



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
“十三五”规划教材

TECHNOLOGY OF ELECTRIC POWER SUPPLY

供电技术

第5版

同向前 余健明 苏文成 等编

《供电技术》是“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‘十三五’规划教材”

供电技术

第5版

同向前 余健明 苏文成 等编

机械工业出版社

www.cmpbook.com

010-68995165

www.cmpbook.com

www.cmpbook.com

010-68995165

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材，是在《供电技术》（第4版）的基础上修订编写的。本版根据电工电能技术的发展、产品的更新、新标准的制定，阐明了供用电工程设计的基本原理和计算方法，对电能质量问题及其新型补偿设备做了较前版更为全面和深入的讨论，同时论述了近年来新兴的用户电力新技术。全书共分八章，包括用户供电系统设计，供电系统的短路电流计算、保护与自动装置、保护接地与防雷、电能质量、经济运行、用户电力新技术等。

本书可作为高等院校电气工程与自动化专业的教材，也可供从事供用电系统设计、供用电设备开发、供用电系统运行与维护的工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

供电技术/同向前等编. —5版. —北京：机械工业出版社，2017.10
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“十三五”规划教材
ISBN 978-7-111-58025-6

I. ①供… II. ①同… III. ①供电-技术-高等学校-教材 IV. ①TM72

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 227980 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：王雅新 责任编辑：王雅新 张珂玲 王小东

责任校对：郑 婕 封面设计：马精明

责任印制：李 昂

河北鹏盛贤印刷有限公司印刷

2018 年 1 月第 5 版第 1 次印刷

184mm×260mm·15.5 印张·374 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-58025-6

定价：38.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线：010-88379833

读者购书热线：010-88379649

网络服务

机工官网：www.cmpbook.com

机工官博：weibo.com/cmp1952

教育服务网：www.cmpedu.com

金书网：www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

前言

《供电技术》(第4版)出版已有十年。十年来,电网升压、增容、设备更新、直流输电和新能源发电等措施的综合运用,使得电力工业规模得到较大发展,电能短缺和供电紧张的情况基本得到缓解。与此同时,用户供电系统中的新兴电力技术得到长足发展,新设备、新技术不断涌现,尤其是电能质量标准进一步完善,基于电力电子技术的电能质量控制技术与分布式可再生能源发电技术已趋于成熟,及时反映供用电领域的这些新成果是本书修订再版的主要动因。

掌握供电系统的基本设计方法和内容,对从事电气系统的设计施工、技术改造和运行维护都是必要的。此外,在维护供电系统安全可靠运行的前提下,如何改善供电系统的电能质量,如何降低供电网络的电能损耗,如何提高终端用电的能效水平,是用户电气工程师需要进一步关注的用电问题。

本书内容分为三大部分。前五章为基础部分,以供电系统的设计为导向,内容涵盖基本概念、系统设计、短路计算、保护配置、设备选型到安全接地,内容安排并不局限于已有的设计规范,重在阐明电气设计计算的方法、原理、原则与应用条件。第六章和第七章为提高部分,着重于用户供电系统在运行过程中的电能质量和经济性,系统地阐述了电能质量的基本概念、评价指标、评估方法及其改善措施,分析了影响电网经济性的因素与节电增效途径。第八章为新技术展望部分,概括性地介绍了电压源变流器技术及其在供电系统中的应用,主要有电能质量控制新技术、分布式电源技术和微电网技术。

本书是在《供电技术》(第4版)的基础上修订增补而成的。修订方案和内容由西安理工大学同向前教授、余健明教授和苏文成教授共同讨论,余健明统阅全书初稿,同向前负责最终统稿。其中,第一、二、三、六章由同向前修订,第四章由段建东修订,第五章由同向前和倪峰修订,新增补的第七、八章由同向前、黄晶晶、王倩、王海燕共同编写。

在本书的编写过程中,参考了国内外专家、学者编撰的论著、教材、标准和手册,中国兵器西北工业集团公司黄晴明高级工程师对修订工作提出了宝贵意见,在此一并表示衷心的感谢。

电气工程是当今世界快速发展的工程技术领域之一,供用电设备与技术日新月异,作者对新技术的理解有限,在编撰中难免存在偏差和不足,恳请广大读者指正。

作者

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	文字符号	中文含义
APD	备用电源自动投入装置	PE	保护线或保护导体
APF	有源电力滤波器	PEN	保护中性线或保护中性导体
ARD	自动重合闸装置	PJ	电能表
ATSE	自动转换开关电器	PV	电压表
B	母线	PWM	脉冲宽度调制
	汇流排	Q	开关
C	电容器		低压断路器
DG	分布式发电装置	QF	断路器
DES	分布式储能装置	QK	刀开关
DVR	动态电压恢复器	QL	负荷开关
F	避雷器	QS	隔离开关
FC	固定电容器	R	电阻
FU	熔断器	SA	控制开关
FR	热继电器		选择开关
	温度继电器	SB	按钮
G	发电机	SPD	电涌保护器
	电源	SVC	静止无功补偿器
HL	指示灯	SVG	静止无功发生器
	信号灯	T	变压器
K	继电器	TA	电流互感器
KA	电流继电器	TAN	零序电流互感器
KG	气体继电器	TCR	晶闸管控制电抗器
KL	闭锁继电器	TSC	晶闸管投切电容器
KM	中间继电器	TV	电压互感器
	接触器	U	变流器
KO	合闸接触器		整流器
KS	信号继电器	V	晶体管
KT	时间继电器		晶闸管
KV	电压继电器	VD	二极管
L	电感或电抗器	VSC	电压源变流器
M	电动机	XB	连接片
MCR	磁控电抗器	YR	跳闸线圈(脱扣器)
N	中性线或中性导体	YO	合闸线圈
PA	电流表		

二、物理量下角标的文字符号

文字符号	中文含义	文字符号	中文含义
a	年	tou	[人体]接触
a	有功,有效附加的	TV	电压互感器
al	允许	k	短路
av	平均	LR	电感、电抗器
c	计算	L	负荷
d	需要	l	导线,线路
ql,ph	平衡	M	电动机
dql,bp	不平衡	N	额定,标称
e,et	设备	op	动作,整定
eq	等效的	rl	实际的
re	返回	θ	温度
S	系统	0	零,空,每(单位)起始的,周围的, 环境的,零序
sh	冲击	l	基波
st	起动	h,H	谐波
sp	跨步	+	正序,增量
T	变压器	-	负序
t	时间		
TA	电流互感器		

目 录

前言

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 6

第三节 课程主要内容及其关系 7

习题与思考题 7

第二章 用户供电系统的设计 9

第一节 电力负荷与负荷计算 9

第二节 供电电压与电源的选择 20

第三节 用户变电所及其主要电气设备 25

第四节 用户变电所的电气主接线 31

第五节 变电所的二次接线与操作电源 38

第六节 高低压配电网及导线截面积选择 44

第七节 供电系统的方案比较 53

习题与思考题 54

第三章 供电系统的短路电流计算 56

第一节 短路的基本概念 56

第二节 无限大容量电源系统供电时短路过程的分析 57

第三节 无限大容量电源条件下短路电流的计算 60

第四节 低压配电网中短路电流的计算 65

第五节 不对称短路电流的分析计算方法 67

第六节 感应电动机对短路电流的影响 72

第七节 电气设备的选择及校验 73

习题与思考题 81

第四章 供电系统的继电保护与自动装置 83

第一节 继电保护的基本概念 83

第二节 单端供电网络的保护 87

第三节 电力变压器的保护 99

第四节 低压配电系统的保护 106

第五节 供电系统的微机保护 112

第六节 自动重合闸装置 120

第七节 备用电源自动投入装置 123

习题与思考题 125

第五章 供电系统的保护接地与防雷 128

第一节 供电系统的保护接地 128

第二节 供电系统的防雷保护 138

习题与思考题 145

第六章 供电系统的电能质量 146

第一节 电能质量的基本概念 146

第二节 电压偏差及其调节 148

第三节 电压波动和闪变 152

第四节 电压暂降与短时中断 161

第五节 电力谐波 166

第六节 供电系统的三相不平衡 178

习题与思考题 183

第七章 供电系统的经济运行 185

第一节 供电系统的电能损耗与节约 185

第二节 用电负荷特性对电网电能损耗的影响 188

第三节 用电负荷的优化调整 191

第四节 用户供电系统的无功功率补偿 195

习题与思考题 199

第八章 用户电力新技术 201

第一节 基于电压源变流器的电能质量控制技术 201

第二节 分布式电源技术 215

第三节 微电网技术 225

习题与思考题 229

附录 230

参考文献 240

第一章

绪论

电能属于二次能源，与煤炭、天然气、石油、风力、太阳能等一次能源相比，具有易于转化、输配简单、使用方便、洁净、调控精准等优点，电能早已成为当前工农业生产和人民生活所用的不可或缺的主要能源。如何保证供电的可靠、安全、经济、高质量，以满足工农业生产与人民生活的需要，如何高效合理地使用电能，是电力科技工作者的长期而艰巨的任务。

第一节 电力系统的基本概念

一、电力系统的构成与发展

如图 1-1 所示，电力系统由各种不同类型的电源、输电网、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。

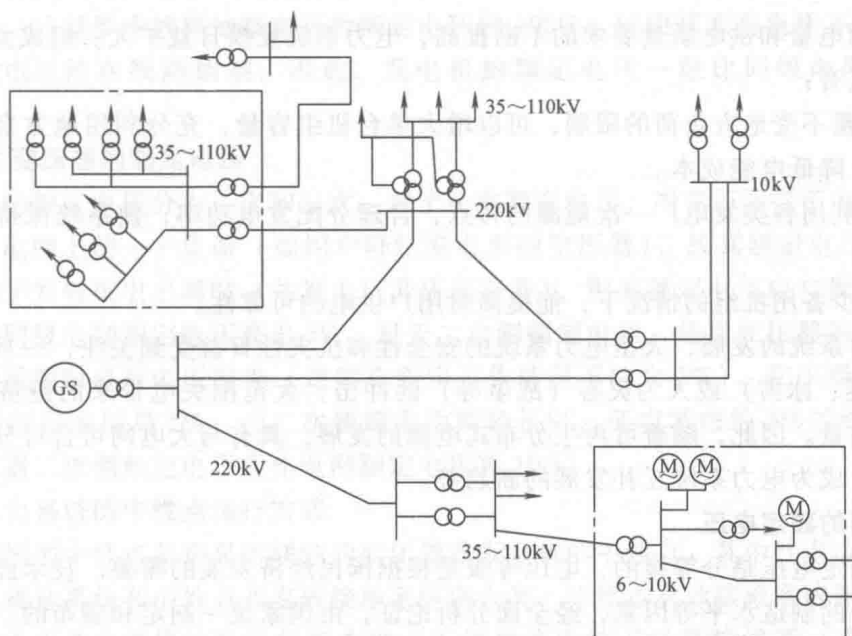


图 1-1 电力系统示意图

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。近年来，在节能减排要求的推动下，随着电力科技的进步，可再生能源发电发展迅速，发电比重逐年上升，百兆

瓦级风电场和光伏电站已有一定规模，以光伏发电为主并接入到配电网的分布式电源亦在高速增长。

输电网络的作用是将各个发电厂通过高压（如 220kV、330kV、500kV 甚至 1000kV）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存在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、降压变电站。

电能传输的方式有交流输电和直流输电两种形式，各有优势和适应的场合。交流输电简单经济、电压变换简易，但是存在大容量长距离输电的稳定性问题和线路分布电容造成的电压升高问题。因此，在大容量超长距离输电和跨海电缆输电的情况下，高压直流输电更具优势。

配电网是影响电力用户供电可靠性和电能质量的关键环节之一。如何在复杂的配电网发生故障时能够及时切除故障以保护配电设备的安全，如何在配电网故障切除后能够自动恢复尽量多的健全区域的供电，如何在配电网故障切除后能够尽量快速地自动恢复供电，如何在主电源故障后还能保障重要设备不断电，这些都是配电网的网架结构设计和配电自动化系统研发的目标，也是未来自愈配电网的发展方向。

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，不同的用电负荷对供电可靠性的要求不同，供配电方式亦不同。用户是电力系统的终端，提高用电设备的电能利用率也是节约电能的一种重要举措。随着包括储能在内的分布式电源的发展，用户也可以参与到发电和电网的调峰中来，优化电网的能源结构和运行效率。

随着对用电量和供电质量要求的不断提高，电力系统规模日益扩大。组成大型统一的电力系统的优点有：

- 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一次能源的特点，合理分配发电功率，使系统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。

随着电力系统的发展，大型电力系统的安全性和抗灾性日益受到关注，一旦系统受到自然灾害（地震、冰雪）或人为灾害（战争等）的冲击，大范围失电带来的经济损失和社会影响将不可估量。因此，随着可再生分布式电源的发展，具有与大电网可合可分特点的微电网应运而生，成为电力系统互补发展的新趋势。

二、电网的额定电压

电网的额定电压是分等级的，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。我国目前公布的交流电网标准额定电压如表 1-1 所示。

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

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, 3.15	3.15, 3.3
	6	6.3	6, 6.3	6.3, 6.6
	10	10.5	10, 10.5	10.5, 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	—
1000	—	1000	—	

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。

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范围正常工作，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，还应考虑约 5% 的线路电压损失，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 $I_{C0} = \omega C_0 l U_\varphi$ ，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 $I_{C(B)}^{(1)} = I_{C(A)}^{(1)} = \sqrt{3} \omega C_0 l U_\varphi$ 。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 $I_k^{(1)} = \sqrt{3} (\sqrt{3} \omega C_0 l U_\varphi) = 3I_{C0}$ 。

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 \dot{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。

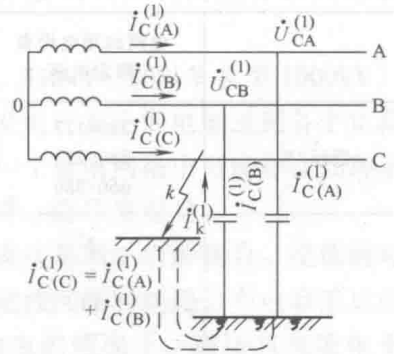


图 1-2 中性点不接地系统发生单相接地故障

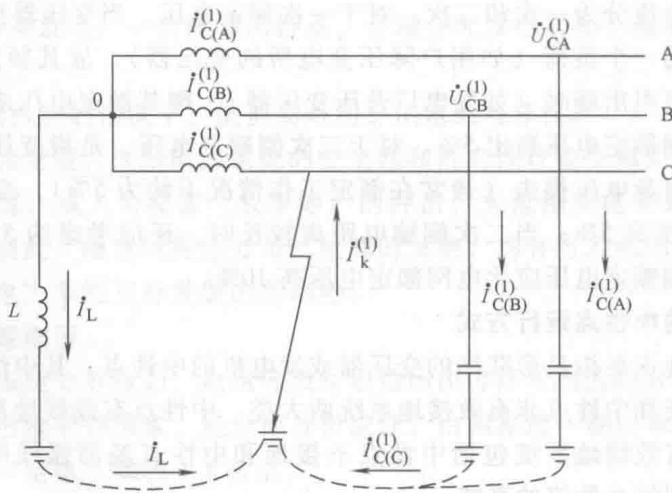


图 1-3 中性点经消弧线圈接地系统发生单相接地故障

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 $\dot{I}_L = \frac{\dot{U}_0}{j\omega L}$ 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，电力系统可以继续运行。

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。

1) 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。

2) 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。

3) 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，而致使系统发生谐振。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 380V/220V 低压供电系统中，采用中性点直接接地，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。

四、电力系统的功率平衡与调整

作为一个封闭系统，电力系统中的有功功率和无功功率应时刻保持平衡。但是，电力系统中的用电负荷是随机变化的，必然要求系统中的电源输出功率相应地跟随其变化，如果做不到实时跟踪，必将导致系统运行参数（电压、频率、线损）发生变化。

源于交流电力系统的同步发电机特性和电网阻抗特性，电力系统的有功功率平衡过程主要影响着系统的频率，而无功功率平衡过程主要影响着电网各节点的电压。电力系统运行的基本任务是将电能电压和频率合格的前提下安全、可靠、经济地分配给各个电力用户，因此，电力系统的功率调整或补偿尤为重要。

1. 有功功率平衡与调整

由于交流电网中的电能不能大量存储，电网中各种电源输出的功率必须要与负荷消耗的功率和电网本身的功率损失时刻保持平衡。为此，电网中必须有平衡电源，通过对平衡电源输出功率的实时调节或调度，使得电网的有功功率随时保持动态平衡。

对于以同步发电机为主电源的电网而言，电网中有功功率平衡的破坏将导致电机转子上原动力驱动转矩与电磁制动转矩的不平衡，进而导致电机转子转速的变化和定子输出电压频率的变化。因此，频率的变化反映了电力系统的有功功率平衡关系，平衡电源的发电机就是根据电网频率的变化来自动调节输出功率以便达到电网有功功率的动态

再平衡。

对于用户供电系统而言,用电功率只是电网电源功率的非常小的一部分,单个用户负荷的随机变化不会对电网频率造成明显影响。

2. 无功功率平衡与补偿

电力系统中各种电源输出的无功功率必然要与用电负荷吸收的无功功率和电网本身产生的无功功率时刻保持平衡。但是,如果用电负荷所需的无功功率都是通过长距离线路由发电机来提供,则必将在电网中产生较大的电压降和电能损耗。与有功电源往往依赖远方发电机的情形不同,无功电源可以就近解决,除远方发电机可以提供无功功率外,并联电容器、静止无功发生器等无功补偿装置都是可就近安装的无功电源,因此,电网的无功功率宜就地平衡。对于用户供电系统而言,应设置必要的无功补偿装置,尽量在用户供电系统内部实现无功功率的平衡。

由于电网存在分布电抗和对地分布电容,若用户负荷的无功功率得不到就近平衡,在电网长距离输送时,与无功功率相对应的无功电流分量必将在电网等值阻抗上产生一定的电压降,在电源侧电压维持合格的情况下,导致用户侧电压低、用电设备运行状态不佳。因此,在电力系统中,无功补偿也作为一种调压手段,根据电网电压的高低调节投入到电网的无功补偿容量。

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,在满足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,导致电能质量问题。国家已经颁布了关于电压偏差、电压波动与闪变、电压暂降、谐波、三相不平衡等电能质量标准,对评价指标及其限值做出了明确的规定,参见第六章。

2. 频率

一个交流电力系统只能有一个工作频率。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。

电力供需不平衡时会导致系统频率偏离其标称值。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,也影响电力系统的稳定运行。我国标准规定,电力系统在正常运行条件下的频率偏差限值为 $\pm 0.2\text{Hz}$ 。当系统容量较小时,偏差限值可以放宽到 $\pm 0.5\text{Hz}$ 。

3. 可靠性

供电可靠性指供电系统持续供电的能力，应根据负荷的可靠性等级，首先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) 用户平均停电时间：用户在统计期间的平均停电小时数。即

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

2) 供电可靠率：在统计期间，对用户有效供电总小时数与统计期间小时数的比值。用户有效供电总小时数为统计期间小时数与用户平均停电时间之差。即

$$\text{供电可靠率} = \left(1 - \frac{\text{用户平均停电时间}}{\text{统计期间时间}}\right) \times 100\% \quad (1-2)$$

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。但用户供电系统毕竟是电力系统的终端部分，主要反映用户用电的特点和要求。尤其是近年来，计划用电、节约用电、高效用电、优质供电、需求侧响应、定制电力、可再生能源发电与交直流微电网技术等受到了普遍的重视，用户供电系统的讨论内容也较之过去更为广泛。因此，掌握用户供电系统的规范设计技术、高效运行技术与未来用户电能系统的发展趋势是十分必要的。

第三节 课程主要内容及其关系

“供用电技术”是一门面向电气工程与自动化专业的实践性较强的专业课程，主要内容围绕用户供电系统的设计与运行，涉及负荷计算、电气主接线设计、电气设备选择、短路电流计算、系统继电保护、防雷接地、电能质量、经济运行与用户电力新技术等。各主要教学内容之间的关系如图 1-4 所示，括弧内的数字为该内容所在的章号。

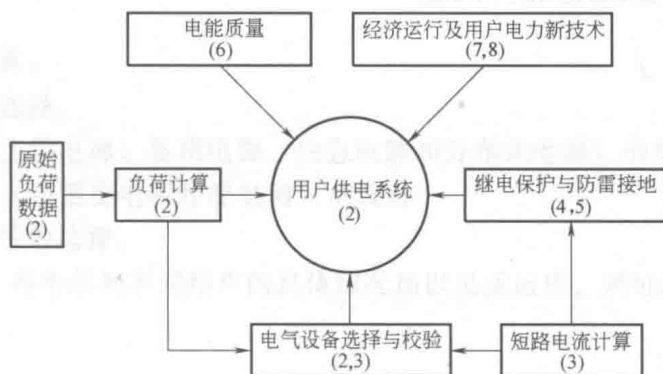


图 1-4 主要教学内容之间的关系

习题与思考题

1-1 试述电力系统的组成及各部分的作用。

1-2 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 如图 1-5 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。

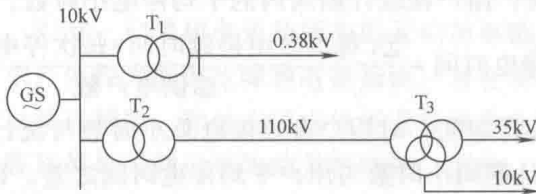


图 1-5 习题 1-4 图

1-5 电力系统中性点运行方式有哪几种？各自的特点是什么？

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哪几种？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 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。

1-10 简述电力系统中有功功率平衡和无功功率平衡的方式方法。



第二章

用户供电系统的设计

用户供电系统的基本设计目标是为各电力用户的生产生活提供一个安全、可靠、合理、优质的供电环境。近年来,可再生能源发电迅速崛起,柔性输配电设备得到广泛应用,交直流微电网逐渐兴起,工业生产过程和数字化设备与日俱新,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。

用户供电系统具有分层分级的特点,从电源接入到配电给用电设备常需要经过多级配电,如图 2-1 所示。外部 35kV 电源引入总降压变电所,经过 35kV/10kV 总降压变压器后以 10kV 给厂内各高压设备或车间变电所配电;在车间变电所经过 10kV/0.4kV 变压器后以 0.4kV 向低压用电设备直接配电,或再通过中间一级配电箱向用电设备配电。

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) 电力负荷计算。
- 2) 供电电压的选择。
- 3) 电源(包括主供电源、备用电源、应急电源和分布式电源)的选择。
- 4) 电气主接线(包括变电所和配电网)的设计。
- 5) 主要电气设备的选择。

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。

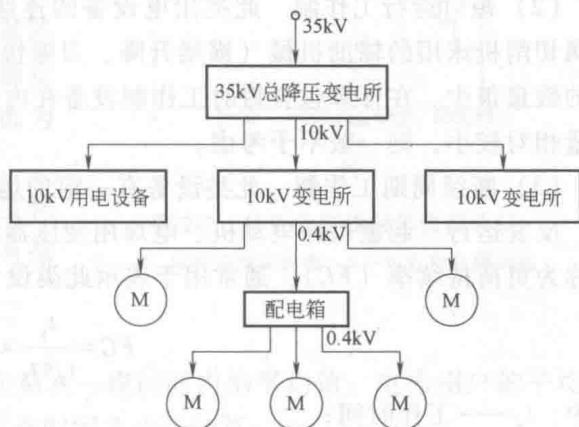


图 2-1 用户供电系统的基本结构

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的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各个设备额定功率之和。因此，如何根据用电设备参数来确定能用于供电系统设计的计算负荷，是负荷计算工作的主要任务。

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