

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等教育电气工程与自动化类“十一五”规划教材

供电技术

第4版

西安理工大学 余健明 同向前 苏文成 编



机械工业出版社

前言

《工厂供电》一书改为《供电技术》问世已近十年,根据十年来毕业后学生及读者的反馈,说明当时更名的思路是明晰的,培养方向是正确的。事实证明,本书叙述的是供电技术的基本原理、初步设计方法以及影响设计的部分运行知识,适用于各个行业和民用。如果按照本书前言中叙述的方法,联系实际,再加上在国内业已形成、从事本领域工作的、有经验的专家和学者的指导队伍,经过努力,电气工程及其自动化及相关专业的毕业学生完全能在供用电领域适应工作要求,从而为我国供用电事业发展和技术创新做出贡献。

十年来,社会转向市场经济,学生毕业后从事的工作,已不再是过去计划经济条件下分配的专业那样专一、对口。上岗后,担负的工作也可能在一定范围、一定时间内变动,学生随着工作经验的积累,要求考虑问题更深入、更全面。而本课程是培养各类用户电力设计应用方面的唯一课程,它的内容是用户与电力系统之间的桥梁。通过本书的学习,不仅增强了学生在电气专业领域就业的能力,同时对其他工程科技人员开拓视野、了解用电、抓好质量、节约电力、做好工作也是大有裨益的。它是符合市场经济条件、培养复合型通用人才要求的。

十年来,国内外电工技术不断进步,新技术、新器件广泛应用,设备装置的更新和标准化实施,节能化发展,以及由于用电范围扩大和设备容量增加引起的电能质量保证问题已为电力部门和用户所共同认知,因而相互了解、严格要求、理解协调以及采取改善措施的要求十分迫切。信息技术业已渗透到各个领域,如何满足适于用电特点的自动化、智能化,从而达到安全、可靠、灵活、经济的用电监控系统规范的制定也迫在眉睫,以上都使得本书的修订有了迫切的需要。

本书主要由三部分组成。前五章仍以用电系统的设计为主线,但不只停留在方法的罗列,而尽可能地阐明形成该方法的原理、原则及应用条件,以便读者对系统和设备能统筹兼顾,合理选用。在全面理解供用电系统的基础上,对电能质量问题作了较深入的分析,对解决途径也作了简要阐述。第七章则是根据作者近年的教学活动、学生所学相邻计算机课程的基本知识、用户变电所的实际,对供用电系统自动化的要点和要求加以初步的总结与叙述。

节电是节能的主要部分。无论是宏观的科学管理与推广,还是微观的具体节电技术,都需要全国人民的共同努力。特别是当前世界能源危机的情况下,节约用电更是用电工作者长期的、迫切的、重大的任务。由于在节电技术中,改进工艺与设备,采用新技术、新材料、新工艺,提高电能利用率等,都牵涉到广而深的各个技术层面和日常具体工作内容,因而本书只能从原则上作初步探讨。至于供用电系统本身的节电问题,将结合有关章节的内容分散在方案选择、设备选用、合理运行及降低损耗等中论述。

电气照明学近年以来发展很快,已形成具有科学技术与艺术相互结合的特点,成为牵涉到物理学、电工学、建筑学、结构学、心理学、生理学、人类工效学等方面的一个重要学科方面,特别是新型光源的研制和应用,人性化照明条件及照明环境的改进,美化城市及节约

电能的要求等,使它成为用电设计的一个重要组成部分。但本书篇幅有限,我们认为当前在学习《供电技术》的基础上尽可能开设相应的选修课还是更为合适的。

本书由西安理工大学余健明教授主编(编写第一、三、五、七章),同向前教授协编(编写第二、六章),段建东副教授参编(编写第四章)。写出前曾请苏文成教授协助提供创意,共同研究了编写大纲和目录,写出后统阅全书初稿,并撰写了再版前言。西安科技大学刘健教授、西北建筑工程设计研究院杨德才教授级高级工程师认真、详细地审阅了本版全部书稿,并提出了许多宝贵的建议,在此对他们的辛勤劳动谨致以衷心的感谢。合肥工业大学陆廷信教授曾为本书的前三版进行了深入的审查,为本书的再版修订打下了有利的基础,在此表示衷心的感谢。在本版的编写过程中参考、引用了国内外许多专家、学者的著作文献,王海燕同志参与了本版插图绘制和文字录入工作,李芳同志参与了本版教材的多媒体课件制作。在此一并表示衷心的感谢。

由于作者才识有限而用电知识浩如烟海,加之学时有限,错漏之处在所难免,尚盼批评指正。

编者

本书常用字符表

一、电气设备的文字符号

文字符号	中文含义	旧符号	文字符号	中文含义	旧符号
APD	备用电源自动投入装置	BZT	PJ	电能表	Wh, varh
ARD	自动重合闸装置	ZCH	PV	电压表	V
B	母线, 汇流排	M	Q	开关	K
C	电容器	C		低压断路器	ZK
F	避雷器	BL	QF	断路器	DL
FU	熔断器	RD	QK	刀开关	DK
G	发电机、电源	F	QL	负荷开关	FK
HL	指示灯、信号灯	XD	QS	隔离开关	GK
K	继电器	J	R	电阻	R
KA	电流继电器	LJ	SA	控制开关	KK
KG	气体继电器	WSJ		选择开关	XK
FR	热继电器	RJ		按钮	AN
	或温度继电器	WJ	T	变压器	B
KL	闭锁继电器	JRJ	TA	电流互感器	LH
KM	中间继电器	ZJ	TAN	零序电流互感器	LLH
	接触器	JC、C	TV	电压互感器	YH
KO	合闸接触器	HC	U	变流器	BL
KS	信号继电器	XJ		整流器	ZL
KT	时间继电器	SJ	V	二极管	D
KV	电压继电器	YJ		晶体管	BG
M	电动机	D		晶闸管	
N	中性线, 中性导体	N	XB	连接片	LP
PA	电流表	A	YR	跳闸线圈(脱扣器)	TQ
PE	保护线、保护导体	—	YO	合闸线圈	HQ
PEN	保护中性线、保护中性导体	N			

二、物理量下角标的文字符号

文字符号	中文含义	旧符号	文字符号	中文含义	旧符号
a	年	n	re	返回	f
a	有功, 有效附加的	a	S	系统	XT
al	允许	Yx	sh	冲击	cj
av	平均	Pj	st	起动	q, qd
c	计算	js	sp	跨步	kp
d	需要	x	T	变压器	B
ql	平衡		t	时间	t
dql	不平衡	bp	TA	电流互感器	LH
e, et	设备	S	tou	[人体]接触	jc
eq	等效的	dx	TV	电压互感器	YH
k	短路	d	a	吸收	a
LR	电感、电抗器	L	p	反射	p
L	负荷	H	θ	温度	θ
l	导线, 线路	l	τ	透射	τ
M	电动机	D	0	零, 无, 空, 停止, 每(单位)起	0
N	额定, 标称	e		始的, 周围的, 环境的	
op	动作, 整定	dz			
rl	实际的				

目 录

前言

本书常用字符表

第一章 绪论	1
第一节 电力系统的基本概念	1
第二节 用户供电系统的特点和决定供电质量的主要指标	4
习题	6
第二章 用户供电系统	7
第一节 电力负荷与负荷计算	7
第二节 供电电压与电源的选择	19
第三节 用户变电所	23
第四节 变电所的电气主接线	29
第五节 变电所的二次接线	36
第六节 高低压配电网	43
第七节 用户供电系统的电能损耗与节约	52
第八节 供电系统的方案比较	57
习题	58
第三章 短路电流计算	61
第一节 概述	61
第二节 无限大容量电源系统供电时短路过程的分析	61
第三节 无限大容量电源条件下短路电流的计算方法	64
第四节 低压配电网中短路电流的计算	70
第五节 不对称短路电流的计算方法	72
第六节 感应电动机对短路电流的影响	77
第七节 供电系统中电气设备的选择及校验	78
习题	86
第四章 供电系统的保护	89
第一节 继电保护的基本概念	89

第二节 单端供电网络的保护	93
第三节 电力变压器的保护	103
第四节 低压配电系统的保护	110
第五节 供电系统的微机保护	116
习题	127
第五章 供电系统的保护接地与防雷	129
第一节 供电系统的保护接地	129
第二节 供电系统的防雷保护	141
习题	151
第六章 供电系统的电能质量与无功补偿	153
第一节 电能质量概述	153
第二节 电压偏差及其调节	155
第三节 电压波动和闪变及其抑制	159
第四节 电力谐波及其抑制	171
第五节 供电系统的三相不平衡	185
第六节 供电系统的无功功率补偿	189
习题	198
第七章 供电系统变电所的自动化	200
第一节 概述	200
第二节 变电所自动化系统的基本功能	200
第三节 变电所综合自动化系统的结构	203
第四节 备用电源自动投入装置	206
第五节 自动重合闸装置	207
第六节 变电所的电压、无功综合控制	209
第七节 中性点不接地系统单相接地自动选线装置	211
第八节 电力负荷管理与控制	213
习题	217
附录	219
参考文献	235

第一章 绪 论

电能是能源的主要组成部分，它与其他能源比较，易于转化，输配简单，便于调节测量、准确控制。因此，保证可靠、安全、经济、高质量的供电，对工农业生产与人民生活影响很大。合理用电已成为目前的当务之急。

第一节 电力系统的基本概念

一、电力系统的构成

如图 1-1 所示，电力系统由各种不同类型的发电厂、输配电网及电力用户组成。它们分别完成电能的生产、输送、分配及使用。

在目前的电力系统中，主要的发电厂为以煤、石油和天然气作为燃料的火力发电厂、利用水力发电的水力发电厂和利用核能发电的原子能发电厂。此外，利用可再生能源的风能、太阳能、地下热能和潮汐能发电也在不断发展与研究中，有的已具有一定的规模。

输电网络的作用是将各个发电厂通过高压（如 220kV、330kV、500kV 甚至 750kV）线路相互连接，使所有同步发电机之间并列运行，并同时将发电厂发出的电能送到各个负荷中心。由于每条线路输送功率大小以及传输距离不同，在同一个输电网络中可能需要采用几种不同等级的电压，这就要求在输电网络中采用各种不同容量的升、降压变电所。电能传输的方式分为交流输电和直流输电两种形式。

电力用户包括工业、农业、交通运输等国民经济各个部门以及市政和人民生活用电等。

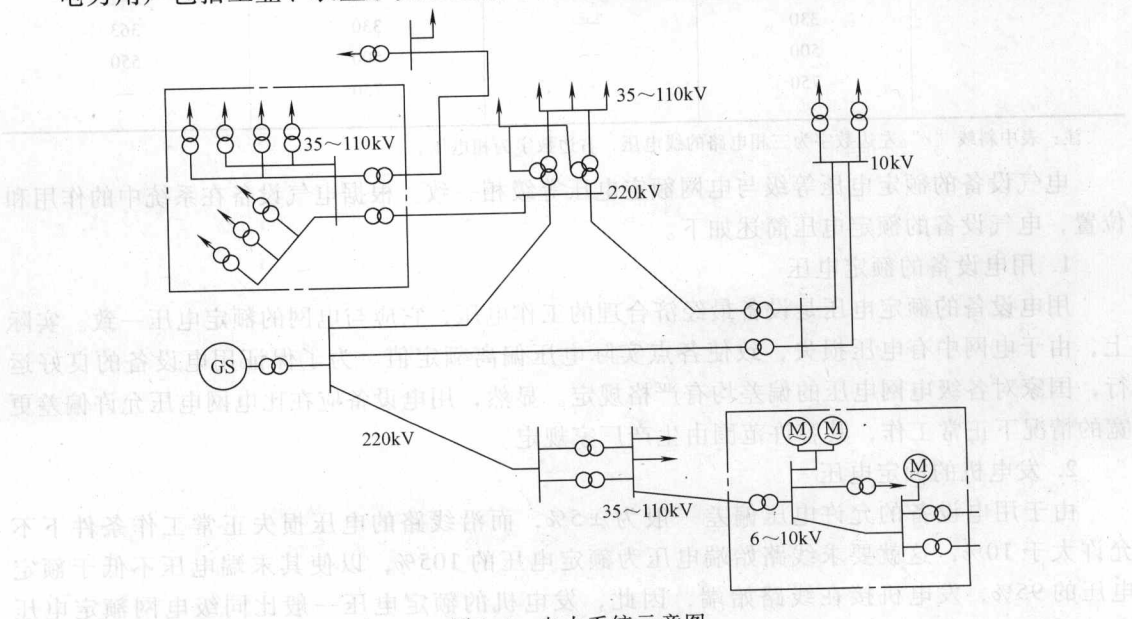


图 1-1 电力系统示意图

随着对用电量和供电质量的要求不断提高，电力系统规模日益扩大。组成大型电力系统的优点有：

- 1) 发电量不受地方负荷的限制，可以增大单台机组容量，充分利用地方自然资源，提高发电效率，降低电能成本。
- 2) 充分利用各类发电厂的特点，合理地分配负荷，使系统能保持在最经济的条件下运行。
- 3) 在减少备用机组的情况下，能提高对用户供电的可靠性。

二、电网的额定电压

电网的额定电压等级是根据国民经济发展的需要、技术经济的合理性以及电气设备的制造水平等因素，经全面分析论证，由国家统一制定和颁布的。我国公布的交流电网和电气设备的额定电压如表 1-1 所示。

表 1-1 我国交流电网和电气设备的额定电压

	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/V	220/127	230	220/127	230/133
	380/220	400	380/220	400/230
	660/380	690	660/380	690/400
高压/kV	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
	110	—	110	121
	220	—	220	242
	330	—	330	363
	500	—	500	550
	750	—	750	—

注：表中斜线“/”左边数字为三相电路的线电压，右边数字为相电压。

电气设备的额定电压等级与电网额定电压等级相一致。根据电气设备在系统中的作用和位置，电气设备的额定电压简述如下。

1. 用电设备的额定电压

用电设备的额定电压是设备最经济合理的工作电压，它应与电网的额定电压一致。实际上，由于电网中有电压损失，致使各点实际电压偏离额定值。为了保证用电设备的良好运行，国家对各级电网电压的偏差均有严格规定。显然，用电设备应在比电网电压允许偏差更宽的情况下正常工作，其容许范围由生产厂家规定。

2. 发电机的额定电压

由于用电设备的允许电压偏差一般为 $\pm 5\%$ ，而沿线路的电压损失正常工作条件下不允许大于 10% ，这就要求线路始端电压为额定电压的 105% ，以使其末端电压不低于额定电压的 95% ，发电机接在线路始端，因此，发电机的额定电压一般比同级电网额定电压高出 5% 。

3. 电力变压器的额定电压

变压器的额定电压分为一次和二次。对于一次额定电压,当变压器接于电网末端时,性质上等同于电网上的一个负荷(如用户降压变电所的变压器),故其额定电压与电网一致;当变压器接于发电机引出端时(如发电厂升压变压器),则其额定电压应与发电机额定电压相同,即比同级电网额定电压高出5%。对于二次侧额定电压,是指变压器的空载电压,考虑到变压器承载时自身电压损失(通常在额定工作情况下约为5%),变压器二次侧额定电压应比电网额定电压高5%;当二次侧输电距离较长时,还应考虑到线路电压损失(约5%),此时,变压器二次侧额定电压应比电网额定电压高10%。

三、电力系统的中性点运行方式

电力系统的中性点是指星形联结的变压器或发电机的中性点。其中性点运行方式可分为中性点有效接地系统和中性点非有效接地系统两大类。中性点有效接地系统即中性点直接接地系统,中性点非有效接地系统包括中性点不接地和中性点经消弧线圈(或电阻)接地,使接地电流被控制到较小数值的系统。

1. 中性点不接地系统

在正常运行时,各相对地电压 $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$ 是对称的,其值为相电压 U_ϕ ;各相对地电容相同(设线路单位长度电容为 C_0 ,线路长度为 l),电容电流对称且超前相电压 90° ,其值为 $I_{c0} = \omega C_0 l U_\phi$,故三相电容电流矢量和为零。但是,当发生一相接地故障时(如C相,见图1-2),故障相对地电压为零,非故障相对地电压将升高至原来相电压的 $\sqrt{3}$ 倍,而线电压在大小和相位上都没有变化。故障相对地电容被短接,非故障相由于对地电压的升高其电容电流升至原来电容电流的 $\sqrt{3}$ 倍,即 $I_{C(B)}^{(1)} = I_{C(A)}^{(1)} = \sqrt{3} \omega C_0 l U_\phi$ 。此时,流经故障点的电流 $\dot{I}_k^{(1)}$ 为非故障相A、B两相电容电流的矢量和 $\dot{I}_k^{(1)} = -\dot{I}_{C(C)}^{(1)} = \dot{I}_{C(B)}^{(1)} + \dot{I}_{C(A)}^{(1)}$,其有效值为 $I_k^{(1)} = \sqrt{3}(\sqrt{3} \omega C_0 l U_\phi) = 3I_{c0}$ 。

以上分析表明,中性点不接地系统发生单相接地故障时,线间电压不变,而非故障相对地电压升高到原来相电压的 $\sqrt{3}$ 倍,故障相电容电流增大到原来的3倍。因此,对中性点不接地系统应注意:

1) 电气设备对地绝缘要求必须按线电压数值来考虑。

2) 若单相接地电容电流超过规定值(6~10kV线路为30A,35kV线路为10A),会产生稳定电弧致使电网出现暂态过电压,危及电气设备安全。这时应采取中性点经消弧线圈(或电阻)接地的运行方式。

2. 中性点经消弧线圈接地系统

消弧线圈实际上是一个铁心可调的电感线圈,安装在变压器或发电机中性点与大地之间,如图1-3所示。当系统发生单相接地故障时,接地故障相与消弧线圈构成了另一个回路,接地电流中增加了一个感性电流 I_L ,它和装设消弧线圈前的电容电流方向相反,相互补偿,减小了接地点的故障电流,使电弧易于自行熄灭,从而提高了供电可靠性。

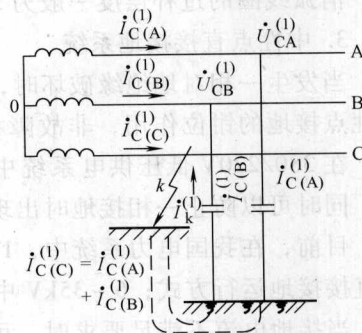


图1-2 中性点不接地系统
发生单相接地故障

设在图 1-3 中发生 C 相接地，中性点电压 $\dot{U}_0$ 变为 $-\dot{U}_C$ ，消弧线圈在 $\dot{U}_0$ 作用下产生电感电流 $\dot{I}_L = \frac{U_0}{j\omega L}$ 与流经故障点的电容电流 $\dot{I}_k^{(1)}$ 方向相反。

中性点经消弧线圈接地系统发生单相接地故障时，与中性点不接地的系统一样，非故障相电压仍升高 $\sqrt{3}$ 倍，三相导线之间的线电压仍然平衡。

电力系统经消弧线圈接地时，有三种补偿方式，即全补偿、欠补偿和过补偿。

全补偿方式 即 $I_L = I_k^{(1)}$ ，此时由于消弧线圈的感抗等于系统对地电容的容抗，系统将发生串联谐振，产生危险的高电压和过电流，可能造成设备的绝缘损坏，影响系统的安全运行。因此，一般系统都不采用全补偿方式。

欠补偿方式 即 $I_L \leq I_k^{(1)}$ ，此时接地点有未被补偿的电容电流流过，当系统运行方式改变而切除部分线路时，整个系统的对地电容电流将减少，有可能发展成为全补偿方式，从而出现上述严重后果，所以也很少被采用。

过补偿方式 即 $I_L \geq I_k^{(1)}$ ，在过补偿方式下，即使系统运行方式改变而切除部分线路时，也不会发展成为全补偿方式，致使系统发生谐振。因此，实际工程中大都采用过补偿方式。消弧线圈的过补偿度一般为 5% ~ 10%。

3. 中性点直接接地系统

当发生一相对地绝缘破坏时，即构成单相接地故障，供电中断，可靠性降低。但是由于中性点接地的钳位作用，非故障相对地电压不变，电气设备绝缘水平可按相电压考虑。此外，在 380/220V 低压供电系统中，采用中性点直接接地，因此可以减少中性点的电压偏差，同时可以防止一相接地时出现超过 250V 的危险电压。

目前，在我国电力系统中，110kV 及以上高压系统，为降低设备绝缘要求，多采用中性点直接接地运行方式；6 ~ 35kV 中压系统中，为提高供电可靠性，首选中性点不接地运行方式，当接地电流不满足要求时，可采用中性点经消弧线圈（或电阻）接地的运行方式；低于 1kV 的低压配电系统中，通常为中性点直接接地运行方式。

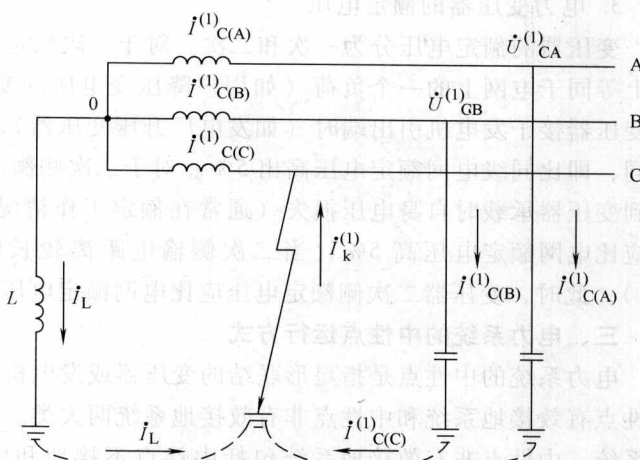


图 1-3 中性点经消弧线圈接地系统发生单相接地故障

第二节 用户供电系统的特点和决定供电质量的主要指标

一、用户供电系统的特点

用户供电系统由用户内部变配电所、供电线路和用电设备等组成，其中变配电所是电力系统的终端降压变配电所。对于某些大型工业企业，在可靠性要求或技术经济比较合理时，

也可建立自备发电站。

用户供电系统的供电电压一般在 110kV 以下。

二、决定供电质量的主要指标

决定用户供电质量的指标为电压、频率和可靠性。

1. 电压

理想的供电电压应该是幅值恒为额定值的三相对称正弦电压。由于供电系统存在阻抗、用电负荷的变化和用电负荷的性质（如冲击性负荷、非线性负荷）等因素，实际供电电压无论是在幅值上、波形上还是三相对称性上都可能与理想电压之间存在着偏差。

(1) 电压偏差 电压偏差是指电网实际电压与额定电压之差。实际电压偏高或偏低对用电设备的良好运行都有影响。我国对用电单位的供电额定电压及容许偏差规定：

35kV 及以上供电电压：电压正、负偏差绝对值之和为 10%；

10kV 及以下三相供电电压： $\pm 7\%$ ；

220V 单相供电电压： $+7\%$ ， -10% 。

(2) 电压波动和闪变 电网电压幅值（或半周波方均根值）的连续快速变化称为电压波动。由电压波动引起的灯光闪烁对人眼脑产生的刺激效应称为电压闪变。如电弧炉等大容量冲击性负荷运行时，剧烈变化的负荷电流将引起送电线路压降的变化，从而导致连接该设备的电网母线上发生电压波动。电压波动不仅引起灯光闪烁，还会使电动机转速脉动、电子仪器工作失常等。

(3) 高次谐波 电网电压波形发生非正弦畸变时，电压中出现高次谐波。高次谐波的产生，除电力系统自身背景谐波外，在用户方面主要由大功率变流设备、电弧炉等非线性用电设备所引起。高次谐波的存在将导致供电系统能耗增大、电气设备尤其是静电电容器过电流及绝缘老化加快，并会干扰自动化装置和通信设施的正常工作。

(4) 三相不对称 三相电压不对称指三个相电压在幅值和相位关系上存在偏差。三相不对称主要由系统运行参数不对称、三相用电负荷不对称等因素引起。供电系统的不对称运行，对用电设备及供配电系统都有危害，低压系统的不对称运行还会导致中性点偏移，从而危及人身和设备安全。

2. 频率

一个交流电力系统只能有一个频率。我国规定的电力系统标称频率（俗称工频）为 50Hz。国际上标称频率有 50Hz 和 60Hz 两种。

当电能供需不平衡时，系统频率便会偏离其标称值。频率偏差不仅影响用电设备的工作状态、产品的产量和质量，而且影响电力系统的稳定运行。

大多数国家规定频率偏差在 $(\pm 0.1 \sim \pm 0.3)\text{Hz}$ 之间。在我国，300 万 kW 以上的电力系统频率偏差规定为 $\pm 0.2\text{Hz}$ ；而 300 万 kW 以下的小容量电力系统，其频率偏差规定为 $\pm 0.5\text{Hz}$ 。我国一些大区电力系统已有能力保持正常频率偏差为 $\pm 0.1\text{Hz}$ 。

3. 可靠性

供电可靠性指供电系统持续供电的能力，应根据负荷等级来保证供电系统的可靠性。

衡量供电系统供电可靠性的主要指标有：

(1) 供电可靠率 在统计期间内，对用户平均用电时间总小时数与统计期间小时数的

比值。即

$$\text{供电可靠率} = \left(1 - \frac{\text{用户平均停电时间}}{\text{统计期间时间}} \right) \times 100\% \quad (1-1)$$

(2) 用户平均停电时间 用户在统计期间内的平均停电小时数。即

$$\text{用户平均停电时间} = \frac{\sum (\text{每次停电持续时间} \times \text{每次停电用户数})}{\text{总供电户数}} \quad (1-2)$$

(3) 用户平均停电次数 用户在统计期间内的平均停电次数。即

$$\text{用户平均停电次数} = \frac{\sum \text{每次停电用户数}}{\text{总用户数}} \quad (1-3)$$

(4) 用户平均故障停电次数 用户在统计期间内的平均故障停电次数。即

$$\text{用户平均故障停电时间} = \frac{\sum \text{每次故障停电用户数}}{\text{总用户数}} \quad (1-4)$$

用户供电系统作为电力系统的一个组成部分，必然要反映电力系统各方面的理论和要求，受到电力系统工作状况的影响和制约。但用户供电系统和电力系统又有所不同，它主要反映用户供电系统的特点和要求。近些年来由于能源紧缺、科技进步，故计划用电、节约用电、安全用电受到了普遍的重视，用户供电系统的讨论内容也较之过去更为广泛：如电能的合理经济利用；低耗能、高性能、安装维护便捷的新型电气设备及配电电器的选用；大型及特种设备的供电；占地面积小、灵活、安全的新型变电站结构；电能质量的改善与提高以及供电系统的自动化、智能化等应用技术问题迅速发展。所有这些，都与国民经济各部门的发展密切相关。随着改革的深入，将会更进一步地显示供用电学科的重要性。因此，培养、提高电气工程技术人员的供电、用电素质，是非常必要的。

习 题

- 1-1 试述电力系统的组成及各部分的作用。
- 1-2 电力用户供电系统中常用的额定电压等级有哪些？试述各种电气设备额定电压存在差别的原因。
- 1-3 统一规定各种电气设备的额定电压有什么意义？
- 1-4 电力系统中性点运行方式有几种？各自的特点是什么？
- 1-5 简述用户供电系统供电质量的主要指标及其对用户的影响。
- 1-6 试分析中性点不接地系统中发生单相接地故障后，该系统的电压会发生什么变化？此时流经故障点的电流如何确定？
- 1-7 中性点经消弧线圈接地系统中，消弧线圈对容性电流的补偿方式有几种？一般采用哪一种？为什么？
- 1-8 简述用户供电系统的主要特点。
- 1-9 如图 1-4 所示的电力系统，标出变压器一、二次侧和发电机的额定电压。

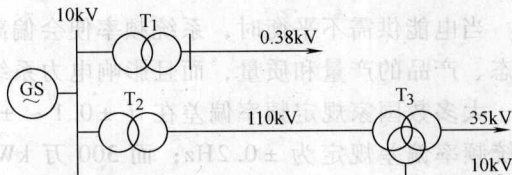


图 1-4 习题 1-9 图

第二章 用户供电系统

用户供电系统的基本设计目标是为各电力用户的生产活动和人民生活提供一个安全、可靠、合理、优质的供电环境。近年来，工业生产设备和与日俱新，自动化水平日益提高，商业用电和人民生活用电更是日益丰富，这些都对供电系统提出了更高的要求，也使得供电系统更加复杂。尽管不同用户的供电系统会因具体情况不同而异，但是电气设计的基本要素是相同的，它们包括：

- 1) 电力负荷及其计算。
- 2) 供电电压的选择与调整。
- 3) 电源（包括备用电源和应急电源）的选择。
- 4) 配电系统（包括变电所和配电网）的设计。
- 5) 供电系统的电能节约与电能质量控制。

掌握上述要素，再考虑到不同用户的具体情况加以灵活运用，则可以设计出满足用户要求的用户供电系统。

第一节 电力负荷与负荷计算

用电设备参数是用户供电系统设计的基础数据。通常，工厂动力用电设备的数目取决于生产过程，设备参数由生产工艺工程师和生产设备设计工程师提供。对于通常难以获得全面准确的用电负荷数据的用户，譬如商住建筑和居民生活用电，则可以根据建筑物的功能用途用统计数据来估计。

电力用户中所有用电设备额定功率之和并不能作为用户供电系统设计的依据。由于用电设备并非都同时工作或都同时工作于额定工况，用户总的电力需求必然小于单个设备额定功率之和。因此，需要通过负荷计算来确定能用于供电系统设计的计算负荷。

一、关于负荷的基本概念

1. 设备安装容量

设备安装容量 P_N （亦称设备功率）是指连续工作的用电设备铭牌上的标称功率 P_E 。但是，用电设备往往因工作性质不同而具有不同的运行工作制，这时，从供电安全性和经济性两方面来考虑，应按设备铭牌功率予以折算。用电设备工作制分为

(1) 连续运行工作制 此类用电设备的连续运行时间较长，通常不小于 10min。绝大多数用电设备都属于此类工作制，如通风机、压缩机、各种泵类、各种电炉、机床、电解电镀设备、照明等。此类设备的铭牌容量就作为设备安装容量。

(2) 短时运行工作制 此类用电设备的连续工作时间很短，但停歇时间相对很长。如金属切削机床用的辅助机械（横梁升降、刀架快速移动装置等）、水闸用电动机等，这类设备的数量很少。在计算包含短时工作制设备在内的一组用电设备的计算负荷时，若此类设备容量相对较小，则一般不予考虑。

(3) 断续周期工作制 此类设备有一定的运行周期 (小于 10min), 时而工作, 时而停歇, 反复运行。起重机用电动机、电焊用变压器等均属于此类。设备工作时间与工作周期之比称为负荷持续率 (FC), 通常用于表示此类设备的工作特征。

$$FC = \frac{t_g}{t_g + t_x} \times 100\% \quad (2-1)$$

式中 t_g ——工作时间;

t_x ——停歇时间;

$t_g + t_x$ ——工作周期, 不应超过 10min。

对于断续周期工作制的用电设备, 在参与成组设备的负荷计算时, 从发热的观点来看, 需将铭牌功率按下式换算成 $FC = 100\%$ 时的额定持续功率, 换算后的功率作为此类设备的安装容量。

对于电动机

$$P_{N.M} = P_E \sqrt{FC} \quad (2-2)$$

对于电焊变压器

$$S_N = S_E \sqrt{FC} \quad (2-3)$$

式中 FC ——铭牌负荷持续率;

P_E (S_E)——换算前的设备铭牌标称功率;

$P_{N.M}$ (S_N)——换算后的设备安装容量。

2. 负荷与负荷曲线

电力负荷是指单台用电设备或一组用电设备从电源取用的电功率, 包括有功功率、无功功率和视在功率。在生产过程中, 由于生产过程的变化或用电设备使用上的随机性, 实际负荷都是随着时间而变化的。电力负荷随时间变化的曲线称为负荷曲线。

根据负荷曲线绘制的时间长度, 负荷曲线可有工作班 (8h) 负荷曲线、日负荷曲线、周负荷曲线、月负荷曲线和年负荷曲线, 其中日负荷曲线和年负荷曲线最为常用。日负荷曲线表示在一天中一定时间间隔 Δt 内的平均负荷随时间的变化情况, 年负荷曲线表示全年负荷变动与负荷持续时间关系的曲线, 如图 2-1 所示。通常, 年负荷曲线是由不同季节典型日负荷曲线推算而来的。

在我国, 求计算负荷的日负荷曲线时间间隔 Δt 取为 30min。 Δt 的取值与导体的发热时间常数 τ 有关, 导体截面越大, 发热时间常数 τ 越大。由于中小截面 (35mm^2 以

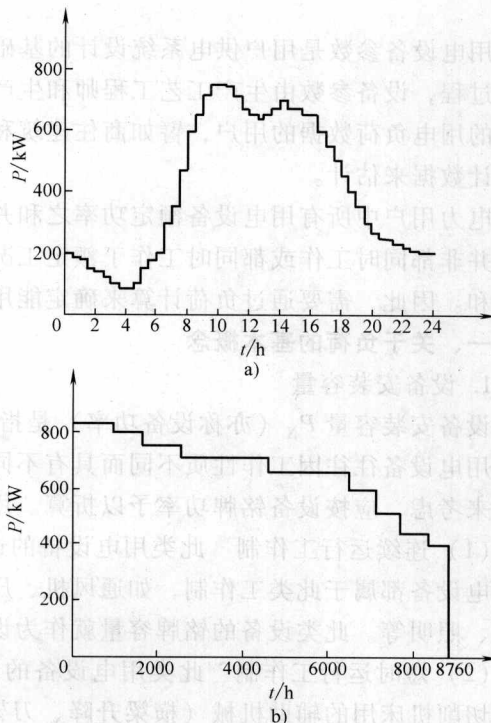


图 2-1 日负荷曲线与年负荷曲线

a) 日有功负荷曲线 b) 年有功负荷曲线

下) 导体的发热时间常数 τ 一般在 10min 左右, 而导体达到稳定温升需要 $(3 \sim 4)\tau$ 的时间, 因此时间间隔选为 30min 是合适的。

通过对负荷曲线的分析, 可以掌握负荷变化的规律, 并从中获得一些对电气设计和运行有指导意义的统计参数。

3. 平均负荷、最大负荷、有效负荷与计算负荷

(1) 平均负荷 P_{av} 平均负荷是指电力负荷在一段时间内的平均值。电力用户的年平均负荷 P_{av} 可由年电能消耗量与年工作时间之比来计算:

$$P_{av} = \frac{W_a}{T_{gz}} \quad (2-4)$$

式中 W_a ——年电能消耗量 ($\text{kW} \cdot \text{h}$);

T_{gz} ——年工作时间 (h), 若全年无间断工作, 则 $T_{gz} = 8760\text{h}$ 。

(2) 最大负荷 P_{max} 最大负荷是指一年中典型日负荷曲线 (全年至少出现 3 次的最大工作班负荷曲线) 中的最大负荷, 即 30min 内消耗电能最大时的平均负荷, 记作 P_{max} 或 P_{30} 。

(3) 有效负荷 P_e 有效负荷是指由典型工作班负荷曲线 (工作班时间为 T) 按下式计算所得的有效值:

$$P_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P^2 dt} \quad (2-5)$$

对同一负荷曲线而言, 有效负荷大于平均负荷而小于最大负荷。有效负荷是从等效发热的角度出发的, 因此也可作为电气设计的依据。

(4) 计算负荷 P_c 电力用户的实际负荷并不等于用户中所有用电设备额定功率之和, 这是因为

- 1) 并非所有设备都同时投入工作。
- 2) 并非所有设备都能工作于额定状态。
- 3) 并非所有设备的功率因数都相同。
- 4) 还应考虑用电设备的效率与配电设备的功率损耗。

因此, 在用户供电系统设计中, 必须首先找出这些用电设备的等效负荷。所谓等效是指用电设备在实际运行中对配电设备所产生的最大热效应与等效负荷产生的热效应相等, 或实际负荷产生的最大温升与等效负荷产生的温升相等。从等效的含义上讲, 前述“半小时最大平均负荷”就是等效负荷。

等效负荷可以作为供电系统设计和电气设备选择的依据。在供电系统设计中, 将等效负荷称为计算负荷 P_c 。因此, 对于已运行的电力用户而言, 计算负荷 P_c 就是该用户典型负荷曲线上的半小时最大平均负荷 P_{30} (或 P_{max}); 但对于筹建中的电力用户, 计算负荷 P_c 则是根据统计规律按照一定的计算方法计算得到的半小时最大平均负荷 P_{30} (或 P_{max}) 的假想值而已。

计算负荷是用户供电系统结构设计、供电线路截面选择、变压器数量和容量选择、电气设备额定参数选择等的依据, 合理地确定用户各级供电系统的计算负荷非常重要。计算负荷过高, 将增加供电设备的容量, 浪费有色金属, 增加建设投资。但若计算负荷过低, 供电系

统的线路及电气设备由于承担不了实际负荷电流而过热,影响供电系统的正常可靠运行,同时对工业生产、商贸活动和居民生活造成不良影响。

4. 负荷系数、利用系数、需要系数与形状系数

(1) 负荷系数 负荷系数是指平均负荷与最大负荷之比,它反映了负荷的平稳程度。负荷越平稳,则负荷系数越大。负荷系数常分为有功负荷系数 α 和无功负荷系数 β :

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{P_{av}}{P_{max}} \\ \beta &= \frac{Q_{av}}{Q_{max}} \end{aligned} \right\} \quad (2-6)$$

由于变压器和电机等设备在空载的情况下也需要一定的无功电流来建立工作磁场,而这部分无功功率基本不随有功负荷有无而变,因此,无功负荷曲线比有功负荷曲线变化平稳一些。通常,工业企业的有功负荷系数 $\alpha = 0.65 \sim 0.75$,无功负荷系数 $\beta = 0.70 \sim 0.82$;智能建筑的有功负荷系数 $\alpha = 0.35 \sim 0.80$,无功负荷系数 $\beta = 0.40 \sim 0.85$ 。

(2) 利用系数 利用系数是针对用电设备组而言的。利用系数 K_x 定义为用电设备组在最大负荷工作班内消耗的平均负荷 P_{av} 与该设备组的总安装容量 ΣP_N 之比,即

$$K_x = \frac{P_{av}}{\Sigma P_N} \quad (2-7)$$

对某一用电设备组,统计其在最大负荷工作班的耗电量,除以该工作班的时间,便可以求出在该工作班内的平均负荷。附录表 1 为部分用电设备组的利用系数 K_x 值。

(3) 需要系数 需要系数也是针对用电设备组而言的。需要系数 K_d 定义为用电设备组的最大负荷 P_{max} (或 P_{30}) 与该设备组的总安装容量 ΣP_N 之比,即

$$K_d = \frac{P_{max}}{\Sigma P_N} = \frac{P_{30}}{\Sigma P_N} \quad (2-8)$$

需要系数反映了计算负荷与设备安装容量之间的关系。由现有设备组、车间或工厂的负荷曲线得到的需要系数统计值,可以作为求取同类设备组、同类车间或同类工厂的计算负荷的参考依据。附录表 2 列出了各种类型用电设备组的需要系数值。

(4) 形状系数 形状系数也是针对用电设备组或用户整体而言的。形状系数 K_z 定义为有效负荷 P_e 与平均负荷 P_{av} 之比,即

$$K_z = \frac{P_e}{P_{av}} \quad (2-9)$$

形状系数与负荷的平稳程度有关。当负荷曲线无间断时, $1 \leq K_z < 1.5$ 。负荷越平稳, K_z 越小。一般情况下, K_z 值在 $1.05 \sim 1.25$ 之间。

5. 年最大负荷利用小时数 T_{max}

年最大负荷利用小时数 T_{max} 是这样—个假想时间:电力负荷按照最大负荷 P_{max} 持续运行 T_{max} 时间所消耗的电能恰好等于该电力负荷全年实际消耗的电能 W_a 。如图 2-2 所示,年最大负荷 P_{max} 延伸到 T_{max} 的横线与两坐标轴所包围的矩形面积,恰好等于年负荷曲线与两坐标轴所包围的面积,即全年实际消耗的电能 W_a ,因此年最大负荷利用小时数为

$$T_{max} = \frac{W_a}{P_{max}} \quad (2-10)$$

附录表 3 列出了某些企业的年最大负荷利用小时数。

二、负荷估算

负荷计算需要知道电力用户中所有用电设备的功率、工作性质、地理位置以及设备组的组成情况。但是，在工业企业或商住建筑的前期规划、可行性研究或初步设计阶段，还难以获得负荷计算所需要的基本数据，此时，多采用负荷估算的方法来初步估计用户的计算负荷，从而为供电电源的选择和供电系统的初步设计提供依据。

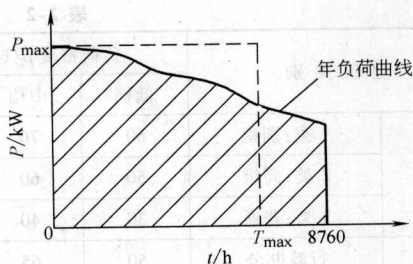


图 2-2 年负荷曲线和年最大负荷利用小时数

1. 单位产品耗电量法

工业企业的年耗电量与年产量直接相关。对于生产同类产品但产地和规模不同的车间或工厂，生产单台产品的耗电量具有统计规律上的相似性。表 2-1 列出了部分产品的单位产品耗电量的统计平均值。

表 2-1 单位产品的电能消耗量

标准产品	单位	单位产品耗电量 $\omega/\text{kW} \cdot \text{h}$	标准产品	单位	单位产品耗电量 $\omega/\text{kW} \cdot \text{h}$
有色金属铸件	1t	600 ~ 1000	变压器	1kV · A	2.5
铸铁件	1t	300	电动机	1kW	14
锻铁件	1t	30 ~ 80	量具、刃具	1t	6300 ~ 8500
拖拉机	1台	5000 ~ 8000	重型机床	1t	1600
汽车	1辆	1500 ~ 2500	纱	1t	40
静电电容器	1kvar	3	橡胶制品	1t	250 ~ 400

若已知某企业的产品和产量，查表可得该产品的单位产品耗电量 ω 和该类工厂的年最大负荷利用小时数 $T_{\max}$ ，进而按下式求出企业年电能需要量 W_a 和计算负荷 P_c ：

$$\left. \begin{aligned} W_a &= \omega n \\ P_c &= \frac{W_a}{T_{\max}} \end{aligned} \right\} \quad (2-11)$$

式中 ω ——单位产品耗电量；

n ——年产品数或年产量。

2. 负荷密度法

商住建筑的用电负荷常与建筑面积直接相关。对于具有相同功能、用途和档次的商住建筑，尽管建筑的规模不同，但单位建筑面积上的负荷密度具有统计规律上的相似性。表 2-2 列出了当前经济发展情况下各类建筑物的负荷密度和需要系数。

若已知建筑面积 A (m^2)，并查表得到同类建筑的负荷密度指标 ρ (W/m^2)，则计算负荷 P_c 可按下式求得：

$$P_c = \rho A \quad (2-12)$$

表 2-2 各类建筑物的用电指标

建筑类别		负荷密度 $\rho/(W/m^2)$			需要系数	备 注
		低档	中档	高档		
住宅	1类:别墅	60	70	80	0.35~0.50	家庭全电气化
	2类:高级	50	60	70		家庭基本电气化
	3类:普通	30	40	50		家庭有主要家电
公共设施	行政办公	50	65	80	0.70~0.80	办公楼、一般写字楼
	商业金融服务	70	100	130	0.80~0.90	金融、商业、旅馆
	文化娱乐	50	70	100	0.60~0.70	
	体育	30	50	80		
	医疗卫生	50	65	80		
	科教	45	65	80		
	文物古迹	20	30	40		
	其他	10	20	30		宗教活动、社会福利
工业企业	一类工业	30	40	50	0.30~0.40	高科技企业
	二类工业	40	50	60	0.30~0.45	一般工业企业
	三类工业	50	60	70	0.35~0.50	中型与重型工业企业
仓储	普通仓储	5	8	10		
	危险品仓储	5	8	12		
	堆场	1.5	2	2.5		
道路广场	道路	0.01	0.015	0.02		
	广场	0.05	0.10	0.15		
	停车场	0.03	0.05	0.08		

3. 形状系数法

用形状系数法估算计算负荷的具体步骤如下：

- 1) 将用电设备分组，求出各用电设备组的总安装容量。
- 2) 查出各用电设备组的利用系数及对应的功率因数，计算平均负荷：

$$\left. \begin{aligned} P_{av} &= \sum P_{av.i} = \sum (K_{x.i} P_{N.i}) \\ Q_{av} &= \sum Q_{av.i} = \sum (P_{av.i} \tan \varphi_i) \end{aligned} \right\} \quad (2-13)$$

3) 根据负荷的平稳程度，适当选择形状系数 K_z 的值（一般情况下可取 $K_z = 1.15$ ），按下式估计计算负荷：

$$\left. \begin{aligned} P_c &\approx P_e = K_z P_{av} \\ Q_c &\approx Q_e = K_z Q_{av} \end{aligned} \right\} \quad (2-14)$$

三、负荷计算

根据工艺和建筑设计等部门提供的用电设备及其安装容量确定计算负荷的工作称为负荷计算。负荷计算的理论依据是相似性原理，即性质相同、功能相近的用电设备组、生产车间或电力用户，其负荷曲线应相似，其负荷曲线的特征参数值（负荷系数、利用系数、需要