

高等学校试用教材

电力工程

青 岛 大 学 刘从爱
山东工业大学 徐中立 主编

机械工业出版社

高等学校试用教材

电 力 工 程

青 岛 大 学 刘从爱
山东工业大学 徐中立 主编



机 械 工 业 出 版 社

(京) 新登字054号

本书是全国电气技术专业的统编教材,也可用于电机、电器和电气自动化专业。全书分九章,内容包括电力工程基础理论:对称和不对称短路电流计算、110kV及以下输配电网络的设计计算;变电所一次系统、防雷接地、继电保护与自动装置、控制与信号回路的设计计算;负荷计算与一般照明、电气设备经济运行、功率因数补偿与节约用电;中小型发电厂电气部分设计与运行等,并附有变电所电气设计举例和常用电气设备技术数据及习题。

本书具有内容广泛精炼、重点突出、理论性和实用性较强等特点,可使学员较快地掌握一般输变电工程和工业企业供电的设计、运行与调试。本书也可作中等专业学校师生和电气工程技术人员参考书。

电 力 工 程

青 岛 大 学 刘从爱 主编
山东工业大学 徐中立

*

责任编辑:任锐贞 版式设计:王 颖
封面设计:郭景云 责任校对:熊天荣
责任印制:路 琳

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $22 \frac{1}{4}$ · 字数 543 千字

1992年10月北京第1版·1992年10月北京第1次印刷

印数 0,001—7,000 · 定价: 6.10元

*

ISBN 7-111-03239-X/TM·402 (课)

主要符号表

一、电气设备的文字符号

文字符号	中文名称	旧符号	文字符号	中文名称	旧符号
A	放大器	FD	KTS	跳闸位置继电器	TWJ
AM	磁放大器	FC	KU	冲击(信号脉冲)继电器	CJJ
APD	备用电源自动投入装置	BZT	KV	电压继电器	YJ
ARD	自动重合闸装置	ZCH	KZ	阻抗继电器	ZJ
AV	电压调节器	TV	L	电感、电感线圈、电抗器、 消弧线圈	L, DK
C	电容器	C	M	电动机	D
D	单稳态或双稳态元件	F	MD	直流电动机	ZD
EL	照明灯	D	MS	同步电动机	TD
F	过电压放电器件、避雷器	BL	N	绕组、线圈、中性线	W
FU	熔断器	RD	NFG	发电机励磁绕组	WLF
G	发电机、振荡器	F	NFGM	发电机励磁机的励磁绕组	WLL
GB	蓄电池	XD	PA	电流表	A
GM	励磁机	L	PE	保护导体、保护线	O
GN	绿色信号灯或指示灯	LD	PJ	电度表	Wh
GS	同步发电机	F	PJQ	无功电度表	WVAR
HA	声响指示器(蜂鸣器、电铃、 警铃等)	JL	PP	功率表	W VAR Q S
HL	指示灯、光字牌、信号灯	FD	PQ	无功功率表	V
K	继电器	GP	PS	同步表	K
KA	电流继电器	J	PV	电压表	ZK
KAC	加速继电器	LJ	Q	电力开关	DL
KB	闭锁继电器	JSJ	QA	自动开关	FK
KD	差动继电器	BJ	QF	断路器	DK
KFL	闪光继电器	CJ	QL	负荷开关	GL
KFR	频率继电器	SGJ	QK	刀开关	R
KG	气体(瓦斯)继电器	FJ	QS	隔离开关	HD
KH	热继电器、温度继电器	WJ	R	电阻、电位器、变阻器	Xt
KLB	跳跃闭锁继电器	RJ	RD	红色信号灯或指示灯	KK, ZK
KM	中间继电器、接触器	TBJ	S	电力系统	AN
KM ₀	继电保护出口中间继电器	ZJ	SA	控制开关、选择开关	B
KO	合闸接触器	BCJ	SB	按钮开关	LH
KP	功率继电器、极化继电器	HC	T	变压器	ZLH
KR	干簧继电器	GJ	TA	电流互感器	LH ₀
KS	信号继电器	GHJ	TAM	中间变流器	
KT	时间继电器	XJ	TA ₀	零序电流互感器	
		SJ			

(续)

文字符号	中 文 名 称	旧符号	文字符号	中 文 名 称	旧符号
TAV	电抗变压器	DKB	WH	白色信号灯	BD
TM	电力变压器	B	WL	灯光信号小母线、线路	DM
TP	自耦变压器	ZOB	WO	合闸电路电源小母线	HM
TV	电压互感器	YH	WS	信号电路电源小母线	SM
TVM	中间变压器	ZYH	WV	电压小母线	YM
U	变流器、整流器		X	接线柱、电抗	X
V	二极管、三极管、稳压管、晶 闸管、各种晶体管	D、BG、 WY、SCR	XB	连接片、切换压板	LP、QP
VC	整流桥	ZL、BZ	XT	端子板、端子排	
W	导线、母线、电缆	L、M	YA	电磁铁	
WAS	事故音响信号小母线	SYM	YE	黄色信号灯	WH
WB	辅助小母线	FM	YO	合闸线圈	HQ
WC	控制电路电源小母线	KM	YR	跳闸线圈、脱扣器	TQ
WF	闪光信号小母线	(+)KM	ZA ₀	零序电流过滤器	
WFS	预告信号小母线	YBM	ZAN	负序电流过滤器	FLG
			ZVN	负序电压过滤器	FYG

二、物理量下角标的文字符号

文字符号	中 文 名 称	旧符号	文字符号	中 文 名 称	旧符号
<i>a</i>	年, 有功	<i>n, r</i>	Cu	铜	Cu
<i>ac</i>	交流		<i>d</i>	差动, 差移, 偏差	<i>c, cd, pc</i>
<i>ad</i>	附加的	<i>fj</i>	<i>d</i>	需要, 基准	<i>x, j</i>
Al	铝	<i>Al</i>	<i>d</i>	直轴, 损耗	<i>d, x</i>
<i>al</i>	允许	<i>yx</i>	<i>da</i>	日, 天	<i>r</i>
<i>ar</i>	电弧	<i>dh</i>	<i>dec</i>	减小, 降低	<i>j</i>
<i>au</i>	阀型, 辅助	<i>f, fs</i>	<i>dc</i>	直流	
<i>av</i>	平均	<i>pj, p</i>	<i>dis</i>	放电	<i>fd</i>
<i>b</i>	平衡, 分支	<i>ph, f</i>	<i>dsq</i>	不平衡	<i>bh</i>
<i>ba</i>	基本	<i>jb</i>	<i>E</i>	地、接地	<i>jd</i>
		<i>f</i>	<i>e</i>	有效的、设备	<i>yx, s</i>
		<i>jd</i>	<i>ec</i>	经济	<i>j</i>
		<i>bs</i>	<i>ed</i>	电动、涡流	<i>d, w</i>
<i>C</i>	电容, 电容器	<i>C</i>	<i>em</i>	电磁	<i>dc</i>
CA	执行	ZX	<i>en</i>	助增	<i>z</i>
<i>c</i>	计算, 运算	<i>js</i>	<i>end</i>	端部	<i>d</i>
<i>c</i>	补偿, 顶棚	<i>bs</i>	<i>eq</i>	等效的	<i>dx</i>
<i>cab</i>	电缆	<i>L</i>	<i>es</i>	电动稳定	<i>dw</i>
<i>ch</i>	充电	<i>cd</i>	<i>ex</i>	熄灭、外部	<i>x, w</i>
<i>con</i>	配合	<i>ph</i>	<i>f</i>	反馈、励磁	<i>f, LC</i>
<i>cr</i>	横向, 临界	<i>h</i>	<i>fa</i>	故障	<i>g</i>

文字符号	中 文 名 称	旧符号	文字符号	中 文 名 称	旧符号
<i>fd</i>	灭磁	<i>mc</i>	<i>os</i>	振荡	<i>zd</i>
<i>FE</i>	熔体	<i>RT</i>	<i>p</i>	周期性的、保护的	<i>zq, b</i>
<i>Fe</i>	铁	<i>Fe</i>	<i>pk</i>	尖峰、峰值	<i>jf</i>
<i>fl</i>	浮动	<i>f</i>	<i>q</i>	交轴、无功功率	<i>q</i>
<i>fr</i>	摩擦	<i>m</i>	<i>qb</i>	速断	<i>sd</i>
<i>G</i>	发电机、电源	<i>F</i>	<i>QF</i>	断路器	<i>DL</i>
<i>g</i>	给定的	<i>g</i>	<i>r</i>	相对的、无功分量、反射	<i>q, f</i>
<i>h</i>	高	<i>g</i>	<i>re</i>	返回	<i>f, fh</i>
<i>he</i>	头部	<i>t</i>	<i>ARD</i>	重合闸	<i>ZCH</i>
<i>i</i>	输入、电流	<i>sr, i</i>	<i>ref</i>	折射	<i>z</i>
<i>inr</i>	间断	<i>jd</i>	<i>reg</i>	调节、调整	<i>t</i>
<i>ima</i>	假想的	<i>jx</i>	<i>rel</i>	可靠、裕度	<i>k, y</i>
<i>imp</i>	脉冲	<i>mc</i>	<i>rem</i>	残余	<i>cy</i>
<i>in</i>	感应、内部	<i>g, n</i>	<i>res</i>	制动	<i>zd</i>
<i>ins</i>	绝缘	<i>j</i>	<i>S</i>	系统	<i>xt</i>
<i>inv</i>	侵入	<i>q</i>	<i>S</i>	信号、小、短	<i>x</i>
<i>K</i>	继电器	<i>j, J</i>	<i>saf</i>	空气、安全	<i>k</i>
<i>k</i>	短路	<i>d, dl</i>	<i>sam</i>	同型	<i>tx</i>
<i>L</i>	负荷、负载、电感、导线	<i>fh, fz, L</i>	<i>set</i>	整定	<i>zd</i>
<i>l</i>	线、长度(距离)	<i>l</i>	<i>sh</i>	冲击	<i>ch, cj</i>
	闭锁、联锁	<i>bs</i>	<i>sp</i>	弹簧、特殊	<i>t, ts</i>
<i>lg</i>	纵向	<i>z</i>	<i>st</i>	稳定、起动	<i>qd, q</i>
<i>M</i>	电动机	<i>D</i>	<i>step</i>	跨步	<i>kb</i>
<i>m</i>	磁性、磁的、磁化、幅值	<i>C, m</i>	<i>su</i>	涌流	<i>y</i>
<i>man</i>	人、人工的	<i>r</i>	<i>sy</i>	整步	<i>zb</i>
<i>max</i>	最大的	<i>zd, max</i>	<i>T</i>	变压器	<i>B</i>
<i>min</i>	最小的	<i>zx, min</i>	<i>TA</i>	电流互感器	<i>LH</i>
<i>N</i>	额定、标称	<i>e</i>	<i>ta</i>	尾部	<i>w</i>
	线圈、绕组	<i>W</i>	<i>th</i>	热(继电器)	<i>r</i>
<i>n</i>	负序、数量、个数	<i>f, n</i>	<i>lou</i>	接触	<i>jc</i>
<i>nat</i>	自然的	<i>z</i>	<i>TR</i>	热脱扣器	
<i>nba</i>	非基本	<i>fjb</i>	<i>tr</i>	转移	<i>zy</i>
<i>np</i>	非周期	<i>fzq, fq</i>	<i>tu</i>	管型	<i>g</i>
<i>O</i>	输出	<i>sc</i>	<i>TV</i>	电压互感器	<i>YH</i>
<i>oc</i>	开路	<i>dl</i>	<i>ut</i>	利用(系数)	<i>l</i>
<i>OF</i>	跳闸	<i>tc</i>	<i>w</i>	接线、工作	<i>jx, g</i>
<i>oh</i>	架空线路		<i>W</i>	电缆、母线	<i>l, M</i>
<i>OL</i>	过负荷	<i>gh</i>	<i>WL</i>	线路	<i>XL</i>
<i>on</i>	合闸	<i>hc</i>	φ	相	φ
<i>op</i>	动作	<i>d, dz</i>	<i>0</i>	零、无、起始的、每(单位)、	<i>o</i>
<i>OR</i>	过流脱扣器	<i>TQ</i>		周围的	

88822

前 言

本书是根据全国电气技术专业教学指导委员会1988年上海会议上拟订并经1989年5月武汉会议上修订的《电力工程》课程教学基本要求,以及1989年8月上海会议上讨论通过的编写大纲进行编写的,是电气技术专业本科和专科共用的教学用书,亦可作为相近专业的教学用书。全书按80学时编写,各校可根据实际教学时数酌情增删。

电气技术专业是电工学科的一个宽口径的学科型专业,《电力工程》是该专业必修的主干课程之一,它安排在电工基础理论、电子技术基础、电机学等专业基础课之后讲授,旨在使学生掌握从事工业企业供电和地方电力工业生产必需的理论基础和专业技能,同时又为部分本科学生进一步选修电力类课程奠定必备的专业基础。因此,本课程具有“可上可下”的双重作用,横跨的专业面较宽,知识面较广,理论性和专业性均较强。

全书共分九章,在内容上紧紧围绕110kV及以下电压等级的发电、输变电和供用电工程。首先讲授电力工程常用的基本理论,然后阐述专业理论和专业知识,主要包括:地方电网规划和短路电流的分析计算、变电所常用高低压电器和电气主接线、电气控制和监测系统、继电保护和自动装置、过电压防护和接地系统、负荷计算和电气照明、重要电气设备的经济运行和工厂节电等等,最后附有110kV降压变电所电气部分课程设计举例和常用电气设备技术数据。每章后面均有复习思考题。

本书由青岛大学刘从爱教授和山东工业大学徐中立教授主编。刘从爱编写第五、七、九章和附录Ⅱ,徐中立编写第一、二、四、六章和附录Ⅰ的初稿,上海工程技术大学蔡玄章副教授编写第三、八章,刘从爱负责全书统稿。本书由上海大学工学院马国琳教授主审。

本书在编写过程中得到中国电工技术学会教育委员会、全国电气技术专业教育研究会和兄弟院校的大力支持与帮助,尤其是东南大学徐德淦教授曾提出不少宝贵意见。1990年夏天召开的该课程研讨会上,与会教师也提出了一些建设性意见,在此,谨表示衷心的感谢!

本书的图形和文字符号试用了新的国家标准,特请读者注意。

由于编者水平所限,加之新的国家标准刚开始实施,因此书中肯定会有不少错误和缺点,恳请使用本书的师生和广大读者批评指正。

编者

1991年8月

目 录

前言

主要符号表

第一章 电力工程基础1

§ 1-1 电力系统的一般概念.....1

§ 1-2 发电厂的生产过程.....4

§ 1-3 电气设备的发热计算.....6

§ 1-4 电气设备的电动力10

§ 1-5 开关电器的灭弧原理13

§ 1-6 电力系统中性点的运行方式19

复习思考题.....23

第二章 电力网24

§ 2-1 概述24

§ 2-2 电力线路的结构和电气参数26

§ 2-3 电压损失与功率损耗36

§ 2-4 电力网的功率分布40

§ 2-5 电力网无功功率的平衡与调整48

§ 2-6 导线截面选择51

复习思考题.....56

第三章 短路电流58

§ 3-1 概述58

§ 3-2 短路过程的分析58

§ 3-3 短路电流计算方法65

§ 3-4 对称短路的分析计算68

§ 3-5 不对称短路的分析计算74

§ 3-6 感应电动机对短路电流的影响85

§ 3-7 低压电网短路电流计算86

§ 3-8 短路电流的效应91

复习思考题.....97

第四章 变电所的一次系统.....100

§ 4-1 概述.....100

§ 4-2 高压电器.....101

§ 4-3 互感器.....108

§ 4-4 低压电器.....116

§ 4-5 电气主结线.....123

§ 4-6 电气设备的选择.....128

§ 4-7 变电所总体布置.....132

复习思考题137

第五章 变电所的二次系统.....139

§ 5-1 概述.....139

§ 5-2 继电器的基本工作原理.....145

§ 5-3 变电所的控制与信号回路.....151

§ 5-4 绝缘监察与测量表计.....157

§ 5-5 线路的电流电压保护.....162

§ 5-6 电网的方向电流保护.....170

§ 5-7 距离保护.....174

§ 5-8 电网的接地保护.....179

§ 5-9 电力变压器保护.....183

§ 5-10 电动机保护198

§ 5-11 电力电容器保护202

§ 5-12 变电所常用自动装置204

§ 5-13 变电所的操作电源209

复习思考题225

第六章 过电压防护、接地及电气安全.....228

§ 6-1 雷与防雷.....228

§ 6-2 接地与接零.....231

§ 6-3 内部过电压简介.....237

§ 6-4 电气安全.....240

复习思考题243

第七章 小型发电厂的电气部分.....244

§ 7-1 概述.....244

§ 7-2 发电机正常运行.....245

§ 7-3 发电机的并列操作.....247

§ 7-4 发电机励磁系统与电压自动调整.....251

§ 7-5 发电机的继电保护.....257

复习思考题265

第八章 电气负荷.....266

§ 8-1 负荷曲线.....266

§ 8-2 负荷计算.....268

§ 8-3 电气照明.....279

§ 8-4 高次谐波及其抑制.....288

复习思考题290

第九章 电气设备的经济运行.....291

IV

§ 9-1 电力变压器的经济运行.....	291	及FCD系列磁吹阀型	
§ 9-2 感应电动机的经济运行.....	299	避雷器(保护旋转电机	
§ 9-3 功率因数补偿.....	301	用)的电气特性.....	337
§ 9-4 电力电容器与无功补偿.....	304	表附Ⅱ-20 GX系列管型避雷器的	
§ 9-5 企业节电与电价.....	308	结构数据和电气特性.....	337
复习思考题	311	表附Ⅱ-21 自动开关基本技术数据.....	338
附录.....	313	表附Ⅱ-22 低压熔断器基本技术	
附录Ⅰ 110kV降压变电所电气部分		数据.....	339
初步设计举例	313	表附Ⅱ-23 YY型电力电容器主要	
附录Ⅱ 常用电气设备技术参数摘要	328	技术数据.....	339
表附Ⅱ-1 标准型同步发电机技术		表附Ⅱ-24 支柱式绝缘瓷瓶和绝缘	
参数	328	瓷套管技术数据.....	340
表附Ⅱ-2 SL ₇ 系列铝绕组低损耗		表附Ⅱ-25 测量仪表和继电器电流	
电力变压器技术数据	329	线圈的负荷值.....	340
表附Ⅱ-3 常用SFL ₇ 系列风冷铝芯		表附Ⅱ-26 测量仪表和继电器电压	
三相双绕组电力变压器		线圈消耗容量.....	341
技术数据	329	表附Ⅱ-27 DL-20(30)系列电流	
表附Ⅱ-4 SLZ ₇ 系列低损耗有载调压		继电器技术数据.....	342
电力变压器技术数据	330	表附Ⅱ-28 GL-10型过电流继电器	
表附Ⅱ-5 三相三绕组电力变压器		整定数据.....	342
技术数据	330	表附Ⅱ-29 DY-20(30)系列电压	
表附Ⅱ-6 高压少油断路器技术数据	331	继电器技术数据.....	342
表附Ⅱ-7 高压多油断路器技术数据	331	表附Ⅱ-30 DS-20(30)系列时间	
表附Ⅱ-8 隔离开关技术数据	331	继电器技术数据.....	343
表附Ⅱ-9 高压负荷开关技术数据	332	表附Ⅱ-31 DZ-30 系列等中间	
表附Ⅱ-10 高压熔断器技术数据.....	332	继电器技术数据.....	343
表附Ⅱ-11 户外跌落式高压熔断器		表附Ⅱ-32 DX-11型信号继电器	
技术数据.....	333	技术数据.....	343
表附Ⅱ-12 Y 系列电动机技术数据.....	334	表附Ⅱ-33 裸铜、铝及钢芯铝绞线	
表附Ⅱ-13 电流互感器技术数据.....	334	的允许载流量.....	344
表附Ⅱ-14 LMJ-10型电流互感器		表附Ⅱ-34 裸导体载流量的温度	
技术数据.....	335	校正系数.....	344
表附Ⅱ-15 LCW型电流互感器技术		表附Ⅱ-35 TJ型裸铜绞线的电阻和	
数据.....	335	电抗.....	344
表附Ⅱ-16 电压互感器技术数据.....	336	表附Ⅱ-36 LJ 型裸铝绞线的电阻和	
表附Ⅱ-17 NKL型铝电缆水泥电抗器		电抗.....	345
技术数据.....	336	表附Ⅱ-37 LGJ型钢芯铝绞线的电阻	
表附Ⅱ-18 FZ系列普通阀型避雷器		和电抗.....	345
的电气特性(发电厂和		表附Ⅱ-38 ZLQ, ZLQ ₁ , ZLL型油浸	
变电所用)	337	纸绝缘铝芯电力电缆在	
表附Ⅱ-19 FS系列普通阀型避雷器		空气中敷设时允许载流	
(低压配电和电缆头用)		量	345

表附Ⅱ-39 ZLQ₂, ZLQ₃, ZLQ₅ 型

油浸纸绝缘电力电缆埋

地敷设时允许载流量 346

表附Ⅱ-40 电缆埋地多根并列时的

电流校正系数 346

表附Ⅱ-41 矩形导体的允许载流量

(交流量/直流量) 346

表附Ⅱ-42 土壤和水的电阻率

参考值 347

主要参考文献 347

第一章 电力工程基础

§ 1-1 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厂企业。因此，需要输送电能；电能被输送到城市和工厂企业之后，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）和用电设备组成的整体，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。至今为止，电能尚不能大量储存，所以电力系统生产和供应中的三大过程（发电、输变电和用电）是一次完成的，这是电力工业的显著特点。

图 1-1 所示为电力系统示意图。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。把许多发电厂连结成统一的电力系统，具有供电可靠性高、运行灵活性大、经济性高、电能质量好等很多优点，是电力工业发展的方向。

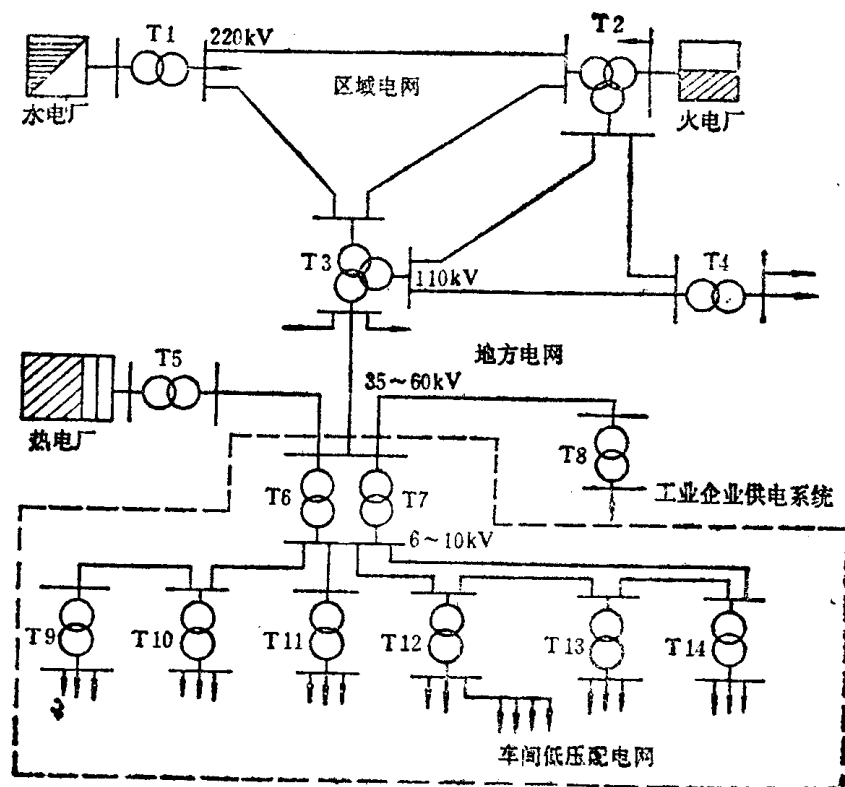


图 1-1 电力系统示意图

一、对电力系统的基本要求

1. 保证电能的质量标准

衡量电能质量的主要指标是电压、频率和波形，同时应保证足够的可靠性。

(1) 频率 我国的电力系统额定频率定为 50Hz，其偏差在 3000MW 及以上的系统不得超过 $\pm 0.2\text{Hz}$ ；在不足 3000MW 的系统不得超过 $\pm 0.5\text{Hz}$ 。同时规定，应保证电钟所示时间的准确性：3000MW 及以上系统，电钟在任何时间的偏差不应大于 $\pm 30\text{s}$ ；不足 3000MW 的系统，不应大于 $\pm 1\text{min}$ 。

(2) 电压 衡量电压的质量指标通常包括电压数值的偏移度、电压波动幅度和三相电压的对称性等内容。

1) 电压偏移度 电压偏移是指电力系统任一点（一般指终端）的实际电压与该系统额定电压的代数差，它与额定电压的百分比值通常称为电压偏移度。输电线路总是有电压损失的，为防止电压偏移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（见表1-1），常用电气设备端电压的允许电压偏移度见表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移度的允许值

设 备 名 称	允许电压偏移度 (%)	设 备 名 称	允许电压偏移度 (%)
电动机		照明灯	
正常情况下	± 5	要求高的场所	$+5 \sim -2.5$
特殊情况下	$+5 \sim -10$	一般场所	± 5
		事故、道路等	$+5 \sim -10$

2) 电压波动幅度 电压波动是电力系统电压的瞬时快速变动，通常多是由负荷的急剧变动引起的，例如大型电动机起动，电焊设备工作，电弧炉等冲击性负荷。电压波动的允许值，《工厂电力设计技术规程》规定：对经常起动的电动机，不应大于 10%；不经常起动的电动机，不应大于 15%。如果电动机能保证生产机械要求的起动转矩，且在系统中引起的电压波动不致破坏其他用电设备工作时，电压波动允许大于 15%。照明负荷对电压波动比较敏感，频繁电压波动会刺激人的眼睛，我国目前尚未具体规定照明负荷电压波动的允许值和单位时间允许波动的次数。

三相电压的对称性，在 6~10kV 及以上的高压系统是不成问题的，因为三相负荷基本对称。对于 380/220V 的低压系统，则应特别注意调整各相的分配负荷，尽量使三相电压基本平衡。

(3) 波形 凡是电压与电流成非线性关系的电气元件（例如日光灯、电弧炉、电焊设备、变压器励磁电流、晶闸管整流电源等），都是电力系统高次谐波电流或电压的来源，所以通常的交流电源不是理想的正弦波形，需要采取措施加以扼制。

2. 保证供电的可靠性

电力系统的计划外停电将给工业生产造成很大损失，对人民生活也带来不便，甚至会给社会秩序造成混乱。长期连续供电是电力系统的重要任务。

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。

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、电气设备制造工业的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110、220、440V的系统，供电设备的额定电压分别为115、230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，详见表1-3。

表1-3 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	0.4 /0.23
	0.66/0.38	0.69	0.66/0.38	0.69/0.40
高 压	3	3.15	3 及 3.15	3.15 及 3.3
	6	6.3	6 及 6.3	6.3 及 6.6
	10	10.5	10 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，下面重点说明这三级负荷的区别和大体范围。

(1) 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。

(2) 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。

(3) 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；特别重要的电力用户，应有两个独立电源点（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）供电。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。

§ 1-2 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，见图 1-2。

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，以便尽量减小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°C 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

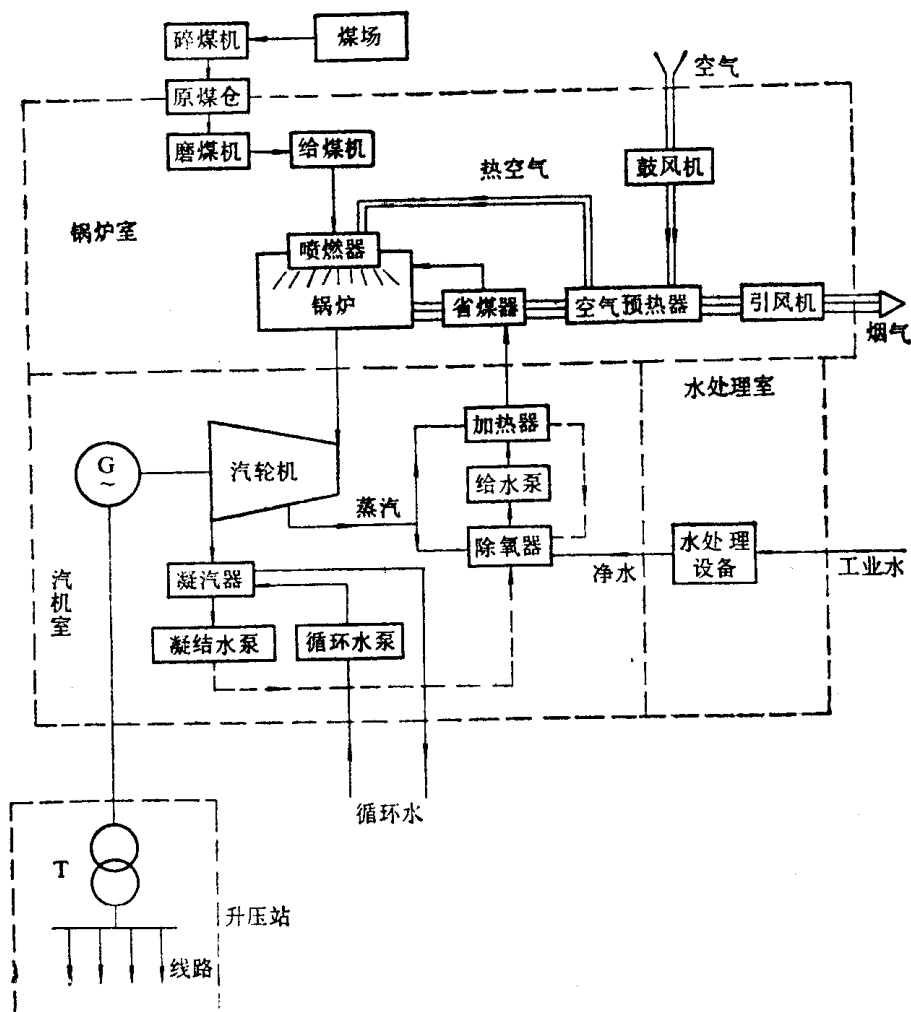


图1-2 凝汽式汽轮机发电厂生产过程示意图

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 η 是不高的，一般不超过40%。发电厂的热效率 η 可用下式表示

$$\eta = K \frac{W}{G} \quad (1-1)$$

式中 W ——某段时间内的发电量，单位为 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ；

G ——燃煤的重量，单位为 kg ；

$K = 1.143$ 电热当量与标准煤发热量的比值。

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：

$$P = \frac{1000QH}{102} \eta = 9.81QH\eta \quad (1-2)$$

式中 P ——水力发电厂的总发电功率, 单位为kW;

Q ——通过水轮机的水流量, 单位为 m^3/s ;

H ——水力发电厂的水头(上下水位的落差), 单位为m;

η ——水力发电厂的总效率。现代水力发电厂的 η 约为0.85~0.86。

由上式可知, 当河水流量一定时, 要想多发电, 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, 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2700 t 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。

§ 1-3 电气设备的发热计算

电气设备运行中如果内部温度过高, 会引起绝缘材料的快速老化损坏, 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, 热平衡方程式为

$$Pdt = Gcd\tau + K_{\text{th}}A\tau dt \quad (1-3)$$

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

式中 P ——物体的发热功率, 单位为W;

G ——物体的重量, 单位为kg;

τ ——物体的温升, 单位为 $^{\circ}\text{C}$;

c ——物体的比热容, 单位为 $\text{W}\cdot\text{s}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$;

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

A ——物体的传热面积, 单位为 m^2 ;

t ——物体的发热时间, 单位为 s 。

解上式可求得温升 τ 为

$$\tau = Ce^{-\frac{t}{T}} + \frac{P}{AK_{th}} \quad (1-4)$$

式中 $T = \frac{Gc}{AK_{th}}$ ——物体发热时间常数, 单位为 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

$$\tau = \frac{P}{AK_{th}}(1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (1-5)$$

如果 $t = 0$, 而 $\tau = \tau_0$, 则

$$\tau = \frac{P}{AK_{th}}(1 - e^{-\frac{t}{T}}) + \tau_0 e^{-\frac{t}{T}} \quad (1-6)$$

由式 (1-6) 可知, 当 $t = \infty$ 时, 物体温升将达到稳定值 τ_{st} (又称稳定温升), 即

$$\tau_{st} = \frac{P}{AK_{th}} \quad \text{或} \quad P = K_{th} A \tau_{st} \quad (1-7)$$

式 (1-7) 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 $P dt = 0$, 于是式 (1-3) 变为下式

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

将上式积分可得

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

设电气设备由 $\tau = \tau_0$ 开始冷却, 则

$$\tau = \tau_0 e^{-\frac{t}{T}} \quad (1-8)$$

由式 (1-8) 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 8 小时及以上者, 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 (1-7) 进行计算。一般计算时可参见有关资料确定散热系数 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 每次投入运行的时间约为 8 小时, 所以又称 8 小时工作制。由