

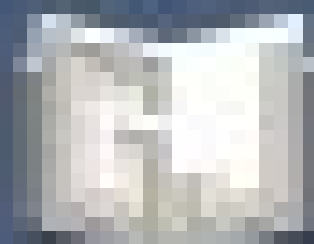
高等学校教材

专 科 适 用

电力系统分析

长沙电力学院 于永源 杨绮雯 合编





高 等 学 校 教 材

电 力 系 统 分 析

电力系统分析

主编：王 强 副主编：张 强 编 者：王 强



高等学校教材

||||| 专 科 适 用 |||||

电力系统分析

长沙电力学院 于永源 杨绮雯 合编

中国电力出版社

内 容 提 要

本书是高等学校发电厂及电力系统及其自动化专业的专科统编教材。

全书除绪论外有三篇共十二章。绪论主要介绍电力系统的基本概念。第一篇为电力系统稳态分析,共分六章,包括:电力系统的元件参数和等值电路及等值网络;电力系统潮流的分析与计算;电力系统潮流的计算机算法;电力系统功率的平衡、调整及其计算;电力网的经济运行及电力线路导线截面的选择。第二篇为电力系统故障分析,共分三章,包括:同步发电机的基本方程式及其三相短路的电磁暂态过程;电力系统各元件的序参数和等值电路;电力系统故障的分析与实用计算。第三篇为电力系统稳定性分析,共分三章,包括机组的机电特性;电力系统的静态和暂态稳定性。此外,为了便于读者对各章节内容的理解和应用,在每章后还附有思考题和习题,并在全书后的附录中给出了电力系统元件的电气参数和短路电流运算曲线等。

本书可供高等学校普通专科电力工程专业师生使用,也适合于职工大学、电视大学和函授专科等成人高等教育的师生使用,也可供电力工程专业工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统分析/于永源,杨维安合编. —北京:中国电力出版社, 1996

高等学校教材 专科适用

ISBN 7-80125-136-9

I. 电… II. ①于…②杨… 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(96)第 03601 号

中国电力出版社出版

(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)

实验小学印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

1996 年 11 月第一版 2001 年 1 月北京第四次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 24.5 印张 553 千字

印数 8931—12930 册 定价 22.50 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前 言

本书系根据原能源部教育司 1993~1995 年高等学校教材编审出版计划,并按照原能源部电力高等专科学校教学委员会制订的发电厂及电力系统专业电力系统分析专科课程教学大纲编写的。

本书在着重阐明电力系统基本概念和基本理论的基础上,又突出了电力系统的潮流计算、短路计算和电力系统稳定性分析。

本书第七章同步发电机的基本方程式及其三相短路的电磁暂态过程,是该书中内容比较难的一章,也是较重要的一章,是以后各章的基础。该章中的重要数学工具是派克变换,为了讲清派克变换,书中利用了电路课程中的旋转相量和电机学课程中旋转磁场的概念,以使该章内容通俗易懂,概念清楚。考虑到各校的实际情况,该章内容可少讲或暂不讲,不会影响其它章节内容的讲授。书中在节前标有“*”的可不讲授。

本书内容的编写力求深入浅出,理论联系实际,重实际应用,并且具有重点突出,层次分明,逻辑性强,便于自学,易于讲授的特点。

本书由长沙电力学院杨绮雯副教授编写绪论和第一篇,于永源教授编写第二、三篇,并担任全书的统稿工作。武汉水利电力大学李光熹教授担任本书的主审工作。

由于编者水平有限,书中如有不妥之处,请读者批评指正。

编 者

1995 年 3 月

目 录

前 言 绪 论

第一节 电力系统概述	1
第二节 电力系统中性点的接地方式	3
第三节 电力系统的负荷	6
第四节 电力线路的结构	8
思考题与习题	13

第一篇 电力系统稳态分析

第一章 电力系统的元件参数和等值电路及等值网络	15
第一节 电力系统的电压等级	15
一、电力系统的额定电压等级 二、电力线路的平均额定电压 三、变压器的实际变比和平均额定电压之比	
第二节 电力线路的参数和等值电路	17
一、单位长度电力线路的参数 二、电力线路的等值电路	
第三节 变压器、电抗器的参数和等值电路	30
一、双绕组变压器的参数和等值电路 二、三绕组变压器的参数和等值电路 三、自耦变压器的参数和等值电路 四、电抗器的参数和等值电路	
第四节 发电机和负荷的参数及等值电路	37
一、发电机的电抗和电势 二、负荷的功率、阻抗和导纳	
第五节 电力系统的等值网络	39
一、电压级的归算及以有名制表示的等值网络 二、标么制和以标么制表示的等值网络 三、电力系统等值网络的使用和简化	
思考题与习题	47
第二章 电力系统潮流的分析与计算	49
第一节 电力网元件的功率损耗和电压降落	49
一、电力线路的功率损耗和电压降落 二、变压器的功率损耗和电压降落 三、电源和负荷功率	
第二节 开式网络的潮流计算	54
一、简单开式网络的潮流计算 二、变电所较多的开式网络的潮流计算	
第三节 环形网络的潮流计算	60
一、环式网络中的功率分布 二、两端供电网络中的功率分布 三、环形网络的潮流计算	
第四节 网络变换法	69
一、等值电源法 二、负荷移置法	
思考题与习题	73
第三章 电力系统潮流的计算机算法	76

第一节 电力网络的数学模型	76
一、节点导纳矩阵的节点电压方程 二、节点阻抗矩阵的节点电压方程	
第二节 变压器为非标准变比时的等值电路	78
一、变压器为非标准变比时的修正 二、变压器为非标准变比时的等值电路	
第三节 节点导纳矩阵的形成	81
一、节点导纳矩阵的计算 二、节点导纳矩阵的修改	
第四节 功率方程和变量及节点的分类	84
一、功率方程和变量 二、变量和节点的分类	
第五节 高斯-塞德尔法潮流计算	86
一、高斯-塞德尔法迭代格式 二、对网络中 PV 节点的考虑 三、功率及功率损耗的计算	
四、高斯-塞德尔法潮流计算的原理框图	
第六节 牛顿-拉夫逊法潮流计算	89
一、牛顿-拉夫逊法简介 二、直角坐标形式的节点功率方程式 三、修正方程式 四、牛顿-拉夫逊法的求解过程及框图 五、牛顿-拉夫逊法的极坐标形式	
第七节 $P-Q$ 分解法潮流计算	96
一、 $P-Q$ 分解法的修正方程式 二、 $P-Q$ 分解法潮流计算的基本步骤和特点	
思考题与习题	99
第四章 电力系统有功功率的平衡及频率调整	101
第一节 概述	101
一、系统频率变化对用户的影响 二、系统频率变化对发电厂和系统本身的影响	
第二节 电力系统中有功功率的平衡	102
一、有功功率负荷的变动及其调整 二、有功功率的平衡和备用容量 三、各类发电厂的特点及合理组合	
第三节 电力系统的频率调整	105
一、电力系统负荷的有功功率-频率静态特性 二、发电机组的有功功率-频率静态特性 三、电力系统的有功功率-频率静态特性及频率的一次调整 四、频率的二次调整 五、互联系统的频率调整 六、调频电厂的选择	
思考题与习题	115
第五章 电力系统无功功率的平衡和电压调整	117
第一节 概述	117
一、电压变动对用户的影响 二、节点电压对有功及无功功率的影响	
第二节 电力系统中无功功率的平衡	119
一、无功功率负荷和无功功率损耗 二、无功功率电源 三、无功功率的平衡	
第三节 电力系统的电压管理	122
一、中枢点电压管理 二、电压调整的基本原理	
第四节 电力系统的几种主要调压措施	123
一、改变发电机端电压调压 二、改变变压器变比调压 三、改变网络中无功功率分布调压 四、改善电力线路参数——串联电容器调压	
思考题与习题	136
第六章 电力网的经济运行	138
第一节 电力网的电能损耗	138
一、电力线路上的电能损耗 二、变压器中的电能损耗 三、电力网的网损率或线损率	

第二节 降低网损的技术措施	140
一、降低网损的意义 二、降低网损的技术措施	
第三节 电力网的年运行费	144
一、电力网中设备的折旧费 二、电力网中设备的小修费和维护管理费 三、电力网中的电能损耗费	
第四节 电力线路导线截面的选择	146
一、按经济电流密度选择导线截面 二、按机械强度的要求选择导线最小容许截面 三、按导线的长期发热选择导线截面 四、按电晕临界电压选择导线截面 五、按容许电压损耗选择导线截面 六、选择导线截面的基本方法	
思考题与习题	152

第二篇 电力系统故障的分析与计算

第七章 同步发电机的基本方程式及其三相短路的电磁暂态过程	154
第一节 同步发电机的基本方程式	154
一、同步发电机的基本方程式 二、派克变换及其应用 三、同步发电机的电压方程式	
第二节 同步发电机的暂态参数和等值电路	169
一、同步发电机正常运行时定子回路的电压方程式 二、无阻尼绕组同步发电机三相短路的物理过程 三、同步发电机的暂态电势和暂态电抗 四、无阻尼绕组同步发电机电流自由分量衰减的时间常数	
第三节 同步发电机的次暂态参数和等值电路	175
一、同步发电机的次暂态电势和次暂态电抗 二、有阻尼绕组同步发电机电流自由分量衰减的时间常数 三、同步发电机各电抗、电势大小的比较	
* 第四节 同步发电机的三相短路电流	183
一、无阻尼绕组同步发电机的三相短路电流 二、有阻尼绕组同步发电机的三相短路电流	
第五节 自动调节励磁装置对短路电流的影响	189
思考题与习题	190
第八章 电力系统各元件的序参数和等值电路	192
第一节 对称分量法	192
第二节 同步发电机的负序和零序电抗	193
一、同步发电机的负序电抗 二、同步发电机的零序电抗	
第三节 异步电动机的参数和等值电路	195
一、异步电动机的次暂态参数和等值电路 二、异步电动机的负序和零序参数	
第四节 变压器的零序参数和等值电路	198
一、双绕组变压器的零序参数和等值电路 二、三绕组变压器的零序参数和等值电路 三、自耦变压器的零序参数和等值电路	
第五节 电力线路的零序阻抗和等值电路	208
一、“导线-大地”回路的阻抗 二、单回路无避雷线三相架空电力线路的零序阻抗 三、双回路无避雷线三相架空电力线路的零序阻抗 四、单回路有避雷线三相架空电力线路的零序阻抗 五、双回路有避雷线三相架空电力线路的零序阻抗 六、电缆线路的零序阻抗	
第六节 电力系统故障运行的等值网络	218
一、短路故障的等值网络 二、非全相运行的等值网络	
思考题与习题	220

第九章 电力系统故障的分析与实用计算	223
第一节 由无限大容量电源供电的三相短路的分析与计算	223
一、无限大容量电源 二、无限大容量电源供电的三相短路暂态过程的分析 三、短路的冲击电 流、短路电流的最大有效值和短路功率 四、无限大容量电源供电的三相短路电流周期分量有效 值的计算	
第二节 电力系统三相短路的实用计算	230
一、起始次暂态电流 I'' 的计算 二、冲击电流和短路电流最大有效值 三、电流分布系数和转移 阻抗 四、应用运算曲线法求任意时刻短路电流周期分量的有效值 五、三相短路电流的计算机 算法	
第三节 电力系统不对称短路的分析与计算	255
一、单相接地短路 二、两相短路 三、两相接地短路 四、正序等效定则 五、不对称短路时 运算曲线的应用 六、变压器两侧电压、电流对称分量的相位关系 七、不对称短路时网络中电 流和电压的计算	
第四节 电力系统非全相运行的分析	281
一、单相断线 二、两相断线	
思考题与习题	286

第三篇 电力系统稳定性分析

第十章 机组的机电特性	291
第一节 同步发电机组的运动方程式	291
第二节 发电机的功-角特性方程式	295
一、隐极式发电机的功-角特性方程式 二、凸极式发电机的功-角特性方程式 三、多机系统中 发电机的功-角特性方程式 四、网络接线及参数对有功功率功-角特性的影响 五、关于同步发 电机的等值电路	
第三节 异步电动机组的机电特性	310
一、异步电动机组的运动方程式 二、异步电动机的电磁转矩	
第四节 自动调节励磁系统对功-角特性的影响	312
一、无自动调节励磁时发电机端电压的变化 二、自动调节励磁系统对功-角特性的影响	
思考题与习题	314
第十一章 电力系统的静态稳定性	316
第一节 电力系统静态稳定性的基本概念	316
第二节 小扰动法的基本原理和在分析电力系统静态稳定性中的应用	318
第三节 调节励磁对电力系统静态稳定性的影响	322
一、不连续调节励磁对静态稳定性的影响 二、对电力系统静态稳定性的简单综述	
第四节 电力系统电压、频率及负荷的稳定性	327
一、电力系统电压的静态稳定性 二、电力系统频率的静态稳定性 三、电力系统负荷的静态稳 定性	
第五节 保证和提高电力系统静态稳定性的措施	332
一、采用自动调节励磁装置 二、减小线路电抗 三、提高电力线路的额定电压 四、采用串联 电容器补偿 五、改善电力系统的结构	
思考题与习题	334

第十二章 电力系统的暂态稳定性	336
第一节 电力系统暂态稳定性概述	336
第二节 简单电力系统暂态稳定性的定性分析	338
一、各种运行情况下的功-角特性 二、对简单电力系统暂态稳定性的定性分析	
第三节 简单电力系统暂态稳定性的定量分析	341
一、等面积定则 二、极限切除角	
第四节 发电机组转子运动方程式的数值解法	343
一、分段计算法 二、改进欧拉法	
第五节 提高电力系统暂态稳定性的措施	353
一、快速切除故障和自动重合闸 二、强行励磁和快速关闭汽门 三、电气制动和变压器中性点	
经小电阻接地 四、采用单元接线方式 五、连锁切机和切除部分负荷 六、系统解列、异步运	
行和再同步	
思考题与习题	361
附录 I 与本书内容有关的法定计量单位名称与符号	363
附录 II 常用电气参数	365
附录 III 短路电流运算曲线	378
参考文献	382

绪 论

第一节 电力系统概述

一、电力系统的几个基本概念

1. 电力系统

由于电能不能大量储存,因此电能的生产、输送、分配和使用是同时进行的,于是电能从生产到使用就构成一个整体。通常将用于生产、输送、分配和使用电能的发电机、变压器、输配电线路及各种用电设备联接在一起和继电保护、自动装置、调度自动化和通讯等相应的辅助系统,组成的统一整体就称为电力系统,如图 0-1 所示。

2. 动力系统

电力系统及其动力部分的总体称为动力系统。电力系统的动力部分包括:①火电厂的锅炉、汽轮机、燃气轮机、热网等;②水电厂的水库、水轮机;③原子能电厂的反应堆、锅炉、汽轮机等。

3. 电力网

各种电压等级的输配电线路及升降压变压器组成了电力网,即电力系统中除去发电机和用户部分(见图 0-1)。

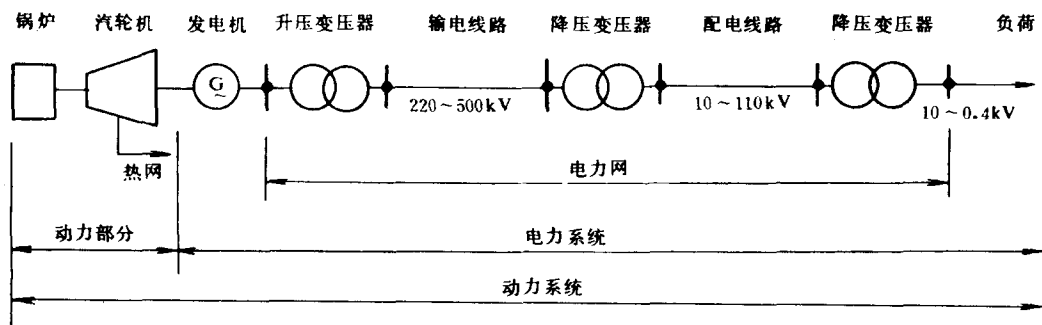


图 0-1 动力系统、电力系统及电力网示意图

二、电力系统的发展概况

1. 国外电力系统的发展概况

自 1831 年,法拉第发现电磁感应定律,在此基础上出现了交流发电机、直流发电机,于是可将其其它形式的能转变成电能。1882 年,第一座发电厂在英国伦敦完成,原始的电力线路是 100V 至 400V 的低压直流线路。同年法国人德普勒进一步提高了直流输电电压,使之达到 1500V 至 2000V,输电功率为 2kW,输电距离为 57km,这是世界上第一个电力系统。

随着生产的发展对输电功率和距离提出了进一步的要求,直流输电已不能满足要求。于是在 1885 年出现了变压器及交流系统,突破了长距离输电的困难,实现了单相交流输电。

第一条三相交流输电线路于1891年在德国运行,电压为12kV,线路长度达180多公里。从此三相交流制的优越性很快显示出来,使输电功率、输电电压、输电距离日益增大。数十年间,大电力系统不断涌现,在一些国家中甚至出现了全国性和国际性的电力系统。直流输电逐渐被淘汰。目前世界上已建成1200kV的交流输电线路,并在研究1500kV交流输电。最远输送距离已超过1000km,最大电力系统容量已超过20000万kW。

由于电力系统日益增大,会出现同步发电机并列运行的稳定性问题。因此又出现了超高压直流输电电力系统。目前直流输电电压已达 ± 600 kV,输电距离超过1000km,输电功率超过100万kW。

2. 中国电力系统的情况

1949年以前,中国电力系统发展非常缓慢。当年全国总装机容量为185万kW,年发电量为43.1亿kWh,110kV以上电压等级的电力系统仅东北有两个,总容量为72万kW。

1949年以后,我国电力系统发展比较迅速。1953年,220kV的高压输电线路在东北电力系统开始运行,1972年刘家峡出现第一条330kV超高压输电线路,1981年第一条500kV超高压输电线路投入运行。500kV交流输电是目前我国最高电压等级的输电方式,500kV交流输电线路已构成我国电网的骨干网络,至1993年该等级线路长已超过8000km。葛洲坝到华东的第一条 ± 500 kV超高压直流输电线路已于1990年投入运行。

随着我国改革开放的不断深入发展,电力工业也迅速发展。到1993年底的统计,全国发电装机容量已达18290万kW(其中水电装机容量为4400万kW,占总装机容量的25%;火电装机容量为13700万kW,占总装机容量的75%),全国年发电量为8314亿度。我国年发电量和发电总装机容量已居世界第四位。

目前,我国已建成六个跨省电力系统,它们分别是:华东、东北、华北、华中、西北和南方电力系统。还有四个省电力系统,即山东、福建、海南、四川省电力系统。随着国民经济的发展,我国电力系统将继续发展,而且还将逐步建立和加强它们之间的联系,形成更大的联合电力系统,甚至全国性统一电力系统。形成全国联合电力系统的问题正在研究中。

三、对电力系统运行的基本要求

1. 保证供电的可靠性

电力系统供电的中断将使生产停顿,生活混乱,甚至危及人身和设备的安全,会造成十分严重的后果,给国民经济带来严重的损失。因此对电力系统的运行首先要保证供电的可靠性,但并非所有负荷都绝对不能中断供电。因此根据用户对供电可靠性的要求将负荷分为以下三级。

第一级负荷:由于中断供电会造成人身事故、设备损坏、产品报废、生产秩序长期不能恢复、人民生活混乱及政治影响大等的用户,一般划为第一级负荷,这是重要负荷。

第二级负荷:由于供电中断会造成大量减产、人民生活会受到影响的用户负荷划为第二级负荷,这是比较重要的负荷。

第三级负荷:除一、二级负荷以外的一般用户负荷属于第三级负荷。

电力系统供电的可靠性,首先是保证第一级负荷,然后保证第二级负荷,最后保证第三级负荷。

2. 保证良好的电能质量

良好的电能质量有三个指标:①电压偏移一般不超过用电设备额定电压的 $\pm 5\%$;②频率偏移一般不超过 $\pm 0.2 \sim 0.5\text{Hz}$ (电压、频率两个指标是根据中国目前生产力发展水平而确定的。电压和频率偏移过大,会引起大量减产、产品报废,严重时危及系统的安全运行造成设备损坏、人身事故);③谐波指标应限制在谐波标准之内,谐波超过标准会影响系统中电气设备的安全运行。

3. 提高系统运行的经济性

电能生产的规模很大,消耗的能源在国民经济能源总消耗中占的比重很大,且电能在生产、输送、分配时损耗的绝对值是相当可观的。因此,提高电力系统运行的经济性具有极其重要的经济意义。电力系统的经济指标一般是指火电厂的煤耗以及电厂的厂用电率和电力网的网损率等。

对于将单一系统互联组成的联合电力系统,就容易满足对电力系统运行的基本要求。因此电力系统的发展趋势总是由小到大。但容量过大,电力系统的稳定性问题又比较突出,应在技术上采取相应的措施。

四、电力系统接线图

1. 电力系统的电气接线图

表示电力系统各元件之间的电气联系的电路图称为电力系统的电气接线图。一般是以单线图表示,但不能反映发电厂、变电所的相对地理位置。如图 0-2 所示的简单电力系统接线图。图中, G 为发电机, T1、T2 为变压器, l 为电力线路, L 为负荷。

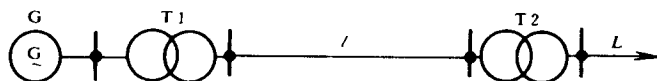


图 0-2 简单电力系统电气接线图

2. 电力系统的地理接线图

按比例地表示出电力系统中各发电厂和变电所相对地理位置,以及反映各条电力线路按一定比例的路径的接线图称为电力系统地理接线图。但它不能完全表示出各电力元件之间的连接情况,如图 0-3 所示。

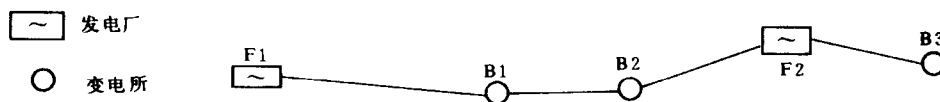


图 0-3 电力系统地理接线图

第二节 电力系统中性点的接地方式

一、电力系统中性点及接地方式

1. 电力系统中性点及接地方式

电力系统中性点是指星形接线的变压器或发电机的中性点。这些中性点的接地方式是

一个复杂的系统工程问题（它关系到系统的供电可靠性、绝缘水平、通信干扰、接地保护方式、电压等级、系统接线和系统稳定等很多方面的问题），故须经合理的技术经济比较后确定电力系统中性点的接地方式。

电力系统中性点接地方式可分为两大类：①电力系统中性点直接接地；②电力系统中性点不接地，其中又可分为电力系统中性点不接地及中性点经消弧线圈接地或经高阻抗接地两种方式。

2. 电力系统中性点不同接地方式的优缺点

(1) 中性点直接接地的电力系统。对于中性点直接接地的电力系统，其优点：首先是安全性好，因为系统单相接地时即为单相短路，保护装置可以立即切除故障；其次是经济性好，因中性点直接接地系统任何情况下，中性点电压不会升高，且不会出现系统单相接地时电弧过电压问题，这样电力系统的绝缘水平便可按相电压考虑，使其经济性好。其缺点是该系统供电可靠性差，因为系统发生单相接地时由于继电保护作用使故障线路的断路器立即跳闸，所以降低了供电可靠性（为了提高其供电可靠性就得加自动重合闸装置等措施）。

(2) 中性点不接地电力系统。中性点不接地电力系统的优点是供电可靠性高，因为电力系统单相接地时不是单相短路，接地线路可以不跳闸，只给出接地信号，按规定电力系统单相接地后仍可运行两小时，若在两小时内排除了故障，就可以不停电，这样就提高了电力系统供电的可靠性。其缺点是经济性差，因为电力系统单相接地时，使不接地相对地电压升高了 $\sqrt{3}$ 倍，即以线电压运行，故此系统的绝缘水平应按线电压设计，在电压等级较高的系统中，绝缘费用在设备总价格中占相当大比重，所以对电压高的系统就不宜采用。此外，中性点不接地系统单相接地时，易出现间歇性电弧引起的系统谐振过电压。

因此，目前我国 110kV 及以上电力系统采用中性点直接接地方式；60kV 及以下的电力系统采用中性点不接地方式（其中 35~60kV 电力系统一般采用中性点经消弧线圈接地；而 3~10kV 电力系统一般采用中性点不接地方式）。一般认为 3~60kV 网络，单相接地时电容电流超过下列数值时，中性点应装消弧线圈：3~6kV 网络为 30A；10kV 网络为 20A；35~60kV 网络为 10A。

二、消弧线圈的工作原理

设正常运行的电力系统为三相对称平衡系统，其三相导线对称排列，并经过完整地换位，各相间及相对地电容相等，那么每相对地电压为相电压数值，其相量为 $\dot{U}_a$ 、 $\dot{U}_b$ 、 $\dot{U}_c$ ，而中性点 N 对地电位 $\dot{U}_N = 0$ 。那么每相对地电容电流为 $I_{co} = U\omega C_0$ ，其中 U 为相对地电压， $C_0 = C_a = C_b = C_c$ 为每相对地电容。

中性点不接地电力系统单相接地时，如图 0-4 (a) 所示。此时，相对地电压的变化及接地电流有以下情况：

当 A 相单相接地时，中性点电压为 $\dot{U}_N = -\dot{U}_a$ ，则各相对地电压变为

$$\dot{U}_{ad} = 0; \quad \dot{U}_{bd} = \dot{U}_N + \dot{U}_b; \quad \dot{U}_{cd} = \dot{U}_N + \dot{U}_c$$

由 $\dot{U}_{bd}$ 、 $\dot{U}_{cd}$ 产生的对地电容电流为 $\dot{I}_{bd}$ 、 $\dot{I}_{cd}$ ，分别超前其对地电压 90° ，而入地总的电容电

流为 $\dot{I}_d = \dot{I}_{bd} + \dot{I}_{cd}$ 。以上电压、电流的相量图如图 0-4 (b) 所示。由此可见, 由于 A 相接地, A 相对地电压为零, B、C 两相对地电压的数值为 $\sqrt{3}U$ (U 为相电压值), 升高为线电压值。而三相线电压并未变化, 因此中性点不接地电力系统发生单相接地时, 可以允许继续运行二小时。那么单相接地电流的有效值为

$$I_d = \sqrt{3} \sqrt{3} U \omega C_0 = 3U \omega C_0 = 3I_{c0} \quad (0-1)$$

即单相接地电流值为正常时一相电容电流值的 3 倍。

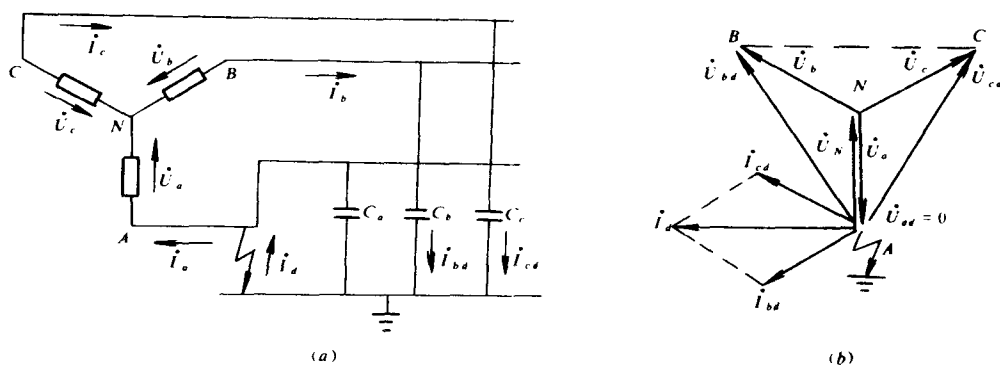


图 0-4 中性点不接地系统的单相接地

(a) 电流分布; (b) 电压、电流相量关系

中性点不接地电力系统发生单相接地时, 有接地电流 I_d 从接地点流过, 这是一个纯电容电流, 而非短路电流, 其值不大。这个接地电流达到一定值时就要在接地点产生间歇性电弧, 使系统产生过电压, 甚至会烧坏电气设备。为了减少接地电流, 使接地点的电弧易于熄灭, 就需要在电力系统某些中性点处装设消弧线圈 L , 以补偿接地电容电流。如图 0-5(a) 所示。

当系统 A 相单相接地时, 则消弧线圈 L 上的电压为中性点对地电压 $\dot{U}_N = -\dot{U}_a$, 可将 L 视为纯电感线圈, 其电流 $\dot{I}_L$ 落后于电压 $\dot{U}_N 90^\circ$, 相量图如图 0-5(b) 所示。

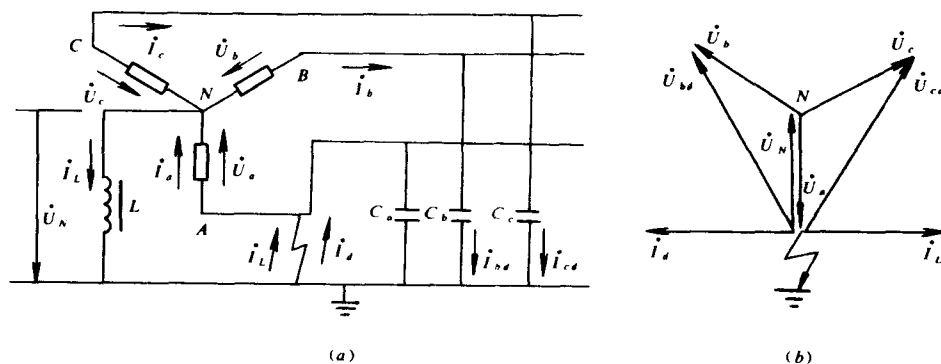


图 0-5 中性点经消弧线圈接地时的单相接地

(a) 电流分布; (b) 电压、电流相量关系

由图可见 $\dot{I}_L$ 与 $\dot{I}_d$ 方向恰为反相, 那么接地点总电流 $\dot{I}_{jd} = \dot{I}_d + \dot{I}_L$, 其绝对值大小为 $I_{jd} = |I_d - I_L|$ 。由于 I_L 对 I_d 的抵消作用使接地电流 I_{jd} 减少, 以利于消弧, 这就是消弧线圈的工作原理, 这也称 I_L 对 I_d 的补偿作用。

当 $I_L = I_d$ 时, $I_{jd} = 0$ 称全补偿, 系统中会产生谐振过电压, 这是不允许的; 当 $I_L > I_d$ 时, I_{jd} 为纯电感性, 称为过补偿, 这是系统运行中经常使用的补偿方式, 并且可以避免或减少谐振过电压的产生; 当 $I_L < I_d$ 时, I_{jd} 为纯电容性, 称为欠补偿。一般不采用欠补偿的运行方式, 以防止再切除线路或系统频率下降时, 使 I_d 减少, 可能出现全补偿状态而出现谐振过电压现象。

第三节 电力系统的负荷

一、电力系统的负荷

电力系统的负荷是指电力系统中用电设备消耗功率的总和。它们可分为动力负荷 (异步电动机、同步电动机、电热电炉、整流设备) 与照明负荷 (电灯)。

电力系统的综合用电负荷是指工业、农业、交通运输、市政生活等各方面消耗的功率之和。

电力系统的供电负荷是指电力系统的综合用电负荷加上电力网的功率损耗, 也就是发电厂供出的负荷。

电力系统的发电负荷是指供电负荷再加上发电厂厂用电, 也就是发电机应发出的功率。

二、负荷曲线

负荷曲线是指某一段时间内负荷随时间变化的曲线。负荷曲线有以下几种: 按负荷种类可分为有功负荷曲线和无功负荷曲线; 按时间段可分为日负荷曲线和年负荷曲线; 按计量地点又可分为个别用户、电力线路、变电所、发电机和整个电力系统的负荷曲线。将上述三种特征相结合, 就确立了某一种特定的负荷曲线。以下介绍几种常用的负荷曲线。

1. 有功日负荷曲线

有功日负荷曲线表明了系统负荷在一天 24 小时内的变化情况, 如图 0-6 (a) 所示。这是制定各发电厂发电负荷计划及系统调度运行的依据。一般不同行业的有功日负荷曲线变化较大, 但系统总的有功日负荷曲线却比较平坦, 这是由于最大最小负荷不同时出现而确定的同时率所决定的。那么将各行业最大负荷叠加后再乘以小于 1 的同时率, 即为电力系统的最大负荷。

2. 无功功率日负荷曲线

无功功率日负荷曲线如图 0-6 (b) 所示, 其用途较少。但应注意无功功率与有功功率最大负荷不一定同时出现, 这一点在作系统的无功功率平衡时很重要。一般白天出现无功功率最大负荷, 傍晚出现有功功率最大负荷, 如图 0-6 所示。

3. 有功功率年最大负荷曲线

表示一年内每月最大有功功率负荷变化的曲线, 称为有功功率年最大负荷曲线, 如图

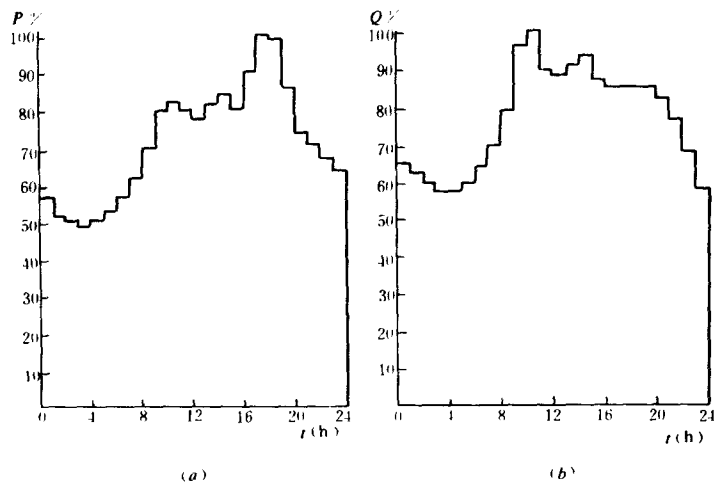


图 0-6 电力系统的日负荷曲线
(a) 有功功率负荷; (b) 无功功率负荷

0-7 所示。它大体上如余弦曲线。据此可有计划地扩建发电机组或新建发电厂, 以满足系统负荷增长的需要, 并恰当安排全年发电设备的检修计划。

4. 年持续负荷曲线

年持续负荷曲线是由一年中系统负荷 P 按其数值大小及其持续时间 t (h) 顺序排列而成, 如图 0-8 所示。全年 8760h 中, 有 t_1 小时的负荷为 P_1 , t_2 小时的负荷为 P_2 , t_3 小时的负荷为 P_3 , 其中 $P_1 = P_{\max}$ 。希注意, 年负荷大小排列的顺序并非是负荷大小出现的时间顺序 (即时刻顺序)。

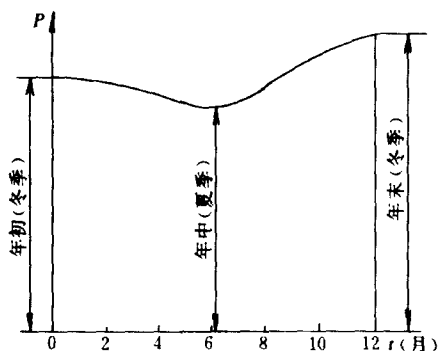


图 0-7 有功功率年最大负荷曲线

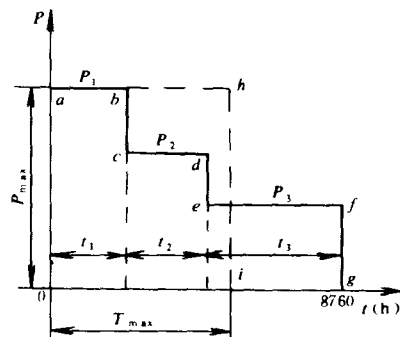


图 0-8 年持续负荷曲线

在安排发电计划, 进行可靠性估算和电网能量损耗计算等方面常用到这种曲线。

根据年持续负荷曲线, 可以计算系统负荷的全年耗电量为:

$$W = \int_0^{8760} P dt \quad (0-2)$$

这就是年持续负荷曲线下面所包含的面积, 如果负荷始终等于最大负荷 $P_{\max}$, 则经过 $T_{\max}$ 小时所消耗的电能恰好等于全年耗电量 W , 故称 $T_{\max}$ 为最大负荷利用小时数, 即