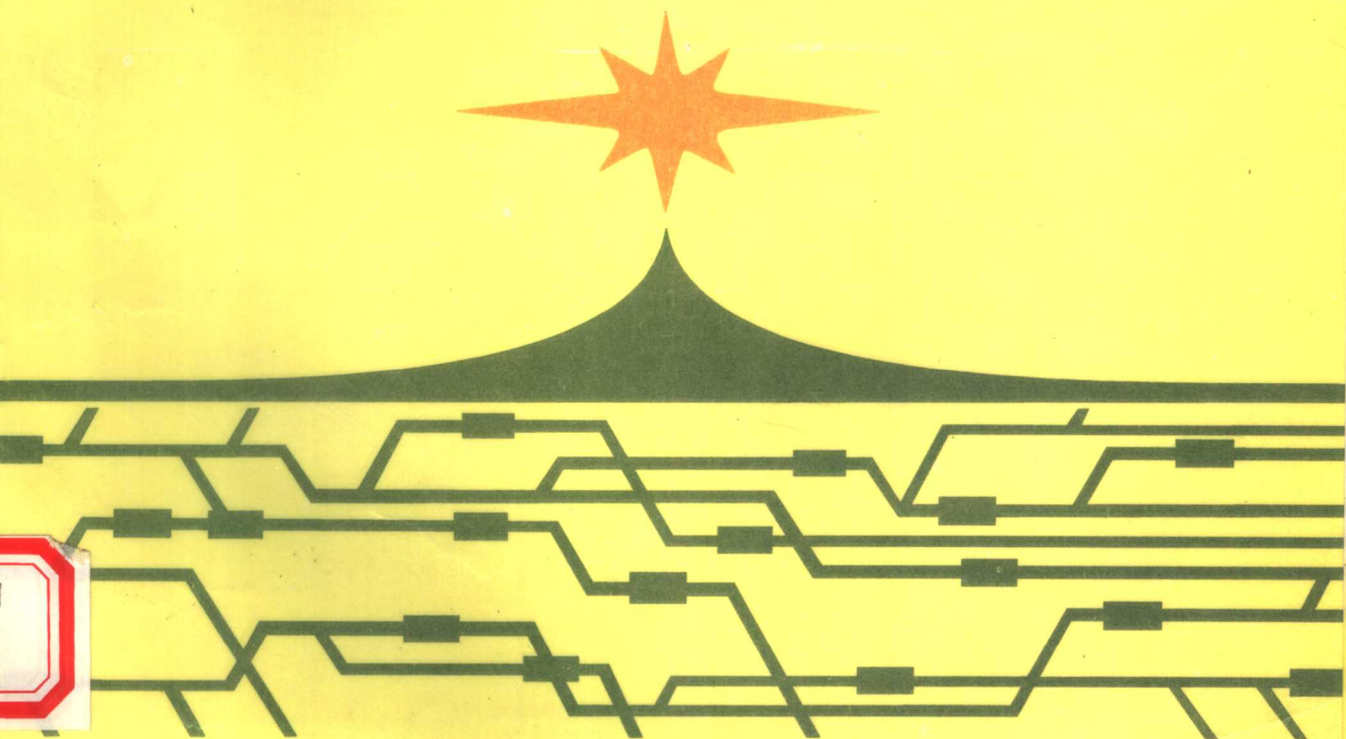


电力系统分析

简克良 主编



西南交通大学出版社

电力系统分析

第四版 王强



清华大学出版社

高等学校教材

电力系统分析

简克良 主编

西南交通大学出版社

前 言

《电力系统分析》是根据铁道部“电力牵引与传动控制及铁道电气化”专业教学指导委员会1990年成都会议审定的教材编写计划进行编写的。这本教材的前身是1982年由中国铁道出版社出版的高等学校试用教材《电气化铁道供变电工程》。

80年代以来,我国的电气化铁道通车里程增加了近六千公里,电气化铁道供电系统不论从结线方式或分析理论方面都有了很大的发展。随着电气化铁道运营里程的延长,电牵引供电系统在全国电力系统中用电构成的比重日益增加,两者间相互影响、制约的关系日益紧密。有鉴于此,在优化教学安排、拓宽学生专业理论知识等客观要求的前提下,乃确实认定将《供变电工程》教材修订改写为《电力系统分析》和《供变电工程及设计》两份教材是适宜的。本教材可作为铁道电气化专业的先行专业理论课且安排在本科第六学期进行讲授。

和原《供变电工程》教材相比,大力扩充了三相电力系统方面的分析内容,进一步充实了计算机解算电力系统的理论和方法。在牵引网故障分析方面也进一步充实了内容,当然在某些问题的分析方法上进行了精简。除了基本讲授内容的改动和充实外,重要和难懂的地方都列举了计算例题。

本书由西南交通大学简克良担任主编,陈君诚、杜申华任协编,由贺威俊教授主审。编写的具体分工如下:

绪论、第一章(第四节)、第四章、第五章、第六章、第七章及附录由简克良执笔;第一章、第二章、第三章由陈君诚执笔;第八章由杜申华执笔。书稿完成后又邀请有关院校,设计、运行管理部门的同行业专家进行了认真地评阅和审议。

本书在制订编写方案,书稿取材及审议过程中,得到了西南交通大学铁道电气化教研室全体同仁的支持与帮助。在编写及书稿审议中上海铁道学院郑瞳炽教授,华东交通大学林秀海副教授,铁道部第二勘测设计院沈彬振高级工程师以及成都铁路局何其光、袁则富高级工程师等同行专家都对书稿进行了认真的审阅并提出许多宝贵意见,对于上述这些支持和帮助,作者深表谢意。

由于水平所限,书中遗漏、错误之处敬希读者批评指正。

编 者

1992年12月 成都

目 录

绪 论	1
第一章 电力系统的基本概念	3
第一节 概 述	3
第二节 电力系统的结线和额定电压	9
第三节 电力系统的负荷和负荷曲线	11
第四节 电力系统中性点的工作方式	14
第二章 电力系统元件的参数和等值电路	20
第一节 电力线路的参数和等值电路	20
第二节 变压器的参数计算和等值电路	33
第三节 电力系统负荷的表示方法	39
第四节 标么制	41
第三章 简单电力系统的电压和功率分布计算	53
第一节 网络元件上的电压降和功率损失	53
第二节 运算负荷和运算功率	58
第三节 开式电力网的电压和功率分布计算	59
第四节 闭式电力网的电压和功率分布计算	64
第五节 含有几个电压级环网的功率分布计算	71
第四章 计算机解算电力系统的数学模型	77
第一节 计算机解算电力系统问题的发展及其优越性	77
第二节 导纳矩阵表达的节点电流方程	78
第三节 阻抗矩阵表达的节点电压方程	89
第五章 电力系统和电牵引供电系统的关系	101
第一节 电牵引供电系统的一次供电方式	101
第二节 电牵引供电系统的结线方式	103
第三节 牵引变电所的结线方式	105
第四节 电牵引负荷对电力系统的影响	113
第六章 电力系统对称短路故障的分析计算	123
第一节 基本概念	123
第二节 网络简化及计算网络的构成	126

第三节	三相短路电流计算	131
第四节	三相短路电流实用算法	141
第七章	不对称短路故障的分析计算	152
第一节	序网络及序网络基本方程式	152
第二节	电气元件的序参数及序网络构成	155
第三节	不对称短路故障的分析计算	166
第四节	短路点处存在过渡阻抗时的分析计算	182
第五节	电力系统短路故障的计算机解法	186
第八章	牵引供电系统短路故障的分析和计算	196
第一节	概 述	196
第二节	三相和单相牵引变电所牵引母线短路分析和计算	198
第三节	三相—两相牵引变电所的系统变换与牵引母线短路 分析和计算	202
第四节	牵引网短路分析和计算	208
附 录		235
参考文献		244

绪 论

现代电力系统是一个由电力生产、输送、分配及电能变换等环节组成的能量平衡系统。它主要由生产电能的发电厂、输电配电线路、各种变压器以及具有不同特性及运行要求的电力负荷所构成。正常运行着的电力系统,电能的生产和消耗是随时相等的。消耗的电能主要用于通过电能变换手段实现社会需求目的及补偿同时在电能生产、输送及变换过程中产生的能量损失。这一过程,体现了电能的生产和消费的连续性,也说明了电能的不可储存性。

现代电力系统的容量往往都是很大且为互联的,一个包含有大容量水力发电机组和火力发电机组的大型电力系统的容量可达数百万甚至上千万千伏安;具有多个电压等级;可以保证各种类型电力负荷的用电要求及供电可靠性。在实现上述工作目的的同时,能使电能的生产和输送、变换过程产生最小的能量损失,从而赢得较大的经济效益。

电力系统在工作过程中会受到各种类型的扰动及冲击,可能使系统的正常工作状态受到破坏而发生故障。严重的系统故障可能使系统解列而产生严重的停电事故,造成社会经济遭受损失、社会安定生活被破坏的严重恶果。为此,要确保电力系统的运行质量,就必须在对电力系统的各种状态进行充分分析的基础上,提出各种有效措施,保证电力系统高质量的运行。因此,电力系统各种状态下的分析工作是十分重要的。

对电力系统正常工作时行为状态的分析属正常工作分析。例如分析正常状态下系统网络内各节点的电压状态及网络中的有功和无功功率潮流分布的状态等。

发电机组的工作状态,不但受电力系统中电气元件及负荷状态的制约,而且要受其原动机性能的制约。当原动机的出力和发电机的电磁功率相平衡时,发电机组正常运行。当因系统遭受各种扰动,使发电机组的原动机和发电机间功率失衡时,有可能使发电机的转子发生摇摆,严重时,可导致发电机对系统失去同步而解列,这是系统中非常严重的事故。发电机组在发电时,因外界扰动因素而导致机—电转换产生暂态过程的分析,也是电力系统分析的内容。通过对发电机组机—电暂态过程的分析,可以了解其暂态性状,从而找出提高发电机组运行稳定性的措施。

当电力系统的电气网络中发生各种类型的短路事故或断线事故时,会使系统网络发生不同性状的电磁暂态过程。严重的短路事故会使发电机组机—电能量严重失衡而解列,使系统节点电压大幅度降低、大量非故障片的负荷不能正常运行,甚至还可酿成严重灾害。可以说,短路是电力系统运行中发生概率最大,从而造成的危害也最严重的事故。因此,对电力系统各种电磁暂态过程进行分析,在此基础上找出降低短路发生的概率;在短路事故发生后尽量缩小其影响范围,迅速切除事故点的措施是提高系统运行质量和供电可靠性的重要措施。可以说,电力系统运行质量及技术水平的提高,是在不断地研究和采取技术措施以降低事故发生概率的过程中实现的。

自从 19 世纪 80 年代世界上出现电力牵引的运输模式以来,电力牵引负荷就成为了电力系统的一种重要负荷,最初是直流制电牵引方式。随着变流技术及变流器件的发展,电力牵引

电流制的模式在经过从直流制向不同模式的交流制牵引过渡的探索以后,终于以大势所趋的认同,走向发展工频单相交流牵引制的共同道路。这是因为工频单相交流牵引制使电气化铁道供电系统的结构大为简化,从而使其运行效益显著增加。据统计,近二十年来,单相工频交流制电力铁道在世界电气化铁路总长度中所占的比例已从原来的只占 4% 而上升到约 30%,而直流制电气化铁道的总长度则从原来的 60% 以上降至 50% 以下。我国自从 1961 年第一条工频单相交流干线电气化铁路通车三十年来,电气化铁路在全国通车运营的铁路中所占比重已达 14%,今后还将在运输繁忙的重大铁路干线上实行电气化的技术改造,高速电气化铁路也会陆续出现在中国大地上。

单相工频交流电气化铁道作为电力系统的负荷,由于其自身工作的特点,会使电力系统的运行受到不同的影响。作为单相负荷,会使三相供电系统处于不对称运行状态。交流电牵引供电系统须采取技术措施,使这种不对称影响降至最小程度,例如,按变电所换相联接到三相系统,采用平衡变压器等措施。电牵引负荷由于变流、平波等措施的影响,使其负荷的功率因数较低,而且含有较大分量的谐波。为了改善系统运行质量,常需在牵引变电所中采用补偿滤波设备。由于交流电气化铁道变电所中采用的主变压器绕组结线方式不同,这不但会使产生的不对称影响不同,而且当牵引网发生短路事故时也会使其分析计算方法有所差别。因此,电力系统分析的基本理论应用于电牵引特殊负荷结构的分析,除了基本理论的共性外,还应掌握其各具特点的个性。

本课程主要结合铁道电气化专业的教学要求进行编写。和前版教材相比,增强了三相电力系统方面的内容、专辟章节讲述电力系统的构成、参数分析及状态分析内容,从而可使学生更多地掌握电力系统的知识以增强其综合能力。同时,把三相对称系统和单相电牵引系统有机地结合起来,从系统变换的角度建立起两个系统的关系,可以使读者能更深一层地了解 and 掌握两个系统之间的相互影响及制约关系。在故障分析方面,主要就电磁暂态过程进行分析,并且结合交流电气化铁道供电系统的结构特点,对铁路牵引网的参数计算及短路故障电流的计算等内容也都进行了较深入的阐述。

“电力系统分析”是铁道电气化专业的必修课程之一,而且是学生最先接触的专业课程。学习本课程的目的,在于使学生掌握电力系统及电气化铁道供电系统的工作原理,深入了解各种电磁暂态过程分析的基础理论和分析方法,为后续专业课程奠定必需的专业理论知识,为学生能正确地分析和解决电气化铁道工程技术问题提供理论基础和实践训练。

第一章 电力系统的基本概念

第一节 概 述

一、电力系统简介

电力系统是一个由生产、输送、分配和消费电能的多环节有机配合协调工作的整体，如图 1—1 所示。在发电厂中发电机所产生的电能，经过升压变压器和输电线路将电能输送到远方负荷中心的配电系统，而后经降压变压器再由配电线路把电能分配到用户（负荷）。电力系统通常采用三相交流制。

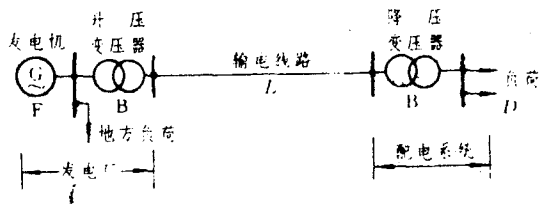


图 1—1 简单电力系统单线示意图

随着微电子技术和电力半导体技术的迅速发展和对大电力系统运行稳定性、可靠性、经济性的要求，目前我国已建成 500 kV 超高压直流输电系统。直流输电系统通常由整流站、直流输电线路和逆变站构成。整流站将三相交流电整流成直流电后，经直流输电线路将电能输送到远方负荷中心，而后再由逆变站将直流电逆变成三相对称交流电分配给电力负荷用户，图 1—2 为直流输电示意图。

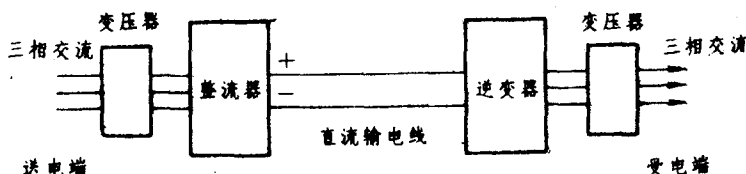


图 1—2 直流输电示意图

通常电力系统可分成四个组成部分：

1. 发电厂 将某种其它形式的能源转变成电能，按所用能源的不同，可以区分为：火力发电厂（使用固体、液体或气体燃料）；水力发电厂；原子能发电厂；地热发电厂；潮汐发电厂；风力发电厂以及太阳能发电厂等。应用最广泛的是火力发电厂和水力发电厂，原子能发电厂在我国也已兴建并开始发电，地热、潮汐以及太阳能电站是清洁而价廉的电站。地大物博的中国，能源种类繁多，今后必然会有多种型式的发电厂矗立在四面八方，为四化建设提供丰富的电能。

火力发电厂是用燃料燃烧产生蒸汽，推动透平机带动发电机发电的，图 1—3 表示一种常见的燃煤凝汽式火力发电厂的生产过程示意图。

块状煤经碎煤机磨成煤粉，经运煤机运至煤粉仓，由鼓风机用热空气经喷燃器吹入炉膛，煤粉在炉膛中以悬浮状态燃烧，温度很高，使锅炉中的水被加热而变成蒸汽。

在锅炉内所产生的蒸汽,沿蒸汽管道进入汽轮机(透平),使汽轮机转动并带动与其同轴的发电机。发电机所生产的电能送至总汇流母线,再由引出线送至外部电网。蒸汽在汽轮机中作功后,排入凝汽器进行冷却,这时汽温和汽压大大降低。蒸汽在汽轮机的进排汽压差愈大,热效率愈高。当进汽压力一定时,为了获得较大的汽压差,应使排入凝汽器的乏汽迅速凝结,以保持其中有较低的汽压(低于大气压)。为此,利用大量的循环水,由循环水泵打入凝汽器用以冷却乏汽,同时漏入的空气由抽气器及时抽出。所以火力发电厂应设在冷却水源充足的地方,冷却水量通常为排汽量的 50 至 80 倍。

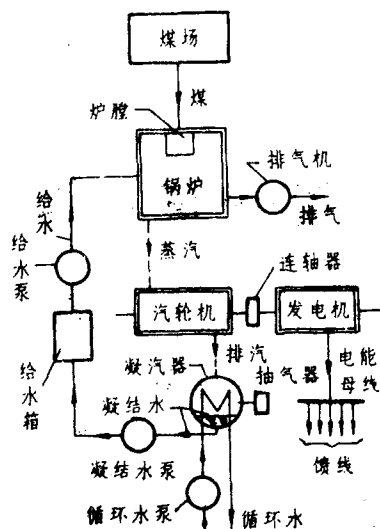


图 1-3 凝汽式汽轮机发电厂生产过程示意图

凝汽式发电厂的效率一般较低。如汽轮机容量为 50 兆瓦以下的中温中压(蒸汽压力为 29~35 大气压,蒸汽温度为 $400^{\circ}\sim 435^{\circ}\text{C}$)的发电厂,效率不超过 25%~28%。汽轮机容量在 50 兆瓦以上的高温高压(蒸汽压力为 170~220 大气压,蒸汽温度为 $550^{\circ}\sim 650^{\circ}\text{C}$)的发电厂,效率也只有 30%~40%,可见凝汽式发电厂中燃料的大部分发热量未被利用。

另一种效率较高的火力发电厂是兼供热发电厂,它不仅向用户供应电能,而且还兼供热水或蒸汽。显然这种电厂建于电、热兼需的用户附近是适宜的。

兼供热发电厂(也叫热电厂)和凝汽式发电厂的区别是在汽轮机的若干中间级可以抽取蒸汽。其中有的蒸汽可以直供蒸汽用户,也可用蒸汽加热热水用户的热水管网,还可以利用蒸汽预热流向锅炉中的补充水。这样就在较大的范围内较充分地利用了燃料中的热能。热电厂的效率一般可达 60%~70%或更高些。

应当指出,热电厂的经济运行状态是由热负荷决定的,也即是按照供给热力用户的蒸汽来适当调节进入汽轮机的蒸汽,使进入凝汽器的排汽量最少。

在水力资源丰富的地方可建造水电站,建造强大的水力发电站时,要考虑改善通航和土地灌溉以及生态平衡。它总是在远离负荷中心的地方建造的。根据水力枢纽布置的不同,水电站可分为拦河坝式、引水式以及混合式、地下式等。

以拦河坝式水力发电厂为例,其生产过程可简述如下(见图 1-4):

由堤坝 1 维持在高水位 2 的水,经过水管 4 进入螺旋形机壳 6,接着到水轮机的转子 7,然后经过泄水管 10 自由地泄到低水位 3,获得很高的速度,并将能量传给水轮机,而使发电机 9 转动。

水力发电厂的建造费要比火力发电厂高些,但是它的简单的生产过程及低的发电成本,能给国民经济带来巨大的经济效益,而且还可取得节省燃料,改善航道以及建立排灌系统的综合利益。

水力发电厂所能发出的功率,与堤坝前后的水位差(水头)、蓄水库容量和蓄水情形有关。

当水力发电厂和火电厂在电力系统的公共电网上并联工作时,水流得到最好的利用。方法是在一年之内,当丰水季节时,使水电站充分工作,且适当降低火力发电厂的负荷,当枯水季节

时可将大部分负荷转移给火力发电厂,同时在水力发电厂的蓄水库中蓄水。根据水电站的这一特点,电力系统中还应有一些能起调节作用的火力发电厂。

图 1—5 表示一个火力发电厂的电气主结线图,照例都用单线图表示。电流从发电机经电缆送至 6~10 kV 总汇流母线。其中一部分经过引出电缆到发电机母线电压级的电网,一部分到二次电压为 35~110 kV 的升压变压器,然后汇流至该电压级的汇流母线,由此或馈电给距发电厂较远的电力用户,或与电力系统相联,参与系统的统一供电工作。

“发电机电压”及升高后的电压,其汇流母线都采用双套母线制,一套工作,一套备用,两者经过母线联络断路器 DL 相联系。这可保证在一套损坏或维修时,发电厂照常送电。

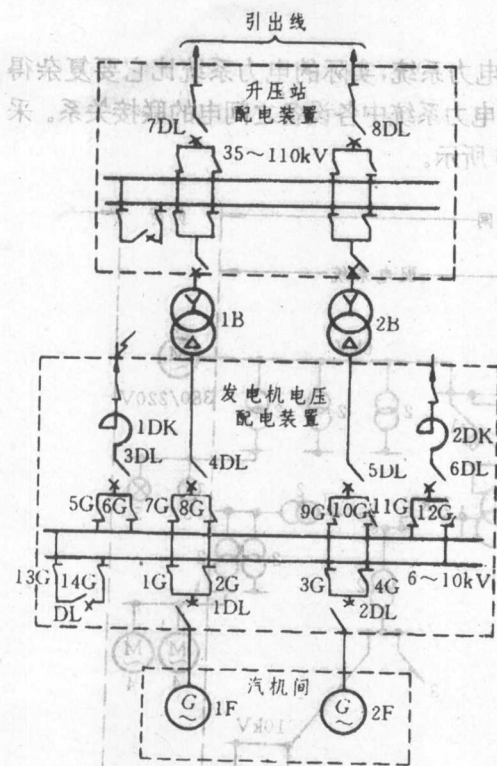


图 1—5 火力发电厂电气主结线图

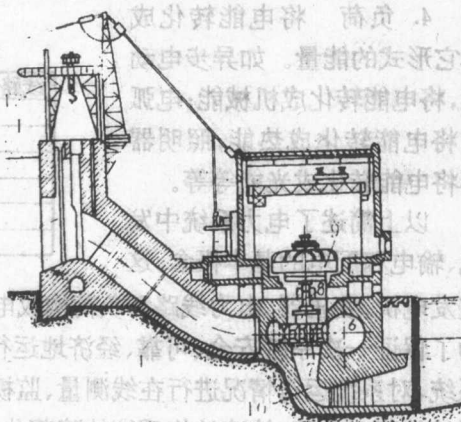


图 1—4 水力发电厂的截面图

为了限制短路电流、减轻断路器的断路负担,常在“发电机电压”的引出电缆上加装限流电抗器,以便在一旦发生短路事故时,限制短路电流的幅值。

发电机及其附属设备安放在汽(水)轮机厂房内(汽机间)，“发电机电压”的所有电气设备一般设在屋内,用屋内式配电装置工作;升压变压器和升高电压的所有电气设备,根据具体情况,可以布置在屋内或屋外。若布置在屋外,则称为屋外配电装置。

测量、监察、保护、信号等二次设备,一般都装在主控制室内。控制保护设备的弱电及集成化,将可把某些二次设备下放到设备区。

按电力用户的种类及要求供电的连续性,一般将用户分成三级。

2. 输电线路 将远离负荷中心水电站和坑口电站的强大电能以高电压形式输送到负荷中心的配电系统。一般输送电能的容量越大、输送距离越远,要求输电线路的电压越高。目前在我国多采用 220 kV 和 500 kV 电压级。

3. 配电系统 将输电线路送来的高压电能,经降压变压器降低电压,再经配电线路分配给电力用户。配电系统可根据需要逐级降压配电,从而形成高压配电系统和低压配电系统。高压配电系统的电压一般为 110 kV, 35 kV, 10 kV 和 6 kV; 低压配电系统的电压一般为 0.4 kV。

输电线路和配电线路统称为电力线路。电力线路所采用的电压级与输送电能的容量,距离

有一定的关系,如表 1—1 所示。

4. 负荷 将电能转化成其它形式的能量。如异步电动机,将电能转化成机械能;电弧炉将电能转化成热能;照明器具将电能转化成光能等等。

以上简述了电力系统中发电、输电和配电的基本概念。这

电力线路的电压与输送容量、
输送距离的关系 表 1—1

线路电压(kV)	输送容量(MVA)	输送距离(km)
6	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
500	1000~1500	150~850

些发电机、变压器、电力线路和负荷构成电力系统的一次系统。对一个现代化的大型电力系统,为了保证一次系统安全、可靠、经济地运行,需要设置计算机在线调度控制系统和多微机运动系统,对系统运行情况进行在线测量、监视和控制。同时还设置有继电保护和操作系统,以便在系统故障时准确、快速地将系统故障部分切除,以保系统其余部分正常运行。它们也是电力系统中不可缺少的组成部分,通常称为二次系统。有关这方面的具体内容,将在后续其它课程中讨论,本课程只涉及到一次系统的有关问题。

二、电力系统的表示方法

图 1—1 是采用单线图来表示的一个最简单的电力系统,实际的电力系统比它要复杂得多。所谓单线图,就是用单线来表示三相。它反映了电力系统中各设备之间电的联接关系。采用单线图,可以方便地表示复杂电力系统,如图 1—6 所示。

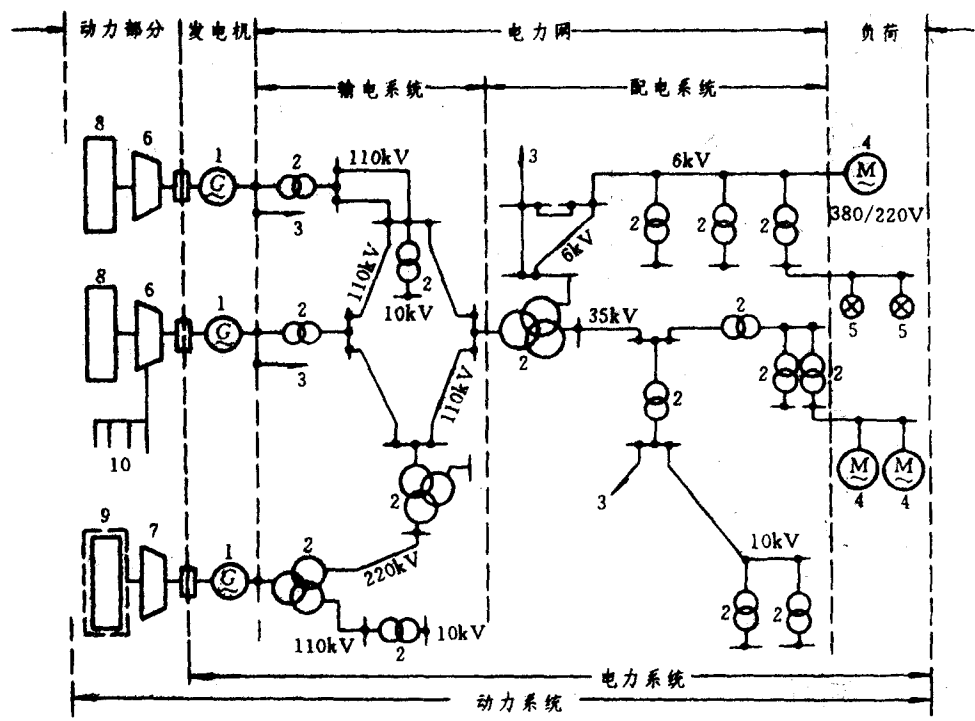


图 1—6 复杂电力系统的单线图

- 1—发电机; 2—变压器; 3—负荷; 4—电动机; 5—电灯; 6—汽轮机;
7—水轮机; 8—锅炉; 9—水库; 10—热力网

电力系统与发电厂的动力部分(如火电站的锅炉、汽轮机、水电站的水库、水轮机等)、热电站的热力网组成动力系统,在电力系统中除去发电机和用电负荷部分的剩余部分构成电力网。在电力网中升压变压器和输电线路部分称为输电系统;降压变压器和配电线路部分称为配电系统。它们之间的关系如图 1—6 所示。

三、联合电力系统

随着工农业生产的发展,对电力的需求越来越多,电力系统的规模相应地也越来越大,它跨越省区甚至国界,将几个地域的电力系统联系起来联合运行,构成联合电力系统或大型电力系统,如图 1—7 所示。在联合电力系统中联接各地域电力系统的输电线路称为联络线,其功能是按照系统运行方式的要求实现地域电力系统之间的功率交换。

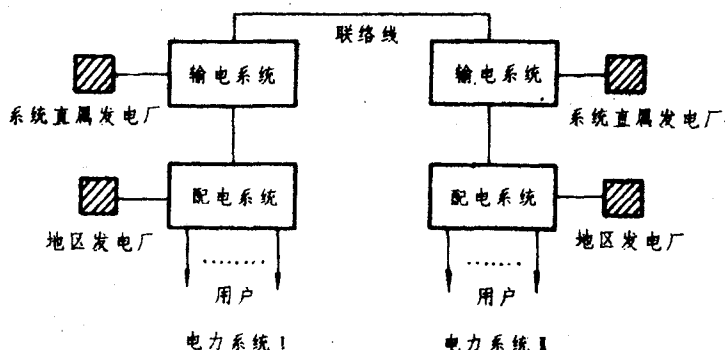


图 1—7 联合电力系统构成示意图

联合电力系统具有如下优点:

(1) 减少系统总装机容量。由于联合电力系统复盖地域广大,各地域最大负荷的发生时间不尽相同。因此,全系统的最大负荷必然小于各地区最大负荷之和。

(2) 减少备用容量。由于设备的故障或检修,系统需要一定的备用容量,而各地区设备同时发生故障的机率较小,可通过合理安排检修,使系统总的备用容量减少。

(3) 提高供电可靠性及电能质量。由于系统装机容量大,当其中一部分发生故障时对全系统的影响较小。并且通过系统的联系,各地区间可以经联络线互为备用,使其停电范围减少,以保证系统供电可靠性和电能质量。

(4) 合理利用能源实现经济运行。在丰水季节可以充分利用水力资源多发电以节省燃料,在轻负荷时,可以停运热效率低,成本高的火电机组。在系统正常运行时可按照等微增率准则使系统负荷在各类发电厂间得到经济、合理的分配。

(5) 便于安装大容量发电机组、提高效率和劳动生产率。对于小系统,机组容量不能太大,否则一旦发生故障,对系统影响大,甚至使系统不能正常运行。从经济上考虑,对于大型电力系统,机组容量大比较合算,可以节省投资,且机组运行劳动生产率高,效率也高。

但是系统容量增大也带来一些问题,如:

(1) 联系各地域电力系统之间的设备都是超高压设备,设备投资大。

(2) 大型电力系统其系统构成复杂,运行调度难度大。在发生局部故障时若处理不当,可能使事故范围扩大,严重时可导致系统解列,从而带来严重后果。

(3) 由于系统装机容量大,系统阻抗减少,系统各点短路功率相应增大,使系统设备投资加大。

随着系统运行管理水平和技术水平的提高,自动化设备性能的提高以及新技术的应用,特别是电子计算机监控,计算机继电保护和智能化专家系统的应用,这些缺点正在逐步克服。目前,我国电网单机装机容量已达到 60 万千瓦,大型网局总装机容量已超过 1000 万千瓦,输电线路电压已达到 500 千伏。长江三峡水电站的兴建将促进全国统一电力系统的形成。

四、电力系统运行的基本特点和对其基本要求

电力系统是由电能的生产、输送、分配和消费的各环节构成的统一整体。与其它工业相比较,电力系统运行具有如下基本特点:

(1) 电能不能大量存储。电能的生产、输送、分配和消费基本上是在同时进行的。电力系统中,发电厂在任何时刻发出的功率都等于该时刻用电设备所消耗的功率和输电、配电环节中功率损失之和。

(2) 电力系统的暂态过程非常短暂,从一种运行状态过渡到另一种状态极为迅速。

(3) 与国民经济各部门及人民生活关系密切。供电的突然中断都会带来严重的后果。

根据上述电力系统运行的基本特点,可对电力系统运行工作提出的基本要求是:

(1) 保证安全、可靠地供电。对用户供电的突然中断将使生产和人民生活发生混乱,甚至会危及人身及设备安全,导致严重的后果。所以,必需从各个方面采取措施以防止和减少事故的发生。保证安全、可靠供电的主要措施有:要严密监视设备的运行状态和认真维修好设备;要不断提高运行人员的技术水平以防人为事故;要配备足够的有功功率电源和无功功率电源以提高系统的安全和可靠性指标;要不断完善电力系统的结构,提高系统抗干扰能力,提高系统运行的稳定性;要采用计算机对系统的运行安全进行预测,监视和控制等。

根据对负荷供电可靠性要求和允许停电程度的不同,目前我国将负荷分为以下三级:

一级负荷:若停电将造成人身、设备事故,产生废品,使生产秩序长期不能恢复正常,或者产生严重的社会影响,使城市人民生活发生混乱等。属于一级负荷的有煤矿,化工厂、电台、医院、大型计算中心、卫星地面站以及电气化铁道等。

二级负荷:若停电将造成大量减产,使城市人民生活受到影响等。属于二级负荷的有非连续生产工厂,一般机关团体,学校等。

三级负荷:不属于一、二级的负荷,如工厂的附属车间,小城镇和农村等。

对一级负荷要保证不间断地供电。对二、三级负荷,在必须有部分负荷停电的情况下,应首先考虑保证二级负荷的连续供电。

(2) 保证良好的电能质量。电压和频率是衡量电能质量的两个重要指标,它们也是电气设备设计制造的基本技术参数。我国电网频率采用 50 Hz,正常运行时允许频率偏移为 ± 0.5 Hz。用户供电电压的允许偏移为额定电压的 $\pm 5\%$ 。当电力系统的运行电压和频率超过允许偏移值时,将影响电气设备的安全、经济运行;并可能造成减产,废品;严重时甚至危及整个系统的安全运行。

频率主要取决于系统中有功功率的平衡,系统出现有功功率缺额,频率就会降低,电压则主要取决于系统中无功功率的平衡,系统出现无功功率缺额,电压就会降低。因此,要保证良好的电能质量,系统中必须有充足的有功功率和无功功率备用,并要有适当的调节手段。

此外,我国对电网电压波形畸变,电网电压波动和不对称度都有具体的规定。它们都影响

电网和电气设备的安全、经济运行,对此必须引起足够的重视。

(3) 保证系统运行的经济性。电能生产的规模大,其能源消耗在国民经济能源总消耗中占的比重很大。在保证电能质量指标前提下,必须设法提高电力系统运行经济指标。这就是说,尽量降低发电煤耗率(水耗率),降低厂用电率和降低电网的有功功率损失。为此,要做好规划设计,合理利用能源;采用高效率低损耗设备;采取功率因数补偿措施降低网损;实行计算机对系统运行的经济调度等。

以上对电力系统这三个方面的要求,安全、可靠、发供电是最重要的,其次要保证电能的质量指标。在安全、可靠和电能质量保证前提下,尽可能地提高电力系统运行经济性,以求得最大的经济效益和社会综合效益。

第二节 电力系统的结线和额定电压

一、电力系统的结线

电力系统的结线图分为地理结线图和电气结线图两种。地理结线图是按照一定的比例反映各发电厂输电线路和变电所的相对地理位置和输电线路的路径,如图 1—8 所示。电气结线图反映电力系统中各主要发电厂,变电站和负荷之间的电气联接关系,常用单线图表示,如图 1—6 所示。它不能反映各发电厂,变电所的相对地理位置和输电线路的路径走向。

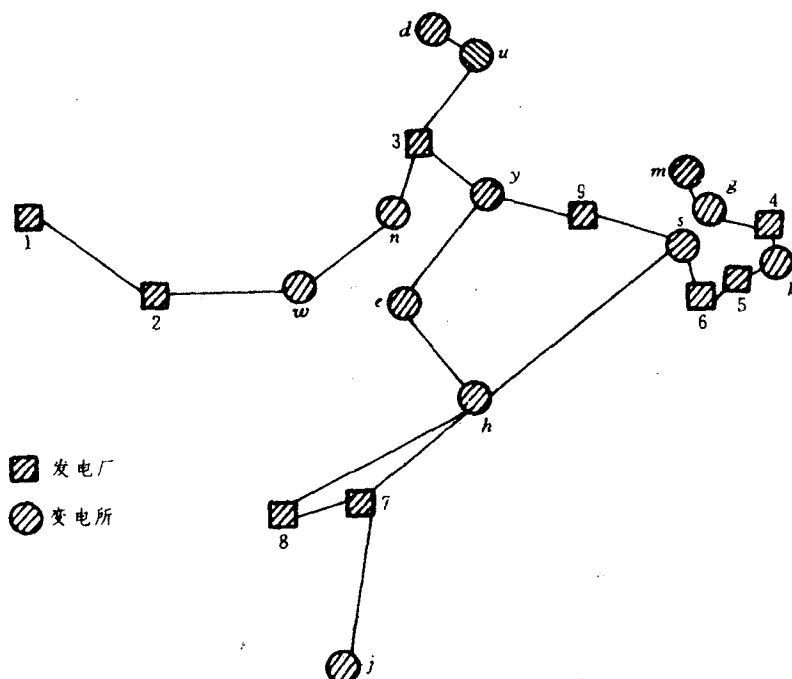


图 1—8 电力系统的地理结线图

电力系统的电气结线方式对保证系统安全可靠、优质和经济地向电力用户供电有非常重要的作用。电力系统的电气结线包括发电厂主结线,变电所主结线和电力网的结线。发电厂和变电所的主结线在后续课程中讨论,这里只介绍电力网的电气结线方式。

电力网的结线方式通常按供电可靠性分为无备用结线和有备用结线,在无备用结线方式中,负荷只能由一个方向从一个电源获得电能。如单回放射式、干线式和树状网络都属于这一类,如图 1—9 所示。无备用结线的特点是简单、设备费用少、运行方便。但是供电的可靠性比较低,任一段线路发生故障或检修时,都要中断部分用户的供电。此外,在干线式和树状式结线中,当线路较长时,线路末端的电压往往偏低。上述结线也称为开式结线。在有备用结线方式中负荷能由一个以上的电源从不同方向获取电能。这类结线的最简单形式是在无备用结线的每一段线路都采用双回线。这类结线同样具有简单和运行方便的特点,而且供电可靠性和电能质量都有明显地提高。其缺点是设备费用增加很多。有备用结线的常见形式有环网和两端式供电结线等,如图 1—10 所示。一般说,环网和两端供电结线的供电可靠性和电能质量可令人满意,运行经济性也较好。其缺点是运行调度和继电保护配置比较复杂。

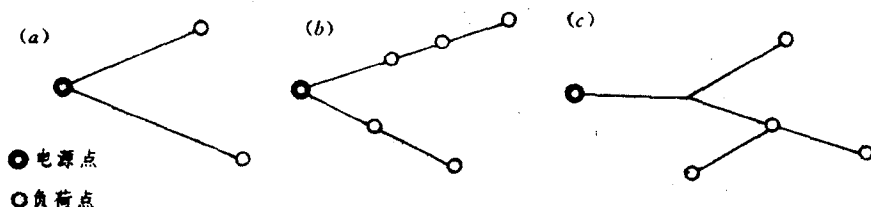


图 1—9 无备用结线
(a) 放射式结线; (b) 干线式结线; (c) 树状结线

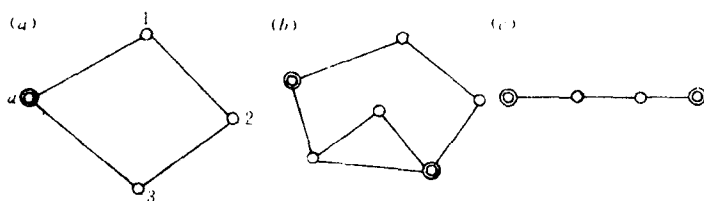


图 1—10 有备用结线
(a)(b) 环网结线; (c) 两端式供电

在现代化大城市,负荷密度大,对供电可靠性要求高,还可采用网格式结线。网格式结线是一种复杂的有备用结线方式。如图 1—11 所示。这种结线具有供电可靠性高,电能质量好,运行经济和能适应负荷增长等优点,但其继电保护配置相当复杂。运行管理麻烦。

二、电力系统的额定电压

为了便于电气设备的设计制造及其使用,规定了电气设备的各种额定电压。用电设备只有在其额定电压下运行才能取得最大的技术性能和经济效果。电力系统常用的额定电压等级如表 1—2 所示。

电力线路的额定电压按照电气设备的额定电压来确定,它与用电设备的额定电压相等。电力线路的电压等级也就是该段线路所在那一段电力网的电压等级。

发电机都处在线路的始端,考虑到沿线路的电压降落,要求发电机的额定电压高于线路的额定电压。但一般发电机的机端都接有负荷,其电压偏移不得超过额定电压的 +5%,因此发电

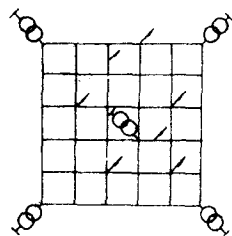


图 1—11 网格式结线

机的额定电压比线路的额定电压值高+5%。

电力系统常用额定电压等级 表 1—2

电力设备额定电压(kV)	发电机额定电压(kV)	变压器线电压 (kV)	
		一 次	二 次
6	6.3	6 及 6.3	6.3 及 6.6
10	10.5	10 及 10.5	10.5 及 11
35		35	38.5
110		110	121
220		220	242
500		500	

变压器的一次侧即功率输入侧，相当于用电设备，其额定电压等于用电设备的额定电压。如果变压器的一次侧直接与发电机相连，则其额定电压就等于发电机的额定电压。变压器的二次侧即功率输出侧，相当于电源，它通过线路向负荷供电时，线路的末端电压一般要降低10%，为使线路末端负荷电压偏移不低于额定电压5%，要求变压器二次侧电压较线路额定电压高+10%。只有漏抗较小，二次侧直接与用电设备相连的变压器，其二次侧额定电压才较线路额定电压高+5%。

变压器二次侧接 380 V 低压配电网时，其二次侧额定电压为 400 V。

第三节 电力系统的负荷和负荷曲线

一、电力系统的负荷

系统中所有用户用电设备消耗功率的总和叫做电力系统的负荷，也称为电力系统综合用电负荷。它包括工农业、交通运输和人民生活等各方面的各种用电设备，其中主要有异步电动机、同步电动机、电弧炉、电解装置、整流装置、电热装置和照明设备等。根据用户的性质，用电负荷也可以分为工业负荷、农业负荷、交通运输业负荷和人民生活用电负荷等。在不同行业用户中，上述各类电气设备消耗功率所构成的比例是不同的。全系统的用电负荷是把不同地区、不同性质的所有用户的负荷总加起来而得到的。

发电机所发出的功率并非全部供给用户，除了发电厂厂用电要消耗一部分功率外，功率在传输和分配过程中还要消耗一部分，这部分称为网络损耗。综合用电负荷加上网络损耗为发电厂供出的负荷，称为电力系统的供电负荷。供电负荷加上发电厂厂用电消耗的功率则为发电机发出的功率，称为电力系统的发电

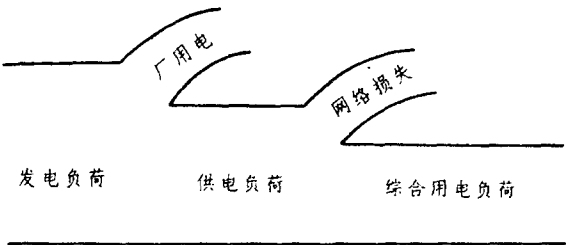


图 1—12 电力系统负荷间的关系