

• 高等专科学学校教学用书 •

工业企业电力网 及变电设备

祝淑萍 主编

G AODENG
ZHUANKE
XUEXIAO
JIAOXUE
YONGSHU

冶金工业出版社

高等专科学校教学用书

工业企业电力网及变电设备

吉林电气化高等专科学校 祝淑萍 主编

北 京
冶金工业出版社 105
1997

图书在版编目 (CIP) 数据

工业企业电力网及变电设备/祝淑萍主编. —北京: 冶金工业出版社, 1998. 2

高等专科学校教学用书

ISBN 7-5024-2044-4

I. 工… II. 祝… III. 工业企业-电力系统结构-高等学校-教材 IV. TM727.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 28674 号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

北京梨园印刷厂印刷; 冶金工业出版社出版; 各地新华书店发行

1998 年 2 月第 1 版, 1998 年 2 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 25.75 印张; 622 千字 402 页; 1-1400 册

31.90 元

前 言

本书是根据 1996 年 2 月 1 日~3 日在吉林召开的七所冶金、有色系统高等专科学校的电气化专业、供电专业教学代表参加的协作会议上拟定的教材出版计划编写的。本着专科教材反映专科特色的重要性,以教学上要突出理论知识的应用和实践动手能力的培养,不断补充新知识、新技术应用的前提下,会议讨论和制订了《工业企业电力网及变电设备》等教材的编写大纲,进行了分工与合作。本书用作高等专科学校变电配电专业、供电专业的教材,也可作为企业、事业从事电气专业的工程技术人员的参考书。

书中主要介绍了电能的分配、合理的应用等方案的网络设计与经济运行的分析计算,分析了影响电能质量的各种因素并叙述了可实行的改进措施;深入讲述电力负荷计算、无功功率补偿与电压调整、短路电流计算、导线截面与变电设备的选择等基本原理和方法。在多年教学及实践经验的基础上,与本教材配套的有:配电网络与变电所设计、架空线路机械计算设计、网络及环网的经济运行设计等课程设计的题目,以进一步达到突出理论知识应用和提高解决实际问题的能力。

全书由东北电力学院张维国教授、吉林电气高等专科学校李正熙教授主审,吉林电气化高等专科学校祝淑萍主编与统稿,刘学军任副主编。第一、二、十一章由吉林电气化高等专科学校王涛编写,第三、四、七章由刘学军编写,第五、六、八、九、十、十二章及附表由祝淑萍编写。书中带*号的内容,可根据学时的多少酌情取舍。

1997 年 3 月 2 日~4 日在吉林召开电气化专业、供电专业的专家组教材审稿会,东北电力学院张维国教授、吉林电气化高等专科学校高希和、李正熙教授及王建南、乔福海等副教授提出了许多宝贵建议和希望,在此表示衷心感谢。

由于我们的水平所限,本书的缺点和错误,恳请读者批评指正。

编 者

1997 年 4 月于吉林

目 录

第一章 电力系统的基本知识	(1)
第一节 电力网及电力系统的概念.....	(1)
第二节 电力网的发展与基本要求.....	(3)
第三节 电力系统的电压等级.....	(5)
第四节 三相电力系统中性点工作状态.....	(9)
*第五节 直流输电的概念	(12)
思考题	(14)
第二章 工厂供配电系统	(15)
第一节 工业企业的负荷分级及其对供电的要求	(15)
第二节 供电系统的架空线路	(16)
第三节 高压电力电缆线路	(25)
第四节 工业企业厂区高压供配电系统	(30)
第五节 车间供电方式	(35)
思考题	(42)
第三章 变电所高压电气设备	(44)
第一节 发电厂和变电所的电气设备	(44)
第二节 开关电器的灭弧	(44)
第三节 高压断路器及其操作机构	(52)
第四节 隔离开关、负荷开关及高压熔断器	(61)
第五节 绝缘子和母线	(67)
第六节 互感器	(70)
思考题和习题	(79)
第四章 电气主接线	(80)
第一节 电气主接线概述	(80)
第二节 主接线基本接线方式	(81)
第三节 限制短路电流的方法	(89)
第四节 发电厂和变电所主接线的特点	(92)
第五节 配电装置及变电所平面布置	(95)
*第六节 电气主接线方案的技术经济比较.....	(103)
思考题和习题.....	(112)
第五章 电力网的负荷计算与经济运行	(115)
第一节 工业企业电力负荷计算.....	(115)
第二节 供电系统中的功率损耗与电能损耗计算.....	(130)
第三节 变电所的变压器容量和台数选择.....	(138)
第四节 变压器的经济运行.....	(141)

第五节 降低电力网电能损耗的措施·····	(143)
习 题·····	(154)
第六章 电力网导线截面的选择·····	(156)
第一节 导线和电缆选择原则·····	(156)
第二节 按允许载流量选择导线和电缆的截面·····	(157)
第三节 线路电压损失的计算·····	(164)
第四节 按允许电压损失选择导线或电缆截面·····	(172)
第五节 按经济电流密度选择导线或电缆截面·····	(177)
第六节 几种截面选择方法的综合分析·····	(179)
思考题与习题·····	(181)
第七章 短路电流计算·····	(184)
第一节 供电系统短路的基本概念·····	(184)
第二节 三相短路的过渡过程·····	(185)
第三节 无限大容量电源供电系统短路电流计算·····	(188)
第四节 有限容量电源供电系统短路计算·····	(199)
第五节 考虑异步电动机和并联电容器组时短路电流的计算·····	(210)
*第六节 不对称短路电流的计算·····	(211)
第七节 载流导体的发热和电动力·····	(228)
思考题和习题·····	(237)
第八章 变电所电气设备选择·····	(245)
第一节 选择电气设备的基本原则·····	(245)
第二节 低压开关设备及开关柜的选择·····	(247)
第三节 高压断路器、隔离开关等开关设备的选择·····	(253)
第四节 母线、电缆、绝缘子和套管的选择·····	(257)
第五节 互感器和限流电抗器选择·····	(264)
*第六节 成套开关柜和箱式变电站选择·····	(274)
习 题·····	(286)
第九章 电力网的潮流计算·····	(288)
第一节 电力网的功率损耗与电压计算·····	(288)
第二节 电力网环节首末两端功率、电压平衡关系·····	(290)
第三节 开式网的潮流计算·····	(294)
第四节 两端供电网的潮流计算·····	(299)
第五节 复杂网的潮流计算·····	(309)
*第六节 电力系统的结点电压方程与结点导纳矩阵·····	(317)
习 题·····	(322)
第十章 电力网电压水平的保持与调整·····	(324)
第一节 概述·····	(324)
第二节 利用变压器分接头调压·····	(325)
第三节 改变电力网无功功率分布调压·····	(332)

第四节	改变电力网的参数调压	(335)
*第五节	动态无功功率补偿	(338)
*第六节	动态无功功率的计算机实时补偿	(341)
	思考题和习题	(345)
第十一章	电力系统有功功率平衡及频率调整	(346)
第一节	概述	(346)
第二节	发电机的功频特性	(349)
第三节	电力系统的频率调整	(353)
	思考题	(355)
第十二章	架空线路的机械计算	(356)
第一节	气象条件	(356)
第二节	机械比载计算	(358)
第三节	架空线的振动	(361)
第四节	档距中架空线的长度和弧垂	(366)
第五节	架空线的应力	(366)
第六节	状态方程	(368)
第七节	临界档距	(368)
第八节	小高差档距中架空线的计算	(376)
第九节	大高差档距中架空线的计算	(379)
第十节	架空线路的机械计算程序	(382)
	思考题	(382)
附 表		(383)
附表 1	工业企业中常用的高压断路器技术数据	(383)
附表 2	工业企业常用高压隔离开关技术数据	(384)
附表 3	负荷开关的技术数据	(385)
附表 4	高压熔断器的技术数据	(386)
附表 5	高压电流互感器的技术数据	(387)
附表 6	高压电压互感器的技术数据	(388)
附表 7	NKL 型铝电缆水泥电抗器技术数据	(389)
附表 8	并联电容器的技术数据	(391)
附表 9	SL ₇ 系列铝线圈低损耗三相电力变压器技术数据	(392)
附表 10	SJL 系列三相双绕组铝线电力变压器技术数据	(393)
附表 11	SFL 型三相双绕组铝线电力变压器技术数据	(394)
附表 12	油浸纸绝缘三相电力电缆长期允许电流	(395)
附表 13	500V 橡胶绝缘电缆敷设在空气中和土壤中长期允许电流/A	(396)
附表 14	塑料绝缘导线芯线允许温度为 70℃, 空气温度为 25℃ 时 长期允许电流/A	(396)
附表 15	橡胶绝缘导线芯线允许温度为 65℃, 空气温度为 25℃ 时 长期允许电流/A	(397)

附表 16	扁铜、扁铝以及扁钢在 $T_{al}=70^{\circ}\text{C}$, $T_0=25^{\circ}\text{C}$ 时的 长期允许电流/A	(398)
附表 17	LJ 型裸铝绞线的允许电流 ($T_{al}=70^{\circ}\text{C}$, $T_0=25^{\circ}\text{C}$) 以及单位 长度有效电阻和感抗	(399)
附表 18	LGJ 型钢芯铝绞线的允许电流 ($T_{al}=70^{\circ}\text{C}$, $T_0=25^{\circ}\text{C}$) 以及 单位长度有效电阻和感抗	(399)
附表 19	TJ 型裸铜绞线的长期允许电流以及有效电阻和感抗值	(400)
附表 20	电缆直埋于地中不同土壤热阻系数时允许电流修正系数	(401)
附表 21	周围环境温度不同于 25°C 时导体长期允许电流的温度 修正系数 K_t	(401)
附表 22	并排敷设 (包括地中穿管及直埋) 的多根电缆允许电流 的修正系数	(401)
参考文献		(402)

第一章 电力系统的基本知识

第一节 电力网及电力系统的概念

现代工农业生产和人民生活的各个方面都广泛地应用着电能，因为电能易于转换成其它形式的能量，输送和分配经济，控制及使用便利。

在电力系统中，通常将用电的单位称为用电户，将发电的场所称为发电厂。用电户主要有工业用户、农业用户、公用事业用户、人民生活用户等。这些用电户由于工作性质不同，它们对供电的要求往往也不同。如：工业用户比较集中，用电量大，设备利用率高，对供电可靠性要求高；农业用户分散，用电量大小与气候及季节有关，平时对供电可靠性要求相对低些，灾害气候时对供电可靠性要求高，如抗旱、排涝等；公用事业用户及人民生活用电面广，形式多样，而且随着生产的发展，人民生活水平的提高，用电量愈来愈大，对供电可靠性要求也愈来愈高。

发电厂是将一次能源变为电能的场所。一次能源又称为自然能，主要有石油、煤炭、水力、天然气及原子能等。应用这些能源发电的电厂分别为火电厂、水电厂及原子能电厂。此外，还有太阳能电厂、风力电厂、潮汐电厂、地热电厂等。

现代，世界各国多将电厂建在能源基地，如坑口电站等，以便节约燃料运输费用。水电厂建在江河水流落差大的地区。而较大的负荷中心多集中在大城市、工业中心、农业发达地区、交通枢纽等地。发电厂与负荷中心之间往往相距很远，甚至达数千公里，这就需要用电力线路输送电能。将发电厂的电能送往负荷中心变电所的电力线路称为输电线路。将负荷中心的电能送往各用户的电力线路称为配电线路。

在输送与分配电能的过程中，电流在导线中会产生电压降落、功率损耗和电能损耗，对于三相交流输电线路它们可分别由下式表示：

$$\Delta U = \sqrt{3} IZ \cdot 10^{-3} \text{ kV} \quad (1-1)$$

$$\Delta P = \sqrt{3} I^2 R \cdot 10^{-3} \text{ kW} \quad (1-2)$$

$$\Delta W = \sqrt{3} I^2 R t \cdot 10^{-3} \text{ kW} \cdot \text{h} \quad (1-3)$$

式中 U —— 线电压 (kV)；

I —— 线电流 (A)；

t —— 时间 (h)；

R —— 电阻 (Ω)；

Z —— 阻抗 (Ω)。

可见，减少线路电流能够减少功率损耗、电能损耗和电压降落。但如果只减少线路电流，由线路传输的有功功率公式

$$P = \sqrt{3} UI \cos \phi \quad (1-4)$$

可以看出，线路输送的有功功率也将减少，所以，只有提高线路电压才能保证输送的有功

功率不变，因此，在保持一定的技术经济指标的条件下，提高输电线路电压，电能质量与运行中的经济性就比较好，并能输送大功率电能到更远的地方。在电力系统中，通常远距离输电线路采用高压或超高压的电压等级；而配电线路为了安全、经济地向负荷供电，通常采用较低的电压等级。

电压的升高和降低是通过变压器完成的。安装变压器及其保护与控制设备的地方，称为变电所。用于升高电压的变电所称为升压变电所。用于降低电压的变电所称为降压变电所。

由各种类型发电厂中的发电机、各种电压等级的变压器及输配电线路和各类型的用电设备及其相应的专用通信、安全自动、继电保护、调度自动化等设施连接在一起而组成的整体，称为电力系统。如果将火电厂的汽轮机、锅炉、供热管道和热用户，水电厂的水轮机和水库等动力部分也包括进来，就称为动力系统。系统中输送和分配电能的部分称为电力网，电力网包括升、降压变压器和各种电压的输、配电线路。输电线路又可分为交流输电线路和直流输电线路。

在交流动力系统中，发电厂、变压器、输配电设备大多是三相的。这些设备之间的连接状况可以用如图 1-1 所示的动力系统接线图来表示。

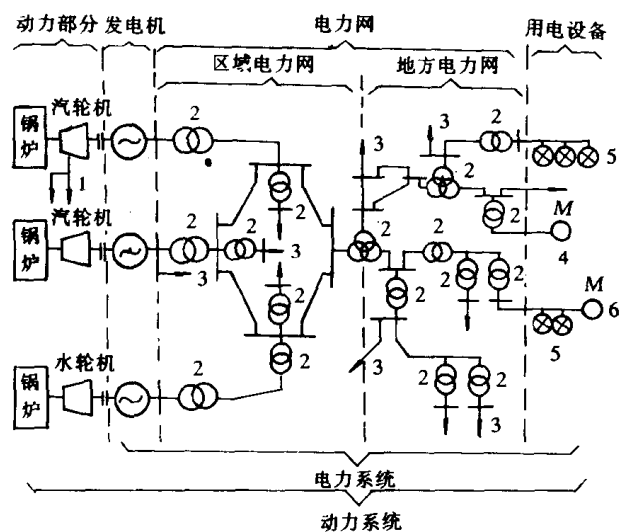


图 1-1 动力系统、电力系统及电力网示意图

1—热力网；2—变压器；3—负荷；4—高压电动机；5—照明负荷；6—低压电动机

应当指出，现在人们也常常把动力系统简称为电网，如东北电网、华南互联电网、华北电网等。显然，不能把这些电网理解为仅仅是输送和分配电能的电力网，而应理解为包括发、送、变、配、用电设备总体及安全自动装置和通信设施的动力系统。

为了研究和计算的方便，常将电力网分为地方网、区域网、远距离输电网三类：一般 10kV 以下电压的电力网，多供电给地方负荷，称为地方网；电压在 10kV 以上的电力网，多供电给区域性变电所，称为区域网；线路距离超过 300km、电压在 220kV 以上的电力网称为远距离输电网。以电压的高低来分，可将电力网分为低压网、中压网、高压网、超高压网等。电压在 1kV 以下的电力网，称为低压网。1kV 到 10kV 的电力网称为中压网。高于

10kV 低于 330kV 的电力网,称为高压网。330kV 及以上的电力网,称为超高压网。从电力网的结线方式区分,可以分为开式网、两端供电网或环网、复杂网三类。

第二节 电力网的发展与基本要求

一、电力网的发展简况

人们对电能的应用最早是 19 世纪。19 世纪 80 年代以前,发电、输电和用电都用直流,电压很低,供电范围很小。为扩大供电范围,曾将直流机组串联起来以提高电压。但是由于大容量直流机电流换向有困难,且串联运行方式复杂,事故机会也多,所以电力工业的发展受到了限制。当三相交流发电技术及变压器和感应式电动机等设备出现后,三相交流电取代了直流电,电力工业得到了迅速发展,输电功率更大,距离更远,供电也更可靠,而且逐渐将孤立运行的发电厂、变电所互相连接起来,形成了大的电力系统。随着电力系统的不断发展,交流输电固有的困难和局限性也逐渐地被人们所认识,于是高压直流输电技术又重新为人们所重视。高压大容量可控汞弧阀与可控硅整流器的制成,为高压直流输电创造了条件。到目前为止,超高压交、直流输电的大型电力系统在世界上许多国家已相继出现。

随着电力工业建设规模的不断扩大,坑口火电厂和大型水电厂的建设,历史形成的地方电力系统的疆域逐渐被打破,并连成大区域或跨区域的现代电网。也只有依靠现代电网,才能将水力、煤炭、石油、天然气、核能等一次能源转化为电能,并把它们有效地联系在一起,通过长距离输送,进行分配,互相支援,彼此配合,取得最大的经济效益。

影响电网供电能力、可靠性和经济性的主要因素是电压和电流。电力网的输送容量直接受电压损耗、功率及能量损耗、导线发热、系统稳定等情况的制约。当电能输送容量一定时,电压越高,电流越小,损耗和发热就越小,而稳定性也越好,所以,提高电压是提高电力网输送容量的有效措施。但是,电压越高、电气设备的投资越大,碰到的需要解决的技术问题也越复杂,因此,确定一个合理的电压等级,必须进行全面的技術、经济论证。我国目前已形成的以交、直流 500kV 超高压电网为骨架的电力系统,其供电经济性、稳定性都较好。随着三峡水电站的建设,几个跨省电网将实行互联。随着西南地区水力资源的大力开发,大量水电长距离东送,将需要更高的高压输电,如 750kV/1100~1200kV 高压交流,或 ± 500 kV、 ± 750 kV 高压直流,或高压交直流联合使用。美国、日本、前苏联、意大利等国都在建设 1000kV 或更高的超高压输变电工程。为提高现代电网稳定性和经济性,美国除采用更高的电压送电外,正在采用超导发电机(同步电抗可由常规发电机的 2.0 左右降到 0.5 以下),超导新能源贮存系统(具有非常高的转换效率、发电和贮存双向性能)及快速调整无功功率等新的稳定性技术。

二、电力工业的主要特点及现代电网的主要特征

1. 电力工业的主要特点

电力工业的生产过程与其他工业部门有很大差别,主要表现在:

(1) 平衡性。电能的生产、输送、分配、消耗同时完成。发多少,用多少;用多少、发多少。发电厂任何时刻生产的电能必须等于该时刻用电设备的消耗与输送、分配中损耗电能之和。而对于整个电力系统来说,必须保证系统中各发电厂发出的电能与各用电户消耗的电能保持平衡,即必须保证系统每时每刻的有功功率的平衡和无功功率的平衡,以保持

电力系统的电压水平和电力系统的稳定运行。

(2) 瞬时性。电能的传输速度与光速一样，达到 $3 \times 10^8 \text{ km/s}$ 。开关一合，瞬间电就到了。另外，电能在生产中以一种状态到另一种状态的过渡过程也很短暂。

(3) 与工农业生产及人民生活的密切相关性。电力工业与国民经济、人民生活的关系极其密切。电能供应不足或中断，将直接影响国民经济计划的完成和人民的正常生活。对某些用户甚至会引起产品报废，设备损坏以至危及人身安全等严重后果。

电力生产的这三个特点，使现代电网领域内产生了许多复杂的技术问题、运行问题、管理问题。

2. 现代电网的主要特征

(1) 现代电网具有一个坚强的 500kV 及以上电压等级网络构成的主网架。由于发电机组的容量愈来愈大，传输距离愈来愈远，电力网覆盖区域愈来愈广（跨省、跨国、跨洲），输电的电压等级也愈来愈高。交流电输电距离目前已可达到 2500km，超高压直流输电已达到 6500km，电压等级也已由 500kV 向更高发展（750kV、1100kV）。

(2) 各现代电网之间具有较强的联系，而且这种联系愈来愈紧密。通过实践，人们认识到，从充分发挥现代大电网的优越性，充分合理利用能源，提高现代电网运行的经济性，实现事故状况下互相支援的要求看，强联系比弱联系有更大的优越性。为了克服强联系带来的事故状态下可能波及另一电网的弱点，目前世界上应用超高压直流输电网络将大电网之间背靠背地连接起来的作法，已经得到了迅速的发展。

(3) 为了提高对现代化大城市供电的可靠性，超高压电网进入城区并以多重环状网络向城市供电。

(4) 电压等级简化和供电电压提高。为了便于设备生产、管理和提高电网运行的经济性，减少变压次数，各国正在进行电压等级的整顿、简化和统一。随着城市用电量的增长，城市中高层建筑的增多，负荷密度的增高，城市供电电压有从 10kV 升高的趋势。

(5) 为确保电网的安全、稳定、优质、经济地运行，提高供电可靠性，在现代电网中配置了一整套与一次系统相适应的安全稳定控制系统，以电子计算机为核心的调度自动化监控系统，电力专用通信系统，气象、水文、雷电监测系统，这些系统是构成现代电网不可分割的重要组成部分。

认识和理解了这几大特征，我们就能有的放矢地去研究、分析、指挥和管理现代化的电网。

三、对电力系统的基本要求

根据电能的产、供、销同时进行，对电能质量要求高，电网事故影响大等特点，电力系统应满足下列基本要求：

(1) 保证可靠地、连续地供电 供电中断将使工农业生产停顿，人民生活秩序混乱，甚至危及人身和设备安全，造成十分严重的后果。停电给国民经济造成的损失远超过电力系统本身的损失，因此，电力系统运行首先要满足安全发电及供电的要求。

(2) 保证良好的电能质量 良好的电能质量是指电力系统的频率正常（50Hz），偏离值不超过 $\pm (0.2 \sim 0.5) \text{ Hz}$ ；电压正常（ U_N ），偏离值不超过各监视点的 $\pm (0.05 \sim 0.1) U_N$ 。频率和电压偏离过大，虽然没有中断供电，也会严重地影响产品的质量、数量，乃至危及人身安全及发生设备事故，总之，电能质量是发电与用电关系的一种客观量度，是电力系

统运行状况的一种客观量度。电能质量恶化到一定程度，就会造成可怕的系统事故。

(3) 保证电力系统运行的经济性 节约能源是当前各国普遍关注的一个问题。电力系统在运行时，应尽量多发、多供、低损耗，不断采取新技术，提高劳动生产率，最大限度地降低成本以促进国民经济各部门的发展。发电厂要降低燃料消耗率与厂用电率，供电部门要降低电网电能损耗等。

第三节 电力系统的电压等级

为了使电力设备的生产实现标准化和系列化，发电机、变压器及各种电力设备都规定有额定电压。当电力设备在额定电压下运行时，其技术性能与经济性能最好，此标准电压就称为额定电压。

我国规定的各种电力设备的额定电压，按照电压的高低分三类：第一类是 100V 以下的额定电压，如表 1-1 所示，主要用于安全照明、蓄电池及开关设备的直流操作电源，而三相 36V 电压，只作为潮湿环境的局部照明及其它特殊电力负荷之用。

表 1-1 第一类额定电压/V

直 流	交 流		直 流	交 流	
	三 相	单 相		三 相	单 相
6		6		42	42
12		12	48		
24		24	60		
36	36	36	72		

第二类是大于 100V、小于 1000V 的额定电压。如表 1-2 所示，主要用于电力及照明设备。表中，括号内的电压只用于矿井下或其它安全条件要求较高之处。

表 1-2 第二类额定电压/V

受 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	100	115						
	(127)							
220	220	127	230	230	220	230	220	230
	380	220	400	400	380	400	380	
440								

第三类是 1000V 以上的额定电压。如表 1-3 所示，这类电压主要用于发电机、变压器及用电设备。

表 1-3 第三类额定电压/kV

受电设备	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	13.8	
		15.75	15.75	
		18	18	
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

电力系统中不同的电力设备，它们的额定电压的确定方法是不同的。系统中的设备主要可分为受电设备、电力线路、发电机和变压器。

受电设备的额定电压是制定其它设备的额定电压的前提，其它设备的额定电压的确定必须以满足受电设备对电压的要求为前提。

电力线路的额定电压应与受电设备的额定电压相等，因为它直接向受电设备供电。但由于线路在运行时有电压损耗，如图 1-2 中 (a)、(b) 图所示，线路有负荷通过时，将有电

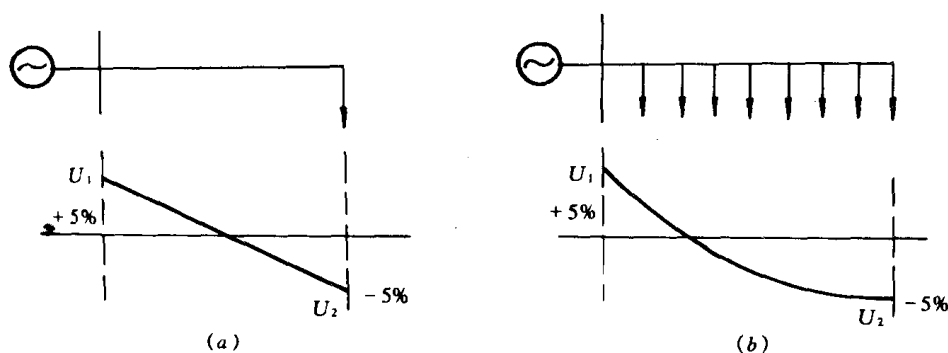


图 1-2 电压沿线路长度的分布

(a) 带集中负荷；(b) 带均布负荷

压降存在，因而首端电压 U_1 和末端电压 U_2 不等，接在线路中的用电设备所承受的电压也各不相同。为了使用电设备实际承受的电压尽可能接近它们的额定电压值，应取线路的平

均电压 U_{av} 为

$$U_{av} = \frac{U_1 + U_2}{2} \quad (1-5)$$

由于用电设备一般允许其实际工作电压偏离额定电压 $\pm 5\%$ ，而电力线路从首端至末端电压损失允许为 10% ，故通常让线路首端的电压比额定电压高 5% ，而让线路末端电压比额定电压低 5% 。这样无论用电设备接在线路的哪一点，承受的电压都不会超过额定电压值的 $\pm 5\%$ 。

发电机总是接在电力网的首端，所以它的额定电压应比所接电网的额定电压高 5% 。

变压器具有发电设备和用电设备的两重性，如变压器一次侧是从电网接受电能，则相当于用电设备；而二次侧供出电能，又相当于发电设备，因此规定，变压器一次侧额定电压等于电网的额定电压。但应注意，与发电机直接连接的变压器，其一次侧额定电压应等于发电机额定电压。变压器二次侧的额定电压定义在空载的基础上，变压器在载有额定负荷时内部阻抗上约有 5% 的电压损失，为使变压器在额定负荷下工作时二次侧的电压能高于用电设备额定电压的 5% ，所以规定，变压器二次侧的额定电压比用电设备额定电压高 10% 。如果变压器阻抗较小，内部电压损失也较小，规定这种变压器的二次侧额定电压比用电设备额定电压高 5% 。所谓阻抗大的变压器，是指高压绕组电压在 35kV 以上或高压绕组电压在 35kV 及以下而短路电压在 7.5% 以上的变压器。所谓阻抗小的变压器是指高压绕组电压在 35kV 及以下，短路电压在 7.5% 及以下的变压器。

此外，对于二次侧所供线路较短的变压器，以及三绕组变压器专向同步调相机供电的绕组，它们的额定电压比线路额定电压提高 5% 即可。

在近似计算中，有时要用到线路平均额定电压，见表 1-3 所示。

例 1-1 有一电力系统，结线如图 1-3 所示。各线路的额定电压及发电机、调相机的电压等级均注明于图中，试确定变压器高低压侧的额定电压及所在网络的平均额定电压。

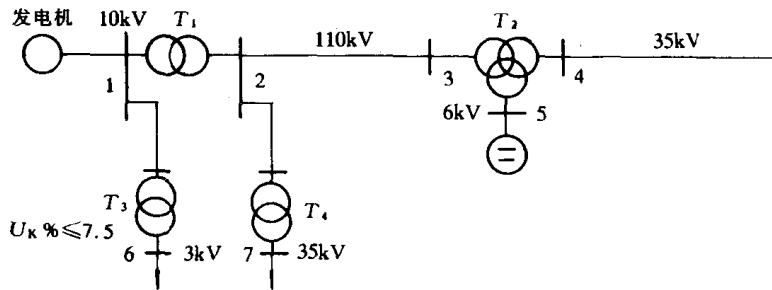


图 1-3 例 1-1 用图

解：(1) 各变压器高低压侧额定电压

T_1 : $10.5\text{kV}/121\text{kV}$

因为升压变压器 T_1 的一次绕组直接与发电机连接，额定电压为 10.5kV ； T_1 的二次绕组接 110kV 线路，额定电压为 121kV 。

T_2 : $110\text{kV}/38.5\text{kV}/6.3\text{kV}$

降压变压器 T_2 为三绕组变压器，一次绕组额定电压为 110kV ；二次绕组额定电压为

38.5kV；三次绕组接电压等级为 6kV 的调相机，额定电压为 6.3kV。

T_3 : 10kV/3.15kV

T_3 的短路电压 $U_K\% < 7.5$ ，所以二次绕组的额定电压为 3.15kV。

T_4 : 110kV/38.5kV

T_4 二次绕组额定电压为 38.5kV。

(2) 各网络平均额定电压

$U_{av2-3} = 115\text{kV}$ ；

$U_{av4} = 37\text{kV}$ ；

$U_{av1} = 10.5\text{kV}$ ；

$U_{av7} = 37\text{kV}$ ；

$U_{av6} = 3.15\text{kV}$ ；

二、各级电压电力网的供电范围

在输电距离和输送功率一定的条件下，电力网电压等级愈高，电流愈小，电力网中的功率损耗、电能损耗也就愈小，并且线路可以采用较小截面的导线。但是，另一方面，电压等级愈高，电力网的绝缘费用就越高。杆塔、变压器构架的几何尺寸增大，这就需要增加投资。同时，电压过高，还会增大电晕损耗，因此，对应一定的输电距离和输送功率，有一定的在技术经济上均较合理的电压；反之，一个电压等级就有一个对应的较合理的输送容量与输送距离。

选择电力网的电压，应根据输送容量与输送距离，以及周围电力网的电压，拟定几个方案进行经济技术比较。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大明显时，应采用电压等级较高的方案。各级电压电力网的经济输送容量、输送距离与适用地区可参照表 1-4。

表 1-4 各级电压电力网的经济输送容量、输送距离与适用地区

额定电压/kV	输送容量/MW	输送距离/km	适用地区
0.38	0.1 以下	0.6 以下	低压动力与三相照明
3	0.1~1.0	1~3	高压电动机
6	0.1~1.2	4~15	发电机电压、高压电动机
10	0.2~2.0	6~20	配电线路、高压电机
35	2.0	20~50	县级输电网、用户配电网
110	10~15	50~150	地区级输电网，用户配电网
220	100~500	100~300	省、区级输电网
330	200~1000	200~600	省、区级输电网、联合系统输电网
500	1000~1500	150~850	省、区级输电网、联合系统输电网
750	2000~2500	500 以下	联合系统输电网

国内外经验表明，电压等级的级差不宜太小，一般 110kV 及以下的电力网，电压级差约在 3 倍左右，110kV 以上的电力网，电压级差在 2 倍左右。

第四节 三相电力系统中性点工作状态

在三相电力系统中，根据电源中性点的工作状态，可将电力系统分为两种类型：一为中性点非直接接地系统，通常称为小电流接地系统；一为中性点直接接地系统，通常称为大电流接地系统。前者又可分为中性点不接地和中性点经消弧线圈接地两种系统。

一、中性点不接地系统

中性点不接地系统的正常运行等值网络如图 1-4 所示。各相对地电容分别用 C_a 、 C_b 、 C_c 来表示，各相对地电压分别为 $\dot{U}_a$ 、 $\dot{U}_b$ 、 $\dot{U}_c$ 。由于中性点对地绝缘，地中无电流通过，所以各相电流平衡：

$$I_a + I_b + I_c = 0 \quad (1-6)$$

各相电流为：

$$\left. \begin{aligned} I_a &= (\dot{U}_a + \dot{U}_0)j\omega C_a \\ I_b &= (\dot{U}_b + \dot{U}_0)j\omega C_b \\ I_c &= (\dot{U}_c + \dot{U}_0)j\omega C_c \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

将其代入 (1-6) 式，可解得中性点实际电压：

$$\dot{U}_0 = -\dot{U}_a \frac{C_a + \alpha^2 C_b + \alpha C_c}{C_a + C_b + C_c} = -\rho \dot{U}_a \quad (1-8)$$

其中 $\alpha = e^{j120^\circ}$ ；

$\rho = \frac{C_a + \alpha^2 C_b + \alpha C_c}{C_a + C_b + C_c}$ 称为电网不对称度，它近似表示中性点对地电压与相电压的比值。

若认为三相对地电容 $C_a = C_b = C_c$ ，则不对称度 $\rho = 0$ ， $\dot{U}_0 = 0$ 。实际电力网各相对地电容总是有些不对称，因而 $\rho \neq 0$ ，通常 ρ 在 3.5% 左右。近似计算中往往将其忽略，认为 $\dot{U}_0 = 0$ 。

当中性点不接地系统在运行中发生单相接地（如 C 相）时，见图 1-5，因 C 相为地电位，

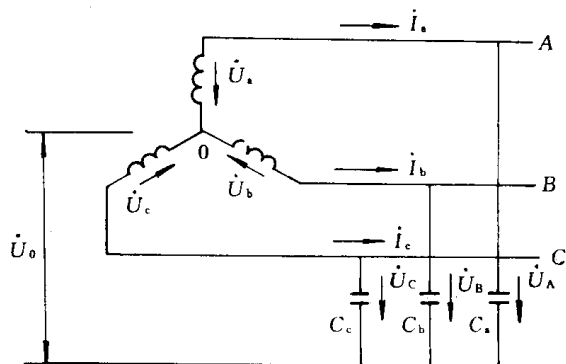


图 1-4 中性点不接地方式

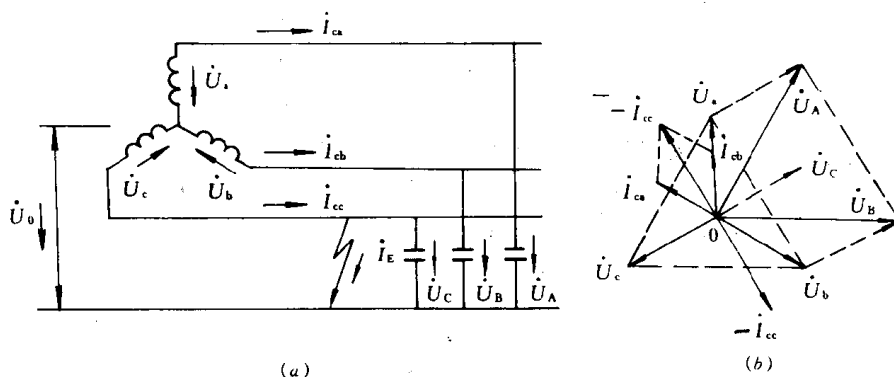


图 1-5 C 相接地示意图

(a) 电流分布；(b) 向量图

C 相与地形成的回路中电压方程为：