



高职高专“十一五”规划教材

GONGPEIDIAN XITONG YUNXING YU WEIHU

供配电系统 运行与维护

李小雄 主编
曾令琴 副主编



化学工业出版社

高职高专“十一五”规划教材

供配电系统运行与维护

李小雄 主 编

曾令琴 副主编

高庆敏 主 审



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书为示范性建设高职院校重点专业的核心教材之一,内容按照供配电系统实用项目编写,包括:供配电系统认知、一次设备的运行与维护、电气主接线的运行分析、二次系统的调试与运行维护、电气主接线的倒闸操作、供配电系统的方案设计共计六个教学项目。本书围绕供配电基本知识、基本理论、运行维护及工程实用技术进行了详尽的论述,并配有贴近实际工程的例题解析及应用举例。为将理论和实践相结合,每个项目后都设有与理论知识相呼应的技能训练。全书知识内容全面、先进,突出了实用性,技能训练题目注重了针对性和应用性。本书可作为应用型本科、高职高专院校电气类专业的教材,也可作为电视大学、函授学院相关专业的教材,还可供其他从事供配电工作的工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

供配电系统运行与维护/李小雄主编. —北京:化学工业出版社, 2010.8
高职高专“十一五”规划教材
ISBN 978-7-122-08895-6

I. 供… II. 李… III. ①供电-电力系统运行-高等学校:技术学院-教材②配电系统-电力系统运行-高等学校:技术学院-教材③供电-电力系统-维护-高等学校:技术学院-教材④配电系统-维护-高等学校:技术学院-教材 IV. TM72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 117600 号

责任编辑:王听讲

文字编辑:高 震

责任校对:宋 玮

装帧设计:韩 飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张12 字数294千字 2010年9月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:24.00 元

版权所有 违者必究

前 言

为适应新形势下人才的需求,为适应我国电力系统不断发展的需要,同时也为提高从事电力工程技术人员的业务技术、技能水平与综合素质,我们组织编写了国家示范性高职教育课程建设教材《供配电系统运行与维护》。

本书涵盖了工厂供电、电气一次系统、电气二次系统和电力系统继电保护等相关课程诸多内容。为区别于传统形式的《供配电技术》教材,我们在编写本书之前,组织人员前往各类电厂(站)、供电局、变电所、工厂变电室及施工现场进行了大量的现场考察和实地调研,广泛征求电力系统工程技术人员对课程建设的意见,围绕教材内容与企业工程技术人员进行多次磋商,其间开封火电厂的田永昌总工、姚玉峰高工以及开封供电局孙德宽高工、郭光工程师等给予了很好的建设性意见和建议。同时我们还和常州工学院的唐志平教授、郑州电力高等专科学校的靳建峰教授、李红艳教授,广东水利电力职业技术学院的钱武教授、吴靓等同行们,对课程建设与教材建设诸多方面的问题展开了广泛的交流,在此向他们表示衷心的感谢!

本书是以实际工程任务为导向,按照工学结合的项目化教学模式组织编写的。本教材共设六个教学项目:供配电系统认知、一次设备的运行与维护、电气主接线的运行分析、二次系统的调试与运行维护、电气主接线的倒闸操作、供配电系统的方案设计。教材内容遵循“以应用为目的,以必需、够用为度”的原则,以“掌握概念、强化应用、培养技能”为重点,以“精选内容、降低理论、加强基础、突出应用”为原则,坚持基本知识点的学习,在相关知识的学习中注重培养学生分析问题、解决问题的能力;按照高职学生认知过程和接受能力,注重理论与工程实际紧密联系,强调工学结合。结合现场参观、实验环节和课程设计等技能训练,突出对学生综合能力及创新能力的培养。

本书由黄河水利职业技术学院李小雄担任主编,并编写了项目一、项目四和项目六;李杰编写了项目二;曾令琴担任副主编,编写了项目三;刘金浦编写了项目五,全书由李小雄统稿,华北水利水电学院高庆敏教授担任主审。

我们将为使用本书的教师免费提供电子教案,需要者可以到化学工业出版社教学资源网站 <http://www.cipedu.com.cn> 免费下载使用。

由于编者实践经验有限,编写过程中难免出现疏漏和不妥,恳请广大读者和供配电方面的专家提出宝贵意见,使我们在今后能够对本教材不断完善和补充,让其真正起到示范性教学作用。

编者
2010年7月

目 录

项目一 供配电系统认知	1
1.1 任务 供配电系统认知	1
1.1.1 任务概述	1
1.1.2 知识准备	1
1.1.3 任务实施	14
1.1.4 问题与思考	14
项目二 一次设备的运行与维护	15
2.1 任务一 变压器的运行监视与故障处理	15
2.1.1 任务概述	15
2.1.2 知识准备	15
2.1.3 任务实施	20
2.1.4 问题与思考	23
2.2 任务二 高压电气设备的运行与维护	23
2.2.1 任务概述	23
2.2.2 知识准备	23
2.2.3 任务实施	33
2.2.4 问题与思考	34
2.3 任务三 低压配电屏的运行与维护	34
2.3.1 任务概述	34
2.3.2 知识准备	35
2.3.3 任务实施	39
2.3.4 问题与思考	40
项目三 电气主接线的运行分析	41
3.1 任务 电气主接线的运行分析	41
3.1.1 任务概述	41
3.1.2 知识准备	41
3.1.3 任务实施	51
3.1.4 问题与思考	55
项目四 二次系统的调试与运行维护	56
4.1 任务一 二次回路的分析与监测	56
4.1.1 任务概述	56
4.1.2 知识准备	56

4.1.3	任务实施	70
4.1.4	问题与思考	76
4.2	任务二 继电保护的调试与维护	76
4.2.1	任务概述	76
4.2.2	知识准备	76
4.2.3	任务实施	89
4.2.4	问题与思考	91
4.3	任务三 微机保护的检验与调试	91
4.3.1	任务概述	91
4.3.2	知识准备	91
4.3.3	任务实施	100
4.4	任务四 自动装置的检验与调试	104
4.4.1	任务概述	104
4.4.2	知识准备	104
4.4.3	任务实施	106
4.5	任务五 变电站综合自动化系统的运行管理	111
4.5.1	任务概述	111
4.5.2	知识准备	111
4.5.3	任务实施	114
4.5.4	问题与思考	115
项目五	电气主接线的倒闸操作	116
5.1	任务 电气倒闸操作	116
5.1.1	任务概述	116
5.1.2	知识准备	116
5.1.3	任务实施	130
5.1.4	问题与思考	135
项目六	供配电系统的方案设计	136
6.1	任务一 电气主接线方案设计	136
6.1.1	任务概述	136
6.1.2	知识准备	136
6.1.3	任务实施	139
6.2	任务二 电力负荷的计算	142
6.2.1	任务概述	142
6.2.2	知识准备	142
6.2.3	任务实施	159
6.2.4	问题与计算	159
6.3	任务三 短路故障和短路电流计算	160
6.3.1	任务概述	160

6.3.2	知识准备	160
6.3.3	任务实施	168
6.3.4	问题与计算	168
6.4	任务四 供配电系统电气设备的选择与校验	168
6.4.1	任务概述	168
6.4.2	知识准备	168
6.4.3	任务实施	176
6.4.4	问题与思考	176
6.5	任务五 电气安全、接地与防雷设计	176
6.5.1	任务概述	176
6.5.2	知识准备	176
6.5.3	任务实施	182
6.5.4	问题与思考	183
参考文献		184

项目一 供配电系统认知

1.1 任务 供配电系统认知

1.1.1 任务概述

当前,我国经济建设飞速发展,作为先行工业的电力系统,其建设步伐异常迅猛。随着三峡电厂的建成,我国电网将以三峡为中心,形成连接华中、华东、川渝的大规模中部电网;将初步形成以华北电网为中心,包括西北、东北、山东的大规模北部电网。随着龙滩、小湾水电站及贵州煤电基地的开发,南方电网也得到进一步加强,增加云南外送的电力,最终形成全国统一的特大规模电网。作为电力系统从业技术人员,通过对供配电系统基础知识的学习,要求了解国内外供配电技术的发展概况及电力系统的组成,熟悉电力系统相关基本概念,了解电力系统的运行特点,熟悉供电质量及其改善措施,掌握电力用户供配电电压的选择,熟悉工厂供配电系统的基本结构组成。

为建立电力系统的整体概念,本次任务组织学生到学校周边地区的火电厂、变电所、大型工厂企业配电室、开关厂、学院配电房等现场参观,以便对电力系统的发电、变电、配电、用电等不同环节有一个感性认识,以熟悉供配电系统的组成、额定电压、中性点的运行方式;了解供配电系统的基本概念和基本要求,区分供配电系统的电气一、二次设备,为后续课程的开展奠定基础。

1.1.2 知识准备

1. 国内外供配电技术发展概况及电力系统的组成

(1) 国内外供配电技术发展概况

自从20世纪初发明三相交流电以来,供配电技术朝着高电压、大容量、远距离、高自动化的目标不断发展,20世纪后半叶发展更加迅速。20世纪70年代,欧美各国对交流1000kV级特高压输电技术进行了大量的研究开发,早在1985年前苏联就建成了世界第一条1150kV的工业性输电线路,日本随后在20世纪90年代初也建成了1000kV的输电线路。我国在近50年的时间内供配电技术也取得了突破性的进展。目前,全国已有东北、华北、华东、华中、西北、南方、川渝7个跨省电网,还有山东、福建、新疆、海南、西藏5个独立省(区)网,网内220kV输电线路合计全长120000km,330kV输电线路7500km,500kV输电线路20000km。特别是华中与华东两大电网之间,通过500kV葛洲坝至上海直流线路实行互联,其输电线路的建设规模和增长速度在世界上也是少有的。

随着我国经济建设形势的迅猛发展,中国电力需求相应大幅增长,电力供不应求的紧张局面不断出现。为满足经济增长对电力的需求,国家采取有力措施,加大电力建设投资,计划全国每年发电规模在1500万千瓦以上,截至2007年底,全国发电装机容量达到7.13亿千瓦,220kV及以上输电线路长度达32.7万公里,变电容量达11.44亿千伏安。“西电东

送、南北互供、全国联网”的发展战略，为我国电力系统的发展带来了极大的发展空间。

(2) 电力系统的组成

电能是一种使用方便、清洁、易于控制和转换的优质能源，由一次能源转换而来，电能的传输、转换和分配是通过电力系统得以实现的。因此，在学习供配电技术之前，首先要掌握电力系统的相关知识。

由于电能的生产、输送、分配和消费是在同一时间完成，又不能大量储存，因此各个环节必须连接成一个整体。由发电机、升压变电站、高压输电网、降压变电站、高压配电网和电能用户组成的发电、输电、变配电和用电的整体称为电力系统，如图 1-1 所示。

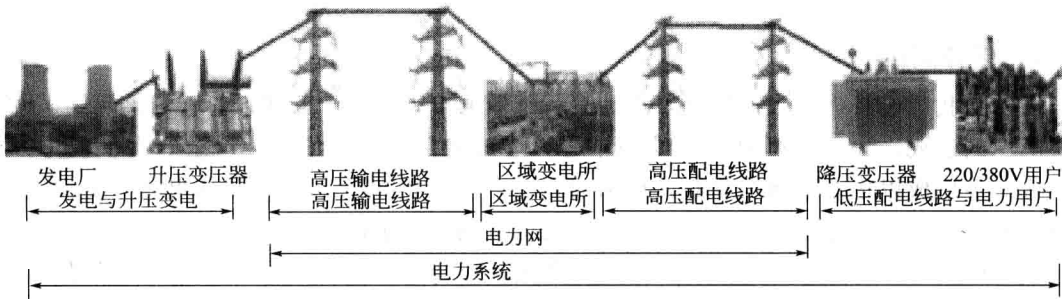


图 1-1 电力系统组成示意图

1) 电力系统的基本概念

① 动力系统。随着电能应用的普及，电力部门通常要把不同类型的发电厂在公共电网上并联运行。由电力系统、发电厂动力部分及热能系统组成的整体称作动力系统。动力系统是将电能、热能的生产与消费联系起来的纽带。

② 电力系统。电力系统是动力系统的一部分，由发电机、配电装置、变电站、输配电线路及用电设备组成。电力系统的功能是完成电能的生产、输送和分配。

③ 电力网。电力网是电力系统的一部分，由各类变电站和各种不同电压等级的线路连接起来组成的统一网络，其作用是输送和分配电能。

电力网按其功能的不同可分为输电网和配电网：输电网的电压等级一般在 110kV 以上，是输送电能的通道；配电网的电压等级一般在 110kV 及以下，是分配电能的通道。随着电力系统规模的扩大，配电网的电压等级将逐步相应地提高。

2) 电力系统的结构

电力系统通常由许多发电厂并列起来组成。

电力系统包括发电厂电气部分、电网及电能用户，是一个由输电线路连接形成的整体，按照发电方式的不同，发电厂主要分为火力发电厂、水力发电厂、核电站及其他类型的发电厂等。

按供电范围的大小和电压等级的高低，电力网可分为地方电力网、区域电力网和超高压输电网三种类型。一般情况下，地方电力网电压不超过 35kV，区域电力网电压为 110～220kV，电压为 330kV 及以上的为超高压远距离输电网。

3) 电力系统额定电压

第一类：100V 以下额定电压，用于蓄电池和安全照明用具等电气设备。

第二类：大于 100V、小于 1000V 的额定电压，用于一般工业和民用电气设备。

第三类：1000V 以上的额定电压，用于高压电气设备。

国家规定电力网的额定电压为 500kV、220kV、110kV、63kV、35kV、10kV。为保证电力设备端电压不超过额定电压的 $\pm 5\%$ ，通常允许发电机额定电压比电网额定电压高 5% ，末端受电变电站端电压比电网额定电压低 5% 。

4) 电力系统的特性

① 电力系统是一个有机的整体，电力系统中任何一个主要设备运行情况的改变，都将影响整个电力系统的正常运行。

② 电力系统时刻处在动态平衡的相对稳定之中。发电厂发出的交流电不能直接储存，决定了电能的生产、输送、分配和使用必须同时进行，而且要保持动态平衡。由于能量的转换是以功率的形式表现出来的，所以要时刻保持电力系统有功功率和无功功率的平衡。

a. 有功功率平衡。发电厂发出的有功功率，扣除厂用电和网损之后，要与用户消耗的有功功率完全相等。如果发出的有功功率多了，系统的频率就会升高；反之就会降低。我国规定频率标准为 50Hz、装机容量在 3000MW 以上的电网，频率偏差不得超过 $\pm 0.2\text{Hz}$ 。

b. 无功功率平衡。无功功率产生于“容性装置”中（如发电机、调相机、电力电容器及高压输电线路的充电电容），消耗在“感性装置”中（异步电动机、电抗器、输电线路的电抗等）。无功功率的平衡体现在电压水平上，无功过剩电压升高，无功不足电压降低。电压过高、过低都会对电气设备和电力系统自身的安全产生很大的危害。无功严重不足时还能造成“电压崩溃”使局部电网瓦解。

③ 随机变化、实时调整。电力系统的运行状态是不断变化的动态，除了设备的计划停送电外，异常和事故对系统的冲击是随机的。正常情况下电力系统的负荷和机组出力的变化也是随机的。

电力系统负荷变化的随机性：电力系统的总负荷是由千千万万个电能用户的用电负荷叠加起来构成的。在高峰（上午和晚上）和低谷（中午和夜间）之间，负荷之差可达最大负荷的 $30\% \sim 50\%$ 。

④ 发电出力的随机性。发电机组的出力不是固定不变，有时需要人为调整。当频率波动时，机组在调整器的作用下出力会有摆动；在主机异常或辅机故障时，机组出力也会出现大幅度下降等。

由于电力系统的上述随机变化，电力系统要求各级调度部门必须运用一切手段不断进行调节和控制，以维持电力系统的电力平衡，保证电力系统的频率和中枢点电压合格。

2. 发电厂、变电所类型

(1) 发电厂类型

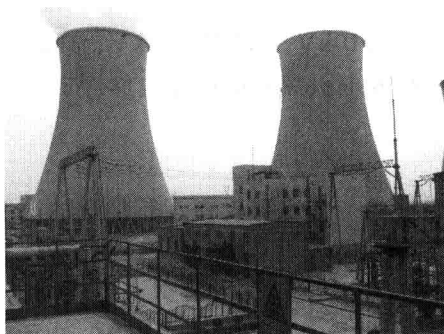
电能是二次能源，是由其他形式的一次能源转换而来的。目前，人类能够用来转换成电能的一次能源主要有：煤炭、石油及其产品、天然气等燃烧释放的热能；水由于落差产生的动能；核裂变释放的核子能及风的动能、太阳能、地热能、潮汐能等。

根据发电厂使用一次能源的不同，目前发电厂类型主要有以下几种（见图 1-2）。

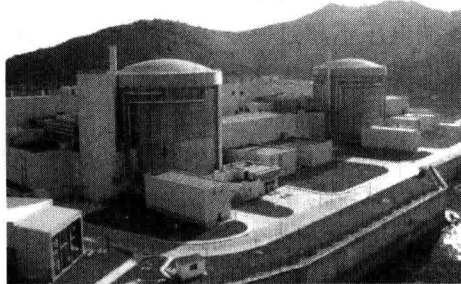
1) 火电厂

火力发电厂简称火电厂，是以煤、石油、天然气为燃料，燃料燃烧时的化学能被转换成热能，再借助汽轮机等热力机械将热能转换成机械能，再由同轴连接的发电机将机械能转换成电能。

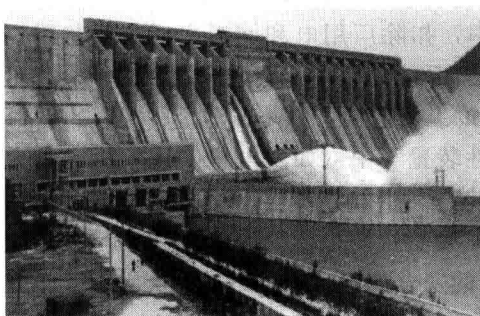
火电厂又分为凝汽式电厂和热电厂两种类型。



火力发电厂



核能发电站



水力发电站



风力发电站

图 1-2 典型发电厂、站外貌

凝汽式电厂仅向用户供出电能。我国多数凝汽式电厂一般建在各煤矿、煤炭基地及附近，或建在铁路交通便利的地方，这类火电厂发出来的电能，通过高压输电线路送到负荷中心。

热电厂不仅向用户供电，同时还向用户供蒸汽或热水。由于供热距离不宜太远，所以热电厂多建在城市和用户附近。热发电机组的发电出力与热力用户的用热有关，用热量多时热发电机组相应多发电，用热少时热发电机组发出的电能相应减少。热电厂的建立能减少烟尘的排放，有利于城市的环境保护。

火电厂的热效率不高，一般为 40% 左右。

2) 水电站

水力发电厂简称水电厂，其发电特点为：将高处江河湖泊的水采用适当的方法引至下游的水电站，利用水的落差使位能转换成动能，推动水轮机旋转，带动与水轮机同轴的发电机运转发出电能。水电厂的生产过程如下：由拦河大坝维持水的高水位，再经压力管进入螺旋形蜗壳，推动水轮机转动，将水的位能转换为机械能，由水轮机带动发电机旋转，于是将机械能转换成电能。做过功的水，经过尾水管再往下游排泄。水电厂发出的电能，除小量厂用之外，大部分经升压变压器升压后输送至用电负荷中心。

水力发电的生产过程要比火力发电过程简单。据统计，目前我国的水力资源开发量还不足 10%，在电力供应依然紧张的今天，显然大力开发水力资源十分必要。

3) 核电站

核电站是利用核能发电的电厂，其发电特点为：利用核反应堆代替火电厂的锅炉，核反应堆中的核燃料不断发生裂变产生热能，利用这种热能产生高温、高压蒸汽，蒸汽送到汽轮

机中,推动与汽轮机同轴的发电机运转发出电能。

核电站用的一次能源主要是二氧化铀,其原动机与火电厂相同,因此发电原理与火电厂基本相同,只是在结构上稍有差异。

核电站的主要优点是:可以节省大量煤炭、石油、天然气等燃料,有利于减小二氧化硫及灰尘等有害物质对城市的污染。

4) 其他发电厂

以地热、风力、潮汐等为一次能源的发电厂容量较小,分布在离这些一次能源较近的区域。另外,太阳能电站是一种较新型的电站,太阳能是一种绿色能源,取之不尽。但是已有的太阳能电站的容量往往都很小,并受天气影响较大,发电量占总发电量的极小一部分。

(2) 变电所类型

发电厂通常建立在距离一次能源丰富或传输便利的地域,与电力用户有一定的距离。为了经济、可靠、快速地把电能从发电厂输送至用户,必须经过变电所升高电压,因此,升压变电所一般安装在发电厂中,不另设变电所。由于高压危险,距离用户较近时还须经过变电所把传送的高压降低,电网中的降压变电所的作用就是在传递电能的同时降低电压。所以,变电所是电力供应的中间转运站,用来提高或降低电压,向用电单位输送和分配电能。

电力网中的变电所除了有升压、降压的分类方法外,还可按它们在电力系统的地位和作用分为系统枢纽变电所、地区变电所、工厂企业变电所以及终端变电所等。

1) 枢纽变电所

位于电力系统中汇集多个大电源和多条重要线路的枢纽点,在电力系统中具有极其重要的地位。高压侧多为 330~500kV,其高压侧各线路之间往往有巨大的交换功率。

2) 地区变电所

地区变电所是供电给一个地区的主要供电点。一般从 2~3 个输电线路受电,受电电压通常为 110~220kV,供电给中低压下一级变电所。

3) 工厂企业变电所

工厂企业变电所是专供电给某工厂企业用电的降压变电所,受电电压可以是 220kV、110kV、35kV 或 10kV,因工厂企业大小而异。

4) 终端变电所

为了提高系统的供电质量,终端变电所一般建设在负荷中心,尽可能靠近用电多的地方,高压侧引入线 10~110kV 经降压后向用户供电。

3. 电力系统中性点运行方式

在电力系统中,中性点工作接地方式有:中性点直接接地、中性点经消弧线圈接地和中性点不接地三种。

(1) 中性点直接接地方式

中性点直接接地的系统称为大接地电流系统,这种系统中,当发生一点接地故障时,即构成了单相接地系统,将产生很大的故障相电流和零序电流。中性点直接接地,中性点上就不会积累电荷而发生电弧接地过电压,其各种形式的操作过电压均比中性点绝缘电网要低,如图 1-3 所示。

中性点直接接地系统发生单相接地短路故障时,单相

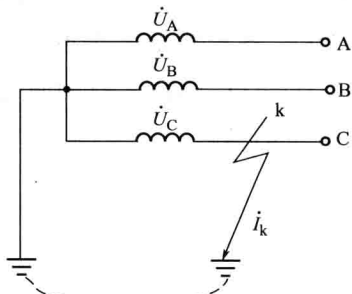


图 1-3 中性点直接接地系统单相接地

短路电流非常大，特别是瞬间接地短路，必须通过继电保护装置动作切除故障部分，再依靠重合闸恢复正常供电。我国 110kV 及以上电压等级的电力系统均属于大接地电流系统。

(2) 中性点不接地方式

1) 中性点不接地系统的正常运行

中性点不接地系统正常运行时，电力系统的三相导线之间及各相对地之间，沿导线全长都分布有电容，这些电容在电压作用下将有附加的电容电流通过。为了便于分析，可认为三相系统是对称的，对地电容电流可用集中于线路中央的电容来代替，相间电容可不予考虑。

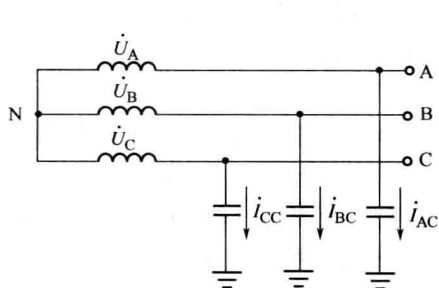


图 1-4 中性点不接地系统正常运行

设电源三相电压分别为 $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$ ，且三相导线绝缘良好，各相对地电容相等，如图 1-4 所示。此时各相对地分布电压为相电压，三相对地电容电流分别为 $\dot{i}_{AC}$ 、 $\dot{i}_{BC}$ 、 $\dot{i}_{CC}$ 。可以认为三相系统是对称的，中性点 N 点的电位应为零电位。

2) 中性点不接地系统的单相接地

当中性点不接地系统由于绝缘损坏发生单相接地时，各相对地电压和电容电流的情况将发生明显变化。我们以金属性接地故障为例进行分析。

金属性接地又称为完全接地。设 C 相在 k 点（见图 1-5）发生单相接地，此时 C 相对地电压为零。而中性点对地电压不再为零：

$$\dot{U}'_N = -\dot{U}_C$$

B 相对地电压为：

$$\dot{U}'_B = \dot{U}_B - \dot{U}_C$$

A 相对地电压为：

$$\dot{U}'_A = \dot{U}_A - \dot{U}_C$$

中性点不接地系统单相接地情况如图 1-5 所示。

显然，中性点不接地系统发生单相接地故障时，线电压不变而非故障相对地电压升高到原来相电压的 $\sqrt{3}$ 倍，即升至为线电压数值。因此，非故障相对地电压的升高，又造成对地电容电流相应增大，各相对地电容电流分别升至为 $\dot{i}'_{AC}$ 、 $\dot{i}'_{BC}$ 、 $\dot{i}'_{CC}$ ，C 相在 k 点的对地短路电流为 $\dot{i}_k$ ，而 $\dot{i}'_{CC} = 0$ ，则

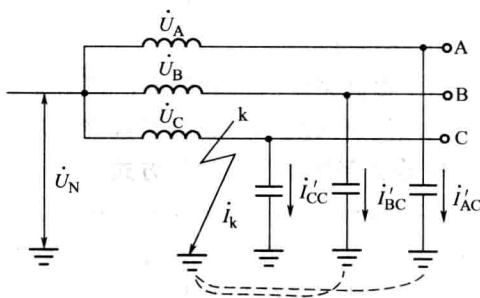


图 1-5 中性点不接地系统单相接地

$$\dot{i}'_k = -(\dot{i}'_{AC} + \dot{i}'_{BC})$$

$$\dot{i}'_{AC} = \frac{\dot{U}'_A}{X_C} = \frac{\sqrt{3}\dot{U}_A}{X_C} = \sqrt{3}\dot{i}_{AC}$$

$$\dot{i}_k = \sqrt{3}\dot{i}'_{AC} = 3\dot{i}_{AC}$$

结论：单相接地时接地点的短路电流是正常运行的单相对地电容电流的 3 倍。

3) 中性点不接地系统的适用范围

中性点不接地方式一直是我国配电网采用最多的一种方式。该接地方式在运行中如发生单相接地故障,其流过故障点的电流仅为电网对地的电容电流。当 35kV、10kV 电网限制在 10A 以下时,若是接地电流很小的瞬间,故障一般能自动消除。此时虽然非故障相对地电压升高,但系统还是对称的,故在电压互感器发热条件许可的情况下,允许带故障连续供电 2h,为排除故障赢得了时间,相对提高了供电的可靠性,这也是中性点不接地系统的主要优点。另外,中性点不接地系统不需要任何附加设备,投资小,只需装设绝缘监视装置,以便发现单相接地故障后能迅速处理,避免单相故障长期存在,以致发展为相间短路或多点接地事故。在这种系统中,电气设备和线路的对地绝缘应按能承受线电压考虑设计,而且应装交流绝缘监视装置。当发生单相接地故障时,可立即发出信号通知值班人员。

目前,我国中性点不接地系统的适用范围是:

- ① 电压等级在 500V 以下的三相三线制系统;
- ② 3~10kV 系统接地电流小于或等于 30A 时;
- ③ 20~35kV 系统接地电流小于或等于 10A 时;
- ④ 与发电机有直接电气联系的 3~20kV 系统,如要求发电机带单相接地故障运行,则接地电流小于或等于 5A 时。

如果系统不满足上述条件,通常采用中性点经消弧线圈或直接接地的的工作方式。

(3) 中性点经消弧线圈接地系统

中性点经消弧线圈接地系统如图 1-6 所示。

当系统发生单相接地(设 C 相)短路故障时,C 相对地电流为 $\dot{I}_k$, 流过消弧线圈的电流为 $\dot{I}_L$, 且 $\dot{I}_k + \dot{I}'_{AC} + \dot{I}'_{BC} - \dot{I}_L = 0$ 。

因此, $\dot{I}_k = \dot{I}_L - (\dot{I}'_{AC} + \dot{I}'_{BC})$ 。由此可知,单相接地短路电流是电感电流与其他两相对地电容电流之差,选择适当大小消弧线圈电感 L , 可使 $\dot{I}_k$ 值减小。

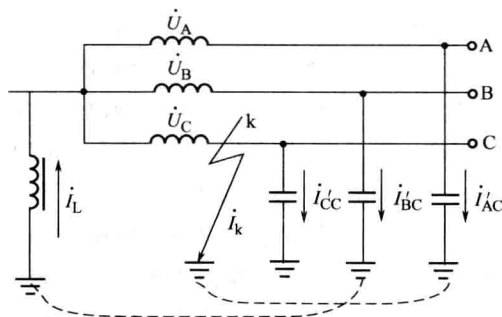


图 1-6 中性点经消弧线圈接地系统单相接地

中性点采用经消弧线圈接地方式,就是在系统发生单相接地故障时,消弧线圈产生的电感电流补偿单相接地电容电流,以使通过接地点电流减小能自动灭弧。消弧线圈接地方式在技术上不仅拥有了中性点不接地系统的所有优点,而且还避免了单相故障可能发展为两相或多相故障,产生过电压损坏电气设备绝缘和烧毁电压互感器等危险。

在各级电压网络中,当单相接地故障时,通过故障点的总的电容电流超过下列数值时,必须尽快安装消弧线圈:

- ① 对 3~6kV 电网,故障点总电容电流超过 30A;
- ② 对 10kV 电网,故障点总电容电流超过 20A;
- ③ 对 22~66kV 电网,故障点总电容电流超过 10A。

变压器中性点经消弧线圈接地的电网发生单相接地故障时,故障电流也很小,所以它也属于小接地电流系统。在这种系统中,消弧线圈的作用就是用电感电流来补偿流经接地点的电容电流。

4. 电力系统的供电质量及其改进措施

供电电能的质量是以频率、电压和波形来衡量的。电能的质量直接影响工农业等各方面电能用户的工作质量，同时也影响电力系统自身设备的效率和安全。因此，了解和熟悉供电质量对电能用户的影响是必要的。

(1) 用户对供电质量的基本要求

保证供电质量，对于促进工农业生产，降低产品成本，实现生产自动化和工业现代化有着十分重要的意义。用户对供电的基本要求有以下几个方面。

1) 保证供电的安全性

保证供电的安全性是对供电系统的最基本要求。供配电系统如果发生故障或遇到异常情况，将影响整个电力系统的正常运行，造成对用户供电的中断，甚至造成重大或无法挽回的损失。例如1977年7月13日，美国纽约市的电力系统由于遭受雷击，供配电系统的保护装置出现了误动作，致使全系统瓦解，至少造成3.5亿美元的经济损失；又如我国湖北电力系统，在1972年7月21日出现了继电保护错误操作，造成武汉和黄石两地区电压崩溃，使受端系统全部瓦解，经济损失达2700万元；还有就是2008年1月的冰灾，南方相当多的输电网被覆冰大规模压垮，引发了南方电力系统的大部瘫痪，特别是湖南电网500kV线路几乎全部瘫痪，造成的直接损失超过百亿元。因此，电力先行、安全第一。

2) 保证供电的可靠性

供电的可靠性是指电力系统应满足用户连续供电的要求。供电的可靠性指标，一般以全部平均供电时间占全年时间的百分比来表示。例如全年时间为8760小时，用户平均停电时间为8.76小时，则停电时间占全年时间的0.1%，供电可靠性为99.9%。

从某种意义上讲，绝对可靠的电力供配电系统是不存在的。但我们应能借助保护装置把故障隔离，防止事故扩大，尽快恢复供配电，维持较高的供电可靠性指标。

3) 保证电能的良好质量

供配电系统应满足用户对电能质量的要求。电压和频率是衡量电能质量的重要指标。电压和频率的过高或过低都会影响电力系统的稳定性，对用电设备造成危害。因此，我国规定电力系统中用户电压的变动范围为：35kV以上电压供电的用户为 $\pm 5\%$ ；10kV以下高压和低压供电的用户为 $\pm 7\%$ ；低压照明的用户为 $-10\% \sim +5\%$ 。

4) 保证电力系统运行的经济性

电能的经济性指标主要体现在发电成本和网络的电能损耗上。为了保证电能利用的经济合理性，供配电系统要做到技术合理、投资少、运行费用低，尽可能地节约电能和有色金属消耗量。另外还要处理好局部和全局、当前和长远的关系。既要照顾到局部和当前利益，又要有全局观念，按照统筹兼顾、保证重点、择优供应分配的原则，做好企业供配电工作。

综上所述，保证对用户不间断地供给充足、优质而又经济的电能，就是现代工矿企业对供配电系统的基本要求。这些基本要求相互联系、相互制约，在考虑满足任何一项要求时，必须兼顾其他方面的要求。

(2) 供配电的电能质量

电能质量是指供配电装置正常情况下不中断和不影响用户使用电能的指标，电能质量表征了供配电系统工作的优劣。电能质量有一个比较大的方面：频率、电压偏差、电压波动、高次谐波和三相不平衡，除此之外，供配电可靠性、操作性、维护性能等，也都是影响供电质量的因素。

1) 频率的允许偏差

根据 GB/T 15945—1995 规定：在电力系统正常工作情况下，电能频率的允许偏差为：电网装机容量为 300 万千瓦以上时，为 $\pm 0.2\text{Hz}$ ；电网装机容量为 300 万千瓦以下时，为 $\pm 0.5\text{Hz}$ ；在电力系统非正常情况下，供电频率允许偏差不应超过 $\pm 1.0\text{Hz}$ 。

频率的调整主要依靠发电厂调节发电机的转速来实现，在供配电系统中频率是不可调的，只能通过提高电压的质量来提高供配电系统的电能质量。

2) 电压质量

供配电系统提高电能质量就是提高供电电压的质量。电压质量可分幅值与波形两个方面。通常以电压偏差、电压波动与闪变、电压正弦波畸变率、负序电压系数来衡量。

① 电压偏差。以电压实际值与额定值之差 ΔU 对额定电压的百分值 $\Delta U\%$ 来表示，即

$$\Delta U\% = \frac{U - U_N}{U_N} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中， U 是检测点的电压实际值； U_N 是检测点电网电压的额定值。

根据 GB/T 12325—1990《电能质量供电电压允许偏差》规定：在电力系统正常情况下，供电企业送到用户受电端的供电电压允许偏差如下：

35kV 及 35kV 以上电压供配电，电压正、负偏差的绝对值之和不超过额定值的 10%；10kV 及以下三相供配电，为额定值的 $\pm 7\%$ ；220V 单相供配电为额定值的 $-10\% \sim 5\%$ 。在供配电系统非正常情况下，用户受电端的电压最大允许偏差不应超过额定值的 10%。

② 电压波动与闪变。电压在某一段时间内急剧变化而偏离额定值的现象，称为电压波动。周期性电压急剧变化引起电源光通量急剧波动而造成人的视觉感官不舒适的现象，称为闪变。

③ 电压正弦波畸变率。由于电力系统中存在大量的非线性供用电设备，使得电压波形偏离正弦波，这种现象称为电压正弦波畸变。电压波形的畸变程度用电压正弦波畸变率来衡量，也称为电压谐波畸变率。

④ 负序电压系数。负序电压系数表示三相电压不平衡程度。通常以三相基波负序电压有效值与额定电压有效值之比的百分数来表示。

(3) 提高电能质量的措施

电能质量的提高，在工矿企业中通常采用以下措施：

① 就地进行无功功率补偿，及时调整无功功率补偿量。

② 调整同步电动机的励磁电流，使其超前或滞后运行，产生超前或滞后的无功功率，以达到改善系统功率因数和调整电压偏差的目的。

③ 正确选择有载或无载调压变压器的分接头（开关），以保证设备端电压稳定。

④ 尽量使系统的三相负荷平衡，以降低电压偏差。

⑤ 采用电抗值最小的高低电压配电线路方案。架空线路的电抗约为 $0.4\Omega/\text{km}$ ；电缆线路的电抗约为 $0.08\Omega/\text{km}$ 。条件许可下，应尽量优先采用电缆线路供电。

工矿企业抑制电压波动的措施有：

① 对负荷变动剧烈的大型电气设备，采用专用线路或专用变压器单独供电；

② 减小系统阻抗。使系统电压损耗减小，从而减小负载变化时引起的电压波动；

③ 在变、配电所配电线路出口加装限流电抗器，以限制线路故障时的短路电流，减小

电压的波动范围；

- ④ 对大型电动机进行个别补偿，使其在整个负荷范围内保持良好的功率因数；
- ⑤ 在低压供配电系统中采用电力稳压器稳压，确保用电设备的正常运行。

目前，随着电子技术、控制技术、网络技术的发展与应用，利用计算机实现对供配电系统的实时监控，从而能够在计算机屏幕上自动显示电压波动信息、波动幅值及频率、电压波动地点及抑制措施等。

5. 供配电电压的选择

工厂供配电电压的高低，对电能质量及降低电能损耗均有重大的影响。在输送功率一定的情况下，若提高供电电压，就能减少电能损耗，提高用户端电压质量。但从另一方面讲，电压等级越高，对设备的绝缘性能要求随之增高，投资费用相应增加。因此，供配电电压的选择主要取决于用电负荷的大小和供电距离的长短。各级电压电力网的经济输送容量与输送距离的参考值见表 1-1。

表 1-1 各级电压电力网的经济输送容量与输送距离

额定电压/kV	传输方式	输送功率/kW	输送距离/km	额定电压/kV	传输方式	输送功率/kW	输送距离/km
0.38	架空线路	≤100	≤0.25	10	电缆线路	≤5000	≤10
0.38	电缆线路	≤175	≤0.35	35	架空线路	2000~10000	20~50
6	架空线路	≤2000	3~10	66	架空线路	3500~30000	30~100
6	电缆线路	≤3000	≤8	110	架空线路	10000~50000	50~150
10	架空线路	≤3000	5~15	220	架空线路	100000~500000	200~300

(1) 供配电系统电力变压器的额定电压

① 电力变压器连接于线路上时，其一次绕组的额定电压应与配电网的额定电压相同，高于供电电网额定电压 5%；

② 电力变压器二次绕组的额定电压是指在变压器空载情况下，一次绕组加上额定电压时二次绕组上的电压，而二次绕组开路时的空载电压。考虑到变压器在满载运行时，二次绕组内约有 5% 的电压降，另外二次侧供电线路较长等原因，变压器的二次绕组端电压应高于供电电网电压 10%，其中 5% 用来补偿变压器峰荷时绕组内部的压降，另外的 5% 用于补偿变压器二次绕组连接的配电线路的电压损耗。

(2) 电压等级划分及适用范围

1) 高、低压的划分

按照电力行业标准 DL408—1991《电力安全工作规范》规定：

低压：指设备对地电压在 250V 及 250V 以下；

高压：指设备对地电压在 250V 以上。

此划分主要是从人身安全角度考虑的。

实际上，我国的一些设计、制造和安装规程通常是以 1kV 为界限来划分高、低压的。因此，通常工厂所指高压即为 1kV 及以上电压。

2) 电压的适用范围

220kV 及其以上电压为输电电压，用来完成电能的远距离输送。

110kV 及以下电压，一般为配电电压，完成对电能进行降压处理并按一定的方式分配至电能用户。35~110kV 配电网为高压配电网，10~35kV 配电网为中压配电网，1kV 以下为低压配电网。3kV、6kV、10kV 是工矿企业高压电气设备的供电电压。