

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



DIANLI GONGCHENG

电力工程

(第二版)

上海电力学院 陆敏政 编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



TM7/50

2008

DIANLI GONGCHENG
电力工程
(第二版)

上海电力学院 陆敏政 编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。

全书共分十章,系统讲述了电力系统、电力网以及发电厂、变电所电气部分基本知识、理论和方法,主要内容包括电力系统概述,电力系统的等值网络,电力系统潮流的分析与计算,电力系统的电压调整和频率调整,高低压电器,发电厂、变电所的一次系统,电力系统三相短路电流的计算,电气设备的选择,发电厂、变电所的控制、信号及绝缘监察,电力系统稳定性等。每章后均有复习思考题。

本书可作为普通高等教育电气信息类相关专业的本科教材,也可作为高职高专和成人高校有关专业的教学用书,还可作为从事电力工程工作的技术人员培训教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电力工程/陆敏政编. —2版. —北京:中国电力出版社, 2007

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5083-6107-9

I. 电… II. 陆… III. 电力工程-高等学校-教材
IV. TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 160287 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京密云红光印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1997 年 10 月第一版

2008 年 1 月第二版 2008 年 1 月北京第八次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 20.5 印张 503 千字

定价 31.50 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为修订教材。

本书是中国电力出版社1997年出版的《电力工程》课程教材第二版。根据高等学校电气工程类专业中非“电力系统及其自动化”专业方向的其他一些专业的特点和培养目标,要求学生了解对电力系统运行以及发电厂、变电所电气部分的基本知识和基础理论应有比较全面的了解,《电力工程》课程正是为此而设置的。

本书在选材上,注意与基础课程和其它专业课程的衔接与配合;在编写中,着重讲清基本原理,减少繁琐的数学推导;在基本概念的阐述中,采用比较容易接受的方法,对问题进行讨论和说明,力求做到严格、简明、清晰;通过典型例题,介绍电力工程计算的基本方法。全书每章均附有复习思考题,书后有解题用的附录,便于读者复习和练习。

为了满足更多的非电力类专业方向的学生在学习电气设备选择一章的教学需要,本书在编写中增加了第七章电力系统三相短路电流的计算,供未单独设置《电力系统故障分析》课程的专业在教学中选用。

本课程教材的授课时数计划为100学时,每章讲授的时数和教材内容的取舍,各校可根据教学情况具体安排。

本书第二版仍由上海电力学院陆敏政编写。在此,编者对原第一版的参编者和本书所参考文献的各位作者,致以衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中讹误之处,恳请广大读者批评指正。

编者

2007年10月

目 录

前言

第一章 电力系统概述	1
第一节 电力系统的组成和技术特点	1
第二节 电力系统中发电厂的生产过程简介	4
第三节 电力系统的接线方式和电压等级	5
第四节 电力系统中性点的运行方式	8
第五节 电力系统的负荷	12
第六节 电力系统的运行状态	14
复习思考题	15
第二章 电力系统的等值网络	16
第一节 电力线路的结构	16
第二节 电力线路的参数及等值电路	19
第三节 变压器、电抗器的参数及等值电路	24
第四节 发电机、负荷的参数及等值电路	30
第五节 电力系统的等值网络	32
复习思考题	39
第三章 电力系统潮流的分析与计算	40
第一节 电力网络元件的电压降落和功率损耗	40
第二节 开式网络的潮流计算	45
第三节 闭式网络的潮流计算	51
第四节 复杂闭式网络的潮流计算	59
第五节 电力线路导线截面积的选择	63
复习思考题	67
第四章 电力系统的电压调整和频率调整	69
第一节 电力系统的无功功率平衡	69
第二节 电力系统的电压管理	73
第三节 电力系统的几种主要调压措施	75
第四节 电力系统频率调整基本概念	83
第五节 电力网络经济运行概念	88
复习思考题	92
第五章 高低压电器	93
第一节 开关电器的灭弧原理	93
第二节 高压断路器	103
第三节 隔离开关	119
第四节 低压开关电器	124
第五节 互感器	133

第六节 电抗器	145
复习思考题	147
第六章 发电厂、变电所的一次系统	149
第一节 电气主接线	149
第二节 发电厂和变电所自用电接线	157
第三节 配电装置	163
第四节 过电压防护、接地及电气安全知识	178
复习思考题	193
第七章 电力系统三相短路电流的计算	194
第一节 概述	194
第二节 由无限大容量电源供电的电力系统三相短路电流的计算	195
第三节 由有限容量电源供电的电力系统三相短路电流的计算	200
第四节 异步电动机对短路电流的影响	206
复习思考题	209
第八章 电气设备的选择	210
第一节 载流导体的发热和电动力	210
第二节 电气设备选择的一般条件	224
第三节 母线、电缆、绝缘子的选择	227
第四节 高压断路器、隔离开关及高压熔断器的选择	234
第五节 限流电抗器的选择	236
第六节 互感器的选择	239
复习思考题	245
第九章 发电厂、变电所的控制、信号及绝缘监察	246
第一节 概述	246
第二节 断路器控制回路	250
第三节 隔离开关和接地刀闸的控制与信号	256
第四节 中央信号装置	260
第五节 绝缘状况监察装置	265
第六节 变电所和发电厂网络部分微机监控系统简介	270
复习思考题	272
第十章 电力系统稳定性	274
第一节 电力系统的功率特性	274
第二节 电力系统静态稳定性	279
第三节 电力系统的暂态稳定性	286
第四节 超高压直流输电简介	298
复习思考题	301
附录 A 同步发电机主要技术数据	302
附录 B 架空线路技术数据	302
附录 C 电力变压器技术数据	307
附录 D 断路器和隔离开关技术数据	317
附录 E 互感器技术数据	319
参考文献	322

第一章 电力系统概述

第一节 电力系统的组成和技术特点

电能是我国社会主义现代化建设和人民生活中不可缺少的重要能源，电力工业在国民经济中占有十分重要的地位。电能由发电厂生产，然后由电力网络输送到城市、农村和工矿企业，供用户的用电设备使用。由发电厂内的发电机、电力网络内的变压器和电力线路以及用户的各种用电设备组成的统一整体，称为电力系统。如果把发电厂的动力部分(如热力发电厂的锅炉、汽轮机、热力网和用热设备，水力发电厂的水库、水轮机以及核电厂的反应堆等)也包含在内，则称之为动力系统。与电力系统相关联的是电力网络，它是指电力系统中除发电机和用电设备以外的一部分。所以电力网络是电力系统的一个组成部分，而电力系统又是动力系统的一个组成部分。这三者的关系示于图 1-1。

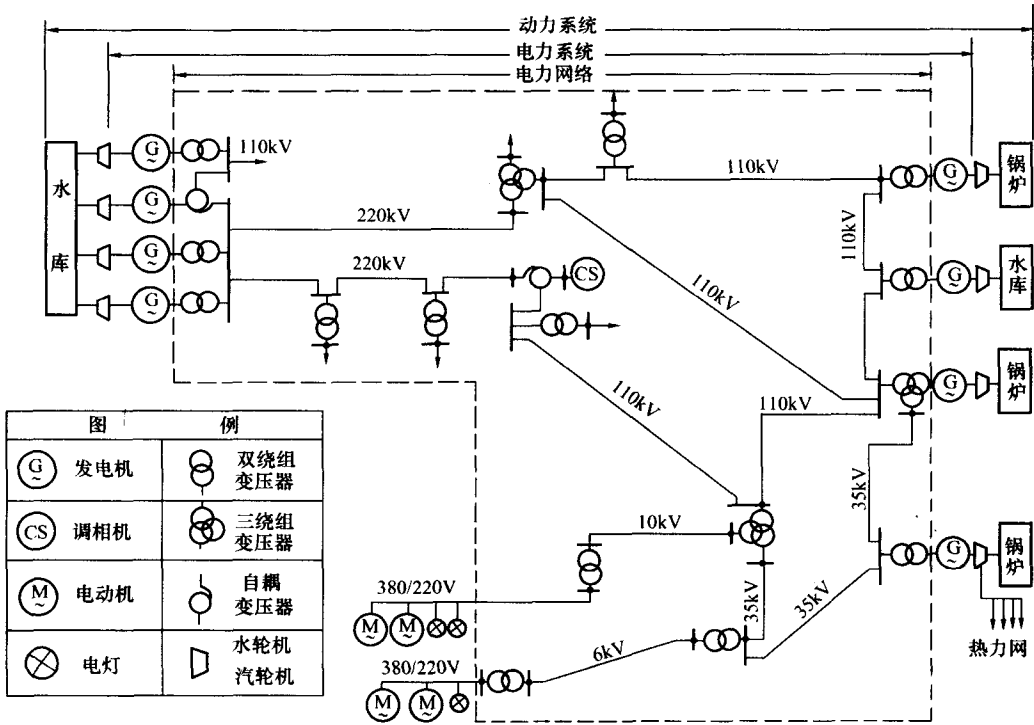


图 1-1 动力系统、电力系统、电力网络示意图

电能的生产、输送和消费有以下区别于其它工业的技术特点。

(1) 电能不能大量存贮。电能的生产、输送、分配和消费实际上是同时进行的。电力系统中的发电厂在任何时刻生产的电能必须等于该时刻用电设备消费的电能与输送和分配环节中的损耗电能之和。

(2) 电力系统的暂态过程非常短促。电力系统中的发电机、变压器、电力线路、电动机等元件的投入或退出运行都在一瞬间完成,电能输送所需时间很短。电力系统从一种运行状态过渡到另一种运行状态的暂态过程非常短促。

(3) 电能与国民经济各部门和人民日常生活的关系极为密切。电能与其它能量之间的转换十分方便,所以国民经济各部门和人们日常生活中都广泛使用电能。电能供应的中断或减少会给社会带来严重的后果。

根据以上这些特点,对电力系统的运行有以下基本要求。

1. 保证供电的安全可靠

保证安全可靠地发、供、用电是对电力系统运行的首要要求。在运行过程中,发、供、用电的突然中断大多由事故引起。统计资料表明,电力生产发生事故的直接原因中,设备质量差引起的约占 32%,自然灾害引起的约占 16.6%,继电保护误动作引起的占 13.2%,人为因素引起的占 17%,运行管理水平低引起的占 21.2%。因此,减少事故应从多方面着手。例如:为了防止设备事故,就要严密监视设备的运行状态和认真维修设备;为了防止人为事故,就应不断提高运行人员的技术水平和工作责任心;为了提高电力系统运行的安全性,还必须完善电力系统结构,提高系统抗干扰的能力;配备足够的有功功率电源和无功功率电源;采用电子计算机对电力系统的运行进行安全监视和控制等。只有全面地提高电力系统的安全运行水平,才能保证对用户的不间断供电。

在这里要指出,并非所有负荷都绝对不能停电。根据用户对供电可靠性的不同要求,目前我国将负荷分为以下三级。

第一级负荷:对这一级负荷中断供电,将造成重大人身伤亡事故和设备损坏,将产生大量废品,使生产秩序长期不能恢复,人民生活严重混乱。

第二级负荷:对这一级负荷中断供电,将造成生产部门大量减产,使人民生活受到很大影响。

第三级负荷:不属于以上第一、二级的负荷以及停电后影响不大的其它负荷都属于第三级负荷,如工厂的附属车间、小城镇和农村的公共负荷等。

对以上三个级别的负荷,可以根据系统运行情况采取不同的技术措施来满足其对供电可靠性的要求。

2. 保证电能的质量标准

衡量电能质量的主要指标是电压、频率和波形。

电压和频率是电气设备设计和制造的基本技术参数,也是衡量电能质量的两个基本指标,在电力系统正常运行时,规定其供电电压必须在允许的变化范围之内。这是电能主要的质量指标。我国目前所规定的用户供电电压允许变化范围,见表 1-1。

表 1-1 用户供电电压允许变化范围

线路额定电压	电压允许变化范围(%)	线路额定电压	电压允许变化范围(%)
35kV 及以上	± 5	低压照明	$+5 \sim -10$
10kV 及以下	± 7	农业用户	$+5 \sim -10$

由于电力网络中存在电压损耗,为保证用户的电压质量合乎标准,需要采取一定的电压调整措施。关于这方面的内容,将在第四章中论述。

电力系统都有其额定频率，即系统中所有发电机都对应一个额定转速。系统运行时的频率与额定频率之差称为频率偏移。频率偏移是电能质量的又一个主要指标。我国电力系统采用的额定频率为 50Hz，其允许偏移值如表 1-2 所示。有关频率调整的内容，也在第四章中介绍。

表 1-2 系统频率允许偏移值

运 行 情 况		允许频率偏移值(Hz)	允许标准时钟误差(s)
正常运行	中、小系统	± 0.5	40
	大系统	± 0.2	30
事故运行	30min 以内	± 1	
	15min 以内	± 1.5	
	绝不允许低于	-4	

电能的第三个主要质量指标就是要求供电电压(或电流)的波形应为正弦波。系统中的发电机虽然发出符合标准的正弦波电压，但系统中有不少电压与电流成非线性关系的电气元件(如电弧炉、电焊设备等)，都是电力系统谐波电流和电压的来源，尤其是应用可控硅的电力电子装置越来越普及后产生的大量谐波，造成系统电压波形的畸变，使供电电压达不到所要求的正弦波形。为此，必须采取各种技术措施，对谐波加以抑制或补偿，以保证电能质量。

我国颁布的关于谐波方面的国家标准，规定了谐波电压的限值，如表 1-3 所示。

表 1-3 谐波电压限值

电网对称电压 (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	4.0	3.2	1.6
35	3.0	2.4	1.2
66	3.0	2.4	1.2
110	2.0	1.6	0.8

表 1-3 中，畸变率是衡量电网电压波形畸变程度的技术数据(其值为各次谐波有效值平方之和的平方根与其基波有效值的百分比)。

3. 提高运行的经济性

电能是国民经济中绝大多数生产部门的主要动力，电能生产消耗的能源在我国能源总消耗中占的比重也很大，提高电能生产的生产性具有十分重要的意义。为了提高电力系统运行的经济性，必须尽量降低发电厂的煤耗率(或水耗率)、厂用电率和电力网的损耗率。

上述三个方面的要求是互相联系，又互相制约的，一个不安全的电力系统谈不上优质和经济，而电能质量低的电力系统也不会是安全和经济的。但是，对安全和优质的要求，有时又会与经济性发生矛盾。因此，在考虑满足其中一项要求时，必须兼顾其它两项。

根据以上基本要求，最好将各个系统联合，组成联合电力系统。这可以大大提高供电的可靠性，减少因设备事故引起供电中断而设置的备用容量；可以更合理地调配用电，降低系

统的最大负荷,提高发电设备的利用率,减少系统中发电设备的总容量;还可以更合理地利用系统中各种类型的发电厂和采用大容量、高效率的发电机组,从而提高系统运行的经济性。同时,也应指出,为使各个系统联合,通常需增加一定的投资。

第二节 电力系统中发电厂的生产过程简介

电力工业应用的能源种类很多,包括煤、石油、天然气、水力、核能、风力、潮汐、太阳能、地热、波浪能等,其中以煤、石油、水力和核能所占比例最大。以煤、石油、天然气等为原料的发电厂,统称为火(热)力发电厂,以水力为能源的称为水力发电厂,以核能为能源的称为核电厂(站)。下面对发电厂的生产过程作简略介绍。

一、火力发电厂

按原动机的不同,火力发电厂可分为汽轮机发电厂、蒸汽机发电厂、内燃机发电厂、燃气轮机发电厂等。目前大容量的火力发电厂多为汽轮机发电厂。火力发电厂按其作用来分有单纯发电的和既发电同时又兼供热的两种类型,前者一般多采用凝汽式汽轮发电机组,故又称凝汽式发电厂,后者称为供热式发电厂(简称热电厂)。下面简要说明凝汽式发电厂的生产过程。

煤从煤场经碎煤机后,用传送带送至原煤仓,然后由磨煤机磨成煤粉送入煤粉仓内。煤粉由给煤机送至喷燃器,用送风机送来的热空气,将煤粉吹入炉膛燃烧。热空气是由放置于锅炉烟道中的空气预热器加热的,这不仅可以提高炉膛温度,而且利用了烟道中烟气的热量。

锅炉的给水需先进行化学处理(去除水中的金属微量元素,以便减少水垢和对管道的腐蚀),并经置于烟道中的省煤器和利用汽轮机中段抽气加热的加热器,进行预热。然后给水经除氧器去除氧等气体后,送入锅炉。给水在锅炉中加热成为高温(可达 500°C 以上)、高压(可达 9.8MPa 以上)的过热蒸汽,经管道送入汽轮机。

高温、高压的过热蒸汽在汽轮机中变为定向的高速汽流,冲击汽轮机转子上的叶片,使转子高速旋转,带动发电机转子随之旋转而发电。蒸汽在汽轮机转子逐级叶片上做功,从最后一级叶片出来的蒸汽,其温度和压力都很低了,最后通过凝汽器冷凝成水,并经凝结水泵送回给水系统重新使用。凝汽器需用大量的水循环冷却,以便将汽轮机尾部蒸汽的热量带走。凝汽式汽轮机发电厂生产过程的示意图见图1-2。由上述生产过程可知,火力发电厂的热效率是不高的,一般不超过40%。

二、水力发电厂

水力发电的原理是将江(河)水从上游(高水位)到下游(低水位)的位能转换为电能。江(河)水冲击水轮机的叶片,推动水轮机转子旋转,并带动发电机定子随之旋转而发电。

显然,当江(河)水的流量一定时,要想多发电,必须有较高的水头(上、下游水位的落差)。因此,常用人工修筑拦河堤坝形成水库,以抬高上游水位,这种发电厂统称为堤坝式水力发电厂。另有一种径流式水力发电厂,适宜于建在水头低、水流急的江(河)道上,不需修筑大坝,水由管道引入水轮机,这种发电厂的发电量随水流情况变化而不稳定。还有一种抽水蓄能水力发电厂,它有上、下两个水库。当电力系统负荷高峰时,用上水库的水,流经水轮机发电,流入下水库;当电力系统负荷低时,再用大型水泵将水从下水库抽到上水

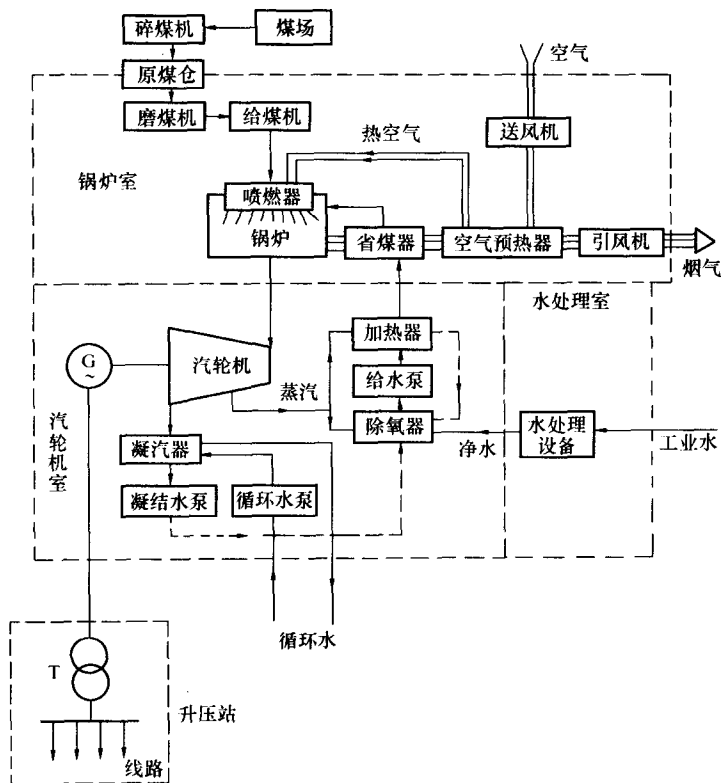


图 1-2 凝汽式汽轮机发电厂生产过程示意图

库储存起来，这种水力发电厂主要用于对电力系统进行峰荷调节。

三、核电厂

核电厂主要的工作元件是核反应堆，它相当于火力发电厂的锅炉，主要由核燃料、慢化剂、冷却系统、控制调节系统、危急保安系统、反射体和保护层等部分组成，其它部分（汽轮机、发电机等）与火力发电厂基本相同。

除上述三种主要发电厂外，还有潮汐发电厂、地热发电厂、太阳能发电厂等，因其发电机组容量均不大，不再详述。

第三节 电力系统的接线方式和电压等级

一、电力系统的接线图

电力系统的接线图有两种，即电力系统的电气接线图和电力系统的地理接线图。

1. 电力系统的电气接线图

电气接线图可较详细地表示出电力系统各主要元件之间的电气联系。但电气接线图上不能反映出各发电厂、变电所的相对地理位置。它一般是单线图，电力系统的电气接线图如图 1-1 所示。

2. 电力系统的地理接线图

在地理接线图上,各发电厂、变电所的相对地理位置,乃至各条电力线路的路径都按一定比例画出,但各主要元件之间的电气联系往往不能完全表示出来。电力系统的地理接线图如图 1-3 所示,常和电气接线图配合使用。

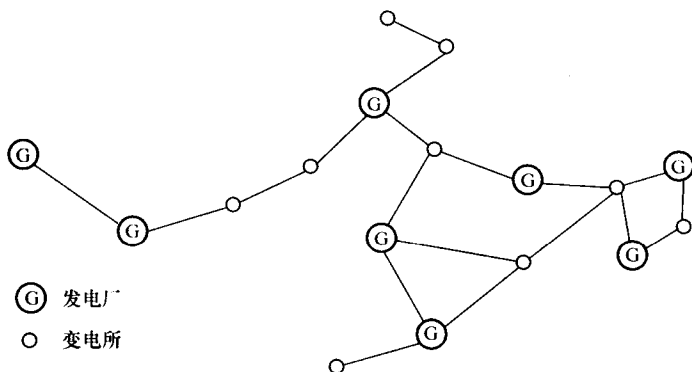


图 1-3 电力系统的地理接线图

二、电力系统的接线方式

电力系统的接线方式大致上可分为无备用和有备用两类。无备用接线有单回路放射式、单回路干线式和单回路链式等,如图 1-4 所示。有备用接线有双回路放射式、双回路干线式、双回路链式以及环式和两端供电网络,如图 1-5 所示。

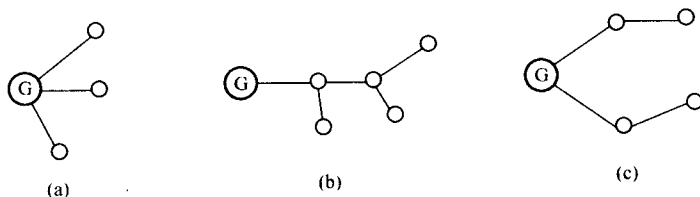


图 1-4 无备用接线方式

(a) 单回路放射式; (b) 单回路干线式; (c) 单回路链式

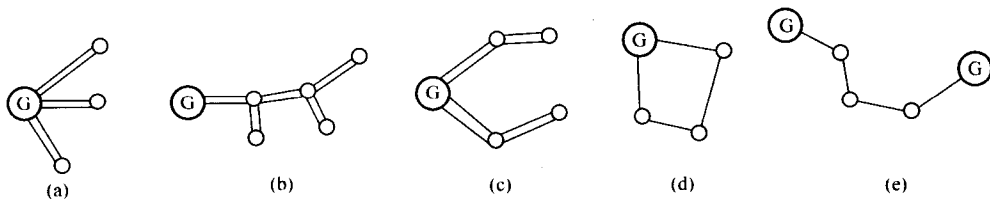


图 1-5 有备用接线方式

(a) 双回路放射式; (b) 双回路干线式; (c) 双回路链式; (d) 环式; (e) 两端供电网络

无备用接线的主要优点是简单、经济、运行方便,主要缺点是供电可靠性差。因此,这种接线不适用于向一级负荷供电的场合。

有备用接线中的双回路放射式、双回路干线式、双回路链式的优点在于供电可靠性高,缺点是不够经济。环式接线除有与上列接线方式相同的供电可靠性外,还较为经济,缺点是

运行调度较复杂，并且故障时的电压质量较差。两端供电网络最常见，但必须要有两个以上的独立电源，方能采用这种接线。

电力系统采用何种接线方式需经技术经济比较后方能确定。选择何种接线方式时除保证供电可靠、有良好的电能质量和经济性外，还应具有运行灵活和操作安全的特点。

三、电力系统的电压等级

电力系统中的电气设备都是按照额定电压和额定频率来设计的，当电气设备在额定电压和额定频率下运行时，将具有最好的技术指标和经济指标。为此，各国根据本国国情制定出标准的额定电压和额定频率，我国的额定频率为 50Hz。我国对 1000V 以上高压电气设备的额定电压规定的数值如表 1-4 所示。

表 1-4 1000V 以上高压电气设备的额定电压 (kV)

用电设备额定线电压	同步发电机额定线电压	变压器额定线电压	
		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	38.5
(60)		(60)	(66)
110		110	121
(154)		(154)	(169)
220		220	242
330		330	363
500		500	525

注 1. 变压器一次绕组栏内的 3.15、6.3、10.5、15.75kV 电压适用于发电机端直接连接的升压变压器。

2. 变压器二次绕组栏内的 3.3、6.6、11kV 电压适用于阻抗值在 7.5% 以上的降压变压器。

由表 1-4 可看出，在同一电压等级下，各种电气设备的额定电压并不完全相等。这是为了使各种电气设备都能运行在较有利的电压下。但在规定它们的额定电压时，应使之能相互配合，下面具体加以说明。

电力线路的额定电压和用电设备的额定电压相等。这是因为经线路输送功率时，沿线路的电压分布往往是始端高于末端，线路的额定电压实际上是线路的平均电压（即始末端电压的算术平均值），而用电设备的额定电压取与线路额定电压相等，使各用电设备能在接近它们的额定电压下运行。线路额定电压也称为网络的额定电压，如 220kV 网络等。

发电机往往接在线路始端，因此发电机的额定电压比线路额定电压高 5%。

变压器一次侧接电源，相当于用电设备；二次侧向负荷供电，则相当于发电机。因此，变压器一次侧额定电压等于用电设备额定电压（但直接和发电机相连接的变压器一次侧额定电压应等于发电机额定电压，使之相互配合），变压器二次侧电压应较线路额定电压高 5%。但由于变压器二次侧电压是指空载时的电压，而额定负载下变压器内部的电压降落约为 5%。因此，为了使正常运行时变压器二次侧电压能较线路额定电压高 5%，规定变压器二次侧额定电压较线路额定电压高 10%。只有漏抗较小的、二次侧直接与用电设备相连接的、或电压特别高的变压器，其二次侧额定电压才规定较线路额定电压高 5%。

表 1-4 所示的 10 种额定电压等级中：500、330、220kV 多用于大电力系统的主干线；

110kV 既用于中小电力系统的主干线,也用于大电力系统的二次网络;35kV 用于中、小城市或大工业企业内部网络,也广泛用于农村网络;10kV 则是常用的、低一级的配电电压;当负荷中高压电动机的比重较大时,可考虑采用 6kV 配电的方案。这里要说明,以上划分不是一成不变的,随着电力系统的发展,当主干线电压等级提高后,220kV 就可能退为二次网络的电压等级。

表 1-5 列出了根据经验确定的、与各额定电压等级相适应的输送功率和输送距离,以供参考。

表 1-5 与各额定电压等级相适应的输送功率和输送距离

额定电压 (kV)	输送功率 (MW)	输送距离 (km)	额定电压 (kV)	输送功率 (MW)	输送距离 (km)
3	0.1~1.0	1~3	(60)	3.5~30	30~100
6	0.1~1.2	4~15	110	10~50	50~150
10	0.2~2.0	6~20	220	100~500	100~300
35	2~10	20~50	500	800~1500	300~1000

第四节 电力系统中性点的运行方式

电力系统的中性点是指星形连接的变压器(或发电机)的中性点。这些中性点的运行方式涉及绝缘水平、通信干扰、接地保护方式、电压等级、系统接线等方面,是一个综合性的问题。我国电力系统的中性点运行方式主要有三种,即中性点不接地(中性点绝缘)、中性点经消弧线圈接地和中性点直接接地。前两种接地系统统称为小接地电流系统,后一种接地系统称为大接地电流系统。这种区分方法是根据系统中发生单相接地故障时,其接地电流的大小来划分的。下面分别来介绍这三种接地方式在运行中的有关问题。

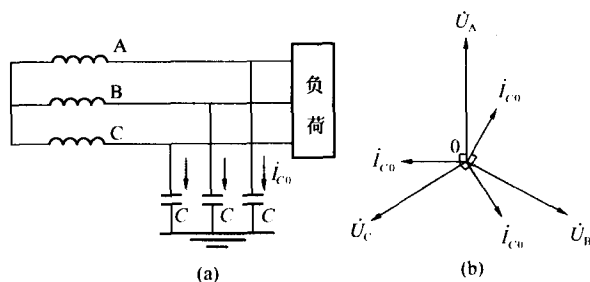


图 1-6 中性点不接地系统正常运行时的
电路图和相量图

(a) 电路图; (b) 相量图

一、中性点不接地的电力系统

我国 60kV 及以下的电力系统通常多采用中性点不接地运行方式。其正常运行时的电路图和相量图如图 1-6 所示。现假设三相系统的电压和线路参数都是对称的,把每相导线的对地电容用集中电容 C 来代替,并忽略相间分布电容。由于正常运行时三相电压 $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$ 是对称的,所以三相对地电容电流 $\dot{i}_{C0}$ 也是对称的,三相的电容电流之和为零。

图 1-7 (a) 所示为发生一相(例如 A 相)接地故障的情况,此时 A 相对地电压降为零,而非故障相 B、C 的对地电压在相位和数值上均发生变化,即

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}'_A &= \dot{U}_A + (-\dot{U}_A) = 0 \\ \dot{U}'_B &= \dot{U}_B + (-\dot{U}_A) = \dot{U}_{BA} \\ \dot{U}'_C &= \dot{U}_C + (-\dot{U}_A) = \dot{U}_{CA} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

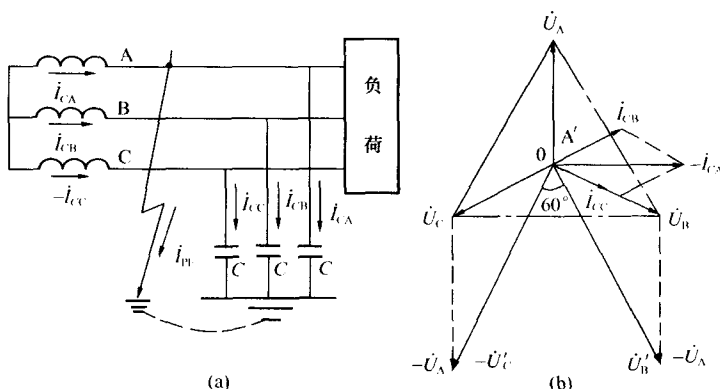


图 1-7 中性点不接地系统单相接地故障电路图和相量图

(a) 电路图; (b) 相量图

由图 1-7 (b) 相量图可知, 当 A 相接地时, B 相和 C 相对地电压变为 $\dot{U}'_B$ 和 $\dot{U}'_C$, 其数值等于正常运行时的线电压, 升高了 $\sqrt{3}$ 倍, $\dot{U}'_B$ 和 $\dot{U}'_C$ 的相位差变为 60° 。如果单相接地经过一定的接触电阻 (亦称过渡电阻), 而不是金属性接地, 那么故障相对地电压将大于零而小于相电压, 非故障相对地电压将小于线电压而大于相电压。

由图 1-7 (b) 还可看出, 在系统发生单相接地故障时, 三相之间的线电压仍然对称, 因此用户的三相用电设备仍能照常运行, 这也是中性点不接地系统的最大优点。在这里要指出, 中性点不接地系统在发生单相接地后, 是不允许运行很长时间的, 因为此时非故障相的对地电压升高了 $\sqrt{3}$ 倍, 很容易发生对地闪络, 从而造成相间短路。因此, 我国有关规程规定, 中性点不接地系统发生单相接地故障后, 允许继续运行的时间不能超过 2h, 在此时间内应设法尽快查出故障, 予以排除。否则, 就应将故障线路停电检修。

中性点不接地系统发生单相接地故障时, 在接地点将流过接地电流 (电容电流)。例如, A 相接地时, A 相对地电容被短接, B、C 相对地电压升高了 $\sqrt{3}$ 倍, 所以对地电容电流变为

$$\dot{I}_{CB} = \frac{\dot{U}'_B}{-jX_C} = \sqrt{3}\omega C\dot{U}_B e^{j60^\circ} \quad (1-2)$$

$$\dot{I}_{CC} = \frac{\dot{U}'_C}{-jX_C} = \sqrt{3}\omega C\dot{U}_B \quad (1-3)$$

接地电流 $\dot{I}_{PE}$ 就是上述电容电流的相量和, 即

$$\dot{I}_{PE} = -(\dot{I}_{CB} + \dot{I}_{CC}) = -3\omega C\dot{U}_B e^{j30^\circ} \quad (1-4)$$

其绝对值为

$$I_{PE} = 3\omega C U_{ph} = 3I_{C0} \quad (1-5)$$

$$I_{C0} = \omega C U_{ph}$$

式中 I_{PE} ——单相接地电流, A;

U_{ph} ——电网的相电压, V;

ω ——电源的角频率, rad/s;

C ——每相导线的对地电容, F;

I_{C0} ——每相导线的对地电容电流, A。

由式(1-5)可知,中性点不接地系统单相接地电流等于正常运行时每相对地电容电流的3倍。由于线路对地电容电流很难准确计算,所以单相接地电流(电容电流)通常可按下列经验公式计算

$$I_{PE} = \frac{(l_{oh} + 35l_{cab})U_N}{350}$$

式中 U_N ——电网的额定线电压, kV;

l_{oh} ——同级电网具有电的直接联系的架空线路总长度, km;

l_{cab} ——同级电网具有电的直接联系的电缆线路总长度, km。

最后还要指出,中性点不接地系统发生单相接地故障时,接地电流在故障处可能产生稳定的或间歇性的电弧,实践证明,当接地电流大于30A时,一般形成稳定电弧,成为持续性电弧接地,这将烧毁线路和可能引起多相相间短路。如果接地电流大于5~10A,但小于30A,则有可能形成间歇性电弧,这是由于电网中电感和电容形成了谐振回路所致。间歇性电弧容易引起弧光接地过电压,从而危及整个电网的绝缘。如果接地电流在5A以下,当电流经过零值时,电弧就会自然熄灭。

二、中性点经消弧线圈接地的电力系统

中性点不接地系统虽具有单相接地时仍可继续供电(一个短时间)的优点,但存在产生间歇性电弧而引起过电压(幅值可达2.5~3倍 U_{ph})的危险,为了克服这一缺点,可将电力系统中的中性点经消弧线圈接地。

所谓消弧线圈,其实就是具有气隙铁芯的电抗器,它装在变压器或发电机中性点与地之间,如图1-8(a)所示。由于装设了消弧线圈,构成了另一回路,接地点接地电流中增加了一个电感性电流分量,它和装设消弧线圈前的电容性电流分量相抵消,减小了接地点的电流,使电弧易于自行熄灭,从而避免了由此引起的各种危害,提高了供电可靠性。

从图1-8(b)可看出,例如C相接地时,中性点电压 $\dot{U}_0$ 变为 $-\dot{U}_C$,消弧线圈在 $\dot{U}_0$ 作用下产生电感电流 $\dot{I}_L$ (滞后于 $\dot{U}_0$ 90°),其数值为

$$I_L = \frac{U_C}{X_{ar}} = \frac{U_{ph}}{\omega L_{ar}}$$

式中 U_{ph} ——电网的相电压;

L_{ar} 、 X_{ar} ——消弧线圈的电感和电抗。

由图1-8(b)可看出,中性点经消弧线圈接地的电力系统发生单相接地故障时,非故障相电压仍升高 $\sqrt{3}$ 倍,三相导线之间的线电压仍然平衡,电力用户可以继续运行。

中性点经消弧线圈接地时,可以有三种补偿方式。如果选择消弧线圈的电感,使 $I_L = I_C$,则接地点电流为零,此即全补偿方式。这种补偿方式并不好,因为感抗等于容抗时,电网将发生谐振,影响系统安全运行。第二种是欠补偿方式,即选择消弧线圈时,使 $I_L < I_C$,此时接地点有未被补偿的电容电流流过。采用欠补偿方式时,当电网运行方式改变而切除部分线路时,对地电容电流减少,有可能成为全补偿方式,所以也很少被采用。实践中常采用的是第三种过补偿方式,即选择消弧线圈时,使 $I_L > I_C$,此时接地点有剩余的电感电流流

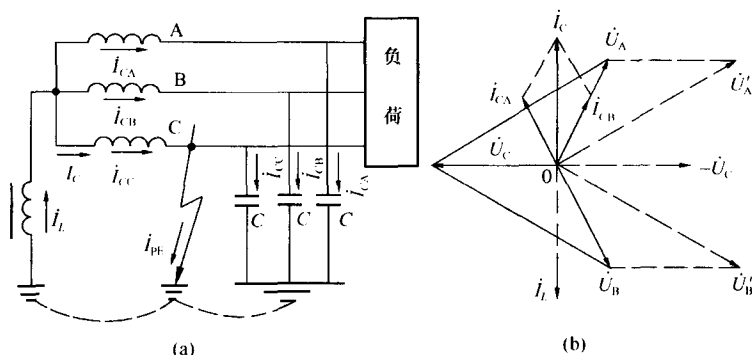


图 1-8 中性点经消弧线圈接地的系统单相接地故障电路图和相量图

(a) 电路图; (b) 相量图

过。在过补偿方式下,即使电网运行方式改变而切除部分线路时,也不致成为全补偿方式,而使电网发生谐振。同时,由于消弧线圈有一定的裕度,在今后电网发展增加线路后,原有消弧线圈还可继续使用。

选择消弧线圈时,通常可按式估算其容量

$$S_{ar} = 1.35 I_C \frac{U_N}{\sqrt{3}}$$

式中 S_{ar} ——消弧线圈的容量, kVA;

I_C ——电网的接地电容电流, A;

U_N ——电网的额定电压, kV。

一般认为,对 3~60kV 电网,电容电流超过下列数值时中性点应装设消弧线圈。例如:

3~6kV 电网 30A

10kV 电网 20A

35kV 电网 10A

三、中性点直接接地的电力系统

图 1-9 为中性点直接接地的电力系统示意图。如果该系统发生单相接地故障,就是单相短路,线路上将流过很大的单相短路电流 $\dot{I}_k^{(1)}$,从而使线路上的继电保护装置迅速动作,使断路器跳闸切除故障部分。显然,中性点直接接地的电力系统发生单相接地故障时,是不能继续运行的,所以供电可靠性不如前两种中性点接地方式。

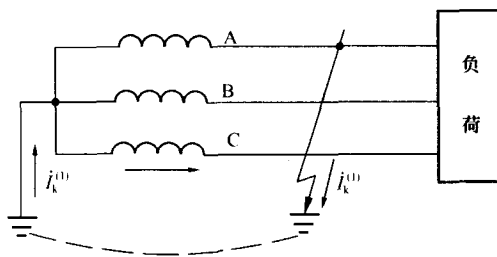


图 1-9 中性点直接接地的电力系统示意图

中性点直接接地电力系统发生单相接地时,中性点电位仍为零,非故障相对地电压也未变,因此输变电设备的绝缘水平只需按电网的相电压考虑,从而降低了工程造价。由于这一优点,我国 110kV 及以上的电力系统基本上都采用中性点直接接地的方式。而在电压等级较低的 60kV 及以下的电力系统中,电网的绝缘水平不是主要矛盾,所以大多采用中性点不