

前 言

由原水利电力部组织、山西省电力工业局编写、原水利电力出版社出版的《火电生产类学徒工初级工培训教材》和《火电生产类中级工培训教材》，发行、使用已历时 10 余年。其间，《学徒工初级工》各分册分别重印 5 至 9 次，《中级工》各分册分别重印 4 至 7 次，发行量很大，深受全国电力系统广大读者的欢迎，基本上满足了电力行业火力发电工人培训、考核、提高技术水平的要求，取得了显著的社会效益。为此，这两套培训丛书在全国电力普及读物评优中，荣获了“普及电力科学技术知识特别奖”。

10 余年来，由于改革开放的不断深入，我国的电力工业有了很大的发展，现已普遍进入大机组、大电网、高参数、超高参数、高电压、超高电压和高度自动化的发展阶段，对电业生产人员的素质提出了更高的要求。继 1991 年 12 月原能源部颁发的《电力工人技术等级标准》之后，1995 年 9 月电力工业部、劳动部又颁发了《中华人民共和国工人技术等级标准·电力工业·火力发电部分》。因此有必要根据电力生产的新情况和电力工人技术等级标准的新要求，对上述两套培训教材进行修订并增补高级工培训教材。经山西省电力工业局和中国电力出版社通力合作，并在全国电力工人技术教育研究所的支持下，现编写、出版了这套《全国火力发电工人通用培训教材》。本套丛书的内容覆盖了火力发电 16 个专业对初、中、高级工的技术要求，每个专业分初级工、中级工、高级工三个分册出版，共计 48 个分册；每一分册中又以各专业的不同岗位工种设“篇”，共覆盖了 40 余个工种。

在编写本套丛书的过程中，首先根据工人技术等级标准中对每一工种的定义、工作内容、技术等级、适用范围等的规定，紧扣标准提出的知识要求和技能要求，从火电生产实际需要出发拟出初步的编写提纲；经数月重点调查研究、广泛征求意见、认真修订后形成正式的编写提纲；之后，又历时半年余，始成初稿。初稿形成后，在局系统内进行了专家审稿和主编者的修改、统稿工作。因此，定稿后的火力发电工人培训教材，深信是紧扣新的工人技术等级标准的实用性教材。

火力发电工人培训教材，体现了工人技术培训的特点以及理论联系实际的原则，尽量反映了新技术、新设备、新工艺、新材料、新经验和新方法；教材以 300MW 机组及其辅机为主，兼顾 600MW 和 200MW 机组及其辅机的内容，因而有相当的先进性和普遍适用性，适应于“九五”期间主要机型的技术要求。与每一专业对应的初、中、高级工三个分册，自成一个小的系列，呈阶梯式递进，内容上互不重复。每一分册的具体内容又分为核心内容和复习题两大部分。核心内容主要讲解必备知识以及与技能要求对应的一些专业知识。复习题的形式多种多样，解答习题的目的在于巩固和深化所学知识。有些习题，如操作题、读绘图题、设计试验题等，主要用以培养和巩固必备的技能。鉴于全国电力系统各基层单位、部门培训力量和师资水平并不平衡，学员水平也参差不齐，所以有必要为每一分册编写相应的《教材使用说明和习题解答》，这将在本套丛书出版后陆续推出。

本书第一、二、十二章由华北电力集团公司三河发电厂李冀先同志编写；第三、四、五、六、七章为太原第二热电厂左学渊同志编写；第八、九章为山西电力工业局乔文普同

志编写；第十章为山西电力工业局程逢科同志与太原第一热电厂梁天柱同志编写；第十一章为山西省电力工业局中心调度所李养善同志编写。李冀先同志任主编。全书由山西省电力工业局沈忠民同志主审。

在中电联教材部为本套培训教材组织的审定会议上，本书由华北电力集团公司石景山发电总厂张保国、邹琪工程师审定，并推荐为全国火力发电工人通用培训教材。

在编写这套《全国火力发电工人通用培训教材》的过程中，得到了电力工业部领导的关怀以及中电联教培部和各有关司局的关心、支持，同时也取得了全国电力系统各有关单位和人员的关注、支持和帮助，他们为本书进行了审定，提供了咨询、技术资料以及许多宝贵的建议，在此一并表示衷心的感谢。

各单位和广大读者在使用本套教材过程中，如发现有不妥之处或需修改的意见，敬请随时函告，以便再版时修改。

山西省电力工业局 中国电力出版社

1996年11月

目 录

序 前 言

第一篇 专业基础知识

第一章 电力系统简介	1
第一节 概述	1
第二节 电力系统的运行调整	9
第三节 电力系统的静态和暂态稳定	29
复习题	36
第二章 电力系统短路故障分析与计算	39
第一节 电力系统短路的一般概念	39
第二节 电力系统的短路计算	43
第三节 短路电流的电动力及发热计算	69
第四节 短路电流的限制	77
复习题	79

第二篇 发电机氢冷系统

第三章 ZHDQ—32/10 型系统的其他设备	83
第一节 氢气的分离、洗涤与冷却	83
第二节 氧气的分离与冷却	87
第三节 电解液的循环与过滤	89

第四节	电解液的冷却与补水	93
复习题		94
第四章	ZHDQ—32/10 型系统的自动调节	96
第一节	自动调节的范围	96
第二节	主要调节项目的原理	99
第三节	标准气源	104
第四节	几种主要的热工仪表	107
复习题		115
第五章	氢气的湿度及其干燥法	117
第一节	氢气的湿度	117
第二节	冷却法除去氢气中的水分	120
第三节	吸附法除去氢气中的水分	124
复习题		134
第六章	发电机的氢冷系统及充排氢	136
第一节	发电机几种氢冷系统的结构	136
第二节	发电机内的气体置换	140
第三节	发电机的体外气体系统	142
第四节	氢气泄漏与检测	144
复习题		148
第七章	制氢系统常见的故障处理	151
第一节	ZHDQ—32/10 型系统常见的故障及处理	151
第二节	氢爆的防止措施	156
第三节	事故范例	158
复习题		167

第三篇 厂 用 系 统

第八章	厂用电的经济运行	169
第一节	电动机的经济运行	169

第二节 变压器的经济运行	174
复习题	179
第九章 厂用电率	181
第一节 厂用电率及其计算方法	181
第二节 厂用电率管理	183
复习题	188

第四篇 电气主系统与电力系统

第十章 电气设备的异常运行	191
第一节 变压器的非正常运行	192
第二节 发电机的非正常运行	205
第三节 高压断路器的非正常运行	233
复习题	238
第十一章 自动装置原理与运行	241
第一节 同步发电机的并列装置	241
第二节 低频自动减负荷装置	246
第三节 发电机自动调节励磁装置	248
第四节 故障录波器	261
第五节 远动装置	270
第六节 火电厂厂用电动机的工艺连锁	287
第七节 厂用电备用电源自动投入装置	312
复习题	316
第十二章 发电厂和电力系统的事故处理	322
第一节 概述	322
第二节 频率和电压降低的事故处理	325
第三节 发电厂与系统解列的事故处理	335
第四节 热力系统故障引起的电气事故处理	339
第五节 全厂停电的事故处理	347

第六节 电力系统非同步振荡的事故处理	351
复习题	361
附录 主要下角标意义	365
后记	李振生

第一篇 专业基础知识

第一章 电力系统简介

第一节 概 述

一、电力系统

在火力发电厂中,由锅炉将燃料的化学能转化为热能,再由汽轮机将热能转化为机械能;在水力发电厂中,由水轮机将水能转化为机械能等。再由发电机把机械能转化为电能,通过变压器、输电线路、把电能分配给用户。电动机、电炉、电灯等用电设备消耗电能,并将电能转化为机械能、热能、光能等等。这些生产、输送、分配、消费电能的发电机、变压器、输电线路、各种用电设备联系在一起组成的统一整体就叫电力系统,如图 1-1 所示。

二、对电力系统运行的基本要求

电能比其它能量转化方便,宜于大量生产、集中管理、远距离输送、自动控制。使用电能较其它能量有显著优点,所以各部门都广泛使用电能。电能供应的中断或减少将影响到国民经济各个部门。

电能的生产、输送、分配、消费实际上是同时进行的,即发电厂任何时刻生产的电能必须等于该时刻用电设备消耗与输送、分配中损耗电能之和,这与其他工业部门是大不相同的。另外,正常生产、运行中从一种状态到另一种状态的过渡过程非常短促,电能生产难于大量储存。根据这些显著的

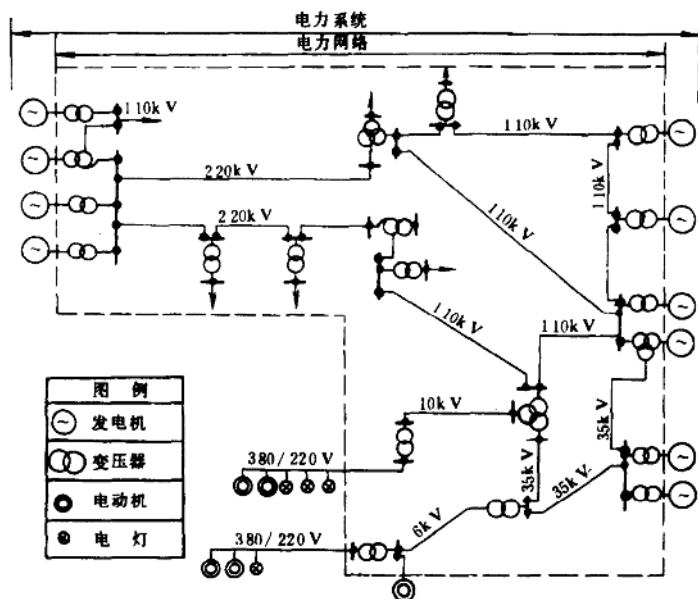


图 1-1 电力系统示意图

特点，对电力系统提出如下基本要求。

(一) 保证可靠地持续供电

供电的中断将使生产停顿、生活混乱，甚至危及人身和设备安全，造成十分严重的后果。停电给国民经济造成的损失远超过电力系统本身的损失。因此，电力系统运行首先要满足安全发供电的要求。

电力系统中的事故将导致计划外的供电中断，而引起事故的原因却很多。据典型统计资料表明，电力系统事故的直接原因中，设备质量差引起的占 32%，自然灾害引起的占 16.6%，继电保护误动作引起的占 13.2%，人员过失引起的

占 17%，运行管理水平低引起的占 21.2%。因此为减少系统中的事故也应从多方面着手。防止设备事故的对策在于严密监视设备的运行，及时认真地维护，防患于未然。为不致发生人为事故，则要求不断提高运行人员的素质和操作技术水平，严格执行行之有效的各种规章制度，严肃认真工作，当设备一旦发生事故时，能迅速、正确地处理，化险为夷。此外，完善电力系统的结构、布局以提高其抗干扰的能力，采用电子计算机监视、控制电力系统的运行等，都是保障安全可靠供电的重要技术措施。

虽然保证安全发供电是对电力系统的首要要求，但并非所有负荷都绝对不能停电。一般可按对供电可靠性要求将负荷分为如下三类。

第一类负荷是指对它中断供电将造成人身事故、设备损坏，除严重产生废品外，还将使生产秩序长期不能恢复，人民生活发生混乱等等。

第二类负荷是指对它中断供电将造成大量减产，生产秩序较长时间才能恢复，使人民生活受到影响等。

第三类负荷是指所有不属于第一类、第二类负荷之外的负荷，如工厂的附属车间、小城镇和农村供电等等。

此外，还有为数很少或持续时间很短的特殊重要负荷要求绝对可靠地不间断供电。

电力系统的运行人员应认真分析各负荷的重要程度，以便根据情况区别对待，减少损失。

(二) 保证良好的电能质量

良好的电能质量指电压正常，偏离不超过额定值的 $\pm 5\%$ ；频率正常，偏离额定频率不超过 $\pm 0.2 \sim 0.5\text{Hz}$ 。电压和频率偏离过大，虽然没有中断供电，也会引起大量废品的

增加。严重时，同样会导致人身事故、设备损坏。

近年来，由于电力供应不足，很多电力系统常常出现频率和电压的降低。为解决这个问题，除大力增加发电设备外，还必须不断挖掘设备潜力，使现有设备充分发挥作用。同时还要合理调配用电，大力宣传节约用电，杜绝一切浪费现象。

在电力供应充足的系统中，电能质量的低劣往往是调度管理不当、运行调整不及时造成的。因此，除提高自动化程度外，加强运行人员工作的责任心，提高他们的技术水平也是非常重要。

（三）保证系统运行的经济性

电能生产的规模很大，消耗的能源在国民经济能源总消耗中占的比重很大。电能输送、分配时的损耗绝对值相当可观。因此，降低每生产一千瓦时电所消耗的能源（如煤、油等）和降低输送、分配时的损耗有极重要的意义。为此应开展电力系统经济运行工作，使负荷在各发电厂之间合理分配。例如，使水力发电厂充分利用水能，避免弃水；火力发电厂中经济性能好的多发电，差的少发电；避免频繁地开停机组；使功率在系统中合理分布以降低输送时的损耗等等。

综上所述，三项对电力系统的基本要求是互相联系的，而在实际处理问题时，又往往是互相矛盾和互相制约的。因此，在考虑满足任何一项要求时，必须兼顾其它两项。

三、电力系统的电压等级和输送距离

图 1-1 所示的系统中，各部分电压等级不同。在电能的输送中，因三相功率 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，导线及载流部分的截面愈小；但电压愈高，对绝缘的要求愈高，杆塔、变压器、断路器等设备绝缘的投资也愈大。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。但从设备制造上考虑，为保证生产的系列性，又不能任意确定线路电压，甚至所规定的标准电压等级过多也不利于电力工业的发展。考虑到现有的实际情况和进一步发展，我国国家规定的标准电压（又称额定电压）以及推荐送电功率和送电距离如表 1-1 所示。在选择电力输送电压时，只能选用国家规定的标准电压等级。

表 1-1 标准电压等级、输送容量、输送距离

标准电压级 (kV)	输送容量 (MVA)	输送距离 (km)
0.4	0.1 以下	0.6 以下
3	0.1~1	1~3
6	0.1~1.2	4~15
10	0.2~2	6~20
35	2~10	20~50
110	10~50	50~150
220	100~500	100~300
330	200~800	200~600
500	1000~1500	150~850
750 (待定)	2000~2500	500 以上

四、电力系统的负荷

(一) 负荷

电力系统的负荷就是系统中千万个用电设备消耗功率的总和。它们大致分异步电动机、同步电动机、电热电炉、整流设备、照明设备等若干类。不同行业中，这些用电设备占的比重也不同。表 1-2 所示是几种工业部门用电设备比重的

统计。

表 1-2 几种工业部门用电设备比重的统计

类型 比重 (%)	综合性中 小工业	棉纺 工业	化学工业 化肥厂、 焦化厂	化学工业 电化厂	大型机械 加工工业	钢铁 工业
异步电动机	79.1	99.8	56.0	13.0	82.5	20.0
同步电动机	3.2		44.0		1.3	10.0
电热电炉	17.7	0.2			15.0	70.0
整流设备				87.0	1.2	
合 计	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

将各工业部门消耗的功率与农业、交通运输业和市政生活消费的功率相加,就可得所谓电力系统的综合用电负荷。综合用电负荷加电网中损耗的功率,就是系统中各发电厂应供应的功率,因而称电力系统的供电负荷。供电负荷再加各发电厂本身消耗的功率——厂用电,就是系统中各发电机应发的功率,称电力系统的发电负荷。

(二) 负荷曲线

负荷曲线指某一时间段内负荷随时间而变化的规律。按负荷种类,可分为有功负荷和无功负荷曲线;按时间段长短,可分为日负荷和年负荷曲线;按计量地点,可分个别用户、电力线路、变电所、发电厂乃至整个系统的负荷曲线。因为负荷变化有随机性质,很难确切预计负荷变化的情况,一般是通过以往的运行经验(仪表的测量记录)来研究它的规律性,并用曲线来描述它。在电力系统的规划设计和运行中,经常用到的负荷曲线有以下几种。

1. 日负荷曲线

图 1-2 表示某电力系统冬季日负荷曲线，它表示系统负荷在 1 天 24h 内的变化情况。不同地区或不同用户的负荷曲线是很不相同的。图 1-2 是全系统各用户负荷叠加起来的综合负荷曲线。

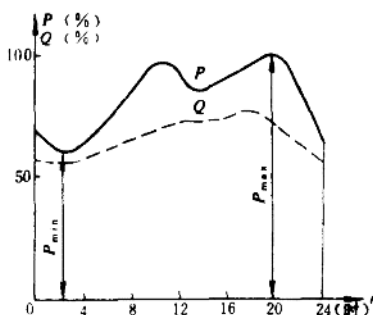


图 1-2 日负荷曲线

在负荷曲线中最大的负荷叫做日最大负荷 $P_{\max}$ (又叫尖荷、峰值等)，最小的负荷叫做日最小负荷 $P_{\min}$ (又叫谷荷)。由于它们代表了 1 天之内负荷变化的两个极限，对电力系统的运行有很大的影响。因此常常作为分析和研究系统运行情况的重要数据。

2. 年最大负荷曲线

在制定电力系统的运行和发展计划时，不仅要了解一天的负荷变化，而且要了解一年或更长时间的负荷变化和增长情况。经常用到的是年最大负荷曲线，它描述每年从 1 月 1 日

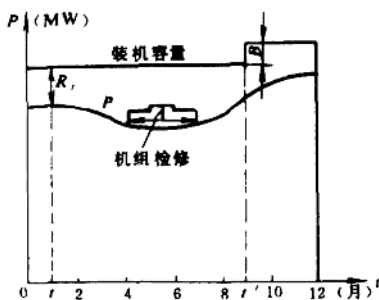


图 1-3 年最大负荷曲线

起到年终时系统逐日 (或逐月) 综合最大负荷的变化情况，以便有计划地扩建发电机组或新建发电厂，以满足系统负荷增长的需要和恰当地安排全年机组的检修计划。图 1-3 表示系统年最大负荷曲线，其中

A 是系统机组计划检修的时间, B 是扩建或新建的机组容量。

为了保证系统供电的安全可靠性, 系统的装机容量在任何时刻都必须大于系统综合最大负荷, 它们的差值如在 t 时刻的 R_t 叫做系统备用容量, 一般应包括负荷备用、事故备用、检修备用和国民经济备用。系统备用容量的确定, 将直接影响到系统运行的可靠性, 因此这是一个十分重要的问题。

3. 年持续负荷曲线

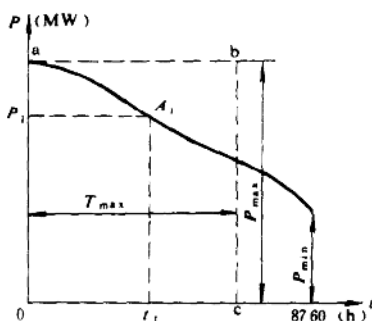


图 1-4 年持续负荷曲线

在编制电力系统的发电计划和进行可靠性估计时, 常常用到年(或月或周)持续负荷曲线。如图 1-4 所示, 它是以前电力系统全年(或月或周)按负荷大小及其持续运行时间(小时数)的顺序排列作成的。

在曲线中 A_1 点反应了在 1 年内负荷值超过 P_1 的累计持续时间共有 t_1 小时。根据年持续负荷曲线, 可以计算出系统全年负荷所取用(消耗)的电能大小。系统运行人员应根据系统中各发电厂的机组特性和效率情况, 计划全年发电方式, 以降低发电费用, 取得较高的经济效益。

总起来讲, 影响负荷曲线的因素很多, 诸如负荷组成的性质, 工矿企业生产发展, 地理位置, 生产管理及作息制度, 气候变化, 假日以及人民生活习惯等等。如何根据电力系统的已知条件, 预测(短期或长期的)下一步负荷的变化, 是当前电力系统运行工作中十分重要而未完全解决的问题。

第二节 电力系统的运行调整

衡量电能质量的指标是频率和电压的偏移。即系统频率应保持在 50Hz，频率偏移不得超过 $\pm 0.5\text{Hz}$ ，容量较大的系统及有条件的，应努力使偏差不得超过 $\pm 0.2\text{Hz}$ 。

电力系统的电压应满足用户受电端偏差值合乎规定：35kV 及以上电力用户为额定电压 $\pm 5\%$ ；10kV 及以下电力用户为额定电压的 $\pm 7\%$ 。

电力系统的频率和电压是在不停地变化的，运行中，除靠自动装置调整外，还需要人为地操作调整，以保持频率和电压在规定的水平。

一、频率的调整

(一) 调整的必要性

频率变化时对用户有以下影响：

(1) 大多数工业用户使用异步电动机，电动机的转速与系统频率有关。频率的变化将引起电动机转速的变化，从而影响产品的质量。如纺织工业、造纸工业，将由于频率变化而出现残、次品。

(2) 系统频率降低，将使电动机的功率降低。电动机的机械负载不同，频率变化的影响也不同。但总的趋势是频率的下降会影响或严重影响电动机所拖动机械的出力，使之下降或严重下降。

(3) 近代工业、国防和高科技部门都广泛使用电子技术设备（电子仪器及自动控制设备），系统频率的不稳定将会影响电子技术设备的准确性。

频率变化对发电厂及系统本身也有影响：

(1) 发电厂的厂用机械(泵与风机)是由异步电动机拖动的。系统频率降低将使电动机功率降低,若系统频率下降到46Hz以下,可以造成水泵不上水,风机风量大大降低,从而马上危及生产。

(2) 系统在低频运行时,容易引起汽轮机叶片的共振,缩短汽轮机叶片的寿命,严重时会使叶片断裂。所以现代化大型汽轮发电机组对系统频率的变化有相当严格的要求。

(3) 系统频率的降低,使异步电动机和变压器的励磁电流将大大增加,引起系统无功负荷的增加,其结果引起系统电压的下降,而电压的下降将影响电机转矩下降,出现恶性循环。若频率严重下降、采取恢复措施又不及时、不得力,甚至会导致重大事故的发生。

(二) 频率的调整

1. 负荷曲线的预计和分析

预计有功功率的日负荷曲线方法不止一种,但都是运用积累的运行记录、实测负荷曲线、足够的实际数据为基础编制预计日负荷曲线。目前大型电力系统,一般采用三级管理——系统总调度所、中心调度所、地区调度所。负荷曲线编制的大体步骤是:各地区大用户向所属调度所申请未来若干天后的预计负荷;地区调度所根据这些用户的申请,参照长期积累的实测数据,汇总调整用户的用电、加上地区网络损耗,编制出该地区的预计负荷曲线,上报中心调度所;中心调度所根据各地区调度所上报的预计负荷曲线,参照该调度所积累的实测数据,再一次汇总、调整各地区的用电、加上该调度所所辖网络的损耗,编制出相应网络的预计负荷曲线,上报总调度所;最后,总调度所根据各中心调度所上报的预计负荷曲线,按相似的步骤,编制出系统的预计负荷曲