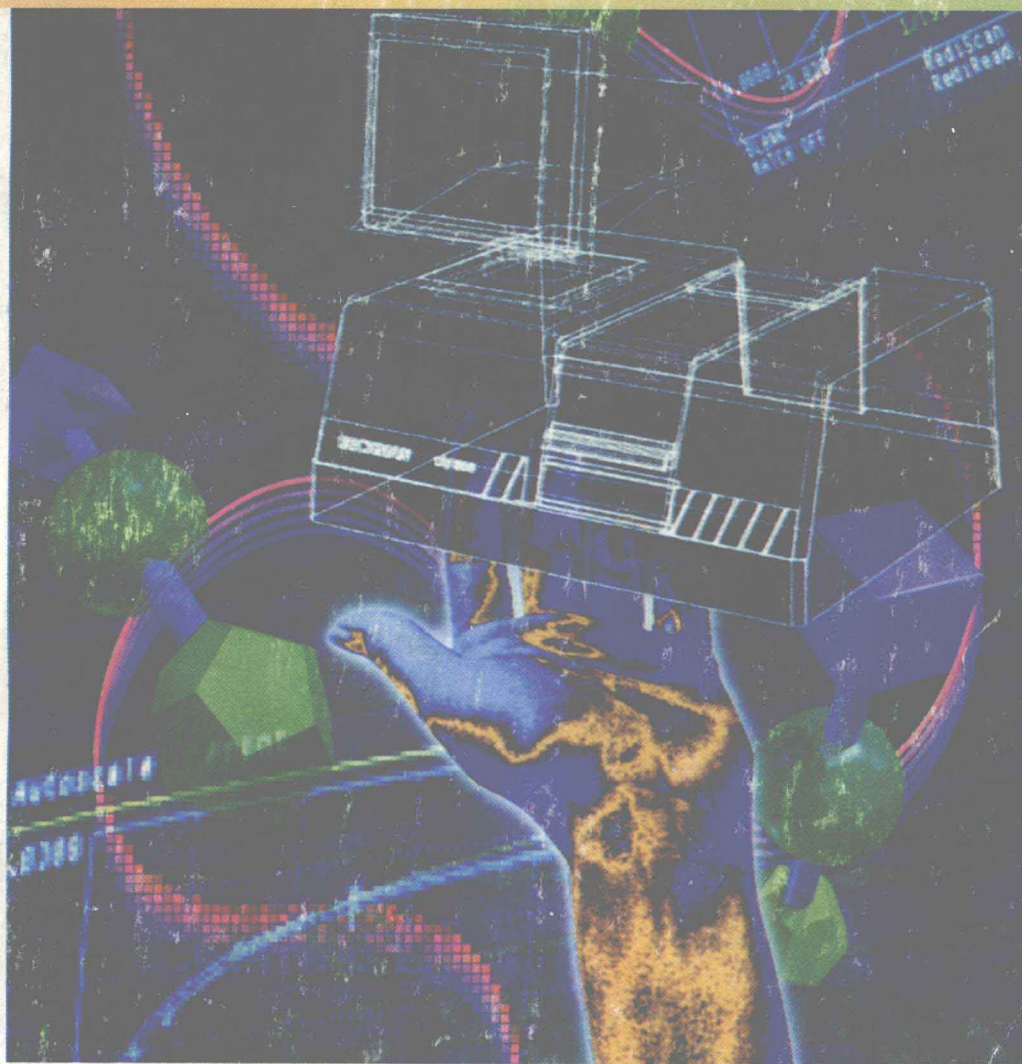


高等学校教材



电力工程 基础

主 编 刘从爱
副主编 慕志恒
山东科学技术出版社

高等学校教材

电力工程基础

主 编 刘从爱
副主编 慕志恒

山东科学技术出版社

高等学校教材
电力工程基础

主 编 刘从爱
副主编 慕志恒

*

山东科学技术出版社出版发行
(济南市玉函路 邮政编码 250002)
山东文登市彩印厂印刷

*

787×1092 毫米 16 开本 28 印张 622 千字
1997 年 1 月第 1 版 1997 年 1 月第 1 次印刷
印数:1—5000

ISBN7—5331—1858—8
TM·25 定价 30.00 元

序

电气技术专业是电工学科领域内强弱电相结合的一个学科型宽口径专业。自1979年创办以来,已在教育部、航空航天部、机械工业部、轻工业部、水利电力部、冶金工业部、地质矿产部、城乡建设环境保护部以及地方的几十所高等和中等院校成立了电气技术专业。1984年教育部批准将专业由试办改为正式专业。1986年12月中国电工技术学会教育工作委员会组织同行专家评审通过全国电气技术教学研究会经调查研究而提出的“电气技术专业人才培养基本业务规格”,确定了专业的主要课程。1987年成立全国电气技术专业教学指导委员会,挂靠机械工业部。该委员会于1988年讨论通过了各课程研究组制定的主要课程和教学环节的基本要求,并据此组织编审有关教材,陆续出版,作为该专业的第一轮试用教材。

电气技术专业具有四个特性:其一是学科性,即它是面向整个电工学科而不是某一特定的电气产品或工程对象来设置专业;其二是基础性,突出强调技术基础在人才培养过程中的重要性和技术基础课程自身学科体系的相对完整性;其三是综合性,强调学科相互交叉和相互渗透的重要性,因此提出四个结合,即强电弱电相结合、元件系统相结合、软硬件相结合和电与机相结合;其四是实践性,即在切实加强基础理论和基本技能的同时,特别强调培养综合运用这些基础和技能来分析和解决实际工程问题的能力,为此必须加强实践性的教学环节,并重视自学能力的培养。因此,本专业的课程设置、课程改革和教材编写都力求体现这四个特性。

这批教材的书稿都是在具有多年教学实践、师生反映较好的讲义中,经院校推荐,专业指导委员会组织有关教师根据专业改造的基本要求重新编写并组织专家进行评审的,各有关出版社为保证教材的质量也作出了很多的努力。但是,限于水平和经验,并且这毕竟也还是初次改革的尝试,不足之处希望使用单位、广大师生提出批评和建议,为不断提高电气技术专业教材的质量而努力。

全国电气技术专业教学指导委员会

1996年6月

前 言

全国高等学校电气技术专业统编教材《电力工程》，机械工业出版社于1992年10月出版，已有20余所院校正式采用。该书由刘从爱、徐中立和蔡玄章教授合编，刘从爱和徐中立教授任主编，马国琳教授主审。近年来科技发展迅猛，电子和计算机技术已在电力工程中广泛应用，同时高层建筑的电气部分也引起了人们的高度重视，因此部分院校建议将这些内容适度地纳入本书，以增强时代感和实用性。经全国电气技术专业教学指导委员会1995年夏季武夷山会议讨论决定对原书进行修改，并于1995年11月在青岛召开了使用原教材最多的五所院校任课教师会议，详细讨论拟订了新教材的内容和编写纲要。由于各院校目前急需用书，而机械工业出版社因任务重而难以尽快出版，故约请山东科学技术出版社出版。又因新教材在内容上有较大变动，所以将书名改为《电力工程基础》，这样也更能反映本教材的特点。

本书仍由青岛大学刘从爱教授主编，山东工业大学慕志恒副教授任副主编，东南大学吴杰改编第四章，慕志恒改编第二、五章，山东工程学院胡希同改编第一、九章，河北机电学院刘庆瑞改编第三章，山东工业大学张卫星改编第六章，青岛大学金明新编第七、八章，青岛大学程明新编第十、十一章，河北机电学院吴受书新编附录I并改编附录II。刘从爱负责全书统稿并审定。

本书是在原《电力工程》的基础上补充改编而成的，充分汲取了部分院校教学实践的经验，本着打好基础、削枝强干、突出重点、便于选讲和自学的原则编撰(选学部分带*号)，本科和专科学生通用，亦可作为将“电力工程”分为“电力工程基础”和“继电保护及自动化”两门少学时课程的教材。本书既可作工业自动化专业和电机电器与控制专业“工厂供电”课程的教材，亦可作相关专业工程技术人员的参考书。

由于编者水平所限，书中错误和缺点在所难免，恳请读者批评指正。

编者

1996年6月

目 录

第一章 电力系统基础	(1)
第一节 电力系统的一般概念	(1)
第二节 发电厂的生产过程	(6)
第三节 电气设备的发热计算	(8)
第四节 电气设备的电动力	(12)
第五节 开关电器的灭弧原理	(15)
第六节 电力系统中性点的运行方式	(21)
复习思考题	(26)
第二章 电气负荷及计算	(27)
第一节 负荷曲线	(27)
第二节 电力负荷的计算	(30)
第三节 尖峰电流的计算	(43)
第四节 高次谐波及其抑制	(43)
复习思考题	(45)
第三章 电力网	(47)
第一节 概述	(47)
第二节 电力线路的结构和电气参数	(49)
第三节 电压损失与功率损耗	(59)
第四节 电网的功率分布	(64)
第五节 导线截面和电力电缆的选择	(72)
复习思考题	(80)
第四章 短路电流	(82)
第一节 概述	(82)
第二节 短路过程的分析	(82)
第三节 短路电流计算方法	(91)
第四节 对称短路的分析计算	(95)
第五节 不对称故障的分析计算	(101)
第六节 感应电动机对短路电流的影响	(115)
第七节 低压电网短路电流计算	(116)
第八节 短路电流的效应	(121)
复习思考题	(127)
第五章 变电所的一次系统	(131)
第一节 概述	(131)
第二节 高压电器	(132)
第三节 互感器	(140)
第四节 电力变压器	(149)
第五节 低压电器	(155)

第六节	电气主结线	(163)
第七节	电气设备的选择	(167)
第八节	变电所总体布置	(172)
	复习思考题	(177)
第六章	继电保护基础	(179)
第一节	概述	(179)
第二节	继电器的基本工作原理	(183)
第三节	线路的电流电压保护	(194)
第四节	电网的方向电流保护	(205)
第五节	距离保护	(209)
第六节	电网的接地保护	(214)
第七节	电力变压器保护	(217)
第八节	电动机保护	(233)
第九节	电力电容器保护	(238)
	复习思考题	(240)
※第七章	微机保护基础	(243)
第一节	概述	(243)
第二节	微机保护的硬件组成与设计	(245)
第三节	微机保护的算法	(258)
第四节	微机保护装置举例	(262)
	复习思考题	(264)
第八章	变电所监控系统	(265)
第一节	概述	(265)
第二节	变电所的控制回路	(266)
第三节	变电所的信号回路	(270)
第四节	变电所绝缘监察装置	(273)
第五节	变电所常用自动装置	(275)
第六节	变电所的操作电源	(281)
※第七节	变电所微机监控系统简介	(287)
	复习思考题	(289)
第九章	过电压防护与接地	(290)
第一节	雷与防雷	(290)
第二节	接地与接零	(304)
※第三节	内部过电压简介	(310)
第四节	电气安全	(313)
	复习思考题	(315)
第十章	电气设备的经济运行	(317)
第一节	电力变压器的经济运行	(317)
第二节	感应电动机的经济运行	(324)
第三节	电力线路的经济运行	(329)
第四节	功率因数补偿	(332)

第五节 电力电容器与无功补偿	(334)
复习思考题	(339)
第十一章 高层建筑电气及照明	(340)
第一节 高压供电系统与低压网络	(340)
第二节 电气照明	(355)
第三节 电梯	(366)
第四节 高层建筑防雷接地及漏电保护	(374)
第五节 自备应急电源	(381)
复习思考题	(384)
附录	(386)
附录 I 35kV 变电所电气设计举例	(386)
附录 II 常用电气设备技术参数	(408)
主要参考文献	(430)
主要符号表	(432)

第一章 电力系统基础

第一节 电力系统的一般概念

电能是社会主义建设和人民生活不可缺少的重要能源,电力工业在国民经济中占有十分重要的地位。电能是由发电厂供给的。为了经济起见,发电厂多建在动力资源丰富的地方,往往远离大中城市和工矿企业,因此需要输送电能。电能被输送到城市和工矿企业之后,还需要进一步分配到用户和生产车间。由发电厂、输配电线路、变电所(站)和用电设备所组成的统一整体,称为电力系统;如果把发电厂的动力部分也包含在内,又称为动力系统。电能的生产、输送、分配以及转换为其他形态能量的过程,是同时进行的。迄今为止,电能尚不能大量储存。电力系统中瞬间生产的电能,一定等于同一瞬间耗用的电能,这是电能生产的最大特点。

图 1-1 为电力系统示意图。由图可知,发电厂生产的电能除满足自用电(又称厂用电)外,一部分向附近的电力用户供电,另一部分经变压器升压输送至城市或大型工矿企业的降压变电所,由变压器降压(或几次降压)后向用电设备供电。把许多发电厂联结成统一的电力系统,具有供电可靠性高、运行灵活、经济性高、电能质量好等许多优点。

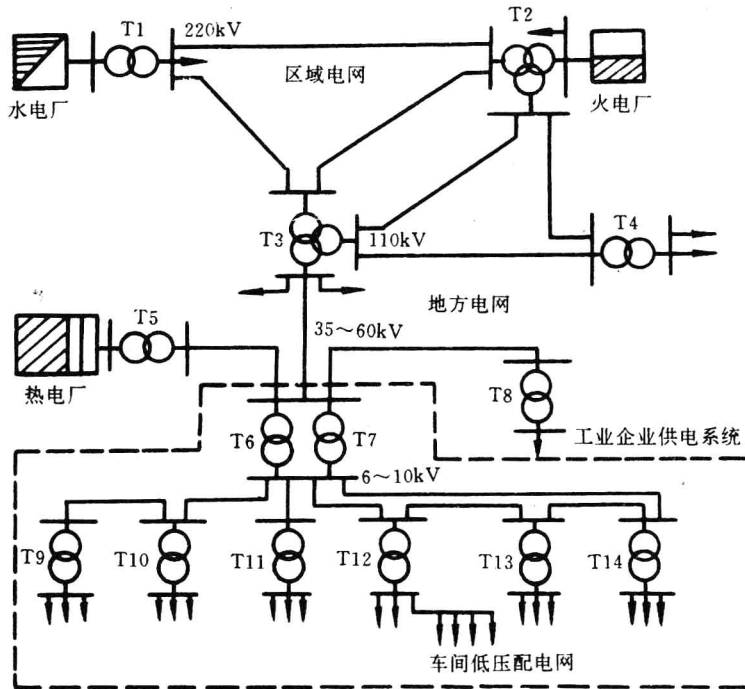


图 1-1 电力系统示意图

一、对电力系统的基本要求

1. 保证供电的可靠性

供电突然中断将使生产停顿、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可靠、持续供电的要求。

2. 保证良好的电能质量

电能质量是表征电能品质的优劣程度。电能质量包括电压质量和频率质量两部分。电压质量又分为幅值与波形质量两方面,通常以电压偏差、电压波动与闪变、电压正弦波畸变率、负序电压系数、频率偏差等项指标来衡量。

(1)电压偏差:在某一时段内,电压幅值缓慢变化而偏离额定值的程度,以电压实际值与额定值之差 δU 或其百分值 $\delta U\%$ 来表示。

电压偏差的大小,主要取决于电力系统的运行方式、线路阻抗以及有功与无功负荷的变化。为了防止电压偏差过大而影响用电设备的正常工作,必须把线路的电压损失限制在一定范围内(表 1-1),常用电气设备端电压的允许偏差见表 1-2。

表 1-1 输配电线路允许电压损失

名称	允许电压损失(%)
配电变压器二次侧母线至用电设备的 380/220V 低压线路	5
配电变压器二次侧母线至用电设备的 380/220V 低压线路(含有照明负荷)	3~5
由 110(35)/10(6)kV 变压器二次侧母线算起的 10(6)kV 线路	5

表 1-2 常用电气设备端电压偏差的允许值

设备名称	允许电压偏差(%)	设备名称	允许电压偏差(%)
电动机	±5 +5~-10	照明灯	+5~-2.5 ±5 +5~-10
正常情况下		要求高的场所	
特殊情况下	一般场所		
		事故、道路等	

(2)电压波动与闪变:在某一时段内,电压急剧变化而偏离额定值的现象,称为电压波动。电压变化的速率大于每秒 1%的,即为电压急剧变化。电压波动程度以电压在急剧变化过程中,相继出现的电压最大值与最小值之差或其百分值来表示,即

$$\delta U = U_{\max} - U_{\min}$$

或

$$\delta U\% = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_N} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中: U_N ——额定电压(V);

U_{\max}, U_{\min} ——某时段内电压波动的最大值与最小值(V)。

国家标准《电能质量、电压允许波动和闪变》(GB12326-90),规定电压波动的允许值

见表 1-3。

表 1-3 电压波动允许值

额定电压(kV)	电压波动允许值(%) (注)
10 及以下	2.5
35~110	2
220 及以上	1.6

注：电力系统公共供电点，由冲击性负荷产生的电压波动允许值。

周期性电压急剧变化引起电光源光通量急剧波动而造成人眼视觉不舒适的现象，称为闪变。通常用引起闪变刺激性程度的电压波动值——闪变电压限值 ΔV_t 或电压调幅波中不同频率的正弦波分量的均方根值等效为 10Hz 值的一分钟平均值——等效闪变值 ΔU_{10} 来表示。电力系统公共供电点，由冲击功率负荷产生的闪变电压应小于 ΔU_{10} 的允许值，否则将会出现闪变， ΔU_{10} 允许值见表 1-4。

表 1-4 ΔU_{10} 允许值

应用场合	ΔU_{10} 允许值(%)
对照明要求较高的白炽灯负荷	0.4(推荐值)
一般性照明负荷	0.6(推荐值)

(3) 电压正弦波畸变率：在理想状态下，电压波形应是正弦波，但由于电力系统中存在有大量非线性阻抗特性的供用电设备，使得实际的电压波形偏离正弦波，这种现象称为电压正弦波形畸变，通常用谐波来表征。电压波形畸变的程度用电压正弦波畸变率来衡量，也称电压谐波畸变率，以各次谐波电压的均方根值与基波电压有效值之比的百分值表示，即

$$DFU = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (U_n)^2}}{U_1} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中： U_n ——第 n 次谐波电压有效值(V)；

U_1 ——基波电压有效值(V)。

水利电力部 1984 年颁布的《电力系统谐波管理暂行规定》规定的谐波电压极限值见表 1-5。

表 1-5 电网电压正弦波形畸变率极限值(相电压)

用户供电电压 (kV)	总电压正弦波形 畸变率极限值(%)	各奇、偶次谐波电压正弦波形畸变率极限值(%)	
		奇次	偶次
0.38	5.0	4	2.00
6 或 10	4.0	3	1.75
35 或 63	3.0	2	1.00
110	1.5	1	0.50

(4) 负序电压系数:表示三相电压不平衡的程度。通常以三相基波负序电压有效值与额定电压有效值之比的百分值表示,即

$$K_{2u}\% = \frac{U_{2(1)}}{U_N} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中: U_N —— 额定电压有效值(V);

$U_{2(1)}$ —— 基波负序电压有效值(V)。

$$U_{2(1)} = \sqrt{\frac{1}{12} \left[\left(\sqrt{3} U_{AB(1)} - \sqrt{4U_{BC(1)} - \left(\frac{U_{BC(1)}^2 - U_{CA(1)}^2}{U_{AB(1)}} - U_{AB(1)} \right)^2} \right)^2 + \left(\frac{U_{BC(1)}^2 - U_{CA(1)}^2}{U_{AB(1)}} \right)^2 \right]} \quad (1-4)$$

式中: $U_{AB(1)}, U_{BC(1)}, U_{AC(1)}$ —— 基波三相线电压实际值(V)。

三相电压不平衡是三相负荷不平衡引起的。三相不平衡电压施加在用电设备上,会使电机增加阻尼力矩,增加转子中的损耗,造成电机温升增高,噪声加大。目前,我国对三相电压不平衡的负序电压系数尚未作出规定。国际发供电联盟(协会)(UNIPED)规定负序电压系数不超过2%。

(5) 频率偏差:供电电源频率缓慢变化的现象,通常以实际频率与额定频率之差或其差值 Δf 与额定值之比的百分值表示。

我国电力系统的额定频率为50Hz,正常运行的电力系统的频率应经常保持额定值。在3000MW及以上的系统,其允许偏差不得超过 ± 0.2 Hz;在不足3000MW的系统,其值不得超过 ± 0.5 Hz。3000MW及以上系统电钟在任何时间的偏差不应大于 ± 30 s;不足3000MW的系统不应大于 ± 1 min。

3. 降低发供电成本

发电厂的经济运行,电力系统的合理调度和最优控制,输配电过程中电能损耗的降低等措施,都会降低发、供电成本,提高经济效益。

4. 保证电力系统安全运行

电力系统的安全运行不仅涉及自身的经济效益,同时电力系统的安全运行与否直接影响大范围的电力用户可靠供电和经济效益及社会效益,电力系统的安全是考核一个供电系统的重要指标

二、电力系统的额定电压

额定电压是根据技术经济上的合理性、电气设备制造工业水平和发展趋势等多种因素而制订的,各种电气设备在额定电压下运行时,能获得最经济的效果。我国规定的额定电压可分为两大类:

1. 低于3kV的设备与系统的额定电压

此类额定电压包括三相与单相交流及直流三种。受电设备的额定电压与系统的额定电压是一致的。供电设备的额定电压,系指电源(蓄电池、直流发电机、变压器的二次绕组等)的额定电压。直流电压为平均值,交流电压则为有效值。

直流系统100V以下的额定电压,受电设备与供电设备相同;对受电设备为110V,220V,440V的系统,供电设备的额定电压分别为115V,230V和460V。

2. 3kV及以上交流系统与设备的额定电压

发电机额定电压比同级电网的额定电压高出5%；直接与发电机相联的升压变压器一次绕组的额定电压，与发电机的额定电压相同。当变压器不与发电机相联而与线路(或变电所母线)相接时，变压器一次绕组的额定电压与线路的额定电压相同。

电力变压器二次绕组的额定电压分为两种情况：当变压器二次侧供电线路较长时，由于变压器满载时二次绕组本身的电压降约占5%，所以变压器二次绕组的额定电压应比供电线路的额定电压高出10%（相当于满载时二次侧电压比线路的额定电压高出5%）；如果供电线路不长(如低压线路或直接给用电设备供电的线路)，则仅需考虑变压器本身的电压降，变压器二次绕组的额定电压比线路的额定电压高出5%即可(表1-6)。

表 1-6 我国交流电网和电力设备的额定电压(kV)

	电网和用电设备额定电压	发电机额定电压	电力变压器额定电压	
			一次绕组	二次绕组
低 压	0.22/0.127	0.23	0.22/0.127	0.23/0.133
	0.38/0.22	0.40	0.38/0.22	0.40/0.23
	0.66/0.38	0.69	0.66/0.38	0.69/0.40
高 压	3	3.15	3.0及3.15	3.15及3.3
	6	6.3	6.0及6.3	6.3及6.6
	10	10.5	10.0及10.5	10.5及11
	—	13.8,15,75,18,20	13.8,15,75,18,20	—
	35	—	35	38.5
	63	—	63	69
	110	—	110	121
	220	—	220	242
	330	—	330	363
500	—	500	550	
750	—	750	—	

注：斜线“/”左边数字为线电压，右边数字为相电压。

三、电力负荷的分类

电力负荷通常指用电负荷，一般有三种分类方法：一是按电力用户在国民经济中的部门分类，可分为工业用电负荷、农业用电负荷、交通运输用电负荷、照明及城市生活用电负荷等四类；二是按国民经济各个时期的政策和季节要求分类，可分为优先保证供电的重点负荷、一般性供电的非重点负荷、可以暂时限制或停止供电的负荷等三类；三是按电力用户对供电可靠性的要求分类，通常分为三级。三级负荷的区别和大致范围是：一级负荷，突然停止供电时，将造成人身伤亡，重大设备损坏，重要产品出现大量废品，引起生产混乱，重要交通枢纽、干线受阻，重要城市供水、通讯、广播中断等，因此而造成巨大经济损失或重大政治影响者。二级负荷，突然停止供电时，会引起严重减产、停工，生产设备局部破坏，局部地区交通阻塞，大部分城市居民的正常生活被打乱者。不在前两级负荷范围以内的都属于三级，此级负荷短时停电造成的损失较小。

一级负荷是最重要的电力用户，应有两个独立电源供电(如两个发电厂、一个发电厂

和一个地区电网、两个地区变电所等)。二级负荷应尽量有两回线路供电,且两回线路引自不同的变压器或母线段;确有困难时,允许由一回专用线路供电。三级负荷属于一般电力用户,可以用单回线路供电。

第二节 发电厂的生产过程

电力工业的生产能源种类很多,包括煤炭、石油、天然气、水力、核能、风力、潮汐、太阳能、地热、海洋波浪力等,其中以煤炭、水力和核能所占比例最大。以煤炭、石油、天然气等可燃物为原料的发电厂统称为火力发电厂,以水力为能源的称为水力发电厂,以核能为能源的称为核电厂(站)。

一、火力发电厂

火力发电厂按原动机类型的不同可分为汽轮机发电厂、蒸汽机发电厂、内燃机发电厂、燃气轮机发电厂等。目前,大容量的火力发电厂多为汽轮机发电厂,包括凝汽式和兼供供热式(简称热电厂)两种。现以凝汽式汽轮机发电厂为例,简要说明它的生产过程(图 1-2)。

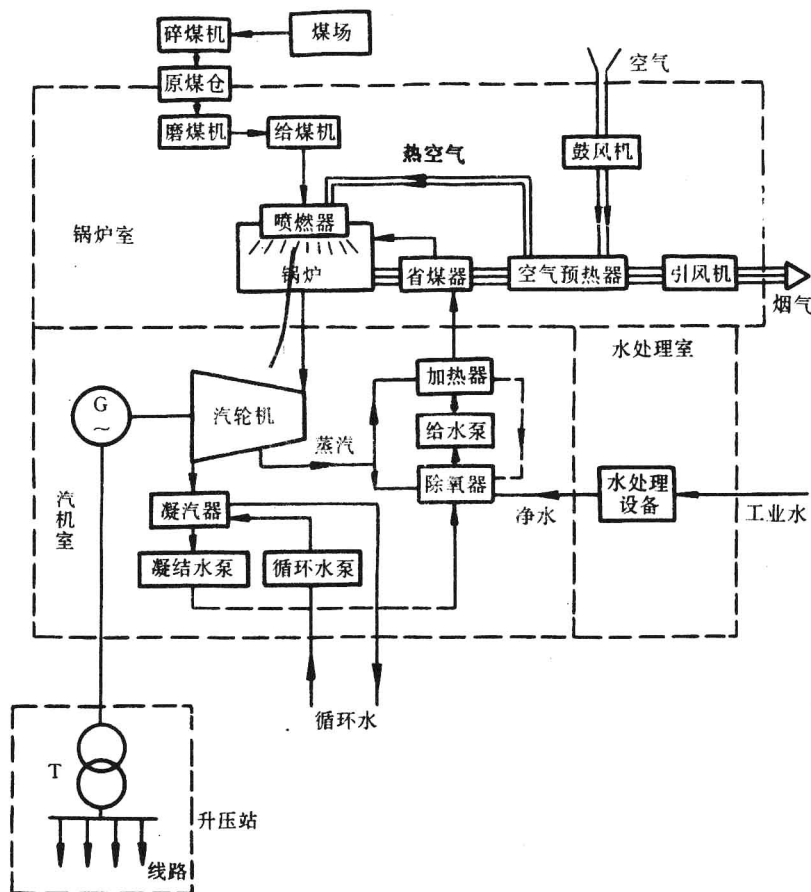


图 1-2 凝汽式汽轮机发电厂生产过程示意图

将煤从煤场送入碎煤机破碎后,由传送带送至原煤仓,再由磨煤机磨成煤粉送入煤粉仓内。煤粉由给煤机送至喷燃器,并由鼓(送)风机送来的热空气将煤粉吹入炉膛内燃烧。热空气是由置于烟道中的空气预热器加热的,这样既能提高炉膛温度,又能减小烟气的热损失。

供给锅炉用的水必须洁净,以便尽量减少水垢和对水管的腐蚀。给水进入锅炉前要预先加热(用汽轮机中段抽汽加热的加热器和置于烟道中的省煤器),并需对水进行化学处理(主要去掉水中的金属微量元素),然后给水再经除氧器去除氧等气体。在整个生产过程中,总有少量蒸汽和水被散失或用掉,因此应不断地注入补给水。给水在锅炉中加热变为蒸汽,由于炉膛温度很高,致使蒸汽在锅炉上部的过热器中加热成高温(可达 500℃以上)、高压(可达 9.8MPa 以上)的过热汽,并经管道送至汽轮机,推动汽轮机转子旋转而使同步发电机转子随之旋转发电。

高温、高压的过热蒸汽在汽轮机中变为定向的高速汽流,冲击汽轮机叶片而使转子旋转。蒸汽在汽轮机中逐级做功,而且体积膨胀得越来越大。从最后一级叶片出来的蒸汽温度和压力都很低了,于是通过凝汽器冷凝成水,并经凝结水泵送回给水系统继续使用。凝汽器利用大量的冷水循环,以便将汽轮机尾部排汽(俗称乏汽)的热量带走、散掉。

由上述生产过程可知,火力发电厂的热效率不高,一般不超过 40%。现代化大型供热式发电厂的综合热效率可达 60%~70%。

二、水力发电厂

水力发电厂将河水从上游(高水位)到下游(低水位)的位能转换为电能,水轮机是水力发电厂的原动机。水力发电厂的总发电功率可按下式估算:

$$P = \frac{1000QH}{102} \eta = 9.8QH\eta \quad (1-5)$$

式中: P ——水力发电厂的总发电功率(kW);

Q ——通过水轮机的水流量(m^3/s);

H ——水力发电厂水头(上下水位的落差)(m);

η ——水力发电厂的总效率,现代水力发电厂的 η 为 0.85~0.86。

由上式可知,当河水流量一定时,要想多发电,就必须有较高的水头。因此,常用人工方法修筑拦河坝形成水库,抬高上游水位,这种发电厂统称为堤坝式水力发电厂。另有一种径流式水力发电厂,适宜于建在水头小、水流急的河道段上,不需修筑大坝,水由管道引入水轮机即可,但它的发电量随水流情况而变化,不够稳定。还有一种抽水蓄能式水力发电厂,它有上、下两个水库,用上水库的水流经水轮机来发电,然后流入下水库,当电网负荷不紧张时,再用大型水泵将水从下水库抽到上水库储存起来。因此,这种水力发电厂主要用于电力系统调峰(调频)。

我国的水力资源约有 6 亿 kW,可开发利用的约为 3.7 亿 kW,居世界首位。因此,水力发电是一项大有发展前途的宏伟事业。

三、核电厂

质量为 1kg 的铀裂变时释放的能量相当于 2700t 的标准煤完全燃烧时放出来的能量。所以,核电厂是大有发展前途的。核反应堆相当于火力发电厂的锅炉,主要由核燃料、

慢化剂、冷却系统、控制调节系统、危急保安系统、反射体和防护层等部分组成,其他部分(汽轮机、发电机等)与火力发电厂基本相同。

除上述三种主要发电厂外,还有潮汐发电厂、地热发电厂、太阳能发电厂等,因发电机组容量不大,不再赘述。

第三节 电气设备的发热计算

电气设备运行中如果内部温度过高,会引起绝缘材料的加速老化,甚至发生热击穿。导体接触面的温度过高,会使接触面加剧氧化,并使接触电阻增大,甚至形成恶性循环而毁坏。为避免或减轻上述故障,需要研究导体的发热规律,以便把温度限制在规定范围之内。

一、发热计算的理论基础

根据能量守恒定律可知,物体在某一时间内产生的热量,等于它本身吸收的热量及向周围介质散失的热量之和,其热平衡方程式为

$$Pdt = Gc d\tau + K_{th} A d\tau t \quad (1-6)$$

或

$$\frac{d\tau}{dt} + \frac{K_{th} A}{Gc} \tau = \frac{P}{Gc}$$

式中: P ——物体的发热功率(W);

G ——物体的质量(kg);

τ ——物体的温升($^{\circ}\text{C}$);

c ——物体的比热容[W·s/(kg· $^{\circ}\text{C}$)];

K_{th} ——传热系数[W/($\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$)];

A ——物体的传热面积(m^2);

t ——物体的发热时间(s)。

解上式可求得温升 τ 为

$$\tau = Ce^{-t/T} + \frac{P}{AK_{th}} \quad (1-7)$$

式中: $T = \frac{Gc}{AK_{th}}$, 为物体发热时间常数(s);

C ——积分常数,取决于初始条件。

若 $t=0, \tau=0$, 则 $C = -\frac{P}{AK_{th}}$, 于是

$$\tau = \frac{P}{AK_{th}} (1 - e^{-t/T}) \quad (1-8)$$

如果 $t=0$, 而 $\tau=\tau_0$, 则

$$\tau = \frac{P}{AK_{th}} (1 - e^{-t/T}) + \tau_0 e^{-t/T} \quad (1-9)$$

由式(1-9)可知,当 $t = \infty$ 时,物体的温升将达到稳定值 τ_{st} (又称稳定温升),即

$$\tau_{st} = \frac{P}{AK_{th}} \quad \text{或} \quad P = K_{th} A \tau_{st} \quad (1-10)$$

式(1-10)又称牛顿公式,它说明在热稳定状态下物体产生的热量全部散失到周围介质中,物体本身不再继续吸热,其温升维持恒定。

如果将电气设备的电源切断,则表明切断了热源,即 $Pdt=0$,于是式(1-6)变为下式:

$$\frac{d\tau}{\tau} = -\frac{dt}{T}$$

将上式积分可得

$$\tau = Ce^{-t/T}$$

设电气设备由 $\tau=\tau_0$ 开始冷却,则

$$\tau = \tau_0 e^{-t/T} \quad (1-11)$$

由式(1-11)可知,当 $t=\infty$ 时, $\tau=0$,即电气设备的温度与周围环境的温度相同。但上述分析中没有涉及绝缘介质和铁磁元件对发热和散热过程的具体影响,而仅是用来说明电气设备发热和散热过程的基本规律。

二、工作制对电气设备发热计算的影响

从发热的角度出发,通常把电气设备分为四大类,即长期工作制、间断长期工作制、反复短时工作制和短时工作制。

1. 长期工作制

电气设备以较稳定的电流连续运行 8h 及以上者,属于长期工作制。这种电气设备的温升趋近稳定温升,可以按式(1-10)进行计算。一般计算时可参见有关资料确定传热系数 K_{th} ;若需比较精确地计算,可按具体条件通过试验确定 K_{th} 值。

2. 间断长期工作制

又称 8h 工作制。电气设备保持通过某一稳定电流足以达到平衡,但大于 8h,必须停电。8h 工作制是基本工作制,电器的额定发热电流即由此确定。

3. 短时工作制

这类电气设备通电运行时间短,不足以使其达到热平衡,而在两次通电间隔之间的无载时间是以使其温度恢复到与冷却介质相同的温度。短时工作制规定的标准值通电时间为 10min, 30min, 60min, 90min。图 1-3 中曲线 1 为电气设备在长期工作制下通过持续额定电流 I_N 时的温升曲线,稳定温升 τ_{st} 与设备的极限允许温升相当。曲线 2 为该设备在短时工作制下通过较大的工作电流 I_w 时的温升曲线,自然温升上升得较快(虚线为不断电时的情况,其稳定稳升为 τ'_{st})。

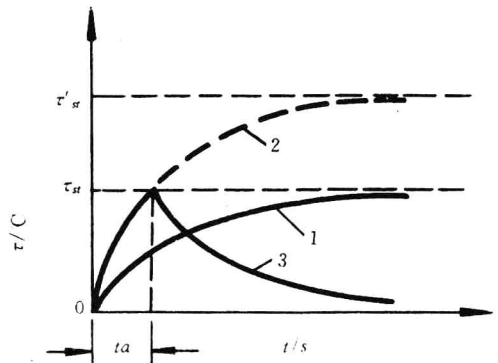


图 1-3 长期和短时工作制的设备温升曲线

由式(1-10)可知

$$I_w^2 R = K_{th} A \tau'_{st}, I_N^2 R = K_{th} A \tau_{st}$$

由上式可得