

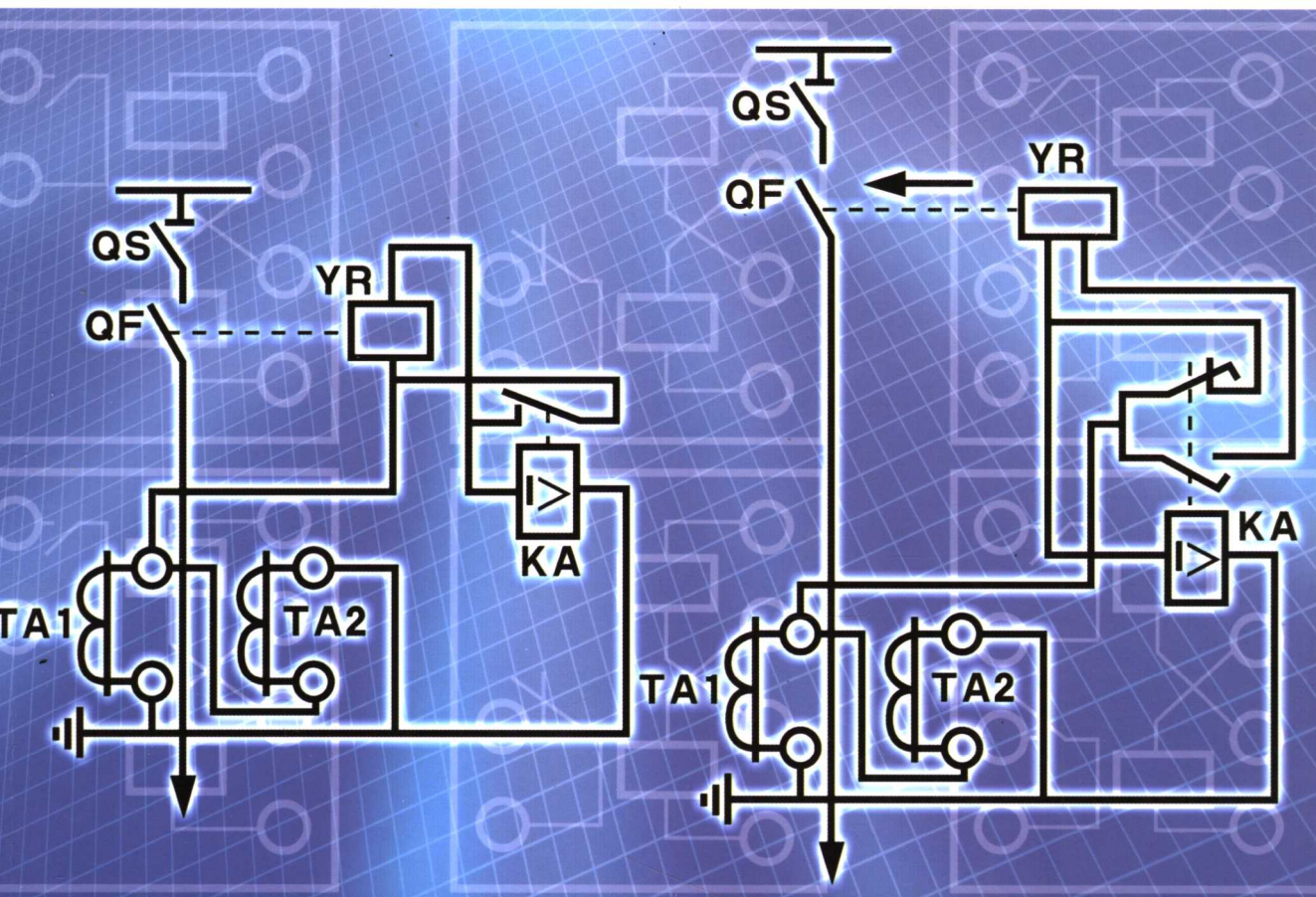


GAODENG ZHIYE JIAOYU GUIHUA JIAOCAI

• 高等职业教育规划教材 •

供配电技术

李军 主编 王子明 许郢 副主编
胡开元 主审



中国轻工业出版社

高等职业教育规划教材

供 配 电 技 术

李 军 主 编
王子明 许 郢 副主编
胡开元 主 审

 中国轻工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

供配电技术/李军主编. —北京: 中国轻工业出版社,
2007. 1

高等职业教育规划教材

ISBN 7-5019-5581-6

I. 供... II. 李... III. ①供电-高等学校: 技术学
校-教材②配电系统-高等学校: 技术学校-教材 IV. TM72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 100448 号

责任编辑: 王 淳

策划编辑: 王 淳 责任终审: 孟寿萱 封面设计: 刘 鹏

版式设计: 马金路 责任校对: 李 靖 责任监印: 胡 兵 张 可

出版发行: 中国轻工业出版社 (北京东长安街 6 号, 邮编: 100740)

印 刷: 三河市世纪兴源印刷有限公司

经 销: 各地新华书店

版 次: 2007 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 787×1092 1/16 印张: 16.25

字 数: 400 千字

书 号: ISBN 7-5019-5581-6/TM·023 定价: 25.00 元

读者服务部邮购热线电话: 010-65241695 85111729 传真: 85111730

发行电话: 010-85119817 65128898 传真: 85113293

网 址: <http://www.chlip.com.cn>

Email: club@chlip.com.cn

如发现图书残缺请直接与我社读者服务部联系调换

51179J4X101ZBW

前 言

本教材是根据教育部制定的《高职高专教育机械设计基础课程教学基本要求》编写的。适用于高职高专以及中等专业学校电气自动化等相关专业。本教材是由从事多年高职教学并具有一定实践经验的一线教师集思广益而成,在力求创新的思想指导下,对这一传统知识体系进行了卓有成效的编撰。它反映了教学改革的思路和成效。

本教材以工厂供电应用为主线,在传统教材编撰的基础上增加了建筑电气的相关内容,以扩大学生的知识面。在论述工程设计方法和运行维护的同时,特别注意基本理论的系统性和在实际供电技术中应用的实用性,并总结了工厂供电技术中出现的新设备、新技术和新问题,注重结合国家近年来颁布的一系列供电国家标准和设计操作规范,编写和充实了近年来工厂供电技术的新技术、新规范。

本书的特点是,按照“以应用为目的,以必须够用为度,以讲清概念,强化应用为教学重点”的原则,精选教学内容。本教材共分9章,首先扼要介绍了电力系统的有关基础知识,接着系统地讲述工厂供电系统电力负荷的计算,供电系统方案的确定,电力变压器和供电系统的相关开关设备,企业供配电系统,室内供配电系统,短路电流计算方法与电气设备的选择与校验,二次回路和继电保护,高层民用建筑供电系统及安全技术。

最后考虑到供电系统新技术、新设备的广泛使用,本书介绍了变电所综合自动化、变电所综合自动化系统、无人值班变电所、配电网综合自动化、供电系统的微机保护及其应用等内容。

各章均有【教学目标】,旨在使初学者一目了然的明确本章的重点、难点所在,做到有所关注,并明确本章的学习要求,做到有的放矢。各章都有“本章小结”及精选的思考及练习题,旨在帮助读者总结归纳,答疑解惑、巩固知识,掌握解题的思路和方法。

本书由哈尔滨职业技术学院李军主编,并负责全书统稿。参加本书编写的有:哈尔滨职业技术学院李军(第3、4、5章),哈尔滨职业技术学院王子明(第7、8、9章),黑龙江工商职业技术学院许郢(第1、2、6章)。

本书由哈尔滨电业局调度处胡开元主审,在审阅过程中,对本书提出许多宝贵意见和建议。在编写过程中,得到诸葛晓舟、马彪、王成福、邱敏、黄英、马健儿、张江城、黄卫红、徐刚、蔡文斐、张泽平等同行的支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

实践是检验真理的唯一标准,本书在编写过程中,力求结合高职高专教育的特点和当前工厂供电技术的新发展,但由于工厂供电技术涉及面越来越广,新产品、新技术的应用越来越广泛,加之编者水平所限,因此本书需要在实践中不断完善,敬请使用本书的广大教师、学生和读者批评指正。同时,我们期待着广大的读者试用并验证。恳请同行和广大读者提出宝贵的意见和建议,我们表示由衷的感谢。

全体编者
2006年5月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 电力系统的基础知识	1
1.2 电力系统的中性点运行方式	5
1.3 供电质量要求.....	12
1.4 电力用户供配电系统的特点及配电电压的调整.....	19
思考题及习题	21
第2章 电力负荷及计算	23
2.1 电力负荷及负荷曲线.....	23
2.2 求计算负荷的方法.....	27
2.3 电力用户计算负荷及年耗电力的算法.....	34
思考题及习题	41
第3章 变配电实用技术	42
3.1 电力设备概述.....	42
3.2 电力变压器.....	44
3.3 电流互感器和电压互感器.....	49
3.4 高压开关电器.....	56
3.5 高压断路器.....	65
3.6 高压熔断器和避雷器.....	73
3.7 成套配电装置.....	80
思考题及习题	84
第4章 企业供配电系统主接线及结构	86
4.1 概述.....	86
4.2 变压器台数和容量的选择.....	90
4.3 企业变配电所的设置.....	93
4.4 变配电所电气主接线.....	96
4.5 企业供配电网络	100
4.6 供电线路母线、导线和电缆的选择计算	103
思考题及习题.....	107
第5章 室内供配电系统实用技术与电气照明	109
5.1 室内供配电要求及配电方式	109
5.2 室内供配电系统的保护装置及选择	113
5.3 低压配电箱	117
5.4 照明技术概述	120
思考题及习题.....	129

第6章 短路计算及电气设备的选择与校验	130
6.1 概述	130
6.2 无限大容量电力系统发生三相短路时短路过程的分析	132
6.3 无限大容量电力系统中的短路电流计算	135
6.4 低压电网中短路电流的计算	143
6.5 短路电流的效应与校验	146
6.6 供电系统中电气设备的选择与校验	152
思考题及习题	159
第7章 供电系统的二次回路、继电保护及自动装置	161
7.1 供电系统的二次回路及操作电源	161
7.2 高压断路器的控制及信号回路	163
7.3 继电保护的任务、要求及基本原理	167
7.4 常见的继电器及其接线、操作方式	170
7.5 供电系统单端供电网络的保护	175
7.6 变压器的保护	180
7.7 高压电动机的保护	185
7.8 低压配电系统的保护	190
7.9 供电系统备用电源自动投入与自动重合闸装置	194
7.10 供电系统的防雷与接地	197
思考题及习题	203
第8章 高层民用建筑供电系统及安全技术	205
8.1 民用建筑配电系统	205
8.2 人体触电的预防和接地系统	208
8.3 建筑电气安全技术	212
8.4 火灾自动报警与消防联动控制系统	217
8.5 智能型现代化建筑综述	223
思考题及习题	227
第9章 供配电系统的综合自动化	229
9.1 概述	229
9.2 变电所综合自动化系统	232
9.3 无人值班变电所	237
9.4 配电网综合自动化	239
9.5 供电系统的微机保护	242
思考题及习题	247
附录	248
参考文献	251

第 1 章 绪 论

【教学目标】

- 了解各种发电厂的能量转换过程。
- 了解电力系统和电力网的基本组成。
- 了解电力系统的运行特点。
- 掌握决定供电质量的主要指标及其改善措施。
- 学会选择电力用户供配电的电压。

1.1 电力系统的基础知识

1.1.1 电力工业和发电厂简介

1.1.1.1 电力工业

由于电能与其他能量之间转换方便，易于传输和使用，目前电力是现代工业的主要能源。电力工业就是指将自然界储藏的一次能源（如水流的位能，煤炭、石油、天然气的化学能，太阳的太阳能，风的风能，地热的热能，某些元素经核反应或核裂变的核能等）转变为电能（二次能源）的工业。

我国电力技术水平在不断提高的同时，电源结构也由火电为主转为水电、火电、风电、核电并行发展。目前已经在一些煤炭基地建成大型坑口火电厂，第一座大型核电厂（秦山核电站）于 1991 年并网发电，还有目前正在修建的三峡工程，是当今世界上最大的水利水电工程。同时中小型发电厂更是星罗棋布，遍布全国。预计到 2010 年我国发电量和发电机组装机容量可以达到 5 亿千瓦左右。

1.1.1.2 发电厂

发电厂又称发电站，是将一次能源转换为电能的工厂。按照发电厂所利用的能源不同，可分为火力发电厂、水力发电厂、风力发电厂、核能发电厂、地热发电厂、太阳能发电厂、潮汐发电厂等类型。

(1) 火力发电厂

火力发电厂，又称火电厂、火电站，是利用燃料（煤、石油、天然气）的化学能来生产电能的。我国的火电厂主要以燃煤为主。为了提高燃料的效率，现代都将煤块粉碎成煤粉燃烧。煤粉在锅炉的炉膛内充分燃烧，将锅炉内的水烧成高温高压的蒸汽，推动汽轮机转动，使与它联轴的发电机旋转发电。其能量转换过程是：

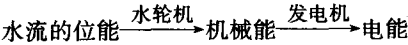
燃烧化学能 $\xrightarrow{\text{锅炉燃烧}}$ 热能（高温高压的蒸汽） $\xrightarrow{\text{汽轮机}}$ 机械能 $\xrightarrow{\text{发电机}}$ 电能

火力发电不受地域限制，建设周期较短，是目前广泛使用的一种发电形式，但火力发电使用的是消耗性能源，使用效率低，发电成本高，技术要求也高。我国传统能源煤炭、石油、天然气在一次能源的使用中占到 93% 左右，其中占主导地位的煤炭发电污染极为严重。为了保护生态环境，提高经济效益，火电厂对“三废”（废水、废气、废渣）实行综合利用，

不仅用来发电，而且用来供热（供应蒸汽和热水）。这种既供电又供热的火电厂，称为“热电厂”或“热电站”。热电厂一般建在靠近城市或工业区的地方。

(2) 水力发电厂

水力发电厂又称水电厂、水电站，是利用河流所蕴藏的水能资源（水位的落差）来生产电能的。水力发电厂的生产过程要比火力发电厂简单，由拦河坝维持在高水位的水，当闸门打开时，水流经压力水管进入螺旋形水轮机蜗壳室，冲击叶片带动水轮机旋转，将水能变为机械能，水轮机再带动发电机转子旋转发电，使机械能变成电能。其能量转换过程是：



水力发电厂的容量大小决定于上下游的水位差（简称水头）和流过水轮机的流量的大小。因此，水力发电厂往往需要修建拦河大坝等水工建筑物以形成集中的水位差，并依靠大坝形成具有一定容积的水库来调节河水流量。

水力发电厂的优点是生产过程简单，易于实现自动化生产，水轮机组的效率较高，电能成本明显要比火力发电厂低得多。并且水能资源是最干净、价廉的能源，不像火力发电厂、核能发电厂那样存在环境污染问题。但是，水力发电厂建设投资较大，工期长，运行方式受气象、水文等条件的影响，不如火电厂稳定。

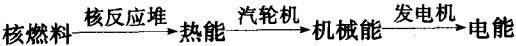
我国的水资源丰富，理论储藏量达 6.76 亿千瓦，可开发 3.79 亿千瓦，居世界首位。水能资源是可再生的清洁能源，开发水电有利于保护环境，防止污染，提高资源利用率。但我国的水力资源开发距发达国家有很大的差距，目前开发率还不到 17%。

最近几十年，我国加速了大中型水电站的建设，百万千瓦以上的特大型水电站越来越多。尤其是 1992 年 3 月批准兴建、1994 年 12 月 14 日正式动工的三峡工程，是具有防洪、发电、航运、养殖、灌溉、旅游、改善周边经济状况的有巨大综合效益的战略性跨世纪工程。三峡电厂装机 26 台 70 万千瓦的发电机组，装机总容量 1820 万千瓦，年发电量 847 亿千瓦。三峡工程是我们每个炎黄子孙引以自豪的超巨型工程，2003 年 7 月 10 日，三峡工程首台机组开始经过 500kV 交流线路和三峡至广州直流输变电工程，从宜昌直达向广东省供电。

三峡工程处于全国电网中枢的位置，预计 2009 年全部竣工。届时，它将以巨大的功率向直线供电距离 1000km 为半径内的地区供应电力。全国除辽宁、吉林、黑龙江、新疆、西藏、海南外，其余各省、自治区、直辖市的主要城市和工业基地都在三峡工程供电范围内。

(3) 核能发电厂

核能发电厂，又称原子能发电厂、核电站，它是利用原子核裂变（中子轰击铀-235）或核聚变所产生的巨大能量来生产电能的。其生产过程与火电厂相类似，但它以核反应堆（俗称原子锅炉）代替了燃烧锅炉，以少量的核燃料在反应堆里发生裂变（或聚变）而产生大量热能，再用处于高压下的水把热能带出，在蒸汽发生器内产生高温高压的蒸汽，由蒸汽冲击、带动汽轮机-发电机组旋转而发电。其能量转换过程是：



核电厂在节省一次能源和环境保护上均优于火电厂，1000g 铀-235 放出的能量相当于 2700t 标准煤，并且核反应不排放二氧化碳、二氧化硫、氮的氧化物等有害物质，不会造成温室效应和酸雨，从而有利于保护人类赖以生存的生态环境。而且，同样装机容量的核电成本比火电低得多。尽管目前对核电颇有争议，但核电的发展是突飞猛进的。至 1998 年底，

全世界共有核电站 422 座，总装机容量 35849 万千瓦。目前，世界核发电占总发电量的 17% 左右，已有 28 个国家建成核电站。我国核电的起步较晚，但秦山核电站的并网发电，证明中国无核电已成为历史，秦山二、三期工程及大亚湾、连云港等一大批核电站的上马，使我国核电发电量明显增加。

进一步大量发展火电存在石油天然气资源限制、煤炭远距离运输困难及影响生态环境等问题；水电虽好，但我国的水能资源主要集中在西南地区，其发展具有一定局限性。从长远来看，充分利用和发挥我国的铀资源优势，大力发展核电，是对火电与水电发展不足的一种补充，是非常必要的，核电将在 21 世纪获得更大的发展。

(4) 风力发电厂

风力发电厂又称风电厂、风电站，是利用风力的动能来生产电能。它一般建在风力资源丰富

的地方。

风力发电对我国边远地区的电力发展具有不可替代的重要意义。

我国风力资源储量丰富，尤其是新疆、内蒙古一带。在人口分散、集中供电困难的情况下，发展风力发电是一条重要途径。例如，内蒙古自治区的风力资源总储量为 10.1 亿千瓦，可开发利用的风能储量为 1.01 亿千瓦，占全国的 40%。为了充分利用风力资源，创建我国新型的环保电力行业，我国制订了“乘风计划”，通过先进的风机制造技术，逐步实现大型风力发电。

(5) 太阳能发电厂

太阳能发电厂是利用太阳光能和太阳热能来生产电能的。它一般建在常年日照时间长的地方。

我国拥有丰富的太阳能资源，每年我国陆地接收的太阳辐射总能量相当于 24000 亿吨标准煤。随着当前世界光电技术及其应用材料的飞速发展，光电材料成本成倍下降，光电转换率不断提高，预计在不久的将来，太阳能发电的成本将会接近甚至低于煤电。我国自行研制生产的太阳能热水器，已越来越多地在全国城乡推广使用。

(6) 地热发电厂

地热发电厂利用地球内部储藏的大量地热能来生产电能。一般建在有丰富地热资源的地方。

这里要指出的是，作为无污染、可再生的太阳能发电和风力发电，在世界各国普遍重视环境保护的今天，具有广阔的发展前景。

1.1.2 电力系统和电力网

1.1.2.1 电力系统

由于目前电能还不能大量的储存，电能的生产、传送、分配和使用都是在同一时间内完成，因此必须将各个环节有机地连成一个整体。电力系统就是由各种电压等级的电力线路，将各发电厂、变电所和电力用户联系而成的发电、输电、配电和用电的整体。图 1-1 是从发电厂到电力用户的各个环节及电力系统的组成示意图。

建立大型电力系统的目的是：

① 可以充分利用地方丰富的水、煤矿等资源（如水电与火电互补，负荷移峰填谷），减少传输线路和能量损耗，降低发电成本。

② 利用发电厂的工作特点，进行合理地分配负荷，使系统在最经济的情况下运行。

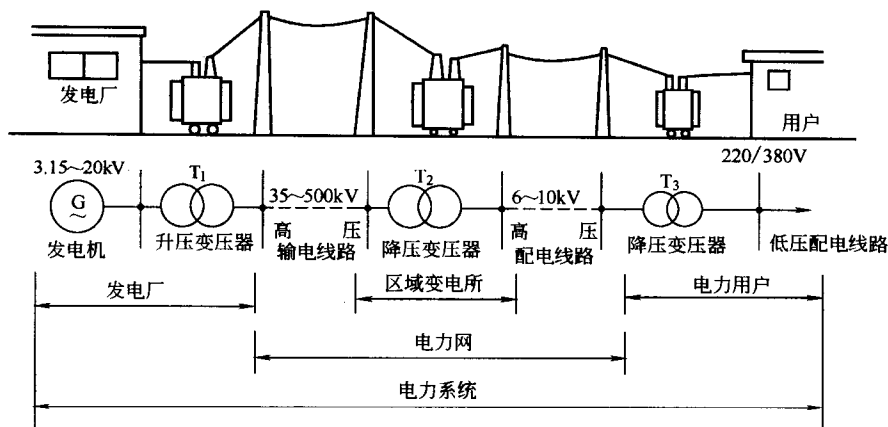


图 1-1 电力系统的组成示意图

③ 不受地方负荷的限制，可以增加单位机组的容量，提高工作生产效率。

④ 在减少备用机组的情况下，能提高对用户供电的可靠性，有利于国民经济的发展。例如在局部电力系统发生故障时，可以切除部分次要负荷，来保证主要用户不间断供电的可靠性。

1.1.2.2 电力网

(1) 电力网的作用

电力网简称电网，是由各种不同电压等级的电力线路及其相联系的变配电所组成的。电力网是电力系统的重要组成部分，其作用是将电能从发电厂输送并分配到用户，因此它是发电厂和用户不可缺少的中心环节。

(2) 电力网的分类

1) 按本身结构方式分 电力网可分为开式电力网和闭式电力网。

开式电力网是指用户从单方向获得电能的电力网；闭式电力网是指用户从两个或两个以上方向获得电能的电力网。环行结构和两端供电的电力网都属于闭式电力网。

2) 按电网的作用不同分 电力网可分为输电网和配电网。

输电网是输电线路的电网，是由 35kV 及以上的输电线路与其相连的变电所组成。输电网是电力系统的主要网络（简称主网），也是电力系统中电压最高的网络，在电力系统中起骨架作用，所以又称为网架。它的作用是将电能输送到各个地区的配电网，或直接送给大型工业企业用户。

配电网是由 10kV 及以下的配电线路与其相连的配电变电所组成，它的作用是将电能分配到各类用户。

3) 按电压等级分 电力网又可分为地方性电力网和区域性电力网。

区域性电力网是指电压在 220kV 及以上的电力网；地方性电力网是指电压在 220kV 及以下的电力网。

目前，我国百万千瓦以上装机容量的电网有 11 个，华东、华北、东北、华中电网装机容量都在 3000 万千瓦以上，大电网已经覆盖了全国的全部城市和大部分乡村。

我国作出了实施西部大开发的重大决策，西电东送就是其中的重要举措之一。通过互联电网将中西部富余廉价的电力输送到经济发达、资源相对缺乏的东部地区，既符合我国的能源发展战略，有利于合理调整能源结构、改善东部的生态环境，又能实现东西部地区优势互补。

补,极大地推动中西部地区的经济发展。

1.1.3 电力系统的运行特点

电力系统的运行与其他工业生产相比,具有以下明显的特点。

(1) 发电与用电的动态平衡

由于电能不能大量储存,电能的生产、输送、分配和消费,实际上是同步进行的。即在电力系统中,发电厂任何时刻生产的电能,必须等于同一时刻用电设备消耗的电能与电力系统本身所消耗的电能之和。因此,电力系统必须保持电能处于一种动态平衡的状态。

(2) 电力系统的暂态过程非常短暂

由于电是以光速传播的,所以发电机、变压器、电力线路和电动机等设备的投入和切除,都是在一瞬间完成的。电能从一地点输送到另一地点所需的时间,仅需要 $10^{-6} \sim 10^{-5} \text{ s}$ 。因此,在设计电力系统的自动化控制、测量和保护装置时,应充分考虑其灵敏性。

(3) 地方性特色明显

电能可以由不同形式的能量转化而来,不同地区的能源具有本地的特色。因此,要因地制宜,充分利用地方资源,尽量减少运输线路,降低电能成本。

(4) 与国民经济及人民生活有重要的影响

现代工业、农业、交通通讯等各行业都广泛使用电作为动力,人民的日常生活广泛使用各种电器。电能供应的中断或不足,不仅将直接影响生产,造成人民生活紊乱,在某些情况下甚至会酿成极其严重的损失和后果。

1.2 电力系统的中性点运行方式

1.2.1 概述

三相电力系统中三相绕组或三根相线的公共联结点,称为中性点。中性点通常用字母“O”来表示。当中性点接地时,称为“零点”。

1.2.1.1 中性线

由中性点引出的导线称为中性线,一般用字母“N”表示。当中性点接地时,中性线称为零线。

中性线(N线)是与电力系统中性点连接并且传导电能的导体,其主要作用是:一是用来传导三相系统中的不平衡电流(包括谐波电流)和单相电流;二是便于连接单相负载及测量相电压;三是用来减小负荷中性点的电位偏移,保持三个相电压平衡。因此中性线是不允许断开的,在下面将要介绍的TN系统的中性线上不得装设熔断器或开关。

保护线(PE线)是为了防止电击,而将电气设备的外露可导电部分、外部导电部分、总接地端子、接地干线、接地极、电源接地点或人工接地点进行电气连接的导体。其中,将总接地端子或接地干线到接地极的保护线称为接地线,用字母“E”表示。使电气设备的外露可导电部分、外部导电部分在电位上实施相等的连接线称为等电位连接线。在等电位连接线中,作为主要连接的称为主等电位连接线,作为局部或辅助连接的称为辅助等电位连接线。

外露可导电部分是指电气装置中能被触及到的导电部分,它在正常情况时不带电,但在

有故障情况下可能带电，一般是指金属外壳，如高低压柜（屏）的框架、电动机机座、变压器或高压多油开关的箱体以及电缆的金属外护层等等。装置外部导电部分又称为外部导电部分，它不属于电气装置，但亦可能引入电位（一般是地电位），如水、暖气、煤气、空调等的金属管道以及建筑物的金属结构。

保护中性线（PEN 线）兼有中性线（N 线）和保护线（PE 线）的功能，用于保护性和功能性结合在一起的场合 [如图 1-2（a）所示的 TN-C 系统]，但首先必须满足保护性措施的要求。保护中性线不用于由剩余电流保护装置 RCD 保护的线路内。

1.2.1.2 低压配电系统的保护接地

低压配电系统中，按保护接地的形式不同，分为 TN 系统、TT 系统和 IT 系统。

(1) TN 系统

在 TN 系统中，电源系统有一点直接接地，通过中性点引出中性线和保护线。如图 1-2 所示。根据中性线和保护线的布置，TN 系统的形式有以下三种：

- 1) TN-C 系统 如图 1-2（a）所示，在整个系统中，中性线和保护线的功能合在一根导线上。
- 2) TN-S 系统 如图 1-2（b）所示，在整个系统中，有分开的中性线和保护线。
- 3) TN-C-S 系统 如图 1-2（c）所示，系统中一部分中性线和保护线的功能合在一根导线上。

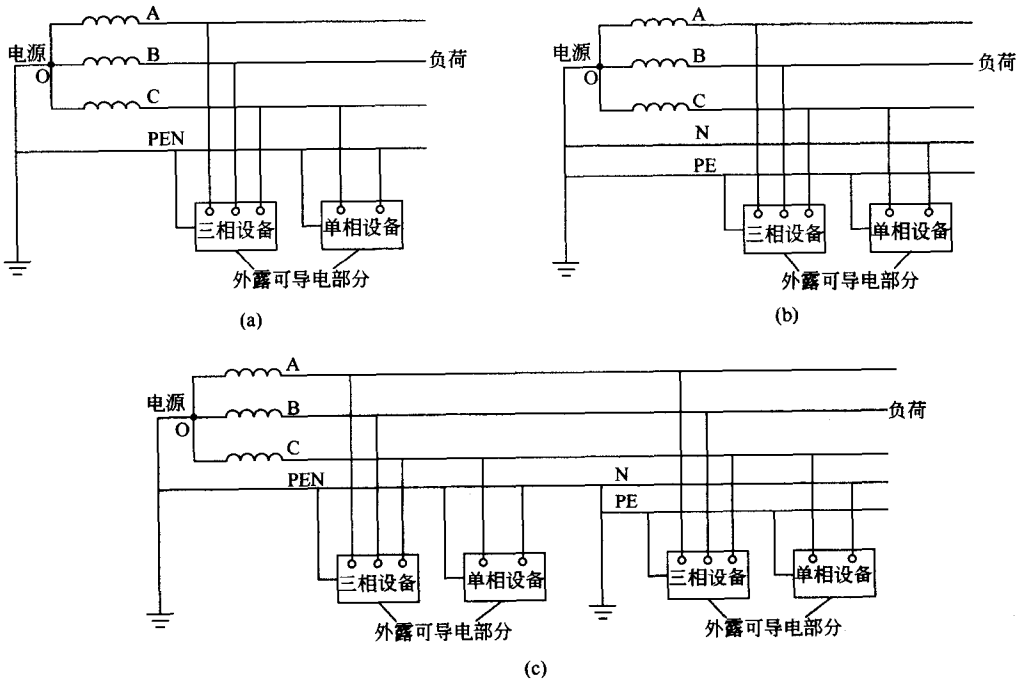


图 1-2 TN 系统
(a) TN-C 系统 (b) TN-S 系统 (c) TN-C-S 系统

TN 系统第一个字母 T 表示电源系统的一点直接接地，第二个字母 N 表示设备外露的可导电部分与电源系统接地点直接电气连接；字母 S 表示中性线和保护线是分开的；字母 C 表示中性线和保护线的功能合在一根导线上。

(2) TT 系统

如图 1-3 所示,在 TT 系统中,电源系统有一点直接接地,电气设备外露可导电部分与电源系统的接地无电气联系。电气设备的接地体可能是一台单独使用,也可能是多台共同使用。

TT 系统第一个字母 T 表示电源系统的一点直接接地;第二个字母 T 表示设备外露导电部分与电源系统的接地无电气联系。

(3) IT 系统

如图 1-4 所示,在 IT 系统中,电源系统的中性点不接地或经电阻或经消弧线圈接地。接在这种电网中的电气设备,应通过接地装置将设备的外壳与地相连。

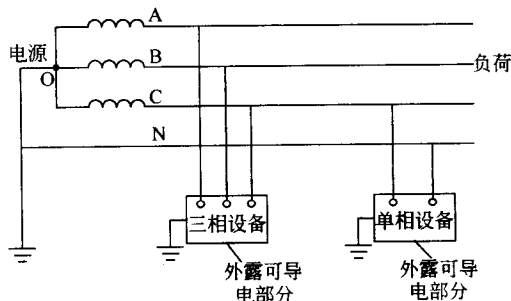


图 1-3 TT 系统

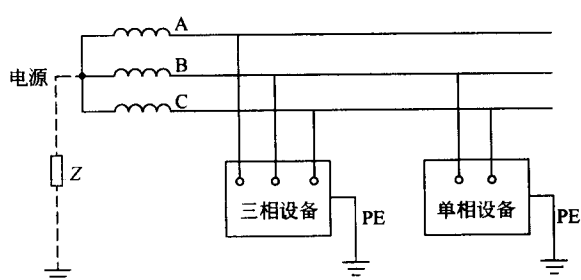


图 1-4 IT 系统

IT 系统中第一个字母 I 表示电源系统所有带电部分不接地或一点经电阻或经消弧线圈接地;第二个字母 T 表示设备外露导电部分的接地与电源系统的接地无电气联系。

TN 系统和 TT 系统都是中性点直接接地系统,且都引有中性线,因此都称之为“三相四线制系统”。TN 系统中设备外露的可导电部分均采用与公共的保护线(PE 线)或保护中性线(PEN 线)相连接的保护方式。IT 系统的中性点不接地或经阻抗(约 1000Ω)接地,且通常不引出中性线,因此一般称之为“三相三线制系统”。

电力系统中电源(含发电机和电力变压器)的中性点有四种运行方式:①中性点不接地;②中性点经电阻接地;③中性点经消弧线圈接地;④中性点直接接地。

电力系统中电源中性点的不同运行方式,对电力系统的运行,尤其是对发生单相接地故障时有明显的影响,并且直接影响电力系统二次电路的保护配置及监察、测量、信号电路的选择和运行。因此下面对中性点的四种运行方式分别加以讨论。

1.2.2 中性点不接地的电力系统

电力系统中,中性点不接地实现起来很简单,只需在电源中性点处不附加任何装置。

(1) 正常状态

如图 1-5 所示,是电源中性点不接地的电力系统在正常运行时的电路图。图中采用集中参数, r_1 、 r_2 、 r_3 分别表示各相对地的分布绝缘电阻, C_1 、 C_2 、 C_3 分别表示各相对地的分布电容。

当系统正常运行时,电源的三个相电压 U_A 、 U_B 和 U_C ,一般都是对称

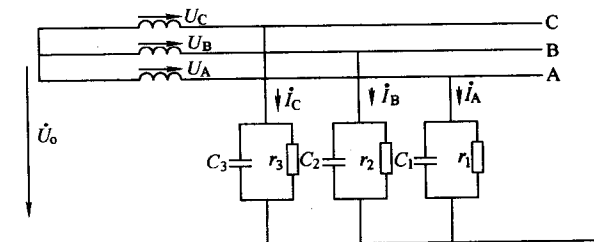


图 1-5 正常运行时电源中性点不接地的电力系统

的, 即

$$U_A = U_B = U_C = \dot{U}_O \quad (1-1)$$

式中 $\dot{U}_O$ ——电源的相电压值

此外, 各相对地的绝缘电阻值和对地电容一般来说也是相等的, 即

$$r_1 = r_2 = r_3 = r \quad (1-2)$$

$$C_1 = C_2 = C_3 = C \quad (1-3)$$

这样, 三相电网对地就相当于接上了由绝缘电阻和对地电容并联后组成的对称负载 (或称为假想负载), 因此, 实际上并不是与地没有任何联系, 它可以视为经电网对地绝缘参数接地的接地系统。

(2) 单相接地故障

当系统发生单相接地故障时, 例如 C 相接地, 如图 1-6 (a) 所示。这时故障相 (C 相) 对地电压为零 (为简便起见, 这里把接地故障视为无阻抗的完全接地——金属性接地), 而非故障相 A 相对地电压 $\dot{U}'_A = \dot{U}_A + (-\dot{U}_C) = \dot{U}_{AC}$, B 相对地电压 $\dot{U}'_B = \dot{U}_B + (-\dot{U}_C) = \dot{U}_{BC}$, 如图 1-6 (b) 所示。由此可见, 非故障两相的对地电压都由原来的相电压升高到线电压, 即为原对地电压的 $\sqrt{3}$ 倍。因此, 这种系统中的供用电设备的相绝缘要按照线电压考虑。

C 相接地时, 系统的接地电流 (电容电流) $\dot{I}_C$ 应为非故障的 A、B 两相对地电容电流之和, 即 $\dot{I}_C = \dot{I}_{CA} + \dot{I}_{CB}$ 。由图 1-6 (b) 可知, $\dot{I}_C$ 在相位上比 C 相相电压 $\dot{U}_C$ 超前 90° 。

由于 $I_C = \sqrt{3}I_{CA}$, 而 $I_{CA} = U_A/X_C = \sqrt{3}U_A/X_C = \sqrt{3}I_{CO}$, 因此

$$I_C = \sqrt{3}I_{CO} \quad (1-4)$$

即中性点不接地的系统中, 单相接地故障时的电容电流为正常运行时每相对地电容电流的 $\sqrt{3}$ 倍。

由于线路对地的分布电容 C 及 I_{CO} 、 I_C 难以确定, 实际电气工程设计中一般采用经验公式来计算单相接地电容电流。

$$I_C = \frac{U_N(L_{oh} + 35L_{cab})}{350} \quad (1-5)$$

式中 I_C ——系统单相接地故障的接地电容电流 (A)

U_N ——系统的额定电压 (kV)

L_{oh} ——与电压 U_N 具有电联系的架空线路的总长度 (km)

L_{cab} ——与电压 U_N 具有电联系的电缆线路的总长度 (km)

由图 1-6 (b) 可见, 当中性点不接地的电力系统中发生单相接地故障时, 系统的三个线电压相量 $\dot{U}_{AB}$ 、 $\dot{U}_{AC}$ 、 $\dot{U}_{BC}$ 无论是相位或量值都没有发生变化, 因而系统中的所有电气设备仍然能照常运行, 这是这种电力系统的主要优点。但是, 一旦另外一相也发生接地故障, 则会产生很大的两相接地短路电流, 甚至引发更严重的三相短路。因此, 我国规程规定: 中性点不接地的电力系统发生单相接地故障时, 允许暂时继续运行 2h。但与此同时, 必须通过系统中装设的单相接地保护装置或绝缘监察装置发出报警信号或指示, 提醒值班人员注意, 通知维修人员立即查找并消除故障, 超过 2h 未能消除故障时, 应切除故障线路以免故障蔓延。

根据以上分析, 目前在我国, 中性点不接地系统的适用范围是:

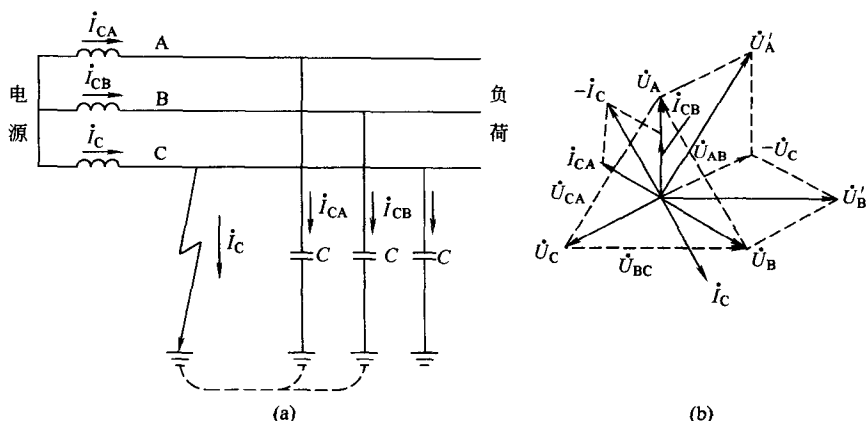


图 1-6 单相接地故障时电源中性点不接地的电力系统
(a) 电路图 (b) 相量图

- ① 电压小于 500V 的装置 (380/220V 的照明装置除外);
- ② 3~10kV 电力网, 当单相接地电流小于 30A 时, 如要求发电机带单相故障运行, 则与发电机有电气连接的 3~10kV 电网的接地电流应小于 5A;
- ③ 35~60kV 电网, 当单相接地电流小于 10A 时, 由于单相接地电流不大, 一般接地电弧均能自行熄灭, 所以这种电力网采用中性点不接地的方式是最合适的。

在中性点不接地的电力系统中, 如果电网某个单相发生了间歇性电弧接地故障时, 其非故障相的对地电压大大超过 $\sqrt{3}$ 倍, 系统中积聚的能量无法泄漏掉, 从而导致对地电位升高, 使整个系统过电压。而且有可能波及到整个电网, 使那些绝缘薄弱环节 (如电动机、电缆和电缆头等) 相继发生绝缘击穿, 造成相间短路, 使事故扩大。为了防止单相接地时接地点出现断续电弧, 电源中性点常采用经电阻或者消弧线圈接地的运行方式。

1.2.3 中性点经电阻接地的电力系统

电力系统中性点通过电阻接地, 其中性点电阻可以选用高电阻、中电阻、低电阻三种接地方式。

高电阻接地方式主要用于 200MW 以上大型发电机回路和某些 6~10kV 配电网; 另外, 煤矿选煤厂对一些 660V 供电系统也采用了高电阻接地方式, 根据电网对地电容值, 其中性点电阻在 76~1520Ω 之间选择。由于高电阻接地方式下的单相接地故障电流较小, 接地故障时一般动作于信号, 以保证接地后能维持 2h 的运行条件。

中电阻接地方式在大型火力发电厂的 6kV 厂用电系统中已经得到使用, 一些城市配电网也已采用此种接地方式。采用中电阻接地方式后, 电网的绝缘水平允许降低, 过电压保护设备的选用 (例如无间隙氧化锌避雷器) 条件放宽。由于单相接地故障电流较大, 仍然可以考虑故障时作用于跳闸。

低电阻接地方式采用小于 10Ω 电阻接地方式, 其特点是可以获得一个大的阻性电流叠加在故障点上, 可保证快速切除故障。其优点还表现在: 过电压水平低, 谐振过电压发展不起来, 可采用绝缘水平较低的电缆和设备; 减少绝缘老化效应, 延长设备使用寿命, 提高网络及设备可靠性; 能把双重接地 (异相故障) 的概率降低至最低限度; 为采用简单的、有选

择性和有足够灵敏度的继电保护提供了可能性。

低电阻接地方式的接地故障电流达 600~1000A, 甚至更大, 有一个原因是为了避开高压电动机的启动和线路冲击合闸。还应注意过高的接地故障电流引起的对地电位升高 (可达数千伏, 大大超过了安全允许值) 引起的安全问题。

中性点经电阻接地系统的特点是实现简单, 中性点电阻一旦接入就不用经常改变。同时电阻接地设备结构简单, 容易维修, 所需设备和投资不高, 日后改造也简便易行。电网中性点通过电阻接地后, 对电弧接地过电压有较大的抑制作用, 从而有效地防止了异常过电压对电动机、电缆绝缘的危害, 保证了用电设备的安全运行。

1.2.4 中性点经消弧线圈接地的电力系统

中性点经电阻接地电力系统可以抑制电弧接地时的过电压, 但是当电网电容电流太大时, 一旦出现接地故障, 在本来就较大的电容电流中又增加了一部分有功分量, 使得接地故障电流上升, 故障点的热效应加剧, 会使电气设备的铁心和绝缘过热, 电缆在接地故障处的相间绝缘会因过热烧毁而发展为多相短路。

而当采用中性点经消弧线圈接地方式后, 由于人为增加的电感电流补偿了电容电流, 电网的单相接地电流仅为补偿后很小的残余电流, 并对电弧的重燃有明显的抑制作用, 可大大

减少高幅值电弧接地过电压发生的可能性。

图 1-7 是中性点经消弧线圈接地的电力系统单相接地时的电路图和相量图。

在正常工作状态下, 三相电力系统是对称的, 其中性点对地电位为零, 这时在消弧线圈上没有作用电压, 也没有电感电流通过。消弧线圈是一个具有铁心的可调电感线圈, 它装设于变压器或发电机的中性点。当发生单相 (如 C 相) 接地故障时, 中性点电压 $\dot{U}_N$ 将变为 $-\dot{U}_C$ 加在消弧线圈上, 此时有感生电流 $\dot{I}_L$ 流过消弧线圈, 且滞后 $\dot{U}_N$ 90°, 其数值为

$$\dot{I}_L = \frac{\dot{U}_C}{X_L} = \frac{\dot{U}_C}{\omega L} \quad (1-6)$$

式中 L ——消弧线圈的电感

X_L ——消弧线圈的电抗

如图 1-7 (b) 所示, 当 C 相接地时, 非故障相 A 相和 B 相的电压将升高 $\sqrt{3}$ 倍, 变为 $\dot{I}'_{CA}$ 和 $\dot{I}'_{CB}$, 并分别超前于 $\dot{U}'_A$ 和 $\dot{U}'_B$ 90°。从图可见, $\dot{I}'_{CA}$ 和 $\dot{I}'_{CB}$ 所组成的总电容电流 $\dot{I}_C$ 将超前于 $\dot{U}'_B$ 90°。由此可见, 电感电流 $\dot{I}_L$ 与电容电流 $\dot{I}_C$ 在相位上正好相反, 而且 $\dot{I}_C$ 也必然流经接地点, 从而实现了单相接地时所产生的电容电流的补偿。使接地处的电流变得很小或等于零, 从而消除了

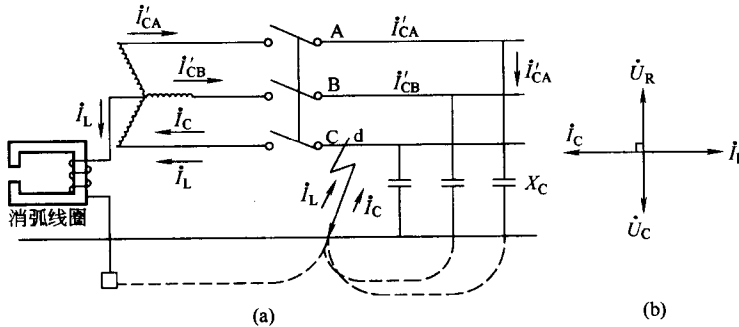


图 1-7 中性点经消弧线圈接地的电力系统
(a) 电路图 (b) 相量图

接地处的电弧及由它所产生的一切危害，故障即消灭。消弧线圈也正是因此而得名的。

中性点经消弧线圈接地系统发生单相接地时，允许连续运行 2h，在这段时间内，运行人员应尽快采取措施，查出接地点并消除。

需要注意的是，如果系统中性点的位移电压过高，则发生单相接地时应用消弧线圈也难以熄弧。因此，要求中性点经消弧线圈接地的系统，在正常运行时，其中性点的位移电压不得超过额定电压的 15%。这样，在单相接地时，中性点位移电位不超过额定相电压，以利于电弧熄灭。

由于消弧线圈能有效地减少单相接地电流，迅速熄灭故障电弧，防止间歇性电弧接地时所产生的过电压，故广泛应用于 3~60kV 电压等级的电网中。

1.2.5 中性点直接接地的电力系统

在我国，对于 110kV 及以上电压等级的电网，除个别雷害特别严重地区的电网是采用中性点经消弧线圈接地外，绝大多数是采用中性点直接接地方式，以便降低绝缘水平，减低设备和线路的造价。

图 1-8 表示了中性点直接接地的电力系统发生单相接地故障时的电路图。

当中性点直接接地的电力系统发生单相接地故障时，由图 1-8 可以看出，其他非故障的两相对地电压仍维持不变，即仍为原来的相电压，因此，凡中性点直接接地的电力系统中的供用电设备的每相绝缘只需按相电压考虑，而无需按线电压考虑。这对于 110kV 及以上的超高压系统，技术经济价值尤为明显。因为高压电器特别是超高压电器，其绝缘问题是影响电器设计和制造的关键所在。电器绝缘要求如果降低了，就相当于降低了高压电气设备的成本，并且同时改善了高压电器的性能。因此，我国 110kV 及以上的超高压系统的电源中性点通常都采用中性点直接接地的运行方式。

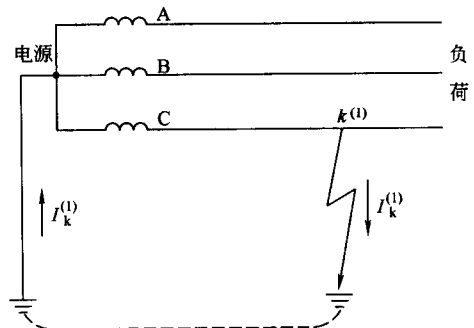


图 1-8 中性点直接接地的电力系统发生单相接地时的电路

在低压配电系统中，我国目前广泛应用的 TN 系统及国外应用较广泛的 TT 系统，都属于中性点直接接地的系统，而且引有中性线或保护中性线。这种系统的安全保护性能良好，与前面中性点不接地的电力系统不同，一旦发生单相接地故障时，便形成单相短路（用符号 $k^{(1)}$ 表示），单相短路电流 $I_k^{(1)}$ 要比线路的正常负荷电流大得多，将使线路上的断路器自动跳闸或使熔断器熔体熔断，从而把发生单相接地故障的部分切除，防止单相接地时产生间歇电弧过电压的可能，减少电气设备毁坏事故及人身伤亡，而电力系统中其他未发生故障的部分正常运行。

但是，中性点直接接地系统在单相接地时，将产生很大的单相接地电流，个别情况下甚至比三相短路电流还大。因此它与小接地电流系统相比，存在下列缺点：

① 大的接地电流将引起电压的急剧下降，从而影响系统的稳定性。

② 大的接地电流将在导线周围产生较强的单相磁场，使相邻的通信线路和信号装置受到电磁干扰。所以，为了有效限制单相短路电流，如图 1-4 所示，采用中性点经阻抗接地，或只将系统中一部分变压器的中性点直接接地（即适当选择中性点直接接地