



21世纪高等学校电气工程系列精品教材

电力系统分析

DIANLI XITONG FENXI

韩祯祥 主编



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

电力系统分析

第三版

主 编 韩祯祥
副主编 吴国炎

浙江大学出版社

内 容 提 要

本书分为5章,内容主要阐述电力系统基本知识、电力系统元件的特性和模型、电力系统稳态和暂态运行方式的计算分析方法等。书后附有短路电流运算曲线。全书物理概念阐述清楚,语言精练,图文并茂,条理清楚,系统性强,理论与实践紧密结合。

本书可作为高等学校电气工程及其自动化专业的教材,还可作为在电力系统工作的技术和科研人员的重要参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统分析 / 韩祯祥主编. —3版. —杭州:浙江大学出版社, 2005.12 (2007重印)
ISBN 978-7-308-01038-2

I. 电… II. 韩… III. 电力系统—分析—高等学校—教材 IV. TM711

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第003006号

电力系统分析

韩祯祥 主编

责任编辑 宋纪浔

出版发行 浙江大学出版社

(杭州天目山路148号 邮政编码310028)

(E-mail: zupress@mail.hz.zj.cn)

(网址: <http://www.zjupress.com>

<http://www.press.zju.edu.cn>)

电话: 0571-88925592, 88273066(传真)

排 版 浙江大学出版社电脑排版中心

印 刷 杭州长命印刷有限公司

开 本 787mm×960mm 1/16

印 张 28.25

字 数 507千

版 印 次 2005年12月第3版 2008年2月第11次印刷

印 数 22501—25000

书 号 ISBN 978-7-308-01038-2

定 价 29.00元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部邮购电话 (0571)88072522

前 言

本书是高等学校电气工程及其自动化专业的主流教材,自 1992 年出版以来,在全国各地高校的教学和培训中得到了广泛的采用,培养了数以万计的大学生,发挥了重要的经济和社会效益。

全书主要阐述电力系统基本知识、电力系统元件的特性和模型、电力系统稳态和暂态运行方式的计算分析方法。根据我们的教学实践,将电力系统有功功率和频率控制、无功功率和电压控制等有关运行控制内容安排在《电力系统自动控制》课程中讲述,而电力系统工程规划和运行中的有关问题则在《电力系统工程》选修课中介绍。希望学生通过上述三门课程的学习,对电力系统有一个完整的了解,学到从理论到设计运行的全面知识。

本书第 1 章由邱家驹编写,第 2 章由赵礼生编写,第 3 章由黄民翔、赵礼生编写,第 4 章由吴国炎编写,第 5 章由徐瑞德编写;韩祯祥、吴国炎负责主编工作。

由于编者水平和教学经验有限,书中错误和不当之处在所难免,欢迎读者批评指正。

编 者

2005 年 12 月

目 录

1 电力系统概述

1.1 电力系统及其发展	3
1.1.1 电力系统	3
1.1.2 电力系统发展简史和我国的电力系统	4
1.1.3 电力系统的负荷和负荷曲线	8
1.1.4 电力系统中的发电厂	11
1.1.5 电力网的结构与结线	12
1.1.6 电压等级和额定电压	14
1.1.7 电力系统运行的特点和要求	16
1.1.8 电力系统中性点接地方式	19
1.1.9 直流输电与柔性交流输电	19
1.2 电力系统基本元件概述	26
1.2.1 发电机	26
1.2.2 电力变压器	27
1.2.3 电力线路	29
1.2.4 无功功率补偿设备	41

2 电力系统元件数学模型

2.1 三相电力线路	47
2.1.1 电力线路电阻	47
2.1.2 电力线路电感	49
2.1.3 电力线路并联电导	53
2.1.4 电力线路并联电容	54
2.1.5 电力线路的稳态方程和等值电路	60

2.2 变压器	67
2.2.1 双绕组变压器等值电路	70
2.2.2 三绕组变压器等值电路	72
2.2.3 自耦变压器及其等值电路	77
2.3 同步发电机和调相机	83
2.3.1 同步发电机	84
2.3.2 同步调相机	89
2.4 无功功率补偿设备	90
2.4.1 并联电容器	91
2.4.2 并联电抗器	92
2.4.3 静止补偿器	92
2.5 电力系统负荷	96
2.6 多级电压电力系统	99
2.6.1 多级电压电力网的等值电路	99
2.6.2 三相系统的标么制	103
2.6.3 多电压级电力网等值电路参变数的标么值	105
2.6.4 具有非标准变比变压器的多电压级电力网等值 电路	108

3 电力系统稳态运行分析

3.1 简单电力系统正常运行分析	117
3.1.1 电力线路的电压损耗与功率损耗	117
3.1.2 变压器中的功率损耗与电压损耗	119
3.1.3 辐射形网络的分析计算	120
3.1.4 电力网的电能损耗	124
3.2 复杂电力系统潮流计算	126
3.2.1 节点电压方程与节点导纳矩阵和阻抗矩阵	127
3.2.2 功率方程和节点分类	131
3.3 高斯—塞德尔法潮流计算	134
3.4 牛顿—拉夫逊法潮流计算	137
3.4.1 牛顿—拉夫逊法简介	137
3.4.2 牛顿—拉夫逊法计算潮流	138
3.4.3 牛顿—拉夫逊法计算潮流的有关问题	144

3.5	P-Q 分解法	150
3.6	直流法潮流计算与开断处理	161
3.6.1	直流法潮流计算	161
3.6.2	直流法潮流计算的开断处理	163
3.7	电力系统有功功率分配与频率控制	165
3.7.1	电力系统有功功率平衡与频率变化	165
3.7.2	有功功率电源	166
3.7.3	有功功率负荷的变动	169
3.7.4	电力系统频率控制	171
3.8	电力系统无功功率和电压	173
3.8.1	概 述	173
3.8.2	无功功率和电压的关系	174
3.8.3	无功功率平衡	176
3.9	电力系统电压控制	177
3.9.1	中枢点电压管理	177
3.9.2	应用发电机调节电压	180
3.9.3	改变变压器变比调压	181
3.9.4	应用无功功率补偿装置调节电压	186
3.9.5	线路串联电容补偿改善电压质量	189
3.9.6	复杂电力系统电压和无功功率的控制	193

4 电力系统故障分析

4.1	基本概念	197
4.2	同步电机的数学模型	199
4.2.1	电压方程和磁链方程	200
4.2.2	坐标变换	204
4.2.3	用 d 、 q 、 0 坐标表示的同步电机方程式	207
4.2.4	标么制表示的派克方程式	211
4.2.5	同步发电机的稳态运行	216
4.3	同步电机三相短路电磁暂态过程	218
4.3.1	无阻尼绕组同步电机突然三相短路	218
4.3.2	有阻尼绕组同步电机三相短路	235
4.3.3	强行励磁对同步电机三相短路的影响	249

4.3.4	短路电流最大瞬时值和有效值	254
4.3.5	异步电动机的三相短路电流	255
4.4	电力系统三相短路实用计算	258
4.4.1	三相短路起始次暂态电流的计算	258
4.4.2	起始次暂态电流的计算机算法	268
4.4.3	应用运算曲线计算三相短路电流周期分量	272
4.5	电力系统不对称运行分析方法—对称分量法	278
4.5.1	对称分量法及其应用	279
4.5.2	同步电机负序和零序阻抗	283
4.5.3	异步电动机和综合负荷的负序及零序阻抗	284
4.5.4	三相变压器零序参数和等值电路	284
4.5.5	电力线路零序参数和等值电路	292
4.5.6	电力系统的零序等值网络	301
4.6	电力系统不对称短路分析	303
4.6.1	各种不对称短路的故障点电流和电压	303
4.6.2	不对称短路时网络中电流和电压的分布	311
4.6.3	简单不对称短路的计算机算法	316
4.6.4	应用运算曲线计算任意时刻的不对称短路电流	317
4.7	电力系统非全相运行	321
4.8	电力系统复杂故障分析概述	328

5 电力系统稳定性

5.1	电力系统稳定性概述	335
5.1.1	简单的机械比拟	337
5.1.2	电力系统静态稳定的初步概念	338
5.1.3	电力系统暂态稳定的初步概念	340
5.2	同步发电机组的机电模型	343
5.2.1	同步发电机组的转子运动方程式	343
5.2.2	同步发电机的电磁转矩和电磁功率	346
5.2.3	原动机的机械转矩和机械功率	362
5.2.4	自动调节系统的数学模型	364
5.3	电力系统静态稳定	373
5.3.1	静态稳定分析的基本方法	374

5.3.2 简单电力系统的静态稳定	377
5.3.3 自动励磁调节对静态稳定的作用	384
5.3.4 多机电力系统静态稳定的简化分析	396
5.4 电力系统暂态稳定	397
5.4.1 基本假定	397
5.4.2 基本分析方法	398
5.4.3 简单电力系统的暂态稳定	401
5.4.4 考虑发电机 E'_q 变化时的暂态稳定计算	408
5.4.5 多机电力系统暂态稳定的简化分析	414
5.5 提高电力系统稳定性的措施	416
5.5.1 发电机及其励磁调节系统	417
5.5.2 原动机的调节特性	418
5.5.3 开关设备和继电保护	418
5.5.4 输电线	420
5.5.5 改善系统的结构和采用中间补偿设备	423
5.5.6 变压器中性点经小阻抗接地	423
5.5.7 电气制动	424
5.5.8 切除部分发电机及部分负荷	425
5.5.9 系统暂态稳定破坏后的措施	426
5.6 电力系统的电压稳定性	428
附录 短路电流运算曲线	433
参考书目	441

1

电力系统概述

1.1 电力系统及其发展

1.1.1 电力系统

发电机把机械能转化为电能,电能经变压器、变换器和电力线路输送并分配到用户,在那里经电动机、电炉和电灯等设备又将电能转化为机械能、热能和光能等。这些生产、变换、输送、分配、消费电能的发电机、变压器、变换器、电力线路及各种用电设备等联系在一起组成的统一整体称为电力系统,如图1.1所示。

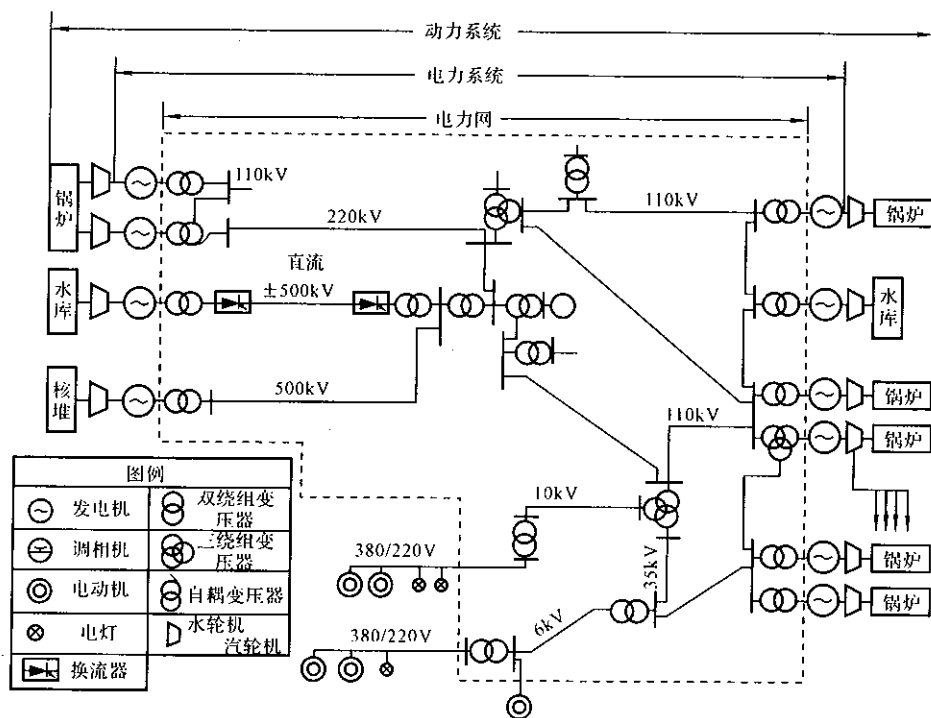


图 1.1 动力系统、电力系统和电力网示意图

与“电力系统”一词相关的还有“电力网”和“动力系统”。前者指电力系统中除发电机和用电设备外的部分;后者指电力系统和“动力部分”的总和。所谓“动力部分”,包括火力发电厂的锅炉、汽轮机、热力网和用热设备,水力发电厂的水库和水轮机,核电厂的反应堆等。所以电力网是电力系统的组成部分,而电力系统则是动力系统的组成部分。三者的关系也示于图 1.1 中。

1.1.2 电力系统发展简史和我国的电力系统

1. 电力系统的发展简史

从 1831 年法拉第发现了电磁感应定律,到 1875 年巴黎北火车站发电厂的建立,电真正进入了实用的阶段。

火力发电始终在所有的电能中占最大的比重,它按照热力学原理,用不断提高蒸汽温度和压力的途径来提高蒸汽的热效率。现在蒸汽温度已达 650°C ,蒸汽压力已达 352 大气压。汽轮发电机制造技术的发展,体现在单机容量的不断增大。目前,世界上最大的汽轮发电机是瑞士 BBC 公司为美国制造的 130 万 kW 机组,是 1972 年投入运行的。最大的火力发电厂是俄罗斯的苏尔古特第二发电厂,其中安装了 6 台 80 万 kW 的汽轮发电机组。

水电的发展是水能开发的结果,早期一般都是小型水电厂,随着用电需要的增长和水电建设技术的提高,逐步向中型和大型发展。近二三十年来,由于超高压输电技术和水轮发电机制造水平的提高,水电厂的建设规模越来越大。目前,世界上最大的水轮发电机组是最早安装在美国大古力水电厂三厂的 70 万 kW 机组,最大的水电厂是巴西巴拉那河上的伊泰普水电厂,装有 18 台 70 万 kW 机组,总容量为 1260 万 kW。在建的我国三峡水电厂设计装机 26 台 70 万 kW 机组,总容量 1820 万 kW,将是世界上最大的水电厂。另外,装机 6 台 70 万 kW 的三峡地下电站也在计划中。全部完工后,三峡水电厂的总装机容量将达 2240 万 kW。

核电的发展大致可分为三个阶段:

20 世纪 50 年代中期到 60 年代初期为试验阶段(1954—1960 年),这一阶段主要是反应堆选型。通过试验研究,从 20 多种堆型中遴选出几种技术经济优越的堆型。世界上第一台核电机组于 1954 年 4 月在莫斯科市近郊奥勃宁斯克核电厂投入运行。

在第二阶段(1961—1968 年),核电的经济性已可以与常规火电竞争,进入商业实用阶段。

1969 年后,核电进入工业推广阶段,不但工业发达国家大力建设核电厂,

许多发展中国家也开始发展核动力。至 2000 年底,世界上共有 438 座核电厂,共装机 351GW,发电量达 2447TWh。最大核电厂是日本福岛第一沸水堆核电厂,总装机 454.6 万 kW。

发电技术的发展促进了输电技术的发展。

第一次高压输电技术出现于 1882 年,德普勒(Marcel De Pree)用装在米斯巴赫煤矿的功率为 3hp 的直流发电机,以 1500~2000V 电压,沿 57km 的电报线(直径为 4.5mm 的钢线),把电能输送到慕尼黑国际博览会,供电给一台电动机,使装饰喷泉的水泵转动。这个输电系统虽小,却可以认为是世界上第一个电力系统。早期采用的是直流输电,要提高效率,必须提高电压,可是当时高压直流发电机和电动机的制造面临难以解决的困难。

进入 19 世纪 80 年代以后,随着电力变压器的实际应用,直流技术的地位受到交流技术的挑战,并被其代替。1891 年 8 月 25 日,世界上第一条三相交流高压输电线在德国投入运行。在该线始端劳奋水电厂安装了一台 230kVA、90V 的三相交流发电机和一台 200kVA、95/15200V 的变压器;线路末端法兰克福建造了两座 13800/112V 降压变压器,其中一座供慕尼黑国际电工展览会用电,另一座供 100hp 三相异步电动机,输电效率达 80%。

最早形成的交流电力系统出现在伦敦,发电厂厂址在远离市区的伊尔福德,厂内安装了一台容量为 1000kW、电压为 2500V 的交流发电机,通过升压变压器把电压提高到 10000V,经 12km 的输电线送到伦敦市区四个变电所,再降为 2400V,经配电变压器降为 100V 向用户供电。

为了减少线路的功率损失,提高输电电压是一个有效的方法,因此输电技术的发展始终伴随输电电压的不断提高。随着大容量水电厂、矿口火电厂和核电厂的建设,从 20 世纪 50 年代开始,330kV 及以上超高压输电线路得到了很快的发展。1969 年,美国第一条 765kV 线路投入运行。前苏联建成的从埃基巴斯图兹—科克切塔夫—库斯坦奈的 900km 特高压输电线,1985 年开始按 1150kV 设计电压运行,开创了输电电压的新纪录。

由于交流输电在海底电缆送电、运行稳定性等方面的局限性,直流输电在 20 世纪 30 年代又东山再起,在 50 年代中期进入工业应用阶段。这时已不用原来的直流发电机,而是在始端将交流整流为直流,在终端又将直流逆变为交流。1954 年,瑞典在本土与果特兰岛之间建成了世界上第一条工业性直流输电线(海底电缆),采用汞弧阀作为变流装置。可控硅整流元件的出现促进了高压直流输电的进一步发展。在已运行的直流输电工程中,巴西伊泰普(Itaipu)水电厂的直流输电工程为最,它包括两个独立的双极系统,每个系统额定输出容量为 3150MW,额定电压为 ± 600 kV。

大型发电厂的建设和高压输电线路的架设使电力系统的规模也日益扩大。初期发展的分散的、孤立的小系统逐渐发展、合并成统一的或联合的大系统。这些系统有的甚至跨越国界和洲界,如俄罗斯统一电力系统与部分欧亚国家的电力系统互联。这个电力系统横跨欧亚大陆,跨越距离东西 7000km,南北 3000km,是目前世界上最大的联合电力系统。

电力系统的发展还体现在自动化水平的提高。目前世界上几乎所有的电力系统监视和控制中心都装备有电子计算机系统,它们具有对系统进行自动监视、安全分析和安全控制,实行经济调度和调度员培训等功能,保证了系统运行的安全性和经济性。

2. 我国的电力系统

1882 年 7 月 26 日,上海电气公司一台 12kW 的蒸汽发电机组发电,点亮了上海南京路上 15 盏弧光灯。这是中国的第一座发电厂,是中国电力工业的开端。

到中华人民共和国成立前夕,全国发电装机容量只有 185 万 kW,年发电量 43 亿 kWh,人均年用电量只有 9kWh,发电装机容量和发电量分别居世界第 21 位和 25 位。

到 1978 年,在不到 30 年的时间里,全国(不含中国香港、澳门和台湾地区,下同)发电装机容量达到 5712 万 kW,年发电量达到 2566 亿 kWh,发电装机容量和发电量分别跃居世界第 8 位和 7 位。

至 2004 年底,全国发电装机容量达到 4.4 亿 kW,年发电量达到 21730 亿 kWh,发电装机容量和发电量均列世界第 2 位。发电装机容量和年发电量的逐年增长见图 1.2 和图 1.3。

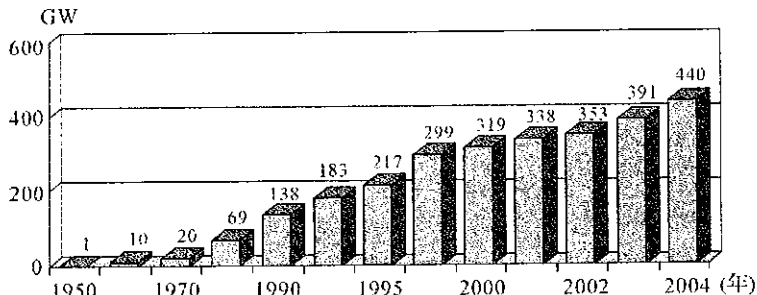


图 1.2 全国发电装机容量增长(不含中国香港、澳门和台湾地区)

20 世纪 80 年代开始,中国电力工业进入大机组、高电压、大电网阶段。目前,全国形成 6 大跨省电网(如图 1.4),即东北、华北、华东、华中、西北

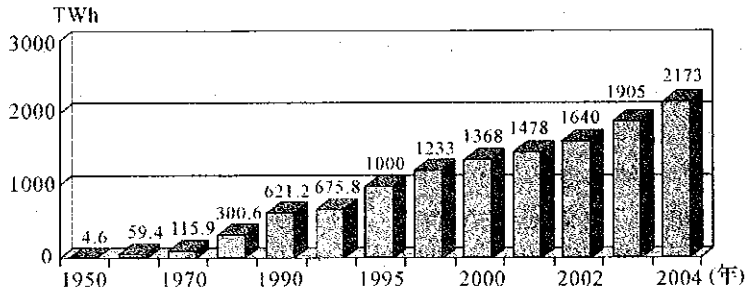


图 1.3 全国年发电量增长

和南方电网和 4 个省级电网,即山东、新疆、海南和西藏电网。500kV 输电网络已成为电网的主干网络,西北电网的 750kV 输变电工程已投入运行。

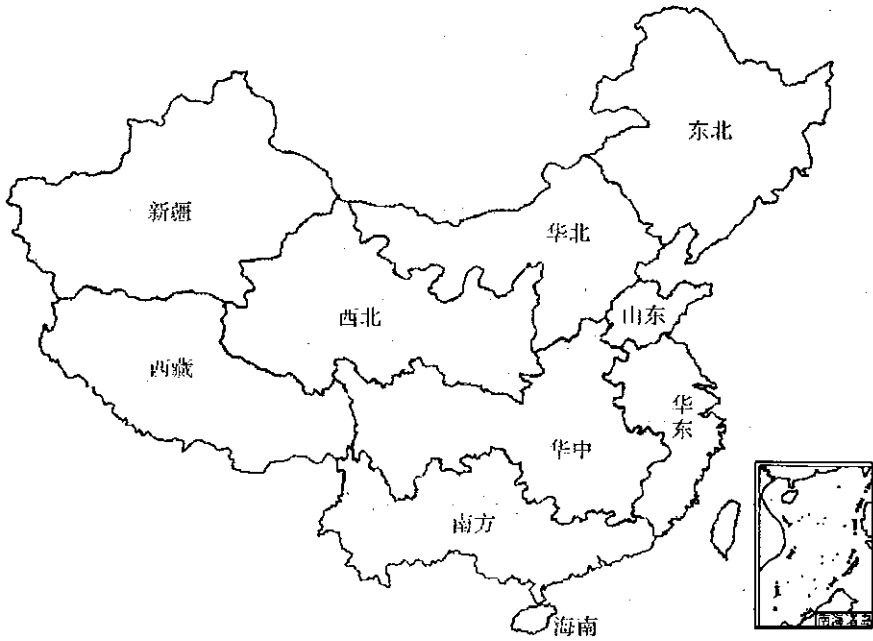


图 1.4 中国电网分布图

自 1993 年从葛洲坝至上海的第一条 $\pm 500\text{kV}$ 直流线路投产后,高压直流输电在我国得到应用,第二条从三峡至常州的相同电压的直流线路于 2003 年投入运行。这样,华中电网通过两条直流线路与华东电网相连,计划中还有第三条从三峡到上海的直流线路。三峡到广州的 $\pm 500\text{kV}$ 直流线路已于 2004 年投入运行,它将华中电网与南方电网连接起来。在南方电网中另有天广和贵

广两条直流线路投入运行。

中国的发电技术制造水平近年来得到提高,30 万 kW 和 60 万 kW 机组国内已经可以批量生产,60 万 kW 超临界机组也正在合作制造,合作建造 25MPa/600℃超临界 100 万 kW 机组的技术方案已经确定。

建设中的三峡水电站位于华中地区,计划于 2009 年完工,届时将是世界上最大的水电站。电站安装 26 台 70 万 kW 的机组,总装机容量为 1820 万 kW,年发电量近 900 亿 kWh。电站将向华中、华东和华南电网送电,并促进全国联网的实现。

1991 年投产的秦山核电厂的第一台 30 万 kW 的核电机组是我国自己设计和建造的,它结束了中国内地无核电的历史。随后,秦山第二核电厂、秦山第三核电厂、大亚湾核电厂和岭澳核电厂相继投产,至 2004 年底,核电机组的总容量已达 700 万 kW。

中国的电源开发方针是:大力开发水电,优化发展煤电,积极发展核电,适度发展天然气发电,加快新能源发电。

2005 年全国发电装机容量已达到 5 亿 kW,到 2020 年将超过 10 亿 kW。

中国水能资源居世界首位,理论蕴藏量 6.76 亿 kW,年发电量 5.92 万亿 kWh,其中可开发装机容量 3.78 亿 kW,年发电量 1.92 万亿 kWh,居世界首位。但能源分布极不均匀,水能资源大部分集中在西南、中南和西北地区,仅四川和云南两省的可开发装机容量就达 1.6 亿 kW,约占全国的 43%,煤炭能源集中在华北和西北地区。而能源消耗却相对集中在经济发达的东部沿海地区,仅北京、上海、江苏、广东等 7 个省、直辖市的电力消费就占全国电力消费总量的 37%。因此“西电东送、南北互供、全国联网”是我国电网的发展战略。

1.1.3 电力系统的负荷和负荷曲线

1. 电力系统的负荷

电力系统的负荷是系统中千万个用电设备消费功率的总和,也称电力系统综合用电负荷。它包括异步电动机、同步电动机、电热炉、整流设备、照明设备等若干类。不同的行业中,这些用电设备的比重也不同。表 1.1 所示是几种工业部门中各种用电设备比重的典型统计数字,有一定的代表性。

表 1.1 几种工业部门用电设备比重的统计 单位：%

类 型	综合性 中小工业	棉纺工业	化学工业—— 化肥厂、焦化厂	化学工业 ——电化厂	大型机械 加工工业	钢铁工业
异步电动机	79.1	99.8	56.0	13.0	82.5	20.0
同步电动机	3.2		44.0		1.3	10.0
电热电炉	17.7	0.2			15.0	70.0
整流设备				87.0	1.2	
合 计	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

注：1. 比重按功率计。
2. 照明设备的比重很小未统计在内。

综合用电负荷加上电力网中损耗的功率就是系统中各发电厂应供应的功率，因而统称为电力系统的供电负荷。供电负荷再加上发电厂本身的消耗功率——厂用电，就是系统中所有发电机应发的总功率，称电力系统的发电负荷。

各用电设备的有功功率和无功功率随受电电压和系统频率的变化而变化，其变化规律不尽相同。综合用电负荷随电压和频率的变化规律，是各用电负荷变化规律的合成。图 1.5(a) 和(b) 分别是某电力系统综合用电负荷的电压特性曲线和频率特性曲线(标么值)。

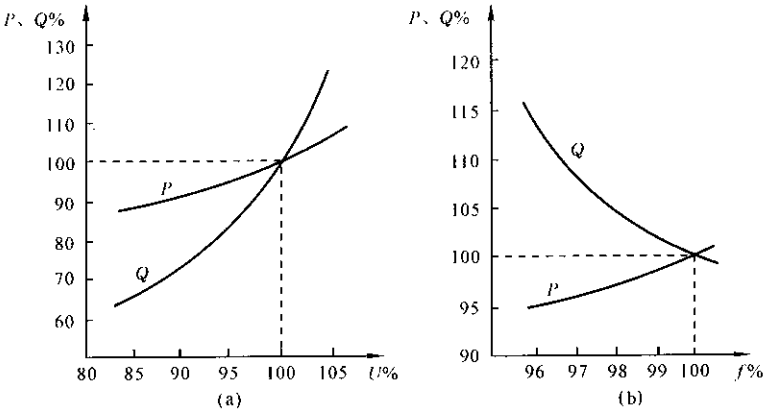


图 1.5 某电力系统综合用电负荷的特性曲线
(a) 电压特性曲线；(b) 频率特性曲线

2. 负荷曲线

负荷曲线指某一时间段内负荷随时间而变化的规律。按负荷种类可分有功功率负荷和无功功率负荷曲线；按时间长短可分日负荷和年负荷曲线；按计量地点可分个别用户、电力线路、变电所、发电厂以至整个系统的负荷曲线。将上述三种分类相结合，就确定了某一种特定的负荷曲线，例如图 1.6 所示的电

力系统有功功率日负荷曲线。

有功功率日负荷曲线所包的面积即为电力系统负荷的日用电量 A

$$A = \int_0^{24} P dt \quad (1.1)$$

其平均负荷

$$P_{av} = \frac{A}{24} = \frac{1}{24} \int_0^{24} P dt \quad (1.2)$$

负荷率定义为平均负荷 P_{av} 与最大负荷 P_{max} 之比,表示负荷曲线平坦的程度,即

$$\text{负荷率} = P_{av} / P_{max} \times 100\% \quad (1.3)$$

不同行业的有功功率日负荷曲线差别很大,三班制连续生产的重工业负荷,如图

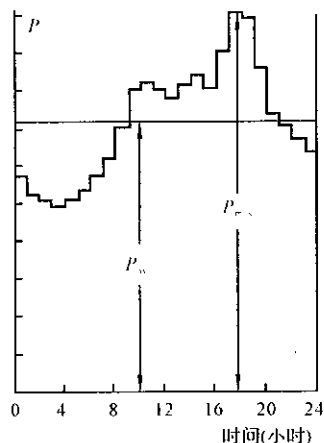


图 1.6 有功功率日负荷曲线

1.7(a) 所示的钢铁工业负荷,负荷曲线较平坦,最小负荷达最大负荷的 85%;

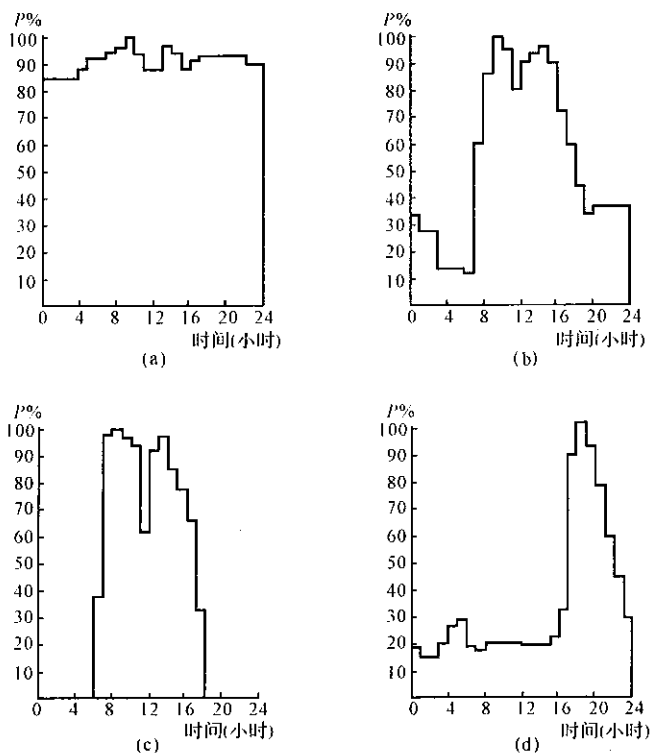


图 1.7 几种行业的有功功率日负荷曲线(冬季)

(a) 钢铁工业负荷;(b) 食品工业负荷;(c) 农村加工负荷;(d) 市政生活负荷

一班制生产的轻工业负荷,如图1.7(b)所示的食品工业负荷,负荷变化的幅度较大,最小负荷仅达最大负荷的13%~14%;农业负荷中,如图1.7(c)所示的农村加工负荷,每天用电仅12h,但在夏季出现的农业排灌负荷,却有相当平坦的日负荷曲线;市政生活负荷曲线如图1.7(d)所示,其特点是有明显的照明电力高峰。尽管不少行业的负荷曲线有较大的变化幅度,但整个电力系统的负荷曲线却比较平坦,因不同行业负荷曲线的高峰不可能都在同一时刻出现,换言之,系统负荷曲线上的最大值恒小于各行业负荷曲线上最大值的总和。各行业最大负荷相加后,应乘以小于1的“同时率”,方为系统的最大综合用电负荷。

负荷曲线对电力系统的运行有很重要的意义,它是安排发电计划,确定各发电厂发电任务以及确定系统运行方式等的重要依据。

有功功率年负荷曲线一般指一年内每月最大有功功率负荷变化的曲线,如图1.8所示。年末最大负荷大于年初最大负荷的部分为年增长,低谷时段常用于安排发电设备的检修。

无功功率负荷曲线不如有功功率曲线那样用得普遍,只是在进行系统无功功率平衡时才予以注意。

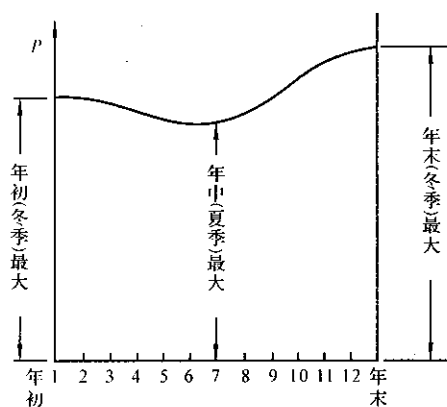


图 1.8 电力系统的有功功率年负荷曲线

1.1.4 电力系统中的发电厂

发电的方式按一次能源划分有:火力发电、水力发电、核能发电、地热发电、风力发电、潮汐发电以及太阳能发电等,在研究中的还有磁流体发电和燃料电池等。

火力发电厂利用煤、石油、天然气等燃料所产生的热能,在锅炉中将水变成高温高压蒸汽,推动汽轮机,带动发电机发电。火力发电机组又分为专供发电的凝汽式汽轮机组及兼供热的抽气式和背压式汽轮机组。供热式机组承担日负荷曲线的基本负荷。凝汽式机组承担基本负荷,需要时也带部分尖峰负荷。

燃气轮机发电厂和柴油机发电厂也属于火力发电厂,这类发电厂能快速启动,故可承担日负荷曲线的尖峰负荷。

水力发电厂利用河流的水能发电,其发电功率与流量和落差的乘积成正

比。水力发电厂分为径流式水电厂、坝式水电厂和抽水蓄能发电厂。

径流式水电厂利用有高落差的急流河道建坝,使水通过管道进入水轮机来发电。它的水库容量很小,发电功率基本上由河流的流量来决定,承担电力系统日负荷曲线的基本部分。

在河道中建大坝,拦断河流,利用上下游的落差来发电的水电厂叫坝式水电厂。坝式水电厂有较大的库容,可按库容的大小进行日、周、年或多年调节,以便有计划地使用水能,它通常承担日负荷曲线上的尖峰部分,在洪水期间则承担基本负荷部分。

利用深夜或丰水期的剩余电力,使水轮机以水泵方式工作,将下游的水抽到水库内,再在需要时发电,以这种方式发电的水电厂叫抽水蓄能发电厂,它承担日负荷曲线上的尖峰部分。

此外,潮汐发电和波浪发电也属水力发电。潮汐发电厂一般在海湾或河口修建堤坝建成水库,于涨潮时放海水入库,利用库水位低于潮位的水位差发电;待潮位下降,又利用库水位高于潮位的水位差和库内蓄存的水量发电。把海洋的波浪能转化位电能的发电方式称波浪能发电,目前波浪能发电尚处于试验阶段。

核能发电厂利用核燃料在反应堆中产生的热能,将水变为蒸汽,推动汽轮机,带动发电机发电,又叫原子能发电厂。反应堆是核能发电厂的关键设备,常用的反应堆有轻水堆(又分压水堆和沸水堆)、重水堆和石墨堆。一般说来,核能发电厂的设备费用较高,燃料费较便宜。为了提高发电厂的经济性和反应堆的安全运行,核能发电厂一般按恒功率负荷运行,承担日负荷曲线的基本负荷部分。

1.1.5 电力网的结构与结线

1. 电力网的结构

实际的电力网比图 1.1 所示的要复杂得多。一个大的电力网(联合电力网)总是由许多子电力网发展、互联而成,因此分层结构是电力网的一大特点。一般电力网可划分为输电网、二级输电网、高压配电网和低压配电网,如图 1.9 所示。

输电网一般是由电压为 220kV 以上的主干电力线路组成,它连接大型发电厂、大容量用户以及相邻子电力网。二级输电网的电压一般为 110 ~ 220kV,它上接输电网,下连高压配电网,是一区域性的网络,连接区域性的发电厂和大用户。配电网是向中等用户和小用户供电的网络,10 ~ 35kV 的称高

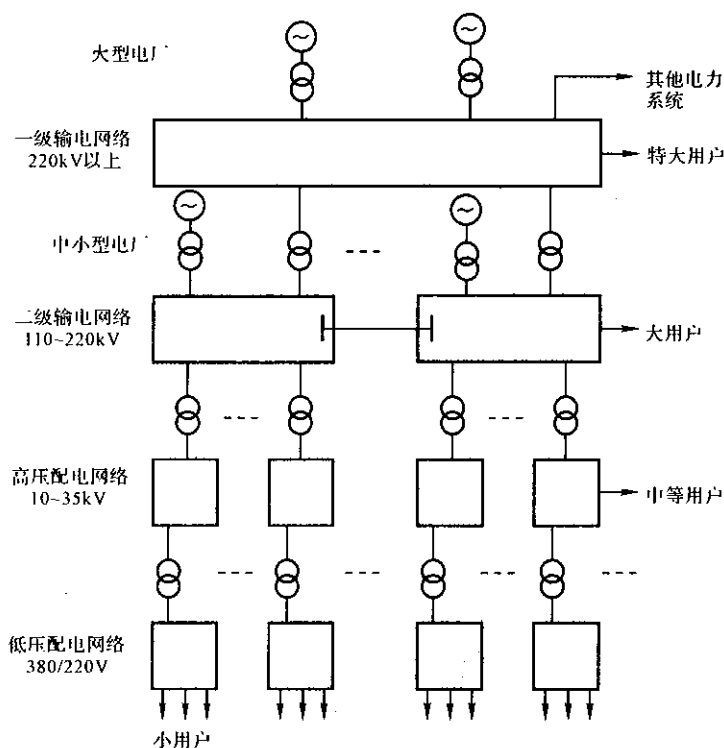


图 1.9 电力网的结构

压配电网,1kV 以下的称低压配电网。

2. 电力网的结线方式

电力网的结线方式大致可分无备用和有备用两类。无备用结线包括单回路放射式、干线式和链式网络,如图 1.10 所示。有备用结线包括双回路放射式、干线式、链式以及环式和两端供电网络,如图 1.11 所示。

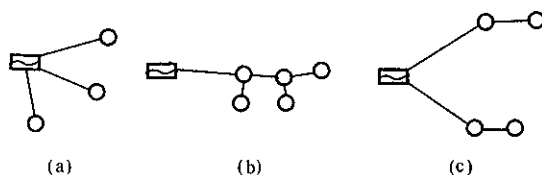


图 1.10 无备用结线方式

(a) 放射式;(b) 干线式;(c) 链式

无备用结线简单、经济、运行方便,但供电可靠性差。架空线路的自动重合闸装置一定程度上能弥补上述的缺点。

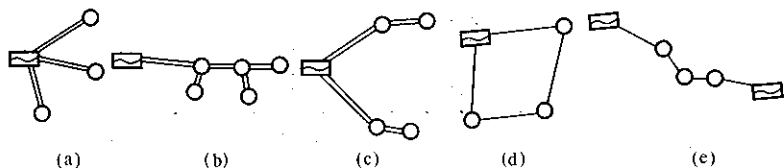


图 1.11 有备用结线方式

(a) 放射式; (b) 干线式; (c) 链式; (d) 环式; (e) 两端供电网络

相反,有备用结线供电可靠性高,一条线路的故障或检修一般不会影响对用户的供电,但投资大,且操作较复杂。其中,环式供电和两端供电方式较为常用。

1.1.6 电压等级和额定电压

众所周知,输送功率一定时,输电电压愈高,电流愈小,导线等载流部分的截面积愈小,投资亦愈小。但电压愈高,对绝缘的要求愈高,杆塔、变压器、断路器等投资也愈大。综合考虑这些因素,对应一定的输送功率和输送距离有一最合理的线路电压,但从设备制造角度考虑,为保证生产的系列性,应规定标准的电压等级,即额定电压。相邻电压等级之比不宜过小,一般应在 2 倍左右。我国国家标准 GB156—1980 规定的额定电压(均指线电压)如表 1.2 所示。

表 1.2 额定电压等级

线路及用电设备额定 线电压(kV)	交流发电机线电压 (kV)	变压器线电压 (kV)	
		一次绕组	二次绕组
3	3.15	3 及 3.15	3.15 及 3.3
6	6.3	6 及 6.3	6.3 及 6.6
10	10.5	10 及 10.5	10.5 及 11
	15.75	15.75	
35		35	37 及 38.5
60		60	63 及 66
110		110	115 及 121
220		220	231 及 242
330		330	363
500		500	550
750		750	788 及 825

注:1. 变压器一次绕组栏内 3.15、6.3、10.5、15.75kV 电压适用于与发电机端点直接连接的升压变压器和降压变压器。

2. 如证明在技术经济上有特殊优点时,水轮发电机的额定电压允许用非标准电压。

在表 1.2 中,用电设备、发电机、变压器的额定电压之所以不一致的原因以及它们与线路额定电压之间的关系,说明如下。

线路输送功率时,沿线的电压分布往往是始端高于末端。例如,图 1.12 中沿线 ab 的电压分布可以如直线 $U_a - U_b$ 所示。从而,图中用电设备 1~6 的端电压将各不相同。所谓线路的额定电压 U_N 实际就是线路的平均电压 $(U_a + U_b)/2$,而各用电设备的额定电压则取与线路额定电压相等,使所有用电设备能在接近它们的额定电压下运行。

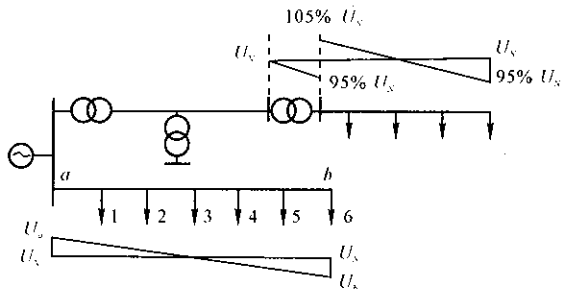


图 1.12 电力网络中的电压分布

由于用电设备的允许电压偏移为 $\pm 5\%$,而沿线路的电压降落一般为 10% ,这就要求线路始端电压为额定值的 105% ,以使其末端电压不低于额定值的 95% 。因为发电机往往接在线路始端,所以发电机的额定电压为线路额定电压的 105% 。

变压器一次侧接电源,相当于用电设备,二次侧向负荷供电,又相当于发电机,因此变压器一次侧额定电压应等于用电设备的额定电压(直接和发电机相连的变压器一次侧额定电压应等于发电机额定电压),二次侧额定电压规定为空载变压器一次侧加额定电压时的二次侧电压。由于带负荷时变压器内部有一定的电压降落,所以二次侧额定电压应高于线路的额定电压。升压变压器二次侧额定电压定为较线路额定电压高 10% ;降压变压器二次侧额定电压则有较线路额定电压高 10% 和 5% 两种,我国以前多采用前一种,现在新建的工程均采用后一种。

一般说来,输电网的主干线和相邻电网间的联络线多采用 500kV 、 330kV 和 220kV 等级;二级输电网采用 220kV 和 110kV 等级; 35kV 既用于城市和农村的配电网,也用于大工业企业的内部电网。 10kV 是最常用的较低一级的高压配电电压;只有负荷中高压电动机的比重很大时,才考虑 6kV 的配电方案(高压电动机的额定电压一般为 6kV); 3kV 只限于工业企业内部使用,且正在被 6kV 所代替。显然,这种划分不是绝对的,也不是一成不变的,随着系统的

扩大,更高一级电压的出现,原电压等级有可能退居到次一级电网中使用。

各级电压线路输送能力(送电容量和送电距离)的大致范围如表 1.3 所示。

表 1.3 架空线路不同电压等级下输送功率和输送距离的大致范围

线路电压(kV)	输送功率(MW)	输送距离(km)	线路电压(kV)	输送功率(MW)	输送距离(km)
3	0.1 ~ 1.0	1 ~ 3	220	100.0 ~ 500.0	100 ~ 300
6	0.1 ~ 1.2	4 ~ 15	330	200.0 ~ 800.0	200 ~ 600
10	0.2 ~ 2.0	6 ~ 20	500	1000.0 ~ 1500.0	150 ~ 850
35	2.0 ~ 10.0	20 ~ 50	750	2000.0 ~ 2500.0	500 以上
110	10.0 ~ 50.0	50 ~ 150			

1.1.7 电力系统运行的特点和要求

电力系统运行的特点有:

1. 与国民经济各部门的关系密切

电是最方便的能源,各行各业都使用它,因此,供电的中断也将影响国民经济的各部门,因故障而少供一度电给国民经济造成的损失远大于一度电的电费。有人说电力系统故障是国民经济的一大灾难,这话一点也不过份。

2003 年 8 月 14 日,美国中西部和东北部以及加拿大的安大略地区经历了一场电力史上最大的电力系统停电事故,事故殃及美国的俄亥俄州、密歇根州、宾夕法尼亚州、纽约州、佛蒙特州、马萨诸塞州、康涅狄格州、新泽西州和加拿大的安大略省,停电区域人口约 5000 万,用电负荷约 6180 万 kW。事故始于美国东部时间下午 4 时,而 4 天后美国某些地区的供电才得以恢复,加拿大安大略地区在供电完全恢复前陆续停电了一周多。据估计,美国的总损失在 40 亿 ~ 100 亿美元之间;加拿大 8 月份的 GDP 下降了 0.7%,安大略省浪费了 1890 万个工作时,制造业的出厂量减少了 23 亿加元。

2. 过渡过程非常短促

电力系统内某一处的故障将以光速波及全系统,电力系统从一种运行方式过渡到另一种运行方式的过渡过程也非常短促。

3. 电能一般不能储存

电能的生产、输送、分配和消费实际上是同时进行的,目前还不能大量储

存电能,即发电厂任何时刻生产的功率必须等于该时刻用电设备消费和网络损失功率之和。

根据以上这些特点,对电力系统运行的基本要求是:

1. 运行的安全可靠

电力系统事故的原因是多方面的,有自然灾害、设备损坏、自动装置误动作、人员过失、管理水平低等。除提高管理水平和人员素质以外,提高电力系统安全可靠主要从下面三个方面着手:

(1) 保证一定的备用容量 系统中发电设备容量,除满足用电负荷的需要外,应配备一定的负荷备用、事故备用和检修备用。

(2) 提高电力系统的整体可靠性 电源的布局和电力系统的结构必须合理,设备元件必须安全可靠。

(3) 加强对电力系统运行的监控 除提高运行人员的责任心以外,采用现代化的计算机监控系统是提高系统运行可靠性的重要手段。

2. 保证电能质量

频率和电压是标志电能质量的两个基本指标。此外,电能质量还包括:谐波、三相电压不平衡度、电压的波动和闪变,以及暂时过电压和瞬时过电压。电能质量不但是电力用户的要求,也关系到用电设备和电网自身的安全。为此,国家质量技术监督局颁布了一系列有关电能质量的标准,简述如下:

(1) 电力系统的频率 我国电力系统的额定频率为 50Hz,国家标准《电能质量 电力系统频率允许偏差》GB/T 15945—1995 规定,电力系统正常频率偏差为 $\pm 0.2\text{Hz}$,当系统容量较小时偏差可以放宽到 $\pm 0.5\text{Hz}$ 。

频率的过渡偏差与其延续时间过长对电力系统本身的运行安全也是一种威胁,国家电网公司在《电业生产事故调查规程》(2003 年)中规定,频率偏差超出如下数值属于电网事故:

装机容量在 3000MW 及以上电网,频率偏差超过 $50 \pm 0.2\text{Hz}$,且延续时间 30min 以上;或频率偏差超过 $50 \pm 0.5\text{Hz}$,且延续时间 15min 以上。

装机容量在 3000MW 及以下电网,频率偏差超过 $50 \pm 0.5\text{Hz}$,且延续时间 30min 以上;或频率偏差超过 $50 \pm 1\text{Hz}$,且延续时间 15min 以上。

(2) 供电电压 国家标准《电能质量 供电电压允许偏差》GB/T 12325—1990 规定,电力系统正常运行条件下供电电压对系统额定电压的允许偏差如表 1.4 所示。

表 1.4 供电电压的允许偏差

供电电压	允 许 偏 差
35kV 及以上	正负偏差的绝对值之和不超过系统额定电压的 10% 注:如供电电压上下偏差同号(均为正或负)时,按较大的偏差绝对值作为衡量依据
10kV 及以下	$\pm 7\%$
220V	$+7\%,-10\%$

(3)谐波 电压和电流的波形也是电能质量的重要指标,正弦波形的畸变是由三相不平衡负载、可控硅或其他非线性元件等形成的谐波所致,谐波将影响电力用户的正常用电并对通讯系统产生干扰。国家标准《电能质量 公共电网谐波》GB/T 14549—1993 对谐波的电压和电流限值作出规定。表 1.5 为谐波电压限值。

表 1.5 公共电网谐波电压限值

电网额定电压 (kV)	电压总谐波畸变率 (%)	各次谐波电压含有率(%)	
		奇次	偶次
0.38	5.0	4.0	2.0
6	4.0	3.2	1.6
10			
35	3.0	2.4	1.2
66			
110	2.0	1.6	0.8

(4)三相电压不平衡度 这里指的是电力系统正常运行方式下由于负序分量而引起的公共连接点的电压不平衡。国家标准《电能质量 三相电压不平衡度》GB/T 15543—1995 对电力系统公共连接点正常电压不平衡度和由于用户的接入而引起三相电压不平衡度的允许值作出规定:电力系统公共连接点正常电压不平衡度允许值为 2%,短时不得超过 4%。

(5)电压的波动和闪变 这里指的是电力系统正常运行方式下,由波动负荷引起的公共连接点电压的快速变动及由此可能引起人对灯闪的明显感觉。国家标准《电能质量 电压波动和闪变》GB/T 12326—2000 对此作出规定,此处不予详述。

(6)暂时过电压和瞬态过电压 国家标准《电能质量 暂时过电压和瞬态过电压》GB/T 18481—2001 对有关暂时和瞬态过电压要求、与之相适应的电气设备绝缘水平,以及过电压保护方法作出规定,此处不予详述。

1.1.8 电力系统中性点接地方式

电力系统中性点接地方式是指电力系统中的变压器和发电机的中性点与大地之间的连接方式。中性点接地方式的选择是一个涉及电力系统许多方面的综合性技术问题,对电力系统的设计和运行有着多方面的影响。在选择中性点接地方式时应该考虑的主要因素有:①供电可靠性;②绝缘水平与绝缘配合;③对电力系统继电保护的影响;④对电力系统通信与信号系统的干扰;⑤对电力系统稳定的影响。

中性点接地方式有:不接地(绝缘)、经电阻接地、经电抗接地、经消弧线圈接地(谐振接地)、直接接地等。就主要运行特征而言,可将它们归纳为两大类:①中性点直接接地或经小阻抗接地。采用这种中性点接地方式的电力系统称为有效接地系统或大接地电流系统。②中性点不接地或经消弧线圈接地,或者中性点经高阻抗接地,因而接地电流被控制到较小数值的中性点接地方式。采用这种中性点接地方式的电力系统称为非有效接地系统或小接地电流系统。需要指出,阻抗或接地电流的大小是相对的,因而有必要采用确切的指标来加以区分。相当多的国家(包括中国)都规定:凡是系统的零序电抗(x_0)和正序电抗(x_1)的比值(x_0/x_1) ≤ 3 的系统,属于有效接地系统;反之,属非有效接地系统。

现代电力系统中采用得较多的中性点接地方式是:直接接地、不接地和经消弧线圈接地。在绝缘水平方面的考虑占首要地位的 110kV 及以上的高压电力系统中,均采用直接接地方式。在绝缘投资所占比重不太大的 110kV 以下中低压系统中,出于供电可靠性等方面的考虑,大都采用不接地或经消弧线圈接地的方式。不过,当城市配电系统中电缆线路的总长度增大到一定程度时,它会给消弧线圈的灭弧带来困难,系统单相接地易引发多相短路。所以,近几年来,有些大城市的配电系统改用中性点经低值(不大于 10 Ω)或中值(11~100 Ω)电阻接地,它们也属于有效接地系统。

1.1.9 直流输电与柔性交流输电

多年来,一直都在不断探索新的输电方式,如高压直流输电(high voltage

direct current, HVDC) 和柔性交流输电系统 (flexible AC transmission system, FACTS) 都是应用电力电子技术改善电网输电能力的技术。它们共同的基本特点是控制迅速。HVDC 和 FACTS 目前已在电力系统中得到广泛应用。

1. 直流输电 (HVDC)

从 1954 年瑞典建成第一条跨海峡工业性直流输电线路开始, 至今已有 50 多年的历史了。直流输电因其在超高压远距离大功率输电、海底电缆输电、不同频率或相同频率交流系统之间的非同步联络, 以及在提高大系统运行的安全稳定性等方面, 具有交流输电所不具备的优越之处, 再加上 70 年代初大功率可控硅换流器的问世, 以及电子和计算机技术应用于直流输电控制系统后对其控制性能的改善, 使得直流输电技术有了迅速的发展。

我国从 20 世纪 70 年代初开始直流输电技术的研究, 起步较晚, 但起点较高。特别是 1987 年我国自行研制设备、自行建设的第一条 $\pm 100\text{kV}$ 高压直流输电线路——舟山直流输电工业性试验工程的顺利投运, 标志着我国对直流输电技术的研究和应用开始进入国际行列。利用引进技术建造的我国第一条大型直流输电工程——葛洲坝至上海 $\pm 500\text{kV}$ 、1080km 高压直流输电线路, 于 1990 年正式投入运行。

(1) 直流输电系统的构成和结线方式

直流输电系统由整流站、直流线路和逆变站三大部分组成, 图 1.13 为直流输电系统的构成原理接线。下面简要介绍各主要器件与设备在直流系统中的作用。

换流装置(整流器、逆变器): 它由一个或数个换流单元串联组成。每个换

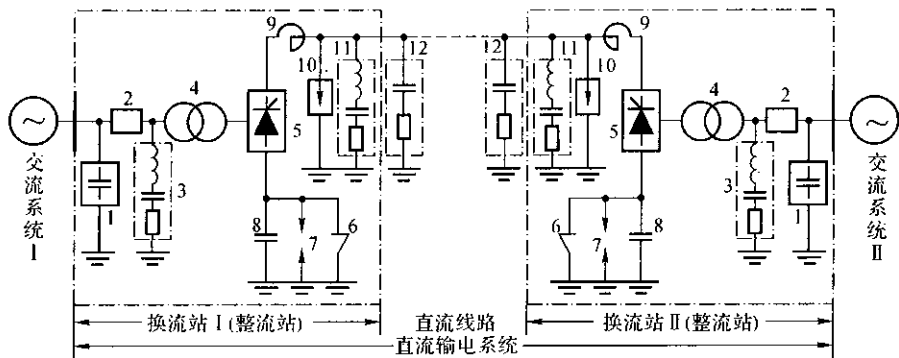


图 1.13 直流输电系统构成

1. 无功功率补偿装置; 2. 交流断路器; 3. 交流滤波器; 4. 换流变压器; 5. 换流装置; 6. 隔离开关;
7. 保护间隙; 8. 过电压吸收电容; 9. 直流电抗器; 10. 避雷器; 11. 直流滤波器; 12. 线路用阻尼器

流单元通常由几十到数百个大功率可控硅晶闸管器件串(并)联构成三相六脉动桥式换流电路,其原理接线如图 1.14(a)所示。正常运行时,控制系统按等 60° 电角度间隔分别发出触发脉冲 $P1 \sim P6$, 触发相应的阀 $V1 \sim V6$ 并使之导通,从而实现交、直流电力的转换。图 1.14(b)为 HVDC 的可控硅换流装置的实物照片。

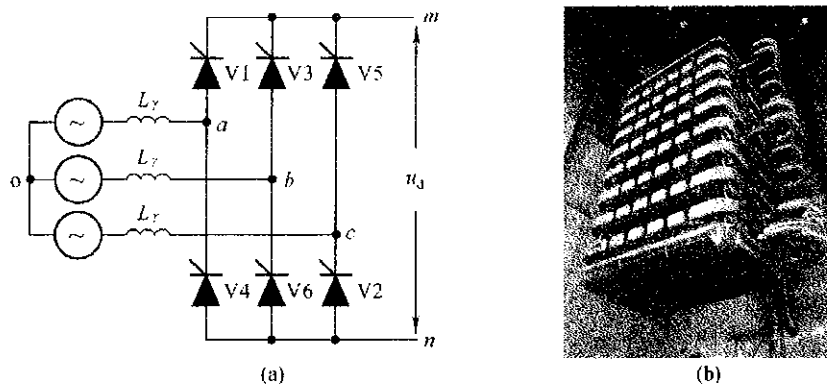


图 1.14

(a)换流桥单元原理接线; (b)可控硅换流装置

换流变压器:在直流输电系统中起着改变交流电压和隔离交、直流电的作用,一般可以带负荷调压。

直流电抗器:安装在换流装置和直流线路之间,其作用是抑制直流电压、电流的谐波分量和直流故障电流上升率。

滤波器:换流装置会在交流侧和直流侧产生多种谐波分量,从而导致其周围电气设备产生附加谐波损耗和通信干扰,因此必须采取滤波措施。交流侧滤波器一般并联安装在换流变压器第三绕组上或交流侧系统母线上,用以吸收谐波电流;采用架空直流线路时,直流侧通常也会简单地安装一阶或二阶高通滤波器以吸收经直流电抗器平滑后的残余谐波分量。

无功补偿装置:换流装置在工作过程中所消耗的无功功率一般需要由同步调相机、静止补偿器或者移相电容器供给。

直流避雷器:是直流输电系统绝缘配合的基础,其保护水平决定设备的绝缘水平。和交流系统不同,直流系统中的电压、电流无自然过零点,所以直流避雷器的工作条件与灭弧原理和交流避雷器有很大差别,目前多采用直流氧化锌避雷器。

直流输电的结线方式可分为单极结线和双极结线两大类,如图 1.15(a)(b)所示。

图 1.15(a)为单极结线方式,由两根导线构成,一根是高压的极导线,另一根是一端接地的低压回流导线(单极两线制)。如果大地或海水允许长期流通电流(地下或水下金属构件少或电腐蚀很轻),则可将两端换流站的低压端都接地,利用大地或海水作回流通路,从而可省去金属回流导线(单极一线一地制)。单极直流输电一般采用负极性运行,即其高压极导线的电位低于地电位。

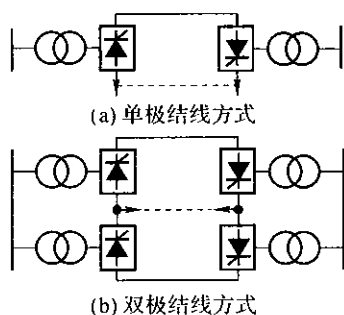


图 1.15 直流输电结线方式

图 1.15(b)为双极结线方式,相当于由两个单极结线的直流输电系统(其中一个运行在正极性、另一个运行在负极性)在交流侧并联、直流侧串联构成,因此具有两根高压极导线(一根正极性,另一根负极性)。当两端换流装置的中性点(两个换流单元的串连接点)都接地(双极两线一地制)或只单端接地但有中性点金属回流导线(双极三线制)时,两极分别可独立运行,当其中一极因故障退出运行时,另一极可继续带一半负荷正常运行;但当采用双极两线一地制结线方式时,一般不允许长期运行,以免地下或海水中的金属构件受到过度腐蚀。由于正常运行时两极线通常以相同的直流电流工作,中性点回流线路中没有电流流过,因此双极直流输电系统还有另外一种结线方式,即没有中性点金属回流导线且两端换流装置中只有一端中性点接地(双极两线制),但这种结线方式在其中任何一极发生故障时另一极也不能运行,运行灵活性和供电可靠性都较差,因此很少采用。

现代高压直流输电普遍采用双极结线方式,单极结线方式通常是双极直流工程其中一个极建成后的临时输电方式。

(2) 直流输电的优缺点

直流输电与交流输电相比,具有下列优点:

- 直流线路造价低。假设直流系统采用双极两线一地制结线方式,交、直流线路对地绝缘水平、导线截面和电流密度都相等,则直流线路与交流线路所输送的(有功)功率基本相同。但对于架空线路,前者的造价大约只有后者的 2/3。如果是电缆线路,这种优势将更为明显。
- 直流输电沿线电压分布平稳,无线电干扰小,线路损耗低。
- 直流输电不存在两端交流系统之间的同步运行稳定性问题,其两端的交流系统不需要同步运行,因此其输送容量和距离都不受同步运行稳定性的限制。
- 直流输电系统具有快速调节控制功率潮流的特点,便于电力系统的分

区调度管理。用直流输电联网不会明显增大两端交流系统的短路容量,有利于故障时两端交流系统之间的快速紧急支援和限制事故扩大。

- 双极直流输电系统在一极故障时另一极仍可输送 50% 的功率,因此可以有效提高两端交流系统的运行可靠性和稳定性。

- 直流联网还可避免电磁环网引起的线损增大,从而避免了某些线路由此而导致的电流越限、影响系统安全运行情况的发生。

直流输电与交流输电相比,具有下列缺点:

- 换流站造价高,抵消了一部分线路造价低的经济效果。计及线路造价及年运行费用等经济指标后,直流输电比交流输电经济的等价距离为:架空线路约为 640~960km,电缆线路约为 24~48km(1968 年统计结果)。这一指标随着可控硅等换流站主设备价格的下降,目前已有所下降。

- 两侧换流装置都需要补偿大量的无功功率,约为直流线路输送功率的 40%~60%。

- 可控硅过载能力低,设计时需要考虑留有足够的余量,否则容易因过载而损坏。

- 利用大地或海水作回流线路时,直流输电对沿途金属设施会造成电腐蚀,需要采取一定的防护措施。

- 直流电不像交流电,没有自然过零点,因而直流灭弧较交流困难,且至今仍未开发出高压大容量的直流断路器产品,从而限制了多端直流输电系统的发展。

(3) 直流输电的适用范围

- 大型电站向远距离负荷中心的高压远距离大功率输电。
- 通过海底电缆向海岛输电。
- 区域交流电网采用直流联网时,可解决它们之间的同步运行稳定性和短路容量等问题。

- 对于用电密集且采用地下电缆供电的大城市,可采用直流输电。

此外,直流输电还可作为磁流体发电、太阳能发电、燃料电池等多种新能源发电方式和超导储能等的配套技术。

2. 柔性交流输电(FACTS)

电力负荷的不断增长,使得已有的交流输电系统在现有运行控制技术下难以满足长距离大容量输送电能的需要,而环境保护的需要,使得架设新的输电线路受到线路走廊短缺的制约,因此挖掘已有输电网络的潜力,提高其输送能力成为解决输电问题的一个重要途径。

虽然一个已经建成的传统电力系统也可通过调整有载调压变压器分接头

位置、串联补偿电容器和并联补偿电抗(或电容)器值来改变网络参数,以及通过开断或投入某条线路来改变网络拓扑结构,但由于相应的控制操作是通过机械装置完成,因此调整速度往往不能满足系统在暂态过程中的要求。另一方面,由于传统电力系统线路的参数不可调控,致使网络中的线路潮流通常都不能按最佳经济电流密度分布,出现了某些线路已经满载甚至过载,而另一些线路仍然轻载运行的情况,因此其输电能力一般都不能得到充分利用。柔性交流输电正是针对传统电力系统的上述情况,在输电网络中引入由大功率电力电子器件构成的自动控制装置,对输电网络(包括网络参数和线路运行参数)实现快速灵活的调控,从而与发电机的各种快速控制相匹配,达到优化已有交流系统线路潮流分布和提高输电能力的目的。大功率电力电子器件的制造技术日益发展,价格日趋低廉,使得应用柔性输电技术改造已有电力系统在经济上成为可能;计算机和控制技术的快速发展和广泛应用,为柔性输电技术发挥其对电力系统快速、灵活的调节与控制作用提供了有力的技术支持。

属于柔性输电技术的装置很多,可以说,除了直流输电外,其他所有利用电力电子器件构成的电力系统调控设备或装置都属于柔性输电技术的范围。FACTS 装置按其在电力系统中的安装连接方式可分为串联型、并联型和混合型三种。目前已经成熟并广泛应用于电力系统的 FACTS 装置主要有静止无功补偿器(SVC,static var compensator,并联型)、晶闸管控制串联补偿器(TCSC,thyristor controlled series compensator,串联型)、静止同步补偿器(STATCOM,static synchronous compensator,并联型)等,还有一些 FACTS 装置目前已有工业样机但仍在进一步完善化研究中,如统一潮流控制器(UPFC,unified power flow controller,混合型)等。此外还有一些刚提出不久目前仍处于研究和原理设计阶段的 FACTS 装置,如静止同步串联补偿器(SSSC,static synchronous series compensator,串联型)、晶闸管控制移相器(TCPST,thyristor controlled phase shifting transformer,混合型)等。

SVC 主要由一组晶闸管控制电抗器单元(TCR,thyristor controlled reactor)和若干组晶闸管投切电容器单元(TSC,thyristor switched capacitor)并联组成,其原理结构如图 1.16 所示。由于半可控功率晶闸管的引入,使得 SVC 可实现快速、连续可调的无功补偿,从而实现了对系统节点电压幅值的控制。理想的 SVC 可以支持所补偿节点处的电压接近常数。

STATCOM 的功能与 SVC 基本相同,但因其采用全控型电力电子器件(如 GTO),因此控制更加快速、灵活,调节范围也更宽。为提高效率和减小谐波,STATCOM 一般采用多电平拓扑结构,如三电平、五电平等,图 1.17 为三电平原理结构示意图。

TCSC 主要由电容器及与其并联并受晶闸管控制的电抗器组成,其原理结构如图 1.18 所示。由于半可控功率晶闸管的引入,使得 TCSC 能够快速、连续地改变所补偿输电线路的等值阻抗,因而在一定的运行范围内,它可以将该输电线路的输送功率控制到期望值。

UPFC 的原理结构如图

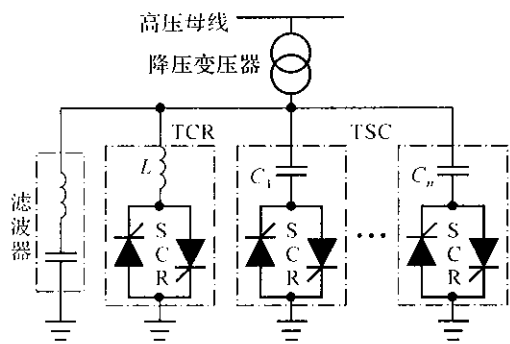


图 1.16 SVC 原理结构示意图

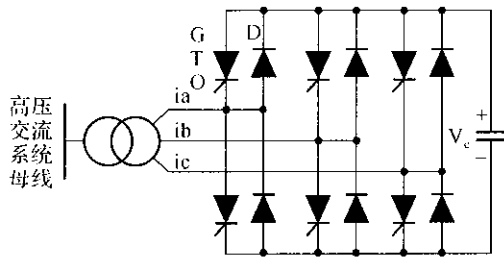


图 1.17 三电平 STATCOM 原理结构示意图

图 1.18 TCSC 原理结构示意图

1.19 所示,主要由全控型并联换流器、串联换流器、并联变压器、串联变压器和耦合电容器构成。与上述几种 FACTS 装置相比,UPFC 的结构和控制策略都要复杂得多,当然其功能也要强得多。

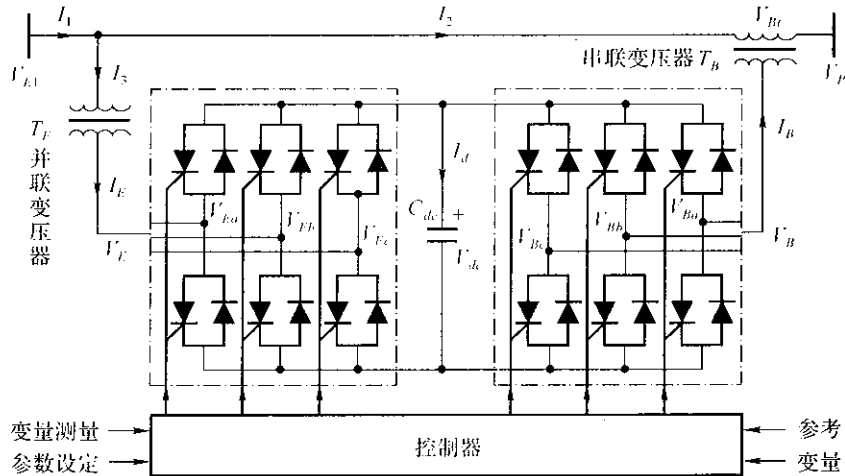


图 1.19 UPFC 原理结构示意图

1.2 电力系统基本元件概述

1.2.1 发电机

现代电力工业中,无论是火力发电、水力发电或核能发电,几乎全部采用同步交流发电机。电机的电枢布置在定子上,励磁绕组布置在转子上,作成旋转式磁极。同步发电机的转速 n (转/min)和系统频率 f (Hz)之间有着严格的关系,即

$$n = 60f/p \quad (1.4)$$

式中, p 为电机的极对数。

根据转子结构型式不同,分为隐极式和凸极式发电机。前者转子没有显露出来的磁极,后者则有。

转子的励磁型式有直流机励磁系统和可控硅励磁系统,后者利用同轴交流励磁机或由同步发电机本身发出的交流电,经整流后供给转子。直流励磁机有换向问题,故其制造容量受到限制,所以,在大容量发电机中均采用可控硅励磁系统。

以下简单介绍汽轮发电机和水轮发电机及它们的特点。

汽轮发电机由汽轮机拖动,大、中容量汽轮发电机的转速均为3000转/min(50Hz)。由于转速较高,故转子做成隐极式,形状细长。转子本体长度对转子直径的比值在3~6.5之间,随发电机容量的增大而增大。发电机结构无例外地都是卧式的。

早期的汽轮发电机采用空气冷却,第二次世界大战前后出现了氢冷技术,20世纪50年代末期发展了定子、转子双水内冷技术,把冷却技术提高到一个新的水平。功率超过50MW的汽轮发电机广泛采用空气、氢气和水等几种不同冷却介质分别冷却有关部件。图1.20为汽轮发电机的实物照片。

水轮发电机主要结构型式有卧式和立式两种。通常小容量水轮发电机多采用卧式结构;中容量的采用立式或卧式结构;大容量的则采用立式结构。立式又可分为悬式和伞式两种:发电机推力轴承位于转子上部的称为悬式,位于转子下部的称为伞式。

因为水轮机是属于低速机械,故水轮发电机只能做成多极的,并要求转子具有一定的飞轮转矩 GD^2 ,使电机在负荷突然去掉后转速不会升高太快,自动

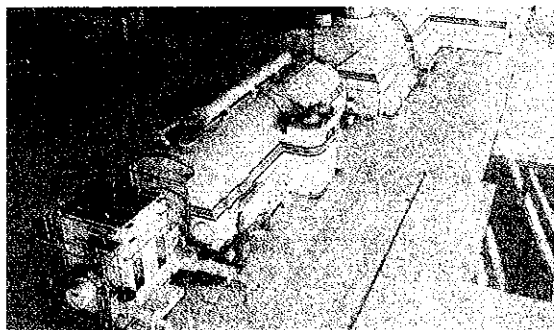


图 1.20 超临界 600MW 汽轮发电机组

控制系统来得及动作,减少进水量,以防止转子达到危险转速。低速大型水轮发电机,当定子内径达 15m 时,转子本体长对转子直径的比约为 $0.15 \sim 0.2$ 。

另外,水电厂一般离负荷中心较远,需要通过长距离高压线路与系统连接,因此电力系统对水轮发电机有较高的暂态稳定和静态稳定要求。

水轮发电机一般采用空气冷却,特大容量的水轮发电机采用水内冷较为经济合理。

1.2.2 电力变压器

电力变压器是电力系统中广泛使用的升压和降压的设备。据统计,电力系统中变压器的安装总容量约为发电机安装容量的 $6 \sim 8$ 倍。按用途,电力变压器可分为升压变压器、降压变压器、配电变压器和联络变压器(作连接几个不同电压等级的电网用)。

国产电力变压器的容量等级基本是 R10 容量系列,如 $\dots, 6300\text{kVA}, 8000\text{kVA}, 10000\text{kVA}, 12500\text{kVA}, \dots$ 通常,容量 630kVA 及以下的统称小型变压器; $800 \sim 6300\text{kVA}$ 的称中型变压器; $8000 \sim 63000\text{kVA}$ 的称大型变压器; 90000kVA 及以上的统称特大型变压器。

按相数分,变压器可分为单相式和三相式。现生产的电力变压器大多是三相的,但特大型变压器鉴于运输上的考虑有制成单相的,安装好后再连接成三相变压器组。

按每相线圈数分,又有双绕组和三绕组之分。前者联络两个电压等级,后者联络三个电压等级。三绕组变压器三个绕组的容量可以不同,以最大的一个绕组的容量为变压器的额定容量。可能的容量分配如表 1.6 所示。

表 1.6 三绕组变压器的容量分配

类 别	高 压	中 压	低 压	备 注
普通三绕组	100	100	100	以变压器额定容量 的百分比表示
	100	50	100	
	100	100	50	
自耦变压器	100	100	50	

线圈排列方式主要考虑漏电抗大小、出线方便、绝缘结构合理等因素,特大型变压器的线圈排列还关系到变压器的高度和重量等问题。排列方式有同心式和交叠式两种。对于同心式排列的双线圈变压器,一般低压线圈放在里面,因它与铁心所需的绝缘距离比较小,有利于缩小线圈尺寸;高压线圈套在外面,因分接头一般是设置在高压线圈上,这样出线方便。交叠式排列的高、低压线圈是沿高度方向互相交叠放置的,其优点是机械强度较好,出线的布置和焊接较方便。

油浸式变压器是生产量最大、应用最广的一类电力变压器,其冷却方式有油浸自冷、油浸风冷、油浸水冷、强迫油循环风冷和强迫油循环水冷等。图 1.21 为高电压、大容量的三相电力变压器的实物照片。

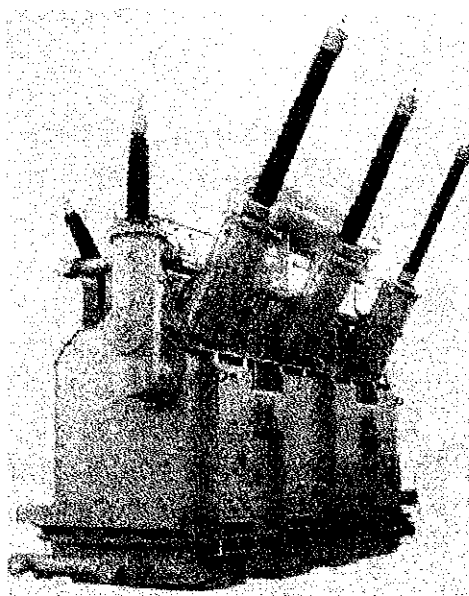


图 1.21 三相电力变压器

电力变压器的高压侧及中压侧除主接头外还引出多个分接头,并装有分

接开关,以改变有效的匝数,进行分级调压。根据分接开关是否可在带负荷情况下操作,电力变压器又分有载调压变压器和不加电压时方可切换分接头的普通变压器。

按线圈耦合的方式,电力变压器又可分为普通变压器和自耦变压器。电力系统中的自耦变压器一般设置有补偿绕组。它是一个低压绕组。高压、中压绕组之间存在自耦联系,而低压绕组与高、中压绕组之间只有磁的耦合。自耦变压器的损耗小、重量轻、成本低,但其漏抗较小,使短路电流增大。此外,由于高、中压绕组在电路上相通,为了过电压保护,自耦变压器的中性点必须直接接地。

1.2.3 电力线路

电力线路按结构可分架空线路和电缆线路两大类。

1. 架空线路

架空线路由导线、避雷线、杆塔、绝缘子和金具等构成,如图 1.22 所示。它们的作用分别为:

导线 —— 传输电能;

避雷线 —— 又称架空地线,用于将雷电流引入大地以保护电力线路免受雷击;

杆塔 —— 支持导线和避雷线;

绝缘子 —— 使导线和杆塔间保持绝缘;

金具 —— 支持、接续、保护导线和避雷线,连接和保护绝缘子。

(1) 架空线路的导线和避雷线

架空线路的导线和避雷线都架设在空中,要承受自重、风压、冰雪荷载等机械力的作用和空气中有害气体的侵蚀,同时还受温度变化的影响,运行条件相当恶劣。因此,它们的材料应有相当高的机械强度和抗化学腐蚀能力,而且导线还应有良好的导电性能。

导线主要由铝、钢、铜等材料制成,在特殊条件下也使用铝合金。导线和避雷线的材料型号,以不同的拉丁字母表示,如铝——L、钢——G、铜——T、铝合金——HL。

由于多股线优于单股线,架空线路一般采用绞合的多股导线。多股绞线的型号为J,其结构如图 1.23 所示。由图可见,每股芯线的截面积相同时,多股导

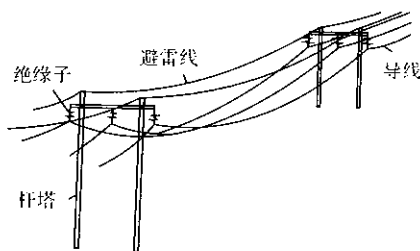


图 1.22 架空线

线的股数是这样安排的:除中心一股芯线外,由内向外数,第一层 6 股,第二层 12 股,第三层 18 股,余类推。

由于多股铝绞线的机械性能差,故往往将铝和钢组合起来制成钢芯铝绞线,将铝线绕在单股或多股钢线外层作主要载流部分,机械荷载则由钢线和铝线共同承担。

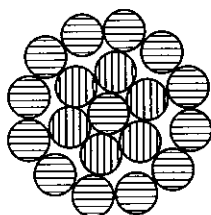


图 1.23 多股导线

在钢芯铝绞线中,因铝线部分与钢线部分截面积的比值不同,机械强度也不同,因此又可将其分成三类:

普通钢芯铝绞线型号为 LGJ, 铝线和钢线部分截面积的比值为 5.2 ~ 6.1;

加强型钢芯铝绞线型号为 LGJJ, 铝线和钢线部分截面积的比值为 4 ~ 4.5;

轻型钢芯铝绞线型号为 LGJQ, 铝线和钢线部分截面积的比值为 7.6 ~ 8.3。

无论单股或多股、一种或两种金属制成的导线,其型号后的数字总是代表主要载流部分(并非整根导线)额定截面积的平方毫米数。例如, LGJQ-400 表示轻型钢芯铝绞线主要载流部分(铝线部分)的额定截面积为 400mm^2 。架空线路广泛采用钢芯铝绞线,低压线路在机械强度允许时多用铝绞线。避雷线一般用钢绞线,也有用钢芯铝绞线的。

线路电压超过 220kV 时,为减小电晕损耗或线路电抗,常需采用直径很大的导线,但就载流容量而言,却又不必采用如此大的截面积。较理想的方案是采用扩径导线或分裂导线。

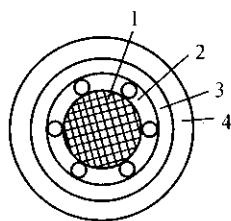


图 1.24 扩径导线(K-272)

扩径导线是人为地扩大导线直径但又不增大载流部分截面积的导线。例如,扩径导线 K-272 铝线部分截面积为 300.8mm^2 ,相当于 LGJQ-300;直径为 27.44mm,又相当于 LGJQ-400。这种导线的结构如图 1.24。它和普通钢芯铝绞线的不同在于支撑层并不为铝线所填满,仅有 6 股,而这 6 股主要起支撑作用。

1. 钢芯(钢线 19 股);
2. 支撑层(铝线 6 股);
3. 内层(铝线 18 股);
4. 外层(铝线 24 股)

分裂导线又称复导线,就是将每相导线分成若干根,相互间保持一定距离,例如分成 2 ~ 4 根,各根相距 400mm,如图 1.25 所示。这种分裂可使导线周围的电、磁场发生变化,减少电晕和线路电抗,但与之同时,线路电容也将增大。我国 220kV 有采用二分裂的,而 500kV 普遍采用四分裂,见图 1.30。

(2) 架空线路的杆塔

架空线路的杆塔型式极多,分类方法也各异。可按受力的特点分为直线杆

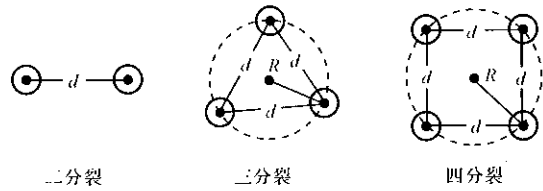


图 1.25 分裂导线

塔、耐张杆塔、转角杆塔和直线转角杆塔、终端杆塔以及换位杆塔、跨越杆塔等特殊杆塔。也可按使用的材料分为钢筋混凝土杆、木杆、铁塔。还可按结构型式、导线排列方式等分成各种类型。图 1.26 所示分别为钢筋混凝土杆和铁塔。

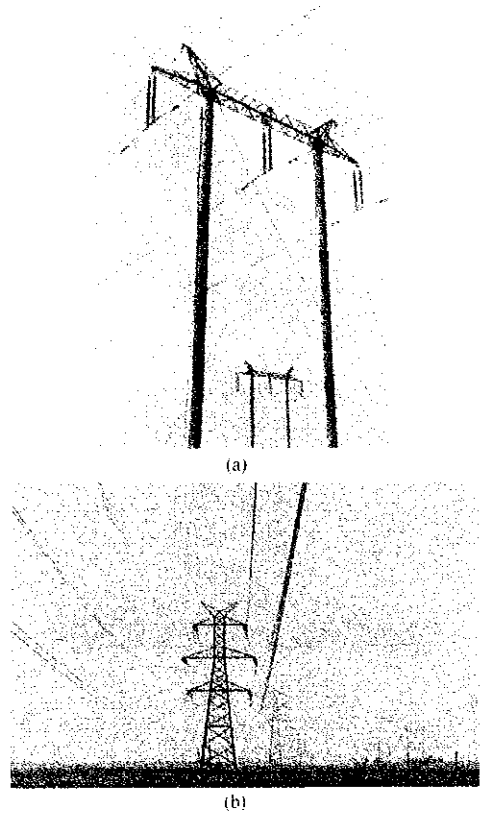


图 1.26

(a) 钢筋混凝土塔；(b) 铁塔

下面将按受力特点对几种杆塔作进一步说明。

① 耐张杆塔

耐张杆塔是允许承受较大两侧导线拉力差的杆塔。因此,其强度要求较高,结构也较复杂。耐张杆塔将线路分成若干公里长的耐张段,使断线故障的影响范围限制在与断线点相邻的两耐张杆塔之间,并便于施工、检修。在耐张杆塔上,同相的两侧导线各用一绝缘子串连接,再以跳线相连。图 1.27 所示为一个耐张段内的线路,图 1.28 则为耐张铁塔。

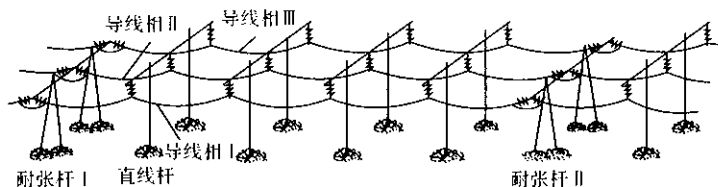


图 1.27 一个耐张段内的线路

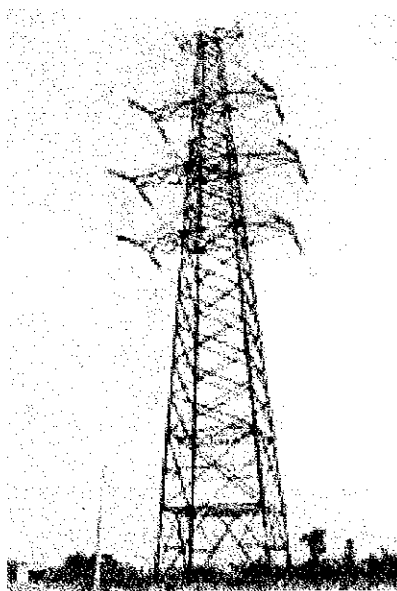


图 1.28 耐张铁塔

② 直线杆塔

相邻两耐张杆塔之间的杆塔称直线杆塔。它允许承受的两侧导线拉力差远小于耐张杆塔。因此,其强度要求较低,造价也低。线路上,直线杆塔数量最多。直线杆塔在线路正常运行时承受的力是垂直方向的导线自重、覆冰重以及水平方向的风压。在直线杆塔上,绝缘子串和导线相互垂直。图 1.26 所示即为直线杆塔。

③ 转角杆塔和直线转角杆塔

这两种杆塔都用于线路转角处。做成耐张杆塔型的,其外形和耐张杆塔相似,仅导线走向有转折的称转角杆塔;做成直线杆塔型的,外形和直线杆塔相似,仅绝缘子串不完全垂直地面而略有偏斜的称直线转角杆塔。前者用于转角较大处,后者则用于转角较小处。它们在结构上要考虑到导线的转折和承受侧向力的要求。图 1.29 所示为转角铁塔。

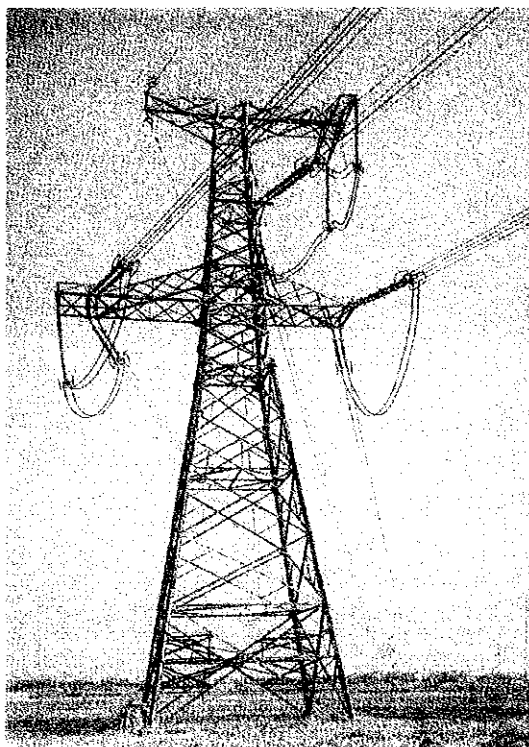


图 1.29 转角铁塔

① 终端杆塔

终端杆塔是设置在进入发电厂或变电所线路末端的杆塔。由它承受最后一个耐张段内导线的拉力。如不设置这种杆塔,这种拉力将施加在发电厂或变电所的建筑物或配电结构上,使它们的造价增加。终端杆塔不同于耐张杆塔,它在正常运行时承受的两侧拉力差就相当大。图 1.30 所示为 500kV 终端铁塔,导线采用四分裂。

⑤ 换位杆塔

架空线路的换位是为了减少三相参数的不平衡。例如,长度为 50 ~ 250km 的 220kV 架空线路,有一次整换位循环的和不换位的相比。由于三相参数不平衡

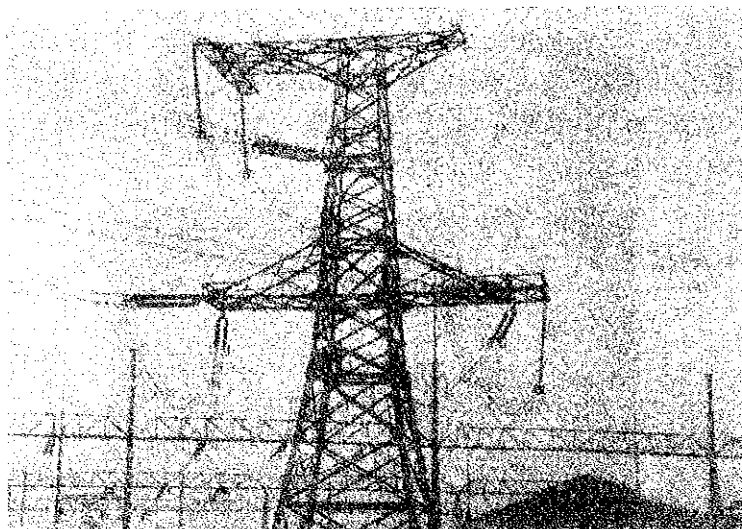


图 1.30 终端杆塔

而引起的不对称电流,前者仅为后者的 $1/10$ 。所谓整换位循环是指在一定长度内使三相导线的每 $1/3$ 长度分别处于三个不同位置,完成一次完整的循环,如图 1.31 所示。按规定,长于 200km 的线路应进行换位。

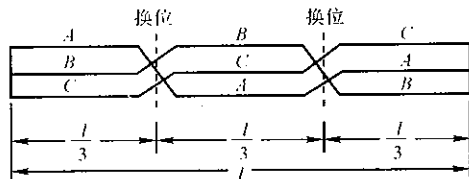


图 1.31 一次整换位循环

换位的方式有二:滚式换位和换位杆塔换位。滚式换位如图 1.32 所示。这种换位方式最常用,已在我国 110kV 及以上线路上广泛使用,运行情况良好。

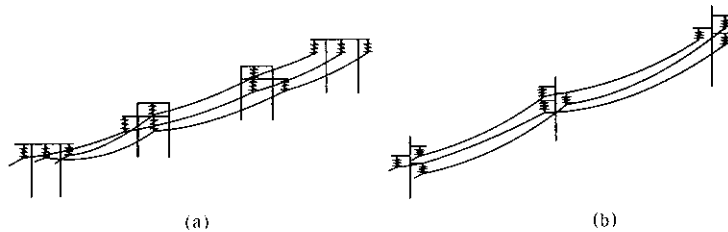


图 1.32 滚式换位循环

(a) 导线水平排列时;(b) 导线三角形排列时

图 1.33 所示为换位铁塔。运用换位杆塔换位时,布线很复杂,跳线、绝缘子串和横担数很多,因此它主要用于滚式换位有困难的地方。

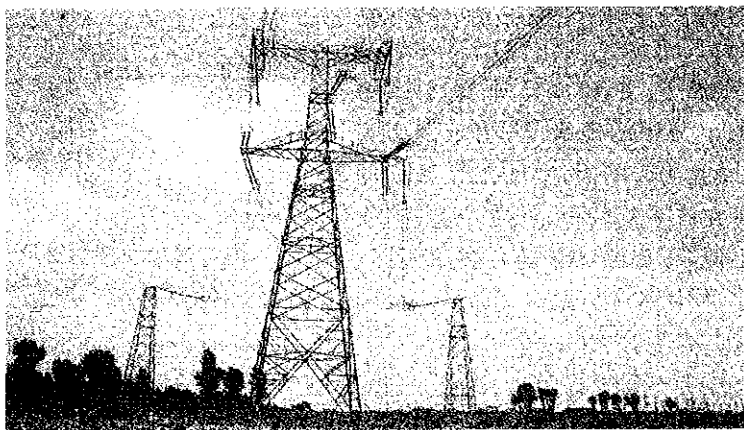


图 1.33 换位铁塔

⑥ 跨越杆塔

线路跨越河流、山谷等地时,如跨越宽度很大,就需采用特殊设计的跨越杆塔。跨越杆塔一般都较普通杆塔高,因地形不同,有高达一二百米的。如图 1.34 所示为跨越长江的杆塔。

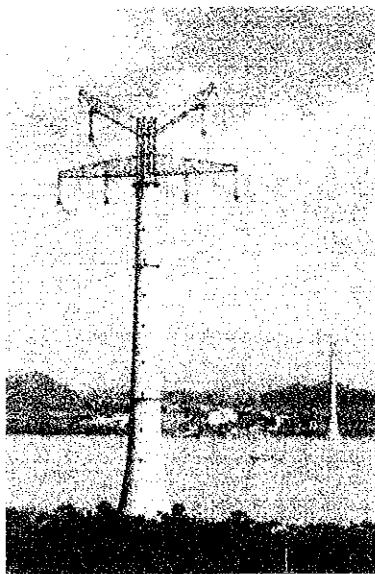


图 1.34 跨越杆塔

(3) 架空线路的绝缘子和金具

① 绝缘子

架空线路使用的绝缘子分针式和悬式两种。针式绝缘子使用在电压不超过 35kV 的线路上,如图 1.35 所示。悬式绝缘子是成串使用的绝缘子,用于电压为 35kV 及以上的线路上,型号为 X,X 后的数字表示允许承受的荷重,单位为吨。线路电压不同,每串绝缘子的片数也不同。规程规定:使用 X-4.5 型时,35kV 不少于 3 片;60kV 不少于 5 片;110kV 不少于 7 片;154kV 不少于 10 片;220kV 不少于 13 片;330kV 不少于 19 片。因此,通常可根据绝缘子的片数判断线路的电压等级。图 1.36(a) 所示为最常用的悬式绝缘子 X-4.5;图 1.36(b) 则为专用于易污染地区的防污悬式绝缘子 XW-4.5;图 1.37 为悬垂绝缘子串。

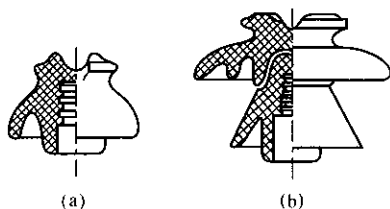


图 1.35 针式绝缘子
(a)10kV 线路用;(b)35kV 线路用

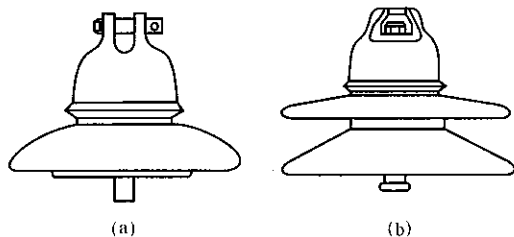


图 1.36 悬式绝缘子
(a)X-4.5;(b)XW-4.5

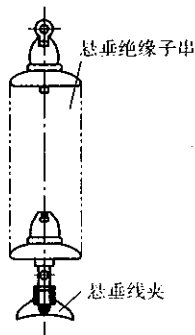


图 1.37 悬垂绝缘子串

② 瓷横担

瓷横担是既起绝缘作用又起横担的支持作用的瓷质新元件,目前已大量用作于 60kV 及以下线路,并逐步推广使用于 110kV 及以上线路。图 1.38 所示为两种不同电压等级的瓷横担。

瓷横担之所以能被迅速推广使用,在于它有如下优点:可节约材料消耗和投资 30% ~ 40%;可就地取材且制造工艺简单;运行安全、维护简单。瓷横担的主要缺点为机械抗弯强度低,但可将两段或四段瓷横担联成 V 形以提高它们承受垂直荷载的能力,如图 1.39 所示。

③ 金具

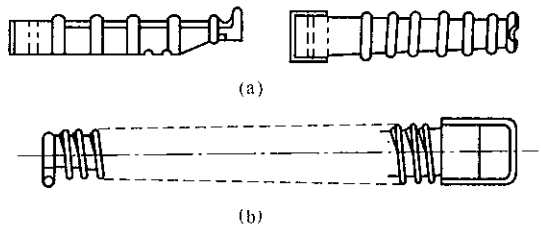


图 1.38 瓷横担
(a)10kV 线路用;(b)110kV 线路用

架空线路的金具可分悬垂线夹、耐张线夹、接续金具、连接金具、保护金具等几大类。品种极多，不胜枚举。

悬垂线夹 悬垂线夹的主要作用是将导线固定在直线杆塔的悬垂绝缘子串上或将避雷线固定在非直线杆塔上。图 1.40(a) 所示为一种常用的悬垂线夹，这种线夹的作用已示于图 1.37。

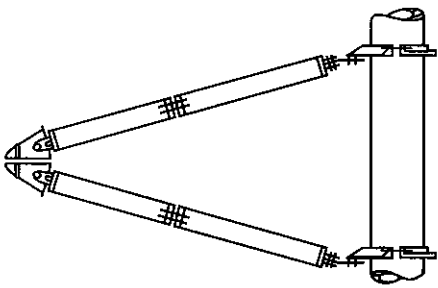


图 1.39 220kV 线路用瓷横担组

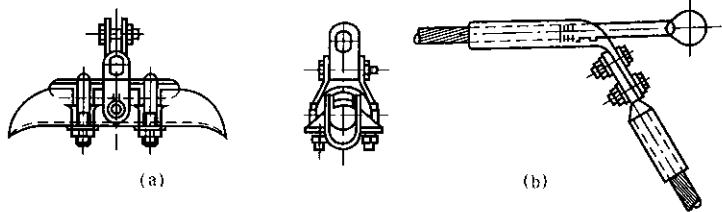


图 1.40 悬垂线夹和耐张线夹
(a) 悬垂线夹;(b) 耐张线夹

耐张线夹 耐张线夹的主要作用是将导线固定在非直线杆塔的耐张绝缘子串上或将避雷线固定在非直线杆塔上。如图 1.40(b) 所示为一种常用的耐张线夹。这种线夹的作用则示于图 1.41。

接续金具 接续金具用于二段导线或避雷线的连接处，如图 1.42(a)、(b) 所示的压接管、钳接管等。

连接金具 运用连接金具将绝缘子组装成串或将线夹、绝缘子串、杆塔横担相互连接。

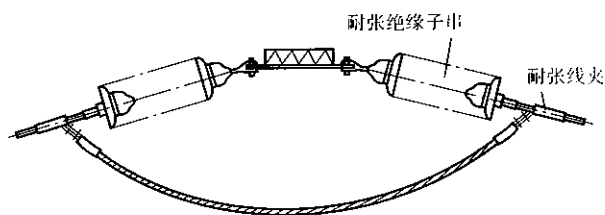


图 1.41 耐张线夹的使用

保护金具 保护金具包括防震保护金具和绝缘保护金具。

防震保护金具用以防止导线或避雷线因风引起的周期性振动而造成导线、避雷线、绝缘子串乃至杆塔的损坏。有护线条、预绞丝、防震锤、阻尼线等。其中,护线条和

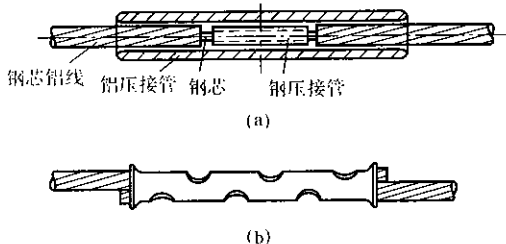


图 1.42 几种接续金具

(a) 压接管;(b) 钳接管

预绞丝的作用在于减小导线振动时所受的机械应力,是加强导线抗震能力的金具;防震锤和阻尼线则在导线振动时产生与振动方向相反的阻尼力,因而是削弱导线振动的金具。护线条和防震锤示于图 1.43(a)、(b)。

绝缘保护金具悬重锤可减小悬垂绝缘子串的偏移,防止其过分靠近杆塔。

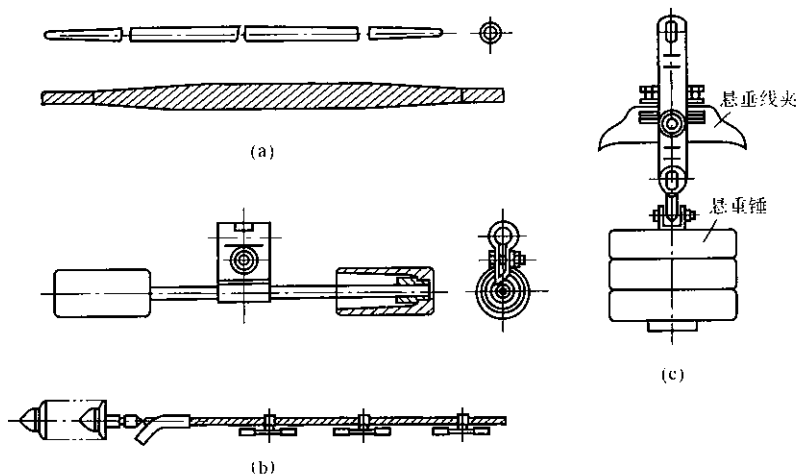


图 1.43 几种保护金具

(a) 护线条;(b) 防震锤;(c) 悬重锤

悬重锤示于图 1.43(c), 图中的重锤片数可以增减。

2. 电缆线路

用于电缆线路的电力电缆由导线、绝缘层、包护层等构成, 如图 1.44 所示。它们的作用分别为:

导线 —— 传输电能。

绝缘层 —— 使导线与导线、导线与包护层互相绝缘。

包护层 —— 保护绝缘层, 并有防止绝缘油外溢和水分侵入的作用。

电缆线路的价格较架空线路高, 电压愈高, 二者差别愈大。检修电缆线路费工费时。但电缆线路具有不需在地面上架设杆塔, 占用土地面积少, 供电可靠, 不易受外力破坏, 对人身较安全以及不影响环境美观等优点。因此, 在城市、发电厂和变电所内部或附近以及穿过江河、海峡时, 往往采用电缆线路。

(1) 电缆的构造

电缆的导体用铝或铜的单股或多股线, 通常用多股线。

电缆绝缘层的材料有橡胶、沥青、聚乙烯、聚丁烯、棉、麻、绸、纸、黏性浸渍纸和矿物油、植物油等液体绝缘材料, 目前大多用浸渍纸。

包护层分内护层和外护层两部分。内护层由铝或铅制成, 用以保护绝缘不受损伤, 防止浸渍剂的外溢和水分的侵入。外护层的作用在于防止外界的机械损伤和化学腐蚀。外护层由内衬层、铠装层和外被层组成。内衬层一般由麻绳或麻布带经沥青浸渍后制成, 用以作铠装的衬垫, 以避免钢带或钢丝损伤内护层。铠装层一般由钢带或钢丝绕包而成, 是外护层的主要部分。外被层的制作与内衬层同, 作用是防止钢带或钢丝的锈蚀。

常用的电力电缆的构造如图 1.44 所示。图 1.44(a) 为铝芯(或铜芯) 浸渍纸绝缘铝(或铅) 包钢带铠装电力电缆。它的特点是扇形导线, 三个芯线组成电缆后再外包铝(或铅) 内护层。这是 10kV 及以下

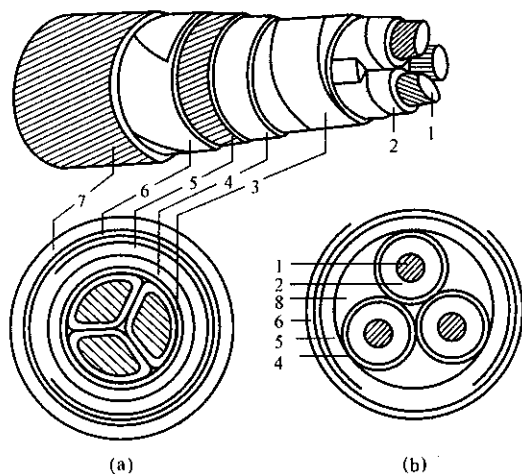


图 1.44 常用电力电缆的构造

(a) 纸绝缘铝(铅) 包钢带铠装;

(b) 纸绝缘分相铝(铅) 包裸钢带铠装

1. 导体; 2. 相绝缘; 3. 带绝缘; 4. 铝(铅) 包;

5. 麻衬; 6. 钢带铠装; 7. 麻被; 8. 填麻

电压级电缆常用的结构。图 1.44(b) 为铝芯(或铜芯)纸绝缘分相铝(或铅)包裸钢带铠装电力电缆。它的特点是每根圆形芯线绝缘后分别包铝(或铅)层屏蔽电场,最后组成电缆。这是 20kV 和 35kV 电压级电缆常用的结构。110kV 及以上电压级的电缆采用单芯充油结构,如图 1.45 所示。其中用粗钢丝铠装的能承受较大拉力,适宜在水中敷设。这种电缆的最大特点是导体中空,内部充油。此外还有塑料电缆,它的绝缘层采用挤压成型的聚乙烯或交联聚乙烯,结构简单而坚固,制造工艺也简单。目前,110kV 及以下的塑料电缆已得到应用,电压较高的也在研制之中。

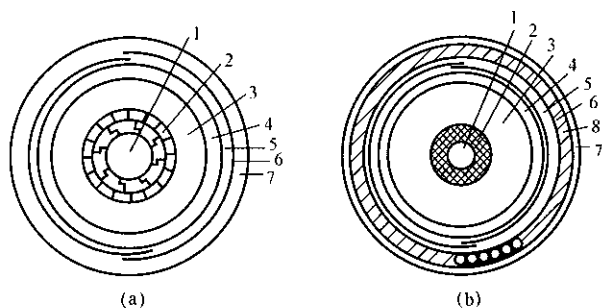


图 1.45 充油电缆的构造

(a) 铅包铜带加固;(b) 铅包铜带加固粗钢丝铠装

1. 油道;2. 导体;3. 绝缘;4. 铅包;5. 内衬层;

6. 铜带加固;7. 外被层;8. 粗钢丝铠装

(2) 电缆的附件

电缆附件主要有接头(盒)和终端头(盒),而充油电缆则还有一整套供油系统。

电缆接头是连接两段电缆的部件,电缆终端头则是电缆线路末端用以保护缆芯绝缘并将缆芯导体与其他电气设备相连的部件。它们都是电缆线路的薄弱环节,应特别注意。

10kV 及以下电缆的附件有用铸铁、铸铝制成的连接盒和终端盒,也有用尼龙、环氧树脂制成的接头和终端头。其中,以环氧树脂制成的接头和终端头最有前途。环氧树脂接头是将导体部分对接并裹以绝缘后,以环氧树脂浇注而成。终端头则是将导体裹以绝缘后,套以预制的环氧树脂外壳,再以环氧树脂浇注而成。它们有工艺简便、机械强度高、密封性能好、体积小、重量轻、成本低等优点。图 1.46 所示为环氧树脂接头和户外型终端头。

20kV、35kV 分相电缆的连接盒和终端盒也是分相的,和单芯电缆相似。其中,连接盒由铸铝制成,三个一组;瓷质终端盒结构简单,体积很小。

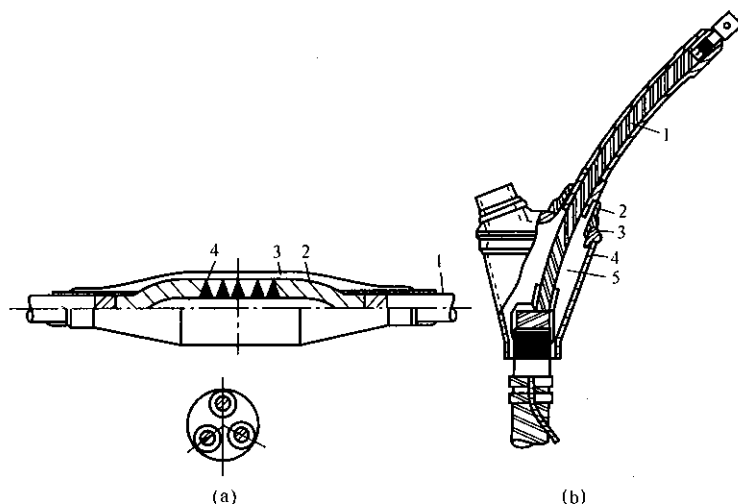


图 1.46 环氧树脂接头和终端头

(a) 接头:1. 铝(铅)包;2. 线芯绝缘;3. 环氧树脂;4. 压接管;

(b) 户外型终端头:1. 缆芯;2. 预制袖口套管;3. 预制模盖;

4. 预制底壳;5. 环氧树脂

110kV 及以上电压等级充油电缆的连接盒和终端盒结构较复杂,如图 1.47(a)、(b) 所示。它们要保证连接处和终端处有足够的绝缘和油路的畅通,此外还需为充油电缆线路配置一套供油装置,以形成完整的油路系统,并保持绝缘油压为一定值。

1.2.4 无功功率补偿设备

电力系统需要的无功功率比有功功率大,若综合有功发电最大负荷为 100%,则无功总需要约为 120%~140%,它包括负荷的无功功率和线路、变压器的无功损耗。发电机的额定功率因数一般大于 0.8,同时也不允许长距离输送无功功率,单靠发电机发出的无功功率(加上线路电容产生的无功功率)不能平衡电力系统的无功需求,因此要进行无功功率补偿。

主要的无功功率补偿设备有同步调相机、电力电容器和静止补偿器。

同步调相机实际上是一台空载运行的同步电动机,在过励磁运行时可发出无功功率,适用于大型变电所进行集中补偿。它不但能发出无功功率,在欠励磁时还可以吸收无功功率,调节均匀简单。自动励磁调节装置能使同步调相机在端电压波动时自动调节无功功率,维持电压,对提高系统运行的稳定性也

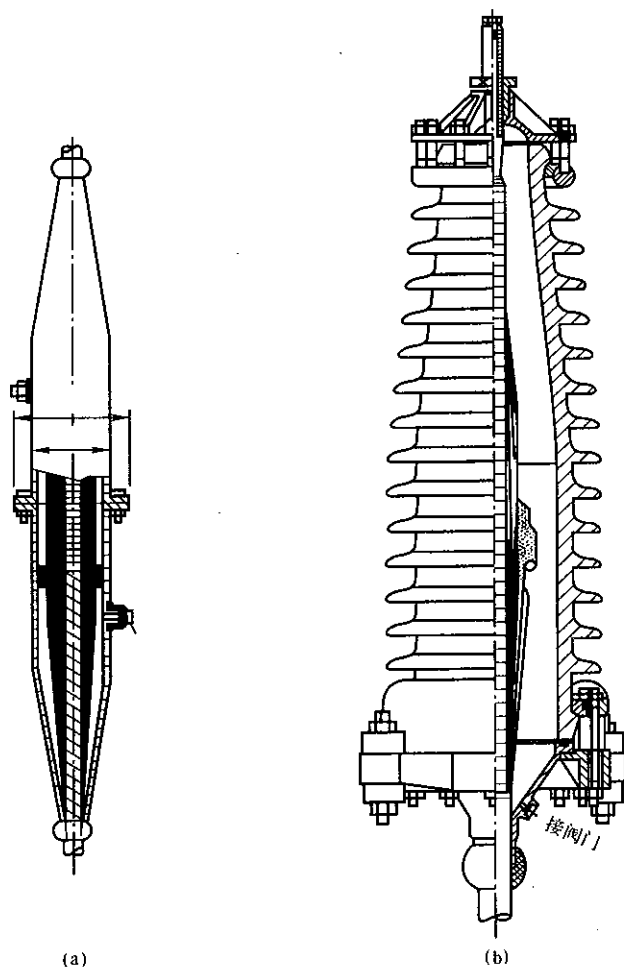


图 1.47 充油电缆的连接盒和终端盒
(a) 接头; (b) 户外型终端头

有好处。缺点是投资大,功率损耗大,因是旋转设备,运行维护工作量也较大。

电力电容器能补偿负荷感性无功功率以提高功率因数,故又称移相电容器。它常并联接于 6.3、10.5 或 35kV 母线上,故又称并联电容器。由于电容器可分散安装,越靠近负荷集中处安装,就会获得越理想的技术经济效果。电容器的有功功率损耗很小,约为容量的 0.3% ~ 0.5%。电容器的投资低于调相机,且单位容量投资几乎与总容量无关,这些都是其优点。

电容器不足之处是只能产生感性无功功率,不能像调相机那样在欠励磁运行时吸收无功功率。近年来出现的一种叫静止补偿器的无功功率调节装置

弥补了这一不足。静止补偿器由可控电抗器和电容器组并联组成。设电容器发出的无功功率为 Q_C ，电抗器吸收的无功功率为 Q_L ，则静止补偿器发出的无功功率为 $(Q_C - Q_L)$ 。通常 Q_L 做成可连续调节的，当 $Q_L < Q_C$ 时，补偿器发出无功功率，而当 $Q_L > Q_C$ 时则吸收无功功率，配以适当的自动调节装置后，就能自动调节无功功率，保持连接点电压为给定值。

静止补偿器不但能在稳态运行时调节无功功率，保证系统电压的稳定，而且由于其反应的快速性，对冲击负荷也有较强的适应性，能满足动态无功功率补偿的要求。与同步调相机相比，它调节速度较快，运行维护简单，功率损失较小。20 世纪 70 年代以来，静止补偿器在国外已被大量使用，近年来，在我国电力系统中也已开始应用。

在某些系统中，还装有并联电抗器，其作用和欠励磁运行的调相机相仿，用以吸收过剩的无功功率。而装在超高压线路上的高压电抗器则是用来吸收线路上的充电功率和降低过电压的。

2

电力系统元件 数学模型

目前,电力系统以三相交流系统为主体,因此本书将着重研究三相交流系统各种运行状态的特性和分析方法。在研究电力系统运行时必须建立各种元件的数学模型,并在此基础上建立整个电力系统的数学模型,然后进行计算和分析。

三相交流电力系统运行状态的分析可分为稳态运行分析和暂态过程分析,并有三相对称运行和不对称运行的区别。电力系统各种元件对应于这些不同状态的数学模型是不相同的。分析暂态过程问题时,各元件要用微分方程描述,而稳态运行分析则可用代数方程描述。本章先讨论三相对称稳态运行时各元件的数学模型,并推导出它们的等值电路,然后介绍电力系统等值电路的建立方法。至于三相不对称运行方式和暂态过程的数学模型,将在以后有关的章节中讨论。

2.1 三相电力线路

三相电力线路分为架空线路和电缆线路两类,一般选用电阻率低、资源丰富的材料作导电部分。目前架空线路普遍使用钢芯铝绞线,对机械强度要求不高的低压线路多用铝绞线,仅在跨越江河等特大跨距、导线承受的机械应力很大的这一段,才使用合金绞线或钢绞线。电力电缆的导电芯线只采用铜或铝绞线。根据上述情况,本节只讨论以铝和铜为导体的电力线路。

三相电力线路实质上是分布参数的电路,沿导线每一长度单元各相都存在电阻、自感、对地电容和漏电导,各相之间有互感、电容和漏电导。本节将讨论三相电压及电流对称情况下,线路各相的单位长度的等值电阻、电感以及对地等值电容和电导,然后从分布参数长线方程出发,推导出集中参数的等值电路。

2.1.1 电力线路电阻

电力线路每相导线的单位长度电阻与导体的材料和截面积有关。由于电流的趋表效应,当交流电流通过导线时,导线的有效电阻与直流电流下的直流电阻的比值,随频率的升高而增大,随导线截面积的增大而上升。对于使用铜、铝绞线的架空线和电缆,除非截面积特别大,频率 $50 \sim 60\text{Hz}$ 时的有效电阻与直流电阻相差甚微,而钢芯铝绞线的有效电阻则与铝线部分的直流电阻差别很小。图 2.1 示出钢芯铝绞线在工频下的有效电阻 R_{ac} 与直流电阻 R_{dc} 的比值

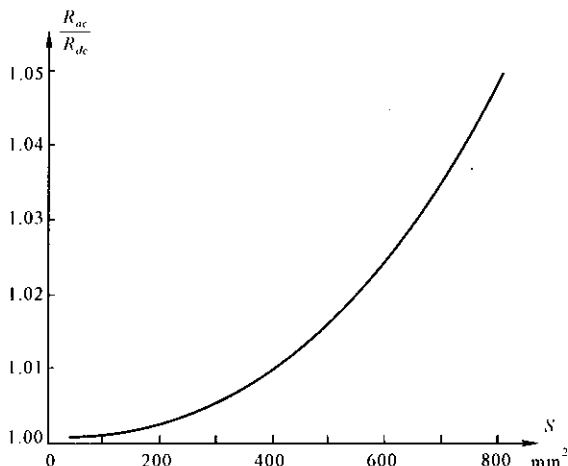


图 2.1 钢芯铝绞线有效电阻与直流电阻的比值

随导线额定截面积 S (相当于铝部分的截面积, mm^2) 变化的曲线。可见, 频率为 $50 \sim 60\text{Hz}$ 时, 有效电阻与直流电阻差别很小; 而常用导线的额定截面积大多在 400mm^2 以下, 其差别就更小了。因此, 在一般电力系统计算中均可用直流电阻代替有效电阻。各类导线和电缆的单位长度电阻可从产品手册中查到, 但大多只提供温度 20°C 时的直流电阻。

在缺乏手册资料时, 可用下式计算各种铜、铝导线和电缆在 20°C 时的单位长度电阻:

$$r_1 = \frac{\rho}{S} (\Omega/\text{km}) \quad (2.1)$$

式中, S 为导线的额定 (标称) 截面积 (mm^2); ρ 为 20°C 时的电阻率, 它应采用下列数值:

$$\text{铝: } \rho = 31.2 (\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km})$$

$$\text{铜: } \rho = 18.8 (\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km})$$

这些数值略大于材料本身的电阻率, 已对绞线每一股长度稍大于导线的长度 (约长 $2\% \sim 3\%$), 而导线的额定截面积一般也略大于实际截面积的实际要求作了考虑。

铜和铝的电阻率是温度的函数, 温度每变化 10°C , 电阻率约变化 4% 。当导线的实际温度与 20°C 相差很大时, 可用下式求 $t^\circ\text{C}$ 时的电阻值:

$$r_1 = r_{1(20)} [1 + \alpha(t - 20)] \quad (2.2)$$

式中, $r_{1(20)}$ 是 20°C 时的电阻, α 是电阻温度系数。铜的 $\alpha = 0.0036 (1/^\circ\text{C})$, 铝的 $\alpha = 0.00382 (1/^\circ\text{C})$ 。

2.1.2 电力线路电感

高压电力线路主要采用架空线路,本节着重讨论三相架空线路的电感。架空线路的三相导线可认为是平行架设的,而且线路的长度远大于导线之间的距离,所以可作为三根无限长的平行导线来处理。当三相电流对称或 $i_a + i_b + i_c = 0$ 时,电流只在三相导线中流通,所以导线周围的磁场只取决于三相导线和其中的电流,本节只讨论这种情况。下面先讨论各相导线的磁链,然后计算它们的电感。

三相导线中,每一根导线的磁链包括本相导线电流产生的磁链(以下简称自感磁链)和另两相电流产生的互感磁链。现在分别计算自感和互感磁链。

1. 单根长导线的磁链

单根无限长导线中的电流所产生的磁场,在导线任一处横截面上都是相同的,如图 2.2 所示。每一横截面中,距离导线圆心 x 处的同心圆上,磁场强度 H_x 都相同,或者说磁力线是一族同心圆。以下分别计算导线内部和外部的磁链。

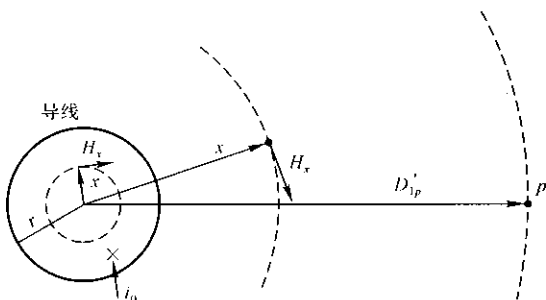


图 2.2 单根长导线的磁场

设导线内电流是均匀分布的,所以半径为 x 的圆内电流为

$$i_x = \frac{i_a}{\pi r^2} \pi x^2 = \frac{x^2}{r^2} i_a \quad (2.3)$$

式中, i_a 为导线的总电流, r 为导线的半径。导线内 x 处的磁场强度

$$H_x = \frac{i_x}{2\pi x} = \frac{1}{2\pi x} \frac{x^2}{r^2} i_a = \frac{x}{2\pi r^2} i_a \quad (2.4)$$

x 处的磁感应强度(磁通密度)为

$$B_x = \mu_0 \mu_r H_x = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi r^2} i_a x \quad (2.5)$$

式中, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} (\text{H/m})$ 为真空的导磁率; μ_r 为导线的相对导磁率,铜和铝

的 $\mu_r = 1$ 。对于导线内 x 处径向厚度为 dx 、长度为 1m 的“圆管”，管壁中的磁通

$$d\Phi_x = B_x dx = \frac{\mu_0}{2\pi r^2} i_a x dx \quad (2.6)$$

此磁通只围绕导线的一部分面积，相当于只有 $\pi x^2 / \pi r^2$ 匝，所以，单位长度 (1m) 导线内部的磁链为

$$\Psi'_{aa} = \int_0^r \frac{x^2}{r^2} d\Phi_x = \int_0^r \frac{\mu_0}{2\pi r^2} i_a x^3 dx = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{i_a}{4} (\text{Wb/m}) \quad (2.7)$$

导线外部 x 处的磁感应强度

$$B_x = \mu_0 H_x = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{i_a}{x} \quad (2.8)$$

单根导线的匝数为 1，所以单位长度导线在半径 D_{1p} 以内的外磁链为

$$\Psi''_{aap} = \int_r^{D_{1p}} B_x dx = \frac{\mu_0}{2\pi} i_a \ln \frac{D_{1p}}{r} (\text{Wb/m}) \quad (2.9)$$

包括导线内部磁链在内，单位长度导线 D_{1p} 以内的磁链为

$$\Psi_{aap} = \Psi'_{aa} + \Psi''_{aap} = \frac{\mu_0}{2\pi} i_a \left(\ln \frac{D_{1p}}{r} + \frac{1}{4} \right) (\text{Wb/m}) \quad (2.10)$$

2. 两根平行长导线的互感磁通

有两根半径为 r 相距 D_{12} 的平行长导线 a 和 b ，导线 b 中电流 i_b 产生的磁场如图 2.3 所示。由于 D_{12} 远大于半径 r ，因此在考虑电流 i_b 对导线 a 的互感磁通时，可以将两根导线的半径看作无限小。

距离导线 b 轴心 x 处圆周上任一点的磁感应强度

$$B_x = \mu_0 H_x = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{i_b}{x} \quad (2.11)$$

由于在两导线之间的磁通没有穿链导线 a ，所以在导线 a 的外侧 p 点与导线 a 间穿链导线 a 的单位长度互感磁链为

$$\Psi_{abp} = \int_{D_{12}}^{D_{2p}} B_x dx = \frac{\mu_0}{2\pi} i_b \ln \frac{D_{2p}}{D_{12}} (\text{Wb/m}) \quad (2.12)$$

3. 三相线路的电抗

三相导线 (见图 2.4) 分别有电流 i_a ， i_b 和 i_c ，它们的方向相同。应用式 (2.10)

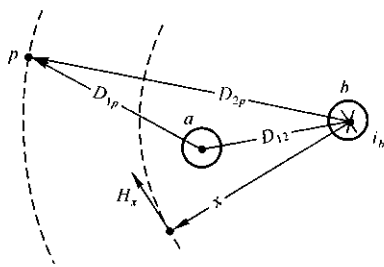


图 2.3 两根平行长导线磁场

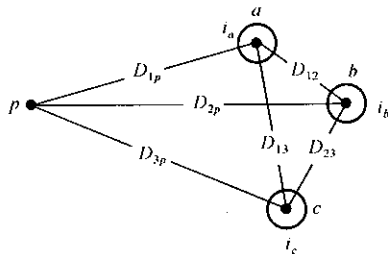


图 2.4 三相导线

和(2.12)可以得到围绕各相导线的磁链。

在 $p-a$ 之间穿链单位长度 a 相导线的磁链为

$$\begin{aligned}\Psi_{ap} &= \frac{\mu_0}{2\pi} \left[i_a \left(\ln \frac{D_{1p}}{r} + \frac{1}{4} \right) + i_b \ln \frac{D_{2p}}{D_{12}} + i_c \ln \frac{D_{3p}}{D_{13}} \right] \\ &= \frac{\mu_0}{2\pi} \left[i_a \left(\ln \frac{1}{r} + \frac{1}{4} \right) + i_b \ln \frac{1}{D_{12}} + i_c \ln \frac{1}{D_{13}} + i_a \ln D_{1p} \right. \\ &\quad \left. + i_b \ln D_{2p} + i_c \ln D_{3p} \right] \quad (2.13)\end{aligned}$$

考虑到 $i_c = -(i_a + i_b)$, 将它代入上式最后一项, 可得

$$\begin{aligned}\Psi_{ap} &= \frac{\mu_0}{2\pi} \left[i_a \left(\ln \frac{1}{r} + \frac{1}{4} \right) + i_b \ln p \frac{1}{D_{12}} + i_c \ln \frac{1}{D_{13}} \right. \\ &\quad \left. + i_a \ln \frac{D_{1p}}{D_{3p}} + i_b \ln \frac{D_{2p}}{D_{3p}} \right] \quad (2.14)\end{aligned}$$

将 p 点(图 2.4) 移到无穷远处, 就可得到 a 相单位长度的全部磁链 Ψ_a 。因为 $\lim_{p \rightarrow \infty} \left(\ln \frac{D_{1p}}{D_{3p}} \right) = 0$, $\lim_{p \rightarrow \infty} \left(\ln \frac{D_{2p}}{D_{3p}} \right) = 0$, 所以

$$\Psi_a = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[i_a \left(\ln \frac{1}{r} + \frac{1}{4} \right) + i_b \ln \frac{1}{D_{12}} + i_c \ln \frac{1}{D_{13}} \right] \quad (2.15)$$

同理, 可得 b, c 相的磁链

$$\Psi_b = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[i_b \left(\ln \frac{1}{r} + \frac{1}{4} \right) + i_a \ln \frac{1}{D_{12}} + i_c \ln \frac{1}{D_{23}} \right] \quad (2.16)$$

$$\Psi_c = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[i_c \left(\ln \frac{1}{r} + \frac{1}{4} \right) + i_a \ln \frac{1}{D_{13}} + i_b \ln \frac{1}{D_{23}} \right] \quad (2.17)$$

一般三相导线之间的距离不相等, 即 $D_{12} \neq D_{23} \neq D_{31}$, 因此三相之间的互感不相同。为了克服这一缺点, 较长的架空线路普遍采用整换位循环, 如第一章中图 1.31 所示, 特别长的线路还可采用多个整换位循环。

采用整换位循环后, a 相单位长度的平均磁链为

$$\begin{aligned}\Psi_a &= \frac{1}{3} \frac{\mu_0}{2\pi} \left\{ \left[i_a \left(\ln \frac{1}{r} + \frac{1}{4} \right) + i_b \ln \frac{1}{D_{12}} + i_c \ln \frac{1}{D_{13}} \right] \right. \\ &\quad \left. + \left[i_a \left(\ln \frac{1}{r} + \frac{1}{4} \right) + i_b \ln \frac{1}{D_{23}} + i_c \ln \frac{1}{D_{12}} \right] \right. \\ &\quad \left. + \left[i_a \left(\ln \frac{1}{r} + \frac{1}{4} \right) + i_b \ln \frac{1}{D_{13}} + i_c \ln \frac{1}{D_{23}} \right] \right\} \\ &= \frac{\mu_0}{2\pi} \left[i_a \left(\ln \frac{1}{r} + \frac{1}{4} \right) + i_b \ln \frac{1}{D_m} + i_c \ln \frac{1}{D_m} \right] \\ &= Li_a + Mi_b + Mi_c \quad (2.18)\end{aligned}$$

式中, $D_m = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{13}}$ 称为三相导线之间的几何平均距离(以下简称几何均距);

$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{1}{r} + \frac{1}{4} \right)$ 为各相导线的单位长度自感; $M = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{D_m}$ 为经过换位后两相导线间的单位长度平均互感。

$$\text{同理可得:} \quad \Psi_b = Mi_a + Li_b + Mi_c \quad (2.19)$$

$$\Psi_c = Mi_a + Mi_b + Li_c \quad (2.20)$$

计及 $i_a + i_b + i_c = 0$, 式(2.18)、(2.19) 和(2.20) 可简化为

$$\Psi_a = (L - M)i_a = L_1 i_a \quad (2.21)$$

$$\Psi_b = L_1 i_b \quad (2.22)$$

$$\Psi_c = L_1 i_c \quad (2.23)$$

式中, $L_1 = L - M$ 为各相的等值电感, 又称为正序电感。根据上述 L 和 M 的定义可得

$$L_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{D_m}{r} + \frac{1}{4} \right) \text{ (H/m)} \quad (2.24)$$

上式表明, 三相电流 $i_a + i_b + i_c = 0$ 时, 实际的三相线路可以用一条各相电感为 L_1 而三相之间没有互感的线路来等值, 因而可以取一相进行计算分析。需要说明: 当 $i_a + i_b + i_c = i_n \neq 0$ 时, 电流 i_n 将经三相电力系统的中性点入地流通, 且在避雷线(多点接地的架空地线) 中也有感应电流, 故这时三相导线周围的磁场将受到地中电流以及避雷线中电流的影响, 上述各式所求得自感和互感都有很大的变化。关于这种情况将在第四章中讨论。

频率为 50Hz 时, 各相的等值电抗(正序电抗) $x_1 = 2\pi \times 50 L_1$ 。

将 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ (H/m)}$ 代入式(2.24), 并将单位长度改用 km 表示, 则有

$$x_1 = 0.06283 \ln \frac{D_m}{r} + 0.0157 \quad (\Omega/\text{km}) \quad (2.25)$$

4. 分裂导线线路的电抗

在 220kV 及以上的超高压架空线路上, 为了减小电晕放电和单位长度电抗, 普遍采用分裂导线。这是由数根相同的钢芯铝绞线并联构成的复导线, 各根导线之间每隔一定长度用金具支撑, 以固定尺寸。所用的导线根数称分裂数, 常用的有 2、3 和 4 分裂。

分裂导线的采用改变了导线周围的磁场分布, 等效地增大了导线半径, 从而减小了导线电抗。可以设想, 如将每相导线分裂成很多根, 并将它们布置在半径为 r_{eq} 的圆周上, 则决定每相导线电抗的将不再是每根导体的半径, 而是圆的半径 r_{eq} 。虽然在实际应用中, 由于结构上的原因, 每相导线的分裂数不可能很多, 但都布置在正多角形的顶点。

可以证明, 每相具有 n 根的分裂导线线路电抗仍可按式(2.25) 计算, 但式

中的第一项中导线的半径应以等值半径 r_{eq} 替代,第二项应除以 n ,即:

$$r_{eq} = \sqrt[n]{r(d_{12}d_{13}\cdots d_{1n})} = \sqrt[n]{rd_m^{(n-1)}} \quad (2.26)$$

式中, r 为每根导体的半径; $d_{12}, d_{13}, \dots, d_{1n}$ 为某根导体与其余 $n-1$ 根导体间的距离; d_m 为各根导体之间的几何均距。

因此,分裂导线线路的每相等值正序电抗(感)为

$$x_1 = 0.06283 \ln \frac{D_m}{r_{eq}} + \frac{0.0157}{n} (\Omega/\text{km}) \quad (2.27)$$

分裂导线的 r_{eq} 明显地大于单导线的半径,所以电抗 x_1 小于单导线线路。分裂数愈多, x_1 愈小,不过由于 $n > 3$ 以后, x_1 的减少量便愈来愈不明显(参见图 2.5),因此通常只取 $n = 2 \sim 4$ 。

在同一杆塔上架设两回或多回三相线路时,由于各回线路各相之间都存在互感,故比只有一回线路要复杂得多。但因当各回线路都满足 $i_a + i_b + i_c = 0$ 时,各回线路之间的互感磁通相对很小,所以在一般工程计算中,仍可用式(2.25)或(2.27)计算各回路的正序电抗。

最后,简单地介绍电缆线路的电抗。因为电缆品种很多,结构各异,三芯电缆的导线截面多压成扇形,又有外包层(铝或铅)及钢铠,而且导体之间和导体与外包层的距离都很小(cm 级)等等,因此电感的计算相当复杂。在电力网计算时可使用电缆产品手册提供的电阻、正序电抗 x_1 等参数的典型数据,已投入运行的线路最好应用实测的数据。需要说明的是,由于电缆截面的尺寸很小,所以其单位长度的电抗比架空线路要小得多,例如单导线架空线路 $x_1 \approx 0.4\Omega/\text{km}$, 500kV 三分裂导线架空线路 $x_1 \approx 0.29\Omega/\text{km}$, 而 10.5kV 三芯电缆 $x_1 \approx 0.08\Omega/\text{km}$, 115kV 单相电缆 $x_1 \approx 0.18\Omega/\text{km}$ 。

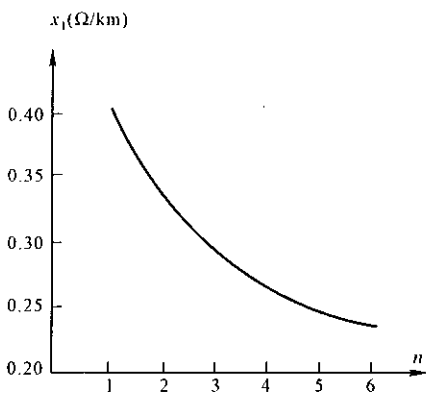


图 2.5 x_1 与分裂数的关系

2.1.3 电力线路并联电导

在三相线路中,凡是由线路电压作用引起的有功功率损耗都可用并联电导表示。电压为 110kV 以下的架空线路,与电压有关的有功功率损耗主要是由绝缘子表面泄漏电流所引起,一般可以略去不计。110kV 及更高电压的架空线路与电压有关的有功功率损耗,主要是由电晕放电所引起的。电晕则是强电

场作用下导线周围空气的电离现象。三相电压对称时,如已知三相线路每公里的电晕有功功率损耗 ΔP_0 (kW),可用下式计算每相等值对地电导:

$$g_1 = \frac{\Delta P_0}{U^2} \times 10^{-3} (\text{S/km}) \quad (2.28)$$

式中, U 为线路的线电压(kV)。

电晕损耗的计算和测量将在《高电压技术》课程中讨论。超高压线路的电晕放电不仅产生有功功率损耗,而且还会引起对无线电通信的干扰。在设计超高压架空线路时,选择的导线半径或分裂导线要满足在晴天基本上不产生电晕。而要在非晴天产生电晕虽是难免的,但也应使有功功率损耗和无线电干扰低于一定水平。由于电晕损耗随天气而变化,所以 g_1 难于准确计算,但因其数值相对很小,所以在一般计算时可取 $g_1 = 0$ 。

电缆线路与电压有关的有功功率损耗主要是绝缘介质损耗。高压电缆介质损耗颇大,例如 110kV、芯线截面积 185mm² 的充油电缆,其三相介质损耗约 3.5kW/km, $g_1 \approx 3.5 \times 10^{-3}/110^2 = 0.29 \times 10^{-6} (\text{S/km})$ 。如电缆线路不长,且缺乏介质损耗数据时,可近似取 $g_1 = 0$ 。

2.1.4 电力线路并联电容

先讨论没有避雷线的三相单导线的电容。三相导线可看作三根并行的长导线,它的电容可用镜像法计算(见《电磁场原理》)。

图 2.6 为三相导线和它们的镜像,图中 H_{11} 为导线 a 与其镜像 a' 间的距离,即导线 a 对地距离的 2 倍; H_{12} 为导线 a 与导线 b 的镜像

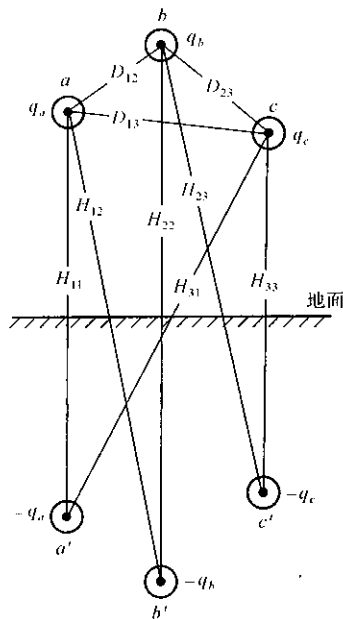


图 2.6 三相线路及其镜像

b' 间的距离,而导线 b 与导线 a 的镜像 a' 间的距离 H_{21} 显然等于 H_{12} ;其余类推。设 u_a 、 u_b 和 u_c 为各相导线的电位或相电压(伏特), q_a 、 q_b 和 q_c 为各相导线单位长度的电荷(库仑),则 u_a 和各相导线电荷的关系为

$$u_a = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(q_a \ln \frac{H_{11}}{r} + q_b \ln \frac{H_{12}}{D_{12}} + q_c \ln \frac{H_{13}}{D_{13}} \right) \quad (2.29)$$

式中, r 为导线的半径; ϵ_0 为真空的介电常数(电容率), $\epsilon_0 = 10^{-6}/36\pi (\text{F/km})$ 。

考虑三相导线有换位循环,则

$$u_a = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(q_a \ln \frac{H_{sm}}{r} + q_b \ln \frac{H_{mm}}{D_m} + q_c \ln \frac{H_{mm}}{D_m} \right) \quad (2.30)$$

式中, $D_m = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{13}}$ 是三相导线间的几何均距; $H_{sm} = \sqrt[3]{H_{11}H_{22}H_{33}}$ 是三相导线与本身镜像间的几何均距; $H_{mm} = \sqrt[3]{H_{12}H_{23}H_{13}}$ 是三相导线与不同相导线镜像间的几何均距。

同理,可写出 u_b 和 u_c 的方程式。三个方程式用矩阵表示:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_d & \alpha_m & \alpha_m \\ \alpha_m & \alpha_d & \alpha_m \\ \alpha_m & \alpha_m & \alpha_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

式中,

$$\alpha_d = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{H_{sm}}{r} \text{ (km/F)} \quad (2.32)$$

$$\alpha_m = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{H_{mm}}{D_m} \text{ (km/F)} \quad (2.33)$$

α 系数矩阵称为电位系数矩阵,一般是对称方阵,在三相导线整换位循环条件下,三个对角线元素相等,非对角线元素全部相同。

由式(2.31)可求得

$$\begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_d & \beta_m & \beta_m \\ \beta_m & \beta_d & \beta_m \\ \beta_m & \beta_m & \beta_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \text{ (C/km)} \quad (2.34)$$

式中 β 系数矩阵是电位系数矩阵的逆矩阵。

对三相导线有整换位循环的特殊情况,不难求出 β 矩阵各元素的一般式:

$$\beta_d = \frac{\alpha_d + \alpha_m}{(\alpha_d - \alpha_m)(\alpha_d + 2\alpha_m)} \text{ (F/km)} \quad (2.35)$$

$$\beta_m = \frac{-\alpha_m}{(\alpha_d - \alpha_m)(\alpha_d + 2\alpha_m)} \text{ (F/km)} \quad (2.36)$$

《电磁场原理》课程中已详细研究了 β 矩阵与多导体系统部分电容的关系,现针对三相线路再作简单的讨论。整换位循环三相导线的部分电容如图 2.7(a) 所示,其中 C_0 为三相导线对地的部分电容, C_m 为三相导线之间的部分电容。根据该图可知

$$\begin{aligned} q_a &= C_0 u_a + C_m (u_a - u_b) + C_m (u_a - u_c) \\ &= (C_0 + 2C_m) u_a - C_m u_b - C_m u_c \\ &= C_s u_a - C_m u_b - C_m u_c \end{aligned} \quad (2.37)$$

其中, $C_s = C_0 + 2C_m$ 。

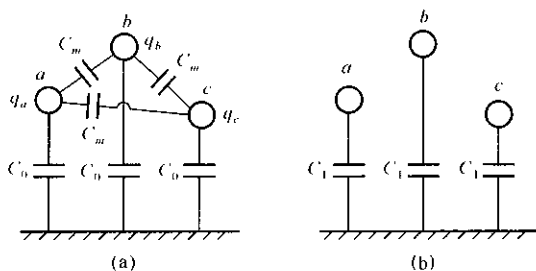


图 2.7 三相线路电容

(a) 部分电容; (b) 正序等值

同理,可写出 q_b 和 q_c 的方程式。此三个方程式用矩阵表示:

$$\begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_s & -C_m & -C_m \\ -C_m & C_s & -C_m \\ -C_m & -C_m & C_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (\text{C/m}) \quad (2.38)$$

与式(2.34)比较可知: $C_s = \beta_d, C_m = -\beta_m$ 。由于 $C_s = C_0 + 2C_m$, 所以可得 $C_0 = C_s - 2C_m = \beta_d + 2\beta_m$ 。计及式(2.35)和(2.36),可得到部分电容:

$$C_0 = \frac{1}{\alpha_d + 2\alpha_m} \quad (2.39)$$

$$C_m = \frac{\alpha_m}{(\alpha_d - \alpha_m)(\alpha_d + 2\alpha_m)} \quad (2.40)$$

将式(2.32)、(2.33)和 $2\pi\epsilon_0 = 10^{-6}/18$ 代入上两式,可得

$$C_0 = \frac{10^{-6}}{18 \ln \frac{H_{sm} H_{mm}^2}{r D_m^2}} \quad (\text{F/km}) \quad (2.41)$$

$$C_m = \frac{\ln \frac{H_{mm}}{D_m}}{18 \ln \frac{D_m H_{sm} \ln \frac{H_{sm} H_{mm}^2}{r D_m^2}}}{\ln \frac{H_{sm} H_{mm}^2}{r D_m^2}} \times 10^{-6} \quad (\text{F/km}) \quad (2.42)$$

现在讨论三相线路所加的电压满足 $u_a + u_b + u_c = 0$ 时,每相的等值电容。在这种情况下式(2.38)可简化为

$$q_a = (C_0 + 2C_m)u_a - C_m(u_b + u_c) = (C_0 + 3C_m)u_a = C_1 u_a \quad (2.43)$$

$$q_b = C_1 u_b \quad (2.44)$$

$$q_c = C_1 u_c \quad (2.45)$$

式中, $C_1 = C_0 + 3C_m$ 称为 $u_a + u_b + u_c = 0$ 时,三相线路每相的等值电容或正序电容。

式(2.43)、(2.44)和(2.45)说明图 2.7(a) 可以用图 2.7(b) 等值,在等值

图中,各相导线只有对地电容 C_1 ,各相之间没有耦合电容。因此,在三相交流电压对称时,可以取其一相进行计算。需要指出,在 $u_a + u_b + u_c \neq 0$ 的情况下,上三式是不成立的。

应用式(2.41)和(2.42),正序电容可表示为

$$C_1 = \frac{10^{-6}}{18 \ln \frac{D_m H_{sm}}{r H_{mm}}} (\text{F/km}) \quad (2.46)$$

对于各种电压等级的架空线路,都有 $H_{sm} \approx H_{mm}$,所以用下式计算 C_1 是足够准确的:

$$C_1 \approx \frac{10^{-6}}{18 \ln \frac{D_m}{r}} (\text{F/km}) \quad (2.47)$$

频率为 50Hz 时相应的正序电纳为

$$b_1 = 2\pi f C_1 = \frac{17.45}{\ln \frac{D_m}{r}} \times 10^{-6} (\text{S/km}) \quad (2.48)$$

分裂导线的采用也改变了导线周围的电场分布,等效地增大了导线半径,从而增大了每相导线的电纳。使用分裂导线的架空线路,也可以用半径为 r_{eq} (见式 2.26) 的等值单导线来计算电容参数,所以只要将式(2.41)、(2.42)、(2.47) 和 (2.48) 中的 r 换为 r_{eq} ,就可求得相应的电容和电纳(分裂导线的电纳 b_1 与分裂数的关系参见图 2.8)。

具有避雷线的架空线路,各相导线与接地的避雷线之间均有部分电容,而部分电容 C_m 和 C_0 因受避雷线的影响都

将发生变化。这些部分电容可用上述方法分析,只是复杂一些。不过,在 $u_a + u_b + u_c = 0$ 的情况下,每相的正序电容和正序电纳变化很小,仍可用式(2.47) 和(2.48) 计算。

同一杆塔上有多回三相线路时,因各回线路的各相之间都有部分电容耦合,所以分析起来相当复杂。但是,在各回线路都满足 $u_a + u_b + u_c = 0$ 的条件时,各回线路的正序电容和正序电纳也还可以用式(2.47) 和(2.48) 计算,误差不大。

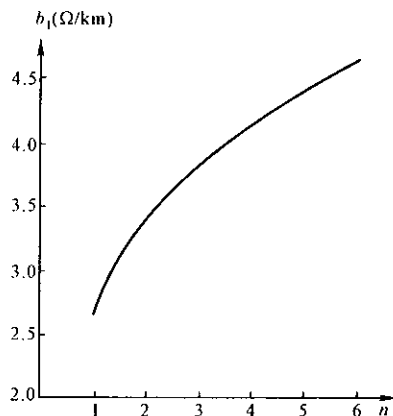


图 2.8 b_1 与分裂数的关系

关于电缆线路的电容,因不易计算,一般通过测量取得,或利用产品手册提供的典型数据。电缆的横向几何尺寸很小,绝缘的介电常数较大,所以它的电容比架空线大得多。例如 110kV、185mm² 的电缆, $b_1 \approx 72 \times 10^{-6} \text{S/km}$, 而普通架空线路的 $b_1 \approx 2.58 \times 10^{-6} \text{S/km}$, 两者相差 20 多倍。

【例 2.1】 某一 220kV 架空线路, 三相导线水平排列, 有关尺寸如图 2.9 所示, 导线采用轻型钢芯铝绞线 LGJQ-500, 直径 30.16mm。试计算该线路单位长度的正序阻抗和电容。

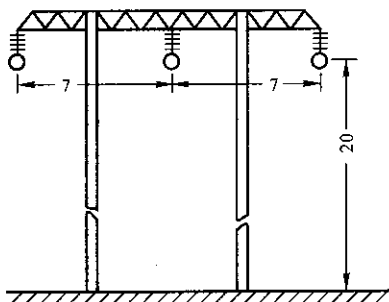


图 2.9 220kV 线路杆塔示意图
(尺寸单位: m)

【解】(1) 计算正序阻抗

每相电阻:

$$r_1 = \frac{\rho}{S} = \frac{31.2}{500} = 0.0624 (\Omega/\text{km})$$

三相导线间的几何均距:

$$D_m = \sqrt[3]{7 \times 7 \times 14} = 8.82 (\text{m})$$

每相正序电抗:

$$x_1 = 0.06283 \ln \frac{8.82}{15.08 \times 10^{-3}} + 0.0157 = 0.416 (\Omega/\text{km})$$

(2) 计算电容

根据图 2.9 的尺寸可得

$$H_{11} = H_{22} = H_{33} = 40 (\text{m})$$

$$H_{12} = H_{23} = \sqrt{40^2 + 7^2} = 40.61 (\text{m})$$

$$H_{31} = \sqrt{40^2 + 14^2} = 42.38 (\text{m})$$

$$H_{sm} = \sqrt[3]{H_{11}H_{22}H_{33}} = 40 (\text{m})$$

$$H_{mm} = \sqrt[3]{H_{12}H_{23}H_{31}} = 41.19 (\text{m})$$

按式(2.41)、(2.42) 计算各相导线对地部分电容:

$$C_0 = \frac{10^{-6}}{18 \ln \frac{40 \times 41.19^2}{15.08 \times 10^{-3} \times 8.82^2}} = 5.067 \times 10^{-9} (\text{F/km})$$

各相间的部分电容:

$$C_m = \frac{\ln \frac{41.19}{8.82} \times 10^{-6}}{18 \ln \frac{8.82 \times 40}{15.08 \times 10^{-3} \times 41.19}} \times \ln \frac{40 \times 41.19^2}{15.08 \times 10^{-3} \times 8.82^2}$$

$$= 1.231 \times 10^{-9} (\text{F/km})$$

每相正序电容:

$$C_1 = C_0 + 3C_m = 8.76 \times 10^{-9} (\text{F/km})$$

用近似式(2.47)计算:

$$C_1 = \frac{10^{-6}}{18 \ln \frac{8.82}{15.08 \times 10^{-3}}} = 8.72 \times 10^{-9} (\text{F/km})$$

误差约 0.5%。

正序电纳:

$$b_1 = 100\pi \times 8.76 \times 10^{-9} = 2.75 \times 10^{-6} (\text{S/km})$$

【例 2.2】 例 2.1 的 220kV 线路改用二分裂导线, 每相用两根 LGJQ-240, 每根外直径 21.88mm, 两根之间的距离 $d = 400\text{mm}$ 。试计算该线路的单位长度正序阻抗和电容。

【解】 每相电阻:

$$r_1 = \frac{1}{2} \frac{\rho}{S} = \frac{1}{2} \frac{31.2}{240} = 0.065 (\Omega/\text{km})$$

分裂导线的等值半径:

$$r_{eq} = \sqrt{rd} = \sqrt{21.88 \times 0.5 \times 400} = 66.15 (\text{mm})$$

正序电抗:

$$x_1 = 0.06283 \ln \frac{8.82}{0.06615} + \frac{0.0157}{2} = 0.315 (\Omega/\text{km})$$

与例 2.1 相比, x_1 约减小 25%; 线路的其他尺寸同例 2.1, $H_{sm} = 40\text{m}$, $H_{mm} = 41.19(\text{mm})$ 。

各相对地电容:

$$C_0 = \frac{10^{-6}}{18 \ln \frac{40 \times 41.19^2}{0.06615 \times 8.82^2}} = 5.856 \times 10^{-9} (\text{F/km})$$

相间电容:

$$\begin{aligned} C_m &= \frac{\ln \frac{41.19}{8.82} \times 10^{-6}}{18 \ln \frac{8.82 \times 40}{0.06615 \times 41.19} \times \ln \frac{40 \times 41.19^2}{0.06615 \times 8.82^2}} \\ &= 1.856 \times 10^{-9} (\text{F/km}) \end{aligned}$$

正序电容:

$$C_1 = C_0 + 3C_m = 11.42 \times 10^{-9} (\text{F/km})$$

与例 2.1 比较, C_0 增大 15%, C_m 增大 50%, C_1 增大 30%。

正序电纳:

$$b_1 = 100\pi C_1 = 3.59 \times 10^{-6} (\text{S/km})$$

2.1.5 电力线路的稳态方程和等值电路

电力线路正常运行时,三相电压和电流都可认为是完全对称的。前面已讨论过,在这种条件下,每一单位长度的线路,各相都可以用等值阻抗 $Z_1 = r_1 + jx_1$ 和等值对地导纳 $Y_1 = g_1 + jb_1$ 来表示,因此可以取其一相进行分析。下面将讨论线路单相回路的方程式及其等值电路。

1. 稳态方程

电力线路是分布参数的均匀传输线,线路任一处无限小长度 dx 都有阻抗 $Z_1 dx$ 和并联导纳 $Y_1 dx$,如图 2.10 所示。

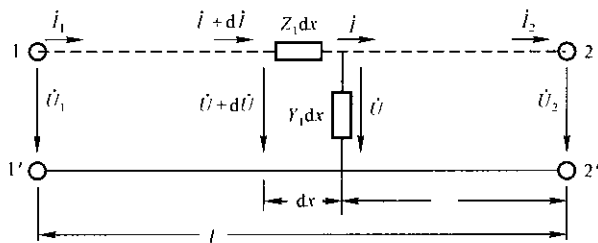


图 2.10 分布参数线路

设离线路末端(2 端) x 处的电压和电流为 \dot{U} 和 \dot{I} , $x + dx$ 处为 $\dot{U} + d\dot{U}$ 和 $\dot{I} + d\dot{I}$, 则 dx 段的电压降 $d\dot{U}$ 和 dx 两侧电流增量 $d\dot{I}$ 可表示为

$$d\dot{I} = \dot{U} Y_1 dx \quad (2.49)$$

$$d\dot{U} = (\dot{I} + d\dot{I}) Z_1 dx \quad (2.50)$$

略去二阶无限小量后可得

$$\frac{d\dot{I}}{dx} = \dot{U} Y_1 \quad (2.51)$$

$$\frac{d\dot{U}}{dx} = \dot{I} Z_1 \quad (2.52)$$

上两式分别对 x 求导数, 则得

$$\frac{d^2 \dot{I}}{dx^2} = Y_1 \frac{d\dot{U}}{dx} = Z_1 Y_1 \dot{I} \quad (2.53)$$

$$\frac{d^2 \dot{U}}{dx^2} = Z_1 \frac{d\dot{I}}{dx} = Z_1 Y_1 \dot{U} \quad (2.54)$$

这就是稳态时分布参数线路的微分方程式。已知线路末端电压 \dot{U}_2 和电流 \dot{I}_2 时, 方程式(2.53) 和(2.54) 的解为

$$\dot{U} = \dot{U}_2 \cosh \gamma x + \dot{I}_2 Z_c \sinh \gamma x \quad (2.55)$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_2}{Z_c} \sinh \gamma x + \dot{I}_2 \cosh \gamma x \quad (2.56)$$

式中, $Z_c = \sqrt{\frac{Z_1}{Y_1}}$, $\gamma = \sqrt{Z_1 Y_1} = \beta + j\alpha$ 。

Z_c 称为线路特征阻抗或波阻抗(Ω); γ 称为线路传播系数, 实部 β 称为衰减系数, 虚部 α 称为相位系数; γ 的量纲为 $1/\text{km}$, α 的单位为 rad/km (弧度/公里)。

《电路原理》课程曾讨论过, 无损耗线路($g_1 = 0, r_1 = 0$) 末端接有纯有功功率负荷, 且功率 $P = P_c = U_2^2/Z_c$ (称为自然功率) 时, 沿线各点的电压和电流有如下特点:

$$\dot{U} = \dot{U}_2 e^{j\alpha x} \quad (2.57)$$

$$\dot{I} = \dot{I}_2 e^{j\alpha x} \quad (2.58)$$

即全线电压有效值相等, 电流有效值相等; 而且同一点电压和电流都是同相的, 即通过各点的无功功率都为零。这是由于线路的每一单位长度中电感消耗的无功功率与接地电容提供的无功功率完全平衡。另外, 各点电压的相位都不相同, 从线路末端起每公里相位前移 α 弧度, 如图 2.11(b) 所示; 电流相位的变化和电压相同。

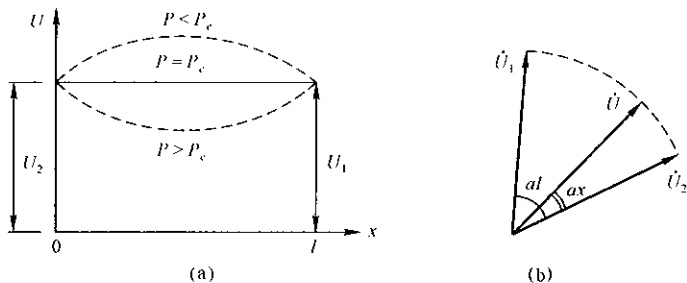


图 2.11 线路沿线电压变化情况

(a) 电压有效值; (b) $P = P_c$ 时电压相量

50Hz 的三相架空线路, $x_1 b_1 \approx 1.1 \times 10^{-6} (1/\text{km}^2)$, 所以 $\alpha = \sqrt{x_1 b_1} \approx 1.05 \times 10^{-3} (\text{rad}/\text{km}) \approx 0.06 (\text{deg}/\text{km}, \text{度}/\text{公里})$, 即每 100 公里相位改变 6° 。所以 50Hz 架空线的波长 $\lambda = 2\pi/\alpha \approx 6000 (\text{km})$ 。线路长度与波长可比时, 称为远距离输电线(例如架空线长度为 $500 \sim 600 \text{km}$ 以上)。因为电缆线路的 $x_1 b_1$ 乘积随额定电压和芯线截面积的不同, 变化范围比较大, 且比架空线路要大好几倍, 所以电缆线路的波长比架空线路要短得多。由于经济上和技术上的原因, 故到现在为止还不能用电缆线路作交流远距离输电。

在线路输送功率不等于自然功率时, 线路各点电压有效值将不再相同。设线路两端有电源保持各端口的电压不变, 则当输电功率大于自然功率时, 线路中间的电压将降低(图 2.11(a)), 线路两端都要输入无功功率; 如果输电功率小于自然功率, 则线路中间电压将升高, 两端电源都要从线路吸取无功功率。这两种现象随线路长度的增大而愈加严重。所以, 长输电线路必须采取措施解决这个问题。至于短线路, 这种现象就不明显, 其输电功率一般都可大于自然功率, 且轻负荷时线路中间电压的上升值一般也不会超过允许范围。

自然功率 P_c 常用来衡量长距离输电线路的输电能力, 220kV 及以上电压等级的架空线路的输电能力大致接近于自然功率。远距离输电线路由于运行稳定性的限制, 输电能力往往达不到自然功率, 因此必须采取措施加以提高。表 2.1 列出超高压架空线路的波阻抗和自然功率的典型值。

表 2.1 架空线路波阻抗和自然功率

额定电压 (kV)	导线分裂数	$Z_c (\Omega)$	$P_c (\text{MW}, \text{三相})$
220	1	380	127
220	2	300	160
330	2	300	360
500	3	280	893
500	4	260	962

2. 等值电路

在电力系统分析中, 一般只考虑电力线路两侧端口的电压和电流, 把电力线路作为无源的双口网络来处理。将线路长度 $l (\text{km})$ 代入式 (2.55) 和 (2.56) 即得到线路的双口网络方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma l & Z_c \sinh \gamma l \\ \frac{1}{Z_c} \sinh \gamma l & \cosh \gamma l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (2.59)$$

用双口网络传输参数 A 、 B 、 C 和 D 表示时

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

式中, $A = D = \cosh \gamma l$; $B = Z_c \sinh \gamma l$; $C = \frac{1}{Z_c} \sinh \gamma l$ 。

上述双口网络可用 π 型或 T 型等值电路表示, 但 T 型等值电路多一个中间节点, 在电力系统计算中一般不采用它。电力线路的 π 型等值电路如图 2.12 所示, 图中两端的并联支路用导纳 $Y/2$ 表示, 因为 $A = D$ (对称网络), 所以两者相等。等值电路的参数与传输参数的关系为

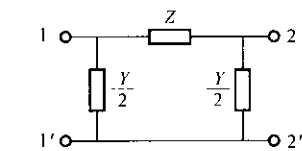


图 2.12 电力线路的等值电路

$$Z = B = Z_c \sinh \gamma l \quad (2.61)$$

$$\frac{Y}{2} = \frac{A - 1}{B} = \frac{\cosh \gamma l - 1}{Z_c \sinh \gamma l} \quad (2.62)$$

由于 $Z_c = \sqrt{Z_1/Y_1} = Z_1/\gamma$ 或 γ/Y_1 , 所以上两式可表示为

$$Z = \frac{\sinh \gamma l}{\gamma l} Z_1 l = K_z Z_1 l \quad (2.63)$$

$$\frac{Y}{2} = \frac{2(\cosh \gamma l - 1)}{\gamma l \sinh \gamma l} \frac{Y_1 l}{2} = K_Y \frac{Y_1 l}{2} \quad (2.64)$$

式中

$$K_z = \frac{\sinh \gamma l}{\gamma l} \quad (2.65)$$

$$K_Y = \frac{2(\cosh \gamma l - 1)}{\gamma l \sinh \gamma l} = \frac{\tanh(\gamma l/2)}{\gamma l/2} \quad (2.66)$$

式(2.63)和(2.64)表明, π 型等值电路中的串联阻抗 Z 等于线路单位长度阻抗的总和($Z_1 l$)乘以系数 K_z , 两端的并联导纳 $Y/2$ 等于线路单位长度导纳总和的一半($Y_1 l/2$)乘以系数 K_Y 。这两个系数可称为 π 型等值电路阻抗和导纳的修正系数, 或称金耐黎系数。

将正弦和正切双曲线函数展开为级数

$$\sinh \gamma l = \gamma l + \frac{(\gamma l)^3}{3!} + \frac{(\gamma l)^5}{5!} + \frac{(\gamma l)^7}{7!} + \dots \quad (2.67)$$

$$\tanh \frac{\gamma l}{2} = \frac{\gamma l}{2} - \frac{1}{3} \left(\frac{\gamma l}{2} \right)^3 + \frac{2}{15} \left(\frac{\gamma l}{2} \right)^5 - \frac{17}{315} \left(\frac{\gamma l}{2} \right)^7 + \dots \quad (2.68)$$

架空线路的 $\gamma \approx j10^{-3} (1/\text{km})$, 当线路长度小于 1000 km 时, $|\gamma l| < 1$; 电缆线路长度约小于 300 km 时, $|\gamma l| < 1$ 。在这种情况下, 上面两个级数收敛很快, 取它们的前两项就够了。取两级数的前两项代入式(2.65)和(2.66), 就可

得到修正系数的近似式:

$$K_z \approx 1 + \frac{(\gamma l)^2}{6} = 1 + \frac{Z_1 Y_1 l^2}{6} \quad (2.69)$$

$$K_Y \approx 1 - \frac{(\gamma l)^2}{12} = 1 - \frac{Z_1 Y_1 l^2}{12} \quad (2.70)$$

为了便于计算,可令

$$Z = K_z(r_1 l + jx_1 l) = k_r r_1 l + jk_x x_1 l \quad (2.71)$$

$$\frac{Y}{2} = K_Y \left(\frac{g_1 l}{2} + j \frac{b_1 l}{2} \right) = k_g \frac{g_1 l}{2} + jk_b \frac{b_1 l}{2} \quad (2.72)$$

将 K_z 和 K_Y 的近似式代入,可解得电阻、电抗、电导和电纳的修正系数:

$$k_r = 1 - \frac{l^2}{3} x_1 b_1 - \frac{l^2}{6} g_1 \left(\frac{x_1^2}{r_1} - r_1 \right) \quad (2.73)$$

$$k_x = 1 - \frac{l^2}{6} b_1 \left(x_1 - \frac{r_1^2}{x_1} \right) + \frac{l^2}{3} r_1 g_1 \quad (2.74)$$

$$k_g = 1 + \frac{l^2}{6} x_1 b_1 + \frac{l^2}{12} r_1 \left(\frac{b_1^2}{g_1} - g_1 \right) \quad (2.75)$$

$$k_b = 1 + \frac{l^2}{12} x_1 b_1 - \frac{l^2}{12} g_1 \left(2r_1 + g_1 \frac{x_1}{b_1} \right) \quad (2.76)$$

这四个系数都是实数。当线路并联电导 $g_1 = 0$ 时, k_g 可以不必计算,其他系数只剩下前两项,计算更为方便。

但架空线路长于 1000km,电缆线路长于 300km 时,仍要用式(2.65)和(2.66)计算修正系数。

当线路长度较短,例如架空线路短于 300km、电缆线路短于 50 ~ 100km 时,各修正系数均可取 1。

35kV 及更低电压的架空线路,由于线路短、电压低,并联导纳小,其中的电流比起端口电流可以略去不计,因而可以不计并联导纳。这样,等值电路就只有一个串联阻抗 $Z = Z_1 l$ 。

【例 2.3】 一长度为 600km 的 500kV 架空线路,使用 $4 \times \text{LGJQ-400}$ 四分裂导线, $r_1 = 0.0187\Omega/\text{km}$, $x_1 = 0.275\Omega/\text{km}$, $b_1 = 4.05 \times 10^{-6}\text{S}/\text{km}$, $g_1 = 0$ 。试计算该线路的 π 型等值电路的参数。

【解】(1) 准确计算

先计算系数 K_z 和 K_Y 。因要计算复数的双曲线函数,各数据要取 4 位有效值。

$$Z_1 = r_1 + jx_1 = 0.0187 + j0.275$$

$$= 0.2756 \angle 86.11^\circ (\Omega/\text{km})$$

$$Y_1 = jb_1 = 4.05 \times 10^{-6} \angle 90^\circ (\text{S}/\text{km})$$

$$\begin{aligned}
\gamma l &= \sqrt{Z_1 Y_1} l \\
&= 600 \sqrt{0.2756 \times 4.05 \times 10^{-6}} \angle (86.11^\circ + 90^\circ)/2 \\
&= 0.6339 \angle 88.06^\circ = 0.02146 + j0.6335 \\
e^{\gamma l} &= e^{0.02146} e^{j0.6335} = 1.0217 \angle 36.30^\circ \\
&= 0.8234 + j0.6049 \\
e^{-\gamma l} &= 1/(1.0217 \angle 36.30^\circ) = 0.9788 \angle -36.30^\circ \\
&= 0.7888 - j0.5795 \\
\sinh \gamma l &= 0.5(e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}) = 0.0173 + j0.5922 \\
&= 0.5924 \angle 88.33^\circ \\
K_z &= \frac{\sinh \gamma l}{\gamma l} = \frac{0.5924 \angle 88.33^\circ}{0.6339 \angle 88.06^\circ} \\
&= 0.9345 \angle 0.27^\circ \\
\cosh \gamma l &= 0.5(e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}) = 0.8061 + j0.0127 \\
K_Y &= \frac{2(\cosh \gamma l - 1)}{\gamma l \sinh \gamma l} \\
&= \frac{2(0.8061 + j0.0127 - 1)}{0.6339 \angle 88.06^\circ \times 0.5924 \angle 88.33^\circ} \\
&= \frac{0.3886 \angle 176.32^\circ}{0.3755 \angle 176.39^\circ} = 1.035 \angle -0.07^\circ
\end{aligned}$$

计算 π 型等值电路参数:

$$\begin{aligned}
Z &= K_z Z_1 l \\
&= 0.9345 \angle 0.27^\circ \times 0.2756 \angle 86.11^\circ \times 600 \\
&= 154.53 \angle 86.38^\circ \\
&= 9.76 + j154.2 (\Omega) \\
Y/2 &= K_Y (jb_1/2) l \\
&= 1.035 \angle -0.07^\circ \times 4.05 \times 10^{-6} \angle 90^\circ \times 300 \\
&= 1.258 \times 10^{-3} \angle 89.93^\circ \approx j1.258 \times 10^{-3} (S)
\end{aligned}$$

等值电路如图 2.13(a) 所示。

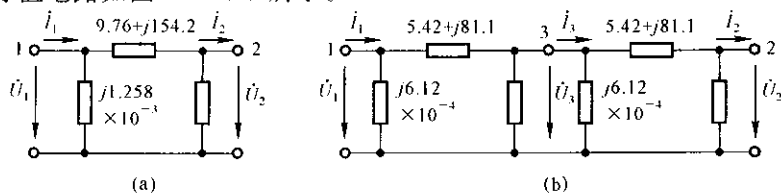


图 2.13 例 2.3 架空线路的等值电路

(a) 用一个 π 等值电路; (b) 用两个 π 等值电路

(2) 实用(近似) 计算

$$k_r = 1 - \frac{l^2}{3}x_1b_1 = 1 - \frac{600^2}{3} \times 0.275 \times 4.05 \times 10^{-6} \\ = 0.866$$

$$k_x = 1 - \frac{l^2}{6}b_1 \left(x_1 - \frac{r_1^2}{x_1} \right) = 0.933$$

$$k_b = 1 + \frac{l^2}{12}x_1b_1 = 1.033$$

$$Z = k_r r_1 l + j k_x x_1 l \\ = 0.866 \times 0.0187 \times 600 + j 0.933 \times 0.275 \times 600 \\ = 9.72 + j 153.9 (\Omega)$$

$$Y/2 = j 4.05 \times 10^{-6} \times 300 \times 1.033 = j 1.255 \times 10^{-3} (\text{S})$$

与准确计算比较,电阻误差 - 0.4%,电抗误差 - 0.12%,电纳误差 - 0.24%。本例线路长度小于 1000km,用实用公式计算已足够准确。

如果取 $K_\varepsilon = K_Y = 1$,则

$$Z = (r_1 + j x_1) l = 11.22 + j 165 (\Omega)$$

$$Y/2 = j b_1 l / 2 = j 1.215 \times 10^{-3} (\text{S})$$

这时,电阻误差达 15%,电抗误差 7%,电纳误差 - 3.4%。

本例的线路,如果要求计算线路中间点的电压和电流,则可将线路分为相等的两段,各用一个 π 型电路等值,如图 2.13(b) 所示。每个 π 型等值电路的参数计算如下:

$$k_r = 1 - \frac{300^2}{3}x_1b_1 = 0.967$$

$$R = k_r r_1 \times 300 = 5.42 (\Omega)$$

$$k_x = 1 - \frac{300^2}{6}b_1 \left(x_1 - \frac{r_1^2}{x_1} \right) = 0.983$$

$$X = k_x x_1 \times 300 = 81.1 (\Omega)$$

$$k_b = 1 + \frac{300^2}{12}x_1b_1 = 1.008$$

$$B/2 = k_b b_1 \times 150 = 6.12 \times 10^{-4} (\text{S})$$

由于每段线路不太长,修正系数都接近 1(k_r 差别大些,约 3%),所以可以不作修正。

2.2 变压器

电力变压器是电力系统的重要元件,它的结构类型很多,这在第一章中已作了简要介绍。在进行电力系统分析时,主要关心的是电力变压器电和磁的特性。下面从电磁特性出发,将常用的电力变压器作分类简述。

1. 按三相变压器磁路系统分类

按这种分类可分为单相变压器组和三相变压器两类。单相变压器组是由三个单相变压器连接而成,各相的磁路(铁心)是完全分开的。三相变压器普遍采用三柱式铁心,如图 2.14 所示,三相的磁路是互相关联的。在电压和电流三相对称时,由于三相铁心柱上作用的磁势向量之和为零,所以它的电磁特性与单相变压器组相同;但当不对称运行时,三相磁势向量和不等于零,将使各绕组的漏磁通分布发生变化,这种变化还与三相绕组的连接方式有关(详见第 4 章)。三相变压器与同容量单相变压器组相比价格要低很多,所以得到优先采用。只有在变压器容量很大,制造或运输有困难的场合,才考虑用单相变压器组。

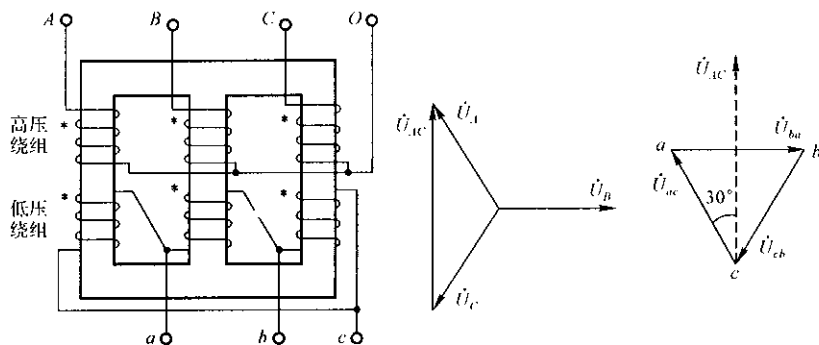


图 2.14 三相三柱式 $Y_0/\Delta-11$ 变压器及空载电压相量图

2. 按三相绕组连接方式分类

双绕组变压器的连接方式主要有: $Y_0/\Delta-11$, $Y/\Delta-11$, Y_0/Y_0-12 和 Δ/Y_0-11 等。其中第一个符号表示高压绕组的接法,斜线后的符号为低压绕组的接法,最后的数字表示高、低压空载电压的相位关系。符号 Y 表示三相绕组为星形接法,而且中性点不引出,用于中性点不接地的场合; Y_0 也是星形接法,但有中性点出线,用于中性点直接接地或经过阻抗接地的场合; Δ 表示三角形接线。高、低压侧空载电压的相位关系,用时钟方法表示。它以高压侧线电

压(或相电压)的相量作为长针,并固定在钟面数字 12 上,而以低压侧同名的线电压(或相电压)的相量作为短针。这样,钟面上的时数就表示了相位的关系。例如图 2.14 的 Y_0/Δ -11 变压器,低压侧线电压 \dot{U}_{ac} 比高压侧 \dot{U}_{AC} 超前 30° , 所以称为“11(时)点”接法。又如 Y_0/Y_0 -12 表示相位关系是 12 时,即两侧同名相电压或线电压是同相的。三绕组变压器的连接方式主要有 $Y_0/Y_0/\Delta$ -12. 11, $Y_0/\Delta/\Delta$ -11. 11 两种,另外 $Y_0/Y_0/Y_0$ -12. 12 的接法也有少量使用。这种表示法中第一、二、三个符号依次表示高压、中压、低压绕组的接法,第一个数字表示高—中压空载电压相位的时数,第二个数字为高—低压相位的时数。

电力变压器中有一侧的三相绕组为 Δ 接法时,能有效地削弱电压器中的三次谐波分量,所以得到广泛的使用。

对于各种接法的电力变压器,制造厂都不提供各侧绕组的匝数比,实用上可由各侧的额定(线)电压计算变比。

3. 按电磁耦合的方式分类

按这种分类可分为普通变压器和自耦变压器两类。普通变压器高、低压绕组间只有磁的耦合关系,自耦变压器除了磁耦合外,还有电的联系。当变比小于 $3 \sim 4$ 时自耦变压器比同容量普通双绕组变压器要经济,但需用在两侧电力网的中性点都是直接接地的场合。自耦变压器一般还带有磁耦合的另一个低压绕组,采用 $Y_0/Y_0/\Delta$ -12. 11 连接方式,个别也有使用所谓“全星形”的 $Y_0/Y_0/Y_0$ -12. 12 接法,但低压绕组的容量一般只有额定容量的 $30\% \sim 50\%$ (与高、中压侧变比有关)。

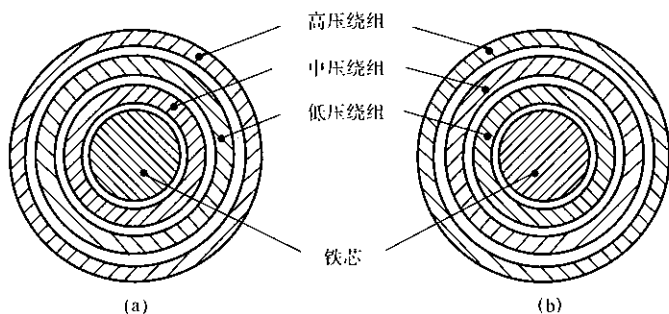


图 2.15 三绕组降压和升压变压器绕组布置示意图(横截面)
(a) 升压型;(b) 降压型

4. 按用作升压或降压分类

按这种分类可分为升压变压器和降压变压器两类。双绕组的升压变压器

和降压变压器结构上并无区别,只是额定电压不同。三绕组变压器则除了额定电压有所不同外,绕组的布置也不相同(见图 2.15)。升压变压器由于功率是从低压侧送往高、中压侧,所以希望低压绕组与高压和中压绕组都有紧密的耦合,以减小电压降落,因此将低压绕组放在高、中压绕组之间[见图 2.15(a)]。降压变压器的功率流向是自高压至中、低压侧,一般中压侧负荷较大,所以中、低压绕组位置对调[见图 2.15(b)],使高、中压绕组有较强的磁耦合。

5. 按调压方式分类

按这种分类可分为普通分接头的变压器和有载调压变压器两类。普通电力变压器的高压绕组(三绕组变压器还包括中压绕组)除了主接头外,还有若干个分接头,并设有切换开关用以选接一个合适的接头。容量为 6300kVA 及以下的变压器,高压绕组只设 $U_N \pm 5\%$ 两个分接头。 U_N 为主接头的额定电压,通常所说的变压器高压侧额定电压即指主接头的额定电压。大容量变压器的高压绕组一般有四个分接头,它们的工作电压(空载)为 $U_N \pm 2 \times 2.5\%$;中压侧绕组有两个分接头: $U_{2N} \pm 5\%$, U_{2N} 为中压主接头额定电压。根据需要,有四个分接头的还可选用如下两个方案: (1) $U_N + (2.5\%, 0, -2.5\%, -5\%, -7.5\%)$; (2) $U_N + (0, -2.5\%, -5\%, -7.5\%, -10\%)$ 。有两个分接头的还可选 $U_N + (0, -5\%, -10\%)$ 。不过,接在 -7.5% 分接头运行时,低压侧额定电流要降低 2.5% ,接在 -10% 时要降低 5% 。

普通变压器的分接头切换开关只允许在不加电压的情况下由手动操作切换,所以必须事先选择适当的分接头,使运行时变压器的输出电压保持在所要求的范围内。

有载调压变压器高压绕组的分接头切换开关,能够在变压器带负荷运行时进行切换,所以负荷变化时能够随时调整变压器的输出电压,它特别适用于电压变化范围很大的场合。同时,这种切换开关除了在箱体旁有手动操作机构外,还设有电动操作机构,可以由远方操作,便于实现自动控制电压。这种变压器高压绕组的调节范围一般有 $U_N \pm 3 \times 2.5\%$ (六个分接头) 和 $U_N \pm 4 \times 2\%$ (八个分接头) 两种。在某些特殊情况下,调节范围还可做得更大。有载调压变压器价格较高,切换开关动作寿命尚待提高,所以目前只在确有必要的场合使用。

还有一种有载调节变压器,它不但能调节输出电压的大小,还可以调节电压的相位,通常称作移相变压器。它用于需要通过改变电压相位来控制有功功率的特殊场合,这里不作具体介绍。

在电力系统计算中,主要着眼于变压器各侧电压、电流和功率的关系,所以一般常用等值电路来描述。本章将讨论正常运行(即三相对称稳态运行)情

况下,变压器的等值电路,至于不对称运行方式的等值电路将在第4章讨论。

电力系统正常运行状态的计算,只需对一相进行计算就可以了,这就需要建立变压器的单相等值电路。为此,将变压器接成三角形的三相绕组用星形接法的来等值,也就是将所有变压器都看作 Y_0/Y_0-12 或 $Y_0/Y_0/Y_0-12, 12$ 接法,当然这种等值必须保证变压器内部的功率损耗和电压降落相同。这样处理并不会影响变压器外电力网中电压和电流的大小,以及两者之间的相位角即功率因数角,因而也不会改变有功功率和无功功率的大小,所以不会影响电力系统计算结果的正确性。

2.2.1 双绕组变压器等值电路

在电机学课程中,已详细推导出正常运行时三相变压器的单相等值电路,如图2.16(a)所示。该图是归算到1侧的等值电路, R_1 和 X_1 为1侧绕组的电阻和漏抗, R'_2 和 X'_2 为2侧绕组电阻和漏抗的归算值,它与实际值的关系为 $R'_2 = k^2 R_2$, $X'_2 = k^2 X_2$, k 为变比,可用变压器两侧的额定电压 U_{1N} 和 U_{2N} 计算,即 $k = U_{1N}/U_{2N}$ 。2侧电压和电流归算值与实际值关系分别为 $\dot{U}'_2 = k\dot{U}_2$, $\dot{I}'_2 = \dot{I}_2/k$ 。

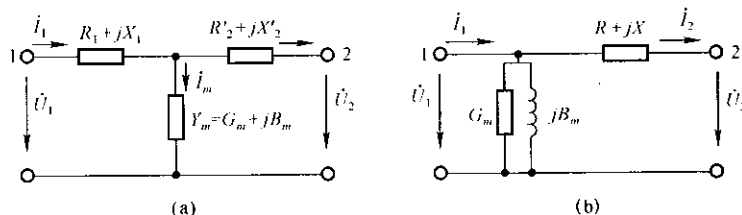


图 2.16 双绕组变压器单相等值电路

电力变压器的励磁电流 I_m 很小,一般约为额定电流的 $0.5\% \sim 2\%$,新产品大都小于 1% 。为了简化计算,可将励磁支路 Y_m 移到外侧(一般移至近电源的一侧)。因此得到图2.16(b)的等值电路,其中 $R = R_1 + R'_2$, $X = X_1 + X'_2$,简称变压器的绕组电阻和漏抗。变压器产品均提供短路试验和空载试验的数据,根据这些数据就可决定 R, X, G_m 和 B_m 四个参数。

1. 短路试验与绕组的电阻和漏抗

变压器的短路试验是将一侧(例如2侧)三相短接,在另一侧(1侧)加上可调节的三相对称电压,逐渐增加电压使电流达到额定值 I_{1N} (2侧为 I_{2N})。这时测出三相变压器消耗的总有功功率称为短路损耗功率 P_k ,同时测得1侧所加的线电压值 U_k ,称为短路电压。通常用额定电压的百分数表示:

$$U_k\% = \frac{U_{1k}}{U_{1N}} \times 100 \quad (2.77)$$

对于 35kV 的双绕组变压器 $U_k\% \approx 6.5 \sim 8$; 110kV 变压器 $U_k\% \approx 10.5$; 220kV 的 $U_k\% \approx (12 \sim 14)$ 。

短路电压比额定电压低很多,这时的励磁电流及铁心损耗可以忽略不计,所以短路损耗 P_k 可看作是额定电流时高低压三相绕组的总铜耗,即

$$P_k = 3I_{1N}^2 R \quad (2.78)$$

三相变压器的额定容量定义为 $S_N = \sqrt{3}U_{1N}I_{1N} = \sqrt{3}U_{2N}I_{2N}$, 因此有

$$P_k = 3 \left(\frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} \right)^2 R = \frac{S_N^2}{U_{1N}^2} R \quad (2.79)$$

通常 S_N 用 MVA、 U_{1N} 用 kV、 P_k 用 kW 表示,由上式可推得

$$R = \frac{P_k}{1000} \times \frac{U_{1N}^2}{S_N^2} (\Omega) \quad (2.80)$$

电力变压器绕组的漏抗 X 比电阻 R 大许多倍,例如 110kV、2.5MVA 的变压器, $X/R \approx 9$, 110kV、25MVA 的变压器 $X/R \approx 16$, 相应的 $\sqrt{R^2 + X^2}/X$ 分别约为 1.006 和 1.002, 因此短路电压和 X 上的电压降相差甚小。所以

$$U_k\% = \frac{U_{1k}}{U_{1N}} \times 100 = \frac{\sqrt{3}I_{1N}X}{U_{1N}} \times 100 = \frac{S_N}{U_{1N}^2} X \times 100 \quad (2.81)$$

由此可得

$$X = \frac{U_k\%}{100} \frac{U_{1N}^2}{S_N} (\Omega) \quad (2.82)$$

2. 空载试验和励磁导纳

变压器空载试验是将一侧(例如 2 侧)三相开路,另一侧(1 侧)加上线电压为额定值 U_{1N} 的三相对称电压,测出三相有功空载损耗 P_0 和空载电流 I_{10} , 即励磁电流 I_m 。空载电流常用百分数表示: $I_0\% = (I_{10}/I_{1N}) \times 100$ 。

由于空载电流很小,1 侧绕组的电阻损耗 $I_{10}^2 R_1$ [见图 2.15(a)] 可以略去不计, P_0 非常接近于铁心损耗,所以励磁支路的电导

$$G_m = \frac{P_0}{U_{1N}^2} \times 10^{-3} (S) \quad (2.83)$$

式中, P_0 用 kW、 U_{1N} 用 kV 表示。

励磁支路导纳中,电导 G_m 远小于电纳 B_m ,空载电流与 B_m 支路中的电流有效值几乎相等,因此

$$I_0\% = \frac{I_{10}}{I_{1N}} \times 100 = \frac{U_{1N}B_m}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{I_{1N}} \times 100 = \frac{U_{1N}^2}{S_N} B_m \times 100 \quad (2.84)$$

所以

$$B_m = \frac{I_0\%}{100} \times \frac{S_N}{U_{1N}^2} \quad (\text{S}) \quad (2.85)$$

本书中复导纳定义为 $Y = G + jB$, 所以感纳取负值, 容纳取正值。变压器的 B_m 是感纳, 式(2.85) 只表示它的大小。

以上推导了归算到 1 侧的变压器参数计算式, 将式(2.80) 至(2.85) 各式中的 U_{1N} 换为 U_{2N} , 即得到归算到 2 侧的参数值。

【例 2.4】 一台 242/13.8kV, 容量 80MVA 的三相双绕组升压变压器, 短路电压 $U_k\% = 13$, 短路损耗 $P_k = 430\text{kW}$, 空载电流 $I_0\% = 2$, 空载损耗 $P_0 = 78\text{kW}$ 。试作出单相等值电路并求归算到低压侧的阻抗和并联导纳。

【解】 绕组电阻:

$$R = \frac{P_k}{1000} \times \frac{U_{2N}^2}{S_N^2} = \frac{430}{1000} \times \frac{13.8^2}{80^2} = 0.0128(\Omega)$$

绕组电抗:

$$X = \frac{U_k\%}{100} \times \frac{U_{2N}^2}{S_N} = \frac{13}{100} \times \frac{13.8^2}{80} = 0.309(\Omega)$$

励磁支路电导:

$$G_m = \frac{P_0}{U_{2N}^2} \times 10^{-3} = \frac{78}{13.8^2} \times 10^{-3} = 4.1 \times 10^{-4}(\text{S})$$

励磁支路电纳:

$$B_m = \frac{I_0\%}{100} \times \frac{S_N}{U_{2N}^2} = \frac{2}{100} \times \frac{80}{13.8^2} = 8.4 \times 10^{-3}(\text{S})$$

等值电路见图 2.17。

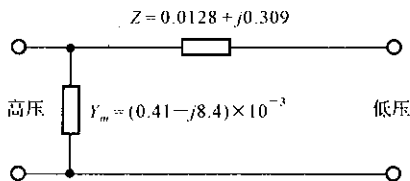


图 2.17 例 2.4 变压器的等值电路图

2.2.2 三绕组变压器等值电路

正常运行时三绕组变压器的单相等值电路如图 2.18(a) 所示。图中 R_1 和 X_1 为 1 侧绕组的电阻和等值漏抗; R_2 、 X_2 和 R_3 、 X_3 分别为归算到 1 侧的 2 侧和 3 侧绕组电阻和等值漏抗; 变比 $k_{12} = U_{1N}/U_{2N}$, $k_{13} = U_{1N}/U_{3N}$; 所以这是参数

归算到 1 侧的等值电路。图 2.18(b) 将励磁并联支路移到端部, 是电力系统分析中常采用的等值电路。

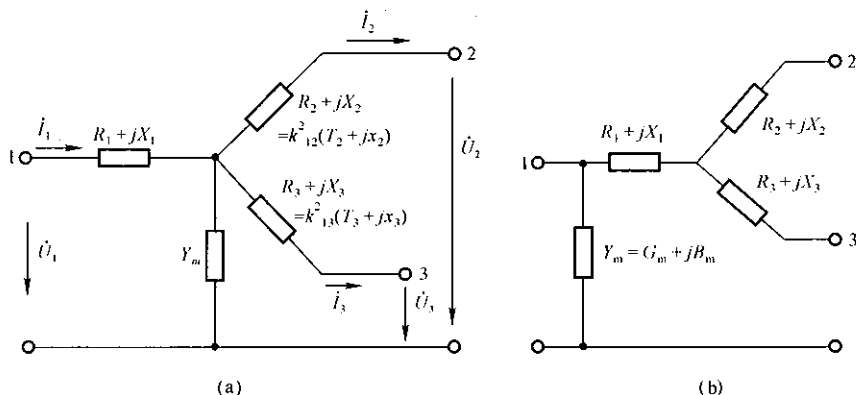


图 2.18 三绕组变压器单相等值电路

三绕组变压器中同相的三个绕组漏磁通分布比较复杂, 每个绕组的漏磁通可分为三个部分, 其中一部分只穿链本身, 称为自漏磁, 可用自漏感(抗)表示; 另两部分则分别穿链到另外两个绕组, 称为互漏磁, 也就是说与另两个绕组分别有漏磁互感(互漏感)。图 2.18 实质上是将实际变压器用一个只有自漏磁而没有互漏磁的变压器等值, 所以得到的是各绕组的等值漏抗。等值漏抗与三个绕组的布置方式有关(见图 2.15), 居于中间的绕组受另两个绕组互漏磁的影响最大, 使它的等值漏磁链很小甚至反向, 所以它的等值漏抗很小或为负值。

图 2.18 中励磁并联支路的导纳 Y_m 用空载损耗 P_0 和空载电流 $I_0\%$ 计算, 与双绕组变压器相同。

三侧绕组的电阻和等值漏抗取决于短路试验的数据。由于有三个待求的阻抗, 所以要做三个短路试验。在讨论这个问题之前, 先介绍三绕组变压器各侧绕组的额定容量问题。我国制造的变压器, 三侧绕组的额定容量有如下三类:

Ⅰ. 容量比为 100/100/100。这类变压器高 / 中 / 低压绕组的额定容量都等于变压器的额定容量, 即 $S_N = \sqrt{3}U_{1N}I_{1N} = \sqrt{3}U_{2N}I_{2N} = \sqrt{3}U_{3N}I_{3N}$, 它只作为升压型变压器。

Ⅱ. 容量比 100/100/50。与 Ⅰ 类不同之处是, 低压绕组的导线截面减小一半, 额定电流也相应减小, 所以低压绕组的额定容量为变压器额定容量的 50%。此类变压器价格较低, 适用于低压绕组负载小于高、中压绕组负载的场

合。

Ⅲ. 容量比 100/50/100, 即中压绕组的额定容量为 50%。

我国制造的降压型三绕组变压器只有 Ⅱ和 Ⅲ两类, 升压型变压器则三类都有。

先讨论 I 类容量比 100/100/100 变压器的短路试验。共进行三次额定电流短路试验: (1) 3 侧开路, 1、2 侧短路试验, 测得短路损耗 P_{k1-2} 和短路电压 $U_{k1-2}\%$, 等值电路见图 2.19(a)。(2) 2 侧开路, 1、3 侧短路试验[见图 2.19(b)], 测得短路损耗 P_{k1-3} 和短路电压 $U_{k1-3}\%$ 。(3) 1 侧开路, 2、3 侧短路试验[见图 2.19(c)], 测得短路损耗 P_{k2-3} 和短路电压 $U_{k2-3}\%$ 。

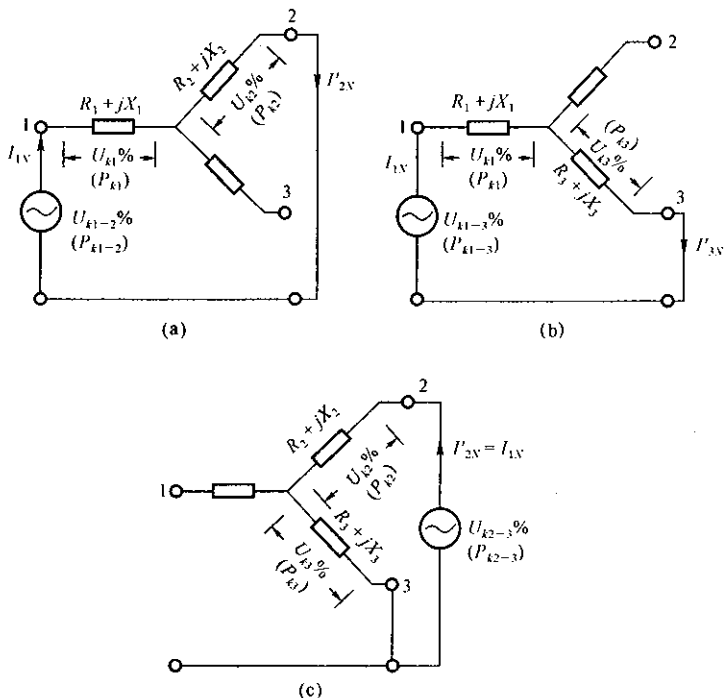


图 2.19 三绕组变压器短路试验等值电路

设 P_{k1} 、 P_{k2} 和 P_{k3} 分别为三侧绕组额定电流下的电阻功率损耗, 则有

$$\left. \begin{aligned} P_{k1-2} &= P_{k1} + P_{k2} \\ P_{k1-3} &= P_{k1} + P_{k3} \\ P_{k2-3} &= P_{k2} + P_{k3} \end{aligned} \right\} \quad (2.86)$$

由上面三式可解得:

$$\left. \begin{aligned} P_{k1} &= 0.5(P_{k1-2} + P_{k1-3} - P_{k2-3}) \\ P_{k2} &= 0.5(P_{k1-2} + P_{k2-3} - P_{k1-3}) \\ P_{k3} &= 0.5(P_{k1-3} + P_{k2-3} - P_{k1-2}) \end{aligned} \right\} \quad (2.87)$$

参照式(2.80),可得三侧绕组的电阻

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \frac{P_{k1}}{1000} \times \frac{U_{1N}^2}{S_N^2} (\Omega) \\ R_2 &= \frac{P_{k2}}{1000} \times \frac{U_{1N}^2}{S_N^2} (\Omega) \\ R_3 &= \frac{P_{k3}}{1000} \times \frac{U_{1N}^2}{S_N^2} (\Omega) \end{aligned} \right\} \quad (2.88)$$

设 $U_{k1}\%$ 、 $U_{k2}\%$ 和 $U_{k3}\%$ 为短路试验时各侧绕组的短路电压百分数值,则有

$$\left. \begin{aligned} U_{k1-2}\% &= U_{k1}\% + U_{k2}\% \\ U_{k1-3}\% &= U_{k1}\% + U_{k3}\% \\ U_{k2-3}\% &= U_{k2}\% + U_{k3}\% \end{aligned} \right\} \quad (2.89)$$

解得

$$\left. \begin{aligned} U_{k1}\% &= 0.5(U_{k1-2}\% + U_{k1-3}\% - U_{k2-3}\%) \\ U_{k2}\% &= 0.5(U_{k1-2}\% + U_{k2-3}\% - U_{k1-3}\%) \\ U_{k3}\% &= 0.5(U_{k1-3}\% + U_{k2-3}\% - U_{k1-2}\%) \end{aligned} \right\} \quad (2.90)$$

参照式(2.82),可得各侧绕组的等值漏抗:

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= \frac{U_{k1}\%}{100} \times \frac{U_{1N}^2}{S_N} (\Omega) \\ X_2 &= \frac{U_{k2}\%}{100} \times \frac{U_{1N}^2}{S_N} (\Omega) \\ X_3 &= \frac{U_{k3}\%}{100} \times \frac{U_{1N}^2}{S_N} (\Omega) \end{aligned} \right\} \quad (2.91)$$

现在讨论Ⅱ、Ⅲ类(即容量比为100/100/50或100/50/100)三绕组变压器的短路试验。为了便于叙述,设3侧绕组的额定容量 $S_{3N} = 0.5S_N$,1、2两侧均为 S_N 。如果三个短路试验均按上述条件进行,即1侧或2侧均调节到额定电流,测出 P_{k1-2} 、 $U_{k1-2}\%$ 、 P_{k1-3} 、 $U_{k1-3}\%$ 和 P_{k2-3} 、 $U_{k2-3}\%$,则完全可按上述方法计算各电阻和等值漏抗。实际上,只有1、2侧短路试验能按额定电流进行,而1、3侧及2、3侧的短路试验[见图2.19(b)、(c)],由于受到3侧额定电流的限制,1侧或2侧绕组电流只能调节到额定电流的一半,短路损耗和短路电压 P'_{k1-3} 和 $U'_{k1-3}\%$ 及 P'_{k2-3} 和 $U'_{k2-3}\%$ 是在这种条件下测出的。因此,在使用这些数据时要先归算到额定电流时的值。因为短路损耗与电流的平方成正比,短

路电压与电流成正比,所以归算到额定条件下的值为

$$P_{k1-3} = 4P'_{k1-3} \quad (2.92)$$

$$P_{k2-3} = 4P'_{k2-3} \quad (2.93)$$

$$U_{k1-3} \% = 2U'_{k1-3} \% \quad (2.94)$$

$$U_{k2-3} \% = 2U'_{k2-3} \% \quad (2.95)$$

当 2 侧绕组的额定容量 $S_{2N} = 0.5S_N$ 时,也可用同样的方法归算。

短路损耗和短路电压按上法归算后,就可应用式(2.87)、(2.88)和式(2.90)、(2.91)计算各电阻和等值漏抗。

我国制造厂提供的短路损耗有的已经归算,有的未归算,而给出的短路电压则大多已经归算。使用这些数据时,务必注意阅读它的说明。

还有,产品手册中有的只提供一个短路损耗数值,称为最大短路损耗 $P_{k\max}$,它指的是两个 100% 容量绕组的短路损耗值。所以根据 $P_{k\max}$ 只能求得两个 100% 绕组的电阻之和,而这两个绕组的电阻以及另一个绕组的电阻就只能估算了。假设各绕组导线的截面积是按同一电流密度选择的,各绕组每一匝的长度相等,则不难证明,归算到同一侧时,容量相同绕组的电阻相等,容量为 50% 的绕组电阻比容量为 100% 的绕组大一倍。按此原则可估算得

$$R_{(100)} = \frac{1}{2} \frac{P_{k\max}}{1000} \cdot \frac{U_{1N}^2}{S_N^2} \quad (2.96)$$

$$R_{(50)} = 2R_{(100)} \quad (2.97)$$

上列各公式中的 U_{1N} 换为 U_{2N} 或 U_{3N} ,即得到归算到 2 或 3 侧的参数。

最后需要指出,制造厂给出的短路损耗和短路电压是当分接头切换开关放在主接头上进行试验时的数据,所以求出的阻抗和导纳参数只适用于主接头。当切换开关转到其他分接头时,这些参数将有所变化。一般变压器分接头调节的范围有限,所以可忽略这些变化。对于有些分接头调节范围很大的有载调压变压器,可要求制造厂提供各分接头的短路和空载试验数据。

【例 2.5】 一台 220/121/10.5kV、120MVA、容量比 100/100/50 的 $Y_0/Y_0/\Delta$ 三相三绕组变压器(升压型), $I_0\% = 0.9$, $P_0 = 123.1\text{kW}$,短路损耗和短路电压见下表。试计算励磁支路的导纳,各绕组电阻和等值漏抗。各参数归算到中压侧。

	高压 — 中压	高压 — 低压	中压 — 低压	
短路损耗(kW)	660	256	227	未归算到 S_N
短路电压(%)	24.7	14.7	8.8	已归算

【解】 高、中、低压侧分别编为 1、2、3 侧。

(1) 励磁支路导纳

$$G_m = \frac{123.1}{121^2} \times 10^{-3} = 8.41 \times 10^{-6} (\text{S})$$

$$B_m = \frac{0.9}{100} \times \frac{120}{121^2} = 73.8 \times 10^{-6} (\text{S})$$

(2) 各绕组电阻

$$P_{k1} = 0.5(660 + 4 \times 256 - 4 \times 227) = 388 (\text{kW})$$

$$P_{k2} = 0.5(660 + 4 \times 227 - 4 \times 256) = 272 (\text{kW})$$

$$P_{k3} = 0.5(4 \times 256 + 4 \times 227 - 660) = 636 (\text{kW})$$

$$R_1 = \frac{388}{1000} \times \left(\frac{121}{120} \right)^2 = 0.394 (\Omega)$$

$$R_2 = \frac{272}{1000} \times \left(\frac{121}{120} \right)^2 = 0.277 (\Omega)$$

$$R_3 = \frac{636}{1000} \times \left(\frac{121}{120} \right)^2 = 0.647 (\Omega)$$

(3) 各绕组等值漏抗

$$U_{k1}\% = 0.5(24.7 + 14.7 - 8.8) = 15.3$$

$$U_{k2}\% = 0.5(24.7 + 8.8 - 14.7) = 9.4$$

$$U_{k3}\% = 0.5(14.7 + 8.8 - 24.7) = -0.6$$

$$X_1 = \frac{15.3}{100} \times \frac{121^2}{120} = 18.67 (\Omega)$$

$$X_2 = \frac{9.4}{100} \times \frac{121^2}{120} = 11.47 (\Omega)$$

$$X_3 = \frac{-0.6}{100} \times \frac{121^2}{120} = -0.73 (\Omega)$$

2.2.3 自耦变压器及其等值电路

自耦变压器高压绕组与低压绕组之间除了有磁的耦合之外,还存在电的联系。三相自耦变压器只能用 Y_0/Y_0 -12 接法,现取其一相进行分析。

图 2.20 为单相自耦变压器的原理图,其中高低压公用的绕组(2~0间)称为公共绕组,匝数为 ω_c ;端子 1~2 之间的绕组称为串联绕组,

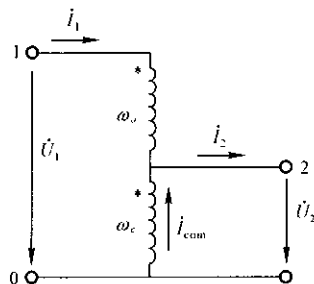


图 2.20 自耦变压器原理

匝数为 w_s ; 两个绕组绕在同一铁心柱上, 它们的同名端已标在图上。

空载运行时, 1 侧加额定电压 U_{1N} , 2 侧电压 U_{2N} 称为低压侧额定电压, 可见变比

$$k_{12} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{w_c + w_s}{w_c} \quad (2.98)$$

自耦变压器带负载运行时, 公共绕组的电流

$$\dot{I}_{com} = \dot{I}_2 - \dot{I}_1 \quad (2.99)$$

不计励磁电流, 按磁动势平衡关系, 可得 $w_s \dot{I}_1 = w_c \dot{I}_{com}$, 由此可得

$$\frac{\dot{I}_{com}}{\dot{I}_1} = \frac{w_s}{w_c} = k_{12} - 1 \quad (2.100)$$

$$\frac{\dot{I}_{com}}{\dot{I}_2} = \frac{\dot{I}_{com}}{\dot{I}_{com} + \dot{I}_1} = \frac{1}{1 + \dot{I}_1 / \dot{I}_{com}} = 1 - \frac{1}{k_{12}} = K_b \quad (2.101)$$

式中

$$K_b = 1 - \frac{1}{k_{12}} = \frac{U_{1N} - U_{2N}}{U_{1N}} = \frac{w_s}{w_c + w_s} \quad (2.102)$$

称为效益系数。由于 $k_{12} > 1$, 所以 K_b 恒小于 1。 k_{12} 愈接近于 1 则 K_b 愈小。例如 $k_{12} = 3$, $K_b = 2/3$; $k_{12} = 1.5$, $K_b = 1/3$ 。可见公共绕组电流小于 2 侧端口的电流 I_2 。与同容量的双绕组变压器比较, 公共绕组的用铜量为双绕组变压器低压绕组用铜量的 K_b 倍; 串联绕组的用铜量为双绕组变压器高压绕组用铜量的 K_b 倍。可见自耦变压器总用铜量为同容量双绕组变压器总用铜量的 K_b 倍。

再观察 2 侧端口输出的复功率

$$\tilde{S}_2 = \dot{U}_2 \dot{I}_2^* = \dot{U}_2 (\dot{I}_1^* + \dot{I}_{com}^*) = \dot{U}_2 \dot{I}_1^* + \dot{U}_2 \dot{I}_{com}^* \quad (2.103)$$

它有两个分量: 第一个分量 $\dot{U}_2 \dot{I}_1^*$ 是 1 侧通过串联绕组由电路传递到 2 侧的功率; 另一分量 $\dot{U}_2 \dot{I}_{com}^*$ 是通过磁耦合由公共绕组传递到 2 侧的功率, 它还可表示为

$$\dot{U}_2 \dot{I}_{com}^* = \dot{U}_2 \dot{I}_2^* K_b = K_b \tilde{S}_2 \quad (2.104)$$

这表明由磁耦合传递的容量仅为总容量的 K_b 倍。

当 2 侧电压和电流均为额定值 U_{2N} 和 I_{2N} 时, 通过磁耦合传递的最大功率为

$$S_{st} = K_b U_{2N} I_{2N} = K_b S_N \quad (2.105)$$

称为自耦变压器的标准容量,即设计容量。显然 S_{si} 小于变压器的额定容量 $S_N (= U_{2N} I_{2N} = U_{1N} I_{1N})$ 。标准容量也就是公共绕组的额定容量。

自耦变压器的磁路系统(铁心)是按照标准容量设计的,所以理论上铁心材料用量亦为同容量双绕组变压器用量的 K_b 倍。 K_b 与自耦变压器的经济效益直接相关,所以称为效益系数。变比 $k_{12} = 1.5 \sim 3$ 时, $K_b = 1/3 \sim 2/3$, 经济效益最为显著。

自耦变压器的等值电路与双绕组变压器相同,它的参数也是由空载和短路试验的数据决定,但计算时要用额定容量,而不是标准容量。需要说明的是,自耦变压器绕组的电阻和漏抗都比同容量的双绕组变压器小,比较两者的短路试验回路就不难理解这一特点。图 2.21(a) 为自耦变压器的短路试验回路。

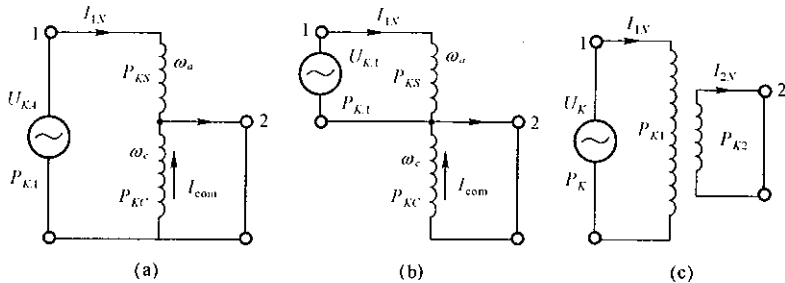


图 2.21 自耦变压器与双绕组变压器短路试验回路

图 2.21(b) 是它的等值回路,与变比为 ω_c/ω_s 的双绕组变压器的短路试验回路相同。设短路电压为 U_{kA} , 短路损耗为 P_{kA} 。图 2.21(c) 为同容量双绕组变压器的短路试验回路,设短路电压为 U_k , 短路损耗为 P_k 。如果两种变压器的漏磁系数相同(单位匝数所对应的漏抗相同),显然有

$$\frac{U_{kA}}{U_{1N} - U_{2N}} = \frac{U_k}{U_{1N}} \quad (2.106)$$

U_{kA} 归算到以 U_{1N} 为基准时,则

$$\frac{U_{kA}}{U_{1N}} = \frac{U_{1N} - U_{2N}}{U_{1N}} \frac{U_{kA}}{U_{1N} - U_{2N}} = K_b \frac{U_{kA}}{U_{1N} - U_{2N}} = K_b \frac{U_k}{U_{1N}} \quad (2.107)$$

这表明 $U_{kA}\% = K_b U_k\%$, 即 $U_{kA}\%$ 较小。

再比较短路损耗。图 2.21(b) 的串联绕组与图 2.21(c) 的 1 侧绕组相比,这两绕组电流相同但匝数不同,而电阻与匝数成正比,所以 $P_{ks} = \omega_s P_{k1} / (\omega_c + \omega_s) = K_b P_{k1}$ 。而图 2.21(b) 的公共绕组与图 2.21(c) 的 2 侧绕组相比,前者的电流和导线截面均为后者的 K_b 倍,所以 $P_{kc} = K_b P_{k2}$ 。两者总的短路损耗关系为 $P_{kA} = K_b P_k$, 即 P_{kA} 较小。

自耦变压器省铜、省铁,价格低,而且功率和电压损耗都较小,所以在变比不大于 $3 \sim 4$ 的场合得到普遍的使用。不过自耦变压器的中性点必须直接接地或经很小的电抗接地,否则在高压侧电力网发生单相接地故障而使中性点电压偏移时,低压侧电力网将发生严重的过电压。因此,它只能用于两侧电力网都是中性点直接接地的场合,这就限制了它的应用范围。另外,高压电力网发生大气过电压(雷击)或操作过电压时,会通过公共绕组进入低压电力网,所以变压器两侧各相出线端都要装设避雷器,而且在任何情况下都不允许不带避雷器运行。

三相自耦变压器通常还加有磁耦合的第三绕组,如图 2.22 所示。第三绕组一般接成三角形,因为它具有削弱三次谐波电压等优点。但在第三绕组接到 35kV 及以下的电力网,而又要求中性点经高电抗(消弧线圈)接地的情况时,则要采用星形接法。第三绕组的额定容量不得大于该变压器的标准容量,一般等于标准容量,即 $S_{3N} = S_N = K_b S_N$ 。

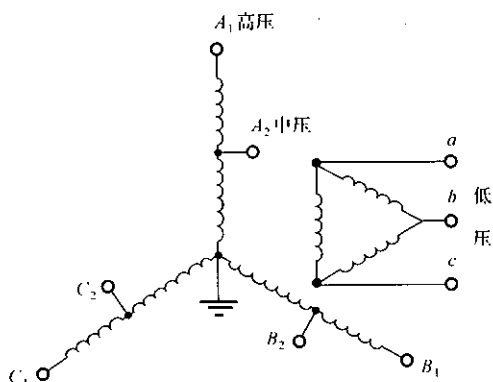


图 2.22 有第三绕组的三相自耦变压器

带有第三绕组的三相自耦变压器称三绕组自耦变压器,它的等值电路和三绕组变压器相同,各侧的电阻和等值漏抗以及并联导纳也是根据额定容量(不是标准容量)、额定电压、三个短路损耗和短路电压以及空载电流和损耗来计算的。必须注意的是,制造厂或产品手册给出的短路损耗大多未归算到额定容量,甚至连短路电压也未归算。

最后,有必要讨论三绕组自耦变压器运行的一个特殊问题:公共绕组过载问题。这种变压器在某些运行方式下,高压和中压侧的负载(视在功率)都没有超过额定容量 S_N ,低压绕组也没有超过它的额定容量 S_{3N} ,但公共绕组的视在功率却有可能超过它的额定容量 S_N 即 $K_b S_N$ 。

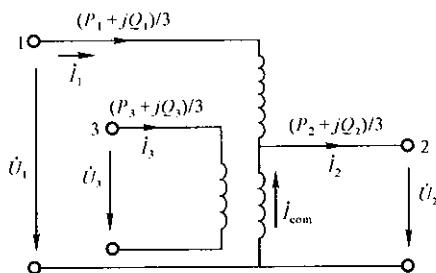


图 2.23 自耦变压器单相原理图

现按图 2.23 的单相图进行讨论。图中有功功率 P 和滞后无功功率 Q 为三相的值, U 为相电压, 各侧 P 、 Q 和 I 的参考方向已标在图中, 即设高压侧和低压侧是输入的, 中压侧是输出的。不计变压器的有功和无功功率损耗和电压降时有:

$$P_2 = P_1 + P_3, Q_2 = Q_1 + Q_3 \text{ 和 } U_1 = k_{12}U_2$$

高压侧的三相复功率为

$$\tilde{S}_1 = 3\dot{U}_1 \dot{I}_1^* = 3k_{12}\dot{U}_2 \dot{I}_1^* = P_1 + jQ_1 \quad (2.108)$$

可得

$$3\dot{U}_2 \dot{I}_1^* = (P_1 + jQ_1)/k_{12} \quad (2.109)$$

中压侧的三相复功率为

$$\tilde{S}_2 = 3\dot{U}_2 \dot{I}_2^* = P_2 + jQ_2 = P_1 + P_3 + j(Q_1 + Q_3) \quad (2.110)$$

公共绕组的三相复功率为

$$\begin{aligned} \tilde{S}_{com} &= 3\dot{U}_2 \dot{I}_{com}^* = 3\dot{U}_2 (\dot{I}_2^* - \dot{I}_1^*) \\ &= P_1 + P_3 - P_1/k_{12} + j(Q_1 + Q_3 - Q_1/k_{12}) \end{aligned} \quad (2.111)$$

考虑式(2.102), 则有

$$\tilde{S}_{com} = K_b P_1 + P_3 + j(K_b Q_1 + Q_3) \quad (2.112)$$

公共绕组的负荷即视在功率为

$$S_{com} = \sqrt{(K_b P_1 + P_3)^2 + (K_b Q_1 + Q_3)^2} \quad (2.113)$$

运行时必须满足公共绕组不过载的条件:

$$S_{com} \leq K_b S_N \quad (2.114)$$

现在讨论两种典型的运行方式:

(1) 高压侧和低压侧同时向中压侧送有功和滞后无功功率或中压侧同时向高压和低压侧送有功和滞后无功功率。

根据图 2.23 的参考方向, 这类运行方式 P_1 和 P_3 及 Q_1 和 Q_3 同为正值或负值, 由式(2.113)可见, 有可能出现 $S_{com} > K_b S_N$, 即公共绕组过载, 这是不允许的。在运行时和设计中选择变压器时, 都要注意这种情况。

(2) 高压侧同时向中压和低压侧送有功和滞后无功功率或中、低压侧同时向高压侧送有功和滞后无功功率。这类运行方式的 P_1 和 P_3 及 Q_1 和 Q_3 总是一正一负的, 由式(2.113)可知, 公共绕组是不会过载的。

对于其他各种运行方式, 均可根据图 2.23 的参考方向和式(2.113)进行具体计算和分析。

【例 2.6】 一台三相三绕组升压型自耦变压器额定值为 242/121/10.5kV—120MVA,容量比为 100/100/50;空载电流 $I_0\% = 0.5$,空载损耗 $P_0 = 90\text{kW}$;短路损耗: $P_{k1-2} = 430\text{kW}$, $P'_{k1-3} = 228.8\text{kW}$, $P'_{k2-3} = 280.3\text{kW}$ (未归算);短路电压: $U_{k1-2}\% = 12.8$, $U_{k1-3}\% = 11.8$, $U_{k2-3}\% = 17.58$ (已归算)。试求:

(1) 等值电路及各参数(归算到中压侧);

(2) 变压器某一运行方式,高压侧向中压侧输送功率 $P_1 + jQ_1 = 108 + j15.4(\text{MVA})$,低压侧向中压侧输送功率 $P_3 + jQ_3 = -6 + j42.3(\text{MVA})$,中压侧输出 $P_2 + jQ_2 = 101.8 + j40.2(\text{MVA})$ 。试检查变压器是否过载。

【解】 该变压器额定容量 $S_N = 120(\text{MVA})$,低压绕组额定容量 $S_{3N} = 0.5S_N = 60(\text{MVA})$,自耦部分变比 $k_{12} = 242/121 = 2$,效益系数 $K_b = 1 - 1/2 = 0.5$,公共绕组额定容量 $S_{\sigma} = 0.5 \times 120 = 60(\text{MVA})$ 。

(1) 等值电路

励磁并联支路导纳:

$$G_m = \frac{90}{121^2} \times 10^{-3} = 6.15 \times 10^{-6}(\text{S})$$

$$B_m = \frac{0.5}{100} \frac{120}{121^2} = 41.0 \times 10^{-6}(\text{S})$$

各绕组电阻:

短路损耗归算: $P_{k1-2} = 430\text{kW}$, $P_{k1-3} = (S_N/S_{3N})^2 P'_{k1-3} = 4 \times 228.8 = 915.2(\text{kW})$, $P_{k2-3} = 4 \times 280.3 = 1121.2(\text{kW})$

$$P_{k1} = 0.5(430 + 915.2 - 1121.2) = 112(\text{kW})$$

$$P_{k2} = 0.5(430 + 1121.2 - 915.2) = 318(\text{kW})$$

$$P_{k3} = 0.5(915.2 + 1121.2 - 430) = 803.2(\text{kW})$$

$$R_1 = \frac{112}{1000} \left(\frac{121}{120} \right)^2 = 0.1139(\Omega)$$

$$R_2 = \frac{318}{1000} \left(\frac{121}{120} \right)^2 = 0.323(\Omega)$$

$$R_3 = \frac{803.2}{1000} \left(\frac{121}{120} \right)^2 = 0.816(\Omega)$$

各绕组等值漏抗:

$$U_{k1}\% = 0.5(12.8 + 11.8 - 17.58) = 3.51$$

$$U_{k2}\% = 0.5(12.8 + 17.58 - 11.8) = 9.29$$

$$U_{k3}\% = 0.5(11.8 + 17.58 - 12.8) = 8.29$$

$$X_1 = \frac{3.51}{100} \times \frac{121^2}{120} = 4.28(\Omega)$$

$$X_2 = \frac{9.29}{100} \times \frac{121^2}{120} = 11.33(\Omega)$$

$$X_3 = \frac{8.29}{100} \times \frac{121^2}{120} = 10.11(\Omega)$$

等值电路见图 2.24。与例 2.5 同电压等级同容量的三绕组变压器相比:自耦变压器自耦部分电阻 $R_1 + R_2 = 0.437\Omega$, $X_1 + X_2 = 15.61\Omega$;上例的三绕组变压器 $R_1 + R_2 = 0.671\Omega$, 漏抗 $X_1 + X_2 = 30.14\Omega$ 。可见自耦变压器电阻和漏抗分别减小了 34.9% 和 48.2%。

(2) 负载检查

$$\text{高压侧负载 } S_1 = \sqrt{108^2 + 15.4^2} = 109.1(\text{MVA}) < S_N$$

$$\text{中压侧负载 } S_2 = \sqrt{101.8^2 + 40.2^2} = 109.4(\text{MVA}) < S_N$$

$$\text{低压侧负载 } S_3 = \sqrt{6^2 + 42.3^2} = 42.7(\text{MVA}) < 0.5S_N$$

公共绕组负载

$$\begin{aligned} S_{com} &= \sqrt{(K_b P_1 + P_3)^2 + (K_b Q_1 + Q_3)^2} \\ &= \sqrt{(0.5 \times 108 + 6)^2 + (0.5 \times 15.4 + 42.3)^2} \\ &= 69.3\text{MVA} > K_b S_N (60\text{MVA}) \end{aligned}$$

变压器三侧均未过载,但公共绕组过载约 15%。

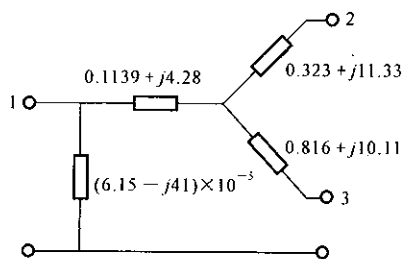


图 2.24 例 2.6 的等值电路

2.3 同步发电机和调相机

三相同步发电机是电力系统的电源,其功能是将原动机(汽轮机或水轮机)通过转轴传送来的旋转机械功率变换为电的功率。迄今为止同步电机仍是电力系统惟一的有功功率电源,同时它也是电力系统中提供无功功率(滞后)的重要电源。三相同步调相机又称同步补偿机,相当于空载运行的同步电动机,是电力系统的一种无功功率电源,用于控制系统的电压,提高运行性能。

描述同步电机各种运行状态的数学模型是相当复杂的,我们将在第 4、5 章中讨论,本节只介绍正常运行即三相对称同步稳态运行的数学模型。为便于建立一相的数学模型,把同步电机的定子三相绕组都看作星形接法,实际上电

力系统用的同步电机都采用星形接法。

2.3.1 同步发电机

本节将讨论正常运行时同步发电机的模型和允许运行范围两个问题。

1. 数学模型

三相同步发电机正常运行时,定子某一相空载电势 E_q (或电势 E_0),输出电压或称端电压 U 和输出电流 I 间的相位关系设如图 2.25 所示。 E_q 与 U 的相位差 δ 称为功率角, U 和 I 的相位差 φ 即功率因数角。取 d - q 直角坐标系,使 q 轴与 E_q 重合; d 轴称为纵轴或直轴, q 轴称为横轴或交轴。 U 和 I 的 d 、 q 分量为:

$$U_q = U \cos \delta \quad (2.115)$$

$$U_d = U \sin \delta \quad (2.116)$$

$$I_q = I \cos(\delta + \varphi) \quad (2.117)$$

$$I_d = I \sin(\delta + \varphi) \quad (2.118)$$

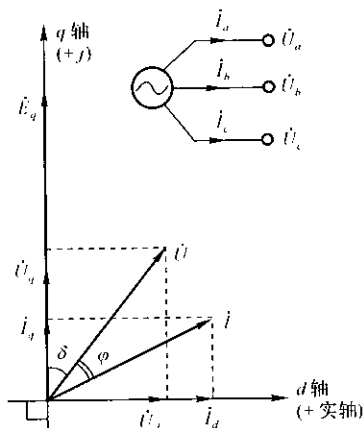


图 2.25 电势、电压和电流的相量

电机学课程中已讨论过,端电压和电流的分量与 E_q 间的关系为:

$$U_q = E_q - x_d I_d - r I_q \quad (2.119)$$

$$U_d = x_q I_q - r I_d \quad (2.120)$$

式中, r 为定子每相绕组的电阻; x_d 为定子纵轴同步电抗; x_q 为定子横轴同步电抗。

除式(2.119)和(2.120)外,还已知空载电势 E_q 与转子励磁绕组中的励磁电流成正比,其比例系数可从空载试验得到。

为便于绘制相量图,令 d 轴作正实轴, q 轴作正虚轴,则各相量可表示成:

$$\dot{E}_q = jE_q \quad (2.121)$$

$$\dot{U} = U_d + jU_q \quad (2.122)$$

$$\dot{I} = I_d + jI_q \quad (2.123)$$

所以

$$\dot{U} = jE_q - j(x_d - x_q)I_d - (r + jx_q)\dot{I} \quad (2.124)$$

隐极同步发电机(汽轮发电机) $x_d = x_q$, 上式变为

$$\dot{U} = jE_q - (r + jx_d)\dot{I} \quad (2.125)$$

此即表示隐极同步发电机的方程式,由此可作出它的等值电路和相量图,如图 2.26 所示。

凸极同步发电机(水轮发电机),由于 $x_d \neq x_q$,只能用式(2.124)表示。为了便于计算,定义了一个与 E_q 同相的虚构电势

$$\dot{E}_Q = jE_q - j(x_d - x_q)I_d \quad (2.126)$$

这样,式(2.124)可表示为

$$\dot{U} = \dot{E}_Q - (r + jx_q)\dot{I} \quad (2.127)$$

上式称为隐极化的凸极同步发电机回路方程, E_Q 称为隐极化电势。但要注意 E_Q 与励磁电流不存在简单的正比关系。

按照式(2.126)和(2.127)可作出凸极同步发电机的等值电路和相量图,如图 2.27 所示。

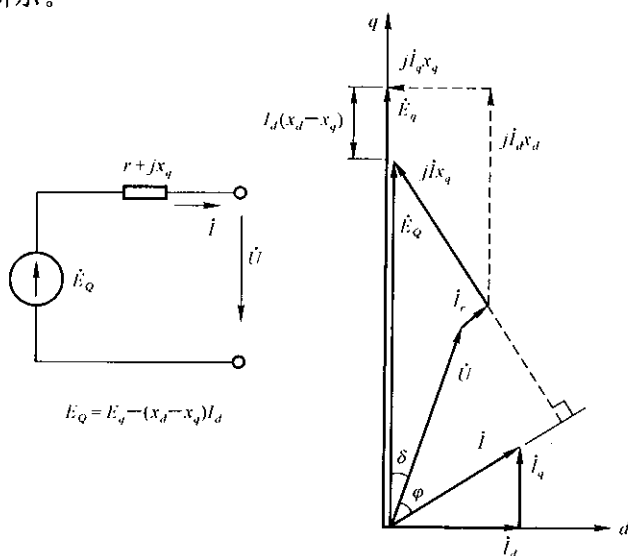


图 2.27 凸极同步发电机的等值电路和相量图

同步发电机的输出功率(一相)为

$$P + jQ = \dot{U} \dot{I}^* = (U_d + jU_q)(I_d - jI_q) \quad (2.128)$$

所以

$$P = U_d I_d + U_q I_q \quad (2.129)$$

$$Q = U_q I_d - U_d I_q \quad (2.130)$$

不计很小的定子电阻($r \approx 0$)时,将式(2.115)~(2.118)代入上式可得凸极同步电机的功率方程:

$$P = \frac{E_q U}{x_d} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \frac{x_d - x_q}{x_d x_q} \sin 2\delta \quad (2.131)$$

$$Q = \frac{E_q U}{x_d} \cos \delta - \frac{U^2}{2} \frac{x_d + x_q}{x_d x_q} + \frac{U^2}{2} \frac{x_d - x_q}{x_d x_q} \cos 2\delta \quad (2.132)$$

对于隐极同步电机,则有

$$P = \frac{E_q U}{x_d} \sin \delta \quad (2.133)$$

$$Q = \frac{E_q U}{x_d} \cos \delta - \frac{U^2}{x_d} \quad (2.134)$$

以上各定子回路方程和功率方程就是同步发电机正常运行状态的数学模型。

制造厂提供的同步发电机参数通常有:额定(线)电压 U_N (kV),三相额定容量 S_N (MVA),额定功率因数 $\cos \varphi_N$ (滞后)以及定子电阻和同步电抗的标么值或百分值: r_* 或 $r\%$, x_{d*} 或 $x_d\%$, x_{q*} 或 $x_q\%$ 等。这些标么值或百分值均以 U_N 和 S_N 为基准。

额定容量定义为 $S_N = \sqrt{3} U_N I_N$ (MVA),由此即可求出额定电流 I_N 。而额定有功功率 $P_N = S_N \cos \varphi_N$ (MVA,三相),额定无功功率 $Q_N = S_N \sin \varphi_N$ (Mvar即兆乏)。

电阻和电抗的实际值用下式计算:

$$r = r_* \frac{U_N^2}{S_N} = \frac{r\%}{100} \frac{U_N^2}{S_N} (\Omega) \quad (2.135)$$

$$x_d = x_{d*} \frac{U_N^2}{S_N} = \frac{x_{d\%}}{100} \frac{U_N^2}{S_N} (\Omega) \quad (2.136)$$

$$x_q = x_{q*} \frac{U_N^2}{S_N} = \frac{x_{q\%}}{100} \frac{U_N^2}{S_N} (\Omega) \quad (2.137)$$

2. 同步发电机的运行范围

同步发电机接到电力系统同步运行时,通过调节原动机蒸汽或水的输入量,使原动机输出的机械功率变化,即可控制发电机输出的有功功率;通过改

变发电机的励磁电流,可以调节发电机的端电压和输出的无功功率。

同步发电机输出的有功和无功功率,可以根据电力系统的需要进行调节,但两者都有最大值和最小值的限制,超出这些限制范围的发电机组(包括原动机)将不能正常运行。限制同步发电机运行范围的因素有如下五个方面:

有功功率的限制 原动机出力和发电机的电磁负荷及机械强度都是根据额定有功功率 P_N 设计的,虽有一些裕度(过载能力),但运行中不宜超出 P_N 。另外,还有最小功率 P_{\min} 的限制,运行时也不能小于此值。 P_{\min} 的限制不是由于发电机本身,而是原动机和锅炉(火电厂)方面的原因。汽轮机的最小允许功率约为额定值的 $10\% \sim 20\%$,与汽轮机的类型和容量有关。水轮机的最小允许功率比汽轮机小一些。当火电厂采用锅炉—发电机组发电方式时, P_{\min} 还受锅炉的限制,因为锅炉在低负荷时燃烧不稳定,特别是燃煤的锅炉。一般锅炉允许的最小输出约为额定值的 $25\% \sim 70\%$,随锅炉类型和燃料(煤或油)而定。

定子三相绕组电流的限制 发电机三相绕组导体的截面积、发电机的冷却系统都是按照额定电流设计的,运行中定子电流不可大于额定值 I_N 。

励磁电流的限制 发电机励磁绕组导体截面积、冷却设施、励磁系统等是按照发电机额定运行条件(S_N, U_N 和滞后的 $\cos\varphi_N$) 下所需要的励磁电流——额定励磁电流而设计的,所以运行中励磁电流不可大于它的额定值。

定子端部发热的限制 发电机在进相运行——即超前 $\cos\varphi$ 、吸收无功功率运行时,定子端部的漏磁将大于滞后 $\cos\varphi$ 运行状态,会在定子端部铁心及金属压板等处感生过大的涡流电流,导致温度升高。当温度超过允许值时,就要限制吸收的无功功率。

发电机同步稳定性的限制 一般发电机在进相运行时容易发生不稳定情况,这时就要限制输出的有功功率或吸收的无功功率。

现以汽轮发电机(隐极)为例,具体说明其允许的运行范围。在图 2.28 中,作出了额定运行条件时的相量图(不计定子电阻 r),各相量均乘以相同比例的系数 K 。相量 AO 为额定相电压 U_N 的 K 倍; AM 为额定电流 I_N 的 K 倍,它滞后 U_N 的角度即额定功率因数角 φ_N ; AN 为额定空载相电势 E_{qN} 的 K 倍,与额定励磁电流成正比。再以 O 为原点作 P - Q 直角坐标轴,使纵轴(P 轴)垂直于 AO 。

取系数 $K = 3U_N/x_d$,则 ON 的长度为 $(3U_N/x_d)I_Nx_d = S_N$,即发电机额定视在功率。 ON 在 P 及 Q 轴的投影 $OC = S_N\cos\varphi_N = P_N$ 及 $OD = S_N\sin\varphi_N = Q_N$,即为发电机的额定有功和无功功率。因此,在 P - Q 坐标平面上, N 为额定的运行点。

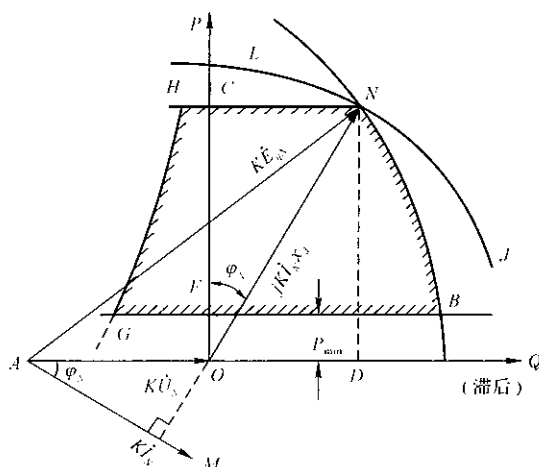


图 2.28 发电机允许的运行范围

发电机的 $\cos\varphi$ 不等于额定 $\cos\varphi_N$ 运行时,以定子电流(即视在功率)不超过额定值作为条件,运行点应限制在以 O 点为圆心,以 ON 为半径的圆弧 LNJ 以内;以励磁电流不超过额定值作为条件,则运行点应限制在以 A 点为圆心,以 AN 为半径的圆弧 NB 之内;以不超过额定有功功率 P_N 为条件,运行点应在水平线 HCN 以下;以不小于最小允许功率 P_{\min} 条件,则运行点应在水平线 GFB 以上。同时考虑上述四个条件,并在滞后 $\cos\varphi \leq 1$ 时, P 和 Q 的允许运行范围为 $FB-BN-NC-CF$ 所包围的面积。

同步发电机进相运行时,定子和励磁绕组的额定电流已不再是限制的因素,除了受额定有功功率和最小允许有功功率限制外,首先受定子端部发热的限制。以前制造的发电机一般不考虑进相运行,能否允许进相运行及进相能力的大小,需要通过试验,测量定子端部有关部件的温升来确定。近年来制造的发电机,定子端部的结构作了改进,允许一定程度的进相运行。例如大容量汽轮发电机带额定有功功率时,超前功率因数一般可达到 0.95,即吸收的无功功率达到额定容量的 32%;水轮发电机超前功率因数则可运行到 0.95 ~ 0.9。

同步发电机进相运行的另一个限制因素是系统的运行稳定性。发电机带一定的有功功率时,吸收的无功功率愈大,励磁电流和与其成正比的空载电势 E_q 愈小。由式(2.133)可知,有功功率一定时, E_q 愈小功率角 δ 愈大,因而稳定性愈差。但是稳定性问题不仅与该发电机运行状态有关,还与整个系统的结构、参数、其他各台发电机运行状态以及发电机自动电压调节器的性能等等密

切相关,很难作出一般性的结论,例如有的发电机在滞后功率因数接近 1 时已不能稳定运行。所以,发电机进相运行的允许范围就不像相位滞后运行那样具有确定性。图 2.28 中给出的进相运行范围 CH—HG—GF 只是一个大致情况。

2.3.2 同步调相机

同步调相机是电力系统的一种无功功率电源。实质上,它是专用的空载运行的大容量同步电动机。同步调相机运行时,由电力网供给的有功功率约为其额定容量的 1.5% ~ 3%,功率因数 $\cos\varphi \approx (0.015 \sim 0.03)$ 。

同步调相机正常运行时的数学模型与同步发电机的相同。现在介绍它的实用简化模型。简化的条件是忽略它所需要的有功功率,认为 $\cos\varphi = 0$,即电压和电流的相量正交。因此,它输出的电流只有纵轴分量, $I = I_d, I_q = 0$;电压只有横轴分量, $U = U_q, U_d = 0$ 。根据式(2.124)可得到调相机的简化回路方程:

$$\dot{U} = \dot{E}_q - jx_d \dot{I} \quad (2.138)$$

图 2.29 给出它的相量图,其中图 2.29(a) 为过励磁(相位滞后)运行时的相量图,图 2.29(b) 为欠励磁(进相)运行时的相量图。

调相机输出的无功功率(滞后)为:

$$\begin{aligned} Q &= UI = \frac{(E_q - U)U}{x_d} \\ &= \frac{E_q U}{x_d} - \frac{U^2}{x_d} \end{aligned} \quad (2.139)$$

当 E_q 和 U 用线电势和线电压表示时, Q 为三相无功功率。

式(2.139)表明,当 $E_q > U$ 即过励磁时, Q 为正值,调相机输出滞后的无功功率,起着电容器的作用。调相机的额定容量 $S_N = \sqrt{3}U_N I_N$ 是指过励磁时的额定无功功率。当 $E_q < U$ 即欠励磁进相运行时, Q 为负值,调相机输出超前的无功功率或吸收滞后的无功功率,起着电抗器的作用。欠励磁的极限为励磁电流为零, $E_q = 0$, 这时 $Q = -U^2/x_d$, 达到极限值。

式(2.139)也可用标么值表示。取 S_N 为功率的基准值, U_N 为线电势和线电压的基准值,阻抗的基准值为 $Z_N = U_N / \sqrt{3} I_N = U_N^2 / S_N$, 则式(2.139)可

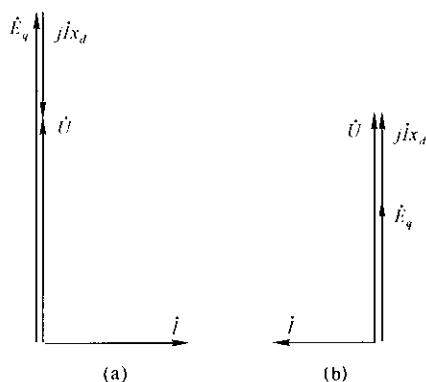


图 2.29 调相机相量图

表示为

$$Q_* = \frac{E_{q*} U_*}{x_{d*}} - \frac{U_*^2}{x_{d*}} \quad (2.140)$$

调相机过励磁运行时输出的最大无功功率取决于它的额定容量；进相运行时吸收的最大无功功率则为 U_*^2/x_{d*} ，通常 $x_{d*} = 1.5 \sim 2$ ，所以吸收的最大无功功率 $Q_* = 0.5 \sim 0.65$ ，即为额定容量的 50% ~ 65%。有些调相机的进相运行还受定子端部发热的限制，最大进相容量小于由 x_d 决定的值。

调相机及其他无功补偿设备控制电压的作用，常用 dQ_*/dU_* 表示，称为电压调节效应。此导数为负值时，说明电压升高时输出的无功功率减小，因而能抑制电压升高的幅度；或者当电压降低时输出的无功功率增加，能减小电压的下降值。导数为正值时的控制电压性能不好，正值愈大控制电压性能愈差。根据式(2.140)可求得调相机的电压调节效应：

$$\begin{aligned} \frac{dQ_*}{dU_*} &= \frac{E_{q*}}{x_{d*}} - \frac{2U_*}{x_{d*}} = \frac{1}{U_*} \left(\frac{E_{q*} U_*}{x_{d*}} - \frac{U_*^2}{x_{d*}} \right) - \frac{U_*}{x_{d*}} \\ &= \frac{Q_*}{U_*} - \frac{U_*}{x_{d*}} \end{aligned} \quad (2.141)$$

$U_* = 1, x_{d*} = 2$ 和 E_q 无自动控制时，调相机的电压调节效应如图 2.30 所示。可见在无功功率小于 $0.5S_N$ 时电压调节效应均为负值；大于 $0.5S_N$ 时虽为正值但不大。

一般调相机均设有自动电压调节器，它根据电压的变化自动改变励磁电流，从而改变输出的无功功率，保持电压在给定的范围内。有自动电压调节器时，调相机的电压调节效应大为改善。

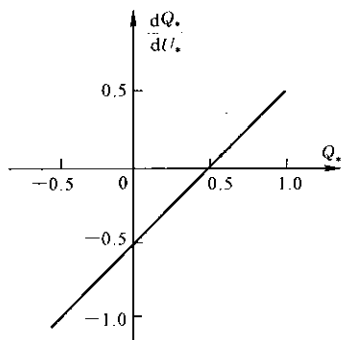


图 2.30 调相机电压调节效应

调相机的优点是，它不但能输出无功功率，还能吸收无功功率，而且具有良好的电压调节特性，对提高电力系统运行性能和稳定性都有作用。它的缺点是价格高，运行维护复杂，有功功率消耗较大。

2.4 无功功率补偿设备

电力系统中常用的无功功率补偿设备，除了同步调相机外，还有并联电容器、并联电抗器和静止补偿器等。相对于旋转机械的同步调相机而言，后三种可称为静止的设备。

2.4.1 并联电容器

并联电容器又称移相电容器,广泛地应用于改善负荷的功率因数,是电力系统中一种重要的无功功率电源。我国生产的移相电容器额定电压有 10.5、6.3、3.15kV,525V,400V 等多种。额定电压 $U_N = 3.15 \sim 10.5\text{kV}$ 的移相电容器均为单相式的,单台容量 $Q_N = U_N^2 \omega C$ 可达 40kvar;额定电压 525V 及以下的多为三相式的,单台三相容量可达到 25 ~ 30kvar。由于单台容量有限,一般要用多台电容器并联,用以组成三相并联电容装置;用于 35kV 电力网时,除了并联以外还要多个串联。大容量并联电容装置一般还分为数组,各设有开关,操作开关就可分级调节输出的无功功率。

在电力系统常用的无功功率补偿设备中,并联电容器的单位容量费用最低,有功功率损耗最小(约为额定容量的 0.3% ~ 0.5%),运行维护最简便。它可以分散安装在用户处或靠近负荷中心的地点,实现无功功率就地补偿,获得最好的技术经济效果。此外,改变容量方便,还可根据需要分散拆迁到其他地点。由于有上述优点,所以并联电容器得到广泛的应用。它的主要缺点是电压调节效应差,其次是不能像同步调相机那样可以连续调节无功功率和吸收滞后的无功功率。

在电力系统正常运行计算中,可将三相并联电容器组看作星形接法,每相用并联导纳 $Y_c = jB_c$ 表示。已知三相电容器组的总容量 Q_N (Mvar) 和额定线电压 U_N (kV) 时,

$$B_c = \frac{Q_N}{U_N^2} (\text{S}) \quad (2.142)$$

当运行电压 $U \neq U_N$ 时,电容器组输出的无功功率

$$Q = U^2 B_c \quad (2.143)$$

用 $Q_N = U_N^2 B_c$ 除上式可得

$$Q_* = U_*^2 \quad (2.144)$$

式中, $Q_* = Q/Q_N$, $U_* = U/U_N$ 分别为无功功率和电压的标么值。

并联电容器的电压调节效应

$$\frac{dQ_*}{dU_*} = 2U_* \quad (2.145)$$

在 $U_* = 1$ 附近, $dQ_*/dU_* \approx 2$, 可见电压调节效应为正值且相当大,这对电力系统运行是不利的。由式(2.143)可知,电容器输出的无功功率与电压平方成正比,例如电压变化 1%,无功功率将变化约 2%,所以当电力网电压下降

时,它输出的无功功率反而减小,这将使电力网的电压更为下降。

2.4.2 并联电抗器

并联电抗器用于吸收高压电力网过剩的无功功率和远距离输电线的参数补偿。

含有超高压架空线路或(和)高压电缆的电力网中,在轻负荷运行时各线路分布电容产生的无功功率大于线路电抗中消耗的无功功率,因此会出现无功功率过剩的现象。解决无功功率过剩的措施之一,是在适当地点接入并联电抗器,就近吸收线路的无功功率,防止电力网电压过高。

在超高压远距离架空输电线路中,可用并联电抗器和串联电容器补偿线路的参数,如图 2.31 所示。这相当于减小线路单位长度的电抗 x_1 和电纳 b_1 ,使线路的等效传播系数 $\gamma \approx j\alpha \approx j\sqrt{x_1 b_1}$ 大为减小,线路的波长 $\lambda = 2\pi/\alpha$ 显著增加。相对于线路的波长而言,这相当于缩短了线路的长度,因而能有效地提高线路的输电能力,改善沿线电压分布,提高运行稳定性。此外,并联电抗器还有降低线路过电压等作用。

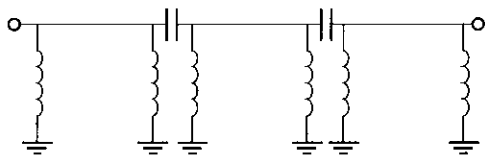


图 2.31 远距离输电线参数补偿

在电力网正常运行状态的计算中,并联电抗器可用接地的阻抗或导纳表示。根据三相并联电抗器的额定容量 S_N (MVA)、额定线电压 U_N (kV) 和三相功率损耗 ΔP_0 (MW),可求得每相导纳

$$Y_L = G_L + jB_L = -\frac{\Delta P_0}{U_N^2} - j\frac{S_N}{U_N^2} \text{ (S)} \quad (2.146)$$

并联电抗器上的电压为 U 时,吸收的无功功率为

$$Q_L = U^2 B_L \quad (2.147)$$

2.4.3 静止补偿器

在第 1 章中已简单介绍了无功功率静止补偿器的概念,本节将讨论可控饱和电抗器型、可控硅控制电抗器型和自饱和电抗器型三种静止补偿器的基

本原理和特性。

1. 可控饱和电抗器型静止补偿器

这种静止补偿器的原理电路如图 2.32(a) 所示,它由可控饱和电抗器和电容器组并联构成。

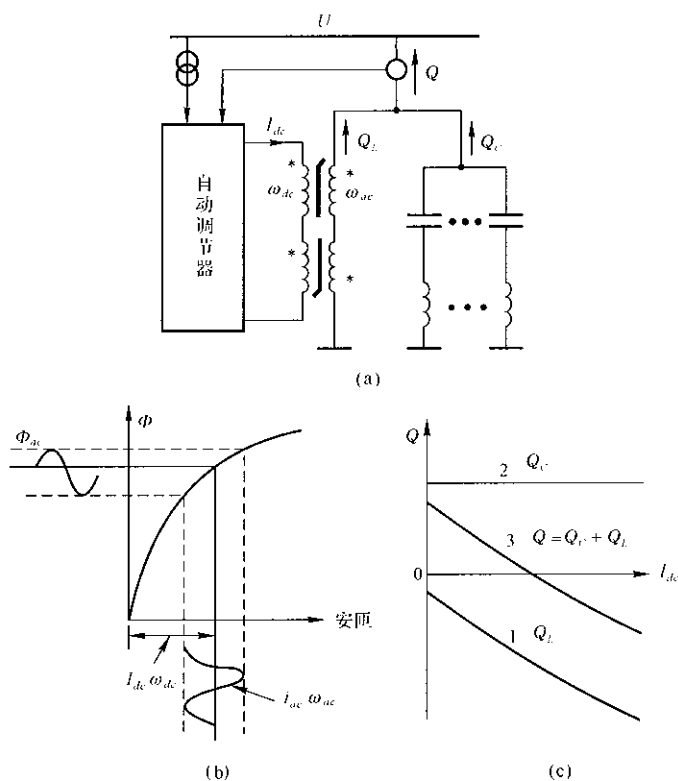


图 2.32 可控饱和电抗器型静止补偿器

(a) 原理接线; (b) 可控饱和电抗器特性; (c) 无功功率特性

可控饱和电抗器的特性示于图 2.32(b),可见改变控制绕组 ω_{dc} 中的直流电流 I_{dc} ,即可改变交流绕组 ω_{ac} 的交流动态电感,从而改变交流电流和无功功率。图中画有两个完全相同的电抗器,它们的直流控制绕组同极性串联,交流绕组反极性串联。这样做的原因是使两个控制绕组感应的交流电压相互抵消,同时使两个交流绕组以“推挽”的方式工作,改善交流电流的波形。可控饱和电抗器输出的无功功率 Q_l 与控制电流 I_{dc} 的关系如图 2.32(c) 中曲线 1 所示(电压 U 不变时)。并联电容器通常分为若干组,每组各串联一个电感很小的线性电抗器,构成交流谐波滤波器组,以进一步改善电流的波形。按图 2.32(a)

的参考方向,静止补偿器输出的无功功率

$$Q = Q_C + Q_L = U^2 \left(\frac{1}{x_C} - \frac{1}{x_L} \right) \quad (2.148)$$

式中, x_C 为电容器组的容抗; x_L 为饱和电抗器的动态感抗,它是 I_{dc} 的函数,当 $I_{dc} = 0$ 时动态感抗达到最大值 $x_{L\max}$, I_{dc} 达到最大值时动态感抗达到最小值 $x_{L\min}$ 。图 2.32(c) 中的曲线 3 表示 U 不变时输出无功功率与 I_{dc} 的关系。可见,改变 I_{dc} 不但能控制输出无功功率的大小,而且能改变其方向,即从输出无功功率变为吸收无功功率。

静止补偿器所加的自动调节器,能根据电压的变化自动地改变无功功率,将电压的变化控制在很小的范围内。具有调节器时,静止补偿器的 $Q-U$ 静态特性如图 2.33 所示,其中 1.2 段是正常工作范围。1.3 段是 $I_{dc} = 0$ 的特性,这时

$$Q = U^2 \left(\frac{1}{x_C} - \frac{1}{x_{L\max}} \right) \quad (2.149)$$

随电压降低而减小。2.4 段是 I_{dc} 达到最大值的特性,

$$Q = U^2 \left(\frac{1}{x_C} - \frac{1}{x_{L\min}} \right) \quad (2.150)$$

随电压增加而急剧地变化。

2. 可控硅控制电抗型静止补偿器

图 2.34(a) 示出这种静止补偿器的原理电路图,它的特点是利用可控硅控制流经线性电抗器的电流。可控硅触发角 $\alpha > 90^\circ$ 时,电抗器电流 i_L 的波形如图 2.34(b) 所示, i_L 是正弦波的一部分,含有一系列奇次谐波。将三相电抗器、可控硅电路接成三角形,线电流的波形将大为改善,它只含有 5,7,11,13, ... 等次谐波,这些谐波电流可利用电容器组构成的滤波器吸收。当不计电抗器的电阻时, i_L 中基波分量的相位比电压滞后 90° ,其有效值为

$$I_{L(1)} = \frac{U}{x_L} \left[2 \left(1 - \frac{\alpha}{180} \right) + \frac{\sin 2\alpha}{\pi} \right] (90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ) \quad (2.151)$$

式中, x_L 为电抗器的电抗值; α 的单位为度,允许工作范围为 $90^\circ \sim 180^\circ$ 。

静止补偿器输出的无功功率:

$$\begin{aligned} Q &= Q_C + Q_L = U^2 \omega C - U I_{L(1)} \\ &= U^2 \left\{ \omega C - \frac{1}{x_L} \left[2 \left(1 - \frac{\alpha}{180} \right) + \frac{\sin 2\alpha}{\pi} \right] \right\} \end{aligned} \quad (2.152)$$

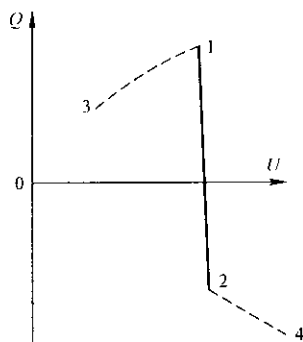


图 2.33 静止补偿器 $Q-U$ 静态特性

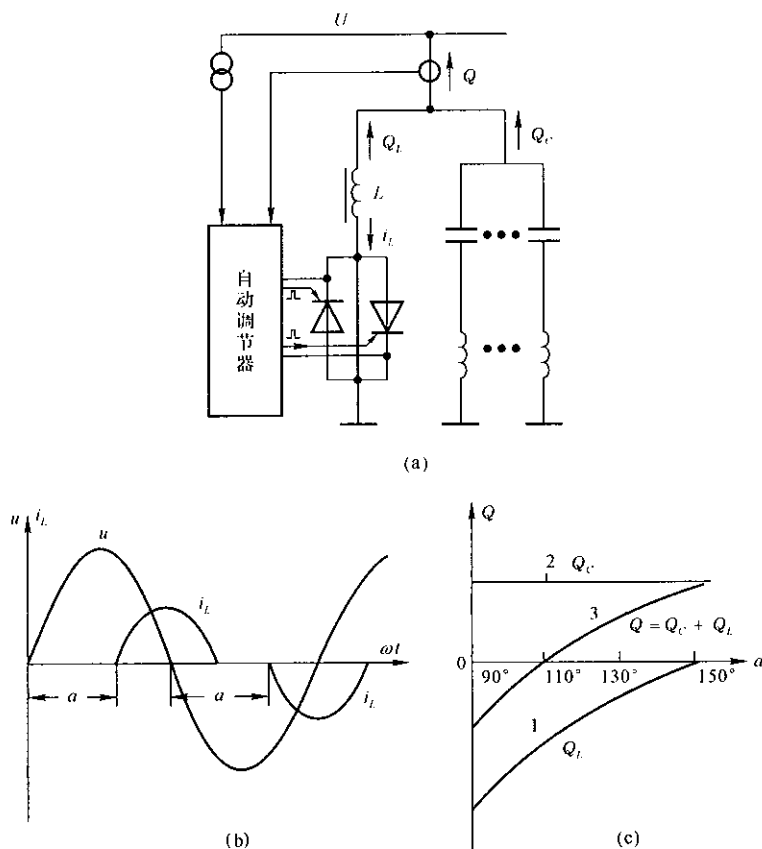


图 2.34 可控硅控制电抗器型静止补偿器

(a) 原理接线; (b) 控制原理; (c) 无功功率特性

电压一定时, Q_L 、 Q_C 和 Q 与触发角 α 的关系如图 2.34(c) 所示。

在自动调节器的作用下, 这种静止补偿器的 Q - U 静态特性与图 2.33 相同。

可控硅控制电抗器型的静止补偿器结构简单、制造较易, 控制响应速度快, 是目前使用得最多的一种类型。

3. 自饱和电抗器型静止补偿器

这种静止补偿器的原理如图 2.35 所示。关键的设备是自饱和电抗器 L , 它的特性设计成: 电压大于某值以后, 随着电压的升高铁心急剧地饱和。因此在这一范围内, 很少的电压变化就会引起绕组中电流和消耗的无功功率大幅度的变化, 如图 2.35(b) 中曲线 Q_L 所示。饱和电抗器和电容器并联后, 静止补偿器输出的无功功率 $Q = Q_C + Q_L$ 随电压 U 变化的特性亦示于同一图中, 在

工作范围内与图 2.33 相同。这种静止补偿器实际上是一种三相大容量磁饱和稳压器,它不需要外加控制设备,动态响应速度很快。饱和电抗器三相绕组采用特殊的曲折形接法还可消除大部分谐波电流,并且运行维护方便,所以是一种很理想的无功补偿设备。但是饱和电抗器设计、制造难度很大,饱和特性不易控制,所以目前使用得还不多。

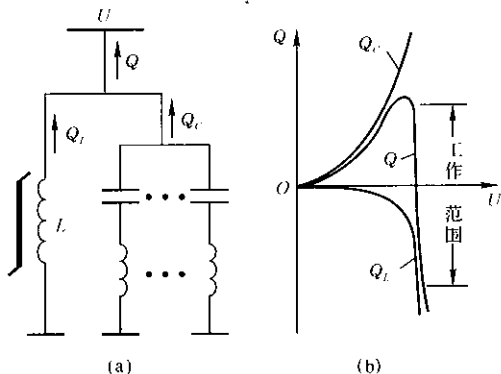


图 2.35 自饱和电抗器型

(a) 原理电路; (b) 无功功率 - 电压特性

各种静止补偿器的共同特点是既可输出又能吸收无功功率,而且调节平滑,特别是在电压变化时能快速地自行调节无功功率,所以用作动态无功功率补偿尤为合适。例如大型轧钢机等具有连续阶跃变化的负荷(称为冲击负荷)对电力系统运行危害很大,在该处接入静止补偿器后,能够有效地抑制电压的波动,减轻对系统的扰动。目前国外已大量使用静止补偿器,我国使用量也日益增多,可以预见它将在电力系统中得到广泛的应用。

在电力系统正常稳态运行分析中,静止补偿器可作为无功功率电源处理,它输出的无功功率用 $Q-U$ 静态特性(图 2.33)表示。在工作范围内静态特性可近似地用线性方程描述,即

$$Q = Q_0 - K(U - U_N) \quad (2.153)$$

式中, U 和 U_N 分别为实际和额定电压, Q_0 为 $U = U_N$ 时的无功功率, K 为静态特性的斜率。

由于 K 值很大,一般计算时还可近似地用电压恒定的无功功率电源表示。

2.5 电力系统负荷

电力系统中每一个变电所供电的众多用户常用一个等值负荷 $P + jQ$ 表示,称为综合负荷。一个综合负荷包括的范围随所研究的问题而定,例如着重研究电力系统中 110kV 及以上电压等级的电力网时,可将 110kV 变电所二次侧母线的总供电功率用一个综合负荷表示,也可将变压器包括在内用一个接

在 110kV 母线上的综合负荷表示。因此综合负荷可能代表一个企业,或一个工业区、一个城市甚至一个广大地区的总用电功率。按综合负荷连接处的电压等级又可分为 220kV、110kV、35kV、10kV 综合负荷等等。

一个综合负荷包含有种类繁多的负荷成分,如照明设备,大量容量不同的异步电动机、同步电动机,电力电子设备(如整流器),电热设备以及电力网的有功和无功功率损耗等。

不同综合负荷包含的各种负荷成分所占的比例可能差异很大,而在不同时刻、不同季节及在不同气象条件下,同一个综合负荷的各种负荷成分的比例也是变化的。所以,要建立一个实用而准确的综合负荷模型是相当困难的,这是迄今尚未很好解决的一个问题。

综合负荷的模型可分为动态模型和静态模型两类。动态模型描述电压和频率急剧变化时,负荷有功和无功功率随时间变化的动态特性,它可表示为

$$P = F_p(t, U, f, dU/dt, df/dt, \dots) \quad (2.154)$$

$$Q = F_q(t, U, f, dU/dt, df/dt, \dots) \quad (2.155)$$

由于负荷中异步电动机的比例相当大,所以负荷的功率不仅与电压 U 、频率 f 有关,而且与电压、频率的变化速度有关。如何建立综合负荷动态特性的数学关系式,至今仍然是一个困难的问题。一般只是根据所研究问题的特点,用不同的近似数学模型表示。

负荷的动态模型用于电力系统受到大扰动时的暂态过程分析。综合负荷的静态模型描述有功和无功功率稳态值与电压及频率的关系,可表示为

$$P = F_p(U, f) \quad (2.156)$$

$$Q = F_q(U, f) \quad (2.157)$$

称为负荷的静态特性。当频率不变时,负荷功率只是电压的函数,称为负荷的电压静态特性,第 1 章图 1.2(a) 绘出某一综合负荷的电压静态特性。当电压不变时,负荷功率与频率的关系称为负荷的频率静态特性,如图 1.2(b) 所示。

综合负荷的电压及频率静态特性,可以根据各个基本负荷成分的静态特性方程式或实测曲线用统计方法综合起来得到,显然其准确性较低。最好的办法是实际测量,但也有困难,因为在实际测量时,要电力网的电压变化大于 $\pm 10\%$ 一般是不允许的,频率改变的允许范围则更小,所以只能测到额定电压或额定频率附近一段的静态特性。比较现实的方法是用测量的结果对理论计算特性进行校核和修正。

综合负荷用静态特性表示的模型用于电力系统正常稳态工况的计算,也可用于电压和频率变化缓慢的暂态过程计算。下面介绍几种实用的负荷静态模型。

1. 用电压静态特性表示的综合负荷模型

在电力系统的正常运行潮流计算(即功率、电压计算)中,一般不考虑频率变化,某些暂态过程中频率变化很小可以不计,这时负荷可以用电压静态特性表示。实用上,负荷的电压静态特性可用二次多项式表示,即

$$P = P_N \left[a_p \left(\frac{U}{U_N} \right)^2 + b_p \frac{U}{U_N} + c_p \right] \quad (2.158)$$

$$Q = Q_N \left[a_q \left(\frac{U}{U_N} \right)^2 + b_q \frac{U}{U_N} + c_q \right] \quad (2.159)$$

式中, U_N 为额定电压, P_N 和 Q_N 为 $U = U_N$ 时的有功和无功功率。各个系数可根据实际的电压静态特性用最小二乘法拟合求得,满足

$$a_p + b_p + c_p = 1 \quad (2.160)$$

$$a_q + b_q + c_q = 1 \quad (2.161)$$

由式(2.158)和(2.159)可见,有功和无功功率都含有三个分量:第一个与电压的平方成正比,相当于恒定阻抗消耗的功率;第二个与电压成正比,是恒定电流分量;第三个是恒定功率分量。

在负荷的电压与额定值偏移较小的场合,电压静态特性在额定电压附近可用直线逼近,即用线性方程表示

$$P = P_N \left(1 + K_{pU} \frac{U - U_N}{U_N} \right) \quad (2.162)$$

$$Q = Q_N \left(1 + K_{qU} \frac{U - U_N}{U_N} \right) \quad (2.163)$$

在进行电力系统规划设计时,由于各负荷都是估计值,因此潮流计算中负荷的 P 和 Q 可粗略地按恒定值处理。

2. 用电压及频率静态特性表示的综合负荷模型

一般频率变化幅度较小,在额定频率附近负荷的频率静态特性可用直线表示。同时考虑电压和频率的负荷模型可表示为

$$P = P_N \left[a_p \left(\frac{U}{U_N} \right)^2 + b_p \frac{U}{U_N} + c_p \right] \left(1 + K_{pf} \frac{f - f_N}{f_N} \right) \quad (2.164)$$

$$Q = Q_N \left[a_q \left(\frac{U}{U_N} \right)^2 + b_q \frac{U}{U_N} + c_q \right] \left(1 + K_{qf} \frac{f - f_N}{f_N} \right) \quad (2.165)$$

或

$$P = P_N \left(1 + K_{pU} \frac{U - U_N}{U_N} \right) \left(1 + K_{pf} \frac{f - f_N}{f_N} \right) \quad (2.166)$$

$$Q = Q_N \left(1 + K_{qU} \frac{U - U_N}{U_N} \right) \left(1 + K_{qf} \frac{f - f_N}{f_N} \right) \quad (2.167)$$

上列式中 f_N 为额定频率。

2.6 多级电压电力系统

在电力系统正常运行状态的计算中,同步发电机、调相机和无功功率静止补偿器等均作为向电力网注入有功和无功功率的电源处理,负荷用有功和无功功率表示,而电力网部分则用单相等值电路描述。本节将讨论多电压等级电力网的等值电路和参变数的归算,还将介绍三相交流系统的标么制和电力网等值电路各参变数标么值的计算方法。最后,讨论非标准变比变压器的等值电路和相应的电力网等值电路。

2.6.1 多级电压电力网的等值电路

根据电力网的电气结线图,将各元件用相应的等值电路代替,即可得到该电力网的等值电路。图 2.36 为一简单多级电压电力网电气结线图和等值电路的例子。

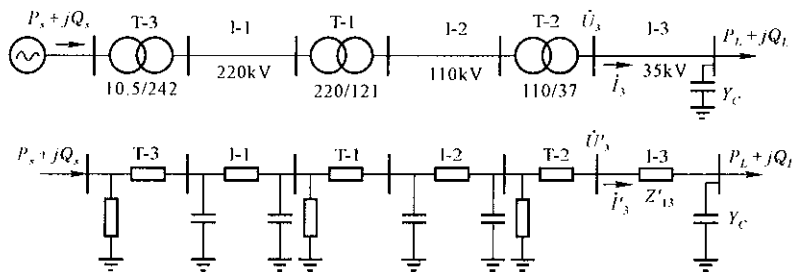


图 2.36 多级电压电力网电气结线图和等值电路

在多电压级的电力网等值电路中,各元件的参数、各节点电压和各支路电流均要归算到指定的某一电压级,该指定的电压级称为基本级或基准级。基本级可任意指定,但选元件数最多的电压级为基本级可以节省计算工作量,因为基本级的参变数不需归算。非基本级元件参变数的归算是根据变压器参变数归算的原理进行的。设从基本级到某电压级之间串联有变比为 k_1, k_2, \dots, k_n 的 n 台变压器,则该电压级中某元件阻抗 Z 、导纳 Y 、电压 U 和电流 I 归算到基本级的计算式分别为

$$Z' = Z \times (k_1 k_2 \cdots k_n)^2 \quad (2.168)$$

$$Y' = Y / (k_1 k_2 \cdots k_n)^2 \quad (2.169)$$

U' = U \times (k_1 k_2 \cdots k_n) \tag{2.170}

I' = I / (k_1 k_2 \cdots k_n) \tag{2.171}

由于 $\dot{U}' \dot{I}' = \dot{U} \dot{I}$, 所以有功和无功功率的归算值不变。归算中各变压器的变比为靠近基本级一侧的空载电压与靠近需要归算一侧的空载电压之比。以图 2.36 为例, 设选择 220kV 级为基本级, 则 35kV 级线路 l-3 的阻抗、始端电压和电流及导纳 Y_c 的归算值为: $Z'_{l3} = Z_{l3}(k_1 k_2)^2, \dot{U}'_3 = \dot{U}_3(k_1 k_2), \dot{I}'_3 = \dot{I}_3/(k_1 k_2), Y'_c = Y_c/(k_1 k_2)^2$ 。其中, 变压器 T-1 的变比 $k_1 = 220/121$, T-2 的变比 $k_2 = 110/37$ 。

归算中各变压器要用实际的变比, 例如变压器高压侧切换到某一分接头运行, 则要用该分接头的空载电压计算变比。由此可见, 当某些变压器分接头改变时, 等值电路中有关的一批参变数要重新进行归算。

【例 2.7】 某电力网的电气结线如图 2.37(a) 所示, 各元件的技术数据见下表, 其中变压器 T-2 高压侧接在 -2.5% 分接头运行, 其他变压器均接在主接头运行; 35kV 和 10kV 线路的并联导纳略去不计; 图中的负荷均用三相功率表示。试绘制该电力网的等值电路, 取 220kV 级为基本级。

电力线路技术数据

线 路	额定电压 (kV)	电阻 (Ω/km)	电抗 (Ω/km)	电纳 (S/km)	线路长度 (km)
l-1(架空线)	220	0.080	0.406	2.81×10^{-6}	150
l-2(架空线)	110	0.105	0.383	2.98×10^{-6}	60
l-3(电缆)	10	0.45	0.080		2.5
l-4(架空线)	35	0.17	0.38		13

变压器技术数据

变 压 器	额定容量 (MVA)	额定电压 (kV)	$U_k\%$	P_k (kW)	$I_0\%$	P_0 (kW)	备 注
T-1	180	13.8/242	13	893	0.5	175	
T-3	63	110/10.5	10.5	280	0.61	60	

变压器	额定容量 (MVA)	额定电压 (kV)	$U_k\%$	P_k (kW)	$I_0\%$	P_0 (kW)	备 注
T-2 (自耦)	120	220/121/38.5	9.6(高-中) 35(高-低) 23(中-低)	448(高-中) 1652(高-低) 1512(中-低)	0.35	89	高压侧接 在-2.5% 分接头运 行。 $U_k\%$, P_k 均已归算到 额定容量

【解】 电力网的等值电路如图 2.37(b), 各元件参数计算如下:
变压器 T-1 参数(归算到 220kV 侧):

$$\begin{aligned} R_{T-1} &= \frac{P_k}{1000} \frac{U_{1N}^2}{S_N^2} = \frac{893}{1000} \frac{242^2}{180^2} = 1.614(\Omega) \\ X_{T-1} &= \frac{U_k\%}{100} \frac{U_{1N}^2}{S_N} = \frac{13}{100} \frac{242^2}{180} = 42.3(\Omega) \\ Y_{m1} &= \frac{P_0}{1000U_{1N}^2} - j \frac{I_0\%}{100} \frac{S_N}{U_{1N}^2} = \frac{175}{1000 \times 242^2} - j \frac{0.5}{100} \frac{180}{242^2} \\ &= (2.99-j15.37) \times 10^{-6}(\text{S}) \end{aligned}$$

220kV 线路 l-1 的参数:

$$\begin{aligned} Z_{l-1} &= (r_1 + jx_1)l = (0.08 + j0.406) \times 150 = 12 + j60.9(\Omega) \\ Y_{l-1} &= jB_{l-1}/2 = jb_1l/2 = j2.81 \times 10^{-6} \times 150/2 \\ &= j2.11 \times 10^{-4}(\text{S}) \end{aligned}$$

自耦变压器 T2 的参数:

$$\begin{aligned} P_{k1} &= 0.5(P_{k1-2} + P_{k1-3} - P_{k2-3}) = 0.5(448 \\ &\quad + 1625 - 1512) = 294(\text{kW}) \\ P_{k2} &= P_{k1-2} - P_{k1} = 448 - 294 = 154(\text{kW}) \\ P_{k3} &= P_{k2-3} - P_{k2} = 1512 - 154 = 1358(\text{kW}) \\ R_{12} &= \frac{294}{1000} \times \frac{220^2}{120^2} = 0.294 \times 3.36 = 0.988(\Omega) \\ R_{22} &= \frac{154}{1000} \times 3.36 = 0.517(\Omega) \\ R_{32} &= \frac{1358}{1000} \times 3.36 = 4.56(\Omega) \\ U_{k1}\% &= 0.5(9.6 + 35 - 23) = 10.8 \end{aligned}$$

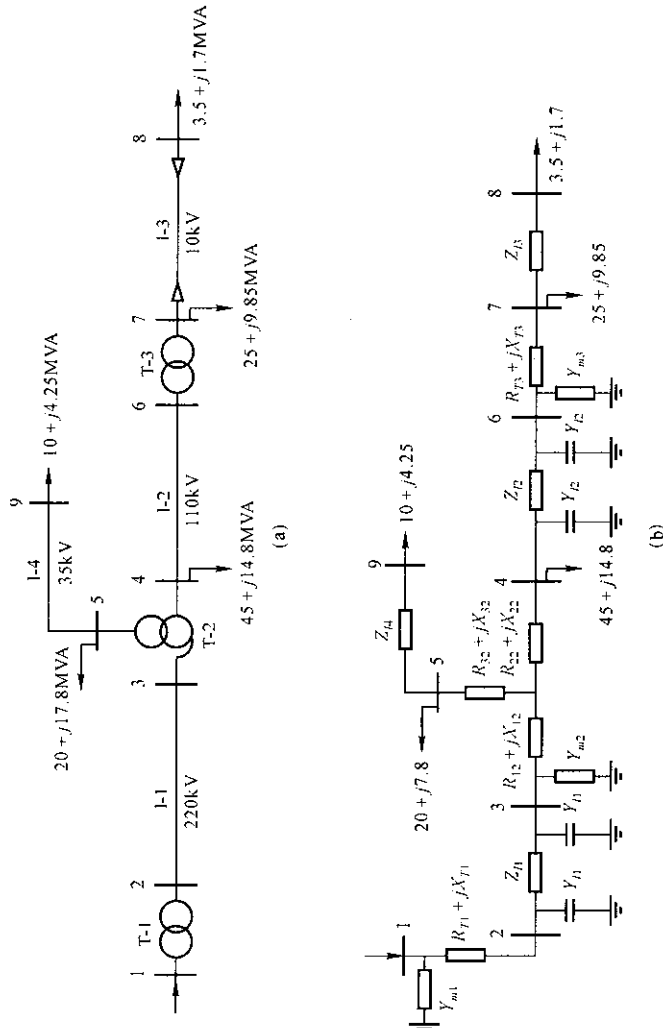


图 2.37 例 2.7 电力网络结线图 and 等值电路

$$\begin{aligned}
 U_{k2} \% &= U_{k1-2} \% - U_{k1} \% = 9.6 - 10.8 = -1.2 \\
 U_{k3} \% &= U_{k2-3} \% - U_{k2} \% = 23 - (-1.2) = 24.2 \\
 X_{12} &= \frac{10.8}{100} \times \frac{220^2}{120} = 0.108 \times 403.3 = 43.6 (\Omega) \\
 X_{22} &= \frac{-1.2}{100} \times 403.3 = -4.84 (\Omega) \\
 X_{32} &= \frac{24.2}{100} \times 403.3 = 97.6 (\Omega) \\
 Y_{m2} &= \frac{89}{1000 \times 220^2} - j \frac{0.35}{100} \times \frac{120}{220^2} \\
 &= (1.84 - j8.68) \times 10^{-6} (\text{S})
 \end{aligned}$$

$$\text{实际变比 } k_{12} = \frac{220(1 - 0.025)}{121} = \frac{214.5}{121}, k_{13} = \frac{214.5}{38.5}$$

110kV 线路 1-2 的参数:

$$\begin{aligned} Z_{1-2} &= (0.105 + j0.383) \times 60 \times \left(\frac{214.5}{121} \right)^2 \\ &= 19.8 + j72.2(\Omega) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_{1-2} &= j \frac{B_{12}}{2} = j2.98 \times 10^{-6} \times \frac{60}{2} \left(\frac{121}{214.5} \right)^2 \\ &= j2.84 \times 10^{-5}(\text{S}) \end{aligned}$$

变压器 T-3 参数:

$$R_{T-3} = \frac{280}{1000} \times \frac{110^2}{63^2} \times \left(\frac{214.5}{121} \right)^2 = 2.68(\Omega)$$

$$X_{T-3} = \frac{10.5}{100} \times \frac{110^2}{63} \times \left(\frac{214.5}{121} \right)^2 = 63.4(\Omega)$$

$$\begin{aligned} Y_{m3} &= \left(\frac{60}{1000 \times 110^2} - j \frac{0.61}{100} \times \frac{63}{110^2} \right) \times \left(\frac{121}{214.5} \right)^2 \\ &= (1.58 - j10.1) \times 10^{-6}(\text{S}) \end{aligned}$$

10kV 线路 1-3 的参数:

$$\begin{aligned} Z_{1-3} &= (0.45 + j0.08) \times 2.5 \times \left(\frac{214.5}{121} \times \frac{110}{10.5} \right)^2 \\ &= 388 + j69(\Omega) \end{aligned}$$

35kV 线路 1-4 的参数:

$$\begin{aligned} Z_{1-4} &= (0.17 + j0.38) \times 13 \times \left(\frac{214.5}{38.5} \right)^2 \\ &= 68.6 + j153.3(\Omega) \end{aligned}$$

2.6.2 三相系统的标么制

在电路计算中,功率、电压、电流和阻抗等物理量可用 MVA、kV、kA 和 Ω 等有单位值进行运算,也可以用没有量纲的相对值——标么值进行运算。没有量纲的标么值系统称为标么制。

在标么制中,不同意义和不同量纲的物理量都要各指定一个基准值。某一物理量的标么值为它的有名值与其基准值之比。例如物理量 A , 有其相应的基准值 A_B , 则 A 的标么值 $A_* = A/A_B$ 。

在单相交流电路和三相交流系统的单相等值电路稳态计算中,不同量纲的物理量有:单相功率(包括视在、有功及无功功率)、相电压(包括相电势)、电流(相电流和线电流相同,故不加区别)、阻抗(包括电阻及电抗)和导纳(包括

电导及电纳)等五种,所以要指定五个基准值:单相功率 $S_{\varphi B}$ 、相电压 $U_{\varphi B}$ 、电流 I_B 、阻抗 Z_B 和导纳 Y_B 。有了基准值之后,即可计算各量的标么值,例如:

$$\text{单相视在功率 } S_{\varphi*} = S_{\varphi}(\text{MVA})/S_{\varphi B}(\text{MVA})$$

$$\text{单相复功率 } \tilde{S}_{\varphi*} = \frac{\tilde{S}_{\varphi}(\text{MVA})}{S_{\varphi B}(\text{MVA})} = \frac{P_{\varphi}}{S_{\varphi B}} + j \frac{Q_{\varphi}}{S_{\varphi B}} = P_{\varphi*} + jQ_{\varphi*}$$

$$\text{相电压 } \dot{U}_{\varphi*} = \frac{\dot{U}_{\varphi}}{U_{\varphi B}} = \frac{U_{\varphi} \angle \theta}{U_{\varphi B}} = U_{\varphi*} \angle \theta$$

$$\text{阻抗 } Z_* = \frac{Z}{Z_B} = \frac{R}{Z_B} + j \frac{X}{Z_B} = R_* + jX_*$$

为了使以标么值表示的回路方程、功率方程等有与有名单位制表示的方程式在形式上保持相同,五个基准值应满足如下关系:

$$S_{\varphi B} = U_{\varphi B} I_B \quad (2.172)$$

$$U_{\varphi B} = I_B Z_B \quad (2.173)$$

$$Y_B = 1/Z_B \quad (2.174)$$

由于有三个约束方程式,所以五个基准值只能任选两个,其余三个由上面三式决定。

现观察用标么值表示的回路方程式。设有有名单位表示的方程为

$$\dot{E}_{\varphi} = \dot{U}_{\varphi} + \dot{I}_1 Z_1 + \dot{I}_2 Z_2 \quad (2.175)$$

以 $U_{\varphi B}$ 除方程式两边,并计及 $U_{\varphi B} = I_B Z_B$,则可得

$$\begin{aligned} \dot{E}_{\varphi*} = \frac{\dot{E}_{\varphi}}{U_{\varphi B}} &= \frac{\dot{U}_{\varphi}}{U_{\varphi B}} + \frac{\dot{I}_1 Z_1}{I_B Z_B} + \frac{\dot{I}_2 Z_2}{I_B Z_B} \\ &= \dot{U}_{\varphi*} + \dot{I}_{1*} Z_{1*} + \dot{I}_{2*} Z_{2*} \end{aligned} \quad (2.176)$$

同理可证明单相电路的其他方程用标么值表示时的形式也不变。

在三相电力系统稳态计算中,习惯上使用三相功率和线电压(线电势)表示,因此还要指定三相功率基准值 S_B 和线电压基准值 U_B ,同时增加两个关系式:

$$S_B = 3S_{\varphi B} \quad (2.177)$$

$$U_B = \sqrt{3} U_{\varphi B} \quad (2.178)$$

这样,一共有7个基准值和5个约束方程,所以也只能任选两个基准值,其余5个可根据式(2.172)、(2.173)、(2.174)、(2.177)和(2.178)求得。一般选定三相功率和线电压基准值 S_B 和 U_B 最为方便。将式(2.172)和(2.178)代入式(2.177),以及将式(2.173)代入式(2.178),可得

$$S_B = 3U_{\varphi B} I_B = \sqrt{3} U_B I_B \quad (2.179)$$

$$U_B = \sqrt{3} I_B Z_B \quad (2.180)$$

由此可得 I_B 、 Z_B 和 Y_B 与 S_B 、 U_B 的关系式:

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3} U_B} \quad (2.181)$$

$$Z_B = \frac{U_B}{\sqrt{3} I_B} = \frac{U_B^2}{S_B} \quad (2.182)$$

$$Y_B = \frac{S_B}{U_B^2} = \frac{1}{Z_B} \quad (2.183)$$

三相交流系统在三相对称运行时,三相功率 $S = 3S_\varphi$,线电压 $U = \sqrt{3} U_\varphi$,所以三相功率与一相功率的标么值相等,线电压与相电压的标么值相等。这是标么制的一个特点,对电力系统正常运行分析会带来不少方便。

基准值的大小要选择适当,以便于标么值与有名值之间的换算,并使各量的标么值大小合适,便于运算。三相功率基准值 S_B 通常取 100MVA,使功率有名值与标么值之间的换算很方便,不易出错。当电力系统容量很大时可取 $S_B = 1000(\text{MVA})$ 。线电压基准值 U_B 宜用电力网的额定电压 U_N ,或 $U_B \approx 1.05U_N$ (取整数)。电力系统正常运行时,各节点电压一般在额定值附近,选择额定电压或相近的值作基准电压时,各节点电压的标么值均接近 1,这样不但数据计算方便,而且能直观地评估各节点电压的质量,也便于判断计算的正确性。

某些电力设备的参数,常用三相额定容量 S_N 和额定线电压 U_N 为基准的标么值表示。如果在电力系统计算中选取的 S_B 、 U_B 与 S_N 、 U_N 不同,则原标么值要换算为新基准的标么值。换算的方法是先计算出有名值,然后求新的标么值。设某阻抗原标么值为 $Z_{\cdot(N)}$,则以 S_B 、 U_B 为基准的标么值为

$$Z_{\cdot} = \left(Z_{\cdot(N)} \frac{U_N^2}{S_N} \right) \frac{S_B}{U_B^2} \quad (2.184)$$

2.6.3 多电压级电力网等值电路参变数的标么值

单一电压级电力网等值电路中各元件参变数的标么值计算很简单,只要将各参变数的有名值除以选定的相应基准值即可求得。对于多电压级电力网的等值电路,各元件参变数的标么值要分两步计算:先将各电压级的参变数的有名值归算到基本级,然后再对基本级的基准值计算标么值。

设基本级选择的三相功率和线电压基准值为 S_B 和 U_B ,按式(2.181)、(2.182)和(2.183)求出 I_B 、 Z_B 和 Y_B 。又设从基本级到某电压级之间串联有 n

台变比为 k_1, k_2, \dots, k_n 的变压器, 该电压级的 \dot{U}, \dot{I}, Z 和 Y 有名值归算到基本级为 \dot{U}', \dot{I}', Z' 和 Y' , 如式(2.168) ~ (2.171) 所示, 则相应的标么值为

$$\dot{U}_* = \frac{\dot{U}'}{U_B} = \frac{\dot{U}}{U_B} (k_1 k_2 \dots k_n) \quad (2.185)$$

$$\dot{I}_* = \frac{\dot{I}'}{I_B} = \frac{\dot{I}}{I_B (k_1 k_2 \dots k_n)} \quad (2.186)$$

$$Z_* = \frac{Z'}{Z_B} = \frac{Z}{Z_B (k_1 k_2 \dots k_n)^2} \quad (2.187)$$

$$Y_* = \frac{Y'}{Y_B} = \frac{Y}{Y_B (k_1 k_2 \dots k_n)^2} \quad (2.188)$$

为了便于计算, 令

$$U_B' = U_B / (k_1 k_2 \dots k_n) \quad (2.189)$$

$$I_B' = I_B (k_1 k_2 \dots k_n) \quad (2.190)$$

$$Z_B' = Z_B / (k_1 k_2 \dots k_n)^2 \quad (2.191)$$

$$Y_B' = Y_B (k_1 k_2 \dots k_n)^2 \quad (2.192)$$

称为基本级基准值归算到所计算电压级的基准值, 则式(2.185) ~ (2.188) 可简化为

$$\dot{U}_* = \dot{U}' / U_B' \quad (2.193)$$

$$\dot{I}_* = \dot{I}' / I_B' \quad (2.194)$$

$$Z_* = Z' / Z_B' \quad (2.195)$$

$$Y_* = Y' / Y_B' \quad (2.196)$$

以上说明, 可以应用归算到所计算电压级的基准值, 直接对未归算的有名值求取标么值。实际上, 这是用基准值的归算代替各参变数的归算。由于一个电压级只有一组基准值, 而元件数可能很多, 所以用式(2.193) ~ (2.196) 计算可以节省计算工作量。

基准值的归算还可以简化。因为 $I_B = S_B / (\sqrt{3} U_B)$, $Z_B = U_B^2 / S_B$, $Y_B = 1 / Z_B$, 所以式(2.190) ~ (2.192) 中

$$I_B' = \frac{S_B}{\sqrt{3} U_B} (k_1 k_2 \dots k_n) = \frac{S_B}{\sqrt{3} U_B'} \quad (2.197)$$

$$Z_B' = \frac{U_B^2}{S_B} \frac{1}{(k_1 k_2 \dots k_n)^2} = \frac{U_B'^2}{S_B} \quad (2.198)$$

$$Y_B' = \frac{(k_1 k_2 \dots k_n)^2}{Z_B} = \frac{1}{Z_B'} = \frac{S_B}{U_B'^2} \quad (2.199)$$

因此,只需计算出基准电压的归算值 U_B' ,其余基准的归算值可直接用上面三式求得。另外,由式(2.197)可知 $S_B = \sqrt{3} U_B' I_B'$,亦即各电压级的功率基准值是相同的,这与功率归算到另一电压级数值不变的道理是一样的。

【例 2.8】 试计算例 2.7 多电压级电力网等值电路中各元件参数的标么值。

【解】 指定 220kV 级为基本级,取 $S_B = 100\text{MVA}$, $U_B = 220\text{kV}$ 。先计算各电压级的电压基准值。

$$110\text{kV 级} \quad U_{B(110)} = \frac{U_B}{k_{12(T2)}} = 220 \times \frac{121}{214.5} = 124.1(\text{kV})$$

$$35\text{kV 级} \quad U_{B(35)} = \frac{U_B}{k_{13(T2)}} = 220 \times \frac{38.5}{214.5} = 39.5(\text{kV})$$

$$10\text{kV 级} \quad U_{B(10)} = \frac{U_B}{k_{12(T2)}k_{T3}} = 220 \times \frac{121}{214.5} \times \frac{10.5}{110} = 11.85(\text{kV})$$

等值电路见图 2.37(b)。

变压器 T-1 参数:

$$R_{T-1*} = \frac{P_k}{1000} \times \frac{U_{1N}^2}{S_N^2} \times \frac{S_B}{U_B^2} = \frac{893}{1000} \times \frac{242^2}{180^2} \times \frac{100}{220^2} = 0.00333$$

$$X_{T-1*} = \frac{U_k\%}{100} \times \frac{U_{1N}^2}{S_N} \times \frac{S_B}{U_B^2} = \frac{893}{100} \times \frac{242^2}{180} \times \frac{100}{220^2} = 0.0874$$

$$\begin{aligned} Y_{m-1*} &= \left(\frac{P_0}{1000U_{1N}^2} - j \frac{I_0\%}{100} \times \frac{S_N}{U_{1N}^2} \right) \frac{U_B^2}{S_B} \\ &= \left(\frac{175}{1000 \times 242^2} - j \frac{0.5}{100} \times \frac{180}{242^2} \right) \frac{220^2}{100} \\ &= (1.45 - j7.44) \times 10^{-3} \end{aligned}$$

220kV 线路 l1 的参数:

$$\begin{aligned} Z_{l-1*} &= (0.08 + j0.406) \times 150 \times \frac{100}{220^2} \\ &= 0.0248 + j0.1258 \end{aligned}$$

$$Y_{l-1*} = j \frac{B_{l1*}}{2} = j2.88 \times 10^{-6} \times \frac{150}{2} \times \frac{220^2}{100} = j0.102$$

变压器 T2 的参数:

$$R_{12*} = \frac{294}{1000} \times \frac{220^2}{120^2} \times \frac{100}{220^2} = 0.294 \times \frac{100}{120^2} = 0.00204$$

$$R_{22*} = \frac{154}{1000} \times \frac{100}{120^2} = 0.00107$$

$$R_{32*} = \frac{1358}{1000} \times \frac{100}{120^2} = 0.00943$$

$$X_{12*} = \frac{10.8}{100} \times \frac{220^2}{120} \times \frac{100}{220^2} = 0.108 \times \frac{100}{120} = 0.09$$

$$X_{22*} = \frac{-1.2}{100} \times \frac{100}{120} = -0.01$$

$$X_{32*} = \frac{24.2}{100} \times \frac{100}{120} = 0.202$$

$$Y_{m2*} = \left(\frac{89}{1000 \times 220^2} - j \frac{0.35}{100} \times \frac{120}{220^2} \right) \frac{220^2}{100}$$

$$= (0.89 - j4.2) \times 10^{-3}$$

110kV 线路 1-2 的参数:

$$Z_{1-2*} = (r_1 + jx_1) \times l \times \frac{S_B}{U_{B(110)}^2}$$

$$= (0.105 + j0.383) \times 60 \times \frac{100}{124.1^2}$$

$$= 0.0409 + j0.1492$$

$$Y_{12*} = j \frac{B_{l2*}}{2} = j \frac{b_1 l}{2} \times \frac{U_{B(110)}^2}{S_B} = j2.98 \times 10^{-6} \times \frac{60}{2} \times \frac{124.1^2}{100}$$

$$= j0.01377$$

变压器 T-3 参数:

$$R_{T-3*} = \frac{280}{1000} \times \frac{110^2}{63^2} \times \frac{100}{124.1^2} = 0.00554$$

$$X_{T-3*} = \frac{10.5}{100} \times \frac{110^2}{63^2} \times \frac{100}{124.1^2} = 0.1309$$

$$Y_{m-3*} = \left(\frac{60}{1000 \times 110^2} - j \frac{0.61}{100} \times \frac{63}{110^2} \right) \frac{124.1^2}{100}$$

$$= (0.765 - j4.89) \times 10^{-3}$$

10kV 线路 1-3 的参数:

$$Z_{1-3*} = (r_1 + jx_1) \times l \times \frac{S_B}{U_{B(10)}^2}$$

$$= (0.45 + j0.08) \times 2.5 \times \frac{100}{11.85^2} = 0.801 + j0.1424$$

35kV 线路 1-4 的参数:

$$Z_{1-4*} = (r_1 + jx_1) \times l \times \frac{S_B}{U_{B(35)}^2}$$

$$= (0.17 + j0.38) \times 13 \times \frac{100}{39.5^2}$$

$$= 0.1416 + j0.317$$

等值电路图 2.37(b) 中各负荷功率也要用标么值表示。

2.6.4 具有非标准变比变压器的多电压级电力网等值电路

在电力系统正常运行状态计算中,往往需要改变某些变压器分接头的位

置,调整有关母线的电压。使用前述的等值电路,在变压器分接头改变时,有关电压级电力网中电压、电流和阻抗等的有名值或标么值都要重新计算。对于大规模的电力网,这需要很大的计算工作量。为了克服这一缺点,本节将讨论变压器的实际变比与两侧额定电压(或基准电压)之比不同时的等值电路,简称非标准变比变压器的等值电路,并介绍采用这种等值电路时,电力网等值电路各参数的计算方法。

先讨论包括变比在内的变压器等值电路。图 2.38(a) 示出变比为 k 的双绕组变压器,图 2.38(b) 为它的单相等值图。这里用一变比为 k 的理想变压器和归算到 1 侧的原变压器阻抗来代替实际的变压器,如图中虚线框所示。所谓理想变压器是指励磁电流、电阻和漏抗均为零的变压器。另外,归算到 1 侧的变压器励磁导纳 Y_m 作为变压器外的并联支路处理。对图 2.38(b) 虚线框内的变压器,可列出如下方程:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2' + \dot{I}_1 Z_T \quad (2.200)$$

$$\dot{U}_2 = k \dot{U}_2' \quad (2.201)$$

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_1 / k \quad (2.202)$$

将后两式代入第一式,可得

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 / k + k Z_T \dot{I}_2 = A \dot{U}_2 + B \dot{I}_2 \quad (2.203)$$

$$\dot{I}_1 = k \dot{I}_2 = C \dot{U}_2 + D \dot{I}_2 \quad (2.204)$$

这是用传输参数表示的双口网络方程,其中 $A = 1/k$, $B = k Z_T$, $C = 0$, $D = k$ 。由于 $AD - BC = 1$,所以该变压器可用图 2.38(c) 的 π 型等值电路表示,其中三个参数分别为

$$Z_c = B = k Z_T \quad (2.205)$$

$$Y_{1c} = \frac{D - 1}{B} = \frac{k - 1}{k Z_T} \quad (2.206)$$

$$Y_{2c} = \frac{A - 1}{B} = \frac{1/k - 1}{k Z_T} = \frac{1 - k}{k^2 Z_T} \quad (2.207)$$

式中 Y_{1c} 为阻抗 Z_T 侧的并联导纳, Y_{2c} 为理想变压器侧的并联导纳,两者不同。

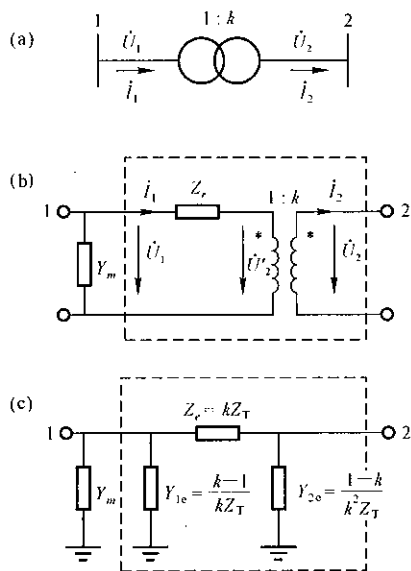


图 2.38 变压器等值电路

变压器采用这种等值电路时,不管变比 k 变化与否,两侧电压和电流都是实际值,不存在归算问题。

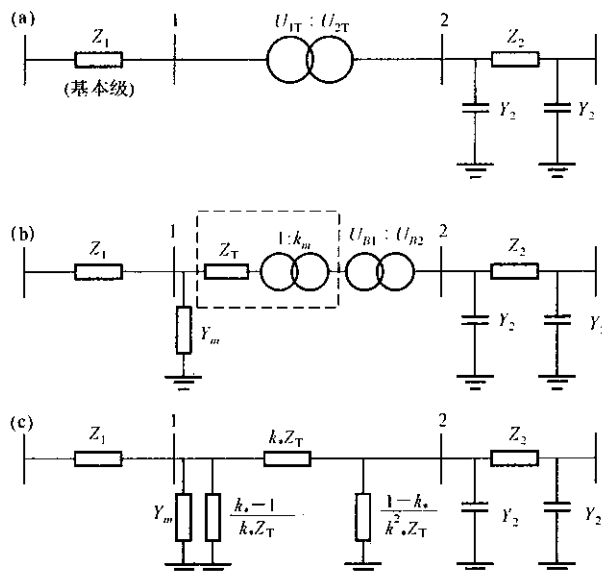


图 2.39 具有非标准变比变压器的电力网等值电路

现在讨论应用这种变压器等值电路建立多电压级电力网等值电路的方法。图 2.39(a) 为有两个电压级的电力网,取 Z_1 所在的电压级作为基本级。将实际变压器用它的阻抗 Z_T 和两个串联的变比分别为 k_* 和 U_{B2}/U_{B1} 的理想变压器等值。 Z_T 和励磁导纳 Y_m 均为归算到 1 侧的值, Y_m 作为变压器外的并联导纳处理。显然,两个理想变压器变比的乘积必须等于变压器的实际变比,即

$$k_* U_{B2}/U_{B1} = U_{2T}/U_{1T} \quad \text{或} \quad k_* = (U_{2T}/U_{1T})/(U_{B2}/U_{B1}) \quad (2.208)$$

式中, U_{B2}/U_{B1} 称为标准变比,通常取变压器两侧电力网额定电压之比,并作为常数处理; k_* 称为非标准变比或变比的标么值,当实际变比改变时, k_* 将随之变化。

进行非基本级参数归算时,可将图 2.39(b) 中虚线框内的变压器看作基本级的一个元件。变压器 2 侧网络中的阻抗 Z_2 和导纳 Y_2 归算到基本级的计算式为

$$Z_2' = Z_2 (U_{B1}/U_{B2})^2 \quad (2.209)$$

$$Y_2' = Y_2 (U_{B2}/U_{B1})^2 \quad (2.210)$$

虚线框内的变压器称为非标准变比变压器,将它用图 2.38(c) 的 π 型等值电路表示,就可得到图 2.39(c) 所示的电力网等值电路。该等值电路的特点是,当

变压器分接头切换而使 k 改变时,除了此变压器等值电路的三个参数需要修改外,其他参变数的归算值都保持不变。

以上是用有单位进行计算,同样也可以用标么值计算。设功率基准值为 S_B ,基本级基准电压为 U_{B1} ,即图 2.39(b) 中标准变比理想变压器靠近基本侧的电压,则另一电压级的电压基准值为 $U_{B1} \div (U_{B1}/U_{B2}) = U_{B2}$,可见这种取法可省去归算。实际上可以反过来做:先选择各电压级的基准电压,然后用变压器两侧电压基准值之比作为标准变比,这样就可省去电压基准值的归算,而且不必明确指定基本级。图 2.39(c) 各参数的标么值为:

$$Z_{1*} = Z_1 \frac{S_B}{U_{B1}^2}, \quad Z_{T*} = Z_T \frac{S_B}{U_{B1}^2}, \quad Y_{m*} = Y_m \frac{U_{B1}^2}{S_B},$$

$$Z_{2*} = Z_2 \frac{S_B}{U_{B2}^2}, \quad Y_{2*} = Y_2 \frac{U_{B2}^2}{S_B}$$

对于电压级更多的电力网,同样可用上述方法制定它的等值电路。

非标准变比三绕组变压器也可根据上述原理作出等值电路。图 2.40(a) 的三绕组变压器,实际变比为 $U_{1T}/U_{2T}/U_{3T}$ 。取标准变比为 $U_{B1}/U_{B2}/U_{B3}$,可作出图 2.40(b) 所示的等值图,其中 Z_{T1} 、 Z_{T2} 、 Z_{T3} 和 Y_m 为归算到 3 侧的三侧绕组等值阻抗和励磁导纳。高、中压侧各串联两个理想变压器,非标准变比为: $k_1 = (U_{1T}/U_{3T})/(U_{B1}/U_{B3})$ 和 $k_2 = (U_{2T}/U_{3T})/(U_{B2}/U_{B3})$ 。这样就把三绕组变

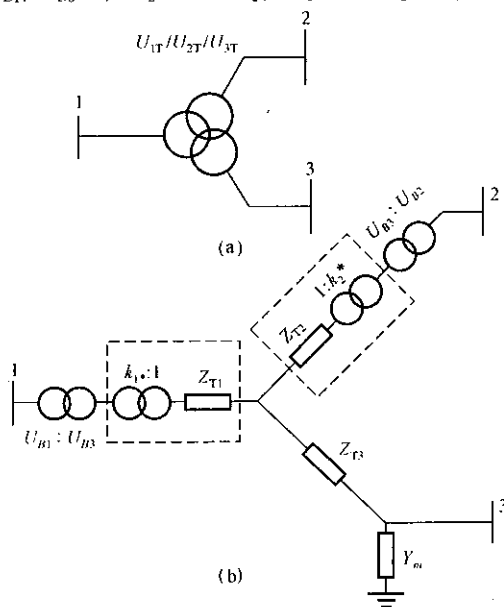


图 2.40 非标准变比三绕组变压器

想变压器的位置。最后,绘制完整的等值电路,如图 2.41(c) 所示。下面计算各元件的参数。

线路 1-1:

$$\begin{aligned} Z_{1-1} &= (0.08 + j0.406) \times 150 \times \frac{100}{220^2} \\ &= 0.0248 + j0.1258 \end{aligned}$$

$$Y_{11} = j \frac{B_{1-1}}{2} = j2.81 \times 10^{-6} \times \frac{150}{2} \times \frac{220^2}{100} = j0.102$$

变压器 T-2:

$$\begin{aligned} Z_{12*} &= \left(\frac{294}{1000} \times \frac{220^2}{120^2} + j \frac{10.8}{100} \times \frac{220^2}{120} \right) \times \frac{100}{220^2} \\ &= 0.00204 + j0.09 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{22*} &= \left(\frac{154}{1000} \times \frac{220^2}{120^2} + j \frac{1.2}{100} \times \frac{220^2}{120} \right) \times \frac{100}{220^2} \\ &= 0.00107 - j0.01 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{32*} &= \left(\frac{1358}{1000} \times \frac{220^2}{120^2} + j \frac{24.2}{100} \times \frac{220^2}{120} \right) \times \frac{100}{220^2} \\ &= 0.00943 + j0.202 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_{m2*} &= \left(\frac{89}{1000 \times 220^2} - j \frac{0.35}{100} \times \frac{120}{220^2} \right) \times \frac{220^2}{100} \\ &= (0.89 - j4.2) \times 10^{-3} \end{aligned}$$

中压侧双绕组变压器等值电路参数:

$$k_{22*} = \frac{121}{214.5} \div \frac{110}{220} = 1.128$$

$$Z_{1*} = k_{22*} Z_{22*} = 0.00121 - j0.01128$$

$$\begin{aligned} Y_{11} &= \frac{k_{22*} - 1}{k_{22*} Z_{22*}} = \frac{1.128 - 1}{1.128} \times \frac{1}{0.00107 - j0.01} \\ &= 0.1135 \times (10.58 + j98.9) \\ &= 1.2 + j11.22 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_{12*} &= \frac{1 - k_{22*}}{k_{22*}^2 Z_{22*}} = \frac{1 - 1.128}{1.128^2} \times (10.58 + j98.9) \\ &= -1.064 - j9.95 \end{aligned}$$

低压侧双绕组变压器等值电路参数:

$$k_{32*} = \frac{38.5}{214.5} \div \frac{35}{220} = 1.128$$

$$Z_{5*} = k_{32*} Z_{32*} = 0.0106 + j0.228$$

$$Y_{51} = \frac{k_{32*} - 1}{k_{32*} Z_{32*}} = \frac{1.128 - 1}{1.128} \times \frac{1}{0.00943 + j0.202}$$

$$= 0.1135 \times (0.231 - j4.94)$$

$$= 0.0262 - j0.561$$

$$Y_{52*} = \frac{1 - k_{32*}}{k_{32*}^2 Z_{32*}} = \frac{1 - 1.128}{1.128^2} \times (0.231 - j4.94) \\ = -0.0232 + j0.497$$

线路 1-4:

$$Z_{1-4*} = (0.17 + j0.38) \times 13 \times \frac{100}{35^2} = 0.1804 + j0.403$$

线路 1-2:

$$Z_{1-2*} = (0.105 + j0.383) \times 60 \times \frac{100}{110^2} \\ = 0.0521 + j0.1899$$

$$Y_{1-2*} = j \frac{B_{1-2*}}{2} = j2.98 \times 10^{-6} \times \frac{60}{2} \times \frac{110^2}{100} = j0.01082$$

变压器 T-3:

$$Z_{T-3*} = \left(\frac{280}{1000} \times \frac{110^2}{63^2} + j \frac{10.5}{100} \times \frac{110^2}{63} \right) \times \frac{100}{110^2} \\ = 0.00705 + j0.1667$$

$$Y_{m3*} = \left(\frac{60}{1000 \times 110^2} - j \frac{0.61}{100} \times \frac{63}{110^2} \right) \times \frac{110^2}{100} \\ = (0.609 - j3.84) \times 10^{-3}$$

$$k_{3*} = \frac{10.5}{110} \div \frac{10}{110} = 1.05$$

$$Z_{3*} = k_{3*} Z_{T-3*} = 0.0074 + j0.175$$

$$Y_{31*} = \frac{k_{3*} - 1}{k_{3*} Z_{T-3*}} = \frac{1.05 - 1}{1.05} \times \frac{1}{0.00705 + j0.1667} \\ = 0.0476 \times (0.253 - j5.99) \\ = 0.012 - j0.285$$

$$Y_{32*} = \frac{1 - k_{3*}}{k_{3*}^2 Z_{T-3*}} = \frac{1 - 1.05}{1.05^2} \times (0.253 - j5.99) \\ = -0.0115 + j0.272$$

3

电力系统稳态运行 分析

3.1 简单电力系统正常运行分析

3.1.1 电力线路的电压损耗与功率损耗

电力线路最简单的模型是连接两节点间的一条阻抗支路,如图 3.1 所示。首先讨论这种模型中的电压损耗与功率损耗。图 3.1 中, $R + jX$ 为线路阻抗, $P + jQ$ 为节点 j 负荷的一相功率。

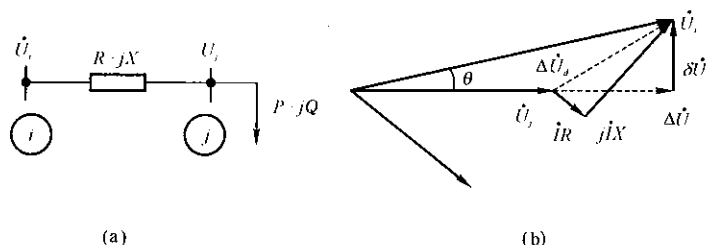


图 3.1 电力线路模型和电压相量图

当以节点 j 的相电压 U_j 为参考相量,即 $\dot{U}_j = U_j \angle 0^\circ$,可求出线路始端的相电压:

$$\begin{aligned}\dot{U}_i &= \dot{U}_j + \dot{I}(R + jX) = U_j + \frac{P - jQ}{U_j}(R + jX) \\ &= U_j + \frac{PR + QX}{U_j} + j \frac{PX - QR}{U_j} = U_j + \Delta U + j\delta U\end{aligned}\quad (3.1)$$

式中:

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U_j} \quad (3.2a)$$

$$\delta U = \frac{PX - QR}{U_j} \quad (3.2b)$$

线路的电压相量图见图 3.1(b)。线路电压降落(两端电压相量差)为

$$\Delta \dot{U}_d = \dot{U}_i - \dot{U}_j = \Delta U + j\delta U$$

式中, ΔU 称作电压降落纵分量, δU 称作电压降落横分量。

从相量图中可以求得线路始端相电压有效值和相位角:

$$U_i = \sqrt{(U_j + \Delta U)^2 + \delta U^2}$$

$$= \sqrt{\left(U_j + \frac{PR + QX}{U_j}\right)^2 + \left(\frac{PX - QR}{U_j}\right)^2} \quad (3.3)$$

$$\theta = \arctan \frac{\delta U}{U_j + \Delta U} \quad (3.4)$$

长度较短的电力线路两端电压相角差一般都不大,可近似地认为

$$U_i \approx U_j + \frac{PR + QX}{U_j} \quad (3.5)$$

亦即线路的电压损耗(两端电压有效值之差)可近似地用电压降落的纵分量 ΔU 表示。

在电力系统正常运行情况的分析计算中,通常使用线电压和三相功率表示。式(3.1)~(3.4)中,将电压改为线电压,同时将功率改为三相功率,关系式仍是正确的;各量用标么值表示时也同样适用。以后均采用线电压和三相功率表示,或用标么制。

通过线路输送的负荷在线路电阻电抗上产生的功率损耗就是线路的功率损耗

$$\Delta \tilde{S} = \Delta P + j\Delta Q = 3I^2(R + jX) = \frac{P^2 + Q^2}{U_j^2}(R + jX) \quad (3.6)$$

电力线路常用的模型为 π 型等值电路,如图 3.2(a) 所示。与图 3.1(a) 相比,线路两端各多了一条数值为线路等值导纳 B 一半的对地支路。如以 $P' + jQ'$ 代表通过线路等值阻抗 $R + jX$ 靠 j 侧的功率,则有

$$P' + jQ' = P + jQ - j\frac{B}{2}U_j^2 \quad (3.7)$$

而线路始端电压:

$$U_i = U_j + \frac{P'R + Q'X}{U_j} + j\frac{P'X - Q'R}{U_j} \quad (3.8)$$

$$\text{线路电压损耗} \approx \frac{P'R + Q'X}{U_j} \quad (3.9)$$

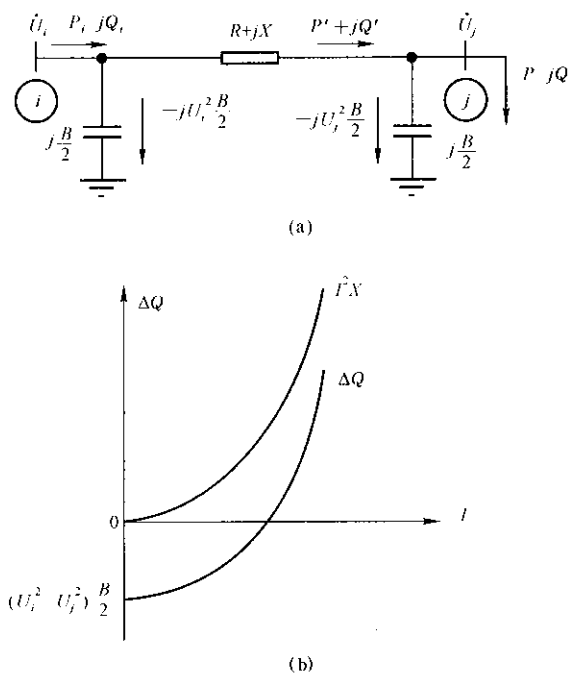
线路功率损耗:

$$\Delta \tilde{S} = \Delta P + j\Delta Q = \frac{P'^2 + Q'^2}{U_j^2}(R + jX) - j\frac{U_i^2}{2}B - j\frac{U_j^2}{2}B \quad (3.10)$$

线路送端的功率:

$$P_i + jQ_i = P + \Delta P + j(Q + \Delta Q) \quad (3.11)$$

从式(3.10)可以看出,线路的无功功率损耗由两部分组成:其一为线路等值电抗中消耗的无功功率,这部分功率与负荷平方成正比;其二为对地等值电纳消耗的无功功率(又称充电功率),由于这一部分无功功率是容性的,因而事实上是发出无功功率,它的大小与所加电压的平方成正比,而与线路流过的

图 3.2 电力线路 π 型模型和线路的无功功率损耗

负荷无直接关系。线路消耗的无功功率与通过负荷电流的近似关系见图 3.2(b)。可以看出,当线路轻载运行时,线路只消耗很少的无功功率,甚至发出无功功率,因而,线路损耗的无功功率是一个与负荷有关的量。

高压线路在轻载运行时发出的无功功率,对无功功率缺乏的系统可能是有益的,但对于超高压输电线路却是不利的。超高压线路等值对地电容产生的无功功率比较大,而超高压线路输送的无功功率又比较小,或者说输送功率的功率因数比较高,这样就有可能产生在轻载时线路充电功率大于线路输送的无功功率。从式(3.8)可以看出,当 Q' 出现负值时,线路始端电压有可能会低于末端电压,或者说,线路末端电压高于始端电压。当线路始端电压保持在正常水平,末端电压的升高会导致设备绝缘的损坏,这是不允许的,因而在 500kV 系统中,线路末端常连接有并联电抗器在空载或轻载时抵消充电功率,避免在线路上出现过电压现象。

3.1.2 变压器中的功率损耗与电压损耗

与电力线路一样,变压器的电压和功率损耗也可按其等值电路计算,如图

3.3(a) 所示。变压器的电压损耗计算与线路的计算相同,如式(3.1)~(3.4)所示,但在式中要用变压器的等值电阻 R_T 和电抗 X_T 来代替线路的阻抗。在计算变压器的功率损耗时,要注意到变压器的对地支路是电感性的,因而它始终消耗无功功率,总无功功率损耗与负荷的关系如图 3.3(b) 所示。

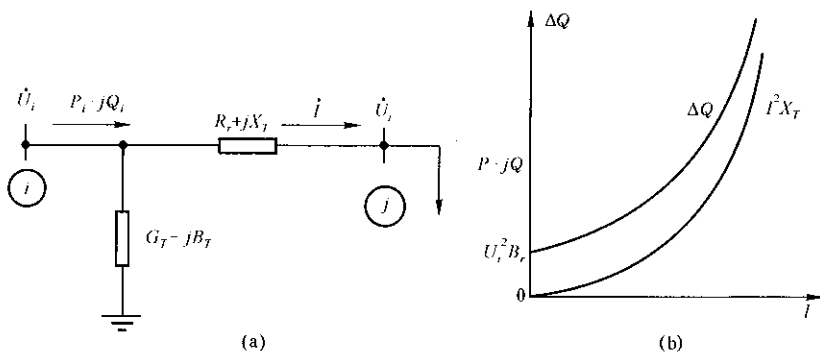


图 3.3 变压器等值电路和无功功率损耗

另外,接地支路还消耗有功功率,即变压器的铁心损耗。这两部分损耗在等值电路中可用接于供电端的并联电纳 $-B_T$ 和电导 G_T 支路来表示。变压器的功率损耗如下式所示。

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U_j^2} R_T + U_i^2 G_T \quad (3.12)$$

$$\Delta Q = \frac{P^2 + Q^2}{U_j^2} X_T + U_i^2 B_T \quad (3.13)$$

$$P_i + jQ_i = P + \Delta P + j(Q + \Delta Q) \quad (3.14)$$

由式(3.12)与式(3.13)可见,变压器的有功损耗与无功损耗都是由两部分组成:一部分为与负荷无关的分量,另一部分是与通过的负荷平方成正比的损耗。

3.1.3 辐射形网络的分析计算

电力系统中很多情况是采用辐射形电力网,如图 3.4 所示。

辐射形电力网的特点是各条线路有明确的始端与末端。辐射形电力网的分析计算就是利用已知的负荷、节点电压求取未知的节点电压、线路功率分布、功率损耗及始端输出功率。由于辐射形电力网结构简单,因此计算比较方便。

辐射形电力网的分析计算,根据已知条件的不同,一般可分为如下两种:

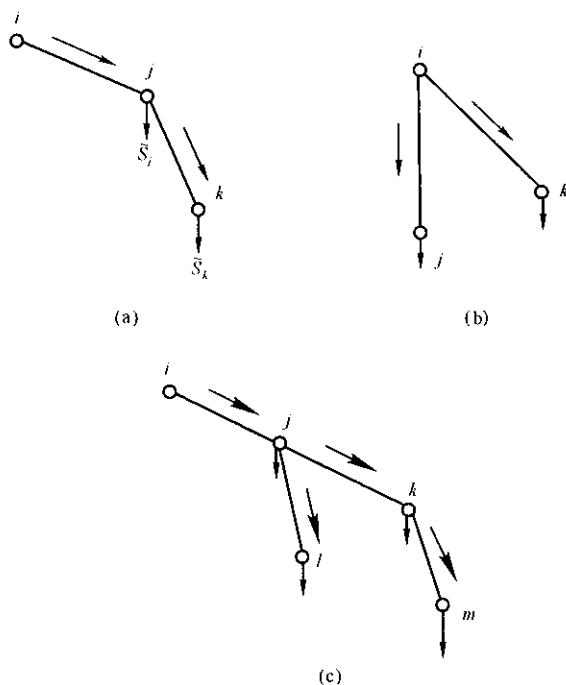


图 3.4 辐射形电力网

1. 已知末端功率与电压

这是最简单的情形,可利用前一节所述的方法,从末端逐级往上推算,直至求得各要求的量。

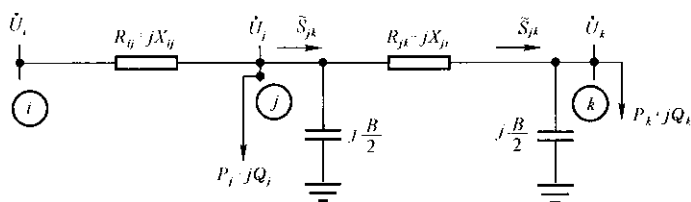


图 3.5 辐射形电力网的功率分布

例如图 3.5 所示的电路中,末端电压 U_k 及功率 P_k 和 Q_k 为已知,可以得到线路 $j-k$ 阻抗末端的功率:

$$\tilde{S}'_{jk} = P'_k + jQ'_k = P_k + j\left(Q_k - \frac{U_k^2}{2}B\right)$$

线路 $j-k$ 阻抗的功率损耗:

$$\Delta \tilde{S}_{jk} = \frac{P_k'^2 + Q_k'^2}{U_k^2} (R_{jk} + jX_{jk})$$

节点 j 的电压:

$$U_j = \sqrt{\left(U_k + \frac{P_k' R_{jk} + Q_k' X_{jk}}{U_k} \right)^2 + \left(\frac{P_k' X_{jk} - Q_k' R_{jk}}{U_k} \right)^2}$$

线路 $j-k$ 的始端功率:

$$\tilde{S}_{jk} = \tilde{S}'_{jk} + \Delta \tilde{S}_{jk} - j \frac{U_j^2}{2} B$$

这样,在线路 $i-j$ 末端节点 j 上的负荷为 $\tilde{S}_{jk} + \tilde{S}_j$,同理可以从节点 j 点推算至 i 点。

如果已知条件为线路始端电压与始端功率,则可采用同样的方法,从线路始端推算出各点电压与支路功率,不同的只是功率损耗和电压损失的符号不同。

2. 已知末端功率、始端电压

这是最常见的情形。末端可理解成一负荷点,始端为电源点或电压中枢点。对于这种情形,可以采用迭代法来求解。

第一步:假设末端电压为线路额定电压,利用第一种方法求得始端功率及全网功率分布;

第二步:用求得的线路始端功率和已知的线路始端电压,计算线路末端电压和全网功率分布;

第三步:用第二步求得的线路末端电压计算线路始端功率和全网功率分布,如求得的各线路功率与前一次相同计算的结果相差小于允许值,就可认为本步求得的线路电压和全网功率分布为最终计算结果。否则,返回第二步重新进行计算。

【例 3.1】 电网结构如图 3.6 所示,其额定电压为 10kV。已知各节点的负荷功率及线路参数:

$$\tilde{S}_2 = 0.3 + j0.2(\text{MVA})$$

$$\tilde{S}_3 = 0.5 + j0.3(\text{MVA})$$

$$\tilde{S}_1 = 0.2 + j0.15(\text{MVA})$$

$$Z_{12} = 1.2 + j2.4(\Omega)$$

$$Z_{23} = 1.0 + j2.0(\Omega)$$

$$Z_{21} = 1.5 + j3.0(\Omega)$$

试作功率和电压计算。

【解】 (1) 先假设各结点电压均为额定电压,求线路始端功率。

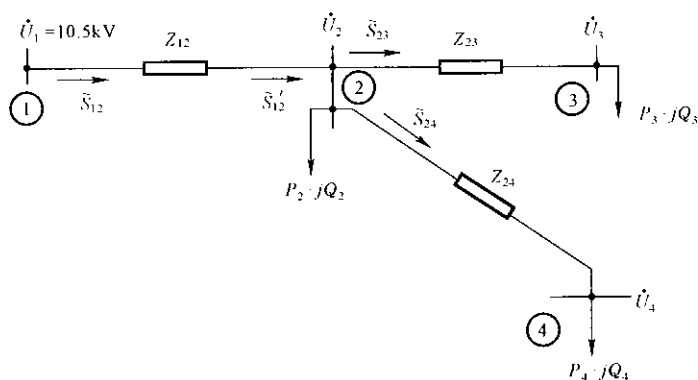


图 3.6 例 3.1 的电力网

$$\begin{aligned}
 \Delta \tilde{S}_{23} &= \frac{P_3^2 + Q_3^2}{U_N^2} (R_{23} + jX_{23}) = \frac{0.5^2 + 0.3^2}{10^2} (1 + j2) \\
 &= 0.0034 + j0.0068 \\
 \Delta \tilde{S}_{21} &= \frac{P_4^2 + Q_4^2}{U_N^2} (R_{24} + jX_{24}) = \frac{0.2^2 + 0.15^2}{10^2} (1.5 + j3) \\
 &= 0.0009 + j0.0019 \\
 \tilde{S}_{23} &= \tilde{S}_3 + \Delta \tilde{S}_{23} = 0.5034 + j0.3068 \\
 \tilde{S}_{21} &= \tilde{S}_1 + \Delta \tilde{S}_{21} = 0.2009 + j0.1519 \\
 \tilde{S}'_{12} &= \tilde{S}_{23} + \tilde{S}_{21} + \tilde{S}_2 = 1.0043 + j0.6587 \\
 \Delta \tilde{S}_{12} &= \frac{P_{12}'^2 + Q_{12}'^2}{U_N^2} (R_{12} + jX_{12}) \\
 &= \frac{1.0043^2 + 0.6587^2}{10^2} (1.2 + j2.4) \\
 &= 0.0173 + j0.0346 \\
 \tilde{S}_{12} &= \tilde{S}'_{12} + \Delta \tilde{S}_{12} = 1.0216 + j0.6933
 \end{aligned}$$

(2) 用已知的线路始端电压 $U_1 = 10.5 \text{ kV}$ 及上述求得的线路始端功率 \tilde{S}_{12} , 求出线路各点电压:

$$\begin{aligned}
 \Delta U_{12} &= (P_{12}R_{12} + Q_{12}X_{12})/U_1 = 0.2752 \\
 U_2 &\approx U_1 - \Delta U_{12} = 10.2248 (\text{kV}) \\
 \Delta U_{21} &= (P_{21}R_{21} + Q_{21}X_{21})/U_2 = 0.0740 \\
 U_1 &\approx U_2 - \Delta U_{21} = 10.1508 (\text{kV}) \\
 \Delta U_{23} &= (P_{23}R_{23} + Q_{23}X_{23})/U_2 = 0.1100 \\
 U_3 &\approx U_2 - \Delta U_{23} = 10.0408 (\text{kV})
 \end{aligned}$$

(3) 根据上述求得的线路各点电压, 重新计算各线路的功率损耗和线路

始端功率:

$$\begin{aligned}\Delta \tilde{S}_{23} &= \frac{0.5^2 + 0.3^2}{10.04^2} (1 + j2) = 0.0034 + j0.0068 \\ \Delta \tilde{S}_{24} &= \frac{0.2^2 + 0.15^2}{10.15^2} (1.5 + j3) = 0.0009 + j0.0018 \\ \tilde{S}_{23} &= \tilde{S}_3 + \Delta \tilde{S}_{23} = 0.5034 + j0.3068 \\ \tilde{S}_{24} &= \tilde{S}_4 + \Delta \tilde{S}_{24} = 0.2009 + j0.1518 \\ \tilde{S}_{12}' &= \tilde{S}_{23} + \tilde{S}_{24} + \tilde{S}_2 = 1.0043 + j0.6586 \\ \Delta \tilde{S}_{12} &= \frac{1.0043^2 + 0.6586^2}{10.22^2} (1.2 + j2.4) \\ &= 0.0166 + j0.0331 \\ \tilde{S}_{12} &= 1.0209 + j0.6917\end{aligned}$$

与第一步所得的计算结果比较相差小于0.3%,故第2和第3步的结果可作为最终计算结果。

3.1.4 电力网的电能损耗

在分析电力系统运行经济性时,不但要求计算最大负荷时电力网的功率损耗,还要求计算一段时间内电力网的电能损耗。通常以年(即365天×24小时/天=8760小时)作为计算时间段,称为电力网年电能损耗。

电力系统各负荷的年有功和无功负荷曲线已知时,原则上可以准确计算年电能损耗。为了简化计算,可将实际负荷曲线用一个阶梯形曲线代替,亦即将全年8760小时分为若干段,每段时间内各负荷的有功和无功功率都用定值表示。这样,就可分别对各时间段进行系统的潮流计算,求出全电网的有功功率损耗,并计算出各时间段的电能损耗,它们的总和即为年电能损耗。例如8760小时分为 n 段,其中第 i 段时间为 Δt_i (h),全网功率损耗为 ΔP_i (MW),则全网年电能损耗 ΔA 为

$$\Delta A = \sum_{i=1}^n (\Delta P_i \times \Delta t_i) (\text{MWh})$$

时间段数 n 愈多,计算的结果愈准确,但计算工作量也愈大,所以要选择适当的 n 值,以减小工作量并保证一定的准确度。上述方法通常应用计算机进行计算。

在作电力系统规划设计等要求不很准确计算电能损耗时,常应用经验公式或曲线计算年电能损耗。这里介绍较常用的两种方法。

首先说明表征年有功负荷曲线特点的两个指标:年最大负荷利用小时数

T_{\max} 和年负荷率 K_{LY} 。根据年负荷曲线(见图 1.5)可求得该负荷全年需要的电能

$$A = \int_0^{8760} P dt (\text{MWh})$$

设年有功负荷曲线的最大值为 P_{\max} (MW), 则年最大负荷利用小时 T_{\max} 定义为

$$T_{\max} = \frac{A}{P_{\max}} (\text{h}) \quad (3.15)$$

T_{\max} 愈大表示负荷曲线愈平坦, 即功率的最大值与最小值相对差值愈小; 如果负荷曲线为一水平线, 则 $T_{\max} = 8760(\text{h})$, 达到最大值。电力系统设计手册等都给出各类负荷的典型 T_{\max} 值, 它是根据统计资料求得的, 例如钢铁工业的 T_{\max} 约为 6500(h), 食品工业的 T_{\max} 约为 4500(h) 等。

年负荷率 K_{LY} 定义为

$$K_{LY} = \frac{A}{8760 P_{\max}} = \frac{T_{\max}}{8760} \quad (3.16)$$

它与 T_{\max} 一样, 可用来衡量年负荷曲线的平坦程度。

下面介绍的两种简化年电能损耗计算方法, 用于逐个计算线路或变压器的年电能损耗。全部线路和变压器电能损耗之和即为全电网的年电能损耗。

1. 年负荷损耗率法

先讨论电力线路。设线路通过最大负荷时的功率损耗为 ΔP_{\max} , 年电能损耗为 ΔA , 年负荷损耗率 K_{AY} 定义为

$$K_{AY} = \frac{\Delta A}{8760 \Delta P_{\max}} \quad (3.17)$$

根据统计资料分析, K_{AY} 与年负荷率 K_{LY} 有关, 近似关系为:

$$K_{AY} = K K_{LY} + (1 - K) K_{LY}^2 \quad (3.18)$$

式中, K 为经验数值。一般取 $K = 0.1 \sim 0.4$, K_{LY} 较低时取较小数值。

因此, 可以根据通过线路负荷的最大负荷利用小时数 T_{\max} 按式(3.16)和(3.18)求出 K_{LY} 和 K_{AY} , 再计算最大负荷时线路的功率损耗 ΔP_{\max} , 最后按式(3.17)计算线路的年电能损耗

$$\Delta A = 8760 K_{AY} \Delta P_{\max} \quad (3.19)$$

变压器的功率损耗包括与负荷有关的电阻损耗和空载损耗 ΔP_0 , 所以它的年电能损耗为

$$\Delta A = 8760 K_{AY} \Delta P_{\max} + \Delta P_0 T \quad (3.20)$$

式中, T 为变压器每年中接入运行的小时数, 缺乏具体数据时可取 $T = 8000\text{h}$ 。

2. 最大负荷损耗时间法

先讨论电力线路。设线路通过最大负荷时的功率损耗为 ΔP_{\max} ，年电能损耗为 ΔA ，最大负荷损耗时间定义为

$$\tau_{\max} = \frac{\Delta A}{\Delta P_{\max}} (\text{h}) \quad (3.21)$$

根据分析， τ_{\max} 与线路负荷的功率因数和 T_{\max} 有关，表 3.1 列出 τ_{\max} 与 T_{\max} 及 $\cos\varphi$ 的关系，可供计算时使用。

使用这一方法时只需计算最大负荷时线路的功率损耗 ΔP_{\max} ，再按负荷的 T_{\max} 和 $\cos\varphi$ 查表得到 τ_{\max} ，就可下式计算线路的年电能损耗。

$$\Delta A = \Delta P_{\max} \tau_{\max} \quad (3.22)$$

变压器的年电能损耗为：

$$\Delta A = \Delta P_{\max} \tau_{\max} + \Delta P_0 T \quad (3.23)$$

表 3.1 τ_{\max} 与 T_{\max} 及 $\cos\varphi$ 的关系

$\begin{matrix} \cos\varphi \\ T_{\max}(\text{h}) \end{matrix}$	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
2000	1500	1200	1000	800	700
2500	1700	1500	1250	1100	950
3000	2000	1800	1600	1400	1250
3500	2350	2150	2000	1800	1600
4000	2750	2600	2400	2200	2000
4500	3150	3000	2900	2700	2500
5000	3600	3500	3400	3200	3000
5500	4100	4000	3950	3750	3600
6000	4650	4600	4500	4350	4200
6500	5250	5200	5100	5000	4850
7000	5950	5900	5800	5700	5600
7500	6650	6600	6550	6500	6400
8000	7400		7350		7250

3.2 复杂电力系统潮流计算

在上节中介绍了简单电力系统的分析方法。但是，随着电力系统的不断扩大、电力网结构的日益复杂，已经不能再用这种方法来分析复杂的电力系统。电力系统潮流计算就是对复杂电力系统正常和故障条件下稳态运行状

态的计算。潮流计算的目标是求取电力系统在给定运行方式下的节点电压和功率分布,用以检查系统各元件是否过负荷、各点电压是否满足要求、功率的分布和分配是否合理以及功率损耗等。对现有电力系统的运行和扩建、对新的电力系统进行规划设计以及对电力系统进行静态和暂态稳定分析,都是以潮流计算为基础的。因此,潮流计算是电力系统计算分析中的一种最基本的计算。

目前电子计算机已广泛应用于电力系统的分析计算,潮流计算是其基本应用软件之一。现在已有很多种潮流计算方法。对潮流计算方法有以下五方面的要求:

- (1) 计算速度快;
- (2) 内存需要小;
- (3) 计算结果有良好的可靠性和可信性;
- (4) 适应性好,亦即能处理变压器变比调整、系统元件的不同描述和与其他程序配合的能力强;
- (5) 简单。

另外,潮流计算结果的用途,例如用于电力系统稳定研究、安全估计或最优潮流等也对潮流计算的模型和方法有直接影响。本节介绍用于离线计算稳态运行方式的潮流计算。

3.2.1 节点电压方程与节点导纳矩阵和阻抗矩阵

将节点电压法应用于电力系统潮流计算,其变量为节点电压与节点注入电流。通常,以大地作为电压幅值的参考,而以系统中某一指定母线的电压角度作为电压相角的参考,并以支路导纳作为电力网的参数进行计算。

将节点 i 和 j 的电压表示为 \dot{U}_i 和 \dot{U}_j ,将它们之间的支路导纳表示为 y_{ij} (即支路阻抗的倒数值 $1/z_{ij}$;复数),则在此支路中从节点 i 流向 j 的电流为(见图3.7(a)):

$$\dot{I}_{ij} = y_{ij}(\dot{U}_i - \dot{U}_j) \quad (3.24)$$

根据克希荷夫电流定律,注入节点 i 的电流 \dot{I}_i (设流入节点的电流为正)等于离开节点 i 的电流之和(见图3.7(b)),因此

$$\dot{I}_i = \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n \dot{I}_{ij} = \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n y_{ij}(\dot{U}_i - \dot{U}_j) \quad (3.25)$$

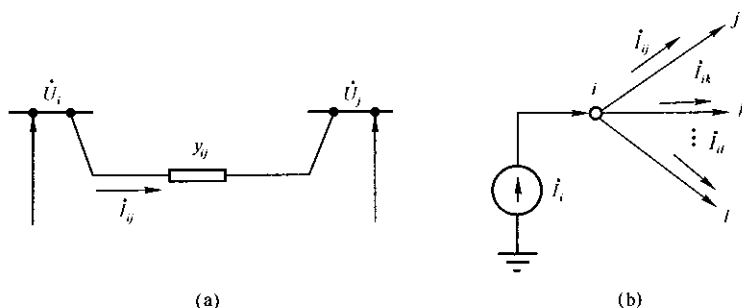


图 3.7 节点电压和支路电流的关系

式中 n 为电力网的节点数, 不包含地节点在内。下标 0 表示地节点, 且有 $U_0 = 0$, 所以

$$\dot{I}_i = \dot{U}_i \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n y_{ij} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n y_{ij} \dot{U}_j \quad (3.26)$$

如令

$$\sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n y_{ij} = Y_{ii}, \quad -y_{ij} = Y_{ij}$$

则式(3.26)可以改写为:

$$\dot{I}_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} \dot{U}_j \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.27)$$

上式可以写成矩阵形式:

$$\mathbf{I} = \mathbf{YU} \quad (3.28)$$

此即为电力网的节点电压方程, \mathbf{Y} 称为节点导纳矩阵。

节点导纳矩阵的各元素可以由其定义直接求得。在式(3.28)中, 由定义 $Y_{ij} = -y_{ij}$, 可知导纳矩阵的第 i 行第 j 列的非对角元素为节点 i, j 间支路导纳的负值, 称为节点 i 和节点 j 间的互导纳或转移导纳。如节点 i 和 j 间无直接联系, 则两节点间支路阻抗为无穷大, 支路导纳为零, 相应的互导纳也为零。

从式(3.27)也可以看出, 当在节点 i 上加一单位值电压, 而其他节点均接地时(见图 3.8), 节点 $j(j = 1, 2, \dots, n, j \neq i)$ 的注入电流

$$\dot{I}_j = Y_{ij} = -y_{ij} \quad (3.29)$$

因为 \dot{I}_j 为自节点 j 流入的电流, 所以为支路导纳 y_{ij} 的负值。

导纳矩阵的第 i 个对角元素 Y_{ii} 为所有与节点 i 相连支路(包括接地支路)导纳之和, 称为节点 i 的自导纳。从图 3.8 可以看出, 自导纳的值等于在节点 i 上加一单位值电压时流入节点 i 的电流值。

n 个节点的电力网络的节点导纳矩阵具有以下特点:

- (1) $n \times n$ 阶方阵;
- (2) 对称;
- (3) 复数矩阵;
- (4) 每一非对角元素 Y_{ij} 是节点 i 和 j 间支路导纳的负值, 当 i 和 j 间没有直接相连的支路时, 即为零。根据一般电力系统的特点, 每一节点平均与 3 ~ 5 个相邻节点有直接联系, 所以导纳矩阵是一高度稀疏的矩阵;

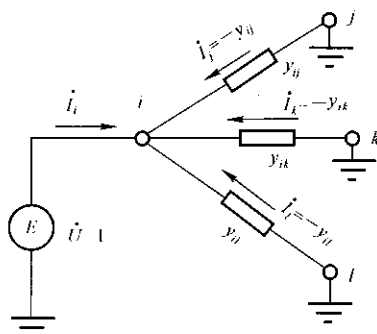


图 3.8 在节点上加一单位电压

- (5) 对角线元素 Y_{ii} 为所有连接于节点 i 的支路(包括节点 i 的接地支路)的导纳之和。

在电力系统的分析计算中, 往往要作不同运行方式下的潮流计算, 每种方式只是对局部区域或个别元件作一些变化, 例如投入或切除一条线路或一台变压器。由于改变一条支路的状态或参数只影响该支路两端节点的自导纳和它们之间的互导纳, 因而对每一种运行方式不必重新形成导纳矩阵, 只需对原有导纳矩阵作相应修改。修改方法如下。

1. 原网络节点增加一接地支路[见图 3.9(a)]

设在节点 i 增加一对地支路, 由于没有增加节点数, 节点导纳矩阵阶数不变, 只有自导纳 Y_{ii} 发生变化, 变化量为节点 i 新增的接地支路的导纳 y_i :

$$Y'_{ii} = Y_{ii} + \Delta Y_{ii} = Y_{ii} + y_i \quad (3.30)$$

2. 原网络节点 i, j 间增加一条支路[见图 3.9(b)]

此时节点导纳矩阵的阶数不变, 只是由于节点 i 和 j 间增加了一个支路导纳 y_{ij} 而使节点 i 和节点 j 间的互导纳、节点 i 和 j 的自导纳发生变化, 变化量为

$$\Delta Y_{ii} = y_{ij}, \Delta Y_{jj} = y_{ij}, \Delta Y_{ij} = \Delta Y_{ji} = -y_{ij} \quad (3.31)$$

3. 从原网络引出一条新支路, 同时增加一个新节点[见图 3.9(c)]

设原网络有 n 个节点, 现从节点 i ($i \leq n$) 引出一条支路及新增一节点 j 。由于网络节点多了一个, 所以节点导纳矩阵也增加一阶。新增支路与原网络节点 i 相连, 因而原节点导纳矩阵元素 Y_{ii} 将发生变化, 而其余元素则不变; 新增节点 j 只通过支路导纳 y_{ij} 与原网络中节点 i 相连, 而与其他节点不直接相连, 因此新的节点导纳矩阵中第 j 列和第 j 行中非对角元素除 Y_{ij} 和 Y_{ji} 外其余都为零, 如下所示:

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{cccccc}
 & i \text{ 列} & & j \text{ 列} & & \\
 \begin{bmatrix}
 Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1i} & \cdots & Y_{1n} & 0 \\
 Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2i} & \cdots & Y_{2n} & 0 \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 Y_{i1} & Y_{i2} & \cdots & Y'_{ii} & \cdots & Y_{in} & Y_{ij} \\
 Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{ni} & \cdots & Y_{nn} & 0 \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\
 0 & 0 & \cdots & Y_{ji} & \cdots & 0 & Y_{jj}
 \end{bmatrix}
 \end{array}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \\ \\ \\
 i \text{ 行} \\ \\ \\
 j \text{ 行}
 \end{array}$$

其中,原节点导纳矩阵的对角元素 Y_{ii} 应修正为 $Y'_{ii} = Y_{ii} + y_{ij}$;新增导纳矩阵元素 $Y_{jj} = y_{ij}$, $Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij}$ 。

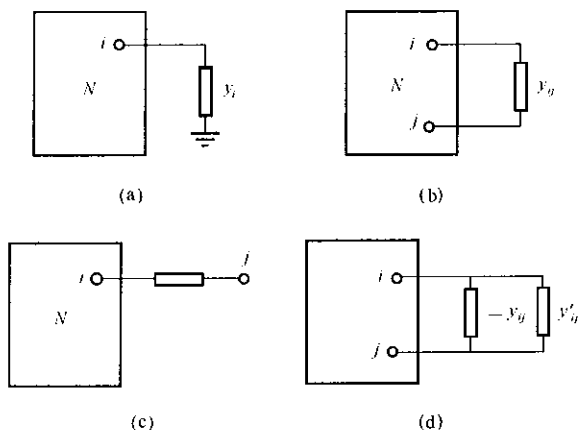


图 3.9 电网的变化

增加一台变压器时,可以先将变压器用含有非标准变比的 π 型等值电路替代,然后按以上三种基本方法处理。例如节点 i 、 j 间增加一台变压器[见图 3.10(a)],节点导纳矩阵有关元素的变化量可由 π 型等值电路[见图 3.10(b)]求得:

$$\Delta Y_{ii} = \frac{y_T}{k} + y_T \left(1 - \frac{1}{k} \right) = y_T \quad (3.32)$$

$$\Delta Y_{jj} = \frac{y_T}{k} + y_T \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{k} \right) = \frac{y_T}{k^2} \quad (3.33)$$

$$\Delta Y_{ij} = \Delta Y_{ji} = -y_T/k \quad (3.34)$$

修改原网络中的支路参数,可以理解成先将被修改支路切除,然后再投入以修改后参数为导纳值的支路。因而,修改原网络中的支路参数可通过给原网络支路并联二条支路来实现。如图 3.9(d) 所示,一条支路的参数为原来该支

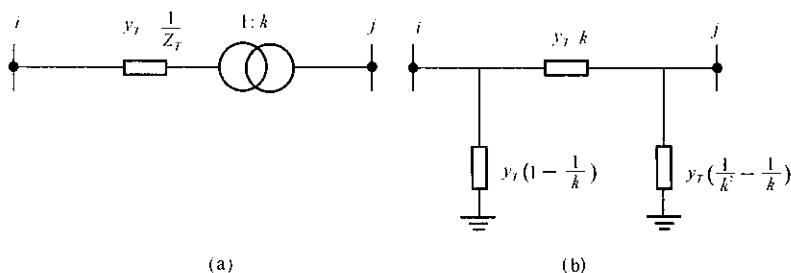


图 3.10 增加变压器

路导纳的负值 $-y_{ij}$ (相当于切除该支路), 另一条支路的参数为修改后支路的导纳 y'_{ij} 。

由式(3.28)可得到:

$$U = Y^{-1}I = ZI \quad (3.35)$$

式中, Y^{-1} 为节点导纳矩阵的逆矩阵, 称作节点阻抗矩阵, 也是一个 n 阶的对称复数方阵。节点阻抗矩阵中各元素的物理意义是: 在电力网中任一节点 i 注入一单位电流, 而其余节点均为开路 (即注入电流为零) 时的节点电压值 (见图 3.11);

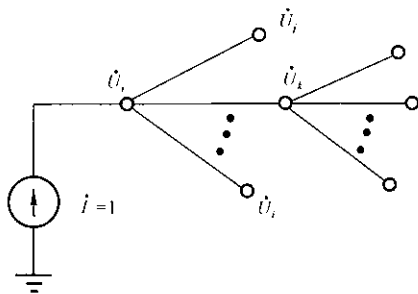


图 3.11 在节点上加一单位电流

$$\dot{U}_i = Z_{ii} \quad (3.36)$$

$$\dot{U}_j = Z_{ji} \quad j = 1, 2, \dots, n, j \neq i \quad (3.37)$$

节点阻抗矩阵的对角元素 Z_{ii} 叫自阻抗, 非对角元素 Z_{ji} 叫互阻抗。在一般情况下, 注入单位电流的节点 i 的电压要大于其他节点的电压, 所以 $Z_{ii} > Z_{ji}$ 。在一有 n 个节点相连成网的系统中, 当节点 i 注入单位电流时, 其他任一节点上均会出现电压, 所以 $Z_{ji} \neq 0$, 因而阻抗矩阵中的元素一般不可能为零, 它是一个满矩阵。

3.2.2 功率方程和节点分类

在实际的电力系统中, 已知的运行条件往往不是节点的注入电流而是负荷和发电机的功率, 而且这些功率一般不随节点电压的变化而变化。例如, 发

电机节点的注入功率由驱动发电机的原动机输入功率所决定,不受发电机端电压影响;如果不考虑负荷的电压特性,负荷吸收的功率也与端电压无关。在节点功率不变的情况下,节点的注入电流是随节点电压的变化而变化。因此,在已知节点导纳矩阵的情况下,必须用已知的节点功率来代替未知的节点注入电流,才能求出节点电压。每一节点的注入功率方程式为:

$$\tilde{S}_i = P_i + jQ_i = \dot{U}_i^* I_i = \dot{U}_i^* \sum_{j=1}^n Y_{ij} \dot{U}_j \quad (3.38)$$

上式是复数方程,计算时要求展开成实数形式。节点电压用极坐标 $\dot{U} = Ue^{j\delta}$ 表示,可得到每一节点有功和无功功率的实数方程:

$$P_i = P_i(U, \delta), \quad Q_i = Q_i(U, \delta) \quad (3.39)$$

也可将节点电压用直角坐标 $\dot{U} = e + jf$ 表示,则可得:

$$P_i = P_i(e, f), \quad Q_i = Q_i(e, f) \quad (3.40)$$

对于有 n 个节点的电力网,可以列出 $2n$ 个功率方程式。从式(3.38)可以看出,每一节点具有四个变量:注入有功功率 P_i ,注入无功功率 Q_i ,节点电压幅值 U_i 和相角 δ_i (或电压的实部 e_i 和虚部 f_i)。 n 个节点的电力网有 $4n$ 个变量,但只有 $2n$ 个关系方程式。所以,为了使潮流计算有确定解,必须给定其中 $2n$ 个变量。根据给定节点变量的不同,可以有以下三种类型的节点:

PV 节点(电压控制母线) 这种节点的注入有功功率 P_i 为给定值,电压 U_i 也保持在给定数值。这种类型节点相当于发电机母线节点,其注入的有功功率(相当于发电机发出的有功功率)由汽轮机调速器设定,而电压大小则由装在发电机上的励磁调节器控制;或者相应于一个装有调相机或静止补偿器的变电所母线,其电压由可调无功功率的控制器设定。

PQ 节点 这种节点的注入有功和无功功率是给定的,相应于实际电力系统中的一个负荷节点,或有功和无功功率给定的发电机母线。

平衡节点 这种节点用来平衡全电网的功率。由于电网的功率损耗在潮流计算前是未知的,因而无法确定电网中各台发电机所发功率的总和,所以必须选一容量足够大的发电机担任平衡全电网功率的职责,该发电机节点称作平衡节点。平衡节点的电压大小与相位是给定的,通常以它的相角为参考量,即取其电压相角为零。一个独立的电力网中只设一个平衡节点。

应该指出,PV 节点、PQ 节点和平衡节点的划分并不是绝对不变的。PV 节点之所以能控制其节点电压为某一设定值,主要原因在于它具有可调节的无功功率出力。一旦它的无功功率出力达到其可调节的无功功率出力的上限或下限时,就不能再使电压保持在设定值。此时,无功功率只能保持在其上限

或下限值, PV 节点将转化成 PQ 节点。

【例 3.2】 试求图 3.12 所示电力网的节点导纳矩阵, 图中给出了各支路阻抗和对地导纳的标么值。节点 2 和节点 4 间、节点 3 和节点 5 间为变压器支路, 其漏抗和变比如图所示。

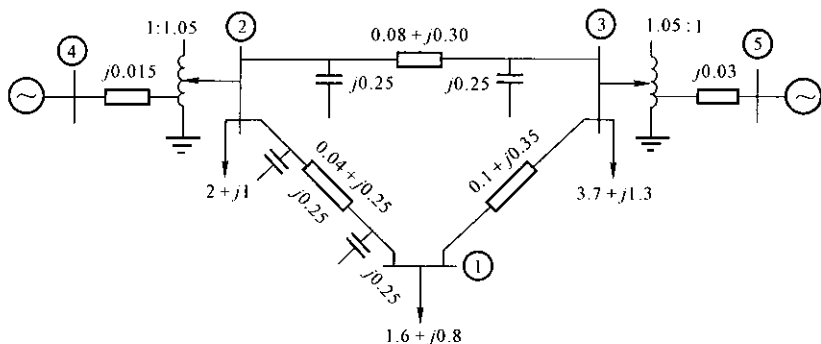


图 3.12 例 3.2 的电力系统接线图

【解】 根据上述节点导纳矩阵的定义, 可求得节点导纳矩阵各元素:

$$\begin{aligned}
 Y_{11} &= y_{10} + y_{12} + y_{13} \\
 &= j0.25 + \frac{1}{0.04 + j0.25} + \frac{1}{0.1 + j0.35} \\
 &= j0.25 + 0.624025 - j3.900156 + 0.754717 - j2.641509 \\
 &= 1.378742 - j6.291665
 \end{aligned}$$

与节点 1 有关的互导纳为

$$Y_{12} = Y_{21} = -y_{12} = -0.624025 + j3.900156$$

$$Y_{31} = Y_{13} = -y_{13} = -0.754717 + j2.641509$$

支路 2.4 为变压器支路, 可以求出节点 2 的自导纳

$$\begin{aligned}
 Y_{22} &= y_{20} + y_{12} + y_{23} + y_{42}/k_{12}^2 \\
 &= j0.25 + j0.25 + 0.624025 - j3.900156 \\
 &\quad + 0.829876 - j3.112033 - j66.666666/1.05^2 \\
 &= 1.453901 - j66.980821
 \end{aligned}$$

与节点 2 有关的互导纳为

$$Y_{23} = Y_{32} = -0.829876 + j3.112033$$

$$Y_{21} = Y_{12} = -y_{42}/k_{12} = -j63.492064$$

用类似的方法可以求出导纳矩阵的其他元素, 最后可得到节点导纳矩阵为

$$Y = \begin{bmatrix} 1.378742 & -0.624025 & -0.754717 & \\ -j6.291665 & +j3.900156 & +j2.641509 & \\ \\ -0.624025 & 1.453901 & -0.829876 & 0.000000 \\ +j3.900156 & -j66.980821 & -j3.112033 & +j63.492063 \\ -0.754717 & -0.829876 & 1.584593 & 0.000000 \\ +j2.641509 & +j3.112033 & -j35.737858 & +j31.746032 \\ \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & \\ +j63.492063 & -j66.666667 & 0.000000 & \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & \\ +j31.746032 & -j33.333333 & & \end{bmatrix}$$

3.3 高斯——塞德尔法潮流计算

描述电力系统功率与电压关系的方程式(3.38)是一组关于电压 U 的非线性代数方程式,不能用解析法直接求解。高斯迭代法是一种简单可行的求解方法。

先假设有 n 个节点的电力系统,没有 PV 节点,平衡节点编号为 $s, 1 \leq s \leq n$,则式(3.38)可写成下列复数方程式:

$$\dot{U}_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{\dot{U}_i^*} - \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{ij} \dot{U}_j \right] \quad \begin{matrix} i = 1, 2, \dots, n \\ i \neq s \end{matrix} \quad (3.41)$$

对每一个 PQ 节点都可列出一个方程式,因而有 $n - 1$ 个方程式。在这些方程式中,注入功率 P_i 和 Q_i 都是给定的,平衡节点电压也是已知的,因而只有 $n - 1$ 个节点的电压为未知量。这样,用 $n - 1$ 个方程式求解 $n - 1$ 个变量,有可能求得惟一解。

高斯法的基本思想是用迭代计算来求解式(3.41),其等号右边是前一次迭代的计算值,等号左边为新值。

$$\dot{U}_i^{(k+1)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{\dot{U}_i^{(k)*}} - \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{ij} \dot{U}_j^{(k)} \right] \quad \begin{matrix} i = 1, 2, \dots, n \\ i \neq s \end{matrix} \quad (3.42)$$

式中, k 为迭代的次数。在给定节点电压的初值后,对所有的 PQ 节点逐个进行

式(3.42)的迭代计算,求得所有PQ节点的电压新值,然后以新值代入式(3.42)右边,进行下一次迭代。这样反复迭代,直至所有节点电压前一次的迭代值与后一次迭代值相量差的模小于给定的允许误差值 ϵ 后,结束迭代,即

$$|\dot{U}_i^{(k+1)} - \dot{U}_i^{(k)}| \leq \epsilon \quad i = 1, 2, \dots, n \quad i \neq s \quad (3.43)$$

迭代计算求得了所有节点的电压之后,就可以利用式(3.38)求出平衡节点的注入功率及利用电路基本定理求取支路功率和支路功率损耗。因此,用高斯法求解潮流的基本步骤为:

1. 设定各节点电压的初值 $\dot{U}_i^{(0)}$ 并给定迭代误差判据 ϵ ;
2. 对每一个PQ节点,以前一次迭代的节点电压值代入式(3.42)右边,求出新值;
3. 判别各节点电压前后二次迭代值相量差的模是否小于规定误差 ϵ ,如不小于 ϵ ,则回到第2步,继续进行计算,否则转到第4步;
4. 按式(3.38)求平衡节点注入功率;
5. 求支路功率分布和支路功率损耗。

如系统内存在PV节点,假设节点 p 为PV节点,设定的节点电压为 U_{p0} 。假定高斯法已完成第 k 次迭代,接着要做第 $k+1$ 次迭代,此时应先按下式求出节点 p 的注入无功功率(符号 Im 为取复数的虚部):

$$Q_p^{(k+1)} = \text{Im}[\dot{U}_p^{(k)} \sum_{j=1}^n \dot{Y}_{pj}^* \dot{U}_j^{(k)}] \quad (3.44)$$

然后将其代入下式,求出节点 p 的电压:

$$\dot{U}_p^{(k+1)} = \frac{1}{Y_{pp}} \left[\frac{P_p - jQ_p^{(k+1)}}{\dot{U}_p^{(k)}} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq p}}^n Y_{pj} \dot{U}_j^{(k)} \right] \quad (3.45)$$

在迭代过程中,按上式求得的节点 p 的电压大小不一定等于设定的节点电压 U_{p0} ,所以在下一次的迭代中,应以设定的 U_{p0} 对 $\dot{U}_p^{(k+1)}$ 进行修正,但其相角仍应保持上式所求得值,使得 $\dot{U}_p^{(k+1)}$ 成为 $U_{p0} \angle \delta_p^{(k+1)}$ 。

如果系统有多个PV节点,可按相同方法处理。

高斯法在第 $k+1$ 次迭代时,式(3.42)右边出现的都是节点电压第 k 次迭代值 $\dot{U}_j^{(k)}$ 。事实上,在计算第 $k+1$ 次迭代的 \dot{U}_i 时,前面 $i-1$ 个节点电压的第 $k+1$ 次迭代值已经求得。所以,如果稍加改进,在第 $k+1$ 次迭代计算第 i 个节点电压时,前面 $i-1$ 个节点电压用其第 $k+1$ 次的迭代值,而后面的节点 (i, \dots, n) 电压仍用第 k 次的迭代值,如式(3.46)所示,则将对收敛速度有所改进。这种方法称之为高斯—塞德尔(Gauss-Seidel)法。

$$\dot{U}_i^{(k+1)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left\{ \frac{P_i - jQ_i}{\dot{U}_i^{(k)}} - \left(\sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} \dot{U}_j^{(k+1)} + \sum_{j=i+1}^n Y_{ij} \dot{U}_j^{(k)} \right) \right\} \quad (3.46)$$

高斯—塞德尔法计算潮流的框图见图 3.13。

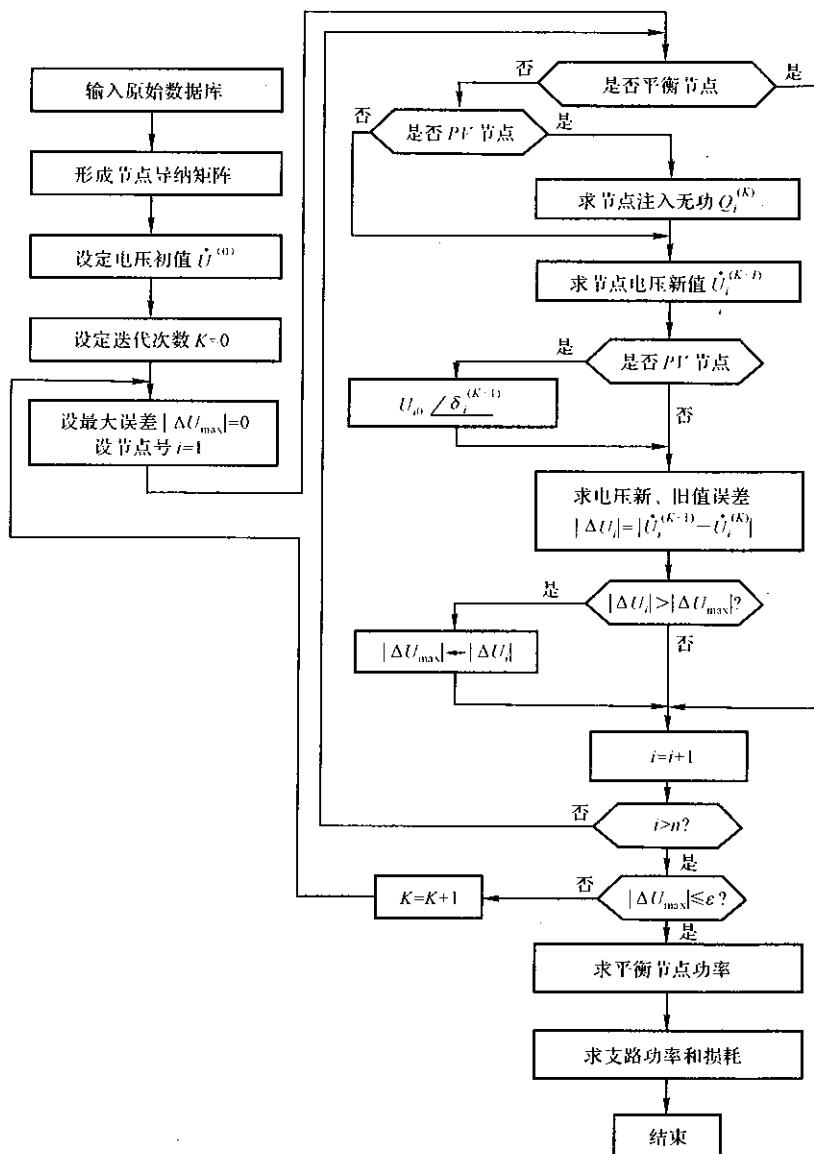


图 3.13 高斯—塞德尔法潮流计算框图

3.4 牛顿—拉夫逊法潮流计算

3.4.1 牛顿—拉夫逊法简介

牛顿—拉夫逊法(Newton-Raphson法)是求解非线性代数方程有效的迭代计算方法。在牛顿—拉夫逊法的每一次迭代过程中,非线性问题通过线性化逐步近似。先以单变量问题来进行说明。

设有非线性函数

$$f(x) = 0 \quad (3.47)$$

设解的初值为 x_0 , 它与真解的误差为 Δx_0 , 则式(3.47)可写成:

$$f(x_0 - \Delta x_0) = 0 \quad (3.48)$$

将上式用泰勒级数展开

$$f(x_0 - \Delta x_0) = f(x_0) - f'(x_0)\Delta x_0 + \frac{f''(x_0)}{2!}(\Delta x_0)^2 - \dots \quad (3.49)$$

如果 x_0 接近真解, 则 Δx_0 相对来讲是足够小的, 所以可以略去所有 Δx_0 的高次项, 因此

$$f(x_0 - \Delta x_0) \approx f(x_0) - f'(x_0)\Delta x_0 \approx 0 \quad (3.50)$$

可得

$$\Delta x_0 = \frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \quad (3.51)$$

将初值 x_0 代入上式求得修正量 Δx_0 , 即可得到解

$$x_1 = x_0 - \Delta x_0 \quad (3.52)$$

图 3.14 中示出上述关系, 可见 x_1 更接近于真解。

将 x_1 作为新的初值代入式(3.51), 再求出新的修正量。如果两次迭代解的差值小于某一给定的允许误差值 ϵ , 或者说 $\Delta x_k \leq \epsilon$ (k 为迭代次数), 则可认为 x_{k+1} 是式(3.47)的解。式(3.51)也可

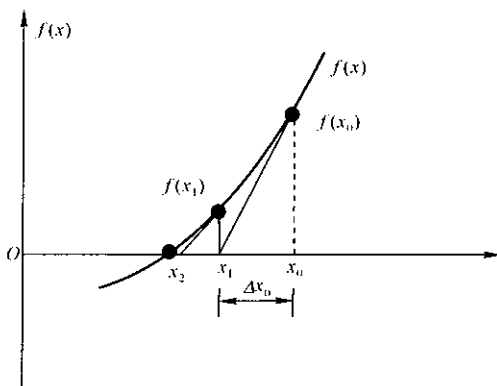


图 3.14 牛顿—拉夫逊法的迭代过程

以写成一般的迭代式

$$f(x_k) = J\Delta x_k \quad (3.53)$$

式中, $J = f'(x_k)$ 。

很容易将单变量问题推广到具有 n 个未知变量 X 的 n 阶非线性联立代数方程组 $F(X)$, 这时, 式(3.53)可写成

$$F(X_k) = J_k \Delta X_k \quad (3.54)$$

式中, J 为函数向量 $F(X)$ 对变量 X 的一阶偏导数的雅可比矩阵, 是 n 阶方阵, 其元素 J_{ij} 由下式定义:

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial x_j}$$

从式(3.54)可求出每次迭代的修正量

$$\Delta X_k = J_k^{-1} F(X_k) \quad (3.55)$$

3.4.2 牛顿—拉夫逊法计算潮流

式(3.38)是用复数表示的功率方程式,可写成:

$$P_i + jQ_i - \dot{U}_i \sum_{j=1}^n \dot{Y}_{ij}^* \dot{U}_j = 0 \quad (3.56)$$

根据节点电压的两种不同表示方法,可以得到两种不同的牛顿—拉夫逊法潮流计算方法,下面分别介绍这些方法。

1. 节点电压以极坐标形式表示时的牛顿—拉夫逊法潮流计算

当节点电压以极坐标形式表示时,亦即电压用 $\dot{U}_i = U_i \angle \delta_i$ 表示时,式(3.56)可以分成实部和虚部两个方程:

$$f_{P_i} = P_i - \sum_{j=1}^n U_i U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \quad (3.57)$$

$$f_{Q_i} = Q_i - \sum_{j=1}^n U_i U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \quad (3.58)$$

此处 $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$, G_{ij} 和 B_{ij} 为节点导纳矩阵元素 Y_{ij} 的实部和虚部。

对于 PQ 节点, 上两式相应于非线性方程组 $F(X)$ 中的各方程式, 其中 P_i 和 Q_i 分别表示节点 i 的设定有功和无功功率。

在第 k 次迭代时, 令

$$\Delta P_i^{(k)} = f_{P_i}^{(k)} = P_i - \sum_{j=1}^n U_i^{(k)} U_j^{(k)} (G_{ij} \cos \delta_{ij}^{(k)} + B_{ij} \sin \delta_{ij}^{(k)}) \quad (3.59)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = f_{Q_i}^{(k)} = Q_i - \sum_{j=1}^n U_i^{(k)} U_j^{(k)} (G_{ij} \sin \delta_{ij}^{(k)} - B_{ij} \cos \delta_{ij}^{(k)}) \quad (3.60)$$

参照式(3.54),可写出用牛顿—拉夫逊法进行潮流计算时的修正方程(从下式开始至式(3.68)均略去上标 k):

对于 PQ 节点

$$\Delta P_i = \sum_{j=1}^n \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \delta_j} \Delta \delta_j + \sum_{j=1}^n \frac{\partial \Delta P_i}{\partial U_j} \Delta U_j \quad (3.61)$$

$$\Delta Q_i = \sum_{j=1}^n \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \delta_j} \Delta \delta_j + \sum_{j=1}^n \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial U_j} \Delta U_j \quad (3.62)$$

每个 PQ 节点有两个变量 $\Delta \delta_i$ 和 ΔU_i 待求,同时可列出两个方程。所以,对全部节点可以写出修正方程如下:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta Q_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta P_p \\ \Delta Q_p \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & N_{11} & H_{12} & N_{12} & \cdots & H_{1p} & N_{1p} & \cdots & H_{1n} & N_{1n} \\ J_{11} & L_{11} & J_{12} & L_{12} & \cdots & J_{1p} & L_{1p} & \cdots & J_{1n} & L_{1n} \\ H_{21} & N_{21} & H_{22} & N_{22} & \cdots & H_{2p} & N_{2p} & \cdots & H_{2n} & N_{2n} \\ J_{21} & L_{21} & J_{22} & L_{22} & \cdots & J_{2p} & L_{2p} & \cdots & J_{2n} & L_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ H_{p1} & N_{p1} & H_{p2} & N_{p2} & \cdots & H_{pp} & N_{pp} & \cdots & H_{pn} & N_{pn} \\ J_{p1} & L_{p1} & J_{p2} & L_{p2} & \cdots & J_{pp} & L_{pp} & \cdots & J_{pn} & L_{pn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ H_{n1} & N_{n1} & H_{n2} & N_{n2} & \cdots & H_{np} & N_{np} & \cdots & H_{nn} & N_{nn} \\ J_{n1} & L_{n1} & J_{n2} & L_{n2} & \cdots & J_{np} & L_{np} & \cdots & J_{nn} & L_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_1 \\ \Delta U_1/U_1 \\ \Delta \delta_2 \\ \Delta U_2/U_2 \\ \vdots \\ \Delta \delta_p \\ \Delta U_p/U_p \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \\ \Delta U_n/U_n \end{bmatrix} \quad (3.63)$$

上式中雅可比矩阵的各元素分别为:

$$\begin{aligned} H_{ij} &= \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \delta_j}; & N_{ij} &= \frac{\partial \Delta P_i}{\partial U_j} U_j; \\ J_{ij} &= \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \delta_j}; & L_{ij} &= \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial U_j} U_j \end{aligned} \quad (3.64)$$

对于 PV 节点,节点电压给定, ΔU 为零,只有一个变量 $\Delta \delta$ 待求,只需列出式(3.61)参加联立求解。所以,只要在式(3.63)中除去相应的行与列,例如节点 p 为 PV 节点,则可除去相应 ΔQ_p 的第 $2p$ 行与第 $2p$ 列。

对于平衡节点,其电压大小、相角均为已知,所以不需参加联立求解。

这样,如果系统有 n 个节点,其中有 PV 节点 m 个, PQ 节点 $n-m-1$ 个,则式(3.63)的雅可比矩阵为 $2(n-1)-m$ 阶。

在式(3.63)中用 U_i 除 ΔU_i ,从数值上讲不影响计算的收敛性与精度,但能使雅可比矩阵各元素形式上更相似,简化雅可比矩阵的计算与表示。

由式(3.57)和式(3.58)可求出雅可比矩阵的元素如下:

非对角元素:

$$\left. \begin{aligned} H_{ij} &= -U_i U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \\ N_{ij} &= -U_i U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ J_{ij} &= U_i U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = -N_{ij} \\ L_{ij} &= -U_i U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = H_{ij} \end{aligned} \right\} \quad (3.65)$$

对角线元素:

$$\left. \begin{aligned} H_{ii} &= Q_i + B_{ii} U_i^2 \\ N_{ii} &= -P_i - G_{ii} U_i^2 \\ J_{ii} &= -P_i + G_{ii} U_i^2 \\ L_{ii} &= -Q_i + B_{ii} U_i^2 \end{aligned} \right\} \quad (3.66)$$

上式中的 P_i, Q_i 分别由式(3.57)、(3.58)定义。

式(3.63) 还可写成:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \vdots \\ \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdots & H_{1n} & N_{11} & N_{12} & \cdots & N_{1n} \\ H_{21} & H_{22} & \cdots & H_{2n} & N_{21} & N_{22} & \cdots & N_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ H_{n1} & H_{n2} & \cdots & H_{nn} & N_{n1} & N_{n2} & \cdots & N_{nn} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ J_{11} & J_{12} & \cdots & J_{1n} & L_{11} & L_{12} & \cdots & L_{1n} \\ J_{21} & J_{22} & \cdots & J_{2n} & L_{21} & L_{22} & \cdots & L_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ J_{n1} & J_{n2} & \cdots & J_{nn} & L_{n1} & L_{n2} & \cdots & L_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_1 \\ \Delta \delta_2 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \\ \vdots \\ \Delta U_1/U_1 \\ \Delta U_2/U_2 \\ \vdots \\ \Delta U_n/U_n \end{bmatrix} \quad (3.67)$$

或

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ U^{-1} \Delta U \end{bmatrix} \quad (3.68)$$

式中, $U = \text{diag}\{U_i\}$, 即各节点电压的对角矩阵。

由上式可求得第 $k+1$ 次迭代的修正量 $\Delta \delta^{(k+1)}$ 和 $\Delta U^{(k+1)}$, 从而可得到新的解

$$\begin{bmatrix} \delta^{(k+1)} \\ U^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{(k)} \\ U^{(k)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(k+1)} \\ \Delta U^{(k+1)} \end{bmatrix} \quad (3.69)$$

这样反复迭代计算, 直至所有节点 $|\Delta U| < \epsilon$ 和 $|\Delta \delta| < \epsilon$ 为止。

2. 节点电压以直角坐标形式表示时的牛顿—拉夫逊法潮流计算

节点电压以直角坐标形式表示, 即 $\dot{U}_i = e_i + j f_i$, e_i 为节点电压实部, f_i 为节点电压虚部, 功率方程可写成:

$$P_i = e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \quad (3.70)$$

$$Q_i = f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) - e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j) \quad (3.71)$$

对于 PV 节点, 电压有效值为设定值, 而实部和虚部的比例是可变的, 它们之间的关系为

$$e_i^2 + f_i^2 = U_i^2 \quad (3.72)$$

等式(3.70)、(3.72) 构成关于 PV 节点的两个约束条件。

对于第 k 次迭代, 可写出

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i - e_i^{(k)} \sum_{j=1}^n (G_{ij}e_j^{(k)} - B_{ij}f_j^{(k)}) - f_i^{(k)} \sum_{j=1}^n (G_{ij}f_j^{(k)} + B_{ij}e_j^{(k)}) \quad (3.73)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i - f_i^{(k)} \sum_{j=1}^n (G_{ij}e_j^{(k)} - B_{ij}f_j^{(k)}) + e_i^{(k)} \sum_{j=1}^n (G_{ij}f_j^{(k)} + B_{ij}e_j^{(k)}) \quad (3.74)$$

$$(\Delta U_i^{(k)})^2 = U_i^2 - (e_i^{(k)})^2 - (f_i^{(k)})^2 \quad (3.75)$$

与式(3.59) 和式(3.60) 相似, 可列出修正方程(从下式至式(3.82), 均略去上标 k)。

对于除平衡节点以外的所有节点

$$\Delta P_i = \sum_{j=1}^n \frac{\partial \Delta P_i}{\partial f_j} \Delta f_j + \sum_{j=1}^n \frac{\partial \Delta P_i}{\partial e_j} \Delta e_j = \sum_{j=1}^n H_{ij} \Delta f_j + \sum_{j=1}^n N_{ij} \Delta e_j \quad (3.76)$$

对于 PQ 节点

$$\Delta Q_i = \sum_{j=1}^n \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial f_j} \Delta f_j + \sum_{j=1}^n \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial e_j} \Delta e_j = \sum_{j=1}^n J_{ij} \Delta f_j + \sum_{j=1}^n L_{ij} \Delta e_j \quad (3.77)$$

对于 PV 节点

$$\Delta U_i^2 = \frac{\partial \Delta U_i^2}{\partial f_i} \Delta f_i + \frac{\partial \Delta U_i^2}{\partial e_i} \Delta e_i = R_{ii} \Delta f_i + S_{ii} \Delta e_i \quad (3.78)$$

如系统具有 n 个节点, 其中 m 个为 PV 节点, 则式(3.76)、(3.77)、(3.78) 可写成如下的矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta U^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \\ R & S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f \\ \Delta e \end{bmatrix} \quad (3.79)$$

式中, ΔP 、 Δe 和 Δf 为 $(n-1) \times 1$ 向量, ΔQ 为 $(n-m-1) \times 1$ 向量, ΔU^2 为 $m \times 1$ 向量, H 、 N 为 $(n-1) \times (n-1)$ 矩阵, J 、 L 为 $(n-m-1) \times (n-1)$ 矩阵, R 、 S 为 $m \times (n-1)$ 矩阵。其雅可比矩阵元素为:

$$\left. \begin{aligned} H_{ij} &= L_{ij} = -G_{ij}f_i + B_{ij}e_i \quad (i \neq j) \\ N_{ij} &= -J_{ij} = -G_{ij}e_i - B_{ij}f_i \quad (i \neq j) \\ H_{ii} &= -b_i + B_{ii}e_i - G_{ii}f_i \\ N_{ii} &= -a_i - G_{ii}e_i - B_{ii}f_i \\ J_{ii} &= -a_i + G_{ii}e_i + B_{ii}f_i \\ L_{ii} &= b_i + B_{ii}e_i - G_{ii}f_i \\ R_{ij} &= S_{ij} = 0 \quad (i \neq j) \\ R_{ii} &= -2f_i \\ S_{ii} &= -2e_i \end{aligned} \right\} \quad (3.80)$$

上列式中 a_i 和 b_i 分别是节点注入电流 \dot{I}_i 的实部和虚部

$$a_i = \sum_{j=1}^n (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) \quad (3.81)$$

$$b_i = \sum_{j=1}^n (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j) \quad (3.82)$$

由式(3.79)可求得第 $k+1$ 次迭代的修正量 $\Delta e^{(k+1)}$ 和 $\Delta f^{(k+1)}$, 从而可得到新的解:

$$\begin{bmatrix} e^{(k+1)} \\ f^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{(k)} \\ f^{(k)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta e^{(k+1)} \\ \Delta f^{(k+1)} \end{bmatrix} \quad (3.83)$$

这样反复计算, 直到收敛到要求的精度。收敛指标一般取所有节点的 $|\Delta P| \leq \epsilon$ 和 $|\Delta Q| \leq \epsilon$ 或 $|\Delta U^2| \leq \epsilon$ 。

3. 牛顿—拉夫逊法潮流计算的步骤

求取雅可比矩阵是牛顿—拉夫逊法的一项重要工作。电力系统潮流计算的雅可比矩阵具有以下性质:

(1) 雅可比矩阵为一非奇异方阵。当节点电压以极坐标形式表示时, 该矩阵为 $2(n-1)-m$ 阶方阵, 节点电压以直角坐标形式表示时为 $2(n-1)$ 阶。

(2) 矩阵元素与节点电压有关, 故每次迭代时都要重新计算。

(3) 与导纳矩阵具有相似的结构, 当 $Y_{ij} = 0$ 时, $H_{ij}, N_{ij}, J_{ij}, L_{ij}$ 均为 0, 因此, 也是高度稀疏的矩阵。这对利用稀疏矩阵技巧, 减少计算所需的内存和时间是很有好处的。

(4) 具有结构对称性, 但数值不对称。例如, $H_{ij} = -G_{ij}f_i + B_{ij}e_i$, $H_{ji} = -G_{ji}f_j + B_{ji}e_j$, 由于各个节点电压不同, 因而 $H_{ij} \neq H_{ji}$ 。

需要指出的是, 当在计算过程中发生 PV 节点的无功功率越限时, PV 节点要转化成 PQ 节点。此时, 对节点电压以极坐标形式表示的修正方程, 需增

加一个对应于该节点的无功功率不平衡量(ΔQ)的关系式,因而式(3.68)中的误差向量、电压向量和雅可比矩阵都有相应变动。当采用直角坐标表示时,要增加一个对应于该节点的无功功率不平衡量(ΔQ)的关系式,同时要减少一个对应于设定节点电压约束条件(ΔU^2)的关系式。

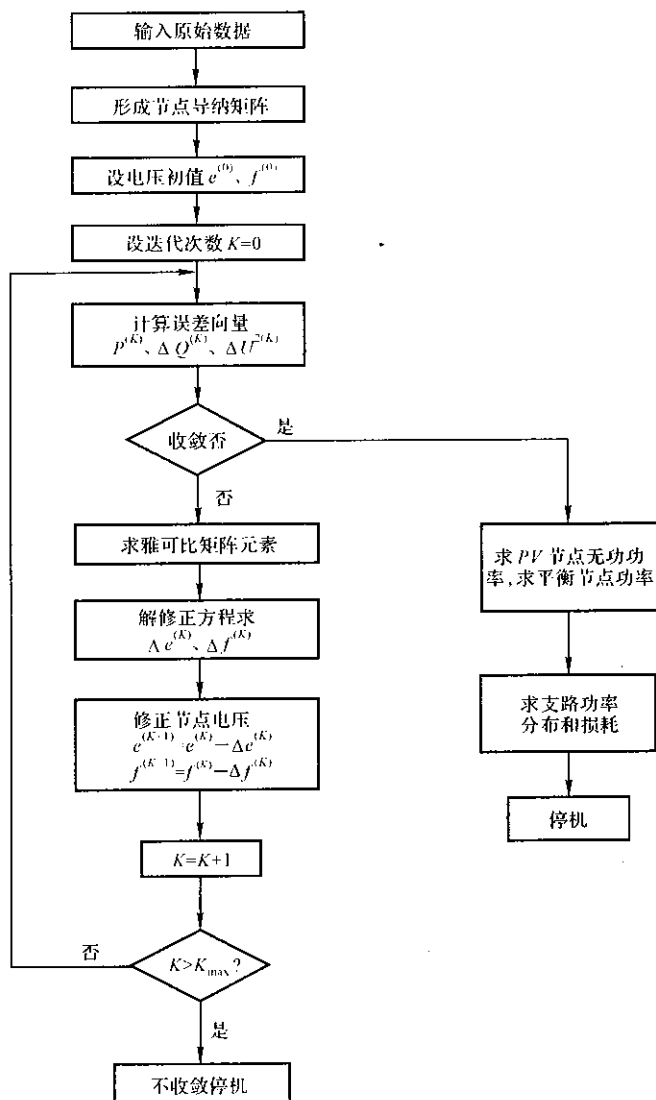


图 3.15 牛顿—拉夫逊法计算潮流程序框图

用牛顿—拉夫逊法计算电力系统潮流的基本步骤:

- (1) 形成节点导纳矩阵;
- (2) 给各节点电压设初值 U_{i0}, δ_{i0} (或 e_{i0}, f_{i0});
- (3) 将节点电压初值代入式(3.59)、(3.60)或(3.73)、(3.74)、(3.75), 求出修正方程式的常数项向量;
- (4) 将节点电压初值代入式(3.65)、(3.66)或式(3.80) 求出雅可比矩阵元素;
- (5) 求解修正方程式(3.68)或(3.79), 求修正向量 $\Delta U, \Delta \delta$ 或 $\Delta e, \Delta f$;
- (6) 根据式(3.69)或(3.83) 求取节点电压的新值;
- (7) 检查是否收敛, 如不收敛, 则以各节点电压的新值作为初值自第3步重新开始进行下一次迭代, 否则转入下一步;
- (8) 计算支路功率分布, PV 节点无功功率和平衡节点注入功率。

图 3.15 为牛顿—拉夫逊法计算潮流的程序框图。图中 K_{\max} 为事先给定的最大迭代次数, 当实际迭代次数 $K > K_{\max}$ 时, 即认为计算不收敛。

3.4.3 牛顿—拉夫逊法计算潮流的有关问题

牛顿—拉夫逊法早在 20 世纪 50 年代末就已应用于求解电力系统潮流问题, 但作为一种实用的、有竞争力的电力系统潮流计算方法, 则是在应用了稀疏矩阵技巧和高斯消去法求解修正方程之后。

1. 稀疏矩阵表示法

电力网络的节点导纳矩阵是一个高度稀疏的矩阵, 也就是矩阵中很多非对角元素是零。如果不考虑导纳矩阵的稀疏性, 导纳矩阵要用二维数组存放, 那么矩阵中的大量零元素不仅要占用大量的计算机内存, 而且还由于要对这些零元素进行大量的、不必要的运算, 从而降低了计算效率。从前节已知, 在用牛顿—拉夫逊法进行潮流计算时, 雅可比矩阵具有与节点导纳矩阵相似的结构, 如果不考虑雅可比矩阵的稀疏性, 在每次迭代过程的雅可比矩阵的形成与分解计算中也必将发生对零元素的不必要的存取和计算。因此, 不考虑稀疏性的牛顿—拉夫逊法不仅需要庞大的存储空间, 而且计算效率很低, 速度很慢。因此, 将稀疏矩阵技巧应用于导纳矩阵或雅可比矩阵时, 可将这些矩阵的对角元素存放在一个一维数组 A 中, 而将矩阵的上三角矩阵的非对角元素的非零元素按行按列紧凑地压缩在一个一维数组 B 中。由导纳或雅可比矩阵的性质可知, A 数组元素的个数等于系统节点个数, B 数组元素的个数与系统不接地支路数相应(为支路数与消去过程中出现的非零注入元数之和)。这样, 矩阵的稀疏存放就极大地减少了所需存储单元。当然, 实际情况还要复杂些, 还需要

若干数组以指明 B 数组中每一个元素对应于方阵所在的行与列。所以,在以稀疏方式存贮一个 n 阶的稀疏方阵时,大约需要 $6b + 3n$ 个存贮单元,其中 b 是系统非接地支路数, n 为系统节点数。在典型的电力系统中, $b \approx 1.5n$, 所以总的存贮单元大约需要 $12n$ 个。与用二维数组存放所需单元相比,对 500 个节点的系统,大约减少了 40 倍,同时,相应于零元素的额外计算工作也大大减少。

2. 高斯消去法

求解牛顿—拉夫逊法潮流计算的修正方程,可以采用矩阵求逆的方法,即

$$\begin{bmatrix} \Delta U \\ \Delta \delta \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (3.84)$$

由于潮流计算的雅可比矩阵通常是个高度稀疏的矩阵,而其逆矩阵 J^{-1} 则是一个满矩阵,因而直接采用矩阵求逆的方法必然会失去矩阵的稀疏性,导致额外的存贮单元与计算工作量。用高斯消去法求解潮流计算中牛顿—拉夫逊法的修正方程式,能够保持线性方程组原有的稀疏性,可以大大减少计算所需的内存和时间,使牛顿—拉夫逊法成为求解潮流问题的一种有效手段。常用的高斯消去法为按行消去,逐行规格化,下面作简要的介绍。

考虑 n 阶线性方程组

$$AX = B \quad (3.85)$$

$$\text{式中系数矩阵 } A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

$$\text{待求向量 } X = [x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_n]^T$$

$$\text{常数向量 } B = [b_1 \ b_2 \ \cdots \ b_n]^T$$

高斯消去法将系数矩阵与常数向量合并成一增广矩阵:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} & b_2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} & b_n \end{bmatrix} \quad (3.86)$$

通过按行消去,逐行规格化(称为前代),上式变换成

$$\begin{bmatrix} 1 & a_{12}^{(1)} & \cdots & a_{1n}^{(1)} & b_1^{(1)} \\ 0 & 1 & \cdots & a_{2n}^{(2)} & b_2^{(2)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & b_n^{(n)} \end{bmatrix} \quad (3.87)$$

再通过线性变换,将增广矩阵的左边 n 列变换成单位阵(称为回代):

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & c_1 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & c_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & c_n \end{bmatrix} \quad (3.88)$$

于是可得方程组的解

$$X = C \quad (3.89)$$

此处

$$C = [c_1 \ c_2 \ \cdots \ c_n]^T$$

前代的基本步骤为:

(1) 以 a_{11} 除第 1 行各元素,使成为

$$[1 \ a_{12}^{(1)} \ a_{13}^{(1)} \ \cdots \ a_{1n}^{(1)} \ b_1^{(1)}]$$

的规格化形式,其中 $a_{1j}^{(1)} = a_{1j}/a_{11} (j = 2, 3, \cdots, n)$; $b_1^{(1)} = b_1/a_{11}$ 。

(2) 将第 1 行乘 $-a_{21}$ 后加到第 2 行,消去第 2 行对角元素左边的元素 a_{21} ,使第 2 行成为

$$[0 \ a_{22}^{(1)} \ a_{23}^{(1)} \ \cdots \ a_{2n}^{(1)} \ b_2^{(1)}]$$

其中 $a_{2j}^{(1)} = a_{2j} - a_{21}a_{1j}^{(1)} (j = 2, 3, \cdots, n)$; $b_2^{(1)} = b_2 - a_{21}b_1^{(1)}$,然后再将第 2 行规格化,成为

$$[0 \ 1 \ a_{23}^{(2)} \ \cdots \ a_{2n}^{(2)} \ b_2^{(2)}]$$

其中 $a_{2j}^{(2)} = a_{2j}^{(1)}/a_{22}^{(1)} (j = 3, \cdots, n)$; $b_2^{(2)} = b_2^{(1)}/a_{22}^{(1)}$ 。

(3) 将第 1 行乘 $-a_{31}$,加到第 3 行,消去 a_{31} 得

$$[0 \ a_{32}^{(1)} \ a_{33}^{(1)} \ \cdots \ a_{3n}^{(1)} \ b_3^{(1)}]$$

将第 2 行乘 $-a_{32}^{(1)}$,加到第 3 行,消去 $a_{32}^{(1)}$ 得

$$[0 \ 0 \ a_{33}^{(2)} \ \cdots \ a_{3n}^{(2)} \ b_3^{(2)}]$$

再将第 3 行规格化。

第 i 行消去计算的表达式为:

$$a_{ij}^{(k)} = a_{ij}^{(k-1)} - a_{ik}^{(k-1)}a_{kj}^{(k)} (j = k+1, k+2, \cdots, n) \quad (3.90)$$

$$b_i^{(k)} = b_i^{(k-1)} - a_{ik}^{(k-1)}b_k^{(k)} \quad (3.91)$$

其中消去计算的顺序 $k = 1, 2, \cdots, i-1$ 。

所以在对第 i 行进行 $i-1$ 次消去计算后,该行对角线左边的元素均为零。

第 i 行规格化计算式为:

$$a_{ij}^{(i)} = \frac{a_{ij}^{(i-1)}}{a_{ii}^{(i-1)}} (j = i, i+1, \cdots, n) \quad (3.92)$$

$$b_i^{(i)} = \frac{b_i^{(i-1)}}{a_{ii}^{(i-1)}} \quad (3.93)$$

(4) 如此不断地逐行消去,规格化,直至第 n 行,就可得到式(3.87)。这个过程也叫前代过程。式(3.87)中对角线以上的元素叫作上三角矩阵元素。从式(3.90)和(3.91)可知, $a_{kj}^{(k)}$ 是位于上三角矩阵中 $k(k < j)$ 行中的元素,而 $a_{ik}^{(k-1)}$ 则是在消去过程中位于对角线左侧 i 行元素的中间计算值,也叫做下三角矩阵元素。

以上介绍的是按行消元法,也可用按列消元法进行前代计算,所得结果相同。

(5) 对式(3.87)进行自下而上的回代就可得到解 \mathbf{X} 。很明显

$$x_n = b_n^{(n)},$$

$$x_{n-1} + a_{n-1,n}^{(n-1)} x_n = b_{n-1}^{(n-1)}$$

所以

$$x_{n-1} = b_{n-1}^{(n-1)} - a_{n-1,n}^{(n-1)} x_n$$

回代的一般形式为:

$$x_i = b_i^{(i)} - \sum_{j=i+1}^n a_{ij}^{(i)} x_j \quad (i = n, n-1, \dots, 1) \quad (3.94)$$

用高斯消去法对稀疏矩阵进行前代消去运算时,消元后的上三角矩阵中的非零元素个数可能会增加。由式(3.90)可以看出,假定矩阵中 i 行元素 a_{ij} 在进行第 k 次消去前 $a_{ij}^{(k-1)} = 0$,在 k 次消去中只要下三角矩阵的第 i 行中的 k 列元素 $a_{ik}^{(k-1)}$ 与上三角矩阵的第 j 列中 k 行元素 $a_{kj}^{(k)}$ 的乘积(如图 3.16 所示)不为零,元素 $a_{ij}^{(k)}$ 将为非零。增加的非零元素称做注入元。显然,在高度稀疏矩阵中,出现注入元的可能性及数目与矩阵中原始非零元素的位置有关。

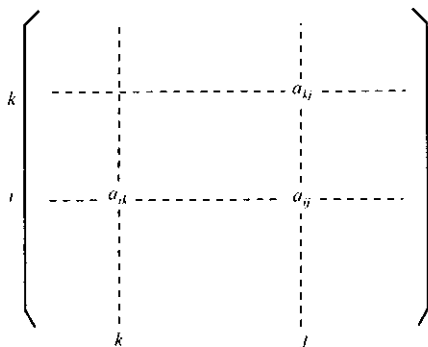


图 3.16 矩阵中的元素相乘

3. 节点的优化编号

从前面几节的内容已经知道,电力系统的节点导纳矩阵或牛顿—拉夫逊法计算潮流的雅可比矩阵的非对角元素,相对于系统中与矩阵的行、列号相应节点之间直接相连的支路。如果电网节点编号改变,对应的节点导纳矩阵或雅可比矩阵的行、列号也将改变;非零元素在矩阵中的位置相应发生变化,所以出现非零注入元的可能性和数目也将发生变化,或者说注入元与节点编号的排序有关。图 3.17 表示一个简单电力网不同的节点编号方案在高斯消去法消元过程中形成的上三角矩阵注入元,图中用符号 Δ 表示注入元。

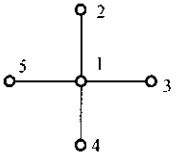
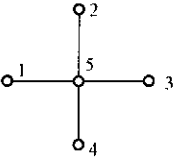
序号	网络节点编号方案	导纳矩阵形式	消元后的上三角阵
1		$ \begin{matrix} \times & \times & \times & \times & \times \\ \times & \times & & & \\ \times & & \times & & \\ \times & & & \times & \\ \times & & & & \times \end{matrix} $	$ \begin{matrix} \times & \times & \times & \times & \times \\ & \times & \triangle & \triangle & \triangle \\ & & \times & \triangle & \triangle \\ & & & \times & \triangle \\ & & & & \times \end{matrix} $
2		$ \begin{matrix} & & & \times & \\ & \times & & & \times \\ & & \times & & \times \\ & & & \times & \times \\ \times & \times & \times & \times & \times \end{matrix} $	$ \begin{matrix} & & & \times & \\ \times & & & & \times \\ & \times & & & \times \\ & & \times & & \times \\ & & & \times & \times \\ & & & & \times \end{matrix} $

图 3.17 节点编号方案

显然,用不同的节点编号方案,所得到的注入元数目是不同的。为了在计算过程中减少内存容量和提高计算速度,要求找到一种或数种使注入元最少的节点编号方案,或最优的节点编号方案。事实上,由于电力网节点数目很大,要找到注入元最少的最优的节点编号方案非常困难,因此在实用上常常以准优化的节点编号方案来代替。准优化节点排序常用的方法有两种:

(1) 静态按最少出线支路数排序

这种方法排序的原则是:

- ① 按节点所连支路数(不包括接地支路,两个节点间有多条并联支路时只算作一条)的多少排序,连接支路数少的节点排在前面;
- ② 非零元素尽量安排在导纳矩阵的准对角线上或靠近对角线。

应用这种静态优化法时,在导纳矩阵形成前,通过对各节点连接支路多少的分析,可一次定出节点编号,因而计算工作量很小。

(2) 动态按最少出线支路排序

在高斯消去法按列消元过程中,每消去一列所增加的注入元个数,相当于网络中消去与该列同号的节点给剩余节点增加的相互连线数。例如图 3.17 中第一个节点编号方案,消去节点 1 相当于进行网络的星一网变换;剩下的四个节点网络将增加 6 条新支路,相应地用高斯消元法消去第一列后将增加 6 个注入元。而方案 2 消去节点 1 不增加新支路,所以消去第 1 列不产生注入元。动态排序的方法是,先对支路数最少的一个节点编号,接着将该节点从网络中消

去,立即修改未编号节点所连的支路数,然后再选出支路数最少的节点继续编号并消去。这种方法与静态按最少出线支路数排序相比,考虑了消去过程中节点支路数(或导纳矩阵非零元素)的变化,因而注入元的数目更少。

4. 牛顿—拉夫逊法的收敛性

牛顿—拉夫逊法具有平方收敛特性,如图 3.18 所示。它在开始时收敛得比较慢,而在几次迭代以后,收敛得非常快。由于它的这种收敛特性,故在使用稀疏矩阵技巧和优化节点编号以后,在使用平直电压启动(设置全网电压初值为同一数值)时,牛顿—拉夫逊法的迭代次数实际上与系统规模无关。一个设计良好的牛顿—拉夫逊法潮流计算程序的每一次迭代时间仅与系统节点数 N 成正比。因此,牛顿—拉夫逊法在计算速度上的优势是很明显的。

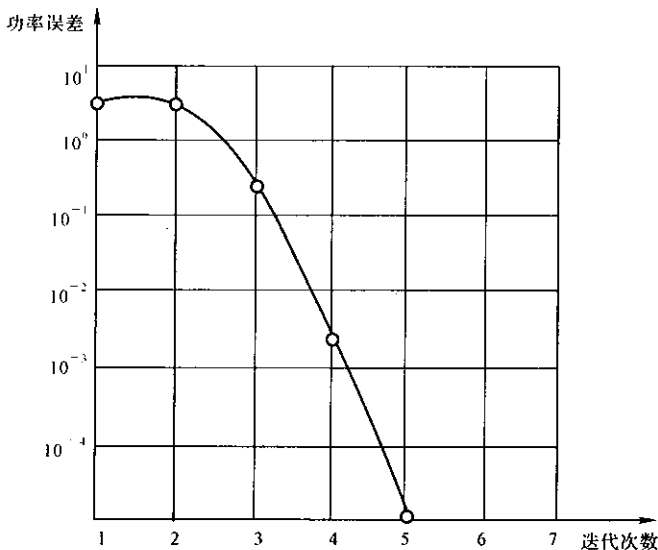


图 3.18 牛顿—拉夫逊法的收敛特性

牛顿—拉夫逊法的收敛性与下述因素有关:

初值 牛顿—拉夫逊法对初值设定很敏感,这可用图 3.19 说明。当初值 x_0 取得合适时,通过 $x_0 \rightarrow x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow \dots$ 逼近真值;当初值 x'_0 取得不合适时,由 $x'_0 \rightarrow x'_1 \rightarrow x'_2 \rightarrow \dots$ 离开真值越来越远。一般地说,如果有良好的初值,牛顿—拉夫逊法的求解是相当可靠的。为此,实用上常常在牛顿—拉夫逊法计算潮流以前先用对初值不敏感的高斯—塞德法(迭代 1~2 次)或其他方法计算电压初值。

函数的平滑性 牛顿—拉夫逊法对所处理函数的平滑性是敏感的,所处理的函数越接近线性,牛顿—拉夫逊法收敛性越好。为了改善功率方程的

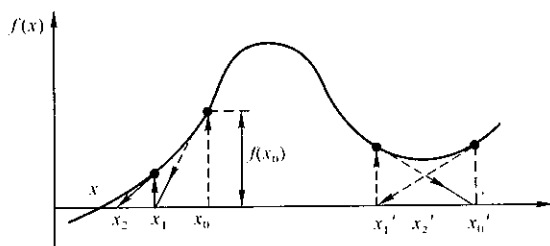


图 3.19 牛顿—拉夫逊法对初值的敏感性

非线性,实用中可以通过限制修正变量 $\Delta\delta$ 、 ΔU 的幅度来取得,如图 3.20 所示。对 Δx 的幅度加以限制以后,使本来可能不收敛的情况改变了。但是,幅度也不能取得太小,否则会使本来处于良好状态的系统的收敛放慢。

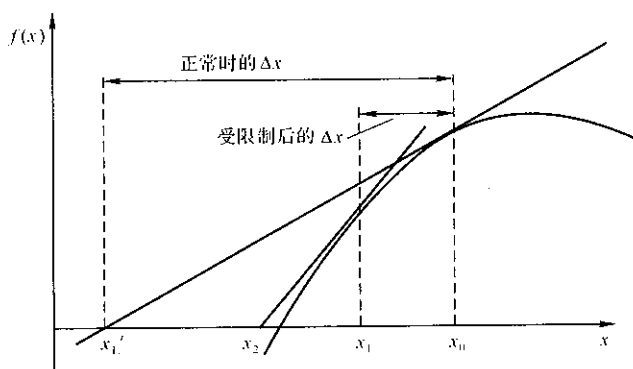


图 3.20 限制修正变量改进收敛性

3.5 P-Q 分解法

P-Q 分解潮流计算法是牛顿—拉夫逊法潮流计算的一种简化方法,在电力系统中得到广泛的应用。从上一节已经知道,牛顿—拉夫逊法的雅可比矩阵在每一次迭代过程中都有变化,需要重新形成和求解,这占据了牛顿—拉夫逊法潮流计算的大部分时间,成为牛顿—拉夫逊法计算速度不能提高的主要原因。虽然在牛顿—拉夫逊法中应用了稀疏矩阵技巧以及节点优化编号等提高计算速度的技术,但却没有充分利用电力系统本身的特点来改进和提高计算速度。P-Q 分解法正是利用了电力系统的一些特有的运行特性,对牛顿—拉夫逊法作了简化。

将式(3.68)极坐标形式表示的牛顿—拉夫逊法修正方程展开为:

$$\Delta P = H\Delta\delta + NU^{-1}\Delta U \quad (3.95)$$

$$\Delta Q = J\Delta\delta + LU^{-1}\Delta U \quad (3.96)$$

对它们进行如下简化:

1. 考虑到电力系统中有功功率分布主要受节点电压相角的影响,无功功率分布主要受节点电压幅值的影响,所以可以近似地忽略电压幅值变化对有功功率和电压相位变化对无功功率分布的影响,即令 $N = 0$ 和 $J = 0$, 式(3.95)和(3.96)可改写为:

$$\Delta P = H\Delta\delta \quad (3.97)$$

$$\Delta Q = LU^{-1}\Delta U \quad (3.98)$$

这样就可使有功功率修正方程与无功功率修正方程分开进行迭代。

2. 根据电力系统的正常运行条件还可作下列假设:

- (1) $\cos\delta_{ij} \approx 1$;
- (2) $G_{ij}\sin\delta_{ij} \ll B_{ij}$;
- (3) $Q_i \ll U_i^2 B_{ii}$

上列第一条假设是因为电力系统正常运行时线路两端的电压相位角一般相差不大(通常不超过 $10 \sim 20^\circ$)。第二条假设是因为电力系统中一般架空线路的电抗远大于电阻,所以 $G_{ij} \ll B_{ij}$, 并且由于 δ_{ij} 很小, $\sin\delta_{ij} \ll 1$ 。第三条假设表示与各节点无功功率相应的导纳 Q/U_i^2 远远小于该节点自导纳的虚部 B_{ii} 。

由以上假设,可从式(3.65)和(3.66)求得式(3.97)和(3.98)中雅可比矩阵元素的表达式为:

$$H_{ij} = L_{ij} = U_i U_j B_{ij} \quad (3.99)$$

$$H_{ii} = L_{ii} = U_i^2 B_{ii} \quad (3.100)$$

所以式(3.97)和(3.98)可改写为

$$\Delta P = UBU\Delta\delta \quad (3.101)$$

$$\Delta Q = UBU(U^{-1}\Delta U) = UB\Delta U \quad (3.102)$$

式中, U 为节点电压有效值的对角矩阵, B 为电纳矩阵(由节点导纳矩阵各元素的虚部构成), 即

$$U = \begin{bmatrix} U_1 & & & \\ & U_2 & & 0 \\ & & U_3 & \\ & 0 & & \\ & & & U_n \end{bmatrix} \quad (3.103)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} & \cdots & B_{1n} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} & \cdots & B_{2n} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} & \cdots & B_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ B_{n1} & B_{n2} & B_{n3} & \cdots & B_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.104)$$

将式(3.101)和(3.102)都左乘 \mathbf{U}^{-1} , 可以得到修正方程:

$$\mathbf{U}^{-1}\Delta\mathbf{P} = \mathbf{B}'\mathbf{U}\Delta\delta \quad (3.105)$$

$$\mathbf{U}^{-1}\Delta\mathbf{Q} = \mathbf{B}''\Delta\mathbf{U} \quad (3.106)$$

或

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta P_1}{U_1} \\ \frac{\Delta P_2}{U_2} \\ \vdots \\ \frac{\Delta P_n}{U_n} \end{bmatrix} = \mathbf{B}' \begin{bmatrix} U_1\Delta\delta_1 \\ U_2\Delta\delta_2 \\ \vdots \\ U_n\Delta\delta_n \end{bmatrix} \quad (3.107)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta Q_1}{U_1} \\ \frac{\Delta Q_2}{U_2} \\ \vdots \\ \frac{\Delta Q_n}{U_n} \end{bmatrix} = \mathbf{B}'' \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \vdots \\ \Delta U_n \end{bmatrix} \quad (3.108)$$

上二式中系数矩阵 \mathbf{B}' 和 \mathbf{B}'' 有相同的形式, 但实质并不完全相同。首先, \mathbf{B}' 为 $n-1$ 阶矩阵, 而由于存在 PV 节点, \mathbf{B}'' 为 $n-m-1$ 阶矩阵 (m 为 PV 节点个数); 其次, 为了加快收敛, 通常在 \mathbf{B}' 中除去那些与有功功率和电压相位关系较小的因素, 如在 \mathbf{B}'_{ii} 中不包含各输电线路和变压器支路等值 π 型电路的对地电纳。 \mathbf{B}' 和 \mathbf{B}'' 均为对称的常数矩阵。

P-Q 分解法通常与因子表法联合使用。所谓因子表法就是将系数矩阵 \mathbf{B}' 和 \mathbf{B}'' 各分解成前代和回代用的因子表, 在每次迭代中, 不必重新形成因子表, 只需形成常数项功率误差向量, 通过对因子表的前代和回代求得电压角度、有效值的修正量。

用 P-Q 分解法进行潮流计算的框图如图 3.21 所示。

与牛顿—拉夫逊法相比, P-Q 分解法具有以下特点:

(1) 以一个 $n-1$ 阶和一个 $n-m-1$ 阶线性方程组代替原有的

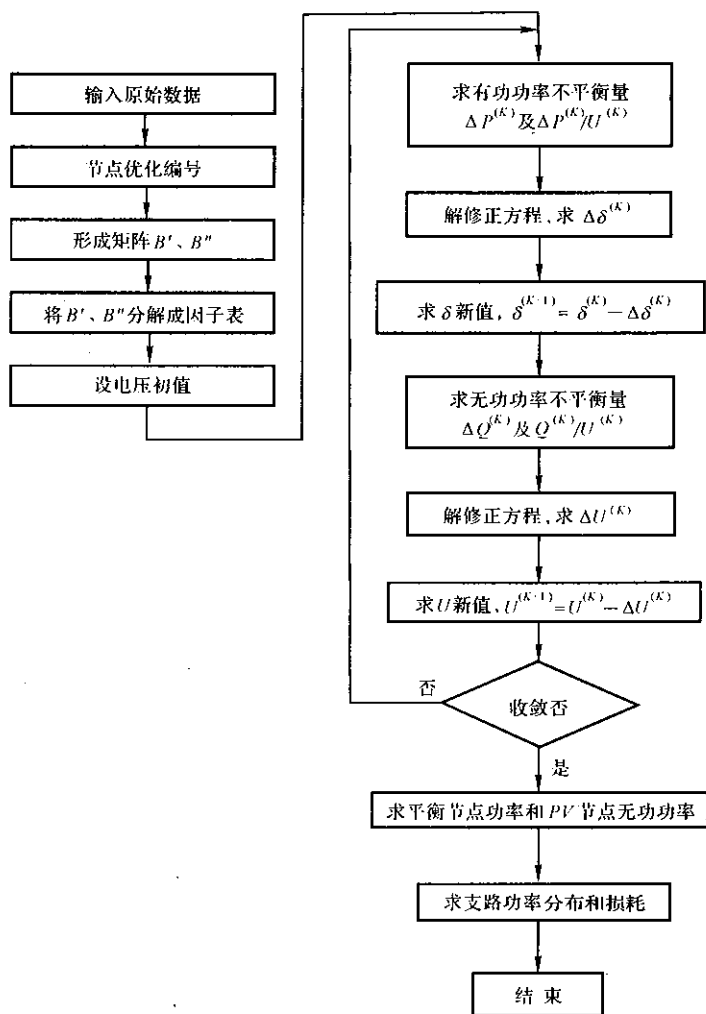


图 3.21 P-Q 分解法的框图

$2n - m - 1$ 阶线性方程组, 这样可以减少计算机的存储容量和加快线性方程组的求解速度。

(2) 修正方程的系数矩阵 B' 和 B'' 为对称常数矩阵, 且在迭代过程中保持不变。如果采用因子表法求解, 只需分解一次, 在迭代过程中不必重新分解, 减少了计算工作量。又因为矩阵是对称的, 所以只需存储一个上(或下)三角矩阵, 这也节约了计算机的内存容量。

由于 P-Q 分解法只是对牛顿—拉夫逊法的雅可比矩阵作了简化, 而对其功率平衡方程式及收敛判据(节点注入功率的偏差绝对值小于 ϵ) 都未做改

变,因而它与牛顿—拉夫逊法同解,同样可以达到很高精度。

P-Q 分解法具有线性收敛特性,与牛顿—拉夫逊法相比,当收敛到同样的精度时,P-Q 分解法需要迭代计算的次数较多。但如上所述,P-Q 分解法每次迭代计算的方程阶数低,不需重新形成和分解系数矩阵,计算工作量较之牛顿—拉夫逊法的一次迭代计算大大减少,因而总的说来,P-Q 分解法的速度较牛顿—拉夫逊法快。

需要说明,当电力系统中含有 35kV 及以下电压等级的电力线路时,由于它们的 r/x 比值很大,不满足上述简化条件,可能出现迭代计算不收敛的情况。所以 P-Q 分解法一般只适用于 110kV 以上电力网的计算。

【例 3.3】 图 3.22 所示的五节点电力网中,节点 1、2 和 3 为 PQ 节点,各节点的负荷分别为: $\tilde{S}_1 = 1.6 + j0.8$, $\tilde{S}_2 = 2 + j1$, $\tilde{S}_3 = 3.7 + j1.3$;节点 4 为 PV 节点,给定 $P_4 = 5$, $U_4 = 1.05$;节点 5 为平衡节点,给定 $\dot{U}_5 = 1.05 \angle 0^\circ$ 。各支路阻抗、对地导纳标于图中,与例 3.2 相同。试分别用牛顿—拉夫逊法和 P-Q 分解法计算潮流。

【解】 例 3.2 已求得该网络的节点导纳矩阵。

各 PQ 和 PV 节点已知的注入功率为: $P_{1S} = -1.6$, $Q_{1S} = -0.8$, $P_{2S} = -2$, $Q_{2S} = -1$, $P_{3S} = -3.7$, $P_{4S} = 5$ 。节点 4 电压 $U_{1S} = 1.05$ 。

设各节点电压初值为

节 点	1	2	3	4	5
$\dot{U}_i^{(0)} = e_i^{(0)} + jf_i^{(0)}$	$1.0 + j0.0$	$1.0 + j0.0$	$1.0 + j0.0$	$1.05 + j0.0$	$1.05 + j0.0$

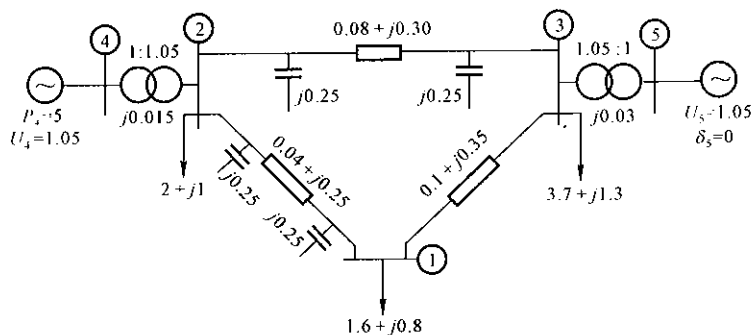


图 3.22 例 3.3 的电力系统接线图

(1) 牛顿—拉夫逊法

用牛顿—拉夫逊法计算潮流,要求建立修正方程式,然后解出电压修正量。

根据式(3.73)~(3.75),可写出本例修正方程式常数项(误差项)的计算式:

$$\Delta P_1 = P_{1S} - e_1[(G_{11}e_1 - B_{11}f_1) + (G_{12}e_2 - B_{12}f_2) + (G_{13}e_3 - B_{13}f_3)]$$

$$- f_1[(G_{11}f_1 + B_{11}e_1) + (G_{12}f_2 + B_{12}e_2) + (G_{13}f_3 + B_{13}e_3)]$$

$$\Delta Q_1 = Q_{1S} - f_1[(G_{11}e_1 - B_{11}f_1) + (G_{12}e_2 - B_{12}f_2) + (G_{13}e_3 - B_{13}f_3)]$$

$$+ e_1[(G_{11}f_1 + B_{11}e_1) + (G_{12}f_2 + B_{12}e_2) + (G_{13}f_3 + B_{13}e_3)]$$

⋮

$$\Delta P_4 = P_{4S} - e_4[(G_{42}e_2 - B_{42}f_2) + (G_{44}e_4 - B_{44}f_4)]$$

$$- f_4[(G_{42}f_2 + B_{42}e_2) + (G_{44}f_4 + B_{44}e_4)]$$

$$\Delta U_1^2 = U_{1S}^2 - (e_1^2 + f_1^2)$$

将各节点电压初值代入,可求得首次迭代的误差项向量:

$$\Delta P^{(0)} = \begin{bmatrix} \Delta P_1^{(0)} \\ \Delta Q_1^{(0)} \\ \Delta P_2^{(0)} \\ \Delta Q_2^{(0)} \\ \Delta P_3^{(0)} \\ \Delta Q_3^{(0)} \\ \Delta P_4^{(0)} \\ \Delta U_1^{2(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.60000 \\ -0.55000 \\ -2.00000 \\ 5.69803 \\ -3.70000 \\ 2.04901 \\ 5.00000 \\ 0.00000 \end{bmatrix}$$

本例的雅可比矩阵为

$$\begin{bmatrix} H_{11} & N_{11} & H_{12} & N_{12} & H_{13} & N_{13} & & & \\ J_{11} & L_{11} & J_{12} & L_{12} & J_{13} & L_{13} & & & \\ H_{21} & N_{21} & H_{22} & N_{22} & H_{23} & N_{23} & H_{24} & N_{24} & \\ J_{21} & L_{21} & J_{22} & L_{22} & J_{23} & L_{23} & J_{24} & L_{24} & \\ H_{31} & N_{31} & H_{32} & N_{32} & H_{33} & N_{33} & & & \\ J_{31} & L_{31} & J_{32} & L_{32} & J_{33} & L_{33} & & & \\ & & H_{42} & N_{42} & & & H_{44} & N_{44} & \\ & & R_{42} & S_{42} & & & R_{44} & S_{44} & \end{bmatrix}$$

其中各元素的算式为

$$H_{11} = \frac{\partial \Delta P_1}{\partial f_1} = -[(G_{11}f_1 + B_{11}e_1) + (G_{12}f_2 + B_{12}e_2) + (G_{13}f_3 + B_{13}e_3)] + B_{11}e_1 - G_{11}f_1$$

$$N_{11} = \frac{\partial \Delta P_1}{\partial e_1} = -[(G_{11}e_1 - B_{11}f_1) + (G_{12}e_2 - B_{12}f_2) + (G_{13}e_3 - B_{13}f_3)] + G_{11}e_1 - B_{11}f_1$$

$$\begin{aligned}
 & + (G_{13}e_3 - B_{13}f_3)] - G_{11}e_1 - B_{11}f_1 \\
 J_{11} = \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial f_1} = & - [(G_{11}e_1 - B_{11}f_1) + (G_{12}e_2 - B_{12}f_2) \\
 & + (G_{13}e_3 - B_{13}f_3)] + G_{11}e_1 + B_{11}f_1 \\
 L_{11} = \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial e_1} = & - [(G_{11}f_1 + B_{11}e_1) + (G_{12}f_2 + B_{12}e_2) + (G_{13}f_3 + B_{13}e_3)] \\
 & + B_{11}e_1 - G_{11}f_1 \\
 H_{12} = \frac{\partial \Delta P_1}{\partial f_2} = & B_{12}e_1 - G_{12}f_1 \\
 N_{12} = \frac{\partial \Delta P_1}{\partial e_2} = & -G_{12}e_1 - B_{12}f_1 \\
 J_{12} = \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial f_2} = & -N_{12} \\
 L_{12} = \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial e_2} = & H_{12} \\
 & \vdots \\
 H_{44} = \frac{\partial \Delta P_4}{\partial f_4} = & -[(G_{42}f_2 + B_{42}e_2) + (G_{44}f_4 + B_{44}e_4)] \\
 & - B_{44}e_4 - G_{44}f_4 \\
 N_{44} = \frac{\partial \Delta P_4}{\partial e_4} = & -[(G_{42}e_2 - B_{42}f_2) + (G_{44}e_4 - B_{44}f_4)] \\
 & - G_{44}e_4 - B_{44}f_4 \\
 R_{44} = \frac{\partial U_4^2}{\partial f_4} = & -2f_4 \\
 S_{44} = \frac{\partial U_4^2}{\partial e_4} = & -2e_4
 \end{aligned}$$

将各节点电压初值代入以上各式,求得首次迭代的雅可比矩阵如下:

$$J^{(0)} = \begin{bmatrix} -6.54166 & -1.37874 & 3.90015 & 0.62402 & 2.64150 & 0.75471 & & & \\ 1.27847 & -6.04166 & -0.62402 & 3.90015 & -0.75471 & 2.64150 & & & \\ 3.90015 & 0.62402 & -73.6783 & -1.45392 & 3.11203 & 0.829876 & 3.49206 & 0.00000 & \\ -0.62402 & 3.90015 & 1.45390 & -60.2828 & -0.82987 & 3.11203 & 0.00000 & 63.49206 & \\ 2.64150 & -0.75471 & 3.11203 & 0.82987 & -39.0869 & -1.58459 & & & \\ -0.75471 & 2.64150 & -0.82987 & 3.11203 & 1.58459 & -32.3688 & & & \\ & & 66.66666 & 0.00000 & & & -63.4921 & 0.00000 & \\ & & 0.00000 & 0.00000 & & & 0.0000 & -2.10000 & \end{bmatrix}$$

上式中各行的最大元素都在对角元素位置上,这种情况不是偶然的。矩阵中各行的对角元素是 $H_{ii} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial f_i}$ 或 $L_{ii} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial e_i}$ 对于高压电力系统来说,某节点 i 的有功功率主要和节点电压横分量(虚部)有关,即 f_i 的影响最大,所以 H_{ii} 大于 H_{ij} 、 N_{ii} 及 N_{ij} 。节点 i 的无功功率主要和电压的纵分量(实部)有关,即 e_i 的影

响最大,所以 L_{ii} 大于 L_{ij} 、 J_{ii} 及 J_{ij} 。

应用高斯消去法对修正方程 $\mathbf{J}^{(0)} \cdot \Delta \mathbf{U}^{(0)} = \Delta \mathbf{P}^{(0)}$ 进行求解,可得第一次迭代的节点电压修正 $\Delta \mathbf{U}^{(0)}$ 。

$$\Delta \mathbf{U}^{(0)} = \begin{bmatrix} \Delta f_1^{(0)} \\ \Delta e_1^{(0)} \\ \Delta f_2^{(0)} \\ \Delta e_2^{(0)} \\ \Delta f_3^{(0)} \\ \Delta e_3^{(0)} \\ \Delta f_4^{(0)} \\ \Delta e_4^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.03348 \\ 0.03357 \\ -0.36070 \\ -0.10538 \\ 0.06900 \\ -0.05881 \\ -0.45749 \\ 0.00000 \end{bmatrix}$$

按 $\mathbf{U}^{(1)} = \mathbf{U}^{(0)} - \Delta \mathbf{U}^{(0)}$ 修正各节点电压,即得到第一次迭代后各节点的电压:

$$\mathbf{U}^{(1)} = \begin{bmatrix} f_1^{(0)} \\ e_1^{(0)} \\ f_2^{(0)} \\ e_2^{(0)} \\ f_3^{(0)} \\ e_3^{(0)} \\ f_4^{(0)} \\ e_4^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.03348 \\ 0.96643 \\ 0.36070 \\ 1.10538 \\ -0.06900 \\ 1.05881 \\ 0.45749 \\ 1.05000 \end{bmatrix}$$

按以上步骤反复进行迭代,当收敛指标取 $\epsilon = 10^{-6}$ 时,需要进行五次迭代。迭代过程中各节点电压及功率误差的变化情况如表 3.2 和 3.3 所示。

表 3.2 迭代过程中各节点电压的变化情况

迭代次数	e_1	f_1	e_2	f_2	e_3	f_3	e_4	f_4
1	0.96643	-0.03348	1.10538	0.36070	1.05881	-0.06900	1.05000	0.45749
2	0.87115	-0.06989	1.03041	0.32997	1.03514	-0.07698	0.97868	0.39243
3	0.85937	-0.07178	1.02604	0.33046	1.03354	-0.07737	0.97463	0.39066
4	0.85915	-0.07182	1.02601	0.33047	1.03352	-0.07738	0.97462	0.39067
5	0.85915	-0.07182	1.02601	0.33047	1.03352	-0.07738	0.97462	0.39067

表 3.3 迭代过程中各节点功率误差的变化情况

迭代次数	ΔQ_1	ΔP_1	ΔQ_2	ΔP_2	ΔQ_3	ΔP_3	ΔP_4
1	-0.55000	-1.60000	5.69803	-2.00000	2.04901	-3.70000	5.00000
2	-0.07204	-0.03473	0.91801	2.77526	-0.37145	0.04904	-3.06101
3	-0.02656	-0.00676	0.06541	0.16660	-0.00948	0.00328	-0.17049
4	-0.00064	-0.00020	0.00002	0.00069	-0.00002	0.00000	-0.00062
5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

迭代结果各节点电压大小和相位角 $U_i \angle \delta_i = e_i + j f_i$ 列于下表:

节点号	1	2	3	4	5
U_i	0.86215	1.07792	1.03641	1.05000	1.05000
δ_i (度)	-4.77859	17.85341	-4.28195	21.84320	0.00000

各支路功率计算略。

(2)P-Q 分解法

用 P-Q 分解法计算潮流时,除了已求得的节点导纳矩阵外,还要求出系数矩阵 B' 和 B'' 。

形成 B' 时可不计线路的充电电容和变压器 π 型等值电路的对地导纳支路。本例 B' 为四阶,不包括平衡节点 5,各元素计算如下:

$$\begin{aligned}
 B'_{11} &= \text{Im} \left(\frac{1}{0.04 + j0.25} + \frac{1}{0.1 + j0.35} \right) \\
 &= -6.541665 \\
 B'_{12} &= B'_{21} = -\text{Im} \left(\frac{1}{0.04 + j0.25} \right) = 3.900156 \\
 &\vdots \\
 B'_{22} &= \text{Im} \left(\frac{1}{0.04 + j0.25} + \frac{1}{0.08 + j0.3} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{j0.015 \times k} \right) = -70.504253 \\
 B'_{23} &= B'_{32} = -\text{Im} \left(\frac{1}{0.08 + j0.3} \right) = 3.112033 \\
 &\vdots \\
 B'_{44} &= \text{Im} \left(\frac{1}{j0.015 \times 1.05} \right) = -63.492064
 \end{aligned}$$

最后可得:

$$B' = \begin{bmatrix} -6.541665 & 3.900156 & 2.641509 & 0.000000 \\ 3.900156 & -70.504253 & 3.112033 & 3.492064 \\ 2.641509 & 3.112033 & -37.499574 & 0.000000 \\ 0.000000 & 63.492064 & 0.000000 & -63.492064 \end{bmatrix}$$

B'' 是由节点导纳矩阵的虚部构成,本例为三阶方阵,不包括PV节点4和平衡节点5。

$$B'' = \begin{bmatrix} -6.291665 & 3.900156 & 2.641509 \\ 3.900156 & -66.980820 & 3.112033 \\ 2.641509 & 3.112033 & -35.737860 \end{bmatrix}$$

功率误差的计算式为:

$$\begin{aligned} \Delta P_1 &= P_{1s} - U_1[U_1G_{11} + U_2(G_{12}\cos\delta_{12} + B_{12}\sin\delta_{12}) \\ &\quad + U_3(G_{13}\cos\delta_{13} + B_{13}\sin\delta_{13})] \\ \Delta Q_1 &= Q_{1s} - U_1[-U_1B_{11} + U_2(G_{12}\sin\delta_{12} - B_{12}\cos\delta_{12}) \\ &\quad + U_3(G_{13}\sin\delta_{13} - B_{13}\cos\delta_{13})] \\ &\quad \vdots \\ \Delta P_4 &= P_{4s} - U_4[U_2(G_{24}\cos\delta_{42} + B_{24}\sin\delta_{42}) + U_4G_{44}] \end{aligned}$$

将电压初值: $U_1^{(0)} = U_2^{(0)} = U_3^{(0)} = 1.0, U_4^{(0)} = U_5^{(0)} = 1.05, \delta_1^{(0)} = \delta_2^{(0)} = \delta_3^{(0)} = \delta_4^{(0)} = \delta_5^{(0)} = 0$ 代入,可以求得各节点有功功率误差:

$$\Delta P^{(0)} = \begin{bmatrix} \Delta P_1^{(0)} \\ \Delta P_2^{(0)} \\ \Delta P_3^{(0)} \\ \Delta P_4^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.60000 \\ -2.00000 \\ -3.70000 \\ 5.00000 \end{bmatrix}$$

除以相应的节点电压,得到 P - δ 修正方程的常数项:

$$(U^{-1}\Delta P)^{(0)} = \begin{bmatrix} -1.60000 \\ -2.00000 \\ -3.70000 \\ 4.76190 \end{bmatrix}$$

解修正方程 $(U^{-1}\Delta P)^{(0)} = B' (U^{(0)}\Delta\delta^{(0)})$, 得到 $U^{(0)}\Delta\delta^{(0)}$, 再将各元素除以相应的 $U_i^{(0)}$ 可得

$$\Delta\delta^{(0)} = \begin{bmatrix} 0.09453 \\ -0.30583 \\ 0.07995 \\ -0.36270 \end{bmatrix}$$

对各 δ 进行修正,得到第一次迭代后的各节点电压相位角:

$$\delta^{(1)} = \delta^{(0)} - \Delta\delta^{(0)} = \begin{bmatrix} -0.09453 \\ 0.30583 \\ -0.07995 \\ 0.36297 \end{bmatrix}$$

接着进行 Q-U 迭代。根据 $U^{(0)}$ 、 $\delta^{(1)}$ 求出各节点无功功率误差:

$$\Delta Q^{(0)} = \begin{bmatrix} -1.11293 \\ 5.60861 \\ 1.41229 \end{bmatrix}$$

由于 $U_1^{(0)} = U_2^{(0)} = U_3^{(0)} = 1.0$, 所以修正方程常数项 $(U^{-1}\Delta U)^{(0)} = \Delta Q^{(0)}$ 。

解修正方程 $(U^{-1}\Delta Q)^{(0)} = B^v \Delta U^{(0)}$, 得到电压修正量:

$$\Delta U^{(0)} = \begin{bmatrix} 0.11192 \\ -0.07899 \\ -0.03812 \end{bmatrix}$$

修正后的节点电压

$$U^{(1)} = U^{(0)} - \Delta U^{(0)} = \begin{bmatrix} 0.88808 \\ 1.07899 \\ 1.03812 \end{bmatrix}$$

这样就完成了第一次迭代计算。

按照以上步骤继续迭代下去, 当收敛指标取 $\epsilon = 10^{-5}$ 时, 迭代 10 次收敛。迭代过程中各节点电压的变化情况列于表 3.4, 最大功率误差和电压误差(修正量)的变化情况见表 3.5。

表 3.4 迭代过程中各节点电压的变化情况

迭代次数	δ_1	U_1	δ_2	U_2	δ_3	U_3	δ_4
1	-0.09453	0.88808	0.30583	1.07899	-0.07995	1.03812	0.36270
2	-0.07516	0.86960	0.31460	1.07839	-0.07334	1.03692	0.38473
3	-0.08463	0.86351	0.31004	1.07803	-0.07478	1.03664	0.37951
4	-0.08287	0.86271	0.31149	1.07796	-0.07465	1.03647	0.38116
5	-0.08346	0.86228	0.31145	1.07793	-0.07473	1.03643	0.38108
6	-0.08337	0.86220	0.31158	1.07792	-0.07473	1.03642	0.38122
7	-0.08340	0.86216	0.31159	1.07792	-0.07473	1.03641	0.38122
8	-0.08340	0.86216	0.31160	1.07792	-0.07473	1.03641	0.38123
9	-0.08340	0.86215	0.31160	1.07792	-0.07473	1.03641	0.38123
10	-0.08340	0.86215	0.31160	1.07792	-0.07473	1.03641	0.38124

注:表中相位角为弧度。

表 3.5 最大功率误差和电压误差的变化情况

迭代次数	ΔP_{\max}	ΔQ_{\max}	$\Delta \delta_{\max}$	ΔU_{\max}
1	5.00000	5.60861	0.36270	0.11192
2	0.96076	0.09836	0.02203	0.01848
3	0.04129	0.03148	0.00947	0.00609
4	0.01141	0.00380	0.00176	0.00080
5	0.00496	0.00214	0.00059	0.00043
6	0.00050	0.00037	0.00013	0.00008
7	0.00044	0.00018	0.00004	0.00004
8	0.00006	0.00004	0.00001	0.00001
9	0.00004	0.00002	0.000003	0.000003
10	0.000008	0.000004	0.000000	0.000001

若收敛指标取为 $\epsilon = 10^{-6}$, 则需迭代 12 次。

3.6 直流法潮流计算与开断处理

3.6.1 直流法潮流计算

在电力系统规划和运行计算中,往往需要对很多运行方式进行潮流计算。例如,在电力系统规划和电力系统静态安全分析时,需要进行一种所谓 $N-1$ 校核计算,即对于某一种运行方式要逐一开断系统中的线路或变压器,检查是否存在支路过载情况。用牛顿—拉夫逊法虽然也可以解决这类问题,但如前几节所述,对应于每一种开断,牛顿—拉夫逊法必须求解新的修正方程。所以,对于大的电力系统来说,用牛顿—拉夫逊法进行诸如 $N-1$ 校核计算将要花费大量的计算时间,这是不切实际的。对于电力系统规划来说,由于系统数据的不完整性和不确定性,用牛顿—拉夫逊法计算往往不能收敛。直流法潮流计算具有简单、计算工作量小、没有收敛性问题和易于快速地处理投入或开断线路操作等优点。在需要计算大量潮流运行方式的场合,直流法与 P-Q 分解法都是应用得很广泛的方法。以下简单介绍直流法潮流计算方法及其对追加或开断支路的处理。

电力网中每条支路 $i-j$ 中通过的有功功率为

$$P_{ij} = \operatorname{Re}[\dot{U}_i \dot{I}_{ij}^*] = \operatorname{Re}[\dot{U}_i \dot{Y}_{ij}^* (\dot{U}_i - \dot{U}_j)] \quad (3.109)$$

如果节点电压用极坐标形式表示时,上式可改写成

$$P_{ij} = U_i^2 g_{ii} - U_i U_j [g_{ij} \cos \delta_{ij} + b_{ij} \sin \delta_{ij}] \quad (3.110)$$

考虑到实际电力系统中输电线路(或变压器)的电阻远小于其电抗,对地电导也可忽略不计;在正常运行时线路两端相位差很少超过 20° ;节点电压值的偏移很少超过 10% ,且对有功功率分布影响不大,因而可以作如下假设:

1. $g_{ij} \approx 0, b_{ij} \approx -1/x_{ij}$, x_{ij} 为节点 i 与节点 j 间支路的电抗;
2. $\sin \delta_{ij} \approx \delta_i - \delta_j$, $\cos \delta_{ij} \approx 1$;
3. $U_i \approx U_j \approx 1$;
4. 不考虑变压器和接地支路对有功分布的影响。

将以上假设代入式(3.110)可得

$$P_{ij} = -b_{ij}(\delta_i - \delta_j) = (\delta_i - \delta_j)/x_{ij} \quad (3.111)$$

各节点的注入功率为与该节点相连各支路功率之和,同时将支路电纳的负值($-b_{ij}$)改写为电纳矩阵 B 中的相应元素 B_{ij} ,可得节点 i 注入功率的表示式

$$P_i = \sum_{j \in i} B_{ij}(\delta_i - \delta_j) = - \left(- \sum_{j \in i} B_{ij} \delta_i + \sum_{j \in i} B_{ij} \delta_j \right)$$

式中, $j \in i$ 表示所有与节点 i 直接相连的节点, $j \neq i$ 。由于忽略了对地支路,由节点导纳矩阵的定义可知:

$$- \sum_{j \in i} B_{ij} = B_{ii}$$

因而,上式可写成

$$P_i = - \left(B_{ii} \delta_i + \sum_{j \in i} B_{ij} \delta_j \right) = \sum_{j=1}^n (-B_{ij} \delta_j) \quad (3.112)$$

令 B_0 表示正常运行时电力网节点电纳矩阵的负数,则所有节点注入功率可用矩阵表示为

$$P = B_0 \delta \quad (3.113)$$

式中, P 为节点注入有功功率向量; δ 为节点电压相角向量。

可以用矩阵求逆法、高斯消去法或因子表等方法求解式(3.113),得出在给定注入功率条件下的节点相角向量 $\delta = B_0^{-1}P$,并可用式(3.111) 求出各支路的有功潮流。

如果将式(3.113)中的节点注入功率当成直流电路的注入电流,节点电压相角当作直流电路的电压,节点电纳矩阵 B_0 当作直流电路的节点电导矩阵,则式(3.113)式与直流电路中电压和电流的关系具有相同的形式,不同的只是在直流电路中电流从电压高处向电压低处流动,而在交流电网中,有功功率从电压相角大的节点向电压相角小的节点流动。这种与直流电路计算的相似性,使人们对这种方法冠以直流法的称呼。

直流法潮流计算需要求解的式(3.113)是线性方程组,如果采用直接法

求解不存在收敛性问题,因而它具有速度快、不存在收敛性问题等优点,广泛地使用在电力系统规划、静态安全分析以及牛顿—拉夫逊法潮流的初值计算等需要大量计算或运行条件不十分理想的场合。然而,直流法对节点功率方程进行了简化,或者说对潮流计算的模型作了简化,因而它是一种近似的算法。

3.6.2 直流法潮流计算的开断处理

当系统内两节点间投入或开断一条线路时,系统的节点注入功率不变,只是系统的节点导纳矩阵中与该线路有关的元素有所改变。在式(3.111)中应用经过修改的节点导纳矩阵可以求得系统投入或开断一条支路后的节点电压相角。虽然式(3.111)是一个线性代数方程,可以直接求解,但对于大量开断操作的计算,比如 $N-1$ 校核,仍然显得工作量太大。人们希望找到不必重复求解式(3.111)的快速算法。下面介绍一种实用的,利用节点电纳矩阵的变化量直接求出节点电压相角的近似算法。

假设系统内节点 k 和节点 m 之间要校验断开 $k-m$ 支路时有功功率潮流的变化。这时, B_0 中 B_{km} 和 B_{mk} 两个非对角线元素,以及 B_{kk} 和 B_{mm} 两个对角线元素发生变化,新的 B 矩阵为

$$B_1 = B_0 + b_{km} M^T M \quad (3.114)$$

式中, b_{km} 为断开支路的串联电抗倒数的负值,即 $-1/x_{km}$; M 为第 k 个元素为 1,第 m 个元素为 -1 ,其余元素均为零时的行向量。

根据矩阵的反演公式可得

$$B_1^{-1} = B_0^{-1} - c W M B_0^{-1} \quad (3.115)$$

式中, $c = (1/b_{km} + MW)^{-1}$ 是一个标量,而 $W = B_0^{-1} M^T$ 表示在原始网络母线 k 和 m 间注入单位有功功率所得到的母线电压相位角的向量。所以可以利用原始网络的 B_0^{-1} 矩阵直接求出 c 和 W 。

这样,就可在断开线路后不重新形成 B 矩阵而算出各母线电压相位角为

$$\delta' = B_1^{-1} P = \delta_0 - c W M \delta_0 \quad (3.116)$$

式中, δ_0 是未断开 $k-m$ 支路时,原始的母线电压相位角的向量; $M \delta_0$ 是一个标量。

定义 A 为 $-c M \delta_0$,是节点 k 和 m 间接入的并联电抗 $-x_{km}$ (相当于使 $k-m$ 支路断开) 中的功率,其方向如图

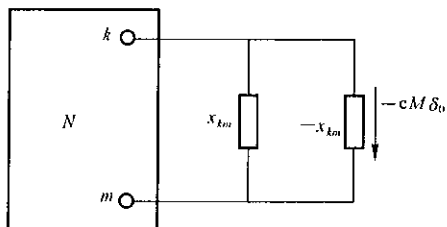


图 3.23 断开支路等值图

3.23 所示。所以,当断开支路 $k-m$ 后,系统中各母线电压相位角的变化为

$$\Delta\delta_i = AW_i \quad (3.117)$$

式中, W_i 为向量 W 中第 i 个元素。

因此,断开支路 $k-m$ 后,支路 $i-j$ 中的有功功率为

$$P_{ij} = \frac{\delta_i' - \delta_j'}{x_{ij}} = \frac{\delta_{i0} - \delta_{j0}}{x_{ij}} + \frac{(W_i - W_j)A}{x_{ij}} \quad (3.118)$$

这样,就可根据上式来校核支路有功功率是否超过规定的极限。

对于断开发电机的情况,只需将式(3.113)中 P 改为 $P + \Delta P$,就可求出相应的母线电压相位角的变化,并利用式(3.118)来校核通过各支路的有功功率潮流。

利用上述方法时只需进行一次基本运行方式的潮流计算,对于大量的开断操作只需用基本运行方式的节点电纳矩阵和节点电压相角,加上开断操作引起的支路电纳改变量进行修正,无疑大大减少了计算工作量。

【例 3.4】 在图 3.22 所示的电力系统接线图中,如忽略线路(变压器)的电阻和电容,并假设变压器的变比为 1,只考虑各节点负荷的有功功率。给定支路 4~5 的极限负荷为 2(标么值),试用直流法计算支路 2.3 断开后,支路 2.1 的过载情况。

【解】 由给定的数据,根据式(3.113)可求出正常时各节点的相位角。

$$\begin{bmatrix} 6.857 & -\frac{1}{0.25} & -\frac{1}{0.35} & 0 \\ -\frac{1}{0.25} & 74 & -\frac{1}{0.3} & -\frac{1}{0.015} \\ -\frac{1}{0.35} & -\frac{1}{0.3} & 39.523 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{0.015} & 0 & \frac{1}{0.015} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.6 \\ -2 \\ -3.7 \\ 5 \end{bmatrix}$$

由上式解得

$$\delta_0 = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.061(-3.508^\circ) \\ 0.344(19.729^\circ) \\ -0.069(-3.953^\circ) \\ 0.419(24.026^\circ) \end{bmatrix}$$

所以正常通过支路 2.1 的有功功率为

$$P_{21} = \frac{\delta_2 - \delta_1}{x_{12}} = \frac{0.344 + 0.061}{0.25} = 1.622$$

当断开支路 2.3 后

$$M = [0 \quad 1 \quad -1 \quad 0]$$

$$W = B_0^{-1} M^T = \begin{bmatrix} 0.117 \\ 0.200 \\ 0.000 \\ 0.200 \end{bmatrix}$$

$$c = (-0.3 + MW)^{-1} = -10$$

根据式(3.116),可得

$$\begin{aligned} \delta' &= \delta_0 - cWM\delta_0 = \begin{bmatrix} -0.061 \\ 0.344 \\ -0.069 \\ 0.419 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.482 \\ 0.827 \\ 0.000 \\ 0.827 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0.421(24.121^\circ) \\ 1.171(67.093^\circ) \\ -0.069(-3.953^\circ) \\ 1.246(71.390^\circ) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

因此,通过支路 2.1 的有功功率为

$$P'_{21} = \frac{1.171 - 0.421}{0.25} = 3$$

支路 2.1 的极限负荷为 2,所以在断开支路 2.3 后,支路 2.1 的负荷超过其极限值。

3.7 电力系统有功功率分配与频率控制

3.7.1 电力系统有功功率平衡与频率变化

电力系统运行的基本任务是将电能电压、频率合格的前提下安全、可靠、经济地分配给各用电设备。为完成这项任务,最基本的一点就是要做到有功功率平衡,即电力系统内所有电源输出的有功功率必须与系统内所有的用电设备消耗的有功功率加上输配电网中所有元件损耗的有功功率相等。互联成网的交流电力系统在稳态运行方式下具有同一频率,当系统中出现有功功率不平衡时,如有功功率电源不足或负荷增大时,将会引起系统频率下降;反

之,将造成系统频率过高。每一个电力系统都有一个额定频率(例如,我国电力系统额定频率为 50Hz),系统运行频率与系统额定频率之差称为频率偏移。频率偏移是衡量电能质量的一项重要指标。由于电力负荷的不确定性与多变性,运行中要保证频率偏移为零往往是不切实际的,通常都规定一个允许的频率偏移范围,例如我国规定为 $50 \pm 0.2\text{Hz}$ 。为了保证频率偏移在规定范围之内,必须不断调节有功电源输出,使电力系统保持有功功率平衡。

3.7.2 有功功率电源

发电机是目前电力系统惟一的有功功率电源,发电机安装在发电厂内。在本书第 1 章中已经讲到,根据发电厂所用一次能源的不同,可以将发电厂分为火力发电厂、水力发电厂、核能发电厂等,不同的发电厂由于其经济、技术特性的不同,在电力系统运行中担负不同的任务。

火力发电厂是电力系统有功功率电源的一个重要组成部分,在世界上大部分国家,包括我国在内,火力发电厂装机容量占其总装机容量的一半以上,因而它在电力系统中有举足轻重的地位。火力发电厂还可进一步分类。按其燃料,可分为燃油火力发电厂、燃气(天然气)火力发电厂、燃煤火力发电厂;按其蒸汽参数,可分为低温低压(蒸汽温度 450°C , 压力 35 大气压),中温中压($500 \sim 520^\circ\text{C}$, 100 大气压),高温高压(550°C , 180 大气压),以及超临界机组(575°C , 200 以上大气压)。一般说来,蒸汽温度高、压力大的发电机其单机容量大,效率也较高;而蒸汽温度低、压力小的发电机单机容量较小,效率较低。为了发出同样的电量,高温高压机组比低温低压机组需要较少的煤(或油),或者说其煤耗较小。

热力发电厂是既发电又供热的火力发电厂。如图 3.24 所示,它利用从汽轮机中间级抽取的具有一定温度和压力的蒸汽,通过热力网向附近工业区和居民住宅供热。这样可以减少大批效率低下的小锅炉,节省大量一次能源。

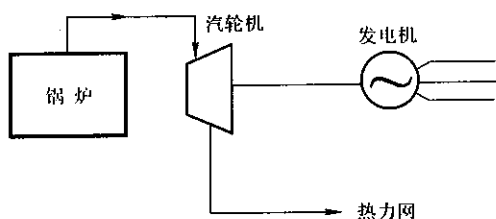


图 3.24 热力发电厂示意图

热力发电厂与火力发电厂的最大区别在于热力发电厂为了保证供热,必须从锅炉向汽轮机输送一定数量的蒸汽,或者说发电机必须至少发出与供热量相应的一定数量的有功功率,热力发电厂的这种保证供热而必须发出的有功功率称之为热力发电厂的强迫出力。

水力发电厂是电力系统中又一种重要的有功功率电源。我国是一个水力资源十分丰富的国家,如何加速开发、充分利用水力资源对我国的四化建设具有很重要的意义。水力发电厂的运行是与水力资源的使用密切相关的。根据水力资源的不同,水力发电厂可分为多年调节库容水力发电厂、日调节库容水力发电厂、径流式水力发电厂、抽水蓄能水力发电厂等。有可调节库容的水力发电厂可以在丰水期蓄水,平时按电力系统调度规定的有功功率曲线经济、灵活地发电。径流式水力发电厂只能按实际来水流量的大小发电。与径流式水力发电厂相比,虽然有可调节库容的水力发电厂可以按需要决定在什么时间发出多少数量的有功功率,但实际上它的运行方式还取决于很多其他因素,如航运、灌溉等社会要求;在洪水期必须充分发电,以避免弃水;在整个水量调节期间内,必须按照负荷变化、发电机组检修安排等因素,合理安排水电厂出力。

抽水蓄能水力发电厂主要用于调节系统有功功率的峰谷差,一般由上下二级水库构成。在系统高峰负荷期间,抽水蓄能水力发电厂由上级水库向下级水库放水,向系统发出有功功率;在系统低谷负荷运行期间,则将下级水库的水抽到上级水库,向系统汲取有功功率。抽水蓄能水力发电厂的调峰作用如图

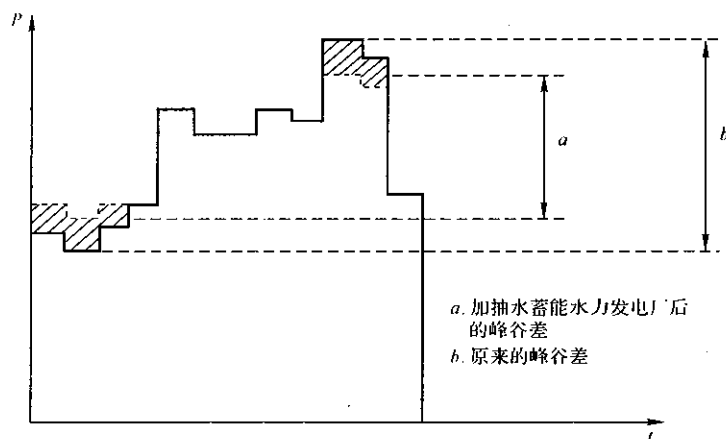


图 3.25 抽水蓄能水力发电厂的调峰作用

3.25 所示,图中实线所示为没有抽水蓄能水力发电厂时系统的负荷曲线,虚线为有抽水蓄能水力发电厂时的负荷曲线。可见,抽水蓄能水力发电厂减小了系统负荷的峰谷差。如不考虑抽水 and 发电过程中的功率损耗,减小的负荷峰谷差为抽水蓄能水力发电厂容量的两倍。因此,在核能发电厂、高参数大容量火力发电机组日益增多,调峰容量日显不足的电力系统中,抽水蓄能水力发电厂的建设与运行具有很重要的意义。

核能发电厂利用原子能裂变反应所释放的能量进行发电。虽然核能发电厂的一次投资较大,但一当建成投产,其运行费用要较火电厂低得多,因而在电力系统的日常运行中应尽可能利用它的容量,并且由于经济、技术上的原因,改变核能发电厂的有功功率出力需要消耗额外的能量和时间,因而核能发电厂在运行中应尽量担负系统的基本负荷,减少功率的变化。

电力系统中发电厂所装的容量,不应仅仅满足最大负荷、网络损耗以及发电厂厂用电的需要,还必须考虑一定数量的备用容量。电力系统中的有功功率备用有以下几种:

负荷备用 是为满足电力系统中短期负荷波动和计划外增加的负荷而设置的备用,负荷备用容量的大小与系统负荷的大小有关,一般为最大负荷的 $3\% \sim 5\%$,大系统用较小数值,小系统采用较大数值。

事故备用 是在电力系统中发电设备发生偶然故障时,为保证向用户正常供电而设置的备用。事故备用容量一般与系统容量、系统内各类发电厂的比例、发电机台数、单机容量以及故障发生概率有关,一般为系统最大负荷的 $5\% \sim 10\%$,事故备用容量同时还必须大于系统中最大的单机容量。

检修备用 是为系统内发电设备定期检修而设置的。它与系统中的发电机台数、年负荷曲线、检修周期、检修时间的长短有关,与前面两种备用不同,检修备用是事先安排的。通常发电设备检修安排在系统低谷负荷期进行,因而一般可以不单独设检修备用。

国民经济备用 考虑到国民经济超计划增长而设置的备用。这部分备用与国民经济增长有关,其值大约为最大负荷的 $3\% \sim 5\%$ 。

以上4种备用中,负荷备用与事故备用是在一旦需要时能立刻投入的备用。一般的发电机组从静止到带上额定负荷,需要少则几分钟(水电厂),多则几小时(火电厂),如再考虑火电厂的锅炉点火升温,则需要更多的时间。显然,负荷备用与事故备用不能全是这种“静止”的冷备用,还必须具有“旋转”着的备用,即一旦需要时就能立即带上负荷的备用,这种备用称之为热备用或旋转备用。热备用一般隐含在系统运行着的机组之中,为系统中运行着的发电机的最大可发功率与实际所发功率之差。热备用容量不能过大,因为过大的热备用容量将使大量的发电机低于额定功率运行,偏离其最佳运行点,造成效率低下。一般热备用容量应大于负荷备用,并包括事故备用的一部分。冷备用是设备完好而未运转的发电设备的最大可能出力,这些机组可以随时起动投入运行。检修中的发电设备不属冷备用。冷备用可作为检修备用、国民经济备用以及部分事故备用。

各部分备用的关系见表3.6。

表 3.6

负荷备用 3% ~ 5%	事故备用 5% ~ 10%	检修备用	国民经济备用 3% ~ 5%
热备用		冷备用	

3.7.3 有功功率负荷的变动

电力系统中负荷的变动用负荷曲线表示,这在第 1 章中已介绍过。典型的日负荷曲线如图 3.26 所示。它是调度运行的重要依据,调度部门根据负荷曲线将发电任务分配给各个发电厂。日负荷曲线的最低点以下部分称为基荷,基荷与最大负荷之间的部分称为峰荷。基荷在 24 小时中是不变的,而峰荷是经常变化的。根据经济运行的目的,按各类发电厂的特点,可以将基荷和峰荷分别分配给各类发电厂。如图 3.27 所示,基荷由具有强迫功率、不可调功率或高效率的热力发电厂、火力发电厂、核能发电厂或径流式水力发电厂负担,而峰荷则由有调节水库的水力发电厂、燃气轮机发电厂、中温中压火力发电厂等负担。

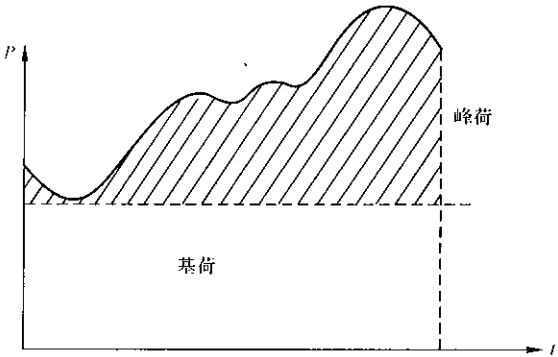


图 3.26 日负荷曲线中基荷和峰荷

实际系统的日负荷曲线并不如图 3.26 那么平滑,而是像图 3.28 所示那样,无时无刻都在变化。它大致可分解成 3 种不同功率变化幅值和周期的曲线,或者说电力系统负荷是由三种成分合成的,如图 3.29 所示。第一种成分 P_1 幅值最小,周期最短,主要是由于中小型用电设备的投入切除引起,带有很大的随机性。第二种成分 P_2 幅度较大,周期较长,属于这一部分的负荷主要是周期性短时间需要大量有功功率的用电设备,例如轧钢机等。第三种负荷 P_3 是日负荷曲线的基本部分,它由工厂的作息制度、人们的生活规律和气象条件的变化等所决定。第一、二种成分负荷是无法预计的,要通过装设在原动机上的

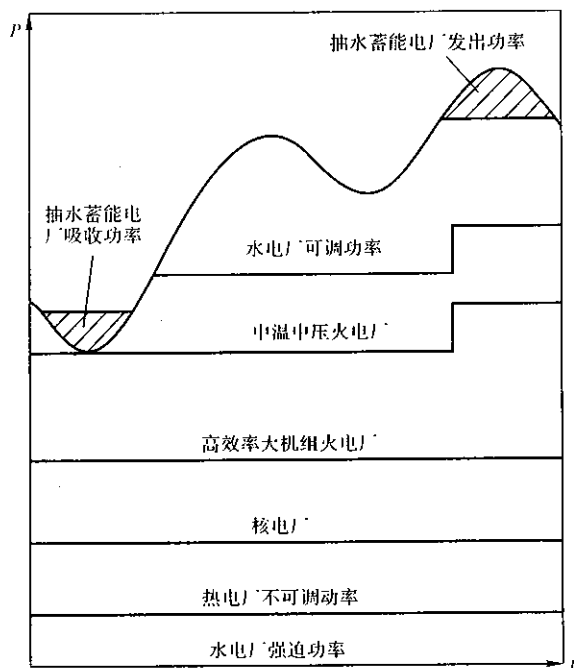


图 3.27 日负荷曲线上各发电厂分担的负荷

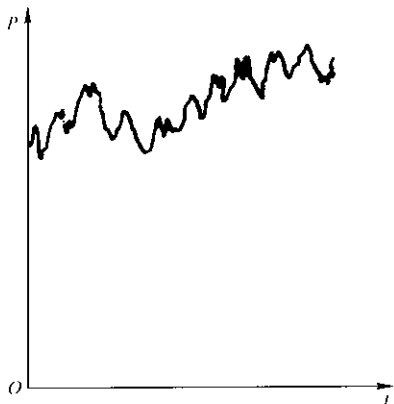


图 3.28 实际的日负荷曲线

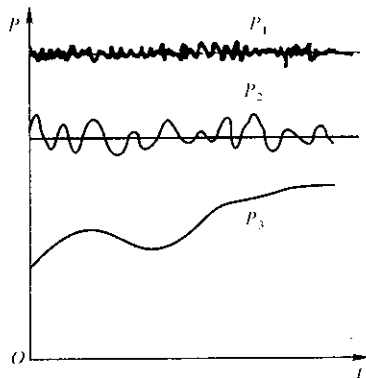


图 3.29 日负荷曲线的三种典型成分

调速器对发电机输出的有功功率的调节来平衡。第三种负荷成分一般可通过研究过去的负荷资料和负荷的变化趋势加以预测,因而可通过事先计算,按最优分配的原则,作出各发电厂的日发电曲线,各发电厂则按此曲线调节发电出力。

3.7.4 电力系统频率控制

频率是电力系统运行的一个重要质量指标。所有用电气传动的旋转设备,其最高效率都是在电力系统频率为额定频率时,因此,任何频率偏移,都会造成效率的降低;其次,频率的过高或过低,还会给运行中的电气设备带来各种不同的危害。

1. 对用户的影响

现代工业的许多产品质量与电力系统频率有关。例如纺织工业、造纸工业等。这些工业使用的大多数电动机为异步电动机,频率的降低会造成异步电动机转速下降,使异步电动机所传动的生产设备生产出次品,乃至废品。一般工业由电动机传动的生产设备也会因频率下降而使生产率降低。电力系统频率波动过大时,会使某些电子设备(如雷达)、电力电子设备等工作不正常。

2. 对发电厂的影响

频率变化时,对发电厂本身的影响比对用户的影响更大,其影响有:

汽轮机叶片谐振 当频率降低到某一程度时,汽轮机低压级的后段或低压级的前段叶片会产生谐振,振动疲劳的积累会导致叶片出现裂纹,甚至损坏或碎裂,酿成事故停机的严重后果。此外,降低频率运行会加速汽轮机工作叶片和其他零件的磨损。

辅机功能下降 火力发电厂、核能发电厂的一些主要厂用机械,例如,给水泵、循环水泵、引风机、送风机等的出力与转速的一次或高次方成正比,当频率下降时,会降低这些辅机的出力,严重影响发电厂的运行。例如,即使频率下降得不多,给水泵的出力也会大大降低,从而破坏发电厂的正常工作,甚至完全停止向锅炉供水;频率下降,会导致压水反应堆核能发电厂的一次冷却泵功能下降,影响反应堆的冷却功能,带来不良影响。

3. 对系统运行的影响

互联电力系统解列 频率下降时,为了保证正常运行,互联的大电网有可能断开系统之间的联络线。

发电机解列 频率下降到一定程度时,为保证发电厂设备的安全,发电厂有可能与系统解列。

综上所述,频率的变化对用户、发电厂、系统运行都会造成不良影响,所以电力系统运行的重要任务之一就是电力系统频率的控制。

电力系统中所有并列运行的发电机组都装有调速器,当系统负荷变化时,有可调容量的机组的调速器均将反应系统频率的变化,按各自的静态调节特

性,及时调节各发电机的出力(通过调节原动机动力元素——蒸汽或水等的输入量),改变机组出力,使有功功率重新达到平衡,以保持频率的偏移在一定的范围之内,这就是频率的一次调整。

但是,由于调速器的有差调节特性,使系统的频率随负荷的增大而减小,所以在负荷变化很大的情况下,单靠调速器往往不能使频率的偏移保持在允许的范围之内,因此必须进行频率的二次调整,才能使频率实现无差调节。频率的二次调整是通过发电机组调速器的转速整定元件来实现的。由人工手动操作同步器对频率的二次调整叫手动调频,而通过自动调频装置控制同步器对频率的二次调整叫自动调频。与手动调频相比,自动调频不仅反应速度快,频率波动小,而且还可以同时顾及到其他方面的要求,例如实现有功负荷的经济分配、保持系统联络线交换功率为定值和满足系统安全经济运行各种约束条件等。所以现代电力系统普遍设有自动调频装置。

频率的二次调整只有部分发电厂(或机组,下同)承担。从是否承担频率的二次调整任务出发,可将系统中所有发电厂分为调频厂和非调频厂两类。调频厂负责全系统的频率调整任务,应具有足够大的调频容量和可调范围,其允许的出力调整速度应满足系统负荷变化速度的要求;非调频厂在系统正常运行情况下只按调度中心预先安排的负荷曲线(日发电计划)运行,而不参加频率的二次调整。

水轮发电机组的出力调整范围大,允许出力变化速度快,一般从空载至满载可在一分钟内实现,出力变化对运行经济性影响不大,且容易实现操作自动化。汽轮发电机组则由于受最小技术出力的限制(其中锅炉约为 25% ~ 70% 额定容量,汽轮机约为 10% ~ 15% 额定容量),所以其出力调整范围小,出力变化速度受汽轮机各部分热膨胀的限制,在 50% ~ 100% 额定容量范围内,出力允许上升速度每分钟仅 2% ~ 5%,而且出力变化对运行经济性影响较大,实现操作自动化也较复杂。所以,在水火电厂并存的电力系统中,一般宜选水电厂担任调频任务。在洪水季节,为了充分利用水力资源,避免弃水,水电厂宜带稳定负荷满发,由效率居中的中温中压凝汽式火电厂担任调频,以提高系统运行的经济性。在枯水季节,可由水电厂和中温中压的火电厂作为调频厂。

在日益扩大的电力系统中,在不同地域装有各种不同类型(水力、火力、核能)和不同容量及经济特性的机组,所以在考虑有功功率调节时,要注意到机组间的合理组合和负荷的合理分配,以达到系统运行的经济性。在实现分区控制的电力系统中,还应进行区域间联络线的功率控制。

有关电力系统频率控制的详细内容将在《电力系统自动控制》课程中讨论。

3.8 电力系统无功功率和电压

3.8.1 概 述

在电力系统的正常运行中,任何电压的偏移都会带来经济、安全方面的不利影响。这是因为:

(1) 所有的用电设备都是按运行在额定电压时效率为最高设计的,偏离额定电压必然导致效率下降,经济性变差。

(2) 电压过高会大大缩短白炽灯一类照明灯的寿命,也会对设备的绝缘产生不利影响。

(3) 电压过低会大大增加恒定转矩的异步电动机的转差,由此引起工业产品出现次品、废品;转差增大的结果使异步电动机电流增加,由此引起发热,甚至损坏。

虽然电力系统中的各节点电压要求能保持在额定值,但是在实际运行中是不可能实现的,其主要原因有两点:

第一,在正常稳态运行方式下,一个互相连接的电力系统具有同一频率。但是,电压与频率不同,因为电力系统中每一元件都有可能产生电压降落,所以电力系统中各点电压不相同,不可能同时将所有节点保持在额定电压。例如,一条线路上接有几个负荷,如图 3.30 所示,设线路各段均有电压降落,则节点 1,2,3,4 的电压都不相同。如将节点 4 维持在额定电压 U_N ,则节点 1 的电压太高;反之,如将节点 1 的电压维持在额定值,则节点 4 的电压又太低。

第二,负荷时时刻刻都在变化,负荷的变化必然导致电力系统中每一元件电压降落的变化,因而即使是在同一点上,也很难保证电压始终维持在额定电压。

鉴于以上原因,同时考虑到用电设备对电压的要求,电力系统一般规定一个电压偏移的最大允许范围,例如 $\pm 5\%$ 以内。为了实现这个要求,需要对电压进行调整。

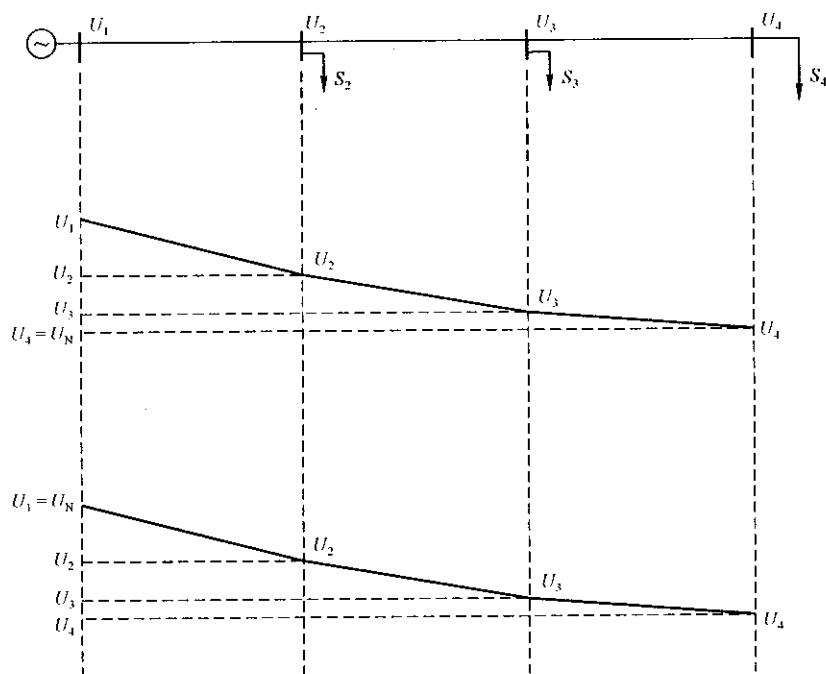


图 3.30 沿线路各点电压的变化

3.8.2 无功功率和电压的关系

电力系统中的电压水平与无功功率密切相关。这可从两方面加以说明。

1. 节点电压有效值的大小对无功功率分布起决定作用

以图 3.1 所示简单输电线为例加以说明。在不考虑输电线的对地电容时，从节点 i 输送到节点 j 的功率为 $P + jQ$ ，节点 i 和节点 j 的电压分别为 U_i 和 U_j ，节点 i, j 之间的支路阻抗为 $R + jX$ 。节点电压间的关系为

$$\dot{U}_i = U_j + \frac{PR + QX}{U_j} + j \frac{PX - QR}{U_j} = U_j + \Delta U + j\delta U$$

在超高压电力系统中，线路电抗远大于线路电阻，因而上式可写成

$$\dot{U}_i \approx U_j + \frac{QX}{U_j} + j \frac{PX}{U_j} \quad (3.119)$$

电压 \dot{U}_i 还可写成

$$\dot{U}_i = U_j \cos \delta + j U_j \sin \delta \quad (3.120)$$

式中, δ 为线路两端电压的相位角差。比较式(3.119)和式(3.120),可以得到

$$P = \frac{U_i U_j}{X} \sin \delta \tag{3.121}$$

$$Q = \frac{U_i \cos \delta - U_j}{X} U_j \tag{3.122}$$

正常运行时输电线路两端电压的相位角差 δ 比较小,可以认为 $\cos \delta \approx 1$, 这样线路中传输的无功功率大小就与线路两端电压有效值之差成正比,无功功率将从节点电压高的一端流向节点电压低的一侧,节点电压有效值的变化,也将使流经线路的无功功率随之发生变化。因此电力网中节点电压的变化会引起无功功率潮流的变化。式(3.122)还表明,如果远处电源经输电线路向负荷提供无功功率,会使沿线路各点的电压下降,甚至不能满足质量要求,同时使线路和变压器的有功和无功损耗也都增加。所以,负荷所需的无功功率应尽可能由附近的电源供给。

2. 无功功率对电压水平有决定性影响

电力系统中各种用电设备吸收的无功功率,大多数与所加电压有关,如表3.7所示。系统综合负荷的无功功率—电压特性如第1章图1.2(a)所示,在额定电压附近,无功功率随电压上升而增加,随电压下降而减小。当系统出现无功功率缺额,亦即无功电源不能提供足够的无功功率时,系统所接的各负荷的电压将下降,减少其向系统吸取的无功功率,才能获得无功功率平衡。

表 3.7 负荷的电压特性

负 荷	无功功率
电灯 / 电热	U^0
变压器	漏磁部分 U^2 励磁部分 $U^{6\sim 8}$
电容器	U^2
异步电动机	$U^{1.6\sim 1.8}$
同步电动机	$U^{-0.7\sim 1.3}$
综合负荷	$U^{2\sim 4}$

根据以上讨论可以看出,电压控制与无功功率的分布和平衡是分不开的。

3.8.3 无功功率平衡

1. 无功功率电源

发电机是最基本的无功功率电源。按照发电机的设计,它不仅可以发出有功功率,而且还可发出无功功率。可以通过调节发电机的励磁电流来改变发电机发出的无功功率,增加励磁电流,就可以增加无功功率输出;反之,就减少无功功率输出。发电机在额定工作状态(额定电压 U_N , 额定有功功率 P_N , 额定功率因数 $\cos\varphi_N$) 时发出的无功功率为额定无功功率 $Q_N = P_N \tan\varphi_N$ 。当发电机输出的有功功率和功率因数角发生变化时,发电机输出的无功功率可通过发电机的允许运行范围图(第2章图2.27)求取。从该图可以看出,只有当发电机运行在额定状态时,发电机才能获得最大视在功率,其容量才能获得最充分的利用。当发电机降低有功功率运行时,其输出的无功功率可以较额定运行状态的无功功率大,但视在功率则较额定视在功率小。

除了发电机外,电力系统中主要的无功功率电源还有并联电容器、同步调相机和静止补偿器等无功功率补偿设备,它们的原理、特性及适用范围在第2章中已作了讨论,这里不再重复。

2. 无功负荷与电力网无功损耗

(1) 负荷的无功功率 大多数用电设备都要消耗无功功率。白炽灯和一些电热设备不消耗无功功率,同步电机可以消耗也可以发出无功功率,而用电设备中的异步电动机消耗的无功功率最大。未经补偿的综合负荷的自然功率因数一般为 $0.6 \sim 0.9$, 低值对应于异步电动机比例较高的负荷。

负荷的无功功率随时间的变化而变化,在一天之中也有高峰和低谷。负荷无功功率的峰值并不一定与有功功率的峰值同时出现,它一般出现在工业负荷最大的时刻,而有功功率峰值一般出现在工业负荷与民用(照明)负荷最大时刻;前者可能在白天,后者往往在傍晚。

(2) 电力线路上的无功功率损耗 电力线路上的无功功率损耗包括串联电抗和并联电纳中的无功功率损耗。串联电抗始终消耗无功功率,与通过线路电流的平方成正比,当通过电流为零时,串联电抗不消耗无功功率;并联电纳消耗容性无功功率,或者说发出感性无功功率(或称充电功率),其大小与所加的电压平方成正比,与通过电流无直接关系。当线路两端电压一定时,电力线路消耗的无功功率与输送电流的关系如图3.2所示。从图中可见,当电力线路轻载运行时,线路充电功率大于串联电抗上消耗的无功功率,整条线路呈容性;当重负载运行时,线路呈感性。因而,电力线路究竟是消耗感性无功功率还

是容性无功功率与通过线路的功率大小有关。35kV 及以下电压等级的架空线路充电功率很小,可以略去不计,所以总是消耗感性无功功率。

(3) 变压器中的无功功率损耗 变压器的无功功率损耗也由两部分组成:励磁支路和绕组漏抗中的无功功率损耗。励磁支路的无功功率损耗与变压器所加电压有关;绕组漏抗中的无功功率损耗与通过变压器的功率成比例。当对变压器施加额定电压,通过视在功率 S 时,消耗的无功功率为

$$\Delta Q_T = \left[\frac{I_0\%}{100} + \frac{U_k\%}{100} \left(\frac{S}{S_N} \right)^2 \right] S_N \quad (3.123)$$

式中, S_N 为变压器的额定容量。变压器的空载电流百分值 $I_0\%$ 约为 $0.5 \sim 2$, 短路电压百分值 $U_k\%$ 约为 $6 \sim 15$, 因此变压器的无功功率消耗相当大。

3. 无功功率平衡

运行中电力系统的无功功率必须平衡,亦即电力系统发出的无功功率必须等于负荷无功功率与变压器、电力线路消耗的无功功率之和。电力系统中无功功率的损耗相当大,一般约占系统负荷的 50%。这些损耗的很大部分是由于功率传输过程中在变压器和电力线路中造成的,因此减少无功功率的传输,实现无功功率的就地平衡是减少无功和有功功率损耗的一个重要方法。在进行无功功率平衡计算时,不仅要确定无功功率电源的容量,还需要对无功功率的传输加以规划,尽量做到无功功率的就地平衡和补偿,长距离传输无功功率肯定是不经济的。

无功功率电源的容量中还含有一定的备用,一般备用容量取最大无功负荷的 $7\% \sim 8\%$ 。

3.9 电力系统电压控制

3.9.1 中枢点电压管理

电力系统中有许多发电厂、变电所和大型用户节点,要全部监视、控制这些节点的电压是不可能的,也是不必要的。通常在这些节点中选择一些具有代表性的节点加以监视、控制,如果这些节点的电压满足要求,则该节点邻近的其他节点的电压基本上也能满足要求,这些节点称为电压监视中枢点。电压中枢点一般选择在区域性发电厂的高压母线、有大量地方性负荷的发电厂母线以及枢纽变电所的二次母线。

利用电压中枢点进行电压控制,其实际内容为根据电压中枢点周围节点对电压偏移的要求,确定中枢点电压允许变化的上下限。例如,有一简单电网如图 3.31(a) 所示, C 点是电压中枢点, A 、 B 为负荷点, 它们的简化负荷曲线分别如图 3.31(b)、(c) 所示。 C 点向负荷点 A 、 B 送电, 在线路 CA 、 CB 上产生的电压损耗变化曲线见图 3.31(d)、(e)。

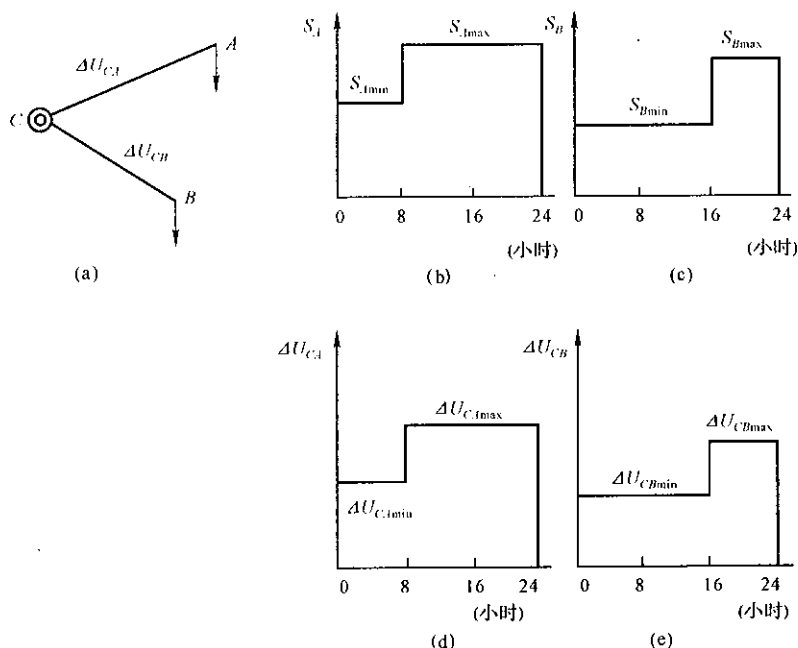


图 3.31 电压中枢点及其相邻节点间的电压损耗

设 A 、 B 两点电压允许的上、下限为 \bar{U} 、 \underline{U} , 可以求得满足 A 点电压要求时, C 点电压应保持的变化范围[见图 3.32(a)]。

$$\text{在 } 0 \sim 8 \text{ 小时} \quad \bar{U}_C = \bar{U} + \Delta U_{CAmin}$$

$$\underline{U}_C = \underline{U} + \Delta U_{CAmin}$$

$$8 \sim 24 \text{ 小时} \quad \bar{U}'_C = \bar{U} + \Delta U_{CAmax}$$

$$\underline{U}'_C = \underline{U} + \Delta U_{CAmax}$$

同样也可以求得满足 B 点电压要求时 C 点电压应保持的范围[见图 3.32(b)]。今将图 3.32(a)、(b) 的电压变化范围曲线画在一起, 如图 3.33 所示。图中两条虚线表示满足 A 点电压要求时, C 点电压应保持的范围; 两条实线则表示为满足 B 点电压要求时 C 点电压应保持的范围。这两个电压范围相互重合的阴影部分是同时能满足 A 、 B 两点电压要求时 C 点电压应保持的范围。所以, 当 C

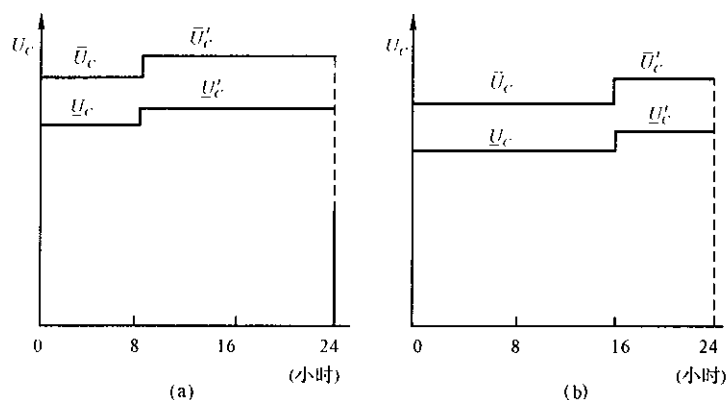


图 3.32 电压变化范围曲线

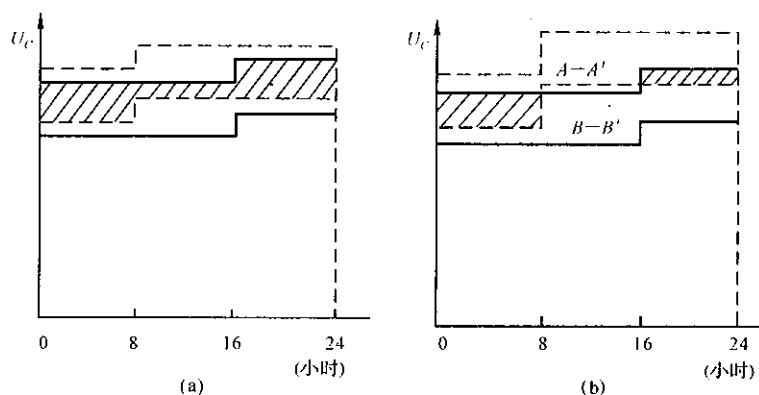


图 3.33 电压中枢点的调压范围

点电压落在阴影范围(见图 3.33(a))内时就能同时满足 A、B 两点的电压要求。如果 CA、CB 两条线路的电压损耗相差很大,在某些时间两个电压范围相互没有重合部分时,即不出现阴影部分,如图 3.33(b) 所示。图中在 8 ~ 16 小时之间,面积 A—A' (表示为满足 A 点电压应保持的范围) 与面积 B—B' (表示为满足 B 点电压 C 点电压应保持的范围) 没有共同部分。此时,如 C 点电压落在 A—A' 之中,亦即满足 A 点电压要求,则 B 点电压过高;如 C 点电压落在 B—B' 之中,则 A 点电压太低。因此,对于两条电压损耗相差太大的线路,采用控制中枢点电压的方法很可能无法同时满足两条线路末端用户电压的要求,还必须同时采用其他调压措施。

对于一个电压中枢点控制多个负荷点电压的情况,可以从这些负荷点中选择一个电压最低的和一個电压最高的点,亦即只要中枢点电压能满足这两

点的电压要求,其他负荷点的电压要求一般也就能满足。

对于实际的电力系统,必须选择一批有代表性的发电厂和变电所的母线作为控制电压的中枢点,然后根据各负荷的日负荷曲线和对电压质量的要求,进行一系列潮流计算及电压控制方式等分析研究,才能最后确定这些中枢点的允许电压偏移上下限曲线。

在进行电力系统规划设计时,由于各负荷对电压质量的要求还不明确,所以难于具体确定各中枢点电压控制的范围。为此规定了“逆调压”、“顺调压”和“恒调压”等几种中枢点电压控制的要求,每一中枢点可根据具体情况选择一种作为设计的依据。

逆调压方式 要求高峰负荷时将中枢点电压调节到 $1.05U_N$,低谷负荷时降低到 U_N ,这种方式适用于由该中枢点供电的线路较长、负荷变化范围较大等场合。

顺调压方式 要求高峰负荷时中枢点电压不低于 $1.025U_N$,低谷负荷时不高于 $1.075U_N$ 。这种方式适用于用户对电压要求不高或线路较短、负荷变动不大的场合。

恒调压(又称常调压)方式 要求在任何负荷时中枢点电压基本保持不变且略大于 U_N ,例如 $1.025U_N$ 或 $1.02 \sim 1.05U_N$ 间的某一值。

在电力系统发生故障后的非正常运行方式(例如两台并联运行的变压器切除一台,多回线路切除一回,环形电网开环等)时,对电压质量的要求可以适当放宽,一般允许电压偏移较正常时大5%。

3.9.2 应用发电机调节电压

应用发电机调压是不需另外增加投资的调压手段。发电机端电压由励磁调节器控制,改变调节器的电压整定值即可改变端电压。发电机的电压与发电机的无功功率输出密切相关。当增加发电机的端电压时,同时也增加了发电机的无功功率输出;反之,降低发电机的端电压,也就减小发电机的无功功率输出。因此,发电机端电压的调节受发电机无功功率极限的限制,当发电机输出的无功功率达到其上限或下限时,发电机就不能继续进行调压。发电机的无功功率极限与发电机的有功功率出力有关,这在前面的发电机允许运行范围图中已有叙述。当发电机的有功功率出力减少时,可相应增加无功功率极限值,因此在发电机的有功出力较小时,无功功率调节的范围会更大些,调压的能力会更强些。发电机端电压的允许调节范围为 $0.95U_N \sim 1.05U_N$,如果端电压低于 $0.95U_N$,输出的最大视在功率要相应减小(小于 S_N)。

由发电机直接供电的小系统,有可能只依靠发电机调压满足各用户的电压要求。对于大系统,尤其是线路很长且有多级电压的电力网,单靠发电机调压就无法满足系统中各点的电压要求,必须与其他调压方法相配合。

3.9.3 改变变压器变比调压

通过切换变压器的分接头来改变变比,可以调节变压器低压侧或高压侧的电压。

变压器一般可分为两种:一种是普通变压器,这种变压器的分接头开关无消弧能力,只能在停电时切换,所以必须事先选择一个合适的分接头。另一种是有载调压变压器,能够带负载调节分接头,可以随时根据需要调节变压器分接头以满足调压要求。下面重点讨论普通变压器如何根据系统运行状况和调压要求选择分接头。

以图 3.34(a) 所示降压变压器为例,其等值电路图示于图 3.34(b) 中,变压器阻抗归算至高压侧, U_1 为高压侧电压, U_2' 为归算到高压侧的低压侧电压, U_{2R} 为低压侧要求达到的电压,通过变压器的功率为 $P + jQ$ 。根据图 3.34(b) 可以写出 U_2 与 U_1 的关系:

$$U_2 = \frac{U_2'}{k} = \frac{U_1 - \Delta U}{k}$$

(3.124)

上式中 ΔU 为变压器阻抗的电压损耗,可近似地写成 $\Delta U = (PR + QX)/U_1$; k 是变压器变比, $k = U_{n1}/U_{n2}$, 其中 U_{n1} 为高压侧分接头电压, U_{n2} 为变压器低压侧额定电压。

如果低压侧要求达到的电压值 $U_2 = U_{2R}$, 则可将 $k = U_{n1}/U_{n2}$ 代入式 (3.124), 求得变压器的分接头电压:

$$U_{n1} = \frac{U_1 - \Delta U}{U_{2R}} \times U_{n2} \quad (3.125)$$

由式 (3.125) 确定的变压器分接头只能满足一种运行方式下的电压要求。随着电力系统负荷的变化,所选择的分接头往往不能满足各种运行方式下

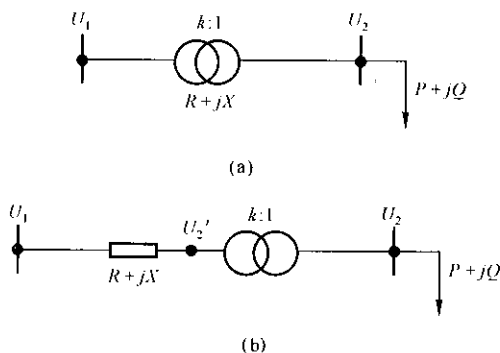


图 3.34 变压器及其等值电路图

的电压要求。解决这个问题的方法是,分别根据最高和最低两种情况的 U'_2 确定变压器的分接头,然后取平均值。 U'_2 最高、最低的情况一般发生在最小、最大负荷期间,因此可用式(3.125),分别求出最小、最大负荷期间变压器的分接头电压:

$$U_{t1\max} = \frac{U_{1\max} - \Delta U_{1\max}}{U_{2R\max}} \times U_{t2} = \frac{U'_{2\max}}{U_{2R\max}} \times U_{t2} \quad (3.126)$$

$$U_{t1\min} = \frac{U_{1\min} - \Delta U_{1\min}}{U_{2R\min}} \times U_{t2} = \frac{U'_{2\min}}{U_{2R\min}} \times U_{t2} \quad (3.127)$$

上式中下标max和min分别表示最大负荷时和最小负荷时的参数。然后,求取平均值

$$U_{t1} = \frac{U_{t1\max} + U_{t1\min}}{2} \quad (3.128)$$

按(3.128)式求得的 U_{t1} 可能不是变压器的某一实际分接头电压值,这时可选择一個最接近计算值的分接头。这样确定的分接头已兼顾了最大负荷和最小负荷(或最低和最高电压)两种情况,因此对于介于两者之间的其他情况一般也就能满足。

由于分接头不是按照式(3.126)和(3.127)所示的 $U_{t1\max}$ 和 $U_{t1\min}$ 选定的,所以在最大负荷及最小负荷期间,变压器的低压侧电压可能达不到所要求的电压值。因此,必须对这样选定的分接头进行检验。

设选择的分接头为 U_{t1} ,则低压侧实际电压

$$U_{2\max} = \frac{U'_{2\max}}{k_{t1}} \quad (3.129)$$

$$U_{2\min} = \frac{U'_{2\min}}{k_{t1}} \quad (3.130)$$

如果 $U_{2\max}$ 、 $U_{2\min}$ 均落在要求值 $U_{2R\max} \sim U_{2R\min}$ 范围内,即认为满足调压要求。

由式(3.129)和(3.130)可得

$$\frac{U_{2\min} - U_{2\max}}{U_{2N}} = \frac{U'_{2\min} - U'_{2\max}}{k_{t1} U_{2N}} \approx \frac{U'_{2\min} - U'_{2\max}}{U_{1N}} \quad (3.131)$$

式中, U_{1N} 、 U_{2N} 分别为变压器高、低压侧额定电压。上式表明,不管选择哪一个分接头,最小负荷与最大负荷时低压侧电压差的相对值基本上不变。所以当

$$\frac{U'_{2\min} - U'_{2\max}}{U_{1N}} > \frac{U_{2R\min} - U_{2R\max}}{U_{2N}}$$

时,无论选择哪一个分接头都无法满足调压要求,这时需要与其他调压措施相配合,或改用有载调压变压器。

归纳一下,变压器分接头的选择有以下几步:

(1) 根据最大负荷和最小负荷时的一次侧电压 $U_{l\max}$ 和 $U_{l\min}$, 以及通过变压器的负荷 $P_{\max} + jQ_{\max}$ 和 $P_{\min} + jQ_{\min}$, 求取变压器的电压损耗 ΔU_{\max} 和 ΔU_{\min} ;

(2) 由式(3.126)和(3.127)求取最大负荷和最小负荷时的变压器分接头电压值,并取其平均值;

(3) 选择一个最接近平均分接头电压值的变压器分接头;

(4) 用选定的分接头验算低压侧电压在最大和最小负荷期间是否满足要求。

升压变压器的分接头选择与降压变压器没有本质差别,只是潮流方向不同,而且一般按照高压侧的电压要求选择分接头。

三绕组变压器的分接头设在高、中压两侧,低压侧不设分接头。确定三绕组变压器的分接头,与变压器中负荷流向有关。例如,当负荷从变压器的高压侧流向中压和低压侧时,首先求出最大和最小负荷时中、低压侧的电压(归算到高压侧)。然后把变压器的高压与低压绕组看成是一个两绕组变压器,按两绕组变压器的分接头选择方法进行选择,由变压器低压侧的调压要求确定高压侧分接头。确定了高压侧的分接头以后,高压绕组与中压绕组又可看成一个两绕组变压器,根据中压侧的调压要求选择中压侧的分接头。

有载调压变压器能够在电力网电压变化和负荷变化时,不停电地改变分接头位置满足调压要求,调节速度也较快,改变一档分接头约需 $2 \sim 5\text{s}$,而且便于实现自动化,是一种有效的调压措施。但它的价格较高,运行维护较复杂,所以应首先用在确有必要的地方。例如两个电力网间的联络变压器,如果负荷方向是变化的或负荷变动范围很大,就需要采用有载调压变压器。同时,还可利用有载调压改变电网间无功功率的分布。对于枢纽变电所,一般需要使用有载调压变压器,作为控制中枢点电压的手段。此外,负荷变化大或调压要求高的变电所,用普通变压器不能满足调压要求时,也可应用有载调压变压器。选择有载调压变压器时,要根据调压要求和负荷变化情况,确定所需的分接头调节范围和每档分接头的调节量。

最后需要指出,只有当系统无功功率电源容量充足时,用改变变压器变比调压才能奏效。现用图 3.35 说明这一问题。设由于发电机 G 无功容量不足,以致各母线电压水平偏低,发电机输出的无功功率 Q_G 已达到最大允许值 $Q_{G\max}$ 。现改变变压器 $T-3$ 的变比,企图提高母线 6 的电压 U_6 。考虑到负荷的 $Q-U$ 静态特性,当 U_6 提高时,负荷 Q_6 也将增加,这会使发电机输出的 $Q_G > Q_{G\max}$ 。为了保证发电机安全运行,只得降低发电机励磁电流,使 Q_G 减小到允许值,即 Q_G

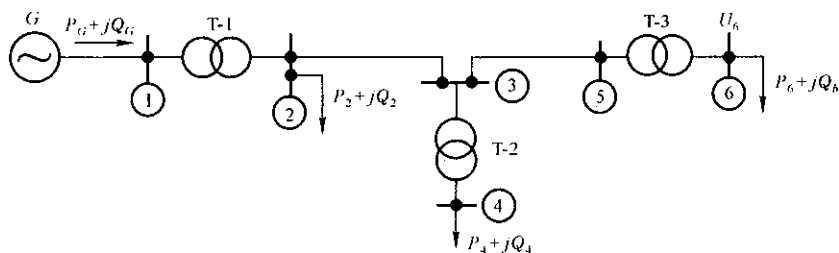
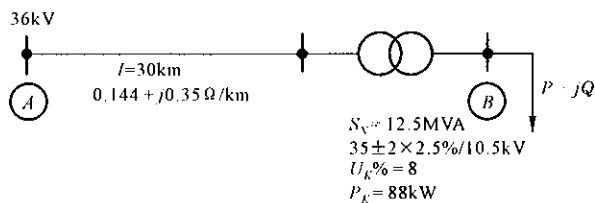


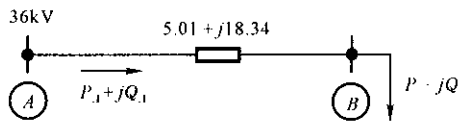
图 3.35 简单的电力系统图

$= Q_{G\max}$ 。显然,这会导致母线 1 ~ 5 的电压降低,而母线 6 的电压也不能升到预期值。以上表明改变 $T-3$ 的变比,不但 U_6 升高有限,还会导致其他母线的电压进一步下降。因此,当系统无功功率不足时,首先应装设无功功率补偿设备,使系统无功功率容量有一定的裕度。

【例 3.5】 某变电所由 35kV 线路供电,详见图 3.36。变电所负荷集中在变压器 10kV 母线上。最大负荷 $8 + j5\text{MVA}$,最小负荷 $4 + j3\text{MVA}$,线路送端母线 A 的电压在最大负荷与最小负荷时均为 36kV,要求变电所 10kV 母线上的电压在最小负荷与最大负荷时电压偏差不超过 $\pm 5\%$,试选择变压器分接头。变压器的变比为 $35 \pm 2 \times 2.5\%/10.5\text{kV}$ 。



(a)



(b)

图 3.36 例 3.5 的结线图

【解】 按给定条件可求得归算至高压侧的变压器阻抗

$$R_T + jX_T = 0.69 + j7.84(\Omega)$$

线路阻抗

$$R_1 + jX_1 = 4.32 + j10.5(\Omega)$$

将变压器阻抗与线路阻抗合并计算的等值电路图如图 3.36(b) 所示。

最大负荷时电压计算

始端功率:

$$\begin{aligned}(P_A + jQ_A)_{\max} &= 8 + j5 + \frac{8^2 + 5^2}{35^2}(5.01 + j18.34) \\ &= 8.36 + j6.33(\text{MVA})\end{aligned}$$

B 点电压:

$$U'_{B\max} = 36 - \frac{8.36 \times 5.01 + 6.33 \times 18.34}{36} = 31.6(\text{kV})$$

分接头:

$$U_{\max} = \frac{U'_{B\max}}{U_{BR\max}} \times U_{2N} = \frac{31.6}{0.95 \times 10} \times 10.5 = 34.9(\text{kV})$$

最小负荷时电压计算

始端功率:

$$\begin{aligned}(P_A + jQ_A)_{\min} &= 4 + j3 + \frac{4^2 + 3^2}{35^2}(5.01 + j18.34) \\ &= 4.1 + j3.37(\text{MVA})\end{aligned}$$

B 点电压:

$$U'_{B\min} = 36 - \frac{4.1 \times 5.01 + 3.37 \times 18.34}{36} = 33.7(\text{kV})$$

分接头:

$$U_{\min} = \frac{33.7}{1.05 \times 10} \times 10.5 = 33.7(\text{kV})$$

计算分接头:

$$U_t = \frac{U_{\max} + U_{\min}}{2} = \frac{34.9 + 33.7}{2} = 34.3(\text{kV})$$

选择变压器最接近的分接头

$$\left(\frac{34.3}{35} - 1\right) \times 100\% = -2\%, \text{ 所以选 } -2.5\% \text{ 分接头, 即}$$

$$U_t = (1 - 0.025) \times 35 = 0.975 \times 35 = 34.125(\text{kV})$$

验算: 最大负荷时

$$U_{B\max} = 31.6 \times \frac{10.5}{34.125} = 9.72(\text{kV})$$

$$\text{电压偏移} = \frac{9.72 - 10}{10} \times 100\% = -2.8\%$$

最小负荷时

$$U_{B\min} = 33.7 \times \frac{10.5}{34.125} = 10.37(\text{kV})$$

$$\text{电压偏移} = \frac{10.375 - 10}{10} \times 100\% = +3.7\%$$

可见,最大负荷时B点电压偏移不超过-5%,最小负荷时B点电压偏移小于+5%,因此所选择变压器分接头满足调压要求。

如果变电所10kV母线的调压要求改为:最大负荷时电压偏移+5%,最小负荷时电压为额定值(10kV),变压器改用有载调压变压器,试确定变压器分接头的调节范围。

最大负荷时 $U_{B\max} = 31.6\text{kV}$,要求10kV母线电压为 $1.05 \times 10\text{kV}$,所需分接头电压:

$$U_{\max} = \frac{31.6}{10.5 \times 10} \times 10.5 = 31.6(\text{kV})$$

分接头位置为:

$$\left(\frac{31.6}{35} - 1 \right) \times 100\% = -9.7\%$$

最小负荷时 $U_{B\min} = 33.7\text{kV}$,要求10kV母线电压为10kV,所需分接头电压:

$$U_{\min} = \frac{33.7}{10} \times 10.5 = 35.4(\text{kV})$$

分接头位置:

$$\left(\frac{35.4}{35} - 1 \right) \times 100\% = 1.2\%$$

选择 $35 + (2 \sim -4) \times 2.5\%/10.5\text{kV}$ 或 $35 + (3 \sim -5) \times 2\%/10.5(\text{kV})$ 有载调压变压器都可满足调压要求。

3.9.4 应用无功功率补偿装置调节电压

在电力网适当的地点接入并联无功功率补偿装置,能够减小线路和变压器输送的无功功率,因而可减小线路和变压器的电压损耗和提高电力网的电压水平,同时还能减小电力网的功率损耗,提高经济效益。当系统负荷变化时,通过调节无功功率补偿装置输出的无功功率,就能控制电力网的电压。

常用的无功功率补偿设备有并联电容器、同步调相机和静止补偿器等。并联电容器是最经济和方便的补偿设备,使用最广泛。它分散安装在各用户处和一些降压变压所的10kV或35kV母线上,使高低压电力网(包括配电网)的电

压损耗和功率损耗都得到减小,在高峰负荷时能提高全网的电压水平;在负荷较低时,可以切除部分并联电容器,防止电压水平过高。同步调相机和静止补偿器输出的无功功率可以连续控制,当系统电压过高时还可吸收无功功率,具有优良的控制电压能力,通常装设在枢纽变电所中。

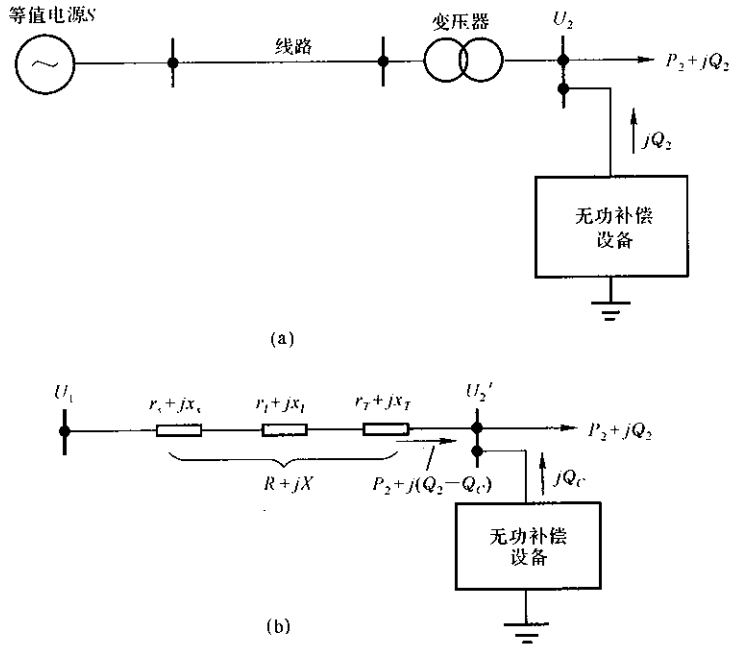


图 3.37 并联补偿原理

现以图 3.37 所示的简单电力网为例,讨论调节电压的原理。图 3.37(a) 为电力网结线图,无功功率补偿设备装在变压器 T 的低压母线上,它输出的无功功率用 Q_c 表示, $Q_c > 0$ 表示输出无功功率(感性), $Q_c < 0$ 为吸收无功功率。图 3.37(b) 为等值电路,等值电源用恒定电压 U_1 和等值内阻抗 $r_s + jx_s$ 表示, $R + jX$ 为电源、线路和变压器阻抗之和,各阻抗均归算到高压侧。设 k 为变压器 T 的变比, U_2 为变压器低压母线电压, $U'_2 = kU_2$ 为归算到高压侧的 U_2 值。

未加并联补偿时

$$U_1 \approx U'_2 + \frac{PR + QX}{U'_2} = U'_2 + \Delta U \quad (3.132)$$

式中, ΔU 为电力网的电压损耗。

加上并联补偿后,如要求变压器低压母线电压为 U_{2R} , 则有

$$U_1 \approx kU_{2R} + \frac{PR + (Q - Q_c)X}{kU_{2R}} = kU_{2R} + \Delta U_c \quad (3.133)$$

式中, ΔU_C 为有补偿时电力网的电压损耗。当 $Q_C > 0$ 时, 显然 $\Delta U_C < \Delta U$ 。

由式(3.133)可见, $kU_{2R} = U_1 - \Delta U_C$, 所以当负荷 $P + jQ$ 变化时, 可以用改变 Q_C 的值使变压器低压母线电压 U_2 等于要求的值 U_{2R} 。并联电容器可分为几组, 用改变投入的组数来调节 Q_C 。由于不能连续改变 Q_C , 所以只能做到 $U_2 \approx U_{2R}$ 。同步调相机和静止补偿器能连续改变 Q_C , 可以精确实现 $U_2 = U_{2R}$; 它们还能自动控制电压(有电压调节器时), 在任何负荷时都能保持 $U_2 = U_{2R}$ 。当负荷具有冲击特性时(见图 3.38), 静止补偿器能快速改变 Q_C , 使 U_2 的波动减小到允许的水平。同步调相机控制速度较慢, 用于抑制冲击负荷引起的电压波动效果较差。

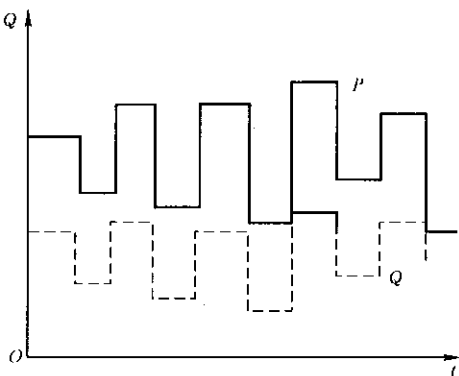


图 3.38 冲击负荷变化特性

何负荷时都能保持 $U_2 = U_{2R}$ 。当负荷具有冲击特性时(见图 3.38), 静止补偿器能快速改变 Q_C , 使 U_2 的波动减小到允许的水平。同步调相机控制速度较慢, 用于抑制冲击负荷引起的电压波动效果较差。

由于 U_1 保持不变, 所以由式(3.132)、(3.133)可解得

$$Q_C = \frac{kU_{2R}}{X}(kU_{2R} - U'_2) + \frac{PR + QX}{X} \left(1 - \frac{kU_{2R}}{U'_2} \right) \quad (3.134)$$

上式等号右边第一项占支配地位, 第二项较小, 所以

$$Q_C \approx \frac{kU_{2R}}{X}(kU_{2R} - U_2) \quad (3.135)$$

已知负荷 $P + jQ$ 和变压器变比 k 时, 根据电压要求值 U_{2R} 可用上式近似地计算所需的补偿功率 Q_C 。

无功功率补偿设备输出的最大无功功率为其额定容量 Q_{CN} 或 S_N , 最小输出功率为 $Q_{C\min} = -K_Q Q_{CN}$, K_Q 为进相最大容量与额定容量的比值, $0 < K_Q < 1$ 。并联电容器 $K_Q = 0$ (全部切除时), 同步调相机 K_Q 约为 0.5, 静止补偿器 K_Q 可按用户的要求制造。选择无功功率补偿设备额定容量时, 希望在满足调压要求条件下, 容量愈小愈好。在使用普通变压器时, 如果能选择适当的分接头, 使最大负荷时补偿的无功功率等于额定值 Q_{CN} , 最小负荷时需要吸收的无功功率则刚好等于 $K_Q Q_{CN}$, 这样的 Q_{CN} 将是最小的。以下具体讨论变比 k 和最小补偿容量的确定。

设最大负荷时 $Q_C = Q_{CN}$, 根据式(3.135)有

$$Q_{CN} = \frac{kU_{2R\max}}{X}(kU_{2R\max} - U'_{2\max}) \quad (3.136)$$

式中加下标 max 表示最大负荷时的电压值。

最小负荷时 $Q_C = -K_Q Q_{CN}$, 式(3.135)可写成

$$-K_Q Q_{CN} = \frac{k U_{2Rmin}}{X} (k U_{2Rmin} - U'_{2min}) \quad (3.137)$$

由上两式可求得所需的变压器变比:

$$k = \frac{K_Q U_{2Rmax} U'_{2max} + U_{2Rmin} U'_{2min}}{K_Q U_{2Rmax}^2 + U_{2Rmin}^2} \quad (3.138)$$

对于并联电容器, 由于 $K_Q = 0$, 上式简化为

$$k = \frac{U'_{2min}}{U_{2Rmin}} \quad (3.139)$$

求得变比 k 以后, 即可代入式(3.136) 求出 Q_{CN} 。

最后选择最接近的分接头和补偿设备的标准额定容量, 再用准确的公式进行验算。

以上是从局部电网调节电压观点出发讨论无功功率补偿容量的选择问题。在实际电力网中, 还需综合考虑系统无功功率平衡、整个电力网电压调节和经济功率分布(全网功率损耗最小) 等因素才能最后确定。

3.9.5 线路串联电容补偿改善电压质量

对于 110 ~ 35kV 的架空线路, 如果线路长度很长、负荷变化范围很大, 或向冲击负荷供电等情况下, 可在线路上串联电容器, 用容性电抗抵消线路的一部分感性电抗, 使线路电压损耗减小, 线路末端电压提高, 以改善电压质量。

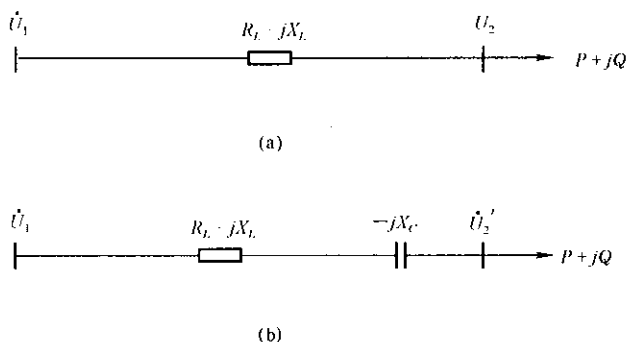


图 3.39 串联电容补偿电力线路的等值图

图 3.39(a) 为一架空线路的等值电路, 送端电压为 U_1 , 末端电压为 U_2 , 负荷集中在线路末端。为了改善线路末端的电压质量, 在线路上串联容抗为 X_C

的电容器组,其等值电路示于图 3.39(b),这时末端电压为 U'_2 。在以下的讨论中,设线路送端电压 U_1 恒定不变,则

未接串联电容器前

$$\dot{U}_1 = U_2 + \frac{PR_L + QX_L}{U_2} + j \frac{PX_L - QR_L}{U_2} = U_2 + \Delta U + j\delta U \quad (3.140)$$

接入串联电容器后

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= U'_2 + \frac{PR_L + Q(X_L - X_C)}{U'_2} + j \frac{P(X_L - X_C) - QR_L}{U'_2} \\ &= U'_2 + \Delta U' + j\delta U' \end{aligned} \quad (3.141)$$

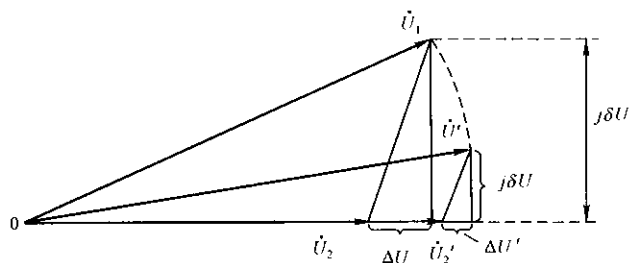


图 3.40 线路电压相量图

两种情况下的相量图如图 3.40 所示,可见串联电容补偿后线路电压降 $\Delta U' < \Delta U$ 和 $\delta U' < \delta U$,所以线路末端电压水平提高了 ($U'_2 > U_2$),而且由于线路电压损耗相对值(即 $\Delta U' / U_1$)减小,因而负荷变化时 U'_2 的变化范围也相应地减小。 X_C 增加时,改善线路末端电压质量的作用随之增大。选择适当的 X_C 值时,串联电容补偿可以有效地减小冲击负荷引起的电压波动。接入串联电容器后,线路电压损耗(略去电压降落横分量)减小量的相对值(百分数)为:

$$\begin{aligned} \Delta\Delta U\% &= \frac{\Delta U - \Delta U'}{\Delta U} \times 100 \approx \frac{QX_C}{PR_L + QX_L} \times 100 \\ &= \frac{X_C/X_L}{R_L/X_L \times P/Q + 1} \times 100 \end{aligned} \quad (3.142)$$

令 $K_C = \frac{X_C}{X_L}$,即串联电容器的容抗与线路电抗之比为线路电抗的补偿度,它是表明串联电容补偿程度的指标。 $K_C = 1$ 称作全补偿, $K_C < 1$ 和 $K_C > 1$ 分别称为欠补偿和过补偿。负荷的功率因数为 $\cos\varphi$ 时,式(3.142)可写成:

$$\Delta\Delta U\% = \frac{K_C}{1 + \frac{R_L}{X_L} \cot\varphi} \times 100 \quad (3.143)$$

从式(3.143)可见; K_c 愈大,改善电压质量的效果愈好; $\cot\varphi$ 愈小(相应于 $\cos\varphi$ 愈小),效果愈好;线路电阻与电抗的比值 R_L/X_L 愈小,效果愈好。图 3.41 是根据式(3.143)绘制的曲线,其中图 3.41(a)为 $Q_L/X_L = 0.4$ 时, $\Delta\Delta U\%$ 与 $\cos\varphi$ 的关系曲线,可见负荷功率因数 $\cos\varphi > 0.95$ 时串联电容补偿的效果已很小。图 3.41(b)为 $\cos\varphi = 0.9$ 条件下, $\Delta\Delta U\%$ 与 R_L/X_L 比值的曲线,表明 $\Delta\Delta U\%$ 随 R_L/X_L 的增大而减小。线路 R_L/X_L 较大时,为了得到相同的补偿效果,就要选用较大的补偿度 K_c 。电压等级愈低的线路,由于导线截面减小和电阻增大, R_L/X_L 比值就愈大,钢芯铝绞线截面积在 95mm^2 以下时, $R_L/X_L > 1$ 。对于 R_L/X_L 很大的线路,为了满足改善电压的要求, K_c 大于1时,将使线路等值电抗变成电容性。

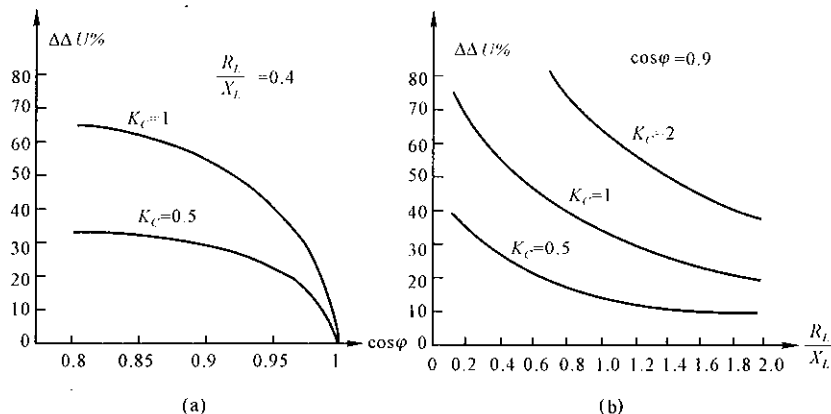


图 3.41 $\Delta\Delta U\%$ 与 K_c 、 $\cos\varphi$ 和 R_L/X_L 的关系

线路接入串联电容器后,由于线路电压的升高,线路的有功和无功功率损耗将有不同程度的减小。当负荷电流流经串联电容器时,会产生感性无功功率

$$\Delta Q_c = \frac{P^2 + Q^2}{U_2'^2} X_c \quad (3.144)$$

所以采用联电容补偿后,还能提高线路送端的功率因数。

根据线路末端电压的要求值 U_2' ,可从式(3.140)和(3.141)计算所需的串联电容的容抗值

$$\begin{aligned} X_c &= \frac{U_2'}{Q} \left[U_2' - U_2 + (PR_L + QX_L) \left(\frac{1}{U_2'} - \frac{1}{U_2} \right) \right] \\ &\approx \frac{U_2'}{Q} (U_2' - U_2) \end{aligned} \quad (3.145)$$

串联电容补偿用的电力电容器有一些特殊的技术要求,例如必须能承受很高的过电压(我国规定应能耐受持续 0.2s 的 5 倍额定电压等),所以必须使

用专门生产的串联电容器。单个串联电容器的额定电压不高(最高约 1 ~ 2kV), 额定容量也不大(约 20 ~ 40kvar), 所以要用许多个串联电容器串、并联组成串联电容器组。图 3.42 是一相串联电容器组原理结线图的例子, 它的并联数为 4, 串联数为 6。

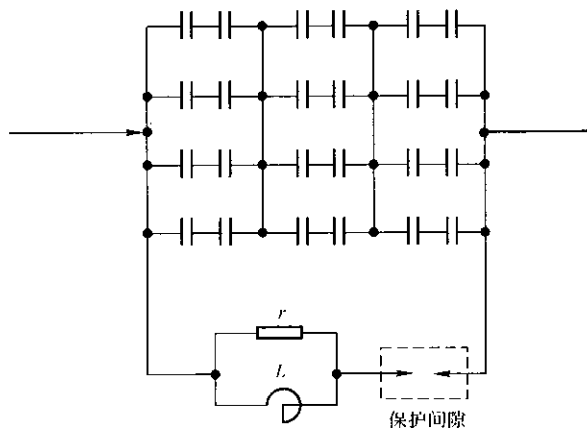


图 3.42 串联电容器组

串联电容器组的并联数和串联数是根据最大工作电流来选择的。要求在最大工作电流通过电容器组时, 每个电容器的电流不超过它的额定电流, 每个电容器的电压不大于它的额定电压。设要求串联补偿的容抗为 X_C , 最大工作电流为 I_{\max} , 选用的串联电容器单个额定电压为 U_{CN} , 容量为 Q_{CN} , 额定电流 $I_{CN} = Q_{CN}/U_{CN}$, 额定容抗 $X_{CN} = U_{CN}^2/Q_{CN}$, 则串联电容器组的并联数 m 和串联数 n 应满足如下条件:

$$mI_{CN} \geq I_{\max} \quad (3.146)$$

$$nU_{CN} \geq I_{\max} X_C \quad (3.147)$$

选定 m 和 n 后, 再核算电容器组的实际容抗

$$X_C = \frac{n}{m} X_{CN} = \frac{n}{m} \frac{U_{CN}^2}{Q_{CN}} \quad (3.148)$$

三相串联电容器组的总容量为 $3mnQ_{CN}$ 。

串联电容器组是根据最大工作电流 I_{\max} 选择的, 当电力网发生短路时, 通过串联电容器组的电流要比 I_{\max} 大许多倍, 将发生严重的过电压, 所以必须采取保护措施。通常用能自灭弧的放电间隙来保护串联电容器, 如图 3.42 所示, 其中附加的电阻 r 用于限制保护间隙击穿瞬间电容器组的放电电流, 通过的工频交流电流则主要由小电感 L 旁路, 以减小电阻的容量。

串联电容器装设的地点按照实际情况确定。当负荷全部集中在线路末端

时,串联电容器安装在始端、末端或线路中间,对改善末端电压质量的效果几乎是一样的。一般为了减小投资费用和便于运行维护,常安装在末端或送端的变电所中。如安装在线路始端,则线路发生短路时,会使短路电流加大,而且短路电流要流经串联电容器组,所以安装在末端变电所中是比较合理的。如果线路沿线接在若干个负荷,在选择串联电容器的安装地点时,应使沿线路电压分布尽量均匀,使各负荷点的电压变化均在允许的范围之内。

电力线路采用串联电容补偿,也带来一些特殊问题,例如串联电容器的过电压保护,继电保护的复杂化,投入有饱和铁心设备时的次谐波振荡,异步电动机自励磁等等问题。运行维护也比较复杂。因此作为改善电压质量的措施,串联电容器只用于110kV以下电压等级、长度特别大或有冲击负荷的架空分支线路上。10kV及以下电压的架空线路,由于 R_L/X_L 很大,所以使用串联电容补偿是不经济和不合理的。

220kV以上电压等级的远距离输电线路中采用串联电容补偿,其作用在于提高运行稳定性和输电能力。

3.9.6 复杂电力系统电压和无功功率的控制

具有多个电压等级电力网的电力系统,电压的调节比上述简单电力网要复杂得多。这是由于:(1)各个负荷的变化规律不同,所以系统中各变电所电压的变化情况也不一样;(2)调节任一发电厂或变电所的电压将会影响系统其他各处的电压,影响的范围和程度又各不相同;(3)调节电压时电力网中无功功率分布将发生变化,因而电力网的有功功率损耗总和也随之发生变化。因此,在利用各发电厂的发电机调节电压的同时,在电力网中适当的地方还需采取各种不同的调压措施,相互配合地进行控制,使全系统各处的电压都能满足要求,而且电力网的无功功率分布为最经济,即全网的有功功率损耗最小。

电力系统在高峰负荷时,各发电机可利用的无功功率最大容量通常不能满足负荷及电网无功功率损耗的需要,必须装设容量足够大的无功功率补偿设备,以保证全系统无功功率平衡,且有一定的备用。无功功率不足的电力系统是无法保证全系统电压质量的,更谈不上实现无功功率经济分布。全系统无功功率(感性)补偿容量与系统最大负荷之比称为无功功率补偿度,一般要达到0.7~0.8或更大,才能满足电压和无功功率控制的需要。电力系统中如果含有220kV以上的超高压电力网,还要考虑低谷负荷时的无功功率平衡,因为超高压线路电容的充电无功功率很大,当负荷较小时充电无功功率将大于线路电抗消耗的无功功率,如果由负荷和各级电力网吸收这些过剩的无功功

率,则将使各级电力网的运行电压过高。为了避免这种过电压的现象,就要求直接接在超高压电力网的发电厂和变电所具有吸收过剩无功功率的能力,即发电厂的发电机允许高功率因数甚至进相运行。为此,变电所可装设同步调相机或静止补偿器等能吸收无功功率的补偿设备,也可以在这些发电厂、变电所的高压或低压母线上装设并联电抗器吸收无功功率。

电力系统中无功功率长距离输送是很不利的,它不但使接受无功功率这一侧电力网的电压水平低下,而且也必然使电力网的有功功率损耗增大。因此,无功功率补偿设备应分散装设在各负荷点及负荷中心,尽量做到分层(指各电压级电力网)、分区无功功率达到平衡。例如某电力系统主干电力网的额定电压为 500kV,由接在主网的各个 500/220kV 区域变电所分别向各地区 220kV 电力网供电。这就要求各地区 220kV 电力网的无功功率应各自保持平衡;而由各地区 220kV 电力网供电的 110kV 电力网,也应各自保持无功功率平衡;110kV 以下各层电力网也都应保持无功功率平衡。我国电力系统电压和无功功率管理导则要求:低压侧为 220kV 和 110kV 的降压变电所,在不同负荷水平时,220kV 母线总负荷的功率因数应保持在 $0.95 \sim 1.0$ (滞后) 范围内,110kV 母线总负荷的功率因数应保持在 $0.9 \sim 1.0$ (滞后) 范围内。各地区应按此要求安排各级电力网的无功功率补偿设备,在各地区无功功率平衡的基础上,再考虑主网的无功功率平衡。

无功功率补偿设备类型的选择,要从电压和无功功率控制的要求和经济性等方面考虑。并联电容器控制性能最差,但单价低、功耗小和运行维持方便,适宜于分散安装在各用户处以及配电变电所的 10kV 和 35kV 母线上。静止补偿器和同步调相机有良好的控制性能,而且有提高系统运行稳定性的作用,但单价较高,运行维护较复杂,所以一般只用于高压枢纽变电所中。静止补偿器还适用于带有冲击负荷的变电所和用户。

在电力系统中通常应用发电机、无功功率补偿设备和有载调压变压器等调节电压。因为各点电压及各线路的无功功率是互相关联的,所以各种调节措施要互相配合,共同进行电压和无功功率的调节。

关于无功功率和电压控制问题,将在《电力系统自动控制》课程中作进一步讨论。

4

电力系统故障分析

电力系统发生故障或在受到其他类型扰动的暂态过程中,各元件的电磁量以及旋转电机的转速等机械量都将发生变化,而且电磁量和机械量的变化是相互关联的。全面严格地分析电力系统暂态过程不但非常复杂而且相当困难,所以工程上根据不同的研究问题,将电力系统暂态过程分为电磁暂态过程和机电暂态过程两类。电磁暂态过程研究电流、电压等电量及电机、变压器中磁通的变化过程,而电机转速变化则可以忽略不计,例如研究短路电流、同步电机自励磁等快速暂态过程。机电暂态过程着重研究同步电机转速和转子相对位置变化的暂态过程,一些对其影响不大的电磁变化因素则可略去不计,例如电力系统运行稳定性、同步发电机异步运行等问题的研究。本章主要讨论电力系统短路故障的电磁暂态过程。

同步电机是电力系统的电源,它的暂态过程比其他元件复杂,而且对电力系统电磁和机电暂态过程起主导作用。本章将首先讨论同步电机电磁数学模型和电磁暂态特性,它是学习电力系统暂态过程的基础。

4.1 基本概念

在电力系统可能发生的各种故障中,对电力系统运行和电力设备安全危害最大,而且发生概率较大的首推短路故障。所谓短路故障是指正常运行情况以外的相与相之间或相与地(或中性线)之间的接通。

产生短路故障的主要原因是电力设备绝缘损坏。常见的有:雷击过电压或操作过电压引起绝缘子、绝缘套管表面闪络(电弧放电);由于绝缘材料老化等原因,在过电压甚至在正常电压下发生绝缘介质击穿;风、雪等自然灾害以及鼠、鸟等动物跨接裸露导体造成的短路。另外,运行人员误操作也是造成短路的一个原因,例如设备检修后遗忘拆除临时接地线(用于保护人员安全)而导致在合上电源时造成短路等。

在三相交流电力系统中,短路故障的基本类型有三相短路、两相短路、单相接地短路和两相接地短路。三相短路时三相电路仍旧是对称的,称为对称短路,其余三类都是不对称短路。电力系统发生的各种短路中,单相短路所占的比例最高,约为65%;两相接地短路约占20%;两相短路约占10%;三相短路最小,约为5%。电力系统短路故障大多数发生在架空线路部分(约占70%以上)。在额定电压为110kV以上的架空线路上发生的短路故障,单相短路占绝大多数,达到90%以上。

中性点不接地或经过大电抗(补偿电抗器)接地的电力网中,单相接地时

线路的电流变化不大,但可能会引起过电压,这种故障在本书中暂不作讨论。

发生短路时,短路点相间或相与地间将燃起电弧。电弧的电阻是非线性的,电阻值与电流大小及电弧长度有关,变化范围很大,难以准确估计,实际计算中常近似地用恒定的电阻来代替。在某些情况下,电弧电阻很小,可以略去不计,这种短路称为“金属性短路”。在相同条件下,金属性短路的电流较大,通常作为计算最大可能短路电流的条件。

电力网中除了同一地点短路以外,还可能在不同地点同时发生短路,称为多重短路或复杂短路故障。

发生短路时,短路点及附近电力设备流过的短路电流可能达到额定电流的几倍至十几倍,从而可能引起导体及绝缘体的严重发热而损坏。同时,在短路刚开始电流瞬时值达到最大时,电力设备的导体间将受到强大的电动力,如果结构不够坚固,就可能引起导体或线圈变形以致损坏。短路时电力网的电压突然降低(短路点附近电压下降得最多),就会影响用户用电设备的正常工作。首先受影响的是异步电动机,电压低于 70% 以下时其转速急剧下降以至停转,造成产品报废甚至设备损坏。短路故障的最严重后果是并列运行的发电机失去同步,引起系统解列直至崩溃,从而造成大面积停电。另外,不对称短路时,架空线路中不对称电流所产生的磁通,会在邻近平行架设的通信线路上感应出相当大的电势,轻则产生通信干扰,重则危及通信设备和人身的安全。

在电力系统设计和运行时,都要求采取适当措施降低短路故障的发生概率,例如采用合理的防雷设施降低过电压水平,使用结构完善的配电装置,加强运行维护管理等等。同时,还要采取减小短路危害的措施,最主要的措施是迅速将发生短路部分与系统其他部分隔离开来,使无故障部分恢复正常运行,例如依靠继电保护装置检测出故障并有选择地断开(跳闸)最接近短路点的断路器以切断故障回路等。架空线路的短路大多数是瞬时性的(即经故障线路与电源隔离,使短路点电弧熄灭并去游离后,能够恢复正常绝缘能力),因此普遍采用自动重合闸措施,即当发生短路时断路器迅速跳闸,经过一定时间(约 0.4 ~ 1s)后断路器自动重合闸。对于瞬时性短路,重合闸后系统即恢复正常运行;如果是永久性故障,重合闸后短路仍旧存在,则再次使断路器跳闸。因 220kV 及更高电压等级架空线路的故障绝大多数是单相短路,所以还广泛采用单相重合闸,其特点是发生单相短路时,只断开故障相的断路器,另两相继续运行。但在永久性故障时,重合闸后三相则是同时断开,线路退出运行。

在发电厂、变电所及整个电力系统的设计和运行中,诸如选择合理的电气结线拓扑、选用配电设备和断路器、设计继电保护以及选择限制短路电流措施等实践操作,都必须以短路故障的计算结果作依据。

除了短路故障外,本章还将讨论线路一相或两相断开的故障,简称断线故障。这类故障大多发生在具有三相分别操作断路器的架空线路中,当断路器的一相或两相跳闸时即形成断线故障。例如在采用单相重合闸的线路上,当发生单相短路的一相断路器跳闸后,即形成一相断开、两相运行的非全相运行状态。此外,架空线路因刮风、积雪、树木倒塌等造成一相或两相导线断裂,也是形成断线故障的一个原因,不过这种故障的概率很小。

4.2 同步电机的数学模型

同步电机(同步发电机、同步调相机和同步电动机)实质上是由定子和转子两个部件构成。除了部分小型同步电动机外,三相电枢绕组都嵌在定子的槽中,产生激励磁场的磁极则装在转子轴上。转子的结构有凸极和隐极两种型式。水轮发电机及其他低转速的同步电机采用凸极式,极对数很多,例如水轮发电机有12~50对极,调相机有3~6对极等。凸极由硅钢片叠成,绕有励磁绕组,极面上还嵌有互相短接的紫铜或黄铜棒,构成鼠笼形的阻尼绕组。汽轮发电机等高速同步电机采用隐极式转子,它由锻钢构成,呈圆柱形,表面槽中装有分布式励磁绕组,大多只有一对极。隐极转子不设阻尼绕组,因为钢转子中的涡流效应有很强的阻尼作用,可看作有无限多个阻尼线圈。

在研究同步电机特性时,常略去一些次要因素,采用如下的假设:

- (1) 电机各磁路的导磁系数为常数,即认为铁心是不饱和的。
- (2) 定子三相绕组的结构完全相同,空间位置彼此相距 120° 电角度;转子的铁心及绕组对极中心轴和极间轴完全对称。
- (3) 定子和转子各绕组电流在空气隙中产生的磁势和磁感应强度(磁通密度)都是按正弦规律分布的。
- (4) 定子和转子的槽不影响各绕组的电感,或者认为定、转子的表面都是光滑的。

符合上述假定的同步电机称为理想同步电机,根据它建立的数学模型求解结果与实际电机试验结果相比较,其准确度可以满足工程的要求,至于实际电机磁路饱和问题可以另行考虑。

为了便于讨论,图4.1给出凸极同步电机的示意图。在多极对的电机中,圆周上的距离和转子角位移用电气角度表示时,可以看作只有一对极。定子三相绕组分别用整距集中绕组 $a-x$ 、 $b-y$ 和 $c-z$ 表示,绕组的中心轴线 a 、 b 和 c 彼此相差 120° 。转子极中心线用 d 轴表示,称为纵轴或直轴;极间轴 q 轴称为横轴

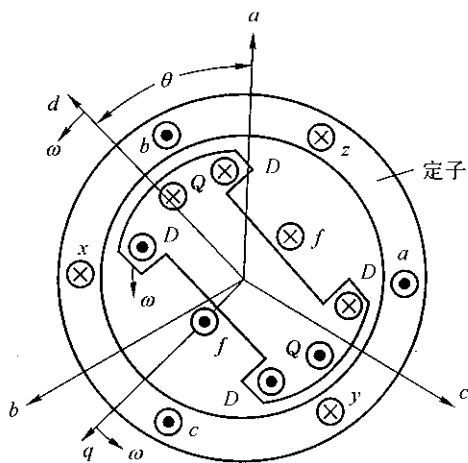


图 4.1 同步电机示意图

或交轴。按转子旋转方向, q 轴比 d 轴超前 90° 。励磁绕组 f - f 的轴线与 d 轴重合。阻尼绕组可用两个互相正交的短接绕组等效。轴线与 d 轴重合的称为纵轴阻尼绕组, 用集中线圈 D - D 表示, 为了保持转子的对称性, 图 4.1 中 D - D 绕组分开放在极的两边; 另一等效绕组 Q - Q 的轴线与 q 轴重合, 称为横轴阻尼绕组。对于隐极同步电机, 钢转子中的涡流效应可以用纵轴和横轴阻尼绕组来等效。这样, 除了转子横截面为圆形外, 其他都与凸极电机相同, 可作为凸极机的特例来处理。

同步电机的数学模型包括描述电磁特性的电压方程、磁链方程以及表明转子转速与转矩变化规律的转子运动方程, 转子运动方程将在第 5 章中讨论。

4.2.1 电压方程和磁链方程

同步电机有 6 个磁耦合的绕组和相应的 6 个回路, 可用各绕组的磁链方程和各回路的电压方程描述。在建立这些方程之前, 必须选择各变量的正方向或称参考方向。本书选择的正方向(参见图 4.1)如下: 定子各相绕组轴线的正方向作为各绕组磁链的正方向, 各相绕组中正方向电流产生的磁链的方向与相应绕组轴线的正方向相反; 在转子方面, 励磁绕组及纵轴阻尼绕组磁链的正方向与 d 轴正方向一致, 横轴阻尼绕组磁链的正方向与 q 轴正方向一致, 转子三个绕组中正方向电流产生的磁链与相应轴线方向一致; 所有 6 个绕组的感应电势的正方向和各自的电流正方向相同。在上述规定中, 定子“电生磁”, 转子“磁生电”, 符合“左电(动机)右发(电机)”定则, 所以转子各绕组磁链和感

应电势 e 的正方向符合右手螺旋法则, 感应电势 $e = -d\psi/dt$; 而定子各相绕组磁链和感应电势的正方向不符合右手螺旋法则, $e = d\psi/dt$ 。另外, 转子与定子的相对位置用 d 轴与 a 相绕组轴线间的夹角 θ 表示, 正方向与转子旋转方向相同。设转子旋转角速度为 ω , 则

$$\theta = \int_0^t \omega dt + \theta_0 \quad (4.1)$$

其中, θ_0 为 $t = 0$ 时的初始角; ω 为常数时, $\theta = \omega t + \theta_0$ 。

图 4.2 为同步电机的电路图, 定子 a, b, c 三相绕组采用 Y 接法, 励磁绕组 $f-f$ 由外加直流电压源 u_f 提供励磁电流。图中标出了各绕组的电阻、电流、电势和端电压。各绕组总磁链用 ψ 和相应的下标表示。

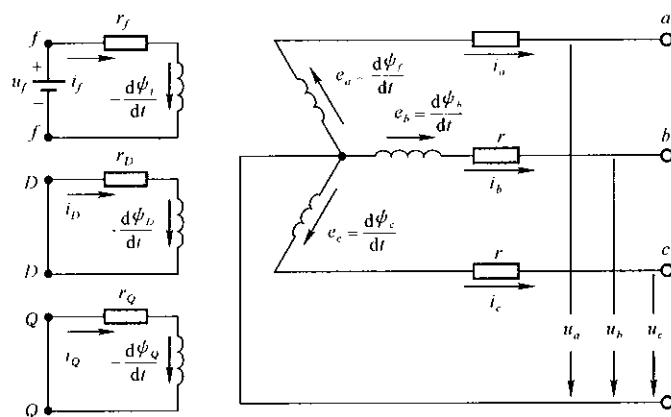


图 4.2 同步电机电路图

定子三相回路电压方程为

$$\left. \begin{aligned} u_a &= e_a - ri_a = \frac{d\psi_a}{dt} - ri_a \\ u_b &= e_b - ri_b = \frac{d\psi_b}{dt} - ri_b \\ u_c &= e_c - ri_c = \frac{d\psi_c}{dt} - ri_c \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

转子三个回路的电压方程为

$$\left. \begin{aligned} u_f &= \frac{d\psi_f}{dt} + r_f i_f \\ 0 &= \frac{d\psi_D}{dt} + r_D i_D \\ 0 &= \frac{d\psi_Q}{dt} + r_Q i_Q \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

同步电机各个绕组有自感,绕组之间有互感,所以各个绕组的磁链方程式

$$\begin{aligned} \psi_{abc} &= \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_b & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_a \\ -i_b \\ -i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{af} & M_{aD} & M_{aQ} \\ M_{bf} & M_{bD} & M_{bQ} \\ M_{cf} & M_{cD} & M_{cQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \\ &= -L_{SS} i_{abc} + L_{SR} i_{fDQ} \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} \psi_{fDQ} &= \begin{bmatrix} \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{af} & M_{bf} & M_{cf} \\ M_{aD} & M_{bD} & M_{cD} \\ M_{aQ} & M_{bQ} & M_{cQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_a \\ -i_b \\ -i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_f & M_{fD} & 0 \\ M_{fD} & L_D & 0 \\ 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \\ &= -L_{RS} i_{abc} + L_{RR} i_{fDQ} \end{aligned} \quad (4.5)$$

式中, L 为下标所指的绕组的自感, M 为下标所指的两个绕组间的互感。由于 q 轴阻尼绕组 Q 与励磁绕组 f 和 d 轴阻尼绕组 D 垂直, 所以 $M_{fQ} = M_{DQ} = 0$ 。

由于凸极同步电机转子的纵轴和横轴两方向的铁心结构不同, 因此大部分自感和互感都是转子位置角 θ 的函数, 下面分别进行讨论。

1. 定子各相绕组的自感

先讨论 a 相绕组的自感 L_a 。由图 4.1 可见, 当 $\theta = 0^\circ$ 或 $\theta = 180^\circ$, 即 d 轴与 a 相绕组轴线重合时, a 相绕组的磁导达到最大值, 所以 L_a 为最大; 当 $\theta = 90^\circ$ 或 270° 时, a 相绕组的磁导达到最小值, L_a 为最小。 L_a 的变化如图 4.3(a) 所示, 是 θ 的周期函数, 周期为 180° , 可以用偶数倍 θ 角的余弦级数来表达, 即

$$L_a = l_0 + l_2 \cos 2\theta + l_4 \cos 4\theta + \dots$$

如考虑上述理想电机的第 3 条假设, 可以证明它只包含前面两项。 b 和 c 相绕组自感的变化规律也相同, 只是达到最大值的 θ 不同。三相绕组自感可表示为:

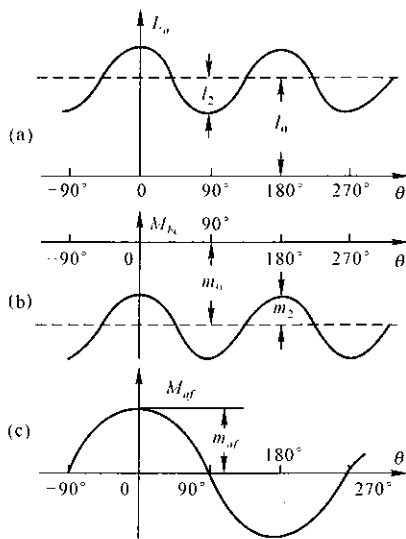


图 4.3 自感和互感随 θ 变化的曲线

$$\left. \begin{aligned} L_a &= l_0 + l_2 \cos 2\theta \\ L_b &= l_0 + l_2 \cos 2(\theta - 120^\circ) \\ L_c &= l_0 + l_2 \cos 2(\theta + 120^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

式中, l_0 和 l_2 为常数, $l_0 > l_2$; 隐极机 $l_2 = 0$ 。

2. 定子三相绕组间的互感

以 b 相和 c 相绕组间的互感 M_{bc} 为例, 由图 4.1 可见, c 相绕组正电流产生的匝链到 b 相绕组的磁通与 b 相绕组正电流产生的磁通方向总相反, 所以 M_{bc} 为负值。当 θ 等于 90° 或 270° 即 d 轴与 a 相绕组轴线垂直时, b 、 c 相绕组耦合最紧密, M_{bc} 的绝对值最大; θ 等于 0° 或 180° 即 d 轴与 a 相绕组轴线平行时, M_{bc} 的绝对值最小。 M_{bc} 随 θ 变化的情况如图 4.3(b) 所示, 变化周期为 180° 。 M_{ab} 和 M_{ca} 的变化规律与 M_{bc} 一样, 但出现最大值(绝对值)时的 θ 分别超前 120° 和滞后 120° 。三个互感可表示为

$$\left. \begin{aligned} M_{ab} &= -[m_0 + m_2 \cos 2(\theta + 30^\circ)] \\ M_{bc} &= -[m_0 + m_2 \cos 2(\theta - 90^\circ)] \\ M_{ca} &= -[m_0 + m_2 \cos 2(\theta + 150^\circ)] \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

式中, m_0 和 m_2 为常数, $m_0 > m_2$ 。理论分析表明 m_2 与 l_2 差别很小, 实际上可认为 $m_2 = l_2$ 。隐极电机的 $m_2 = 0$ 。

3. 定子各相绕组与转子各绕组间的互感

d 轴是励磁绕组的轴线, 当 d 轴与 a 轴重合即 $\theta = 0^\circ$ 时, 励磁绕组穿链到 a 相绕组的磁通达到最大值, 所以 a 相绕组与励磁绕组间的互感 M_{af} 达到最大值, 用 m_{af} 表示; 当 θ 等于 90° 或 270° 时, d 轴垂直于 a 轴, $M_{af} = 0$; $\theta = 180^\circ$ 时, d 轴又与 a 轴重合, 但方向相反, 所以励磁绕组穿链到 a 相的磁通达到负最大值, $M_{af} = -m_{af}$ 。 M_{af} 变化的曲线如图 4.3(c) 所示, 变化周期为 360° 。定子各相绕组与励磁绕组间的互感可表示为

$$\left. \begin{aligned} M_{af} &= m_{af} \cos \theta \\ M_{bf} &= m_{af} \cos(\theta - 120^\circ) \\ M_{cf} &= m_{af} \cos(\theta + 120^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (4.8)$$

因为纵轴阻尼绕组的轴线也是 d 轴, 所以定子绕组与纵轴阻尼绕组间的互感与式(4.8)相似, 可表示为

$$\left. \begin{aligned} M_{ad} &= m_{ad} \cos \theta \\ M_{bd} &= m_{ad} \cos(\theta - 120^\circ) \\ M_{cd} &= m_{ad} \cos(\theta + 120^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

横轴阻尼绕组的轴线 q 轴超前 d 轴 90° , 所以用 $\theta + 90^\circ$ 替换式(4.9)中的

θ ,就可得到定子各绕组与横轴阻尼绕组间的互感

$$\left. \begin{aligned} M_{aQ} &= -m_{aQ}\sin\theta \\ M_{bQ} &= -m_{aQ}\sin(\theta - 120^\circ) \\ M_{cQ} &= -m_{aQ}\cos(\theta + 120^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (4.10)$$

4. 转子各绕组的自感和互感

转子上各绕组是随着转子一起旋转的,无论凸极机还是隐极机,各绕组磁路的磁导都是不变的,所以转子各绕组自感 L_f 、 L_D 和 L_Q 以及励磁绕组与纵轴阻尼绕组间的互感 M_{fD} (以后用 m_r 表示) 都是常数。

上述表明,凸极机大部分自感和互感、隐极机定子绕组与转子绕组间的互感都是转子位置角 $\theta = \int \omega dt$ 的函数,也就是时间的函数。可见,磁链方程式(4.4)和(4.5)是非线性的代数方程式,电压方程式(4.2)和(4.3)是变系数的微分方程式,它们的求解是十分困难的。克服这个困难的有效方法,是将定子 a 、 b 、 c 三相绕组的磁链、电流和电压用一组新的变量替换,从而使方程式便于求解。变量替换又称为坐标变换。本书采用最常用的一种坐标变换,即所谓派克(Park)变换。

4.2.2 坐标变换

将式(4.8)~(4.10)代入式(4.5),转子各绕组磁链方程可表示为

$$\left. \begin{aligned} \psi_f &= -m_{af}[i_a\cos\theta + i_b\cos(\theta - 120^\circ) + i_c\cos(\theta + 120^\circ)] + L_f i_f + m_r i_D \\ \psi_D &= -m_{aD}[i_a\cos\theta + i_b\cos(\theta - 120^\circ) + i_c\cos(\theta + 120^\circ)] + m_r i_f + L_D i_D \\ \psi_Q &= -m_{aQ}[i_a\sin\theta + i_b\sin(\theta - 120^\circ) + i_c\sin(\theta + 120^\circ)] + L_Q i_Q \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

这些方程式启发我们,可以用新的变量 i_d 、 i_q 、 i_0 替换 i_a 、 i_b 、 i_c ,它们之间的关系为

$$\left. \begin{aligned} i_d &= \frac{2}{3} [i_a\cos\theta + i_b\cos(\theta - 120^\circ) + i_c\cos(\theta + 120^\circ)] \\ i_q &= \frac{2}{3} [i_a\sin\theta + i_b\sin(\theta - 120^\circ) + i_c\sin(\theta + 120^\circ)] \\ i_0 &= \frac{1}{3} (i_a + i_b + i_c) \end{aligned} \right\} \quad (4.12)$$

将新变量代入式(4.11),它们就可以得到简化,成为线性代数方程。

下面从物理上说明新变量的意义。

设定子三相绕组中的电流分别为

$$\left. \begin{aligned} i_a &= I_m \cos(\omega t + \gamma_0) = I_m \cos\gamma \\ i_b &= I_m \cos(\gamma - 120^\circ) \\ i_c &= I_m \cos(\gamma + 120^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (4.13)$$

式中, $\gamma = \omega_s t + \gamma_0$, ω_s 为电流的角频率, γ_0 为初相角。这种具有正常相序的三相对称电流称为正序电流。将该三相电流代入式(4.12)并经三角运算可得

$$\left. \begin{aligned} i_d &= I_m \cos(\gamma - \theta) \\ i_q &= I_m \sin(\gamma - \theta) \\ i_0 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.14)$$

式(4.13)的三相电流可以用一个模值为 I_m 、角速度为 ω_s 的旋转综合相量 \dot{I} 表示, 见图 4.4。它在三个相差 120° 的固定时间轴 t_a, t_b, t_c 上的投影, 即为三相电流的瞬时值。如将图 4.1 中定子三相绕组轴线 a, b, c 分别兼作时间轴 t_a, t_b, t_c , 则定子电流综合相量可与 d, q 轴表示在同一图上, 如图 4.5

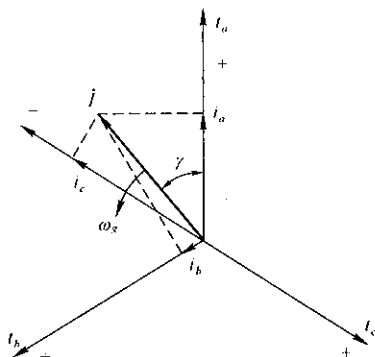


图 4.4 三相电流综合相量

所示。 \dot{I} 与 d 轴的夹角为 $\gamma - \theta$, 它在 d, q 的分量分即为式(4.14)的 i_d 和 i_q 。因此, i_d, i_q 分别称为定子电流的纵轴分量和横轴分量。

当电机定子三相绕组流过式(4.13)的正序电流时, 产生的气隙三相合成磁势是一在空间正弦分布(理想电机)的旋转磁势, 转速为 ω_s , 旋转方向和转子相同。这一空间旋转磁势可以用向量 \dot{F}_a 表示, 它的模等于磁势的幅值, 位置与合成电流向量 \dot{I} 重合。交流电机原理表明, 当某一相电流的瞬时值达到最大时, 旋转磁势的位置与该相绕组的轴线重合, 因此在图 4.5 中, 空间向量 \dot{F}_a 与定子电流的综合相量 \dot{I} 是重合在一起的。

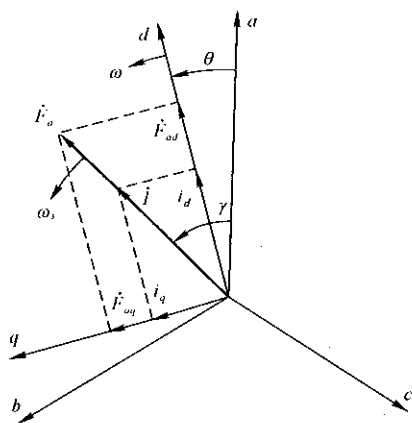


图 4.5 空间向量 \dot{F}_a 和综合相量 \dot{I}

三相合成磁势的幅值为每相绕组脉动磁势幅值的 1.5 倍, 每相脉动磁势的幅值与电流的幅值 I_m 成正比, 可用 $I_m \omega$ 表示, 比例系数 ω 可称为每相绕阻的

等值匝数,所以三相合成旋转磁势的幅值 $F_{am} = \frac{3}{2} \omega I_m$, 即向量 \dot{F}_a 与相量 \dot{I} 成正比。可见, \dot{I} 作为时间相量可以代表三相电流, 把它看作空间向量则可代表定子三相(电流产生的)合成磁势。

向量 \dot{F}_a 可分解为纵轴和横轴分量 \dot{F}_{ad} 和 \dot{F}_{aq} , 见图 4.5, 它们的模为

$$\left. \begin{aligned} F_{ad} &= F_{am} \cos(\gamma - \theta) = \frac{3}{2} I_m \omega \cos(\gamma - \theta) \\ F_{aq} &= F_{am} \sin(\gamma - \theta) = \frac{3}{2} I_m \omega \sin(\gamma - \theta) \end{aligned} \right\} \quad (4.14)$$

计及式

$$\left. \begin{aligned} F_{ad} &= \frac{3}{2} i_d \omega \\ F_{aq} &= \frac{3}{2} i_q \omega \end{aligned} \right\} \quad (4.15)$$

空间向量 \dot{F}_{ad} 与 d 轴重合, \dot{F}_{aq} 与 q 轴重合, 两者都是空间正弦分布与转子一起旋转的磁势, 分别称为纵轴和横轴电枢反应磁势。如转子角速度 ω 恒定, 则 $\gamma - \theta = (\omega_s - \omega)t + \gamma_0 - \theta_0$ 。当 $\omega_s = \omega$ 时, F_{ad} 和 F_{aq} 的大小是恒定的; 当 $\omega_s \neq \omega$ 时, 两者的大小随时间而变化, 角频率为 $\omega_s - \omega$ 。

定子三相电流为任意时间函数时, 各相电流可分解为两个成分: $i_a = i'_a + i_{a0}$, $i_b = i'_b + i_{b0}$, $i_c = i'_c + i_{c0}$ 。其中 $i'_a + i'_b + i'_c = 0$; $i_{a0} = i_{b0} = i_{c0} = i_0$ 为零序电流, 显然 $i_0 = \frac{1}{3} (i_a + i_b + i_c)$ 。

三相零序电流不能用综合相量表示, 但 i'_a , i'_b 和 i'_c 可以用综合相量 \dot{I} 代表。由于零序电流不产生气隙合成磁势, 所以三相合成磁势取决于 i'_a , i'_b 和 i'_c , 因此 \dot{I} 仍可以代表 \dot{F}_a , 不过一般情况下, \dot{F}_a 和 \dot{I} 的旋转速度和模都随时间而变化, \dot{I} 的 d 、 q 轴分量 i_d 和 i_q 仍与式(4.12)所确定的相同, 式(4.15)也仍然成立。可见, 对于任意情况, i_d 和 i_q 都可分别代表定子纵轴和横轴电枢反应磁势。

同步电机定子的电枢反应磁通, 穿链转子 d 轴各绕阻的磁链与 F_{ad} 成正比, 穿链转子 q 轴各绕阻的磁链与 F_{aq} 成正比, 零序电流只产生定子漏磁, 与转子无关, 所以用 i_d , i_q 和 i_0 替代三相电流可以使磁链方程得到简化。

i_a , i_b 和 i_c 可看作定子 a 、 b 、 c 轴坐标系的量; i_d , i_q 和 i_0 可看作 d 、 q 、 0 坐标系的量, d 、 q 坐标轴和转子一起旋转, “ 0 ”坐标轴则是抽象的。因此用 i_d , i_q , i_0 替换 i_a , i_b , i_c 又称为坐标变换。

式(4.12)可用矩阵表示:

$$\mathbf{i}_{dq0} = \mathbf{P} \mathbf{i}_{abc} \quad (4.16)$$

式中, $\mathbf{i}_{dq0} = [i_d \quad i_q \quad i_0]^T$; $\mathbf{i}_{abc} = [i_a \quad i_b \quad i_c]^T$

$$P = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - 120^\circ) & -\sin(\theta + 120^\circ) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

称为派克坐标变换矩阵。

同样地,定子三相电压及磁链的坐标变换式为

$$u_{dq0} = Pu_{abc} \quad \Psi_{dq0} = P\Psi_{abc} \quad (4.18)$$

矩阵 P 是非奇异的,它的逆矩阵为

$$P^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 1 \\ \cos(\theta - 120^\circ) & -\sin(\theta - 120^\circ) & 1 \\ \cos(\theta + 120^\circ) & -\sin(\theta + 120^\circ) & 1 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

定子三相电流、电压及磁链的坐标逆变换关系为

$$i_{abc} = P^{-1}i_{dq0}, u_{abc} = P^{-1}u_{dq0}, \Psi_{abc} = P^{-1}\Psi_{dq0} \quad (4.20)$$

上述变换是派克(R. H. Park)于1929年首先提出的,所以称为派克变换。

4.2.3 用 d 、 q 、 0 坐标表示的同步电机方程式

本节讨论同步电机磁链方程和回路电压方程的派克变换,从而得到用 d 、 q 、 0 坐标表示的方程式。

1. 磁链方程的派克变换

定子绕组磁链方程式(4.4)为了书写方便而简写为

$$\Psi_{abc} = -L_{SS}i_{abc} + L_{SR}i_{fDQ} \quad (4.21)$$

转子各绕组磁链方程式(4.5)表示为

$$\Psi_{fDQ} = -L_{RS}i_{abc} + L_{RR}i_{fDQ} \quad (4.22)$$

上两式中, L_{SS} 为定子各绕组电感矩阵; $L_{SR} = L_{RS}^T$ 为定子绕组与转子绕组间的互感矩阵; L_{RR} 为转子各绕组的电感矩阵; $\Psi_{fDQ} = [\psi_f \ \psi_D \ \psi_Q]^T$; $i_{fDQ} = [i_f \ i_D \ i_Q]^T$; $\Psi_{abc} = [\psi_a \ \psi_b \ \psi_c]^T$; $i_{abc} = [i_a \ i_b \ i_c]^T$ 。

式(4.21)等号两边乘 P , 计及式(4.18)、(4.20)可得:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{dq0} &= -PL_{SS}P^{-1}i_{dq0} + PL_{SR}i_{fDQ} \\ \Psi_{fDQ} &= -L_{RS}P^{-1}i_{dq0} + L_{RR}i_{fDQ} \end{aligned} \right\} \quad (4.23)$$

根据式(4.17)、(4.19)以及式(4.6)~(4.10),经三角演算可得:

$$PL_{SS}P^{-1} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 \\ 0 & L_q & 0 \\ 0 & 0 & L_0 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

式中:

$$L_d = l_0 + m_0 + l_2/2 + m_2 \approx l_0 + m_0 + \frac{3}{2} l_2;$$

$$L_q = l_0 + m_0 - l_2/2 - m_2 \approx l_0 + m_0 - \frac{3}{2} l_2;$$

$$L_0 = l_0 - 2m_0$$

$$PL_{SR} = \begin{bmatrix} m_{af} & m_{ad} & 0 \\ 0 & 0 & m_{aQ} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

$$L_{RS}P^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{3}{2}m_{af} & 0 & 0 \\ \frac{3}{2}m_{ad} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}m_{aQ} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

将式(4.24)~(4.26)代入式(4.23),即得到用 d 、 q 、 0 坐标表示的同步电机磁链方程,其展开式为

$$\left. \begin{aligned} \psi_d &= -L_d i_d + m_{af} i_f + m_{ad} i_D \\ \psi_q &= -L_q i_q + m_{aQ} i_Q \\ \psi_0 &= -L_0 i_0 \\ \psi_f &= -\frac{3}{2} m_{af} i_d + L_f i_f + m_{fd} i_D \\ \psi_D &= -\frac{3}{2} m_{ad} i_d + m_{Df} i_f + L_D i_D \\ \psi_Q &= -\frac{3}{2} m_{aQ} i_q + L_Q i_Q \end{aligned} \right\} \quad (4.27)$$

可见坐标变换后各电感都变成常数。

从磁链关系的观点来看,坐标变换相当于将定子三相绕组用三个假想的绕组来等值,它们是零序绕组、 d 轴绕组和 q 轴绕组。此三个绕组与定子一相绕组的结构相同,等值匝数也一样。等值的定子零序绕组是一个独立的绕组,自感 L_0 为常数,与其他绕组均无磁的耦合,所以该绕组的磁链与其中的电流 i_0 成正比。等值的定子 d 轴和 q 轴绕组的轴线分别与转子 d 轴和 q 轴重合,和转子一起旋转,两绕组的电流和磁链分别为 i_d 、 ψ_d 和 i_q 、 ψ_q (参考方向与定子绕组相同)。这样,计及转子各绕组时,同步电机的 d 轴方向共有三个相对静止的绕组, q 轴方向共有两个相对静止的绕组; d 轴各绕组与 q 轴各绕组之间没有互感作用。

等值定子 d 轴绕组的轴线始终与 d 轴重合,所以磁路的磁导不变,自感 L_d 为常数,它与同轴的励磁绕组及纵轴阻尼绕组之间的互感也是常数,分别等于 $\theta = 0^\circ$ 时 a 相绕组与转子 d 轴两绕组之间的互感; m_{af} 和 m_{ad} 。这样就不难理解式(4.27)中 ψ_d 、 ψ_f 、 ψ_D 与 i_d 、 i_f 、 i_D 的关系。需要指出: ψ_d 中由 i_f 和 i_D 产生的磁链,互感为 m_{af} 和 m_{ad} ;而 ψ_f 和 ψ_D 中由 i_d 产生的互感磁链,互感则为 $1.5m_{af}$ 和

$1.5m_{ad}$ 。这表明,等值定子 d 轴绕组与转子 d 轴两个绕组间的互感是不可互逆的。这是因为转子该两绕组中由定子三相电流产生的互感磁链与定子合成磁势纵轴分量 $F_{ad}(=1.5i_d\omega)$ 成正比,而 m_{af} 和 m_{ad} 相应于定子一相绕组与转子该两绕组之间的互感,所以互感磁链用 i_d 表示时,互感要增大1.5倍。

等值定子 q 轴绕组的轴线始终与转子 q 轴重合,所以它的自感 L_q 为常数,它与转子横轴阻尼绕组间的互感也是常数。同理, q 轴两个绕组间的互感也是不可互逆的。

现在进一步讨论定子等值电感 L_d 、 L_q 和 L_o 的物理意义。

设一台同步电机由原动机驱动,转子转速保持为额定值 ω_N ,励磁绕组开路,定子接到电压为三相对称(正序)正弦波和角频率为 ω_N 的电源。稳态时,定子绕组电流为三相对称的正弦波, $i_o = 0$,在气隙产生的三相合成旋转磁势和转子没有相对运动,阻尼绕组中 $i_D = i_Q = 0$ 。如改变三相电源电压的相位,使定子三相合成磁势的向量和 d 轴重合,即图4.5中 $\gamma = \theta$,则 $i_q = 0$,由式(4.27)可知,这时 $\phi_d = -L_d i_d$, $\phi_q = 0$, $\phi_o = 0$ 。定子三相电流和磁链为

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \mathbf{P}^{-1} \begin{bmatrix} i_d \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d \cos \theta \\ i_d \cos(\theta - 120^\circ) \\ i_d \cos(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} = \mathbf{P}^{-1} \begin{bmatrix} \phi_d \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_d \cos \theta \\ \phi_d \cos(\theta - 120^\circ) \\ \phi_d \cos(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix}$$

可得定子各相等值电感:

$$-\frac{\phi_a}{i_a} = -\frac{\phi_b}{i_b} = -\frac{\phi_c}{i_c} = -\frac{\phi_d}{i_d} = L_d$$

可见 L_d 是只有纵轴电枢反应时定子各相的等值电感,在电机学中称为纵轴同步电感,它为相绕组漏感 L_o 和纵轴电枢反应电感 L_{ad} 之和,即 $L_d = L_o + L_{ad}$,相应的电抗为 $x_d = \omega_N L_d = x_o + x_{ad}$ 。

再改变三相电源电压的相位,使定子三相合成磁势向量和 q 轴重合,即图4.5中 $\gamma - \theta = 90^\circ$,则磁链 $\phi_d = 0$, $\phi_q = -L_q i_q$, $\phi_o = 0$ 。定子三相电流和磁链为

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \mathbf{P}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ i_q \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} i_q \sin \theta \\ i_q \sin(\theta - 120^\circ) \\ i_q \sin(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} = \mathbf{P}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \phi_q \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \phi_q \sin \theta \\ \phi_q \sin(\theta - 120^\circ) \\ \phi_q \sin(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix}$$

可得定子各相等值电感:

$$-\frac{\psi_a}{i_a} = -\frac{\psi_b}{i_b} = -\frac{\psi_c}{i_c} = -\frac{\psi_q}{i_q} = L_q$$

这说明 L_q 是只有横轴电枢反应时定子各相的等值电感,在电机学中称为横轴同步电感, $L_q = L_s + L_{aq}$, L_{aq} 为横轴电枢反应电感。相应的电抗为

$$x_q = \omega_N L_q = x_s + x_{aq}$$

最后,定子三相绕组通以零序电流 $i_a = i_b = i_c = i_0$, 则有 $i_d = i_q = 0$, $\psi_d = \psi_q = 0$, $\psi_0 = -L_0 i_0$, 三相磁链 $\psi_a = \psi_b = \psi_c = \psi_0$, 这时定子各相等值电感为

$$-\frac{\psi_a}{i_a} = -\frac{\psi_b}{i_b} = -\frac{\psi_c}{i_c} = -\frac{\psi_0}{i_0} = L_0$$

L_0 即各相零序电感, $x_0 = \omega_N L_0$ 为零序电抗。

2. 回路电压方程的派克变换

定子三相回路电压方程式(4.2)用矩阵表示时如下式所示:

$$\mathbf{u}_{abc} = \mathrm{d}\Psi_{abc}/\mathrm{d}t - r\mathbf{i}_{abc} \quad (4.28)$$

式中

$$\mathbf{u}_{abc} = [u_a \quad u_b \quad u_c]^T$$

上式等号两边左乘 \mathbf{P} , 计及式(4.16)、(4.18)和(4.20), 可得

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{dqp} &= \mathbf{P} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} [\mathbf{P}^{-1} \Psi_{dqp}] - r \mathbf{P} \mathbf{P}^{-1} \mathbf{i}_{dqp} \\ &= \mathbf{P} \left[\mathbf{P}^{-1} \frac{\mathrm{d}\Psi_{dqp}}{\mathrm{d}t} + \left(\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \mathbf{P}^{-1} \right) \Psi_{dqp} \right] - r \mathbf{i}_{dqp} \\ &= \frac{\mathrm{d}\Psi_{dqp}}{\mathrm{d}t} + \mathbf{P} \frac{\mathrm{d}\mathbf{P}^{-1}}{\mathrm{d}t} \Psi_{dqp} - r \mathbf{i}_{dqp} \end{aligned}$$

式中

$$\mathbf{P} \frac{\mathrm{d}\mathbf{P}^{-1}}{\mathrm{d}t} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega & 0 \\ \omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

所以派克变换后的定子电压方程为

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega & 0 \\ \omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \end{bmatrix} - r \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

转子各回路方程式(4.3)不含有定子量, 所以不必变换。

将式(4.29)展开, 并重写式(4.3)可得如下的同步电机派克方程式:

$$\left. \begin{aligned} u_d &= \frac{d\psi_d}{dt} - \omega\psi_q - r i_d \\ u_q &= \frac{d\psi_q}{dt} + \omega\psi_d - r i_q \\ u_o &= \frac{d\psi_o}{dt} - r i_o \\ u_f &= \frac{d\psi_f}{dt} + r_f i_f \\ 0 &= \frac{d\psi_D}{dt} + r_D i_D \\ 0 &= \frac{d\psi_Q}{dt} + r_Q i_Q \end{aligned} \right\} \quad (4.30)$$

坐标变换后,在定子电压 u_d 和 u_q 的方程中出现两项电势:一项是由磁链变化感应的电势($d\psi_d/dt$ 和 $d\psi_q/dt$),简称为变压器电势;另一项与转子转速成正比的电势 $\omega\psi_q$ 和 $\omega\psi_d$,简称旋转电势或发电机电势。

坐标变换后磁链方程变为线性代数方程组, u_d 和 u_q 两个电压方程式由于存在发电机电势,因而成为随 ω 变化的非线性微分方程。在研究电力系统短路和稳定问题时,由于电机转速变化很小, ω 可当作常数处理。这样,电压方程组也都是线性微分方程,它们的求解将大为简化。

4.2.4 标么制表示的派克方程式

电力系统暂态分析计算中,一般采用标么制。在第2章中已讨论了系统三相对称稳态分析所用的标么制,规定了各基准值之间的关系。选择三相功率基准值 S_B 和线电压有效值基准值 U_B 后,就可确定其他各基准值。现扩展应用到暂态分析。

1. 定子侧基准值

在暂态过程中,往往三相不对称,而且电压和电流都是非正弦波,所以需要分析计算相电压、电流和功率的瞬时值。使用标么制时要先选定相应的基准值。通常三相瞬时功率的基准值与稳态三相功率基准值 S_B 相同;相电压瞬时值的基准值 u_B 则取相电压有效值基准值的 $\sqrt{2}$ 倍,即

$$u_B = \sqrt{2} U_{\varphi B} = \sqrt{2/3} U_B \quad (4.31)$$

电流瞬时值基准值取电流有效值基准值的 $\sqrt{2}$ 倍

$$i_B = \sqrt{2} I_B = \frac{\sqrt{2} S_B}{\sqrt{3} U_B} \quad (4.32)$$

阻抗基准值

$$Z_B = \frac{u_B}{i_B} = \frac{U_B}{I_B} = \frac{U_B}{\sqrt{3} I_B} = \frac{U_B^2}{S_B} \quad (4.33)$$

与稳态分析所用的基准值相同。三相功率基准值用 u_B, i_B 表示时为

$$S_B = \sqrt{3} U_B I_B = \sqrt{3} \times \sqrt{3/2} \times u_B \times \frac{i_B}{\sqrt{2}} = \frac{3}{2} u_B i_B \quad (4.34)$$

另外,角频率或发电机角速度、频率、自感 L 、互感 M 、磁链和时间 t 等也用标么值表示,它们的基准值之间的关系取为

$$\left. \begin{aligned} \omega_B &= 2\pi f_B \\ L_B &= M_B = Z_B / \omega_B \\ \phi_B &= L_B i_B = (Z_B / \omega_B) i_B = u_B / \omega_B \\ t_B &= 1 / \omega_B \end{aligned} \right\} \quad (4.35)$$

一般取额定频率 f_N (50Hz) 为频率的基准值,即 $f_B = f_N$ 。相应地, $\omega_B = 2\pi f_N = \omega_N$ 为额定角频率或角速度,因而 t_B 为发电机转子在额定转速时转过一个(电)弧度所需的时间。

规定了基准值后,即可计算各物理量的标么值。例如角频率的标么值 $\omega_* = \frac{\omega}{\omega_B} = \frac{2\pi f}{2\pi f_B} = f_*$, 即频率与角频率(速度)的标么值相等。如果 $f = f_N$, 则 $f_* = \omega_* = 1$ 。又如时间的标么值 $t_* = t/t_B = \omega_B t = \omega_N t$ (rad)。时间的标么值与众不同,它具有单位(rad),但仍是无量纲的。同理,时间常数的标么值 $T_* = T/t_B = \omega_B T$ (rad)。

下面列出用标么值表示的一些基本关系式:

$$\begin{aligned} x_* &= \frac{\omega L}{Z_B} = \frac{\omega L}{\omega_B L_B} = \omega_* L_* \\ \phi_* &= \frac{\phi}{\phi_B} = \frac{L i}{L_B i_B} = L_* i_* = \frac{x_*}{\omega_*} i_* \\ e_* &= \frac{e}{u_B} = \frac{\omega \phi}{\omega_B \phi_B} = \omega_* \phi_* \end{aligned}$$

式中, e 为发电机电势。当 $\omega_* = 1$ 时有: $x_* = L_*$; $\phi_* = x_* i_*$; $e_* = \phi_*$ 。

上述表明,在 $\omega_* = 1$ 的条件下,自(互)感抗与相应的自(互)感系数的标么值相等,发电机电势与相应磁链的标么值相等。一个物理量可以用标么值相等的另一物理量代替,这是标么制的一个特点。

具有正弦波形的相电压

$$u = U_m \sin(\omega t + \theta)$$

用标么值表示:

$$u_* = \frac{U_m}{u_B} \sin\left(\frac{\omega}{\omega_B} \omega_B t + \theta\right) = U_{m*} \sin(\omega_* t_* + \theta)$$

$\omega_* = 1$ 时, $u_* = U_{m*} \sin(t_* + \theta)$ 。注意上式中的 θ 要用弧度单位。

对于三相对称正弦电压, 相电压的有效值 $U = U_m / \sqrt{2}$, 所以

$$U_{m*} = \frac{U_m}{u_B} = \frac{\sqrt{2}U}{\sqrt{2}U_{\varphi B}} = U_*$$

即相电压幅值的标么值与有效值的标么值相等, 也等于线电压有效值的标么值。

2. 转子各绕组的基准值

转子侧各量的基准值有很多种选择方法, 这里介绍常用的一种基准值系统: x_{ad} 基准值系统。

先讨论励磁绕组的基准值。设定子一相绕组和励磁绕组的等值匝数分别为 ω 和 ω_f , 则匝数比 $k_{af} = \omega / \omega_f$ 。励磁绕组电压和磁链的基准值按下两式确定:

$$u_{fB} = u_B / k_{af}, \quad \psi_{fB} = \psi_B / k_{af}$$

为了使标么制表示的磁链方程中, 转子和定子间的互感成为可互逆的, 按 x_{ad} 基准值系统条件, 即励磁绕组基准电流 i_{fB} 产生的磁势和定子三相对称基准电流产生的合成磁势相等的原则选择 i_{fB} , 有

$$i_{fB} \omega_f = \frac{3}{2} i_B \omega$$

所以

$$i_{fB} = \frac{3}{2} k_{af} i_B$$

按同样的原则确定励磁绕组自感基准值 L_{fB} 和它与定子的互感基准值 M_{afB} 之间的关系:

$$L_{fB} i_{fB} = \frac{3}{2} M_{afB} i_B$$

即

$$L_{fB} = \frac{3}{2} \frac{i_B}{i_{fB}} M_{afB} = M_{afB} / k_{af}$$

变比通常由实验来测定。

其他各基准值间的关系为

$$u_{fB} = \omega_B \psi_{fB} = Z_{fB} i_{fB}$$

$$\psi_{fB} = L_{fB} i_{fB} = \frac{3}{2} M_{afB} i_B$$

由以上各式可得

$$\psi_B = k_{af} L_{fB} i_{fB} = M_{afB} i_{fB} = L_B i_B$$

纵轴和横轴阻尼绕组各基准值的选择和励磁绕组相同,各基准值间的关系如下:

$$u_{DB} = u_B/k_{aD} = \omega_B \psi_{DB} = Z_{DB} i_{DB}$$

$$i_{DB} = \frac{3}{2} k_{aD} i_B$$

$$\psi_{DB} = L_{DB} i_{DB} = \frac{3}{2} M_{aDB} i_B$$

$$\psi_B = k_{aD} \psi_{DB} = M_{aDB} i_{DB}$$

$$u_{QB} = u_B/k_{aQ} = \omega_B \psi_{QB} = Z_{QB} i_{QB}$$

$$i_{QB} = \frac{3}{2} k_{aQ} i_B$$

$$\psi_{QB} = L_{QB} i_{QB} = \frac{3}{2} M_{aQB} i_B$$

$$\psi_B = k_{aQ} \psi_{QB} = M_{aQB} i_{QB}$$

式中, k_{aD} 和 k_{aQ} 分别为定子相绕组与纵、横阻尼组的等值匝数比。

另外,励磁绕组与纵轴阻尼绕组间的互感基准值 M_{rB} 由下式确定:

$$\psi_{fB} = M_{rB} i_{DB}$$

由于 $\psi_{fB}/\psi_{DB} = k_{aD}/k_{af}$, $i_{DB}/i_{fB} = k_{aD}/k_{af}$, 所以 $\psi_{DB} = M_{rB} i_{fB}$ 。

确定了基准值之后,推导标么制派克方程就不困难了。需要说明, u_d 、 u_q 、 u_0 、 i_d 、 i_q 、 i_0 和 ψ_d 、 ψ_q 、 ψ_0 都是定子的量,其基准值应为 u_B 、 i_B 和 ψ_B 。

在磁链方程式(4.27)中, ψ_d 方程的等号两边同除以 $\psi_B (= L_{rB} i_B = M_{afB} i_{fB} = M_{aDB} i_{DB})$, 可得

$$\frac{\psi_d}{\psi_B} = -\frac{L_d i_d}{L_{rB} i_B} + \frac{m_{af} i_f}{M_{afB} i_{fB}} + \frac{m_{aD} i_D}{M_{aDB} i_{DB}}$$

即

$$\psi_{d*} = -L_d i_{d*} + m_{af*} i_{f*} + m_{aD*} i_{D*} \quad (4.36)$$

在式(4.27)中, ψ_f 方程的等号两边同除以 $\psi_{fB} (= \frac{3}{2} M_{afB} i_B = L_{fB} i_{fB} = M_{rB} i_{DB})$, 可得

$$\frac{\psi_f}{\psi_{fB}} = -\frac{\frac{3}{2} m_{af} i_d}{\frac{3}{2} M_{afB} i_B} + \frac{L_f i_f}{L_{fB} i_{fB}} + \frac{M_r i_D}{M_{rB} i_{DB}}$$

即

$$\psi_{f*} = -m_{af*} i_{d*} + L_{f*} i_{f*} + m_{r*} i_{D*} \quad (4.37)$$

同理,可得其他磁链方程:

$$\left. \begin{aligned} \psi_{q*} &= -L_{q*}i_{q*} + m_{aQ*}i_{Q*} \\ \psi_{0*} &= -L_{0*}i_{0*} \\ \psi_{D*} &= -m_{aD*}i_{d*} + m_{r*}i_{f*} + L_{D*}i_{D*} \\ \psi_{Q*} &= -m_{aQ*}i_{q*} + L_{Q*}i_{Q*} \end{aligned} \right\} \quad (4.38)$$

可见,转子采用上述基准值系统时,标么制磁链方程的互感都变为可互逆的。

用标么制时, $m_{ad*} = L_{ad*}$, $m_{aQ*} = L_{aq*}$, 而 m_{af*} , m_{aD*} 和 m_{r*} 三者与 m_{ad*} 差别很小,实际上可取 $m_{af*} = m_{aD*} = m_{r*} = m_{ad*} = L_{ad*}$ 。同时,各绕组自感等于漏感与互感之和,即 $L_{f*} = L_{f\sigma*} + L_{ad*}$, $L_{D*} = L_{D\sigma*} + L_{ad*}$, $L_{d*} = L_{\sigma*} + L_{ad*}$, $L_{Q*} = L_{Q\sigma*} + L_{aq*}$, $L_{q*} = L_{\sigma*} + L_{aq*}$ 。各式中加下标 σ 者表示漏感。

由于电抗的标么值 $x_* = \omega_* L_*$ 或 $x_* = \omega_* M_*$, 所以各电感标么值可用 $\omega_* = 1$ 时的电抗标么值代替。

标么制下的磁链方程可表示为(略去下标 $*$)

$$\left. \begin{aligned} \psi_d &= -x_d i_d + x_{ad} i_f + x_{ad} i_D \\ \psi_q &= -x_q i_q + x_{aq} i_Q \\ \psi_0 &= -x_0 i_0 \\ \psi_f &= -x_{ad} i_d + x_f i_f + x_{ad} i_D \\ \psi_D &= -x_{ad} i_d + x_{ad} i_f + x_D i_D \\ \psi_Q &= -x_{aq} i_q + x_Q i_Q \end{aligned} \right\} \quad (4.39)$$

在电压方程式(4.30)中 u_d 方程的等号两边同除以 $u_B (= \omega_B \psi_B = Z_B i_B)$:

$$\frac{u_d}{u_B} = \frac{d(\psi_d/\psi_B)}{d(\omega_B t)} - \frac{\omega \psi_q}{\omega_B \psi_B} - \frac{r i_d}{Z_B i_B}$$

可得

$$u_{d*} = \frac{d\psi_{d*}}{dt_*} - \omega_* \psi_{q*} - r_* i_{d*}$$

式(4.30)中 u_f 方程的等号两边同除以 $u_{fB} (= \omega_B \psi_{fB} = Z_{fB} i_{fB})$:

$$\frac{u_f}{u_{fB}} = \frac{d(\psi_f/\psi_{fB})}{d(\omega_B t)} + \frac{r_f i_f}{Z_{fB} i_{fB}}$$

则有

$$u_{f*} = \frac{d\psi_{f*}}{dt_*} + r_{f*} i_{f*}$$

上面两个电压方程用标么制或有名单位制表示时,形式上完全相同,其他各电压方程式的形式也都不变。在以后的分析中均采用标么制,为了书写方便起见,表示标么值的下标“ $*$ ”一律省去。

4.2.5 同步发电机的稳态运行

本节将应用派克方程式分析同步发电机稳态同步运行的情况。

在稳态同步运行时,三相电势、电压和电流都是三相对称、正弦波形的,而且 $\omega_r = 1$,励磁电流 i_f 为常数,所以 i_0 、 ϕ_0 及阻尼绕组电流 i_D 、 i_Q 均为零。

1. 同步发电机空载运行

空载运行时定子三相绕组没有电流, $i_d = i_q = i_0 = 0$,所以定子磁链 $\psi_d = x_{ad}i_f$ (用 ψ_{fd} 表示), $\psi_q = \psi_0 = 0$ 。定子三相磁链:

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \mathbf{P}^{-1} \begin{bmatrix} \psi_{fd} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_{fd} \cos \theta \\ \psi_{fd} \cos(\theta - 120^\circ) \\ \psi_{fd} \cos(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix}$$

式中, $\theta = \omega t + \theta_0 = t + \theta_0$ 。

定子三相空载磁链可用综合相量 $\dot{\Psi}_{fd}$ 表示,如图 4.6 所示,它与 d 轴重合。定子电压(见式 4.30)为: $u_d = 0$, $u_q = \omega \psi_d = \omega \psi_{fd}$, $u_0 = 0$,三相电压等于三相电势,可表示为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \mathbf{P}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \psi_{fd} \\ 0 \end{bmatrix} = \omega \psi_{fd} \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ -\sin(\theta - 120^\circ) \\ -\sin(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \\ &= E_q \begin{bmatrix} \cos(\theta + 90^\circ) \\ \cos(\theta + 90^\circ - 120^\circ) \\ \cos(\theta + 90^\circ + 120^\circ) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

式中, $E_q = \omega \psi_{fd}$ 为同步电机空载电势,同步运行时 $\omega = 1$,所以

$$E_q = \psi_{fd} = x_{ad}i_f \quad (4.40)$$

三相电势也可用综合相量 \dot{E}_q 表示,

它与 a 轴的相角差为 $\theta + 90^\circ$,即 \dot{E}_q 与 q 轴重合,如图 4.6 所示。

2. 同步发电机有负载运行

设发电机带有三相对称感性负载,功率因数为 $\cos \varphi$ (滞后),各相电势、端电压和电流(只写出 a 相)为

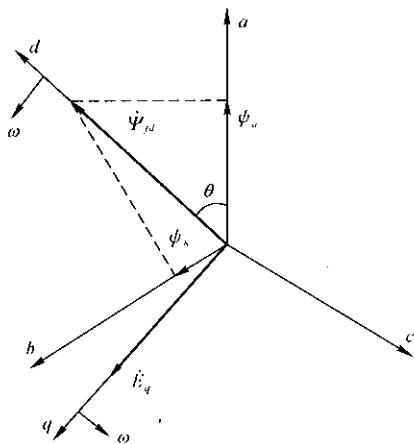


图 4.6 空载相量图

$$\begin{aligned}
 e_a &= E_q \cos(\theta + 90^\circ) \\
 u_a &= U \cos(\theta + 90^\circ - \delta) \\
 i_a &= I \cos(\theta + 90^\circ - \delta - \varphi)
 \end{aligned}$$

相量图见图 4.7。电压和电流的坐标变换值：

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_o \end{bmatrix} = \mathbf{P} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \sin \delta \\ U \cos \delta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} = \mathbf{P} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \sin(\delta + \varphi) \\ I \cos(\delta + \varphi) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

u_d, u_q, i_d, i_q 都是常数(直流), 是相量 \dot{U}, \dot{I} 在 d, q 轴的分量, 如图 4.7 所示。这些稳态值以下用大写字母表示。

稳态时派克方程式为

$$\left. \begin{aligned} \phi_d &= -x_d I_d + x_{ad} I_f \\ \phi_q &= -x_q I_q \\ \phi_f &= -x_{ad} I_d + x_f I_f \end{aligned} \right\} \quad (4.43)$$

$$\left. \begin{aligned} U_d &= -\phi_q - r I_d \\ U_q &= \phi_d - r I_q \\ U_f &= r_f I_f \end{aligned} \right\} \quad (4.44)$$

定子电压方程可表示为

$$\left. \begin{aligned} U_d &= x_q I_q - r I_d \\ U_q &= E_q - x_d I_d - r I_q \end{aligned} \right\} \quad (4.45)$$

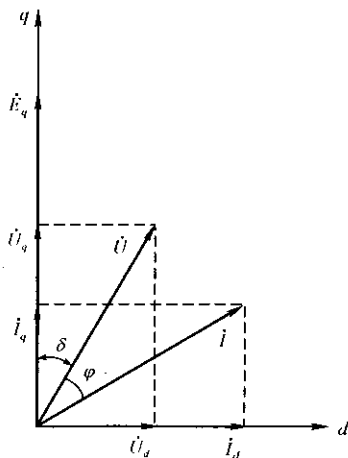


图 4.7 发电机相量图

同步发电机稳态运行特性可用式(4.43)、(4.44)和(4.45)描述。它的相量图和等值电路已在第2章中讨论过。

由式(4.45)解得

$$\begin{aligned}
 I_d &= \frac{x_q(E_q - U_q) - r U_d}{r^2 + x_d x_q} \\
 I_q &= \frac{r(E_q - U_q) + x_d U_d}{r^2 + x_d x_q}
 \end{aligned}$$

由于 $r \ll x_d, r \ll x_q$, 一般计算可取 $r = 0$, 所以

$$\left. \begin{aligned} I_d &= \frac{E_q - U_q}{x_d} \\ I_q &= \frac{U_d}{x_q} \end{aligned} \right\} \quad (4.46)$$

4.3 同步电机三相短路电磁暂态过程

本节讨论同步电机端部突然发生三相短路时的电磁暂态过程。由于这个问题比较复杂,所以先讨论没有阻尼绕组的同步电机,然后再分析有阻尼绕组同步电机的三相短路。虽然电力系统使用的凸极型水轮发电机和调相机都有阻尼绕组,隐极汽轮发电机的锻钢转子也相当于有阻尼绕组,同步电动机为便于起动也大多具有阻尼绕组,但研究无阻尼绕组电机仍有意义,因为它较简单,便于说明和掌握过程的物理本质。

在分析中假定:(1)在短路后的暂态过程中,电机转速保持不变, $\omega = 1$;(2)同步电机是理想的,磁路不饱和,因而可以应用叠加原理进行分析;(3)励磁直流电源看作没有内电阻和内电感的电压源,不计自动励磁调节器的作用,励磁电压保持不变,至于强行励磁的影响将在最后补充讨论。

在分析中还将应用超导体闭合线圈的磁链守恒原理,现简述如下。设一电阻为 r 的闭合线圈,在其本身电流 i 以及外磁场作用下线圈的总磁链为 ψ ,它的回路电压方程为

$$\frac{d\psi}{dt} = ri$$

设 $t = 0$ 时, $\psi = \psi(0)$,则 t 时刻的磁链

$$\psi(t) = r \int_0^t i dt + \psi(0)$$

如果线圈是超导体导线制成的,因 $r = 0$,所以 $\psi(t) = \psi(0)$ 并永远守恒。

对于 $r > 0$ 的实际线圈,由于 i 是连续的,当 $t = 0^+$ 时上式积分项为零,所以 $\psi(0^+) = \psi(0)$ 。这说明研究闭合线圈暂态过程开始瞬间情况,可将线圈看作超导体来处理。

4.3.1 无阻尼绕组同步电机突然三相短路

根据式(4.39)和(4.30),可得无阻尼绕组同步电机的派克方程:

$$\left. \begin{aligned} \psi_d &= -x_d i_d + x_{ad} i_f \\ \psi_q &= -x_q i_q \\ \psi_f &= -x_{ad} i_d + x_f i_f \\ u_d &= p\psi_d - \psi_q - r i_d \\ u_q &= p\psi_q + \psi_d - r i_q \\ u_f &= p\psi_f + r_f i_f \end{aligned} \right\} \quad (4.47)$$

式中用 p 代替 d/dt 。三相短路时定子三相电流仍是对称的, $i_0 = 0, \phi_0 = 0$, 所以 u_0 和 ϕ_0 方程不必列出。

机端三相短路时 $u_d = u_q = u_f = 0$, 所以 $u_d = u_q = 0$, 而 u_f 保持短路前的数值不变。将这三个已知条件代入式(4.47), 并计及各电流、磁链的初值, 可以解得 i_d, i_q , 再经坐标变换, 即得到三相电流的解。

现应用叠加原理求解。设短路前各量为 $U_{d(0)}, U_{q(0)}, I_{d(0)}, I_{q(0)}, \psi_{d(0)}, \psi_{q(0)}, I_{f(0)}, U_{f(0)}, \psi_{f(0)}$ 等, 称为正常分量, 它们是稳态方程式(4.43)、(4.44)的解, 都是常数。三相短路后, 各量看作正常分量与故障分量之和, 即: $u_d = U_{d(0)} + \Delta u_d, u_q = U_{q(0)} + \Delta u_q, i_d = I_{d(0)} + \Delta i_d, i_q = I_{q(0)} + \Delta i_q$ 等等, 将它们代入式(4.47), 并与式(4.43)、(4.44)(其中各量应加下标(0))按式相减, 即可得到如下描述各故障分量的关系式:

$$\Delta\psi_d = -x_d \Delta i_d + x_{ad} \Delta i_f \quad (4.48)$$

$$\Delta\psi_q = -x_q \Delta i_q \quad (4.49)$$

$$\Delta\psi_f = -x_{ad} \Delta i_d + x_f \Delta i_f \quad (4.50)$$

$$\Delta u_d = p\Delta\psi_d - \Delta\psi_q - r\Delta i_d \quad (4.51)$$

$$\Delta u_q = p\Delta\psi_q + \Delta\psi_d - r\Delta i_q \quad (4.52)$$

$$\Delta u_f = p\Delta\psi_f + r_f \Delta i_f \quad (4.53)$$

短路后 $u_d = U_{d(0)} + \Delta u_d = 0, u_q = U_{q(0)} + \Delta u_q = 0$, 所以 $\Delta u_d = -U_{d(0)} \times 1(t), \Delta u_q = -U_{q(0)} \times 1(t), 1(t)$ 为单位阶跃函数; 又 u_f 不变, 所以 $\Delta u_f = 0$, 以上3个为已知值。由于各电流、磁链不能突变, 所以短路瞬间($t = 0$)各 Δi 、 $\Delta\psi$ 均为零。因此, 用拉氏变换法求解故障分量方程式就比较方便。

上述叠加原理可用图4.8说明。图4.8(a)表示三相短路, 图4.8(b)是图4.8(a)的等值, 其中 $u_{a(0)}, u_{b(0)}$ 和 $u_{c(0)}$ 为短路前三相电压(时间正弦函数)。将图4.8(b)看作是图4.8(c)和图4.8(d)的叠加, 其中图4.8(c)是故障前的正常运行情况, 图4.8(d)是短路后故障分量的等值电路。因此, 故障分量可看作是在励磁绕组短接的空载运行同步电机上, 突然加三相电压 $-u_{a(0)}, -u_{b(0)}$ 和 $-u_{c(0)}$ 的结果, 或突然施加 $-U_{d(0)}$ 和 $-U_{q(0)}$ 阶跃电压的结果。

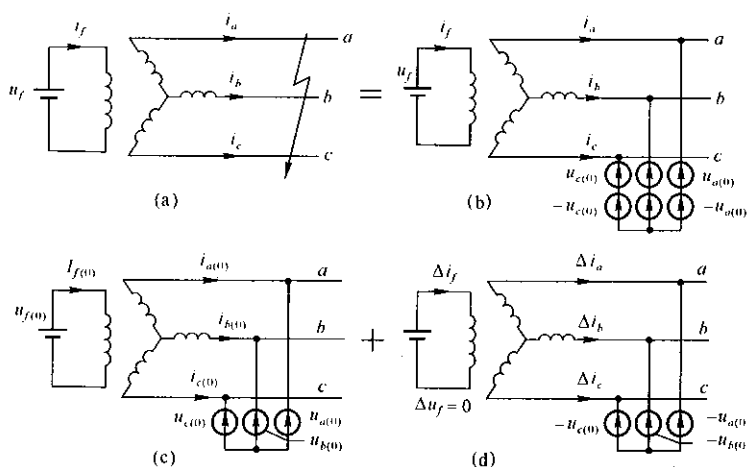


图 4.8 三相短路时叠加原理的应用

现用拉氏变换法求解式(4.48)~(4.53)。这些方程式拉氏变换后的形式不变,但 p 表示变换算符,各 Δi 、 $\Delta \psi$ 应理解为象函数 $\Delta i(p)$ 和 $\Delta \psi(p)$ 。式(4.51)、(4.52)中

$$\Delta u_d(p) = -\frac{U_{d(0)}}{p}; \Delta u_q(p) = -\frac{U_{q(0)}}{p} \quad (4.54)$$

将式(4.50)代入式(4.53)解得

$$\Delta i_f(p) = \frac{\Delta u_f(p)}{r_f + x_f p} + \frac{x_{ad} p}{r_f + x_f p} \Delta i_d(p) \quad (4.55)$$

将(4.55)式代入式(4.48)可得

$$\Delta \psi_d(p) = A(p) \Delta u_f(p) - X_d(p) \Delta i_d(p) \quad (4.56)$$

式中

$$A(p) = \frac{x_{ad}}{r_f + x_f p}; \quad X_d(p) = x_d - \frac{x_{ad}^2 p}{r_f + x_f p} \quad (4.57)$$

$X_d(p)$ 称为纵轴运算电抗。

将式(4.49)改写为

$$\Delta \psi_q(p) = -x_q \Delta i_q(p) \quad (4.58)$$

将式(4.56)、(4.58)和(4.54)代入式(4.51)和(4.52),联立解得

$$\begin{aligned} \Delta i_d(p) &= \frac{(x_q p^2 + x_q + r p) A(p)}{D(p)} \Delta u_f(p) \\ &\quad + \frac{(r + x_q p) U_{d(0)} + x_q U_{q(0)}}{p D(p)} \end{aligned} \quad (4.59)$$

$$\Delta i_q(p) = \frac{r A(p)}{D(p)} \Delta u_f(p) + \frac{[r + p X_d(p)] U_{q(0)} - X_d(p) U_{d(0)}}{p D(p)} \quad (4.60)$$

式中

$$D(p) = X_d(p)x_q p^2 + r[X_d(p) + x_q]p + r^2 + X_d(p)x_q \quad (4.61)$$

在励磁电压 $u_f = U_{f(0)}$ 不变时, $\Delta u_f = 0$, 各电流故障分量的方程式可简化为

$$\Delta i_d(p) = \frac{(r + x_q p)U_{d(0)} + x_q U_{q(0)}}{pD(p)} \quad (4.62)$$

$$\Delta i_q(p) = \frac{[r + pX_d(p)]U_{q(0)} - X_d(p)U_{d(0)}}{pD(p)} \quad (4.63)$$

$$\Delta i_f(p) = \frac{x_{ad}p}{r_f + x_f p} \Delta i_d(p) \quad (4.64)$$

上面三式经拉氏逆变换后即可得到时域解 $\Delta i_d(t)$ 、 $\Delta i_q(t)$ 和 $\Delta i_f(t)$, 然而逆变换仍然相当复杂。下面将从物理概念出发作一些简化, 以求得工程实用解。在此之前, 先介绍一个重要的等值电势和等值电抗。

1. 暂态电势和暂态电抗

磁链方程组式(4.47)中, 在纵轴方向 ψ_d 和 ψ_f 两磁链方程式中消去 i_f 可得

$$\psi_d = \frac{x_{ad}}{x_f} \psi_f - \left(x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_f} \right) i_d = \psi'_d - x'_d i_d \quad (4.65)$$

式中令

$$\begin{aligned} \psi'_d &= \frac{x_{ad}}{x_f} \psi_f \\ x'_d &= x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_f} \end{aligned} \quad (4.66)$$

x'_d 称为定子纵轴暂态电抗, ψ'_d 是定子纵轴的等值磁链, 它与励磁绕组合成磁链 $\psi_f = -x_{ad}i_d + x_f i_f$ 成正比。设由 ψ'_d 产生的定子旋转电势为 E'_q , 即 $E'_q = \omega \psi'_d = \psi'_d (\omega = 1)$, 式(4.65)可表示为

$$\psi_d = E'_q - x'_d i_d \quad (4.67)$$

在同步电机运行时, 励磁绕组经直流励磁电源形成闭合回路, 因此当电机运行状态突变瞬间, ψ_f 不会突变。 E'_q 与 ψ_f 成正比, 所以也具有不突变的性质。同步机正常运行时, 可用式(4.67)求出 E'_q 的值, 在运行状态突变瞬间, E'_q 的值不变, 因此可以用来计算突变后的运行情况。这是引入这一虚构电势的原因, 也因此称 E'_q 为暂态电势。

现在讨论 x'_d 的物理意义。

$\Delta u_f = 0$ 时, 式(4.56)简化为

$$\Delta \psi_d(p) = -X_d(p) \Delta i_d(p)$$

此式系描述励磁绕组短接时[见图 4.8(d)]纵轴磁链与电流的暂态关系。

设 $\Delta i_d(t) = \Delta i_d \times 1(t)$, 即一阶跃电流, 则 $\Delta i_d(p) = \Delta i_d/p$ 。可以应用拉氏变换初值定理求加入阶跃电流瞬间, 即 $t = 0$ 时,

$$\Delta \psi_d(0) = \lim_{p \rightarrow \infty} [\Delta \psi_d(p)] = \lim_{p \rightarrow \infty} \left[-p X_d(p) \frac{\Delta i_d}{p} \right] = -X_d(\infty) \Delta i_d$$

式中 $X_d(\infty) = \lim_{p \rightarrow \infty} X_d(p) = \lim_{p \rightarrow \infty} \left(x_d - \frac{x_{ad}^2 p}{r_f + x_f p} \right) = x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_f} = x'_d$, 所以 $\Delta \psi_d(0) = -x'_d \Delta i_d$ 。

还可应用终值定理求 $t = \infty$ 时的纵轴磁链

$$\Delta \psi_d(\infty) = \lim_{p \rightarrow 0} [p \Delta \psi_d(p)] = \lim_{p \rightarrow 0} \left[-p X_d(p) \frac{\Delta i_d}{p} \right] = -x_d \Delta i_d$$

以上说明暂态过程开始时的定子纵轴同步电抗为 x'_d , 至稳态时则恢复到 x_d 。这种现象可以用励磁绕组磁链守恒来说明。前已述及, 研究同步电机磁链关系时, 定子三相绕组可以用与转子一起旋转的等值 d 绕组和 q 绕组来模拟。图 4.9(a) 表示加上阶跃电流瞬间 d 轴方向磁通(标么值与磁链相等) 分布情况。 Δi_d 产生的磁通 $-x_{ad} \Delta i_d$ 突然穿入励磁绕组, 后者感应出电流 Δi_f , 使它的磁链不发生突变, 即 $t = 0$ 时

$$\Delta \psi_f = (x_{fa} + x_{ad}) \Delta i_f - x_{ad} \Delta i_d = 0 \quad (4.68)$$

结果迫使通过 d 轴气隙的合成磁链 $\Delta \psi'_{ad} (= x_{ad} \Delta i_f - x_{ad} \Delta i_d)$, 从励磁绕组的漏磁路径上通过, 如图 4.9(b) 所示。

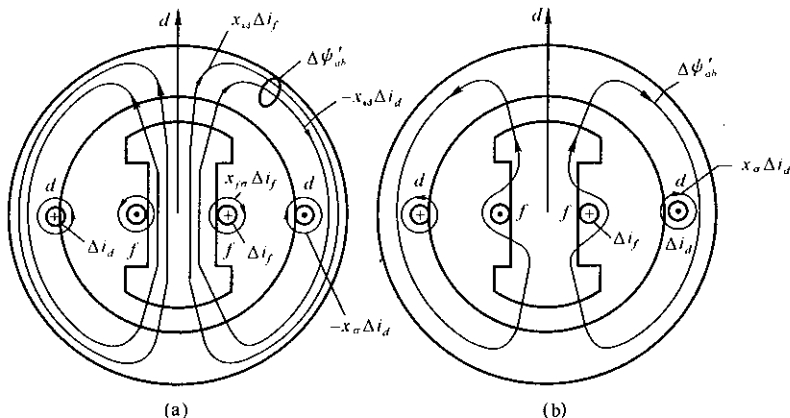


图 4.9 $t = 0$ 时 d 轴方向磁通示意图

由式(4.68)可求出励磁绕组电流为 $\Delta i_f = (x_{ad}/x_f) \Delta i_d$ 。根据图 4.9 可写出定子 d 绕组的磁链为

$$\Delta \psi_d(0) = -x_d \Delta i_d - x_{ad} \Delta i_d + x_{ad} \left(\frac{x_{ad}}{x_f} \Delta i_d \right)$$

$$= - \left(x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_f} \right) \Delta i_d = - x'_d \Delta i_d$$

这与前面方程式求解的结果一致。

再研究图 4.9(b) 定子 d 绕组磁通路径的磁导。设 λ_σ 和 $\lambda_{f\sigma}$ 分别为定子绕组和励磁绕组漏磁路径的磁导, λ_{ad} 为正常稳态时纵轴电枢反应磁通路径的磁导。由于铁心磁导与气隙磁导相比可看作无限大, 所以 λ_{ad} 等于纵轴气隙的磁导。由于磁阻为磁导的倒数, 因而可从图 4.9(b) 得出定子绕组磁通(包括漏磁和 $\Delta\psi'_{ad}$) 路径的等值磁导为

$$\lambda_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{\lambda_{ad}} + \frac{1}{\lambda_{f\sigma}}}$$

x_σ 、 x_{ad} 、 x_f 分别与 λ_σ 、 λ_{ad} 、 λ_f 成正比且比例系数相同, 因此定子绕组的等值电抗为

$$x_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{f\sigma}}} = (x_d - x_{ad}) + \frac{x_{ad}x_{f\sigma}}{x_{ad} + x_{f\sigma}} = x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_f} = x'_d$$

这同样也说明 $t = 0$ 时, 定子纵轴同步电抗为 x'_d , 而且表明 $x_\sigma < x'_d < x_d$ 。

励磁绕组具有电阻, 没有电源支持的 Δi_f 将衰减消失, 所以 $t = \infty$ 时, Δi_d 产生的电枢反应磁通全部从励磁绕组中穿过, $\Delta\psi_d(\infty) = -x_\sigma\Delta i_d - x_{ad}\Delta i_d = -x_d\Delta i_d$, 所以定子纵轴的稳态电抗为 x_d 。

另外, 如励磁绕组的电阻 $r_f = 0$ (超导体), 由式(4.57)可知 $X_d(p) = x'_d$, 所以 $\Delta\psi_d(t) = -x'_d\Delta i_d$, 即纵轴电抗永远为 x'_d 。这是由于 ψ_f 守恒不变, 定子纵轴电枢反应的磁通永远只能从励磁绕组的漏磁路径通过之故。

定子 d 绕组与励磁绕组是两个相对静止的磁耦合线圈, 相当于双绕组变压器, 如图 4.10(a) (励磁绕组短接时) 所示。若 Δi_d 是阶跃电流, 则 $t = 0$ 时的等值电路见图 4.10(b), 显然, 定子纵轴等值电抗为 x'_d 。如果 Δi_d 是交流电流, 则电抗永远为 x'_d 。如果 Δi_d 为直流电流, 则稳态时 $\Delta i_f = 0$, 定子纵轴电抗为 x_d 。

在横轴方向转子上没有绕组, 所以在任何情况下的横轴同步电抗都是 x_q , 这从式(4.58)也可看出。

一般同步电机各电抗的标么值(以额定容量、电压为基准)可参看下一节

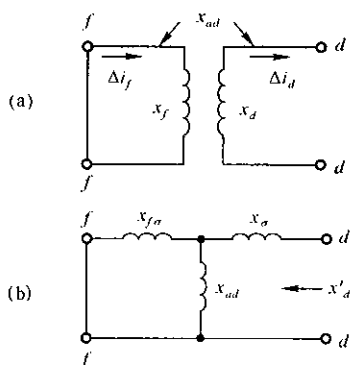


图 4.10 x'_d 等值电路

中的表 4.1。

最后讨论正常稳态运行时暂态电势的计算。由式(4.67)、(4.44)、(4.45)可得

$$E'_q = U_q + x'_d I_d + r I_q$$

或

$$E'_q = E_q - (x_d - x'_d) I_d \quad (4.69)$$

只要已知 U_q 、 I_d 、 I_q 或 E_q 、 I_d ，就可由这两式之一求得 E'_q (x_d 、 x'_d 、 r 等电机参数已知)。用相量表示时， \dot{E}'_q 、 \dot{E}_q 和 \dot{U}_q 都与 q 轴重合。

忽略不计定子电阻压降时，

$$I_d = \frac{E'_q - U_q}{x_d} = \frac{E_q - U_q}{x_d}$$

图 4.11 为同步电机稳态等值电路(不计定子电阻)。

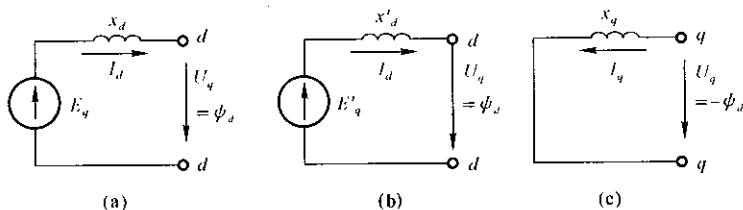


图 4.11 同步电机稳态等值电路

最后还要强调指出， E'_q 这一虚构电势之所以取名“暂态电势”，是因为在电机运行状态突变瞬间，它的数值不变，从而可以把突变前后的情况联系起来，使暂态过程分析得到简化。 E'_q 并不是在暂态过程中产生的，而是在稳态时就存在，并且还可以计算它的数值。

2. 不计各绕组电阻时三相短路电流

如果电机的各绕组都是由零电阻的超导体绕制而成的，那就使短路电流的求解非常简单，但所得的结果仅是实际电机短路后的初始情况。

在 $r = 0$ 和 $r_f = 0$ 时，式(4.57)、(4.61)可简化为

$$X_d(p) = x'_d; \quad D(p) = x'_d x_q (p^2 + 1)$$

式(4.62)、(4.63)可简化为

$$\left. \begin{aligned} \Delta i_d(p) &= \frac{U_{d(0)} p + U_{q(0)}}{p(p^2 + 1)x'_d} = \frac{U_{q(0)}}{x'_d} \left(\frac{1}{p} - \frac{p}{p^2 + 1} \right) + \frac{U_{d(0)}}{x'_d} \frac{1}{p^2 + 1} \\ \Delta i_q(p) &= \frac{U_{q(0)} p - U_{d(0)}}{p(p^2 + 1)x_q} = -\frac{U_{d(0)}}{x_q} \left(\frac{1}{p} - \frac{p}{p^2 + 1} \right) + \frac{U_{q(0)}}{x_q} \frac{1}{p^2 + 1} \end{aligned} \right\} \quad (4.70)$$

拉氏反变换后，得到时域解：

$$\left. \begin{aligned} \Delta i_d(t) &= \frac{U_{q(0)}}{x_d} - \frac{U_{q(0)}}{x_d} \cos t + \frac{U_{d(0)}}{x_d} \sin t \\ &= \frac{U_{q(0)}}{x_d} - \frac{U_{(0)}}{x_d} \cos(t + \delta_0) = \Delta i_{dn} + \Delta i_{d\omega} \\ \Delta i_q(t) &= -\frac{U_{d(0)}}{x_q} + \frac{U_{d(0)}}{x_q} \cos t + \frac{U_{q(0)}}{x_q} \sin t \\ &= -\frac{U_{d(0)}}{x_q} + \frac{U_{(0)}}{x_q} \sin(t + \delta_0) = \Delta i_{qn} + \Delta i_{q\omega} \end{aligned} \right\} \quad (4.71)$$

式中计及 $U_{d(0)} = U_{(0)} \sin \delta_0$, $U_{q(0)} = U_{(0)} \cos \delta_0$ 。

Δi_d 和 Δi_q 各含有两个分量,一是阶跃性质的直流分量(Δi_{dn} 和 Δi_{qn}),另一为 $\omega = 1$ 的同步频率交流分量($\Delta i_{d\omega}$ 和 $\Delta i_{q\omega}$)。由于励磁绕组磁链守恒, Δi_d 中两个分量都取决于 x_d' 。由式(4.71)可见,短路瞬间($t = 0^+$), $\Delta i_d = \Delta i_q = 0$,说明电感中的电流不能突变,但它们的各个分量却都是突然出现的。

短路后的电流为正常分量与故障分量之和,正常分量 $I_{q(0)} = U_{d(0)}/x_q$, $I_{d(0)} = (E_{q(0)} - U_{q(0)})/x_d$,所以

$$\left. \begin{aligned} i_d &= I_{d(0)} + \Delta i_d = U_{q(0)} \left(\frac{1}{x_d} - \frac{1}{x_d} \right) \\ &\quad + \frac{E_{q(0)}}{x_d} - \frac{U_{(0)}}{x_d} \cos(t + \delta_0) = i_{dn} + \Delta i_{d\omega} \\ i_q &= I_{q(0)} + \Delta i_q = \frac{U_{(0)}}{x_q} \sin(t + \delta_0) = \Delta i_{q\omega} \end{aligned} \right\} \quad (4.72)$$

i_d 包括直流(非周期)分量 i_{dn} 和同步频率周期分量 $\Delta i_{d\omega}$ 。 i_q 只有同步频率周期分量。

当 $r = r_f = 0$ 时,式(4.64)可简化为 $\Delta i_f(p) = (x_{ad}/x_f) \Delta i_d(p)$,时域解为 $\Delta i_f(t) = (x_{ad}/x_f) \Delta i_d(t)$ 。由式(4.66)可得 $x_{ad}/x_f = (x_d - x_d')/x_{ad}$,正常分量 $I_{f(0)} = E_{q(0)}/x_{ad}$,所以

$$\begin{aligned} i_f(t) &= I_{f(0)} + \Delta i_f = \frac{E_{q(0)}}{x_{ad}} + \frac{x_d - x_d'}{x_{ad}} \left[\frac{U_{q(0)}}{x_d} - \frac{U_{(0)}}{x_d} \cos(t + \delta) \right] \\ &= I_{f(0)} + \Delta i_{fn} + \Delta i_{f\omega} \end{aligned} \quad (4.73)$$

它包含正常电流 $I_{f(0)}$ 、非周期分量 Δi_{fn} 和同步频率周期分量 $\Delta i_{f\omega}$ 。 Δi_{fn} 、 $\Delta i_{f\omega}$ 分别与 Δi_{dn} 、 $\Delta i_{d\omega}$ 成正比。

i_d 和 i_q 经坐标反变换,即可得到定子三相短路电流。例如 a 相电流

$$\begin{aligned} i_a &= i_d \cos(t + \theta_0) - i_q \sin(t + \theta_0) \\ &= i_{dn} \cos(t + \theta_0) + [\Delta i_{d\omega} \cos(t + \theta_0) - \Delta i_{q\omega} \sin(t + \theta_0)] \\ &= \left(\frac{U_{q(0)}}{x_d} - \frac{U_{q(0)}}{x_d} + \frac{E_{q(0)}}{x_d} \right) \cos(t + \theta_0) - \frac{U_{(0)}}{2} \frac{x_d' + x_q}{x_d x_q} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \times \cos(\delta_0 - \theta_0) - \frac{U_{(0)}}{2} \frac{x_q - x'_d}{x_d x_q} \cos(2t + \delta_0 + \theta_0) \\ & = i_{au} + i_{an} + i_{a(2\omega)} \end{aligned} \quad (4.74)$$

将式中 θ_0 换为 $\theta_0 - 120^\circ$ 或 $\theta_0 + 120^\circ$, 即得到 i_b 或 i_c 的表达式。

由式(4.74)可见,三相短路时定子各相电流包含三个分量:

同步频率交流分量(简称周期分量) 为 $\omega = 1$ 的三相对称正序电流,幅值等于 i_d 中的非周期分量 i_{dn} 。机端发生三相短路后,定子三相成为短接的纯电感电路(定子 $r = 0$),三相电流的周期分量只产生同步的纵轴电枢反应磁势,且对励磁绕组起去磁作用,而 i_q 中没有非周期分量。假设短路后励磁电流保持为 $I_{f(0)}$ 不变,则 i_d 中的非周期分量 i_n 将从 $I_{d(0)}$ 突然增大到 $E_{q(0)}/x_d$ 。然而由于同步的纵轴电枢反应磁通突然增加,励磁绕组为了保持磁链守恒,势必出现非周期电流 Δi_{fn} ,这又使定子空载电势 $E_q = (I_{f(0)} + \Delta i_{fn})x_{ad}$ 突然增大,结果使定子电流周期分量的幅值增大到 $E_{q(0)}/x_d + U_{q(0)}(1/x'_d - 1/x_d)$ 。 i_{dn} 中的 $U_{q(0)}(1/x'_d - 1/x_d)$ 分量与 Δi_{fn} 对应,是励磁绕组保持磁链守恒的结果。实际电机的励磁绕组存在电阻,无直流电源支持的 Δi_{fn} 将会衰减而消失, i_{dn} 中与其对应的分量也将随之而消失,所以两者都是自由电流。

非周期分量 它的大小与发生短路瞬间转子的位置角 θ_0 有关。当 $\theta_0 = \delta_0$ 或 $\theta_0 = 180^\circ + \delta_0$ 瞬间(亦即 a 相电压瞬时值过零瞬间)发生短路时, a 相电流非周期分量的绝对值将达到最大。同理, b 相或 c 相电压瞬时值过零时刻发生短路时, b 或 c 相电流非周期分量的绝对值将达到最大。但不管哪一时刻发生短路,三相非周期电流的代数和恒为零,它们产生的气隙合成磁场在空间静止不动。以同步转速旋转的励磁绕组切割这一固定磁通,将感应出同步频率的电流周期分量 $\Delta i_{f\omega}$ 。

倍频交流分量 此分量是 2 倍同步频率的三相对称正序电流,它们产生的气隙合成磁场与转子同向旋转,但转速快 1 倍,也会使励磁绕组感应出同步频率的交流电流 $\Delta i_{f\omega}$ 。

上述非周期和倍频交流分量都是定子三相绕组磁链守恒的产物。因为三相短路形成的 3 个短接线圈的磁链将保持 $t = 0$ 时刻的值不变,如图 4.12 中实线所示。磁链是电流与电感的乘积,恒定不变的磁链必须由直流电流来支持,又因 $\psi_{a(0)} + \psi_{b(0)} + \psi_{c(0)} = 0$,所以三相直流电流的代数和为零。另外,定子各相绕组的等值电感是周期性变化的,其标么值在 x'_d 和 x_q 之间以两倍同步频率变化,所以还要出现倍频交流电流才能保持磁链不变。 x'_d 与 x_q 差别愈小,倍频交流电流也愈小。直流电流分量应与 x'_d 和 x_q 的平均值成反比,在式(4.74)中该平均值以 $2x'_d x_q / (x'_d + x_q)$ 的形式出现。实际上因电机定子三相绕组具有电

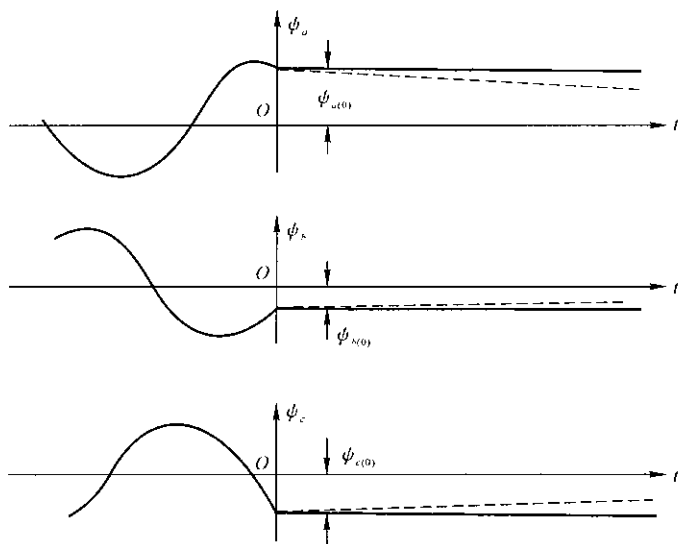


图 4.12 三相短路前后定子各相的磁链

阻, 它们的磁链将会衰减消失, 如图 4.12 中虚线曲线所示, 所以定子直流和倍频交流电流也将随之变化。 Δi_{dw} 和 Δi_{qw} 是这两个定子电流分量的坐标变换的结果, 励磁绕组的 Δi_{fw} 也与这两电流分量相对应, 也将以相同的规律衰减至零。

3. 考虑各绕组电阻时三相短路电流

前面在不计电阻情况下推导了短路电流的各个分量, 实际上它们只是各分量的起始值。本小节讨论计及电阻时, 短路电流的变化规律和各自由分量衰减的时间常数。原则上, 对式(4.62)~(4.64)进行逆变换就可得出严格的答案, 然而十分复杂。所以, 下面从物理概念出发作出近似而实用的简化处理。

(1) 定子电流非周期和倍频交流分量的衰减

定子电流的这两个分量是由三相绕组磁链守恒引起的, 所以它们衰减的时间常数为定子绕组的等值电感和等值电阻之比。理论分析和实验结果表明, 定子绕组的等值电阻主要决定于本身的电阻 r , 励磁绕组电阻 r_f 影响很小, 可以略去不计。 Δi_{dw} 和 Δi_{qw} 是定子非周期和倍频交流电流的坐标变换结果, 因此可以根据 Δi_d 和 Δi_q [式(4.62)和(4.63)] 分母 $pD(p)$ 的根求出时间常数。令 $r_f = 0$, 可得

$$pD(p) = p[x_d'x_qp^2 + r(x_d' + x_q)p + r^2 + x_d'x_q] \triangleq 0$$

它有三个根: 第一个 $p_1 = 0$, 表明 Δi_d 和 Δi_q 中有直流分量, 因设 $r_f = 0$ 所以不衰减; 另两个根为

$$p_{2,3} = -\frac{r(x'_d + x_q)}{2x'_d x_q} \pm j\sqrt{1 - \frac{r^2}{4}\left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_q}\right)^2}$$

$$= -\frac{1}{T_a} \pm j\omega'$$

式中

$$T_a = \frac{2x'_d x_q}{x'_d + x_q} / r \quad (4.75)$$

$$\omega' = \sqrt{1 - \frac{r^2}{4}\left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_q}\right)^2}$$

这表明 Δi_d 和 Δi_q 中角频率为 ω' 的周期分量, 其衰减的时间常数为 T_a 。大中型同步电机的 ω' 与 1 相差极小, 实际上可看作同步频率。

由式(4.75)可见, T_a 是定子电抗 x'_d 和 x_q 的一种平均值与定子电阻之比, 可以理解为励磁绕组短接时定子绕组的一种平均时间常数。

(2) 定子电流周期分量的衰减

定子周期分量电流是由励磁电流非周期分量($I_{f(0)} + \Delta i_{fn}$)对应的定子旋转电势产生的, 因此求解这一分量时, 式(4.51)和(4.52)中的变压器电势 $p\Delta\phi_d$ 和 $p\Delta\phi_q$ 可以略去不计, 即

$$\Delta u_d(p) = -U_{d(0)}/p = -\Delta\phi_q(p) - r\Delta i_d(p)$$

$$\Delta u_q(p) = -U_{q(0)}/p = \Delta\phi_d(p) - r\Delta i_q(p)$$

将式(4.56)、(4.58)代入上两式, 计及 $\Delta u_f = 0$, 可联立解得

$$\Delta i_d(p) = \frac{rU_{d(0)} + x_q U_{q(0)}}{p[r^2 + X_d(p)x_q]}$$

$$\Delta i_q(p) = \frac{rU_{q(0)} - X_d(p)U_{d(0)}}{p[r^2 + X_d(p)x_q]}$$

式中

$$X_d(p) = x_d - \frac{x_{ad}^2 p}{r_f + x_f p} = \frac{x_d r_f + (x_d x_f - x_{ad}^2) p}{r_f + x_f p}$$

$$= \frac{x_d r_f + x_f x'_d p}{r_f + x_f p} = \frac{x_d + T_f x'_d p}{1 + T_f p}$$

这里, $T_f = x_f / r_f$ 是励磁绕组本身的时间常数。

将 $X_d(p)$ 代入整理后可得

$$\Delta i_d(p) = \frac{(rU_{d(0)} + x_q U_{q(0)})(1 + T_f p)}{p[r^2 + x_d x_q + (r^2 + x'_d x_q)T_f p]}$$

$$\Delta i_q(p) = \frac{(rU_{q(0)} - x_d U_{d(0)}) + (rU_{q(0)} - x'_d U_{d(0)})T_f p}{p[r^2 + x_d x_q + (r^2 + x'_d x_q)T_f p]}$$

两式中的分母除了一个零根 $p_1 = 0$ 外, 还有一个负实数根 $p_2 = -\frac{r^2 + x_d x_q}{(r^2 + x_d x_q)T_f}$, 它的负倒数用 T'_d 表示:

$$T'_d = \frac{r^2 + x_d x_q}{r^2 + x_d x_q} T_f \quad (4.76)$$

应用拉氏逆变换的分解定理, 可求得

$$\left. \begin{aligned} \Delta i_d(t) &= \frac{rU_{d(0)} + x_q U_{q(0)}}{r^2 + x_d x_q} + \left[\frac{rU_{d(0)} + x_q U_{q(0)}}{r^2 + x_d x_q} - \frac{rU_{d(0)} + x_q U_{q(0)}}{r^2 + x_d x_q} \right] e^{-t/T'_d} \\ \Delta i_q(t) &= \frac{rU_{q(0)} - x_d U_{d(0)}}{r^2 + x_d x_q} + \left[\frac{rU_{q(0)} - x_d U_{d(0)}}{r^2 + x_d x_q} - \frac{rU_{q(0)} - x_d U_{d(0)}}{r^2 + x_d x_q} \right] e^{-t/T'_d} \end{aligned} \right\} \quad (4.77)$$

这两个电流只有非周期分量, 即 Δi_{dn} 和 Δi_{qn} 。可见不计 u_d 和 u_q 两个方程式中的变压器电势, 可以求得计及 r 的非周期分量电流。

对于大中型同步电机, r 只有 x'_d 的 1% ~ 2% 或更小, 而 $x_q > x'_d$, 所以式 (4.77) 中可取 $r = 0$, 这样

$$\begin{aligned} \Delta i_{dn} &= \frac{U_{q(0)}}{x_d} + \left(\frac{U_{q(0)}}{x_d} - \frac{U_{q(0)}}{x_d} \right) e^{-t/T'_d} \\ \Delta i_{qn} &= -\frac{U_{d(0)}}{x_q} \end{aligned}$$

Δi_{dn} 中自由分量的衰减时间常数为 T'_d , 而 Δi_{qn} 可认为无自由分量。

由于 $I_{d(0)} = \frac{E_{q(0)} - U_{q(0)}}{x_d} = \frac{E'_{q(0)} - U_{q(0)}}{x_d}$, 所以 Δi_{dn} 中的自由分量初值 $\frac{U_{q(0)}}{x_d} - \frac{U_{q(0)}}{x_d} = \frac{E'_{q(0)}}{x_d} - \frac{E_{q(0)}}{x_d}$ 。

忽略不计 r 时, 式 (4.76) 可简化为

$$T'_d = \frac{x'_d T_f}{x_d} = \frac{1}{r_f} \left(x_{fa} + \frac{x_{ad} x_a}{x_{ad} + x_a} \right) \quad (4.78)$$

由此可得图 4.13 所示的计算 T'_d 的等值电路。可见, T'_d 是定子绕组短路时励磁绕组的时间常数。这是不难理解的, 因为三相短路时定子电流周期分量中的自由分量是由励磁绕组磁链守恒引起的, 所以衰减时间常数由定子绕组短路时励磁绕组的等

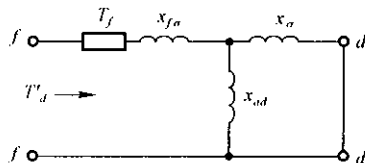


图 4.13 计算 T'_d 的等值电路

值电抗和电阻决定。实际上, T'_d 是励磁绕组电流中非周期自由分量 Δi_{fn} 的衰减时间常数。

同步电机的 T_f 、 T_a 、 T'_d 的典型值见 4.3 节中的表 4.2, T_a 约为 T'_d 的 10% ~ 25%。

考虑电流的各自由分量衰减时, 三相短路电流为

$$i_d = I_{d(0)} + \Delta i_d = \left(\frac{E'_{q(0)}}{x_d} - \frac{E_{q(0)}}{x_d} \right) e^{-t/T'_d} + \frac{E_{q(0)}}{x_d} - \frac{U_{(0)}}{x_d} e^{-t/T_a} \cos(t + \delta_0) \quad (4.79)$$

$$i_q = I_{q(0)} + \Delta i_q = \frac{U_{(0)}}{x_q} e^{-t/T_a} \sin(t + \delta_0) \quad (4.80)$$

$$i_a = \left[\left(\frac{E'_{q(0)}}{x_d} - \frac{E_{q(0)}}{x_d} \right) e^{-t/T'_d} + \frac{E_{q(0)}}{x_d} \right] \cos(t + \theta_0) - \frac{U_{(0)}}{2} \times \frac{x'_d + x_q}{x_d x_q} \cos(\delta_0 - \theta_0) e^{-t/T_a} - \frac{U_{(0)}}{2} \times \frac{x_q - x'_d}{x_d x_q} e^{-t/T_a} \cos(2t + \delta_0 + \theta_0) \quad (4.81)$$

可见 $t = 0$ 时, i_d 非周期分量的起始值 $i_{d0} = E'_{q(0)}/x'_d$ 也是定子电流周期分量的起始幅值。

励磁绕组电流

$$i_f = I_{f(0)} + \Delta i_f = \frac{E_{q(0)}}{x_{ad}} + \frac{x_d - x'_d}{x_{ad}} \left[\frac{U_{q(0)}}{x_d} e^{-t/T'_d} - \frac{U_{(0)}}{x_d} e^{-t/T_a} \cos(t + \delta_0) \right] \quad (4.82)$$

图 4.14 为同步电机空载运行、 $\theta_0 = 180^\circ$ 突然三相短路时的波形, 制作此图时为清晰起见, T_a 和 T'_d 均按比例减小。

在研究电力系统稳定等暂态过程时, 一般只考虑定子电流同步频率周期分量, 亦即只计及 i_d 和 i_q 中的非周期分量, 而忽略不计其他分量, 因此, 在 u_d 和 u_q 方程式中可以略去变压器电势分量, 不计定子绕组的暂态过程。简化后的定子电压和磁链方程式和正常稳态运行时的方程式在形式上完全相同, 也可用图 4.11 的等值电路表示, 但其中 $E_q = x_{ad} i_{fn} = x_{ad} (I_{f(0)} + \Delta i_{fn})$, 是励磁电流非周期分量产生的定子同步频率空载电势。

三相短路时, $u_d = u_q = 0$, 所以 $E_q = x_{ad} i_{dn}$, $E'_q = x'_d i_{dn}$, $E_q/E'_q = x_d/x'_d$ 。因此三相短路后, E_q 和 E'_q 的变化规律相同。但在发生短路瞬间, i_{fn} 突然增大 Δi_{fn} , 所以 E_q 会发生突变, 而 E'_q 则不会突变。

以上讨论了同步电机端部发生三相短路的电磁暂态过程。如果在外部

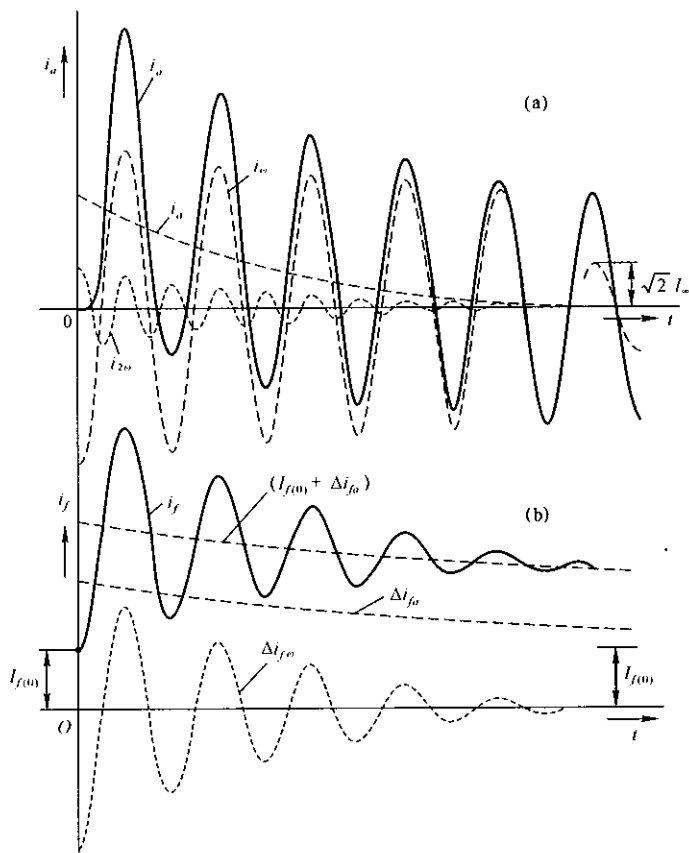


图 4.14 无阻尼绕组电机三相短路电流波形图

电路中发生三相短路, 短路点至发电机的电抗为 x_r , 则可将 x_r 看作定子漏抗的一部分, 上述分析结果仍然适用, 但各电流及时间常数表达式中的电抗要分别用 $x_{d\Sigma} = x_{ad} + (x_\sigma + x_r) = x_d + x_r$, $x_{q\Sigma} = x_q + x_r$ 和 $x'_{d\Sigma} = x'_d + x_r$ 代替, 端电压 $U_{(0)}$ 及其 d 、 q 轴分量要用短路点的正常电压代替。

【例 4.1】 一凸极发电机经外部电抗发生三相短路, 试求短路后 i_a 、 i_f 、 E_q 、 E'_q 和发电机端电压 U_t 。发电机参数: $x_d = 1.0$, $x_q = 0.6$, $x'_d = 0.3$, $x_\sigma = 0.15$, $r = 0.005$, $T_f = 5\text{s}$ 。外部电抗 $x_r = 0.15$ 。短路前故障点处电压 $U = 0.96$, 电流 $I = 0.9$, $\cos\varphi = 0.83$ 。以上各阻抗、电压、电流均为发电机额定值为基准时的标么值。设故障点 a 相电压瞬时值过零(由正变到零)时刻发生短路。

【解】 把外电抗看作发电机定子漏抗的一部分。

$$x_{d\Sigma} = 1 + 0.15 = 1.15$$

$$x_{q\Sigma} = 0.6 + 0.15 = 0.75$$

$$x'_{ds} = 0.3 + 0.15 = 0.45$$

(1) 正常运行计算(各量下标(0)均省去)

$$\text{取 } \dot{U} = 0.96 \angle 0^\circ, \dot{I} = 0.9 \angle -\cos^{-1}0.83 = 0.9 \angle -33.9^\circ,$$

$$\begin{aligned}\dot{E}_Q &= \dot{U} + jx_{qs}\dot{I} = 0.96 + j0.75 \times 0.9 \angle -33.9^\circ \\ &= 1.449 \angle 22.7^\circ\end{aligned}$$

$$\delta_0 = 22.7^\circ$$

$$\text{故障点正常电压分量: } U_q = 0.96 \cos 22.7^\circ = 0.886$$

$$U_d = 0.96 \sin 22.7^\circ = 0.370$$

$$\text{电流分量: } I_q = I \cos(\varphi + \delta_0) = 0.9 \cos 56.6^\circ = 0.495$$

$$I_d = 0.9 \sin 56.6^\circ = 0.751$$

空载电势和暂态电势:

$$E_q = U_q + x_{ds}I_d = 0.886 + 1.15 \times 0.751 = 1.749$$

$$E'_q = U_q + x'_{ds}I_d = 0.886 + 0.45 \times 0.751 = 1.224$$

发电机端电压及其分量:

$$\begin{aligned}\dot{U}_t &= \dot{U} + jx_e\dot{I} = 0.96 + j0.15 \times 0.9 \angle -33.9^\circ \\ &= 1.041 \angle 6.2^\circ\end{aligned}$$

$$U_{tq} = 1.041 \cos(22.7^\circ - 6.2^\circ) = 0.998$$

$$U_{td} = 1.041 \sin(22.7^\circ - 6.2^\circ) = 0.296$$

正常运行相量图示于图 4.15。

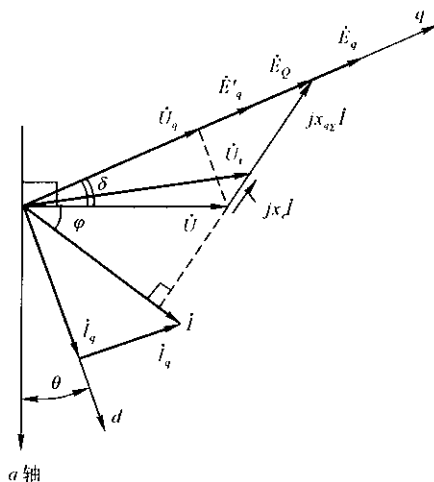


图 4.15 例 4.1 同步机相量图

(2) 三相短路计算

$$\begin{aligned}\text{时间常数 } T_a &= \frac{2x'_{d\Sigma}x_{q\Sigma}}{(x'_{d\Sigma} + x_{q\Sigma})r} = \frac{2 \times 0.45 \times 0.75}{(0.45 + 0.75) \times 0.005} \\ &= 112.5(\text{rad}) \\ &= \frac{112.5}{\omega_N} = \frac{112.5}{2\pi \times 50} = 0.358(\text{s})\end{aligned}$$

$$T'_d = T_f \frac{x_{d\Sigma}}{x_{d\Sigma}'} = 5 \times \frac{0.45}{1.15} = 1.96(\text{s})$$

根据题意: $U_{(0)}$ 垂直于 a 轴(a 相时间轴)时刻发生短路, 所以故障时刻转子位置角 $\theta_0 = \delta_0 = 22.7^\circ$ (参看图 4.15)。

将以上有关数据代入式(4.81), 得

$$\begin{aligned}i_a &= \left[\left(\frac{1.224}{0.45} - \frac{1.749}{1.15} \right) e^{-t/1.96} + \frac{1.749}{1.15} \right] \cos(\omega t + 22.7^\circ) \\ &\quad - \frac{0.96}{2} \times \frac{0.45 + 0.75}{0.45 \times 0.75} e^{-t/0.358} \\ &\quad - \frac{0.96}{2} \times \frac{0.74 - 0.45}{0.45 \times 0.75} e^{-t/0.358} \cos(2\omega t + 45.4^\circ) \\ &= (1.199e^{-t/1.96} + 1.521) \cos(\omega t + 22.7^\circ) \\ &\quad - 1.707e^{-t/0.358} - 0.427e^{-t/0.358} \cos(2\omega t + 45.4^\circ)\end{aligned}$$

上式中 t 单位用秒, ω 为 deg/s , 其他均为标么值。本例设 $\theta_0 = \delta_0$ 时刻发生短路, 所以 a 相电流的非周期分量达到最大值; 又由于 x_c 较大, 所以短路电流较小。

定子电流周期分量的幅值等于

$$i_{dn} = 1.199e^{-t/1.96} + 1.521$$

励磁绕组电流按式(4.82)计算

$$\begin{aligned}i_f &= \frac{1.749}{1 - 0.15} + \frac{1 - 0.3}{1 - 0.15} \left[\frac{0.886}{0.45} e^{-t/1.96} \right. \\ &\quad \left. - \frac{0.96}{0.45} e^{-t/0.358} \cos(\omega t + 22.7^\circ) \right] \\ &= 2.05 + 1.62e^{-t/1.96} - 1.757e^{-t/0.358} \cos(\omega t + 22.7^\circ)\end{aligned}$$

三相短路后的空载电势:

$$\begin{aligned}E_q &= i_{fn}x_{ad} = (2.05 + 1.62e^{-t/1.96})(1 - 0.15) \\ &= 1.380e^{-t/1.96} + 1.749\end{aligned}$$

或

$$\begin{aligned}E_q &= x_{d\Sigma}i_{dn} = 1.15 \times (1.199e^{0.7/1.96} + 1.521) \\ &= 1.38e^{-t/1.96} + 1.749\end{aligned}$$

$t = 0$ 时, $E_{q0} = 1.38 + 1.749 = 3.13$, 比 $E_{q(0)}$ 大 79%。

三相短路暂态电势:

$$E'_q = x'_d i_{dn} = 0.54e^{-t/1.96} + 0.684$$

$t = 0$ 时, $E'_{q0} = 1.224 = E'_{q(0)}$; $t = \infty$ 时, $E'_q = 0.684$ 。

发电机端电压:

$$\begin{aligned} U_{iq} &= x_e i_{dn} = 0.15 \times (1.199e^{-t/1.96} + 1.521) \\ &= 0.18e^{-t/1.96} + 0.228 \end{aligned}$$

或 $U_{iq} = E'_q - x'_d i_{dn} = 0.18e^{-t/1.96} + 0.228$

$$U_{id} = x_e i_{qn} = 0$$

$$U_i = U_{iq} = 0.18e^{-t/1.96} + 0.228$$

$t = 0$ 时, $U_{i0} = 0.408$; $t = \infty$ 时 $U_i = 0.228$ 。

根据上列各式制作的 E_q 、 E'_q 、 U_i 和 i_{dn} 随时间变化的曲线示于图 4.16。

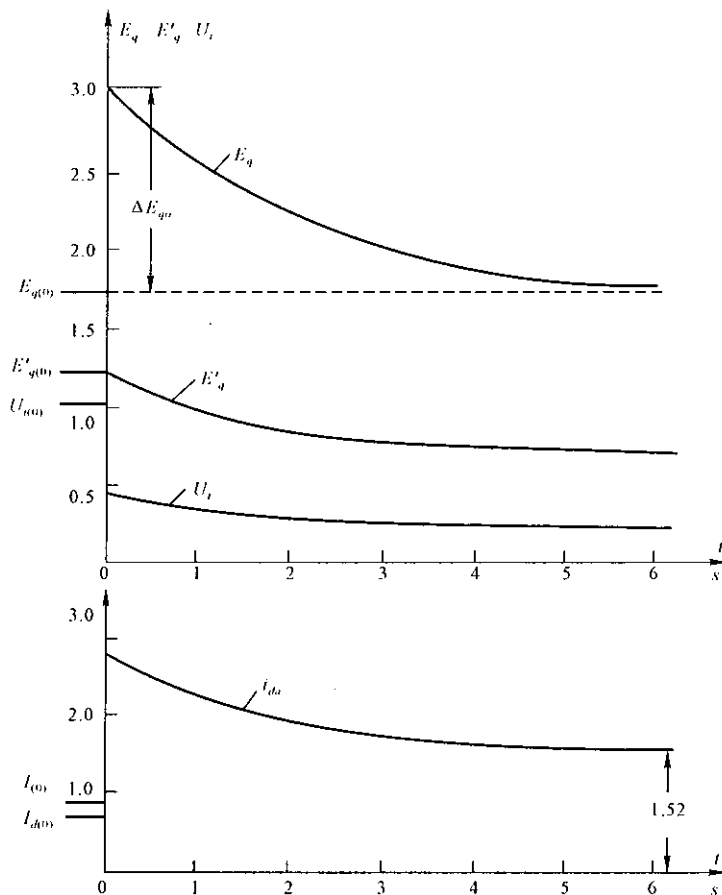


图 4.16 三相短路时 E_q 、 E'_q 、 U_i 和 i_{dn} 的变化曲线

4.3.2 有阻尼绕组同步电机三相短路

同步电机实际上都有真实的或等效的阻尼绕组,所以研究有阻尼绕组的同步电机的暂态过程有更普遍的意义。描述电磁过程的方程式为式(4.30)和(4.39),在对称条件下 ϕ_0 和 u_0 两个方程式可以取消。现仍用叠加原理分析机端三相短路,下面直接列出拉氏变换后的故障分量方程:

$$\Delta u_d = -U_{d(0)}/p = p\Delta\psi_d(p) - \Delta\psi_q(p) - r\Delta i_d(p) \quad (4.83)$$

$$\Delta u_q = -U_{q(0)}/p = p\Delta\psi_q(p) + \Delta\psi_d(p) - r\Delta i_q(p) \quad (4.84)$$

$$\Delta\psi_d(p) = -x_d\Delta i_d(p) + x_{ad}\Delta i_f(p) + x_{ad}\Delta i_D(p) \quad (4.85)$$

$$\Delta\psi_q(p) = -x_q\Delta i_q(p) + x_{aq}\Delta i_Q(p) \quad (4.86)$$

$$\Delta u_f = 0 = p\Delta\psi_f(p) + x_f\Delta i_f(p) \quad (4.87)$$

$$0 = p\Delta\psi_D(p) + r_D\Delta i_D(p) \quad (4.88)$$

$$\Delta\psi_f(p) = -x_{ad}\Delta i_d(p) + x_f\Delta i_f(p) + x_{ad}\Delta i_D(p) \quad (4.89)$$

$$\Delta\psi_D(p) = -x_{ad}\Delta i_d(p) + x_{ad}\Delta i_f(p) + x_D\Delta i_D(p) \quad (4.90)$$

$$0 = p\Delta\psi_Q(p) + r_Q\Delta i_Q(p) \quad (4.91)$$

$$\Delta\psi_Q = -x_{aq}\Delta i_q(p) + x_Q\Delta i_Q(p) \quad (4.92)$$

这组方程式相当于描述转子各绕组短接、空载运转的同步电机,在定子上加阶跃电压 $-U_{d(0)}$ 和 $-U_{q(0)}$ 时的电磁暂态过程。

方程式(4.87)至(4.90)消去 $\Delta\psi_f$ 和 $\Delta\psi_D$ 后可得

$$\left. \begin{aligned} \Delta i_f(p) &= \frac{x_{ad}(r_D + x_D p)p - x_{ad}^2 p^2}{D_r(p)} \Delta i_d(p) \\ \Delta i_D(p) &= \frac{x_{ad}(r_f + x_f p)p - x_{ad}^2 p^2}{D_r(p)} \Delta i_d(p) \end{aligned} \right\} \quad (4.93)$$

$$\text{式中} \quad D_r(p) = (x_f x_D - x_{ad}^2)p^2 + (x_f r_D + x_D r_f)p + r_f r_D \quad (4.94)$$

式(4.93)代入式(4.85)得

$$\Delta\psi_d(p) = -X_d(p)\Delta i_d(p) \quad (4.95)$$

其中

$$X_d(p) = x_d - \frac{x_{ad}^2(x_f + x_D - 2x_{ad})p^2 + x_{ad}^2(r_D + r_f)p}{D_r(p)} \quad (4.96)$$

称为定子纵轴运算电抗。

式(4.91)和(4.92)中消去 $\Delta\psi_Q$ 后,有

$$\Delta i_Q(p) = \frac{x_{aq}p}{r_Q + x_Q p} \Delta i_q(p) \quad (4.97)$$

代入式(4.86),得

$$\Delta\psi_q(p) = -X_q(p)\Delta i_q(p) \quad (4.98)$$

式中

$$X_q(p) = x_q - \frac{x_{aq}^2 p}{r_Q + x_Q p} \quad (4.99)$$

称为定子横轴运算电抗。

式(4.95)和(4.98)代入式(4.83)和(4.84),联立求解得:

$$\left. \begin{aligned} \Delta i_d(p) &= \frac{[r + pX_q(p)]U_{d(0)} + X_q(p)U_{q(0)}}{pD(p)} \\ \Delta i_q(p) &= \frac{[r + pX_d(p)]U_{q(0)} - X_d(p)U_{d(0)}}{pD(p)} \end{aligned} \right\} \quad (4.100)$$

式中

$$\begin{aligned} D(p) &= X_d(p)X_q(p)p^2 + r[X_d(p) + X_q(p)]p \\ &\quad + r^2 + X_d(p)X_q(p) \end{aligned} \quad (4.101)$$

下面分两步求各电流的时域解,先不计各绕组的电阻求得各分量的起始值,然后计及电阻分析各分量的衰减。在此之前,还要讨论次暂态电势和次暂态电抗的概念。

1. 次暂态电势和次暂态电抗

同步电机磁链方程组式(4.39)中,在纵轴方向 ψ_d, ψ_f 和 ψ_D 三个方程式消去 i_f 和 i_D 后,可得

$$\begin{aligned} \psi_d &= \frac{x_{ad}}{x_f x_D - x_{ad}^2} (x_{D\sigma} \psi_f + x_{f\sigma} \psi_D) - \left[x_d - \frac{x_{ad}^2 (x_f + x_D - 2x_{ad})}{x_f x_D - x_{ad}^2} \right] i_d \\ &= \psi_d'' - x_d'' i_d \end{aligned}$$

式中令

$$\begin{aligned} \psi_d'' &= \frac{x_{ad}}{x_f x_D - x_{ad}^2} (x_{D\sigma} \psi_f + x_{f\sigma} \psi_D) \\ x_d'' &= x_d - \frac{x_{ad}^2 (x_f + x_D - 2x_{ad})}{x_f x_D - x_{ad}^2} \end{aligned} \quad (4.102)$$

x_d'' 是定子纵轴的等值电抗,称为纵轴次暂态电抗, ψ_d'' 是与 ψ_f 和 ψ_D 成线性关系的定子纵轴等值磁链。设由 ψ_d'' 产生的定子旋转电势为 E_q'' ,用标么值表示时 $E_q'' = \psi_d'' (\omega = 1)$,则 ψ_d 的方程可表示为

$$\psi_d = E_q'' - x_d'' i_d \quad (4.103)$$

E_q'' 是一虚构的电势,称为横轴次暂态电势。同步电机运行状态突变时, ψ_f 和 ψ_D 都不会发生突变,因而 E_q'' 也不会突变,仍保持原先的值。

磁链方程组式(4.39)中,在横轴方向的 ψ_q 和 ψ_Q 两个方程消去 i_Q 后,有

$$\psi_q = \frac{x_{aq}}{x_Q} \psi_Q - \left(x_q - \frac{x_{aq}^2}{x_Q} \right) i_q = -\psi_q'' - x_q'' i_q$$

式中令

$$\dot{\psi}_q' = -\frac{x_{aq}}{x_Q}\dot{\psi}_Q; \quad x_q'' = x_q - \frac{x_{aq}^2}{x_Q} \quad (4.104)$$

x_q'' 是定子横轴的等值电抗,称为横轴次暂态电抗; ψ_q'' 为定子横轴方向等值磁链。设由 ψ_q'' 产生的定子旋转磁势为 E_d'' ,用标么值表示时 $E_d'' = \psi_q''(\omega = 1)$,则 ψ_q 可表示为

$$\psi_q = -E_d'' - x_q'' i_q \quad (4.105)$$

E_d'' 也是一虚构电势,称为纵轴次暂态电势。同步电机运行状态突变时, ψ_Q 不会突变,所以 E_d'' 也是连续的。

E_q'' 和 E_d'' 可在正常运行时求得,运行状态突变时它们的数值保持不变,所以可用来分析暂态过程开始时的运行状态。

下面分别说明 x_d'' 和 x_q'' 的物理意义。

设空载运行的同步发电机,励磁绕组短接,它和阻尼绕组中都没有电流。现在突然加入 $\Delta i_d(t) = \Delta i_d \times 1(t)$,式(4.95)变为

$$\Delta\psi_d(p) = -X_d(p)\Delta i_d/p$$

加入阶跃电流瞬间($t = 0$)有

$$\Delta\psi_d(0) = \lim_{p \rightarrow \infty} [p\Delta\psi_d(p)] = -X_d(\infty)\Delta i_d = -x_d''\Delta i_d$$

$$\text{式中} \quad X_d(\infty) = \lim_{p \rightarrow \infty} X_d(p) = x_d - \frac{x_{ad}^2(x_f + x_d - 2x_{ad})}{x_f x_D - x_{ad}^2} = x_d''$$

可见, x_d'' 是有阻尼绕组电机在暂态过程开始瞬间的定子纵轴同步电抗。该电抗还可以用图 4.17(a) 纵轴方向磁通分布情况来说明: $t = 0$ 时, Δi_d 产生的纵轴电枢反应磁通突然穿入励磁绕组和 d 轴阻尼绕组,使该两绕组感生电流 Δi_f 和 Δi_D 以保持各自的磁链不突变,即满足:

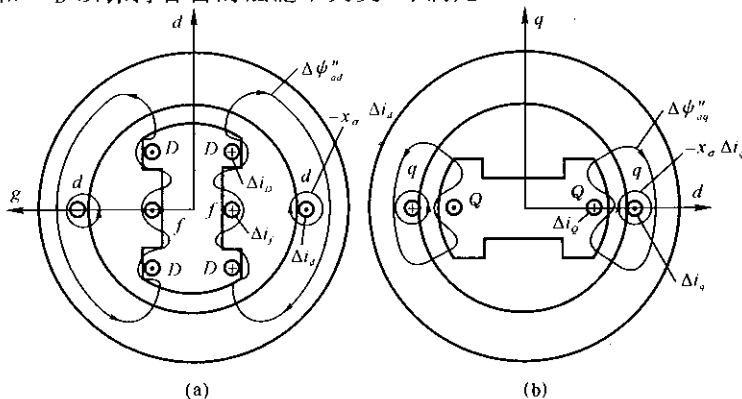


图 4.17 $t = 0$ 时 d 轴和 q 轴方向磁通示意图

$$\Delta\psi_f = x_f\Delta i_f + x_{ad}\Delta i_D - x_{ad}\Delta i_d = 0$$

$$\Delta\psi_D = x_{ad}\Delta i_f + x_D\Delta i_D - x_{ad}\Delta i_d = 0$$

从而迫使纵轴电枢反应 $\Delta\psi_{ad}^*$ 从 d 轴阻尼绕组和励磁绕组的漏磁路径上通过。设 $\lambda_{D\sigma}$ 为 d 轴阻尼绕组漏磁路径的磁导, 则定子绕组漏磁和 $\Delta\psi_{ad}^*$ 通路的等值磁导为

$$\lambda_{\sigma} + \frac{1}{\frac{1}{\lambda_{ad}} + \frac{1}{\lambda_{f\sigma}} + \frac{1}{\lambda_{D\sigma}}}$$

与磁导成正比的定子纵轴等值电抗为

$$x_{\sigma} + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{f\sigma}} + \frac{1}{x_{D\sigma}}} = x_{\sigma} + \frac{x_{f\sigma}x_{D\sigma}x_{ad}}{x_{ad}x_{f\sigma} + x_{ad}x_{D\sigma} + x_{f\sigma}x_{D\sigma}}$$

计及 $x_{\sigma} = x_d - x_{ad}$, $x_{f\sigma} = x_f - x_{ad}$ 和 $x_{D\sigma} = x_D - x_{ad}$, 上式变化为

$$\begin{aligned} x_d - x_{ad} + \frac{x_{ad}(x_fx_D - x_{ad}^2) - x_{ad}^2(x_f + x_D - 2x_{ad})}{x_fx_D - x_{ad}^2} \\ = x_d - \frac{x_{ad}^2(x_f + x_D - 2x_{ad})}{x_fx_D - x_{ad}^2} \end{aligned}$$

此电抗即 x_d^* , 上式还表明 $x_{\sigma} < x_d^* < x_d' < x_d$ 。

图 4.17(a) 中纵轴方向三个相对不动的绕组, 可用图 4.18(a) 表示。励磁和阻尼绕组短接时, 加上阶跃电流 Δi_d 瞬间的等值电路见图 4.18(b)。显然, 定

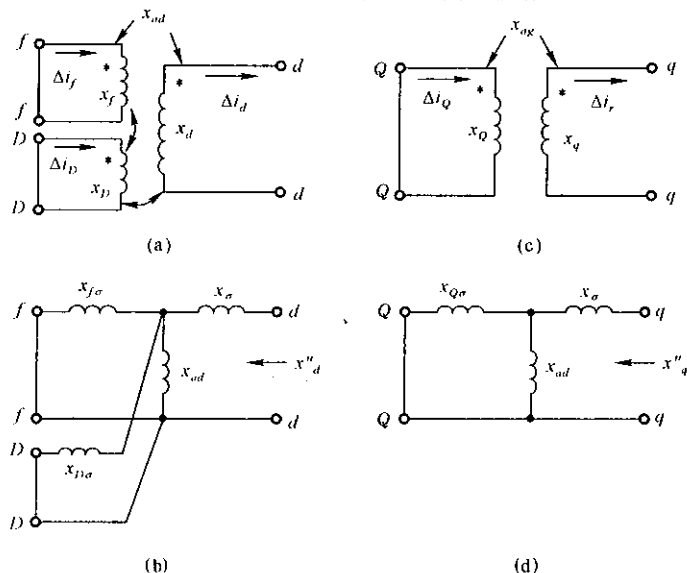


图 4.18 x_d^* 和 x_q^* 等值电路

子纵轴电抗为 x_d'' , Δi_d 为交流电流时的电抗亦为 x_d'' 。如 Δi_d 为稳态直流电流, 因 $\Delta i_f = \Delta i_D = 0$, 则定子纵轴电抗为 x_d 。另外, 在 $r_f = r_D = 0$ 时, $X_d(p) = x_d''$ 。

现在考虑 q 轴方向的情况。

设突然加入 $\Delta i_q(t) = \Delta i_q \times 1(t)$, 式(4.98)变为

$$\Delta \psi_q(p) = -X_q(p) \frac{\Delta i_q}{p}$$

$$t = 0 \text{ 时, } \Delta \psi_q(0) = \lim_{p \rightarrow \infty} [p \Delta \psi_q(p)] = -x_q'' \Delta i_q$$

因此, x_q'' 为定子暂态过程开始瞬间的定子横轴同步电抗, 这时 q 轴方向的磁通如图 4.17(b) 所示。因为 q 轴阻尼绕组的磁链守恒, 把横轴电枢反应 $\Delta \psi_{aq}''$ 挤到 Q 轴阻尼绕组漏磁路径上, 所以定子绕组磁通路径的等值磁导为

$$\lambda_a + \frac{1}{\frac{1}{\lambda_{aq}} + \frac{1}{\lambda_{Qa}}}$$

其中 λ_{aq} 为稳态时横轴电枢反应磁通路径的磁导, λ_{Qa} 为 Q 轴阻尼绕组漏磁路径磁导。相应的定子横轴等值电抗为

$$x_a + \frac{1}{\frac{1}{x_{aq}} + \frac{1}{x_{Qa}}} = x_q - x_{aq} + \frac{x_{aq} x_{Qa}}{x_{aq} + x_{Qa}} = x_q - \frac{x_{aq}^2}{x_{Qa}} = x_q''$$

上式表明 $x < x_q'' < x_q$ 。图 4.18(c) 和(d) 表示 x_q'' 的等值电路。另外, $r_q = 0$ 时, $X_q(p) = x_q''$ 。

一般同步电机各电抗标么值如表 4.1 所列。

表 4.1 同步电机的电抗

机型	汽轮发电机		水轮发电机		同步调相机	
电抗	范围	平均	范围	平均	范围	平均
x_d	1.5 ~ 2.3	1.9	0.8 ~ 1.3	0.98	1.5 ~ 2.5	1.8
x_q	1.5 ~ 2.3	1.9	0.45 ~ 0.88	0.64	0.7 ~ 1.3	0.96
x_d'	0.18 ~ 0.3	0.22	0.24 ~ 0.35	0.30	0.23 ~ 0.44	0.32
x_d''	0.1 ~ 0.2	0.14	0.16 ~ 0.25	0.20	0.12 ~ 0.25	0.17
x_q''	0.1 ~ 0.2	0.14	0.16 ~ 0.32	0.23	0.12 ~ 0.25	0.17

最后, 讨论正常稳态运行时 E_q'' 和 E_d'' 的计算。前已讨论过, 正常时

$$U_d = -\psi_q - rI_d = x_q I_q - rI_d$$

$$U_q = \psi_d - rI_q = E_q - x_d I_d - rI_q = E_q' - x_d' I_d - rI_q$$

ψ_d 、 ψ_q 用式(4.103)、(4.105)表示时,

$$U_d = E'_d + x''_q I_q - r I_d$$

$$U_q = E'_q - x''_d I_d - r I_q$$

由上面各式可推得

$$\left. \begin{aligned} E'_d &= U_d - x''_q I_q + r I_d \\ E'_q &= U_q + x''_d I_d + r I_q \end{aligned} \right\} \quad (4.106)$$

或 $E'_q = E_q - (x_d - x''_d) I_d = E'_q - (x'_d - x''_d) I_d$

忽略不计定子电阻压降时,有

$$I_d = \frac{E'_q - U_q}{x''_d}; \quad I_q = \frac{-E'_d + U_d}{x''_q} \quad (4.107)$$

用 E'_q 和 E'_d 表示的同步电机稳态运行等值电路(忽略 r) 如图 4.19(a) 所示。图 4.20 为相量图,其中定义: $\dot{E}'' = \dot{E}'_d + \dot{E}'_q$ 或 $E'' = \sqrt{E'^2_d + E'^2_q}$, 也称为次暂态电势。在同步电机运行状态突变瞬间, E'_d 和 E'_q 不会突变, 所以 E'' 也不会突变。

同步电机 x''_d 和 x''_q 相差很小, 在短路电流实用计算中常取 $x''_d = x''_q$ 。在这种条件下, 式(4.106) 可改写为

$$E'_d = U_d + jx''_d(jI_q) + r I_d$$

$$jE'_q = jU_q + jx''_d I_d + r(jI_q)$$

两式相加, 可得

$$\dot{E}'' = \dot{U} + (r + jx''_d) \dot{I} \quad (4.108)$$

由此得到 $x''_d = x''_q$ 时的稳态等值电路, 如图 4.19(b) 所示。

2. 不计各绕组电阻时三相短路电流

$r = r_f = r_D = r_Q = 0$ 时, $X_d(p) = x''_d, X_q(p) = x''_q$, 式(4.100) 简化为

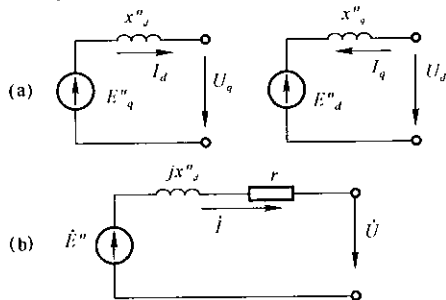


图 4.19 同步机稳态等值电路

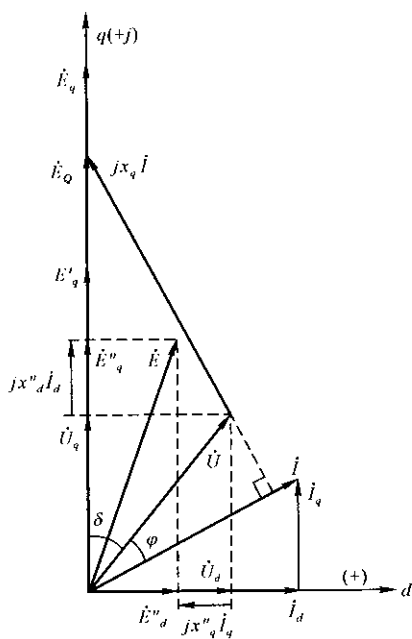


图 4.20 同步电机相量图

$$\Delta i_d(p) = \frac{U_{d(0)}p + U_{q(0)}}{p(p^2 + 1)x_d}$$

$$\Delta i_q(p) = \frac{U_{q(0)}p - U_{d(0)}}{p(p^2 + 1)x_q}$$

这两式与无阻尼绕组电机的式(4.70) 差别仅为 x'_d, x'_q 换为 x_d^*, x_q^* , 所以可套用式(4.71) 得

$$\begin{aligned}\Delta i_d(t) &= \frac{U_{q(0)}}{x_d} - \frac{U_{d(0)}}{x_d} \cos(t + \delta_0) \\ &= \Delta i_{dn} + \Delta i_{dw} \\ \Delta i_q(t) &= -\frac{U_{d(0)}}{x_q} + \frac{U_{q(0)}}{x_q} \sin(t + \delta_0) \\ &= \Delta i_{qn} + \Delta i_{qw}\end{aligned}$$

电流正常分量用式(4.107) 表示时, 有

$$\left. \begin{aligned}i_d &= I_{d(0)} + \Delta i_d = \frac{E_{q(0)}}{x_d} - \frac{U_{d(0)}}{x_d} \cos(t + \delta_0) = i_{dn} + \Delta i_{dw} \\ i_q &= I_{q(0)} + \Delta i_q = -\frac{E_{d(0)}}{x_q} + \frac{U_{q(0)}}{x_q} \sin(t + \delta_0) = i_{qn} + \Delta i_{qw}\end{aligned} \right\} \quad (4.109)$$

不计电阻时, 式(4.93)、(4.97) 的逆变换为

$$\begin{aligned}\Delta i_f(t) &= \frac{x_{ad}x_D}{x_f x_D - x_{ad}^2} \Delta i_d(t) \\ \Delta i_D(t) &= \frac{x_{ad}x_f}{x_f x_D - x_{ad}^2} \Delta i_d(t) \\ \Delta i_Q(t) &= \frac{x_{aq}}{x_Q} \Delta i_q(t)\end{aligned}$$

正常电流 $I_{f(0)} = E_{q(0)}/x_{ad}$, $I_{D(0)} = I_{Q(0)} = 0$, 所以

$$\begin{aligned}i_f &= \frac{E_{q(0)}}{x_{ad}} + \frac{x_{ad}x_D}{x_f x_D - x_{ad}^2} \left[\frac{U_{q(0)}}{x_d} - \frac{U_{d(0)}}{x_d} \cos(t + \delta_0) \right] \\ &= I_{f(0)} + \Delta i_{fn} + \Delta i_{fw}\end{aligned} \quad (4.110)$$

$$i_D = \frac{x_{ad}x_f}{x_f x_D - x_{ad}^2} \left[\frac{U_{q(0)}}{x_d} - \frac{U_{d(0)}}{x_d} \cos(t + \delta_0) \right] = \Delta i_{Dn} + \Delta i_{Dw}$$

$$i_Q = -\frac{x_{aq}}{x_Q} \left[\frac{U_{d(0)}}{x_q} - \frac{U_{q(0)}}{x_q} \sin(t + \delta_0) \right] = \Delta i_{Qn} + \Delta i_{Qw}$$

定子三相短路电流:

$$\begin{aligned}i_a &= i_d \cos \theta - i_q \sin \theta = \frac{E_{q(0)}}{x_d} \cos(t + \theta_0) + \frac{E_{d(0)}}{x_q} \sin(t + \theta_0) \\ &\quad - \frac{U_{(0)}}{2} \times \frac{x_d^* + x_q^*}{x_d x_q} \cos(\delta_0 - \theta_0)\end{aligned}$$

$$-\frac{U_{(0)}}{2} \times \frac{x_q'' - x_d''}{x_d x_q} \cos(2t + \delta_0 + \theta_0) \quad (4.111)$$

将式中 θ_0 分别换为 $\theta_0 - 120^\circ$ 、 $\theta_0 + 120^\circ$ ，即为 i_b 和 i_c 。

定子各相电流包含有三种分量：同步频率周期分量、非周期分量和倍频交流分量。这点与无阻尼绕组电机相同，但各分量大小不同。同步频率周期分量除了幅值等于 i_{dn} 的余弦分量外，还增加一个幅值为 i_{qn} 的正弦分量。下面根据物理概念作简单说明。

机端发生三相短路时，定子三相电路成为纯电感的短路电路（忽略 r ）。假设励磁电流保持为 $I_{f(0)}$ 不变，阻尼绕组都没有电流，则定子同步频率周期电流的纵轴分量 i_{dn} 将从 $I_{d(0)}$ 突然增大到 $E_{q(0)}/x_d$ ，横轴分量 i_{qn} 将从 $I_{q(0)}$ 突然减小到零。相应地，同步的电枢反应磁通纵轴分量突然增大，横轴分量突然消失。事实上，纵轴电枢反应突然增大时，励磁绕组和纵轴阻尼绕组都要感应出非周期电流 Δi_{fn} 和 Δi_{Dn} ，以保持各自的磁链不变，这使定子空载电势从 $E_{q(0)}$ 突然增大为 $E_{q0} = (I_{f(0)} + \Delta i_{fn} + \Delta i_{Dn})x_{ad}$ 。所以，实际上 $i_{dn} = E_{q0}/x_d$ ，也就是 $E_{q(0)}/x_d$ （读者自己证明）。同样，横轴同步电枢反应磁通突降为零，横轴阻尼绕组也会出现非周期电流 Δi_{qn} ，以保持 ψ_q 不变。在 Δi_{qn} 激励下，定子中将出现稳态运行时所没有的空载电势纵轴分量 $E_{d0} = x_{aq}\Delta i_{qn}$ ，并导致出现 $i_{qn} = E_{d0}/x_q = -E_{d(0)}/x_q$ 。实际上，电机各绕组都有电阻，没有电源支持的 Δi_{fn} 、 Δi_{Dn} 和 Δi_{qn} 都将衰减消失，它们都是自由电流。与此相应， i_{dn} 将从 $E_{q(0)}/x_d$ 衰减到 $E_{q(0)}/x_d$ ，两者之差是自由分量； i_{qn} 是自由电流，将衰减消失。

与无阻尼绕组电机相同，定子电流非周期和倍频交流分量是由定子三相绕组磁链守恒引起的。但在有阻尼绕组电机中，对这两个电流分量来说，相绕组的电抗在 x_d 和 x_q 之间波动。由于 x_d'' 与 x_q'' 的大小相当接近，所以倍频交流分量很小。定子中这两个电流分量产生的磁场，会使转子各绕组感应出交流电流 Δi_{fw} 、 Δi_{Dw} 和 Δi_{Qw} 。计及定子电阻时，它们将跟随定子中这两个电流分量同时衰减消失。

定子电流中同步频率周期分量的幅值或有效值（两者标么值相等）为

$$I'' = \sqrt{\left(\frac{E_{q(0)}}{x_d}\right)^2 + \left(\frac{E_{d(0)}}{x_q}\right)^2}$$

实际上，这是三相短路时定子电流周期分量的起始值，简称为起始次暂态电流。

在电力系统短路电流实用计算中，假设 $x_d'' = x_q''$ ，也就是完全不计本来就很小的倍频交流电流分量，同时 I'' 也简化为

$$I'' = \sqrt{E_{q(0)}^2 + E_{d(0)}^2}/x_d'' = E_{q(0)}/x_d'' \quad (4.112)$$

这样,就可用图 4.19(b) 所示的简化等值电路来计算 T'' 。

3. 计及各绕组电阻时三相短路电流

可以根据式(4.100)中 $\Delta i_d(p)$ 和 $\Delta i_q(p)$ 两式分母 $D(p)$ 的根,确定各自由分量衰减的时间常数。先令 $r_f = r_D = r_Q = 0$, 求出 $\Delta i_{d\omega}$ 和 $\Delta i_{q\omega}$, 亦即定子电流的非周期和倍频交流分量以及转子各绕组中交流电流衰减的时间常数。在该条件下

$$D(p) = x_d'' x_q'' p^2 + r(x_d'' + x_q'')p + r^2 + x_d'' x_q''$$

它有一对共轭复根,实部的负倒数 T_a 即所求的时间常数

$$T_a = \frac{1}{r} \times \frac{2x_d'' x_q''}{x_d'' + x_q''} \quad (4.113)$$

再令式(4.101)中的 $r = 0$, 求 i_d 和 i_q 中非周期分量亦即定子电流同步频率周期分量以及转子各绕组中电流非周期分量衰减的时间常数。

在 $r = 0$ 时有

$$D(p) = (p^2 + 1)X_d(p)X_q(p)$$

$$\Delta i_d(p) = \frac{U_{d(0)}p + U_{q(0)}}{p(p^2 + 1)X_d(p)}$$

$$\Delta i_q(p) = \frac{U_{q(0)}p - U_{d(0)}}{p(p^2 + 1)X_q(p)}$$

可见, i_d 中非周期分量的衰减时间常数由 $X_d(p)$ 的根确定, 而 i_q 中非周期分量的衰减时间常数则取决于 $X_q(p)$ 的根。

(1) i_q 非周期分量的衰减时间常数

$$X_q(p) = \frac{x_q r_Q + (x_q x_Q - x_{aq}^2)p}{r_Q + x_Q p} = \frac{x_q r_Q + x_Q x_q p}{r_Q + x_Q p}$$

它的根 $p_1 = -x_q r_Q / (x_q x_Q)$, 时间常数为

$$T_q'' = -\frac{1}{p_1} = \frac{x_Q}{r_Q} \times \frac{x_q''}{x_q} = T_{q0}'' \frac{x_q''}{x_q} \quad (4.114)$$

式中, $T_{q0}'' = x_Q / r_Q$ 为定子绕组开路时横轴阻尼绕组的时间常数。将式(4.104)的 x_q'' 代入上式, 计及 $x_Q = x_{Q\sigma} + x_{aq}$, 可得

$$T_q'' = \frac{1}{r_Q} \left(x_{Q\sigma} + \frac{x_{aq} x_{\sigma}}{x_{aq} + x_{\sigma}} \right)$$

参看图 4.21 可知, T_q'' 是定子绕组短路时横轴阻尼绕组的时间常数。 i_{qn} 是由 Δi_{qn} 所引起的, 所以时间常数应取决于 Q 绕组。

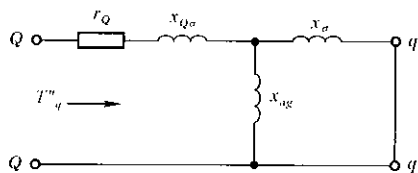


图 4.21 计算 T_q'' 的等值电路

(2) i_d 非周期分量的衰减时间常数

式(4.96)的 $X_d(p)$ 可改写成

$$X_d(p) = x_d \frac{x_f' x_D' \left(1 - \frac{x_{ad}^2}{x_f x_D} \right) p^2 + (x_f' r_D + x_D' r_f) p + r_f r_D}{x_f x_D \left(1 - \frac{x_{ad}^2}{x_f x_D} \right) p^2 + (x_f r_D + x_D r_f) p + r_f r_D} \quad (4.115)$$

式中 $x_{ad}' = \frac{x_o x_{ad}}{x_{ad} + x_o} = x_{ad} - \frac{x_{ad}^2}{x_d}$; $x_f' = x_f - \frac{x_{ad}^2}{x_d} = x_{fo} + x_{ad}'$; $x_D' = x_D - \frac{x_{ad}^2}{x_d} = x_{Do} + x_{ad}'$, 为 x_{ad} 与 x_o 的并联值。所以, x_f' 为定子绕组短路、阻尼绕组开路时励磁绕组的电抗; x_D' 为定子绕组短路、励磁绕组开路时纵轴阻尼绕组的电抗。

设 $\sigma = 1 - \frac{x_{ad}^2}{x_f x_D}$, $\sigma' = 1 - \frac{x_{ad}^2}{x_f' x_D'}$ 分别为定子绕组开路和短路时励磁绕组与纵轴阻尼绕组间的漏磁系数, 将式(4.115)的分子和分母同时除以 $r_f r_D$ 得

$$X_d(p) = x_d \frac{\sigma' T_f' T_D' p^2 + (T_f' + T_D') p + 1}{\sigma T_f T_D p^2 + (T_f + T_D) p + 1} \quad (4.116)$$

式中, $T_f = x_f / r_f$, $T_f' = x_f' / r_f$ 分别为定子绕组开路和短路、阻尼绕组开路时励磁绕组的时间常数; $T_D = x_D / r_D$, $T_D' = x_D' / r_D$ 分别为定子绕组开路和短路、励磁绕组开路时纵轴阻尼绕组的时间常数。

$X_d(p)$ 的根由下式决定

$$\sigma' T_f' T_D' p^2 + (T_f' + T_D') p + 1 = 0$$

它的两个根为

$$p_1 = -\frac{T_f' + T_D'}{\sigma' T_f' T_D'} \times \frac{1 - q'}{2}; \quad p_2 = -\frac{T_f' + T_D'}{\sigma' T_f' T_D'} \times \frac{1 + q'}{2}$$

其中, $q' = \sqrt{1 - \frac{4\sigma' T_f' T_D'}{(T_f' + T_D')^2}}$, 且是小于1的正实数, 所以两个根都是负实数。这说明 Δi_d 有两个非周期自由分量, 衰减时间常数分别为

$$\left. \begin{aligned} T_d' &= -\frac{1}{p_1} = \frac{\sigma' T_f' T_D'}{T_f' + T_D'} \times \frac{2}{1 - q'} = (T_f' + T_D') \frac{1 + q'}{2} \\ T_d'' &= -\frac{1}{p_2} = \frac{\sigma' T_f' T_D'}{T_f' + T_D'} \times \frac{2}{1 + q'} = (T_f' + T_D') \frac{1 - q'}{2} \end{aligned} \right\} \quad (4.117)$$

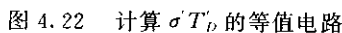
其中考虑了如下的关系式:

$$(1 - q')(1 + q') = 1 - q'^2 = \frac{4\sigma' T_f' T_D'}{(T_f' + T_D')^2}$$

一般同步电机 $q' \approx 0.7 \sim 0.8$, 所以 $T_d' > T_d''$ 。取 $1 + q' = 2$ (误差约 10% ~ 15%) 可得近似表达式:

大中型同步电机的 T'_f 比 T'_D 大好几倍, 所以可粗略地取 $T'_d \approx T'_f = T'_f(x'_d/x_d)$, $T''_d \approx \sigma' T'_D$, 而

图 4.22 示出求取 $\sigma' T'_D$ 的等值电路。因此, T'_d 可粗略地看作是定子绕组和励磁绕组均短路时, 纵轴阻尼绕组的时间常数。



还有一种常用的 T'_d 和 T''_d 计算式, 推导如下。先求式(4.116)分母的根, 该式分母和分子的结构相同, 两个根的结构也一样, 它们的负倒数分别为

其中

q 比 q' 更接近 1, 可认为 $1+q=2$ (误差约小于 5%), 所以下式误差不大:

一般同步电机 $T_f \gg T_D$, 所以

因此可近似地认为 T'_{d0} 是定子绕组和阻尼绕组均开路时,励磁绕组的时间常数; T_{d0} 是定子绕组开路、励磁绕组短路时,纵轴阻尼绕组的时间常数,相当于图 4.22 中 $d-d'$ 端断开的情况。

式(4.118)与(4.119)对应的时间常数之比为

可以证明

$$\frac{T'_f + T'_D}{T_f + T_D} \approx \frac{x'_d}{x_d}; \quad \frac{\sigma' T'_f T'_D}{\sigma T_f T_D} = \frac{x''_d}{x_d}$$

所以

$$\left. \begin{aligned} T'_d &\approx T'_{d0} \frac{x'_d}{x_d} \\ T''_d &\approx T''_{d0} \frac{x''_d}{x_d} \end{aligned} \right\} \quad (4.120)$$

T'_{d0} 和 T''_{d0} 是定子绕组开路时的时间常数, 因此与定子回路的情况无关。当同步电机经外部电抗短路时, 用式(4.120) 计算 T'_d 和 T''_d 非常方便。

表 4.2 列出同步电机各时间常数的典型值, 可见 $T'_d \ll T''_d, T'_d \approx T''_q$ 。

表 4.2 同步电机的时间常数(s)

	汽轮发电机	水轮发电机	同步调相机
T'_{d0}	3.5 ~ 11.5	4 ~ 10	5 ~ 10
T''_{d0}	0.07 ~ 0.22	0.06 ~ 0.11	0.02 ~ 0.06
T'_d	0.6 ~ 1.6	1.3 ~ 3	0.8 ~ 2.4
$T'_d \approx T''_q$	0.04 ~ 0.13	0.02 ~ 0.06	0.007 ~ 0.03
T''_d	0.08 ~ 0.4	0.08 ~ 0.4	0.1 ~ 0.3

上面分析表明, i_{dn} 中的自由分量包括两个部分, 一个按 T'_d 衰减, 另一个按 T''_d 衰减, 这就需要确定这两部分的起始值。前已述及, 当只求解 i_d, i_q 的非周期分量时, Δu_d 和 Δu_q 方程中的变压器电势可以不计。将式(4.83) 和(4.84) 除去这一电势且不计定子电阻 r , 再将式(4.95)、(4.98) 代入, 可解得

$$\Delta i_{dn}(p) = \frac{U_{q(0)}}{pX_d(p)}$$

它的逆变换(略去一些次要因素) 为

$$\Delta i_{dn}(t) = U_{q(0)} \left(\frac{1}{x_d} - \frac{1}{x_{dD}} \right) e^{-t/T'_d} + U_{q(0)} \left(\frac{1}{x_{dD}} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-t/T''_d} + \frac{U_{q(0)}}{x_d}$$

式中, $x_{dD} = (T'_d/T'_{d0})x'_d$ 。

对于大中型同步电机, $x_{dD} = (0.9 \sim 1)x'_d$, 在以下的讨论中近似地取 $x_{dD} = x'_d$ 。

计及正常分量

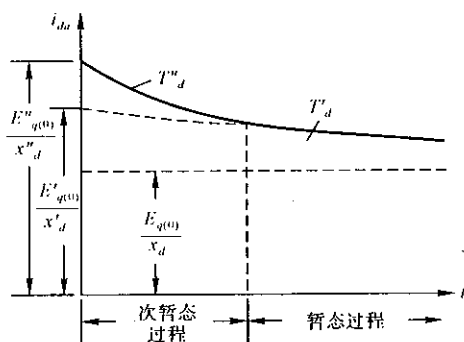
$$I_{d(0)} = (E_{q(0)} - U_{q(0)})/x_d = (E'_{q(0)} - U_{q(0)})/x'_d = (E''_{q(0)} - U_{q(0)})/x''_d$$

可得

$$i_{dn} = \left(\frac{E''_{q(0)}}{x_d} - \frac{E'_{q(0)}}{x'_d} \right) e^{-t/T'_d} + \left(\frac{E'_{q(0)}}{x'_d} - \frac{E_{q(0)}}{x_d} \right) e^{-t/T''_d} + \frac{E_{q(0)}}{x_d} \quad (4.121)$$

图 4.23 画出短路开始阶段 i_{dn} 的变化曲线。在发生三相短路瞬间, 由于励磁绕组和纵轴阻尼绕组的磁链不突变, 该两绕组出现 Δi_{fn} 和 Δi_{pm} , 所以 $i_{dn} =$

$E_{q(0)}^*/x_d''$ 。由于 $T_d'' \ll T_d'$, 也就是纵轴阻尼绕组的时间常数远小于励磁绕组的时间常数, 所以 Δi_{Dn} 按 T_d'' 很快地衰减。可以认为 Δi_{Dn} 衰减消失之时, 励磁绕组的磁链仍基本不变, 这一时刻的情况相当于无阻尼绕组电机刚发生短路瞬间的状态, $i_{dn} = E_{q(0)}^*/x_d'$, $\Delta i_{fn} = \frac{x_d - x_d'}{x_{ad}} \times \frac{U_{q(0)}}{x_d}$ [见式(4.73)]。这

图 4.23 i_{dn} 随时间变化曲线

说明 i_{dn} 和 i_{fn} 中按 T_d' 衰减的自由电流初值分别为 $\frac{E_{q(0)}^*}{x_d} - \frac{E_{q(0)}^*}{x_d}$ 和 $\frac{x_{ad}x_D}{x_f x_D - x_{ad}^2} \times \frac{U_{q(0)}}{x_d} - \frac{x_d - x_d'}{x_{ad}} \times \frac{U_{q(0)}}{x_d}$; 而按 T_d' 衰减的自由电流则与无阻尼绕组电机相同。

从短路时起至阻尼绕组中电流的非周期分量基本消失时止的过程通常称为次暂态过程, 此后直到 Δi_{fn} 衰减结束的过程则称为暂态过程。相应地, 定子电流 I' 称为起始次暂态(周期)电流, $E_{q(0)}^*/x_d'$ 称为起始暂态电流。

以下列出计及自由分量衰减时各电流的表达式:

$$\left. \begin{aligned} i_d &= i_{dn} - \frac{U_{(0)}}{x_d} e^{-t/T_d} \cos(t + \delta_0) \\ i_q &= -\frac{E_{d(0)}^*}{x_q} e^{-t/T_q} + \frac{U_{(0)}}{x_q} e^{-t/T_d} \sin(t + \delta_0) \end{aligned} \right\} \quad (4.122)$$

其中, i_{dn} 见式(4.121)。

$$\begin{aligned} i_u &= \left[\left(\frac{E_{q(0)}^*}{x_d} - \frac{E_{q(0)}^*}{x_d} \right) e^{-t/T_d} + \left(\frac{E_{q(0)}^*}{x_d} - \frac{E_{q(0)}^*}{x_d} \right) e^{-t/T_d} \right. \\ &\quad \left. + \frac{E_{q(0)}^*}{x_d} \right] \cos(t + \theta_0) + \frac{E_{d(0)}^*}{x_q} e^{-t/T_q} \sin(t + \theta_0) \\ &\quad - \frac{U_{(0)}}{2} \times \frac{x_d + x_q}{x_d x_q} \cos(\delta_0 - \theta_0) e^{-t/T_d} \\ &\quad - \frac{U_{(0)}}{2} \times \frac{x_q - x_d}{x_d x_q} e^{-t/T_d} \cos(2t + \theta_0 + \delta_0) \end{aligned} \quad (4.123)$$

$$\begin{aligned} i_f &= \frac{E_{q(0)}^*}{x_{ad}} + \left(\frac{x_{ad}x_D}{x_f x_D - x_{ad}^2} \times \frac{U_{q(0)}}{x_d} - \frac{x_d - x_d'}{x_{ad}} \times \frac{U_{q(0)}}{x_d} \right) e^{-t/T_d} \\ &\quad + \frac{x_d - x_d'}{x_{ad}} \times \frac{U_{q(0)}}{x_d} e^{-t/T_d} - \frac{x_{ad}x_D}{x_f x_D - x_{ad}^2} \\ &\quad \times \frac{U_{(0)}}{x_d} e^{-t/T_d} \cos(t + \delta_0) \end{aligned} \quad (4.124)$$

纵轴阻尼绕组中电流的非周期自由分量也包括以 T_d'' 和 T_d' 衰减的两个分量,但后者很小;横轴阻尼绕组中电流的非周期分量以 T_q'' 衰减至零;两阻尼绕组中电流的周期分量均以 T_a 衰减而消失。

【例 4.2】 一台水轮发电机的额定容量为 150MVA, 额定电压为 13.8kV, $x_d = 0.871$, $x_q = 0.576$, $x_d' = 0.261$, $x_d'' = 0.161$, $x_q' = 0.163$, $r = 0.0018$, $T_{d0}' = 7.54s$, $T_{d0}'' = 0.0717s$, $T_{q0}'' = 0.156s$ 。发电机正常运行时,端电压和电流都等于额定值,功率因数为 0.85(滞后)。设距离发电机电气距离为 $x_r = 0.1$ 标么值处,在 $\theta_0 = 0$ 时发生三相短路,试求 $t = 0.01s$ 时 a 相电流的瞬时值。

【解】 (1) 正常运行计算

取发电机端电压 $\dot{U}_t = 1 \angle 0^\circ$, 则 $\dot{I} = 1 \angle -\cos^{-1}0.85 = 1 \angle -31.8^\circ$

$$\begin{aligned}\dot{E}_Q &= \dot{U}_t + jx_q\dot{I} \\ &= 1 + j0.576 \times 1 \angle -31.8^\circ = 1.392 \angle 20.6^\circ\end{aligned}$$

$$I_d = 1 \times \sin(20.6^\circ + 31.8^\circ) = 0.792$$

$$I_q = 1 \times \cos(20.6^\circ + 31.8^\circ) = 0.601$$

$$E_q = E_Q + (x_d - x_q)I_d = 1.626$$

$$E_q' = E_q - (x_d - x_d')I_d = 1.143$$

$$E_q'' = E_q - (x_d - x_d'')I_d = 1.063$$

$$E_d'' = U_t \sin\delta - x_q''I_q = 0.252$$

短路点正常电压

$$\dot{U} = \dot{U}_t - jx_r\dot{I} = 1 - j0.1 \times 1 \angle -31.8^\circ = 0.951 \angle -5.13^\circ$$

E_q 与 U 的相位差 $\delta_0 = 20.6^\circ + 5.13^\circ = 25.7^\circ$

(2) 短路电流计算

等值电抗: $x_{d\Sigma} = x_d + x_r = 0.871 + 0.1 = 0.971$, $x_{q\Sigma} = 0.576 + 0.1 = 0.676$, $x_{d\Sigma}' = 0.261 + 0.1 = 0.361$, $x_{d\Sigma}'' = 0.161 + 0.1 = 0.261$, $x_{q\Sigma}' = 0.163 + 0.1 = 0.263$ 。

时间常数:

$$T_a = \frac{2x_{d\Sigma}''x_{q\Sigma}''}{r(x_{d\Sigma}'' + x_{q\Sigma}'')} \cdot \frac{1}{2\pi \times 50} = 0.463(s)$$

$$T_d' = T_{d0}' \frac{x_{d\Sigma}'}{x_{d\Sigma}} = 2.8(s)$$

$$T_d'' = T_{d0}'' \frac{x_{d\Sigma}''}{x_{d\Sigma}} = 0.0518(s)$$

$$T_q'' = T_{q0}'' \frac{x_{q\Sigma}''}{x_{q\Sigma}} = 0.0607(\text{s})$$

将 $\theta_0 = 0$ 及上面求得的有关数据代入式(4.123),可得

$$\begin{aligned} i_a = & \left[\left(\frac{1.063}{0.261} - \frac{1.143}{0.361} \right) e^{-t/0.0518} + \left(\frac{1.143}{0.361} - \frac{1.626}{0.971} \right) e^{-t/2.8} \right. \\ & \left. + \frac{1.626}{0.971} \right] \cos \omega t + \frac{0.252}{0.263} e^{-t/0.0607} \sin \omega t \\ & - \frac{0.951}{2} \frac{0.261 + 0.263}{0.261 \times 0.263} e^{-t/0.163} \cos 25.7^\circ \\ & - \frac{0.951}{2} \cdot \frac{0.263 - 0.261}{0.261 \times 0.263} e^{-t/0.163} \cos(2\omega t + 25.7^\circ) \\ = & [0.907 e^{-t/0.0518} + 1.492 e^{-t/2.8} + 1.675] \cos \omega t \\ & + 0.958 e^{-t/0.0607} \sin \omega t - 3.27 e^{-t/0.163} \\ & - 0.014 e^{-t/0.163} \cos(2\omega t + 25.7^\circ) \end{aligned}$$

$t = 0.01\text{s}$ 时, $\omega t = 180^\circ$, a 相电流瞬时值 $i_{a(0.01)} = -7.12$ 。电流瞬时值的基准 $i_B = \sqrt{2} I_B = \sqrt{2} \times 150 / (\sqrt{3} \times 13.8) = 8.87(\text{kA})$
所以 $i_{a(0.01)} = -7.12 \times 8.87 = -63.2(\text{kA})$

4.3.3 强行励磁对同步电机三相短路的影响

在以上分析中,均假设同步电机的励磁电压保持不变。实际上,电力系统中同步发电机和调相机都设有自动励磁调节装置。当机端电压波动时,它能自动地调节励磁电压,改变励磁电流,使电机端电压保持在允许的范围内,而且当电机端部或附近发生短路使端电压急剧下降时,自动励磁调节装置中的强行励磁单元,迅速增大励磁电压至极限最大值,以尽快恢复系统的电压水平,保持系统运行的稳定性。图 4.24 为一种继电型强行励磁设备的原理图。当发生短路电机端电压降低到规定值(例如额定电压的 85%) 以下时,欠电压继电

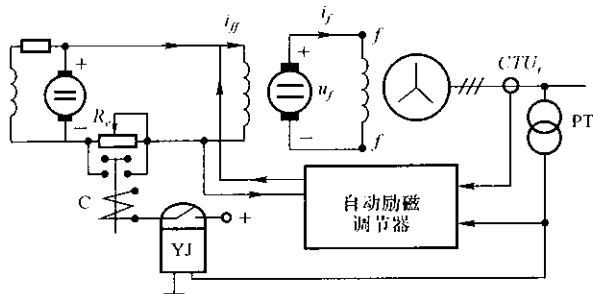


图 4.24 继电型强行励磁原理

器 YJ 的触点闭合,接触器 C 动作把励磁机的磁场电阻 R_c 短接,使励磁机的励磁电流增大,同步电机的励磁电压 u_f 也随之增加,起到强行增大励磁的作用。由于励磁机的励磁绕组具有电感,它的电流不可能突然增大,因此 u_f 也不会突然升高。图 4.25 中的曲线 1 示出强行励磁动作时 u_f 的上升过程,它可近似地用指数曲线 2 来代替,它的增量 $\Delta u_f = u_f - U_{f(0)}$ 可表示为

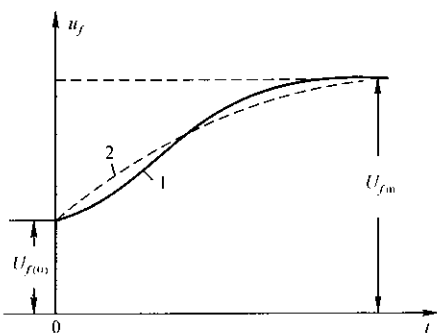


图 4.25 强行励磁时 u_f 的变化

$$\Delta u_f = (U_{fm} - U_{f(0)}) (1 - e^{-t/T_{ff}}) \quad (4.125)$$

式中, T_{ff} 为 u_f 上升的时间常数, U_{fm} 为励磁电压极限值。 U_{fm} 与 $U_{f(0)}$ 之比称为强行励磁倍数,通常为 2 ~ 3。一般励磁系统 T_{ff} 的典型值为 0.57s,快速可控硅励磁系统可做到 0.1s 左右。

现在讨论强行励磁对三相短路过程的影响。先考虑没有阻尼绕组的同步电机。式(4.59)、(4.60)为三相短路时 Δi_d 和 Δi_q 的运算式,它们都包含两项:第二项为 u_f 不变时的短路电流增量,我们已经求得它们的时域解;第一项则为 u_f 变化所引起的短路电流附加分量。显然,两项时域解之和就是 u_f 变化时的三相短路电流的故障分量。

在式(4.59)、(4.60)中, u_f 变化引起的附加分量为

$$\Delta i_{dv}(p) = \frac{(x_q p^2 + x_q + r p)}{D(p)} \cdot \frac{x_{ad}}{r_f + x_f p} \Delta u_f(p)$$

$$\Delta i_{qv}(p) = \frac{r}{D(p)} \cdot \frac{x_{ad}}{r_f + x_f p} \Delta u_f(p)$$

由于定子电阻 r 很小,而且对过程的影响也很小,可以忽略不计。 $r = 0$ 时,上两式可简化为

$$\Delta i_{dv}(p) = \frac{1}{X_d(p)} \cdot \frac{x_{ad}}{r_f(1 + T_f p)} \Delta u_f(p) \quad (4.126)$$

$$\Delta i_{qv}(p) = 0$$

实际上, u_f 变化对 i_q 的影响很小,可以不考虑。

式(4.125)的拉氏变换为

$$\Delta u_f(p) = \frac{U_{fm} - U_{f(0)}}{p(1 + T_{ff} p)}$$

已知

$$X_d(p) = \frac{x_d + x_d' T_f p}{1 + T_f p} = \frac{x_d(1 + T_d' p)}{1 + T_f p}$$

所以式(4.126)可表示为

$$\begin{aligned} \Delta i_{dc}(p) &= \frac{1}{p(1 + T_d' p)(1 + T_{ff} p)} \cdot \frac{U_{fm} - U_{f(0)}}{r_f} \cdot \frac{x_{ad}}{x_d} \\ &= \frac{\Delta E_{qm}/x_d}{p(1 + T_d' p)(1 + T_{ff} p)} \end{aligned} \quad (4.127)$$

式中, $\Delta E_{qm} = \left(\frac{U_{fm}}{r_f} - \frac{U_{f(0)}}{r_f} \right) x_{ad} = (I_{fm} - I_{f(0)}) x_{ad} = E_{qm} - E_{q(0)}$; $I_{fm} = U_{fm}/r_f$ 为励磁电流极限值; $E_{qm} = x_{ad} I_{fm}$ 为极限励磁所对应的空载电势极限值。

式(4.127)的逆变换为

$$\Delta i_{dc}(t) = \frac{\Delta E_{qm}}{x_d} F(t) \quad (4.128)$$

$$F(t) = 1 - \frac{T_d' e^{-t/T_d'} - T_{ff} e^{-t/T_{ff}}}{T_d' - T_{ff}} \quad (4.129)$$

可见, Δi_{dc} 只含有非周期分量。因为在三相短路时, 空载电势 $E_q = (i_{dn} + \Delta i_{dc}) x_d$, 所以强行励磁引起的空载电势增量为

$$\Delta E_q = \Delta i_{dc} x_d = \Delta E_{qm} \times F(t) \quad (4.130)$$

强行励磁动作时, 励磁电流非周期分量的附加增量为

$$\Delta i_{fe} = \frac{\Delta E_q}{x_{ad}} = \frac{\Delta E_{qm}}{x_{ad}} F(t) = (I_{fm} - I_{f(0)}) F(t) \quad (4.131)$$

可见, Δi_{fe} 和 Δi_{dc} 的上升速度与强励倍数及 $F(t)$ 有关。图 4.26 绘出不同 $b = T_d'/T_{ff}$ 值时 $F(t)$ 的变化情况。 T_{ff} 一定时, T_d' 愈大即 b 愈大, 励磁电流增加愈慢。 T_d' 与短路处远近有关, 短路处愈远 T_d' 愈大, $F(t)$ 上升愈慢。

对于有阻尼绕组的同步电机, 因在短路开始阶段 Δi_{fe} 上升很慢, 对次暂态过程没有明显的影响, 故上述分析结果仍可适用。

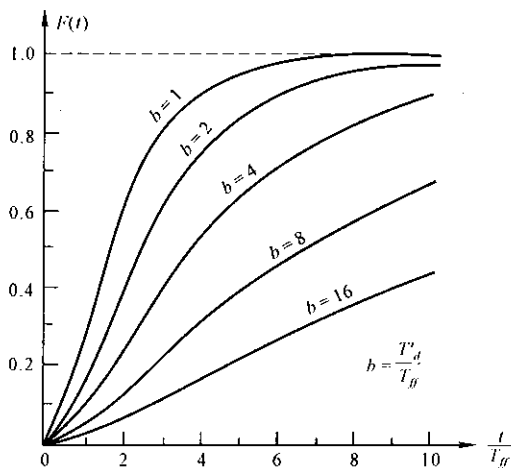


图 4.26 $F(t)$ 变化的曲线

计及强行励磁作用,三相短路时 i_d 的非周期分量式(4.121)应加上 Δi_{de} , 而定子电流式(4.123)中同步频率周期分量余弦部分的振幅也要增加 Δi_{de} 。

在电力网中发生短路时,短路点与电机之间有一定的电抗 x_e 。由于强行励磁的作用,电机端电压将有所恢复,短路点离电机愈远(x_e 愈大),机端电压恢复的效果也愈好。当 x_e 大于某一值时,励磁电流上升到一定程度(尚未达到极限值),机端电压就能恢复到额定值,这时强行励磁设备中的欠电压继电器就会返回,而由自动励磁调节器保持机端电压为额定值。此后,短路电流周期分量的大小为 $U_{(0)}/x_e$,不再发生变化。

【例 4.3】 同例 4.1,但考虑强行励磁的作用。设强励倍数为 2.5, $T_{ff} = 0.5s$ 。

【解】 没有强行励磁时短路电流、电势和机端电压等在例 4.1 中均已求得,只要加上强行励磁所引起的增量就可得到所求的解答。

例 4.1 中已求得正常时 $I_{f(0)} = 2.06$, $E_{q(0)} = 1.749$, 它们的强励极限值为 $I_{fm} = 2.5 \times 2.06$, $E_{qm} = 2.5 \times 1.749$

$$\begin{aligned}\Delta i_{de} &= \frac{\Delta E_{qm}}{x_{ds}} F(t) = \frac{E_{qm} - E_{q(0)}}{x_{ds}} F(t) \\ &= \frac{(2.5 - 1) \times 1.749}{1.15} F(t) = 2.28 F(t) \\ F(t) &= 1 - \frac{1.96e^{-t/1.96} - 0.5e^{-t/0.5}}{1.96 - 0.5} \\ &= 1 - 1.34e^{-t/1.96} + 0.342e^{-t/0.5}\end{aligned}$$

$F(t)$ 的曲线与图 4.26 中 $b = 4$ 的曲线相近。

$$\begin{aligned}\Delta i_{fe} &= (I_{fm} - I_{f(0)})F(t) = (2.5 \times 2.06 - 2.06)F(t) \\ &= 3.09 F(t)\end{aligned}$$

$$\Delta E_q = (2.5 \times 1.749 - 1.749)F(t) = 2.62 F(t)$$

或
$$\Delta E_q = \Delta i_{fe} x_{ad} = \Delta i_{de} x_{de}$$

所得结果相同。

应用例 4.1 的结果,可得

$$\begin{aligned}i_d &= 1.199e^{-t/1.96} + 1.521 + 2.28 F(t) \\ &\quad - 2.13e^{-t/0.358} \cos(\omega t + 22.7^\circ) \\ i_f &= 2.06 + 1.62e^{-t/1.96} + 3.09 F(t) \\ &\quad - 1.757e^{-t/0.358} \cos(\omega t + 22.7^\circ) \\ E_q &= 1.38e^{-t/1.96} + 1.749 + 2.62 F(t)\end{aligned}$$

定子 a 相短路电流周期分量(其他分量不变)为

$$i_a = [1.199e^{-t/1.96} + 1.521 + 2.28 F(t)] \cos(\omega t + 22.7^\circ)$$

三相短路时暂态电势

$$E'_q = \frac{x_{de}}{x_{dv}} E_q = 0.54e^{-t/1.96} + 0.684 + 1.027F(t)$$

发电机端电压:

$$\begin{aligned} U_t = x_t i_{dn} &= 0.15 \times [1.199e^{-t/1.96} + 1.521 + 2.28F(t)] \\ &= 0.18e^{-t/1.96} + 0.228 + 0.342F(t) \end{aligned}$$

根据上面各式绘制的 E_q 、 E'_q 、 U_t 和 i_{dn} 随时间变化的曲线示于图 4.27, 其

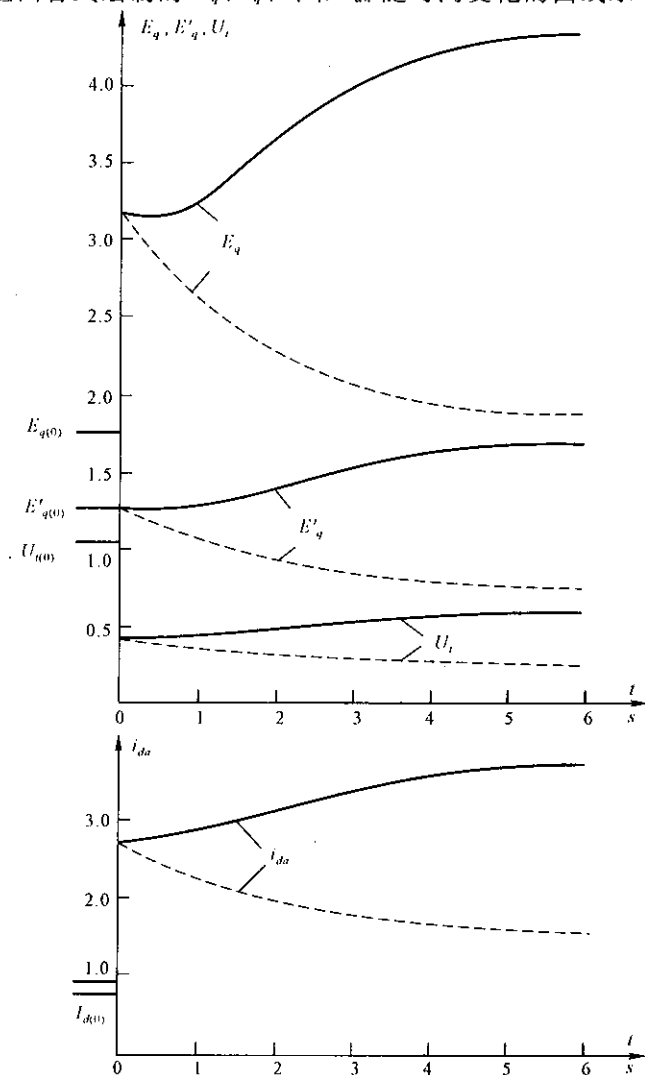


图 4.27 三相短路时 E_q 、 E'_q 、 U_t 和 i_{dn} 随时间的变化曲线

中虚线曲线为没有强行励磁的情况。值得注意的是图中的 E'_q 曲线,它不但在发生短路瞬间不变,而且在 $1 \sim 2\text{s}$ 内几乎保持不变。

4.3.4 短路电流最大瞬时值和有效值

在同步电机的定子短路电流中由于含有非周期分量,致使短路后第一周期内出现很大的电流瞬时值。非周期电流愈大,最大瞬时值也愈大。短路电流最大可能的瞬时值,称为短路冲击电流,它是验算电力设备承受最大电动力的重要数据。

当同步电机空载运行、转子位置角 $\theta_0 = 180^\circ$ 时发生三相短路时, a 相电流中的非周期分量达到最大,电流瞬时值也达到最大。空载运行时, $E_{q(0)} = E'_{q(0)} = E''_{q(0)} = E''_{(0)} = U_{(0)}$, $E''_{d(0)} = 0$, 考虑 $x'_d \approx x''_d$, 可从式(4.123) 得到这种条件下的 a 相的电流:

$$i_a = \left\{ E''_{(0)} \left[\left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-t/T'_d} + \left(\frac{1}{x_d} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-t/T''_d} + \frac{1}{x_d} \right] + \frac{\Delta E_{qm}}{x_d} F(t) \right\} \cos(\omega t + 180^\circ) + \frac{E''_{(0)}}{x_d} e^{-t/T_a} \quad (4.132)$$

式中,非周期电流达到最大,起始值为 $E''_{(0)}/x'_d$, 与周期电流起始值 I'' 相等。 i_a 的波形如图 4.28 所示。

可见,在 $t = T/2 = 0.01\text{s}$ 时出现最大冲击电流 i_{ch} , 它可表示为

$$i_{ch} = I_{(0.01)} + I'' e^{-0.01/T_a} = k_{ch} I'' \quad (4.133)$$

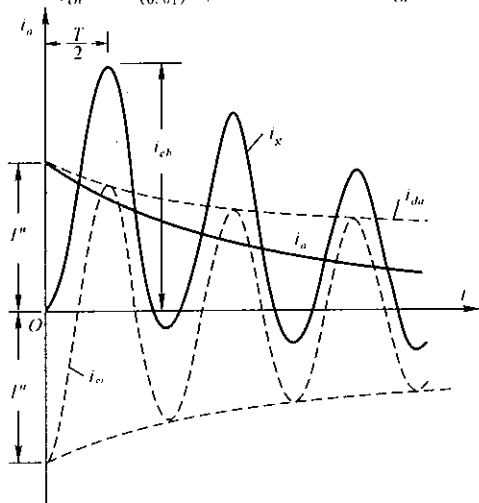


图 4.28 非周期分量最大时的短路电流波形

$$k_{ch} = I_{(0.01)} / I'' + e^{-0.01/Ta} \quad (4.134)$$

式中, $I_{(0.01)}$ 为 $t = 0.01\text{s}$ 时周期电流的幅值, 可由式(4.132)求得。 k_{ch} 称为冲击系数。

近似计算时, 可取 $I_{(0.01)} = I''$, 则

$$k_{ch} = 1 + e^{-0.01/Ta} \quad (4.135)$$

发电机端三相短路时 $k_{ch} \approx 1.9$, 电力网中短路时 $k_{ch} \approx 1.8$ 。

式(4.133)中, i_{ch} 和 I'' 均为标么值, 乘以电流瞬时值的基准值 $i_B = \sqrt{2} I_B$, 即可得到 i_{ch} 的有名值。

短路电流含有非周期分量, 也使它的有效值大于周期电流的有效值。 t 时刻短路电流有效值定义为

$$I_t = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} (i_\omega + i_n)^2 dt}$$

由于 i_ω 不是严格的正弦波, i_n 随时间而衰减, 用上式计算 I_t 颇为复杂。在工程计算中, 可近似地认为在 t 为中心的一个周期内, i_ω 是严格的正弦波, 幅值 I_ω 等于 i_ω 包络线(图4.28中为 i_{d0}) 在 t 时刻的值。电流的非周期分量则看作是直流, 取值 $I_{n0} e^{-t/Ta}$, I_{n0} 为电流非周期分量的起始值。设 I_ω 和 I_{n0} 为标么值, 则有效值 I_t 的有名值用下式计算

$$\begin{aligned} I_t &= \sqrt{(I_\omega I_B)^2 + (I_{n0} e^{-t/Ta} \times \sqrt{2} I_B)^2} \\ &= \sqrt{I_\omega^2 + 2(I_{n0} e^{-t/Ta})^2} \times I_B \quad (\text{A 或 kA}) \end{aligned} \quad (4.136)$$

式中平方根的值 I_t 的标么值。

短路电流最大有效值 I_{ch} 定义为: 在电流的非周期分量最大时, 短路后的第一周期的电流有效值, 即 $t = T/2 = 0.01\text{s}$ 时的有效值。按此定义, 要用图4.28的条件计算 I_{ch} , 则可按式(4.136)得

$$\begin{aligned} I_{ch} &= \sqrt{I_{(0.01)}^2 + 2(I'' e^{-0.01/Ta})^2} \times I_B \\ &\approx \sqrt{1 + 2(k_{ch} - 1)^2} \times I'' I_B \quad (\text{A 或 kA}) \end{aligned} \quad (4.137)$$

式中 I'' 为标么值。一般 $k_{ch} = 1.8 \sim 1.9$, 所以 $I_{ch} = (1.5 \sim 1.62) I'' I_B$ 。

4.3.5 异步电动机的三相短路电流

运行中的异步电动机, 在定子端部发生三相短路时, 由于转速在短时间内变化很小, 故在电动机电势作用下, 将向短路点送出短路电流。

分析异步电动机的三相短路时,可将它看作具有阻尼绕组但没有励磁绕组的同步电机,用式(4.123)进行计算。不过,异步电动机没有励磁绕组,所以定子短路电流周期分量中不含有按 T'_d 衰减的自由分量,而且短路电流稳态值为零,亦即只有次暂态过程。另外,电动机转子在电和磁方面都是对称的, $x'_d = x'_q = x''$, $T'_d = T'_q = T''$, 所以定子电流中不存在倍频交流分量。根据式(4.123),计及上述特点,即可得到电动机定子三相短路电流,例如 a 相电流

$$\begin{aligned} i_a &= \frac{E''_{q(0)}}{x''} e^{-t/T''} \cos(t + \theta_0) + \frac{E''_{d(0)}}{x''} e^{-t/T''} \sin(t + \theta_0) + I_{n0} e^{-t/T_a} \\ &= \frac{E''_{(0)}}{x''} e^{-t/T''} \cos(t + \theta_0 - \alpha_0) + I_{n0} e^{-t/T_a} \end{aligned} \quad (4.138)$$

式中, $E''_{(0)} = \sqrt{E''_{q(0)}^2 + E''_{d(0)}^2}$ 为次暂态电势, $\alpha_0 = \arctan(E''_{d(0)}/E''_{q(0)})$, I_{n0} 为非周期分量的起始值。

发生短路瞬间($t = 0$), i_a 的瞬时值应等于短路前一瞬间的瞬时值 $i_{a(0)}$, 即 $I_{n0} + i_{\omega 0} = i_{a(0)}$ (这里 $i_{\omega 0}$ 为 $t = 0$ 时短路电流周期分量的瞬时值), 所以非周期分量的起始值 $I_{n0} = i_{a(0)} - i_{\omega 0}$ 。

在 $\theta_0 - \alpha_0 = 180^\circ$ 时刻发生三相短路时,非周期分量将达到最大值,这时 $i_{\omega 0} = -E''_{(0)}/x'' = -I''$, $I_{n0} = i_{a(0)} + I'' \approx I''$, 式(4.138)可写为

$$i_a = -I'' e^{-t/T''} \cos \omega t + I'' e^{-t/T_a}$$

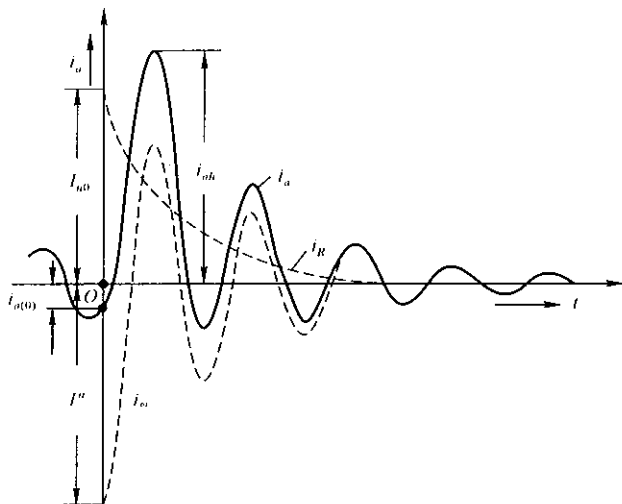


图 4.29 异步电动机三相短路电流波形

图 4.29 绘出非周期分量最大时的定子电流波形图。在 $t = T'/2 = 0.01\text{s}$ 时出现冲击电流

$$\left. \begin{aligned} i_{ch} &= I e^{-0.01/T'} + I' e^{-0.01/Ta} = k_{ch} I'' \\ k_{ch} &= e^{-0.01/T'} + e^{-0.01/Ta} \end{aligned} \right\} \quad (4.139)$$

异步电动机 T'' 和 T_a 约为百分之几秒,冲击系数 $k_{ch} < 1.8$ 。

异步电动机的次暂态电抗和时间常数可用同步电机的概念来确定。图 4.30(a) 是计算 x'' 的等值电路,其中 $x_{1\sigma}$ 、 $x_{2\sigma}$ 为定子和转子的漏抗, x_μ 为励磁电抗(均为电动机额定值为基准的标么值),一般 x_μ 远大于漏抗。所以

$$x'' = x_{1\sigma} + \frac{x_\mu x_{2\sigma}}{x_\mu + x_{2\sigma}} \approx x_{1\sigma} + x_{2\sigma}$$

异步电动机在停止状态(滑差 $S = 1$)加电压起动时,等值电路与图 4.30(a) 相同。额定电压($U = 1$)下的起动电流

$$I_{st} = \frac{1}{x''}$$

I_{st} (标么值)又称为起动电流倍数,可从电动机手册中找到。一般 $I_{st} \approx 5$,所以 $x'' \approx 0.2$ 。

时间常数 T'' 可用图 4.30(b) 计算:

$$T'' \approx \frac{x_{1\sigma} + x_{2\sigma}}{r_2} \approx \frac{x''}{r_2}$$

式中, r_2 为转子电阻。

定子绕组时间常数 T_a 按式(4.113)计算,因 $x_d'' = x_q'' = x''$,所以 $T_a = x''/r_1$,其中 r_1 为定子电阻。通常 $r_1 \approx r_2$,所以 $T_a \approx T''$ 。

异步电动机的次暂态电势 $E''_{(0)}$,可根据正常运行时的电压 $U_{(0)}$ 和吸取的电流 $I_{(0)}$ 计算:

$$\dot{E}''_{(0)} = \dot{U}_{(0)} - jx''\dot{I}_{(0)}$$

或用吸取的功率 $P_{(0)} + jQ_{(0)}$ 按下式计算:

$$E''_{(0)} = \sqrt{\left(U_{(0)} - \frac{Q_{(0)}x''}{U_{(0)}}\right)^2 + \left(\frac{P_{(0)}x''}{U_{(0)}}\right)^2}$$

最后需要指出,只有短路点接近异步电动机端部时,它提供的短路电流才比较大。短路点较远时,端电压与 E'' 相差不大,短路电流就很小,甚至端电压仍大于 E'' ,电动机还从电网吸取电流。

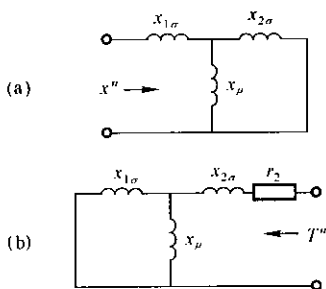


图 4.30 x'' 和 T'' 的等值电路

4.4 电力系统三相短路实用计算

在含有多台同步发电机的电力系统中,三相短路的电磁暂态过程比单台电机要复杂得多,各个电机供出的短路电流不仅与本机的参数有关,还与其他电机的参数以及电力网的结构和参数有关,要准确计算是十分困难和复杂的。因此电力系统短路电流的实用计算,必须采用简化的方法,在满足工程计算准确度要求的前提下,力求计算简便。为此,除了已采用的假定外,还要作如下简化:

(1) 不考虑同步电机之间摇摆的影响,即认为短路暂态过程中各电机空载电势间的相位差保持不变。

(2) 短路电流中倍频交流分量略去不计,非周期分量仅作近似的计算。

(3) 在有多台同步电机的电力系统中,把短路电流周期分量的变化规律看作和一台同步电机短路电流周期分量的变化规律相同。

(4) 电力线路对地电容及变压器的等值励磁接地支路都略去不计。另外,变压器和高压线路的电阻也可略去不计。因电缆和低压线路电阻与电抗的比值较大,用纯电抗表示时,电抗值可用阻抗模值($\sqrt{r^2 + x^2}$)代替。

(5) 电力系统负荷根据计算任务作不同的简化处理。

4.4.1 三相短路起始次暂态电流的计算

发生短路瞬间,短路电流周期分量的起始值 I'' 称为起始次暂态电流,在一些工程问题中,常常只要求提供这一电流值。为了简化计算,补充假设各同步电机的 $x_d'' = x_q''$,这对于汽轮发电机是接近实际的,对于凸极同步电机误差也很小。 $x_d'' = x_q''$ 时,就可用图4.19(b)所示的同步电机等值电路计算起始次暂态电流。例如机端三相短路时, $\dot{I}'' = \dot{E}'' / (r + jx_d'')$,次暂态电势 E'' 可从短路前正常运行状态求得。

对于复杂的电力系统,只需将各种不同的发电机和调相机分别用电势为 E'' 、内电抗为 x_d'' 的电压源表示,就可用交流电路稳态计算方法求得各发电机和短路点的 I'' 。

关于负荷的处理说明如下:对于接近短路点的大容量同步和异步电动机,

要作为提供起始次暂态电流的电源处理,异步电动机按 4.3 节中的方法用 E'' 和 x'' 等值;对于接在短路点的综合负荷,可近似地看作一台等值异步电动机,用 E'' 和 x'' 支路表示,取 $x'' = 0.35$ 标么值(以负荷视在容量和额定电压为基准);短路点以外的综合负荷,可近似地用阻抗支路等值,阻抗值用正常时的电压和功率计算,即

$$Z = r + jx = \frac{U^2}{S^*} (P + jQ)$$

式中, $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ 为负荷的容量。更简略些可用纯电抗支路等值,电抗标么值取 1.2。远离短路点的负荷甚至可以略去不计。

【例 4.4】 图 4.31 为一简单的电力系统, G 为同步发电机, C 为同步调相机, $L-1$ 、 $L-2$ 和 $L-3$ 为综合负荷, 架空线路 $l-1$ 和 $l-2$ 的额定电压 110kV, 电抗 0.4Ω/km, 其他有关数据均标在图上。正常运行时各节点电压: $\dot{U}_1 = 10.4 \angle 0^\circ \text{kV}$, $\dot{U}_3 = 114.7 \angle 4.74^\circ \text{kV}$, $\dot{U}_1 = 10.73 \angle 10.69^\circ \text{kV}$, $\dot{U}_2 = 6.315 \angle 0.07^\circ \text{kV}$; 发电机的输出功率为 $65.9 + j48 \text{MVA}$, 调相机输出的无功功率为 4.56MVAR 。试计算 D 点(节点 4)发生金属性三相短路时, 短路点及发电机的起始次暂态电流和发电机母线短路瞬间的电压。

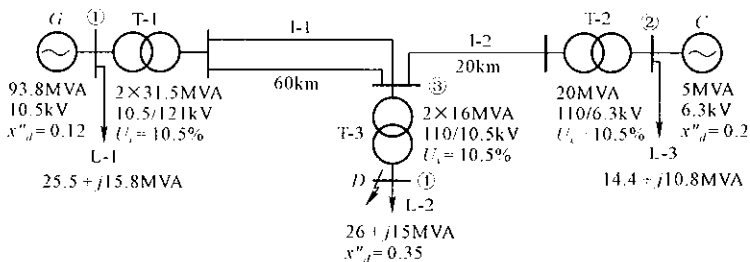


图 4.31 例 4.4 电力系统结线图

【解】 (1) 制订计算用等值电路

用标么值计算, 取 $S_B = 100 \text{MVA}$, 110kV 为电压基本级, $U_B = 110 \text{V}$ 。发电机侧电压基准: $U_{1B} = 110 \times 10.5/121 = 9.55 \text{kV}$; 调相机侧电压基准: $U_{2B} = 110 \times 6.3/110 = 6.3 \text{kV}$; 负荷 $L-2$ 侧电压基准: $U_{1B} = 110 \times 10.5/110 = 10.5 \text{kV}$ 。

系统等值电路如图 4.32(a) 所示, 接在短路点的负荷 $L-2$ 用 E'' 和 x'' 代替, 另两个负荷用阻抗表示。图中各元件阻抗旁的分数表示元件的编号(分子)和它的阻抗标么值(分母)。

各元件阻抗标么值:

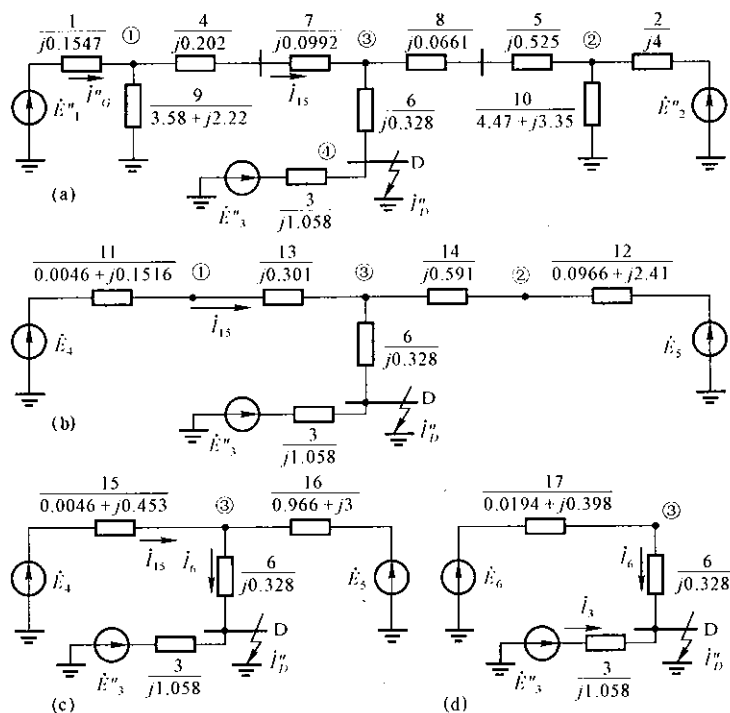


图 4.32 例 4.4 的等值电路

$$\text{发电机: } x_1 = 0.12 \times \frac{10.5^2}{93.8} \times \frac{100}{9.55^2} = 0.1547$$

$$\text{调相机: } x_2 = 0.2 \times \frac{6.3^2}{5} \times \frac{100}{6.3^2} = 4$$

$$\text{负荷 L-2 的 } x'' : x_3 = \frac{0.35 \times 10^2}{\sqrt{26^2 + 15^2}} \times \frac{100}{10.5^2} = 1.058$$

$$\text{变压器 T-1: } x_4 = 0.105 \times \frac{121^2}{2 \times 31.5} \times \frac{100}{110^2} = 0.202$$

$$\text{T-2: } x_5 = 0.105 \times \frac{110^2}{20} \times \frac{100}{110^2} = 0.525$$

$$\text{T-3: } x_6 = 0.105 \times \frac{110^2}{2 \times 16} \times \frac{100}{110^2} = 0.328$$

$$\text{线路 1-1: } x_7 = 60 \times \frac{0.4}{2} \times \frac{100}{110^2} = 0.0992$$

$$\text{线路 1-2: } x_8 = 20 \times 0.4 \times \frac{100}{110^2} = 0.0661$$

正常运行时各节点电压:

$$\dot{U}_1 = \frac{10.73}{9.55} \angle 10.69^\circ = 1.124 \angle 10.69^\circ$$

$$\dot{U}_2 = \frac{6.315}{6.3} \angle 0.07^\circ = 1.002 \angle 0.07^\circ$$

$$\dot{U}_3 = \frac{114.7}{110} \angle 4.74^\circ = 1.043 \angle 4.74^\circ$$

$$\dot{U}_4 = \frac{10.4}{10.5} = 0.99$$

负荷 L-1 和 L-3 的等值阻抗:

$$L-1: Z_9 = \frac{1.124^2}{0.255^2 + 0.158^2} (0.255 + j0.158) = 3.58 + j2.22$$

$$L-3: Z_{10} = \frac{1.002^2}{0.144^2 + 0.108^2} (0.144 + j0.108) = 4.47 + j3.35$$

各电源次暂态电势:

发电机:

$$\begin{aligned} E_1'' &= \sqrt{\left(1.124 + \frac{0.48 \times 0.1547}{1.124}\right)^2 + \left(\frac{0.659 \times 0.1547}{1.124}\right)^2} \\ &= \sqrt{1.19^2 + 0.0907^2} = 1.193 \end{aligned}$$

$$\text{相位角 } \delta_1 = \arctan \frac{0.0907}{1.19} + 10.69^\circ = 15.05^\circ$$

调相机:

$$\dot{E}_2'' = \left(1.002 + \frac{0.0456 \times 4}{1.002}\right) \angle 0.07^\circ = 1.18 \angle 0.07^\circ$$

L-2:

$$\begin{aligned} E_3'' &= \sqrt{\left(0.99 - \frac{0.15 \times 1.058}{0.99}\right)^2 + \left(-\frac{0.26 \times 1.058}{0.99}\right)^2} \\ &= \sqrt{0.83^2 + (-0.278)^2} = 0.875 \end{aligned}$$

$$\text{相位角 } \delta_3 = \arctan \frac{-0.278}{0.83} = -18.2^\circ$$

(2) 次暂态电流计算

将图 4.32(a) 中的支路 1 和支路 9 并联, 支路 2 和 10 并联, 支路 4 和 7 串联, 5 和 8 串联, 得到图 4.32(b), 其中:

$$\dot{E}_1 = \frac{\dot{E}_1'' Z_9}{Z_1 + Z_9} = 1.17 \angle 13.29^\circ$$

$$Z_{11} = \frac{Z_1 Z_9}{Z_1 + Z_9} = 0.046 + j0.1516$$

$$\begin{aligned}\dot{E}_5 &= \frac{\dot{E}_2 Z_{10}}{Z_2 + Z_{10}} = 0.776 \angle -21.8^\circ \\ Z_{12} &= Z_2 // Z_{10} = 0.966 + j2.41 \\ Z_{13} &= Z_1 + Z_7 = j0.301 \\ Z_{11} &= Z_5 + Z_8 = 0.591\end{aligned}$$

将 Z_{11} 和 Z_{13} 串联, Z_{12} 和 Z_{11} 串联, 得到图 4.32(c)。再将支路 15 和 16 并联, 得到简化电路图 4.32(d), 图中

$$\begin{aligned}\dot{E}_6 &= \frac{\dot{E}_1 Z_{16} + \dot{E}_5 Z_{15}}{Z_{16} + Z_{15}} = 1.121 \angle 9.63^\circ \\ Z_{17} &= Z_{15} // Z_{16} = 0.0194 + j0.398\end{aligned}$$

由图 4.32(d) 求得发电机和调相机供出的电流

$$\dot{I}_6 = \frac{\dot{E}_6}{Z_{17} + Z_6} = 1.545 \angle -78.8^\circ$$

综合负荷 L-2 供给的电流: $\dot{I}_3 = \frac{\dot{E}_3}{Z_3} = 0.827 \angle -108.5^\circ$

短路点的起始次暂态电流: $\dot{I}_D = \dot{I}_6 + \dot{I}_3 = 2.3 \angle -89.1^\circ$

短路瞬间节点 3 的电压

$$\dot{U}_3 = Z_6 \dot{I}_6 = 0.507 \angle 11.16^\circ$$

由图 4.32(c) 求出支路 15 的电流

$$\dot{I}_{15} = (\dot{E}_4 - \dot{U}_3) / Z_{15} = 1.467 \angle -74.5^\circ$$

节点 1 即发电机 G 的端电压可由图 4.32(b) 求得:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_3 + \dot{I}_{15} Z_{13} = 0.948 \angle 13.18^\circ$$

最后, 由图 4.32(a) 求出发电机 G 的起始次暂态电流

$$\dot{I}_G = (\dot{E}_1 - \dot{U}_1) / Z_1 = 1.604 \angle -67.8^\circ$$

所求电流和电压的实际有名值为

$$I_D = 2.3 \times \frac{100}{\sqrt{3} \times 10.5} = 12.65 (\text{kA}) (\text{有效值})$$

$$I_G = 1.604 \times \frac{100}{\sqrt{3} \times 9.55} = 9.7 (\text{kA}) (\text{有效值})$$

$$U_1 = 0.948 \times 9.55 = 9.05 (\text{kV}) (\text{线电压有效值})$$

应用叠加原理计算起始次暂态电流比上例的直接算法更为方便。图

4.33(a) 为计算起始次暂态电流的等值电路,除电源支路外其他部分用方框表示。图中,短路点 D 与地之间串接入两个理想电压源,一个电压为故障前 D 点的电压 $\dot{U}_{D(0)}$,另一个电压为 $\Delta\dot{U}_D = -\dot{U}_{D(0)}$,因而保证 D 点对地电压为零。应

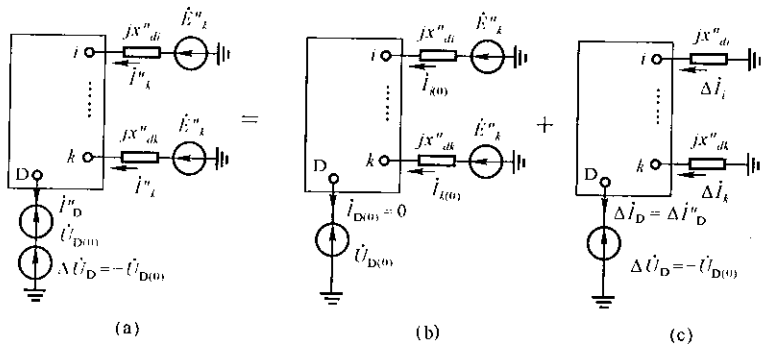


图 4.33 应用叠加原理计算起始次暂态电流

用叠加原理,将图 4.33(a) 分为图 4.33(b) 和(c) 两种情况。图 4.33(b) 是正常运行时的等值电路,各节点电压和支路电流由正常潮流计算求得。图 4.33(c) 是无源一端口网络,仅端口加有电压 $\Delta\dot{U}_D = -\dot{U}_{D(0)}$,可以很容易求得各节点电压和各支路电流,它们是三相短路引起的故障分量。图 4.33(a) 中任一支路的实际电流及任一节点的实际电压,为相应的正常分量和故障分量的相量和。短路点的正常电流为零,所以它的起始次暂态电流 $\dot{I}_D = \Delta\dot{I}_D$ 。设图 4.33(c) 中 D—地端口的等值阻抗为 Z_{DD} ,则有

$$\dot{I}_D = \Delta\dot{I}_D = -\frac{\Delta\dot{U}_D}{Z_{DD}} = \frac{\dot{U}_{D(0)}}{Z_{DD}}$$

只需要计算短路点的 I_D' 时,用叠加原理计算特别方便。

【例 4.5】 同例 4.4,但用叠加原理计算。

【解】 各基准值同例 4.4。

(1) 正常电流和电压分量

$$\begin{aligned}\dot{U}_{D(0)} &= \dot{U}_{1(0)} = 0.99 & \dot{U}_{1(0)} &= 1.124 \angle 10.69^\circ \\ \dot{I}_{G(0)} &= \frac{\dot{S}_{G(0)}^*}{\dot{U}_{1(0)}} = \frac{0.659 - j0.48}{1.124 \angle -10.69^\circ} = 0.655 - j0.311\end{aligned}$$

(2) 故障分量计算

计算故障分量的等值电路示于图 4.34(a),再依次简化为图(b) 和(c)(参

看图 4.32), 各支路电抗值同例 4.4。

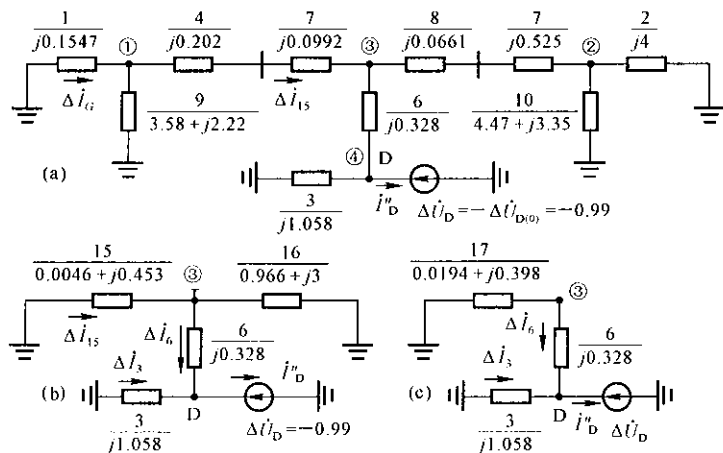


图 4.34 例 4.5 的故障分量等值电路

由图 4.34(c) 可知

$$\Delta \dot{I}_6 = -\frac{\Delta \dot{U}_D}{Z_{17} + Z_6} = \frac{0.99}{0.0194 + j0.726} = 0.0364 - j1.364$$

$$\Delta \dot{I}_3 = -\frac{\Delta \dot{U}_D}{Z_3} = \frac{0.99}{j1.058} = -j0.936$$

$$\dot{I}_D'' = \Delta \dot{I}_6 + \Delta \dot{I}_3 = 0.0364 - j2.3 = 2.3 \angle -89.1^\circ$$

$$\Delta \dot{U}_3 = \Delta \dot{U}_D + Z_6 \Delta \dot{I}_6 = 0.543 \angle 178.7^\circ$$

再由图 4.34(b)、(a) 求出:

$$\Delta \dot{I}_{15} = \frac{-\Delta \dot{U}_3}{Z_{15}} = -1.2 \angle 89.3^\circ$$

$$\Delta \dot{U}_1 = \Delta \dot{U}_3 + \Delta \dot{I}_{15}(Z_4 + Z_7) = -0.1818 + j0.00771$$

$$\Delta \dot{I}_G = -\frac{\Delta \dot{U}_1}{Z_1} = -0.00498 - j1.175$$

(3) 起始次暂态电流和电压

$$\dot{I}_D'' = 2.3 \angle -89.1^\circ$$

$$\dot{I}_G'' = \dot{I}_{G(0)} + \Delta \dot{I}_G = 0.605 - j1.486 = 1.604 \angle -67.8^\circ$$

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{1(0)} + \Delta \dot{U}_1 = 0.948 \angle 13.18^\circ$$

计算结果与例 4.4 相同。

在例 4.4 和 4.5 计算中,不同电压等级的参数或基准值都是用变压器实际变比进行归算的。对于具有多种电压等级、元件数很多的大规模电力系统,参数标么值计算的工作量很大。短路电流实用计算方法本身带有近似性,所以参数计算不需要如此准确。为了简化计算,假设:(1)接在同一电压级的所有电力设备的额定电压相等,其数值取这些设备额定电压的平均值,称为平均额定电压。我国规定的各级电压电力网的平均额定电压见下表,约为额定电压的 1.05 倍。(2)各变压器的变比用它各侧电力网平均额定电压之比代替。

额定电压(kV)	3	6	10	15	35	110	220	330	500
平均额定电压	3.15	6.3	10.5	15.75	37	115	230	345	525

采用这些假定时,基本级的电压基准值选用它的平均额定电压,其他各级的电压基准值则都等于各自的平均额定电压,不必一一归算。等值电路中各元件参数标么值的计算也很简便。例如某设备以其额定容量 S_N 、额定电压 U_N 为基准值的电抗标么值为 $x_{*(N)}$,则归算到基准功率 S_B 和平均额定电压 U_{MN} 的标么值为

$$x_* = x_{*(N)} \times \frac{U_N^2}{S_N} \times \frac{S_B}{U_{MN}^2} = x_{*(N)} \times \frac{S_B}{S_N}$$

由于设 $U_N = U_{MN}$,所以电抗标么值只需进行容量归算。同理,变压器的电抗标么值为

$$x_* = \frac{U_k\%}{100} \times \frac{S_B}{S_N}$$

在短路电流实用计算中,普遍使用这种简化,但必须指出,在电力系统潮流和稳定计算(见第 3 章和第 5 章)中,不允许使用这些简化,各变压器必须用实际变比,各元件必须用它本身的额定电压进行计算。

还有一种简易的起始次暂态电流计算方法,它假定故障前电力网各节点电压都等于平均额定电压(标么值为 1),相位都相同;各支路的起始次暂态电流只计及故障分量,因为一般正常电流比故障分量小很多,所以可略去不计。另外,除了短路点的大型电动机及综合负荷用 E'' 、 x'' 等值外,其他负荷都可略去不计;全部线路及变压器的电阻也都不计。这样,短路点 $I_D'' = 1/x_{DD}$,任一支路 $I_i = \Delta I_i$,任一节点起始电压 $U_i = 1 + \Delta U_i$ 。这种简易算法只需对故障分量等值电路进行计算,而且是纯电抗电路,不必用相量计算。用简易法求得的短路点 I_D'' 误差不大;对于支路电流,在正常电流较大时则误差较大。

电力系统短路电流水平,通常用短路容量或称短路功率表示,它定义为

$$S_n = \sqrt{3} U_n I_n (\text{MVA})$$

式中, U_N 为短路点所在电网的额定电压(kV), I_b 为短路点三相短路起始次暂态电流(kA)。用平均额定电压替代 U_N 时

$$S_D = \sqrt{3} U_{MN} I_D'' = \sqrt{3} U_{MN} I_{D*}'' \times \frac{S_B}{\sqrt{3} U_{MN}} = I_{D*}'' S_B$$

即为电流标么值与功率基准值的乘积,或短路容量标么值与 I_b'' 的标么值相等。

【例 4.6】 同例 4.4, 但用平均额定电压计算。

【解】 取 $S_B = 100\text{MVA}$, 电压基准值取各级的平均额定电压。用叠加原理计算, 故障分量等值电路如图 4.35 所示。负荷 $L-1$ 用标么值为 1.2 的电抗支路表示, 负荷 $L-3$ 删去不计, 接在短路点的负荷 $L-2$ 仍用 E'' 、 x'' 等值。各元件电抗值计算如下:

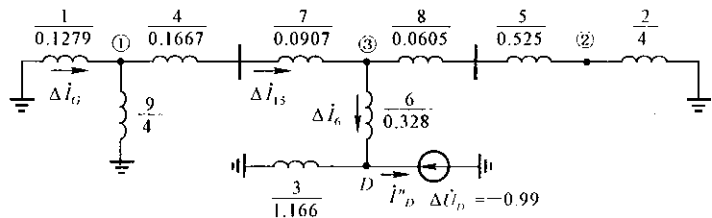


图 4.35 例 4.6 故障分量等值电路

$$x_1 = 0.12 \times \frac{100}{93.8} = 0.1279$$

$$x_2 = 0.2 \times \frac{100}{5} = 4$$

$$x_3 = 0.35 \times \frac{100}{\sqrt{26^2 + 15^2}} = 1.166$$

$$x_4 = 0.105 \times \frac{100}{2 \times 31.5} = 0.1667$$

$$x_5 = 0.105 \times \frac{100}{20} = 0.525$$

$$x_6 = 0.105 \times \frac{100}{2 \times 16} = 0.328$$

$$x_7 = 0.4 \times \frac{60}{2} \times \frac{100}{115^2} = 0.0907$$

$$x_8 = 0.4 \times 20 \times \frac{100}{115^2} = 0.605$$

$$x_y = 1.2 \times \frac{100}{\sqrt{25.5^2 + 15.8^2}} = 4$$

等值电路简化(参看图 4.34(b)、(c)):

$$x_{15} = (x_1 // x_9) + x_4 + x_7 = 0.381$$

$$x_{16} = x_2 + x_5 + x_8 = 4.59$$

$$x_{17} = x_{15} // x_{16} = 0.352$$

短路点等值电抗 $x_{DD} = (x_{17} + x_6) // x_3 = 0.43$

短路点正常电压 $U_{D(0)} = 10.4/10.5 = 0.99$

短路点起始次暂态电流:

$$I_D'' = \frac{U_{D(0)}}{x_{DD}} = \frac{0.99}{0.43} = 2.3$$

电压、电流故障分量计算:

$$\Delta I_6 = \frac{-\Delta U_D}{x_{17} + x_6} = \frac{0.99}{0.352 + 0.328} = 1.454$$

$$\Delta I_{15} = \Delta I_6 \times \frac{x_{17}}{x_{15}} = 1.344$$

$$\Delta U_1 = -\Delta I_{15} \times (x_1 // x_9) = -0.1665$$

$$\Delta I_G = \frac{-\Delta U_1}{x_1} = 1.302$$

发电机正常电压和电流:

$$\dot{U}_{1(0)} = \frac{10.73}{10.5} \angle 10.69^\circ = 1.022 \angle 10.69^\circ$$

$$\dot{I}_{G(0)} = \frac{0.659 - j0.48}{1.022 \angle -10.69^\circ} = 0.721 - j0.342$$

发电机起始次暂态电流、电压:

$$\begin{aligned} \dot{I}_G'' &= \dot{I}_{G(0)} + \Delta \dot{I}_G = 0.721 - j0.342 - j1.302 \\ &= 1.8 \angle -66^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_{1(0)} + \Delta \dot{U}_1 = 1.022 \angle 10.69^\circ - 0.1665 \\ &= 0.859 \angle 12.8^\circ \end{aligned}$$

所求电流和电压的有效值:

$$I_D'' = 2.3 \times \frac{100}{\sqrt{3} \times 10.5} = 12.65(\text{kA})$$

$$I_G'' = 1.8 \times \frac{100}{\sqrt{3} \times 10.5} = 9.9(\text{kA})$$

$$U_1 = 0.859 \times 10.5 = 9.02(\text{kV})$$

与例 4.4 计算结果比较, 电流和电压误差并不大。

短路点短路容量 $S_D = 2.3 \times 100 = 230(\text{MVA})$

【例 4.7】 同例 4.4, 但用简易法近似计算。

【解】 取 $S_B = 100\text{MVA}$, 基准电压为平均额定电压。故障分量等值电路同图 4.35, 但负荷 $L-1$ 不计, 可令其中 $x_9 = \infty$, 另外 $\Delta U_D = -1$ 。

短路点 D 等值电抗:

$$x_{DD} = \{[(x_1 + x_1 + x_7) // (x_2 + x_5 + x_8)] + x_6\} // x_3 \\ = 0.431$$

$$I_D'' = \frac{1}{x_{DD}} = \frac{1}{0.431} = 2.32$$

$$\text{有效值 } I_D'' = 2.32 \times \frac{100}{\sqrt{3} \times 10.5} = 12.8(\text{kA})$$

短路容量 $S_D = 2.32 \times 100 = 232(\text{MVA})$

发电机电流和电压的故障分量分别为 $\Delta I_G = 1.35$, $\Delta U_1 = -0.173$, 起始电流和电压有效值为

$$I_G'' = \Delta I_G = 1.35 \times \frac{100}{\sqrt{3} \times 10.5} = 7.42(\text{kA})$$

$$U_1 = (1 + \Delta U_1)U_B = (1 - 0.173) \times 10.5 = 8.68(\text{kV})$$

与例 4.4 相比, I_D'' 和 U_1 误差不大, I_G'' 误差较大, 因为它的正常电流相对较大。

4.4.2 起始次暂态电流的计算机算法

复杂电力系统的三相短路起始次暂态电流普遍应用计算机进行计算。本节限于介绍算法的基本原理, 不讨论具体的计算程序。通常应用叠加原理进行计算, 先作潮流计算, 得到各节点的正常电压 $\dot{U}_{i(0)}$, 然后对故障分量等值网络进行求解, 得到各节点电压的故障分量 $\Delta \dot{U}_i$ 。最后根据各节点实际电压 $\dot{U}_i = \dot{U}_{i(0)} + \Delta \dot{U}_i$ 计算各支路的起始次暂态电流。

计算故障分量用的等值网络[见图 4.33(c)], 可以利用潮流计算用的等值网络, 在各发电机节点加上电抗为 x_d'' 的接地支路, 各负荷节点接入代替负荷的接地阻抗支路而形成。直接连于短路点的大型电动机或综合负荷所提供的起始次暂态电流可另行单独处理。该计算网络中, 只有短路节点 D 加有电源, 注入电流为 $-\dot{I}_D''$, 其他节点注入电流均为零。

如果计算网络的节点阻抗矩阵已经形成, 则可解如下的节点电压方程, 得

到电压的故障分量:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_1 \\ \vdots \\ \Delta \dot{U}_D \\ \vdots \\ \Delta \dot{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1D} & \cdots & Z_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{D1} & \cdots & Z_{DD} & \cdots & Z_{Dn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{n1} & \cdots & Z_{nD} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ -\dot{I}_D \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = -\dot{I}_D \begin{bmatrix} Z_{1D} \\ \vdots \\ Z_{DD} \\ \vdots \\ Z_{nD} \end{bmatrix} \quad (4.140)$$

式中,设网络有 n 个节点。由上式可得

$$\Delta \dot{U}_i = -Z_{iD} \dot{I}_D \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4.141)$$

对于节点 D 有

$$\Delta \dot{U}_D = -\dot{U}_{D(0)} = -Z_{DD} \dot{I}_D$$

所以

$$\dot{I}_D = \frac{\dot{U}_{D(0)}}{Z_{DD}} \quad (4.142)$$

实际上先由上式求出 \dot{I}_D , 然后用式(4.141) 计算各节点 $\Delta \dot{U}_i$ 。

各节点的实际起始电压为

$$\dot{U}_i = \dot{U}_{i(0)} + \Delta \dot{U}_i = \dot{U}_{i(0)} - Z_{iD} \dot{I}_D \quad (4.143)$$

任一支路 $i-j$ 的起始次暂态电流为

$$\dot{I}_{ij} = \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_j}{Z_{ij}} \quad (4.144)$$

式中, Z_{ij} 为支路 $i-j$ 的阻抗。

在近似计算中,假设故障前各节点电压 $U_{i(0)} = 1$, 以上各式可简化为

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_D &= \frac{1}{Z_{DD}} \\ \dot{U}_i &= 1 - \frac{Z_{iD}}{Z_{DD}} \\ \dot{I}_{ij} &= \frac{1}{Z_{ij}} \cdot \frac{Z_{jD} - Z_{iD}}{Z_{DD}} \end{aligned} \right\} \quad (4.145)$$

由以上各式可见,计算 D 点三相短路时,只用到节点阻抗矩阵的第 D 列元素。

节点阻抗矩阵是满矩阵,当网络的节点数增加时,形成该矩阵所占用的计算机时间和存储它的内存容量将大为增加,这就使计算电力系统的规模受到

限制。电力网的节点导纳矩阵的形成很简捷,网络结构改变时也容易修改,而且该矩阵很稀疏,储存非零元素只需很少的内存。因此,常用的短路电流算法中,采用先形成计算网络的节点导纳矩阵,然后求出短路点对应的一系列阻抗矩阵元素。

根据节点阻抗矩阵元素的定义,当节点 D 注入单位电流,其他节点注入电流均为零时,节点 D 的电压等于它的自阻抗,其他节点的电压等于该节点与 D 点间的互阻抗,即节点阻抗矩阵 D 列(行)的元素为

$$Z_{iD} = Z_{Dn} = \dot{U}_i (i = 1, 2, \dots, n)$$

式中各节点的电压可以由下面用节点导纳矩阵表示的节点电压方程解得

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1D} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{D1} & \cdots & Y_{DD} & \cdots & Y_{Dn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{nD} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \vdots \\ \dot{U}_D \\ \vdots \\ \dot{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \leftarrow D \text{ 列} \quad (4.146)$$

综上所述,计算起始次暂态电流的步骤如下:

- (1) 形成计算故障分量用的等值网络的节点导纳矩阵。
- (2) 解线性代数方程组式(4.146),求出短路点 D 对应的一系列节点阻抗矩阵元素。
- (3) 应用式(4.142),计算短路点的起始次暂态电流 I_p'' 。
- (4) 按式(4.143)计算各节点的电压。
- (5) 应用式(4.144)计算各支路的起始次暂态电流。

进行某一电力系统短路分析时,往往要对一批节点逐个地计算三相短路电流,这就需要反复求解式(4.146),求得若干列节点阻抗矩阵元素。为了减小计算工作量,可事先将节点导纳矩阵作三角分解(或形成因子表)并存储起来,以后当计算某一节点短路时,用来求出一列阻抗矩阵元素。此外,工程计算中往往只要求计算短路点及其附近支路的电流,所以只需求出短路点附近的节点电压就可以了。同理,计算某一电压等级电网的短路电流时,离短路点较远的其他电压等级电网的节点电压也不必求出。因此可将部分网络简化,消去一批节点,以降低节点导纳(阻抗)矩阵的阶数,减轻计算工作量。应用计算机计算时,网络简化方法简述如下。设节点 $1, 2, \dots, m$ 要保留,其他 $m+1$ 至 n 节点都是没有注入电流的节点(简称联络节点)需要消去。原节点电压方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \vdots \\ \dot{I}_m \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1m} & Y_{1,m+1} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{m1} & \cdots & Y_{mm} & Y_{m,m+1} & \cdots & Y_{mn} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ Y_{m+1,1} & \cdots & Y_{m+1,m} & Y_{m+1,m+1} & \cdots & Y_{m+1,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{nm} & Y_{n,m+1} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \vdots \\ \dot{U}_m \\ \dot{U}_{m+1} \\ \vdots \\ \dot{U}_n \end{bmatrix}$$

上式用分块矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} I_m \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{mm} & Y_{mk} \\ Y_{km} & Y_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_m \\ U_k \end{bmatrix}$$

将其展开:

$$I_m = Y_{mm}U_m + Y_{mk}U_k$$

$$0 = Y_{km}U_m + Y_{kk}U_k$$

由第二式得 $U_k = -Y_{kk}^{-1}Y_{km}U_m$, 代入第一式:

$$I_m = (Y_{mm} - Y_{mk}Y_{kk}^{-1}Y_{km})U_m = Y_m U_m \quad (4.147)$$

其中

$$Y_m = Y_{mm} - Y_{mk}Y_{kk}^{-1}Y_{km} \quad (4.148)$$

它就是消去联络节点后简化网络的 m 阶节点导纳矩阵。

【例 4.8】 同例 4.4, 但用计算机算法计算。

【解】 各基准值同例 4.4, 故障分量计算网络见图 4.34(a), 短路点(节点 4)的综合负荷 $L-2$ 单独处理, 暂从图中除去。

根据图 4.34(a) 不难求得节点导纳矩阵各元素(请读者核算), 现列出节点导纳矩阵:

$$Y = \begin{bmatrix} 0.2019 - j9.909 & 0 & j3.320 & 0 \\ 0 & 0.1433 - j2.049 & j1.692 & 0 \\ j3.320 & j1.692 & -j8.061 & j3.049 \\ 0 & 0 & j3.049 & -j3.049 \end{bmatrix}$$

根据式(4.146) 计算节点阻抗矩阵第 4 列元素。由方程

$$Y \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_3 \\ \dot{U}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

解得

$$Z_{14} = \dot{U}_1 = 0.009208 + j0.1331$$

$$Z_{24} = \dot{U}_2 = 0.03572 + j0.3249$$

$$Z_{34} = \dot{U}_3 = 0.01938 + j0.3976$$

$$Z_{44} = \dot{U}_4 = 0.01938 + j0.7256$$

短路点 4 的短路电流:

$$\dot{I}_4 = \frac{\dot{U}_{4(0)}}{Z_{44}} = \frac{0.99}{0.01938 + j0.7256} = 0.03642 - j1.364$$

各节点电压:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{1(0)} - Z_{14}\dot{I}_4 = 0.9476 \angle 13.19^\circ$$

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_{2(0)} - Z_{24}\dot{I}_4 = 0.5591 \angle 3.91^\circ$$

$$\dot{U}_3 = \dot{U}_{3(0)} - Z_{34}\dot{I}_4 = 0.5056 \angle 11.17^\circ$$

线路 L-1 故障电流(见图 4.32(a)):

$$\dot{I}_n = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_3}{Z_4 + Z_7} = 0.3918 - j1.413$$

负荷 L-1 电流:

$$\dot{I}_{L-1} = \frac{\dot{U}_1}{Z_9} = 0.2133 - j0.0717$$

发电机短路电流:

$$\dot{I}_G = \dot{I}_n + \dot{I}_{L-1} = 1.604 \angle -67.83^\circ$$

短路点起始次暂态电流:

$$\dot{I}_D = \dot{I}_4 + \frac{\dot{U}_{4(0)}}{Z_3} = 2.300 \angle -89.09^\circ$$

4.4.3 应用运算曲线计算三相短路电流周期分量

电力系统三相短路后任意时刻的短路电流周期分量的准确计算是非常复杂的,工程上均使用近似的实用计算法,目前我国使用运算曲线法,即应用事先制作的三相短路电流周期分量的曲线进行计算。下面介绍运算曲线和使用

方法。

运算曲线是根据图 4.36(a) 的电路制作的。计算条件为三相短路前发电机以额定电压满载运行, 高压母线负荷 L 为发电机额定容量的一半, $\cos\varphi = 0.9$ (滞后); 其余的一半负荷在短路点 D 以外; 同步发电机采用有代表性的典型参数。计算 D 点三相短路的等值电路示于图 4.36(b), 其中负荷 L 用恒定阻抗 Z_L 代替。根据这个等值电路, 对不同 x_l 值(表示短路远近) 分别计算出不同时刻短路电流周期分量 I 。最后以电流标么值 I 为纵坐标, 计算电抗 $x_{js} = x_d'' + x_T + x_l$ 为横坐标, 以时间 t 为参数绘制出短路电流曲线族, 即得到运算曲线。这里 x_{js} 和 I 都是以发电机额定容量和平均额定电压为基准的标么值。

本书附录中附图 1 至附图 9 是我国 1980 年绘制的运算曲线, 其中附图 1 至附图 5 是汽轮发电机的运算曲线, 附图 6 至附图 9 为水轮发电机的运算曲线, 两者都已计及强行励磁的影响。制作运算曲线所用的电机参数, 是根据我国常用的各种容量同步发电机参数, 用概率统计方法计算得到的“标准参数”。因此这些运算曲线可用来计算具有不同容量发电机的电力系统的三相短路电流, 一般不需要对计算结果进行修正。

采用计算电抗 x_{js} 为横坐标是为了使运算曲线使用更为方便。例如计算图 4.36(a) 中 D 点三相短路电流时, 只需绘出图 4.36(c) 的等值电路, 其中发电机电抗用 x_d'' 表示, 负荷全部略去, 然后求出发电机对短路点的计算电抗 x_{js} , 就可从运算曲线上查得某时刻 t 的短路电流周期分量的标么值。

运算曲线只做到 $x_{js} = 3.4$ 为止, 因为 $x_{js} > 3$ 时, 短路电流周期分量中次暂态和暂态自由分量的初值已经很小, 实际上任意时刻电流的周期分量值为 $I_\infty = 1/x_{js}$ 。

运算曲线主要用来计算短路点及其邻近支路的短路电流周期分量值。

应用运算曲线计算电力系统三相短路电流周期分量的步骤如下:

1. 制订等值网络

各同步发电机的电抗取 x_d'' ; 大型同步调相机和靠近短路点的大型同步电

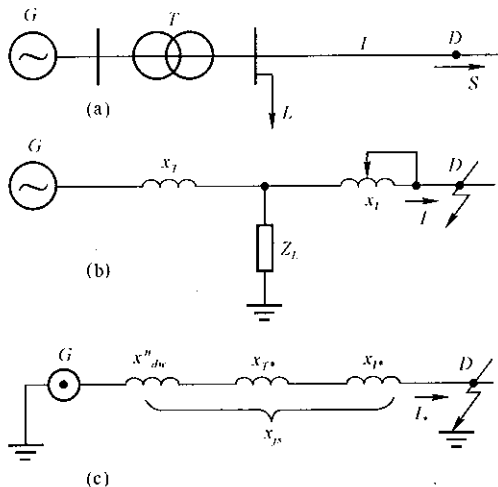


图 4.36 制作运算曲线的电路

动机作为同容量发电机计算;所有其他负荷均略去不计。至于接在短路点的大型异步电动机和综合负荷,它们供出的短路电流衰减很快,通常只考虑对短路点起始次暂态电流 I'' 的影响,可用 4.3 节介绍的方法单独计算。由于计算方法是近似的,各元件的电阻都可不计,变压器的变比用各侧平均额定电压之比代替,各电压级电压基准值选用各自的平均额定电压。选择适当的功率基准值 S_B ,计算各元件电抗的标么值。

2. 计算各电源对短路点的转移电抗

将等值网络化简,消去全部联络节点,求出各电源对短路点的转移电抗。如图 4.37(a) 所示的三个电机的等值网络,经过 Y- Δ 变换后,得到图 4.37(b) 所示最简单的网络,各电机对短路点的转移电抗分别为 x_{1D} 、 x_{2D} 和 x_{3D} 。图中 x_{12} 、 x_{23} 和 x_{13} 不必求出,也可以不画出,因为它们对短路点电流没有影响。

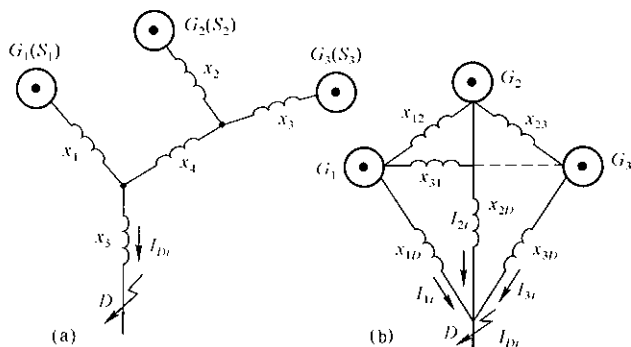


图 4.37 等值网络的简化

3. 求各计算电抗

例如图 4.37 中三个电机的额定容量分别为 S_1 、 S_2 和 S_3 ,相应的计算电抗(即归算到电机额定容量下的标么值)为

$$x_{j1} = x_{1D} \frac{S_1}{S_B} \quad x_{j2} = x_{2D} \frac{S_2}{S_B} \quad x_{j3} = x_{3D} \frac{S_3}{S_B}$$

4. 计算任意时间 t 的短路电流周期分量

根据各发电机的计算电抗分别从相应(汽轮或水轮发电机)的运算曲线上查出 t 秒时各发电机供出的短路电流。需要注意,从运算曲线上查出的电流是以相应发电机额定容量为基准的标么值,计算短路点总电流时不可直接相加,必须归算到同一基准功率或算出有名值后再相加。例如图 4.37(b),从运算曲线查出的三个电机的电流分别为 I_{1t} 、 I_{2t} 和 I_{3t} ,以 S_B 为基准的短路点

总电流标么值应为

$$I_{D*} = I_{1*} \cdot \frac{S_1}{S_B} + I_{2*} \cdot \frac{S_2}{S_B} + I_{3*} \cdot \frac{S_3}{S_B}$$

其有名值为

$$I_{Dl} = I_{D*} \cdot \frac{S_B}{\sqrt{3} U_{MN}} (\text{kA}) (\text{有效值})$$

或归算为有名值再相加:

$$I_{Dl} = I_{1l} \cdot \frac{S_1}{\sqrt{3} U_{MN}} + I_{2l} \cdot \frac{S_2}{\sqrt{3} U_{MN}} + I_{3l} \cdot \frac{S_3}{\sqrt{3} U_{MN}} (\text{kA})$$

式中 U_{MN} 为短路点平均额定电压。

在实际的电力系统中,发电机数很多,如果每台电机都单独计算,则计算工作量很大,而且无此必要。为了减小电机数目,可将对短路点电气距离大致相等、类型(指汽轮或水轮发电机)相同的若干台电机合并为一台等值电机,它的容量为各机容量的总和。如果某些不同类型的发电机对短路点的电气距离都很大,也可合并为一台等值发电机。这是因为随着电气距离的增大,汽轮和水轮发电机短路电流的变化规律趋于一致。

如果电力系统包含有无限大容量电源,则不可将它与其他发电机合并。无限大容量电源是指容量相对很大、内阻抗相对很小和端电压恒定的等值电源或等值系统,它供出的短路电流周期分量不随时间而变化。通常无限大电源母线的电压标么值取为1,它提供的短路电流 $I_{\infty} = 1/x_{SD}$, x_{SD} 为该电源对短路点的转移电抗标么值。

【例 4.9】 图 4.38 中水电厂 D 点发生三相短路,试求 $t=0$ 和 1.5s 时故障点短路电流周期分量 I_D'' 和 $I_{D1.5}$ 。四台水轮发电机的 $x_d'' = 0.2$ 。

【解】 取 $S_B = 100 \text{ MVA}$, 电压基准取平均额定电压。等值电路见图 4.39(a), 发电机 $G-1$ 和 $G-2$ 相同, 与 D 点电气距离相等, 变压器 $T-1$ 和 $T-2$ 也相同, 可作为两倍功率的一个发电机-变压器单元处理。合并后发电机和变压器的电抗分别为

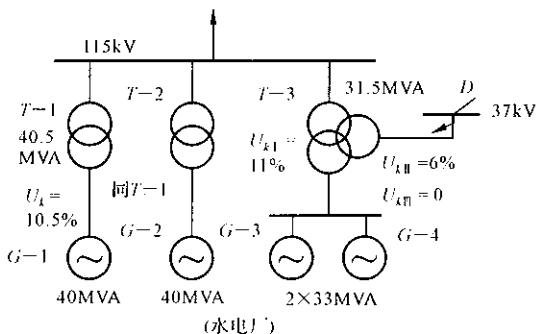


图 4.38 例 4.9 水电厂接线图

$$x_1 = 0.2 \times \frac{100}{2 \times 40} = 0.25$$

$$x_2 = 0.105 \times \frac{100}{2 \times 40.5} = 0.1296$$

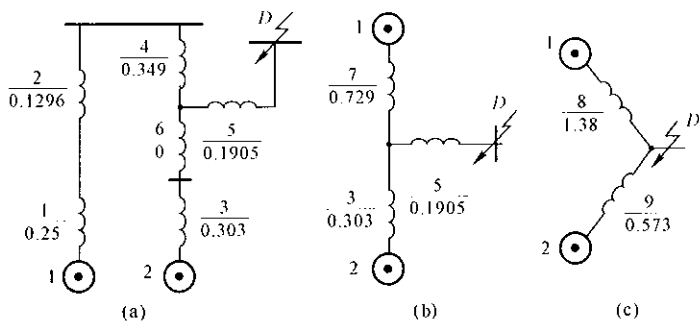


图 4.39 例 4.9 的等值网络

同理,发电机 $G-3$ 和 $G-4$ 合并为一台额定容量为 $2 \times 33 = 66\text{MVA}$ 的发电机,电抗为

$$x_3 = 0.2 \times \frac{100}{66} = 0.303$$

变压器 $T-3$ 的电抗:

$$x_1 = 0.11 \times \frac{100}{31.5} = 0.349$$

$$x_5 = 0.06 \times \frac{100}{31.5} = 0.1905$$

$$x_6 = 0$$

图 4.39(a) 化简为图 4.39(b), 其中 $x_7 = x_1 + x_2 + x_3 = 0.729$ 。将 Y 变换为 Δ 得图 4.39(c), 其中

$$x_8 = x_7 + x_5 + \frac{x_7 x_5}{x_3} = 1.38$$

$$x_9 = x_3 + x_5 + \frac{x_3 x_5}{x_7} = 0.573$$

电源 1 的计算电抗:

$$x_{js1} = 1.38 \times \frac{2 \times 40}{100} = 1.1$$

由附图 8.9 水轮机运算曲线查得: $I_1'' = 0.97$, $I_{1(1.5)} = 1.1$ 。

电源 2 的计算电抗:

$$x_{js2} = 0.573 \times \frac{2 \times 33}{100} = 0.378$$

由附图 6.7 查得

$$I_2' = 2.95, \quad I_{2(1.5)} = 2.64$$

短路点电流:

$$\begin{aligned} I_D' &= 0.97 \times \frac{80}{\sqrt{3} \times 37} + 2.95 \\ &\quad \times \frac{66}{\sqrt{3} \times 37} \\ &= 0.97 \times 1.248 + 2.95 \times 1.03 \\ &= 4.25(\text{kA}) \\ I_{D1.5} &= 1.1 \times 1.248 + 2.64 \times 1.03 \\ &= 4.09(\text{kA}) \end{aligned}$$

【例 4.10】 图 4.40 所示的电力系统, D 点发生三相短路, 试计算 $t = 0, 0.01$ 和 1s 时的短路电流周期分量。图中等值系统 S 可看作无限大功率电源。

【解】 取 $S_B = 100\text{MVA}$, $U_B =$ 平均额定电压, 作等值网络图 4.41(a), 将 1 和 3 支路串联后与 4、5 支路变换为 Δ , 得图 4.41(b), 其中:

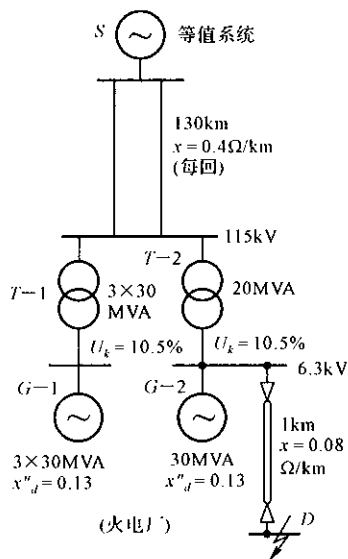


图 4.40 例 4.10 系统结线图

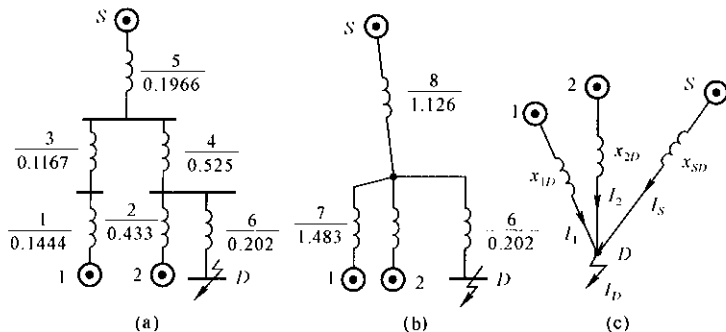


图 4.41 例 4.10 等值网络

$$x_7 = (x_1 + x_3) + x_4 + \frac{(x_1 + x_3)x_4}{x_5} = 1.483$$

$$x_8 = x_5 + x_4 + \frac{x_5 x_4}{x_1 + x_3} = 1.117$$

再经星-网变换简化为图 4.41(c)。各转移电抗计算如下:

$$y = \frac{1}{x_2} + \frac{1}{x_7} + \frac{1}{x_8} + \frac{1}{x_6} = 8.83$$

$$x_{1D} = x_7 x_6 y = 2.645$$

$$x_{2D} = x_2 x_6 y = 0.772$$

$$x_{8D} = x_8 x_6 y = 1.992$$

电源 1 的计算电抗:

$$x_{js1} = x_{1D} \frac{S_1}{S_B} = 2.645 \times \frac{3 \times 30}{100} = 2.38$$

由运算曲线附图 3 和 5 查得:

$$I_1'' = 0.44, \quad I_{1(0,0.1)} = 0.44, \quad I_{1(1)} = 0.44$$

电源 2 的计算电抗:

$$x_{js2} = 0.772 \times \frac{30}{100} = 0.232$$

由附图 1 运算曲线查得

$$I_2'' = 4.7, \quad I_{2(0,0.1)} = 4.55, \quad I_{2(1)} = 2.66$$

系统 S 供给的短路电流:

$$I_S = \frac{1}{x_{SD}} = \frac{1}{1.992} = 0.502$$

短路点总电流:

$$\begin{aligned} I_D &= 0.44 \times \frac{3 \times 30}{\sqrt{3} \times 6.3} + 4.7 \times \frac{30}{\sqrt{3} \times 6.3} \\ &\quad + 0.502 \times \frac{100}{\sqrt{3} \times 6.3} \\ &= 0.44 \times 8.25 + 4.7 \times 2.75 + 0.502 \times 9.16 \\ &= 21.15(\text{kA}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{D(0,0.1)} &= 0.44 \times 8.25 + 4.55 \times 2.75 + 0.502 \times 9.16 \\ &= 20.74(\text{kA}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{D(1)} &= 0.44 \times 8.25 + 2.66 \times 2.75 + 0.502 \times 9.16 \\ &= 15.54(\text{kA}) \end{aligned}$$

4.5 电力系统不对称运行分析方法 - 对称分量法

电力系统正常运行时可认为是三相对称的,即各元件三相阻抗相同,各

处三相电压和电流对称,且具有正弦波形和正常相序。电力系统对称运行方式的破坏主要与故障有关,例如发生不对称短路或个别地方一相或两相断开等等。

电力系统对称运行方式遭到破坏时,三相电压和电流将不对称,而且波形也发生不同程度的畸变,即除基波外,还含有一系列谐波分量。在暂态过程中谐波成分更多,而且还出现非周期分量。在本章中,将只限于分析电压和电流的基波(50Hz)分量,并且在暂态过程任一瞬间都当作正弦波形看待。这样,不对称运行方式的分析就可简化为正弦电势作用下三相不对称电路的分析,可以用相量法计算。由于只有个别地点发生不对称短路或开断导致三相阻抗不相等,系统其他各元件的三相阻抗及三相之间互感仍保持相等,所以一般不使用直接求解复杂的三相不对称电路的方法,而采用更简单的对称分量法进行分析。

4.5.1 对称分量法及其应用

任意不对称的三相相量 \dot{F}_a 、 \dot{F}_b 和 \dot{F}_c [见图4.42(a)],可以分解为三组相序不同的对称分量:(1)正序分量 \dot{F}_{a1} 、 \dot{F}_{b1} 和 \dot{F}_{c1} [见图4.42(b)];(2)负序分量 \dot{F}_{a2} 、 \dot{F}_{b2} 和 \dot{F}_{c2} [见图4.42(c)];(3)零序分量 \dot{F}_{a0} 、 \dot{F}_{b0} 和 \dot{F}_{c0} [见图4.42(d)]。即存在如下关系:

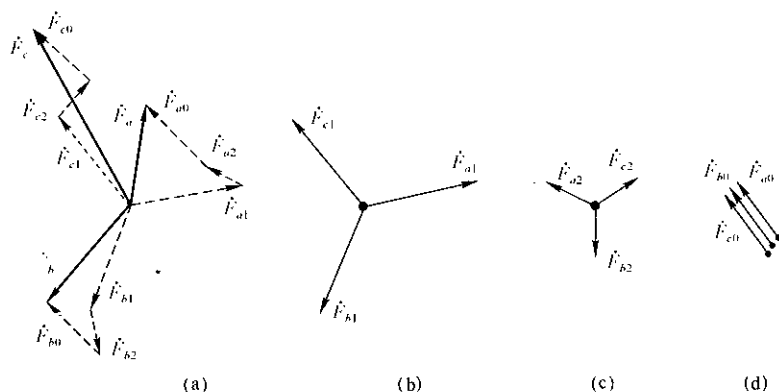


图 4.42 三相不对称相量分解为对称分量

$$\left. \begin{aligned} \dot{F}_a &= \dot{F}_{a1} + \dot{F}_{a2} + \dot{F}_{a0} \\ \dot{F}_b &= \dot{F}_{b1} + \dot{F}_{b2} + \dot{F}_{b0} \\ \dot{F}_c &= \dot{F}_{c1} + \dot{F}_{c2} + \dot{F}_{c0} \end{aligned} \right\} \quad (4.149)$$

每一组对称分量之间的关系为

$$\left. \begin{aligned} \dot{F}_{b1} &= e^{j120^\circ} \dot{F}_{a1} = a^2 \dot{F}_{a1} \\ \dot{F}_{c1} &= e^{j120^\circ} \dot{F}_{a1} = a \dot{F}_{a1} \\ \dot{F}_{b2} &= e^{j120^\circ} \dot{F}_{a2} = a \dot{F}_{a2} \\ \dot{F}_{c2} &= e^{-j120^\circ} \dot{F}_{a2} = a^2 \dot{F}_{a2} \\ \dot{F}_{b0} &= \dot{F}_{c0} = \dot{F}_{a0} \end{aligned} \right\} \quad (4.150)$$

式中复数算符

$$\begin{aligned} a &= e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \\ a^2 &= e^{j240^\circ} = e^{-j120^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \\ a^2 + a + 1 &= 0 \end{aligned}$$

将式(4.150)代入式(4.149)可得

$$\begin{bmatrix} \dot{F}_a \\ \dot{F}_b \\ \dot{F}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{F}_{a1} \\ \dot{F}_{a2} \\ \dot{F}_{a0} \end{bmatrix} \quad (4.151)$$

式中系数矩阵是非奇异的,它的逆矩阵存在,所以有

$$\begin{bmatrix} \dot{F}_{a1} \\ \dot{F}_{a2} \\ \dot{F}_{a0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{F}_a \\ \dot{F}_b \\ \dot{F}_c \end{bmatrix} \quad (4.152)$$

任意三相不对称的电压或电流都可用式(4.152)求出它们的正序、负序和零序电压或电流分量。已知三序分量时,可用式(4.151)合成三相相量。

现以不对称短路为例说明应用对称分量法计算短路电流周期(基波)分

量的原理。图 4.43(a) 所示简单电力系统的 D 点发生 a 相接地短路, 由于 D 点三相对地阻抗不相等, 导致三相电压和电流不对称。图 4.43(a) 可以用图 4.43(b) 等值, 也就是将三相阻抗不相等处用三相不对称的理想电压源来代替。应用式(4.152) 将 D 点三相不对称的电压源分解为三组电压对称的电压源, 即正序、负序和零序电压源, 如图 4.43(c) 所示。最后, 应用叠加原理分三次求解图 4.43(c): (1) 三相网络中加上全部发电机的电势(只有正序分量)和短路点的正序电压源, 如图 4.43(d) 所示; (2) 短路点加上负序电压源, 见图 4.43(e); (3) 短路点加上零序电压源, 见图 4.43(f)。

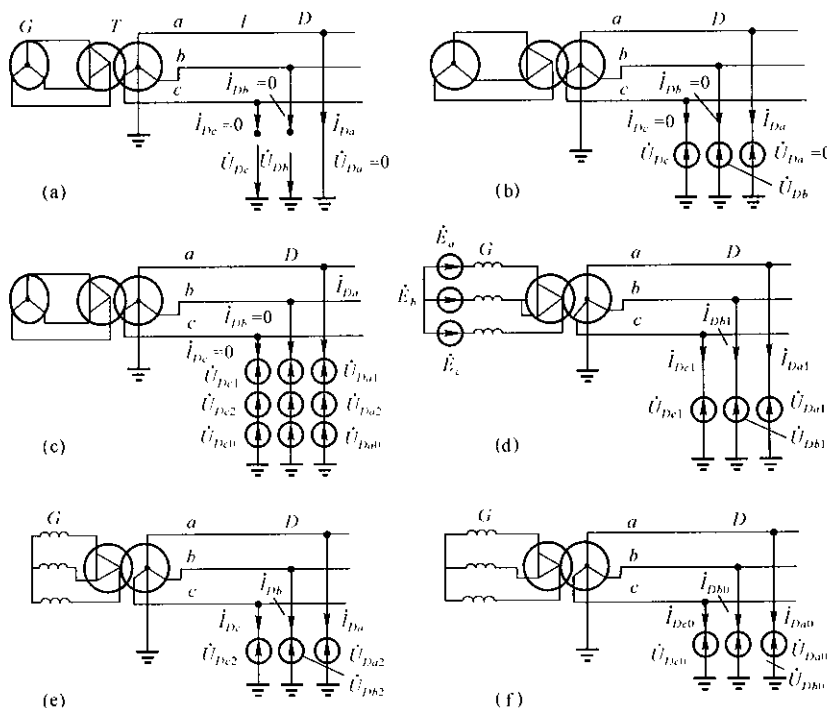


图 4.43 简单不对称短路分析原理

对于图 4.43(d) 的三相电路, 各发电机的电势及短路点所加的电压源都是三相对称的正序电势或电压, 而网络各元件的阻抗也是三相对称的, 所以网络中各支路电流、各节点电压必然是三相对称的正序相量, 不可能出现负序和零序分量。因此, 可以用电网正常运行的分析方法取一相(例如 a 相)进行计算。计算用的单相等值网络称为正序等值网络, 各元件阻抗称为正序阻抗, 即正常运行时的阻抗。从短路点观察, 正序网络是一单口有源网络, 根据戴维宁

定理可用一等值电势 \dot{E}_{a1} 和等值阻抗 Z_{D1} 代替,如图 4.44(a) 所示。

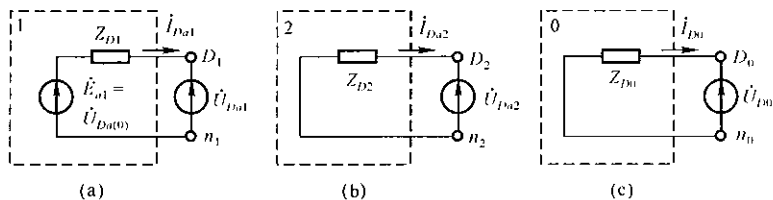


图 4.44 简化后的各序等值网络

等值电势 \dot{E}_{a1} 等于端口 D_1-n_1 的开路电压,亦即故障前 D 点的相电压 $\dot{U}_{Da(0)}$,是已知量; Z_{D1} 为各电源电势等于零(短接)时 D 点的自阻抗。正序网络中各符号均加下标“1”作为标志。

同理,图 4.43(e) 和图 4.43(f) 中,各支路电流及各节点电压,分别只含有负序分量或零序分量,它们都是三相对称的,也可以取一相进行分析。相应的单相等值网络分别称为负序(加下标 2)和零序(加下标 0)等值网络,各元件的阻抗称为负序或零序阻抗。负序及零序网络均为单口无源网络,可用一等值阻抗代表,如图 4.44(b)、(c) 所示。由于零序电压、电流三相相量相等,所以图 4.44(c) 中表示相别的下标 a 省去。

以上讨论表明,由正序网络决定的电流和电压是实际网络中电流和电压的正序分量,由负序(零序)网络决定的电流和电压是实际网络中电流和电压的负序(零序)分量。三序分量互不相关。

图 4.44 中各序网络的电压方程式分别为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{Da1} &= \dot{U}_{Da(0)} - Z_{D1} \dot{I}_{Da1} \\ \dot{U}_{Da2} &= -Z_{D2} \dot{I}_{Da2} \\ \dot{U}_{D0} &= -Z_{D0} \dot{I}_{D0} \end{aligned} \right\} \quad (4.153)$$

这三个方程式含有 6 个变量,还需根据短路类型列出三个方程,才能求解。

例如 D 点发生 a 相金属性接地短路,显然有

$$\dot{U}_{Da} = 0, \quad \dot{I}_{Db} = 0 \text{ 和 } \dot{I}_{Dc} = 0 \quad (4.154)$$

用对称分量表示时,根据式(4.151) 可得

$$\dot{U}_{Da} = \dot{U}_{Da1} + \dot{U}_{Da2} + \dot{U}_{D0} = 0 \quad (4.155)$$

$$\dot{I}_{Db} = a^2 \dot{I}_{Da1} + a \dot{I}_{Da2} + \dot{I}_{D0} = 0$$

$$\dot{I}_{Dc} = a\dot{I}_{Da1} + a^2\dot{I}_{Da2} + \dot{I}_{D0} = 0$$

后两式相减,可得

$$\dot{I}_{Da1} = \dot{I}_{Da2} \quad (4.156)$$

再代入 \dot{I}_{D0} 式,计及 $a^2 + a = -1$ 后有

$$\dot{I}_{Da1} = \dot{I}_{D0} \quad (4.157)$$

式(4.155)~(4.157)称为 a 相短路的边界条件,与式(4.153)联立求解,就可得到短路点电压和电流的三序分量;然后再从三个序网中求得各支路电流和各节点电压的三序分量。最后,用式(4.151)求得三相电压和电流。

由上述可知,电力系统不对称运行分析的第一步是制订三序等值网络。正序网络的结构和各元件参数与正常运行的等值网络相同。分析不对称故障暂态过程时,发电机的正序电抗与三相短路时相同,例如计算起始次暂态电流时用 x_d'' ,计算起始暂态电流时用 x_d' ,稳态计算用 x_d 。负序网络的结构和正序网络相同,但各发电机负序电势为零、负序阻抗与正序阻抗不同,负荷的负序阻抗也与正序阻抗不同。零序网络的结构和各元件参数则与正序网络有很大差别。下面将讨论各元件的负序和零序参数以及零序等值网络。

4.5.2 同步电机负序和零序阻抗

同步电机定子绕组中流过同步频率的负序电流时,它产生的旋转磁场与转子的转向相反,对转子的相对转速为同步转速的两倍,因此在转子的励磁绕组和阻尼绕组中感应产生两倍同步频率的交流电流,并将负序电枢反应磁通排挤到各自的漏磁路径上通过。可见定子绕组对负序电流的等值电抗即负序电抗 x_2 为 x_d'' 和 x_q'' 的某种平均值,一般近似地用算术平均值计算,即

$$x_2 \approx \frac{1}{2}(x_d'' + x_q'')$$

当 $x_d'' = x_q''$ 或差别不大时, $x_2 \approx x_d''$ 。定子负序电阻大于正序电阻,但较 x_2 小得多,一般略去不计。

同步电机定子绕组中的零序电流不产生气隙磁通,只存在定子绕组的漏磁通,所以定子零序电抗 x_0 等于零序漏抗。定子零序漏磁与正序或负序电流产生的漏磁很不一样,这是因为定子每个槽中嵌有相邻两相绕组的导线且绕向相反,而各相零序电流大小相等相位相同,所以零序漏磁比正序漏磁小,减小的程度视绕组型式而定。由于上述原因,同步电机零序电抗的标么值差别很

大,一般 $x_0 = (0.15 \sim 0.6)x_d''$ 。同步电机零序电阻和正序电阻相等。

表 4.3 列出同步电机 x_2 和 x_0 标么值的大致范围。

表 4.3 同步电机负序和零序电抗

	汽轮发电机	水轮发电机	同步调相机和大型同步电动机
x_2	0.134 ~ 0.18	0.15 ~ 0.35	0.24
x_0	0.036 ~ 0.08	0.04 ~ 0.125	0.08

4.5.3 异步电动机和综合负荷的负序及零序阻抗

异步电动机的负序阻抗由它的等值电路(见图 4.45)确定,但负序电流产生的旋转磁场与转子转向相反,两者的相对转速为 $\omega_0 + (1-s)\omega_0 = (2-s)\omega_0$,

ω_0 为同步角速度, s 为正常时的滑差,所以图中的滑差要用负序滑差 $s_2 = 2-s$ 代替。不计励磁电流时,负序阻抗为

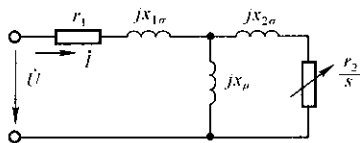


图 4.45 异步电动机等值电路

$$= \left(r_1 + \frac{r_2}{2-s} \right) + j(x_1 + x_2) \approx r_1 + \frac{r_2}{2} + jx''$$

综合负荷的负序阻抗由各用电设备的负序阻抗和供电线路阻抗确定,随负荷成分不同而异。在不对称运行分析中可近似地取为:

$$Z_2 = 0.18 + j0.24 \quad (6 \sim 10\text{kV 母线的负荷})$$

$$Z_2 = 0.19 + j0.36 \quad (35\text{kV 以上母线})$$

更粗略些,可取 $Z_2 \approx jx_2 = j0.35$ 。这些数据都是以负荷本身视在功率为基准的标么值。

异步电动机三相绕组一般接成不接地星形或三角形,综合负荷一般用 Δ/Y 接法的变压器供电,所以零序电流不能流通,在零序网络中用不到它们的零序阻抗。

4.5.4 三相变压器零序参数和等值电路

变压器是静止的磁耦合部件,当加上正序或负序电压时,各侧各绕组之间电压和电流的关系、内部磁通分布情况,除了相序不同外,其他都没有差别,所以正、负序参数和等值电路完全相同。变压器加上零序电压时,情况有所不同,这与变压器结构及三相绕组的接法有关,下面分别加以讨论。

1. 普通变压器零序等值电路

图 4.46 画出了几种普通双绕组变压器的接法(左边各图)和相应的零序

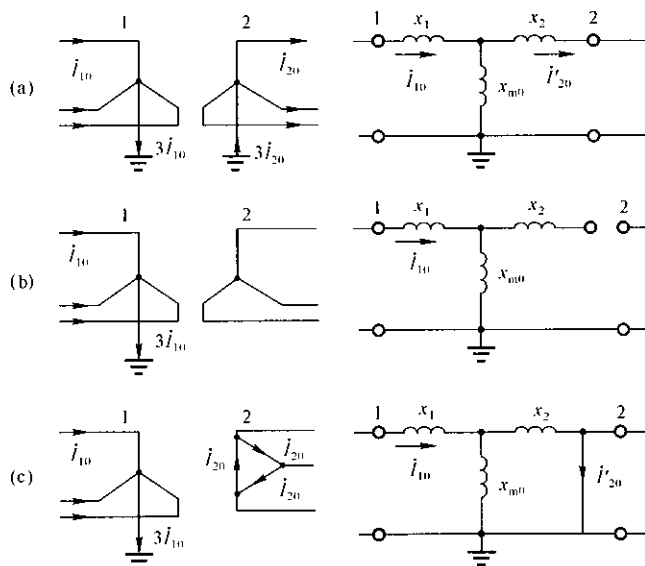


图 4.46 普通双绕组变压器的接法和相应的零序单相等值电路

单相等值电路(右边各图)。图 4.46(a) 为 Y_0/Y_0 接法的变压器,不管在哪一侧施加零序电压,两侧零序电流都可以流通(注意:中性线零序电流为绕组零序电流的 3 倍),所以等值电路的形式和正序等值电路相同。图中 x_1 和 x_2 为两侧绕组的零序漏抗, x_{m0} 为零序励磁电抗,电阻均略去。零序漏抗和正序漏抗相等或大致相等, x_{m0} 则与变压器的结构密切相关,详见后述。图 4.46(b) 为 Y_0/Y 接法的变压器,当零序电压加在 Y_0 侧时,该侧有零序电流流通,另一侧中性点不接地不可能有零序电流,相当于开路,可见 1 侧的零序电抗为 $x_1 + x_{m0}$ 。如果零序电压加到 Y 侧,则两侧绕组均无电流,相当于整个变压器断开, $x_0 = \infty$ 。图 4.46(c) 为 Y_0/Δ 接法的变压器,零序电压加在 Y_0 侧(即 1 侧)时,两侧绕组均有零序电流,但 2 侧在 Δ 内形成环流,流出外电路的电流为零,所以单相等值电路中相当于 2 侧短路且对外开断。1 侧的零序电抗为

$$x_0 = x_1 + \frac{x_2 x_{m0}}{x_2 + x_{m0}}$$

由于 x_{m0} 比 x_2 大得很多(见后述),所以 $x_0 \approx x_1 + x_2$ 。如果零序电压加在 Δ 侧,则相当于整个变压器断开。至于 Y/Y 、 Y/Δ 接法的变压器,则不管零序电压加在哪一侧 x_0 都是无限大。

同理,可作出三绕组变压器的零序等值电路,如图 4.47 所示。

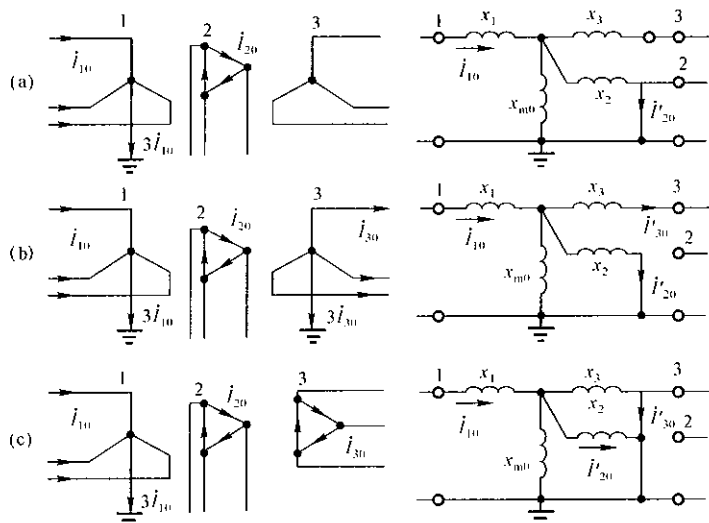


图 4.47 三绕组变压器的零序等值电路

由三个单相变压器接成的三相变压器组,各相的铁心是独立的,磁通分布情况与所加电压的相序无关,所以零序和正序励磁电流一样小,可认为 $x_{m0} = \infty$ 。另外,零序漏抗和正序漏抗也完全相同。

三相三柱式变压器的各相铁心是连接在一起的,如图 4.48 所示(每相只画出一个绕组)。三相绕组上加正序或负序电压时,各相的主磁通均在铁心内形成回路,所以励磁电

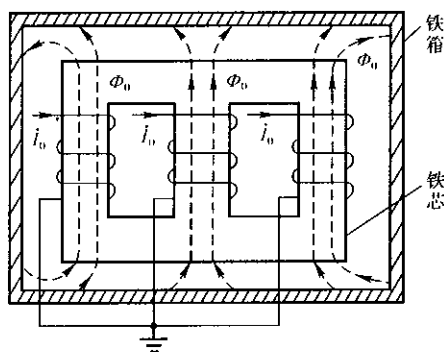


图 4.48 三相三柱式变压器

流很小,励磁电抗很大(标么值约 $50 \sim 200$)。当三相绕组上加零序电压时,情况就大不相同。因为三相零序主磁通大小相等相位一样,所以只能通过绝缘介质和外壳(铁箱)形成回路(见图 4.48),因而零序励磁电流相当大。同时,零序主磁通还使铁箱中产生涡流电流,其效果相当于存在一短路绕组,使零序励磁电流更大。因此 x_{m0} 为有限值,要用实验方法测定,它的标么值约在 $0.3 \sim 1$ 范围内。此外,由于零序磁路的改变及铁箱等值短路绕组的影响,各相绕组的漏磁通分布也发生一些变化,因而零序等值漏抗与正序的有些不同。特别是

Y_0/Y 或 $Y_0/Y_0/Y$ 接法的变压器,两种漏抗差别更大一些。在没有实测数据时,仍可用正序等值漏抗代替零序漏抗。三相三柱式变压器中若有一侧绕组接成 Δ ,则零序等值电路中 Δ 侧绕组的漏抗总是和 x_{m0} 并联的,两者相比 x_{m0} 还是大得多,所以等值电路中 x_{m0} 支路可以除去。因此,只有 Y_0/Y 、 Y_0/Y_0 和 $Y_0/Y_0/Y$ 等接法的三相三柱式变压器需要计及数值有限的 x_{m0} 。

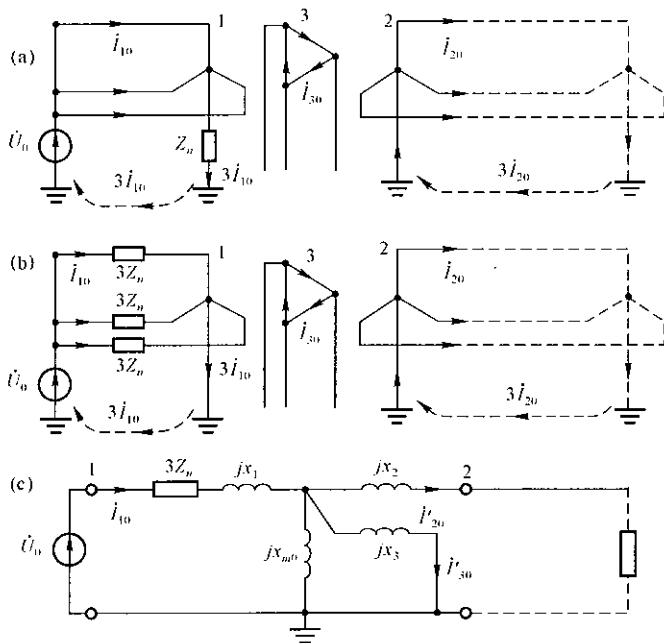


图 4.49 中性点经阻抗接地时的零序等值电路

变压器中性点经阻抗接地时,零序等值电路必须计及这一电抗,这点与正序或负序等值电路不同。例如图 4.49(a) 的 $Y_0/Y_0/\Delta$ 变压器,1 侧中性点经阻抗 Z_n 接地,2 侧直接接地。为了正确地作出等值电路,首先要查明零序电流的分布情况和中性线 Z_n 上的零序电压降(为 $3Z_n \dot{I}_{10}$)。在保持零序电流分布不变,各回路零序电压方程不变的条件下,可作出图 4.49(b) 的等值图,再参考图 4.47(b) 就不难画出图 4.48(c) 所示的零序等值电路,其中 x_{m0} 支路可以除去。

2. 自耦变压器零序等值电路

自耦变压器一般用于联系两个中性点接地的电力网,它本身的中性点一般也是接地的,通常还具有第三个非自耦的低压绕组。下面先讨论由三个单相自耦变压器构成的三相变压器组,它的 x_{m0} 作为无限大处理。

中性点直接接地的自耦变压器,零序等值电路和普通变压器完全相同。图

4. 50(a) 为 Y_0/Y_0 接法的自耦变压器及其零序等值电路, 由于 $x_{m0} = \infty$, 零序等值电路只有一串联电抗 $x_{1-2} = x_1 + x_2$ 。图 4. 50(b) 为 $Y_0/Y_0/\Delta$ 接法的自耦变压器。至于 $Y_0/Y_0/Y$ 接法的零序等值电路, 因为第三绕组中性点通常不接地, 所以和图 4. 50(a) 相同。需要注意的是, 自耦变压器 1、2 侧绕组还有电的联系, 中性线电流为 $3(\dot{I}_{10} - \dot{I}_{20})$, 要用实际电流 (不是归算到某一侧的电流) 计算。

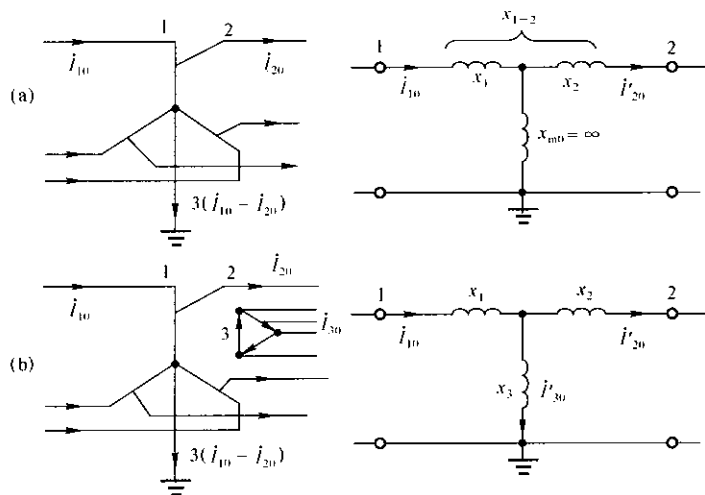


图 4. 50 中性点直接接地自耦变压器零序等值电路 ($x_{m0} = \infty$)

自耦变压器中性点经阻抗接地时, 零序等值电路比较复杂。图 4. 51(a) 为中性点经 Z_n 接地的 Y_0/Y_0 自耦变压器, 设中性点零序电压为 \dot{U}_n , 两侧绕组本身的零序电压分别为 \dot{U}_{1n} 和 \dot{U}_{2n} (均为未归算的实际值), 则两侧端点对地的零序电压为

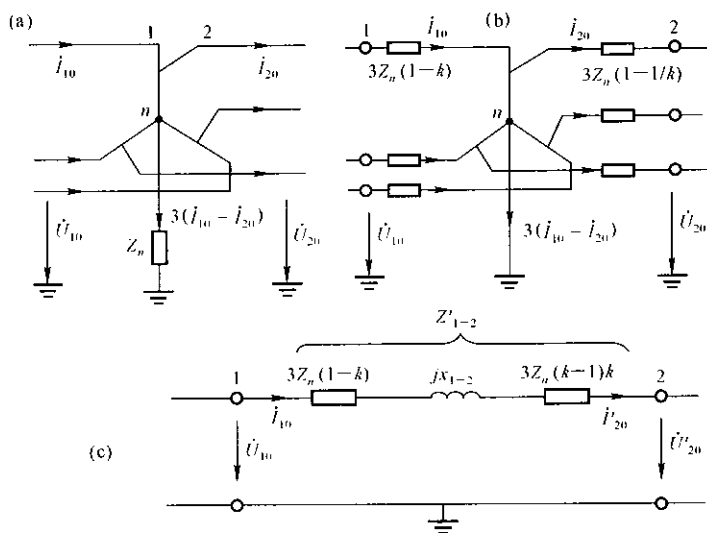
$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{10} &= \dot{U}_{1n} + \dot{U}_n = \dot{U}_{1n} + 3(\dot{I}_{10} - \dot{I}_{20})Z_n \\ \dot{U}_{20} &= \dot{U}_{2n} + \dot{U}_n = \dot{U}_{2n} + 3(\dot{I}_{10} - \dot{I}_{20})Z_n \end{aligned} \right\} \quad (4.158)$$

由于 $x_{m0} \rightarrow \infty$, 零序励磁电流可以不计, 所以

$$\dot{I}_{10} = \dot{I}_{20}/k \quad (4.159)$$

式中, k 为变比。

式(4.159)代入式(4.158), 可得

图 4.51 中性点阻抗接地的 Y_0/Y_0 自耦变压器 ($x_{m0} = \infty$)

$$\dot{U}_{10} = \dot{U}_{1n} + 3Z_n(1-k)\dot{I}_{10}$$

$$\dot{U}_{20} = \dot{U}_{2n} - 3Z_n(1-1/k)\dot{I}_{20}$$

根据上面两式可作出图 4.51(b) 所示的等值图,再参照图 4.50(a) 即可得到图 4.51(c) 的零序等值电路,其中 2 侧的参数均归算到 1 侧。该变压器的零序等值阻抗为

$$\begin{aligned} Z'_{1,2} &= 3Z_n(1-k) + jx_{1-2} + 3Z_n(1-1/k) \times k^2 \\ &= jx_{1-2} + 3Z_n(k-1)^2 \end{aligned} \quad (4.160)$$

中性点经阻抗接地的 $Y_0/Y_0/\Delta$ 自耦变压器[图 4.52(a)],它的单相零序等值电路可用三口网络表示。由于接成 Δ 的 3 侧绕组与外部电路不通零序电流,可作为变压器内部的绕组处理,所以可看作双口网络并用 T 型电路等值,如图 4.52(b) 所示,图中各参数均归算到 1 侧。现在要确定 Z'_1 、 Z'_2 和 Z'_3 。

首先设图 4.52(a) 中 1 侧加上零序电压,2 侧开路。这时的情况和 Y_0/Δ 接法的双绕组变压器相同,所以 1 侧的零序等值阻抗为 $jx_1 + jx_3 + 3Z_n$,而图 4.52(b) 在 2 侧开路时,1 侧的等值阻抗为 $Z'_1 + Z'_3$,两者应相等,即

$$Z'_1 + Z'_3 = jx_1 + jx_3 + 3Z_n \quad (4.161)$$

其次设在图 4.52(a) 中 1 侧加零序电压,2 侧接通外电路,3 侧三角形断开 ($I_3 = 0$),这时的情况和图 4.51 相同,归算到 1 侧的 1.2 间的阻抗同式 (4.160)。同样情况下,图 4.52(b) 中 1.2 间的阻抗为 $Z'_1 + Z'_2$,因而有

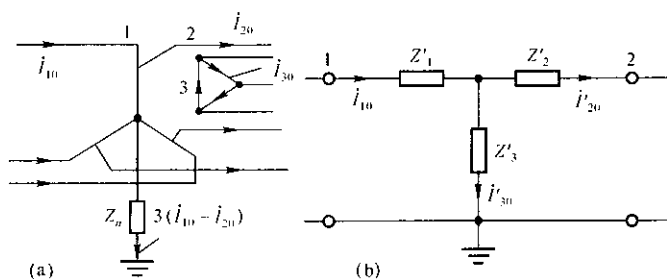


图 4.52 中性点阻抗接地的 $Y_0/Y_0/\Delta$ 自耦变压器 ($x_{m0} = \infty$)

$$Z'_1 + Z'_2 = jx_1 + jx_2 + 3Z_n(k-1)^2 \quad (4.162)$$

再设在 2 侧加零序电压, 1 侧开路, 3 侧三角形闭合。这时 2 侧的零序阻抗为 $jx'_2 + jx'_3 + 3Z_n$, 这是归算到 2 侧的值, 归算到 1 侧则为 $(jx'_2 + jx'_3 + 3Z_n)k^2 = jx_2 + jx_3 + 3Z_n k^2$ 。与图 4.52(b) 比较, 应有

$$Z'_2 + Z'_3 = jx_2 + jx_3 + 3Z_n k^2 \quad (4.163)$$

式(4.161) ~ (4.163) 联立求解, 得

$$\left. \begin{aligned} Z'_1 &= jx_1 + 3Z_n(1-k) \\ Z'_2 &= jx_2 - 3Z_n k(1-k) \\ Z'_3 &= jx_3 + 3Z_n k \end{aligned} \right\} \quad (4.164)$$

以上是按归算到 1 侧的有名值讨论的, 变比应取 $k = U_{1N}/U_{2N}$ 。用标么值表示时, 只需将各阻抗(包括中性线阻抗)除以 1 侧的阻抗基准值即可。

关于三相三柱式自耦变压器, 如果有三角形接法的第三绕组, 仍可使用图 4.50(b) 或图 4.52 的零序等值电路, 但其中的 x_1 、 x_2 和 x_3 最好用实测的零序等值漏抗, 无此数据时也可近似地用正序等值漏抗代替。至于 Y_0/Y_0 和 $Y_0/Y_0/Y$ 接法的三相三柱式自耦变压器, 则不仅 x_{m0} 为有限值, 而且零序漏抗与正序漏抗完全不同, 它们的零序等值电路和零序参数在本书中就不再作进一步的讨论。

【例 4.11】 图 4.53(a) 的自耦变压器, 额定容量为 120MVA, 额定电压为 220/121/11kV, 短路电压: $U_{K1-2}\% = 10.6$, $U_{K2-3}\% = 23$, $U_{K1-3}\% = 36.4$ 。如将高压侧三相直接接地, 中压侧三相加以零序电压 $U_0 = 10\text{kV}$, 试计算: (1) 中性点直接接地时各侧的零序电流; (2) 中性点经 $12.5(\Omega)$ 电抗接地时各侧零序电流和中性点电压。

【解】 取额定容量和额定电压为基准值。零序等值电路见图 4.53(b), 加括号的电抗为中性点经电抗接地时的参数。

(1) 中性点直接接地

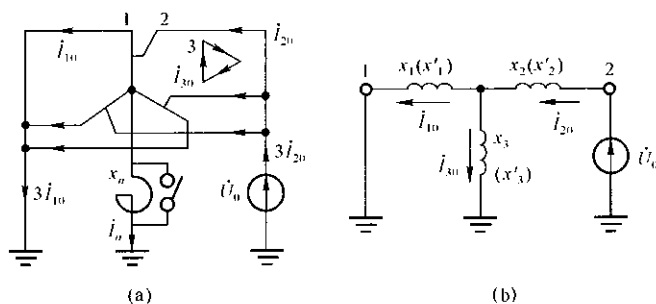


图 4.53 例 4.11 电路图

$$x_1 = \frac{1}{2}(10.6 + 36.4 - 23) \times \frac{1}{100} = 0.12$$

$$x_2 = \frac{1}{2}(10.6 + 23 - 36.4) \times \frac{1}{100} = -0.014$$

$$x_3 = \frac{1}{2}(23 + 36.4 - 10.6) \times \frac{1}{100} = 0.244$$

2 侧施加的零序电压(相电压)标么值为

$$U_0 = 10 / \left(\frac{121}{\sqrt{3}} \right) = 0.143$$

各侧零序电流标么值:

$$I_{20} = \frac{0.143}{-0.014 + (0.12 // 0.244)} = 2.15$$

$$I_{10} = \frac{0.244}{0.12 + 0.244} I_{20} = 1.44$$

$$I_{30} = \frac{0.12}{0.12 + 0.244} I_{20} = 0.709$$

各侧零序电流有名值:

$$I_{20} = 2.15 \times \frac{120}{\sqrt{3} \times 121} = 1.23(\text{kA})$$

$$I_{10} = 1.44 \times \frac{120}{\sqrt{3} \times 220} = 0.453(\text{kA})$$

$$I_{30} = 0.709 \times \frac{120}{\sqrt{3} \times 11} \frac{1}{\sqrt{3}} = 2.58(\text{kA})$$

(变压器额定电流是指线电流,所以三角形接法绕组的额定电流为线电流除以 $\sqrt{3}$ 。)

$$\text{中性线电流 } I_n = 3(I_{20} - I_{10}) = 3(1.23 - 0.453) = 2.33(\text{kA})$$

(2) 中性点经电抗接地

参数归算到高压侧,高中压变比 $k = 220/121 = 1.818$,接地电抗标么值 $x_n = 12.5 \times 120/220^2 = 0.031$ 。等值电路各电抗:

$$x'_1 = 0.12 + 3 \times 0.031(1 - 1.818) = 0.044$$

$$x'_2 = -0.014 + 3 \times 0.031 \times 1.818(1.818 - 1) = 0.124$$

$$x'_3 = 0.244 + 3 \times 0.031 \times 1.818 = 0.413$$

$$I_{20} = \frac{0.143}{0.124 + (0.044 // 0.413)} = 0.873$$

$$I_{10} = \frac{0.413}{0.044 + 0.413} \times 0.873 = 0.789$$

$$I_{30} = \frac{0.044}{0.044 + 0.413} \times 0.873 = 0.084$$

各侧电流实际值:

$$I_{20} = 0.873 \times \frac{120}{\sqrt{3} \times 121} = 0.5(\text{kA})$$

$$I_{10} = 0.789 \times \frac{120}{\sqrt{3} \times 220} = 0.248(\text{kA})$$

$$I_{30} = 0.084 \times \frac{120}{\sqrt{3} \times 11} \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.305(\text{kA})$$

$$\text{中性线电流 } I_n = 3 \times (0.5 - 0.248) = 0.756(\text{kA})$$

$$\text{中性点电压 } U_n = 0.756 \times 12.5 = 9.45(\text{kV})$$

4.5.5 电力线路零序参数和等值电路

三相线路流过正序或负序电流时,由于三相电流之和为零,所以三相线路互为回路,空间磁场只取决于三相导线本身。当三相线路流过零序电流时,由于三相电流相同,它们之和为各相电流的3倍,必须另有回路才能流通。例如架空线路的零序电流将以大地和避雷线(又称架空地线)为回路,因此空间磁场不仅取决于三相导线本身,还与大地和避雷线及其中的电流有关。可见,各相零序阻抗与正序阻抗不同。另外,在三相线路上加零序电压时,每相的零序等值电容也与正序的不同。下面着重分析架空线路的零序阻抗。

1. 单回路架空线的零序阻抗

图 4.54 为三相架空线路及流过任意电流时地中电流的示意图。此三相线路可看作由三个“导线-地”回路组成。三相导线有整循环换位时,各“导线-地”回路的自感抗和电阻相同,用自阻抗 Z_L 表示;每两个“导线-地”回路之间

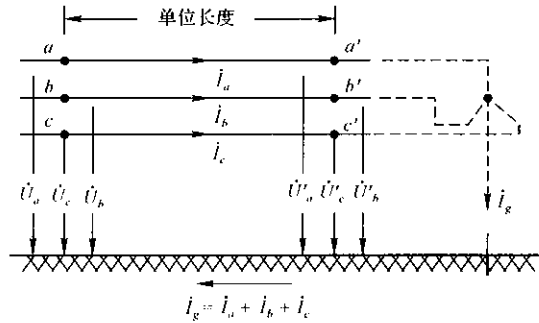


图 4.54 三相架空线路

的互感抗相等, 计及地中电阻时用互阻抗用 Z_M 表示。三相线路单位长度的回路方程可表示为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a - \dot{U}'_a \\ \dot{U}_b - \dot{U}'_b \\ \dot{U}_c - \dot{U}'_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_a \\ \Delta \dot{U}_b \\ \Delta \dot{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_L & Z_M & Z_M \\ Z_M & Z_L & Z_M \\ Z_M & Z_M & Z_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} \quad (4.165)$$

设线路中流过正序(负序)电流, 则 $\dot{I}_b = a^2 \dot{I}_a$ ($a \dot{I}_a$), $\dot{I}_c = a \dot{I}_a$ ($a^2 \dot{I}_a$), 代入式(4.165)可得

$$\Delta \dot{U}_a = [Z_L + (a^2 + a)Z_M] \dot{I}_a = (Z_L - Z_M) \dot{I}_a = Z_1 \dot{I}_a \quad (4.166)$$

式中 $Z_1 = Z_L - Z_M$

同理, $\Delta \dot{U}_b = Z_1 \dot{I}_b$, $\Delta \dot{U}_c = Z_1 \dot{I}_c$ 。 Z_1 即每相正序(负序)阻抗。

设线路中流过零序电流: $\dot{I}_a = \dot{I}_b = \dot{I}_c = \dot{I}_0$, 代入式(4.165), 得

$$\Delta \dot{U}_a = (Z_L + 2Z_M) \dot{I}_a = Z_0 \dot{I}_a$$

式中 $Z_0 = Z_L + 2Z_M \quad (4.167)$

同理, $\Delta \dot{U}_b = Z_0 \dot{I}_b$, $\Delta \dot{U}_c = Z_0 \dot{I}_c$ 。 Z_0 为每相零序阻抗。显然, $Z_0 > Z_1$ 。

卡尔逊(J. R. Carson)于1926年提出, 计算“导线-地”回路自感时, 可以用一根与架空导线平行的假想地中导线代替大地, 地中电流集中在假想导线中流过。计算电感的模型如图4.55所示。

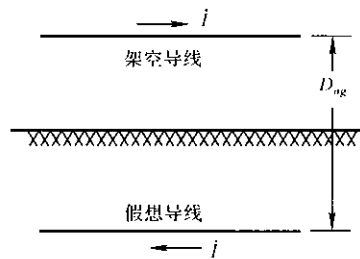


图 4.55 “导线-地”回路的模型

设架空导线的半径为 r , 假想导线的等值半径为 R_g , 两平行导线间的距离为 D_{ag} , 则回路的自感为

$$\begin{aligned} L &= \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{D_{ag}}{r} + \frac{1}{4} \right) + \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{ag}}{R_g} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{D_{ag}^2}{r R_g} + \frac{1}{4} \right) \\ &= \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{D_g}{r} + \frac{1}{4} \right) \text{ H/m} \end{aligned}$$

式中, 令 $D_g = D_{ag}^2 / R_g$, 称为假想导线的等值深度, 卡尔逊推导出

$$D_g = \frac{660}{\sqrt{f\gamma}} (\text{m})$$

式中, f 为电流的频率 (Hz), γ 为大地电导率 (S/m)。当 $f = 50 \text{ Hz}$ 时, 不同 γ 的 D_g 如下:

干燥泥土 ($\gamma = 10^{-3}$): $D_g = 2950 (\text{m})$

潮湿泥土 ($\gamma = 10^{-2}$): $D_g = 933 (\text{m})$

海水 ($\gamma = 1$): $D_g = 93 (\text{m})$

一般计算可取平均值: $D_g = 1000 (\text{m})$ 。

$f = 50 \text{ Hz}$ 时, “导线 - 地” 回路的自感抗

$$x_L = 2\pi f L = 0.06283 \ln \frac{D_g}{r} + 0.0157 (\Omega/\text{km}) \quad (4.168)$$

设架空导线电阻为 $r_1 (\Omega/\text{km})$, 大地电阻为 $r_k (\Omega/\text{km})$, 则“导线 - 地”回路的自阻抗为

$$Z_L = (r_1 + r_k) + j \left(0.06283 \ln \frac{D_g}{r} + 0.0157 \right) (\Omega/\text{km}) \quad (4.169)$$

在第 2 章中已推导出正序阻抗 $Z_1 = r_1 + jx_1$, 如式 (2.1) 和 (2.25) 所示, 因此可由式 (4.166) 求出“导线 - 地”回路间的互阻抗:

$$Z_M = Z_L - Z_1 = r_k + j0.06283 \ln \frac{D_g}{D_m} (\Omega/\text{km}) \quad (4.170)$$

最后, 应用式 (4.167) 求零序阻抗

$$\begin{aligned} Z_0 &= Z_L + 2Z_M = (r_1 + 3r_k) + j \left(0.06283 \ln \frac{D_g^3}{r D_m^2} + 0.0157 \right) \\ &= (r_1 + 3r_k) + j \left(0.1885 \ln \frac{D_g}{\sqrt{r D_m^2}} + 0.0157 \right) (\Omega/\text{km}) \end{aligned} \quad (4.171)$$

关于大地电阻 r_k , 可用卡尔逊推导的公式计算:

$$r_k = \pi^2 f \times 10^{-1} (\Omega/\text{km})$$

$$f = 50 \text{ Hz 时, } r_k \approx 0.05 (\Omega/\text{km})$$

【例 4.12】 单回路三相架空线, 每相导线为 LGJ-150, 半径为 8.4 mm, 电

阻 $r_1 = 0.21\Omega/\text{km}$ 。三相导线水平排列, 相间距离 3m。试计算正序和零序阻抗。

【解】 三相导线几何均距

$$D_m = \sqrt[3]{3 \times 3 \times 6} = 3.78(\text{m})$$

取 $D_g = 1000\text{m}$, 按式(4.169) 计算自阻抗

$$\begin{aligned} Z_L &= (0.21 + 0.05) + j\left(0.06283 \ln \frac{1000}{8.4 \times 10^{-3}} + 0.0157\right) \\ &= 0.26 + j0.75(\Omega/\text{km}) \end{aligned}$$

按式(4.170) 计算互阻抗

$$Z_M = 0.05 + j0.06283 \ln \frac{1000}{3.78} = 0.05 + j0.35(\Omega/\text{km})$$

线路正序阻抗

$$\begin{aligned} Z_1 &= Z_L - Z_M = (0.26 + j0.75) - (0.05 + j0.35) \\ &= 0.21 + j0.4 = 0.452 \angle 62.3^\circ(\Omega/\text{km}) \end{aligned}$$

零序阻抗

$$Z_0 = Z_L + 2Z_M = 0.36 + j1.45 = 1.494 \angle 76.1^\circ(\Omega/\text{km})$$

零序阻抗与正序阻抗比值

$$\frac{r_0}{r_1} = \frac{0.36}{0.21} = 1.714; \frac{x_0}{x_1} = \frac{1.45}{0.4} = 3.36; \frac{Z_0}{Z_1} = \frac{1.494}{0.452} = 3.31$$

2. 平行架设的两回路架空线零序阻抗

同杆架设的两回三相线路, 或平行架设但距离很近的两条三相线路, 当它们流过零序电流时, 两条线路间互感零序磁通相当大, 致使各线路的零序阻抗发生很大的变化。

设两条线路都有整循环换位, 参照式(4.170) 可以写出一线路中任一相“导线-地”回路与另一线路中任一相“导线-地”回路之间的互阻抗

$$Z_{1 \dots 1} = r_g + j0.06283 \ln \frac{D_g}{D_{1 \dots 1}}(\Omega/\text{km})$$

式中, $D_{1 \dots 1}$ 为两条线路间的几何均距, 按图 4.56

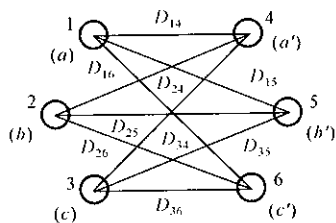


图 4.56 两回线路间的距离

$$D_{1 \dots 1} = \sqrt[9]{D_{14} D_{15} D_{16} D_{24} D_{25} D_{26} D_{34} D_{35} D_{36}}$$

当两条线路流过零序电流时, 一条线路三相对另一线路中任一相间的零序互阻抗 $Z_{1 \dots 1}$ 应等于 $Z_{1 \dots 1}$ 的 3 倍, 即

$$Z_{1-10} = 3r_g + j0.1885 \ln \frac{D_g}{D_{1-1}} = 3r_g + jx_{1-10} (\Omega/\text{km}) \quad (4.172)$$

图 4.57 为两回线路的零序电路示意图, 其中 $Z_{10} = r_{10} + jx_{10}$, $Z_{10} = r_{10} + jx_{10}$ 分别为线路 I 和 II 本身的零序阻抗, 可列出两线路的电压方程式

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{U}_{10} &= Z_{10} \dot{I}_{10} + Z_{1-10} \dot{I}_{10} \\ \Delta \dot{U}_{10} &= Z_{10} \dot{I}_{10} + Z_{1-10} \dot{I}_{10} \end{aligned} \right\} \quad (4.173)$$

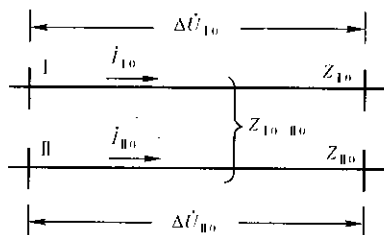


图 4.57 两回线路的零序电路

一般 \dot{I}_{10} 与 \dot{I}_{10} 没有直接关系, 上式不能进一步简化, 不能导出等值电路。如果两线路一端相连, 如图 4.58(a) 所示, 式(4.173) 可改写为

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{U}_{10} &= (Z_{10} - Z_{1-10}) \dot{I}_{10} + Z_{1-10} (\dot{I}_{10} + \dot{I}_{10}) \\ &= Z_{100} \dot{I}_{10} + Z_{1-10} (\dot{I}_{10} + \dot{I}_{10}) \\ \Delta \dot{U}_{10} &= (Z_{10} - Z_{1-10}) \dot{I}_{10} + Z_{1-10} (\dot{I}_{10} + \dot{I}_{10}) \\ &= Z_{100} \dot{I}_{10} + Z_{1-10} (\dot{I}_{10} + \dot{I}_{10}) \end{aligned} \right\} \quad (4.174)$$

式中

$$Z_{100} = Z_{10} - Z_{1-10} = r_{11} + j(x_{10} - x_{1-10}) = r_{11} + jx_{100}$$

$$Z_{100} = Z_{10} - Z_{1-10} = r_{11} + j(x_{10} - x_{1-10}) = r_{11} + jx_{100}$$

$x_{100} = x_{10} - x_{1-10}$, $x_{100} = x_{10} - x_{1-10}$ 分别为线路 I 和 II 的零序漏抗。

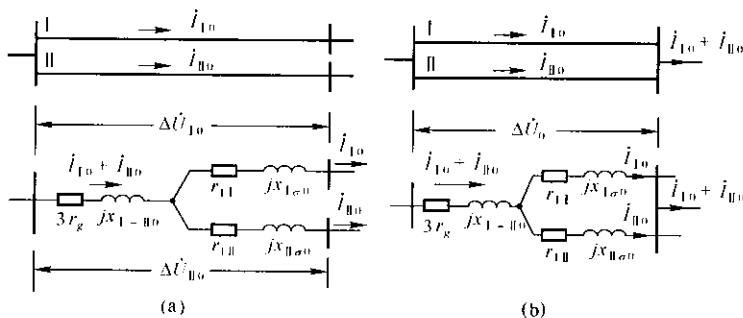


图 4.58 平行架设架空线路及零序等值电路

根据式(4.174) 可作出图 4.58(a) 的零序等值电路。

图 4.58(b) 为两回线路并联运行时的零序等值电路, 两回路的等值零序

阻抗为

$$Z_0^{(2)} = 3r_g + jx_{1-10} + \frac{(r_{11} + jx_{1s0})(r_{11} + jx_{1s0})}{(r_{11} + jx_{1s0}) + (r_{11} + jx_{1s0})} \quad (4.175)$$

现在考虑一种特殊的、但却经常遇到的情况：并联运行的双回线路完全相同，即 $r_{11} = r_{11} = r_1, x_{10} = x_{10} = x_0, x_{1s0} = x_{1s0} = x_0 - x_{1-10}$ ，双回线路的零序阻抗为

$$\begin{aligned} Z_0^{(2)} &= 3r_g + jx_{1-10} + \frac{r_1 + j(x_0 - x_{1-10})}{2} \\ &= \frac{(r_1 + 6r_g) + j(x_0 + x_{1-10})}{2} = \frac{Z'_0}{2} \end{aligned}$$

式中

$$\left. \begin{aligned} Z'_0 &= r'_0 + jx'_0 \\ r'_0 &= r_1 + 6r_g \\ x'_0 &= x_0 + x_{1-10} \end{aligned} \right\} \quad (4.176)$$

这时的零序等值电路示于图 4.59，它表明：两回平行架设、完全相同、并联运行的架空线路，可以用两回之间没有零序耦合的并联线路代替，每回路

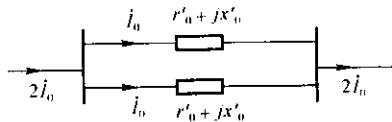


图 4.59 完全相同的双回路并联时的零序等值电路

的 Z'_0 称为计及回路间零序互感时每回路的零序阻抗。

3. 避雷线对架空线路零序参数的影响

有避雷线的电力线路，当三相导线流过零序电流时，接地的避雷线中将感应出电流 I_w ，如图 4.60(a) 所示。避雷线也是一个“导线-地”回路，它的自阻抗 Z_w 以及它与各相“导线-地”回路间的互阻抗 Z_{cw} 可参照式(4.169)和(4.170)确定。参照图 4.60(b) 可写出相导线和避雷线的回路零序电压方程：

$$\Delta \dot{U}_0 = Z_0 \dot{I}_0 + Z_{cw} \dot{I}_w$$

$$0 = Z_w \dot{I}_w + 3Z_{cw} \dot{I}_0$$

由后一式求出 \dot{I}_w ，代入前一式可得

$$\Delta \dot{U}_0 = \left(Z_0 - \frac{3Z_{cw}^2}{Z_w} \right) \dot{I}_0 = Z_0^{(w)} \dot{I}_0$$

式中

$$Z_0^{(w)} = Z_0 - \frac{3Z_{cw}^2}{Z_w} \equiv r_0^{(w)} + jx_0^{(w)} \quad (4.177)$$

即为有避雷线时线路每相的零序阻抗，它小于无避雷线的 Z_0 。

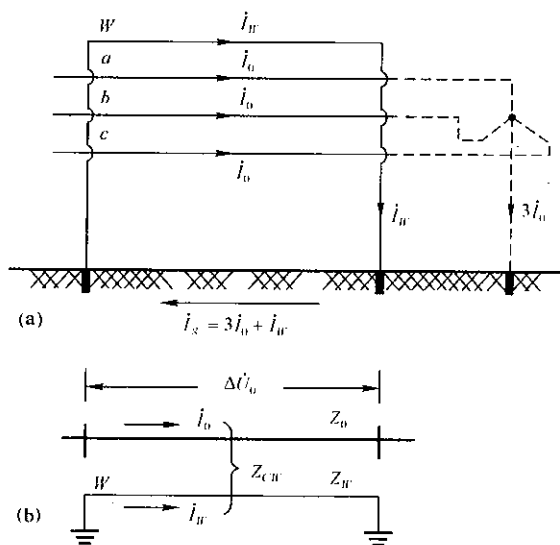


图 4.60 有避雷线的架空线路

避雷线相当于一个与三相导线有磁耦合的短路线圈,所以使电抗 $x_0^{(W)}$ 减小,电阻 $r_0^{(W)}$ 增大,影响程度与避雷线的材料有关。钢芯铝绞线避雷线的自阻抗 Z_w 较小,所以对零序阻抗的影响很大;钢绞线避雷线对 $Z_0^{(W)}$ 影响较小。

有的线路具有两根避雷线,可以用一根等值避雷线代替,其等值半径可按分裂导线的等值半径公式计算。

有避雷线的同杆两回平行架空线路的零序参数简述如下。设不计避雷线作用时,两回路的零序自阻抗和互阻抗分别为 Z_{10} 、 Z_{1-10} 、 Z_{1-10} ,避雷线自阻抗为 Z_w ,避雷线与两回路每相之间的互阻抗分别为 Z_{1w} 和 Z_{1w} ,则三个回路零序电压方程式可表示为

$$\begin{aligned}\Delta\dot{U}_{10} &= Z_{10}\dot{I}_{10} + Z_{1-10}\dot{I}_{10} + Z_{1w}\dot{I}_w \\ \Delta\dot{U}_{10} &= Z_{10}\dot{I}_{10} + Z_{1-10}\dot{I}_{10} + Z_{1w}\dot{I}_w \\ 0 &= Z_w\dot{I}_w + 3Z_{1w}\dot{I}_{10} + 3Z_{1w}\dot{I}_{10}\end{aligned}$$

由第三式求出 \dot{I}_w ,代入前两式,可得

$$\left. \begin{aligned}\Delta\dot{U}_{10} &= Z_{10}^{(W)}\dot{I}_{10} + Z_{1-10}^{(W)}\dot{I}_{10} \\ \Delta\dot{U}_{10} &= Z_{10}^{(W)}\dot{I}_{10} + Z_{1-10}^{(W)}\dot{I}_{10}\end{aligned} \right\} \quad (4.178)$$

式中

$$Z_{10}^{(W)} = Z_{10} - \frac{3Z_{1W}^2}{Z_W}$$

$$Z_{10}^{(W)} = Z_{10} - \frac{3Z_{1W}^2}{Z_W}$$

$$Z_{1-10}^{(W)} = Z_{1-10} - \frac{3Z_{1W}Z_{1W}}{Z_W}$$

分别为计及避雷线作用时线路 I、II 的零序自阻抗和线路间的零序互阻抗。式(4.178)和没有避雷线的式(4.173)具有相同的形式,因此可按没有避雷线的两回平行线路那样进行处理。

表 4.4 列出架空线路零序电抗的约值,可供规划设计及近似计算使用。表中双回路的零序电抗是指两回完全相同并联运行的线路,每回路的等值零序电抗,即图 4.59 中的 x_0 。

表 4.4 架空线路零序电抗($x_1 \approx 0.4\Omega/\text{km}$)

	单回线路 x_0/x_1	双回线路 x_0/x_1
无避雷线	3.5	5.5
有铁磁导体避雷线	3.0	4.7
有良导体避雷线	2.0	3.0

【例 4.13】 图 4.61(a) 为 100km 长有避雷线的双回路架空线,两回路完全相同,未计及线路间零序互感时每回路零序电抗 $x_0 = 1.12\Omega/\text{km}$,计及互感时 $x_0' = 1.8\Omega/\text{km}$,零序电阻略去不计。设线路 II 的 D 点加有零序电源,试分别作出断路器 B 合闸及三相跳闸时的零序等值电路。(注:本例 x_0 和 x_0' 都是计及避雷线作用的电抗值)

【解】 先考虑断路器 B 合闸。在 D'D 处将线路分作两段,各用图 4.58(a) 的等值电路表示,再连接成图 4.61(b) 的零序等值电路。

由式(4.176)可知,两线路间零序互感抗

$$x_{1-10} = x_0' - x_0 = 1.8 - 1.12 = 0.68(\Omega/\text{km})$$

等值电路各电抗为

$$x_1 = 40x_{1-10} = 40 \times 0.68 = 27.2(\Omega)$$

$$x_2 = x_3 = 40(x_0 - x_{1-10}) = 17.6(\Omega)$$

$$x_4 = 60x_{1-10} = 40.8(\Omega)$$

$$x_5 = x_6 = 60(x_0 - x_{1-10}) = 26.4(\Omega)$$

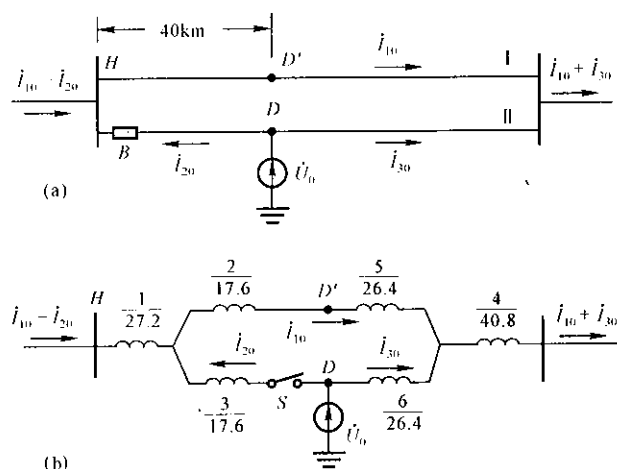


图 4.61 例 4.13 架空线及零序等值电路

断路器 B 跳闸后, 相当于将 x_3 支路除去(或开关 S 打开)。这时 x_1 和 x_2 是串联的, $x_1 + x_2 = 27.2 + 17.6 = 44.8\Omega$ 。实际上, H 至 D 这一段只剩下线路 1, 所以 $x_1 + x_2 = 40x_0 = 40 \times 1.12 = 44.8\Omega$ 。

4. 架空线路零序电容

在第 2 章第 2.1.4 节中用镜像法分析了无避雷线的单回架空线路的部分电容(见图 2.7(a)), 以及三相导线上电荷和电压的一般关系式, 即式(2.38)。当三相线路加上零序电压 $u_a = u_b = u_c = u_0$ 时, 由式(2.38)可得

$$\frac{q_a}{u_a} = \frac{q_b}{u_b} = \frac{q_c}{u_c} = \frac{q_0}{u_0} = C_s - 2C_m = C_0$$

上式中考虑 $C_s = C_0 + 2C_m$ 。可见, 各相零序电容等于导线与地间的部分电容。这是因为三相导线电位相等, 导线之间部分电容上没有电荷之故。显然 $C_0 < C_1$ (正序电容)。零序电容 C_0 可用式(2.41)计算。

单回路架空线有一根避雷线时, 这一多导体系统的部分电容如图 4.62 所示, 每相正序和零序电容应为

$$\begin{aligned} C_1^{(W)} &= C_R + C_W + 3C_m \\ C_0^{(W)} &= C_R + C_W \end{aligned}$$

显然, $C_0^{(W)} < C_1^{(W)}$ 。这些电容可以应用镜像法求得, 这里不作具体讨论。分析结果表明, 避

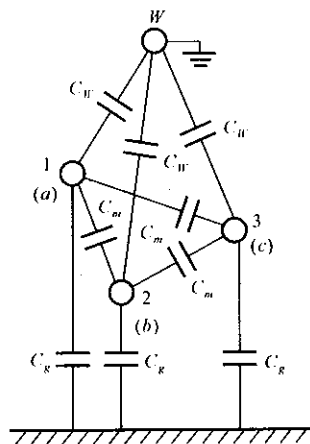


图 4.62 有避雷线三相线路的部分电容

雷线对正序电容影响很小,工程上仍可用式(2.40)计算,但对零序电容的影响较大。

关于有两根避雷线的单回线路以及同杆双回线路等的零序电容,这里就不再介绍。

5. 三芯电力电缆的零序参数

三芯电力电缆结构复杂,各参数的准确计算相当困难。没有实测数据时,正序电阻、电抗、电容和零序电容等取决于电缆本身结构的参数,尚可使用制造厂提供的典型数据。零序阻抗则不然,它还与电缆敷设方式及沿线大地情况等有很大的关系,简单说明如下。

电缆的铅(铝)包护层在两端的终端盒处有人工接地,中间的一系列接头盒也与大地有接触,因此三相芯线中通以零序电流时,大地和铅包都成为电流的返回通路。铅包对零序阻抗的作用与架空线路的避雷线相似,但铅包中电流产生的磁通整个包围三相芯线,没有漏磁通,对芯线去磁作用很大。因此,零序电流在铅包与大地间的分配情况对零序阻抗影响很大,铅包中电流分配愈多,则零序电抗愈小,零序电阻愈大。然而铅包与大地零序电流的分配与铅包的阻抗及铅包接地电阻有关,后者又与电缆敷设方式(直埋地下或置于缆沟、缆管中等等)及大地电导率有关。为了说明问题,考虑两个极端情况:(1)铅包接地电阻相当大,以致地中电流为零,零序电流全部经铅包返回。这时零序电抗达到最小值,零序电阻达到最大值;(2)铅包良好接地,地中电流达到最大,而铅包分配的电流达到最小。这种条件下,零序电抗达到最大值,零序电阻达到最小值。研究表明,零序电抗的两个极限值差别非常大(例如10倍左右)。当然,实际情况居于两者之间,但还是因敷设的具体条件不同而相差很大。因此,对已敷设好的电缆,要通过测试才能取得准确的零序阻抗。在规划设计和近似计算中,可取 $r_0 = 10r_1$, $x_0 = (3.5 \sim 4.6)x_1$ 。

4.5.6 电力系统的零序等值网络

零序网络中各发电机没有零序电势,只有在不对称故障点加有等值的零序电压源,由它提供零序电流。由于三相中的零序电流完全相同,只能流过Y接法且中性点接地的元件,并从大地返回。变压器的接法和中性点接地方式,对网络中零序电流的分布及零序网络的结构有决定性的影响。另外,不同地点发生不对称故障,零序电流分布和零序网络结构也不相同。因此,一般情况下零序网络结构和正、负序网络不一样,而且元件参数也不同。

绘制零序网络时,首先要在故障点画上零序电压源,查明零序电流可能流

通的途径。然后从短路点开始将变压器用前述的等值电路代替,电力线路用零序阻抗或等值电路代替,其他元件用零序阻抗表示,不通零序电流的元件不需画出。要注意正确处理中性点接地阻抗,在单相等值电路中,它的阻抗要取实际值的 3 倍,而且流过的零序电流应和实际情况相符。

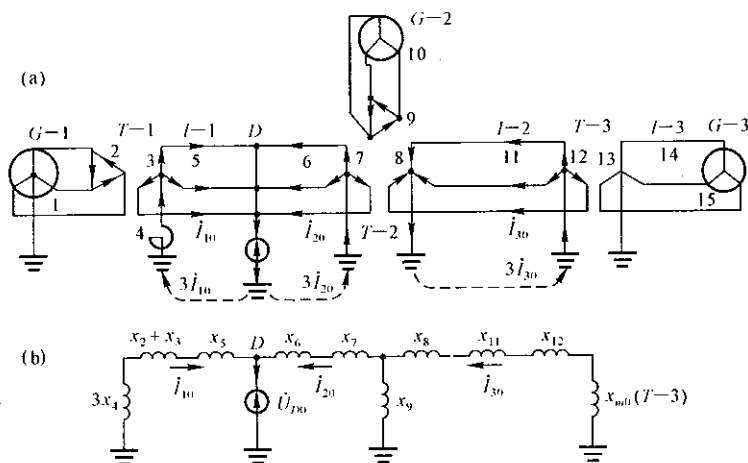


图 4.63 绘制零序网络的例子

图 4.63 为绘制零序网络的一个例子,图 4.63(a) 是系统的三相结线图,变压器各侧绕组和其他元件都以号码标明。图中还标出 D 点短路时零序电流的分布情况。图 4.63(b) 画出零序网络(略去各元件零序电阻)。如果 $T-3$ 为单相变压器组,则它的 $x_{m0} \rightarrow \infty, I_{30}$ 可略去不计,因此 x_8-x_{12} 支路可以删去。

图 4.64(a) 示出另一个例子, D 点不对称短路时,零序网络如图 4.64(b) 所示, F 点短路的零序网络见图 4.64(c)。

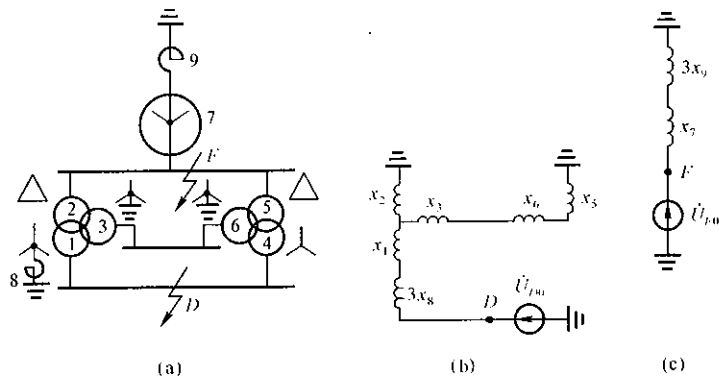


图 4.64 制订零序网络的另一例子

4.6 电力系统不对称短路分析

前一节讨论了应用对称分量法分析不对称故障的基本原理,论证了故障时各序电压和电流可分别用三个序网描述,它们的电压方程如式(4.153)所示,现重写如下:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{D1} &= \dot{U}_{D0} - Z_{D1} \dot{I}_{D1} \\ \dot{U}_{D2} &= -Z_{D2} \dot{I}_{D2} \\ \dot{U}_{D0} &= -Z_{D0} \dot{I}_{D0} \end{aligned} \right\} \quad (4.179)$$

式中省去下标 a ,只要指明以 a 相为基准即可。分析简单故障时,取特殊相为基准最为方便。单相故障时,故障相为特殊相;两相故障时,非故障相为特殊相。

式(4.179)及图4.44仅表明故障点各序电压和电流的一般关系,还需列出短路边界条件方程才能求解。本节将具体分析各种简单不对称短路的电流和电压。

4.6.1 各种不对称短路的故障点电流和电压

图4.65表示电力网发生各种不对称短路时,短路点的各相短路电流和电压。这里设短路点经阻抗 Z_f 或 Z_f, Z_g 短路,如 $Z_f = 0, Z_g = 0$,则为金属性短路或直接短路。

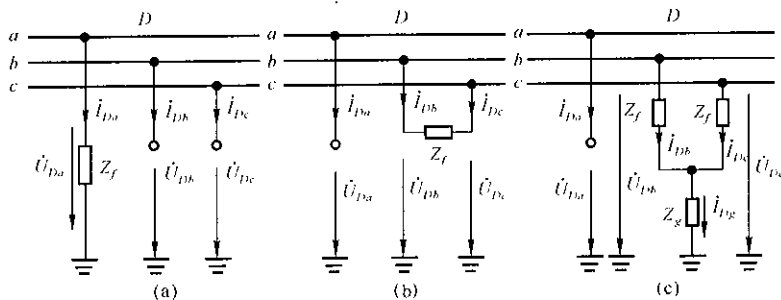


图 4.65 各种不对称短路

(a) 单相接地短路; (b) 两相短路; (c) 两相接地短路

各种不对称短路的边界条件列于表 4.5 中,用对称分量表示的边界条件均以特殊相为基准。图 4.65 中的特殊相均为 a 相。

表 4.5 各种不对称短路的边界条件

短路类型	实际电压、电流关系	各序电流关系	各序电压关系
单相接地 短路	$\dot{I}_{Dh} = \dot{I}_{Dc} = 0$ $\dot{U}_{Da} = Z_f \dot{I}_{Da}$	$\dot{I}_{D1} = \dot{I}_{D2} = \dot{I}_{D0}$	$\dot{U}_{D1} + \dot{U}_{D2} + \dot{U}_{D0} - 3Z_f \dot{I}_{D0} = 0$
两相短路	$\dot{I}_{Da} = 0$ $\dot{I}_{Dh} + \dot{I}_{Dc} = 0$ $\dot{U}_{Dh} - \dot{U}_{Dc} = Z_f \dot{I}_{Dh}$	$\dot{I}_{D1} + \dot{I}_{D2} = 0$ $\dot{I}_{D0} = 0$	$\dot{U}_{D1} - 0.5Z_f \dot{I}_{D1}$ $= \dot{U}_{D2} - 0.5Z_f \dot{I}_{D2}$ $\dot{U}_{D0} = 0$
两相接地 短路	$\dot{I}_{Da} = 0$ $\dot{U}_{Dh} = Z_f \dot{I}_{Dh} + Z_g(\dot{I}_{Dh} + \dot{I}_{Dc})$ $\dot{U}_{Dc} = Z_f \dot{I}_{Dc} + Z_g(\dot{I}_{Dh} + \dot{I}_{Dc})$	$\dot{I}_{D1} + \dot{I}_{D2} + \dot{I}_{D0} = 0$	$\dot{U}_{D1} - Z_f \dot{I}_{D1}$ $= \dot{U}_{D2} - Z_f \dot{I}_{D2}$ $= \dot{U}_{D0} - (Z_f + 3Z_g) \dot{I}_{D0}$

现以两相接地短路为例,推导用对称分量表示的边界条件。设 D 点 b 和 c 相经阻抗 Z_f 和 Z_g 发生接地短路,如图 4.65(c) 所示,短路点相电压和电流相量关系如表 4.5 所列。由于 $\dot{I}_{Da} = 0$,所以

$$\dot{I}_{Da} = \dot{I}_{D1} + \dot{I}_{D2} + \dot{I}_{D0} = 0 \quad (4.180)$$

b 相和 c 相间的电压差为

$$\dot{U}_{Dh} - \dot{U}_{Dc} = Z_f(\dot{I}_{Dh} - \dot{I}_{Dc})$$

用对称分量表示时则为

$$\begin{aligned} & (a^2 \dot{U}_{D1} + a \dot{U}_{D2} + \dot{U}_{D0}) - (a \dot{U}_{D1} + a^2 \dot{U}_{D2} + \dot{U}_{D0}) \\ &= Z_f [(a^2 \dot{I}_{D1} + a \dot{I}_{D2} + \dot{I}_{D0}) - (a \dot{I}_{D1} + a^2 \dot{I}_{D2} + \dot{I}_{D0})] \end{aligned}$$

整理后得

$$\dot{U}_{D1} - \dot{U}_{D2} = Z_f(\dot{I}_{D1} - \dot{I}_{D2})$$

或

$$\dot{U}_{D1} - Z_f \dot{I}_{D1} = \dot{U}_{D2} - Z_f \dot{I}_{D2} \quad (4.181)$$

又, \dot{U}_{Dh} 和 \dot{U}_{Dc} 的相量和为

$$\dot{U}_{Dh} + \dot{U}_{Dc} = Z_f(\dot{I}_{Dh} + \dot{I}_{Dc}) + 2Z_g(\dot{I}_{Dh} + \dot{I}_{Dc})$$

用对称分量表示并计及式(4.180)、(4.181)可得

$$\dot{U}_{D0} - (Z_f + 3Z_g) \dot{I}_{D0} = \dot{U}_{D1} - Z_f \dot{I}_{D1} \quad (4.182)$$

式(4.180)~(4.182)即为两相接地短路的边界条件。

根据用对称分量表示的边界条件,将三个序网连接起来,可得到图 4.66 所示的复合序网。显然,复合序网既满足式(4.179)又符合边界条件,可方便地用来计算短路点各序电流和电压。

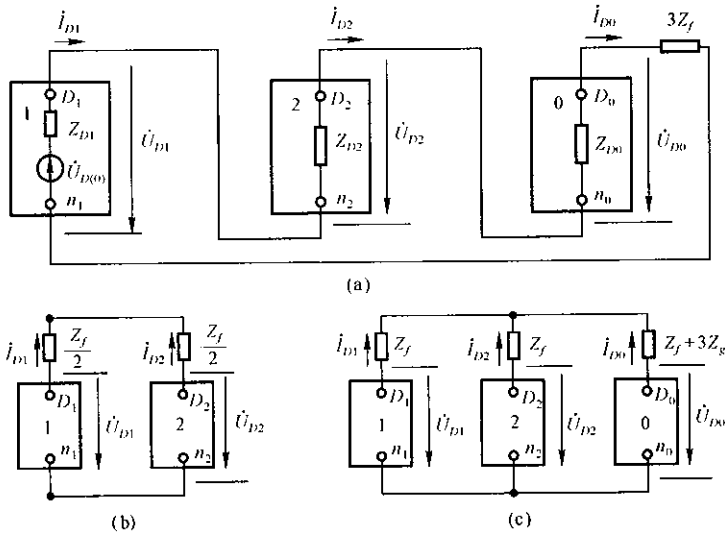


图 4.66 各种不对称短路的复合序网

(a) 单相接地短路;(b) 两相短路;(c) 两相接地短路

各种不对称短路的故障点正序电流和电压的计算公式可以统一地用下式表示:

$$\dot{I}_{D1} = \frac{\dot{U}_{D(0)}}{\bar{Z}_{D1} + \Delta Z} \quad (4.183)$$

$$\dot{U}_{D1} = \dot{I}_{D1} \Delta Z \quad (4.184)$$

式中, ΔZ 如表 4.6 所示。

表 4.6 各种短路的 ΔZ 和 M

短路种类	ΔZ	$M = \frac{I_D}{I_{D1}}$
单相短路	$Z_{D2} + Z_{D0} + 3Z_f$	3
两相短路	$Z_{D2} + Z_f$	$\sqrt{3}$
两相短路接地	$Z_f + \frac{(Z_{D2} + Z_f)(Z_{D0} + Z_f + 3Z_g)}{Z_{D2} + Z_{D0} + 2Z_f + 3Z_g}$	$\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{D2}x_{D0}}{(x_{D2} + x_{D0})^2}}$
三相短路	0	1

\dot{I}_{D1} 和 \dot{U}_{D1} 确定后,即可根据边界条件及式(4.179)或复合序网求得 \dot{I}_{D2} 、 \dot{I}_{D0} 、 \dot{U}_{D2} 和 \dot{U}_{D0} 。

短障点故障相的短路电流推导如下。

(1) 单相接地短路

由于 $\dot{I}_{D1} = \dot{I}_{D2} = \dot{I}_{D0}$, 所以

$$\dot{I}_{Da} = \dot{I}_{D1} + \dot{I}_{D2} + \dot{I}_{D0} = 3\dot{I}_{D1} \quad (4.185)$$

(2) 两相短路

由于 $\dot{I}_{D1} = -\dot{I}_{D2}$, $\dot{I}_{D0} = 0$, 所以

$$\begin{aligned} \dot{I}_{Db} &= a^2\dot{I}_{D1} + a\dot{I}_{D2} = (a^2 - a)\dot{I}_{D1} = -j\sqrt{3}\dot{I}_{D1} \\ \dot{I}_{Dc} &= a\dot{I}_{D1} + a^2\dot{I}_{D2} = (a - a^2)\dot{I}_{D1} = j\sqrt{3}\dot{I}_{D1} \end{aligned} \quad (4.186)$$

(3) 两相接地短路

由复合序网图 4.66(c) 可得

$$\begin{aligned} \dot{I}_{D2} &= -\frac{Z_{D0} + Z_f + 3Z_k}{(Z_{D2} + Z_f) + (Z_{D0} + Z_f + 3Z_k)}\dot{I}_{D1} \\ \dot{I}_{D0} &= -\frac{Z_{D2} + Z_f}{(Z_{D2} + Z_f) + (Z_{D0} + Z_f + 3Z_k)}\dot{I}_{D1} \end{aligned}$$

故障相短路电流可用下两式计算:

$$\dot{I}_{Db} = a^2\dot{I}_{D1} + a\dot{I}_{D2} + \dot{I}_{D0} \quad \dot{I}_{Dc} = a\dot{I}_{D1} + a^2\dot{I}_{D2} + \dot{I}_{D0}$$

对于金属性两相接地短路($Z_f = Z_k = 0$),当忽略不计负、零序网中各元件的电阻,即 $Z_{D2} = jx_{D2}$ 和 $Z_{D0} = jx_{D0}$ 时

$$\begin{aligned} \dot{I}_{Db} &= \left[a^2 - \frac{x_{D2} + ax_{D0}}{x_{D2} + x_{D0}} \right] \dot{I}_{D1} \\ \dot{I}_{Dc} &= \left[a - \frac{x_{D2} + a^2x_{D0}}{x_{D2} + x_{D0}} \right] \dot{I}_{D1} \end{aligned} \quad (4.187)$$

各种短路的故障点短路电流有效值也可统一表示为

$$I_D = MI_{D1} \quad (4.188)$$

系数 M 如表 4.6 所列。表中两相接地短路的系数是指金属性短路,而且不计零、负序网电阻的表达式,可由式(4.187)导出。

式(4.183)和(4.188)对三相短路也同样适用,但系数 $M = 1, \Delta Z = 0$ (金属性短路)。

式(4.183)表示,电力网中某点发生不对称短路时,故障点的正序电流与

在同一点经阻抗 ΔZ 发生三相短路时的短路电流相等,如图 4.67 所示。这一规律称为正序等效定则,图 4.67 称为正序增广网络。因此,可以应用计算三相短路电流(周期分量)的方法来计算不对称短路

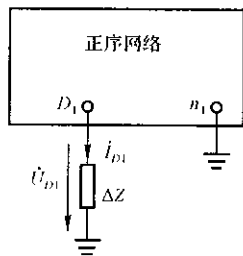


图 4.67 正序增广网络

【例 4.14】 图 4.68 所示的系统中,变压器 T-2 高压母线发生各种金属性不对称短路,试分别计算短路瞬间故障点的短路电流和各相电压,并绘制相量图。已知数据如下:

发电机 G:120MVA,10.5(kV), $x_d' = x_2 = 0.14$;

变压器:T-1 和 T-2 相同,60MVA, $U_k\% = 10.5$;

线路 l:平行双回路,105(km),每回路 $x_1 = 0.4(\Omega/\text{km})$, $x_0 = 3x_1$;

负荷:L-1:60MVA,L-2:40MVA,正序电抗取 1.2,负序电抗取 0.35。

各元件的电阻均不计。故障前 D 点电压 $U_{D(0)} = 109(\text{kV})$ 。

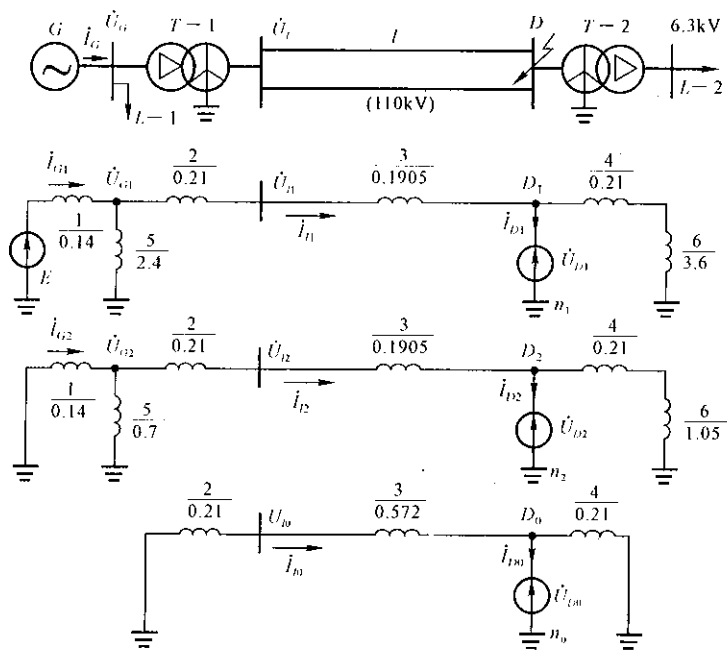


图 4.68 例 4.14 的系统及各序网络

【解】 对应于短路点 D 的各序网络示于图 4.68 中。

取 $S_B = 120\text{MVA}$, U_B 取各级平均额定电压。各元件电抗标么值用平均额

定电压近似计算,已标在图中(请读者核算)。

正序网络短路点的等值电抗:

$$x_{D1} = [(x_1 // x_5) + x_2 + x_3] // [x_4 + x_6] = 0.468$$

负序网络对 D_2 点的等值电抗:

$$x_{D2} = [(x_1 // x_5) + x_2 + x_3] // [x_4 + x_6] = 0.367$$

零序网络对 D_0 点的等值电抗:

$$x_{D0} = (x_2 + x_3) // x_1 = 0.166$$

D 点正常电压 $U_{D(0)} = 109/115 = 0.948$

(1) 单相接地短路

$$\Delta x = x_{D2} + x_{D0} = 0.367 + 0.166 = 0.533$$

$$I_{D1} = \frac{U_{D(0)}}{x_{D1} + \Delta x} = \frac{0.948}{0.468 + 0.533} = 0.947$$

$$U_{D1} = I_{D1} \Delta x = 0.947 \times 0.533 = 0.505$$

$$U_{D2} = -I_{D1} x_{D2} = -0.947 \times 0.367 = -0.348$$

$$U_{D0} = -I_{D1} x_{D0} = -0.947 \times 0.166 = -0.157$$

D 点故障相短路电流 $I_D = 3I_{D1} = 2.84$

各序网的电阻均忽略不计, (特殊相) 各序电流的相位均比 $U_{D(0)}$ 滞后 90° , 正序电压与 $U_{D(0)}$ 同相, 负序和零序电压的相位则与 $U_{D(0)}$ 相差 180° 。

设 b 相发生接地短路, 短路点各相电压(以特殊相为基准) 为

$$\dot{U}_{Db} = \dot{U}_{D1} + \dot{U}_{D2} + \dot{U}_{D0} = 0.505 - 0.348 - 0.157 = 0$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{Dc} &= a^2 \dot{U}_{D1} + a \dot{U}_{D2} + \dot{U}_{D0} = 0.505 \angle 240^\circ - 0.348 \angle 120^\circ \\ &\quad - 0.157 = 0.775 \angle -107.7^\circ \end{aligned}$$

$$\dot{U}_{Da} = a \dot{U}_{D1} + a^2 \dot{U}_{D2} + \dot{U}_{D0} = 0.775 \angle 107.7^\circ$$

短路点电流和电压的相量图绘于图 4.69。

短路点短路电流和相电压的有效值为

$$I_{Db} = 2.84 \times \frac{120}{\sqrt{3} \times 115} = 1.71(\text{kA})$$

$$U_{Da} = U_{Dc} = 0.775 \times 115 / \sqrt{3} = 51.5(\text{kV})$$

(2) 两相短路

$$\Delta x = x_{D2} = 0.367$$

$$I_{D1} = \frac{U_{D(0)}}{x_{D1} + \Delta x} = \frac{0.948}{0.468 + 0.367} = 1.135$$

$$I_{D2} = -I_{D1} = -1.135$$

$$U_{D1} = U_{D2} = I_{D1} \Delta x = 0.417$$

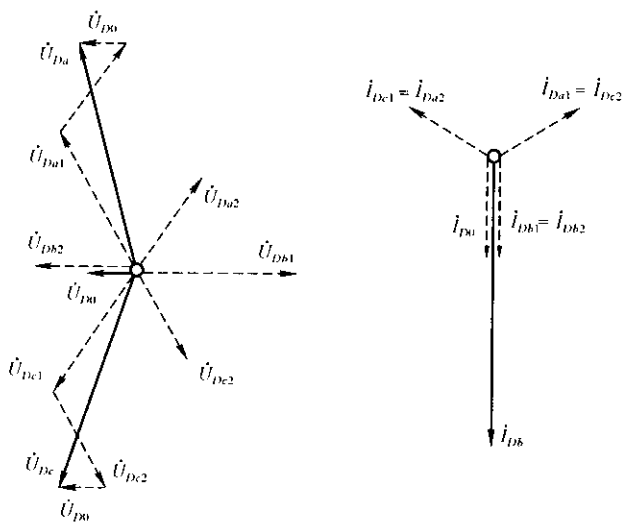


图 4.69 例 4.14 b 相接地短路相量图

D 点故障相短路电流 $I_D = \sqrt{3} I_{D1} = 1.966$

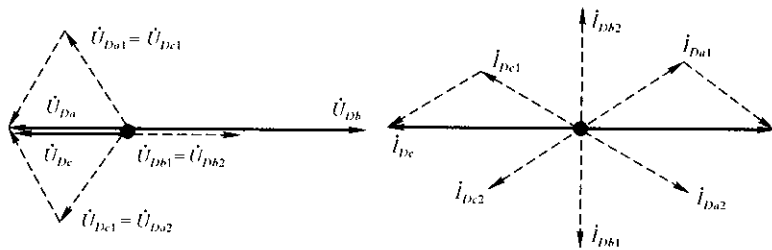
设 a, c 两相短路, 短路点各相电压(以特殊相 b 相为基准) 为

$$\dot{U}_{Db} = \dot{U}_{D1} + \dot{U}_{D2} = 2\dot{U}_{D1} = 2 \times 0.417 = 0.834$$

$$\dot{U}_{Dc} = a^2 \dot{U}_{D1} + a \dot{U}_{D2} = (a^2 + a) \dot{U}_{D1} = -0.417$$

$$\dot{U}_{Da} = (a + a^2) \dot{U}_{D1} = -0.417$$

D 点电压和电流的相量图示于图 4.70。

图 4.70 例 4.14 中 a, c 两相短路相量图

短路点电流和电压的有效值:

$$I_{Da} = I_{Dc} = 1.966 \times 120 / (\sqrt{3} \times 115) = 1.184 (\text{kA})$$

$$U_{Da} = U_{Dc} = 0.417 \times 115 / \sqrt{3} = 27.7 (\text{kV})$$

$$U_{ph} = 2 \times 27.7 = 55.4(\text{kV})$$

(3) 两相接地短路

$$\Delta x = \frac{x_{D2}x_{D0}}{x_{D2} + x_{D0}} = 0.1143$$

$$I_{D1} = \frac{U_{D(0)}}{x_{D1} + \Delta x} = 1.629$$

$$I_{D2} = -\frac{\Delta x}{x_{D2}}I_{D1} = -0.507$$

$$I_{D0} = -\frac{\Delta x}{x_{D0}}I_{D1} = -1.122$$

$$U_{D1} = U_{D2} = U_{D0} = \Delta x I_{D1} = 0.1862$$

设 ac 两相发生故障, 以特殊 b 相为基准时, 故障点短路电流为

$$\dot{I}_{Dh} = \dot{I}_{D1} + \dot{I}_{D2} + \dot{I}_{D0} = -j1.629 + j0.507 + j1.122 = 0$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{Dc} &= a^2 \dot{I}_{D1} + a \dot{I}_{D2} + \dot{I}_{D0} \\ &= 1.629 \angle (240^\circ - 90^\circ) + 0.507 \angle (120^\circ + 90^\circ) \\ &\quad + j1.122 = 2.5 \angle 137.7^\circ \end{aligned}$$

$$\dot{I}_{Da} = a \dot{I}_{D1} + a^2 \dot{I}_{D2} + \dot{I}_{D0} = 2.5 \angle 42.3^\circ$$

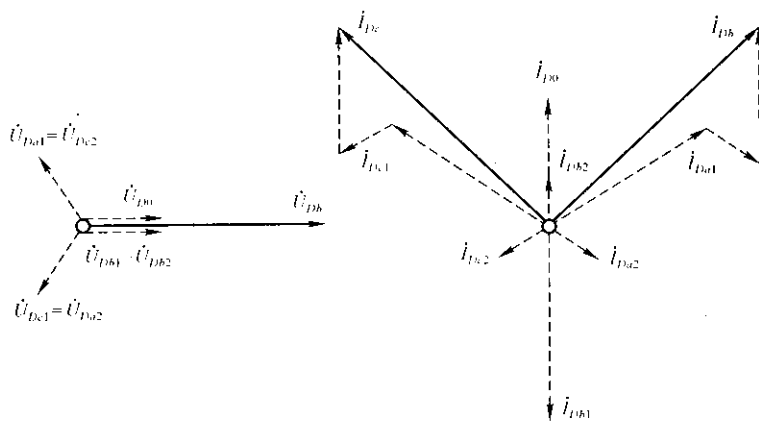


图 4.71 例 4.14 中 a, c 两相短路接地时相量图

故障点各相电压:

$$\dot{U}_{Dh} = \dot{U}_{D1} + \dot{U}_{D2} + \dot{U}_{D0} = 3\dot{U}_{D1} = 0.559$$

$$U_{Dc} = U_{Da} = 0$$

D 点电压及电流相量图示于图 4.71。短路点电流和电压的有效值为

$$I_{Da} = I_{Dk} = 2.5 \times 120 / (\sqrt{3} \times 115) = 1.51(\text{kA})$$

$$U_{Dm} = 0.559 \times 115 / \sqrt{3} = 37.1(\text{kV})$$

4.6.2 不对称短路时网络中电流和电压的分布

为了计算不对称短路时网络中任一支路的电流,必须先分别从正序、负序和零序网络中求出该支路的正序、负序和零序电流(它们的参考方向必须相同),然后用式(4.151)计算各相电流。同理,计算网络中任一节点的各相电压,也要先分别从各序网络求出该节点三序电压,然后合成三相电压。

对于正序网络,各电源电势已知,短路点电压和电流确定后,就可用一般电路的计算方法求出正序电流和电压的分布。如果短路前网络中的正常电流和电压已知,则用叠加原理计算更为方便。计算方法如图 4.72 所示,图 4.72(a) 为短路时的正序网络,短路点的正序电压 \dot{U}_{D1} 用两个串联的理想电压源代替,其中一个电压为正常时的电压 $\dot{U}_{D(0)}$,另一电压为 $\Delta\dot{U}_{D1} = \dot{U}_{D1} - \dot{U}_{D(0)}$,称为短路点正序电压的故障分量。应用叠加原理把图 4.72(a) 分为图(b)和(c)两种情况:图(b)为短路前的正常运行状态,各电压和电流均已知;图(c)为计算正序故障分量的网络,其中各电源的电势均短接,只有短路点加着电压为 $\Delta\dot{U}_{D1}$ 的电源,可以很方便地求出正序电流、电压故障分量的分布情况。网络中实际的正序电流和电压,为相应的正常分量和正序故障分量的相量和。

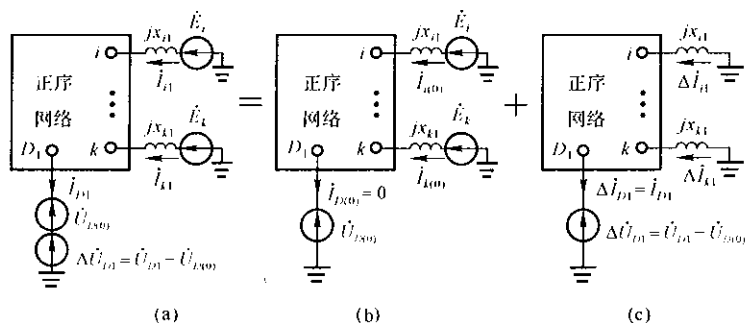


图 4.72 应用叠加原理计算正序电流和电压的分布

在负序及零序网络中,只有短路点存在负序或零序的电压源。当短路点负序及零序电流和电压求出后就不难计算出它们的分布情况。负序和零序电压

在网络中的分布,以短路点的有效值最大,离短路点愈远则愈小,这与正序电压的分布不同,后者在发电机处有效值最大,由发电机向短路点逐渐下降。

用已知的各序电流、电压计算各相电流、电压时,还必须考虑各序分量通过变压器后可能发生不同的相位变化。现以常用的Y/Δ-11接法变压器为例讨论这一问题。在电力系统分析中,实际变压器是用它的等值电路和理想变压器串联来处理的,所以这里只考虑各序分量通过理想变压器的相位变化。

图 4.73(a) 为 Y/Δ-11 变压器绕组布置和连接方式的示意图,当加以正序电压和正序电流时,相量图示于图 4.73(b)。可知 Δ 侧正序电压和电流的相位都比 Y 侧的超前 30°。用标么值表示时两侧电压和电流的关系为:

$$\dot{U}_{a1} = \dot{U}_{A1} e^{j30^\circ} \quad \dot{I}_{a1} = \dot{I}_{A1} e^{j30^\circ}$$

b 相和 c 相的关系也相同。

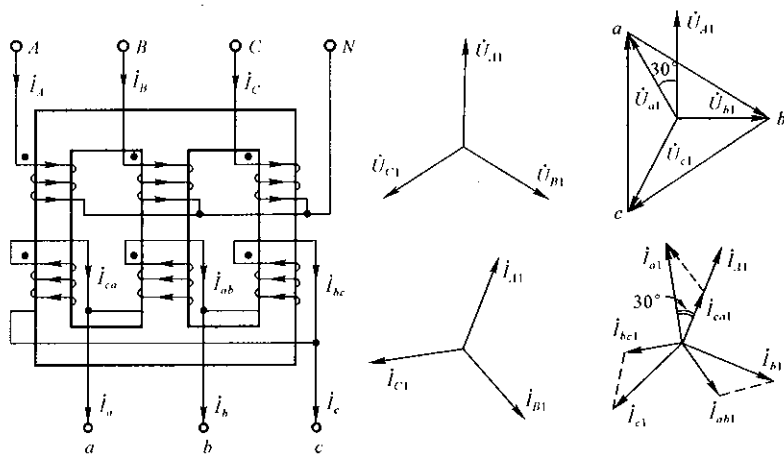


图 4.73 Y/Δ-11 变压器及正序电压和电流相量图

Y/Δ-11 变压器在负序电压和电流作用下,根据图 4.73(a) 作出的相量图如图 4.74 所示。Δ 侧负序电压和电流的相位都比 Y 侧的滞后 30°,用标么值表示时:

$$\dot{U}_{a2} = \dot{U}_{A2} e^{-j30^\circ} \quad \dot{I}_{a2} = \dot{I}_{A2} e^{-j30^\circ}$$

b 相和 c 相的关系也相同。

以上讨论说明,由 Y 侧变换到 Δ 侧时,正序相量反时针方向转过 30°,负序相量则顺时针方向转过 30°。相应地,由 Δ 侧变换到 Y 侧时,正序相量顺时针转过 30°,负序相量反时针转过 30°。

电力系统常用的另一种变压器接法为 Y/Y-12 接法,它两侧的正序、负序

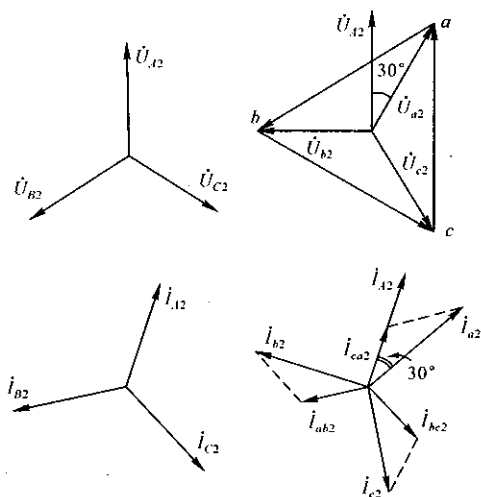


图 4.74 Y/Δ-11 负序电压、电流相量图

电压和电流都没有相位差。如果两侧中性点都接地,则零序电压、电流通过时也不会发生相位移动。

【例 4.15】 续例 4.14,试计算 D 点发生金属性单相接地瞬间,线路 l 和发电机的各相电流,线路始端和发电机端各相电压。已知正常运行时 D 点电压 $\dot{U}_{D(0)} = 109 \angle 0^\circ \text{ kV}$; 线路始端电压 $\dot{U}_{l(0)} = 112 \angle 3^\circ \text{ kV}$, 输电功率 $36 + j23 \text{ MVA}$; 发电机电压 $\dot{U}_{G(0)} = 10.3 \angle 7^\circ \text{ kV}$, 发电功率 $87 + j58.3 \text{ MVA}$ 。变压器 $T-1$ 为 $Y/\Delta-11$ 接法。

【解】 例 4.14 已求出单相接地短路时短路点的各序电流和电压,现用相量表示如下:

取 $\dot{U}_{D(0)} = 0.948 \angle 0^\circ$, 则 $\dot{I}_{D1} = \dot{I}_{D2} = \dot{I}_{D0} = -j0.947$, $\dot{U}_{D1} = 0.505$, $\dot{U}_{D2} = -0.348$, $\dot{U}_{D0} = -0.157$ 。

先计算所求电流和电压的各序分量。各序电流的参考方向已标在图 4.68 中,各电压的参考方向均取节点至“中性点”。

(1) 正序电压和电流分布

用叠加原理计算。有关电压和电流的正常分量为

$$\dot{U}_{l(0)} = \frac{112 \angle 3^\circ}{115} = 0.974 \angle 3^\circ$$

$$\dot{I}_{l(0)} = \frac{36 - j23}{120 \times 0.974 \angle -3^\circ} = 0.318 - j0.18$$

$$\dot{U}_{G(0)} = \frac{10.3 \angle 7^\circ}{10.5} = 0.981 \angle 7^\circ$$

$$\dot{I}_{G(0)} = \frac{87 - j58.3}{120 \times 0.981 \angle -7^\circ} = 0.794 - j0.401$$

正序故障分量根据图 4.75 的正序网络计算。

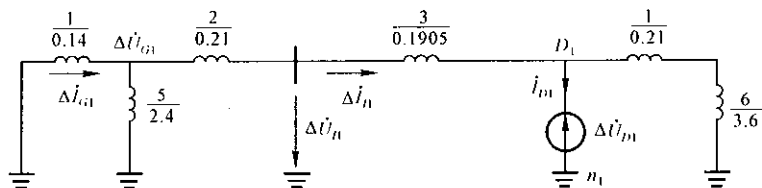


图 4.75 例 4.15 计算故障分量的正序网络

$$\Delta \dot{U}_{D1} = \dot{U}_{D1} - \dot{U}_{D(0)} = 0.505 - 0.948 = -0.443$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{I}_{I1} &= \dot{I}_{I1} + \frac{\Delta \dot{U}_{D1}}{j(x_1 + x_6)} = -j0.947 + \frac{-0.443}{j(0.21 + 3.6)} \\ &= -j0.831 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{I1} &= \Delta \dot{U}_{D1} + jx_3 \Delta \dot{I}_{I1} \\ &= -0.443 + j0.1905 \times (-j0.831) = -0.285 \end{aligned}$$

$$\Delta \dot{U}_{G1} = \Delta \dot{U}_{D1} + j(x_2 + x_3) \Delta \dot{I}_{I1} = -0.11$$

$$\Delta \dot{I}_{G1} = -\frac{\Delta \dot{U}_{G1}}{jx_1} = \frac{0.11}{j0.14} = -j0.786$$

正序电压和电流:

$$\dot{U}_{I1} = \dot{U}_{I(0)} + \Delta \dot{U}_{I1} = 0.974 \angle 3^\circ - 0.285 = 0.69 \angle 4.2^\circ$$

$$\dot{I}_{I1} = \dot{I}_{I(0)} + \Delta \dot{I}_{I1} = 0.318 - j1.011 = 1.06 \angle -72.5^\circ$$

$$\dot{U}_{G1} = \dot{U}_{G(0)} + \Delta \dot{U}_{G1} = 0.981 \angle 7^\circ - 0.11 = 0.872 \angle 7.9^\circ$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{G1} &= \dot{I}_{G(0)} + \Delta \dot{I}_{G1} = 0.794 - j0.401 - j0.786 \\ &= 1.466 \angle -57.2^\circ \end{aligned}$$

(2) 负序电压和电流分布

由图 4.68 负序网络求得

$$\begin{aligned} \dot{I}_{I2} &= \dot{I}_{D2} + \frac{\dot{U}_{D2}}{j(x_1 + x_6)} = -j0.947 + \frac{-0.248}{j(0.21 + 1.05)} \\ &= -j0.672 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{t2} &= \dot{U}_{D2} + jx_3 \dot{I}_{t2} = -0.348 + j0.1905 \times (-j0.672) \\ &= -0.22\end{aligned}$$

$$\dot{U}_{G2} = -0.22 + j0.21 \times (-j0.672) = -0.079$$

$$\dot{I}_{G2} = -\frac{\dot{U}_{G2}}{j0.14} = -j0.564$$

(3) 零序电压和电流分布

由图 4.68 零序网络求得

$$\dot{I}_{t0} = -\frac{\dot{U}_{D0}}{j(0.21 + 0.572)} = \frac{0.157}{j0.782} = -j0.201$$

$$\dot{U}_{t0} = -j0.21 \times \dot{I}_{t0} = -j0.21 \times (-j0.201) = -0.0422$$

$$I_{G0} = 0, \quad U_{G0} = 0$$

(4) 发电机和线路始端各相的电压和电流

设 D 点发生 b 相接地短路。线路 l 各相的电流为

$$\begin{aligned}\dot{I}_{tb} &= \dot{I}_{t1} + \dot{I}_{t2} + \dot{I}_{t0} = (0.318 - j1.011) - j0.672 - j0.201 \\ &= 1.91 \angle -80.4^\circ\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{I}_{tc} &= a^2 \dot{I}_{t1} + a \dot{I}_{t2} + \dot{I}_{t0} = 1.06 \angle (240^\circ - 72.5^\circ) \\ &\quad + 0.672 \angle (120^\circ - 90^\circ) - j0.201 = 0.581 \angle 141.2^\circ\end{aligned}$$

$$\dot{I}_{ta} = a \dot{I}_{t1} + a^2 \dot{I}_{t2} + \dot{I}_{t0} = 0.926 \angle 81.7^\circ$$

线路始端各相电压:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{tb} &= \dot{U}_{t1} + \dot{U}_{t2} + \dot{U}_{t0} = 0.69 \angle 4.2^\circ - 0.22 - 0.0422 \\ &= 0.429 \angle 6.8^\circ\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{tc} &= 0.69 \angle (4.2^\circ + 240^\circ) - 0.22 \angle 120^\circ - 0.0422 \\ &= 0.844 \angle -106^\circ\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{ta} &= 0.69 \angle (4.2^\circ + 120^\circ) - 0.22 \angle 240^\circ - 0.0422 \\ &= 0.826 \angle 112.8^\circ\end{aligned}$$

发电机各相电流:

$$\begin{aligned}\dot{I}_{Gtb} &= \dot{I}_{G1} e^{j30^\circ} + \dot{I}_{G2} e^{-j30^\circ} \\ &= 1.466 \angle (-57.2^\circ + 30^\circ) - j0.564 \angle -30^\circ \\ &= 1.545 \angle -48.6^\circ\end{aligned}$$

$$\dot{I}_{Gc} = a^2 \dot{I}_{G1} e^{j30^\circ} + a \dot{I}_{G2} e^{-j30^\circ} = 1.038 \angle -130.1^\circ$$

$$\dot{I}_{Ga} = a \dot{I}_{G1} e^{j30^\circ} + a^2 \dot{I}_{G2} e^{-j30^\circ} = 1.984 \angle 100.3^\circ$$

发电机端三相电压:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{Gb} &= \dot{U}_{G1} e^{j30^\circ} + \dot{U}_{G2} e^{-j30^\circ} \\ &= 0.872 \angle (7.9^\circ + 30^\circ) - 0.079 \angle -30^\circ \\ &= 0.845 \angle 42.9^\circ \end{aligned}$$

$$\dot{U}_{Gc} = a^2 \dot{U}_{G1} e^{j30^\circ} + a \dot{U}_{G2} e^{-j30^\circ} = 0.95 \angle -82.8^\circ$$

$$\dot{U}_{Ga} = a \dot{U}_{G1} e^{j30^\circ} + a^2 \dot{U}_{G2} e^{-j30^\circ} = 0.826 \angle 153.6^\circ$$

4.6.3 简单不对称短路的计算机算法

复杂电力系统的不对称短路一般应用计算机进行计算。这里介绍按照前述原理并使用节点导纳矩阵的计算方法。计算的主要步骤如下:

(1) 进行潮流计算, 求出各节点的正常电压。在简化计算中, 假定各节点正常电压相位相同, 大小取各自的平均额定电压, 可省去潮流计算。

(2) 形成各序网络的节点导纳矩阵。

正序网络的节点导纳矩阵和计算三相短路故障分量用的相同。

在负序网络中, 各发电机和负荷用负序阻抗的接地支路表示, 其他部分和潮流计算的网路相同。因此, 可利用潮流计算的节点导纳矩阵, 对各发电机和负荷节点的自导纳加以修正, 即得到负序网络的节点导纳矩阵。

零序网络的结构和参数与正序网络不同, 它的节点导纳矩阵要单独形成。

必须注意: 当短路点在线路中某点时, 应该首先在该点处增加一节点, 再形成各序网的节点导纳矩阵。

(3) 求各序网络短路点的自阻抗和有关的互阻抗。

用短路点注入单位电流法[参看式(4.146)], 从正序网络节点导纳矩阵求出短路点 D 对应的一列节点阻抗矩阵元素: $Z_{1D1}, Z_{2D1}, \dots, Z_{DD1}$ (即 Z_{D1}), \dots, Z_{nD1} ; 再用同样方法分别求出负序和零序网络节点阻抗矩阵的第 D 列元素。

(4) 计算短路节点各序电流。按照式(4.183) 计算 \dot{I}_{D1} , 并根据不对称故障的边界条件求 \dot{I}_{D2} 和 \dot{I}_{D0} 。

(5) 计算各节点正序电压和各支路正序电流。

先求各节点正序电压故障分量, 其方法和计算三相短路的电压故障分量

相同,即在正序网络短路点注入 $-\dot{I}_{D1}$,其他节点注入零电流,求出各节点的电压故障分量。计算式为

$$\Delta\dot{U}_{i1} = -Z_{iD1}\dot{I}_{D1} \quad (i = 1, 2, \dots, D, \dots, n)$$

再用下式求各节点正序电压:

$$\dot{U}_{i1} = \dot{U}_{i(0)} + \Delta\dot{U}_{i1} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

任一支路 $i-j$ 的正序电流为

$$\dot{I}_{ij1} = \frac{\dot{U}_{i1} - \dot{U}_{j1}}{Z_{ij1}}$$

式中 Z_{ij1} 为支路 $i-j$ 的正序阻抗。

(6) 计算各节点负序电压和各支路负序电流。

在负序网络短路点注入 $-\dot{I}_{D2}$,其他节点注入零电流,可得

$$\dot{U}_{i2} = -Z_{iD2}\dot{I}_{D2} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

任意支路的负序电流为

$$\dot{I}_{ij2} = \frac{\dot{U}_{i2} - \dot{U}_{j2}}{Z_{ij2}}$$

(7) 计算各节点零序电压和各支路零序电流。

$$\dot{U}_{i0} = -Z_{iD0}\dot{I}_{D0} \quad (i = \text{零序网络各节点号})$$

$$\dot{I}_{ij0} = \frac{\dot{U}_{i0} - \dot{U}_{j0}}{Z_{ij0}}$$

(8) 计算各节点三相电压和各支路三相电流。必须计及经过 $Y/\Delta-11$ 变压器时正、负序电流和电压的相位移动。

4.6.4 应用运算曲线计算任意时刻的不对称短路电流

正序等效定则表明,不对称短路时短路点的正序电流与该点经 ΔZ 发生三相短路的电流周期分量相等。还可以证明它们随时间变化的规律也近似相同,亦即可认为在短路过程中任意时刻正序等效定则都适用。因此,可以利用三相短路运算曲线计算不对称短路后任意时刻的正序电流值。

应用运算曲线计算不对称短路电流时,各元件的各序电阻均忽略不计,各序电抗的标么值用平均额定电压近似计算。在正序网络中,各个发电机电抗用

x_d'' 表示, 所有负荷都忽略不计。在负序网络中, 各负荷仍须用负序电抗 (标么值可取 0.35) 表示, 但近似计算时全部负荷也可略去不计, 同时取发电机 $x_2 = x_d''$, 这样, 正序和负序网络相应元件的电抗相等, 因而 $x_{D2} = x_{D1}$, 可省去制订负序网络。

作出三序网络和求出 x_{D2} 及 x_{D0} 后, 根据短路类型计算 Δx , 然后作出正序增广网络, 即可应用运算曲线求得任意时刻短路点的正序电流值。最后, 按式 (4.188) 计算该时刻短路点的故障相短路电流。如果还要求计算该时刻短路点附近的支路电流和节点电压, 则可根据边界条件或复合序网, 求出短路点各序电压和负、零序电流, 然后用 4.6.2 节所述的方法进行计算。

【例 4.16】 试用运算曲线法计算例 4.14 中的系统 (见图 4.68) D 点发生各种不对称短路, 0s 及 0.2s 时的短路电流 (G 为汽轮发电机)。

【解】 基准值同例 4.14, $S_B = 120\text{MVA}$ 。各序网络见图 4.68。但正序网络中负荷支路 5 和 6 应除去, 变压器 $T-2$ 也不必考虑。这样, $x_{D1} = x_1 + x_2 + x_3 = 0.54$ 。例 4.14 已求得 $x_{D2} = 0.367$, $x_{D0} = 0.166$ 。正序增广网络如图 4.76 所示。

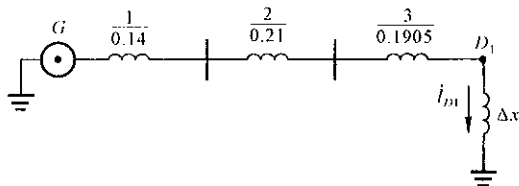


图 4.76 例 4.15 的正序增广网络

(1) 单相接地短路

$$\Delta x = x_{D2} + x_{D0} = 0.533$$

$$\text{计算电抗 } x_{js} = (x_{D1} + \Delta x) \frac{S_G}{S_B} = 1.07 \times \frac{120}{120} = 1.07$$

由附图 3 汽轮发电机的运算曲线查得

$$I'_{D1} = 0.95 \quad I_{D1(0.2)} = 0.88$$

故障相短路电流:

$$\begin{aligned} I_D' &= MI'_{D1} I_B = 3 \times 0.95 \times \frac{120}{\sqrt{3} \times 115} \\ &= 3 \times 0.95 \times 0.602 = 1.72(\text{kA}) \end{aligned}$$

$$I_{D(0.2)} = 3 \times 0.88 \times 0.602 = 1.59(\text{kA})$$

(2) 两相短路

$$\Delta x = x_{D2} = 0.367$$

$$x_{js} = x_{D1} + \Delta x = 0.907$$

由附图 3 查得

$$I_{D1}'' = 1.14 \quad I_{D1(0,2)} = 1.03$$

故障相短路电流:

$$I_D'' = \sqrt{3} \times 1.14 \times 0.602 = 1.19(\text{kA})$$

$$I_{D(0,2)} = \sqrt{3} \times 1.03 \times 0.602 = 1.07(\text{kA})$$

(3) 两相短路接地

$$\Delta x = x_{D2} // x_{D0} = 0.367 // 0.166 = 0.114$$

$$x_{js} = x_{D1} + \Delta x = 0.654$$

由附图 3 查得:

$$I_{D1}'' = 1.6, \quad I_{D1(0,2)} = 1.4$$

故障相短路电流:

$$M = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{0.367 \times 0.166}{(0.367 + 0.166)^2}} = 1.535$$

$$I_D'' = 1.535 \times 1.6 \times 0.602 = 1.48(\text{kA})$$

$$I_{D(0,2)} = 1.535 \times 1.4 \times 0.602 = 1.29(\text{kA})$$

【例 4.17】 图 4.77(a) 所示的系统,在 D 点发生金属性单相接地短路,试求 $t = 0.4\text{s}$ 时短路点的短路电流和非故障相电压。

图中各双绕组变压器 $U_K\% = 10.5$;三绕组变压器 $U_{K1}\% = 12, U_{K2}\% = 0, U_{K3}\% = 6$;各架空线的路 $x_1 = 0.4\Omega/\text{km}, x_0 = 3.5x_1$, 双回线路 $x_0' = 5.5x_1$ 。

【解】 取 $S_B = 100\text{MVA}$,各级 U_B 取平均额定电压。作正序网络[见图 4.77(b)],计算各元件的电抗标么值(略),负序网络各元件参数同正序网络。零序网络示于图 4.77(c)。

在正序网络中,发电机 G-1 至 D_1 点的电抗为

$$x_A = x_1 + x_3/2 + x_{10} = 0.629$$

发电机 G-2 至 D_1 点的电抗为

$$x_B = x_2 + x_5 + x_7 = 1.0$$

系统至 D_1 点的电抗为

$$x_S = x_6 + x_9 + x_8 = 0.32$$

$$x_{D1} = x_{D2} = x_A // x_B // x_S = 0.175$$

在零序网络中, $x_{D0} = 0.215$

单相接地短路的附加电抗:

$$\Delta x = x_{D2} + x_{D0} = 0.39$$

正序网络(见图 4.77(b))中 D_1 点与“地”间接入 Δx 即成为正序增广网

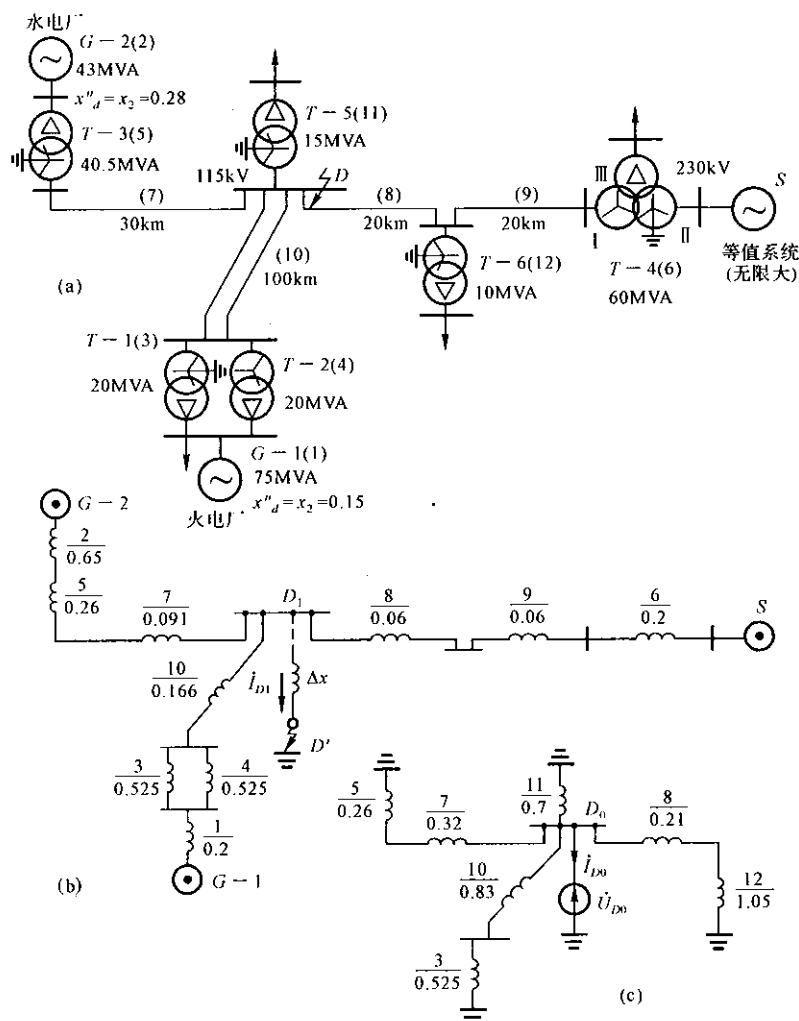


图 4.77 例 4.17 的系统和等值网络

络, I_{D1} 相当于 Δx 后 D' 点的三相短路电流。由于 Δx 较大, 使发电机 $G-1$ 和 $G-2$ 对 D' 的电气距离增加, 所以可以合并作为一台汽轮发电机处理, 总容量 $S_G = 43 + 75 = 118(\text{MVA})$ 。

等值发电机至 D_1 点的电抗: $x_{GD1} = x_A // x_B = 0.386$

计算电抗

$$x_{js} = \left(x_{GD1} + \Delta x + \frac{x_{GD1} \Delta x}{x_S} \right) \frac{S_G}{S_B}$$

$$\begin{aligned}
 &= \left(0.386 + 0.39 + \frac{0.386 \times 0.39}{0.32} \right) \frac{118}{100} \\
 &= 1.246 \times \frac{118}{100} = 1.47
 \end{aligned}$$

由附图 4 运算曲线查得 0.4s 时(在 $t = 0.2\text{s}$ 和 $t = 0.6\text{s}$ 两曲线之间内插), $I_{G1} = 0.68$ 。

等值系统至 D' 的转移电抗

$$x_{SD'} = x_S + \Delta x + \frac{x_S \Delta x}{x_{GD1}} = 1.03$$

等值系统提供的正序电流为

$$I_{S1} = \frac{1}{1.03} = 0.97$$

$t = 0.4\text{s}$ 时短路点故障相电流为

$$\begin{aligned}
 I_{D(0.4)} &= 3 \left(0.68 \times \frac{118}{\sqrt{3} \times 115} + 0.97 \times \frac{100}{\sqrt{3} \times 115} \right) \\
 &= 2.67(\text{kA})
 \end{aligned}$$

归算到 $S_B = 100\text{MVA}$ 的短路点正序电流标么值为

$$I_{D1} = 0.68 \times \frac{118}{100} + 0.97 = 1.77$$

取 $\dot{I}_{D1} = -j1.77$, 0.4s 时短路点各序电压为

$$\dot{U}_{D1} = j\Delta x \dot{I}_{D1} = 0.390 \times 1.77 = 0.69$$

$$\dot{U}_{D2} = -jx_{D2} \dot{I}_{D1} = -0.175 \times 1.77 = -0.31$$

$$\dot{U}_{D0} = -jx_{D0} \dot{I}_{D1} = -0.215 \times 1.77 = -0.38$$

设 a 相发生短路, 0.4s 时 D 点 b, c 相电压为

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_{Db} &= a^2 \dot{U}_{D1} + a \dot{U}_{D2} + \dot{U}_{D0} \\
 &= 0.69 \angle 240^\circ - 0.31 \angle 120^\circ - 0.38 \\
 &= 1.037 \angle -123^\circ
 \end{aligned}$$

$$\dot{U}_{Dc} = 0.69 \angle 120^\circ - 0.31 \angle 240^\circ - 0.38 = 1.037 \angle 123^\circ$$

4.7 电力系统非全相运行

电力系统某些元件一相或两相断开的非正常运行状态称为非全相运行。

造成非全相运行的主要原因是装有分相操作断路器的架空线路,断路器一相或两相跳闸所致。这种情况常伴随短路故障而出现,例如采用单相自动重合闸的架空线路,发生单相短路时,该相导线两端的断路器相继跳闸,并先后重合闸。在这过程中就出现单相短路、一相断开和两者同时存在的情况。此外,也包括架空线路一相或两相导线断线,但断线落地也同时造成接地短路。因此,非全相和短路大多同时存在,形成多重故障或复杂故障。本节仅讨论系统中一个地点非全相断开的分析方法,它是分析复杂故障的基础。

图 4.78(a)、(b) 表示电力系统某处发生一相和两相断开的情况。在断口 $F-F'$ 之间三相压降是不对称的,非断开相电压降为零,断开相有一定的电压;三相电流显然也是不对称的。这是一种纵向的三相不对称,与不对称短路不同,后者是三相对地之间横向的不对称。

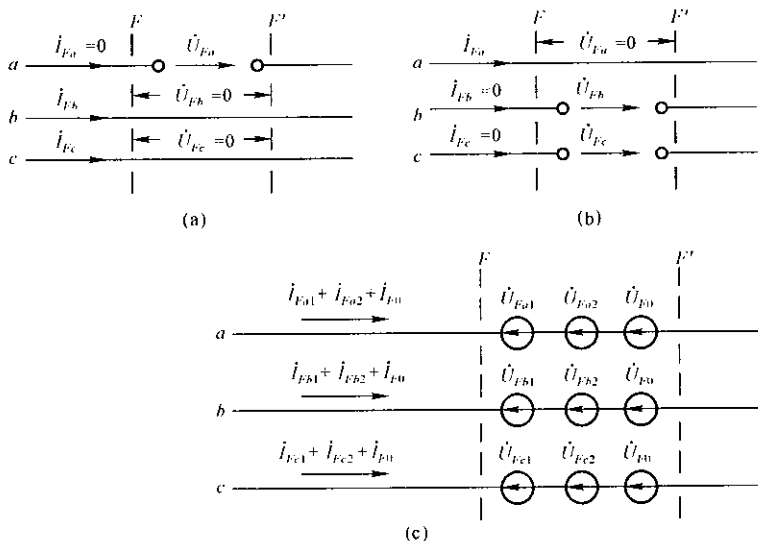


图 4.78 一相和两相断开示意图

断口处三相不对称的电压,可以分解为正序、负序和零序电压分量,并用理想的电压源代替,如图 4.78(c) 所示。由于系统其他地方参数都是三相对称的,所以可以像处理不对称短路一样,应用叠加原理作出正序、负序和零序网络,如图 4.79 所示。正序网络包含发电机电势,是有源一端口网络,可用戴维宁电势 E_F 和阻抗 Z_{F1} 等值,见图 4.79(a);负序和零序网络[见图 4.79(b)、(c)]都是无源单口网络,可以分别用阻抗 Z_{F2} 和 Z_{F0} 等值。

各序网络的方程可表示为

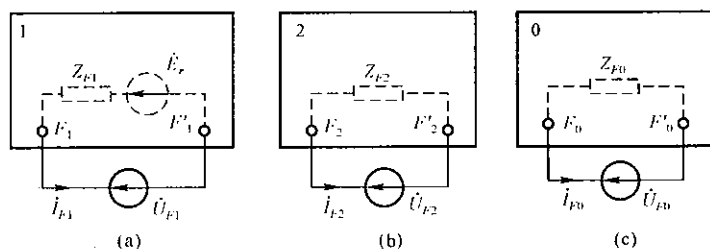


图 4.79 非全相运行的正序(a)、负序(b)和零序(c)网络

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{F1} &= \dot{E}_F - Z_{F1} \dot{I}_{F1} \\ \dot{U}_{F2} &= -Z_{F2} \dot{I}_{F2} \\ \dot{U}_{F0} &= -Z_{F0} \dot{I}_{F0} \end{aligned} \right\} \quad (4.189)$$

根据断口的边界条件,还可列出三个方程,与上式联立求解,就可得到断口电压和电流的各序分量。

一相(a 相)开断和两相(b, c 相)开断[见图 4.78(a)、(b)]的边界条件列于表 4.7 中,其中对称分量是以特殊相 a 相为基准。根据边界条件作出的复合序网示于图 4.80 中。

表 4.7 非全相开断的边界条件

	实际电流、电压关系	各序电流关系	各序电压关系
一相开断	$\dot{I}_{Fa} = 0, \dot{U}_{Fb} = \dot{U}_{Fc} = 0$	$\dot{I}_{F1} + \dot{I}_{F2} + \dot{I}_{F0} = 0$	$\dot{U}_{F1} = \dot{U}_{F2} = \dot{U}_{F0}$
两相开断	$\dot{I}_{Fb} = \dot{I}_{Fc} = 0, \dot{U}_{Fa} = 0$	$\dot{I}_{F1} = \dot{I}_{F2} = \dot{I}_{F0}$	$\dot{U}_{F1} + \dot{U}_{F2} + \dot{U}_{F0} = 0$

由复合序网可得

$$\dot{I}_{F1} = \frac{\dot{E}_F}{Z_{F1} + \Delta Z} \quad (4.190)$$

$$\dot{U}_{F1} = \dot{I}_{F1} \Delta Z \quad (4.191)$$

对于一相开断, $\Delta Z = Z_{F2} Z_{F0} / (Z_{F2} + Z_{F0})$; 两相开断, $\Delta Z = Z_{F2} + Z_{F0}$ 。

\dot{I}_{F1} 和 \dot{U}_{F1} 确定后,就可从边界条件和式(4.189)或复合序网求得负、零序电流和电压,进而计算各序网络中的电流和电压分布,以及各处的三相电流和电压。也可以应用图 4.81 的正序增广网络计算任意支路的正序电流和各节点的正序电压。

【例 4.18】 例 4.14 的电力系统[重画于图 4.82(a)],设双回路架空线之一的末端发生非全相开断。试分别计算一相开断和两相开断瞬间,故障线路各

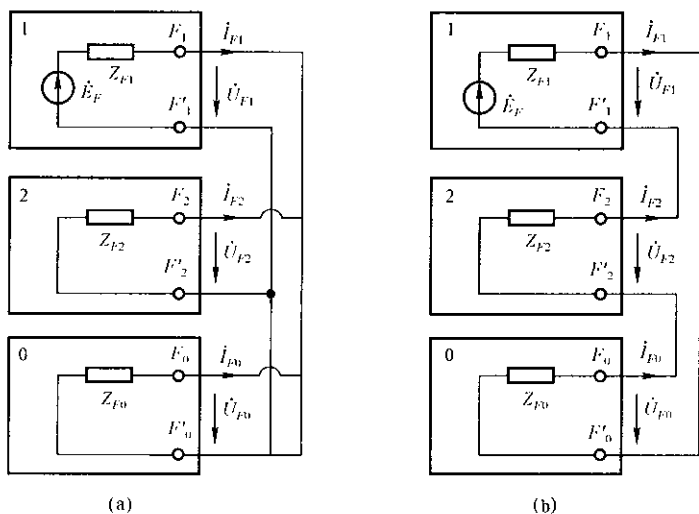
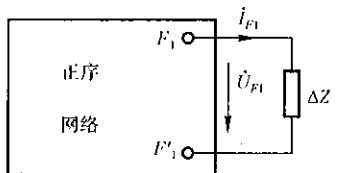


图 4.80 非全相开断的复合序网

(a) 一相开断; (b) 两相开断

相电流和线路末端母线 M 的各相电压。已知发电机次暂态电势 $E'' = 11\text{kV}$; 双回路架空线不考虑回路间零序互感时 $x_0 = 2x_1$, 计及零序互感时 $x'_0 = 3x_1$; 其他参数见例 4.14。



【解】 基准值同例 4.14 ($S_B = 120\text{MVA}$, $U_B =$ 平均额定电压)。

作正序网络, 示于图 4.82(b), 各元件电抗标么值同例 4.14。正序网络的等值电势 \dot{E}_F 等于断口 $F_1-F'_1$ 开路时的电压, 即 $F_1-F'_1$ 开路时电抗 x_3 上的电压降。

发电机 E'' 的标么值: $E'' = 11/10.5 = 1.05$, 取 $\dot{E}'' = 1.05 \angle 0^\circ$ 。图 4.82(b) 中虚线框内 (即发电机支路和支路 5) 用等值电势 \dot{E}_{eq} 和 x_{eq} 表示

$$\dot{E}_{eq} = \frac{\dot{E}'' x_5}{x_1 + x_3} = \frac{1.05 \times 2.4}{0.14 + 2.4} = 0.992$$

$$x_{eq} = x_1 // x_3 = 0.132$$

正序网络戴维宁等值电势:

$$\dot{E}_F = \frac{\dot{E}_{eq}}{x_{eq} + x_2 + x_3 + x_4 + x_6} x_3 = 0.0834$$

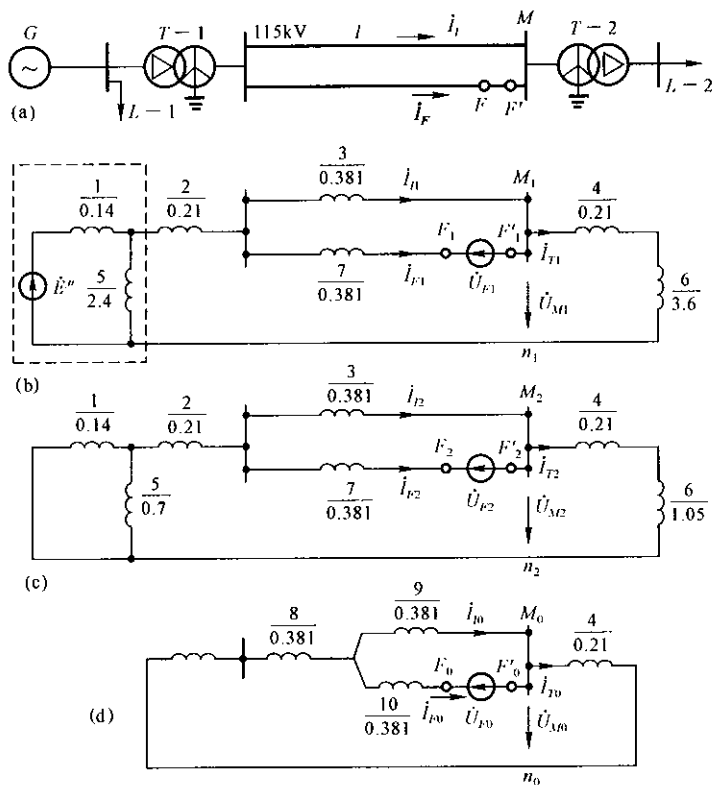


图 4.82 例 4.18 的系统和各序网络

等值电抗:

$$x_{F1} = [(x_{eq} + x_2 + x_4 + x_6) // x_3] + x_7 = 0.73$$

负序网络见图 4.82(c), 端口 $F_2 - F'_2$ 的等值电抗:

$$x_{F2} = \{[(x_1 // x_5) + x_2 + x_4 + x_6] // x_3\} + x_7 = 0.688$$

零序网络见图 4.82(d), 其中双回线路 $x_0 = 2x_1 = 2 \times 0.4 = 0.8(\Omega/\text{km})$, $x'_0 = 3x_1 = 3 \times 0.4 = 1.2(\Omega/\text{km})$, 两回路间零序互感抗 $x_{1-10} = x'_0 - x_0 = 0.4(\Omega/\text{km})$ 。

各回路零序漏抗 $x_{s0} = x_0 - x_{1-10} = 0.8 - 0.4 = 0.4(\Omega/\text{km})$

双回路零序等值电路中

$$x_8 = x_{1-10} \times 105 \times \frac{S_B}{U_B^2} = 0.4 \times 105 \times \frac{120}{115^2} = 0.381$$

$$x_9 = x_{10} = x_{s0} \times 105 \times \frac{120}{115^2} = 0.381$$

端口 $F_0 - F'_0$ 的等值电抗:

$$x_{F0} = [(x_2 + x_8 + x_1) // x_9] + x_{10} = 0.639$$

(1) 一相开断(a相)

$$\Delta x = x_{F2} // x_{F0} = 0.688 // 0.639 = 0.331$$

$$\dot{I}_{F1} = \frac{\dot{E}_F}{j(x_{D1} + \Delta x)} = \frac{0.0834}{j(0.73 + 0.331)} = -j0.0786$$

$$\dot{I}_{F2} = -\frac{\Delta x}{x_{D2}} \dot{I}_{F1} = -\frac{0.331}{0.688} (-j0.0786) = j0.0378$$

$$\dot{I}_{F0} = -\frac{\Delta x}{x_{D0}} \dot{I}_{F1} = -\frac{0.331}{0.639} (-j0.0786) = j0.0408$$

$$\dot{U}_{F1} = \dot{U}_{F2} = \dot{U}_{F0} = \dot{I}_{F1} \times (j\Delta x) = 0.026$$

由正序网络求得

$$\dot{I}_{I1} = \frac{\dot{U}_{F1} + jx_7 \dot{I}_{F1}}{jx_3} = -j0.1468$$

$$\dot{I}_{T1} = \dot{I}_{I1} + \dot{I}_{F1} = -j0.225$$

$$\dot{U}_{M1} = j(x_1 + x_6) \dot{I}_{T1} = 0.857$$

由负序网络求得

$$\dot{I}_{I2} = \frac{\dot{U}_{F2} + jx_7 \dot{I}_{F2}}{jx_3} = -j0.0304$$

$$\dot{I}_{T2} = \dot{I}_{I2} + \dot{I}_{F2} = -j0.0074$$

$$\dot{U}_{M2} = j(x_1 + x_6) \dot{I}_{T2} = -0.0093$$

由零序网络求得

$$\dot{I}_{I0} = \frac{\dot{U}_{F0} + jx_{10} \dot{I}_{F0}}{jx_9} = -j0.0274$$

$$\dot{I}_{T0} = \dot{I}_{I0} + \dot{I}_{F0} = j0.0134$$

$$\dot{U}_{M0} = jx_4 \dot{I}_{T0} = -0.0028$$

故障线路b和c相电流

$$\begin{aligned} \dot{I}_{Fb} &= a^2 \dot{I}_{F1} + a \dot{I}_{F2} + \dot{I}_{F0} \\ &= 0.0786 \angle (240^\circ - 90^\circ) + 0.0378 \angle (120^\circ + 90^\circ) \\ &\quad + j0.0408 = 0.118 \angle 148.7^\circ \end{aligned}$$

$$\dot{I}_{Fc} = 0.0786 \angle (120^\circ - 90^\circ) + 0.0378 \angle (240^\circ + 90^\circ)$$

$$+ j0.0408 = 0.118 \angle 31.3^\circ$$

母线 M 各相电压:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{Ma} &= \dot{U}_{M1} + \dot{U}_{M2} + \dot{U}_{M0} = 0.857 - 0.0093 - 0.0028 \\ &= 0.845\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{Mb} &= 0.857 \angle 240^\circ - 0.0093 \angle 120^\circ - 0.0028 \\ &= 0.863 \angle -119.6^\circ\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{Mc} &= 0.857 \angle 120^\circ - 0.0093 \angle 240^\circ - 0.0028 \\ &= 0.863 \angle 119.6^\circ\end{aligned}$$

(2) 两相开断(设为 b, c 两相)

正序电流和电压改用正序增广网络(见图 4.83) 计算。图中 $\Delta x = x_{F2} + x_{F0} = 0.688 + 0.639 = 1.327$ 。虚线框中支路 1 和 5 用串联的 \dot{E}_{eq} 和 x_{eq} 代替, 前已求得 $\dot{E}_{eq} = 0.992, x_{eq} = 0.132$ 。

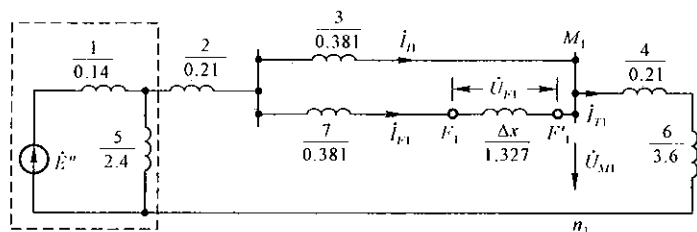


图 4.83 例 4.18 的正序增广网络

$$\begin{aligned}\dot{I}_{T1} &= \frac{\dot{E}_{eq}}{j\{x_{eq} + x_2 + [x_3 / (x_7 + \Delta x)] + x_4 + x_6\}} = \frac{0.992}{j4.46} \\ &= -j0.222\end{aligned}$$

$$\dot{I}_{F1} = \frac{x_3}{x_3 + x_7 + \Delta x} \dot{I}_{T1} = -j0.041$$

$$\dot{U}_{M1} = j(x_4 + x_6) \dot{I}_{T1} = 0.846$$

根据边界条件: $\dot{I}_{F1} = \dot{I}_{F2} = \dot{I}_{F0} = -j0.041$ 。而

$$\dot{U}_{F2} = -jx_{F2} \dot{I}_{F2} = -j0.688 \times (-j0.041) = -0.028$$

$$\dot{U}_{F0} = -jx_{F0} \dot{I}_{F0} = -j0.639 \times (-j0.041) = -0.026$$

由负序网络(见图 4.82(c)) 求得

$$\dot{I}_{I2} = \frac{\dot{U}_{F2} + jx_7 \dot{I}_{F2}}{jx_3} = j0.033$$

$$\dot{I}_{T2} = \dot{I}_{F2} + \dot{I}_{I2} = -j0.041 + j0.033 = -j0.008$$

$$\dot{U}_{M2} = j(x_4 + x_6) \dot{I}_{T2} = 0.0101$$

由零序网络[图 4.82(d)]求得

$$\dot{I}_{I0} = \frac{\dot{U}_{F0} + jx_{10} \dot{I}_{F0}}{jx_9} = j0.027$$

$$\dot{I}_{T0} = \dot{I}_{F0} + \dot{I}_{I0} = -j0.041 + j0.027 = -j0.014$$

$$\dot{U}_{M0} = jx_4 \dot{I}_{T0} = j0.21 \times (-j0.014) = 0.0029$$

故障线路电流:

$$\dot{I}_{Fa} = \dot{I}_{F1} + \dot{I}_{F2} + \dot{I}_{F0} = 3\dot{I}_{F1} = -j0.041 \times 3 = -j0.123$$

$$\dot{I}_{Fb} = \dot{I}_{Fc} = 0$$

母线 M 各相电压:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{Ma} &= \dot{U}_{M1} + \dot{U}_{M2} + \dot{U}_{M0} = 0.846 + 0.0101 + 0.0029 \\ &= 0.859\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{Mb} &= 0.846 \angle 240^\circ + 0.0101 \angle 120^\circ + 0.0029 \\ &= 0.84 \angle -120.4^\circ\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{Mc} &= 0.846 \angle 120^\circ + 0.0101 \angle 240^\circ + 0.0029 \\ &= 0.84 \angle 120.4^\circ\end{aligned}$$

4.8 电力系统复杂故障分析概述

电力系统中两处或两处以上地点同时发生故障称为多重故障或复杂故障,它的分析方法也是以对称分量法和叠加原理为基础。现以双重故障为例,说明分析的基本方法。

图 4.84 表示电力系统在 D 点发生不对称短路,同时在 F 处发生非全相开断的情况。和简单不对称故障一样,也可用正序、负序和零序网络分别求解三

序电流和电压分量,不同之处是各序网络都有两个端口,如图 4.85 所示。正序网络含有全部发电机的电势,是有源的双口网络,负序和零序网络则都是无源的双口网络。各序网络可用 Y 参数、 Z 参数或 H (混合) 参数表示的双口网络方程描述。例如用 H 参数表示的各序网方程如下所列:

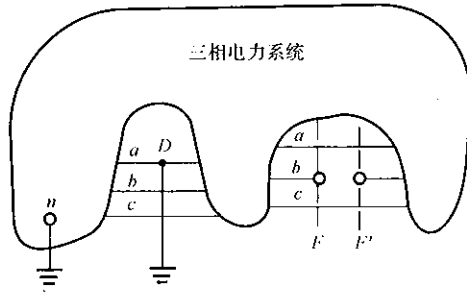


图 4.84 双重故障示意图

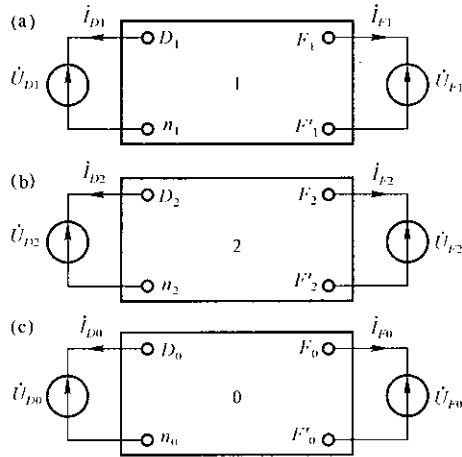


图 4.85 双重故障示意图

正序网络方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{D1} \\ \dot{I}_{F1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11(1)} & H_{12(1)} \\ H_{21(1)} & H_{22(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{D1} \\ \dot{U}_{F1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{U}_{D(0)} \\ \dot{I}_{F(0)} \end{bmatrix} \quad (4.192)$$

式中, $\dot{U}_{D(0)}$ 为端口 D_1-n_1 开路、端口 $F_1-F'_1$ 短路时, 端口 D_1-n_1 的开路电压; $\dot{I}_{F(0)}$ 为同样情况下端口 $F_1-F'_1$ 的短路电流。它们就是正常运行时 D 点的相电压和流过 F 处的电流。

负序网络方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{D2} \\ \dot{I}_{F2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11(2)} & H_{12(2)} \\ H_{21(2)} & H_{22(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{D2} \\ \dot{U}_{F2} \end{bmatrix} \quad (4.193)$$

零序网络方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{D0} \\ \dot{I}_{F0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11(0)} & H_{12(0)} \\ H_{21(0)} & H_{22(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{D0} \\ \dot{U}_{F0} \end{bmatrix} \quad (4.194)$$

用 Y 或 Z 参数的双口网络方程不再列出。用何种参数表示,视解题方便而定。

另外,根据具体故障的边界条件还可列出六个方程。例如设 D 点发生 a 相直接接地短路, F 处发生 b 相开断,以 a 相为基准的短路点边界条件为

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{D1} &= \dot{I}_{D2} \\ \dot{I}_{D1} &= \dot{I}_{D0} \\ \dot{U}_{D1} + \dot{U}_{D2} + \dot{U}_{D0} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.195)$$

以 a 相为基准的 F 处 b 相开断的边界条件为:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{Fb} &= a^2 \dot{I}_{F1} + a \dot{I}_{F2} + \dot{I}_{F0} = 0 \\ \dot{U}_{Fa} &= \dot{U}_{F1} + \dot{U}_{F2} + \dot{U}_{F0} = 0 \\ \dot{U}_{Fc} &= a \dot{U}_{F1} + a^2 \dot{U}_{F2} + \dot{U}_{F0} = 0 \end{aligned}$$

经简单推导可得

$$\left. \begin{aligned} a^2 \dot{I}_{F1} + a \dot{I}_{F2} + \dot{I}_{F0} &= 0 \\ a^2 \dot{U}_{F1} &= \dot{U}_{F0} \\ a \dot{U}_{F2} &= \dot{U}_{F0} \end{aligned} \right\} \quad (4.196)$$

因为一个三相网络只能指定某一相为基准,所以上式边界条件出现复数系数 a 和 a^2 。

式(4.192)至(4.196)12个方程联立求解即可得到12个变量。至于具体求解的技巧以及各序网络参数的计算,这里就不作讨论。

复杂故障也可以应用复合序网进行分析计算。例如 D 点 a 相短路, F 处 b 相开断的情况,根据边界条件式(4.195)和(4.196)可作出图4.86所示的复合序网。图中 $F-F'$ 侧采用变比为 $1:a$ 和 $1:a^2$ 的理想移相变压器,是为了满足边界条件式(4.196),而 $D-n$ 侧采用 $1:1$ 的理想变压器是为了保证各序网络端口 D 点流出的电流与流入 n 点的电流相等。

关于其他不同故障组合的情况,这里就不一一加以讨论。

5

电力系统稳定性

5.1 电力系统稳定性概述

电力系统稳定是研究电力系统在受到扰动后,凭借系统本身固有的能力和控制设备的作用,回复到原始稳态运行方式,或者达到新的稳态运行方式的问题。一般用以表示发电机组对系统或系统对系统间的同步运行稳定性。所谓同步运行是指所有并联运行发电机都有相同的电角速度。电力系统稳定与扰动的大小、经受扰动的时间、系统的结构与运行方式、电力系统各元件的参数、各种调节和控制装置的性能等很多因素有关。保证电力系统稳定是电力系统正常运行的必要条件。只有在保持电力系统稳定的条件下,电力系统才能不间断地向各类用户提供合乎质量要求的电能。

电力系统稳定问题的出现最早应追溯到 20 世纪二三十年代。自第一批发电机(或发电厂)并列运行,以及从远方发电厂到负荷中心长距离输电线路的出现,形成最初的电力系统起,开始出现电力系统稳定问题,也就是同步发电机间并列运行的稳定性。电力系统中各同步发电机只有在同步运行状态下,其送出的电功率为定值,同时在系统中各节点的电压及支路的功率潮流也都是定值,这就是电力系统的稳定运行状态。反之,如果电力系统中各发电机间不能保持同步,则发电机送出的电功率不是定值,全系统各节点的电压及支路的功率不再保持为定值,将发生很大幅度的波动。如果不能使系统中各发电机间恢复同步运行,系统将持续地处于失步状态,即系统失去稳定的状态。

使电力系统失去稳定的原因是在运行中不断受到内部和外界的扰动,小的如负荷波动,大的如电力元件发生短路故障等,使在电气上连接在一起的各同步发电机的机械输入转矩与电磁转矩失去平衡,出现各发电机转子不同程度的加速或减速,以及各发电机转子相对功率角($\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$)的变化。在扰动后,相对功率角,或以周期性振荡的形式变化,或以单调形式变化。如果这种变化是随时间衰减的,最后达到原始运行方式下的正常值,或达到新的稳态值,则认为在这种运行方式下是稳定的,否则认为是不稳定的。

到目前为止,国际上还没有统一的有关电力系统稳定的分类标准。电力系统稳定一般按电力系统承受扰动的大小分为静态和暂态稳定两大类。所谓小干扰或大干扰只是相对的和有条件的区分,很难用具体的数量值来给定。小干扰一般指正常的负荷和参数的波动,如个别电动机的接入和切除或加负荷和减负荷;又如架空输电线因风吹摆动引起线间距离(影响线路电抗)的微小变化;另外,发电机转速也可能产生微小变化。电力系统的大干扰主要有:负荷的

突然变化,如投入或切除大容量的用户等;切除或投入系统的主要元件,如发电机、变压器及线路等;发生短路故障和断线故障。小干扰对系统行为特性的影响一般与干扰的大小和发生的地点无关,可以在原始运行状态的周围,使系统特性线性化进行分析,其研究结果不是确定运行参数对原始稳态运行值的偏移值,而是确定运行参数变化的性质,得出系统静态稳定或不稳定的结论。大干扰时,电力系统将发生很大的状态偏移和振荡,所以必须考虑系统元件的非线性特性,从系统的机电暂态过程来判断系统的暂态稳定性。

一般对电力系统暂态稳定性的研究限制在大干扰后几秒钟内。但是,在现代电力系统中有各种自动调节装置,它们对各种干扰自动作出各自的反应。所以,在这些系统中一个干扰的全部影响有时要在它发生后几秒钟甚至更长的时间以后才能反映出来。这种在受到小的或大的干扰后,在发电机本身的阻尼和自动调节和控制装置的作用下,使电力系统的振荡衰减,保持较长过程稳定性的能力也称为电力系统动态稳定。对于这种较长时间的稳定性研究,有时需要考虑一般暂态稳定研究中不考虑的那些系统元件的动态特性,例如锅炉、原子反应堆、水电厂压力管道、继电保护和系统调节装置(如调频和功率调节装置)等元件。在一定的系统参数、运行方式和调节方式下,这种动态过程可以由小干扰激发的,由微小振荡逐渐增大;也可以是由于大干扰引起的参数变化而激发。对于由小干扰所激发的动态稳定问题,因为振荡初期的系统状态变化很小,不涉及系统的非线性特性,一般可用研究静态稳定的方法来进行研究,所以广义的静态稳定也包括这类情况。

1981年,水利电力部制定的《电力系统安全稳定导则》中对电力系统稳定作了如下规定。

(1) 电力系统静态稳定是指电力系统受到小干扰后,不发生非周期性的失步,自动恢复到起始运行状态的能力。

(2) 电力系统暂态稳定是指电力系统受到大干扰后,各同步发电机保持同步运行并过渡到新的或恢复到原来稳态运行方式的能力。通常指第一或第二振荡周期不失步。

(3) 电力系统动态稳定是指电力系统受到干扰后,不发生振幅不断增大的振荡而失步。

以上所述的电力系统稳定均以电力系统中任一发电机是否失步为依据。在某些情况下,发电机受到小的或大的干扰而失步后,由于调节装置或人为的干预以及系统本身具有的能力,同步发电机经过短时间的失步运行后,可以再恢复同步运行方式,这种情况称作电力系统再同步。从严格的稳定性定义来看,它是属于不稳定的情况。但从工程实际观点来看,这是一种缩小稳定破坏

的后果,迅速恢复电力系统正常运行的措施,所以有人称之为“最终稳定”或“综合稳定”。各个电力系统将根据各自的条件来处理和对待这种情况。中国的《电力系统安全稳定导则》中规定在满足一定条件下可以允许局部系统作短时间的非同步运行。

5.1.1 简单的机械比拟

先用力学上的一个简单的例子来说明稳定性的概念。如图 5.1 所示,一个小球在原始状态所受到外力的合力(或合力矩)等于零,则该小球处于平衡状态。有些平衡状态是稳定的,而另一些则是不稳定的。检验平衡状态稳定性的方法是在小球上加一外力干扰,使小球从它的原始位置产生偏移,当外力干扰消除后,看小球是否能回复到原始状态或达到一个新的平衡状态。

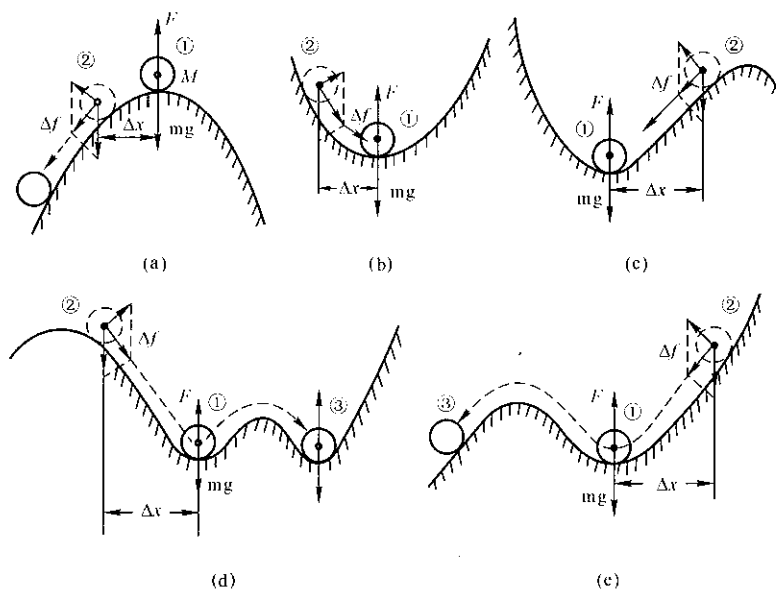


图 5.1 稳定概念的例子

图 5.1(b) 中位于凹面底部 ① 的小球,当受到微小的外力干扰,将偏离原始的平衡位置。外力干扰消除后,合力 Δf 能使小球回到原始平衡位置,则小球在位置 ① 是静态稳定的。图 5.1(a) 中位于凸面顶处 ① 的小球 M 同样处于原始平衡状态,但当对小球稍加外力干扰,使其偏离平衡位置后,合力 Δf 将使小球离开原始平衡位置越来越远,所以小球在这种原始平衡位置是静态不稳定的。

图 5.1(c) 中凹面底部 ① 的小球受到较大外力干扰,使其偏离平衡位置,达到位置 ②。当外力干扰消除后,小球仍能回复到原始位置 ①,所以小球在原始位置 ① 的状态是稳定的。图 5.2(d) 中小球受较大外力干扰偏离平衡位置 ① 达到位置 ②,外力消除后,最终在邻近 ① 的位置 ③ 达到一个新的平衡,所以小球在原始位置 ① 的状态也是稳定的。图 5.1(e) 中小球受到较大外力干扰偏离平衡位置 ①,当外力干扰消除后最终不能回到原始位置或达到一个新的平衡位置,所以原始位置 ① 的状态是不稳定的。

5.1.2 电力系统静态稳定的初步概念

电力系统静态稳定性是研究电力系统在某一运行方式下受到微小干扰时的稳定性问题。假如在电力系统中有一瞬时性小干扰,在干扰消失后,系统能回复到原始运行状态;而在一个永久性的小干扰作用下,系统经历一个暂态过程后,能达到一个新的稳态运行状态,则这一系统被认为是静态稳定的,否则系统在小干扰下将是静态不稳定的。

现以一简单的电力系统为例来说明静态稳定的基本概念。图 5.2(a) 表示一台发电机 G 通过升压变压器 T_1 ,输电线路 L ,降压变压器 T_2 接到无穷大功率电源母线上。

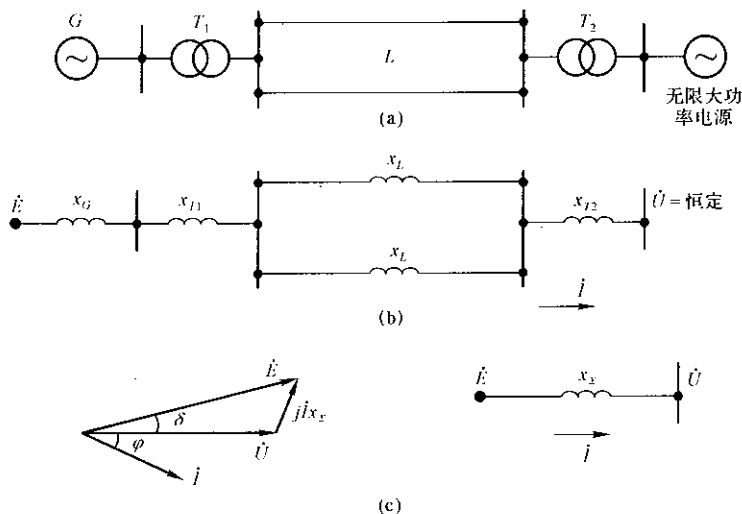


图 5.2 简单的输电系统

图 5.2(b) 和(c) 是系统的等值电路和运行时的相量图。受端无穷大功率

电源的阻抗为零, 母线电压 \dot{U} 是恒定值; 在不考虑自动调节装置时, 送端发电机 G 的电势 \dot{E} 也是恒定值。不计元件的电阻及对地导纳, 系统总电抗为

$$x_{\Sigma} = x_G + x_{T1} + x_L/2 + x_{T2} \quad (5.1)$$

发电机电磁功率方程式为

$$P_E = \frac{EU}{x_{\Sigma}} \sin \delta \quad (5.2)$$

式中, 角度 δ 为 \dot{E} 与 \dot{U} 之间的相位角, 称为“功率角”。在 \dot{E} 和 \dot{U} 均为定值时, 发电机功率与功率角间的功角特性曲线如图 5.3 所示。

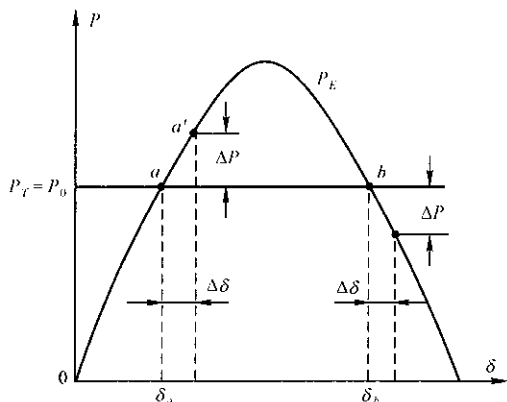


图 5.3 简单电力系统的功角特性

在正常工作时, 原动机传送给发电机的机械功率为 P_T , 与发电机电功率 P_0 平衡, 运行点如图中 a 点所示, 相应的功率角为 δ_a 。当系统中出现某一微小的干扰, 使功率角 δ 发生一微小增量 $\Delta\delta$ 时, 发电机输出的电功率将与 a' 点相应, 发生 ΔP 的变化。由于原动机功率不变, 因此电功率大于原动机功率, 使发电机转子减速, δ 将减小, 运行点向原始的 a 点运动。同样, 如果小干扰使 δ 减小 $\Delta\delta$, 这时的电功率将小于原动机功率, 转子将加速, 运行点同样地向原始的 a 点返回。由此可见, 在 a 点, 当系统受到任何小干扰时均能自行恢复到原始的平衡状态, 所以系统是静态稳定的。

在图 5.3 中的 b 点 (相应的功率角为 $\delta_b = 180^\circ - \delta_a$), 稳态时输入的原动机功率和输出的电功率也是相互平衡的, 但是在小干扰使发电机产生一个 $\Delta\delta$ 增量时, 由于电功率的减小, 使发电机转子加速, δ 将继续增大, 以至发电机失去同步, 即系统失去稳定。同样地, 如果小干扰使 δ 减小, 由于电功率大于原动机功率而使转子减速, 其结果是使运行点向 a 点趋近, 达到新的平衡。所以, 在

b 点, 电力系统是静态不稳定的。

由上述分析可知, 所谓电力系统静态稳定性, 是指电力系统在运行中受到小干扰后, 能恢复到它原来运行状态的能力。对于这种简单电力系统, 静态稳定的条件是 $dP_E/d\delta > 0$, 即在图 5.3 所示曲线的上升部分系统是静态稳定的。当不断增大原动机功率时, 功率角 δ 将增加, 直到 $\delta = 90^\circ$ 处, 电功率达到极限值, 称为静态稳定功率极限。

在研究复杂电力系统并考虑各种调节装置的静态稳定问题时, 应列出描述电力系统各种有关元件动态过程的状态方程式。由于干扰是微小的, 所以状态方程式可以线性化。判断静态稳定的方法, 一般可求出线性化状态方程式组的特征根。如果有一个根的实部为正值, 系统就是静态不稳定的。

5.1.3 电力系统暂态稳定的初步概念

电力系统在某一运行方式下, 受到外界大干扰后, 经过一个机电暂态过程, 能够恢复到原始稳态运行方式或达到一个新的稳态运行方式, 仍保持同步电机间的同步运行, 则认为电力系统在这一运行方式下是暂态稳定的。暂态稳定性与干扰的型式有关, 一般有三种基本形式。

(1) 电力系统的结构或参数突然变化, 最常见的是短路, 包括单相接地、两相短路、两相接地或三相短路。短路大多发生在输电线路, 但也可能发生在母线或其他电力系统元件上。在发生短路后, 由断路器断开故障的元件, 如果线路有重合闸装置, 可能是重合成功(瞬时性故障), 也可能是重合不成功(永久性故障)。无故障断开线路也属于这一类干扰;

(2) 突然增加或减少发电机出力, 如切除一台容量较大的发电机;

(3) 突然增加或减少大量负荷。

仍以图 5.2(a) 所示的简单系统来说明电力系统暂态稳定性的基本概念。设一回输电线路由于某种原因在线路两侧断开, 图 5.4 示出这一无故障断开过程中的功角特性曲线的变化过程。

在正常运行时, 系统运行在功角特性曲线 P_1 上, 运行点相应于 P_0 和 δ_0 的 a 点。切除一回线路后, 系统的总电抗为

$$x'_{\Sigma} = x_G + x_{r1} + x_L + x_{r2} \quad (5.3)$$

相应的电磁功率方程式为

$$P_1 = \frac{EU}{x'_{\Sigma}} \sin \delta \quad (5.4)$$

当 E 保持不变时, 由于 $x'_{\Sigma} > x_{\Sigma}$, 因而 $P_1 = f(\delta)$ 的幅值比 $P_1 = f(\delta)$

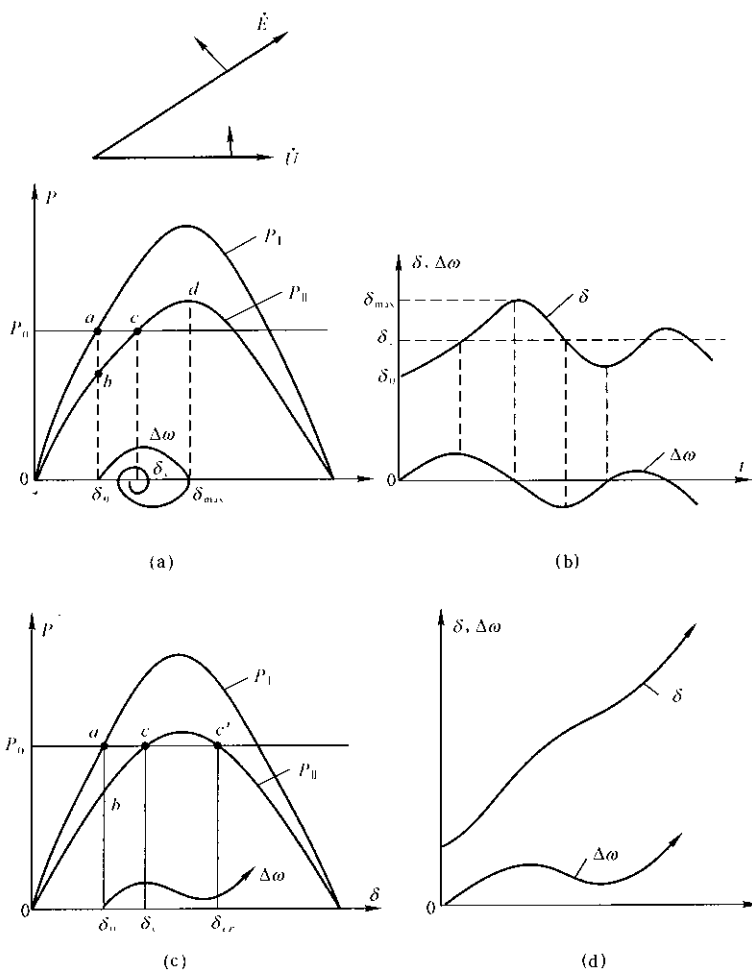


图 5.4 电力系统故障后的暂态过程

的幅值要小, 图 5.4(a) 表示了两种情况下的功率特性曲线。由于转子具有较大的机械惯性, 所以在切除线路后的瞬间, 功率角 δ 的值保持不变, 发电机输出的电磁功率突然减小, 运行点由 P_1 曲线上的 b 点确定。

这时, 可以假定原动机的机械功率 $P_T = P_m$ 维持不变, 这是因为原动机的调速器是根据发电机转速的改变而起调节作用的, 但在切断回路的瞬间, 转速仍保持原来的正常数值 (只发生微小的变化), 加上原动机调速器的失灵区和滞迟等因素, 所以在发生故障后的一段时间里还不能显著地对原动机功率有所影响。

这样, 输出的电功率减小, 而输入的原动机功率还来不及变化, 所以发电

机在过剩转矩作用下,开始加速,发电机的角速度 ω_G 开始大于额定角速度 ω_0 ,相对角速度 $\Delta\omega = \omega_G - \omega_0$ 为正,功率角 δ 开始增大,发电机的工作点将沿着特性曲线 P_1 由 b 点向 c 点变动,同时发电机输出的功率也开始增加。但是,在未抵达 c 点以前,原动机功率还是大于发电机的输出功率,虽然加速性的过剩转矩逐渐减小,但它一直是加速性的,因此 $\Delta\omega$ 不断增大。

在 c 点处,原动机和发电机的转矩互相平衡,但过程并不到此结束。因为这时发电机转速已高于同步转速,由于转子的惯性,功率角将继续增大而越过 c 点。当角度 δ 再增大时,发电机输出功率将大于原动机的机械功率。因此,过剩转矩将变为减速性的,发电机开始减速, $\Delta\omega$ 逐渐变小并在 d 点时等于零(发电机转速 $\omega_G = \omega_0$)。

在 d 点处,角度不再继续增大并抵达它的最大值 δ_{\max} 。但是在这点过程并不停止。由于发电机功率仍大于原动机的功率,所以有减速性的过剩转矩,发电机转速继续减小。这时, $\omega_G < \omega_0$,相对速度 $\Delta\omega < 0$,角度 δ 开始减小,在特性曲线 P_1 上由 d 点向 c 点趋近,并越过 c 点。这样反复振荡,由于系统的阻尼作用,最后到达稳态平衡点 e 。图 5.4(b)表示了 δ 和 $\Delta\omega$ 随时间振荡的波形。所以,这种情况下的电力系统是暂态稳定的。

可能有另外一种情况,例如初始运行状态的 P_0 较大(即 δ_0 较大)或 P_1 的最大值较小时。如图 5.4(c)所示,从点 c 开始转子减速,正的相对速度 $\Delta\omega$ 开始减小, δ 角继续增大。如果到达临界角 δ_{cr} (对应于点 c')时, $\Delta\omega$ 还未降到零, δ 将继续增大。这样,原动机功率又要大于发电机输出功率,转子重新开始加速, $\Delta\omega$ 增大,角度继续增大,使发电机与受端系统失去同步,破坏了电力系统的稳定运行。图 5.4(d)表示这种情况下角度 δ 和 $\Delta\omega$ 与时间的关系。这种情况下的电力系统是暂态不稳定的。

由上述分析可以得到暂态稳定的初步概念:电力系统暂态稳定性是指电力系统在某个运行状态下,突然受到大的干扰后,能够过渡到新的稳态运行状态(或者回到原来运行状态)的能力。电力系统具有静态稳定性是稳定运行的必要条件。但是静态稳定的系统遭受了大的干扰时(如短路、切除或投入发电机或线路等),并联运行的同步发电机是否仍能保持同步运行,负荷能否保持正常运行等,这就是电力系统暂态稳定的问题。

描述电力系统受到大干扰后的机电暂态过程是一组非线性微分方程式,不能进行线性化,所以一般采用数值积分法(如欧拉法、龙格-库塔法、隐式积分法)的时域分析方法,将计算结果绘出运行参数(如功角 δ)对时间的曲线,用以判别暂态稳定性。

5.2 同步发电机组的机电模型

由上节概述可见,要分析电力系统的机电暂态过程,首先应该对系统中各类旋转电机及其调节系统的模型有一基本了解。本节将分别加以介绍。

5.2.1 同步发电机组的转子运动方程式

电力系统稳定问题主要是研究电力系统中同步发电机转子间的相对运动。这里将介绍发电机的转子运动方程,它是研究电力系统稳定问题的基础。

根据旋转物体的力学定律,同步发电机组转子的机械角加速度与作用在转子轴上的不平衡转矩之间有如下关系:

$$J\alpha = \Delta M \quad (5.5)$$

式中, J 为发电机及原动机转子的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; ΔM 为作用在转子轴上的不平衡转矩,是原动机的机械转矩 M_T 和发电机的电磁转矩 M_E 之差, $\text{N} \cdot \text{m}$; α 为转子的机械角加速度 $\alpha = d\Omega/dt, \text{rad/s}^2$; Ω 为转子机械角速度, rad/s 。

由于在暂态稳定和静态稳定计算中需要计算各发电机转子间电的相对转速和相对角度,所以,对式(5.5)可作一些变换。

机械角速度 Ω 和电角速度 ω 有如下关系:

$$\Omega = \frac{\omega}{p} \quad (5.6)$$

式中, p 为同步电机转子磁极的极对数。

图 5.5 所示的角度间的关系中, α 是空间静止的固定参考轴线,同步参考轴线是以同步角速度 ω_0 在空间旋转的轴线。转子 q 轴以角速度 ω 在空间旋转。

由图 5.5 可见:

转子 q 轴与固定参考轴间的角

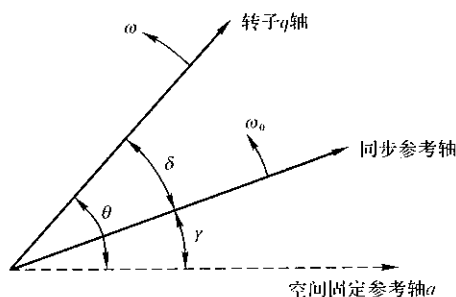


图 5.5 同步机转子的相对角度

$$\theta = \int_0^t \omega dt + \theta_0$$

同步参考轴与固定参考轴间的角 $\gamma = \omega_0 t + \gamma_0$

转子 q 轴与同步参考轴间的角 $\delta = \theta - \gamma$

所以

$$\theta = \delta + \gamma = \delta + \omega_0 t + \gamma_0$$

转子的电角速度

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\delta}{dt} + \omega_0 \quad (5.7)$$

即

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \quad (5.8)$$

转子的电角加速度

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad (5.9)$$

这样,式(5.5)可以改写为

$$J \frac{d\omega}{p dt} = J \frac{d^2\delta}{p dt^2} = \Delta M \quad (5.10)$$

今取下式所定义的发电机额定转矩 M_N 作为转矩的基准值 M_B 。

$$M_B = \frac{S_N}{\Omega_0} = \frac{S_N}{\omega_0 / p} = \frac{p S_N}{\omega_0} \quad (5.11)$$

式中, S_N 为发电机额定容量, VA 或 $N \cdot m/s$; p 为极对数。

用 M_B 去除式(5.10)的两边得

$$\frac{J \omega_0^2}{p^2 S_N} \cdot \frac{1}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \Delta M_*$$

或

$$\frac{T_J}{\omega_0} \cdot \frac{d\omega}{dt} = \Delta M_* \quad (5.12)$$

式中, $T_J = \frac{J \omega_0^2}{p^2 S_N}$ 的单位为 s , 称为电机的惯性时间常数。

电机的惯性时间常数的物理意义可以解释如下:

把式(5.12)改写为

$$dt = \frac{T_J}{\omega_0 \Delta M_*} d\omega$$

令加于转子轴上的不平衡转矩标么值 $\Delta M_* = 1$, 将上式从 0 到 ω_0 积分

$$t = \int_0^{\omega_0} \frac{T_J}{\omega_0} d\omega = T_J \quad (5.13)$$

式(5.13)说明 T_J 为在发电机转子上加一单位转矩后, 转子从停顿状态

($\omega = 0$) 到额定转速(相应于 $\omega = \omega_0$) 所需要的时间。

通常制造厂家提供的发电机组的数据是反映转动部分质量和尺寸的 GD^2 值,它和 T_J 之间的关系为

$$\begin{aligned} T_J &= \frac{GD^2 \times 10^3}{4} \cdot \frac{\omega_0^2}{p^2 S_N \times 10^3} \\ &= \frac{GD^2}{4} \cdot \frac{\left(\frac{2\pi n p}{60}\right)^2}{p^2 S_N} = \frac{2.74 GD^2 n^2}{1000 S_N} \end{aligned} \quad (5.14)$$

式中, GD^2 为发电机和原动机转子的飞轮转矩, $T \cdot m^2$; S_N 为发电机的额定容量, kVA; n 为发电机组的额定转速, r/min。

按式(5.14)计算的 T_J 是以发电机本身的额定容量为功率基准值的。当计算时应该把它换算到系统统一的功率基准值 S_B , 即

$$T_{JB} = T_{JN} \cdot \frac{S_N}{S_B} \quad (5.15)$$

式中, S_N, S_B 取同一种单位。

也有采用 $H = T_J/2$ 的形式, 所以式(5.12) 也可改写为

$$\frac{2H}{\omega_0} \cdot \frac{d\omega}{dt} = \Delta M_* \quad (5.16)$$

式(5.12) 已将转子运动方程式表示为电角加速度和不平衡转矩的关系。在角速度变化范围不大的情况下, 可近似地认为转矩的标么值等于功率的标么值, 即

$$\begin{aligned} \Delta M_* &= \frac{\Delta M}{M_B} = \frac{\Delta M}{S_B/\Omega_0} = \frac{\Delta M \Omega_0}{S_B} \approx \frac{\Delta M \Omega}{S_B} \\ &= \frac{\Delta P}{S_B} = \Delta P_* = P_{T*} - P_{E*} \end{aligned} \quad (5.17)$$

为了书写方便, 省去下标 *, 式(5.12) 变为

$$\frac{T_J}{\omega_0} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_T - P_E \quad (5.18)$$

上式还可以写成状态方程的形式:

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \quad (5.19)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_0}{T_J} (P_T - P_E) \quad (5.20)$$

如果 ω 用标么值表示, 即 $\omega_* = \omega/\omega_0$, 省去下标, 上式可改写为

$$\frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0 \quad (5.21)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{T_J} (P_T - P_E) \quad (5.22)$$

分析上式可知,在稳定运行时 $P_T = P_E$, 所以 $\frac{d\omega}{dt} = 0$, 即 $\omega = 1$, 从而 $\frac{d\delta}{dt} = 0$, 即 δ 不变。在暂态过程中, P_T 和 P_E 均要变化, 因而, 角速度 ω 和相对角度 δ 也要发生变化。在下面两节中将分析暂态过程中发电机的电磁转矩和机械转矩。

5.2.2 同步发电机的电磁转矩和电磁功率

发电机电磁转矩的计算公式为

$$M_E = i_q \psi_d - i_d \psi_q \quad (5.23)$$

当用标么值表示, 而且 $\omega = \omega_0$ 时, 则 $P_{E*} = M_{E*}$, 所以式(5.23)也表示电磁功率标么值的计算公式。电机在稳态和暂态过程中它都是适用的。

1. 稳态运行时同步发电机电磁功率方程式

图 5.6 表示同步发电机经升压变压器和高压输电线接至无穷大功率电源

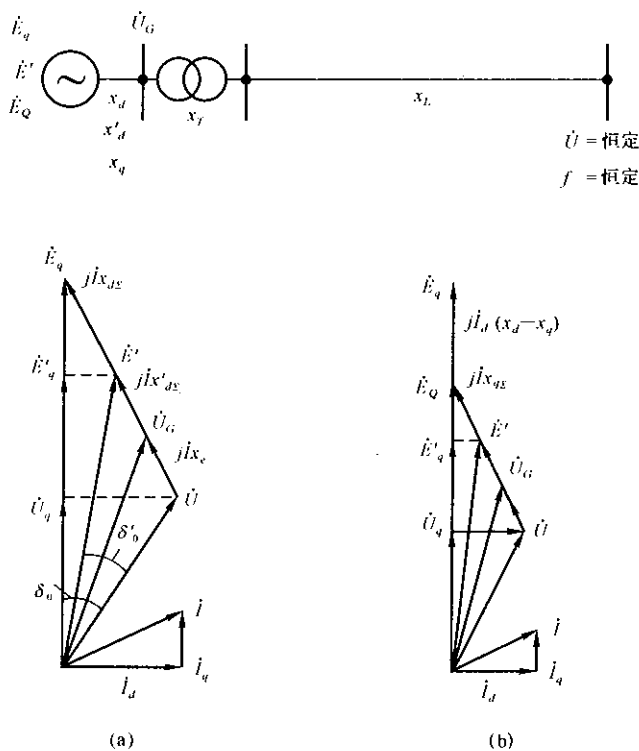


图 5.6 简单电力系统及其相量图

母线的简单电力系统及其相量图。其中 \dot{U} 为无穷大功率电源的电压, x_e 为外接串联电抗(包括变压器及线路的电抗)。令 $x_{d\Sigma} = x_d + x_e$, $x'_{d\Sigma} = x'_d + x_e$, $x_{q\Sigma} = x_q + x_e$ 。

同步发电机输出的稳态电磁功率 P_E 可由下式计算

$$P_E = I_q \psi_d - I_d \psi_q \quad (5.24)$$

在稳态时, $\omega = 1$, $d\psi_q/dt = d\psi_d/dt = 0$, 阻尼绕组中没有电流, 忽略定子电阻, 根据第四章中式(4.43)和式(4.44)可得同步发电机的稳态基本方程为

$$\left. \begin{aligned} U_d &= -\psi_q \\ U_q &= \psi_d \\ \psi_q &= -I_q x_{q\Sigma} \\ \psi_d &= E_q - I_d x_{d\Sigma} \end{aligned} \right\} \quad (5.25)$$

从上式可得

$$I_d = \frac{E_q - U_q}{x_{d\Sigma}} \quad (5.26)$$

和

$$I_q = \frac{U_d}{x_{q\Sigma}} \quad (5.27)$$

计及 $U_q = U \cos \delta$, $U_d = U \sin \delta$, 并将式(5.25) ~ (5.27)代入式(5.24), 可得凸极机的电磁功率方程式

$$P_{E_q} = \frac{E_q U}{x_{d\Sigma}} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \cdot \frac{x_d - x_q}{x_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} \sin 2\delta \quad (5.28)$$

对于隐极机 $x_d = x_q$, 则

$$P_{E_q} = \frac{E_q U}{x_{d\Sigma}} \sin \delta \quad (5.29)$$

式(5.28)和式(5.29)中, 当 $E_q =$ 恒定值时, P_{E_q} 是 δ 的函数, δ 是无穷大功率电源母线电压 \dot{U} 与发电机空载电势 \dot{E}_q 间的夹角。电磁功率的最大值可以由 $dP_E/d\delta = 0$ 的条件求出, 对于隐极发电机功率极大值出现在 $\delta = 90^\circ$ 时, 其大小为 $P_m = \frac{E_q U}{x_{d\Sigma}}$ 。

2. 暂态过程中电磁功率方程式

在解决工程实际问题时, 往往只研究问题的主要方面, 而对次要方面作必要的简化。例如, 在分析短路电流时, 主要计算短路电流的变化, 而假定发电机的转速不变, 因此不考虑转子运动的变化。同样的, 在分析稳定问题时, 主要是研究转子的运动变化, 所以对发电机电磁暂态过程也作某些简化, 主要是下列

几个方面:

- (1) 不计发电机定子绕组的电阻, 即 $r = 0$;
- (2) 机组的转速接近同步转速, 计算电磁功率时取 $\omega = 1$;
- (3) 不计定子绕组中的电磁暂态过程;
- (4) 本书采用简化分析方法, 忽略不计阻尼绕组的影响。

对于上述第(3)个假定的含义是只计及发电机定子电流中的正序基频周期分量产生的电磁转矩(或功率), 而忽略了暂态过程中定子电流的其他分量, 如非周期分量和负序分量等产生的转矩(或功率), 因为这些分量的转矩是脉动的, 它们的平均值为零, 不影响机电暂态过程。从第4章的分析可知, 三相短路时电流初值的 d, q 分量为

$$i_d = \frac{E'_{q(0)}}{x'_d} + \frac{U_{d(0)}}{x_d} \sin t - \frac{U_{q(0)}}{x_d} \cos t \quad (5.30)$$

$$i_q = \frac{U_{q(0)}}{x_q} \sin t + \frac{U_{d(0)}}{x_q} \cos t \quad (5.31)$$

i_d 和 i_q 中的基频分量是对应于 i_a, i_b 和 i_c 中的非周期分量和倍频周期分量, 而 i_d 和 i_q 中的直流分量对应于 i_a, i_b 和 i_c 中的基频周期分量。在派克方程中令 $d\phi_d/dt = d\phi_q/dt = 0$ 时, 则解出的 i_d 和 i_q 中只有直流分量。同理, 电力网中也只计及电压和电流的基频周期分量, 所以仍可使用稳态等值电路和稳态方程来描述。

采用简化条件(4)是因为阻尼绕组所引起的次暂态自由电流衰减很快, 它产生的电磁转矩很快就消失, 对惯性很大的转子的机械暂态过程影响很小。不过, 当需要研究转子振荡衰减情况时, 必须计及阻尼绕组的作用。

在上列简化条件下, 同步机基本方程中定子的两个方程变为

$$u_q = \phi_d \quad u_d = -\phi_q \quad (5.32)$$

$$\phi_d = E_q - i_d x_{d\Sigma} \quad \phi_q = -i_q x_{q\Sigma} \quad (5.33)$$

与稳态运行时式(5.25)的形式完全相同, 也可使用图5.6的相量图表示, 只是其中各量都是暂态过程中任一瞬时 t 的数值。因此在暂态过程中的电磁功率(转矩)的表示式也与式(5.28)和(5.29)形式相同。

3. 同步发电机电磁功率方程式的其他表示形式

式(5.28)和(5.29)是用空载电势 E_q 表示的电磁功率方程式。为了分析问题的需要, 功率方程式还可以表示为其他形式。

- (1) 用暂态电势 E'_q 表示的功率方程式

由图5.6(a)、(b)可求出 E_q 与 E'_q 的关系

$$E_q = \frac{x_{d\Sigma}}{x'_d} E'_q - \frac{x_d - x'_d}{x_{d\Sigma}} U \cos \delta \quad (5.34)$$

代入(5.28)式,得出用 E'_q 表示的功率方程式 $P_{E'_q}$

$$P_{E'_q} = \frac{E'_q U}{x_{d\Sigma}} \sin \delta - \frac{U^2}{2} \cdot \frac{x_q - x'_d}{x_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} \sin 2\delta \quad (5.35)$$

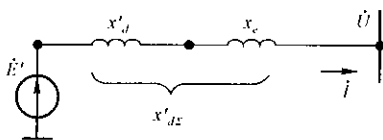
式(5.35)是用 E'_q 表示的凸极机的功率方程式,对于隐极机为

$$P_{E'_q} = \frac{E'_q U}{x_{d\Sigma}} \sin \delta - \frac{U^2}{2} \cdot \frac{x_d - x'_d}{x_{d\Sigma} x_{d\Sigma}} \sin 2\delta \quad (5.36)$$

可见在其功率方程式中也包含两项,与凸极机形式相同。

(2) 用暂态电抗 x'_d 后的电势 E' 表示的功率方程式

为了简化起见,常常采用简化的发电机模型,即取暂态电抗后的电势 E' 和暂态电抗 x'_d 来代表发电机,如图 5.7 所示。



这样,无论是凸极机还是隐极机,都可被隐极化了的电机模型代替。功率方程式为

$$P_E = \frac{E' U}{x_{d\Sigma}} \sin \delta' \quad (5.37)$$

应注意,(5.37)式中,功率角是 δ' ,而不是实际的功率角 δ ,也就是说 E' 不在 q 轴上,所以 δ' 不是发电机转子相对位置角,但它的变化仍可以反映发电机转子相对运动的性质。由式(5.29)、

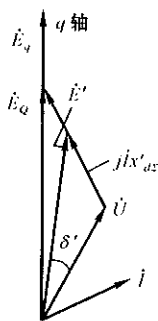


图 5.7 发电机简化模型及其相量图
(5.28)、(5.35)、(5.36) 和(5.37)表示的电磁功率与功率角 δ 之间的函数关系表示在图 5.8 中。

【例 5.1】 如图 5.9 所示的电力系统,试分别计算发电机用 E_q 、 E'_q 、 E' 表示的电磁功率特性。各元件的参数及运行条件如下。

发电机: $S_{GN} = 352.5\text{MVA}$; $P_{GN} = 300\text{MW}$; $U_{GN} = 10.5\text{kV}$; $x_d = 1.0$;

$x_q = 0.6$; $x'_d = 0.25$; $T_J = 8\text{s}$

变压器: T_1 : $S_{TN} = 360\text{MVA}$; $U_k\% = 14.0$; 额定电压之比为 $10.5\text{kV}/242\text{kV}$

T_2 : $S_{TN} = 360\text{MVA}$; $U_k\% = 14.0$; 额定电压之比为 $220\text{kV}/121\text{kV}$

线路: $l = 250\text{km}$; $x = 0.41(\Omega/\text{km})$

运行条件: $U_0 = 115\text{kV}$, $P_0 = 250\text{MW}$, $\cos \varphi_0 = 0.95$ (滞后), 变压器在额

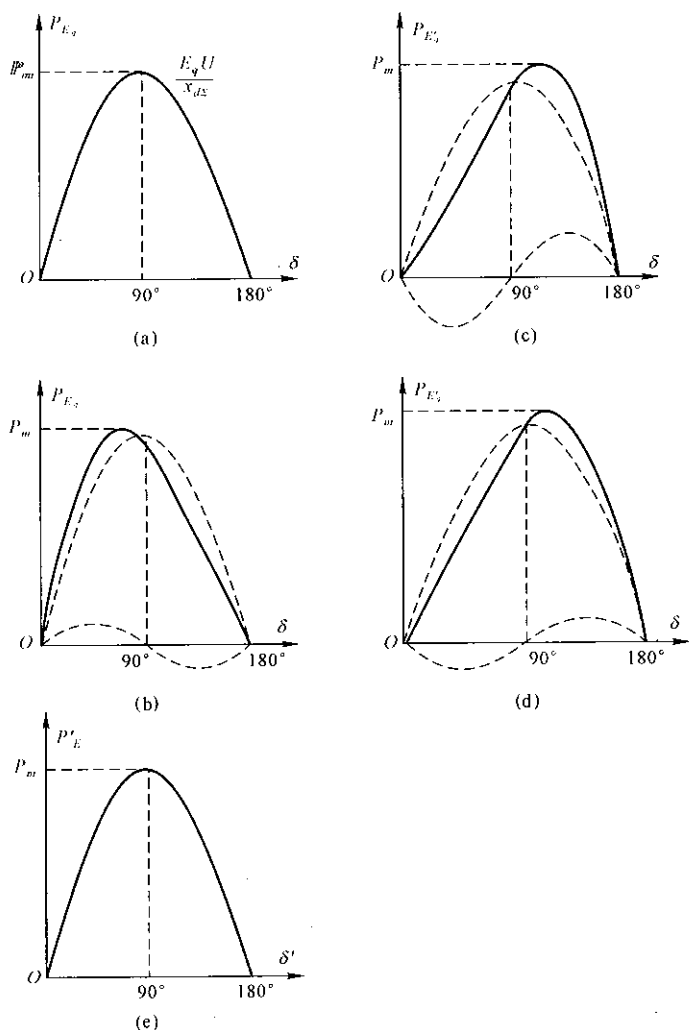


图 5.8 同步发电机功率特性

(a) 隐极机(E_q 表示); (b) 凸极机(E_q 表示); (c) 隐极机(E'_q 表示)
(d) 凸极机(E'_q 表示); (e) 简化发电机模型(E' 表示)

定分接头位置。各运行参数加下标 0 表示正常运行值或干扰前的稳态值,下同。

【解】

(1) 网络参数及运行参数的计算

取 $S_B = 250\text{MVA}$, $U_E = 115\text{kV}$, 为使变压器不出现非标准变比, 所有参数按分接头位置归算到 110kV 电压级。

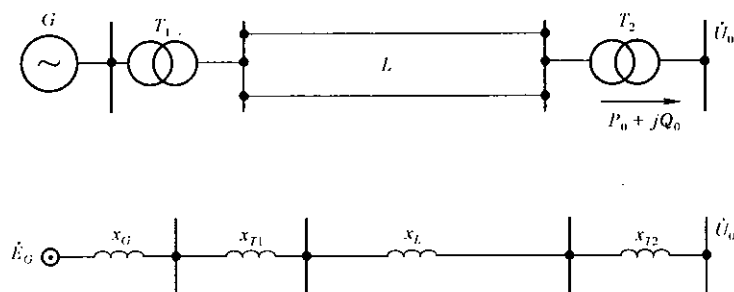


图 5.9 电力系统及其等值图

各元件参数标么值为

$$x_d = 1.0 \times \frac{10.5^2}{352.5} \times \frac{242^2}{10.5^2} \times \frac{121^2}{220^2} \times \frac{250}{115^2} = 0.95$$

$$x_q = \frac{0.6}{1.0} \times 0.95 = 0.57$$

$$x_d' = \frac{0.25}{1.0} \times 0.95 = 0.238$$

$$x_{T1} = 0.14 \times \frac{242^2}{360} \times \frac{121^2}{220^2} \times \frac{250}{115^2} = 0.13$$

$$x_{T2} = 0.14 \times \frac{121^2}{360} \times \frac{250}{115^2} = 0.108$$

$$x_L = 0.5 \times 0.41 \times 250 \times \frac{121^2}{220^2} \times \frac{250}{115^2} = 0.293$$

$$x_{d\Sigma} = x_d + x_{T1} + x_L + x_{T2} = 1.481$$

$$x_{q\Sigma} = x_q + x_{T1} + x_L + x_{T2} = 1.101$$

$$x_{d\Sigma}' = x_d' + x_{T1} + x_L + x_{T2} = 0.769$$

运行参数的计算:

$$U_0 = \frac{115}{115} = 1.0, \quad \varphi_0 = \arccos 0.95 = 18.19^\circ$$

$$P_0 = \frac{250}{250} = 1.0, \quad Q_0 = P_0 \tan \varphi_0 = 0.329$$

$$\begin{aligned} E_{Q0} &= \sqrt{\left(U_0 + \frac{Q_0 x_{q\Sigma}}{U_0} \right)^2 + \left(\frac{P_0 x_{q\Sigma}}{U_0} \right)^2} \\ &= \sqrt{(1 + 0.329 \times 1.101)^2 + (1 \times 1.101)^2} \\ &= \sqrt{1.362^2 + 1.101^2} = 1.751 \end{aligned}$$

$$\delta_0 = \arctan \frac{1.101}{1.362} = 38.95^\circ$$

$$I_0 = \frac{\sqrt{P_0^2 + Q_0^2}}{U_0} = \sqrt{1 + 0.329^2} = 1.053$$

$$I_{d0} = I_0 \sin(\delta_0 + \varphi_0) = 1.053 \sin(38.95^\circ + 18.19^\circ) = 0.885$$

$$U_{d0} = U_0 \cos \delta_0 = 1 \times \cos 38.95^\circ = 0.778$$

$$\begin{aligned} E_{q0} &= E_{Q0} + I_{d0}(x_{d\Sigma} - x_{q\Sigma}) \\ &= 1.751 + 0.885(1.481 - 1.101) \\ &= 2.087 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E'_{q0} &= E_{Q0} - I_{d0}(x_{q\Sigma} - x'_{d\Sigma}) \\ &= 1.751 - 0.885(1.101 - 0.769) \\ &= 1.457 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E'_0 &= \sqrt{\left(U_0 + \frac{Q_0 x'_{d\Sigma}}{U_0}\right)^2 + \left(\frac{P_0 x'_{d\Sigma}}{U_0}\right)^2} \\ &= \sqrt{(1 + 0.329 \times 0.769)^2 + (1 \times 0.769)^2} \\ &= \sqrt{1.253^2 + 0.769^2} = 1.47 \end{aligned}$$

$$\delta'_0 = \arctan \frac{0.769}{1.253} = 31.54^\circ$$

(2) 用 E_q 表示的功率特性

$$\begin{aligned} P_{Eq} &= \frac{E_q U_0}{x_{d\Sigma}} \sin \delta + \frac{U_0^2}{2} \cdot \frac{x_d - x_q}{x_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} \sin 2\delta \\ &= \frac{E_q}{1.481} \sin \delta + \frac{1}{2} \cdot \frac{1.481 - 1.101}{1.481 \times 1.101} \sin 2\delta \\ &= 0.675 E_q \sin \delta + 0.117 \sin 2\delta \end{aligned}$$

如果发电机输出功率变化时, $E_q = E_{q0} = 2.087$ 保持不变, 则

$$P_{Eq} = 1.41 \sin \delta + 0.117 \sin 2\delta$$

$$\frac{dP_{Eq}}{d\delta} = 0, \quad \text{即} \quad 1.41 \cos \delta + 0.234 \cos 2\delta = 0$$

解得

$$\cos \delta = 0.158 \text{ 和 } -3.171$$

取正值得

$$\delta_{Eqm} = 80.91^\circ$$

功率最大值

$$P_{Eqm} = 1.41 \sin 80.91^\circ + 0.117 \sin (2 \times 80.91^\circ) = 1.429$$

(3) 用 E'_q 表示的功率特性

$$\begin{aligned} P_{E'_q} &= \frac{E'_q U_0}{x_{d\Sigma}} \sin \delta - \frac{U_0^2}{2} \cdot \frac{x_q - x'_d}{x_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} \sin 2\delta \\ &= \frac{E'_q}{0.769} \sin \delta - \frac{1}{2} \left(\frac{1.101 - 0.769}{0.769 \times 1.101} \right) \sin 2\delta \\ &= 1.3 E'_q \sin \delta - 0.196 \sin 2\delta \end{aligned}$$

如果发电机输出功率 P 增大时 $E_q = E_{q0}$ 保持不变,由式(5.34)可知,随着 P 增大(即 δ 增大), E'_q 将减小, E'_q 是变量。

如果 P 增大时, $E'_q = E_{q0} = 1.457$ 保持不变,则

$$P_{E'_q} = 1.89\sin\delta - 0.196\sin 2\delta$$

$$\frac{dP_{E'_q}}{d\delta} = 0, \quad \text{即} \quad 1.89\cos\delta - 2 \times 0.196\cos 2\delta = 0$$

可得

$$\delta_{E'_qm} = 101.05^\circ$$

功率最大值

$$P_{E'_{qm}} = 1.896\sin 101.05^\circ - 0.196\sin(2 \times 101.05^\circ) = 1.934$$

(4) 用 E' 表示的功率特性

$$P_{E'} = \frac{E' U_0}{x_{d\Sigma}} \sin\delta' = \frac{E'}{0.769} \sin\delta' = 1.3E' \sin\delta'$$

如果发电机 P 增大时 $E_q = E_{q0}$ 保持不变,则 E' 将随 P 增大而减小。

设 P 变化时 $E' = E_0 = 1.47$ 保持不变,则

$$P_{E'} = 1.91\sin\delta'$$

当 $\delta'_m = 90^\circ$ (这时 $\delta_m > 90^\circ$, 不详细计算) 时

$$P_{E'_m} = 1.91$$

由上述计算结果可知 $P_{E'_m}$ 与 $P_{E'_{qm}}$ 的差别很小。

4. 多机电力系统的功率方程式

对于复杂的电力系统,为了简化计算,常作一些工程上允许的简化:(1) 发电机用一个电势和相应的阻抗来表示(如 E' 和 x'_d 等);(2) 负荷用恒定阻抗表示。

如图 5.10 所示,有 m 台发电机和 n 个节点的多机系统。现将各发电机用

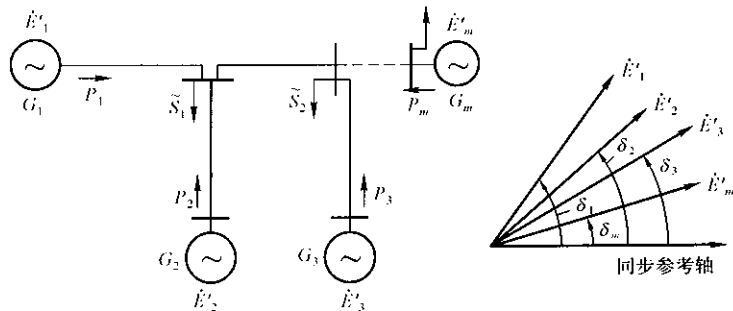


图 5.10 多机电力系统

$E'-x_d'$ 模型表示,各负荷用恒定阻抗 Z_L 代替。此时,各发电机母线节点和负荷节点的注入电流均为零,而仅电势节点有注入电流。

可以写出包括电势节点的网络节点电压方程:

$$\begin{matrix} & n & & m \\ & & & \\ n & \begin{bmatrix} & \vdots & \\ Y_{nn} & \vdots & Y_{nm} \\ & \vdots & \\ \dots & \dots & \dots \\ & \vdots & \\ Y_{mn} & \vdots & Y_{mm} \\ & \vdots & \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \vdots \\ \dot{U}_n \\ \vdots \\ \dot{E}_1 \\ \vdots \\ \dot{E}_m \end{bmatrix} & = & \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ \dot{I}_1 \\ \vdots \\ \dot{I}_m \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (5.38)$$

式中, $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dots, \dot{U}_n$ 为节点电压; $\dot{E}_1, \dot{E}_2, \dots, \dot{E}_m$ 为发电机电势; $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dots, \dot{I}_m$ 为发电机注入电流。

对式(5.38)消去所有的联络节点(1至 n),只剩下 m 个电势节点,可以求得发电机电势节点之间的自导纳和互导纳。对剩余部分重新编号,得到节点电压方程:

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1m} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Y_{m1} & Y_{m2} & \dots & Y_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{E}_1 \\ \dot{E}_2 \\ \vdots \\ \dot{E}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_m \end{bmatrix} \quad (5.39)$$

式中, $Y_{11}, Y_{22}, \dots, Y_{mm}$ 为各电势节点的自导纳; $Y_{12}, Y_{21}, \dots, Y_{ij}$ 为各电势节点间的互导纳。

令

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 &= E_1 e^{j\delta_1}, \dot{E}_2 = E_2 e^{j\delta_2}, \dots, \dot{E}_m = E_m e^{j\delta_m} \\ Y_{11} &= G_{11} + jB_{11}, Y_{mm} = G_{mm} + jB_{mm}, Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \end{aligned}$$

任一发电机的电磁功率为(为了简化公式,下面用 E 代替 E')

$$\begin{aligned} P_i &= \operatorname{Re}(\dot{E}_i \dot{I}_i^*) = \operatorname{Re}(\dot{E}_i \sum_{j=1}^m \dot{E}_j^* Y_{ij}^*) \\ &= E_i \sum_{j=1}^m E_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \end{aligned}$$

$$= E_i^2 G_{ii} + E_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m E_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij})$$

或

$$P_i = E_i^2 G_{ii} + E_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m E_j |Y_{ij}| \sin(\delta_{ij} + \beta_{ij}) \quad (5.40)$$

式中, δ_{ij} 为 \dot{E}_i 和 \dot{E}_j 相量间的夹角, 即 $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$, δ_i 和 δ_j 为 \dot{E}_i 和 \dot{E}_j 相对于某一公共参考轴的夹角; β_{ij} 为导纳角的余角, 即 $90^\circ - \arctan \frac{B_{ij}}{G_{ij}}$ 或为 $\arctan \frac{G_{ij}}{B_{ij}}$ 。

式 (5.40) 表明, 多机系统中任意一台发电机的电磁功率是各发电机电势 E' 及该电机电势相量与其他电机电势相量相角差的函数。

对于两台发电机的情况, 可分别写出两台机的功率计算式:

$$\begin{aligned} P_{E1} &= E_1^2 G_{11} + E_1 E_2 (G_{12} \cos \delta_{12} + B_{12} \sin \delta_{12}) \\ &= E_1^2 G_{11} + E_1 E_2 |Y_{12}| \sin(\delta_{12} + \beta_{12}) \end{aligned} \quad (5.41)$$

$$\begin{aligned} P_{E2} &= E_2^2 G_{22} + E_1 E_2 (G_{21} \cos \delta_{21} + B_{21} \sin \delta_{21}) \\ &= E_2^2 G_{22} + E_1 E_2 (G_{12} \cos \delta_{12} - B_{12} \sin \delta_{12}) \\ &= E_2^2 G_{22} - E_1 E_2 |Y_{12}| \sin(\delta_{12} - \beta_{12}) \end{aligned} \quad (5.42)$$

由式 (5.41) 和 (5.42) 可作出 E_1 和 E_2 恒定时 $P_E \sim \delta_{12}$ 的曲线, 如图 5.11(b) 所示。

5. 串联电阻、并联电阻和并联电抗对功率特性的影响

(1) 串联电阻的影响

计及线路和变压器电阻时的单机—无穷大系统的等值电路如图 5.12 所示。假定发电机为隐极机。发电机电势为 \dot{E}_q , 无穷大功率系统的母线电压为 \dot{U} , \dot{E}_q 与 \dot{U} 间夹角为 δ 。节点导纳矩阵各元素为

$$\begin{aligned} Y_{11} &= Y_{22} = -Y_{12} = \frac{1}{Z} = \frac{1}{R_\Sigma + jx_{d\Sigma}} = \frac{R_\Sigma - jx_{d\Sigma}}{R_\Sigma^2 + x_{d\Sigma}^2} \\ G_{11} &= G_{22} = \frac{R_\Sigma}{R_\Sigma^2 + x_{d\Sigma}^2}, \quad B_{11} = B_{22} = \frac{-x_{d\Sigma}}{R_\Sigma^2 + x_{d\Sigma}^2} \\ \beta_{12} &= \arctan \frac{G_{11}}{B_{11}} = -\arctan \frac{R_\Sigma}{x_{d\Sigma}} \end{aligned}$$

这里 β_{12} 为负值, 以下令 $\beta = -\beta_{12} = \arctan(R_\Sigma/x_{d\Sigma})$ 。

由式 (5.41) 可知发电机电势处送出的功率为

$$P_{Eq} = E_q^2 \frac{R_\Sigma}{R_\Sigma^2 + x_{d\Sigma}^2} + \frac{E_q U}{\sqrt{R_\Sigma^2 + x_{d\Sigma}^2}} \sin(\delta - \beta) \quad (5.43)$$

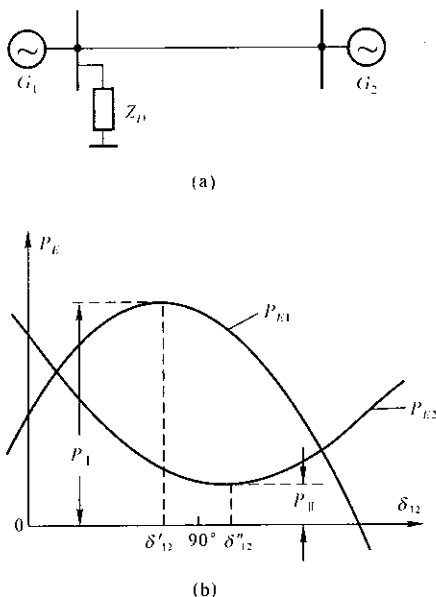


图 5.11 两机系统的功角特性

图中: $\delta'_{12} = 90^\circ - \beta_{12}$; $\delta''_{12} = 90^\circ + \beta_{12}$;

$$P_I = E_1^2 G_{11} + E_1 E_2 |Y_{12}|; P_{II} = E_2^2 G_{22} - E_1 E_2 |Y_{12}|$$

发电机送入无穷大系统的功率,即为式(5.42)的负值。

$$P_U = -U^2 \frac{R_S}{R_S^2 + x_{dS}^2} + \frac{E_q U}{\sqrt{R_S^2 + x_{dS}^2}} \sin(\delta + \beta) \quad (5.44)$$

E_q 恒定时功率特性曲线如图 5.12 所示。可以看到,由于串联电阻的存在,发电机功率特性与不考虑电阻时,向上移动了 $E_q^2 \frac{R_S}{R_S^2 + x_{dS}^2}$, 向右移动了 β 角度。送入系统的功率向下移动了 $U^2 \frac{R_S}{R_S^2 + x_{dS}^2}$, 向左移动了 β 角度。 P_E 与 P_U 之差,即为串联电阻上的有功功率损耗。

发电机功率最大值,由 $\frac{dP_E}{d\delta} = 0$ 条件确定。相应的功率角为

$$\delta_m = 90^\circ + \arctan \frac{R_S}{x_{dS}}$$

功率最大值为

$$P_{Em} = \frac{E_q^2 R_S}{R_S^2 + x_{dS}^2} + \frac{E_q U}{\sqrt{R_S^2 + x_{dS}^2}}$$

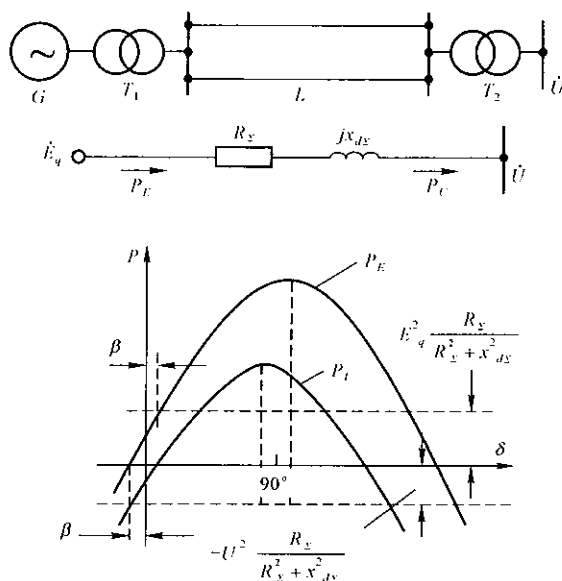


图 5.12 串联电阻对功率特性的影响

它比 $\frac{E_q U}{x_{dS}}$ 大, 因为一般 110kV 及以上高压电网中 $R_s \ll x_{dS}$, 所以

$$\frac{E_q U}{\sqrt{R_s^2 + x_{dS}^2}} \approx \frac{E_q U}{x_{dS}}, \text{ 而增加了 } \frac{E_q^2 R_s}{R_s^2 + x_{dS}^2} \text{ 项, 使功率最大值增大了, 且 } \delta_m > 90^\circ.$$

(2) 并联电阻的影响

接入并联电阻的情形如图 5.13 所示。这时有一并联电阻 R_k 接在发电机的高压母线上, 所以可将系统的串联电抗 x 分成两部分: x_1 和 x_2 。可以求出自导纳和互导纳。

$$Y_{11} = \left[\frac{R_k x_2^2}{R_k^2 + x_2^2} + j \frac{R_k^2 x_2}{R_k^2 + x_2^2} + j x_1 \right]^{-1}$$

$$Y_{22} = \left[\frac{R_k x_1^2}{R_k^2 + x_1^2} + j \frac{R_k^2 x_1}{R_k^2 + x_1^2} + j x_2 \right]^{-1}$$

$$Y_{12} = \frac{\frac{x_1 x_2}{R_k} + j(x_1 + x_2)}{\left(\frac{x_1 x_2}{R_k} \right)^2 + (x_1 + x_2)^2}$$

$$\beta_{12} = \arctan \frac{x_1 x_2}{R_k (x_1 + x_2)} > 0$$

发电机电势处送出的功率为

$$P_E = E_q^2 G_{11} + E_q U |Y_{12}| \sin(\delta + \beta_{12}) \quad (5.45)$$

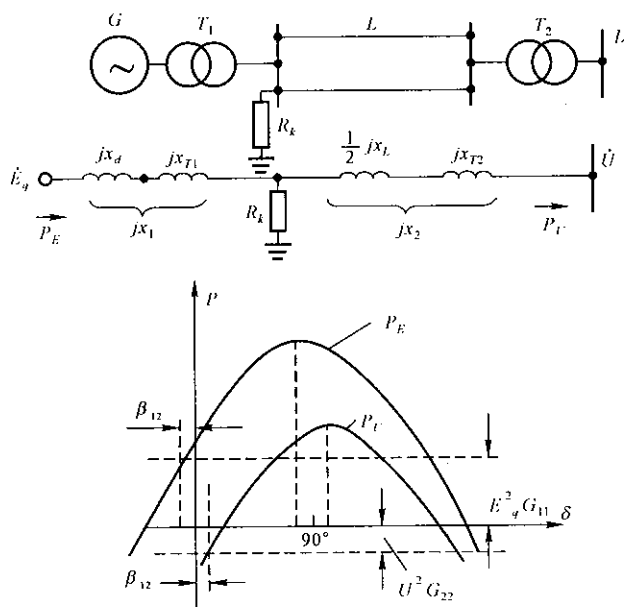


图 5.13 并联电阻对功率特性的影响

送入无穷大系统的功率为

$$P_U = -U^2 G_{22} + E_q U |Y_{12}| \sin(\delta - \beta_{12}) \quad (5.46)$$

可见发电机功率向上移动了 $E_q^2 G_{11}$, 向左移动了一个角度 β_{12} 。而送入系统的功率则向下移动了 $U^2 G_{22}$, 向右移动了 β_{12} 角度。 P_E 与 P_U 之差为并联电阻上所消耗的功率。

接入并联电阻后发电机的功率最大值(设 E_q 恒定)为

$$P_{E_{qm}} = E_q^2 G_{11} + E_q U |Y_{12}|$$

对应的角度为 $\delta_m = 90^\circ - \beta_{12}$, 因为 $\beta_{12} > 0$, 所以 $\delta_m < 90^\circ$ 。

(3) 并联电抗的影响

如图 5.14 所示, 接入电抗 x_k 后, 电势 E_q 与 U 之间转移电抗为

$$x_{12} = x_1 + x_2 + \frac{x_1 x_2}{x_k} = x + \frac{x_1 x_2}{x_k}$$

发电机的功率特性为

$$P_{E_q} = \frac{E_q U}{x_{12}} \sin \delta = P_U \quad (5.47)$$

E_q 恒定时功率最大值为

$$P_{E_{qm}} = \frac{E_q U}{x_{12}}$$

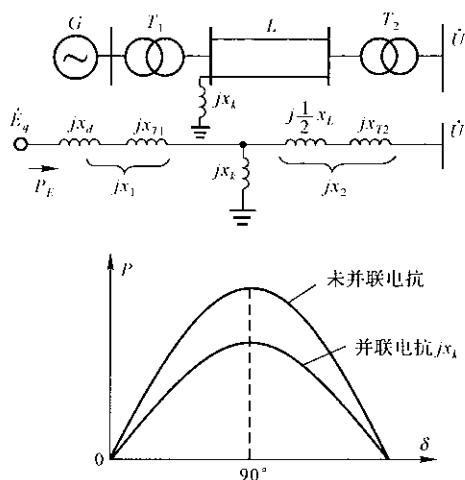


图 5.14 并联电抗对功率特性的影响

与未接电抗器时功率极限 $P_m = \frac{E_q U}{x}$ 相比, 由于 $x_{12} > x$, 所以, 在 E_q 和 U 相同时, 接入并联电抗器后, 将使功率最大值减小, 减小的程度与转移电抗增大的程度成比例。 x_k 越小, $\frac{x_1 x_2}{x_k}$ 越大, x_{12} 越大。极限情况为 $x_k = 0, x_{12} = \infty$, 发电机输出的功率为零。

【例 5.2】 如图 5.9 所示的电力系统, 设发电机为隐极机, $x_d = 1.7$, 其他参数同例 5.1, 试计算和比较: (1) 仅考虑电抗; (2) 计及输电线路电阻 ($0.07\Omega/\text{km}$); (3) 不计输电系统电阻, 送端高压母线并接电阻 1000Ω ; (4) 同 (3), 但接入并联电抗 500Ω 等 4 种情况发电机的功率特性。

【解】 按例 5.1 条件计算参数:

$$x_{d\Sigma} = x_q = 0.95 \times 1.7 = 1.615$$

$$R_L = 0.293 \times \frac{0.07}{0.41} = 0.05$$

$$R_k = 1000 \times \frac{121^2}{220^2} \times \frac{250}{115^2} = 5.718$$

$$x_k = 5.718 \times \frac{500}{1000} = 2.859$$

(1) 不考虑电阻 R_L 时

$$x_d = 1.615 + 0.13 + 0.293 + 0.108 = 2.146$$

$$\begin{aligned} E_{q0} &= \sqrt{\left(U_0 + \frac{Q_0 x_{d\Sigma}}{U_0} \right)^2 + \left(\frac{P_0 x_{d\Sigma}}{U_0} \right)^2} \\ &= \sqrt{(1.706)^2 + (2.146)^2} = 2.742 \end{aligned}$$

$$\delta_0 = \arctan \frac{2.146}{1.706} = 51.52^\circ$$

$$P_{Eq} = \frac{E_q U_0}{x_{d\Sigma}} \sin \delta = \frac{E_q}{2.146} \sin \delta = 0.466 E_q \sin \delta$$

$E_q = E_{q0}$ 不变时,最大功率为

$$P_{Eqm} = 1.278, \quad \delta_m = 90^\circ$$

(2) 计及线路电阻 R_L 时

$$x_{d\Sigma} = 2.146, R = 0.05, \beta_{12} = -\arctan \frac{R}{x_{d\Sigma}} = -1.33^\circ$$

$$G_{11} = \frac{0.05}{0.05^2 + 2.146^2} = 0.011$$

$$B_{11} = \frac{-2.146}{0.05^2 + 2.146^2} = -0.466$$

$$|Y_{11}| = |Y_{12}| = 0.466$$

$$\begin{aligned} E_{q0} &= \sqrt{\left(U_0 + \frac{P_0 R + Q_0 x_{d\Sigma}}{U_0} \right)^2 + \left(\frac{P_0 x_{d\Sigma} - Q_0 R}{U_0} \right)^2} \\ &= \sqrt{(1.756)^2 + (2.13)^2} = 2.76 \end{aligned}$$

$$\delta_0 = \arctan \frac{2.13}{1.756} = 50.5^\circ$$

$$\begin{aligned} P_{Eq} &= E_q^2 \times 0.011 + E_q \times 1.0 \times 0.466 \sin(\delta - 1.33^\circ) \\ &= 0.011 E_q^2 + 0.466 E_q \sin(\delta - 1.33^\circ) \end{aligned}$$

$E_q = E_{q0}$ 不变时

$$P_{Eqm} = 1.37, \quad \delta_m = 91.33^\circ$$

(3) 接入并联电阻 R_k

接入并联电阻后的等值电路如图 5.13 所示。

$$x_1 = x_d + x_{T1} = 1.615 + 0.13 = 1.745$$

$$x_2 = 0.5x_L + x_{T2} = 0.293 + 0.108 = 0.401$$

$$\begin{aligned} Z_1 &= jx_1 + R_k // jx_2 = j1.745 + \frac{5.718 \times j0.401}{5.718 + j0.401} \\ &= 0.028 + j2.144 \end{aligned}$$

$$G_{11} = \operatorname{Re}\left(\frac{1}{Z_1}\right) = 0.006$$

$$\begin{aligned} Z_{12} &= jx_1 + jx_2 + \frac{jx_1 jx_2}{R_k} \\ &= j1.745 + j0.401 + \frac{j1.745 \times j0.401}{5.718} \\ &= -0.122 + j2.146 \end{aligned}$$

$$|Y_{12}| = \left| \frac{1}{Z_{12}} \right| = 0.465, \beta_{12} = \arctan \frac{0.122}{2.146} = 3.25^\circ$$

正常潮流计算:

电阻接入点的电压

$$\begin{aligned} U_k &= \sqrt{\left(U_0 + \frac{Q_0 x_2}{U_0} \right)^2 + \left(\frac{P_0 x_2}{U_0} \right)^2} \\ &= \sqrt{(1 + 0.329 \times 0.401)^2 + (0.401)^2} = 1.2 \end{aligned}$$

$$\delta_{k0} = \arctan \frac{0.401}{1 + 0.329 \times 0.401} = 19.5^\circ$$

并联电阻消耗功率

$$P_k = \frac{U_k^2}{R_k} = \frac{1.2^2}{5.718} = 0.252$$

变压器高压侧输出功率

$$P_1 = P_0 + P_k = 1.252$$

$$\begin{aligned} Q_1 &= Q_0 + \frac{P_0^2 + Q_0^2}{U_0^2} \cdot x_2 = 0.329 + \frac{1 + 0.329^2}{1} \times 0.401 \\ &= 0.773 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{q0} &= \sqrt{\left(U_k + \frac{Q_1 x_1}{U_k} \right)^2 + \left(\frac{P_1 x_1}{U_k} \right)^2} \\ &= \sqrt{\left(1.2 + \frac{0.773 \times 1.745}{1.2} \right)^2 + \left(\frac{1.252 \times 1.745}{1.2} \right)^2} \\ &= \sqrt{(2.324)^2 + 1.821^2} = 2.952 \end{aligned}$$

$$\delta_0 = \delta_{k0} + \arctan \frac{1.821}{2.324} = 19.5^\circ + 38.08^\circ = 57.58^\circ$$

发电机输出功率特性

$$\begin{aligned} P_{Eq} &= E_q^2 G_{11} + E_q U |Y_{12}| \sin(\delta + \beta_{12}) \\ &= 0.006 E_q^2 + 0.465 E_q \sin(\delta + 3.25^\circ) \end{aligned}$$

$E_q = E_{q0}$ 不变时

$$P_m = 0.0523 + 1.373 = 1.425$$

$$\delta_m = 90^\circ - 3.25^\circ = 86.75^\circ$$

(4) 接入并联电抗时

根据(3)的计算结果,在并联电抗上消耗的无功功率

$$Q_k = \frac{U_k^2}{x_k} = \frac{1.2^2}{2.859} = 0.504$$

$$Q_1 = 0.773 + 0.504 = 1.277$$

$$E_{q0} = \sqrt{\left(1.2 + \frac{1.277 \times 1.745}{1.2}\right)^2 + \left(\frac{1 \times 1.745}{1.2}\right)^2} = 3.385$$

$$x_{12} = x_1 + x_2 + \frac{x_1 x_2}{x_k} = 2.146 + 0.245 = 2.391$$

$$P_{Eq} = \frac{E_q U}{x_{12}} \sin \delta = 0.418 E_q \sin \delta$$

$$E_q = E_{q0} \text{ 不变时}$$

$$P_m = 1.416, \quad \delta_m = 90^\circ$$

此时功率最大值要比不接并联电抗时大,这是因为为了保持输出功率 P_m 、 Q_0 不变,必须提高电势 E_q ,它使 P_m 提高的影响超过了并联电抗使 P_m 减少的缘故。

如果保持 $E_{q0} = 2.742$ 不变,则功率最大值

$$P_m = \frac{2.742}{2.391} = 1.147$$

下表列出了在 $E_{q0} = 2.742$ 不变条件下,各种情况的功率最大值及其对应的角度 δ_m 。

	仅考虑输电线电抗	串联电阻	并联电阻	并联电抗
P_m	1.278	1.37	1.425	1.147
δ_m	90°	91.33°	86.75°	90°

5.2.3 原动机的机械转矩和机械功率

发电机的调速器是根据转子转速或角速度的变化来调节原动机的进汽量或进水量,以改变输入的机械功率。一般装有调速器的发电机的机械功率的增量的标么值与角速度增量标么值的静态关系为

$$\Delta P_T = - \frac{\Delta \omega}{R} \quad (5.48)$$

式中, R 称为调差系数,一般取 $2\% \sim 5\%$,即当机械功率由空载增至满载时,发电机转速将降低 $2\% \sim 5\%$ 。

暂态过程中的原动机的机械功率的变化受原动机的特性及调速器类型的影响。

电力系统稳定计算中,对原动机特性的模拟一般采用比较简化的方法。其中水轮机的动态特性,通常用简化的公式来模拟,而汽轮机动态特性的模型则只考虑蒸汽容积的影响。

1. 汽轮机蒸汽容积的影响

由于汽轮机的调节气门和喷嘴之间有一定的空间(蒸汽容积),当调节气

门的开度变化时,这个空间的蒸汽压力不能立即变化,因此,汽轮机输出的机械功率也不能立即变化。这种现象就是蒸汽容积的影响。在大容量汽轮机中,蒸汽容积对调节过程的影响相当显著,必须考虑。

蒸汽容积影响在数学上可用一阶惯性环节来模拟。用传递函数形式表示的公式如下:

$$P_r = \frac{1}{T_{CH}p + 1} \mu \quad (5.49)$$

式中, T_{CH} 为蒸汽容积时间常数; μ 为气门开度,稳态时它与 P_r 的标么值相等。

对于中间再热式汽轮机,其中间再热系统具有更大的蒸汽容积;中、低压缸输出功率的变化将受到这部分蒸汽容积的影响。图 5.15 表示了中间再热式汽轮机蒸汽容积的传递函数模型框图。

图 5.15 中 α 和 $1 - \alpha$ 分别为高压缸及中、低压缸功率所占汽轮机总功率的比例。 T_{CH} 和 T_{RH} 分别为高压缸和中间过热系统蒸汽容积的时间常数。一般 $\alpha = 0.2 \sim 0.3$, $T_{CH} = 0.1s \sim 0.4s$, $T_{RH} = 4s \sim 11s$ 。

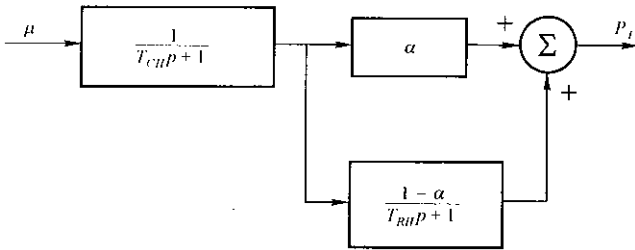


图 5.15 中间再热式汽轮机蒸汽容积模拟框图

2. 水轮机的水锤效应

在稳态运行时,水轮机引水管道中水的流速一定,沿管道各点的压力也一定。但当导水叶开度变化时,由于水流的惯性,沿引水管道各点的水压将发生变化。随着水压的改变,输入水轮机的功率也相应改变。当导水叶关小(减小机械功率)时,由于水压提高,输入水轮机的瞬时功率不是减少而是增大;反之,当需要增加机械功率输出,而把导水叶突然开大时,由于水压减小,瞬时功率不是增大而是减小,这种现象称为水锤效应。图 5.16 说明了这种现象。

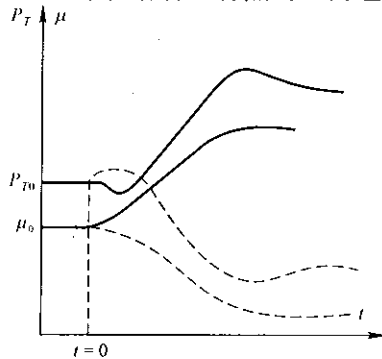


图 5.16 水锤效应

计及水锤效应后,水轮机及其引水系统的动态特性可用如下关系式表示:

$$P_T = \frac{1 - T_v p}{1 + 0.5 T_v p} \mu \quad (5.50)$$

式中, T_v 为水流时间常数, 约在 0.5s ~ 5s 之间; μ 为导水叶开度。

5.2.4 自动调节系统的数学模型

同步发电机组的自动调节系统包括: 自动调节原动机功率的调速器和发电机的自动励磁调节器两部分。

1. 调速器的数学模型

水电和火电机组的原动机配置了不同类型的调速器。从电力系统计算角度出发, 可分为水轮机调速器和汽轮机调速器两种基本类型, 而汽轮机调速器又可分为液压调速器和功频电液调速器两种。下面仅以水轮机组采用的离心飞摆式机械调速器为例说明其动作原理及其数学模拟方法。

离心飞摆式机械调速器的原理结构如图 5.17 所示。

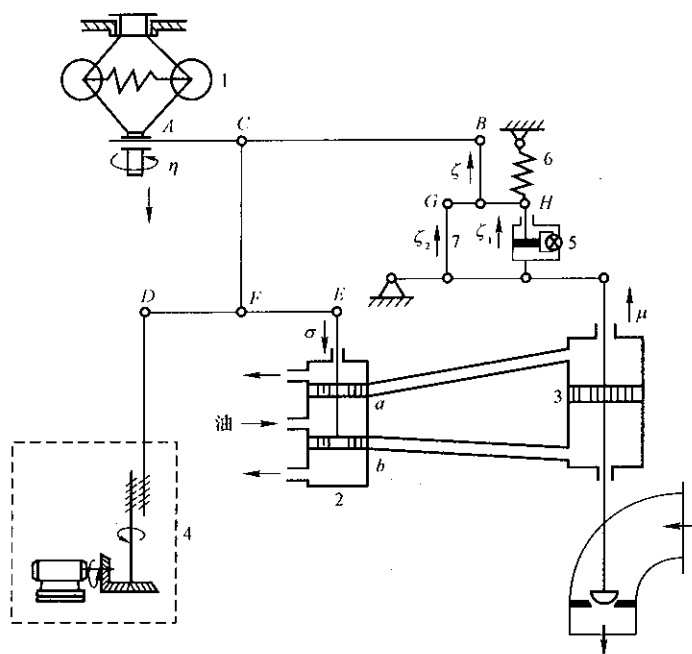


图 5.17 离心飞摆式机械调速器的原理结构

(1) 动作原理

当外界负荷增加时,由于 $P_E > P_T$,水轮机转速下降,测速部件1的离心飞摆所受到的离心力减小,飞摆套筒A点下移,同时带动C点下移。如调频器4不动作,则D点固定不动,C点的运动使E点和配压阀2的活塞相应下移,压力油将通过b小孔进入接力器3的下部推动活塞上移,使导水叶开度增大,增加进水量,从而使机械功率增加,转速回升。缓冲器5(及弹簧6)和杠杆7的作用分别为产生与接力器活塞移动速度有关的软负反馈和正比于移动量大小的硬负反馈,以减缓调节速度,改善调节品质。硬反馈的另一作用,是使调节过程结束、配压阀2的活塞回复到将a和b两小孔关闭的位置时,B点略有升高,因而A点要比原来位置低一些,实现频率的有差调节,即负荷增加时转速略有降低。

为了使机组的转速恢复到额定转速,需用调频器使D点上移,把导水叶开度再开大,最后可使A、E两点恢复到原来的位置。

(2) 运动过程的方程式和框图

离心飞摆方程式 不计飞摆质量和阻尼作用时,飞摆套筒相对位移标么值 η (以最大位移为基准值) 与转速偏差 $\omega_0 - \omega$ 的关系为

$$\eta = K_\delta(\omega_0 - \omega) \quad (5.51)$$

式中, $K_\delta = \frac{1}{\delta}$ 为离心飞摆测速部件的放大倍数,其中 δ 为测速灵敏度。

配压阀活塞方程式 调频器不动作时,同时又忽略活塞惯性,配压阀活塞的相对位移 σ 与 η 及负反馈 ζ 之间的关系如下

$$\sigma = \eta - \zeta \quad (5.52)$$

接力器活塞方程式 打开配压阀的充油口后,接力器的活塞开始位移,在暂态过程中油口的开度(即配压阀的相对行程 σ) 与活塞位移量之间的关系可用一积分环节来表示:

$$\mu = \frac{1}{T_i p} \sigma + \mu_0 \quad (5.53)$$

式中, T_i 为接力器时间常数; $\mu = \mu_0 + \Delta\mu$ 为接力器活塞相对行程,也就是导水叶的相对开度, μ_0 为初始值。

T_i 反映了导水叶从满载开度关小到空载开度所需的时间,一般 $T_i = 4s \sim 7s$,如果 T_i 太小,即过分迅速的关小导水叶开度,水锤效应可能使压力导管破裂。

反馈方程式 反馈量 ζ 为软反馈量 ζ_1 和硬反馈量 ζ_2 之和。

软反馈方程式如下

$$\zeta_1 = \frac{K_\beta T_i p}{T_i p + 1} \mu \quad (5.54)$$

式中, T_i 为软反馈时间常数; $K_\beta = \frac{\beta}{\delta}$ 为软反馈放大倍数, β 为软反馈系数。

硬反馈量与导水叶开度 μ 成正比:

$$\zeta_2 = K_i \mu \quad (5.55)$$

式中, $K_i = \frac{\delta_i}{\delta}$ 为硬反馈放大倍数; δ_i 为调差系数。

总反馈量

$$\zeta = \zeta_1 + \zeta_2$$

水轮机离心飞摆机械调速系统的传递函数框图如图 5.18 所示。由于调速器存在干摩擦和机械间隙等原因,当转速偏差大小时,调速器将不起反应,即调速器存在一定的失灵区。此外,配压阀的行程 σ 和导水叶的开度 μ 都有一定限制。因此,框图中加入了失灵区 (εK_δ),配压阀活塞位移和接力器活塞开度限制等非线性环节。

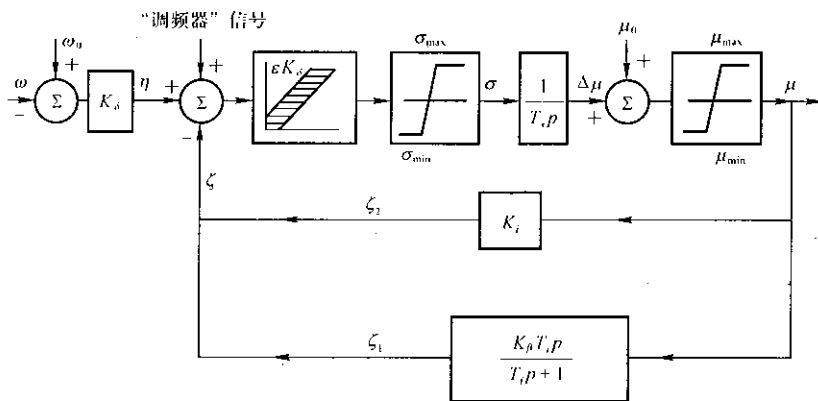


图 5.18 离心飞摆机械调速系统框图

2. 自动励磁调节系统

在正常运行时,当系统负荷的波动而引起发电机端电压波动时,同步发电机的自动励磁调节装置能自动地调节发电机的励磁电压 u_f ,从而改变励磁电流 i_f ,使空载电势 E_0 作相应的变化,以便维持发电机的端电压在允许的范围内。当发电机端部附近突然发生短路,端电压有较大幅度下降时,自动调节装置能迅速地增强励磁电压至极限值,以尽快恢复系统的电压水平,提高系统运行的稳定性。

同步发电机的自动调节励磁系统由主励磁系统和励磁调节器两个基本部分组成。

在我国电力系统中,主励磁系统可归纳为两类:电机励磁和半导体整流励

绕组内部和励磁机励磁系统内部两个电磁暂态方程式。下面将以图 5.21 所示的它励直流发电机的励磁系统为例来进行说明。

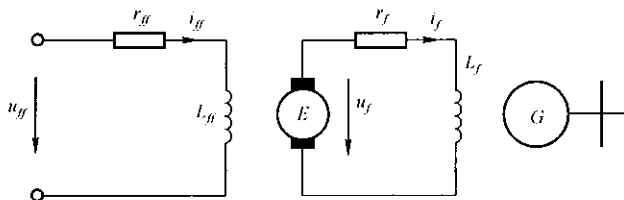


图 5.21 它励直流发电机励磁系统

① 发电机励磁绕组的电压平衡方程式

$$u_f = r_f i_f + \frac{d\psi_f}{dt} \quad (5.56)$$

用 x_{ad}/r_f 乘上式等号两边得

$$\frac{x_{ad}}{r_f} u_f = x_{ad} i_f + \frac{x_f}{r_f} \frac{d\left(\frac{x_{ad}}{x_f} \psi_f\right)}{dt} \quad (5.57)$$

改写上式,可得

$$E_{qe} = E_q + T'_{d0} \frac{dE'_q}{dt} \quad (5.58)$$

式中, $E_{qe} = \frac{u_f}{r_f} x_{ad}$ 为由励磁电流的强制分量 u_f/r_f 产生的强制空载电势,与 u_f 成正比; $E_q = i_f x_{ad}$ 为发电机空载电势; $T'_{d0} = T_f = \frac{x_f}{r_f}$ 为定子绕组开路时,励磁绕组本身的时间常数; $E'_q = \frac{x_{ad}}{x_f} \psi_f$ 为暂态电势。

式(5.58)为用发电机定子电势表示的发电机励磁绕组暂态方程式。

在任何时刻 E_q 和 E'_q 的关系如下

$$E_q = E'_q + (x_d - x'_d) I_d \quad (5.59)$$

所以,式(5.58)可以改写为

$$T'_{d0} \frac{dE'_q}{dt} = E_{qe} - [E'_q + I_d(x_d - x'_d)] \quad (5.60)$$

式(5.60)是通常计算时采用的电势变化方程式,可见发电机电势 E'_q 的变化与 E_{qe} (正比于 u_f) 和定子电流 I_d 有关。

式(5.60)用传递函数方式表示,可画出图 5.22 所示的框图。

当计及发电机饱和效应时的电势变化方程式为

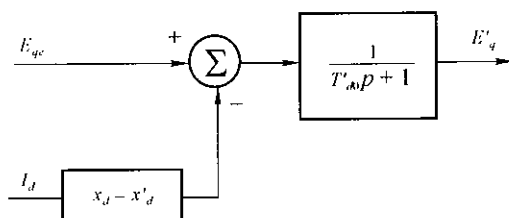


图 5.22 计算暂态电势的框图

$$\begin{aligned} T'_{d0} \frac{dE'_q}{dt} &= E_{qe} - [K_F E'_q + I_d(x_d - x'_d)] \\ &= E_{qe} - [E'_q + I_d(x_d - x'_d) + (K_F - 1)E'_q] \end{aligned} \quad (5.61)$$

式中, $K_F = I_f/I_{f0}$, 为同步发电机的饱和修正系数。 I_{f0} 为不计饱和时产生空载电势 E_q 所需的励磁电流, I_f 为计及饱和时产生同样的 E_q 所需的励磁电流。 K_f 是 I_f 的函数。

根据式(5.61)得出的传递函数框图如图 5.23 所示。

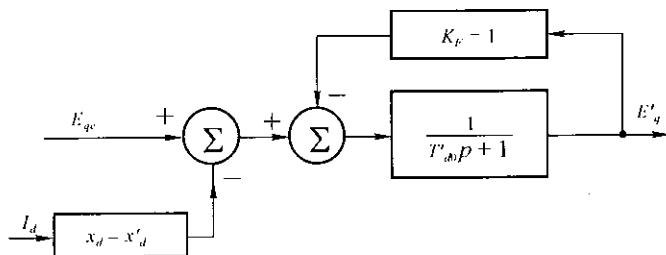


图 5.23 考虑饱和影响时计算暂态电势的框图

② 励磁机励磁绕组的电压平衡方程式

$$u_{ff} = r_{ff}i_{ff} + \frac{d\phi_{ff}}{dt} \quad (5.62)$$

不计转速变化时, 励磁机的输出电压 u_f 与励磁机励磁绕组磁链 ϕ_{ff} 成正比, 即

$$u_f = K\phi_{ff} \quad (5.63)$$

不计饱和时磁链 ϕ_{ff} 与励磁电流 i_{ff} 成线性关系, 即

$$\phi_{ff} = L_{ff}i_{ff} \quad (5.64)$$

故不计饱和时

$$u_f = KL_{ff}i_{ff} = \beta_f i_{ff} \quad (5.65)$$

式(5.65)的关系可用如图 5.24 所示的直线表示, 图中 β_f 为直线的斜率。计及饱和时

$$u_f = \beta'_{ff} i_{ff} = \frac{\beta_f}{K_{ff}} i_{ff} \quad (5.66)$$

式中, $K_{ff} = i_{ff}/i_{ff0}$ 称为饱和修正系数。 i_{ff0} 为不计饱和时产生 u_f 所需的励磁电流, i_{ff} 为计及饱和时产生同样的 u_f 所需的励磁电流。 K_{ff} 随饱和程度不同而变化。

$$\text{将式(5.66)的关系 } i_{ff} = \frac{K_{ff} u_f}{\beta_f}$$

及式(5.63) $\phi_{ff} = \frac{u_f}{K} = \frac{u_f \cdot L_{ff}}{\beta_f}$ 代入式(5.62)

可得

$$u_{ff} = r_{ff} \frac{u_f K_{ff}}{\beta_f} + \frac{L_{ff}}{\beta_f} \frac{du_f}{dt} \quad (5.67)$$

再以 r_{ff} 除等式两边得

$$\frac{u_{ff}}{r_{ff}} = \frac{1}{\beta_f} \left(K_{ff} u_f + T_{ff} \frac{du_f}{dt} \right) \quad (5.68)$$

式中, $T_{ff} = L_{ff}/r_{ff}$ 为励磁机励磁绕组的时间常数。

取 u_f 的基准值为 u_{fB} , $i_{ffB} = \frac{u_{fB}}{\beta_f}$, 它励绕组的电压基准值为 $u_{ffB} = r_{ff} i_{ffB} = \frac{r_{ff}}{\beta_f} u_{fB}$, 则用标么值表示的式(5.68)可以写成

$$T_{ff} \frac{du_{f*}}{dt} = u_{ff*} - K_{ff} u_{f*} \quad (5.69)$$

式(5.69)为励磁电压 u_f 的变化方程式, 略去下标“*”, 可改写为

$$T_{ff} \frac{du_f}{dt} = u_{ff} - u_f - (K_{ff} - 1)u_f \quad (5.70)$$

根据上式得出的传递函数框图如图 5.25 所示。

(2) 励磁调节器的数学模型

现以我国电力系统同步发电机采用的励磁调节器之一——可控硅励磁调节器为例讨论它的数学模型。

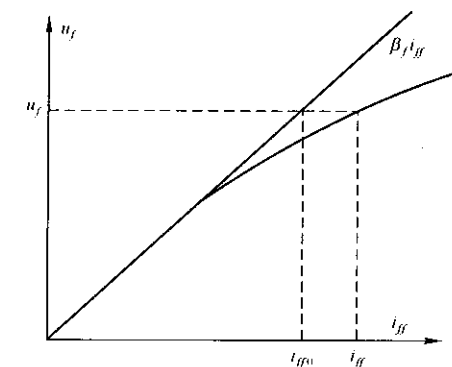


图 5.24 励磁机的负载特性曲线

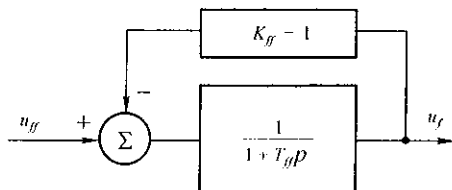


图 5.25 它励直流发电机传递函数框图

图 5.26 所示为可控硅励磁调节器原理框图, 而图 5.27 则表示它的传递

函数框图。

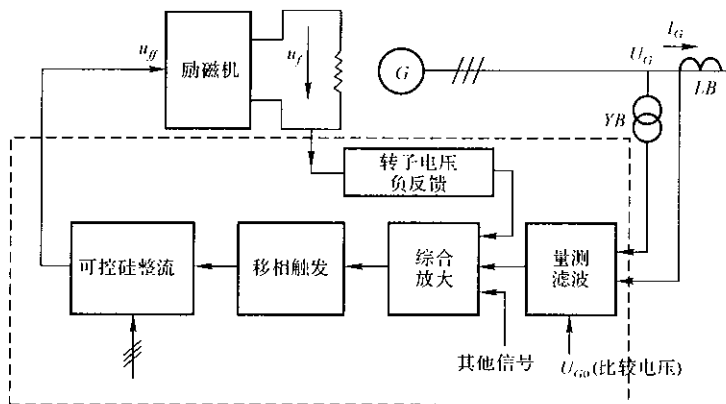


图 5.26 可控硅励磁调节器原理框图

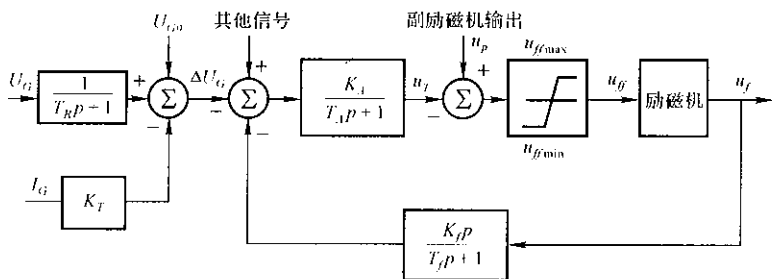


图 5.27 可控硅励磁调节器的传递函数框图

在图 5.26 中虚线框中为励磁调节器，它由量测滤波、综合放大、移相触发、可控硅整流器及转子电压软反馈等环节构成。其简单作用原理如下：由于系统负荷的变化引起发电机端电压 U_G 发生变化（升高或降低）时，量测单元将输出一个电压偏差量（正的或负的） $\Delta U_G = U_G - U_{G0}$ ，该信号经过放大后作用于移相触发环节，产生不同相位的触发脉冲，以控制可控硅整流器的导通角，使励磁机的励磁电压 u_{ff} 发生变化，从而达到调节端电压的目的。

量测滤波环节是一个惯性环节，其传递函数可用下式表示：

$$G_R(p) = \frac{1}{T_R p + 1} \quad (5.71)$$

式中， T_R 为时间常数，其数值主要取决于滤波回路参数。

综合放大、移相触发及可控硅整流环节可合并成一个惯性环节来表示，其传递函数为

$$G_A(p) = \frac{K_A}{T_A p + 1} \quad (5.72)$$

式中, K_A 和 T_A 分别为放大系数和时间常数。

由于可控硅整流器的输出电压和电流有一定范围, 因此需用一个限幅环节来限制调节器的输出电压, 其中 $U_{ff\max}$ 与发电机强行励磁的顶值电压相对应, $U_{ff\min}$ 为最小输出电压。

转子电压 u_f 的软反馈的作用是为了提高调节系统的稳定性, 可用一个惯性-微分环节来模拟, 稳态运行时, 其输出为零。

其他信号可以是发电机转速、转子的相对角度及其导数等信号, 以提高电力系统的运行稳定性。

考虑到量测和放大环节时间常数非常小(几十 ms 级), 当只按电压的偏差调节时, 图 5.27 所示的框图可以适当简化, 如图 5.28 所示。

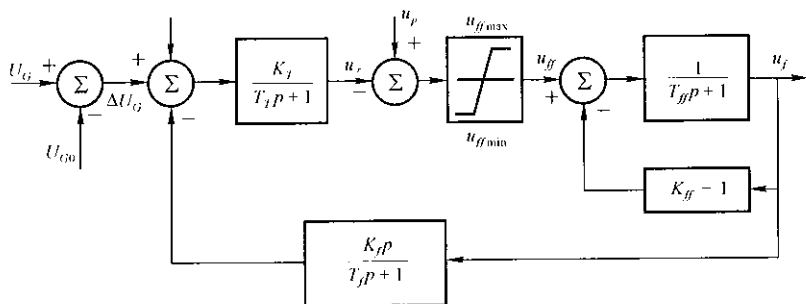


图 5.28 可控硅励磁调节系统传递函数的简化框图

为了便于以后说明自动励磁调节器对静态稳定的影响, 可对传递函数的框图再作一些简化, 并写出相应的自动调节励磁系统的方程式。这些简化是: 不计调节器本身时间常数即 $T_T = 0$, 调节器为一个比例环节; 不计励磁机的饱和, 即 $K_{ff} = 1$; 不计转子电压的软反馈, 则图 5.28 可进一步简化为图 5.29 的框图。

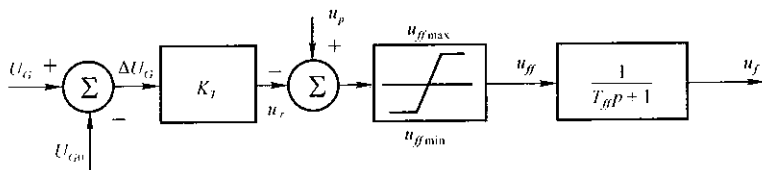


图 5.29 可控硅励磁调节系统传递函数的再简化框图

根据图 5.29 可以写出系统的方程式为

$$\begin{aligned}\Delta U_G &= U_G - U_{G0} \\ u_r &= \Delta U_G K_T \\ u_{ff} &= u_p - u_r \\ u_{ff} &= T_{ff} \frac{du_f}{dt} + u_f\end{aligned}\tag{5.73}$$

式中, U_G 为发电机端电压; K_T 为调节器的放大系数; u_r 为调节器的输出电压; U_{G0} 为调节器的电压整定值。

可控硅励磁调节系统各主要参数的数值范围列于表 5.1。

表 5.1 可控硅励磁调节系统主要参数的数值范围

可控硅励磁调节器							励磁机	
符号	K_T	$T_r(s)$	K_f	$T_f(s)$	$U_{ff\max}$	$U_{ff\min}$	K_{ff}	$T_{ff}(s)$
取值范围	10	0.05	0.03	0.02	4.0	≈ 0	1	直流励磁机 0.5 ~ 1.0
	40	0.1	0.05	0.06	6.0			交流励磁机 = 0.5 T'_d (励磁机)

如果在图 5.20 所示的励磁系统中, 二极管整流器 D 改为可控硅整流器, 并用励磁调节器直接控制, 则可实现快速励磁控制, 这相当于图 5.28 和 5.29 中, 励磁机时间常数 $T_{ff} \approx 0$ 。

5.3 电力系统静态稳定

在 5.1 节的概述中提到, 电力系统受到小干扰后, 不发生自发振荡或非周期性失步, 而自动地恢复到原始运行状态的能力, 称为电力系统在该状态下是静态稳定的。因此电力系统静态稳定研究的任务是:

- (1) 校验电力系统在某一运行方式是不是静态稳定的, 稳定的判据是什么?
- (2) 确定电力系统在哪些可能的运行方式下是静态稳定的。例如对远距离输电系统, 静态稳定研究要解决的问题是: 当远方发电厂(如水电厂、坑口发电厂等)通过输电线输送额定功率时, 系统是否稳定, 如果是稳定的, 那么稳定的程度如何估计? 一般用达到静态稳定极限的输电功率与实际输电功率的

比值来衡量稳定程度。

(3) 采用什么措施可以提高系统的静态稳定性。

本节中将介绍电力系统静态稳定的判据和分析计算方法,同时也要着重说明励磁调节系统对静态稳定的作用。

5.3.1 静态稳定分析的基本方法

i. 实用判据 $\frac{dP}{d\delta}$

在 5.1 节的静态稳定初步概念分析中,在单机-无穷大功率系统中如果发电机电势 E 恒定不变,则得出在图 5.3 中 a 点是静态稳定的,在 b 点是静态不稳定的结论;也即在电磁功率特性曲线的上升部分运行系统是静态稳定的,在功率特性下降部分运行是不稳定的,即电磁功率增量 ΔP_E 和功率角增量 $\Delta\delta$ 具有相同的符号的话,系统运行是静态稳定的。这样,得到简单系统静态稳定的实用判据为

$$\frac{dP_E}{d\delta} > 0 \quad (5.74)$$

由功率方程式(5.2)可得

$$\frac{dP_E}{d\delta} = \frac{EU}{x_s} \cos\delta \quad (5.75)$$

某一运行状态($\delta = \delta_0$)下, $dP_E/d\delta$ 越大,静态稳定程度就越高。当 $\delta = 90^\circ$ 时, $dP_E/d\delta = 0$,达到稳定的临界点。实际上,这一点是不能正常运行的,因为当受到任何一个小干扰时功率 δ 就会不断增大。此角度称为静态稳定极限角,它正好与功率极限值相一致。

为了保证电力系统安全、可靠运行,不但要求电力系统在正常运行及事故后的稳态运行情况下必须是静态稳定的,而且还要求有一定静态稳定储备,通常用静态稳定功率储备系数 K_p 来表示。 K_p 可由下式决定

$$K_p = \frac{P_{\max} - P_0}{P_0} \times 100\% \quad (5.76)$$

式中, P_{\max} 为静态稳定功率极限; P_0 为某一运行方式下输出的功率。

根据我国现行的《电力系统安全稳定导则》规定,系统正常运行时 K_p 应不小于 15% ~ 20%,事故后的运行方式下 K_p 不应小于 10%。

2. 应用小干扰法分析系统静态稳定性的基本原理

上面介绍了简单电力系统静态稳定的实用判据,下面将进一步从理论上来说明电力系统静态稳定的分析计算方法并得出稳定的判据。

对于一个动力学系统,其运动特性可以用一阶非线性微分方程组(状态方程)来描述:

$$\frac{dX(t)}{dt} = F[X(t), t] \quad (5.77)$$

式中, $X = [X_1 \ X_2 \ \cdots \ X_n]^T$ 为表征系统每一时刻状态的状态空间向量; $F = [F_1 \ F_2 \ \cdots \ F_n]^T$ 为状态变量和时间 t 的非线性函数向量。

用向量表示的上述系统方程式的解为

$$X(t) = \Phi(t, t_0, X_0) \quad (5.78)$$

式中, t 为从观察的起始时间 t_0 开始的时间变量; X_0 为初始状态变量。

在式(5.77)中,如果 $F[X, t] = 0$,表示系统状态变量对时间的变化率为零,也就是说系统处于一种没有任何产生变化趋势的状态,这就是所谓平衡状态。如果 F 为非线性函数,则可以有多个解,也即可以有多个平衡状态。

如果系统是线性的,即

$$\frac{dX(t)}{dt} = F[X(t), t] = AX(t) \quad (5.79)$$

式中, A 是一个 $n \times n$ 阶的常数矩阵。在平衡状态时 $AX = 0$,如果 A 为非奇异矩阵时,系统只有一个平衡状态。

用算子 p 来表示时,上式可写为

$$[A - pI]X(t) = 0 \quad (5.80)$$

式中, I 为与 A 同阶的单位矩阵。

如果要使 $X(t)$ 有非零解,则要求矩阵 $[A - pI]$ 的行列式等于零,即

$$\det[A - pI] = 0 \quad (5.81)$$

将式(5.81)的左端展开后得到 p 的多项式

$$f(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \cdots + a_{n-1} p + a_n = 0 \quad (5.82)$$

式(5.82)是式(5.79)的特征方程,其 n 个根为 p_1, p_2, \cdots, p_n ,通常称为特征方程的根或矩阵 A 的特征值。当无重根时,线性微分方程组式(5.79)的通解具有如下形式:

$$X_i(t) = K_{i1} e^{p_1 t} + K_{i2} e^{p_2 t} + \cdots + K_{in} e^{p_n t} (i = 1, 2, \cdots, n) \quad (5.83)$$

式中, $K_{i1}, K_{i2}, \cdots, K_{in}$ 是由初始条件决定的积分常数。

根据特征方程根的性质,可以决定系统的稳定性。如果有一个根是正的实数,那就表示变量 $X_i(t)$ 是不断增加的,不能回复到受干扰前的运行状态,因而系统是不稳定的;如果所有的根都是负的实数,那么式(5.83)各项都将衰减到零,表示系统是稳定的。

虚数根表示不衰减的振荡,系统处于稳定边界。复数根实部为负时,表示

幅值是衰减的振荡,系统是稳定的。复数根实部为正时,表示幅值是增长的振

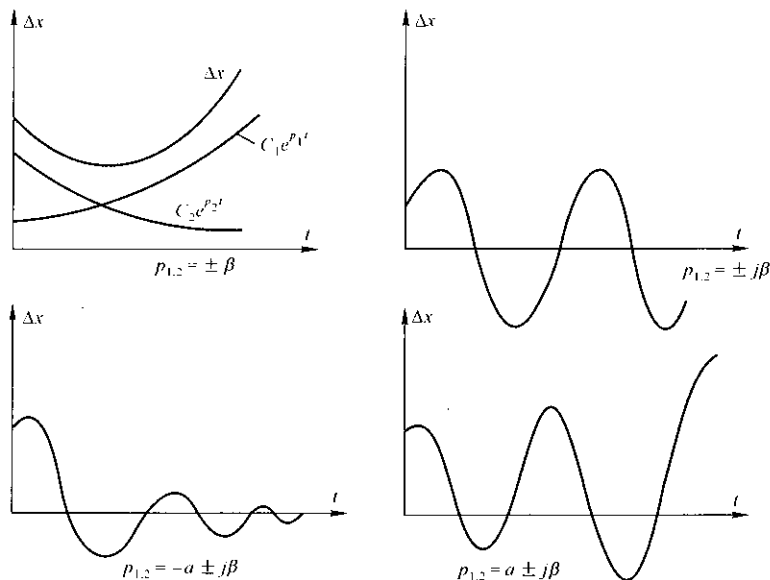


图 5.30 不同特征方程式根时的暂态过程的特性

荡,系统是不稳定的。图 5.30 中表示了上述各种情况。事实上,在静态稳定研究中,不必解出特征方程式的根,而只需判断根的性质。判断根的性质方法很多,如劳斯判据、古尔维兹判据等。

如式(5.77)所示,大多数的工程系统是非线性的。如果干扰很小,则可以把非线性函数在初始平衡状态 $F[X_0] = 0$ 附近展开成泰勒级数。

$$F[X] = F(X_0 + \Delta X) \\ = F[X_0] + \left. \frac{dF[X]}{dX} \right|_0 \Delta X + \left. \frac{d^2F[X]}{dX^2} \right|_0 \times \frac{\Delta X^2}{2!} + \dots \quad (5.84)$$

略去二次以上高次项,可以把原来的非线性方程(5.77)改写为

$$\frac{dX}{dt} = \frac{d(X_0 + \Delta X)}{dt} = \frac{d\Delta X}{dt} = \left. \frac{dF[X]}{dX} \right|_0 \Delta X \quad (5.85)$$

式中, $\left. \frac{dF[X]}{dX} \right|_0$ 为雅可比矩阵。

式(5.85)称为线性化的小干扰方程,这样,非线性系统的稳定性就转变为线性化系统的稳定性问题。

5.3.2 简单电力系统的静态稳定

利用上述小干扰法分析如图 5.31 所示的简单系统。设 G 为隐机发电机，原始运行时 $P_T = P_E = P_{E0}$, $\delta = \delta_0$, $\omega = 1$ 。

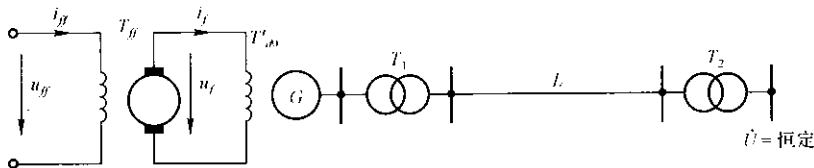


图 5.31 简单电力系统

1. 不计发电机的阻尼作用

先不考虑自动励磁调节器，设 E_q 不变。根据式 (5.21) 和 (5.22) 可列出发电机转子的小干扰运动方程式

$$\frac{d(\delta_0 + \Delta\delta)}{dt} = \frac{d\Delta\delta}{dt} = \Delta\omega\omega_0 \quad (5.86)$$

$$\frac{d(1 + \Delta\omega)}{dt} = \frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{1}{T_J} [P_T - P_E] \quad (5.87)$$

在上式中 P_T 在小扰动时可以认为不变，而 P_E 项是非线性的。将 $P_E = \frac{E_q U}{x_\Sigma} \sin(\delta_0 + \Delta\delta)$ 在平衡点 δ_0 附近线性化，得

$$P_E = P_{E0} + \left. \frac{dP_E}{d\delta} \right|_0 \Delta\delta = \frac{E_q U}{x_\Sigma} \sin\delta_0 + \frac{E_q U}{x_\Sigma} \cos\delta_0 \Delta\delta \quad (5.88)$$

令 $S_{Eq} = \left. \frac{dP_E}{d\delta} \right|_0$ ，即电磁功率曲线在 (P_{E0}, δ_0) 点的斜率，称为同步功率系数。将上式代入式 (5.87)，得线性化的小干扰方程式：

$$\frac{d\Delta\delta}{dt} = \Delta\omega\omega_0 \quad (5.89)$$

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = -\frac{S_{Eq}}{T_J} \Delta\delta \quad (5.90)$$

上述两式的特征方程式为

$$p^2 + \frac{\omega_0 S_{Eq}}{T_J} = 0 \quad (5.91)$$

解得方程的两个根为

$$p_{1,2} = \pm \sqrt{-\frac{\omega_0 S_{Eq}}{T_J}} \quad (5.92)$$

通过分析根的性质可以判断系统在给定运行方式下是否静态稳定。

式(5.92)中系统的同步频率 ω_0 和发电机组的惯性时间常数均为正值,而 S_{E_q} 可以是正值,也可能是负值。

当 $S_{E_q} > 0$ 时,特征值为一对共轭虚数

$$p_{1,2} = \pm j\beta \quad (5.93)$$

式中, $\beta = \sqrt{\frac{\omega_0 S_{E_q}}{T_j}}$ 为自由振荡角频率,相应的自由振荡频率 $f_e = \frac{\beta}{2\pi}$ 。

功率角偏移量的解为

$$\begin{aligned} \Delta\delta(t) &= C_1 e^{j\beta t} + C_2 e^{-j\beta t} \\ &= (C_1 + C_2) \cos \beta t + j(C_1 - C_2) \sin \beta t \end{aligned} \quad (5.94)$$

$\Delta\delta(t)$ 应为实数,因此 C_1 和 C_2 一定是一对共轭复数。设 $C_1 = A + jB$, $C_2 = A - jB$ 代入式(5.94),经整理可得

$$\Delta\delta(t) = 2A \cos \beta t - 2B \sin \beta t = 2C \sin(\beta t - \varphi) \quad (5.95)$$

式中

$$C = \sqrt{A^2 + B^2} \quad \varphi = \arctan \frac{A}{B}$$

由上式可见, $\Delta\delta(t)$ 是等幅振荡,考虑到系统中的阻尼作用,振荡将是衰减的,所以系统是静态稳定的。

当 $S_{E_q} < 0$ 时,特征根是一个正的实根和一个负的实根,自由振荡的解为

$$\Delta\delta(t) = C_1 e^{p_1 t} + C_2 e^{p_2 t} \quad (5.96)$$

系统受干扰后, $\Delta\delta$ 将是单调增加,系统将非周期性地失去稳定。

从以上的分析可知,在简单的系统中,当不考虑自动励磁调节装置时,静态稳定的判据与前面根据物理现象分析的结论是一致的,即

$$\frac{dP_{E_q}}{d\delta} > 0 \quad \text{即 } \delta < 90^\circ \text{ 时系统静态稳定;}$$

$$\frac{dP_{E_q}}{d\delta} < 0 \quad \text{即 } \delta > 90^\circ \text{ 时系统静态不稳定;}$$

$$\frac{dP_{E_q}}{d\delta} = 0 \quad \text{即 } \delta = 90^\circ \text{ 时为静态稳定极限情况。}$$

E_q 恒定不变时, $\delta = 90^\circ$ 对应的发电机输出的磁功率 $P_{\max} = \frac{E_q U}{x_s}$,称为静态稳定极限功率或功率极限。

有关发电机的同步功率系数 S_{E_q} 和固有振荡频率 f_e 随 δ 变化的关系如图5.32所示。

2. 计及发电机阻尼作用

发电机的阻尼作用包括机械阻尼作用和电气阻尼作用两个方面,机械阻

尼主要是由于轴承摩擦及转子转动时与气体摩擦产生的;电气阻尼的产生是由于系统发生振荡时,定子旋转磁场对于发电机转子有相对运动,从而在转子的励磁绕组和阻尼绕组中感应电流而形成阻尼转矩(功率)。常用阻尼功率系数 D 乘以角速度增量 $\Delta\omega$ 表示阻尼功率,即

$$P_D = D\Delta\omega \quad (5.97)$$

阻尼功率系数 D 的计算比较复杂,它由励磁绕组的阻尼功率系数 D_f 、 d 轴阻尼绕组的阻尼功率系数 D_D 和 q 轴阻尼绕组的阻尼功率系数 D_Q 三部分构成。一般情况下 D 为正值,是 δ_0 的函数,但当运行角度 δ_0 较小(小于 $20^\circ \sim 30^\circ$) 且线路电阻较大时,阻尼功率系数可能也变为负值。

考虑阻尼时,电磁功率 $P_E = P_{E0} + S_{Eq}\Delta\delta + D\Delta\omega$, 发电机转子运动的线性化状态方程式:

$$\frac{d\Delta\delta}{dt} = \Delta\omega\omega_0 \quad (5.98)$$

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = -\frac{S_{Eq}\Delta\delta + D\Delta\omega}{T_J} \quad (5.99)$$

上式的特征方程式为

$$p^2 + \frac{D}{T_J}p + \frac{\omega_0 S_{Eq}}{T_J} = 0$$

求得两个特征根为

$$p_{1,2} = -\frac{D}{2T_J} \pm \frac{1}{2T_J} \sqrt{D^2 - 4\omega_0 T_J S_{Eq}} \quad (5.100)$$

下面对式(5.100)进行分析讨论:

(1) 发电机阻尼为正值,即 $D > 0$

当 $S_{Eq} > 0$, 且 $D^2 > 4\omega_0 T_J S_{Eq}$ 时, $\sqrt{D^2 - 4\omega_0 T_J S_{Eq}} < D$, 所以特征值为两个负的实数, $\Delta\delta(t)$ 将单调地衰减到零,系统是静态稳定的。

当 $S_{Eq} > 0$, 但 $D^2 < 4\omega_0 T_J S_{Eq}$ 时, $(D^2 - 4\omega_0 T_J S_{Eq}) < 0$, 所以特征值是一对具有负实部的共轭复数, $\Delta\delta(t)$ 将是衰减振荡的,系统是静态稳定的。

当 $S_{Eq} < 0$ 时, $\sqrt{(D^2 - 4\omega_0 T_J S_{Eq})} > D$, 所以特征值中有一个为正的实数, $\Delta\delta(t)$ 将随时间单调地增加,系统是静态不稳定的。

(2) 发电机阻尼功率系数为负值,即 $D < 0$

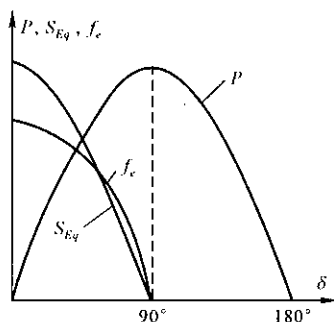


图 5.32 同步功率系数及固有频率的变化

从式(5.100)可知,此时不论 S_{Eq} 为何值时,特征值的实部总有一个为正数,系统将是不稳定的。例如,当 $S_{Eq} > 0$,且 $D^2 > 4\omega_0 T_J S_{Eq}$ 时,特征值为两个正实数,系统将单调地失稳;当 $S_{Eq} > 0, D^2 < 4\omega_0 T_J S_{Eq}$ 时,特征值是具有正实部的共轭复数,系统将振荡失步。

综上所述,考虑发电机阻尼作用时,简单系统的静态稳定判据为: $D > 0$ 和 $S_{Eq} > 0$ 。

为了进一步理解正阻尼作用,下面从物理意义方面来解释。由 $P_D = D\Delta\omega$ 可知,如果 $D > 0$,则当角速度增量 $\Delta\omega > 0$ 时,即转子速度高于同步转速时,阻尼功率 P_D 功率为正,它将阻止转子转速升高,从而阻止 δ 的增大。当 $\Delta\omega < 0$ 时,即转子转速低于同步转速时,阻尼功率 P_D 为负,阻止转速的下降。如果 $D < 0$,则情况完全相反。

阻尼功率对于系统受小干扰后振荡的影响可以用图 5.33 进行定性说明。图 5.33(a) 为功率特性曲线,正常运行点为 a 点,功率角为 δ_a ,假定受到一个小干扰使角度产生一个负的偏移量。为了说明清楚,把 a 点附近的曲线局部放大。因 $\Delta\delta$ 很小,所以这部分曲线可以看作直线。当不考虑阻尼时,即 $D = 0$,则角度变化是沿着 $b-a-c$ 来回振荡, $\Delta\delta(t)$ 的曲线是等幅振荡 $\delta_a - \delta_b = \delta_c - \delta_a$,如图 5.33(b)所示。

有阻尼存在时的情况就不同了。当 $D > 0$ 时,如图 5.33(c)所示,由于受扰瞬间 $P_T > P_E$,转子加速 $\Delta\omega > 0$,所以 $P_D > 0$,从而使总的电磁功率变为 $ba'c$ 曲线。在角度超过 O 点时转子开始减速,达到 c 点时 $\Delta\omega = 0, \delta$ 不再增大。此时, c 点离平衡点 a 的角度偏差要小于 b 点对 a 点的角度偏差。接下去的过程是 $P_E > P_T$,转子减速 $\Delta\omega < 0, P_D < 0$,从而使电磁功率变为 $ca''d$ 曲线。当 δ 角达到 O' 时开始加速,到 d 点时达同步转速,即 $\Delta\omega = 0$ 。此时 $|\delta_d - \delta_a| < |\delta_c - \delta_a|$ 。这样的衰减振荡不断进行下去,最后使运行点仍回恢复到 a 点。

当 $D < 0$ 时,即负阻尼存在时,情况如图 5.33(d)所示。 δ 的变化过程将沿着曲线 $b \rightarrow a' \rightarrow c \rightarrow a'' \rightarrow d \rightarrow \dots$ 发展,使 δ 越来越离开 a 点,最终导致系统失去稳定。所以 $\Delta\delta(t)$ 的变化是增幅振荡。

综上所述, $D > 0$ 时,阻尼的作用是阻止系统振荡; $D < 0$ 时,将使系统振荡越来越大。

【例 5.3】 图 5.6 所示的简单电力系统,隐极发电机的参数(标么值)如下: $x_{d\Sigma} = 1.5, E_q = 1.07, U = 1$;惯性时间常数 $T_J = 15\text{s}$,阻尼功率系数 $D = 60$ 。小扰动时 E_q 保持不变。试求:

(1) 在考虑阻尼和不考虑阻尼的情况下,检验系统在各种运行方式下的静态稳定,并求出振荡频率和周期;

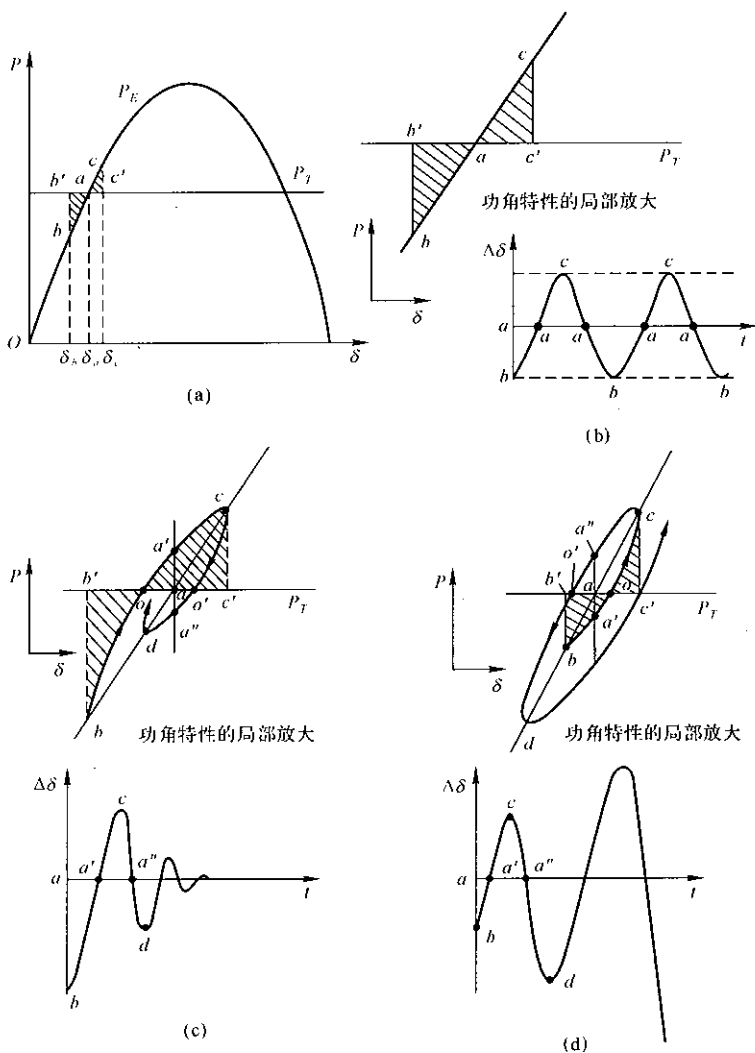


图 5.33 阻尼功率对系统振荡的影响

(a) 功率特性曲线; (b) $D=0$, $\Delta\delta$ 等幅振荡;(c) $D>0$, $\Delta\delta$ 衰减振荡; (d) $D<0$, $\Delta\delta$ 增幅振荡

(2) 当转子位置对其稳态值偏差为 $\Delta\delta_0$ 时 (外力随即消失), 作角度对时间的变化曲线。 δ_0 分别为 $0^\circ, 60^\circ, 85^\circ$ 和 100° 。

【解】 下面求不同初始条件时振荡频率、周期和 $\Delta\delta$ 变化曲线。

(1) 不考虑阻尼的情况。

$\delta_0 = 0^\circ$ 时, 同步功率系数

$$S_{Eq} = \frac{E_q U}{x_{d\Sigma}} \cos \delta_0 = \frac{1.07 \times 1}{1.5} = 0.713$$

振荡角频率

$$\beta = \sqrt{\frac{S_{Eq} \omega_0}{T_J}} = \sqrt{\frac{0.713 \times 314}{15}} = 3.86 (\text{rad/s})$$

$$f_c = \frac{\beta}{2\pi} = 0.614 (\text{Hz})$$

$$T = \frac{1}{f_c} = \frac{1}{0.614} = 1.63 (\text{s})$$

$$\Delta\delta = \Delta\delta_0 \cos 3.86t$$

同样的,可以求出 δ_0 为其他角度时的情况,如下表所示。

δ	S_{Eq}	$\beta (\text{rad/s})$	$f_c (\text{Hz})$	$T (\text{s})$	$\Delta\delta / \Delta\delta_0$
0°	0.713	3.86	0.614	1.63	$\cos 3.86t$
60°	0.357	2.73	0.435	2.30	$\cos 2.73t$
85°	0.062	1.14	0.182	5.5	$\cos 1.14t$
100°	-0.124	$p_{1,2} = \pm 1.61$			$0.5(e^{1.61t} + e^{-1.61t})$

比较在不同起始角 δ_0 时的 $\Delta\delta$ 曲线(见图 5.34)可见,随着 δ_0 的增大,也就是随着输送功率的增大,振荡周期也增大。 $\delta_0 > 90^\circ$ 时,有一个正的实根,所以角度将随时间非周期性地增大。

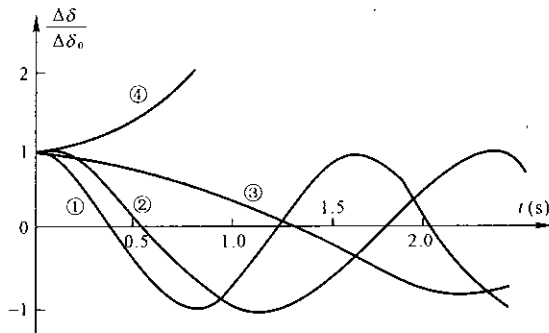


图 5.34 例 5.3 中 $\Delta\delta = f(t)$ 振荡曲线

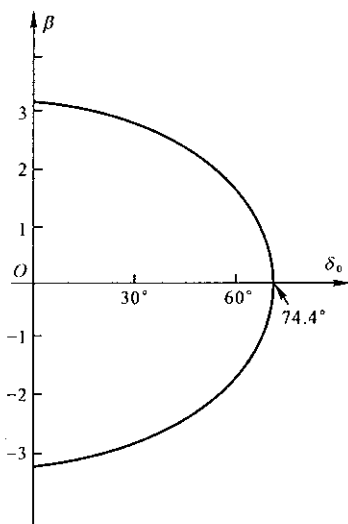
① $\delta_0 = 0^\circ$; ② $\delta_0 = 60^\circ$; ③ $\delta_0 = 85^\circ$; ④ $\delta_0 = 100^\circ$

(2) 考虑阻尼系数 D 时,特征方程的根

$$p_{1,2} = -\alpha \pm j\beta$$

$$\alpha = \frac{D}{2T_J} = \frac{60}{2 \times 15} = 2 (1/\text{s}) \quad \beta = \sqrt{\frac{\omega_0 S_{Eq}}{T_J} - \frac{D^2}{4T_J^2}}$$

$\beta = f(\delta_0)$ 曲线如图 5.35 所示。当 $\beta = 0$ 时,

图 5.35 振荡频率 β 与 δ_0 关系

$$4\omega_0 T_d S_{Eq} - D^2 = 0$$

解得 $\delta_0 = 74.4^\circ$

所以

(a) 当 $\delta < 74.4^\circ$ 时, $\Delta\delta$ 作周期性衰减振荡

$$\frac{\Delta\delta}{\Delta\delta_0} = \frac{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{\beta} e^{-\alpha t} \sin(\beta t + \psi_0)$$

$$\psi_0 = \arctan \frac{\beta}{\alpha}$$

当 $\delta_0 = 0^\circ$ 时, $\beta = 3.31$, $\frac{\Delta\delta}{\Delta\delta_0} = 1.17e^{-2t} \sin(3.31t + 58.86^\circ)$, $T = 1.9s$, $f_e = 0.526\text{Hz}$ 。

当 $\delta_0 = 60^\circ$ 时, $\beta = 1.86$, $\frac{\Delta\delta}{\Delta\delta_0} = 1.486e^{-2t} \sin(1.86t + 42.9^\circ)$, $T = 3.38s$, $f_e = 0.296\text{Hz}$ 。

(b) 当 $90^\circ > \delta > 74.4^\circ$

因为 $p_{1,2}$ 为两个负实数, $\Delta\delta$ 是非周期性衰减到零。

$\delta_0 = 85^\circ$ 时, $S_{Eq} = 0.0622$, $p_{1,2} = -3.64$ 和 -0.36

$$\frac{\Delta\delta}{\Delta\delta_0} = 1.1019e^{-0.36t} - 0.109e^{-3.64t}$$

(c) $\delta_0 > 90^\circ$ 时

$S_{Eq} < 0$, $p_{1,2}$ 为一个正实根和一个负实根, $\Delta\delta$ 将不断增长。

$\delta_0 = 100^\circ$ 时, $S_{E_q} = -0.124$, $p_{1,2} = 0.57$ 和 -4.57

$$\frac{\Delta\delta}{\Delta\delta_0} = 0.889e^{0.57t} + 0.111e^{-4.57t}$$

5.3.3 自动励磁调节对静态稳定的作用

上一节中分析简单电力系统的静态稳定,但不考虑自动励磁调节的作用。实际上,现在电力系统中的发电机上都装设各种各样的自动励磁调节器,下面以按发电机机端电压偏移调节励磁的比例型励磁调节器为例,用小干扰法分析它对图 5.31 简单电力系统静态稳定极限、稳定判据等方面的影响。

为了分析简化起见,作如下一些假定:

(1) 忽略励磁调节系统和励磁机中的暂态过程,即图 5.29 中令 $T_{ff} = 0$ (相当于快速可控硅励磁系统),认为与发电机端电压偏移成比例的调节量立即作用于励磁电压 u_f 上。

(2) 不计阻尼功率。

式(5.58)表示发电机的励磁绕组方程(发电机电势变化方程)为

$$E_{qr} = E_q + T'_{d0} \frac{dE'_q}{dt}$$

上式的线性化小干扰方程式为

$$\Delta E_{qr} = \Delta E_q + T'_{d0} \frac{d(\Delta E'_q)}{dt} \quad (5.101)$$

当不计调节器和励磁系统的暂态过程时,由图 5.29 可得

$$\Delta E_{qr} = -K_C \Delta U_G \quad (5.102)$$

式中, $K_C = K_T x_{ad}/r_f$ 称为调节器的综合放大系数,负号表示当 ΔU_G 为正时,即当发电机端电压高于整定值 U_{G0} 时, ΔE_{qr} 为负值,其作用为减小发电机端电压。将上式代入式(5.101)得

$$-K_C \Delta U_G = \Delta E_q + T'_{d0} \frac{d\Delta E'_q}{dt} \quad (5.103)$$

同时列出发电机转子运动的小干扰方程式

$$\frac{d\Delta\delta}{dt} = \Delta\omega\omega_0 \quad (5.104)$$

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = -\frac{1}{T_J} \Delta P_E \quad (5.105)$$

在上一节中也曾应用同样的发电机转子运动方程式(5.90),但在上一节中不考虑自动励磁调节的作用,所以电磁功率的增量 ΔP_E 仅与功率角 δ 的变

化有关,在这里还要考虑励磁调节的作用。

上述式(5.103)~(5.105)这三式中,共有状态变量 $\Delta E'_q$ 、 $\Delta\delta$ 、 $\Delta\omega$ 及其他偏移量: ΔU_G 、 ΔE_q 和 ΔP_E 等 6 个未知量。所以,还需要补充三个方程式。把 ΔU_G 、 ΔE_q 和 ΔP_E 都用状态变量的偏移量来表示,得到如下三个方程式: $\Delta P_E = f(\Delta E'_q, \Delta\delta)$, $\Delta E_q = f(\Delta E'_q, \Delta\delta)$ 和 $\Delta U_G = f(\Delta E'_q, \Delta\delta)$ 。

1. 求 $\Delta P_E = f(\Delta E'_q, \Delta\delta)$ 的关系式

由式(5.35)可得出以 E'_q 表示的发电机电磁功率方程式为

$$P_E = P_{E'_q} = \frac{E'_q U}{x_{d\Sigma}} \sin\delta - \frac{U^2}{2} \frac{x_q - x_d}{x_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} \sin 2\delta$$

这是非线性方程,线性化后得到

$$\Delta P_E = K_1 \Delta\delta + K_2 \Delta E'_q \quad (5.106)$$

式中

$$K_1 = \left. \frac{\partial P_{E'_q}}{\partial \delta} \right|_0 = \frac{E'_q U}{x_{d\Sigma}} \cos\delta_0 - U^2 \frac{x_q - x_d}{x_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} \cos 2\delta_0 \quad (5.107)$$

$$K_2 = \left. \frac{\partial P_{E'_q}}{\partial E'_q} \right|_0 = \frac{U}{x_{d\Sigma}} \sin\delta_0 \quad (5.108)$$

2. 求 $\Delta E_q = f(\Delta E'_q, \Delta\delta)$ 的关系

由式(5.34)可得

$$\Delta E_q = \left. \frac{\partial E_q}{\partial E'_q} \right|_0 \Delta E'_q + \left. \frac{\partial E_q}{\partial \delta} \right|_0 \Delta\delta = \frac{1}{K_3} \Delta E'_q + K_4 \Delta\delta \quad (5.109)$$

式中

$$K_3 = x_{d\Sigma} / x_{d\Sigma} \quad (5.110)$$

$$K_4 = \frac{x_d - x_d'}{x_{d\Sigma}} U \sin\delta_0 \quad (5.111)$$

3. 求 $\Delta U_G = f(\Delta E'_q, \Delta\delta)$ 的关系

由稳态相量图 5.6 可得

$$U_{Gd} = I_q x_q = \frac{U_d}{x_{q\Sigma}} x_q = U \sin\delta \frac{x_q}{x_{q\Sigma}} \quad (5.112)$$

$$\begin{aligned} U_{Gq} &= U_q + I_d (x_{d\Sigma} - x_d) = U_q + \frac{E'_q - U_q}{x_{d\Sigma}} (x_{d\Sigma} - x_d) \\ &= \frac{x_d'}{x_{d\Sigma}} U \cos\delta + \frac{E'_q}{x_{d\Sigma}} (x_{d\Sigma} - x_d) \end{aligned} \quad (5.113)$$

因为

$$U_G^2 = U_{Gd}^2 + U_{Gq}^2 \quad (5.114)$$

所以

$$\begin{aligned}\Delta U_G &= \frac{U_{Gq}}{U_G} \left(\frac{\partial U_{Gq}}{\partial E'_q} \bigg|_0 \Delta E'_q + \frac{\partial U_{Gq}}{\partial \delta} \bigg|_0 \Delta \delta \right) + \frac{U_{Gd}}{U_G} \times \frac{\partial U_{Gd}}{\partial \delta} \bigg|_0 \Delta \delta \\ &= K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q\end{aligned}\quad (5.115)$$

式中

$$K_5 = \frac{U_{Gdo}}{U_{Go}} \times \frac{U x_q \cos \delta_0}{x_{d\Sigma}} - \frac{U_{Gqo}}{U_{Go}} \times \frac{U x'_d \sin \delta_0}{x'_{d\Sigma}} \quad (5.116)$$

$$K_6 = \frac{U_{Gqo}}{U_{Go}} \left(\frac{x_{d\Sigma} - x_d}{x'_{d\Sigma}} \right) \quad (5.117)$$

对于一定的运行状态,系数 $K_1 \sim K_6$ 都是常数。

将式(5.106)、(5.109)和(5.115)代入式(5.103)~(5.105),得到如下表示系统小干扰特性的状态方程:

$$\frac{d\Delta\delta}{dt} = \omega_0 \Delta\omega \quad (5.118)$$

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = -\frac{K_1}{T_J} \Delta\delta - \frac{K_2}{T_J} \Delta E'_q \quad (5.119)$$

$$\frac{d\Delta E'_q}{dt} = -\frac{1}{T'_{do}} \left[(K_4 + K_L K_5) \Delta\delta + \left(\frac{1}{K_3} + K_L K_6 \right) \Delta E'_q \right] \quad (5.120)$$

上列三式的特征方程式为

$$\begin{vmatrix} 0 - p & \omega_0 & 0 \\ -\frac{K_1}{T_J} & 0 - p & -\frac{K_2}{T_J} \\ -\frac{1}{T'_{do}}(K_4 + K_L K_5) & 0 & -\frac{1}{T'_{do}}\left(\frac{1}{K_3} + K_L K_6\right) - p \end{vmatrix} = 0 \quad (5.121)$$

把上式左端行列式展开得

$$\begin{aligned}p^3 + \frac{1 + K_3 K_L K_6}{T'_{do} K_3} p^2 + \frac{\omega_0 K_1}{T_J} p + \frac{\omega_0}{T'_{do} T_J} \left[\left(\frac{K_1}{K_3} - K_2 K_4 \right) \right. \\ \left. + K_L (K_1 K_6 - K_2 K_5) \right] = 0\end{aligned}\quad (5.122)$$

式(5.122)是三阶代数方程式,可以根据古尔维茨判据来判定方程式的根的性质。这个判据指出,要使特征方程式的所有根具有负的实部的必要充分条件是方程式的所有系数和行列式 $\Delta_1, \Delta_2, \dots$ 均为正值。

对于一个三阶代数方程

$$a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0 \quad (5.123)$$

$$\Delta_1 = a_1, \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix}$$

式(5.122)中

$$a_0 = 1$$

$$\begin{aligned}
 a_1 &= \frac{1 + K_3 K_U K_6}{T'_{d0} K_3} \\
 a_2 &= \frac{\omega_0 K_1}{T_J} \\
 a_3 &= \frac{\omega_0}{T'_{d0} T_J} \left[\left(\frac{K_1}{K_3} - K_2 K_4 \right) + K_U (K_1 K_6 - K_2 K_5) \right]
 \end{aligned}$$

所以系统静态稳定的条件,除 a_0, a_1, a_2, a_3 都应为正值外,还必须

$$\Delta_2 = a_1 a_2 - a_0 a_3 = \frac{\omega_0 K_2}{T'_{d0} T_J} (K_1 + K_U K_5) > 0 \quad (5.124)$$

根据式(5.110)和(5.117)可知, K_3 和 K_6 均为正值常数。当 δ_0 在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围内时, K_2 和 K_4 也为正值。根据式(5.115), K_5 是发电机端电压对功率角的偏导数,当 δ 增大,即输出的电磁功率增加时,发电机端电压 U_G 将降低,所以 K_5 总是一负值。由式(5.107)可知, K_1 随 δ 的变化是可正可负的。

根据上述对系数 $K_1 \sim K_6$ 的讨论,可知上述静态稳定判据中 a_0 和 a_1 为正值,而 a_2, a_3 和式(5.124)则是随功率角和放大系数 K_U 的变化由正变负的。现在可以从这三个关系中求出保证静态稳定的条件。

(1) $a_2 > 0$ 的条件即 $K_1 > 0$ 。由式(5.107)可知

$$K_1 = \left. \frac{\partial P_{E'q}}{\partial \delta} \right|_0 = S_{E'q} \quad (5.125)$$

它是 $E'_q = E'_{q0}$ 时 $P_{E'q} \sim \delta$ 特性曲线在扰动前稳态运行点的斜率,即图 5.36 中 $P_{E'q}(E'_q = E'_{q0})$ 曲线在 0 点的斜率。

(2) 由 a_3 应大于零的条件可得

$$(K_1 - K_2 K_3 K_4) + K_U K_3 (K_1 K_6 - K_2 K_5) > 0 \quad (5.126)$$

因为 $K_1 > 0, K_3 < 0, K_2 > 0, K_6 > 0$, 所以,上式中 $(K_1 K_6 - K_2 K_5) > 0$, 而 $(K_1 - K_2 K_3 K_4)$ 有可能是负值或正值。由式(5.107) ~ (5.111) 可得

$$K_1 - K_2 K_3 K_4 = \frac{E_q U}{x_d} \cos \delta = S_{Eq} \quad (5.127)$$

即 P_{Eq} 对功率角的偏导数。在功率角 $\delta < 90^\circ$ 时, $S_{Eq} > 0$, 所以 K_U 取任意正值均能满足 $a_3 > 0$ 的条件,也就是说 K_U 的极小值为零。当 $\delta > 90^\circ$ 时, $S_{Eq} < 0$, 所以 K_U 应满足下列条件

$$K_U > - \frac{K_1 - K_2 K_3 K_4}{(K_1 K_6 - K_2 K_5) K_3} = K_{U\min} \quad (5.128)$$

式中, $K_{U\min}$ 为励磁调节器放大倍数的下限值。

(3) 由式(5.124)得到另一静态稳定的条件是 $K_1 + K_U K_5 > 0$ 。因为 K_5 总为负值,所以 K_U 必须满足另一条件

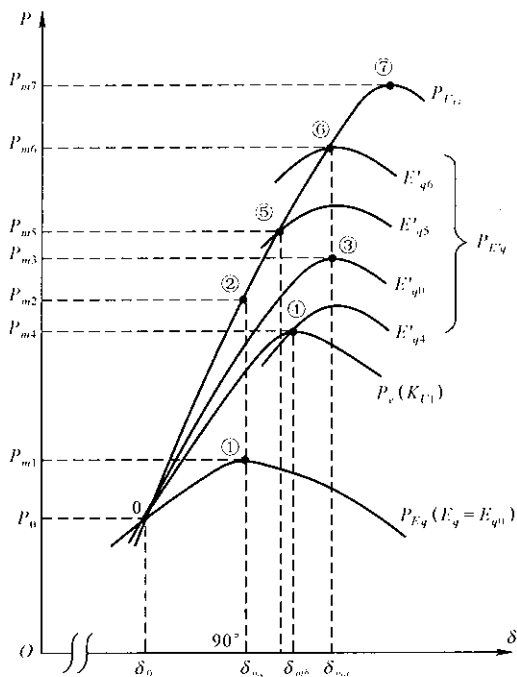


图 5.36 有励磁调节器时的功率和静态稳定特性

$$K_{L'} < -\frac{K_1}{K_5} = K_{L'\max} \quad (5.129)$$

式中, $K_{L'\max}$ 为励磁调节器放大倍数的上限值。

图 5.37 中曲线 1 和 2 为隐极机 $K_{L'\max}$ 和 $K_{L'\min}$ 随 δ 变化的曲线。

综上所述,在发电机上装有比例型励磁调节装置的快速可控硅励磁系统,或不计励磁调节装置和励磁机中暂态过程时,静态稳定的判据为

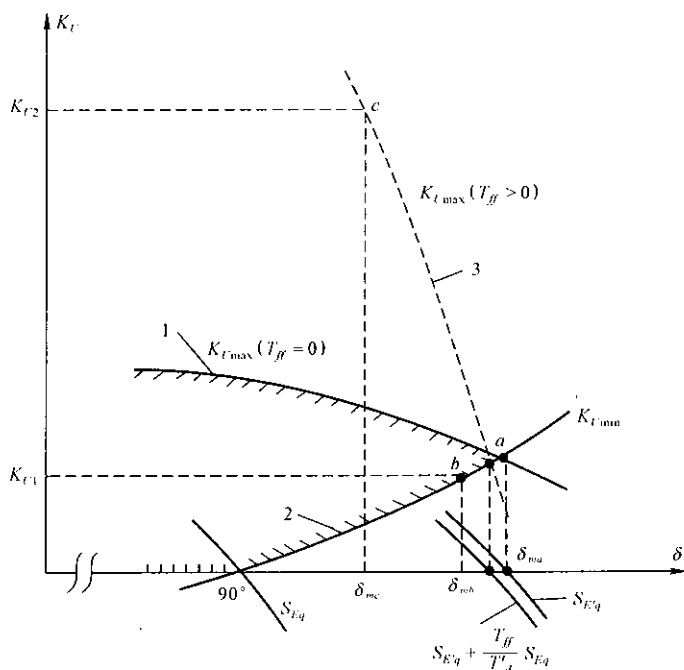
$$S_{E'q} > 0 \quad (5.130)$$

$$K_{L'\min} \leq K_{L'} \leq K_{L'\max} \quad (5.131)$$

进一步分析表明,当条件(5.131)满足,但 $S_{E'q} < 0$ 时,系统受到小干扰后, δ 角将非周期地增大而失去静态稳定;如果 $S_{E'q} > 0$ 但 $K_{L'} > K_{L'\max}$, δ 将增幅振荡而失去稳定;如果 $S_{E'q} > 0$ 但 $K_{L'} < K_{L'\min}$, 系统将非周期地失去稳定。

上述比例型自动励磁调节器 $K_{L'\max}$ 值很小,实际 $K_{L'}$ 要更小些,所以当输电功率 P 增大时发电机端电压将随之减少。分析表明,当取 $K_{L'} = K_{L'\max}$ 时,只能保持 $E'_q = E'_{q0}$ 不变; $K_{L'} < K_{L'\max}$ 时,则连 E'_q 也将随 P 的增大而减少。

具有上述励磁调节器时,系统的静态稳定功率极限将得到提高,提高的程度与 $K_{L'}$ 取值有关。设 $K_{L'} = K_{L'\max}$, 则输电功率 P 增大时 $E'_q = E'_{q0}$ 保持不变,

图 5.37 励磁调节器放大系数 K_L 与功率角的变化关系

所以运行点将沿着图 5.36 中 $P_{E'q}$ ($E'_q = E'_{q0}$ 不变) 特性曲线上移动, 当 $P = P_{m3}$ 时, 运行点 ③ 的 $S_{E'q} = 0$, 达到静态稳定极限, 所以极限功率为 P_{m3} , 极限角为 δ_{ma} 。极限运行点 ③ 与图 5.37 中 K_{Lmax} (曲线 1) 与 K_{Lmin} 曲线交点 a 相对应。一般 δ_{ma} 约为 $105^\circ \sim 110^\circ$ 。当 $K_L < K_{Lmax}$ 时, 静态稳定极限功率要通过试算的方法确定。首先设输电功率为 $P_1 (> P_0)$, 根据式 (5.114) (包括式 (5.112)、(5.113))、(5.28) 或式 (5.35)、(5.34) 及励磁系统和调节器稳态方程式

$$E_q = E_{q0} - K_L(U_G - U_{G0})$$

解出这时的稳态值: δ_1 、 E_{q1} 、 E'_{q1} 和 U_{G1} , 再求出相应的 $S_{E'q}$ 、 K_{Lmax} 和 K_{Lmin} , 然后用式 (5.130)、(5.131) 检查该运行状态是否静态稳定。如果是稳定的, 则再增大 P 重新进行计算, 直到不能稳定时为止。刚好不能稳定时的 P 和 δ 即为极限功率和极限角。例如 $K_L = K_{L1} < K_{Lmax}$, 求出的 $P \sim \delta$ 曲线如图 5.36 的曲线 P_e 所示。而求出的 K_{Lmax} 、 K_{Lmin} 如图 5.37 曲线 1 和 2 所示, 可见, 在 b 点 $K_{Lmin} = K_{L1}$, δ_{mb} 是稳定极限角。在图 5.36 中, 功率曲线 P_e 对应于 $\delta = \delta_{mb}$ 的运行点为 ①, 功率为 P_{m1} 。用 ① 点相应的 E'_{q1} 作出的 $P_{E'q}$ 特性曲线, 它在 ① 点的斜率 $S_{E'q} > 0$ 。如果 P 稍大于 P_{m1} , 虽然 $S_{E'q} > 0$, 但因 $K_{L1} < K_{Lmin}$ 系统将非周期地失去

稳定。所以静态功率极限为 P_{m1} , 极限角为 δ_{mb} 。显然, K_U 越小功率和 δ 极限值也越小

【例 5.4】 如图 5.6 所示的简单电力系统, 发电机为隐极机, 用标么值表示的参数如下:

$$x_d = x_q = 1.0, x_d' = 0.35, x_e = x_T + x_L = 0.5,$$

$$x_{d\Sigma} = x_{q\Sigma} = 1.5, x_{d\Sigma}' = 0.85,$$

正常运行时

$$P_0 = 1.0, E_{q0} = 2.0, U = 1.0, \delta_0 = 48.6^\circ$$

设发电机具有按端电压偏移调节的比例型励磁调节器。试计算放大倍数 K_U 取多少是合适的。

【解】

(1) 求正常运行时 $K_{U\min}$ 和 $K_{U\max}$

计算常数 $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$

$$I_{d0} = \frac{E_{q0} - U \cos \delta_0}{x_{d\Sigma}} = \frac{2.0 - \cos 48.6^\circ}{1.5} = 0.892$$

$$I_{q0} = \frac{U \sin \delta}{x_{d\Sigma}} = \frac{\sin 48.6^\circ}{1.5} = 0.500$$

$$U_{Gq0} = U \cos \delta + I_d x_e = \cos 48.6^\circ + 0.892 \times 0.5 = 1.107$$

$$U_{Gd0} = I_{q0} x_q = 0.500 \times 1 = 0.500$$

$$U_{G0} = \sqrt{U_{Gq0}^2 + U_{Gd0}^2} = \sqrt{1.107^2 + 0.500^2} = 1.215$$

$$E_{q0}' = U \cos \delta_0 + I_{d0} x_d' = \cos 48.6^\circ + 0.892 \times 0.85 = 1.420$$

$$\begin{aligned} K_1 &= S_{E'q} = \frac{E_{q0}' U}{x_{d\Sigma}} \cos \delta + U^2 \frac{x_{d\Sigma}' - x_{q\Sigma}}{x_{d\Sigma} \cdot x_{q\Sigma}} \cos 2\delta \\ &= \frac{1.420 \times 1}{0.85} \cos 48.6^\circ + \frac{0.85 - 1.5}{0.85 \times 1.5} \cos (2 \times 48.6^\circ) \\ &= 1.165 \end{aligned}$$

$$K_2 = \frac{U}{x_{d\Sigma}} \sin \delta = \frac{1}{0.85} \sin 48.6^\circ = 0.882$$

$$K_3 = \frac{x_{d\Sigma}'}{x_{d\Sigma}} = \frac{0.85}{1.5} = 0.567$$

$$K_4 = \frac{x_{d\Sigma} - x_{d\Sigma}'}{x_{d\Sigma}} U \sin \delta = \frac{1.5 - 0.85}{0.85} \sin 48.6^\circ = 0.574$$

$$\begin{aligned} K_5 &= \frac{U_{Gd0} U x_q \cos \delta_0}{U_{G0} x_{q\Sigma}} - \frac{U_{Gq0} U x_d' \sin \delta_0}{U_{G0} x_{d\Sigma}} \\ &= \frac{0.500 \times 1 \times 1 \times \cos 48.6^\circ}{1.215 \times 1.5} - \frac{1.104 \times 0.35 \times \sin 48.6^\circ}{1.215 \times 0.85} \end{aligned}$$

$$= 0.1814 - 0.2814 = -0.1000$$

$$K_6 = \frac{U_{Gq0}}{U_{G0}} \left(\frac{x_{d\Sigma} - x_d}{x'_{d\Sigma}} \right) = \frac{1.107 \times 0.5}{1.215 \times 0.85} = 0.536$$

$$K_{U_{\max}} = -\frac{K_1}{K_5} = \frac{0.574}{0.1000} = 5.74$$

$$K_1 - K_2 K_3 K_4 = 1.166 - 0.882 \times 0.567 \times 0.574 \\ = 0.879 > 0$$

所以 $K_{U_{\min}} < 0$

在正常运行时励磁调节器的放大倍数取值范围是

$$0 \leq K_U \leq 5.74$$

(2) 选取实际的 K_U 值

实际的 K_U 值不能按某一功率角 δ 时的最大值选取, 因为当运行条件改变时, 相应的最大值是要变化的。如图 5.37 所示, $K_{U_{\max}}$ 随功率角 δ 的增大而减小, 在极限情况时 ($S_{E_q} = 0$) 为最小。设在极限角时, $E'_q = E'_{q0} = 1.42$, 由 $K_1 = 0$ 确定极限角度的近似值

$$\frac{1.42}{0.85} \cos \delta + \frac{0.85 - 1.5}{0.85 \times 1.5} \cos 2\delta = 0$$

解得

$$\delta = 105.25^\circ$$

此时
$$K_1 = \frac{1.5 - 0.85}{0.85} \sin 105.25^\circ = 0.738$$

按式(5.34)可得 $\delta = 105.25^\circ$ 时的电势 E_q 为

$$E_q = \frac{x_{d\Sigma}}{x_{d\Sigma}} E'_q - \frac{x_d - x'_d}{x_{d\Sigma}} U \cos \delta \\ = \frac{1.5}{0.85} \times 1.42 - \frac{1.0 - 0.35}{0.85} \times \cos 105.25^\circ \\ = 2.506 + 0.201 = 2.707$$

$$U_{Gd} = U \sin \delta \frac{x_q}{x_{q\Sigma}} = \frac{1}{1.5} \sin 105.25^\circ = 0.643$$

$$U_{Gq} = E_q - \frac{x_d}{x_{d\Sigma}} (E_q - U \cos \delta) \\ = 2.707 - \frac{1}{1.5} (2.707 - \cos 105.25^\circ) \\ = 2.707 - \frac{2.970}{1.5} = 2.707 - 1.980 = 0.727$$

$$U_G = \sqrt{U_{Gq}^2 + U_{Gd}^2} = \sqrt{0.727^2 + 0.643^2} = 0.971$$

于是

$$K_5 = \frac{U_{Gd} U x_q \cos \delta}{U_G x_{q\Sigma}} - \frac{U_{Gq} U x'_d \sin \delta}{U_G x_{d\Sigma}}$$

$$= \frac{0.643 \times 1 \times 1 \times \cos 105.13^\circ}{0.971 \times 1.5} - \frac{0.725 \times 1 \times 0.35 \times \sin 105.13^\circ}{0.971 \times 0.85}$$

$$= -0.116 - 0.297 = -0.413$$

所以 $\delta = 105.25^\circ$ 时, $K_{U_{\max}} = \frac{K_1}{-K_5} = \frac{0.738}{-0.413} \approx 1.8$, 即发电机励磁调节器的放大倍数应取 $K_U = 1.8$ 。

现在计算系统在不同 δ 角运行时, E_q 、 U_G 、 E'_q 、 P 、 $S_{E'_q}$ 、 $K_{U_{\max}}$ 和 $K_{U_{\min}}$ 的值。发电机端电压的计算式为

$$U_{Gd} = \frac{x_q}{x_{d\Sigma}} U \sin \delta, \quad U_{Gq} = \frac{x_e}{x_{d\Sigma}} E_q + \frac{x_d}{x_{d\Sigma}} U \cos \delta$$

$$U_G^2 = U_{Gd}^2 + U_{Gq}^2$$

自动励磁调节系统的稳态方程为

$$E_q = E_{q0} - K_U (U_G - U_{G0}) = 2.0 - 1.8(U_G - 1.215)$$

由上面四式可解得

$$U_G = \frac{A(B+C) - \sqrt{(B+C)^2 - (A^2-1)U_{G0}^2}}{A^2-1}$$

式中 $A = K_U \frac{x_e}{x_{d\Sigma}}$; $B = (E_{q0} + K_U U_{G0}) \frac{x_e}{x_{d\Sigma}}$; $C = \frac{x_d}{x_{d\Sigma}} U \cos \delta$

对于给定的 δ 角, 可由上面各式求得 U_G 、 U_{Gd} 、 U_{Gq} 和 E_q ; 将 E_q 代入式 (5.34) 求出 E'_q , 由式 (5.35) 求出 P 值。再从有关计算式算出该 δ 角的 $K_1 = S_{E'_q}$ 、 $K_2 \sim K_6$ 及 $K_{U_{\max}}$ 、 $K_{U_{\min}}$ 各值。对于不同 δ 角, 计算结果列于下表:

δ (度)	48.6	60	70	80	90	100	105.55	110
E_q	2.000	2.072	2.148	2.238	2.340	2.456	2.526	2.584
U_G	1.215	1.175	1.133	1.083	1.026	0.962	0.923	0.895
E'_q	1.420	1.391	1.366	1.343	1.326	1.317	1.315	1.316
P	1.000	1.196	1.346	1.469	1.560	1.613	1.622	1.619
$S_{E'_q}$	1.169	1.073	0.940	0.755	0.510	0.210	0.022	-0.139
$K_{U_{\max}}$	5.73	4.51	3.66	2.98	2.44	2.01	1.80	1.65
$K_{U_{\min}}$	-2.18	-1.74	-1.275	-0.709	0.000	0.956	1.684	2.457

由上表可见, 随着输电功率的增加, 机端电压 U_G 明显下降, 而 E'_q 也略有降低。当 $\delta = 105.55^\circ$ 时, 虽然 $S_{E'_q} = 0.022 > 0$, 但 $K_{U_{\max}} = K_U = 1.8$, 所以达

到静态稳定极限, 极限功率 $P_{\max} = 1.622$ 。该简单系统静态稳定储备系数

$$K_p = \frac{1.622 - 1.0}{1.0} \times 100 = 62.2\%$$

以上分析仅适用于快速可控硅励磁系统。对于一般励磁系统, 励磁机的时间常数 T_{ff} 约为 $0.5 \sim 1.0$ 秒, 不可忽略不计。考虑励磁机暂态过程时, 式 (5.102) 要用下面的微分方程式代替:

$$\begin{aligned} T_{ff} \frac{d\Delta E_{qc}}{dt} &= -(\Delta E_{qc} + K_U \Delta U_G) \\ &= -(\Delta E_{qc} + K_U K_3 \Delta \delta + K_U K_6 \Delta E'_q) \end{aligned}$$

其他三个方程仍为式 (5.118)、(5.119) 和 (5.120)。对这 4 个状态方程的特征方程式, 用劳斯或古尔维茨判据进行分析, 可得到系统静态稳定的判据:

$$S_{E'q} + \frac{T_{ff}}{T'_d} S_{Eq} > 0$$

$$K_{U\min} < K_U < K_{U\max}$$

必须同时满足上述诸条件, 系统才是静态稳定的。这里, $K_{U\min}$ 仍和式 (5.128) 相同, $K_{U\max}$ 则为

$$K_{U\max} = \frac{K_1}{K_3} \cdot \frac{1 + \frac{\omega_0 T_{ff}^2}{T_d(T'_d + T_{ff})} (T'_d K_1 + T_{ff} K_7)}{1 + \frac{T_{ff}}{T'_d} \left(1 - \frac{K_3 K_1 K_6}{K_5} \right)}$$

式中, $K_7 = K_1 - K_2 K_3 K_4 = S_{Eq}$; $T'_d = K_3 T'_{d0}$ 。

$K_{U\max}$ 随 δ 的变化, 如图 5.37 中曲线 3 所示。可见, K_U 的允许范围比 $T_{ff} = 0$ 时要大得多, 而且 T_{ff} 越大, K_U 的允许范围也越大。另外, 由于 $\delta > 90^\circ$ 时 $S_{Eq} < 0$, 所以由 $S_{E'q} + (T_{ff}/T'_d) S_{Eq} = 0$ 确定的极限角 δ_{\max} 比由 $S_{E'q} = 0$ 所确定的要小一些, T_{ff} 越大, δ_{\max} 则更小些。

装设自动励磁调节器的目的, 除了提高静态稳定性外, 还希望能自动保持发电机端电压不变或基本不变, 所以 K_U 要取得足够大。但 K_U 越大, 静态稳定所允许的最大 δ 值越小, 例如取 $K_U = K_{U2}$, 如图 5.37 所示, 当运行角 $\delta > \delta_{mc}$ (对应于 C 点) 时, 由于 $K_{U2} > K_{U\max}$, 系统将发生增幅振荡而不能保持稳定。关于静态稳定功率极限, 则与 K_U 的大小有关, 可按照例 5.4 中的方法进行计算。现在讨论一种特殊情况, 即 K_U 取得足够大, 能够保持 $U_G \approx U_{G0}$, 使发电机端电压基本不变 (设 $K_U = K_{U2}$), 则输电功率增加时, 运行点将沿着图 5.36 中 $U_G = U_{G0}$ 恒定的功率特性 P_{UG} 上移动。对应于 (P_{m3}, δ_{mc}) 的运行点 ⑤ 点, 由该点相应的 E'_{q5} 可作 P_{Eq} 特性曲线。在 ⑤ 点虽然 $S_{E'q} + (T_{ff}/T'_d) S_{Eq} > 0$, 但因 $K_{U2} = K_{U\max}$, 所以功率极限为 P_{m5} 。

上面分析的励磁调节器是以机端电压偏差 ΔU_G 为输入信号按比例进行调节的,同样也可用发电机端电流、频率、功率等的偏差作为输入信号。

【例 5.5】 同例 5.4,但励磁机时间常数 $T_{ff} = 1\text{s}$ 。试计算 $K_U = 25$ 时的静态稳定极限功率(发电机 $T_d = 6\text{s}, T'_{d0} = 5\text{s}$)。

【解】 给定不同 δ 角,分别计算 $U_G, E_q, E'_q, P, S = S_{E_q} + (T_{ff}/T'_d)S_{E_q}, K_{U_{\max}}$ 及 $K_{U_{\min}}$ 。计算方法同例 5.4,只是 $K_{U_{\max}}$ 不同。

本例中 $T'_d = T'_{d0}x_{d\Sigma}/x_{d\Sigma} = 5 \times 0.85/1.5 = 2.83\text{s}$

$$K_{U_{\max}} = -\frac{K_1}{K_5} \cdot \frac{1 + \frac{314.2 \times 1^2}{6(1 + 2.83)}(2.83K_1 + K_7)}{1 + \frac{1}{2.83}\left(1 - \frac{K_3K_4K_6}{K_5}\right)}$$

计算结果列表如下:

$\delta(\text{度})$	48.6	60	70	80	91.57	99.78
U_G	1.215	1.208	1.200	1.190	1.177	1.166
E_q	2.000	2.183	2.386	2.630	2.964	3.230
E'_q	1.420	1.454	1.500	1.566	1.668	1.757
P	1.000	1.260	1.495	1.727	1.975	2.122
S	4.190	3.87	3.36	2.57	1.23	0.000
$K_{U_{\max}}$	170.1	129.3	94.5	61.2	25.02	1.229
$K_{U_{\min}}$	-2.18	-1.76	-1.31	-0.76	0.151	1.229

由上表可见, P 由 1.0 上升至 1.727 ($\delta = 80^\circ$) 时, U_G 下降 2%, 所以 $K_U = 25$ 已能基本保持 U_G 不变。由于 K_U 较大, 所以 E'_q 随 δ 增加而增大。当 $\delta = 91.57^\circ$ 时, $K_{U_{\max}} = K_U = 25$, 达到静态稳定极限, $P_{\max} = 1.975$, 稳定储备系数 $K_p = 97.5\%$, 大于例 5.4。

最后, 归纳一下简单电力系统的静态稳定问题。

在图 5.2 所示的简单电力系统中, 发电机采用不同的励磁调节方式时, 静态稳定性能分述如下。设正常运行时输电功率为 P_0 , 功率角为 δ_0 (见图 5.36), 电压、电势为 U_{G0}, E_{q0}, E'_{q0} 。

没有自动励磁调节器 系统受到小干扰时, $E_q = E_{q0}$ 不变, 稳定判据为 $S_{E_q} > 0$ 。图 5.36 中设正常运行点 (0 点) $S_{E_q} > 0$, 所以是静态稳定的。为了分析正常运行状态的稳定程度, 还需要计算稳定功率极限, 这就要增大输电功率, 建立新的稳态运行方式进行检验。设输电功率增大时, E_q 仍保持不变, 则极限

功率为 P_{m1} , 如图 ① 点所示。该点 $S_{Eq} = 0$, 极限角 $\delta_m = 90^\circ$, 凸极发电机略小于 90° 。失去稳定的形式是非周期性的。

如果增加输电功率时, 用人工调节励磁保持 $U_G = U_{G0}$ 不变, 则新的稳态运行点将在 $U_G = U_{G0}$ 的功率特性 P_{UG} 上移动, 其稳定性仍由 $S_{Eq} > 0$ 判断。极限功率 P_{m2} 对应于 $S_{Eq} = 0$ 的 ② 点, 极限角仍为 90° 。

发电机有老式的慢速自动电压调节器 这种调节器的时间常数(即图 5.28 中 T_T)非常大, K_U 也足够大, 能够保持稳态运行时 $U_G = U_{G0}$ 不变, 但在小扰动暂态过程中则来不及动作, 所以静态稳定仍由 $S_{Eq} > 0$ 判断。稳定极限功率仍为 ② 点, 失去稳定的形式也是非周期性的。

发电机有比例型励磁调节器 对于 T_{ff} 很小的快速励磁系统, 当 $K_{Umin} < K_U < K_{Umax}$ 时, 静态稳定判据为 $S_{Eq} > 0$ 。如取 $K_U = K_{Umax}$, 则能保持 $E'_q = E'_{q0}$ 不变, 功率特性为 $P_{E'q}(E'_q = E'_{q0})$, 稳定极限由 $S_{Eq} = 0$ 确定, 如图中的 ③ 点, 其效果相当于使发电机的电抗由 x_d 降低为 x'_d 。对于常规励磁系统, K_U 适当时, 稳定判据为 $S_{E'q} + (T_{ff}/T'_d)S_{Eq} > 0$, 也可近似用 $S_{E'q} > 0$ 判断。通常 K_U 取得较大, 能保持 U_G 基本不变, 这时稳定极限角取决于 $K_{Umax} = K_U$ 时的 δ_{mc} , 如图中 ⑤ 点所示。稳定破坏形式是负阻尼振荡, 振荡频率一般约几个 Hz, 属于低频振荡。

发电机有复式励磁装置 这种励磁调节设备可看作由两部分构成: 其一是比例调节器, 常用按电流偏差比例控制; 另一是电压校正器, 相当于慢速、高放大系数的电压调节器, 用于控制稳态电压。当比例调节器 K_U 取值适当时, 可近似地用 $S_{E'q}$ 判断稳定性, 静态稳定极限由 $S_{E'q} = 0$ 时 P_{UG} 特性上的 ⑥ 点确定。

发电机具有电力系统稳定装置 PSS(power system stabilizer) 这种励磁调节器是在按电压偏差控制的基础上, 再引入一附加镇定信号(即图 5.27 中的其他信号)。常用的镇定信号有发电机转速增量 $\Delta\omega$ 、机端频率增量 Δf 、电磁功率增量 ΔP_E 等。PSS 的作用是提供正值阻尼, 平息低频振荡, 所以不但能控制 U_G 不变, 而且扩大静态稳定区域。理论上, 稳定功率极限可以提高到 P_{UG} 曲线的顶点, 即图 5.36 中 ⑦ 点, 其效果相当于使发电机电抗降到零。PSS 实现较方便且效果好, 所以得到广泛使用。

此外, 还有一种强力励磁调节器, 它除了按某些变量的偏差比例调节外, 还按电流、电压等的一次及二次导数进行控制, 对静态稳定的作用和 PSS 相似。该调节器比较复杂, 使用得不多。

由上述分析可知, 具有比例型励磁调节器的单机-无穷大功率系统, 静态稳定极限可达到图 5.36 中的 ③、⑤ 或 ⑥ 点, 在工程简化计算中, 一般可按 ③

点估计极限功率,也就是认为 $E'_q = E'_{q0}$ 不随 δ 改变而变化。在这种情况下,发电机可用电势为 E'_q 、电抗为 x'_d 的模型表示。为了进一步简化,发电机还可用 $E' - x'_d$ 模型表示,认为小干扰时 E' 不变,功率方程用简单的式(5.37)表示。这是因为 $E' \approx E'_q$,而且小干扰时这两个电势以及 δ' 和 δ 的变化规律相当接近。发电机的这两种模型也可推广应用到多机电力系统静态稳定的简化分析。

5.3.4 多机电力系统静态稳定的简化分析

由于电力系统中各发电机都有自动励磁调节器,所以发电机用 $E' - x'_d$ 模型。多机电力系统的功率方程式已示于式(5.40)。下面以两机系统为例说明静态稳定的近似分析方法。它可以很方便地推广到更复杂的系统。

图 5.11 表示两机系统,在发电机 G_1 的母线上的负荷用恒定阻抗 Z_D 表示,发电机电势 E'_1 和 E'_2 为恒定值,相对于同步参考轴的角度为 δ_1 和 δ_2 。发电机送出的功率为 P_{E_1} 和 P_{E_2} 。

在图 5.11(a) 中把中间负荷 Z_D 的节点消去,使系统只包含发电机 1、2 两个节点。发电机输出的电磁功率如式(5.41)和(5.42)和图 5.11(b) 所示。

$$P_{E1} = E'^2_1 G_{11} + E'_1 E'_2 |Y_{12}| \sin(\delta_{12} + \beta_{12})$$

$$P_{E2} = E'^2_2 G_{22} - E'_1 E'_2 |Y_{12}| \sin(\delta_{12} - \beta_{12})$$

电磁功率是两机相对角度 $\delta_{12} = \delta_1 - \delta_2$ 的函数。现将转子运动方程用相对角 $\Delta\delta_{12}$ 表示(以 δ_2 为参考轴):

$$\frac{d\Delta\delta_{12}}{dt} = (\Delta\omega_1 - \Delta\omega_2)\omega_0 \quad (5.132)$$

$$\frac{d\Delta\omega_1}{dt} = -\frac{1}{T_{J1}} \frac{dP_{E1}}{d\delta_{12}} \Delta\delta_{12} \quad (5.133)$$

$$\frac{d\Delta\omega_2}{dt} = -\frac{1}{T_{J2}} \frac{dP_{E2}}{d\delta_{12}} \Delta\delta_{12} \quad (5.134)$$

式中

$$\frac{dP_{E1}}{d\delta_{12}} = E'_1 E'_2 |Y_{12}| \cos(\delta_{12} + \beta_{12})$$

$$\frac{dP_{E2}}{d\delta_{12}} = -E'_1 E'_2 |Y_{12}| \cos(\delta_{12} - \beta_{12})$$

式(5.132) ~ (5.134) 的特征方程式为

$$p^3 + p\omega_0 \left(\frac{1}{T_{J1}} \frac{dP_{E1}}{d\delta_{12}} - \frac{1}{T_{J2}} \frac{dP_{E2}}{d\delta_{12}} \right) = 0 \quad (5.135)$$

特征根为

$$p_1 = 0$$

$$P_{2,3} = \pm \sqrt{-\omega_0 \left(\frac{1}{T_{J1}} \frac{dP_{E1}}{d\delta_{12}} - \frac{1}{T_{J2}} \frac{dP_{E2}}{d\delta_{12}} \right)} \quad (5.136)$$

出现一个零根是因为未计及阻尼作用,若计及阻尼则该零根将变为负实根。稳定判据为

$$\frac{1}{T_{J1}} \frac{dP_{E1}}{d\delta_{12}} - \frac{1}{T_{J2}} \frac{dP_{E2}}{d\delta_{12}} > 0 \quad (5.137)$$

如果满足上述条件, $p_{2,3}$ 为一对共轭虚根,小干扰后系统发生等幅振荡。如考虑系统的阻尼因素,振荡将是衰减的,系统是静态稳定的;如不满足上述条件,则将出现一个正实根,系统将非周期地失去稳定。

从图 5.11(b) 可见,两台发电机都有各自的功率极限角,系统的稳定极限角则在这两台发电机功率极限角的中间

$$\delta_{12m} = \arctan \left(\frac{\cos \beta_{12}}{\sin \beta_{12}} \times \frac{1+m}{1-m} \right) \quad (5.138)$$

式中, $m = T_{J1}/T_{J2}$ 。

所以,两机系统的稳定极限角不仅与系统元件的导纳角的余角(β_{12})有关,而且还与两机的惯性时间常数之比有关。

对于有 3 台或更多发电机的电力系统,一般不能得到稳定判据的关系式,只能求得特征方程各根的数值解,用以判断该运行方式是否静态稳定。

5.4 电力系统暂态稳定

5.4.1 基本假定

电力系统遭受大干扰后,由于发电机转子上机械转矩与电磁转矩不平衡,使同步电机转子间相对位置发生变化,即发电机电势间相对角度发生变化,从而引起系统中电流、电压和电磁功率的变化。电力系统暂态稳定就是研究电力系统在某一运行方式,遭受大干扰后,并联运行的同步发电机间是否仍能保持同步运行、负荷是否仍能正常运行的问题。在各种大干扰中以短路故障最为严重,所以通常都以此来检验系统的暂态稳定。

为了简化电力系统暂态稳定的计算,同时又要抓住问题的主要方面,所以在计算中要忽略一些影响不大的因素或对它们作近似的考虑。在计算中一般

的基本假设有:

(1) 电力系统机电暂态过程在很大程度上决定于系统的机械状态(原动机调速器的动作、发电机转子空间位置角等),而机械过程的进行速度要比电磁过程的进行速度缓慢得多,因此在机电暂态过程分析中,可以把电磁参量(电压、电流、磁链和功率等)看作是突变的。根据这样假定,实际上是不计发电机和其他元件的电流或电压的直流分量及与其相对应的转子中的周期分量。

(2) 不计定子电流的直流和谐波分量以及转子电流的周期分量,也意味着忽略由于定子直流和谐波分量以及转子直流电流所产生的磁场间的脉动转矩。因为这个转矩的平均值接近于零,对转子运动的影响可以忽略。

(3) 在具有阻尼绕组的电机中,由于次暂态分量衰减得很快,一般可以不计其影响。

(4) 在高压电网中发生不对称短路故障时,在发电机中性点不接地或升降变压器为 $\Delta-Y$ 接法时,零序分量电流不流过定子绕组,即使流过定子绕组,也由于三相零序电流不产生发电机气隙的空间磁场,所以对于转子机械运动无影响。同理,负序电流在空间产生与转子旋转方向相反的旋转磁场,它与转子磁场相互作用所产生的二倍基本频率脉动转矩的平均值为零,所以也可不计负序电流的影响。总之,只考虑基波正序分量,因此,电力网可用正序增广网络表示。

(5) 电力系统受到大干扰后的第一、二个摇摆周期内,各发电机转速偏离同步转速不多,可以不考虑频率变化对参数的影响,各元件参数均按额定频率计算。同时由于调速器惯性大,可以近似地认为调速器不动作,从而可假定机械转矩(功率)保持不变。

(6) 由于受到大干扰时发电机励磁绕组的磁链不会突变,与其成正比的 E'_q 也不会突变,且在几秒内变化很小,而且大干扰后在强行励磁作用下,使 E'_q 更接近常数。所以简化分析时发电机可采用 $E'_q = \text{恒定}$ 的模型。由于 E' 与 E'_q 差别不大且变化规律相近,在实用计算中,进一步可假定 E' 为恒定。这样,不论凸极或隐极发电机模型均可简化为用 E' 和 x_d' 表示。

5.4.2 基本分析方法

暂态稳定是研究电力系统受大干扰后的行为,干扰前后的运行状态变量偏差较大(如发生短路故障,则网络结构也发生变化),所以不能像静态稳定那样采用小干扰法,把方程线性化,而只能采用数值解法。常用的有分段计算法,

改进欧拉法, 隐式积分法等, 这里介绍改进欧拉法, 并结合下面的叙述介绍分段算法, 至于隐式积分法可参阅有关参考书。

数值解法是用来求解非线性微分方程式

$$\frac{dx}{dt} = f(x) \quad (5.139)$$

从已知的初始状态 ($t = 0, x = x_0$) 开始, 离散地逐点求出和某一时间序列 t_0, t_1, \dots, t_m 相对应的近似值 x_0, x_1, \dots, x_m , 该法称为逐步计算法。一般 t_0, t_1, \dots, t_n 间取成等步长, 即 $t_1 - t_0 = t_2 - t_1 = \dots = \Delta t = h$ 。

下面先以欧拉法为例说明逐步计算法的基本概念。

已知一阶微分方程 $\frac{dx}{dt} = f(x)$, 当 $t = 0$ 时 $x = x_0$, 求 $x = g(t)$ 。如图 5.38 所示, $x = g(t)$ 为方程的正确解。

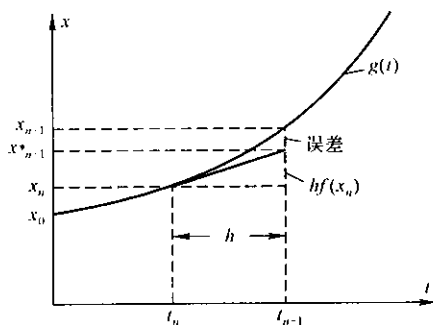


图 5.38 欧拉法求解示意图

如已知 t_n 时刻的 x 值为 x_n , 要求下一个时刻 t_{n+1} 的 x 值 x_{n+1} 。当 h 取得很小时, 可以用泰勒级数表示:

$$x_{n+1} = x_n + hf(x_n) + \frac{h^2}{2!}f'(x_n) + \frac{h^3}{3!}f''(x_n) + \dots \quad (5.140)$$

忽略二次以上的高次项得 x_{n+1} 的近似值

$$x_{n+1}^* = x_n + hf(x_n) \quad (5.141)$$

从图 5.38 可见 x_{n+1}^* 的近似值与 x_{n+1} 的正确值之间存在误差, 这是由于忽略了 h^2 以后各项而引起的。设在整个计算区间 $[0, t_m]$ 内, $\frac{d^2x}{dt^2} = f'(t)$ 的最大值为 M , 则从 n 点推算到 $n+1$ 点引起的局部截断误差

$$E_{n+1} \leq \frac{M}{2}h^2 \quad (5.142)$$

应该指出, 在计算 x_{n+1} 之前, x_n 本身已带有误差, 因此, 除了局部截断误差外, 还应加上 x_n 本身误差。这个误差叫做全局截断误差, 可以证明它与步长

h 成正比。可见,选择较小的步长 h 可以减少误差。但是,由于取小步长后,将使计算机的运算工作量与步长成反比增加,而由于计算机有效位数的限制而引起的舍入误差则增加,图 5.39 表示误差与步长的关系。

欧拉法的特点是用一系列折线来逼近精确解,算式简单,计算量少,但不够精确,一般不能满足工程计算的精度。为此,下面进一步介绍改进欧拉法。

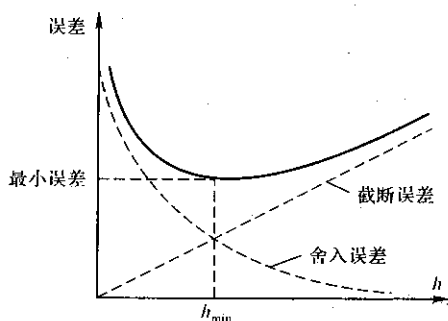


图 5.39 误差与步长的关系

如取式(5.140)的前三项,而忽略 h^3 以上项,则可得

$$\begin{aligned}
 x_{n+1} &= x_n + hf(x_n) + \frac{h^2}{2!}f'(x_n) \\
 &= x_n + hf(x_n) + \frac{h^2}{2!} \frac{\Delta f}{\Delta t} \\
 &= x_n + hf(x_n) + \frac{h^2}{2!} \left[\frac{f(x_{n+1}) - f(x_n)}{h} \right] \\
 &= x_n + h \frac{f(x_n) + f(x_{n+1})}{2}
 \end{aligned} \tag{5.143}$$

由式(5.143)可见,右端也含有未知数 x_{n+1} ,所以,式(5.143)是一个隐式方程,一般要用迭代法求解。其步骤如下:

(1) 先用欧拉法估计一个 $x_{n+1}^{(0)}$

$$x_{n+1}^{(0)} = x_n + hf(x_n)$$

(2) 求出第一次修正值

$$x_{n+1}^{(1)} = x_n + \frac{h}{2} [f(x_n) + f(x_{n+1}^{(0)})]$$

(3) 求出第二次修正值

$$x_{n+1}^{(2)} = x_n + \frac{h}{2} [f(x_n) + f(x_{n+1}^{(1)})]$$

(4) 求出第三次修正值

$$x_{n+1}^{(3)} = x_n + \frac{h}{2} [f(x_n) + f(x_{n+1}^{(2)})]$$

⋮

每次计算后校验前后两次修正值之差,并将其与某一个希望的值 ϵ 相比,如果小于 ϵ 则迭代结束。

改进欧拉法的局部截断误差正比于 h^3 ,而全局截断误差成比于 h^2 。一般取

步长 h 为 0.01s 或 0.05s。

5.4.3 简单电力系统的暂态稳定

1. 正序增广网络及各种运行情况下的功率特性

(1) 正序增广网络

根据基本假设,在发生不对称故障时,不计零序电流和负序电流对暂态过程的影响,而只考虑基频正序电流的影响。电力系统不对称故障的正序分量电流可以用正序增广网络求得,即在正序网的故障点接上一个附加阻抗 ΔZ ,如不计电阻,则接上一个附加电抗 Δx ,该电抗随故障形式不同而异。如图 5.40(c) 为图 5.40(a) 所示简单系统在 K 点发生不对称短路故障时的正序增广网(见第 4 章 4.6.1 节)。

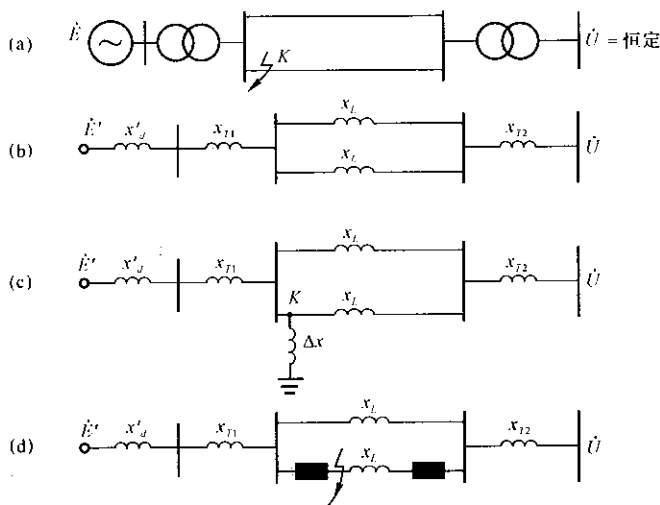


图 5.40 简单系统在各种运行情况下的等值电路

(2) 各种运行情况下的功率特性

正常运行时的功率方程为

$$P_1 = \frac{E'U}{x_1} \sin \delta = P_{1m} \sin \delta \quad (5.144)$$

式中

$$x_1 = x'_d + x_{T1} + x_L/2 + x_{T2}$$

在 K 点发生不对称故障时功率方程为

$$P_1 = \frac{E'U}{x_1} \sin \delta = P_{1m} \sin \delta \quad (5.145)$$

式中 $x_1 = x_d' + x_{T1} + \frac{x_L}{2} + x_{T2} + \frac{(x_d' + x_{T1})(x_L/2 + x_{T2})}{\Delta x}$

(3) 切除故障线路后的功率方程

$$P_1 = \frac{E'U}{x_1} \sin \delta = P_{1m} \sin \delta \quad (5.146)$$

式中 $x_1 = x_d' + x_{T1} + x_L + x_{T2}$

由于 $x_1 < x_i$, 所以故障后的功率特性要比正常时低。当切除一回故障后, x_1 一般在 x_i 和 x_1 之间, 即 $x_i < x_1 < x_i$, 因此, 三种情况下 $P_{1m} > P_{im} > P_{im}$, 如图 5.41 所示。

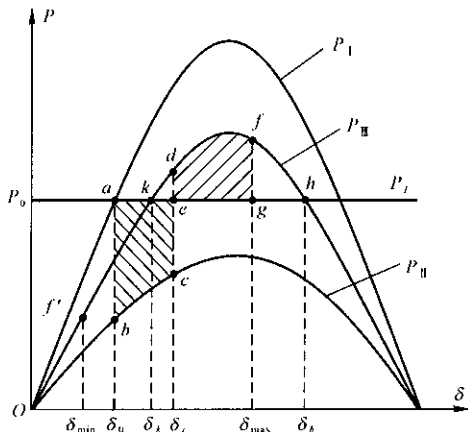


图 5.41 功率特性及面积定则

2. 大干扰后发电机转子的运动情况

如图 5.41 所示, 正常运行点为 a 点, 对应于 δ_0 。故障后假定调速器不动作, $P_T = P_0$, 由于 δ 不会突变, 所以故障瞬间运行点由 a 跳到 b 点。这时 P_T 大于在 P_1 曲线上相应的电磁功率, 所以转子加速, δ 角增大, 运行点沿 P_1 曲线移至 c 点。设在这一瞬间故障切除, 运行点即跳到 P_1 曲线上的 d 点。此时在 P_1 曲线上相应 d 点的电磁功率大于 P_T , 转子开始减速, 一直到 f 点, 角速度 $\omega = \omega_0$ 。此后过程沿 $f-d-k-f'$ 进行, 以 k 点为中心来回振荡, 考虑到阻尼作用的存在, 最后电力系统在 k 点稳定运行, 在整个过程中角度最大到达 δ_{\max} 。

3. 等面积定则

当不考虑振荡时的能量损耗时, 可以根据等面积定则确定最大摇摆角 δ_{\max} 。从对图 5.41 的分析可知, 功角由 δ_0 变化到 δ_c 过程中 P_T 大于电磁功率, 使发电机加速, 多余的能量转变为转子的动能而储存在转子中; 但当功角由 δ_c 向 δ_{\max} 增大过程中, 发电机的电磁功率大于 P_T , 使转子减速, 并释放转子储存

的动能。

转子由 δ_0 到 δ_c 变动时,过剩转矩所做的功为

$$A_a = \int_{\delta_0}^{\delta_c} \Delta M_a d\delta = \int_{\delta_0}^{\delta_c} \frac{\Delta P_a}{\omega} d\delta \quad (5.147)$$

考虑到 $\omega \approx 1$, 所以

$$\begin{aligned} A_a &= \int_{\delta_0}^{\delta_c} \Delta P_a d\delta = \int_{\delta_0}^{\delta_c} (P_T - P_1) d\delta \\ &= \int_{\delta_0}^{\delta_c} P_T d\delta - \int_{\delta_0}^{\delta_c} P_1 d\delta = \text{面积 } abcea \end{aligned} \quad (5.148)$$

式中,面积 $abcea$ 称为加速面积,即为转子动能的增量。

当转子由 δ_c 变动到 δ_{\max} 时,转子过剩转矩所做的功为

$$\begin{aligned} A_a &= \int_{\delta_c}^{\delta_{\max}} \Delta M_a d\delta = \int_{\delta_c}^{\delta_{\max}} \Delta P_a d\delta = \int_{\delta_c}^{\delta_{\max}} (P_T - P_1) d\delta \\ &= \text{面积 } edfge \end{aligned} \quad (5.149)$$

由于 $P_T - P_1 < 0$, 所以上式积分为负值,即动能增量为负值,说明转子动能减少,转速下降。

当功角达到 δ_{\max} 时,转子转速 $\omega = \omega_0$,说明在加速期间积蓄的动能增量全部耗尽,即加速面积等于减速面积,

$$\text{面积 } abcea = \text{面积 } edfge \quad (5.150)$$

从图 5.41 可以看出,最大减速面积为 $edfhe$,如果该面积小于加速面积 $abcea$ 时,系统就要失去稳定。减速面积的大小与故障切除角 δ_c 有很大关系, δ_c 越小,减速面积就越大。当在某个角度 δ_{cm} 切除故障时,使最大可能减速面积刚好等于加速面积,则 δ_{cm} 称为极限切除角。利用下面等式很容易求出极限切除角 δ_{cm}

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{cm}} (P_T - P_1) d\delta = \int_{\delta_{cm}}^{\delta_h} (P_1 - P_T) d\delta \quad (5.151)$$

$$\text{式中} \quad \delta_h = \pi - \arcsin \frac{P_T}{P_{1m}} (\text{rad})$$

从上式可得

$$\delta_{cm} = \arccos \frac{P_T(\delta_h - \delta_0) + P_{1m} \cos \delta_h - P_{1m} \cos \delta_0}{P_{1m} - P_{1m}} \quad (5.152)$$

为了保证系统稳定,要求实际切除角 $< \delta_{cm}$,但是在继电保护装置整定时需要知道与 δ_{cm} 对应的切除时间 t_{cm} ,要确定 t_{cm} 必须知道功角随时间变化的特性 $\delta = f(t)$,所以,需要求解转子运动方程式。

4. 发电机转子运动方程的求解

(1) 分段计算法

对于简单电力系统,转子运动方程式为:

$$\frac{T_J}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_T - P_E$$

或

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{T_J} (P_T - P_m \sin\delta) \quad (5.153)$$

上式中 $\frac{d^2\delta}{dt^2} = \alpha$ 为角加速度, P_m 的大小在正常运行、短路运行和切除故障后是不同的。

应用分段算法时,先将发电机摇摆过程分成一系列时间小段 Δt ,再逐一计算每段时间内角度增量 $\Delta\delta$ 。

在刚短路时,发电机产生了过剩功率 $\Delta P_{(0)}$ 。在时间段取得较小时,可以假设在一个时间段内过剩功率 $\Delta P_{(0)}$ 恒定不变,因而该时段内的角加速度 $\alpha_{(0)} = \frac{\omega_0}{T_J} \Delta P_{(0)}$ 也认为是恒定不变。依照等加速运动的算式,可以求得第一时段末发电机的速度和角度的增量 $\Delta\omega_{(1)}$ 和 $\Delta\delta_{(1)}$ 。

$$\Delta\omega_{(1)} = \Delta\omega_{(0)} + \alpha_{(0)} \Delta t$$

$$\Delta\delta_{(1)} = \Delta\omega_{(0)} \Delta t + \frac{1}{2} \alpha_{(0)} \Delta t^2$$

在突然短路时,发电机的速度不会突变,所以 $\Delta\omega_{(0)} = 0$,于是

$$\Delta\omega_{(1)} = \alpha_{(0)} \Delta t \quad (5.154)$$

$$\Delta\delta_{(1)} = \frac{1}{2} \alpha_{(0)} \Delta t^2 = \frac{1}{2} \frac{\omega_0}{T_J} \Delta P_{(0)} \Delta t^2 \quad (5.155)$$

在式(5.155)中, $\omega_0 = 2\pi f(\text{rad})$, $\Delta P_{(0)}$ 是标么值, T_J 、 t 、 Δt 的单位是 s,而在实用计算中角度通常用度来表明,所以式(5.155)可改写为

$$\Delta\delta_{(1)} = \frac{1}{2} \frac{360f}{T_J} \Delta P_{(0)} \Delta t^2 = \frac{1}{2} K \Delta P_{(0)} \quad (5.156)$$

式中, $K = \frac{360f}{T_J} \Delta t^2$, 是一个常数。

知道了第一个时间段中角度增量,即可求出第一个时段末时,也即第二个时间段开始时的角度值。

$$\delta_{(1)} = \delta_0 + \Delta\delta_{(1)}$$

有了新的值 $\delta_{(1)}$ 的值后,即可以确定第二个时间段中的过剩功率

$$\Delta P_{(1)} = P_T - P_m \sin\delta_{(1)}$$

在第二个时间段内的角加度为 $\alpha_{(1)} = \frac{\omega_0}{T_J} \Delta P_{(1)}$, 这样就可求出第二个时间

段(或以后时间段)末的角度增量,

$$\Delta\delta_{(2)} = \Delta\omega_{(1)}\Delta t + \frac{1}{2}\alpha_{(1)}\Delta t^2 \quad (5.157)$$

上式中的 $\Delta\omega_{(1)}$ 是按 $\alpha_{(0)}$ 求得。因为在第一时段内的 $\Delta P_{(0)}$ 是在变化着的,因而 $\alpha_{(0)}$ 也是略有变化的。为了提高计算精度,取时间段初和时间段末的加速度的平均值 $\alpha_{(0)av}$ 来求第一时段末的速度,即

$$\Delta\omega_{(1)} = \alpha_{(0)av}\Delta t = \frac{\alpha_{(0)} + \alpha_{(1)}}{2}\Delta t \quad (5.158)$$

将式(5.158)代入式(5.157),得

$$\Delta\delta_{(2)} = \frac{\alpha_{(0)} + \alpha_{(1)}}{2}\Delta t \cdot \Delta t + \frac{1}{2}\alpha_{(1)}\Delta t^2 = \Delta\delta_{(1)} + K\Delta P_{(1)}$$

第二个时间段末的角度

$$\delta_{(2)} = \delta_{(1)} + \Delta\delta_{(2)}$$

求出 $\delta_{(2)}$ 后,可以求得 $\Delta P_{(2)}$,并求出第三时间段的角增量

$$\Delta\delta_{(3)} = \Delta\delta_{(2)} + K\Delta P_{(2)}$$

如果故障在第 k 个时段开始(即第 $k-1$ 个时间段末)时切除,此时,电磁功率曲线由 P' 突然变为 P'' ,因此过剩功率从 $\Delta P'_{(k-1)} = P_0 - P'_m \sin\delta_{(k-1)}$ 突然变为 $\Delta P''_{(k-1)} = P_0 - P''_m \sin\delta_{(k-1)}$,如图 5.42 所示。此时,可取过剩功率的平均值作为计算第 k 个时间段的角增量,即

$$\Delta\delta_{(k)} = \Delta\delta_{(k-1)} + K \frac{\Delta P'_{(k-1)} + \Delta P''_{(k-1)}}{2} \quad (5.159)$$

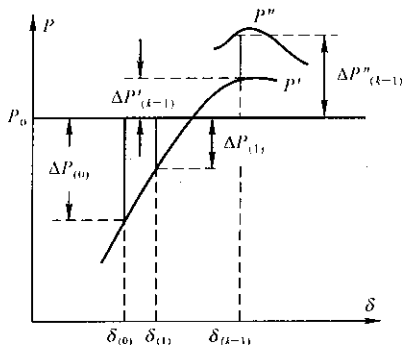


图 5.42 电磁功率突变图

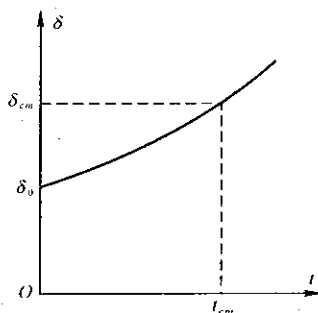


图 5.43 极限切除时间的计算

根据上述计算方法可作出角度随时间变化曲线,如图 5.43 所示。再由极限切除角 δ_{cm} ,求出相应的极限切除时间 t_{cm} 。实际切除时间必须小于 t_{cm} 才能保证稳定。

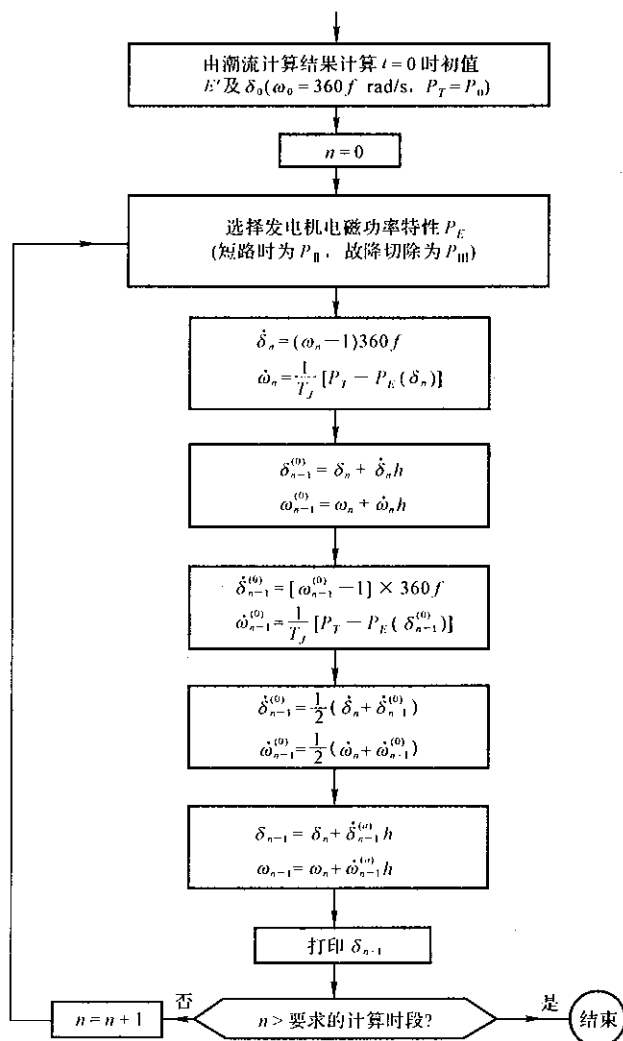


图 5.44 用改进欧拉法计算 $\delta = f(t)$ 曲线

(2) 改进欧拉法

前面已介绍过改进欧拉法的原理。对于简单电力系统发电机转子运动方程式，一般用两个一阶微分方程来描述，可以同时两个一阶微分方程式求解。在电力系统实际计算时，对一个时段，一般只迭代一次就认为满足要求，因此，可以大大节约计算时间，而又能符合工程上要求。图 5.44 给出了用改进欧拉法求解发电机转子运动方程的计算机流程框图。图中

$$\dot{\delta} = \frac{d\delta}{dt}, \quad \dot{\omega} = \frac{d\omega}{dt}, \quad \text{步长 } h = \Delta t。$$

【例 5.6】 图 5.40(a) 简单系统短路故障后的电磁功率特性表示式为 $P_E = 0.504\sin\delta$, $T_J = 8.18\text{s}$, $P_T = P_0 = 1$, $\delta_0 = 34.53^\circ$, 试用改进欧拉法计算 $\delta = f(t)$ 曲线(计算三个时段, 取 $h = 0.05\text{s}$)。

【解】 令 $\Delta\omega = \frac{d\delta}{dt}$, $\alpha = \frac{d\omega}{dt}$ 。已知 $t = 0$ 时 $\omega = \omega_{(0)} = 1$ 。

(1) 计算第一时段末(即 $t = 0.05\text{s}$ 时)的角度

第一时段开始时的 δ 和 ω 的变化率为

$$\Delta\omega_0 = (\omega_{(0)} - 1) \times 360f = 0$$

$$\begin{aligned}\alpha_0 &= \frac{1}{T_J}(P_T - P_m \sin\delta_0) \\ &= \frac{1}{8.18}(1 - 0.504\sin 34.53^\circ) = 0.0873\end{aligned}$$

第一时段末 δ 和 ω 的估计值:

$$\delta_1^{(0)} = \delta_0 + \Delta\omega_0 h = 34.53^\circ + 0 = 34.53^\circ$$

$$\omega_1^{(0)} = \omega_{(0)} + \alpha_0 h = 1 + 0.0873 \times 0.05 = 1.00436$$

相应于 $\delta_1^{(0)}$ 和 $\omega_1^{(0)}$ 时的变化率为

$$\begin{aligned}\Delta\omega_1^{(0)} &= (\omega_1^{(0)} - 1) \times 360f \\ &= (1.00436 - 1) \times 18000 = 78.48\end{aligned}$$

$$\alpha_1^{(0)} = \frac{1}{8.18}(1 - 0.504\sin 34.53^\circ) = 0.0873$$

第一时段中 δ 和 ω 的平均变化率为

$$\Delta\omega_1^{(a)} = 0.5(\Delta\omega_0 + \Delta\omega_1^{(0)}) = 0.5(0 + 78.48) = 39.24$$

$$\alpha_1^{(a)} = 0.5(\alpha_0 + \alpha_1^{(0)}) = 0.5(0.0873 + 0.0873) = 0.0873$$

所以, 第一时段末的 δ 和 ω 值为

$$\delta_1 = \delta_0 + \Delta\omega_1^{(a)} h = 34.53^\circ + 39.24 \times 0.05 = 36.49^\circ$$

$$\omega_1 = \omega_0 + \alpha_1^{(a)} h = 1 + 0.0873 \times 0.05 = 1.00436$$

(2) 计算第二时间段末的角度 δ_2

$$\Delta\omega_1 = (\omega_1 - 1) \times 18000 = (1.00436 - 1) \times 18000 = 78.48$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{8.18}(1 - 0.504\sin 36.49^\circ) = 0.0856$$

$$\delta_2^{(0)} = \delta_1 + \Delta\omega_1 h = 36.49^\circ + 78.48 \times 0.05 = 40.41^\circ$$

$$\omega_2^{(0)} = \omega_1 + \alpha_1 h = 1.00436 + 0.0856 \times 0.05 = 1.00864$$

$$\Delta\omega_2^{(0)} = (\omega_2^{(0)} - 1) \times 18000$$

$$= (1.00864 - 1) \times 18000 = 155.52$$

$$\alpha_2^{(0)} = \frac{1}{8.18}(1 - 0.504\sin 40.41^\circ) = 0.0823$$

$$\Delta\omega_2^{(a)} = 0.5(78.48 + 155.52) = 117$$

$$\alpha_2^{(a)} = 0.5(0.0856 + 0.0823) = 0.08395$$

$$\delta_2 = \delta_1 + \Delta\omega_2^{(a)}h = 36.49^\circ + 117 \times 0.05 = 42.34^\circ$$

$$\omega_2 = \omega_1 + \alpha_2^{(a)}h = 1.00436 + 0.08395 \times 0.05 = 1.00856$$

(3) 计算第三时段末的角度 δ_3

$$\begin{aligned}\Delta\omega_2 &= (\omega_2 - 1) \times 18000 = (1.00856 - 1) \times 18000 \\ &= 154.08\end{aligned}$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{8.18}(1 - 0.504\sin 42.34^\circ) = 0.081$$

$$\delta_3^{(0)} = 42.34 + 154.08 \times 0.05 = 50.044^\circ$$

$$\omega_3^{(0)} = 1.00856 + 0.081 \times 0.05 = 1.0126$$

$$\Delta\omega_3^{(0)} = (1.0126 - 1) \times 18000 = 226.8$$

$$\alpha_3^{(0)} = \frac{1}{8.18}(1 - 0.504\sin 50.044^\circ) = 0.07502$$

$$\Delta\omega_3^{(a)} = 0.5(154.08 + 226.80) = 190.44$$

$$\alpha_3^{(a)} = 0.5(0.081 + 0.0752) = 0.07801$$

$$\delta_3 = 42.34^\circ + 190.44 \times 0.05 = 51.86^\circ$$

$$\omega_3 = 1.00856 + 0.07801 \times 0.05 = 1.0125$$

5.4.4 考虑发电机 E'_q 变化时的暂态稳定计算

在前面的分析中,假定 E'_q 为恒定是一种近似的简化计算方法。事实上, E'_q 在 $t = 0$ 时是不突变的,但在随后的过程中将逐渐变化,如果大干扰时发电机端电压低于某一值以致强行励磁动作, E'_q 的变化也有所不同。由于 E'_q 变化,所以电磁功率也发生变化,暂态过程也有所不同。以下分析中设强行励磁立即动作。

此时,对于图 5.40(a) 的简单系统,发电机有下列 4 个一阶微分方程:

励磁机(计及强行励磁):

$$T_{ff} \frac{dE_{qc}}{dt} = E_{q\max} - E_{qc} \quad (5.160)$$

发电机励磁绕组:

$$T'_{d0} \frac{dE'_q}{dt} = E_{qe} - E_q \quad (5.161)$$

发电机转子运动方程式:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\delta}{dt} &= (\omega - 1)\omega_0 \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{T_J} (P_T - P_E) \end{aligned} \right\} \quad (5.162)$$

式(5.160)中 E_{qe} 与 u_f 相对应, $E_{qe\max}$ 对应于 $u_{f\max}$ 。

上面4个方程中含有 E_q 、 E'_q 、 E_{qe} 、 P_E 、 δ 和 ω , 共6个未知量, 所以还需找到两个方程式才能求解。

这两个方程式是下面两个代数方程。

$$\left. \begin{aligned} E_q &= f(E'_q, \delta) \\ P_E &= g(E_q, \delta) \end{aligned} \right\} \quad (5.163)$$

把式(5.163)代入式(5.161)和式(5.162)中就可以求得 E_{qe} 、 E'_q 、 δ 和 ω 随时间变化的曲线, 从而根据 $\delta-t$ 曲线来判定系统稳定性。

如果大干扰时强行励磁不动作, 则 $E_{qe} = E_{q0}$, 式(5.160)就不需列出。

由于故障时网络结构的变化(如不对称短路, 需在正序网的短路点接上附加阻抗 ΔZ), 使 $E_q = f(E'_q, \delta)$ 表示式变得较为复杂。下面以凸极机为例说明, 如图5.45所示的发电机经复杂电力网与无限大功率电源母线相连, 发电机用 E_Q-x_q 模型表示。经化简, 消去联络结点后, 变为 E_Q 与 U 直接相连的网络如图5.45(c)。

写出电压方程:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_Q Y_{11} + \dot{U} Y_{12} &= \dot{I}_1 \\ \dot{E}_Q Y_{21} + \dot{U} Y_{22} &= \dot{I}_2 \end{aligned} \right\} \quad (5.164)$$

式中, $Y_{11} = y_{10} + y_{12}$, $Y_{22} = y_{20} + y_{21}$, $Y_{12} = Y_{21} = -y_{21} = -y_{12}$

E_Q 、 E_q 、 E'_q 和 I_d 存在下列关系

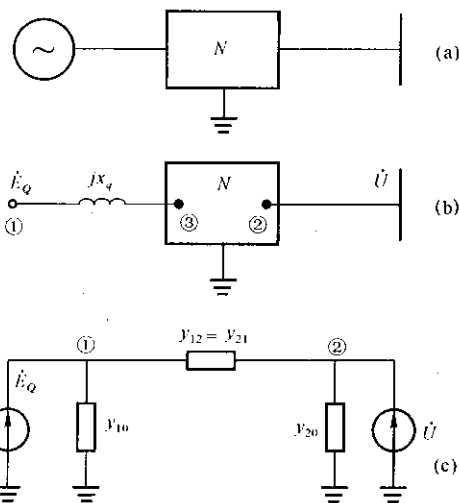


图 5.45 凸极机经复杂网与无限大功率系统相连

$$\left. \begin{aligned} E_q &= E_Q + I_d(x_d - x_q) \\ E'_q &= E_Q - I_d(x_q - x'_d) \end{aligned} \right\} \quad (5.165)$$

设 \dot{E}_Q 与虚轴重合, 则 $\dot{I}_1 = I_d + jI_q$, 所以

$$\begin{aligned} I_d &= \operatorname{Re}(\dot{I}_1) = \operatorname{Re}(\dot{E}_Q Y_{11} + \dot{U} Y_{12}) \\ &= \operatorname{Re}[E_Q \angle 90^\circ |Y_{11}| \angle (90^\circ - \beta_{11}) \\ &\quad + U \angle (90^\circ - \delta) |Y_{12}| \angle (90^\circ - \beta_{12})] \\ &= -E_Q |Y_{11}| \cos \beta_{11} - U |Y_{12}| \cos(\delta + \beta_{12}) \end{aligned} \quad (5.166)$$

$$\begin{aligned} \text{式中} \quad \beta_{12} &= \arctan \frac{G_{12}}{B_{12}} \\ \beta_{11} &= \arctan \frac{G_{11}}{B_{11}} \end{aligned}$$

δ 为 \dot{E}_Q 与 \dot{U} 间的夹角, 即功率角。

将式(5.166)代入式(5.165)并消去 E_Q , 可得到 E_q 与 E'_q 和 δ 的关系。对于隐极机 $E_Q = E_q$, $x_d = x_q$ 可得

$$E_q = \frac{E'_q - (x_d - x'_d)U |Y_{12}| \cos(\delta + \beta_{12})}{1 + (x_d - x'_d) |Y_{11}| \cos \beta_{11}} \quad (5.167)$$

发电机电磁功率方程为

$$P_E = E_q^2 |Y_{11}| \sin \beta_{11} + E_q U |Y_{12}| \sin(\delta + \beta_{12}) \quad (5.168)$$

应用改进欧拉法, 按前述原理可以写出相应的递推算式, 最后求出 $\delta = f(t)$ 曲线。

关于初值问题作一些说明: $t = 0$ 时, 即干扰前瞬时, 各量初值为 $\delta_0, \omega_0, E_{qr0}(= E_{q0}), E'_{q0}, P_{E0}$ 均可从正常运行方式求得。干扰后瞬时 $\delta_0, \omega_0, E_{qr0}, E'_{q0}$ 都不突变, 即 $t = 0^+$ 时, $\delta_{(0)} = \delta_0, \omega_{(0)} = \omega_0, E_{qr(0)} = E_{q0}, E'_{q(0)} = E'_{q0}$ 。而 E_q 及 P_E 要突变, 即 $E_{q(0)} \neq E_{q0}, P_{E(0)} \neq P_{E0}$ 。可以根据 $E'_{q(0)}, \delta_{(0)}$ 用式(5.167)求得 $E_{q(0)}$, 再根据 $E_{q(0)}, \delta_{(0)}$ 用式(5.168)求得 $P_{E(0)}$ 。

当故障切除瞬间($t = t_n$)、 $\delta_{(n)}, \omega_{(n)}, E'_{(n)}, E_{qr(n)}$ 不突变, 可作为 t_{n+} 的初值, 而 $E_{q(n)}$ 和 $P_{E(n)}$ 要突变, 按上述方法可以求出 t_{n+} 的值。

【例 5.7】 有一简单系统的等值电路如图 5.46 所示, 发电机为隐极机, 各元件参数为归算到同一基准值的标么值, 正常运行时: $U = 1$, 送到受端系统母线的 $P_0 = 1, Q_0 = 0.2, T'_{d0} = 5\text{s}, x'_d = 0.295$ 。试按下列两种情况计算暂态稳定(短路后 0.2s 切除故障)。

(A) 强行励磁的励磁电压顶值(最大值)为正常时的 2.5 倍, $T'_{ff} = 0.35\text{s}$ 。

(B) 强行励磁的励磁电压顶值为正常时的 5 倍, $T'_{ff} = 0.2\text{s}$ 。

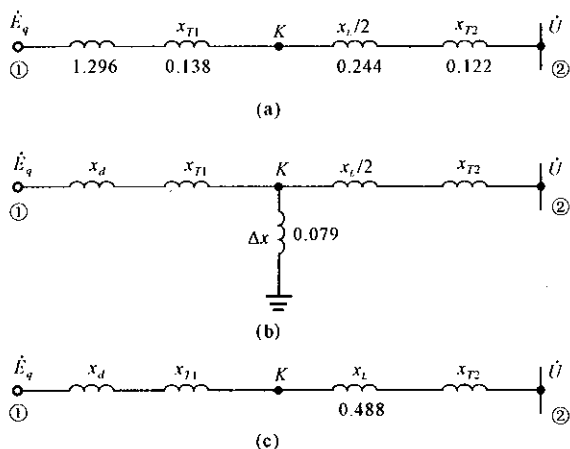


图 5.46 例 5.7 的等值电路

(a) 正常运行时; (b) 短路时正序增广网; (c) 故障线路切除

【解】

(1) 计算正常运行时 E_{q0} , E'_{q0} 和 δ_0

由图 5.46(a) 得

$$x_{12} = 1.296 + 0.138 + 0.244 + 0.122 = 1.8$$

$$E_{q0} = E_{q0} = \sqrt{(1 + 0.2 \times 1.8)^2 + (1 \times 1.8)^2}$$

$$= \sqrt{1.36^2 + 1.8^2} = 2.256$$

$$\delta_0 = \arctan \frac{1.8}{1.36} = 52.93^\circ$$

$$\varphi_0 = \arctan \frac{0.2}{1} = 11.3^\circ$$

$$I_0 = \sqrt{1 + 0.2^2} = 1.02$$

$$E'_{q0} = U \cos \delta_0 + I_0 \sin(\varphi_0 + \delta_0) x'_d$$

$$= \cos 52.93^\circ + 1.02 \times \sin(52.93^\circ + 11.3^\circ) \times 0.799$$

$$= 1.337$$

(2) 短路时和短路切除后的 E_q 和 P_E 表达式

根据图 5.46(b) 等值图, 消去节点 K 得到图 5.47 故障时的等值图。

$$x_{12} = (1.296 + 0.138) + (0.244 + 0.122)$$

$$+ \frac{(1.296 + 0.138)(0.244 + 0.122)}{0.079} = 8.444$$

$$x_{10} = (1.296 + 0.138) + 0.079$$

$$+ \frac{(1.296 + 0.138) \times 0.079}{0.244 + 0.122} = 1.823$$

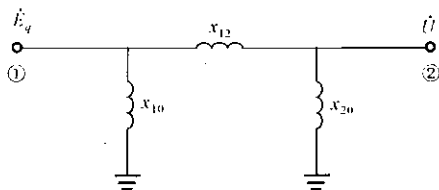


图 5.47 短路后化简等值图

可求得

$$Y_{11} = \frac{1}{jx_{12}} + \frac{1}{jx_{10}} = \frac{1}{j8.444} + \frac{1}{j1.823} = -j0.667$$

$$\beta_{11} = 180^\circ$$

$$Y_{12} = -\frac{1}{j8.444} = j0.118$$

$$\beta_{12} = 0^\circ$$

由式(5.167)可求得故障期间 E_q 计算式

$$\begin{aligned} E_q &= \frac{E_q' - (1.296 - 0.295) \times 0.118 \cos \delta}{1 - (1.296 - 0.295) \times 0.667} \\ &= 3.01E_q' - 0.355 \cos \delta \end{aligned}$$

由式(5.168)可求得故障期间 P_E 计算式

$$P_E = E_q^2 \times 0.667 \times 0 + E_q \times 0.118 \sin \delta = 0.118 E_q \sin \delta$$

短路故障切除后

$$x_{12} = 1.296 + 0.138 + 0.488 + 0.122 = 2.044$$

$$Y_{12} = -\frac{1}{j0.2044} = j0.489$$

$$\beta_{12} = 0^\circ$$

$$Y_{11} = \frac{1}{j2.044} = -j0.489$$

$$\beta_{11} = 180^\circ$$

可得故障切除后 E_q 、 P_E 表达式

$$E_q = 1.96E_q' - 0.96 \cos \delta$$

$$P_E = 0.489 E_q \sin \delta$$

(3) 计算短路瞬时各量的初值

$$E_{q(0)} = E_{q0} = 2.256$$

$$E_{q(0)}' = E_{q0}' = 1.337$$

$$\delta_{(0)} = \delta_0 = 52.93^\circ$$

$$\omega_{(0)} = 1$$

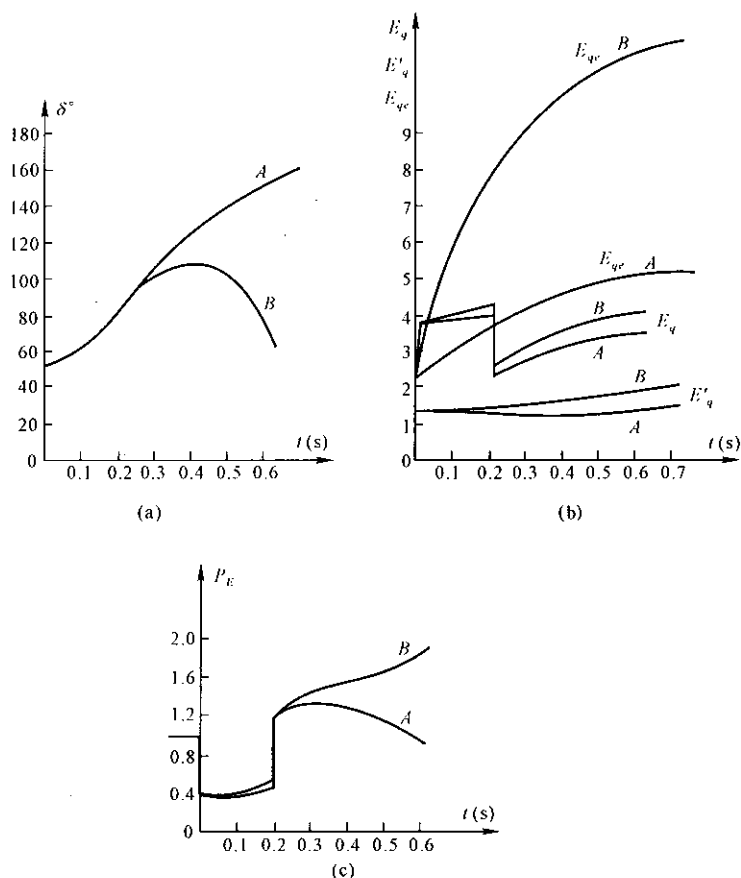


图 5.48 例 5.7 的计算结果

(a) $\delta = f(t)$ 曲线; (b) E_{qe} , E_q 和 E'_q 变化曲线; (c) 功率 P_E 变化曲线

$$\begin{aligned} E_{q(0)} &= 3.01E'_{q(0)} - 0.355\cos\delta_{(0)} \\ &= 3.01 \times 1.337 - 0.355\cos 52.93^\circ = 3.81 \end{aligned}$$

$$P_{E(0)} = 0.118 \times 3.81\sin 52.93^\circ = 0.359$$

根据式(5.160)~(162)代入有关已知量,即可得到4个变量变化率的计算式。

$$(A) \quad E_{qe\max} = 2.5E_{q0}, \quad T_{ff} = 0.35\text{s}$$

$$\begin{aligned} \frac{dE_{qe}}{dt} &= \frac{1}{T_{ff}}(E_{qe\max} - E_{qe}) = \frac{1}{0.35}(2.5 \times 2.256 - E_{qe}) \\ &= 16.11 - 2.857E_{qe} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{dE'_q}{dt} &= \frac{1}{T'_{d0}}(E_{qe} - E_q) = \frac{1}{5}(E_{qe} - E_q) \\ \frac{d\delta}{dt} &= 18000(\omega - 1) \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{T_J}(P_T - P_E) = \frac{1}{8.18}(1.0 - P_E) = 0.122(1 - P_E) \\ \text{(B) } E_{qe\max} &= 5E_{q0}, T_{ff} = 0.2\text{s} \\ \frac{dE_{qe}}{dt} &= \frac{1}{0.2}(5 \times 2.256 - E_{qe}) = 56.4 - 5E_{qe}\end{aligned}$$

其他公式同(A)。

计算步长 $\Delta t = h = 0.1\text{s}$, 计算结果如图 5.48 所示。由图 5.48(a) 可见, 情况(A) 系统不稳定, 而情况(B) 系统稳定。因此, 通过增大强励的倍数和提高强励的速度, 可以提高系统的暂态稳定性。同时由图 5.48(b) 可见 E_q 和 E'_q 增长较慢, 这是由于励磁绕组时间常数 T'_{d0} 较大的缘故。当强励倍数不太大, 速度不太高时, E'_q 几乎不变, 说明近似计算时认为 E'_q (或 E') 恒定, 是完全可行的。从图 5.48 还可看出 E_q 、 P_E 在短路时和故障切除时的发生突变。

5.4.5 多机电力系统暂态稳定的简化分析

有多台发电机的复杂电力系统的暂态稳定的计算原理, 仍与简单系统一样, 要求计算系统受干扰后各发电机转子间相对角度随时间变化的曲线, 随后根据曲线变化来判别系统稳定性。当任意两台发电机间的相对角度随时间不断增大, 且超过 180° 时, 就认为系统在这种干扰下不能保持暂态稳定。影响暂态稳定计算结果的因素是发电机数学模型和负荷数学模型的选择。发电机和负荷的模型越精确, 计算的结果越准确, 但复杂性大为增加。现只介绍简化计算方法, 它适用于分析大干扰后相对角的第一至第二个摇摆周期(约 $1\text{s} \sim 2\text{s}$ 左右)。该简化方法采用以下假定:

- (1) 发电机模型采用 $E' - x'_d$ 模型, $E' = \text{恒定}$;
- (2) 原动机的机械功率 $P_T = \text{恒定}$;
- (3) 负荷用恒定阻抗表示。

计算时, 列出每台发电机的转子运动方程式:

$$\left. \begin{aligned}\frac{d\delta_i}{dt} &= (\omega_i - 1)\omega_0 \\ \frac{d\omega_i}{dt} &= \frac{1}{T_{Ji}}(P_{Ti} - P_{Ei}) \quad (i = 1, 2, \dots, m)\end{aligned}\right\} \quad (5.169)$$

m 台发电机的电磁功率用式(5.40)表示。但大干扰时计算网络的节点导

纳矩阵要发生变化。发生不对称短路故障或线路非全相运行时,要用正序增广网络的节点导纳矩阵表示,为此要先形成正、负、零序网络的节点导纳矩阵。若大干扰后(如切除故障线路,自动重合闸成功)系统是三相对称的,则只需形成或修改正序网络的节点导纳矩阵。最后,还要消去全部联络节点,得到只含有发电机电势节点的导纳矩阵,再用式(5.40)计算。

用改进欧拉法对各发电机转子运动方程式的求解过程可用图 5.49 的框图表示。

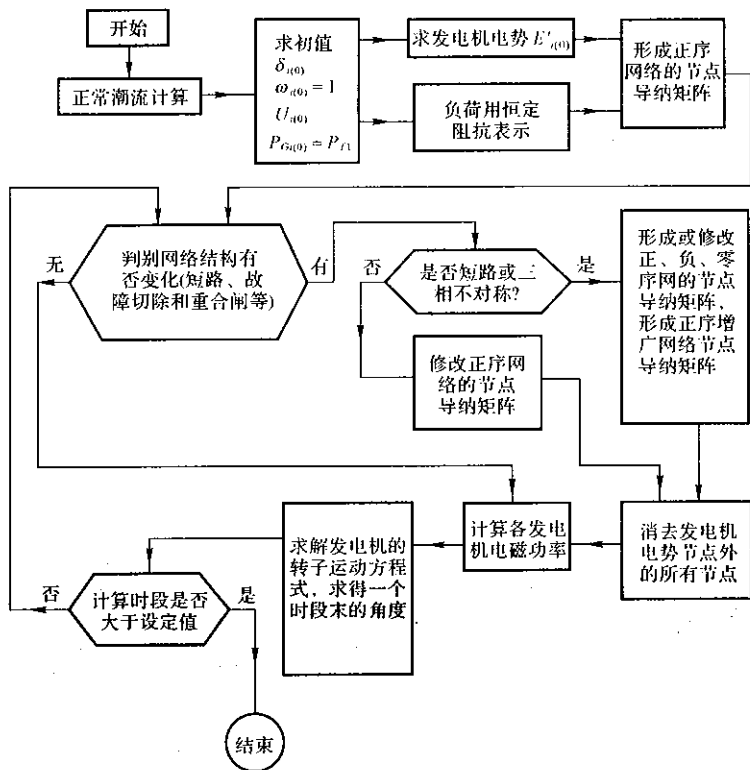


图 5.49 多机系统暂态稳定计算过程示意图

根据计算结果可作出各发电机转子的“绝对”角度及相对角度的变化曲线,然后根据相对角随时间的变化曲线判定系统的暂态稳定性。如图 5.50 表示三机系统绝对角和相对角的变化曲线,虽然绝对角不断增加,但相对角仍趋于某一稳定值,所以系统是稳定的。图 5.51 则表示相对角随时间增加不断增大,系统是不稳定的。

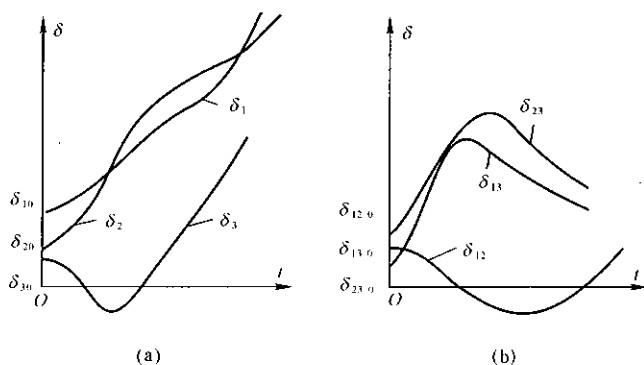


图 5.50 绝对角和相对角的变化

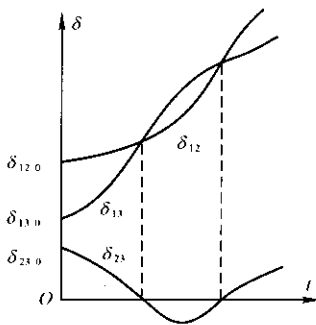


图 5.51 发电机①与②、③间失去同步

5.5 提高电力系统稳定性的措施

电力系统从设计到运行必须保证其运行的可靠性、合格的电能质量和经济性三项指标。随着电力系统的扩大,大容量发电厂的建立和输电距离不断增加,如何提高系统的输送容量以及在任何运行方式下保证系统的静态稳定和暂态稳定,是电力工作者必须研究的一项重要课题。一般可以从以下几个方面采取措施来提高电力系统稳定性:

(1) 改善电力系统元件的特性和参数,如原动机及其调节系统、发电机和励磁系统、变压器、输电线路、开关设备、补偿设备等电力系统基本元件特性和参数的改善。

(2) 用附加装置提高电力系统稳定性,如输电线设置中间开关站,输电线

的串联补偿和发电机电制动等。

(3) 改善运行方式及其他措施,通过合理选择电力系统接线方式和运行方式,正确安排功率潮流,提高系统运行电压以及故障切机、切负荷等,可以提高运行的稳定性。此外当系统失去稳定时,应尽快采取措施使系统尽快恢复同步运行和正常供电。

下面将就目前电力系统中常用的一些提高稳定性的措施作简要的分析和介绍。

5.5.1 发电机及其励磁调节系统

1. 改善发电机本身参数

发电机参数包括电抗 x_d 、 x'_d 、 x_q 和惯性时间常数 T_J 等。

(1) 发电机电抗

发电机电抗在系统总阻抗中占有较大的比重,因此,减小发电机电抗可以提高系统静态、暂态稳定性和提高输电能力。降低发电机的电抗主要是降低电枢反应电抗 x_{ad} 和 x_{aq} ,而降低这些电抗要加大定、转子间的气隙,从而增加发电机的尺寸,提高发电机制造成本。此外,汽轮发电机是一种标准化生产的发电机,一般不能个别制造,只有水轮发电机属非标准产品,可以根据具体要求来设计和制造。

(2) 惯性时间常数 T_J

发电机惯性时间常数 T_J 对电力系统暂态稳定影响较大。发电机在受干扰后的角加速度 $\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{T_J} \Delta P$,因此,增加 T_J ,可以减小角加速度,有利于提高暂态稳定。但是根据 T_J 的计算公式可知,要增加 T_J ,也需要加大发电机的尺寸,从而增加发电机的制造成本。

因此,从改善发电机本身参数考虑提高系统的稳定性,应该对照其他提高稳定的措施,进行技术经济比较再作出决定。一般不考虑用专门设计的发电机来提高电力系统的稳定性。

2. 改善发电机励磁调节特性

从前面章节的分析可知,自动励磁调节器对提高系统静态稳定功率极限和扩大稳定区有很好的作用。采用比例型调节装置时,可以近似地维持 E'_q (或 E') 恒定,相当于把发电机的电抗从 x_d 减小到 x'_d ;而采用 PSS 或强力励磁调节器则能维持发电机端电压 $U_G =$ 恒定,相当于把 x_d 减小至零,从而可提高功率极限和扩大稳定区。强行励磁对提高暂态稳定性有良好作用。由于自动励磁

调节器的价格相对于电力系统本身的投资来说是很小的,所以应尽可能使用新型的励磁系统和励磁调节器。

5.5.2 原动机的调节特性

电力系统受大干扰后,电磁功率急剧变化,而原动机功率由于调速器具有较大的机械惯性和存在失灵区,所以其调节作用有一定时延。同时,从调节开始到输出转矩发生变化也有一定时间,所以在暂态稳定的第一个摇摆周期内原动机功率基本不变。因此在发电机转子轴上出现不平衡转矩,使转子加速或减速。目前,已有根据故障情况来快速调节原动机功率的装置。如在汽轮机上采用快速动作的气门,能根据发电机功率变化情况,快速关闭气门,以使发电机轴上不平衡转矩达到最小,加快振荡的衰减(如图 5.52)。

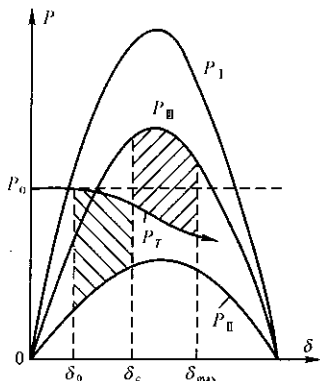


图 5.52 快速调节气门的作用

5.5.3 开关设备和继电保护

在超高压远距离输电线上快速切除故障对于提高系统的暂态稳定性有着决定性的意义,它可以减小加速面积,增加减速面积。图 5.53 表示不同切除故障时间对暂态稳定的影响。图 5.53(c) 切除时间短,使减速面积大于加速面

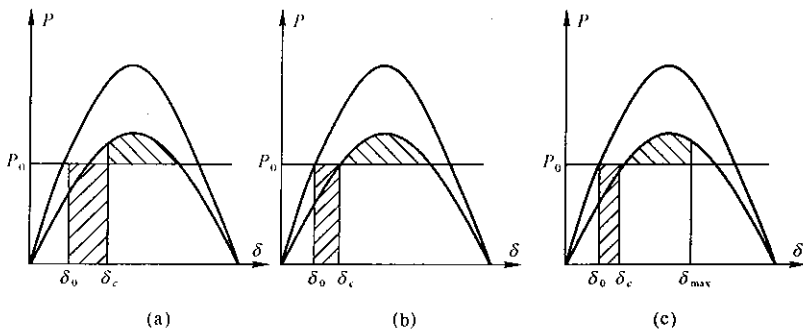


图 5.53 切除故障快慢对暂态稳定的影响

(a) 不稳定;(b) 极限情况;(c) 稳定

积,系统稳定;图 5.53(b) 切除时间稍长,则可能使减速面积等于加速面积,系统稳定达临界状态;当切除故障的时间较长,使最大减速面积小于加速面积时,系统不能维持暂态稳定(见图 5.53(a))。故障切除时间包括继电保护动作时间和开关从收到跳闸脉冲起到触头分开消弧后为止的两部分时间。在 220kV 以上的线路中,继电保护采用高频或差动保护,其动作时间为 0.02s ~ 0.04s,在使用空气开关时,动作时间为 0.06s ~ 0.08s,因此总的动作时间为 0.08s ~ 0.12s。

切除故障时间缩短以后,系统暂态稳定得以提高,就能输送更大的功率。图 5.54 表示在某一系统中不同类型故障、不同切除故障时间时能保持暂态稳定的输电功率 P_0 。例如,当切除时间从 0.2s 减小到 0.1s 时,三相短路的 P_0 从 45% 增大到 82%。

由于架空输电线上大多数短路都是暂时性的,所以在输电线路广泛地采用自动重合闸装置来提高系统的暂态稳定性。图 5.55(a)、(b) 分别表示单回路和双回路电力系统中采用三相自动重合闸后,对系统稳定性的影响。在图中 δ_0 表示发生故障时的角度, δ_c 表示切除故障时的角度, δ_R 表示重合闸时的角度。

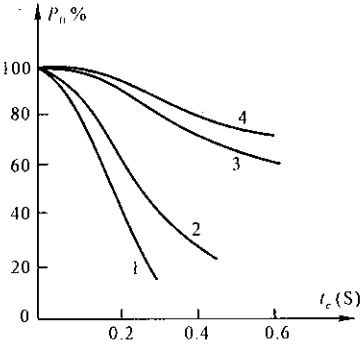


图 5.54 输电功率极限与切除时间的关系
1:三相短路;2:两相短路接地;
3:两相短路;4:单相接地短路

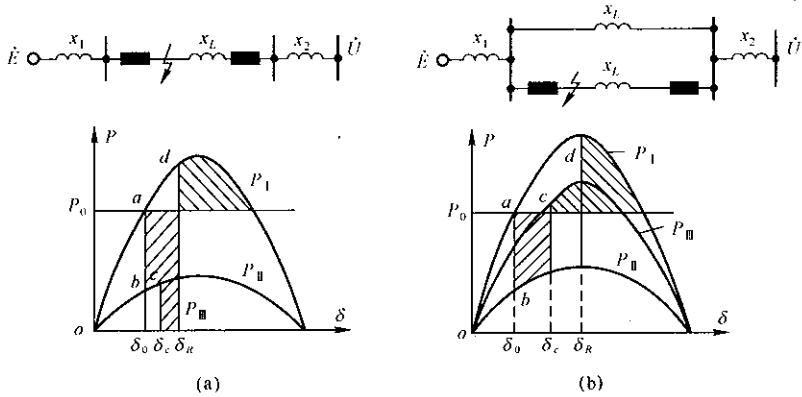


图 5.55 自动重合闸对暂态稳定的影响

电力系统故障中的大多数是瞬时性单相短路故障,因此一般不需要把三相都切除,而只需切除故障相,然后再进行重合闸,这样可以更好地提高电力系统的暂态稳定。这对于单回的输电线路有特别重要的意义,因为一相断开后仍有两相与系统相连,并送出一定的电磁功率,所以比三相切除时的加速面积要小得多,如图 5.56(a) 表示单相故障, δ_c 时切除三相, δ_R 时三相重合成功。而图 5.56(b) 表示单相故障, δ_c 时切除故障相, δ_R 时故障相重合成功。

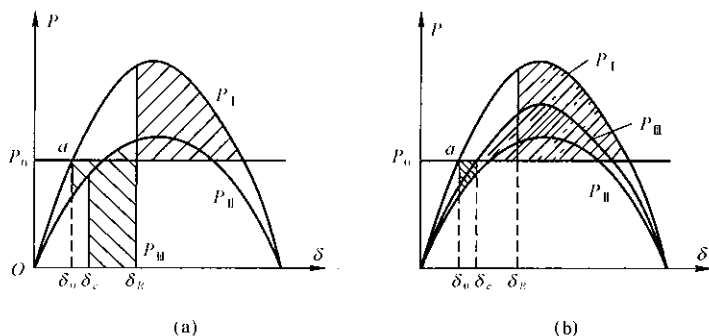


图 5.56 单相重合闸的作用

330kV 及更高电压的架空输电线路采用单相重合闸的主要问题是,在切除一相以后,由于其他两相仍带电,会通过相间电容耦合向短路点提供电流(简称潜供电流),使故障相的电弧不易熄灭。在一定情况下,由于电弧来不及熄灭,会导致重合闸失败。所以必须采取措施减小潜供电流,以提高单相重合闸的成功率。

5.5.4 输电线

电力系统总电抗中,输电线电抗占相当大的比例。因此,减小输电线的电抗,对提高输电系统静态和暂态稳定性都有很大作用。

1. 提高输电线额定电压

简单电力系统的功率曲线的最大值可近似用下式表示:

$$P_m = \frac{EU}{x_G + x_T + x_L} \quad (5.170)$$

式中, x_G 、 x_T 和 x_L 分别表示发电机、变压器和线路的电抗。

在标么值计算时,如采用平均额定电压作为基准电压,变压器变比近似用平均额定电压之比表示,则 x_G 、 x_T 、 x_L 的标么值为

$$x_G = \frac{x_G\%}{100} \times \frac{S_B}{S_{GN}}$$

$$x_T = \frac{U_K\%}{100} \times \frac{S_B}{S_{TN}}$$

$$x_L = x_{L(\Omega)} \times \frac{S_B}{U_N^2} \approx x_{L(\Omega)} \times \frac{S_B}{U_N^2}$$

可见,发电机电抗标么值和变压器电抗标么值与线路电压无关,但输电线路电抗标么值与线路额定电压的平方成反比。现把式(5.170)改写为

$$P_m = \frac{EU}{a + \frac{b}{U_N^2}} \quad (5.171)$$

式中, $a = x_G + x_T$; $b = x_{L(\Omega)} S_B$ 。

当发电机电势 E , 受端电压 U 及发电机、变压器的阻抗一定时, P_m 将随输电线路额定电压而变化, 极限情况为 $U_N \rightarrow \infty$, $P_m \rightarrow EU/a$ 。图 5.57 表示不同线路长度时 P_m 与 U_N 的关系。

由图 5.57 可见, 对应一定长度的输电线路, 当电压达到一定值时, P_m 增加已不大。另一方面, 输电线路电压等级的上升将提高对电器设备制造和绝缘材料的要求, 造价也急剧升高, 因此, 线路电压的确定是一个综合的经济技术比较问题。

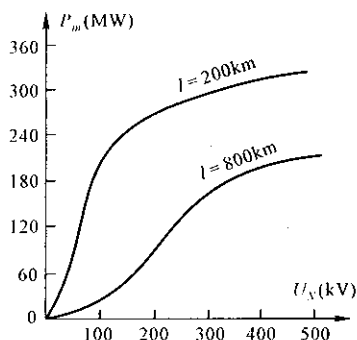


图 5.57 P_m 与 U_N 的关系

2. 采用分裂导线

第 2 章已讨论过, 架空线路采用分裂导线可以减小输电线路的电抗和电晕损耗。所以, 超高压远距离输电线路绝大多数采用分裂导线。以 500kV 输电线路为例, 当每相采用单导线时, 每公里电抗为 0.42Ω ; 2 分裂时为 $0.32\Omega/\text{km}$; 3 分裂时, $0.30\Omega/\text{km}$; 4 分裂时降为 $0.29\Omega/\text{km}$ 。再增加分裂数时, 效果已不显著, 反而使线路结构复杂, 投资提高。所以, 一般不超过 4 分裂。

3. 采用串联电容补偿

在超高压架空输电线上串联适当的电容器用以补偿线路的感抗, 达到减小输电线路总的阻抗。关于串联补偿原理不再详细介绍, 这里仅就补偿度和补偿装置位置的选择问题作一简单介绍。

(1) 补偿度选择

接入串联电容器以后, 输电线路的等值电抗为

$$x_{L_{eq}} = x_L - x_C = x_L \left(1 - \frac{x_C}{x_L} \right) = x_L (1 - K_C) \quad (5.172)$$

式中, $K_c = x_c/x_l$ 称为串联补偿度。一般说, K_c 越大线路等值电抗越小, 对提高稳定性越有利。但是 K_c 增大要受到很多条件的限制。 K_c 过大时, 在某些地方短路时会使短路电流超过发电机机端短路电流, 而且, 短路电流还可能是容性电流, 这会引起继电保护误动作。此外, 补偿度过大时, 系统可能出现低频自振荡和“自励磁”现象。所以, 一般补偿度不应超过 0.5。

(2) 补偿装置位置的选择

串联电容器都是集中安装的, 如分散安装在线路上则会给维护、检修带来困难。一般都安装在线路中间的变电所内。串联电容器安装后还有过电压保护和线路继电保护等一些问题, 这里不作进一步讨论。

4. 输电线并联电抗补偿

输电线路越长, 线路的对地等值电容也越大, 由于电压较高, 所以输电线路电容会产生大量无功功率, 使在空载或轻载时引起线路末端电压升高, 同时也使发电机功率因数升高。为使系统电压保持在规定的范围内, 就要降低发电机电势, 因而在发电功率一定时, 将使运行角度增大, 对系统稳定是不利的。

为了解决这些问题, 提高系统稳定性, 可在超高压线路上并连接入电抗器, 用以吸收线路电容所产生的无功功率, 并可使发电机在较低的滞后功率因数下运行, 使发电机电势大为提高, 从而提高了系统的稳定性。

5. 输电线路设置开关站

故障后, 双回输电线路被切除一回线, 线路阻抗将增大一倍, 使故障后的功率曲线的最大值降低。如果在线路上设置一些开关站(见图 5.58), 把整个输电线路分为几段。这样, 故障时仅切除其中一段, 而使线路阻抗增加较少, 故障后的功率曲线的最大值较高, 从而明显地提高暂态稳定性。但是, 开关站不宜太多, 一般按每 300~500km 输电线设置一个开关站。通常开关站应和串联电容补偿和并联电抗补偿的分布统一考虑。

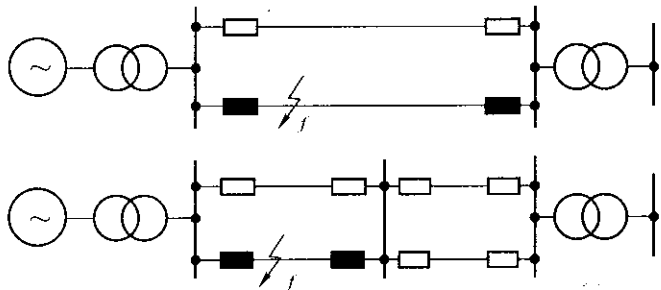


图 5.58 输电线路设置开关站

5.5.5 改善系统的结构和采用中间补偿设备

不少远距离输电线经过的地区有工业区及地区电力系统,如果用降压变压器将输电线与这些系统连接起来,可以提高供电可靠性和经济性。这些降压变电所还起着开关站的作用。如果在降压变电站内装置适当容量的同步调相机,并维持线路中间的电压恒定,则可以提高输电线的静态、暂态稳定性和输电能力。下面以图 5.59 所示简单系统加以说明。当未装中间降压变电所时,输电系统的功率极限为

$$P_m = \frac{EU}{x_a + x_b}$$

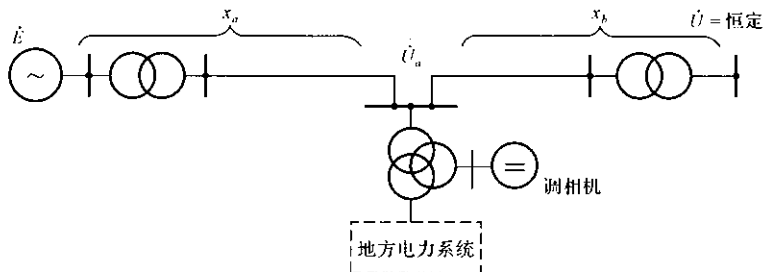


图 5.59 有中间同步调相机的输电系统

如果装设调相机后,能维持变电所高压母线电压为恒定,那么相当于在线路中间接入一无限大功率电源,因而把整个输电线在静态稳定问题上分为两个互相分开的系统。这时线路的功率极限就由

$$P_{1m} = \frac{E' U_a}{x_a} \quad \text{和} \quad P_{2m} = \frac{U_a U}{x_b}$$

中较小的一个决定。一般 E' 、 U_a 和 U 相差不多,但电抗远小于总电抗,所以可以大大提高功率极限。

当然,单靠中间同步调相机本身作用不能达到维持 $U_a = \text{恒定}$,而必须在调相机上装设相应的励磁调节器,以维持 U_a 电压基本恒定。目前,正应用一种反应速度更快的静止补偿器来代替同步调相机。

5.5.6 变压器中性点经小阻抗接地

为了提高接地短路时的暂态稳定,在中性点直接接地的系统中变压器中性点可经小阻抗接地。图 5.60 所示系统,变压器中性点经一电阻 R_g 接地后,

当在 f 点发生单相接地短路故障时,在零序网中将增加 $3R_{g1}$ 和 $3R_{g2}$ 两支路,零序电流通过这些支路所产生的功率损耗也相当于增加了发电机的电磁功率。从正序增广网络看,由于附加阻抗 ΔZ 的存在,使转移阻抗 Z_{12} 减小,从而提高了功率极限,对暂态稳定有利。

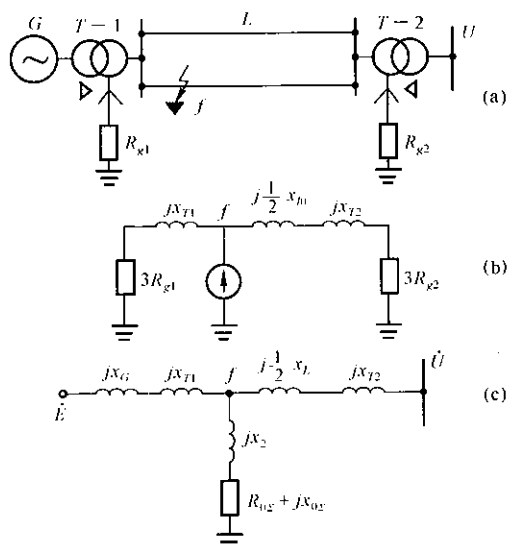


图 5.60 变压器中性点经小电阻接地
(a) 系统值线;(b) 零序网络;(c) 正序增广网络

变压器中性点接地电阻的大小要适当选择。电阻过小,消耗功率太小,作用不大;电阻过大时,当短路电流通过时会使中性电压升高过多。

5.5.7 电气制动

输电线路发生短路故障后,如在远方发电厂尽快投入一接于发电机端的专用电阻,消耗一部分有功功率,可以增加发电机的电磁功率,产生制动作用,因而达到提高暂态稳定目的,这种方法称为电气制动,接入的电阻称为制动电阻。

电气制动的原理如图 5.61 所示。从制动电阻的投入到制动电阻切除之间的间隔 Δt_b 称为制动时间。

制动电阻 R_b 的大小,通常用额定制动容量表示。并连接入的制动电阻的额定制动容量定义为:

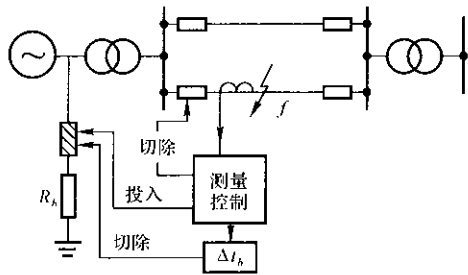


图 5.61 电气制动原理

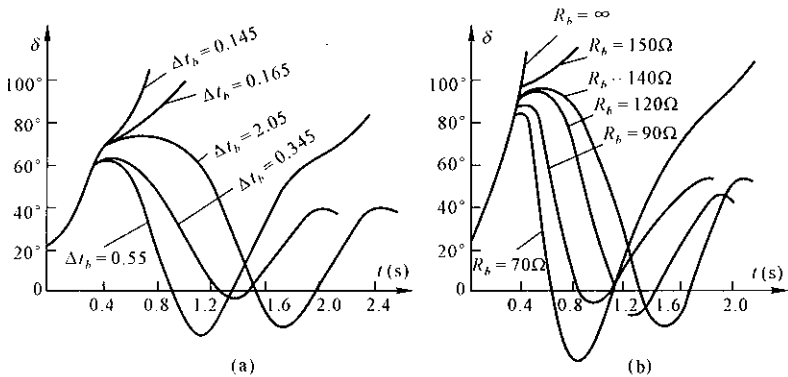


图 5.62 电气制动参数对暂态稳定的影响
(a) 制动电阻固定; (b) 制动时间固定

$$\Delta P_{bN} = \frac{U_N^2}{R_b} \quad (5.173)$$

式中, U_N 为制动电阻接入点的额定电压; R_b 为每相电阻值。

制动电阻过小或过大, 制动时间 Δt_b 过长或过短均对暂态稳定不利。从图 5.62(a) 中的例子可以看出, 当制动电阻一定时, 制动时间 $\Delta t_b \leq 0.16\text{s}$ 时, 发电机在第一个摇摆周期失去暂态稳定; 而当 $\Delta t_b \geq 0.5\text{s}$ 时, 发电机在第二个摇摆周期失去稳定。图 5.62(b) 表明, 当制动时间一定时, $R_b \geq 150\Omega$ 时, 发电机在第一个摇摆周期失去稳定; 当 $R_b \leq 70\Omega$ 时, 发电机在第二个摇摆周期失去稳定。另外, 短路类型不同时制动的作用也不相同, 所以要通过综合分析选择最适当的电阻值和制动时间。

5.5.8 切除部分发电机及部分负荷

前面介绍了通过快速关闭汽门措施来减小送端电厂汽轮机的出力, 以提

高暂态稳定性。但是,水轮发电机由于水锤现象不允许快速关闭导水翼。因此,当与远方水电厂相连的输电线路送端发生短路故障,而使大量功率送不出时,可以在切除短路时连锁切除一部分发电机,以减小原动机的机械功率,增大减速面积,保持系统暂态稳定。

图 5.63 表示有 3 台发电机的发电厂,当线路送端发生三相短路时电磁功率为零,切除一回线路,减速面积小于加速面积,系统不稳定[见图 5.63(a)]。如在切除故障线路后接着切除 1 台发电机,使原动机功率减小 1/3(由 P_T 减为 P'_T),发电机电磁功率由 P_E 变为 P'_E (等值电抗增加),增大了可能的减速面积,使系统保持稳定。

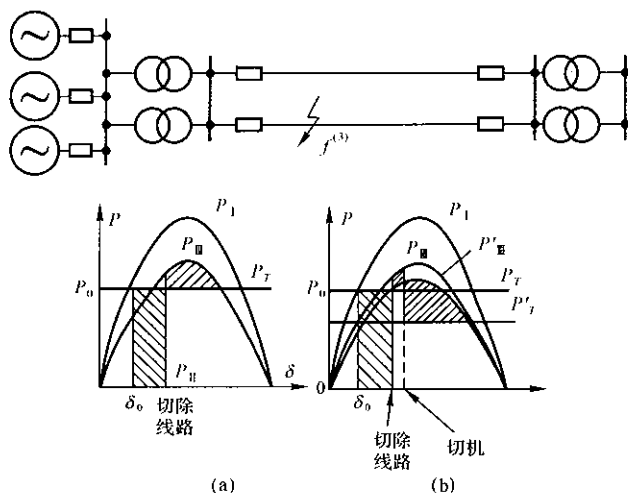


图 5.63 切除发电机对暂态稳定的影响

当系统有功备用不足时,为了保持系统频率和电压水平,可以同时切除一部分不重要的负荷。

5.5.9 系统暂态稳定破坏后的措施

虽然在设计和运行中采取了一系列措施,但是系统仍可能在遭受严重故障时失去稳定。所以,必须考虑系统失稳后采取的措施。

1. 系统解列

所谓系统解列,即在已失去同步的电力系统的适当地点断开,将电力系统分为几个独立的子系统。要尽量做到每个子系统的电源和负荷基本平衡,保证各个独立子系统本身的同步运行,其频率和电压接近正常值。在故障消除后,

经过功率和频率的调整,再把各子系统并列起来。解列点的选择是一个重要的问题。

2. 允许短时间异步运行

以单机无限大系统为例说明异步运行的概念。发电机与系统失去同步后,由于功角不断增大,其同步功率随时间振荡,即一部分时间为发电机状态,另一部分时间为电动机状态,所以其平均值几乎为零。由于原动机输出功率调整较慢,使发电机继续加速,转差 $S = \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}$ 变大。发电机转速大于同步转速而处于异步运行状态时,发电机将发出异步功率 P_{as} ,并随着转差的增加而使异步功率逐渐增加,同时由于调速器的动作使机械功率 P_T 减小,当与 P_T 达到平衡时,发电机有可能进入一个稳态异步运行状态。上述发电机由失步转入稳态异步运行过程可以用图 5.64 定性地说明。

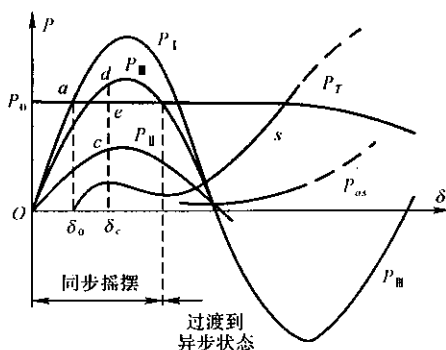


图 5.64 发电机失步到异步运行过程

同步发电机在异步运行时发出异步功率的原理与异步发电机类似,即定子旋转磁场割切转子,在转子绕组和铁心内产生感应电流,这个感应电流的磁场与定子磁场间相互作用产生异步转矩,使发电机发出异步功率。异步转矩由于转子绕组的不对称而是脉动的,其平均值与端电压平方成正比,且是转差的函数。图 5.65 表示了几种发电机组的平均异步转矩曲线。

发电机异步运行时将给发电机本身和系统带来一些严重问题:

(1) 由于定子和转子电流增大引起发热和过大应力,造成发电机损伤;

(2) 异步运行时从系统吸收大量无功功率,当系统无功功率备用不足时,可能导致“电压崩溃”;

(3) 异步运行时由于发电机电磁功率、定子电流和励磁电流随角度而发生波动,导致有些地方电压极低,使该地区电动机停止转动而脱离系统;

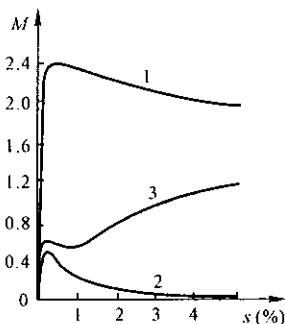


图 5.65 发电机平均异步转矩特性

1: 汽轮发电机; 2: 无阻尼绕组水轮发电机;
3: 有阻尼绕组水轮发电机

(4) 电流、电压变化情况复杂,导致继电保护误动作,进一步扩大事故。

水轮发电机异步功率很小,一般不允许异步运行。所以,在系统有充足的无功功率储备,且有功功率电源不足条件下,可以考虑某些汽轮发电机作短期的异步运行。进入异步运行后应采取措施使它牵入同步,或将有功功率转移给其他发电机后将它切除。

5.6 电力系统的电压稳定性

在电力系统运行的稳定性问题中,除了上述维持发电机同步运行的稳定性外,广义而言,还包括负荷节点的电压稳定性。在电力需求增加和电源远离负荷中心的情况下,以及输电系统带重负荷时,会出现这种不稳定现象。如图 5.66 所示,由于在电力系统中切除一部分无功电源,在 a 点电压开始下降,到 b

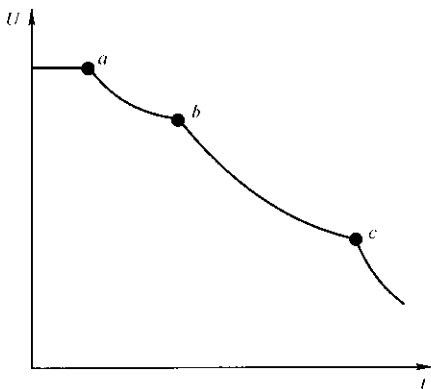


图 5.66 电压崩溃过程

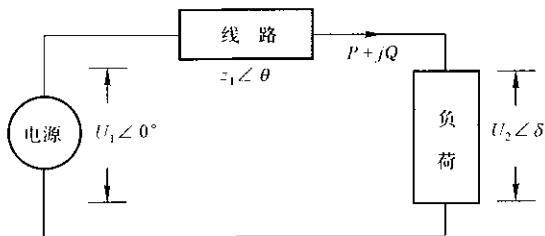


图 5.67 简单电力系统示意图

点时开始电压崩溃,到 c 点局部电力系统瓦解。现以图 5.67 所示的单机供电系

统来说明,如电源点的电压为 $U_1 \angle 0^\circ$, 经过阻抗为 $Z_l \angle \theta$ 的线路, 对一功率为 $P + jQ$ 的负荷供电, 这时负荷端的电压为 $U_2 \angle \delta$, 可写出供电功率方程式:

$$P = \frac{U_1 U_2}{Z_l} \cos(\delta + \theta) - \frac{U_2^2}{Z_l} \cos \theta \quad (5.174)$$

$$Q = \frac{U_1 U_2}{Z_l} \sin(\delta + \theta) - \frac{U_2^2}{Z_l} \sin \theta \quad (5.175)$$

在 P, Q 给定情况下, 从上两式中消去 δ 角, 可得

$$U_2^4 + U_2^2(2PZ_l \cos \theta + 2QZ_l \sin \theta - U_1^2) + (P^2 + Q^2)Z_l^2 = 0 \quad (5.176)$$

从上式可解出 U_2 与 P 和 Q 的关系

$$U_2^2 = \frac{1}{2}[-B \pm \sqrt{B^2 - 4C}] \quad (5.177)$$

式中

$$B = 2PZ_l \cos \theta + 2QZ_l \sin \theta - U_1^2$$

$$C = (P^2 + Q^2)Z_l^2$$

因为电压幅值 U_2 不可能为负值和虚数, 所以, U_2 只有上式所示的两个解。因此, 在给定 P, Q 或负荷功率因数情况下, 可以得到如图 5.68 所示的三组曲线。

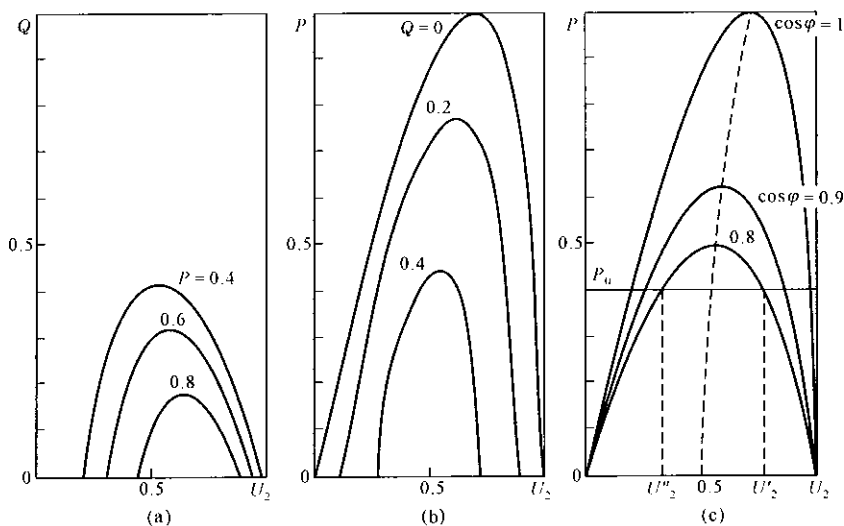


图 5.68 负荷与电压的关系

与考虑发电机同步运行时的稳定性相似, 在同一负荷情况下, 可得到两个不同的负荷端电压值, 如图 5.68(c) 所示, 其中一个为较大的电压值 U_2' , 是属于静态稳定的; 另一个较小的电压值 U_2'' 是静态不稳定的。随着负荷的增加, U_2'

相应减少,而 U_2'' 增大,这两电压值逐渐趋近。当功率达到极限值 P_{\max} (或 Q_{\max}) 时, $U_2' = U_2''$,这时对应的负荷端功率对电压的导数 $\frac{dP}{dU_2} = 0$ 或 $\frac{dQ}{dU_2} = 0$,这就是静态稳定的判据。

这个极限情况相应于式(5.177)中 $B^2 - 4C = 0$,即

$$U_1^4 - 4U_1^2 Z_l (P \cos \theta + Q \sin \theta) + 4Z_l^2 (P^2 \cos^2 \theta + Q^2 \sin^2 \theta + 2PQ \sin \theta \cos \theta - P^2 - Q^2) = 0 \quad (5.178)$$

在给定 P (或 Q) 的情况下,可以自上式求出极限情况的 Q (或 P),然后可得极限情况时的负荷端电压

$$U_{2c}^2 = -\frac{B}{2} = \frac{U_1^2}{2} - Z_l (P \cos \theta + Q \sin \theta) \quad (5.179)$$

假定负荷的功率因数 $\cos \varphi$ 为给定值,则由式(5.178)可求得

$$P_{\max} = \frac{U_1^2}{Z_l} \cdot \frac{\cos \varphi}{2[1 + \cos(\theta - \varphi)]} \quad (5.180)$$

相应的

$$U_{2c} = \frac{U_1}{\sqrt{2[1 + \cos(\theta - \varphi)]}} = \sqrt{\frac{P_{\max} Z_l}{\cos \varphi}} \quad (5.181)$$

在图 5.68(c) 中的虚线即表示不同 $\cos \varphi$ 情况下的极限情况曲线,虚线右侧所示的区域是电压稳定的区域,而左侧只是不稳定的区域。

从上述简单情况可以知道,在给定电力系统电源配置和网络结构情况下,随着节点负荷的增长,将会出现节点电压的下降,以至达到一个极限点,超越这一极限就不再能维持一个稳定的运行方式,即出现所谓“电压崩溃”现象。

在上述讨论中,并没有涉及负荷本身与电压的关系。一般的电力系统研究中把负荷看作是一个静态元件,其吸收的有功和无功功率与电压成固定的关系。但是在实际的电力系统中,负荷的功率与电压成非线性关系(如变压器的励磁功率)。同时,作为负荷中主要成分的异步电动机又是非静态元件。

异步电动机的简化等值电路见图 5.69 所示,其电磁转矩为

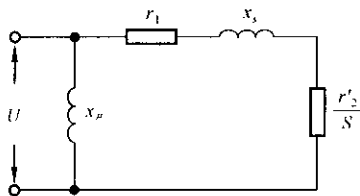


图 5.69 异步电动机等值电路

$$M_E = \frac{U^2 r'_2 S}{\omega_0 (r'^2_2 + x_s^2 S^2)} = \frac{2M_{E\max}}{S/S_c + S_c/S} \quad (5.182)$$

式中, r'_2, x_s 为异步电机的等值电阻和电抗, S 和 $S_c = \frac{r'_2}{x_s}$ 为异步电机的转差和临界转差; $M_{E\max} = \frac{U^2}{2x_s\omega_0}$ 为最大转矩, 它与电动机的端电压平方成正比。图 5.70 表示异步电动机的转矩 - 转差特性。

在正常运行中, 电动机的电磁转矩与负荷的机械转矩 M_T 相互平衡, 电动机保持恒定的转差运行。从图 5.70 可以看到有两个平衡点 a 和 b 。在 a 点运行时, 如果有某个干扰使转差有一个很小的增量 ΔS , 对应于转矩特性曲线上的 a' 点。此时, 电磁转矩大于机械转矩, 出现一个使电动机加速的转矩增量 ΔM , 这样转差将减小, 回复到原始运行点 a ; 当出现负的转差增量时, 电动机同样可回复到 a 点。所以, a 点是稳定的。

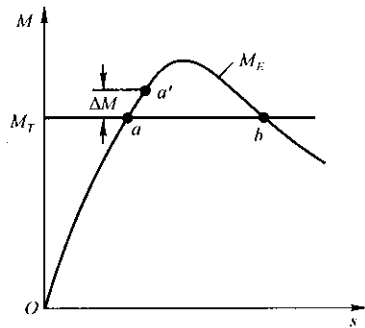


图 5.70 异步电动机特性曲线

在 b 点运行, 干扰产生的正 ΔS , 将使电动机转速下降, 转差继续增大, 最后使电动机停止转动。所以 b 点是不稳定的。

由于上述负荷的特性, 使节点负荷的功率随电压的变化有很大的增减, 特别是无功功率的变化更为显殊。如图 5.71 所示负荷无功功率与电压的关系曲线 1, 当电压偏离额定值 U_0 时, 电压的增大将使电动机及变压器所消耗的励磁无功功率随电压的增大而急剧增加。但当电压下降时, 由于铁心吸收励磁功率减少, 负荷的无功功率相应减少。但当电压进一步下降时, 由于电动机转差增大而使电流增大, 因而电动机漏抗中消耗的无功功率急剧增大, 当电动机因不稳定而停止转动时, 将吸收大量无功功率。在图 5.71 中

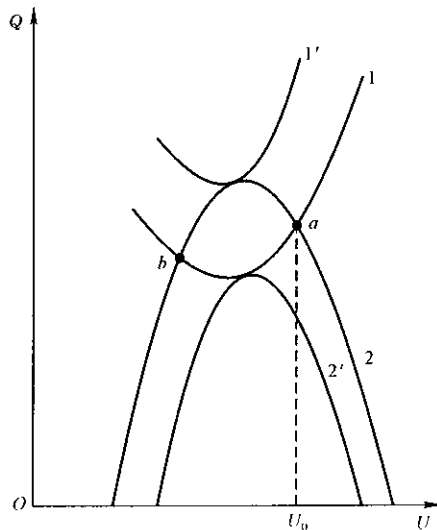


图 5.71 无功功率与电压变化的关系

同时示出根据电源确定的节点无功电源特性曲线 2。在正常时,曲线 1 和 2 相交于点 a 和点 b ,其中点 a 是稳定的运行点。当系统电压发生变化时(假定电压减小),发出的无功功率增大,而负荷吸收的无功功率减少,这就使节点的无功功率供大于需,所以使节点电压上升,恢复到原来的运行情况。相应的稳定条件是:

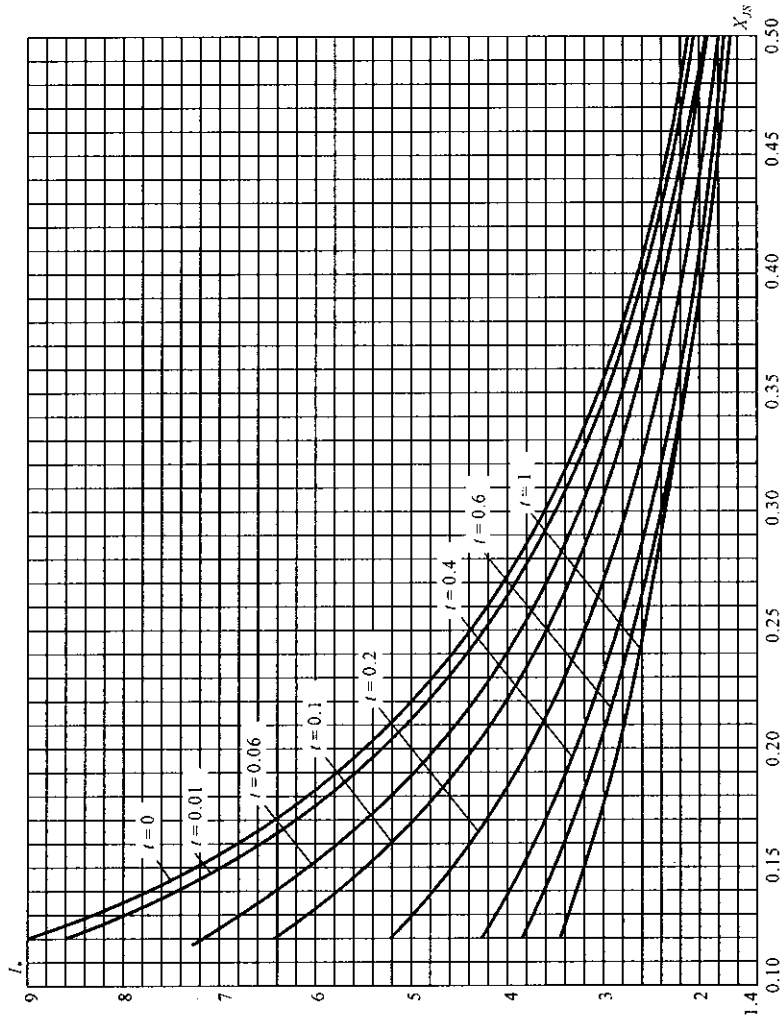
$$\frac{d\Delta Q}{dU} = \frac{d(Q_1 - Q_2)}{dU} < 0 \quad (5.183)$$

反之,在点 b ,当电压减小时,发出的无功功率减小,而负荷吸收的无功功率增大,所以电压将进一步减小,这时 $\frac{d\Delta Q}{dU} > 0$,所以是不稳定的。

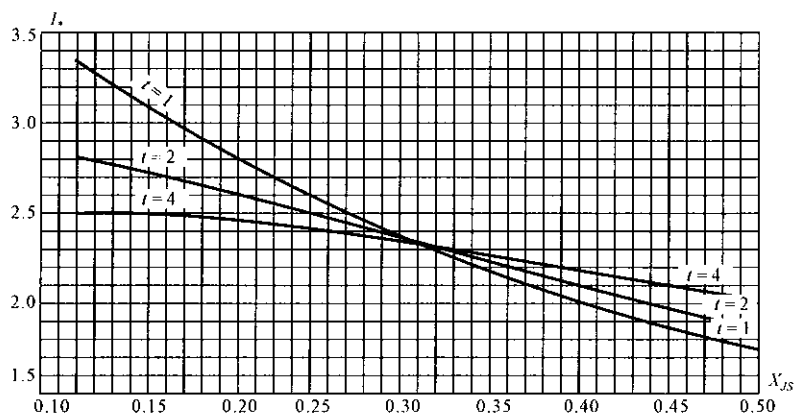
当改变节点无功功率的供需特性(图 5.71 中的曲线 1' 和 2'),使两者相切,即 $\frac{d\Delta Q}{dU} = 0$ 时,即为极限情况。

附录

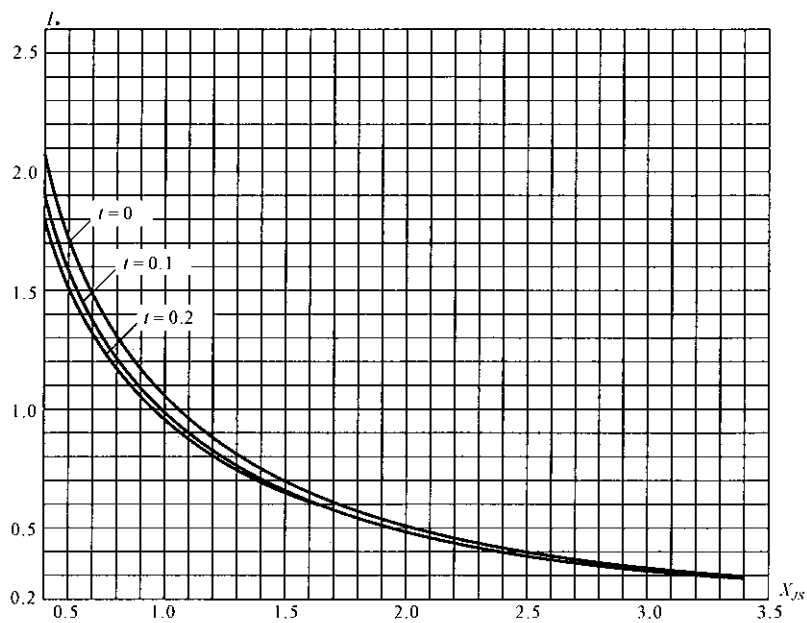
短路电流运算曲线



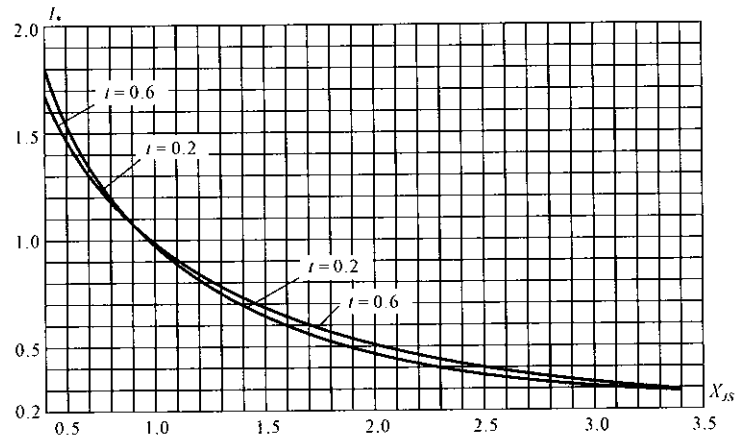
附图 1 汽轮发电机运算曲线(一)($X_{JS} = 0.12 \sim 0.50$)



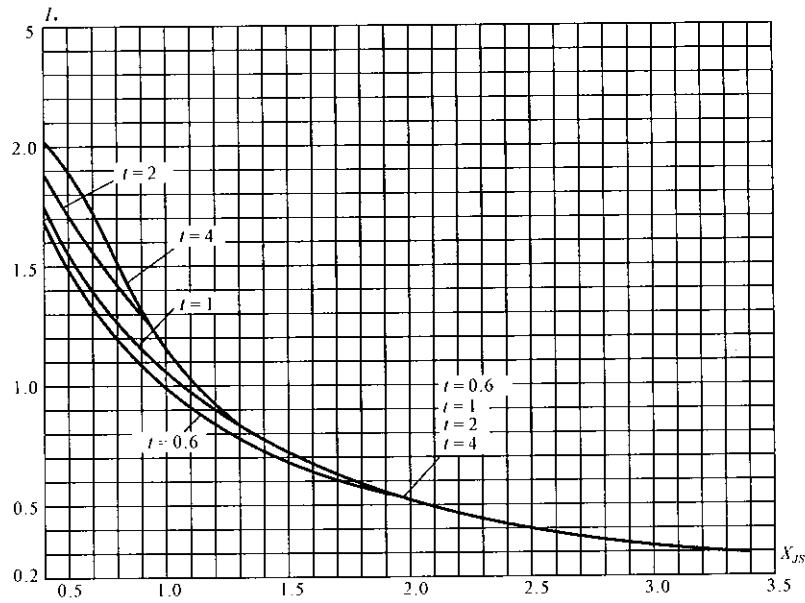
附图2 汽轮发电机运算曲线(二)($X_{js} = 0.12 \sim 0.50$)



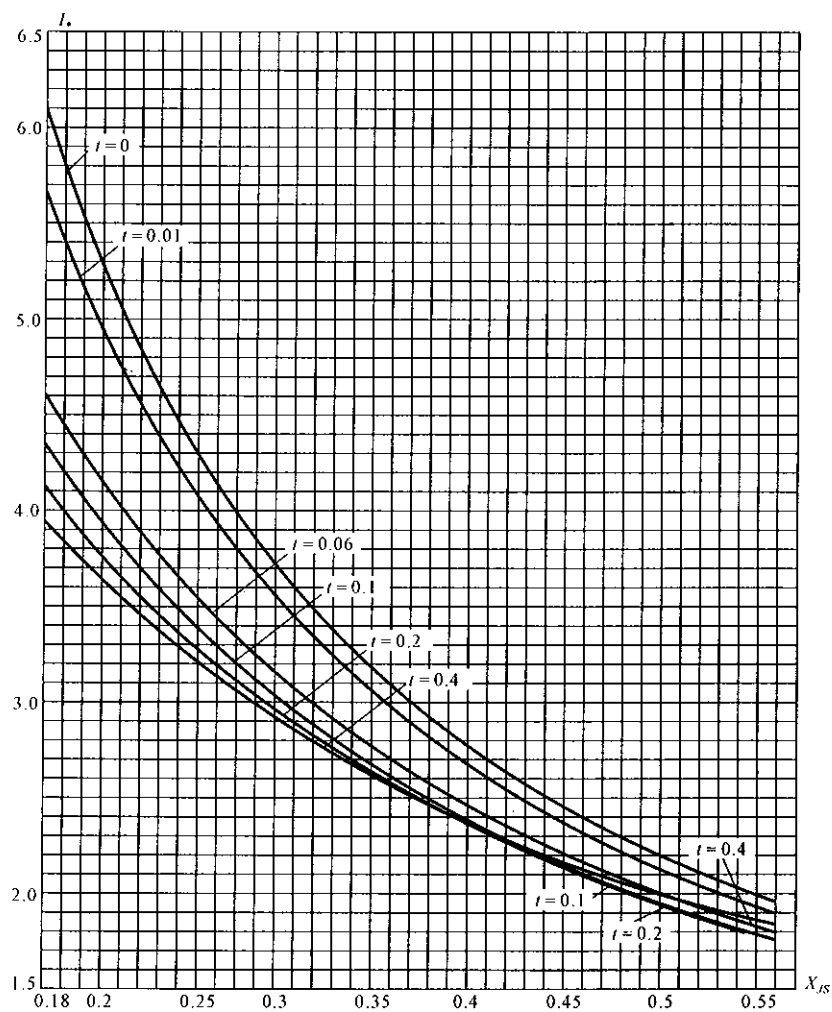
附图3 汽轮发电机运算曲线(三)($X_{js} = 0.50 \sim 3.45$)



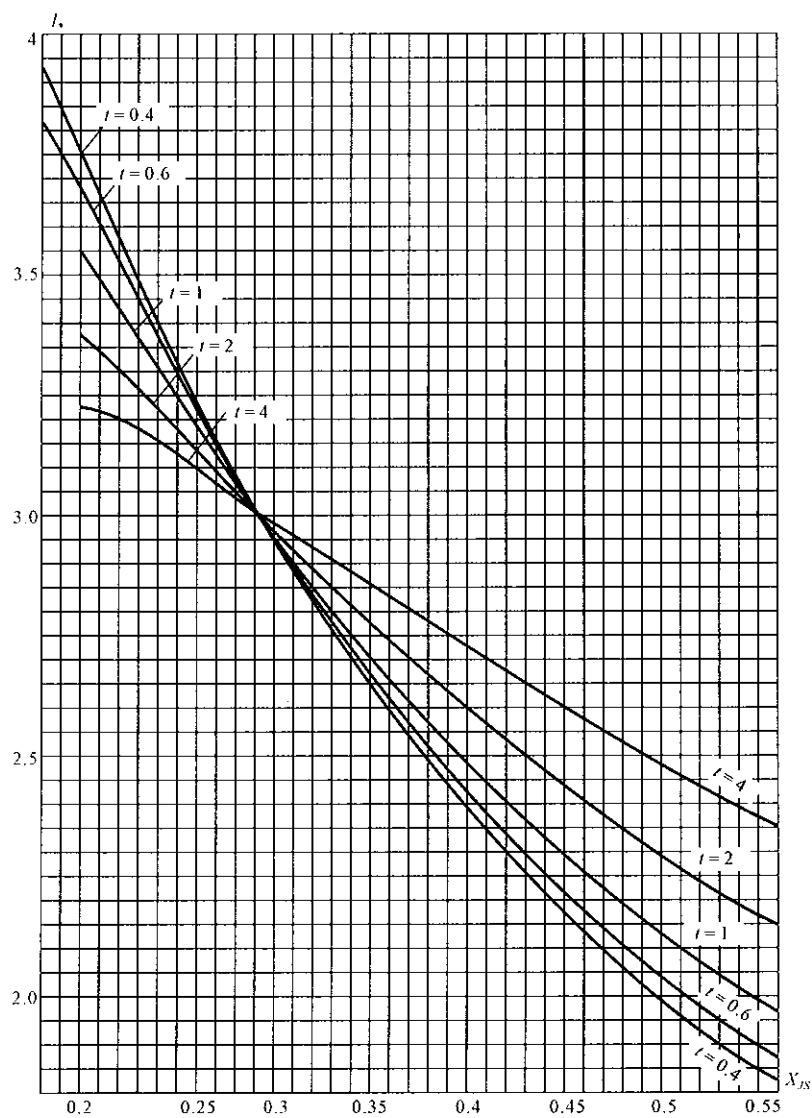
附图 4 汽轮发电机运算曲线(四)($X_{JS} = 0.50 \sim 3.45$)

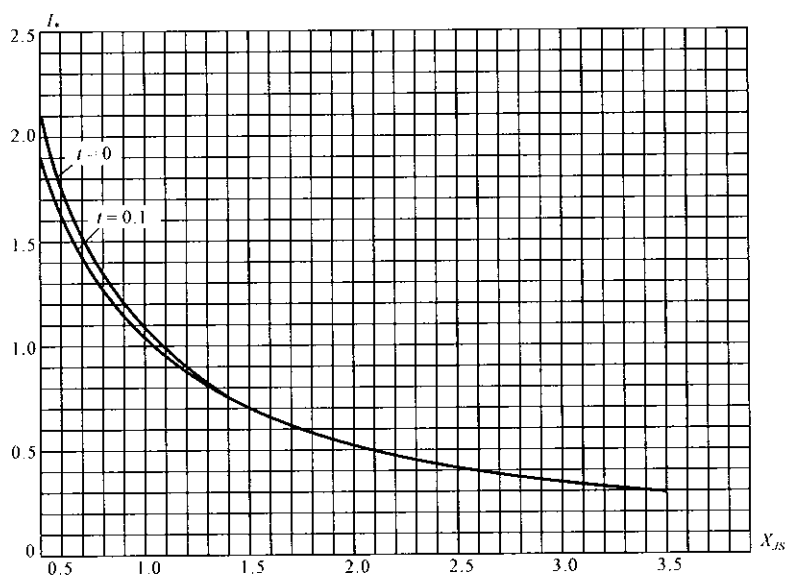


附图 5 汽轮发电机运算曲线(五)($X_{JS} = 0.50 \sim 3.45$)

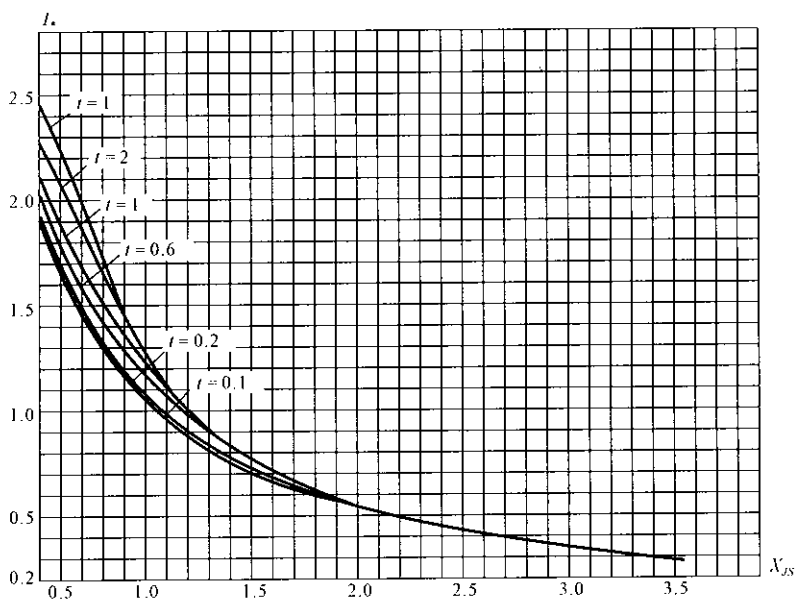


附图 6 水轮发电机运算曲线(一)($X_{js} = 0.18 \sim 0.56$)

附图7 水轮发电机运算曲线(二)($X_{JS} = 0.18 \sim 0.56$)



附图 8 水轮发电机运算曲线(三)($X_{js} = 0.50 \sim 3.50$)



附图 9 水轮发电机运算曲线(四)($X_{js} = 0.50 \sim 3.50$)

参 考 书 目

- [1] 陈珩编. 电力系统稳态分析. 北京:水利电力出版社,1985
- [2] 李光琦编. 电力系统暂态分析. 北京:水利电力出版社,1985
- [3] 何仰赞等编. 电力系统分析(上),(下). 武汉:华中理工大学出版社,1987
- [4] 西安交通大学,清华大学,浙江大学,湖南大学,成都工学院,水利电力部电网调度研究所合编. 电力系统计算. 北京:水利电力出版社,1978
- [5] 西安交通大学,西北电力设计院,西北勘测设计院编著. 短路电流实用计算方法. 北京:电力工业出版社,1982
- [6] 查理士·康柯蒂亚著. 同步电机理论与行为. 曾继铎译. 北京:高等教育出版社,1958
- [7] P. M. 安德逊, A. A. 佛阿德. 电力系统的控制与稳定. 北京:水利电力出版社,1979
- [8] Elgerd O I. , *Electric Energy System Theory — An Introduction*. McGraw-Hill Book Co. ,1982
- [9] J. Arrillaga C P. Arnold. *Computer Modelling of Electrical Power Systems*. John Wiley & Sons. 1983
- [10] С. А. Ахьянов. электромагнитные Переходные Процессы в электрических Системах. Издательство «энергия», 1964
- [11] В. А. Венников. электромеханические Переходные Процессы в электрических Системах. Издательство «Высшая Школа», 1985



电力系统分析

韩祯祥
主编



浙江大学出版社

