



普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

DIANLI XITONG

电力系统

杜文学 主编

Electric Power Technology



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>



普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

DIANLI XITONG

电力系统

主 编 杜文学
编 写 辛 华 蔡 雯
主 审 杜正春 张 明

Electric Power Technology



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。全书共分十四章，内容包括电力系统基本知识、电力网的参数及等值电路、简单电力系统的潮流计算、复杂电力系统的潮流计算、电力系统的有功功率平衡及频率调整、电力系统的无功功率平衡和电压调整、电力系统三相短路分析、电力系统三相短路电流的实用计算、对称分量法及电力系统各元件的序阻抗和等值电路、不对称故障的分析和计算、电力系统稳定性问题概述、电力系统静态稳定性、电力系统暂态稳定性及交流远距离输电。全书力求结合生产实际，并充分反映了电力系统的最新发展成果。在各章后还附有小结和习题，以便于学习和掌握。

本书可作为高职高专院校电力技术类专业的教学用书，也可作为从事相关工作的工程技术人员参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统/杜文学主编；辛华，蔡雯编写. —北京：中国电力出版社，2007

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 高职高专教育
ISBN 978 - 7 - 5083 - 5268 - 8

I. 电... II. ①杜... ②辛... ③蔡... III. 电力系统—高等学校：技术学校—教材 IV. TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 031343 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>)
北京市同江印刷厂印刷
各地新华书店经售

2007 年 4 月第一版 2007 年 4 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 18 印张 435 千字
印数 0001—3000 册 定价 27.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材，是根据教育部审定的电力系统课程教学大纲，为电气工程类专业电力系统分析课程编写的一本专业教材。

随着国民经济快速稳定增长，电力系统面临前所未有的发展机遇。大机组电厂和超高压乃至特高压电网的不断建设，使得电力系统间的联系愈来愈紧密、容量也愈来愈大。为了尽力反映电力系统的技术进步和大机组、超高压以及特高压电网的特点，为了能适应专科学校应用性、实用性及针对性的教学特点，根据电力系统分析课程教学大纲的要求，组织编写了这本反映现代电力系统现状和最新成果的《电力系统》教材。

全书共分十四章。其中前十三章包括了电力系统稳态分析和暂态分析两部分内容，为电力系统课程的基本内容。第十四章交流远距离输电为扩展内容，以达到开阔学生视野、拓展知识面的目的，视教学需要可适当增删。

本书的第八、十一、十二章由辛华编写，第九章第一节部分内容由蔡雯编写，其余各章节由杜文学编写。本书由杜文学担任主编，并对全书进行了统稿工作。

全书由西安交通大学博士生导师杜正春教授和西安电力高等专科学校张明教授主审，并对全书提出了许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

限于编者水平和经验，书中错误和不足之处在所难免，恳请读者评改指正（dwxxwd@163.com）。

编 者

2006.12

目 录

前言	
第一章 电力系统基本知识	1
第一节 电力系统的组成及特点	1
第二节 电力系统的额定电压和接线方式	3
第三节 电力系统中性点接地方式	8
第四节 电力系统负荷	11
第五节 电力线路结构	13
小结	19
习题	19
第二章 电力网的参数及等值电路	21
第一节 电力线路的电气参数计算	21
第二节 输电线路的等值电路	26
第三节 电力变压器的电气参数和等值电路	28
第四节 标幺制和电力网等值电路	34
小结	44
习题	44
第三章 简单电力系统的潮流计算	46
第一节 电力网的功率损耗与电能损耗	46
第二节 电力网的电压计算	50
第三节 简单辐射型电力网的潮流计算	54
第四节 两端供电网的潮流计算	58
第五节 电力线路导线截面选择	65
小结	71
习题	72
第四章 复杂电力系统的潮流计算	74
第一节 复杂电力系统的数学模型	74
第二节 功率方程及节点分类	77
第三节 非线性代数方程的迭代解法	79
第四节 牛顿—拉夫逊法潮流计算	82
小结	89
习题	89
第五章 电力系统的有功功率平衡及频率调整	91
第一节 电力系统中的有功功率平衡	91
第二节 电力系统中有功功率的最优分配	92

第三节	电力系统的频率特性	100
第四节	电力系统的频率调整	104
小结	.....	109
习题	.....	110
第六章	电力系统的无功功率平衡和电压调整	112
第一节	电力系统中的无功功率平衡	112
第二节	电力系统的无功电源	115
第三节	电力系统中的电压管理	118
第四节	改变变压器分接头调压	120
第五节	并联无功补偿设备调压	125
第六节	改变电力网参数调压	128
第七节	电力系统综合调压	131
小结	.....	132
习题	.....	133
第七章	电力系统三相短路分析	135
第一节	短路的基本概念	135
第二节	无限大系统供电的三相短路电流计算	136
第三节	同步发电机参数分析	141
第四节	同步发电机供电的三相短路过程分析	146
小结	.....	151
习题	.....	151
第八章	电力系统三相短路电流的实用计算	153
第一节	网络的变换与化简	153
第二节	短路电流交流分量起始值的计算	157
第三节	运用运算曲线求任意时刻的短路电流	162
第四节	异步电动机对短路电流的影响	165
小结	.....	167
习题	.....	168
第九章	对称分量法及电力系统各元件的序阻抗和等值电路	170
第一节	对称分量法	170
第二节	对称分量法在不对称故障分析中的应用	172
第三节	系统各元件的序阻抗及序网络	175
第四节	电力系统的序网络	179
小结	.....	182
习题	.....	182
第十章	不对称故障的分析和计算	184
第一节	各种不对称短路故障时故障处的电流和电压计算	184
第二节	非故障处电流和电压计算	194
第三节	非全相运行的分析和计算	199

小结	202
习题	202
第十一章 电力系统稳定性问题概述	204
第一节 电力系统稳定的基本概念	204
第二节 同步发电机的转子运动方程	205
第三节 同步发电机的电磁功率	207
小结	212
习题	212
第十二章 电力系统静态稳定性	214
第一节 简单电力系统的静态稳定	214
第二节 小干扰法分析系统静态稳定	218
第三节 提高静态稳定性的措施	223
小结	225
习题	226
第十三章 电力系统暂态稳定性	227
第一节 电力系统暂态稳定概述	227
第二节 简单系统的暂态稳定性分析	228
第三节 发电机转子摇摆曲线的求解	233
第四节 复杂系统的暂态稳定性	236
第五节 提高电力系统暂态稳定性的措施	237
第六节 电力系统振荡分析	241
小结	243
习题	243
第十四章 交流远距离输电	245
第一节 交流远距离输电线路的输电方程	245
第二节 交流远距离输电线路的自然功率	247
第三节 无补偿线路的开路运行	249
第四节 交流远距离输电线路的负荷运行	251
第五节 交流远距离输电线路的传输功率极限	254
第六节 交流远距离输电线路的补偿运行	257
小结	262
习题	262
附录	264
附录 A 导体的主要技术参数	264
附录 B 变压器主要技术参数	267
附录 C 补偿电容器技术参数	272
附录 D 短路电流运算曲线	273
参考文献	278

第一章 电力系统基本知识

第一节 电力系统的组成及特点

一、电力工业的发展现状

能源是社会生产力的基础。随着社会生产力的不断发展，人类使用的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直接提供的能源，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，就没有国民经济的快速稳定增长。

我国电力工业发展速度很快，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2006年底，全国的装机容量已经达到62200万kW，年增长20.3%；年发电量达到28344亿kW·h，年增长13.5%。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。预计到2020年，我国电力装机将在此基础上再翻一番，达到95000万kW（见表1-1）。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，750kV已经带电运行，由晋东南经河南南阳到湖北荆门的首条交流1000kV特高压输变电工程已经开工建设，由云南到广东的±800kV特高压直流输电工程也已开始建设。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。这些都对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。

表 1-1 2020 (2010) 年我国电力装机预测 (万 kW)

年份	总计	煤电	常规水电	抽水蓄能	气电	核电	新能源
2020	95000	59200	22000	2500	5500	3600	2200
	100%	62.3%	23.2%	2.6%	5.8%	3.8%	2.3%
2010	58450	40000	13500	1500	1800	1250	400
	100%	68.4%	23.1%	2.6%	3.1%	2.1%	0.7%

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客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，而电能客户一般都集中在大、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客户。

为了提高供电的可靠性和经济性，通常将发电厂和客户之间通过升、降压变电所、输配电线路联系起来，如图 1-1 所示。由发电厂中的电气部分、各类变电所及输电、配电线路及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配电线路组成的统一体，称为电力网。如果将各种类型发电厂的源动力部分，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。

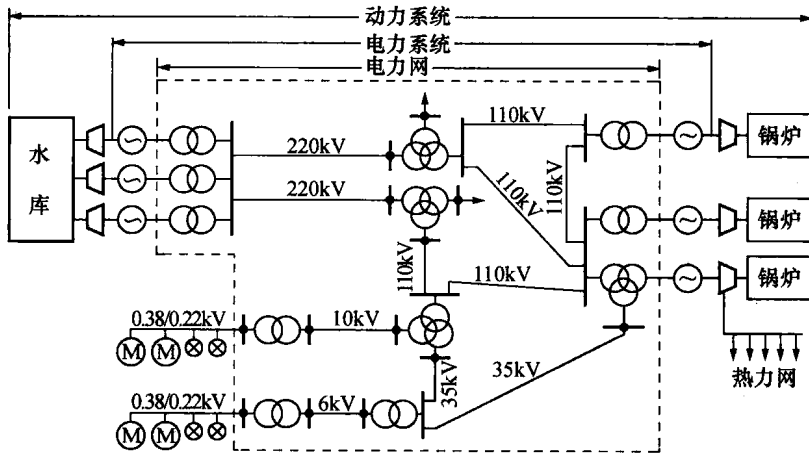


图 1-1 动力系统、电力系统及电力网示意图

三、电力系统的特点

在电力系统短短的 100 多年发展历史中，电力系统从早期的直流到后来的交流，再到现代的交流直流并存，其规模越来越大，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。将小系统联合成大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. 发供用电的同时性

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，都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、可靠运行和对客户的不间断供电。

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，在正常和故障情况下所进行的调整和切换操作要非常迅速，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、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造成的事故扩大化；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 $50\text{Hz} \pm (0.2 \sim 0.5)\text{Hz}$ （小系统为 $\pm 0.5\text{Hz}$ ，大系统为 $\pm 0.2\text{Hz}$ ）；波形应为标准正弦波且谐波不应超过标准。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。这不仅意味着大量地节约了能量资源，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 电力系统的额定电压和接线方式

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

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

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； φ 为功率因数角。

三相导线中的损耗可表示为

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

式中： ΔP 为三相线路的功率损耗，MW； R_l 为一相导线电阻， Ω ； ρ 为导线的电阻率， $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ ； l 为输电线路长度，km； S 为导线截面积， 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，所用导线的截面积就可以减小，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，线路的绝缘水平也应相应提高，除对应的线路杆塔尺寸、输电走廊等应加大外，变压器和电力设备等的投资也需增大。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；1000V以上的电压称为第三类额定电压，第二类和第三类额定电压如表1-2和表1-3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 1-2 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
440	380	220	400	400	380	400	380	

表 1-3 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

续表

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
330	345		330	363
500	525		500	550
750	787		750	825
1000	1050		1000	1100

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。但由于电能输送时，在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 1-2 所示。

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客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 $\pm 5\%$ 。

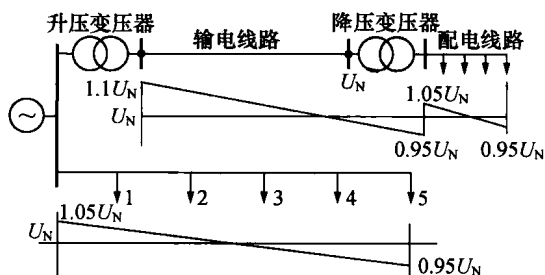


图 1-2 电力网各元件额定电压示意图

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质。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（一般为 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 $1.05U_N$ 。

必须指出，为了适应电力系统运行调节的需要，通常在变压器的高压绕组上设有一定数目的分接头（即抽头），以便根据变压器内部电压损耗的大小及电力网的实际电压要求适当地加以调整。分接头用百分数表示，即分接头电压与主抽头电压的差值为主抽头电压的百分之几。对同一电压等级的升压变压器和降压变压器，即使分接头百分值相同，分接头的额定电压也不同，图 1-3 所示为用线电压表示的 $\text{SSPL}-63000/220\pm 2\times 2.5\%$ 型变压器的抽头额定电压。对 $+2.5\%$ 的抽头，升压变压器为 $242\text{kV}\times 1.025 = 248.05\text{kV}$ ，降压变压器为

$220\text{kV} \times 1.025 = 225.5\text{kV}$ 。

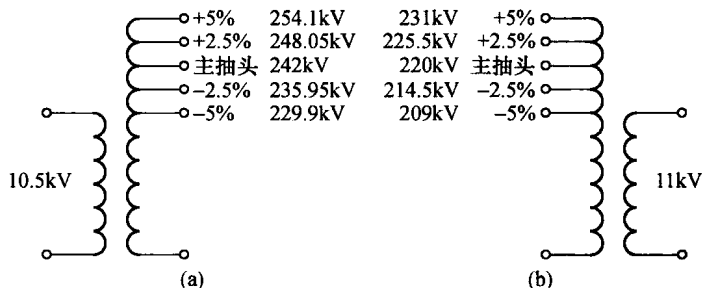


图 1-3 用线电压表示的变压器标准分接头

(a) 升压变压器; (b) 降压变压器

- 【例 1-1】** 图 1-4 所示为一简单电力系统接线图，各线路的额定电压注明于图中。试求：
 (1) 发电机 G 和变压器 T1、T2、T3 高、低压侧绕组的额定电压。
 (2) 变压器 T1 工作于 +2.5% 抽头、T2 工作于主抽头、T3 工作于 -5% 抽头时的实际变比。

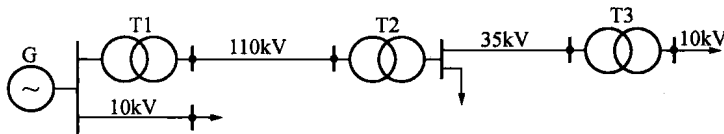


图 1-4 例 1-1 图

解：(1) 发电机与 10kV 线路相连接，故发电机 G 的额定电压为 10.5kV。

升压变压器 T1 的一次绕组直接与发电机连接，相当于负荷，额定电压为 10.5kV；T1 的二次绕组接 110kV 线路首端，额定电压应在线路额定电压的基础上提高 +10%，故为 121kV。

降压变压器 T2 的一次绕组与 110kV 线路连接，相当于负荷，额定电压为 110kV；T2 的二次绕组与 35kV 线路首端连接，相当于电源，其额定电压应在线路额定电压的基础上提高 +10%，故为 38.5kV。

降压变压器 T3 的一次绕组与 35kV 线路连接，额定电压为 35kV；T3 的二次绕组接 10kV 线路首端，但由于该变压器的阻抗电压小于 7.5%，故二次绕组额定电压应为 10.5kV。

(2) 变压器的实际变比。

T1: $124.025/10.5\text{kV}$

T2: $110/38.5\text{kV}$

T3: $33.25/10.5\text{kV}$

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 1-4 所示为各级电压的经济输送功率与输送距离的关系，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 1-4 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

四、电力网的接线

1. 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3类。电压在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、超高压网和特高压网等几类。电压在1kV以下的电力网称为低压网,低压网主要用于低压客户的配电,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,担负着向广大中小客户供电的任务,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的电力网称为高压网,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330~750kV的电网通常称为超高压网,而将750kV以上电网称为特高压网,超高压网和特高压网主要用于跨区域、大功率、远距离输电。

2. 电力网的接线图

电力网的接线图分为电气接线图和地理接线图。电气接线图反映了系统中发电厂、变电所、负荷之间的电气联系。地理接线图按一定比例反映了发电厂、变电所、负荷的相对位置。无论哪一种接线图,一般都将三相用单线表示。

3. 电力网的接线方式

为了满足电力系统运行的基本要求,电力网接线应考虑以下几个方面的问题。

(1) 必须满足电力系统运行可靠性的要求,对于可靠性要求较高的客户,应保证当一个元件故障时,其余元件仍能继续供电。

(2) 必须能灵活地适应各种可能的运行方式。保证在各种运行方式下供电的可靠性和良好的电能质量。

(3) 力求节约所需要的设备及材料,减少设备费用和运行费用,使电力网的建设和运行都比较经济。

按照上述要求,在实际网络中根据发电厂特点及各负荷性质和大小,采取多种接线方

式。这些接线方式概括起来可以分为无备用接线和有备用接线两类。

(1) 无备用接线。无备用接线又称为单电源接线，是指负荷只能从一个方向获得电能的接线方式。主要包括放射型、干线型、树型等几种，如图 1-5 所示。

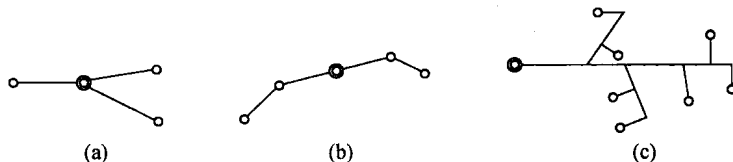


图 1-5 无备用电源接线
(a) 放射型；(b) 干线型；(c) 树型

这种接线的特点是简单、经济、运行方便，但供电的可靠性和灵活性差，线路故障或检修，就要中断供电。这种接线可用于城网对不太重要负荷的供电及农网中短时停电不会造成太大损失的客户供电。

(2) 有备用接线。有备用接线又称为“手拉手”供电，是指负荷可以从两个或两个以上方向获得电源的接线方式。如双回路放射型、干线型、链型及环型、两端（或多端）供电网以及它们的组合，如图 1-6 所示。在有备用接线中，双回路放射型、干线型、链型网络不常用，这些网络的优点在于供电可靠性和电压质量较高，缺点是经济性较差。双回路放射型由于对每一负荷都采用双回路供电，使每一回路的负荷都不大，但为了防止电晕，不得不选用较大的导线截面积，从而造成有色金属的大量浪费。干线型和链型由于所需要的高压断路器数目较多，因而不经济。环型接线供电可靠性较高，而且也比较经济，缺点是运行调度较复杂。两端供电网较为常见，但需要两个独立电源。实际系统中接线方式多种多样，所有接线方式均需要经过经济技术比较后才能确定。

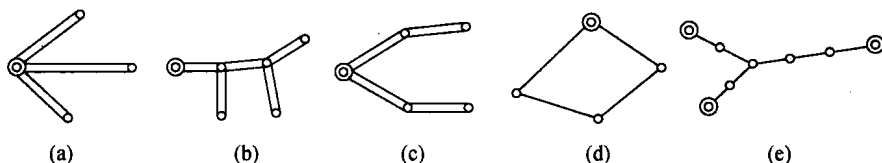


图 1-6 有备用接线方式
(a) 放射型；(b) 干线型；(c) 链型；(d) 环形供电网；(e) 多电源供电网

电力系统中还常把无备用接线的电力网和有备用的放射型、干线型、链型网络称为开式电力网，把两端（或多端）供电网及环型网络称为闭式电力网。

第三节 电力系统中性点接地方式

电力系统的中性点是指接成星形的三相变压器绕组或发电机绕组的公共点。目前，我国电力系统中性点的接地方式可分为两大类：一类是有效接地系统，即中性点直接接地系统，包括有中性点直接接地和中性点经小电抗接地系统；另一类是中性点非有效接地系统，即小电流接地系统，包括有中性点不接地、中性点经消弧线圈接地以及中性点经电阻接地系统。

一、中性点不接地系统

中性点不接地系统是指发电机或变压器绕组的中性点在电气上对地是绝缘的。中性点不

接地系统又称为中性点绝缘系统。

图 1-7 (a) 所示为中性点不接地系统原理接线图。三相导线之间及各相导线对地之间，沿导线全长都均匀分布有电容，这些电容将引起附加电流。各相导线对地之间的分布电容，分别用集中的等效电容 C_A 、 C_B 和 C_C 代替。

设系统三相电压分别为 \dot{U}_A 、 \dot{U}_B 和 \dot{U}_C ，且三相对称。在三相电压作用下，三相对地电容电流分别为 \dot{I}_{CA} 、 \dot{I}_{CB} 和 \dot{I}_{CC} ，其相量关系如图 1-7 (b) 所示。由于三相对地分布电容基本相等，故三相对地电容电流也对称，地中没有电流，中性点电位 \dot{U}_n 为零。

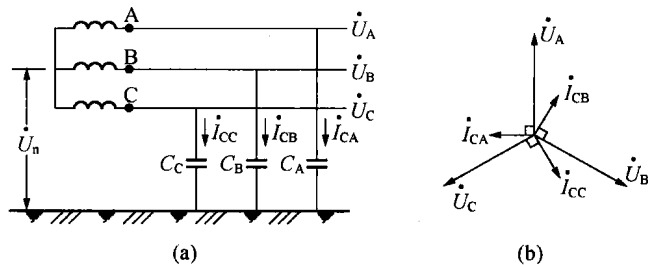


图 1-7 中性点不接地系统正常运行方式
(a) 原理接线图；(b) 相量图

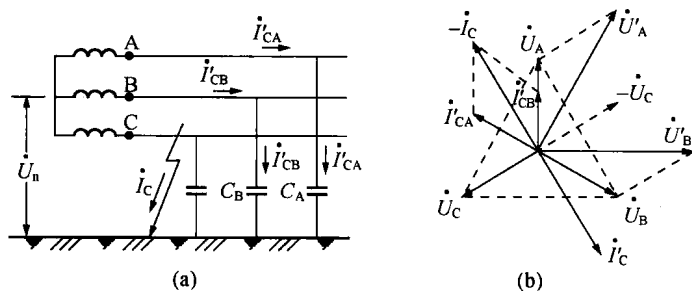


图 1-8 中性点不接地系统的单相接地
(a) 原理接线图；(b) 相量图

中性点不接地系统发生单相金属性接地时，如图 1-8 (a) 中的 C 相，则 C 相的对地电压变为零，即 $\dot{U}_C = 0$ 。此时中性点电压为 $\dot{U}_n = -\dot{U}_C$ ，即中性点对地电压由原来的零升高为相电压，其相量关系如图 1-8 (b) 所示。由相量关系可以看出，在单相接地后，非故障相 (A、B 相) 对地电压分别为

$$\dot{U}'_A = \dot{U}_A + \dot{U}_n = \dot{U}_A - \dot{U}_C = \sqrt{3}\dot{U}_C e^{-j150^\circ} \quad (1-3)$$

$$\dot{U}'_B = \dot{U}_B + \dot{U}_n = \dot{U}_B - \dot{U}_C = \sqrt{3}\dot{U}_C e^{j150^\circ} \quad (1-4)$$

式 (1-3) 和式 (1-4) 表明，中性点不接地系统发生单相接地时，非故障相电压升高了 $\sqrt{3}$ 倍，即非故障相对地电压升高为线电压。但此时三相线电压不变（仍然对称），故对电力系统的正常工作没有影响，系统仍可带故障运行一段时间（通常为 2h），可由运行人员排除故障。由于非故障相电压升高为线电压，就要求系统中的各种电气设备的绝缘必须按线电压设计。但在电压等级较高的系统中，绝缘费用比较高，降低绝缘水平带来的经济效益比较显著，因此一般不采用中性点不接地方式，只有在电压等级较低的系统中一般采用中性点不接地方式，以提高系统的供电可靠性。

由于单相接地后非故障相的电压升高了 $\sqrt{3}$ 倍，所以两相的对地电容电流也较正常时增大了 $\sqrt{3}$ 倍，即 $I'_{CA} = \sqrt{3}I_{CA}$ 、 $I'_{CB} = \sqrt{3}I_{CB}$ 。由于 C 相接地，其对地电容被短接，所以 C 相的对地电容电流变为零。则 A、B 两相的对地电容电流分别为

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}'_{CA} &= j\omega C \cdot \sqrt{3}\dot{U}_C e^{-j150^\circ} = \sqrt{3}\omega C \dot{U}_C e^{-j160^\circ} \\ \dot{I}'_{CB} &= j\omega C \cdot \sqrt{3}\dot{U}_C e^{j150^\circ} = \sqrt{3}\omega C \dot{U}_C e^{-j120^\circ} \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

但经过 C 相接地点流进地中的电流（即接地电流）不再为零，其值为

$$\dot{I}_C = -(\dot{I}'_{CA} + \dot{I}'_{CB}) = -\sqrt{3}\omega C\dot{U}_C(e^{-j60^\circ} + e^{-j120^\circ}) = j3\omega C\dot{U}_C \quad (1-6)$$

式(1-6)表明,中性点不接地系统发生单相接地故障时,接地点处的接地电流为一容性电流,其值为正常时一相电容电流的3倍。若接地点的电流不大,则接地点处的电弧通常可以自行熄灭。系统的运行经验表明,10kV及以下电力网的接地电流不超过30A,35kV等级电力网接地电流不超过10A,接地电弧通常可以自行熄灭。当10kV电网接地电流超过30A,35kV电网接地电流超过10A时,可能在接地点处产生间歇性电弧或稳定燃烧的电弧。在间歇性电弧的作用下,网络中的电感和电容可能产生振荡,造成电弧过电压,其幅值可达2.5~3.5倍的相电压值,在网络绝缘薄弱点可能发生击穿,从而造成两相两点、甚至多点接地故障。因此,当3~10kV电网电容电流大于30A,或35kV系统电容电流大于10A时,应采用中性点经消弧线圈接地或电阻接地方式。

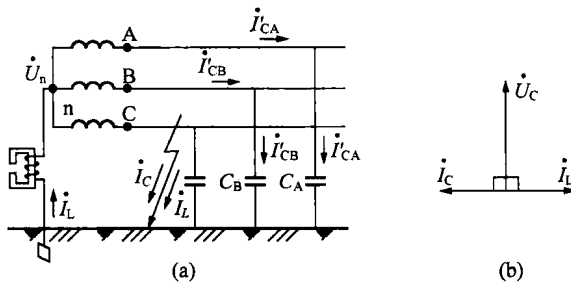


图 1-9 中性点经消弧线圈接地系统的单相接地

(a) 接线图; (b) 相量图

二、中性点经消弧线圈接地

消弧线圈实质上是一个具有空气间隙铁芯的电感线圈,线圈的电阻很小,电抗很大,且具有很好的线性特性,电抗值可用改变线圈的匝数来调节。它装在系统中发电机和变压器的中性点与地之间,其接线如图1-9(a)所示。

正常工作时,由于三相对称,中性点电位等于地电位,即 $\dot{U}_n=0$,消弧线圈中没有电流流过。当发生单相接地时,中性

点电压升高为相电压,消弧线圈中将有感性电流通过,其电流值 \dot{I}_L 为

$$\dot{I}_L = -\frac{\dot{U}_n}{j\omega L} = \frac{\dot{U}_C}{j\omega L} \quad (1-7)$$

该电流与其他两相非故障相的容性电流同时流过接地点,其相量关系如图1-9(b)所示。此时的接地电流为

$$\dot{I}_f = \dot{I}_C + \dot{I}_L = j\left(3\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)\dot{U}_C \quad (1-8)$$

因容性电流与感性电流方向相反,故接地电流 \dot{I}_f 减小。由于电感电流对电容电流进行了有效地补偿,接地电流减小,电弧将自行熄灭,消弧线圈也正是由此而得名。

若选择电感 L 使其满足 $3\omega C - 1/\omega L = 0$,则 $\dot{I}_f = 0$ 。这种情况称为全补偿。在实际系统中不采用全补偿,因为此时电感和电容正好构成串联谐振关系,将会在系统中引起很高的谐振过电压。当 $\dot{I}_L < \dot{I}_C$ 时,称为欠补偿,这种补偿会由于运行方式的改变或部分线路退出运行后,电容电流减小而使网络接近或变为全补偿,故实际系统中也很少采用。当 $\dot{I}_L > \dot{I}_C$ 时,称为过补偿,过补偿不会出现上述问题,故在系统中得到了广泛的应用。但须注意,采用过补偿时,接地电流的残余量不能过大,否则将造成因残余电流过大而使电弧不能自行熄灭的问题。

三、中性点直接接地系统

中性点不接地系统在发生单相接地故障时,相间电压不变,依然对称,系统可继续运行2h,所以供电可靠性高,但非故障相电压升高 $\sqrt{3}$ 倍,显然不适于高压电网中。因而我国在