

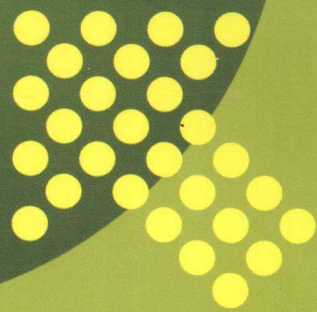
21世纪高等学校规划教材



DIANLI GONGCHENG

电力工程

王思华 主 编
吴秋瑞 吴文辉 副主编



 中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

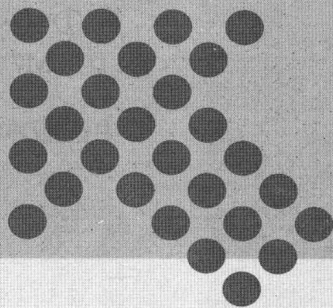
21世纪高等学校规划教材



DIANLI GONGCHENG

电力工程

主 编 王思华
副主编 吴秋瑞 吴文辉
编 写 任丽苗 崔跃华 刘建华
主 审 盛四清 王晓茹



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是 21 世纪高等学校规划教材。

本书是电气工程类专业的一门综合性、实践性较强的专业基础课，以电能生产、输送、分配和使用等相关的电力系统工程基础理论知识和基本计算方法为主要内容。全书共分十二章：首先概括介绍了电力工程的基础知识，然后系统讲述了构建电力工程的主要高压设备和接线方式，简单介绍了各组成元件的参数计算和网络潮流计算、短路计算及负荷计算，讲述了电气设备的选择方案及现代电力系统基本运行和控制，详细分析了二次电路的基本原理和实现方法，最后讲述了电气照明及防雷接地的有关知识。为了便于复习，每章均附有复习思考题。

本书可作为电气工程及其自动化专业本科教材用书，机电类专业、职工大学、高职高专学校也可选用，并可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力工程/王思华主编. —北京：中国电力出版社，2011. 1
21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978 - 7 - 5123 - 1344 - 6

I. ①电… II. ①王… III. ①电力工程—高等学校—教材
IV. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 014861 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 5 月第一版 2011 年 5 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 20 印张 489 千字

定价 33.00 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

本书是根据教育部《高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划》的精神和要求,遵循加强基础、拓宽专业的教学改革需要加以编写。本书横跨的专业面较宽,知识面较广,涵盖多门电力专业课的内容,其内容多而杂。

全书共分十二章。首先概括介绍了电力工程的基础知识,然后系统讲述了构建电力工程的主要高压设备和接线方式,简单介绍了各组成元件的参数计算和网络潮流计算、短路计算及负荷计算,讲述了电气设备的选择方案及现代电力系统基本运行和控制,详细分析了二次电路的基本原理和实现方法,最后讲述了电气照明及防雷接地的有关知识。为了便于复习,每章均附有复习思考题。

本书由兰州交通大学王思华编写第一、第八、第九章,石家庄铁道学院吴秋瑞编写第三、第七章,华东交通大学吴文辉编写第六、第十一、第十二章,兰州交通大学任丽苗编写第四、第十章,石家庄铁道学院崔跃华编写第二章、刘建华编写第五章。王思华负责全书的协调组织、统稿和改稿。另外,石家庄铁道学院张福生老师对本书的编写提出了很多建议。

本书由华北电力大学盛四清教授和西南交通大学王晓茹教授主审,并在审阅过程中提出了许多宝贵意见,谨在此表示衷心的感谢!

限于编者的水平,书中疏漏之处在所难免,敬请使用本书的广大师生和读者批评指正。

编 者

2011 年 3 月

目 录

前言	
第一章 电力工程概述	1
第一节 电力系统概述.....	1
第二节 发电厂及变电站的类型.....	5
第三节 电力系统中性点的运行方式.....	7
第四节 特高压输电概述.....	13
第五节 高压直流输电概述.....	15
第六节 智能电网概述.....	21
复习思考题.....	25
第二章 高低压电器及成套配电装置	26
第一节 开关电器的灭弧原理.....	26
第二节 高压断路器.....	29
第三节 隔离开关及负荷开关.....	34
第四节 高压熔断器和避雷器.....	37
第五节 互感器.....	42
第六节 低压开关电器.....	48
复习思考题.....	53
第三章 发电厂和变电站电气主接线	54
第一节 电气主接线的基本形式.....	54
第二节 发电厂电气主接线.....	59
第三节 高压电力网络接线方式.....	61
第四节 变电站电气主接线.....	63
第五节 工厂供电系统的主接线.....	64
复习思考题.....	66
第四章 电力系统等值电路和潮流计算	67
第一节 电力线路的参数及等值电路.....	67
第二节 变压器及电抗器的等值电路及参数.....	72
第三节 发电机和负荷的参数及等值电路.....	79
第四节 电力网络的等值电路.....	82
第五节 电力系统潮流分布与计算.....	85
复习思考题.....	92
第五章 电力系统短路故障及分析	94
第一节 短路的基本概念.....	94

第二节	电力系统三相短路电流计算	95
第三节	感应电机对短路电流的影响	99
第四节	对称分量法及序阻抗的参数计算	103
第五节	电力系统简单不对称短路计算	107
	复习思考题	111
第六章	电力负荷特性和计算分析	114
第一节	负荷曲线与特性分析	114
第二节	负荷计算的方法	119
第三节	工厂供电负荷的统计计算	127
第四节	建筑配电负荷的统计计算	128
第五节	负荷预测简介	129
	复习思考题	133
第七章	电气设备的选择	135
第一节	电气设备的发热和电动力计算	135
第二节	电气设备选择的一般条件	138
第三节	母线、电缆和绝缘子的选择	141
第四节	高压电器的选择	143
第五节	发电厂和变电站主变压器的选择	147
	复习思考题	150
第八章	现代电力系统运行的调节与控制	151
第一节	概述	151
第二节	电力系统有功功率与频率的调整控制	152
第三节	电力系统无功功率与电压的调整控制	158
第四节	电力系统运行的经济性	162
	复习思考题	166
第九章	二次回路及自动装置	167
第一节	二次回路基础知识	167
第二节	断路器控制及信号回路	174
第三节	隔离开关控制信号及闭锁电路	178
第四节	中央信号回路	180
第五节	自动重合闸	184
第六节	备用电源自动投入装置	187
第七节	变电站绝缘监察装置	191
第八节	变电站综合自动化系统简介	195
	复习思考题	200
第十章	继电保护原理	201
第一节	继电保护概述	201
第二节	电网相间短路的电流保护	204
第三节	电网的接地保护	216

第四节	电网的距离保护·····	220
第五节	电力变压器保护·····	232
第六节	微机保护·····	241
	复习思考题·····	245
第十一章	电气照明 ·····	247
第一节	照明技术的基本知识·····	247
第二节	工厂常用的电光源和灯具·····	250
第三节	照度标准和照度计算·····	265
第四节	照明供电系统及选择·····	274
	复习思考题·····	279
第十二章	防雷与接地 ·····	280
第一节	接地概述·····	280
第二节	雷电的形成及危害·····	284
第三节	防雷装置·····	290
第四节	输电线路和变电站的防雷·····	297
第五节	工厂供电系统的防雷·····	305
第六节	建筑配电系统的防雷·····	307
	复习思考题·····	310
参考文献	·····	312

第一章 电力工程概述

本章主要讲述电力系统的基本概念，了解超高压输电及高压直流输电的有关基本知识，研究电力系统中性点的运行方式及中性点运行方式对企业供电系统的意义。

第一节 电力系统概述

一、电力工业发展的意义

随着现代化工业的发展，电力工业在现代化的建设中扮演着越来越重要的角色。可以说，没有电力工业就没有现代化建设，任何国家电力工业的迟滞发展必将阻挠其现代化建设的步伐。电力工业在国民经济中的重要位置主要体现在：

(1) 电能是绝大多数工矿企业现代化设备的动力能源，是国民生活实现小康水平的必要保障。

(2) 电能可以十分经济又方便地进行输送和分配。

(3) 电能可以很方便与其他形式的能量（如机械能、热能、光能、风能、核能等）互相转换。

(4) 电能在使用中易于被操作和控制，使得其自动化生产、输送和在各个领域中的普及应用易于得到实现。

电能作为二次能源，是由发电厂生产的。考虑到经济等各方面的原因，大型的发电厂多数建立在动力资源（如水力资源、火力资源）丰富的地方，这样，发电厂就可能距离电能的客户——工矿企业或人口密集的居民区相当远，从而存在着电能的输送问题。当电能输送到企业或居民区后又存在将电能分配到客户的问题。

二、电力系统的组成

电能的生产、输送、分配和使用组成一个系统，称为电力系统。它主要包括发电厂、电力网、电能客户等。图 1-1 是电力系统示意图。

1. 发电厂

发电厂是生产电能的工厂，它把非电形式的能量转换成电能。发电厂类型很多，根据所利用能源的不同，有火力发电厂、水力发电厂、原子能发电厂、地热发电厂、风力发电厂等。

2. 变电站（所）

变电站（所）是变换电压和分配电能的场所。变电站由主变压器，高、低压配电装置，继电保护和控制系统，所用电和直流系统，远动和通信系统，必要的无功功率补偿装置和主控制室等组成。

3. 电力网

电力网是联系发电厂和客户的中间环节，由各级电压电力线路及联系的变电站组成。其作用是输送电能和分配电能。

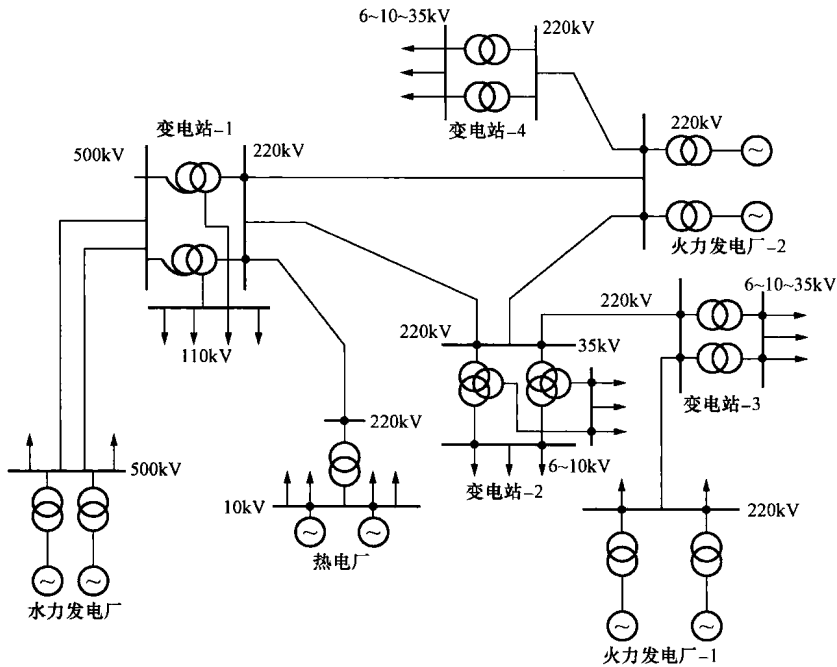


图 1-1 电力系统示意图

三、我国电力系统的电压等级

1. 国家标准电压等级

为使电器设备能实现大批量的生产和在使用中便于互换，电器设备的标准化和系列化是必须的。因此，我国根据国民经济发展的需要和考虑到经济、技术的合理性及电机、电器制造水平等因素，经全面分析研究后，制定出我国国家标准，规定额定电压等级分为三类，见表 1-1~表 1-3。

表 1-1

第一类额定电压

V

直 流	交 流		直 流	交 流	
	三相（线电压）	单相		三相（线电压）	单相
6	—	—	48	36	36
12	—	12		—	—
24	—	—		—	—

表 1-2

第二类额定电压

V

用 电 设 备			发 电 机		变 压 器				
直 流	三 相 交 流		直 流	三 相 交 流		交 流			
	线电压	相电压		线电压	三 相		单 相		
					一 次 绕 组	二 次 绕 组	一 次 绕 组	二 次 绕 组	
110	—	—	115	—	—	—	—	—	
220	—	—	230	(230)	(220)	(230)	220	230	
	380	220	—	400	380	400	(380)	—	

表 1-3

第三类额定电压

kV

电网和用电设备额定电压	交流发电机电压	变压器绕组电压	
		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
	13.8, 15.75, 18, 20	13.8, 15.75, 18, 20	—
35	—	35	38.5
66	—	66	72.6
110	—	110	121
220	—	220	242
330	—	330	363
500	—	500	550
750	—	750	825

(1) 第一类额定电压。它是指 100V 以下的电压，属于安全电压。它主要用于安全照明、蓄电池组、直流控制、操作电源和实验室等。

(2) 第二类额定电压。它是指 100~1000V 的电压，称为低压。它主要用于动力和照明设备。

(3) 第三类额定电压。它是指 1000V 以上的电压，称为高压。它主要用于发电、变电、输电、配电和高压用电设备。

2. 电力系统中各设备电压

图 1-2 是一个简单的电力系统电压分布图，下面对系统中各主要设备的电压分布情况进行分析。

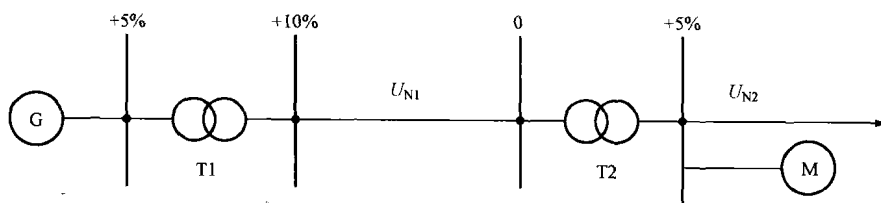


图 1-2 简单的电力系统电压分布图

(1) 发电机的电压。发电机位于电网的首端，因此发电机的额定电压应等于电网的首端电压，即高于电网额定电压 5%。例如：当电网额定电压 U_{NL} 为 10kV 时，发电机额定电压 U_{NG} 为 10.5kV。

(2) 变压器的电压。企业供电系统中的变压器（如 T2）具有发电机和用电设备的双重性质。变压器的一次绕组是接受电能的，相当于用电设备，其额定电压等于所在电网的额定电压，即 $U_{NT1} = U_{NL}$ ；而变压器的二次绕组是送出电能的，相当于发电机，则其额定电压应比所在电网的额定电压高出 5%，又因变压器二次绕组的额定电压是按空载时电压确定的，当在额定负载时，变压器一、二次绕组有 5% 的阻抗压降应得到补偿。综上所述，变压器二

次绕组的额定电压 U_{NT2} 应高于所在级电网额定电压 U_{NL} 的 10%，即 $U_{NT2} = 1.1U_{NL}$ 。在这里要注意：当变压器一次绕组与发电机直接相连时，如 T1 的一次绕组，其额定电压 $U_{NT1} = 1.05U_{NL}$ ；当变压器二次绕组与用电设备或低压网络相连时，如 T2 二次绕组，则其二次额定电压 $U_{NT2} = 1.05U_{NL}$ 。

(3) 电力网电压的分布。在图 1-2 中可以看到，电力网上存在电压损耗，网上各点的电压是不同的，为了方便分析，电力网的额定电压可取电力线路的平均电压。电力网的额定电压等于用电设备的额定电压，见表 1-1~表 1-3。

(4) 电器设备的额定电压。用电设备的额定电压，是按照国家规定的额定电压等级制造的，其额定电压等于标准额定电压。实际上由于用电设备可以分接在整个电力网上，而网络上各点的电压是不同的，因此，一般要求用电设备的运行电压在其额定电压偏差 $\pm 5\%$ 以内能正常运行。

四、大型电力系统的优点

随着对用电量和供电质量的要求的不断提高，电力系统规模日益扩大。大型电力系统的优点有：

1. 减少系统中的总装机容量

由电力系统供电的各客户的最大负荷并不是同时出现的，因此，系统中综合最大负荷总是小于各客户最大负荷的总和。由于系统综合最大负荷的降低，也就可以相应地减少系统的总装机容量。为了保证对客户可靠地供电，无论是孤立电站还是电力系统，都需要检修和事故备用容量。在孤立电站中，备用容量不应小于电站最大机组容量（可能达到电站总容量的 30%~40%）；而在电力系统中，所有发电站连接在一起并列运行，备用容量只需系统总容量的 20%，其中负荷备用 2%~5%，事故备用 10% 左右，检修备用 8% 左右。显然，此时电力系统的备用容量比各孤立电站备用容量的总和少，即总装机容量又可以减少。

2. 可以装设大容量机组

组成电力系统后，由于总负荷的增大，因此可以装设大容量机组。大容量机组效率高，每千瓦投资以及维护费用都比多台小机组经济得多。但是，电力系统中所采用的最大机组容量，以不超过总装机容量的 15%~20% 为宜。

3. 能够充分利用动力资源

建成电力系统后，就可以将发电站建造在动力资源产地，如在煤矿附近建立巨型坑口电站，在水能资源集中的地方建立大型水力发电站等。同时，有些形式的电站，如热电站，水电站、风力电站、原子能电站等，如果不与系统并列，就很难保证持续正常供电以及发挥其最佳经济效益。例如，热电站的抽汽机组的出力是由热负荷确定的，而热负荷与电负荷的需要往往不能互相配合。水电站的出力则是由水能及其综合利用要求来决定的，也往往与电负荷的需要不能互相配合。一般在夏季丰水期，水量多而用电量较少；在冬季枯水期，水量少而用电量反而多，因此，就可能或由于水库调节库容不够而弃水，或对电力负荷不能保证供应。如果把水电站连接在电力系统中，由于有火电站和其他形式电站的互相配合和调节，水能资源就能得到充分利用，供电也能得到保证。

4. 提高供电可靠性

在电力系统中，由于是多电源联合供电，机组的台数较多，即使个别机组或电源发生故障，其他机组或电源仍可以在出力允许的情况下多带负荷，因此可以提高供电可靠性。

5. 提高电能质量

电能质量一般用频率和电压来衡量，其数值应根据规程要求保持在一定的允许变动范围内。由于电力系统容量大，因此负荷波动时所引起的频率和电压波动就会减小，电能质量可以提高。

6. 提高运行的经济性

建立电力系统后，除了充分利用动力资源可以提高运行的经济性外，还可以通过经济合理地分配各发电站或机组的负荷，使运行经济、效率高的机组多带负荷，效率低、发电成本高的机组少带负荷，从而降低生产电能的成本。

五、负荷的分级及其对供电的基本要求

根据电能生产的特点，电力系统的运行必须满足下列基本要求：

1. 保证对客户供电的可靠性

在任何情况下，都应该尽可能地保证电力系统运行的可靠性。系统运行可靠性的破坏，将引起系统设备损坏或供电中断，以致造成国民经济各部门生产停顿和人民生活秩序的破坏，甚至发生设备和人身事故。

电力客户，对供电可靠性的要求并不一样，即使一个企业中各个部门或车间，对供电持续性的要求也有所差别。根据对供电持续性的要求，可把客户分为三级。

(1) 一级负荷：若停止供电，将会危害生命、损坏设备、产生废品或使生产过程混乱，给国民经济带来重大损失，或者使市政生活发生重大混乱。

(2) 二级负荷：若停止供电，将造成大量减产，城市大量居民的正常活动受到影响。

(3) 三级负荷：指所有不属于一级及二级的负荷，如非连续生产的车间及辅助车间和小城镇用电等。

对于一级负荷，至少要由两个独立电源供电，其中每一电源的容量，都应在另一电源发生故障时仍能完全保证一级负荷的用电；对于三级负荷，不需要备用电源；对于二级负荷是否需要备用电源，要进行技术经济比较后才能确定。

2. 保证电能的良好质量

要求供电电压（或电流）的波形为较严格的正弦波，保证系统中的频率和电压在一定的允许变动范围以内。我国规程规定：10~35kV及以上电压供电的客户和对电压质量有特殊要求的低压客户电压允许偏移为 $\pm 5\%$ ；频率允许偏移为 $\pm 0.5\text{Hz}$ 。

3. 保证运行的最大经济性

电力系统运行有三个主要经济指标，即生产每度电的能源消耗（煤耗率、油耗率、水耗率等）、生产每度电的自用电（自用电率），以及供配每度电在电力网中的电能损耗（线损率）。提高运行经济性，就是在生产和供配某一定数量的电能时，使上述三个指标达到最小。为了实现电力系统的经济运行，必须对整个系统实施最佳经济调度。

第二节 发电厂及变电站的类型

一、发电厂的类型

发电厂的种类很多，一般按一次能源分为以下几种类型：

(1) 火力发电厂。火力发电是利用燃烧燃料（煤、石油及其制品、天然气等）所得到的

热能发电。火力发电的发电机组有两种主要形式：利用锅炉产生高温高压蒸汽冲动汽轮机旋转带动发电机发电，称为汽轮发电机组；燃料进入燃气轮机将热能直接转换为机械能驱动发电机发电，称为燃气轮机发电机组。火力发电厂通常是指以汽轮发电机组为主的发电厂。

(2) 水力发电厂。水力发电是将高处的河水（或湖水、江水）通过导流引到下游形成落差推动水轮机旋转带动发电机发电。以水轮发电机组发电的发电厂称为水力发电厂。

水力发电厂按水库调节性能又可分为：

1) 径流式水电厂。无水库，基本上来多少水发多少电的水电厂。

2) 日调节式水电厂。水库很小，水库的调节周期为一昼夜，将一昼夜天然径流通过水库调节发电的水电厂。

3) 年调节式水电厂。对一年内各月的天然径流进行优化分配、调节，将丰水期多余的水量存入水库，保证枯水期放水发电的水电厂。

4) 多年调节式水电厂。将不均匀的多年天然来水量进行优化分配、调节，多年调节的水库容量较大，将丰水年的多余水量存入水库，补充枯水年份的水量不足，以保证电厂的可调出力。

(3) 核能发电厂。核能发电是利用原子反应堆中核燃料（如铀）慢慢裂变所放出的热能产生蒸汽（代替了火力发电厂中的锅炉）驱动汽轮机再带动发电机旋转发电。以核能发电为主的发电厂称为核能发电厂，简称核电站。其分类有：轻水堆核电厂（分压水堆核电厂和沸水堆核电厂）、重水堆核电厂、石墨堆核电厂。

(4) 风力发电厂。利用风力吹动建造在塔顶上的大型桨叶旋转带动发电机发电称为风力发电。由数座甚至数十座风力发电机组成的发电厂称为风力发电厂。利用风能驱动风轮机以带动发电机生产电能的电厂始于 20 世纪 30 年代，以荷兰、丹麦应用最早。单机容量从几十瓦到 5000kW。风力电站主要由能量转换装置、蓄能装置、控制系统等构成。风能属可再生能源，又不存在污染，具有广阔的应用前景。风能是一种随机性能源，且有间歇性，因此必须和一定的蓄能方式（如蓄电池蓄能）结合才能实现连续供电。控制系统（如调速系统、励磁调节系统）控制风轮机和发电机以保证供电质量（频率和电压恒定）。世界气象组织估计，地球上海洋和陆地上的风能资源约为 1300 亿 kW，风能应用前景广阔。

(5) 其他还有地热发电厂、潮汐发电厂、太阳能发电厂等。

二、变电站（所）的类型

变电站（所）由主接线，主变压器，高、低压配电装置，继电保护和控制系统，所用电和直流系统，远动和通信系统，必要的无功功率补偿装置和主控制室等组成。

变电站的分类有很多种，主要有：

1. 枢纽变电站

枢纽变电站位于电力系统的枢纽点，汇集有多个电源（发电厂或其他电力网），连接电力系统的高压和中压，电压等级在 330kV 以上，负责向区域变电站和中间变电站供电。当其停电时，将引起电力系统解列甚至瘫痪。

2. 中间变电站

中间变电站位于枢纽变电站和区域变电站之间，使长距离输电线路分段，其高压侧以交换潮流为主，起功率交换作用。它一般汇集 2~3 路电源，电压等级在 220~330kV 之间。除了通过功率外，它还降压向当地客户供电，当其停电时将使区域电网解列。

3. 区域变电站

区域变电站负责向某一地区或城市供电,其高压侧电压等级一般为 110kV 或 220kV,低压侧电压等级一般为 110kV 或 35kV。当该变电站停电时将使该地区的供电中断。

4. 终端变电站

终端变电站在输电线路的终端,直接向电力客户供电,全站停电时,只影响该变电站的供电客户。

5. 牵引变电所

牵引变电所是一种特殊的终端变电所,用于向电气化铁路的电力牵引网和电力机车供电。其高压侧电压一般为 110kV 或 220kV,低压侧电压为 27.5kV 或 55kV (AT 供电)。牵引变电所是一级负荷。少数牵引变电所还担负着其所在地区的 10kV 动力负荷。

第三节 电力系统中性点的运行方式

三相电力系统的发电机和变压器,当采用星形接线时,存在中性点的运行方式问题。电力系统的中性点运行方式主要表现为中性点是否接地及如何接地,一般有以下两种状态:

(1) 中性点非直接接地的三相电力系统,又称为小电流接地系统。中性点非直接接地系统分为中性点不接地和中性点经消弧线圈接地系统。

(2) 中性点直接接地的三相电力系统,又称为大电流接地系统。中性点直接接地系统分为中性点直接接地和中性点经电抗器接地系统。

电力系统的中性点运行方式是一个比较复杂的综合性技术经济问题,对于电力系统供电的可靠性、绝缘设计、继电保护及自动装置的整定等有决定性的意义。当系统发生接地短路(特别是单相接地短路)时,对系统有明显的影响。

一、中性点非直接接地的三相电力系统

(一) 中性点不接地的三相电力系统

中性点不接地的三相电力系统接线示意图如图 1-3 所示。由于任何两个相互绝缘的导体之间都存在着一一定的电容,因此三相导线之间和各相对地之间,沿线路全长有分布电容存在,在电压的作用下将有附加电容电流流过。由于三相导线型号、规格相同,各相对地电压的有效值相同,故认为三相沿线路对地分布电容量相等。为了讨论的方便,沿线路导线对地均匀分布电容,以集中的等效对地电容 C 代替,而导线间的电容较小,略去不计。

1. 三相系统正常运行状态

在系统正常运行时,三相系统是对称的,则各相对地电压 \dot{U}_A 、 \dot{U}_B 、 \dot{U}_C 对称,中性点对地电位为零,各相对地电压等于相电压。电源各相电流 \dot{I}_A 、 \dot{I}_B 、 \dot{I}_C 分别等于各相的负载电流 \dot{I}_{lA} 、 \dot{I}_{lB} 、 \dot{I}_{lC} 及各相对地电容电流 \dot{I}_{cA} 、 \dot{I}_{cB} 、 \dot{I}_{cC} 之和,即 $\dot{I}_A = \dot{I}_{lA} + \dot{I}_{cA}$, $\dot{I}_B = \dot{I}_{lB} + \dot{I}_{cB}$, $\dot{I}_C = \dot{I}_{lC} + \dot{I}_{cC}$ 。由于三相电压对称,三相线路对地电容相等,则三相电容电流对称,其矢量和等于零,故地中无电流流过。

2. 系统发生单相接地

当网络的绝缘被破坏而发生单相接地(如 A 相完全接地)时,将引起各相对地电压和电流产生变化。为了分析的方便,认为系统运行在空载情况下发生单相短路,此时短路情况

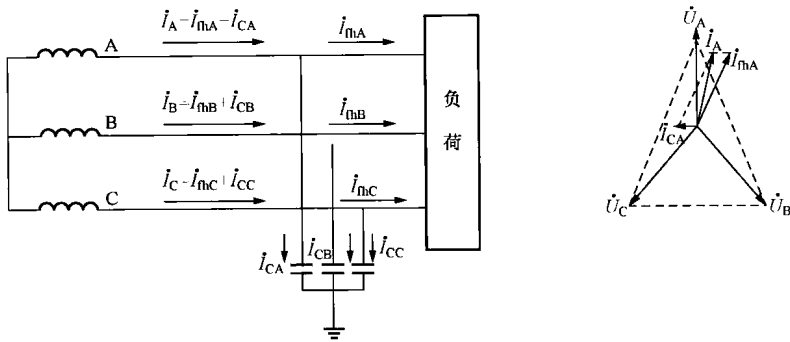


图 1-3 中性点不接地的三相电力系统示意图

最严重。图 1-4 是 A 相接地电流、电压相量图。

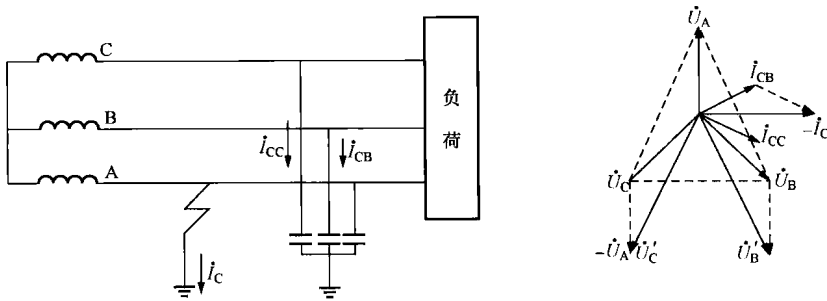


图 1-4 A 相接地电流、电压相量图

(1) 各相电压的变化。接地相 (A 相) 对地电压为零, 中性点对地电压不为零, 而变为 $-\dot{U}_A$; 而非接地相 (B、C 相) 对地电压, 变为该相相电压加上中性点对地电压 $-\dot{U}_A$, 即

$$\dot{U}'_A = \dot{U}_A + (-\dot{U}_A) = 0 \quad (1-1)$$

$$\dot{U}'_B = \dot{U}_B + (-\dot{U}_A) = \dot{U}_B - \dot{U}_A = \sqrt{3} \dot{U}_A e^{-j150^\circ} \quad (1-2)$$

$$\dot{U}'_C = \dot{U}_C + (-\dot{U}_A) = \dot{U}_C - \dot{U}_A = \sqrt{3} \dot{U}_A e^{j150^\circ} \quad (1-3)$$

经分析得: 三相线间电压对称关系没有改变, 故障相对地电压为零, 非故障相对地电压为相电压的 $\sqrt{3}$ 倍。

(2) 电流的变化。接地相 (A 相) 对地电容被短接, 非故障相对地电容上所加的电压为原来所加电压的 $\sqrt{3}$ 倍。

从图 1-4 可知, A 相接地电流 $\dot{I}_C = -(\dot{I}_{CB} + \dot{I}_{CC})$, 而 \dot{U}_{BA} 与 \dot{U}_{CA} 相位差 60° , 则 \dot{I}_{CB} 与 \dot{I}_{CC} 同样相差 60° (\dot{I}_{CB} 引前 $\dot{U}_{BA} 90^\circ$, \dot{I}_{CC} 引前 $\dot{U}_{CA} 90^\circ$), 所以 $I_C = \sqrt{3} I_{CB}$, 因此接地电流 I_C 为原电容电流的 3 倍。

(3) 结论。对于中性点不接地的三相电力系统, 当发生单相接地时, 系统的相间电压对称关系没有改变, 对三相负载无影响, 因此允许系统继续运行。但由于非故障相对地电压为原来对地电压的 $\sqrt{3}$ 倍, 如系统仍长期运行, 可能引起非故障相对地绝缘薄弱处的绝缘被破坏而接地, 导致两相接地短路故障, 故只允许短期运行 (有关规程规定: 中性点不接地三相

电力系统发生单相接地故障时可继续运行 2h, 但此时系统应向值班人员发出警告)。

当系统发生单相接地时, 有可能出现持续电弧或间歇电弧。持续电弧会引起相间短路, 而间歇电弧会引起网络过电压。对于 6~10kV 网络, 当单相接地电流 I_C 大于 30A 时, 其持续电弧较大不易熄灭, 容易造成相间短路, 而间歇电弧造成的危险并不显著; 但对于 20kV 以上的网络, 当 I_C 大于 10A 时就会引起接地电弧。故一般在线路额定电压 110kV 以下、接地电流 I_C 在 10A 及以下和线路额定电压为 6~10kV、接地电流 I_C 在 30A 及以下的网络, 常采用中性点不接地的方式。

(二) 中性点经消弧线圈接地的三相电力系统

当网络的线间电压为 110kV 以下, 单相接地电流又大于上述的数值时, 为了防止单相接地时产生电弧, 尤其是间歇电弧, 应采取减少接地电流的措施。此时常采用中性点经消弧线圈接地的运行方式。图 1-5 为这种接地方式发生单相 (A 相) 接地的示意图。

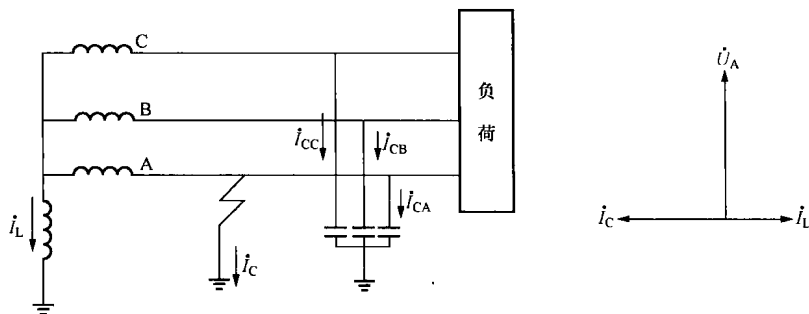


图 1-5 中性点经消弧线圈接地的三相电力系统单相接地示意图

1. 工作原理

正常工作时, 中性点对地电压为零, 消弧线圈中无电流流过。当发生单相 (A 相) 接地时, 消弧线圈两端的外加电压为 \dot{U}_A , 流过电流为 \dot{I}_L , \dot{I}_L 滞后 \dot{U}_A 90°, 而接地电流 \dot{I}_C 引前 \dot{U}_A 90°, 故 \dot{I}_L 与 \dot{I}_C 方向相反。选择合适的消弧线圈, 可使 I_L 与 I_C 相等, 使接地电流 $I_K = I_C - I_L = 0$ 。这种原理称为电流补偿。

2. \dot{I}_L 与 \dot{I}_C 的补偿关系

根据 \dot{I}_L 与 \dot{I}_C 的补偿关系, 消弧线圈对接地电流的补偿分为以下三种:

(1) 全补偿关系。当 $I_L = I_C$ 时, 即 $\frac{1}{\omega L} = 3\omega C$, 此时系统单相接地电流为零, 称为全补偿。从消弧的观点来讲这种方式是最好的, 但此时 $X_L = X_C$ 。在系统正常运行时, 由于电网的三相相对地电容不完全相等或由于断路器的三相触头不同期闭合等原因, 使未发生故障的电网存在不对称电压, 使中性点对地电压不为零而引起串联谐振过电压, 故不采用这种补偿方式。

(2) 欠补偿关系。当 $I_L < I_C$ 时, 即 $\frac{1}{\omega L} < 3\omega C$, 此时有未补偿的容性电流, 称为欠补偿。当部分电网被切除退出运行时, 电网的电容 C 减少, 可能出现 $\frac{1}{\omega L} = 3\omega C$ 的全补偿状态, 故也不予采用。

(3) 过补偿关系。当 $I_L > I_C$ 时, 即 $\frac{1}{\omega L} > 3\omega C$, 这是常用的补偿方式, 称为过补偿。这种补偿方式发生单相接地时, 有一定数值的电感电流流过接地点, 应控制其不超过一定的数值。 I_L 大于 I_C 的程度用过补偿度 P 来表示, 其关系为

$$P = \frac{I_L}{I_C} \quad (1-4)$$

一般选择过补偿度 $P=5\% \sim 10\%$ 。

二、中性点直接接地的三相电力系统

在这种系统中, 当发生单相接地时, 故障相经接地点通过大地形成单相短路回路, 单相短路电流很大, 故又称为大电流接地系统。如图 1-6 所示。

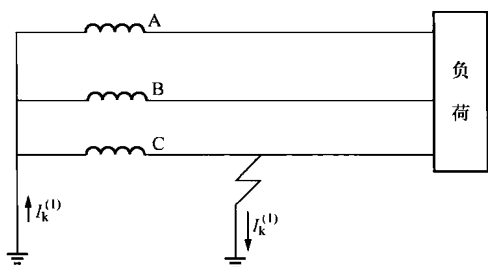


图 1-6 中性点直接接地的三相电力系统

在大容量中性点直接接地的三相电力系统中, 为了减少单相短路电流 I_E 的数值, 可以采用中性点经电抗器接地或只将系统中部分变压器的中性点直接接地, 总的要求是使其单相接地电流不超过三相短路电流。

在中性点直接接地的系统中, 发生单相接地时, 短路电流很大, 为了避免电气设备被破坏, 必须通过保护装置断开故障线路。

中性点直接接地的电力系统的主要特点是发生单相接地时, 中性点的电位不变, 因此, 非故障相对地的电压也不变。此时电压的对地绝缘水平取决于相电压, 所以电压越高, 其经济效益就越显著。我国 110kV 及以上的电力系统多采用中性点直接接地或经电抗器接地的方式。

三、低压配电系统中性点接地方式

我国 380/220V 的低压配电系统均采用中性点直接接地方式, 并从中性点引出线, 构成三相四线制或三相五线制。中性点接地又称为工作接地, 从中性点引出线有三种, 即中性线 (N)、保护线 (PE)、保护中性线 (PEN), 这三种线的功能各不相同。

(1) 中性线 (N)。它是用来接单相用电设备的额定电压和相电压 (如电力照明等), 传导三相系统的单相电流和不均衡电流, 减小负荷中性点的电位偏移。

(2) 保护线 (PE)。它是用来保障人身安全、防止触电事故的公共接地线。系统中的设备外露可导电部分 (如金属构架、金属外壳等) 可通过 PE 线接地形成接地保护, 当设备发生接地故障时可降低设备金属外壳等带电电压, 从而降低触电危险。

(3) 保护中性线 (PEN)。它具有以上两种线的功能, 接于供电线路上可进行避雷保护, 也叫“零线”或“地线”。

在低压配电系统中, 对各种用电设备的外露可导电部分进行接地保护, 按接地保护的形式不同, 可将配电系统分为三种类型。

1. TN 系统

所有设备外壳都与保护线 (PE) 或保护中性线 (PEN) 连接, 称为 TN 系统。TN 系统又分三种情况。

(1) 系统中 N 线与 PE 线合并为 PEN 线, 称为 TN-C 系统, 如图 1-7 所示。TN-C 系