

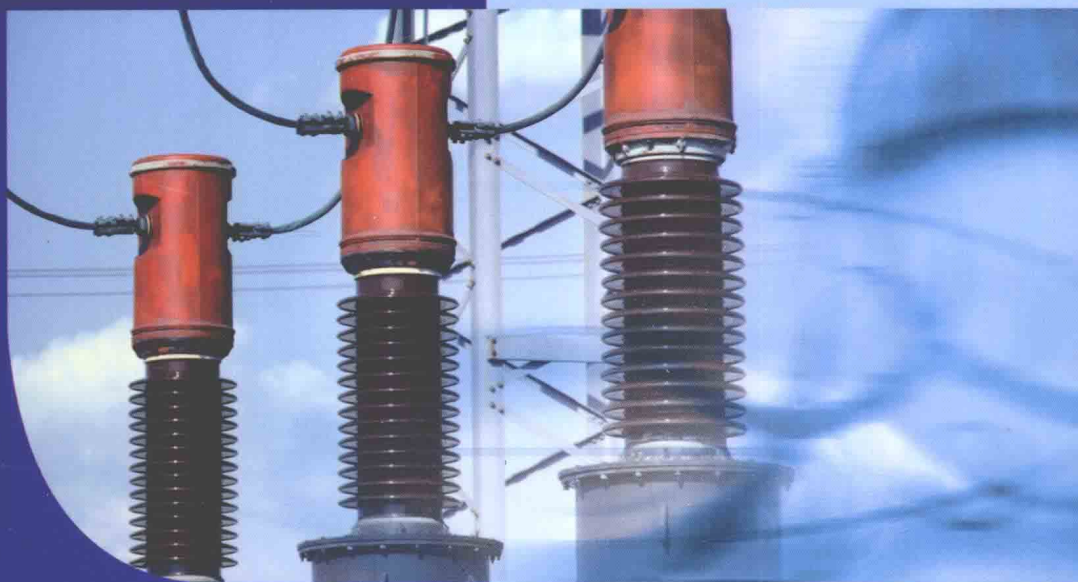


普通高等教育“十二五”电气信息类规划教材

供配电工程

◎ 孙丽华 主编

POWER SUPPLY AND DISTRIBUTION



免费电子课件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”电气信息类规划教材

供 配 电 工 程

主 编 孙丽华
主 审 盛四清



机 械 工 业 出 版 社

前 言

本书是为适应高校课程体系与教学内容改革的需要而组织编写的。本书以 35kV 及以下供配电系统的工程设计为主线，在论述工厂供配电系统基础理论知识和基本计算方法的同时，特别注重基础理论的系统性、实用性和技术内容的先进性，较多地关注了供配电领域的新知识和新技术，在电能质量、微机保护及变电所综合自动化等方面均有一些新的论述。

本书在叙述上力求做到深入浅出，结合例题进行讲解，便于学生学习和理解；在内容编排上力求做到重点突出、实践性强，除了前八章每章有小结、思考题和习题外，还在第九章详细介绍了供配电系统电气设计的主要内容及方法步骤，并给出了典型的工程设计示例。因此，学生学完本书后不仅能够建立供配电系统的知识结构平台，还可具有独立设计 35kV 及以下变电所的能力。

本书由孙丽华主编，负责全书的构思和统稿工作。全书共分九章，其中第一、三章由孙丽华编写，第二、四章由刘庆瑞编写，第六、九章由赵静编写，第五、七章由邓慧琼编写，第八章和附录由冉海潮编写。华北电力大学盛四清教授对全书进行了仔细的审阅，并提出了许多宝贵意见，在此深表感谢。

本书在编写过程中，参考了许多相关的教材和文献，在此向所有作者表示诚挚的谢意。同时，本书的出版得到了机械工业出版社的大力协助和许多高校及电力部门同行的热情帮助，在此一并向他们致以衷心的感谢。

为方便教师授课，本书将配有免费电子课件，欢迎选用本书作教材的老师登录出版社教材服务网站 www.cmpedu.com 注册后下载。

由于编者水平有限，书中难免存在错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

本书常用字符表

一、电气设备的文字符号

文字符号	名称	旧符号	文字符号	名称	旧符号
A	放大器	—	PV	电压表	V
APD	备用电源自动投入装置	BZT	Q	电力开关	K
ARD	自动重合闸装置	ZCH	QF	断路器 (含自动开关)	DL (ZK)
C	电容, 电容器	C	QK	刀开关	DK
F	避雷器	BL	QL	负荷开关	FK
FD	跌开式熔断器	DR	QS	隔离开关	GK
FU	熔断器	RD	R	电阻, 电阻器	R
G	发电机, 电源	F	S	电力系统	XT
HA	蜂鸣器, 警铃, 电铃等	FM, JL	SA	控制开关, 选择开关	KK, XK
HL	指示灯, 信号灯	XD	SB	按钮	AN
HLR	红色指示灯	HD	T	变压器	B
HLG	绿色指示灯	LD	TA	电流互感器	CT, LH
HLY	黄色指示灯	UD	TAN	零序电流互感器	LLH
HLW	白色指示灯	BD	TAM	中间变流器	ZLH
K	继电器, 接触器	J, C	TV	电压互感器	PT, YH
KA	电流继电器	LJ	TVM	中间变压器	ZYH
KAR	重合闸继电器	CHJ	U	变流器, 整流器	BL, ZL
KD	差动继电器	CJ	V	电子管, 晶体管	—
KG	气体继电器	WSJ	VD	二极管	D
KM	中间继电器	ZJ	W	母线	M
KM	接触器	C	WF	闪光信号小母线	SYM
KO	合闸接触器	HC	WAS	事故音响信号小母线	SM
KR	干簧继电器	GHJ	WC	控制小母线	KM
KS	信号继电器	XJ	WFS	预告信号小母线	YBM
KT	时间继电器	SJ	WL	线路	XL
KV	电压继电器	YJ	WO	合闸电源小母线	HM
L	电感, 电感线圈	L	WS	信号电源小母线	XM
L	电抗器	DK	WV	电压小母线	YM
M	电动机	D	XB	连接片, 切换片	LP, QP
N	中性线	N	XT	端子板	—
PA	电流表	A	YA	电磁铁	DC
PE	保护线	—	YO	合闸线圈	HQ
PEN	保护中性线	N	YR	跳闸线圈, 脱扣器	TQ
PJ	电能表	wh, varh			

二、物理量下角标的文字符号

文字符号	名称	旧符号	文字符号	名称	旧符号
a	年, 每年	<i>n</i>	max	最大	max
a	有功的	a, yg	min	最小	min
Al	铝	Al	N	额定, 标称	e
al	允许	yx	<i>n</i>	数目	<i>n</i>
av	平均	pj	nba	非基本	fjb
ba	基本	jb	np	非周期的	f-zq
C	电容, 电容器	C	oc	断路	dl
c	计算	js	oh	架空线路	—
cab	电缆	L	OL	过负荷	gh
Cu	铜	Cu	op	动作	dz
d	需要	x	OR	过电流脱扣器	TQ
d	基准	j	p	周期性的	zq
d	差动	cd	p	有功功率	p, yg
dsp	不平衡	bp	pk	尖峰	jf
E	地, 接地	d, jd	q	无功功率	q, wg
e	设备	S, SB	qb	速断	sd
e	有效的	yx	r	无功的	r, wg
ec	经济的	j, ji	r	滚球	—
eq	等效的	dx	re	返回, 复归	f, fh
es	电动稳定	dw	rel	可靠性	k
Fe	铁	Fe	rem	残余	cy
FE	熔体	RT	S	系统	XT
fr	摩擦	m	s	短延时	s
h	谐波	—	saf	安全	aq
i	电流	<i>i</i>	sam	同型	tx
i	任一数目	<i>i</i>	set	整定	zd
ima	假想的	jx	sh	冲击	cj, ch
k	短路	d	st	起动, 启动	q, qd
K	继电器	J	step	跨步	kp
L	电感	L	tou	接触	jc
L	负荷, 负载	H, fz	u	电压	u
l	长延时	l	θ	温度	θ
m	最大, 幅值	M	Σ	总和	Σ
man	人工的	rg	φ	相	φ

目 录

前言	
本书常用字符表	
第一章 概论 1	
第一节 供配电系统概述..... 1	
第二节 电力系统的额定电压与电能质量..... 4	
第三节 电力系统中性点的运行方式..... 9	
本章小结 13	
思考题与习题 14	
第二章 负荷计算与无功功率补偿 15	
第一节 电力负荷与负荷曲线 15	
第二节 计算负荷的确定 18	
第三节 供配电系统的功率损耗和电能损耗 27	
第四节 全厂计算负荷的确定 29	
第五节 工厂的功率因数与无功功率补偿 32	
第六节 尖峰电流的计算 37	
本章小结 38	
思考题与习题 39	
第三章 供配电一次系统 40	
第一节 供配电系统常用电气设备 40	
第二节 变配电所的电气主接线 66	
第三节 工厂电力线路 74	
第四节 变配电所的类型与布置 79	
本章小结 82	
思考题与习题 83	
第四章 短路电流及其计算 84	
第一节 短路的基本概念 84	
第二节 无限大容量系统三相短路暂态分析 85	
第三节 无限大容量系统三相短路电流的计算 89	
第四节 不对称短路电流计算简介 92	
第五节 电动机对短路电流的影响 98	
第六节 低压电网短路电流的计算 99	
第七节 短路电流的效应 101	
本章小结 104	
思考题与习题 105	
第五章 电气设备的选择与校验 106	
第一节 电气设备选择的一般原则 106	
第二节 高低压开关设备的选择与校验 108	
第三节 互感器的选择与校验 110	
第四节 熔断器的选择与校验 111	
第五节 导线截面的选择与校验 114	
第六节 母线的选择与校验 122	
本章小结 124	
思考题与习题 124	
第六章 供配电系统的继电保护 126	
第一节 继电保护的基本知识 126	
第二节 电力线路的继电保护 133	
第三节 电力变压器的继电保护 143	
第四节 高压电动机的保护 153	
第五节 供配电系统微机保护简介 155	
本章小结 158	
思考题与习题 159	
第七章 供配电系统的二次回路和自动装置 161	
第一节 供配电系统的二次回路及其操作电源 161	
第二节 高压断路器的控制回路 164	
第三节 中央信号回路 168	
第四节 绝缘监察装置和测量仪表 171	
第五节 供配电系统常用自动装置 174	
第六节 变电所综合自动化系统简介 176	
本章小结 179	
思考题与习题 180	
第八章 防雷、接地与电气安全 181	
第一节 过电压与防雷 181	

第二节 电气装置的接地.....	189	第一节 供配电系统电气设计概述.....	202
第三节 电气安全.....	198	第二节 供配电系统电气设计示例.....	203
本章小结.....	200	附录 常用电气设备的技术数据	216
思考题与习题.....	201	参考文献	232
第九章 供配电系统电气设计.....	202		

第一章 概 论

本章首先简要介绍电力系统和供配电系统的概念，然后重点介绍电力系统的额定电压、电能质量指标、电力系统中性点的运行方式等基本知识。

第一节 供配电系统概述

电能是一种十分重要的二次能源，它既可以方便而经济地由其他形式的能量转换而来，又可以简便地转换成其他形式的能量供人们使用。电能的输送和分配既简单经济，又易于控制、管理和调度，易于实现生产过程自动化。因此，电能已广泛应用到社会生产的各个领域和社会生活的各个方面，已成为现代工业、农业、交通运输、国防科技及人民生活等各方面不可缺少的重要能源。

工厂供配电系统是电力系统的重要组成部分。工厂所需要的电能，绝大多数是由公共电力系统供给的。因此，在介绍供配电系统之前，有必要先介绍电力系统的基本知识。

一、电力系统

电能是由发电厂生产的。为了充分利用动力能源，降低发电成本，大容量发电厂多建在燃料、水力资源丰富的地方，而电力用户是分散的，往往又远离发电厂，因此需要建设较长的输电线路进行输电。为了实现电能的经济传输和满足用电设备对工作电压的要求，需要建设升压变电所和降压变电所进行变电，将电能送到城市、农村和工矿企业后，还需要经过配电网路向各类电力用户进行配电，如图 1-1 所示。

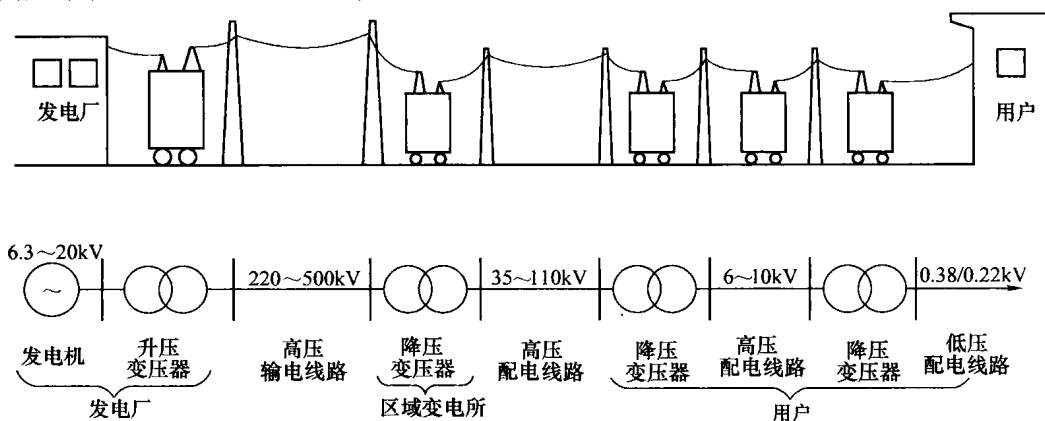


图 1-1 从发电厂到用户的送电过程

电能的生产、输送、分配和使用的全过程，几乎是同时进行的，即发电厂在任何时刻生产的电能等于该时刻用电设备消费的电能与变换、输送和分配环节中损耗的电能之和。电力系统是由发电厂、变电所、电力线路和电力用户组成的一个发电、输电、变配电和用电的整体，如图 1-2 所示。

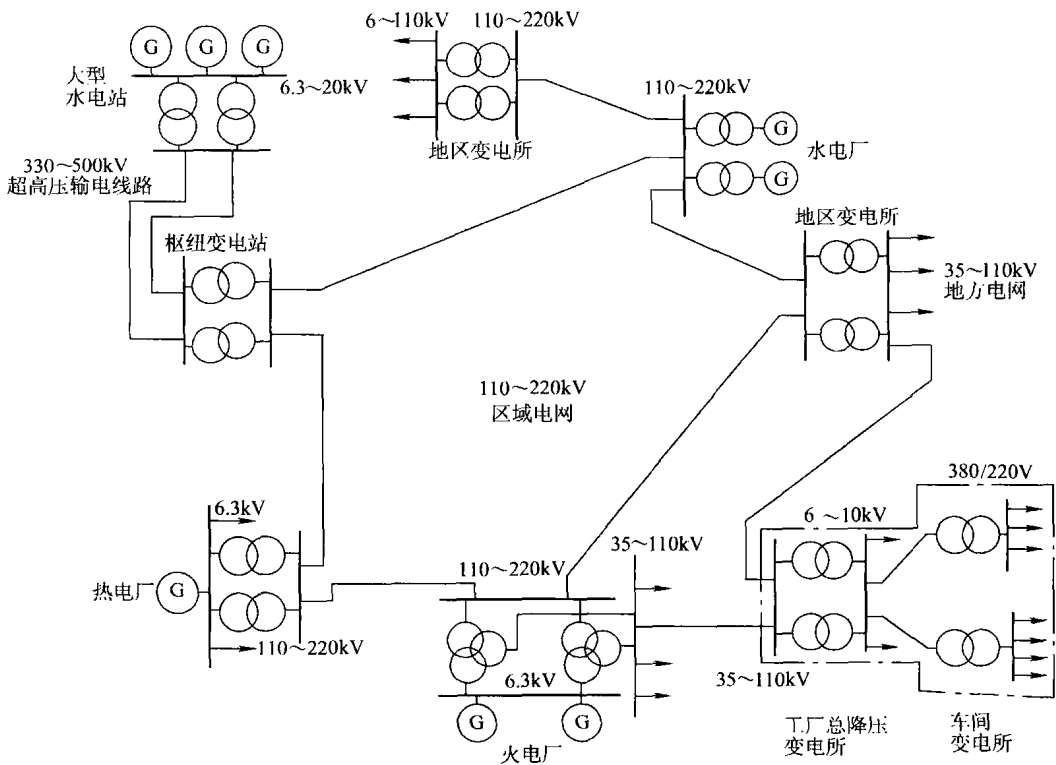


图 1-2 电力系统示意图

在电力系统中，除发电厂和电力用户之外的部分，称为电力网或电网，它由各级电压的电力线路及其联系的变配电所组成。电力网是电力系统的重要组成部分，其作用是将电能从发电厂输送并分配至电力用户，可分为地方电力网、区域电力网及超高压远距离输电网三种类型。

1. 发电厂

发电厂将各种一次能源转化为电能。按照其所利用一次能源的不同，可分为火力发电厂、水力发电厂和核能发电厂。此外，还有太阳能、风力、地热和潮汐发电厂等类型。

(1) 火力发电厂 火力发电厂将煤炭、石油、天然气等燃料的化学能转换为电能，其主要设备有锅炉、汽轮机、发电机。发电过程为：燃料在锅炉的炉膛内充分燃烧，将锅炉内的水变成高温高压的蒸汽，推动汽轮机转动，使与之联轴的发电机旋转发电。其能量的转换过程是：燃料的化学能→热能→机械能→电能。我国的火电厂以煤炭为主。火电厂分两类：一类是凝汽式火电厂，一般建在燃料产地，容量可以很大；另一类是兼供热的火电厂（热电厂），一般建在大城市及工业区附近，容量不大。凝汽式火电厂的效率不高，只有 30%~40%，而热电厂的效率较高，一般可达 60%~70%。火力发电至今仍是世界上最主要的电能生产方式，在我国电源结构中，火电设备容量占总装机容量的 75% 以上。

(2) 水力发电厂 水力发电厂将水的位能转换成电能，主要由水库、水轮机和发电机组成。发电过程为：水库中的水有一定位能，通过压力水管将水引入水轮机，推动水轮机转子旋转，带动与之连轴的发电机旋转发电。其能量的转换过程是：水的位能→机械能→电能。水电厂根据水流形成的方式不同，可分为堤坝式水电厂、引水式水电厂和抽水蓄能式水电厂等。水电厂的发电效率较高，一般为 85% 左右。水力发电是利用廉价的、可再生的能

源,故发电成本较低,一般只有火力发电的 $1/3 \sim 1/4$,而且水力发电具有不产生污染、运行维护简单等优点,同时还兼有防洪、灌溉、航运、水产养殖等综合效益,因此具有较高的开发价值。

(3) 核能发电厂 核能发电厂利用核能来生产电能,其生产过程与火电厂大体相同,只是以核反应堆(原子锅炉)代替了燃煤锅炉,以少量的核燃料代替了大量的煤炭。其能量的转换过程是:核燃料的裂变能 \rightarrow 热能 \rightarrow 机械能 \rightarrow 电能。核能发电可以节省大量煤炭、石油等燃料,质量为 1kg 的铀全部裂变时释放的能量相当于 2700t 标准煤完全燃烧时所释放的能量。同时,核能发电不需空气助燃,因此可以建在地下、水下、山洞或空气稀薄的高原地区。核能发电的主要问题是放射性污染,但随着科学技术的发展,核能发电将会成为最清洁、经济、安全的发电方式。

(4) 太阳能、风力、地热和潮汐发电厂 太阳能发电厂是利用太阳光能或太阳热能来生产电能的,它建造在常年日照时间长的地方。风力发电厂是利用风力的动能来生产电能的,它建造在常年有稳定风力资源的地区。地热发电厂是利用地表深处的地热能来生产电能的,它建造在有足够地热资源的地区。潮汐发电厂是利用海水涨潮、落潮中的动能、势能来生产电能的,它实质上是一种特殊类型的水电厂,通常建在海岸边或河口地区。

2. 变电所

变电所是变换电压、交换和分配电能的场所,是联系发电厂和电力用户的中间环节。如果仅用于接收和分配电能,则称为配电所或开闭所。

变电所可分为升压变电所和降压变电所,除了与发电机相连的变电所为升压变电所外,其余均为降压变电所。降压变电所按其在电力系统中的地位和作用不同,又分为区域变电所、地区变电所和工业企业变电所等。

3. 电力线路

电力线路的作用是输送电能,并把发电厂、变配电所和电力用户连接起来。通常, 220kV 及以上的电力线路称为输电线路, 110kV 及以下的电力线路称为配电线路。配电线路又分为高压配电线路($35 \sim 110\text{kV}$)、中压配电线路($6 \sim 10\text{kV}$)和低压配电线路($380/220\text{V}$)。

4. 电力用户

电力用户又称电力负荷。在电力系统中,所有消耗电能的用电设备或用电单位均称为电力用户。电力用户按行业可分为工业用户、农业用户、市政商业用户和居民用户等。

二、供配电系统

供配电系统是电力系统的电力用户,也是电力系统的重要组成部分,由总降压变电所(或高压配电所)、配电线路、车间变电所和用电设备等组成。图1-2中点画线框包围部分就是一个工业企业供电系统。

总降压变电所将 $35 \sim 110\text{kV}$ 的外部供电电压变成 $6 \sim 10\text{kV}$ 的高压配电电压,供电给各车间变电所和高压用电设备。对负荷比较分散、厂区较大的大型企业,还需设置高压配电所,它集中接收 $6 \sim 10\text{kV}$ 电压,再供电给附近各车间变电所和高压用电设备。

配电线路分为厂区高压配电线路($6 \sim 10\text{kV}$)和车间低压配电线路($380/220\text{V}$)。厂区高压配电线路将总降压变电所、车间变电所和高压用电设备连接起来;低压配电线路主要用以向低压用电设备供电。

车间变电所将 6 ~ 10kV 的电压降为 380/220V，供低压用电设备使用。

应当指出，对于某个具体的供配电系统，由于电力负荷和厂区的大小不同，其构成会有较大的差异。通常，大型企业都设有总降压变电所，中小型企业仅设高压配电所或 6 ~ 10kV 车间变电所。

三、对供配电工作的基本要求

为了保证生产和生活用电的需要，供配电工作必须达到以下基本要求：

- (1) 安全 在电能的供应、分配和使用中，不应发生人身事故和设备事故。
- (2) 可靠 应满足电力用户对供电可靠性的要求。
- (3) 优质 应满足电力用户对电压和频率等供电质量的要求。
- (4) 经济 应使供配电系统的投资少、运行费用低，并尽可能地节约电能和减少有色金属消耗量。

应当指出，上述要求不但相互关联，而且往往相互制约和相互矛盾。因此，对于上述要求，必须全面考虑，统筹兼顾。

第二节 电力系统的额定电压与电能质量

一、额定电压的国家标准

电力系统中所有的电气设备都是设计在额定电压下工作的。所谓额定电压，就是保证用电设备处于最佳运行状态的工作电压。我国三相交流系统的额定电压见表 1-1。

表 1-1 我国三相交流系统的额定电压 (单位: kV)

分 类	电力网和用电设备的 额定电压	发电机的额定电压	变压器的额定电压	
			一次绕组	二次绕组
1kV 以下	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
1kV 以上	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
	—	15.75	15.75	—
	35	—	35	38.5
	60	—	60	66
	110	—	110	121
	220	—	220	242
	330	—	330	363
	500	—	500	550
750	—	750	825	

注：20kV 电压等级已在江苏南部电网使用。

由表 1-1 可以看出,在同一电压等级下,各种电气设备的额定电压并不完全相同。为了使各种互相连接的电气设备都能在较有利的电压水平下运行,各电气设备的额定电压之间应相互配合。

1. 电力线路的额定电压

电力线路(电网)的额定电压是根据国民经济的发展需要和电力工业的发展水平,经全面的技术经济分析后由国家制定颁布的。它是确定各类用电设备额定电压的基本依据。

2. 用电设备的额定电压

通过线路输送电能时,由于在变压器和线路等元件上将产生电压损失,使线路上的电压处处不相等,其电压分布往往是始端高于末端,但成批生产的用电设备不可能按设备使用处线路的实际电压来制造,而只能按线路始端与末端的平均电压(即电网的额定电压)来制造。因此,规定用电设备的额定电压与同级电网的额定电压相同。

3. 发电机的额定电压

由于用电设备允许的电压偏差一般为 $\pm 5\%$,即线路允许的电压损失为 10% ,因此,为保证用电设备在线路上各处都能正常运行,应使线路始端电压比额定电压高 5% ,而末端电压比额定电压低 5% ,如图 1-3 所示。由于发电机多接于线路始端,因此其额定电压应比同级电网的额定电压高 5% 。

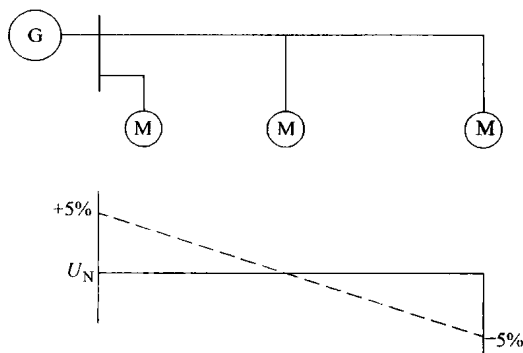


图 1-3 供电线路上的电压变化示意图

4. 变压器的额定电压

变压器的一次绕组相当于用电设备,其额定电压应等于电网的额定电压;对于直接与发电机连接的升压变压器,其额定电压应等于发电机的额定电压。

变压器二次绕组的额定电压是指在变压器一次绕组加额定电压而二次绕组开路时的电压,即空载电压。变压器在满载运行时,二次绕组内约有 5% 的阻抗压降,又因变压器的二次绕组对于用电设备而言相当于电源,因此其额定电压有以下两种情况:

1) 当变压器二次侧供电线路较长时(例如为高压输配电线路),除了考虑补偿二次绕组满载时内部 5% 的阻抗压降外,还应考虑补偿线路上 5% 的电压损失,因此变压器二次绕组的额定电压应比同级电网的额定电压高 10% 。

2) 当变压器二次侧供电线路较短时(例如直接供电给附近的高压用电设备或为低压线路),只需考虑补偿二次绕组满载时内部 5% 的阻抗压降,因此变压器二次绕组的额定电压应比同级电网的额定电压高 5% 。

二、各种电压等级的适用范围

在相同的输送功率和输送距离下,所选用的电压等级愈高,线路电流愈小,则导线截面面积和线路中的功率损耗、电能损耗也就愈小。但是,电压等级愈高,线路的绝缘愈要加强,杆塔的尺寸也要随导线间及导线对地距离的增加而加大,变电所的变压器和开关设备的造价也要随电压的增高而增加。因此,采用过高的电压并不一定恰当,在设计时需经过技术经济比较后才能决定所选电压的高低。一般说来,传输功率愈大、传输距离愈远时,选择较

高的电压等级比较有利。根据设计和运行经验，电网的额定电压、传输功率和传输距离之间的关系见表 1-2。

表 1-2 电网的额定电压、传输功率和传输距离之间的关系

线路电压/kV	传输功率/MW	传输距离/km	线路电压/kV	传输功率/MW	传输距离/km
3	0.1~1	1~3	110	10~50	50~150
6	0.1~1.2	4~15	220	100~500	100~300
10	0.2~2	6~20	330	200~1000	200~600
35	2~10	20~50	500	1000~1500	250~850
60	3.5~30	30~100	750	2000~2500	500 以上

目前，在我国电力系统中，220kV 及以上电压等级多用于大型电力系统的主干线；110kV 多用于中小型电力系统的主干线及大型电力系统的二次网络；35kV 多用于大型工业企业内部电网，也广泛用于农村电网；10kV 是城乡电网最常用的高压配电电压，当负荷中拥有较多的 6kV 高压用电设备时，也可考虑采用 6kV 配电方案；3kV 仅限于工业企业内部采用；380/220V 多作为工业企业的低压配电电压。

三、电能质量

电能质量是指通过公用电网供给用户端的交流电能的品质。理想状态的公用电网应以恒定的频率、正弦波形和标准电压对用户供电。同时，在三相交流系统中，各相电压和电流的幅值应大小相等、相位对称且互差 120°。但由于系统中的发电机、变压器、线路和用电设备的非线性或不对称，加之控制手段不完善及运行操作、外界干扰和各种故障等原因，因此产生了电网运行、电力设备和供用电环节中的各种问题，也就产生了电能质量的概念。衡量电能质量的主要指标有频率偏差、电压偏差、电压波动与闪变、高次谐波（波形畸变率）、三相不平衡度及暂时过电压和瞬态过电压等。

1. 频率偏差

我国电力系统的额定频率（工频）为 50Hz，国家标准 GB/T 15945—1995《电能质量电力系统频率允许偏差》中规定：正常允许偏差为 ±0.2Hz，当电网容量较小时，其可放宽到 ±0.5Hz。实际运行中，我国各跨省电力系统频率的允许偏差都保持在 ±0.1Hz 的范围内。因此，频率目前在电能质量中最有保障。

2. 电压偏差

电压偏差是指用电设备的实际电压与额定电压之差，一般用占额定电压的百分数来表示，即

$$\Delta U\% = \frac{U - U_N}{U_N} \times 100\% \quad (1-1)$$

当加于用电设备端的实际电压与额定电压有偏差时，其运行特性将恶化。例如，对白炽灯，当加于灯泡的电压低于其额定电压时，其使用寿命将延长，但发光效率降低，照度下降，照明场所内人员的视力健康将受到严重影响，也会降低工作效率；当电压高于其额定电压时，其发光效率将增加，但使用寿命将大大缩短。对感应电动机，其转矩与电压二次方成正比，当电压降低时，转矩将急剧减小，在负载转矩不变的情况下，电动机电流必然增大，

从而使电动机绕组绝缘过热受损, 缩短使用寿命。

因此, 在运行中, 必须按规定的电压质量标准, 将电压偏差限制在允许的范围内。国家标准 GB/T 12325—2003《电能质量 供电电压允许偏差》中规定: 35kV 及以上供电电压的正、负偏差的绝对值之和为额定电压的 10%; 10kV 及以下三相供电电压允许偏差为额定电压的 $\pm 7\%$; 220V 单相供电电压允许偏差为额定电压的 7%、-10%。

为了减小电压偏差, 必须采用相应的措施进行电压调整, 主要措施有: 正确选择变压器的电压分接头或采用有载调压变压器, 合理减少系统的阻抗, 尽量保持系统三相负荷平衡, 改变系统的运行方式, 采用无功功率补偿设备等。

3. 电压波动与闪变

电压波动是指电网电压幅值在一定范围内有规则地变动时, 电压最大值与最小值之差对电网额定电压的百分比, 即

$$\delta U\% = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_N} \times 100\% \quad (1-2)$$

电压波动是由负荷急剧变动引起的。例如, 电焊机、电弧炉、轧钢机等冲击性负荷的工作, 都会引起电网电压波动。急剧的电压波动可使电动机无法正常起动, 引起同步电动机转子振动, 使某些电子设备无法正常工作, 使照明灯发生明显的闪烁现象等。闪变就是人眼对因电压波动引起灯闪的一种主观感觉, 引起灯闪的电压称为闪变电压。电压闪变对人眼有刺激作用, 甚至使人无法正常工作和学习。

因此, 国家标准 GB/T 12326—2000《电能质量 电压允许波动和闪变》中规定了系统中由冲击性负荷产生的电压波动的允许值和闪变电压的允许值。

为了抑制或减少电压波动, 可采取以下措施: 对负荷变动剧烈的大型电气设备, 采用专线或专用变压器供电; 增大供电容量, 减小系统阻抗; 增加系统的短路容量或提高供电电压等。在系统运行时, 也可以在电压波动严重时减少或切除引起电压波动的负荷。此外, 对大型冲击性负荷, 可装设能吸收冲击无功功率的静止型无功补偿装置 (SVC)。

4. 谐波

谐波的定义是对周期性非正弦电量进行傅里叶级数分解, 除了得到与电网基波频率相同的分量, 还得到一系列为电网基波频率整数倍的各次分量, 这部分电量称为谐波。

谐波产生的主要原因是由于电力系统中存在各种非线性元件, 例如气体放电灯、变压器、感应电动机、电焊机等, 这些设备工作时都要产生谐波电流和谐波电压。特别是大型晶闸管整流设备和大型电弧炉, 是电力系统中产生谐波干扰的主要谐波源。

波形畸变程度可以用下面几个特征量来描述。

1) 第 h 次谐波电压含有率 (HRU_h):

$$HRU_h = \frac{U_h}{U_1} \times 100\% \quad (1-3)$$

2) 第 h 次谐波电流含有率 (HRI_h):

$$HRI_h = \frac{I_h}{I_1} \times 100\% \quad (1-4)$$

3) 谐波电压总含量 (U_H):

$$U_H = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (U_h)^2} \quad (1-5)$$

4) 谐波电流总含量 (I_H):

$$I_H = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (I_h)^2} \quad (1-6)$$

5) 电压总谐波畸变率 (THD_U):

$$THD_U = \frac{U_H}{U_1} \times 100\% \quad (1-7)$$

6) 电流总谐波畸变率 (THD_I):

$$THD_I = \frac{I_H}{I_1} \times 100\% \quad (1-8)$$

目前, 谐波已成为电力系统中影响电能质量的一大“公害”。谐波的危害主要表现在: 使变压器和电动机的铁心损耗增加, 引起局部过热, 同时使其振动和噪声增大, 缩短使用寿命; 使线路的功率损耗和电能损耗增加, 并有可能使电力线路出现电压谐振, 从而在线路上产生过电压, 击穿电气设备的绝缘; 使电容产生过负荷而影响其使用寿命; 使继电保护及自动装置产生误动作; 使计算电费用的感应式电能表的计量不准; 对附近的通信线路产生信号干扰, 从而使数据传输失真等。

因此, 国家标准 GB/T 14549—1993《电能质量 公用电网谐波》中规定了公用电网谐波电压限值和谐波电流允许值。

目前, 对谐波的抑制措施主要有: 三相整流变压器采用 Yd 或 Dy 接线, 增加整流器的相数, 在谐波源处装设专用滤波器, 限制晶闸管整流设备投入电网的容量, 在大型整流设备附近装设静止型无功补偿装置等。

5. 三相不平衡度

在三相供电系统中, 当电压或电流的三相量幅值不等或相位差不为 120° 时, 则三相电压或电流不平衡。供电系统的三相不平衡主要是由三相负荷不对称引起的。

对三相不平衡电压或电流, 可按对称分量法将其分解为正序分量、负序分量和零序分量。由于负序分量的存在, 对系统中电气设备的运行产生不良影响, 例如使电动机产生一个反向转矩, 从而降低了电动机的输出转矩, 使电动机效率降低; 同时, 使电动机的总电流增大, 使绕组温升增高, 加速绝缘老化, 缩短使用寿命。对变压器, 由于三相电流不平衡, 当最大相电流达到变压器额定电流时, 其他两相电流均低于额定值, 从而使其容量得不到充分利用。对多相整流装置, 三相电压不对称将严重影响多相触发脉冲的对称性, 使整流设备产生更多的谐波, 进一步影响电能质量。此外, 负序电流分量偏大还有可能导致一些作用于负序电流的继电保护和自动装置误动, 威胁电力系统的安全运行。

三相电压 (或电流) 不平衡度用电压 (或电流) 负序分量有效值与正序分量有效值的百分比来表示, 即

$$\varepsilon U\% = \frac{U_2}{U_1} \times 100\% \quad (1-9)$$

因此, GB/T 15543—1995《电能质量 三相电压允许不平衡度》中规定: 电力系统公共连接点的正常电压不平衡度允许值为 2%, 短时不得超过 4%; 接于公共连接点的每个用户, 电压不平衡度一般不得超过 1.3%。

为了改善三相不平衡, 可采取以下措施: 在三相系统中合理分配不对称负荷, 将不对称

负荷分散接于不同的供电点,采用高一级电压供电,采用特殊接线的平衡变压器供电及加装三相平衡装置等。

6. 暂时过电压和瞬态过电压

电力系统中因运行操作、雷击和故障等原因,经常会出现过电压,这是供电特性之一。过电压是指峰值电压超过系统正常运行的最高峰值电压时的工况。减少或杜绝过电压引发的事故是电力工作者长期面临的任务。围绕过电压问题,已有不少国家标准或行业标准就有关设备绝缘、试验和过电压保护等方面进行了规定,但将过电压作为电能质量指标之一并予以标准化,是近年来随着电力工业的发展和电力工作者对电能问题的逐步深入认识而出现的。

国家标准 GB/T 18481—2001《电能质量 暂时过电压和瞬态过电压》按照作用于设备和线路上的过电压幅值、波形和持续时间,将电力系统过电压分为暂时过电压和瞬态过电压。暂时过电压包括工频过电压和谐振过电压,特征为其在持续时间范围内无衰减或弱衰减;瞬态过电压包括操作过电压和雷击过电压,特征为振荡或非振荡衰减,且衰减很快,持续时间只有几毫秒或几十微秒。

总之,电能质量是一个既和电力系统安全稳定运行、电磁兼容紧密相关又有自己独特性质的领域,我国自 1990 年以来已相继颁布了六项电能质量的国家标准,提高电能质量和加强电能质量的治理已成为全社会普遍关注的热点,并已取得了一定的成效。随着电力科技的进步和电力工作者对电能质量问题的深入研究和认识,电能质量的相关概念、术语、标准、控制技术还将会得到进一步的发展。

第三节 电力系统中性点的运行方式

一、概述

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。这些中性点的运行方式涉及系统的电压等级、绝缘水平、通信干扰、接地保护方式及保护整定等许多方面,是一个综合性的复杂问题。我国电力系统的中性点运行方式主要有三种:中性点不接地、中性点经消弧线圈接地和中性点直接接地(或经低电阻接地)。前两种系统称为小电流接地系统,亦称电源中性点非有效接地系统;后一种系统称为大电流接地系统,亦称电源中性点有效接地系统。

二、中性点不接地的电力系统

我国 3~60kV 的电力系统通常采用中性点不接地运行方式。中性点不接地的电力系统正常运行时的电路和相量图如图 1-4 所示。各相导线之间、导线与大地之间都有分布电容,为了便于分析,假设三相电力系统的电压和线路参数都是对称的,把每相导线的对地电容用集中电容 C 表示,并忽略导线间的分布电容。

电力系统正常运行时,由于三相电压 \dot{U}_A 、 \dot{U}_B 、 \dot{U}_C 是对称的,三相导线对地电容电流 \dot{i}_{CA} 、 \dot{i}_{CB} 、 \dot{i}_{CC} 也是对称的,其有效值为 $I_{\omega} = \omega C U_{\phi}$ (U_{ϕ} 为各相相电压有效值),所以三相电容电流相量之和等于零,地中没有电容电流。此时,各相对地电压等于各相的相电压,电源中性点对地电压 \dot{U}_N 等于零。

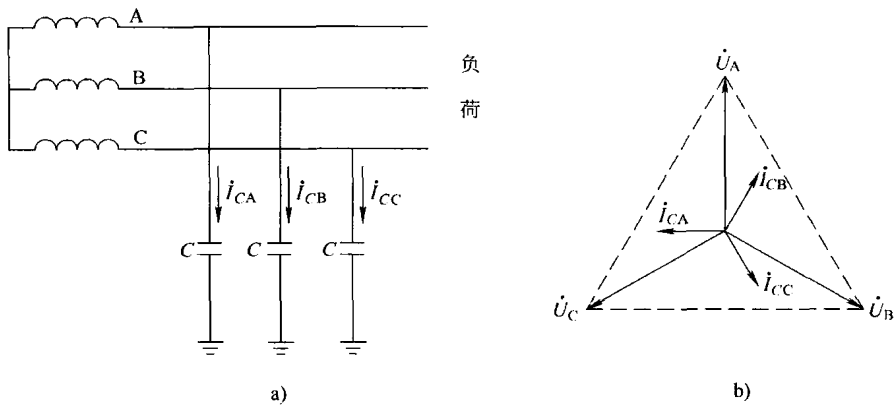


图 1-4 中性点不接地的电力系统正常运行时的电路和相量图

a) 电路 b) 向量图

当电力系统如果发生单相（如 A 相）接地故障时，如图 1-5a 所示，则故障相（A 相）对地电压降为零，中性点对地电压 $\dot{U}_N = -\dot{U}_A$ ，即中性点对地电压由原来的零升高为相电压，此时非故障相（B、C 两相）对地电压分别为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}'_B &= \dot{U}_B + \dot{U}_N = \dot{U}_B - \dot{U}_A = \dot{U}_{BA} \\ \dot{U}'_C &= \dot{U}_C + \dot{U}_N = \dot{U}_C - \dot{U}_A = \dot{U}_{CA} \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

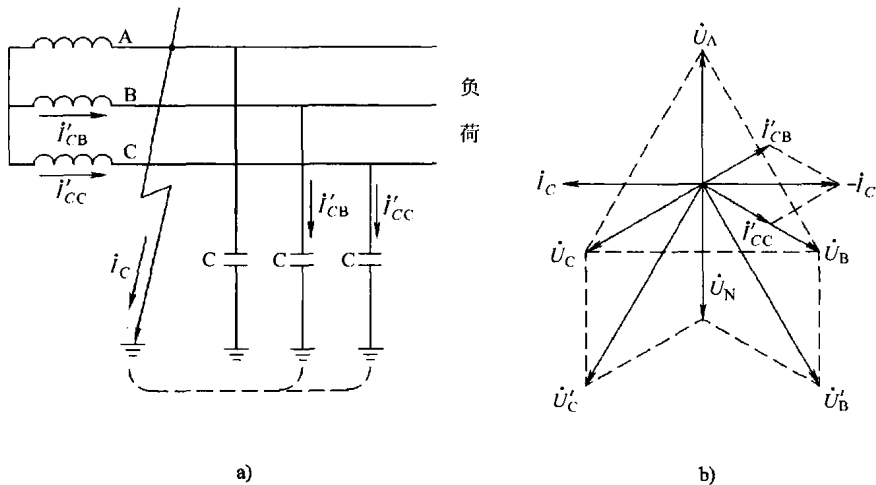


图 1-5 中性点不接地的电力系统发生 A 相接地故障时的电路和相量图

a) 电路 b) 相量图

式 (1-10) 说明，此时 B 相和 C 相对地电压升高为原来的 $\sqrt{3}$ 倍，即变为线电压，如图 1-5b 所示。但此时三相之间的线电压仍然对称，因此用户的三相用电设备仍能照常运行，这是中性点不接地电力系统的最大优点。但是，发生单相接地故障后，其运行时间不能太长，以免在另一相又发生接地故障时形成两相接地短路。因此，我国有关规程规定，中性点不接地的电力系统发生单相接地故障后，允许继续运行的时间不能超过 2h，在此时间内应设法尽快查出故障，予以排除；否则，就应将故障线路停电检修。