

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



SHUBIANDIAN XITONG
JIQI BAOHU KONGZHI

输变电系统 及其保护控制

朱永利 主 编
张 举 副主编



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

西安理工大学图书馆



C879119-9

SHUBIANDIAN XITONG
JIQI BAOHU KONGZHI

输变电系统 及其保护控制

主 编 朱永利
副主编 张 举
编 写 杨淑英 李俊卿
主 审 董新洲



中国电力出版社

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



中国电力出版社 中国电力出版社 中国电力出版社

CHINA ELECTRIC POWER PRESS CHINA ELECTRIC POWER PRESS CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。

本书共分为九章,在宏观介绍电力系统组成、特点的同时,重点介绍了电力系统的主要电气设备、厂站主接线、电力系统监测电路、电力系统参数和等值电路、电力系统短路计算和潮流计算、电力系统的电压和频率调整以及电力系统继电保护等。本书适合具有电路理论基本知识的本科生选用。学生学习本教材后,将拥有从事电力系统运行、电气一次和二次设备的研发以及电力系统管理所必备的专业知识。

本书可作为高等院校除电力系统及其自动化专业方向之外的各类工科专业的学生学习电力系统专业知识的简明教材,也可供从事电力工业工作的各类科技人员及管理人员学习使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

输变电系统及其保护控制/朱永利主编. —北京:中国电力出版社, 2009

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5083-9184-7

I. 输… II. 朱… III. ①输电-电力系统-高等学校-教材
②变电所-电力系统-高等学校-教材 IV. TM7 TM63

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 125143 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>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 8 月第一版 2009 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.25 印张 397 千字

定价 26.00 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

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。本书为新编教材。

电力系统是当今最庞大、最复杂的人造系统。我国电力系统仍处于高速发展时期,人才需求量较大。除了电力系统及其自动化专业之外,电力工业还需要大量的自动化、计算机、通信、电机、热能动力和机械工程等专业人才。他们要从事电力系统及其自动化设备的研究、制造乃至管理,需具有电力系统的基础知识。本书就是为非电力系统专业的本科生编写的,书中尽量回避复杂的电力系统计算模型,尽可能用简明语言说明复杂对象内涵。

为了使对于电力系统有较系统的理解,本书简明而不失系统地介绍了输变电系统的组成及其保护控制装置,力求使一次系统与二次系统的介绍达到浑然一体的效果。另外,为了便于未学过《电机学》课程的学生使用本书,书中第二章介绍了作为电力系统重要设备组成的变压器、发电机和电动机。

本书是由华北电力大学长期从事电力系统分析、保护、控制以及电机教学和研究的教师编写的。朱永利教授编写了第一、三、四章,张举教授编写了第六、九章,杨淑英副教授编写了第五、七、八章,李俊卿副教授编写了第二章。

本书由朱永利教授任主编、张举教授任副主编;由清华大学董新洲教授任主审,并提出了许多宝贵意见。另外,在本书编写过程中,还得到了华北电力大学电力系多位教师的指导和帮助。在此一并深表谢意。

编 者

2009年3月

目 录

前言	1
第一章 电力系统概论	1
第一节 概述	1
第二节 输电线路的结构	6
第三节 电网中性点的接地方式	9
第四节 电力系统调度	13
习题	15
第二章 变压器、异步电机和同步电机	16
第一节 概述	16
第二节 磁路	16
第三节 变压器	21
第四节 交流绕组及其电动势和磁动势	30
第五节 异步电机	40
第六节 同步电机	52
习题	64
第三章 变电系统主接线及其电气设备	68
第一节 断路器的基本知识	68
第二节 变电站电气主接线的设计原则和基本要求	75
第三节 变电站电气主接线的基本形式	76
第四节 电流互感器	81
第五节 电压互感器	86
第六节 互感器在主接线中的配置原则	90
习题	92
第四章 发电厂和变电站的监测与控制	93
第一节 发电厂和变电站的控制方式	93
第二节 二次回路接线图	94
第三节 断路器的传统控制方式	101
第四节 传统的中央信号系统	106
第五节 变电站自动化系统	110
第六节 变电站自动化数据通信技术	115
习题	119
第五章 电力系统各元件的参数及等值序网	120
第一节 电力系统各元件的参数和等值电路	120
第二节 电力系统的等值序网	138

第三节	对称分量法及其应用	143
第四节	电力系统各元件的负序和零序电抗	147
习题		150
第六章	电力系统短路	152
第一节	概述	152
第二节	电力系统的对称短路	152
第三节	电力系统的不对称短路	155
第四节	电力系统的纵向不对称故障	159
第五节	计算机计算电力系统故障的方法	161
习题		164
第七章	电力系统的潮流和电压调整	165
第一节	输电线路运行状况的分析与计算	165
第二节	变压器运行状况的分析与计算	168
第三节	辐射形电网的潮流分布	169
第四节	电力系统无功功率的平衡和电压调整	173
习题		188
第八章	电力系统的频率调整	191
第一节	概述	191
第二节	电力系统中有功功率负荷的优化分配	194
第三节	电力系统频率的一次调整和二次调整	198
第四节	自动低频减负荷	205
习题		210
第九章	输变电系统中常用的继电保护原理	212
第一节	电力系统继电保护的作用及对继电保护的基本要求	212
第二节	电网相间短路电流保护和方向性电流保护	214
第三节	中性点直接接地电网中接地短路的零序电流及方向保护	221
第四节	输电线路的距离保护	226
第五节	输电线路的纵联保护	233
第六节	变压器保护	237
第七节	微机保护简介	240
习题		251
参考文献		253

第一章 电力系统概论

第一节 概述

一、电力系统的构成

电力系统主要有四个组成部分：发电厂、输电线路、变电站及负荷。图 1-1 所示为一个简单电力系统构成示意图。

发电厂的任务是把其他形式的能源转变成为电能。用于发电的能源主要有河流中水的势能和动能、化石燃料（煤、天然气、油等）能源和原子能。目前风力发电发展很快，欧洲到 2020 年的发展目标是风力发电要占到总发电量的 21%。其他可用于发电的还有太阳能、地热、潮汐能等，但还处于小容量发电阶段。2004 年，我国发电装机总容量为 4.4 亿 kW，其中水电为 1.08 亿 kW（24.5%）、火电为 3.25 亿 kW（74%）、核电为 0.07 亿 kW（700 万 kW、1.5%）；2007 年，发电装机总容量为 7.13 亿 kW，其中水电为 1.45 亿 kW、火电为 5.54 亿 kW、核电为 0.0885 亿 kW、风电 0.0403 亿 kW。由于

我国火力发电比重过大，带出了大气污染和资源紧缺问题，因而在今后较长一段时期内应积极发展水电、风电，到 2020 年水电要达到 3 亿 kW、风电要达到 0.3 亿 kW；优化发展火电，在煤炭资源丰富的西北等地区建设高效率、高参数的大型坑口火电厂，在东部沿海交通便利的铁道、港口附近建设一批火电厂；适当发展核电，原子能发电厂主要建设在一次能源匮乏而经济发达的东部沿海地区。

长江三峡水电厂是当今世界最大的水电厂，大坝坝高 185m，水库正常蓄水位 175m（相对于海平面），可安装单机容量 70 万 kW 的水轮发电机组 26 台，总装机容量 1820 万 kW，年发电量 847 亿 kWh。发电通常仅是水电厂的效益之一，除此之外它还有防洪、航运、工农业和居民用水、养殖等多方面的水利效益。

由于大型水力发电厂和大型坑口火电厂大都在边远地区，离开系统的负荷中心往往有几百乃至上千公里，所以就需建设高压或超高压输电线路，将强大的电能从发电厂输送到负荷中心。

变电站是联系发电厂和电力负荷的中间环节，起着交换或接受、分配电能，以及改变电能的电压等级的作用。改变交流电能的电压是借助变压器来实现的。由于受绝缘材料的限制，制造很高电压等级的发电机是不现实的，而交流远距离大容量输电又需要高电压，所以就要用到升压变压器。电力负荷一般电压等级都比较低，工业电动机的电压一般为 380V~

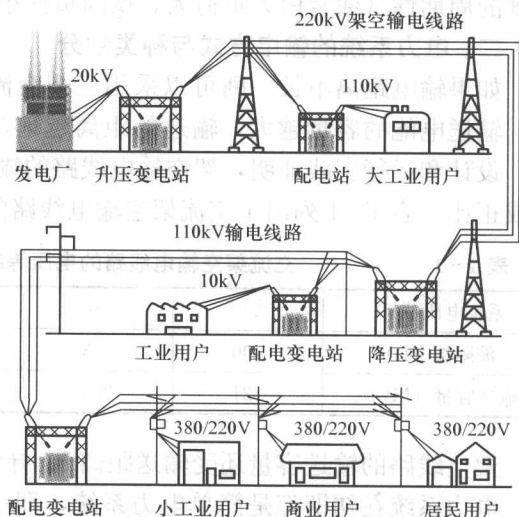


图 1-1 简单电力系统构成示意图

10kV，而家用电器一般为 380V（相电压 220V），因此电能送到用户端又要降压，就要用到降压变压器。主要从电网中接受电能并将其分配给用户的变电站为配电变电站，它的电压等级一般较低，其高压侧不超过 110kV，低压侧一般为 10kV 或 6kV。升压变压器和降压变压器在原理上是相同的，但在变压器结构（绕组的排列方式）上有所差别。

电力系统负荷主要有电动机（包括异步电动机和同步电动机）、电炉、照明和电热器等电气设备。它们所消耗的功率随着系统电压和频率的变化而改变，这种性质叫做负荷的电压和频率特性。系统负荷涉及到广大地区的各种用户，而每个用户的用电情况是很不相同的。多数电力负荷是随时间在不断变化，而且这种变化带有一定的随机性质，当然也表现为某种程度的周期性（通常白天负荷大、夜间负荷小），很难确切地预计负荷变化的情况。

二、电力系统的输电方式与种类划分

如果输电距离不长，则可以采用三相交流高压输电；否则采用高压直流输电。一般地说，输送电能的容量越大，输送的距离越远，在经济上和技术上要求输电线路的电压就越高。设计和运行实践证明，架空输电线路的输送容量（MVA）大致和线路电压（kV）的平方成正比。表 1-1 列出了交流架空输电线路的电压等级同波阻抗和输送容量的关系。

表 1-1 交流架空输电线路的电压等级同波阻抗和输送容量的关系

系统电压(kV)	220	330	500	750	1000	2000
波阻抗(Ω)	400	303	278	256	250	250
输送容量(MW)	121	360	900	2200	4000	16 000

架空线路的输送容量还受输送距离 l 、导线热稳定和机电暂态稳定极限的限制。

电力系统在初期都是简单电力系统，即一个电厂向附近的用户供电，管理起来相对简单，但系统对用户的供电可靠性差，一台机组故障或检修就会造成较多的用户停电或限电。我国电力系统经历了由单个电厂供电、到多电厂互联成地区级或省级范围的电力系统，再到区域电力系统互联的阶段。目前除西藏、新疆和海南外，全国互联电网已基本形成。连接于两个电力系统或两个电源之间的输电线路叫联络线。两个或两个以上的电力系统用联络线连接后叫互联电力系统。电力系统互联可以增加系统在事故或检修情况下运行的供电可靠性，并可减少各子系统中发电机的备用容量。为提高区域之间的功率交换能力，我国正在建设交流 1000kV 和±800kV 的直流输电线路用于全国大部分区域的联网（西北地区有所不同）。

由于交流电力系统中三相的组成一般是相同的（负荷略有差异），所以电力系统接线图通常只画成单线图。图 1-2 所示的电力系统一次接线图，它比较完整地描绘了一个电力系统的概貌。

图 1-2 中的水力发电厂容量较大、

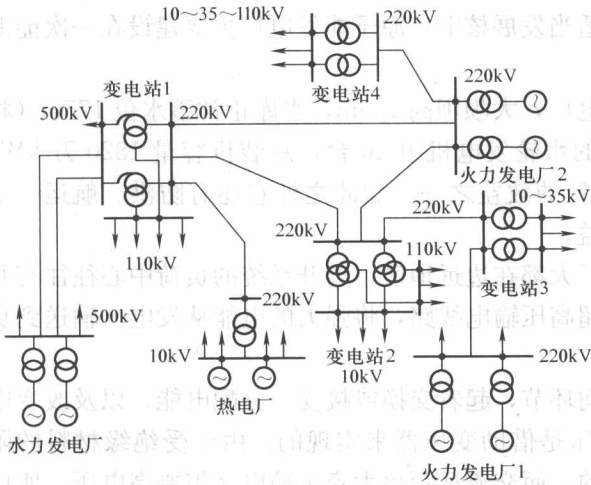


图 1-2 电力系统一次接线图

输电距离较远,所以把电压升高到 500kV 后经线路送至主电网,整个系统通过 500kV 线路与其他电力系统互联。图中火力发电厂 1 的电能升至 220kV 后由线路送到变电站 3,并通过线路与其他 220kV 输电网相联系。热电厂除了发电外,还兼向附近的工厂或居民区供热,它用 10kV 电压供给附近地区用电,并通过升压变压器与 220kV 主电网相联系。火力发电厂 2 为建设在煤产区的坑口火电厂,它所发出的电能主要通过 220kV 线路远距离送往负荷中心。图 1-2 中由变电站 1、变电站 2 和火力发电厂 2 以及高压线路构成一个 220kV 环形电网,变电站 1 中的 2 台变压器并接在 3 个电压等级的母线上。母线用于多个设备的同相互联,起到汇聚电流和交换、分配电能的作用。

电网是电力系统中扣除电力发送端的发电机和接受端的负荷设备后的部分,它用于连接发电机和负荷设备。一个完整的电网通常由连接电源之间的变压器、输电线路、母线和开关设备组成,且按照电压等级被分为输电网和配电网两个或多个层面。由于线路的传输功率为电压和电流的乘积,为了减少线路损耗,且为了提高电力系统的稳定性,发电机发出来的电能需要借助高电压等级的输电网才能把电能高效地输送到电力负荷中心。又由于电力负荷的额定电压一般为 380V~10kV 用户端,所以输电网的电能需要经降压变压器才能传输到配电网,实现对于广大电力用户的电能分配。输电网用于大容量发电厂、变电站的连接和大范围的电力传输,若输电网由 2~3 个电压等级的发电厂和变电站组成,还可把输电网进一步划分,称为一次输电网和次级输电网。前者,连接大容量发电厂和变电站,并形成省级电网和跨区域电网(500kV 和 220kV);后者,连接地方中小型电厂并主要形成地市级输电网(110kV)。

配电网用于从主电网中接受电能并分配给电力用户,为了简化系统的保护配置和方便运行管理,尽量不将电厂接入配电网,只有当小型电厂远离二次输电系统时可被直接接入配电网。太阳能发电和小型水力发电机常被直接接入配电网。配电网一般包括 2~3 个电压等级的电网,可以按照电压等级被分为高压和低压配电网两级,或者高压、中压和低压配电网三级。我国目前的高压配电网是指 35kV 电网,中压配电网为 6kV 或 10kV 电网,低压配电网的电压是 380/220V 的三相四线制。为了力求电网图清晰,开关设备可以不画在电网接线图中,而画在变电站主接线图中,每个变电站都是一个由大量开关、变压器、辅助保护与控制设备组成的复杂变电系统。

为了提高电力系统的供电可靠性,无论是输电网还是配电网,它们大都含有多环。输电网尽量按环网运行,可以提高系统的运行稳定性;而配电网平时按解环运行,环的一侧送电,另外一侧停电备用,这样能使系统的潮流控制和继电保护配置都比较简单。电力可靠性的技术指标很多,如可用度是其中之一,它是指在特定时间(如一年)内系统或设备保持正常工作的概率,它的大小取决于在规定时间内系统或设备的故障时间、检修时间和运行时间。关于可靠性有专门的书籍介绍。

互联电力系统在系统结构上与普通电力系统没有太多的区别,如果有的话则是在原有系统之间增加了系统中最高电压等级的联络线或直联联络线;在管理上主要体现在各电力系统仍有各自负责调频和联络线功率控制的调度中心,联络线功率可以由自动发电控制系统(AGC)来完成(它允许调度员设置交换功率的大小)。互联电网一般处于系统的最高电压等级。电力系统互联在技术经济上带来很大好处:

(1) 充分利用水能资源,为在我国水利资源丰富的西南和西北地区建设一大批大容量的

水力发电厂创造了条件。如果不形成互联电力系统,这些地区无法消化这么多的电力,而且由于水能资源有季节性,所以这些地区还必须建设大量的火电厂。形成了互联电力系统后,这些地区在丰水季节向外送电,枯水季节接受外系统的其他形式能源电厂发出的电力,从而既减少了环境污染又提高了经济效益。

(2) 可以减少各子系统的备用容量,从而减少投资和相应的维护费用。

(3) 在煤炭资源丰富的山西、内蒙和陕西地区建设大容量坑口火电厂,变输煤为输电,减轻了运输压力。

图 1-2 所示系统包含了电力系统的躯干,叫做一次系统。然而,电力系统在运行中不可避免地要发生事故,引起过电压或过电流现象,以致损坏电力设备、中断对用户供电。因此,这就需要有保护措施,以防止事故的扩大。在电力系统中设置继电保护系统用于在系统短路时切除故障点;设置过电压保护系统用于系统的防雷和限制其他过电压;同时,系统运行人员需要对全系统进行测量、监视和调度,因而设置有调度控制系统。这些都是电力系统不可缺少的组成部分,通常叫做二次系统。

三、电力系统的特点和电能质量

电力系统与其他工业部门有着许多不同的特点,其中主要有以下几点。

1. 电能不能大量储藏

由于电能的生产与消费同时完成,所以除部分特殊需求的场合要通过特殊的装置实现少量电能的存储外,电网中负荷需要多少电能,电厂才能发多少电能,这是由发电机的调频/调速装置来完成的。目前储藏电能方式和手段有超导、燃料电池、机械飞轮、电容、电感和蓄电池等,它们只能用于储能容量要求比较小的地方,能够较大容量储能的手段是抽水蓄能电厂。这种电厂的机组在电力系统低谷负荷期间可按电动机—水泵方式工作,将下游水库的水抽至上游水库,提高水的势能;在电力系统高峰负荷期间可按水轮机—发电机方式运行,将高处的水冲入水轮机发电。

2. 产品质量有独特的表现形式

过去衡量电能质量的主要技术指标为电压和频率。

随着微电子半导体制造行业的出现,对于电力企业的供电质量提出了更高的要求(半导体制造不允许电源几十毫秒的中断甚至电压骤降)。目前,国际电工委员会(IEC)对于电能质量做了较严格的规定,标准分 5 大类 13 个指标。我国迄今为止已颁布了 6 项电能质量指标的国标:

(1) 电压允许偏差。其计算式为

$$\text{电压偏差}(\%) = (\text{实际电压} - \text{额定电压}) / \text{额定电压} \times 100\%$$

用户受电端供电电压的允许偏差为:

- 1) 35kV 及以上的电力用户的供电电压的正负偏差绝对值之和不超过 10%。
- 2) 10kV 及以下用户的供电电压的允许偏差为 +7% ~ -7%。
- 3) 220V 低压单相用户的电压允许偏差为 +7% ~ -10%。

(2) 公用电网谐波。谐波(Harmonic)是由电网中非线性负荷而产生的。GB/T 14549—1993《电能质量公用电网谐波》中规定了各电压等级配电电压的总谐波畸变率,各奇次谐波电压含有率和各偶次谐波电压含有率的限制值。该标准还规定了电网公共连接点的各次谐波电流(2~25 次)注入的允许值。

(3) 电压波动和闪变。电压波动 (Fluctuation) 定义为电压方均根值 (有效值) 一系列相对快速的变动或连续的改变, 是由波动性、冲击性负荷 (如电弧炉、轧机、电弧焊机) 引起的, 且明显偏离了额定电压。电压波动计算式为

$$d = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_N} \times 100\%$$

电压波动的另一个指标是电压变动频度。它是指单位时间内电压方均根值变化的次数 r 。

例如国标 GB 12326—2000《电能质量电压波动和闪变》规定, $r \leq 10$ 次/h 条件下, 低压 ($U_N \leq 1\text{kV}$) 和中压 ($1\text{kV} < U_N \leq 35\text{kV}$) 的波动限值为 3%, 高压 ($U_N > 35\text{kV}$) 的波动限值为 2.5%。

电光源的电压波动造成灯光照度不稳定, 从而引起人眼视觉反应被称为闪变 (Flick)。人眼对于闪变的敏感频率范围是 6~12Hz, 其中 8.8Hz 为最敏感频率, 在这一闪变频率下允许的电压波动值 d 最小 (0.25%)。

(4) 三相电压不平衡。电力系统中三相负荷的大小和功率因数往往是不等的, 将使得负荷附近的母线节点的三相电压不平衡。三相电压不平衡时肯定会出现负序分量 (参阅本书第五章), 且三相负荷不平衡越严重, 所接母线的负序电压越大。因此, 用负序分量与正序分量的比值表示不平衡度。GB/T 15543—1995《电能质量三相电压允许不平衡度》规定: 电力系统公共连接点正常运行方式下的电压不平衡度允许值为 2%, 短时不得超过 4%; 接于公共连接点的每个用户引起该点电压不平衡度不得超过 1.3%。

(5) 电网频率。电力系统频率偏差允许值为 $\pm 0.2\text{Hz}$; 当系统容量较小时, 偏差值可放宽到 $\pm 0.5\text{Hz}$ 。实际运行中, 我国互联电力系统的频率正常运行时都保持在 $\pm 0.1\text{Hz}$ 的范围内。

(6) 暂时过电压和瞬态过电压。暂时过电压和瞬时过电压由开关操作或雷击等原因引起, 是直接危及电力设备安全运行的重要原因之一。暂时过电压是指在其持续时间范围内无衰减或衰减慢的过电压, 它包括工频 (电网工作频率) 过电压和谐振过电压; 瞬态过电压通常衰减很快, 持续时间只有几毫秒或几十个微秒。瞬态过电压包括操作过电压和雷电过电压。这两种过电压的标准见国标 GB/T 18481—2001《电能质量暂时过电压和瞬态过电压》。

3. 暂态过程十分短暂

由于电是以光速传播的, 所以运行情况发生变化所引起的电磁方面和机电方面的暂态过程都是十分迅速的, 其中的电磁暂态为微秒级, 机电暂态为毫秒级。电力系统中的正常操作 (如变压器、输电线路投入运行或切除) 也是在极短时间内完成的。因此, 电力系统仅仅依靠人工操作是不可能达到预期效果的, 必须采用先进的信息控制技术和各种自动装置来迅速而准确地完成各项调整和操作任务。

4. 电力系统运行的稳定性

电力系统中发生故障或大负荷投切时, 会使发电机大轴的转矩失去原有的平衡, 发电机转速出现振荡, 反过来又影响发电机的输出电压和功率, 引起机电暂态过程并可能造成系统崩溃。系统崩溃是指系统经过一段过渡过程后, 如机电暂态过程中发电机的超速或低速保护装置动作切机, 系统全体或一定范围的母线完全失去电能。可能引起系统崩溃的还有频率稳定、电压稳定等。国内外的大停电事故一般都伴有稳定破坏的现象发生。

电力系统的这些特点决定了人们对于它有下列基本要求：

(1) 安全、稳定、可靠。系统的安全性与可靠性的概念不同，前者是指系统的当前运行状态是否正常，以及发生任一单一故障的条件下系统的运行参数能否仍在正常范围内，后者强调在一个较长时间段内系统正常工作的概率。

(2) 保证电能质量。

(3) 在保证前两项技术指标的基础上力求经济性。

四、变电站中的主要电气设备

除线路设备外，电网中的其他设备几乎都布置在变电站（也称变电所）中。发电厂通常也设有一个升压变电站。某变电站外貌如图 1-3 所示。

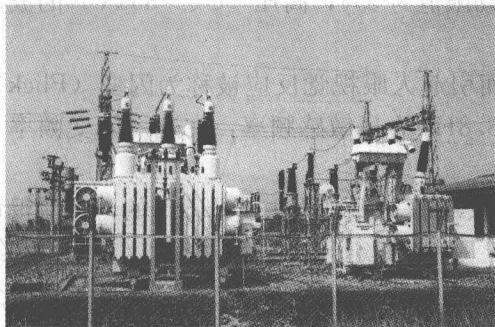


图 1-3 变电站外貌

通常把生产和分配电能的设备，如发电机、变压器和断路器等称为一次设备。它们包括：

(1) 生产和转换电能的设备，如发电机将机械能转变成电能、电动机将电能转变成机械能、变压器使电压升高或降低，以满足输配电需要。这些都是发电厂中最主要的设备。

(2) 接通或断开电路的开关电器，例如断路器、隔离开关、熔断器、接触器之类。它们用于在正常或事故时将电路闭合或断开。

(3) 限制故障电流和防御过电压的电器，例如限制短路电流的电抗器和防御过电压的避雷器等。

(4) 接地装置，无论是电力系统中性点的工作接地还是保护人身安全的保护接地，均用金属接地体埋入地中（或连接成接地网）。

(5) 载流导体，如母线、电缆等，它们按设计的需求，将有关电气设备连接起来。

另外，还有一些设备是对上面的一次设备进行测量、控制、监视和保护用的，故称为二次设备。它们包括：

(1) 仪用互感器，如电压互感器和电流互感器，可将电路中的电压或电流降至较低的值，供给仪表和保护装置使用。

(2) 测量表计，如电压表、电流表、功率因数表等，用于测量电路中的参量值。

(3) 继电保护及自动装置，这些装置能迅速反应不正常情况并进行调节或作用于断路器跳闸，使故障切除。

(4) 直流设备，包括直流发电机组、蓄电池等，供给保护和事故照明的直流用电。

(5) 变电站自动化系统，包括实时数据通信网络和变电站实时监控系统。

第二节 输电线路的结构

输电线路就其结构来说，主要分架空输电线路（或称架空线路）和电缆线路两大类。架空线路就是将导线架设在露天的线路杆塔上，图 1-4 所示采用水泥杆塔的架空输电线路。电缆线路一般是埋在地下的电缆沟或管道中。由于架空线路的建造费用比电缆线路要低得多，而且便于架设、维护和修理，因此在电网中绝大多数的线路都采用架空线路。考虑到美

观或空间受限,大城市的配电系统正越来越多地采用地下电缆线路。

架空输电线路由导线、避雷线(或叫架空地线)、杆塔、绝缘子和金具等主要元件组成。架空线路相邻杆塔之间的水平距离,称为线路的档距。在档距中导线的最低点和悬挂点之间的垂直距离,称为导线的弧垂。两个相邻杆塔之间档距的大小,决定于导线的允许弧垂和对地距离。对于6~10kV配电线路,档距一般在100m以下。对于110~220kV输电线路,采用钢筋混凝土杆塔时档距一般为150~400m,用铁塔时为250~500m。导线弧垂的大小,决定于导线的允许拉力和档距,并随气象(如温度、覆冰等)条件的改变而变化。

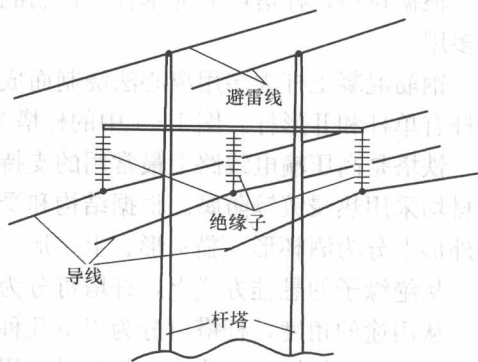


图 1-4 采用水泥杆塔的架空输电线路

以下分别对架空线路的各个元件和电缆线路的结构做简单的介绍。

1. 导线和避雷线

架空线路的导线和避雷线是在露天里工作的,不仅受到风压、覆冰和温度变化的影响,而且还要受到空气中各种化学杂质的侵蚀。因此,导线和避雷线除了要求有良好的导电性能外,还必须具有较高的机械强度和耐化学腐蚀的能力。

目前常用的导线材料是铜、铝、铝合金等。避雷线一般用钢线,在特殊情况下也有用铝包钢线的。

对于导线(或简称线),除低压配电线路使用绝缘线外,一般都是裸线,其构造主要有以下三种形式:

(1) 单股线——由单根实心的金属线构成,且只有铜线和铝线两种,现在已很少采用。

(2) 一种金属的多股绞线——它们是由7、19或37根单股线互相扭绞而制成。

(3) 两种金属的多股绞线——由于铝线的机械强度较低,所以采用铝线时线路的档距不能太大,这样就增加了杆塔的数目,从而抬高了线路的造价。因此,电压在10kV以上的输电线路广泛采用钢芯铝绞线。

钢芯铝绞线按照其铝线和钢线截面比的不同,有不同的机械强度,一般分为三类:

第一类是普通钢芯铝绞线,型号为LGJ,它的铝截面 S_L 和钢截面 S_G 的比值 $S_L/S_G=5.3\sim6.1$ 。

第二类是轻型钢芯铝绞线,型号为LGJQ,它的 $S_L/S_G=7.6\sim8.3$ 。

第三类是加强型钢芯铝绞线,型号为LGJJ,它的 $S_L/S_G=4\sim4.5$ 。

此外,为了减少电晕损耗和线路电抗,对电压在220kV以上的输电线路多采用分裂导线或扩径空心导线。分裂导线就是把线路每一相导线分成2、3根或4根,每根之间保持一定的距离(例如400mm)。图1-5所示为三相3分裂架空导线的垂直截面示意图。

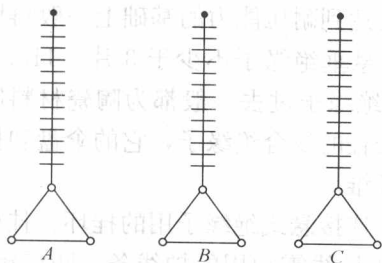


图 1-5 三相3分裂架空导线的垂直截面示意图

2. 杆塔

架空线路的杆塔用于支撑导线。它的类型很多,分

类的方法也不相同。

根据材料,杆塔可分为木杆、钢筋混凝土杆和铁塔三种。为了节约木材,木杆在我国已不多用。

钢筋混凝土杆大多用离心法浇制而成,有等径杆和锥形杆两种。按照结构形式钢筋混凝土杆有单杆和Ⅱ形杆。图 1-4 中的杆塔为Ⅱ形钢筋混凝土杆。

铁塔是高压输电线路上最常用的支持物,国内外大多采用热轧角钢并用螺栓组装而成,钢材均采用热浸镀锌防腐。根据结构和受力特点,铁塔可分为拉线塔和自立塔两大类。铁塔从外形上分为酒杯形、猫头形、上字形、门形和干字形等。

从绝缘子的悬挂方式上,杆塔可分为耐张塔和悬垂子塔。

从用途的角度,杆塔可分为以下几种:

(1) 直线杆塔:又称为中间杆塔,用来悬挂绝缘子和导线,且用于线路走向呈直线处。由于这种杆塔在正常情况下主要承受导线自重、导线覆冰以及风压,只有在—侧断线时才承受较大的不平衡拉力,所以这种杆塔的拉力强度要求较低、价格也低。这种杆塔的数量约占线路全部杆数量的 80% 以上。图 1-6 示出的为自立式酒杯形直线铁塔。

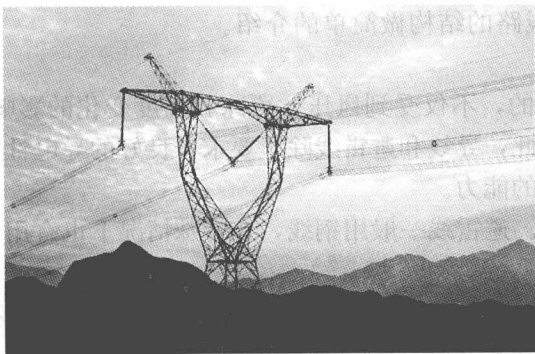


图 1-6 自立式酒杯形直线铁塔

受较大的不平衡拉力,所以这种杆塔的拉力强度要求较低、价格也低。这种杆塔的数量约占线路全部杆数量的 80% 以上。图 1-6 示出的为自立式酒杯形直线铁塔。

(2) 耐张杆塔:又称为承力杆塔,它所连的绝缘子串要被线路拉到接近水平位置。它的作用是在—侧发生断线或倒杆塔的情况下能承受住线路的不平衡拉力,以限制倒杆塔范围。在架空输电线路中每隔几个直线杆塔就须设置一个耐张杆塔。

(3) 转角杆塔:用于线路转角地点,分直线转角杆塔和耐张转角杆塔 2 种。转角较大的场合一般都须用后一种,因为此时两侧拉力的不平衡度较大。

(4) 特种杆塔。它是在特殊情况下使用的一种杆塔,如导线换位用的换位杆塔,跨越河流、山谷等跨距很大的跨越杆塔等。

3. 绝缘子和金具

绝缘子是用来支持或悬挂导线,并使之与杆塔绝缘的一种瓷质或玻璃元件。因而它应具有足够的绝缘强度和机械强度。同时对化学杂质的侵蚀也要有足够的抵抗能力,并能适应周围大气的变化。一片标准的绝缘子耐压能力是一定的,线路的电压等级越高,绝缘子串的片数越多。为了防止运行中的绝缘子损坏,悬垂绝缘子串要在达到耐压能力的基础上—般再增加 1 片,耐张串的工作条件更差,—般要增加 2 片。35kV 悬垂绝缘子不少于 3 片,110kV 悬垂绝缘子不少于 7 片,220kV 悬垂绝缘子不少于 13 片。绝缘子过去—般都为陶瓷材料制成,比较重。在高压输电线路—上目前广泛使用的是质量较轻的复合绝缘子,它的伞盘和护套为高温硫化硅,芯棒为高强度、质量轻的环氧树脂玻璃纤维。

架空线路—上使用的金具很多,如连接导线—用的接线管,连接悬式绝缘子—用的挂环、挂板、和连板,把导线固定在悬式绝缘子链—上的各种线夹,防止导线震动—用的护线条、防震锤,以及为了使高压线路—上绝缘子链—上电压分布均匀—用的均压环等。所有这些金属部件统称为金具。这里不做—的介绍。

4. 电缆

电力电缆的结构主要包括三个部分，即导体、绝缘层和保护包皮。

电缆的导体通常用多股铜绞线或铝绞线，以增加电缆的柔软性，使之在一定程度内弯曲而不变形。根据电缆中导体数目的不同，有单芯电缆、三芯电缆和四芯电缆几种。单芯电缆的导体截面总是圆形的。三芯或四芯电缆的导体截面除了圆形而外，更多采用扇形，其结构如图 1-7 所示，这样可以充分利用电缆的总面积。

电缆的绝缘层用来使导体与导体之间、导体与保护包皮之间绝缘。绝缘层使用的绝缘材料种类很多，如橡胶、沥青、聚乙烯、麻、丝、纸等。电力电缆多采用油浸纸绝缘。

电缆的保护包皮是用来保护绝缘层使其在运输、敷设和运行过程中不受外力的损伤，并防止水分的浸入。它具有一定的机械强度。在油浸纸绝缘电缆中还有防止绝缘油外流的作用。常用的包皮有铅包皮和铝包皮。为了防止外力破坏，电缆外层为钢带铠甲。

电缆的分类，除按芯数和导体形状不同分类外，又可分为统包型和屏蔽型和分相铅包型。图 1-7 即为统包型，三相芯线绝缘层外有一共同的铅包皮。这种电缆内部电场分布不均匀，不能充分利用绝缘强度，只用于 10kV 以下的电缆。10kV 以上的电缆常采用屏蔽型和分相铅包型，屏蔽型的每相芯线绝缘外面都包有金属带，分相铅包型的各相分别有铅包皮，如图 1-8 所示，这样可以得到均匀分布的辐射电场，更好地利用电缆的绝缘。

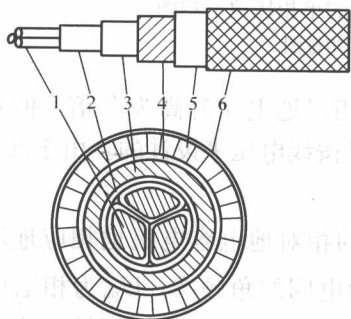


图 1-7 统包型扇形电缆结构图

1—导体；2—绝缘层；3—铅包皮；4—黄麻层；
5—钢带铠甲；6—黄麻保护层

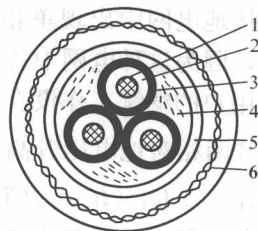


图 1-8 分相铅包型电缆结构图

1—导体；2—纸绝缘；3—铅包皮；
4—填充物；5—黄麻层；6—钢丝甲

以上介绍的电力电缆都是电压在 35kV 以下的。对于电压在 110kV 以上的则采用充油式或充气式电力电缆。

第三节 电网中性点的接地方式

电网中性点接地方式有：不接地，经电阻接地，经电抗接地，经消弧线圈接地，直接接地（有效接地）等。我国电网目前所采用的中性点接地方式主要有三种，即不接地、经消弧线圈接地和直接接地。

电网的中性点工作方式是一个涉及到供电可靠性、过电压与绝缘配合、继电保护的正确动作、通信干扰、系统稳定等许多方面的一项综合性的技术问题，所以难于在一门课程中作详尽的阐述，本节仅就中性点接地方式问题作一个综合的介绍。

一、中性点不接地的电网

电网中发生频率最高的故障就是单相接地。

图 1-9 表示了当 C 相在 k 点发生金属性接地时的情况。相量关系如图 1-9 (b) 所示：接地前因为三相对称，电位零点为中性点 O；接地后电位零点变为电源 C 相的出口 k，即线路 C 相 C' 电位变为 0，中性点对地电压 $\dot{U}_0$ 变为了一 $\dot{U}_C$ ，这样 A、B 相对地 (C') 电位为自身电源的相电压与中性点对地电压 $\dot{U}_0$ 的合成，合成后变为 A'、B'。从此相量图中可以看出，非故障相 A 和 B 的对地电压却升高为原来的 $\sqrt{3}$ 倍。

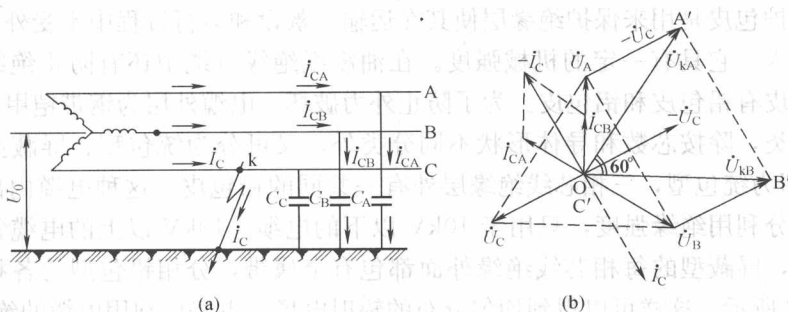


图 1-9 中性点不接地电网的单相接地示意图

(a) 接线图；(b) 相量图

中性点不接地电网中出现单相接地时，尽管相对地电压升高为 $\sqrt{3}$ 倍，但对各种电气设备无多大危险，因为这种电网中各种设备的绝缘是按线电压来设计的。由于线电压仍保持不变，故对电力用户的继续工作没有什么影响。

由于 A、B 两相对地电压升高为 $\sqrt{3}$ 倍，它们的相对地电容电流也相应地增大原来的 $\sqrt{3}$ 倍，即 $I_{CA} = I_{CB} = \sqrt{3} I_{C0}$ ($I_{C0} = \omega C U_{ph}$)，其中 ω 为电网的角频率， U_{ph} 为相电压， I_{C0} 为电网无接地故障时每相的对地电容电流。由于 C 相接地，其对地电容被短接，所以 C 相的对地电容电流变为 0。但是经过 C 相接地点流进地中的电容电流（即接地电流）不为 0，而是 $I_C = -(I_{CA} + I_{CB})$ 。由相量图可以得出，其大小为 I_{CA} 的 $\sqrt{3}$ 倍，因此有

$$I_C = 3 I_{C0} = 3 \omega C U_{ph}$$

其中电容 C 的大小则与电网的结构（电缆线路或架空线路）、布置方式、长度等有关。通常，这种接地电流可从几安培（长度较短的架空网络）到几十或几百安培（很长的电缆网络）的范围内变化。

以上的分析是按金属性接地（即接地处电阻为零）来进行的。但是，如果发生的是不完全接地（即经过一定的过渡电阻接地），则故障相的对地电压将大于零而小于相电压，而健全相的对地电压则大于相电压而小于线电压，这时接地电流将较金属性接地时要小。

值得注意的是，单相接地时所产生的接地电流将在故障处形成电弧。这种电弧可能是稳定的或间歇性的。当接地电流不大时，则电流过零值时电弧将自行熄灭，于是接地故障随之消失。如果接地电流较大（30A 以上时），则将产生稳定的电弧，形成持续性的电弧接地，这时电弧的大小与接地电流成正比。强烈的电弧将会损坏设备并导致两相甚至三相短路。当电弧持续燃烧时，故障相的对地电压可看作零。

实践证明,当接地电流大于 $5\sim 10\text{A}$ 而小于 30A 时,有可能产生一种不稳定的间歇性电弧。这是由于网络中的电感和电容所形成的振荡回路所致。随着间歇性电弧的产生将出现一种电弧过电压,其幅值可达 $2.5\sim 3U_{ph}$,足以危及整个电网的绝缘。这种电弧过电压属于《高电压技术》课程的内容。

综上所述可知:在中性点不接地电网中,当发生单相接地故障时,线电压仍保持对称不变,单相接地电流与负荷电流相比并不大,因而对用户供电并无影响,这是这种电网的主要优点。但是,必须在较短时间 ($2\sim 3\text{h}$) 内迅速发现并消除故障,以免发展成为多相短路接地。当线路不长时,接地电流的数值较小,不至于形成稳定的接地电弧,一般均能迅速自动熄灭而无需跳闸。但是,当线路较长、电容电流相对较大时,则可能由于持续电弧而烧毁设备或由于间歇性电弧而导致过电压,此时这种接地方式的优越性就丧失了。

电网中的故障以单相接地为最多。由于 35kV 及以下电压的电网单相接地电流不大,接地电弧均能自动熄灭,所以这种电网采用中性点不接地的方式是最合适的。然而,中性点不接地电网的缺点是由于单相接地电流较小,查找故障点很困难,甚至在发现母线的某相电压接近于 0 时确定哪条线路有接地都是困难的(故障选线自动装置的正确率还不高)。

目前我国,中性点不接地的适用范围为:

(1) $3\sim 10\text{kV}$ 电网,当单相接地电流小于 30A 时;如要求发电机能带单相接地故障运行,则当与发电机有电气连接的 $3\sim 10\text{kV}$ 电网的接地电流小于 5A 时。

(2) $35\sim 60\text{kV}$ 电网中,单相接地电流小于 10A 时。

如不满足上述条件,通常将中性点直接接地或经消弧线圈接地。

二、中性点经消弧线圈接地的电网

如前所述,中性点不接地电网具有当发生单相接地故障时仍可继续供电的优点,但在单相接地电流较大时却不能适用。为了克服这个缺点,出现了经消弧线圈接地的电网。消弧线圈是一个具有铁芯的可调电感线圈,它装设于变压器或发电机的中性点。当发生单相接地故障(见图 1-10)时,可形成一个与接地电流的大小接近相等但方向相反的电感电流,这个电流与电容电流可相互补偿,最终将使接地处的电流变得很小或等于零,从而消除了接地处的电弧以及由它所产生的一切危害。消弧线圈也正是因此而得名的。此外,当电流经过零值

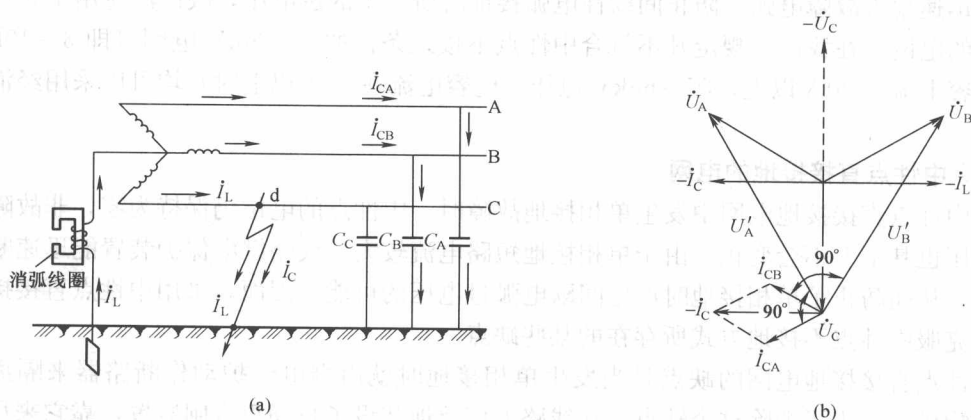


图 1-10 中性点经消弧线圈接地的单相接地示意图

(a) 接线图; (b) 相量图