

大型火电厂生产技术人员培训系列教材

火电厂电气设备及运行

胡志光
编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



大型火电厂生产技术人员培训系列教材

火电厂电气设备及运行

胡志光 编著

中国电力出版社
www.cepp.com.cn



内 容 提 要

本书着重讲述发电厂一、二次电气设备的基本原理、结构类型、性能特点、技术参数、接线方式、运行分析和理论计算以及与发电厂运行紧密相关的电力系统知识。全书共分8章,内容包括:电力系统的运行;发电厂电气主接线及厂用电;发电厂电气设备;发电厂电气设备的控制与信号;发电厂的继电保护;发电厂的电气自动装置;同步发电机的运行和电力变压器的运行等。

本书针对大型火电机组的特点进行讲解,内容全面,突出先进性和实用性。

本书作为大型火电厂生产技术人员培训教材,亦可供从事发电厂相关专业工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

火电厂电气设备及运行/胡志光编著. —北京:中国电力出版社

大型火电厂生产技术人员培训系列教材

ISBN 7-5083-0452-7

I. 火… II. 胡… III. ①火电厂—电气设备—技术培训—教材②火电厂—电气设备—电力系统运行—技术培训—教材
IV. TM621.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 54446 号

中国电力出版社出版、发行

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

北京交通印务实业公司印刷

各地新华书店经售

*

2001 年 4 月第一版 2001 年 4 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.75 印张 335 千字

印数 0001—5120 册 定价 28.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

序 言

随着科学技术的迅速发展,新技术、新材料、新工艺不断涌现并得到应用。电力生产是技术高度密集型产业,伴随科学技术及电力工业的发展,现代化电力生产也朝着“大容量、高参数、高自动化”的方向快速发展。快速发展的电力技术对电力生产技术人员和管理人员提出了更高的要求,迅速提高生产技术人员素质及观念,更新知识,已经成为当前电力生产的重要任务。

在职教育是提高劳动者素质的重要途径,高等学校发挥自身的人才优势,开展在职教育是现代高等教育发展的一大趋势。华北电力大学动力工程系经过10多年的努力与探索,在开展在职教育、为电力生产企业培训高层次技术人才方面,取得了一定成绩,积累了丰富的实践经验。为满足电力生产企业培训及电力生产技术人员学习新技术、新知识的需要,华北电力大学动力工程系组织具有10多年为电力生产企业培训技术人员经验的教师,编写了这套《大型火电厂生产技术人员培训系列教材》。本套教材首批共7种:《火电厂锅炉设备及运行》、《火电厂汽机设备及运行》、《火电厂电气设备及运行》、《火电厂过程控制》、《火电厂开关量控制技术及应用》、《汽轮机控制、监视和保护》、《计算机控制系统及其在电厂中的应用》。

本套培训教材的特点:

- (1) 力求反映当前电力生产的新知识、新技术。
- (2) 力求理论结合实际,明确理论在生产过程、生产设备及系统中的作用。
- (3) 注重解决生产过程中的实际问题。

本套教材可供电力生产企业培训生产技术人员使用,也可供其他相关工程技术人员学习、参考。

这套教材的出版是编著者多年教学培训实践积累的结果,但不可避免地会存在一些问题和不足,热切地希望广大读者给予批评指正。

《大型火电厂生产技术人员培训系列教材》编委会

2000年7月

前 言

为了适应电力生产建设迅速发展的需要,提高火电厂运行人员的技术水平,特编写了这本针对大型火电机组的培训教材。本教材努力反映发电厂电气部分的新技术、新设备、新工艺、新材料和新经验,突出实用性和先进性。本着理论联系实际的原则,简化电气设备选型、设计内容,力求将发电厂的电气主接线、厂用电、一次设备、二次设备、继电保护、自动装置、发电机的运行、变压器的运行和电力系统的运行等内容融为一体,在理解电气设备工作原理的同时,全面反映发电厂电气设备运行技术。努力做到内容准确、文字精练、插图简明、通俗易懂、内容全面。一书在手,即可全面掌握大型火电机组电气设备的基本原理、结构类型、性能特点、技术参数、接线方式、运行分析和理论计算以及与发电厂运行紧密相关的电力系统专业知识。本教材每章还配有复习思考题,既可以作为培训教材,亦可供从事发电厂相关专业工作的工程技术人员参考。

本书经程逢科同志审阅,并提出很多宝贵的意见。本书在编写过程中,曾得到不少单位和个人的大力支持和帮助,在此一并表示感谢。由于编写时间仓促,加上编者水平有限,会有不少漏误之处,恳请读者不吝指正。

编 者

2000年7月

目 录

序言

前言

第一章 电力系统的运行	1
第一节 电力系统概述	1
第二节 电力系统有功功率平衡和频率调整	13
第三节 电力系统无功功率平衡和电压调整	18
第四节 电力系统运行的稳定性	24
复习思考题	28
第二章 发电厂电气主接线及厂用电	30
第一节 对电气主接线的基本要求	30
第二节 电气主接线的基本接线形式	31
第三节 电气设备的倒闸操作	39
第四节 发电厂的厂用电	44
第五节 事故保安电源、不停电电源和直流电源系统	51
第六节 厂用电动机	57
复习思考题	63
第三章 发电厂电气设备	64
第一节 发电厂电气设备概述	64
第二节 高压断路器	66
第三节 隔离开关和高压熔断器	75
第四节 互感器	80
第五节 过电压保护设备	87
第六节 接地装置	92
复习思考题	96
第四章 发电厂电气设备的控制与信号	97
第一节 发电厂的控制方式	97
第二节 二次接线图	98
第三节 断路器的距离控制	103

第四节 信号装置.....	107
第五节 绝缘监察装置.....	110
复习思考题.....	112
第五章 发电厂的继电保护	113
第一节 继电保护概述.....	113
第二节 发电机保护.....	119
第三节 电力变压器保护.....	130
第四节 输电线路的距离保护.....	139
第五节 输电线路的高频保护.....	145
复习思考题.....	151
第六章 发电厂的电气自动装置	152
第一节 备用电源自动投入装置.....	152
第二节 发电机的自动准同期并列装置.....	157
第三节 发电机的自动调节励磁装置.....	163
第四节 输电线路三相自动重合闸装置.....	172
复习思考题.....	182
第七章 同步发电机的运行	183
第一节 同步发电机的基本知识.....	183
第二节 同步发电机的运行特性.....	187
第三节 同步发电机的正常运行.....	190
第四节 同步发电机的特殊运行.....	197
第五节 同步发电机的异常运行.....	199
复习思考题.....	204
第八章 电力变压器的运行	205
第一节 电力变压器的基本知识.....	205
第二节 变压器的运行状态分析.....	211
第三节 变压器的负荷能力.....	218
第四节 变压器的并列运行.....	225
复习思考题.....	229
参考文献.....	230

电力系统的运行

第一节 电力系统概述

一、电力系统的组成及大电力系统的优越性

1. 电力系统的组成

发电机将机械能转化为电能，通过变压器、电力线路把电能输送、分配给电动机、电炉、电灯等用电设备，这些用电设备将电能转化为机械能、热能、光能等等。这些生产、输送、分配、消耗电能的发电机、变压器、电力线路、各种用电设备联系在一起组成的统一整体就叫做电力系统，如图 1-1 所示。

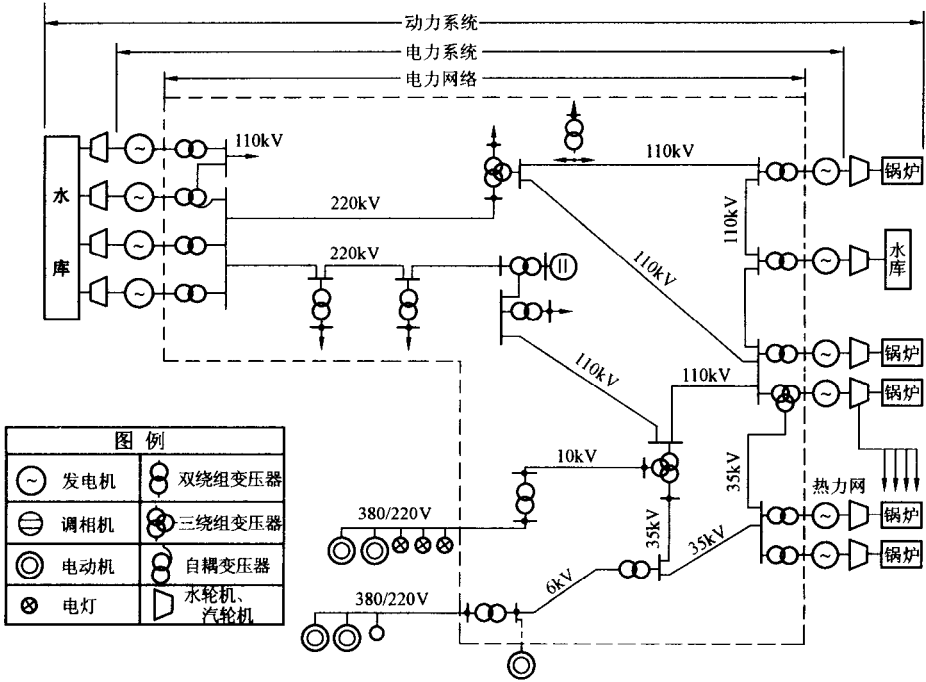


图 1-1 动力系统、电力系统、电力网络示意图

与电力系统相关的还有动力系统和电力网络。由电力系统和“动力部分”组成的整体叫做动力系统。“动力部分”包括火力发电厂的锅炉、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核反应堆等等。由升降压变压器和各种不同电压等级的电力线路所组成的网络叫做电力网络，也称电力网或电网。电力网是电力系统的重要组成部分。主要承担输送电能任务的电网称为输电网。输电网的电压较高，110~220kV 的输电网称为高压输电网，330kV 及以上的电网称为超高压输电网。主要承担分配电能任务

的电网称为配电网。配电网的电压较低，3~35kV 的配电网称为高压配电网，380/220V 的配电网称为低压配电网。

将两个或两个以上的小型电力系统用电网连接起来并列运行，即可组成地区性电力系统。将若干个地区性电力系统用电网连接起来，即可组成区域性电力系统。将若干个区域性电力系统用电网连接起来，就可形成跨省（区）甚至跨国界的电力系统。

2. 大电力系统的优越性

(1) 提高供电可靠性和电能质量。因为大电力系统中备用发电机组较多，容量也比较大，个别机组发生故障对系统影响较小，从而提高了供电可靠性。此外，当电力系统容量较大时，个别负荷变动，即使是较大的冲击负荷，也不会造成电压和频率的明显变化，故可增强抵抗事故能力，提高电网安全水平，改善电能质量。

(2) 可减少系统的装机容量，提高设备利用率。大电力系统往往占有很大的地域，因为存在时差和季差，各小系统中最大负荷出现的时间就不同，综合起来的最大负荷，也将小于各小系统最大负荷相加的总和。因此，大电力系统中总的装机容量可以减少些。同时，备用容量也可以减少。如果装机容量一定，则可提高设备的利用率，增加供电量。

(3) 便于安装大机组，降低造价。在 100~1000 万 kW 电力系统中，最经济的单机容量为系统总容量的 6%~10%。可见，系统容量越大，越便于安装大机组。而大机组每千瓦设备的投资、生产每千瓦·时电能的燃料消耗和维修费用都比小机组便宜，从而可节约投资，降低煤耗，降低成本，提高劳动生产率，加快电力建设速度。

(4) 合理利用各种资源，提高运行的经济性。水电厂发电易受季节影响，在夏秋丰水期水量过剩，在冬春枯水期水量短缺，水电厂容量占的比例较大的系统，将造成枯水期缺电，丰水期弃水的后果。将水电比例较大的系统与火电比例较大的系统连接起来并列运行，丰水期水电厂多发电，火电厂少发电并适当安排检修；枯水期火电厂多发电，水电厂少发电并安排检修。这样既能充分利用水利资源，又能减少燃料消耗，从而降低电能成本，提高运行的经济性。

二、电力系统的特点及对电力系统的要求

1. 电力系统的特点

(1) 电能的生产和消费具有同时性。电力系统中电能的生产和消费每时每刻都保持着平衡关系，即发电厂任何时刻生产的电能都等于该时刻所有用电设备消耗电能之和。在电力系统中发电、输电、变电、配电和用电的任何一个环节的电气设备发生故障，都会影响电能的生产和供应。因此，必须通过优化和调整等手段，使这种平衡关系维持在正常范围之内。

(2) 电磁变化过程十分迅速。电是以光速传播的。改变系统的运行状态是在极短的时间内完成的，系统故障失去稳定的过程也非常短暂。因此，正常运行或故障处理所进行的一系列操作和调整仅靠人工不能达到满意的效果，甚至不能达到预期的目的，必须利用各种自动装置来完成这些任务。

(3) 电力系统和国民经济各部门之间有密切的关系。现代工业、农业、交通运输等部

门都以电为动力进行生产。电能以其便于输送、便于集中管理、便于转换、便于自动控制、使用方便和利用率高等显著优点而得到广泛应用。电能在国民经济的发展和人民生活水平方面发挥着越来越重要的作用。因此，电力系统也应不断发展壮大，并留有足够的备用容量满足社会发展的需要。

(4) 电力系统的地区性特点较强。由于电力系统的电源结构与资源分布情况和特点有关，而负荷结构却与工业布局、城市规划、电气化水平有关。至于输电线路的电压等级、线路配置等则与电源与负荷间的距离、负荷的集中程度等有关。因此，各个电力系统的组成情况不尽相同。应根据本地区的特点规划、建设和发展电力系统。

2. 对电力系统的要求

(1) 最大限度地满足用户的用电需要，为国民经济各个部门提供充足的电力。为此，首先应按照电力先行的原则，做好电力系统的发展规划，确保电力工业的建设优先于其它工业部门。其次，还要加强现有电力设备的运行维护，以充分发挥潜力，防止事故发生。

(2) 保证供电的可靠性。运行经验证明，电力系统中的大事故，往往是由小事故引起的；整体性事故往往是由局部性事故发展扩大而造成的。因此，要保证对用户供电的可靠性，就要对每一发电、输电、变电、配电和用电设备都经常进行监视、维护，并进行定期的预防性试验和检修，使设备处于完好的运行状态。严格执行规章制度，不断提高运行人员的运行维护水平，采用技术先进、性能可靠和自动化程度高的电气设备，扩大系统容量和改善环境条件等均是提高供电可靠性的重要手段。

随着科学技术的发展，供电可靠性正在不断提高，但是保证对所有用户绝对可靠供电是困难的。考虑到不同用户的重要性及因停电造成的损失大小，按其供电可靠性的不同要求，将负荷分为三级。

一级负荷：中断供电将造成人身伤亡或造成重大经济损失，以及中断供电将造成重大政治影响或市政秩序严重混乱者。

二级负荷：中断供电将造成较大经济损失或较大政治影响者，以及中断供电将造成公共场所秩序混乱者。

三级负荷：凡不属于一、二级负荷者均为三级负荷，该级负荷无特殊供电要求。

电力系统的运行人员应认真分析各负荷的重要程度，以便必要时根据具体情况，区别对待。

(3) 保证良好的电能质量。所谓电能质量，是指电压、频率、波形三个技术指标，前两个尤其重要。用电设备是按额定电压设计的，实际供电电压过高或过低都会使设备的运行技术经济指标下降，甚至不能工作。我国规定的电气设备允许电压偏移一般不超过额定电压的 $\pm 5\%$ 。频率的变化同样影响电气设备的正常工作，并且对电力系统本身也有严重危害。我国规定电力系统的标准频率是50Hz，对于300万kW以上的系统，允许偏差不得超过 $\pm 0.2\text{Hz}$ ；300万kW及以下的系统，允许偏差不得超过 $\pm 0.5\text{Hz}$ 。另外，电能质量标准中还要求电压波形为正弦波。由于某些用电设备，如热轧机、电弧炉、电焊机，晶闸管控制的电动机、电解整流装置等，向电网输出高次谐波电流，影响电源电压波形，使正

弦波发生畸变，严重时会使继电保护装置、自动控制装置和计算机监控系统等发生误动作，因此，要求任一高次谐波的瞬时值不得超过同相基波电压瞬时值的5%。

(4) 保证电力系统运行的经济性。提高电力系统运行的经济性，就是使电力系统在运行中做到最大限度地降低燃料消耗，降低厂用电率和网损率。电能的生产规模很大，消耗的能源在国民经济能源总消耗中占的比重很大。因此，采取合理利用能源、降低发电成本、使负荷在各发电厂之间合理分配、使发电机组实现优化组合等措施，均会产生极大的经济效益。

三、电力系统的结构及其电压等级

1. 电力系统的基本结构

合理的电力系统结构是保证电力系统安全稳定运行的重要物理基础。所谓合理的电力系统结构，就是指在技术上电源布局合理，并按其地位、作用分区分层接入主电力网；发电机组的规模及参数的选择、电源建设与电网规模，须与发展阶段相适应；电网标准电压等级合理，网络结构清晰，潮流（功率流动）分布均匀、流向合理，使电网能适应负荷和建设的发展需要；电网运行的事故处理具有灵活性，抗干扰能力强；在规划建设上发电、输电、配电都要配套同步；经济上合理，适合国情。大的电力系统有几十个甚至上百个电厂，供电面积大，线路成千上万条，系统的结构相当复杂。从横的方面看，电力系统可分为将一次能源转换为电能的发电系统，将发电系统发出的电能汇集后输送到各处的输电系统和将输送来的电能分配到各用户的配电系统三大部分。从纵的方面看，电力系统具有按电压等级区分的分层结构。

电力系统的基本结构形式，通常根据电源位置、负荷分布等的不同而有所不同，但大致可分为下列两类：

(1) 大城市型。这类系统是向以大城市为中心的负荷密度很高的地区供电的电力系统。它以围绕城市周围的环形系统作为主干，将水电、火电、核电电源引入主干网络，再向城市供电 ([配]电系统进行再分配，并对大城市用电增长有高度的适应性和供电的高度可靠性。

(2) 远距离输电系统。这一类系统一般是指通过远距离输电线路（数百到数千公里）把远处的大型水电厂、坑口电厂、核电厂的电能送往负荷中心，如图 1-2 所示。这种大容量、远距离的电能输送，既可以用超高压（330kV 及以上）交流输电线路，也可以用超高压直流或交、直流并列的输电线路。我国的水力资源 70% 以上在西南、西北和华中，煤炭资源大部分在华北和西北，而负荷中心主要在东部沿海和中部地区，形成需西电东送的格局。因此，远距离输电系统在我国电力建设中起重要作用。

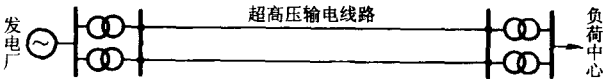


图 1-2 远距离输电系统

电力系统电压分层结构示意图如图 1-3 所示。超高压 500kV 主要用于大功率、远距离输送和跨省联络线，并正在逐步形成跨省互联的网络；高压 220kV 主要形成大电网主干

网架；110kV 用于中、小系统的主干线，也用于大电力系统的二次网络；城市配电网目前主要采用 10kV、35kV 电压等级。随着城市电力需求的增长，配电网的电压升高，将形成 110kV 配电网。这种划分不是绝对的，要根据具体情况，经过论证分析后决定。

电力系统基本结构形态的接线大致可以分为无备用和有备用两种类型。无备用接线的用户只有一个电源，主要优点是简单、经济、运行方便，其缺点是供电可靠性差，所以它一般不能用于对第一、二类负荷的供电。有备用接线的用户有两个和两个以上的电源对其供电，其优点是供电可靠，能保证对第一、二类负荷的供电，但其缺点是运行操作和继电保护复杂，投资费用也较大。

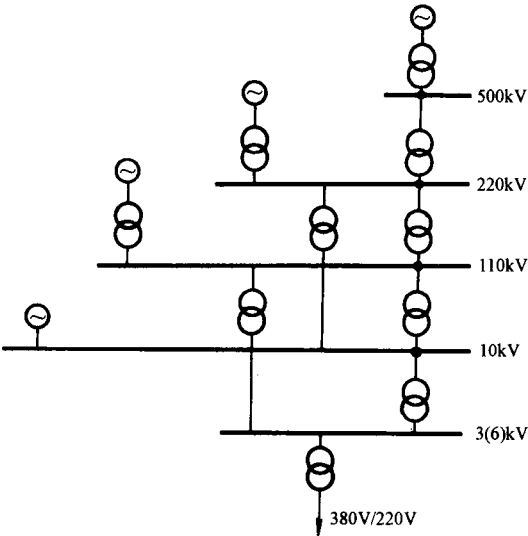


图 1-3 电力系统电压分层结构示意图

2. 电力系统的电压等级

在图 1-4 所示的系统中，各部分电压等级不同。因为三相功率 S 和线电压 U 、线电流 I 之间的关系为 $S = \sqrt{3}UI$ 。输送功率一定时，输电电压越高，电流越小，导线截面越小，投资越小。但电压越高，杆塔、变压器、断路器等绝缘的投资也越大。综合考虑这些因素，对应一定的输送功率和输送距离，有一合理的线路电压。但从设备制造角度考虑，为保证生产的系列性，又不应任意确定线路电压。考虑上述原因根据我国实际情况，并参考国外的标准，确定了我国电力系统的标称电压等级。新制订的国家标准电压（即 GB 156-93《标准电压》）规定，3kV 及以上的交流三相系统的标称电压值及电气设备的最高电压值见表 1-1。

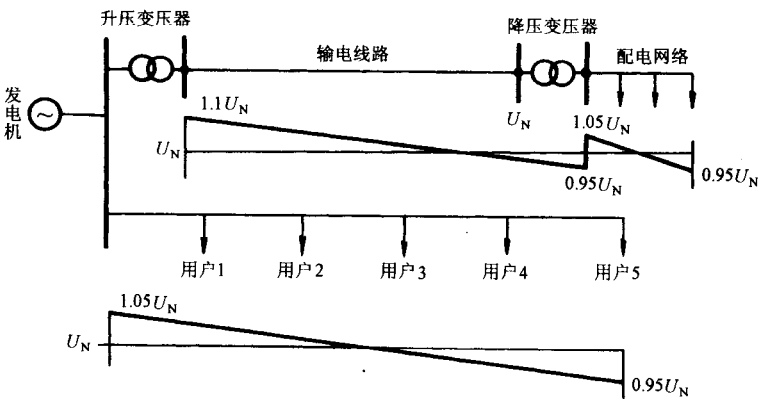


图 1-4 电力网各部分电压分布示意图

表 1-1

标 准 电 压

kV

系统的标称电压	电气设备的最高电压	系统的标称电压	电气设备的最高电压
3	3.6	110	126 (123)
6	7.2	220	252 (245)
10	12	330	363
(20)	(24)	500	550
35	40.5	(750)	(800)
66	70.5		12000

- 注 1. 括号中的数值为用户有要求时使用。
2. 电气设备的额定电压可从表中选取，由产品标准确定。

从表 1-1 可知，新的标准电压中将以前的电力系统（电力网）额定电压改称电力系统标称电压，并且将 20kV 列入国家标准，同时规定了电气设备的最高电压值，即电气设备正常运行时工作电压不能超过最高电压。

新的国家标准电压中规定了发电机的额定电压值，见表 1-2。

表 1-2

发电机的额定电压

V

交流发电机额定电压	直流发电机额定电压	交流发电机额定电压	直流发电机额定电压
115	115	13800	
230	230	15750	
400	460	18000	
690		20000	
3150		22000	
6300		24000	
10500		26000	

- 注 与发电机出线端配套的电气设备额定电压，可采用发电机的额定电压，在产品标准中具体规定。

从表 1-2 可知，新的国家标准电压中电气设备仍用额定电压表示，交流发电机新增 24kV 和 26kV 两种发电机额定电压，这预示我国大容量发电机将会有较快的发展。

从新的国家标准电压中可知，变压器的额定电压与标准相同，分一次绕组和二次绕组额定电压。

变压器一次绕组的额定电压有以下几种情况：

(1) 对于升压变压器，与发电机额定电压相同，即 3.15、6.3、10.5、13.8、15.75、18、20、22、24、26kV。

(2) 对于降压变压器，一次绕组的额定电压与相连线路的标称电压相同，即 3、6、10、35、66、110、220、330、500kV。但是，对于发电厂厂用高压变压器，一次绕组的额定电压与发电机的额定电压相同。

关于变压器二次绕组的额定电压，首先看确定变压器二次绕组额定电压的理由。在额

定运行时，变压器二次侧电压应较线路高 5%，但又因变压器二次侧电压规定为空载时的电压，而在额定电流负载下，变压器内部的电压降约 5%，为使正常运行时变压器二次侧电压较线路标称电压高 5%，故规定一般大中容量变压器二次侧额定电压应较相连接线路标称电压高 10%，只有漏抗压降较小的小容量变压器，或二次侧直接与用电设备相连的变压器（如厂用变压器），其二次侧额定电压才较线路标称电压高 5%。

因此，变压器二次绕组的额定电压较线路高 5% 的为：3.15、6.3、10.5kV。在城市电网中，由于送电距离较近，多选此种额定电压。

变压器二次绕组的额定电压较线路高 10% 的为：0.4、3.3、6.6、11、38.5、121、242、363、550kV。

各种电压等级目前在我国的使用情况如下：

- (1) 3、6kV 用于发电厂厂用电和配电网电压，10kV 广泛用于配电网电压。
- (2) 35、66kV 为大城市、大工业企业内部的配电网和农村输电网电压。
- (3) 110kV 用于电力系统主干输电线电压。
- (4) 220、330kV 用于大电力系统主网网架电压。
- (5) 500kV 用于系统之间联络线及大电网主网架电压。

各级电压电力网的输电能力见表 1-3。

表 1-3 各级电压电力网的输电能力

标称电压 (kV)	经济输送容量 (MW)	输送距离 (km)	标称电压 (kV)	经济输送容量 (MW)	输送距离 (km)
0.38	0.1 以下	0.6 以下	110	10~50	50~150
3	0.1~1.0	1~3	220	100~500	100~300
6	0.1~1.2	4~15	330	200~1000	200~600
10	0.2~2.0	6~20	500	1000~1500	150~850
35	2.0~10	20~50	750	2000~2500	500 以上

四、电力系统的负荷

1. 电力系统的负荷分类

电力系统的负荷是指电力系统中所有用电设备消耗功率的总和，它们又分为动力负荷（异步电动机）、电热电炉、整流设备及照明负荷等。

电力系统的综合用电负荷是指工业、农业、交通运输、市政生活等各方面消耗功率之和。

电力系统的供电负荷是指电力系统的综合用电负荷加上网损后的负荷。

电力系统的发电负荷是指供电负荷再加上发电厂厂用电负荷，即发电机应发出的功率。

2. 负荷曲线

负荷曲线是指某一段时间内负荷随时间变化的曲线。负荷曲线有以下特征：

- (1) 按负荷种类分为有功负荷曲线和无功负荷曲线。
- (2) 按时间段分为日负荷曲线和年负荷曲线。

(3) 按计量地点分为个别用户、电力线路、变电所、发电厂及整个电力系统的负荷曲线。

将上述三种特征结合起来, 就确立以下几种特定的负荷曲线:

(1) 日负荷曲线。图 1-5 (a) 表示某一地区电网的日负荷曲线, 图中 P 表示有功功率。 Q 表示无功功率, 它们表示该系统在一天 24h 内负荷变化的情况。

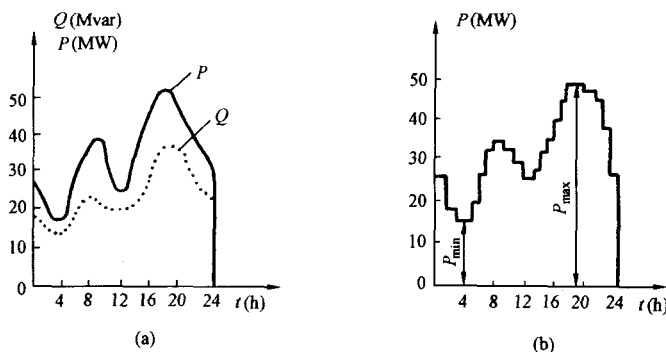


图 1-5 日负荷曲线

(a) 有功及无功日负荷曲线; (b) 阶梯形有功日负荷曲线

为了便于绘制和计算, 日负荷曲线常绘制成阶梯形, 见图 1-5 (b), 图中 $P_{\max}$ 表示一天内的最大负荷, $P_{\min}$ 表示一天内的最小负荷。把一天内各小时的负荷加起来再除以 24, 则可得日平均负荷, 记作 P_{av} 。

在电力系统的负荷曲线上, 平均负荷以上的负荷称为尖峰负荷或峰荷; 最小负荷以下的负荷称为基本负荷或基荷; 基荷与峰荷之间的部分称为腰荷。通常, 表示负荷曲线特征的系数为日负荷率 δ

$$\delta(\text{日负荷率}) = \frac{P_{\text{av}}}{P_{\max}} \quad (1-1)$$

日负荷率越高, 电能成本越低, 应努力提高日负荷率。我国日负荷率约为 85% ~ 90%。日负荷曲线除了表示负荷在一日内各时间的变化外, 还表示用户在一日内消耗的电能 W_d

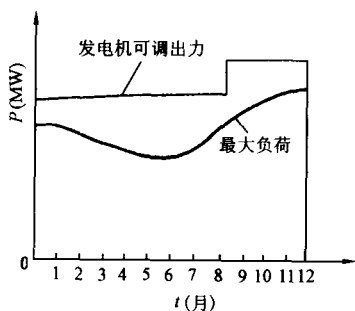


图 1-6 年最大负荷曲线

$$W_d = \sum_{i=1}^{24} P \cdot \Delta t \quad (\text{kWh}) \quad (1-2)$$

$$\text{或} \quad W_d = \int_0^{24} P \cdot dt \quad (\text{kWh}) \quad (1-3)$$

很明显, 这就是有功日负荷曲线下面所包围的面积。

(2) 年最大负荷曲线。把一年 12 个月中的最大负荷逐月画出, 连成曲线, 可得年最大负荷曲线, 如图 1-6 所示为某电力系统的年最大负荷曲线。年最大负荷曲线表示一年内电网最大负荷的变化规律。从图 1-6 可

以看出, 该系统夏、秋季的最大负荷较小, 可安排在该季节检修机组。

(3) 年持续负荷曲线。年持续负荷曲线是根据一年中负荷的大小及持续时间顺序排列线成的曲线, 如图 1-7 所示。利用年持续负荷曲线, 可以计算全年中电力网所输送的或用户使用的电能, 即全年用电量 W_a

$$W_a = \sum_1^{8760} P \cdot \Delta t \quad (\text{kWh}) \quad (1-4)$$

或
$$W_a = \int_0^{8760} P \cdot dt \quad (\text{kWh}) \quad (1-5)$$

显然, 年用电量的数值就是年持续负荷曲线下面从 0 到 8760h 所包围的面积。

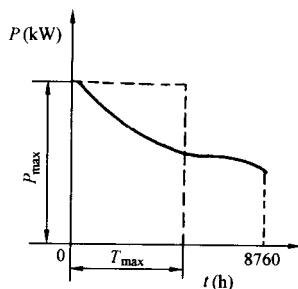


图 1-7 年持续负荷曲线

五、电力系统中性点的接地方式

电力系统中性点是指星形连接的变压器或发电机的中性点。这些中性点的接地方式是一个复杂问题。它关系到绝缘水平、通信干扰、接地保护方式、电压等级、系统接线和系统稳定等很多方面的问题, 最后经合理的技术经济比较而确定电力系统中性点的接地方式。

电力系统中性点接地方式可分为三种, 即中性点不接地、中性点经消弧线圈或电阻接地和中性点直接接地。前两种称为中性点非有效接地, 或称为小电流接地; 后一种称为中性点有效接地, 或称大电流接地。

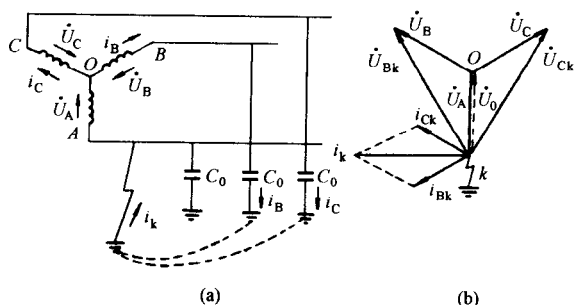


图 1-8 中性点不接地系统单相接地时情况

(a) 电流分布; (b) 电压电流相位关系

1. 中性点不接地系统

正常运行的电力系统为三相平衡系统, 各相电压大小相等, 相位差 120° , 每相对地电压为相电压, 中性点 0 对地电压 $U_0 = 0$, 且每相对地电容电流 $I_{C0} = U_x \cdot \omega C_0$, 其中 U_x 为相电压, C_0 为每相对地的电容。

当 A 相单相接地时, 见图 1-8, 中性点电压 $\dot{U}_0 = -\dot{U}_A$, 则各相对地电压为

$$\begin{aligned} \dot{U}_{Ak} &= 0 \\ \dot{U}_{Bk} &= \dot{U}_B - \dot{U}_A \\ \dot{U}_{Ck} &= \dot{U}_C - \dot{U}_A \end{aligned} \quad (1-6)$$

由于 $\dot{U}_{Bk}$ 、 $\dot{U}_{Ck}$ 升为线电压, 它们产生对地电容电流为 $\dot{I}_{Bk}$ 、 $\dot{I}_{Ck}$, 分别超前其对地电压 90° , 而入地的总电容电流为

$$\dot{I}_k = \dot{I}_{Bk} + \dot{I}_{Ck} \quad (1-7)$$

因为

$$I_{Bk} = \sqrt{3} I_{C0} = \sqrt{3} U_x \cdot \omega C_0 \quad (1-8)$$

由图 1-8 (b) 的相量可见, 接地电流的有效值为

$$I_k = \sqrt{3} I_{Bk} = \sqrt{3} \times \sqrt{3} U_x \cdot \omega C_0 = 3 I_{C0} \quad (1-9)$$

可见, 单相接地时, 在接地点入地的接地电流为正常时每相对地电容电流的 3 倍。B、C 相的对地电压为正常时的 $\sqrt{3}$ 倍, 但 A、B、C 三相之间的线电压仍对称不变。因此, 当中性点不接地系统发生单相接地时, 线路可不跳闸, 只给出接地信号, 按规程规定电力系统单相接地后仍可运行两小时, 以排除故障, 这样就提高了供电的可靠性。

但是, 因中性点不接地系统在发生单相接地故障时, 使不接地相对地电压升高 $\sqrt{3}$ 倍。因此, 该系统经济性差, 对于电压高的系统就不宜采用。另外, 该系统发生单相接地时, 还容易出现间歇电弧引起系统谐振过电压和对通信产生干扰。

2. 中性点经消弧线圈接地系统

中性点不接地系统发生单相接地时, 有接地电流 I_k 从接地点流过。当接地电流不大时, 电弧可在电流过零瞬间自动熄灭。当接地电流较大时, 可能产生间歇性电弧, 引起相对地的过电压, 损坏绝缘, 并导致两相接地短路。当接地电流更大时, 将会形成持续性电弧, 造成设备烧坏并导致相间短路等事故。为了减少接地电流, 使接地点电弧容易熄灭, 就需要在电力系统中性点接消弧线圈, 以补偿电容电流。

所谓消弧线圈, 就是在变压器或发电机的中性点与大地之间接入一个电抗线圈 L , 如图 1-9 所示。

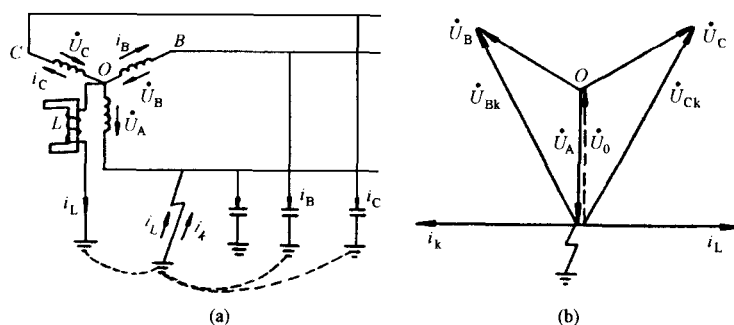


图 1-9 中性点经消弧线圈接地时的单相接地情况

(a) 电流分布; (b) 电流电压相量图

当系统 A 相单相接地时, 则消弧线圈 L 上电压为中性点对地电压 $\dot{U}_0 = -\dot{U}_A$, 而 L 可视为纯电感性线圈, 则 $\dot{I}_L$ 滞后 $\dot{U}_0$ 于 90° , 其相量图如图 1-9 (b), 可见 $\dot{I}_L$ 与 $\dot{I}_k$ 方向恰为反相, 那么接地点总电流 $\dot{I}_{zk} = \dot{I}_k + \dot{I}_L$ 。其绝对值为 $I_{zk} = |I_k - I_L|$ 。

由于 I_L 对 I_k 的抵消作用, 使接地电流 I_{zk} 减少, 以利于消弧, 这就是消弧线圈的工作原理。

当 $I_L = I_k$ 时, $I_{zk} = 0$, 称为全补偿, 但系统易产生谐振过电压, 故不采用。

当 $I_L > I_k$ 时, I_{zk} 为纯电感性电流, 称为过补偿, 这是在电力系统中经常采用的补偿方式, 可以避免或减少谐振过电压的产生。

当 $I_L < I_k$ 时, I_{zk} 为纯电容性, 称为欠补偿。当切除部分线路或系统频率下降时, 会