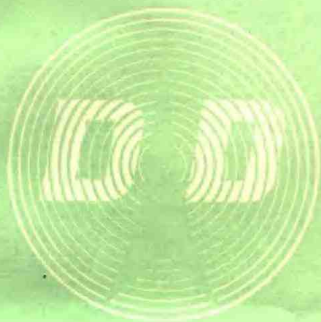


电视大学 职工大学教材



电力系统分析

上册

华南理工大学 方富淇
广州广播电视大学 关瑞彬 上海市电力工业局 齐家寿
合 编



内 容 提 要

本书是根据中央广播电视大学和电业职工大学的“电力系统及其自动化”专业教材编写讨论会所制订的“电力系统分析”课程教学大纲编写的。

全书共十六章，每章都附有小结、思考题和习题。分上、下两册出版。

上册主要内容是：电力网的参数计算及其等值电路、三相短路故障的暂态分析和实用计算、不对称短路与断线故障的分析计算、电力网络方程、电力系统故障的计算机算法、各种工程计算的实用数据和短路电流计算程序。

中央广播电视大学 教材
电 业 职 工 大 学
电力系统分析
(上册)

华南理工大学 方富谋
广州广播电视大学 关瑞彬 余编
上海市电力工业局 齐家寿

水利电力出版社出版
(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售
北京朝阳区新原印刷厂印刷

787×1092 毫米16开本 18.5印张 419千字
1989年11月第一版 1989年11月北京第一次印刷
印数 0001—4500 册
ISBN7-120-00753-X/TM·208
定价3.70元

前 言

本书是根据中央广播电视大学和电业职工大学“电力系统分析”课程教学大纲编写的。该大纲是在1986年5月广州召开的“电力系统及其自动化”专业教学计划、教学大纲及教材编写讨论会和在1986年8月在南昌召开的“电力系统及其自动化”专业教材编写座谈会上所制订的。

全书包含四部份内容：电力系统基本概念，电力系统短路、潮流和稳定。共十六章，分为上、下两册。上册主要内容是：电力网的参数计算及其等值电路、三相突然短路的暂态分析和实用计算、不对称短路与断线故障的分析计算、电力网络方程与电力系统故障的计算机算法。在附录中列出各种实用的工程计算用数据和供读者上机练习用的短路电流计算程序。下册主要内容是：电力网的潮流计算及其计算机算法、电力系统的频率调整与电压调整、电力系统的经济计算及运行、功角特性、静态稳定与暂态稳定的基本概念与分析方法及提高稳定的措施、交流远距离输电与直流输电的基本概念和供练习用的牛顿-拉夫逊法潮流计算程序。

本教材授课时上册为50学时，下册为66学时，短路与潮流计算程序练习各为6学时，总计为122学时。

本书的主要对象是电视大学和电业职工大学“电力系统及其自动化”专业的大专班学生，也可供该专业的本科生、中专生以及工程技术人员参考。

考虑到电视大学远距离教学和学生自学的特点与电业职工大学学生具有一定实践经验的专长，在本教材的编写过程中，特别注意到理论与实际的紧密结合。在阐述上力求深入浅出、通俗易懂。在每一章的末尾都附有小结、思考题和习题，每册书后附有教学计算程序，从而提高教材的实用性。

参加本书编写工作的有：华南理工大学方富洪同志（第四、五、六、七、八、九、十三章及附录）、广东广播电视大学关瑞彬同志（第二、三、十、十一及十二章）、上海市电力工业局教育培训部齐家寿同志（第一、十四、十五及十六章）、广东电力局中心调度所林扬同志协助编写附录中的工程计算用数据表。方富洪同志负责全书统稿工作。天津大学宋文南、郑希兰同志担任全书的审稿工作。

本书的编写承蒙原水电部教育司郝邦振同志、中央广播电视大学李立群同志、原水电部西北电业职工大学石宝缜同志等各有关领导的支持和帮助，提出了许多宝贵的意见和建议，对此，一并致以谢意。对于书中的疏漏和缺点，恳切希望读者提出批评及指正。

编 者

1988年3月

目 录

前 言

第一章 电力系统的基本概念	1
第一节 概述	1
第二节 电力网、电力系统及动力系统	2
第三节 对电力系统运行的基本要求	2
第四节 电力系统的接线方式和电压等级	5
第五节 电力系统中性点的运行方式	10
第六节 电力系统的负荷	11
第七节 电力线路的结构	14
小结	21
思考题	21
习题	21
第二章 电力网的等值电路和参数计算	23
第一节 概述	23
第二节 输电线路的等值电路和参数计算	23
第三节 变压器、电抗器的等值电路和参数计算	33
第四节 电力网的等值电路	44
第五节 标么制	48
小结	61
思考题	61
习题	62
第三章 电力系统短路的基本知识	64
第一节 短路的一般概念	64
第二节 恒压静止电路的电磁暂态过程	66
第三节 同步发电机突然三相短路的物理分析	73
第四节 无阻尼绕组同步发电机的等值电路和暂态参数	77
第五节 无阻尼绕组同步发电机三相短路电流的计算	83
第六节 有阻尼绕组同步发电机的突然三相短路	92
第七节 网络的变换和化简	100
第八节 转移阻抗及电流分布系数	105
小结	112
思考题	112
习题	113
第四章 电力系统三相短路的实用计算	115

第一节	基本假设	115
第二节	起始次暂态电流和冲击电流的计算	116
第三节	运算曲线法	126
第四节	应用运算曲线计算三相短路	129
第五节	短路电流周期分量的近似计算	137
小结		140
思考题		141
习题		141
第五章	电力系统不对称故障的计算	143
第一节	应用对称分量法分析不对称故障	143
第二节	电力系统各元件的序电抗	148
第三节	电力系统的序网络	155
第四节	不对称短路的分析	158
第五节	不对称短路时系统中电流和电压的分布	170
第六节	应用运算曲线计算不对称短路	183
第七节	非全相运行的分析计算	188
第八节	通用复合序网	194
小结		196
思考题		197
习题		197
第六章	电力网络方程及其解法	199
第一节	概述	199
第二节	变压器的 Π 型等值电路	199
第三节	电力网的节点方程	203
第四节	节点导纳矩阵	205
第五节	节点阻抗矩阵	212
第六节	用高斯消去法求解网络方程	222
第七节	用三角分解法求解网络方程	227
小结		236
思考题		237
习题		237
第七章	电力系统故障的计算机算法	239
第一节	概述	239
第二节	对称短路的计算	240
第三节	不对称故障计算	245
小结		260
思考题		260
习题		260
附录 I	各种常用架空线路导线的规格	261
附录 II	架空线路导线的电抗和电纳	263

附录Ⅱ	架空线路导线的电容和充电功率	264
附录Ⅲ	电缆参数	264
附录Ⅳ	钢导线参数	266
附录Ⅴ	电力变压器技术数据 ..	268
附录Ⅵ	同步电机参数	276
附录Ⅶ	电力电容器参数	277
附录Ⅷ	短路电流周期分量计算曲线数字表	279
附录Ⅷ	短路电流计算程序	283

第一章 电力系统的基本概念

第一节 概 述

电力工业是先行工业，是工农业生产机械化、自动化的技术基础。它能否高速度发展对整个国民经济的发展有着直接的影响。如果电力供应能满足工农业发展的需要，生产发展就快。因此电力必须优先得到发展。这是现代化生产的客观规律。

解放前，我国电力工业极端落后，自1882年在上海建立第一个发电厂开始至1949年全国解放，六十余年，电力工业和电力系统的发展非常缓慢。1949年全国解放时，发电设备总容量只有185万kW，年发电量仅43亿kWh。110kV以上电压等级的电力系统仅东北三省有两个，总容量为72万kW，而且电力设备陈旧，单机容量小，工质参数低，电力设备的规格也极不统一。

解放后，经过三十多年的建设，我国电力工业无论在运行、设计、安装和制造方面都有了很大发展。1957年底，第一个五年计划完成时，发电设备总容量增加到464万kW；1962年底，第二个五年计划完成时，发电设备容量增加到1300万kW；1978年底，发电设备容量达5211万kW，年发电量增加到2565.5亿kWh；1986年底发电设备容量已达9381.85万kW，年发电量则增加到4495.71亿kWh。就110kV以上电压等级的电力系统而言，其中220kV变压器总容量为6500万kVA，220kV线路长度达49419km；110kV变压器总容量为8500万kVA，110kV线路长度达89229km。装机容量为百万千瓦以上的大型发电厂，我们已能自行设计和安装。我国目前最高电压等级已达500kV。“七五”期间地处长江天险的葛洲坝水电厂将以500kV直流输电至上海，输送容量可达120万kW。自古以来，泛滥成灾威胁人民生命财产的黄河也开始被开发利用并造福于人民，在其上游建设了装机容量百万千瓦以上的刘家峡、龙羊峡水电厂。

按规划预计，我们将兴建1300万kW容量的三峡水电厂；采用单机容量为60万kW的火力发电机组；建成几座60万kW至80万kW的核发电机组，建设七个容量达1500万kW规模的500kV电网；电站和电网将实现高度的自动化，应用运动通讯技术和计算机技术的自动控制系统，对电力系统进行自动监视和控制。

这样的发展速度虽较解放前有很大增长，但仍不能满足工农业用电的要求。就电压等级、输电距离、系统总容量等技术指标而言，距世界先进水平尚有很大的差距。党的十二大确定到本世纪末，全国工农业总产值要翻两番，根据这个伟大的战略目标，我们要加快发展以电力为中心的能源工业，争取到1990年全国发电量达到5500亿kWh左右。无疑这是摆在我们电力工业职工面前的一项既光荣而又艰巨的任务。

第二节 电力网、电力系统及动力系统

发电机生产电能。在发电机中机械能转化为电能。变压器、电力线路输送、分配电能。电动机、电炉、电灯等用电设备消耗电能。在这些用电设备中，电能转化为机械能、热能、光能等。将上述所有生产、输送、分配、消费电能的发电机、变压器、电力线路、各种用电设备连接在一起组成的统一整体就是电力系统，如图1-1所示。

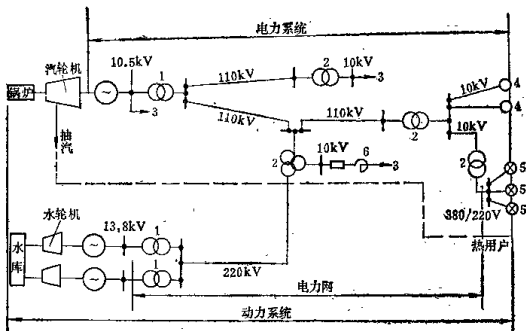


图 1-1 动力系统、电力系统、电力网示意图

1—升压变压器；2—降压变压器；3—输电线路；4—电动机；5—电灯；6—电抗器

与电力系统相关联的还有“电力网”和“动力系统”。前者指电力系统中除掉发电机和用电设备的那部分，它是由各种电压等级的输、配电线路及其两端的变电站组成的；后者指电力系统和“动力部分”的总和。所谓“动力部分”，包括热力发电厂的锅炉、汽轮机、热力网和用热设备，水力发电厂的水库、水轮机以及原子能发电厂的反应堆等。所以，可以这样说，电力网是电力系统的一个组成部分，而电力系统又是动力系统的一个组成部分。它们三者的关系示于图1-1中。

第三节 对电力系统运行的基本要求

电能的生产、输送、分配、消费和其它工业的区别在于：

(1) 与国民经济各部门的关系密切。由于电能与其它能量之间转换方便，宜于大量生产、集中管理、远距离输送和实现自动控制，所以国民经济各部门使用电能较其它能量有显著优点。同时一旦电能供应不足或中断，将直接影响国民经济计划的完成与人民的正

常生活。

(2) 过渡过程非常短暂。由于运行情况变化而引起的电磁的和机电的变化过程非常短暂,电能从一处输送至另一处所需时间仅千分之几甚至百万分之几秒,因而正常情况下或故障时进行的调整和切换等操作,必须依靠自动装置才能顺利完成。

(3) 电能生产不容间断。电能的生产、输送、分配、消费实际上是同时进行的,即发电厂任何时刻生产的电能必须等于该时刻用电设备消费与输送、分配中损耗电能之和。为了保证对用电部门不间断地供电,电力系统各组成部分必须紧密联系,互相协调,安全可靠地工作。

根据电力生产的特点,电力系统的运行状态基本上可分为稳态运行和暂态运行。当电力系统处于稳态运行时,系统中的主要运行参数,诸如功率、电压、频率等可假定作为不变的常数参与运行的全过程。而当电力系统受到某种突然的大干扰或小干扰,诸如输电线路发生短路故障(包括瞬时性故障),切除空载线路引起操作过电压,系统中各发电机组输入功率和输出功率不平衡等,引起系统电磁功率和机电功率的变化时,上述各主要运行参数也在不断变化。这种运行状态即为电力系统的暂态运行状态。

根据电力生产的特点,对电力系统运行的基本要求是:

一、保证供电的可靠性

供电的中断,将使生产停顿或引起混乱,甚至危及人身和设备安全,造成十分严重的后果。60年代以来,由于欧、美各国的一些电力系统多次发生大面积停电事故,在经济上造成了巨大损失,因此,世界各国对电力系统运行提出了首先要满足安全供电的要求。根据电力系统破坏性事故的原因分析,其中,由于元件质量差引起的占32%,自然灾害引起的占16.6%,继电保护误动作引起的占13.2%,人员误操作引起的占17%,运行管理水平低引起的占21.2%。因此,减少电力系统事故应从多方面着手。分析近年来日本的停电事故可以看出:配电线路事故次数占总事故次数的80%以上,占每次停电时间30min以上停电事故的90%。因此,采用电子计算机监控,实现配电系统自动化也是很重要的技术措施。必须指出,采用了配电系统自动化措施后,可通过远方集中控制发现故障段,并操作开关切除故障段,恢复正常送电,从而可较大地缩短每次事故停电的时间,有效地满足用户用电的需要。

虽然保证安全供电是对电力系统运行的首要要求,但并非所有负荷都绝对不能停电。通常,根据负荷对可靠性的要求,可分为下列三类:

第一类负荷 对这类负荷停止供电,会造成人身事故,设备损坏,将产生废品,使生产秩序长期不能恢复,人民生活发生混乱等。

第二类负荷 对这类负荷停止供电,会造成大量减产,将使人民生活受到影响等。

第三类负荷 指不属于第一类、第二类负荷的其它负荷。对这类负荷如工厂的附属车间等,短时停电不会带来严重后果。

此外,还有为数极少或持续供电时间很短的特殊重要负荷,要求可靠地不间断供电。对这类负荷通常都设置有两个或两个以上的独立电源,以便在任一电源故障时,对其供电不致中断。

作为电力系统的运行人员应认真分析各负荷的重要程度，以便根据情况，区别对待。

二、保证电能的良好质量

电能的良好质量指电压正常，偏移不超过额定值的 $\pm 5\%$ ；频率正常，偏移不超过 $\pm 0.5\text{Hz}$ ；供电电压波形正常，应为严格的正弦波。

电压质量对各类用电设备的安全经济运行有着直接影响。对照明负荷来说，当电压降低时，白炽灯的发光效率和光通量都急剧下降；当电压上升时，白炽灯寿命将大为缩短。对异步电动机来说，其定子电流、功率因素和效率与电压关系极大。当电压降低时，电机转矩显著减小，以致转差率增大，定子、转子电流增大，导致电动机温度上升；当电压过高时，电动机铁芯磁通密度增大以致饱和，从而激磁电流与铁耗都大大增加。

频率的偏差同样将严重地影响用户正常工作。对电动机来说，频率下降会使其转速下降，降低生产率并缩短寿命；频率增高会使电动机转速增高，功率损耗上升，使经济性降低。此外频率变化还能影响电钟的正确使用及其它电子器械的精确度等。

电源波形如不是严格的正弦波时，必然包含着各种高次谐波成分，从而大大影响电动机效率和正常运行，还将影响电子设备正常工作，造成对通信线干扰，甚至使系统产生高次谐波共振而危及设备的安全运行。

三、保证电力系统运行的经济性

电能生产的规模很大，消耗的能源在国民经济能源总消耗中占的比重很大。电能输送、分配时的损耗绝对值相当可观。为此，电力系统运行管理人员应努力降低发电厂的燃料消耗（煤耗率或油耗率）、厂用电率和线损率；应使水力发电厂充分利用水能，避免弃水；应充分发挥抽水蓄能发电厂的调峰性能，减少煤耗和系统调频的困难；应使功率在系统中合理分布以降低输送、分配时的损耗。应该指出，以上这些要求是互相关联的，而且往往是互相矛盾、互相制约的。因此，在考虑满足任何一项要求时，必须兼顾其它几项。

根据以上基本要求，最好将各个地区的电力系统联在一起，组成联合电力系统。其任务是根据运行要求，实现系统之间的功率交换，在事故情况下增加系统运行的可靠性。联合电力系统具有一系列优点：

（1）可减少系统的总装机容量。由于联合电力系统跨越地区广大，各地之间不但有季节上、时间上的差异，而且负荷性质也很不相同，这样就使得联合电力系统中最大负荷的出现时间不同。因此，联合电力系统综合起来的最大负荷必然小于各单独电力系统的最大负荷之和，从而可减少系统的总装机容量。

（2）可减少备用容量。考虑到在机组发生故障或检修时，仍能对用户继续供电，电力系统中需要一定的备用容量。组成联合电力系统后，各地区机组同时发生故障的概率较小，并可合理安排检修，从而使系统总的备用容量减少。

（3）提高供电可靠性和电能质量。由于联合电力系统容量大，当其中个别机组发生故障时，对系统影响较小，并且通过系统间的联络线，各地区之间可以互相支援，使用户停电减少，因此供电可靠性较高。一般联合电力系统的机组容量很大，个别负荷的变动，不会造成系统电压和频率的显著变化，所以电能质量较好。

（4）便于安装大容量机组。对于小型的电力系统，机组容量不能太大，否则一旦发

生故障退出运行后，对于系统影响较大，甚至会导致整个系统不能正常运行。大型联合电力系统，由于整个系统容量大，所以可安装容量较大的机组。从经济上分析，大机组每1 kW设备的投资和生产每1 kWh电能的燃料消耗以及维护费用，都较小组经济。这样一来，联合电力系统便可节约投资，降低成本，提高劳动生产率。

(5) 合理利用动力资源，便于实现经济运行。实现联合电力系统后，可以充分利用水力资源。一般来说水力资源取决于河流的流量及年降水量。在夏季雨水多时为丰水期，可多发水电，以节省燃料。在冬季枯水期时，可让火电机担任基本负荷，而让水电机组担负尖峰负荷。此外在负荷小的时候，也可停运效率低、成本高的火电机组。在正常运行时，可合理地组合各类发电厂，使负荷在发电厂间得到经济分配。原子能发电既不受气候自然环境的影响，也不受燃料运输条件的限制，但它不允许负荷过大的波动。因此，只有在联合电力系统中才有可能使其经常担负基本负荷运行。

当然，由于联合电力系统容量的增大，也带来一些值得注意的地方，如：

(1) 联合电力系统地域辽阔，各地区系统之间联系的电气设备都要采用超高压装置，这样不但投资大，技术上也有特殊的要求。

(2) 联合电力系统运行难度大。系统中发生局部故障时，若处理不当，会使事故扩大，从而危及整个系统运行的稳定程度，有时在经济上会带来较大的损失。

(3) 由于联合电力系统中线路回路数（并联的）增多，往往造成短路时故障电流的增大，这不但增加了电力系统本身电气设备的投资，而且也增大了对通信线路的干扰。

但是，上述存在的问题，并不造成对联合电力系统巨大优越性的否定，随着科学技术的发展，这些缺点都可逐步得到克服。

第四节 电力系统的接线方式和电压等级

一、电力系统的接线方式

(一) 电力系统的接线图

电力系统的接线图有两种：电力系统的电气接线图和电力系统的地理接线图。电力系统的电气接线图如图1-1所示。在电气接线图上较详细地表示出电力系统各主要元件之间的

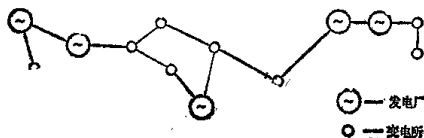


图 1-2 电力系统的地理接线图

电气联系，但不能反映各发电厂、变电所的相对地理位置。电力系统的地理接线图如图1-2所示。在地理接线图上，各发电厂、变电所的相对地理位置，乃至各条电力线路的路

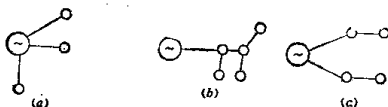


图 1-3 无备用接线方式
(a)放射式；(b)干线式；(c)树枝式(链式)

径都按一定比例绘制，但各主要元件之间的电气联系却往往难以表示。因此，这两种接线图常配合使用。

(二) 电力系统接线方式的特点

电力系统的接线方式大致可分为无备用和有备用两类。

所谓无备用接线，就是指负荷只能从一个方向取得电源的接线方式。这类接线方式分无备用放射式、无备用干线式和无备用树枝式(又称链式)等，如图1-3所示。无备用接线的主要优点在于简单、经济、运行方便，主要缺点是供电可靠性差。因此，这种接线不适用于一级负荷占很大比重的场合。由于目前架空电力线路已广泛采用自动重合闸装置，而自动重合闸的成功率是相当高的。所以，无备用接线也渐渐得到较广泛的采用。

所谓有备用接线是指负荷可以从两个或两个以上方向取得电源的接线方式。如双回路、环形网和两端供电网络等，如图1-4所示。这些网络的优点在于供电可靠性和电压质量高，缺点是不经济。因双回路放射式接线对每一负荷都以两回路供电，每回路的负荷不大，而往往由于避免发生电晕等原因，不得不选用大于这些负荷所需的导线截面积，严重地浪费有色金属。干线式或树枝式(链式)接线所需的断路器等高压电气设备很多，从而造成了投资费用的昂贵。而环式接线有与上述接线方式相同的供电可靠性，但却较为经济，缺点是运行调度较复杂，且故障时的电压质量差。

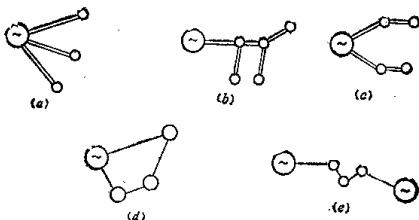


图 1-4 有备用接线方式
(a)放射式；(b)干线式；(c)树枝式(链式)；(d)环式；(e)两端供电式

接线方式需经技术经济比较后方能确定。所选接线除保证供电可靠、有良好的电能质量和经济指标外，还应保证运行灵活和操作时的安全。

二、电力系统的电压等级

(一) 电力系统的额定电压等级

图1-1所示电力系统中，电网各部分电压等级是不相同的。三相输送功率 P 可表示为

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

式中 P ——输送的有功功率(kW)；

U ——线电压(kV)；

I ——线电流(A)；

$\cos \varphi$ ——功率因数。

当输送功率一定时，输电电压愈高，电流愈小，导线等载流部分截面积可相应缩小，这样投资可减少。如果截面不变，电压愈高，功率损耗和电能损耗均可相应地减小。但输电电压愈高，对绝缘的要求则愈高，从而使杆塔、变压器、断路器等绝缘的投资也愈大。综合上述因素，对应一定的输送距离有一个最合理的线路电压。为了使电气设备的生产实现标准化和系列化，发电机、变压器及各种电气设备都规定有额定电压。各种电气设备在额定电压下运行时，其技术性能和经济效果最好。我国制定的1kV以上电压的额定电压等级如表1-1所示。

表 1-1 额 定 电 压 等 级 (kV)

用电设备额定线电压	交流发电机线电压	变压器额定线电压	
		一次绕组	二次绕组
6	6.3	6及6.3	6.3及6.6
10	10.5	10及10.5	10.5及11.0
	(13.8, 15.75)	(13.8, 15.75)	
35		35	38.5
110		110	121
220		220	242
330		330	363
500		500	550

注 1. 变压器一次绕组栏内6.3、10.5、13.8及15.75kV电压适用于和发电机端直接连接的升压变压器和降压变压器。

2. 变压器二次绕组栏内6.6及11kV电压适用于阻抗值为7.5%及以上的降压变压器。

3. 如在技术经济上证明有特殊优点时，水轮发电机的额定电压允许采用非标准电压（如表内括号中的13.8、15.75kV）。

在表1-1中，用电设备、发电机、变压器的额定电压不一致的原因以及它们与线路额定电压之间的关系，现予以说明：

(1) 经线路输送功率时，沿线路的电压分布往往是始端高于末端。例如，当线路带集

中负荷时,沿线段1—2的电压分布为一直线,如图1-5(a)所示;当线路带均匀分布负荷时电压分布为一曲线,如图1-5(b)所示。所以,要使所有用电设备都保持在额定电压下运行是不可能的,只能尽量使所有用电设备的端电压与额定电压接近。所谓线路的额定电压 U_N ,实际上就是线路的平均电压 $(U_1+U_2)/2$ 。各用电设备的额定电压则取与线路的额定电压相等,从而使所有用电设备能在接近它们的额定电压下运行。

我国规定的额定电压 U_N 及相对应的额定平均电压 U_{av} 如表1-2所示。由表可知, $U_{av} \approx 1.05U_N$,在工程简化计算中,常应用 U_{av} 来进行运算。

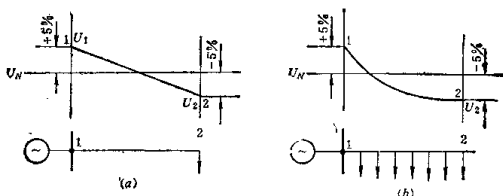


图 1-5 电力网中线路电压分布
(a) 带集中负荷的线路; (b) 带均匀分布负荷的线路

表 1-2

我国规定的 U_N 和相应的 U_{av}

额定电压 U_N (kV)	10	35	110	220	330	500
额定平均电压 U_{av} (kV)	10.5	37	115	230	345	525

由于用电设备的允许电压偏移为 $\pm 5\%$, 而沿线路的电压降落一般不大于 10% , 所以线路首端电压最好为额定值的 105% , 以使其末端电压不低于额定值的 95% 。由于发电机往往接在线路始端, 所以发电机的额定电压要比用电设备的额定电压高 5% 。

(2) 变压器的一次侧是接受电能的, 相当于用电设备, 其额定电压与用电设备的额定电压相等, 而直接与发电机相连的升压变压器一次侧额定电压应等于发电机额定电压 (即应比用电设备额定电压高出 5%)。

(3) 变压器的二次侧向负荷供电, 相当于一个电源, 因此其二次侧电压应较线路额定电压为高。考虑到变压器二次侧电压规定为空载时的电压, 在电能传输过程中由于其本身阻抗压降约为 5% , 为使正常运行时变压器二次侧电压较线路额定电压高 5% , 所以它的空载额定电压要比用电设备的额定电压高出 10% 。但对漏抗较小的变压器, 即短路电压 $U_{\%}$ 小于 7.5 的变压器以及直接与用户连接的变压器, 其二次侧额定电压仅高出用电设备 5% 。

例1-1 试确定图1-6所示电力系统各变压器的额定电压比。(除变压器T-7的 $U_{\%} < 7.5$ 外,其余变压器的 $U_{\%}$ 均大于7.5。)

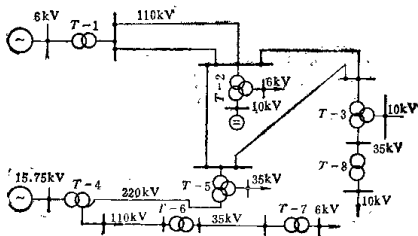


图 1-6 例1-1的电力系统图

解 根据已知条件,各变压器额定电压比如下:

- T-1——6.3/121kV;
- T-2——110/110/6.6kV;
- T-3——110/38.5/11kV;
- T-4——15.75/121/242kV;
- T-5——220/121/38.5kV;
- T-6——110/38.5kV;
- T-7——35/6.3kV;
- T-8——35/11kV。

(二) 电压等级的选择

根据电力网的电压等级我们一般将电力网分为地方网和区域网两大类。电压在110kV以下的电力网称为地方网。其中35kV既用于大城市、大工业企业的高级宾馆内部供电网络,也广泛应用于农村供电网络;10kV则是最常用的一级配电电压。目前民用电负荷随着人民生活不断改善而增加极快,6kV配电网已不能适应,供电部门在设计规划新建配电网时,常以10kV代替6kV。电压在110kV及以上的电力网称为区域网。其中110kV既用于中小电力系统的主干线,也用于大电力系统的二次网络,而220kV则目前用于国内大电力系统的主干线。

如何进行电压等级的选择,是关系到电力系统建设费用的高低、供电是否安全可靠、运行维护是否灵活方便的一个综合性的技术经济问题,根据设计和运行经验,电力网10kV至500kV电压等级的输送容量与输送距离的大致范围如表1-3所示。一般可根据输送容量和输送距离按表1-3选择合适的电压等级。

表 1-3

电力系统的电压与输送容量、距离的关系

线 路 电 压(kV)	输 送 容 量(MW)	输 送 距 离(km)
0	0.1~1.2	4~15
10	0.2~2.0	6~20
35	2~10	20~50
110	10~50	50~150
220	100~500	100~300
330	200~800	200~600
500	1000~1500	250~850

第五节 电力系统中性点的运行方式

电力系统的中性点指星形连接的变压器或发电机的中性点。这些中性点的运行方式是个比较复杂的问题。它关系到绝缘水平、通讯干扰、接地保护方式、电压等级、系统接线等诸多方面的问题。

中性点运行方式主要分两类：直接接地方式和不接地方式。直接接地系统供电可靠性低。因这种系统中一旦出现了单相短路接地时，便形成了除中性点外的另一个接地点，构成了短路回路，接地相电流很大。此时，为了防止电气设备损坏，必须迅速切除接地相甚至三相。不接地系统，虽然一相接地构不成短路回路，供电的可靠性较高，但当这种系统中发生一相短路接地时，非接地相的对地电压将升高为相电压的 $\sqrt{3}$ 倍。因面对绝缘水平的要求也高。在电压等级较高的系统中，绝缘费用在设备总价格中占相当大的比重，降低绝缘水平带来的经济效益十分显著，一般电压等级较高的电力系统采用中性点直接接地方式，面以其他措施（如采用线路自动重合闸）来提高供电可靠性。目前，我国对110kV及以上电力网都采用中性点直接接地方式。这样电力变压器、高压断路器等电气设备的造价大约可降低20%左右。反之，在电压等级低的电力系统中，一般就采用中性点不接地方式，以提高供电可靠性。目前我国对35kV及以下电力网都采用中性点不接地方式。

从属于中性点不接地方式的还有中性点经消弧线圈接地。所谓消弧线圈，实质上就是电抗线圈。我们用图1-7和图1-8来说明消弧线圈的功能。由图1-7可见，由于导线对地有电容，中性点不接地系统中一相短路接地时，接地点接地相电流属容性电流。而且随电力网线路的延伸，该电流会增大，以至完全有可能使接地点电弧不能自行熄灭并引起弧光接地过电压，甚至发展成严重的系统性事故。为避免发生上述情况，当电容电流超过某些数值时（10kV电力网为20A，35kV电力网为10A），可在网络中某些中性点处装设消弧线圈，如图1-8所示。由图可见，由于装设了消弧线圈，构成了另一回路，接地点接地相电流中增加了一个感性电流分量，它和装设消弧线圈前的容性电流分量起抵消作用，减小了接地点的电流，使电弧易于自行熄灭，提高了供电可靠性。如果感性电流等于容性电流，使接地处的电流为零，这种情况叫做完全补偿；如果感性电流小于容性电流，在接地点有

残余的电容性的欠补偿电流，我们称之欠补偿；如果感性电流大于容性电流，则接地处有残余的电感性过补偿电流，我们称之为过补偿。在实际运行中，我们不采用完全补偿或欠补偿的方式。因为，当采用完全补偿时，容抗等于感抗，网络将发生串联谐振，这时如各

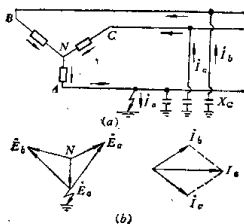


图 1-7 中性点不接地时的一相接地
(a) 电流分布；(b) 电势、电流相量关系

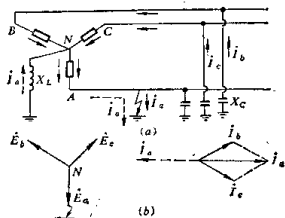


图 1-8 中性点经消弧线圈接地时的一相接地
(a) 电流分布；(b) 电势、电流相量关系

相电容值不等，则消弧线圈的中性点位移电压将达到很高的数值，可能使设备的绝缘损坏。当采用欠补偿时，日后电网不断发展，对地电容增加，将起不到补偿电容电流的作用。为此，系统中都采用过补偿的运行方式。因为这样一方面可使消弧线圈保留有一定的裕度，便于日后电力网发展；另一方面，当系统运行方式变更，如切除部分线路致使整个网络的容抗减少时，采用过补偿后，不致使系统接近完全补偿，避免了出现不允许的谐振过电压。

第六节 电力系统的负荷

电力系统中发电厂发出的电能，除了一小部分在变压、传输和分配过程中损耗以外，余下的都供给了用户。我们习惯上将用户所取用的电流或功率称为系统负荷，它一般指工业、农业、交通运输业以及民用电等用电设备所取用的电流或功率。

一、负荷的表示法

负荷通常可用电流 $\dot{I}$ 或视在功率 S 来等值，如图 1-9 所示。

电力系统的发电机、变压器和用电设备等的铭牌参数一般都用千瓦 (kW) 或千伏安 (kVA)，即功率来表征。因此，在电力系统计算中常以视在功率 S 来等值负荷。用视在功率表示负荷有两种体系。

$$1. S = \sqrt{3} \dot{U} \dot{I} \text{ 体系}$$

当负荷为阻感性时，若选取负荷端电压 $\dot{U}$ 为参考相量，即 $\dot{U} = U \angle 0^\circ$ ，则负荷电流 $\dot{I}$ 滞后电压 $\dot{U}$ 为 φ 角，如图 1-10 (a) 所示，可得