

高级工培训教材



电力系统运行及过电压保护

(火电厂、水电厂和变电所共用)

河南省电力工业局 编

内 容 提 要

本书为水电厂、火电厂及变电所电气运行、检修、试验方面等高级技术工人的培训教材。全书分两篇,第一篇为电力系统运行,分七章。主要内容有:电力系统的基本知识,潮流分布,无功平衡与电压调整,有功平衡与频率调整,经济运行,电力系统稳定及电网调度管理基础。第二篇为过电压保护,分六章,主要内容有:气体、液体、固体介质的电气性能,绝缘预防性试验及分析,行波及雷电过电压,过电压保护设备,发电厂及变电所的防雷保护,内部过电压保护。

本书除供水电厂、火电厂及变电所电气运行、检修、试验各工种高级工培训使用外,也可作为从事有关专业各级技术工人、职业技术学校相关专业学生的自学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统运行及过电压保护:火电厂、水电厂和变电所共用/河南省电力工业局编. -北京:中国电力出版社,1995

发电厂和变电所运行高级工培训教材

ISBN 7-80125-024-9

I. 电… II. 河… III. ①电力系统运行-技术培训-教材
②过电压保护-技术培训-教材 IV. ①TM732 ②TM86

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 11539 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)

北京市京东印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1995 年 9 月第一版 1995 年 9 月北京第一次印刷

787×1092 毫米 32 开本 11.5 印张 253 千字

印数 00001—10080 册 定价 16.70 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

出版说明

为满足高级工培训工作的需要，根据部颁《电力工人技术等级标准》的要求，我社组织出版了发电厂和变电所运行高级工培训教材。本套教材第一批共 9 种，是由河南省电力工业局和甘肃省电力工业局在其省内广为使用、多次办培训班所采用的运行高级工培训教材的基础上，根据教学中的经验和使用单位与读者的意见，对内容进行了增、删，结构上进行了调整，经重新修改而成，使之更适应运行高级工培训的要求。其中，火电厂运行高级工培训教材分为 4 种，即《火电厂电气设备及运行》、《火电厂继电保护及自动装置》、《锅炉设备运行技术》、《汽轮机设备运行技术》；变电所运行高级工培训教材分为 2 种，即《变电所电气设备及运行》、《变电所继电保护及自动装置》；水电厂运行高级工培训教材分为 2 种，即《水轮发电机组运行技术》、《水工观测技术》。另外，《电力系统运行及过电压保护（火电厂、水电厂和变电所共用）》为共用教材。本套教材供运行高级工培训及自学用，也可供相关专业的工人及技术人员参考。

中国电力出版社

1995 年 7 月

前 言

为了适应电力生产建设迅速发展的需要,提高工人队伍技术业务素质,并对技术工人晋升进行严格考核,原能源部颁发了《电力工人技术等级标准》。在贯彻执行该标准时,全国电力系统均积极开展技术工人培训工作。为了使从事发电厂、变电所电气运行的高级技术工人能按等级标准进行正规化和系统化的培训,特组织编写了发电厂和变电所电气运行高级工培训教材,共包括《火电厂电气设备及运行》、《火电厂继电保护及自动装置》、《变电所电气设备及运行》、《变电所继电保护及自动装置》、《电力系统运行及过电压保护(火电厂、水电厂和变电所共用)》五本书,除作为发电厂、变电所电气运行高级工的培训教材,也可供发电厂、变电所电气试验及检修高级工培训时参考。

这五种教材由河南电力工业局组织郑州电力高等专科学校的高级讲师、讲师分工编写。在编写过程中,考虑了发电厂、变电所电气运行高级工的专业需要,并力求在保证教材完整性、系统性的同时,注重职工培训的特点,深入浅出,密切联系生产实际,反映现场新技术。

本书分两篇,第一篇主要讲述电力系统的基本知识、潮流分布、频率调整与电压调整、经济运行、电网稳定及调度管理;第二篇主要讲述介质的电气性能、绝缘预防性试验及分析、行波及雷电过压、过电压保护设备、发电厂及变电站的防雷保护、内部过电压保护等。为了便于教学和学员复习,每章后都有复习题。

本书第一篇由罗玉莲编写；第二篇由田建华编写。
由于编写时间仓促，教材中有不足之处，敬请读者指正。

编 者

1995 年 6 月

目 录

出版说明
前 言

第一篇 电力系统运行

第一章	电力系统的基本知识	1
第一节	电力网及电力系统概述	1
第二节	电力系统运行的基本要求	4
第三节	电力系统的标称电压	7
第四节	电力网的接线方式	11
第五节	电力系统的负荷	13
第六节	电力系统中性点的接地方式	17
复习题	.....	22
第二章	电力系统的潮流分布	25
第一节	线路的参数及等值电路	25
第二节	变压器的参数及等值电路	33
第三节	开式电力网的潮流分布	38
第四节	开式电力网的功率分布与电压计算举例	49
第五节	简单闭式电力网的功率分布与电压计算	57
复习题	.....	64
第三章	电力系统的无功平衡与电压调整	67
第一节	电压调整的必要性	67
第二节	电力系统的无功功率平衡	68
第三节	电力系统中枢点的电压管理	74
第四节	电网电压偏低及偏高的原因	76
第五节	电力系统的电压调整措施	77
第六节	电力系统电压事故处理	88

复习题	89
第四章 电力系统的有功功率平衡与频率调整	93
第一节 频率调整的必要性	93
第二节 电力系统的有功功率平衡及备用容量	94
第三节 汽轮机的调速装置	96
第四节 电力系统的频率调整	98
复习题	103
第五章 电力系统的经济运行	105
第一节 电力网电能损耗的计算	105
第二节 降低电力网线损的技术措施	113
第三节 火力发电厂间有功负荷的经济分配	116
第四节 各类发电厂负荷的合理分配	120
复习题	124
第六章 电力系统运行的稳定性概念	127
第一节 静态稳定的初步概念	127
第二节 暂态稳定的初步概念	131
第三节 提高电力系统稳定运行的措施	136
复习题	139
第七章 电网调度管理基础	141
第一节 加强电网调度管理的必要性	141
第二节 电网调度管理的任务和主要工作	142
第三节 电网调度管理系统的构成及其职权	144
第四节 电网调度计划（运行方式）的主要内容	147
第五节 电网调度规则	148
第六节 电网调度指令	150
复习题	151

第二篇 过电压保护

第一章 电介质的电气特性	153
---------------------------	------------

第一节	电介质的极化、电导与损耗	153
第二节	气体放电特性	164
第三节	沿面放电及绝缘子的污闪	179
第四节	液体介质的击穿	187
第五节	固体介质的击穿	190
复习题	.....	194
第二章	绝缘预防性试验及分析	197
第一节	绝缘电阻及吸收比的测量	198
第二节	泄漏电流试验	203
第三节	介质损耗因素 $\tan \delta$ 的测量	205
第四节	耐压试验	210
第五节	局部放电测试简介	215
第六节	变压器绝缘试验	218
第七节	发电机绝缘试验	226
复习题	.....	234
第三章	行波及雷电过电压	237
第一节	行波的传播特点	237
第二节	变压器绕组中的波过程	245
第三节	雷电过电压的形成及特点	252
第四节	直击雷过电压与感应雷过电压	257
复习题	.....	260
第四章	过电压保护设备	263
第一节	避雷针和避雷线	263
第二节	保护间隙与排气式避雷器	267
第三节	阀式避雷器	270
第四节	防雷接地	278
复习题	.....	280
第五章	发电厂、变电所的防雷保护	282
第一节	发电厂、变电所的直击雷保护	282
第二节	发电厂、变电所的侵入波保护	285

第三节	变压器防雷保护的其它问题	289
第四节	旋转电机的防雷保护	296
复习题	.....	300
第六章	内部过电压	302
第一节	切断空载线路过电压	303
第二节	切除空载变压器过电压	308
第三节	间歇电弧接地过电压	313
第四节	铁磁谐振过电压	317
复习题	.....	324
附录	.....	326
参考文献	.....	356

第一篇 电力系统运行

第一章 电力系统的基本知识

第一节 电力网及电力系统概述

一、电力系统与电力网的组成

世界上大部分国家的动力资源和电力负荷中心分布是不一致的。如水力资源都是集中在江河流域水位落差较大的地方，燃料资源集中在煤、石油、天然气的矿区。而大电力负荷中心则多集中在工业区和大城市，因而发电厂和负荷中心往往相隔很远的距离，从而发生了电能输送的问题。水电只能通过高压输电线路把电能送到用户地区才能得到充分利用。火电厂虽然能通过燃料运输在用电地区建设电厂，但随着机组容量的扩大，运输燃料常常不如输电经济。于是就出现了所谓坑口电厂，即把火电厂建在矿区，通过升压变电站、高压输电线、降压变电所（站）把电能送到离电厂较远的用户地区。随着高压输电技术的发展，在地理上相隔一定距离的发电厂为了安全、经济、可靠供电，需将孤立运行的发电厂用电力线路连接起来。首先在一个地区内互相连接，再发展到地区和地区之间互相连接，这就组成统一的电力系统。

图 1-1-1 为电力系统和电力网示意图，通常将发电厂、变电所、用电设备之间用电力网和热力网连接起来的整体，叫做动力系统。

电力系统中的电气部分，即发电机、配电装置、变压器、电力线路及各种用电设备连接在一起组成的统一整体，称为电力系统。

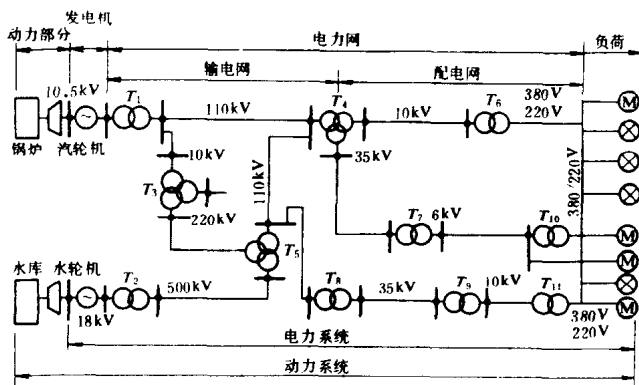


图 1-1-1 动力系统、电力系统及电力网示意图

电力系统中由各级电压等级的输配电线路及升降压变电所组成的部分，称为电力网。在我国习惯将电力系统称作电网，例如华中电力系统称为华中电网。

电力线路是电力系统的重要组成部分，它担负着输送和分配电能的任务。由电源向电力负荷中心输送电能的线路，称为输电线路或送电线路。送电线路的电压较高，一般在110kV及以上。主要担任分配电能任务的线路，称为配电线路，配电电压较低，一般在35kV及以下。

为了研究和计算方便，通常将电力网分为地方电网和区域电网。电压在110kV及以上、供电范围较广、输送功率较大的电力网，称为区域电力网。电压在110kV以下、供电距离较短、输电功率较少的电力网，称为地方电力网。电压在6~10kV的配电网，称为中压配电网。城市电网中35kV的配

电网亦称为中压配电网。电压为 380/220V 的配电网，称为低压配电网。但这种划分方式，其间并没有严格的界限。

根据电力网的结构方式，又分为开式电力网和闭式电力网。凡用户只能从单方向得到电能的电力网，称为开式电力网；凡用户至少可以从两个或更多方向同时能得到电能的电力网，称为闭式电力网。

根据电压等级的高低，电力网还可分为低压、高压、超高压几种。通常把 1kV 以下的电力网称为低压电网，1~220kV 的电力网称高压电网，330kV 及以上称超高压电网。

二、联合电力系统（又称大电网）

两个或两个以上的小型电力系统用电网连接起来并联运行，即可组成地区性电力系统。若干个地区性电力系统用电网连接起来，即组成联合电力系统。联合电力系统在技术上和经济上都有很大的优越性。

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，由于联合电力系统容量较大，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，各系统中最大负荷出现时间就不同，综合起来的最大负荷，也将小于各系统最大负荷相加的总和，因此系统中总的装机容量可以减少些。同时，备用容量也可减少些。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

由于联合电力系统容量大，按照比例（一般 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%）可装设容量较大的机组，而大机组每千瓦设备的投资和生产每千瓦·时电能的燃料消耗以及维修费用都比装小机组便宜，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. 充分利用各种资源，提高运行的经济性

水电厂发电受季节影响，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（如湖北省）将造成枯水期缺电，丰水期弃水的后果。组成联合电力系统后，水火电联合运行，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，这样充分利用水动力资源，减少燃料消耗，从而降低电能成本，提高运行的经济性。

第二节 电力系统运行的基本要求

一、电能在生产技术上的主要特点

电能的生产、输送、分配和使用是在同一瞬间完成的，即发电厂任何时刻生产的电能必须等于该时刻用电设备的消费及输送、分配中损耗电能之和，也就是说电能是不能大量储存的。

电力系统的电磁过程非常迅速，发电机、变压器、线路、电动机等元件的投入或退出都是在一瞬间完成的，因此电能生产靠人工进行操作和调整是达不到满意效果的，必须采用自动装置才能迅速而准确地完成电能的生产任务，所以电力

系统自动化程度必须高。

电力工业与国民经济各部门及人民生产关系极为密切，电能供应中断或减少都会直接影响国民经济各个部门。

二、对电力系统运行的基本要求

1. 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、变电、输配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，使设备始终处于完好的运行状态；严格执行规章制度，杜绝事故的发生，不断提高运行人员的技术水平和责任心；同时还要采用现代化的监测、控制设备。

随着技术的进步，供电可靠性正在不断提高，但是保证所有用户供电绝对可靠是困难的。考虑到不同用户的重要性及因停电造成的损失大小，按其对于供电可靠性的不同要求，可将负荷分成三级（三类）。

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。

2. 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，尤其前两个最重要。用电设备是按额定电压设计的，实际供电电压过高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应超过额定电压的 $\pm 5\%$ 。频率的变化同样影响用电设备的正常工作，以电动机为例，频率下降引起转速下降，因而影响机械频率和产品质量，而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，允许偏差值：300 万 kW 以上的系统，不得超过 $\pm 0.2\text{Hz}$ ；300 万 kW 以下的系统，不得超过 $\pm 0.5\text{Hz}$ 。

电能质量标准中还要求电压波形为正弦波。由于现代用电设备，如热轧机、电弧炉、电焊机、可控硅控制的电动机、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自动装置、计算机等发生误动作，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%。

3. 保证电力系统运行的经济性

提高电力系统运行的经济性，就是使系统运行中做到多供、少损、降低煤耗。主要有以下三个考核指标。

(1) 燃料消耗。生产每千瓦时电的燃料消耗量愈低愈好，这对降低发电成本、提高能源利用率有极重要的意义。

(2) 厂用电率。发电厂发电设备在生产过程中所消耗的电量与其发电量之比称为厂用电率。目前我国火电厂的厂用电率在 6%~10%之间，是个电能消耗户，应努力降低。

(3) 线损率(网损率)。电网在供电环节中所损耗的电量占所输送的电量之比称为线损率。目前我国各级电网的线损率的在 3%~10%，是一个不可忽视的能源损失，应力争降低。

4. 最大限度地满足用户的用电需要

电力生产部门的任务，是生产电能不间断地向用户供电，以满足国民经济建设事业日益发展的需要和人民物质、文化

生活的需要，为此，电力工业必须先行。

第三节 电力系统的标称电压

在图 1-1-1 所示系统中，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，输电电压愈高，电流愈小，导线截面愈小，投资愈小。但电压愈高，杆塔、变压器、断路器等绝缘的投资也愈大。综合考虑这些因素，对应一定的输送功率和输送距离，有一最合理的线路电压。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 GB156-93《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 1-1-1。

从表 1-1-1 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 列入为国家标准，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 1-1-2。

从表 1-1-2 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，我国电力系统（电力网）的标称电压有：3、6、10、(20)、35、66、110、220、330、500、(750) kV。

表 1-1-1 标准电压 (kV)

系统的 标称电压	电气设备的 最高电压
3	3.6
6	7.2
10	12
(20)	(24)
35	40.5
66	70.5
110	126 (123)
220	252 (245)
330	363
500	550
(750)	(800)
—	1200

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。

**表 1-1-2 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
115	115
230	230
400	460
690	—
3150	—
6300	—
10500	—
13800	—
15750	—
18000	—
20000	—
22000	—
24000	—
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。

同步发电机的额定电压 (一般比线路标称电压高 5%) 有: 3.15、6.3、10.5、13.8、15.75、18、20、22、24、26kV。

变压器的额定电压, 与原标准相同, 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。

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。