



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
职业教育电力技术类专业教学用书

供用电工程

杜文学 主编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
职业教育电力技术类专业教学用书

供用电工程

主编 杜文学
编写 王锁川 林创立 白亚为
主审 张 明 李巍巍



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书是电力高等专科学校“电气工程类”“供用电类”专业的一门专业课教材。全书共分十二章，主要内容包括电力系统的基本概念、电力系统中性点接地方式、电力负荷计算、电力网参数及潮流计算、配电网无功电压控制、电力系统短路电流计算、配电网电气设备、变电所常用接线及布置、电气设备的选择与维护、配电系统的继电保护、配电系统的二次回路及自动装置、配电网自动化等。本书力求反映电力工业新技术、新设备的发展趋势。作为教学用书在各章后还附有思考题和习题，以便于学习和掌握。

本书可作为高等专科学校电气工程类及供用电类的专业教材，也可供从事电力设备制造、运行及管理等相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

供用电工程/杜文学主编. —北京: 中国电力出版社, 2005

教育部职业教育与成人教育司推荐教材

ISBN 7-5083-3408-6

I. 供... II. 杜... III. ①供电-电力工程-成人教育: 高等教育-教材②用电管理-电力工程-成人教育: 高等教育-教材 IV. ①TM72②TM92

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 057163 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2005 年 7 月第 1 版 2005 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 29.5 印张 679 千字

印数 0001—3000 册 定价 38.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

前言

近年来,随着国民经济的快速稳定增长,电力工业得到了持续迅速发展,发电机装机容量和发电量已跃居世界第二位。尤其是两网改造后,大量的新设备、新技术、新工艺的广泛应用,对电力系统的规划、设计、运行、管理等方面提出了新的、更高的要求。培养更多掌握现代电力系统特点的专门人才和提高现有电力工业人员素质,是电力高等教育工作者所面临的迫切任务。

本书为教育部职业教育与成人教育司推荐教材,是根据教育部审定的电力技术类专业主干课程的教学大纲编写而成的,并列入教育部《2004~2007年职业教育教材开发编写计划》。本书经中国电力教育协会和中国电力出版社组织专家评审,同意列为全国电力高等职业教育规划教材,作为高等职业教育电力技术类专业教学用书。

本书体现了职业教育的性质、任务和培养目标;符合职业教育的课程教学基本要求和有关岗位资格和技术等级要求;具有思想性、科学性、适合国情的先进性和教学适应性;符合职业教育的特点和规律,具有明显的职业教育特色;符合国家有关部门颁发的技术质量标准。本书既可以作为学历教育教学用书,也可作为职业资格和岗位技能培训教材。

《供用电工程》是为宽口径的“电气工程类”、“供用电类”专业编写的一部专业教材。全书紧密结合生产实际,将“电力系统分析”、“电气设备”、“继电保护”、“自动装置”等融为一体。全书共分十二章:第一章介绍了电力系统的基本概念;第二章介绍了电力系统中性点的接地方式,并对现在广泛应用的自动调潜消弧线圈的工作原理以及低压配电网的供电方式作了介绍;第三章介绍了电力负荷计算;第四章介绍了电力系统元件的参数、网络的潮流及电能损耗计算等内容;第五章介绍了电力系统无功电压调整,并新增了配电线路的最优无功补偿内容;第六章介绍了短路电流的基本知识;第七章介绍了现在广泛应用的新型配电设备的结构和原理;第八章对变电所常用接线及布置作了介绍;第九章介绍了电气设备的选择知识,并增加了设备的运行及维护内容;第十章介绍了配电系统的继电保护;第十一章介绍了配电系统的二次回路及自动装置;第十二章介绍了配电网自动化的基本知识,围绕现在广泛应用的电流型、电压型自动化方案和FTU型自动化方案,介绍了重合器、电流型分段器、自动配电开关以及几种自动化方案隔离故障的过程等内容。全书最后通过相关的课程设计巩固所学内容,并为以后相关课程的学习打下基础。

本书由西安电力高等专科学校杜文学副教授主编,其中第一、二、三、四、五、六、七、十二章及附录由杜文学副教授编写,第八、九章由西安电力高等专科学校王锁川同志编写,第十一章由西安电力高等专科学校林创立同志编写,第十章由西安电力高等专科学校白亚为同志编写,全书由杜文学副教授统稿。西安电力高等专科学校张明教授和保定电力职业技术学院李巍巍高级讲师主审了全书,并提出了许多宝贵意见,作者表示衷心感谢。

在书的编写过程中,得到了多家供电企业及设备制造厂家的大力支持,许多制造厂家提

供了大量的第一手资料，对此作者表示衷心的感谢。书中还引用了大量的参考文献，作者对这些文献的作者也表示衷心感谢。

由于编写时间仓促，书中错误和不足之处在所难免，恳切希望使用此书的教师和学生提出批评指正意见。

编 者

2004 年 12 月

常用电气设备文字符号表

文字符号	中文含义	英文含义	旧符号
APD	备用电源自动投入装置	auto - put - into device of reverse - source	BZT
ARD	自动重合闸装置	auto - reclosing device	ZCH
C	电容	electric capacity	C
C	电容器	capacitor	C
FG	保护间隙	protective gap	JX
FU	熔断器	fuse	RD
G	发电机	generator source	F; DY
HG	绿色指示灯	green indicator lamp	LD
HL	指示灯, 信号灯	indicator lamp, pilot lamp	XD
HR	红色指示灯	red indicator lamp	HD
K	继电器, 接触器	relay contactor	J; JC
KA	电流继电器	current relay	LJ
KG	气体(瓦斯)继电器	gas relay	WSJ
KH	热继电器	heating relay	RJ
KM	中间继电器	medium relay	ZJ
KO	合闸接触器	closing contactor	HC
KS	信号继电器	signal relay	XJ
KT	时间继电器	time - delay relay	SJ
KV	电压继电器	voltage relay	YJ
M	电动机	motor	D
N	中性线	neutral wire	N
PA	电流表	ammeter	A
PE	保护线	protective wire	
PEN	保护中性线	protective neutral wire	N
PJ	电能表	watt hour meter	W
PV	电压表	voltmeter	V
QF	断路器(含自动开关)	circuit - breaker	DL
QL	负荷开关	load - switch	FK
QS	隔离开关	switch - disconnecter	GK
R	电阻	resistance	R

续表

文字符号	中文含义	英文含义	旧符号
SA	控制开关	control switch	KK
SA	选择开关	selector switch	XK
SB	按钮	push - button	AN
T	变压器	transformer	B
TA	电流互感器	current transformer	LH
TAM	中间变流器	middle current transformer	ZLH
TAN	零序电流互感器	neutral - current transformer	LLH
TV	电压互感器	voltage transformer	YH
TVM	中间变压器	middle voltage transformer	YB
TX	电抗变压器	reactance transformer	DKB
U	整流器	rectifier	ZL
UE	整流桥	bridge rectifier	BZ
V	晶体管、二极管	transistor、diode	BG、G
WAS	事故音响小母线	accident sound signal small - bus	SYM
W	接线	wire	jx
WB	母线	busbar	M
WC	控制小母线	control circuit small - busbar	KM
WF	闪光信号小母线	flash light signal small - busbar	SM
WFS	预告信号小母线	forecast signal small - busbar	YBM
WL	灯光信号小母线	lighting signal small - busbar	DM
WO	合闸电源小母线	switch on circuit source small - busbar	HM
WS	信号电源小母线	signal circuit source small - busbar	XM
X	电抗	reactance	X
X	端子排	terminal strip	—
XB	连接片	link	LP
YO	合闸线圈	closing operation coil	HQ
YR	跳闸线圈, 脱扣器	opening operation coil; release	TQ

目 录

前言	
常用电气设备文字符号表	
第一章 电力系统的基本概念	1
第一节 电力系统的组成及特点	1
第二节 发电厂和变电所的类型及设备	3
第三节 电力系统的额定电压	6
第四节 电力网的分类及常用接线形式	8
第五节 配电网的几个重要技术指标	10
第六节 电力线路的结构	13
小结	19
思考题与习题	20
第二章 电力系统中性点接地方式	21
第一节 中性点不接地系统	21
第二节 中性点经消弧线圈接地	25
第三节 智能补偿消弧线圈的工作原理	29
第四节 中性点经电阻接地	32
第五节 中性点直接接地	34
第六节 低压配电网的供电方式	35
小结	37
思考题与习题	38
第三章 电力负荷计算	39
第一节 电力负荷与负荷曲线	39
第二节 按需用系数法计算负荷	47
第三节 二项系数法计算负荷	52
第四节 单位产品耗电定额法计算负荷	55
第五节 供电系统功率因数的提高	57
小结	62
思考题与习题	62
第四章 电力网参数及潮流计算	64
第一节 电力线路的参数及等值电路	64
第二节 变压器的等值电路及参数计算	68
第三节 配电网的功率损耗及电压计算	73
第四节 开式配电网的潮流计算	79
第五节 两端电源供电网潮流计算	84
第六节 电力网的电能损耗与经济功率分布计算	92
小结	96
思考题与习题	97
第五章 配电网无功电压控制	99
第一节 概述	99
第二节 电力系统的无功电源	103
第三节 电力系统中的电压管理	106
第四节 改变变压器分接头调压	108
第五节 并联无功补偿调压	112
第六节 改变电力网参数调压	121
第七节 配电线路的最优无功补偿	124
第八节 配电网的综合调压	129
小结	130
思考题与习题	130
第六章 电力系统短路电流计算	132
第一节 概述	132
第二节 元件参数的标幺值与网络化简	134
第三节 无限大系统供电的三相短路电流计算	140
第四节 同步发电机供电的三相短路电流计算	145
第五节 运用运算曲线求任意时刻的短路电流	152
第六节 序网络及元件的序阻抗	156
第七节 不对称短路电流分析计算	164
小结	172
思考题与习题	172
第七章 配电网电气设备	175
第一节 开关设备中的电弧理论	175
第二节 断路器的基本知识	179
第三节 SF ₆ 断路器	182

第四节 真空断路器	192	第四节 110kV 电力线路的继电保护	308
第五节 高压隔离开关	198	第五节 电力变压器的继电保护	320
第六节 负荷开关及组合电器	201	第六节 电动机保护和 6 ~ 10kV 电力电 容器的保护	328
第七节 熔断器	203	第七节 电气装置的接地与接零	336
第八节 互感器	208	小结	342
第九节 高压开关柜	219	思考题与习题	342
第十节 低压控制电器	224	第十一章 配电系统的二次回路及自动 装置	344
小结	226	第一节 配电系统的二次回路概述	344
思考题与习题	227	第二节 二次回路操作电源	351
第八章 变电所常用接线及布置	229	第三节 断路器控制及信号回路	356
第一节 电气主接线的基本要求	229	第四节 中央信号装置	364
第二节 主接线的基本接线形式	230	第五节 测量系统及监视系统	369
第三节 各种变电所主接线的 常用接线	237	第六节 配电系统自动装置	372
第四节 变电所所用电接线	239	小结	376
第五节 变电所配电装置	240	思考题与习题	376
小结	252	第十二章 配电网自动化	378
思考题与习题	252	第一节 配电网自动化的组成	378
第九章 配电网电气设备的选择 与维护	254	第二节 进线监控、变配电所的自 动化	382
第一节 变电所变压器的选择	254	第三节 重合器与分段器	383
第二节 导体的发热计算	256	第四节 馈线自动化	390
第三节 导体短路的电动力计算	258	小结	396
第四节 导体、电缆、绝缘子 及套管的选择	261	思考题与习题	397
第五节 电气设备的选择与校 验的一般方法	270	附录 I 导体的主要技术参数	398
第六节 开关电器的选择	272	附录 II 变压器主要技术参数	403
第七节 互感器的选择	276	附录 III 开关电器的主要技术数据	409
第八节 电气设备的运行与维护	278	附录 IV 熔断器主要技术参数	412
小结	284	附录 V 互感器的主要技术参数	414
思考题与习题	285	附录 VI 智能接地补偿装置主要技术 参数	418
第十章 配电系统的继电保护	286	附录 VII 补偿电容器技术参数	419
第一节 继电保护的 task 与要求	286	附录 VIII 避雷器技术参数	424
第二节 常用继电器及其接线方式	288	附录 IX 短路电流运算曲线	426
第三节 3 ~ 66kV 电力线路的继电保护	293	参考文献	431

电力系统的基本概念

提要：本章介绍了电力系统的基本组成、发电厂和变电所类型、额定电压等基本概念，介绍了配电网的常用接线形式和几个重要技术指标，最后对电力线路的结构及组成等作了介绍。

第一节 电力系统的组成及特点

一、电力工业在国民经济中的地位

能源是社会生产力的基础。随着社会生产力的不断发展，人类使用能源不仅在数量上越来越大，而且在品种和结构上也越来越多样化。其中煤炭、石油、天然气、水能、核能、风能、地热和潮汐等自然界提供的能源，称为一次能源；人们日常生产和生活中广泛使用的电能称为二次能源。电能是由一次能源转换而来的，通常把一次能源转换成二次能源的产业称为电力工业。

由于电能具有输送、分配、转换、控制及使用方便等诸多优点，在现代社会中，电能已经成为工业、农业、交通和国防等各行各业不可缺少的动力和人民生活的必需品。世界各国的发展表明，国民经济每增长1%，电力工业要相应增长1.3%~1.5%，才能为国民经济快速稳定增长提供足够的动力。因此，电力工业是国民经济发展的基础产业，没有电力工业的先行，就没有国民经济快速稳定增长。

旧中国的电力工业发展十分缓慢，到1949年全国解放时，全国的装机容量仅有185万kW，年发电量只有43亿kWh。解放后，全国电力工业有了很大发展，尤其是改革开放以后，随着国民经济快速发展对电能的巨大需求，电力工业更是进入了迅猛发展时期。截至2003年底，全国的装机容量已经达到38450亿kW，年发电量达到19107.6亿kWh。2004年预计装机容量将达到43000亿kW，发电量将超过21000亿kWh，装机容量和发电量已由解放时世界的25位跃升为仅次于美国的第二位。与之相配套的一大批500kV交流输变电和直流±500kV输电线路已经投入运行。目前，全国已经形成南方、东北、西北、华北、华中、华东6个大跨省区域电网和鲁、闽、琼、疆、藏和台湾6个独立省（自治区）电网。从1998年后，国家又投入巨资对城乡配电网进行了改造，大量的新设备、新技术、新工艺投入使用。这些都为国民经济的快速和可持续发展以及人民生活水平的提高起到了积极的推动作用。

二、电力系统的组成

在自然界中，发电所需的一次能源和电能用户通常不在同一地方。水能资源集中在水流落差比较大的偏远山区，煤炭和石油资源集中在矿区，而电能用户一般都集中在大、中城市和负荷集中的大工业区，与一次能源产地相距甚远。虽然火力发电厂也可以建设在负荷中心附近，但高昂的燃料运输成本和严重的环境污染是人们无法接受的。因此，必须建设升压变电所和输电线路，将地处偏远地区的水力发电厂和位于矿区的大型火力发电厂并列起来，通过输电线路，将各类发电厂发出的电能输送到负荷中心来，再经过降压变电所降压和配电网

配送和分配,最后将电能提供给广大用户。

为了提高供电的可靠性和经济性,通常将发电厂和用户之间通过升、降压变电所、输电、配电线路和各种类型的用电设备组成的统一整体称为电力系统。电力系统中各种类型的变电所及输电、配电线路组成的统一整体,称为电力网。如果将各种类型发电厂的原动力部分,如水电厂的水库和水轮机、火力发电厂的锅炉和汽轮机、核电厂的核岛(反应堆)及汽轮机等考虑进去,它们与电力系统所组成的统一整体,称为动力系统。

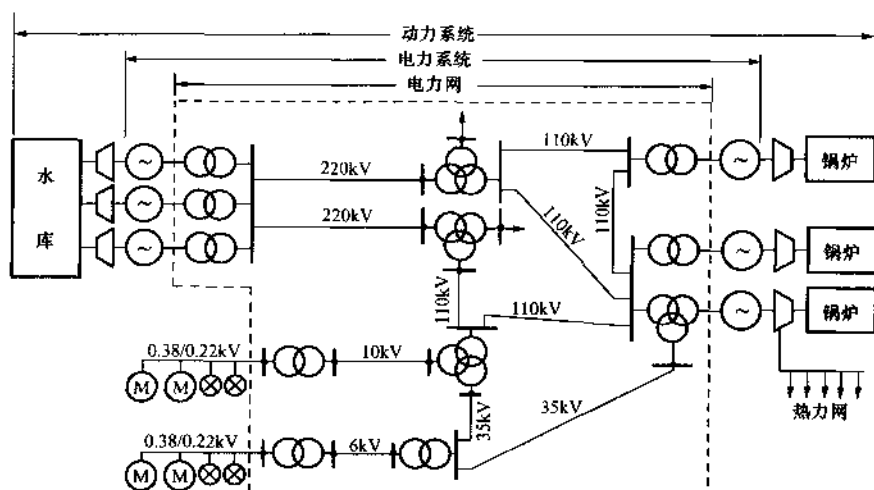


图 1-1 动力系统、电力系统及电力网示意图

三、电力系统的特点

在短短的 100 多年发展历史中,电力系统从早期的直流到后来的交流,再到现代的交流并存,电力系统的规模越来越大,输电距离也越来越远,已经出现了大型的跨国、跨区域联合电力系统。将小系统联合成人系统具有下列几方面明显的优点:

- (1) 提高了供电可靠性。
- (2) 提高了供电的电能质量。
- (3) 可以减少系统的备用容量,提高设备利用率。
- (4) 便于安装大机组,且机组容量越大,技术经济效益越好。
- (5) 可以合理利用动力资源,提高了系统运行的经济性。

虽然联合电力系统具有上述优点,但是随着系统容量的不断扩大,故障影响和波及的范围也在扩大,系统的短路容量也在扩大,对电气设备开断短路电流的能力也提出了更高的要求,这也正是联合电力系统的缺点。

电力系统运行的特点,概括起来有以下几个方面:

1. 发供电的连续性

现阶段电能尚不能大量地、廉价地储存,发、变、输、配以及用电几乎同时完成,其中任一环节出现故障,必将影响电力系统的运行。因此,必须努力提高各环节的可靠性,以保证电力系统的安全、经济、连续、可靠运行和对用户的不间断供电。

2. 与国民经济各部门关系密切

电力工业与国民经济及人民生活息息相关，是国民经济发展的动力和基础，是人们生活的必需品，电力供应的中断或不足，将直接影响到社会生产、人民生活和国民经济的方方面面。

3. 过渡过程的短暂性

电力系统中发电机、变压器、线路等元件的投入和切除要求非常迅速，由此而引起的系统电磁、机电暂态过程是非常短暂的。因此，正常和故障情况所进行的调整和切换操作非常迅速，必须依赖自动化程度高和动作可靠的继电保护设备及自动装置来完成。同时还需要大量的、高素质的专门人才来加以控制。

四、对电力系统的基本要求

根据电力系统运行的特点，对电力系统的基本要求主要有以下几个方面。

1. 保证连续可靠的供电

供电的中断将使生产停顿、生活紊乱，甚至危害到设备和人身的安全，造成十分严重的后果。供电中断给国民经济造成的损失远远超过对电力系统本身造成的停电损失。因此，电力系统运行首先要满足连续可靠的要求；其次要提高运行和管理水平，防止发生误操作和不必要的人为操作失误使事故扩大化；还要加强对设备的安全运行检查；最后要加强和完善电网本身的结构，增加备用容量和采用必要的自动化设备。

2. 保证良好的电能质量

电能质量指标是指电压、频率和波形三者的变化不能超过允许的波动范围。电压的允许波动范围：35kV 及以上为 $\pm 5\%$ ，10kV 及以下为 $\pm 7\%$ ；频率的允许偏移为 $50 \pm (0.2 \sim 0.5)$ Hz（小系统为 ± 0.5 Hz，大系统为 ± 0.2 Hz）；波形应为标准正弦波且谐波应不超过标准（110kV 谐波总畸变率不超过 2%，35 ~ 66kV 不超过 3%，6 ~ 10kV 不超过 4%，0.38/0.22kV 不超过 5%）。电压质量合格，用电设备正常工作时具有最佳的技术经济效果；相反，电能质量不合格，不仅对用电设备运行产生影响，对电力系统本身也有危害。

3. 保证电力系统运行的经济性

电力系统运行时，要尽可能地降低发电、变电和输配电过程中的损耗，最大限度地降低电能成本。这不仅意味着大量的节约了能量资源，而且也降低了各用电部门的生产成本，使国民经济整体受益。

第二节 发电厂和变电所的类型及设备

一、发电厂的类型

发电厂是将各种自然资源转换为电能的工厂。按照一次能源的种类不同，发电厂又可以分为火力发电厂、水力发电厂、核能发电厂及其他形式能源的发电厂。

1. 火力发电厂

利用固体、液体、气体燃料的化学能来生产电能的工厂称为火力发电厂，简称火电厂。迄今为止，火电厂仍是世界上电能生产的主要方式，约占发电设备总装机容量的 70% 以上。我国和世界各国的火电厂使用的燃料大多以煤炭为主，其他还有以燃油、天然气以及生活和工业垃圾等为燃料的火电厂。

火电厂在将一次能源转化为电能的过程中，一般要经过三次能量转换。首先是将燃料的

化学能转化为热能，再经过原动机把热能转变为机械能，最后通过发电机将机械能转化为电能。

火电厂按照其生产方式不同又可以分为下列类型：

(1) 凝汽式火电厂。将锅炉产生的过热蒸汽送到汽轮机，通过汽轮机带动发电机发电。而凝汽式火电厂的特点是将已作过功的蒸汽（乏汽）排入凝汽器，在凝汽器中凝结成水后再重新打入锅炉。在这一过程中，大量的热量被循环水带走，因此，凝汽式火电厂的热效率较低，一般只有 30% ~ 40%。

(2) 热电厂。热电厂与凝汽式电厂的主要不同点在于汽轮机中部分已经做过功的蒸汽，从中间抽出后供给热力用户，或经热交换器将水加热后再供给热力用户。由于热电厂减少了循环水带走的热量损失，因此热电厂的热效率较高，一般可以达到 60% ~ 70%。

2. 水力发电厂

水力发电厂是利用河流等蕴藏的水能资源来生产电能的工厂，简称水电厂。水电厂将水的位能转换为电能只有两次能量转换过程，即通过原动机（水轮机）将水的位能转换为机械能，再通过发电机将机械能转变为电能。根据水利枢纽的布局不同，水电厂又可以分为堤坝式和引水式等类型。

(1) 堤坝式水电厂。这种发电厂的厂房建在坝后，全部水压由坝体承受，厂房本身不承受水压，利用坝体抬高水位形成发电水头，再将高水位的水头引下来冲动水轮机，带动发电机发电。堤坝式水电厂按水头又可以分为坝后式和径流式两种，我国长江三峡、刘家峡和二滩等都属于坝后式水电厂；葛洲坝则为径流式水电厂。

(2) 引水式水电厂。将水电厂建筑在山区水流湍急的河道上，或河床坡度较大的区段，用修隧道或渠道的方法形成水流落差来发电。这种发电厂多用于小水电。

此外，为了系统调峰的需要，系统中还有一些水电厂，在负荷较小时利用系统“多余”的电能，使机组按电动机—水轮机（水泵）方式运行，将下游的水抽到上游水库储存；而在系统负荷高峰时，使机组按水轮机—发电机方式运行，将水库中的蓄水转变为电能。这种水电厂一般称为抽水蓄能电厂。

3. 核能发电厂

核能发电厂与火力发电过程相似，只是其热能是利用置于反应堆中的核燃料在发生裂变时释放出的能量而得到。它利用蒸汽发生器取代火电厂的锅炉系统，除蒸汽发生器、泵等外，主要就是核反应堆。根据反应堆的形式不同，核电厂又可以分为轻水堆型和重水堆型等类型。目前世界上的核电厂大多是轻水堆型。轻水堆型又分为沸水堆型和压水堆型。

4. 其他能源发电

目前，除了上述利用燃料的化学能、水的位能和核能作为生产电能的主要方式外，还可以利用风能、地热、潮汐、太阳能等可再生能源生产电能。

二、变电所的类型

变电所是电能输送过程中的一个重要环节，起着变换和分配电能的作用。根据变电所在系统中的位置和作用，变电所可以分为枢纽变电所、中间变电所、地区变电所和终端变电所等类型，如图 1-2 所示。

1. 枢纽变电所

枢纽变电所是大供电区域内的核心变电所，起着汇集多个大型发电厂电能和再分配的重

要任务。一般电压在 $330 \sim 500\text{kV}$ 且有大量 $110 \sim 220\text{kV}$ 出线的变电所,称为枢纽变电所。枢纽变电所的故障停电,将引起供电区域内大面积停电,系统解列,甚至造成系统瘫痪。

2. 中间变电所

中间变电所的特点是以交换潮流为主,一般汇集 $2 \sim 3$ 个电源,作为长距离输电线路的分段,低压侧可以带部分当地负荷,在系统中起着“承上启下”的重要作用。变电所故障停电后,将导致该供电地区供电中断,甚至区域网络解列。

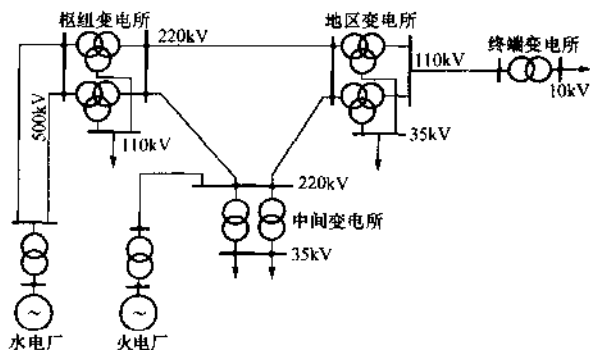


图 1-2 发电厂及变电所类型

3. 地区变电所

地区变电所的高压侧电压一般只有 $110 \sim 220\text{kV}$,以对地区供电为主,一般作为地区或城市配电网的主要变电所。全所故障停电后,仅使该供电地区停电。

4. 终端变电所

终端变电所作为电网的末端变电所,一般位于输电线路终端,接近负荷点,高压侧电压为 $35 \sim 110\text{kV}$,经降压后直接向用户变、配电所供电。全所停电后,仅影响该所的供电用户。

此外,变电所按作用不同还可以分为降压变电所、升压变电所、联络变电所和整流变电所等类型。

三、电气设备及其作用

发电厂和变电所在工作时需要很多控制、保护、监视及自动化等电气设备。这些电气设备主要有:

(1) 电能生产和转换类设备。这些设备主要包括有发电机、电动机、变压器等,发电机主要用来将机械能转换为电能,电动机则是将电能转换为机械能,变压器可以将电压按要求升高或降低以满足输配电的要求。

(2) 控制和保护类电气设备。如断路器、负荷开关、熔断器、接触器、自动开关等,主要用来对电路及设备的运行进行控制,当电路或设备发生故障时,能在继电保护的配合下,迅速动作切除故障。

(3) 限流和限制过电压类设备。如限制短路电流的限流电抗器和限制过电压的避雷器及避雷针等。

(4) 载流导体类。如汇流母线、引流线等,利用这些载流导体可以将各种电气设备连接起来。

上述电气设备担负着生产和输配电能的任务,通常称为一次设备。还有一些设备是对这些设备进行监察、测量、控制和保护用的,称为二次设备。它们包括:

(1) 互感器类。如电流互感器和电压互感器,它们的作用是将高电压、大电流变换成低电压和小电流,供仪表和继电保护装置使用。

(2) 测量表计类。如电压表、电流表、功率表、电能表等,主要用来测量电路中的各种

电气量。

(3) 继电保护和自动装置类。这些装置能迅速反应系统的各种不正常工作状态，并作用于自动调节装置或断路器跳闸，快速切除故障以使系统尽快恢复正常。

(4) 直流设备。直流设备包括直流发电机、蓄电池和直流系统等，其作用是为继电保护、控制、事故照明等提供电源。

第三节 电力系统的额定电压

一、额定电压等级

为了使电力设备的生产实现标准化、系列化，为了各元件能够合理配套，电力系统中发电机、变压器、线路及各种电气设备等，都是按照规定的额定电压进行设计制造的。电力设备在额定电压下运行时，其技术和经济性能最佳。

在电力系统中，从输送电能的角度来看，三相交流输电线路传输的有功功率为

$$P \approx \sqrt{3} UI \cos \varphi \quad (1-1)$$

式中：\$U\$ 为三相线电压，kV；\$I\$ 为线路电流，kA；\$P\$ 为传输的有功功率，MW。

三相导线中的损耗可表示为

$$\Delta P = 3I^2 R_1 = 3 \left(\frac{P}{\sqrt{3} U \cos \varphi} \right)^2 \times \rho \frac{l}{S} = \frac{P^2 \rho l}{U^2 \cos^2 \varphi \times S} \quad (1-2)$$

式中：\$\Delta P\$ 为三相线路的功率损耗，MW；\$R_1\$ 为一相导线电阻，\$\Omega\$；\$\rho\$ 为导线的电阻率，\$\Omega \text{mm}^2/\text{km}\$；\$l\$ 为输电线路长度，km；\$S\$ 为导线截面积，\$\text{mm}^2\$。

由式(1-1)和式(1-2)可以看出，当输送功率一定时，线路的电压越高，导线中的电流就越小，所用导线的截面就可以减小，对应的导线投资也减少，导线中的功率损耗和电能损耗也相应降低。因此大容量和远距离输电时要采用高电压等级。但是，电压越高，线路的绝缘水平也相应提高，除对应的线路杆塔尺寸、输电走廊等加大外，变压器和电力设备等的投资也增大。因此，对电力系统电压等级的选择，过高或过低都不合理。对应一定的传输距离和传输功率，有一个最合理的线路电压值。但为了设备制造方便，电压值又不能任意设定，且电压等级规定得过多也不利于电力工业的发展。考虑到电力系统现有的实际情况和进一步发展的需要，国家制定了一系列标准（额定）电压等级。通常，将100V以下的电压称为第一类额定电压，将100~1000V的电压称为第二类额定电压，将1000V以上的电压称为第三类额定电压。第二类 and 第三类额定电压如表1-1和表1-2所示。电力线路的电压等级只能选用国家规定的额定电压等级。

表 1-1 1000V 以下（二类）额定电压（V）

用 电 设 备			发 电 机		变 压 器			
直 流	三 相 交 流		直 流	三相交流	三 相		单 相	
	线 电 压	相 电 压			一 次 绕 组	二 次 绕 组	一 次 绕 组	二 次 绕 组
110	(127)		115	(133)	(127)	(133)	(127)	(133)
220	220	127	230	230	220	230	220	230
	380	220	400	400	380	400	380	
440								

表 1-2

3kV 级以上 (三类) 额定电压 (kV)

用电设备	线路平均额定电压	交流发电机	变 压 器	
			一次绕组	二次绕组
3	3.15	3.15	3 及 3.15	3.15 及 3.3
6	6.3	6.3	6 及 6.3	6.3 及 6.6
10	10.5	10.5	10 及 10.5	10.5 及 11
		13.8, 15.75, 18, 20, 24	13.8, 15.75, 18, 20, 24	
35	37		35	38.5
(60)	63		(60)	(66)
110	115		110	121
(154)	(162)		(154)	(169)
220	230		220	242
330	345		330	363
500	525		500	550
750	787		750	825

二、电气设备的额定电压

1. 用电设备的额定电压

用电设备的额定电压应和电网的额定电压相一致。但由于在电能输送时,线路和变压器等元件上会产生电压损失,使线路上各处的电压不相等,使各点的实际电压偏离额定电压,即线路首端的电压将高出额定电压,末端将低于额定电压,其电压分布如图 1-3 所示。

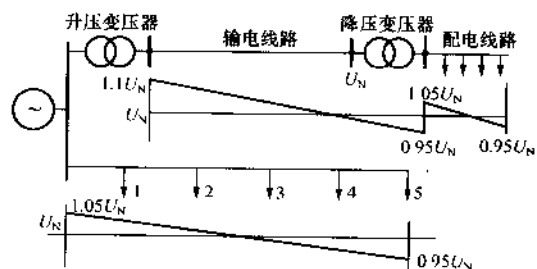


图 1-3 电力网各元件额定电压示意图

为了使电气设备有良好的运行性能,国家标准规定各级电网电压在用户处的电压偏差不得超过 $\pm 5\%$ 。即电力线路从首端至末端的电压损失允许为 10% 。这样,无论图中的负荷 (1~5) 接在哪一点,都能保证其承受的电压不超过额定电压的 $\pm 5\%$ 。

2. 发电机的额定电压

因为发电机总是接在线路的首端,所以它的额定电压应比电网的额定电压高 5% ,用以补偿电网上的电压损失。

3. 变压器的额定电压

变压器具有发电机和用电设备的双重性。在电力系统中,变压器的一次绕组相当于用电设备,接受电能;二次绕组输出电能则相当于发电机。因此规定:变压器一次绕组的额定电压等于电网的额定电压,即 U_N 。但是当变压器的一次绕组直接与发电机的出线端相连时,其一次绕组的额定电压与发电机的额定电压相同,即 $1.05U_N$ 。变压器二次绕组的额定电压是指变压器空载运行时的电压。当变压器在额定负荷下运行时,其内部阻抗会造成大约 5% 的电压损失。为使变压器在额定负载下工作时,二次绕组的电压比同级电网的额定电压高 5% ,因此规定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%，即 $1.1U_N$ 。当变压器的二次侧输电距离较短或变压器的阻抗较小（一般 35kV 及以下，阻抗电压小于 7.5%）时，则变压器二次绕组的额定电压可比同级电网的额定电压高 5%，即 $1.05U_N$ 。

三、各级电压的经济输送容量

选择电力网的电压时，应根据输送容量和输电距离，以及周围电力网的额定电压情况，拟定几个方案，通过经济技术比较确定。如果两个方案的技术经济指标相近，或较低电压等级的方案优点不太明显时，应采用电压等级较高的方案。表 1-3 所示为各级电压的经济输送容量与输送距离的关系，可供选择电压等级时参考。

电力工业发展的经验表明，电压等级不宜过多或过少，即相邻的两个电压等级的级差不宜过大或过小。级差过小，将导致电压等级过多，使电力设备制造部门的生产复杂化，即增加了设备成本，也增大了重复降压时的变电损耗。相反，过少的电压等级又会使电压等级的选择受到限制，不易达到合理配置。根据经验，在 110kV 以下时，额定电压的级差以 3 倍左右为宜；110kV 以上时以 2 倍左右为宜。

表 1-3 架空输电线路的额定电压与输送功率和输送距离的关系

线路电压 (kV)	输送功率 (MW)	输送距离 (km)	线路电压 (kV)	输送功率 (MW)	输送距离 (km)
0.38	0.1 以下	0.6 以下	110	10 ~ 50	50 ~ 150
3	0.1 ~ 1.0	1 ~ 3	220	100 ~ 500	100 ~ 300
6	0.1 ~ 1.2	4 ~ 15	330	200 ~ 800	200 ~ 600
10	0.2 ~ 2.0	6 ~ 20	500	1000 ~ 1500	250 ~ 850
35	2.0 ~ 10	20 ~ 50	750	2000 ~ 2500	500 以上

第四节 电力网的分类及常用接线形式

一、电力网的分类

电力网按照供电范围和输送距离，可以分为地方网、区域网和远距离输电网三类。电压为 110kV 以下的电力网，由于电压较低，输送功率小，线路距离短，主要供地方负荷用电，称为地方网；电压在 110kV 以上的电力网，其传输距离和传输功率都比较大，一般供电给大型区域性变电所，称为区域网；而对于供电距离在 300km 以上，电压在 330kV 及以上的电力网，称为远距离输电网。

电力网按照电压的高低可以分为低压网、中压网、高压网和超高压网等类。电压在 1kV 以下的电力网称为低压网，低压网主要用于低压用户的配电，又称为低压配电网。电压在 1 ~ 20kV 的电力网称为中压网，中压网作为城市和农村电网的主网，担负着向广大中小用户供电的任务，中压网又称为中压配电网。全国中压配电网以 10kV 为主，3kV 和 6kV 中压配电网已经趋于淘汰，20kV 目前仅限于局部地区使用。电压在 35 ~ 220kV 电力网称为高压网，高压网主要用于城市和农村电网配电，又称为高压配电网。高压配电网目前以 35 ~ 110kV 为主，35kV 主要用于农村电网，60kV 和 110kV 主要用于城市配电网；220kV 则主要用于特大型城市的高压配电网中。电压在 330kV 及以上的电网通常称为超高压网，主要用于跨区域、大功率远距离输电。