
高等学校教材

发电厂电气设备

东南大学 楼樟达 李扬 合编

中国电力出版社

内 容 提 要

本书主要讲述发电厂电气一、二次设备及接线装置的类型、作用、特点、基本工作原理和特性以及与发电厂运行紧密相关的电力系统专业基本知识。全书共分5章,内容包括:电力系统的组成和特点、电能质量和功率平衡;主要电气一次设备及其电气主接线和配电装置;火电厂厂用电的构成、接线、保安电源和厂用电动机;主要电气二次设备及控制信号、继电保护和自动装置;电气设备运行监控和微机远动终端等。内容结合现代火电厂实际,全面简要,适当拓宽知识面,结构新颖,并注意了取材的先进性和实用性。

本书为高等学校“热能动力工程”类专业教材,亦可供从事发电厂工作和相关专业工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

发电厂电气设备/楼樟达 李扬合编. -北京:中国电力出版社, 1998

高等学校教材

ISBN 7-80125-476-7

I. 发… I. ①楼… ②李… III. 发电厂-电气设备-高等学校-教材 IV. TM62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 19139 号

中国电力出版社出版

(北京三里河路6号 邮政编码 100044)

北京京东印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

1998年5月第一版 1998年5月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 11印张 247千字

印数 0001—5370册 定价 11.00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

本书是根据电力部中电联“普通高等学校第四轮前二年（1996~1997）电力工程、热能动力、水电工程类专业本科教材编审出版计划”编写的，作为“热能动力工程”类专业必修课程的教材。本书的编写大纲是在原“热能动力工程及其自动化”专业已使用多年的讲义《发电厂电气系统》的基础上提出的，并经全国电力工程类专业教学指导委员会发电厂教学小组会议上通过。本书内容结合现代火电厂实际以及“热能动力工程”类专业工作人员对“电”方面专门知识的需要，注意现代先进技术与实际结合，着重阐述了发电厂主要电气一、二次设备及接线装置类型、作用、特点、基本工作原理和特性以及与之密切相关的电力系统专业基本知识。内容全面简要，结构层次清晰，易于建立现代火电厂大量电气设备的各个环节的局部概念及其相互联系的总体概念。

本书第一章、第三章的第四、五节以及第四章由楼樟达编写；第二章、第三章的第一、二、三节以及第五章由李扬编写。全书由楼樟达统稿。

本书由贵州工业大学谢维廉教授主审，在审阅过程中提出了许多宝贵的意见，编者在此表示感谢。

限于编者水平，书中难免存在一些缺点和错误，希望广大读者给予指正。

编者

1997.7

目 录

前言	
第一章 电力系统概述	1
第一节 电力系统的组成和特点	1
第二节 电力系统的电能质量	8
第三节 电力系统的功率平衡	10
第四节 电力系统短路简述	22
思考题	24
第二章 发电厂电气一次设备	25
第一节 概述	25
第二节 电气设备的一般安全工作条件	26
第三节 同步发电机和电力变压器的运行	29
第四节 高压开关电器	43
第五节 互感器	50
第六节 电气主接线	56
第七节 配电装置	63
思考题	67
第三章 发电厂的厂用电	68
第一节 概述	68
第二节 厂用电接线	69
第三节 厂用负荷的供电类别和供电方式	74
第四节 交流事故保安电源和交流不停电电源系统	81
第五节 厂用电动机	89
思考题	94
第四章 发电厂电气二次设备	96
第一节 概述	96
第二节 发电厂电气控制与信号	102
第三节 继电保护	106
第四节 发电厂电气自动装置	126
思考题	149
第五章 电气设备运行监控与微机远动终端	150
第一节 电气设备运行监控和互感器配置	150
第二节 电气量数据采集通道	152
第三节 微机远动系统终端	163
思考题	169
参考文献	170

第一章 电力系统概述

第一节 电力系统的组成和特点

一、电力系统的形成及其优越性

(一) 电力系统的形成

随着生产的发展和用电量的增加，发电厂的数量和容量都不断增加。当把地理上分散的发电厂通过各种电压等级的输电线路、升压和降压变电所等相互连接形成一个整体，供电给许多电力用户时，就形成了现代电力系统。也就是说，电力系统是由发电厂（不包括动力部分）、变电所、输电线路和用电设备有机连接起来的整体，它包括了从发电、变电、输电、配电直到用电这样一个全过程。电力系统加上发电的动力部分、供热以及用热设备，则称为动力系统。发电厂（电力系统）的动力部分包括：①火电厂的锅炉、汽轮机、燃气轮机、热网等；②水电厂的水库、水轮机；③原子能电厂的核反应堆锅炉、汽轮机等。电力系统中，由升压和降压变电所通过输电线路连接起来的部分，称为电力网。因此，电力系统也可看作是由发电厂（不包括动力部分）、电力网和电力用户所组成的整体。

图 1-1 所示电力系统单线接线图（单线均代表三相）是现代电力系统的一个例子，其中包括较大容量的水力发电厂、火力发电厂和热电厂。图中的水力发电厂由于容量较大，输电距离较远，所以把电压升高到 500kV 后经线路送出。火力发电厂 1 的电能升压至 220kV 后由线路送到变电所 3，并通过线路与 220kV 电网相联系。图中所谓的热电厂是指装有供热式汽轮机的发电厂，它除了发电外，还兼向附近的工厂供热。由于要兼供热，所以总是把热电厂建在用户附近，它除了用 10kV 发电机电压供给附近地区用电外，还通过升压变压器与 220kV 电网联系以进行功率交换。火力发电厂 2 为建设在燃料产区的区域性火电厂，它所发出的电能主要通过 220kV 线路送往负荷中心。图中变电所 1、变电所 2 和火力发电厂 2 的升压站以及高压线路所构成的 220kV 环形电力网是本系统的主要电力网，它是联系发电厂和用户的核心部分。

较大的电力系统总是由各种类型的发电厂、电力网和电力用户组成的。

发电厂是电力系统中电力的生产环节，它的类型一般根据一次能源来分类。以往，电力系统中主要是火力和水力发电厂，从 20 世纪 60 年代以来，原子能发电厂的建设逐年增加，在一些国家的电力系统中已占有相当的比重。我国也正在有重点有步骤地建设核电站，大亚湾、秦山核电站已建成投入运行。

电力网按其供电范围、电压高低主要可分为地方电力网和区域电力网。地方电力网的电压等级一般不超过 110kV，供电距离多在 100km 以内，主要是一般城市、工矿区、农村的配电网。区域电力网则把范围较广地区的发电厂联系起来，而且输电线路长，电压高，传输功率大，用户类型也较多。目前在我国，区域电力网的电压在 110kV 以上，包括 330kV

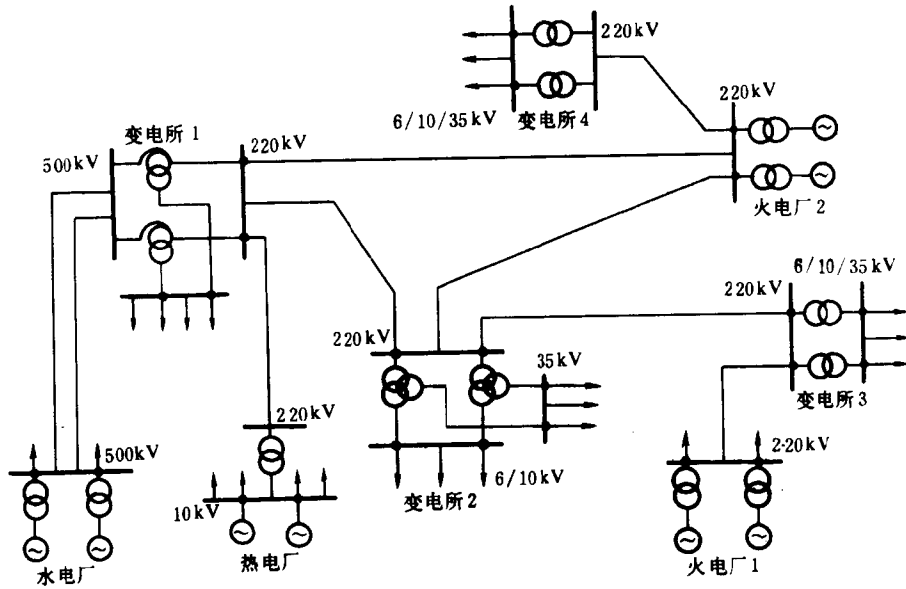


图 1-1 电力系统单线接线图

及以上的超高压，供、输电距离在 100km 以上，甚至超过 1000km，基本上各省（区）都有，并形成了跨省（区）的多个大电力网。

变电所是电力系统中的中间环节，是电力网的重要组成部分，主要用来改变电压（升压或降压），接受、分配、传输和转送电能。一般可分为枢纽变电所、中间变电所和终端变电所等。枢纽变电所电压较高、容量较大，处于联系电力系统各部分的中枢位置，地位重要，如图 1-1 中的变电所 1 和变电所 2 都属于这种类型。中间变电所则处于发电厂和负荷中心之间，从这里可以转送或抽引一部分负荷，如图 1-1 中的变电所 3。终端变电所，它只是负责供应一个局部地区的负荷，而不承担转送功率，如图 1-1 中的变电所 4。

电力用户的用电设备所取用的功率称为**电力负荷**，按其重要性和对供电可靠性的要求，通常分为三类：

(1) **第一类负荷**。对此类负荷突然停止供电时，将造成人员伤亡，重大设备损坏，重要产品出现大量废品，引起生产混乱，交通枢纽、干线受阻，重要城市供水、通信、广播中断等，造成巨大经济损失或重大政治影响。第一类负荷是最重要的电力用户，必须有两个独立电源供电。

(2) **第二类负荷**。对此类负荷突然停电时，会造成大量减产、停工，生产设备局部破坏，局部地区交通阻塞，城市居民的正常生活被打乱等。第二类负荷也是重要负荷，应尽量由两回线路供电，且两回线路应引自不同的变压器或母线段；确有困难时，允许由一回专用线路供电。

(3) **第三类负荷**。不属于前两类负荷的均属第三类负荷。此类负荷短时停电造成的损失不大，属于一般电力用户，可以用单回线供电。

1949 年以来，我国电力工业发展比较迅速，特别是近 20 年，随着改革开放的不断深入，

电力工业更迅速发展，取得举世瞩目的成就。截至1996年底的统计，全国发电装机容量已达2.37亿kW（其中水电为0.56亿kW，占总容量的23.6%；火电为1.79亿kW，占总容量的75.5%；核电为210万kW，占总容量的0.9%），全国年发电量10797亿kWh^①。目前，我国发电装机容量和年发电量均仅次于美国，居世界第二位。

我国已建成六个跨省的电力系统，它们分别是华东、东北、华北、华中、西北和南方电力系统。随着国民经济的发展，电力系统将继续发展，而且还将逐步建立和加强它们之间的联系，形成更大的联合电力系统甚至全国性统一电力系统。全国各级电力系统根据“统一调度，分级管理”的原则进行管理，分为国家电力调度、跨省电力调度、省级电力调度、地区电力调度和县级电力调度等五级，简称国调、网调、省调、地调和县调。

（二）电力系统的优越性

实践证明，当各孤立运行的发电厂通过电力网连接起来形成并联运行的电力系统后，在技术经济上将带来很大好处，主要是：

（1）减少系统中的总装机容量。电力系统供电的各电力用户的最大负荷是不会同时出现的。因此系统中最大综合负荷总小于各用户最大负荷的总和。由于系统中最大综合负荷降低，也就可以相应地减少系统的总装机容量。

为了保证对用户的可靠供电，无论是孤立电厂还是电力系统，都需要检修和事故备用容量。在孤立电厂中，备用容量不应小于电厂最大机组的容量（可能是电厂总容量的30%~40%）。而在电力系统中，所有发电厂连接在一起并联运行，备用容量只需系统总容量的10%~15%，且不小于系统中最大一台机组容量即可。显然，此时电力系统的备用容量比各孤立电厂备用容量的总和为少，即系统总装机容量可以减少。

（2）可以装设大容量机组。形成电力系统后，由于总负荷的增大，因此可以装设大容量机组。大容量机组效率高，每千瓦投资以及维护费用都比多台小机组经济得多。但是，电力系统中所采用的最大机组容量，以不超过总装机容量的15%~20%为宜。

（3）能够充分利用动力资源。如果不形成电力系统，很多能源难以得到充分利用。例如，水力发电厂的出力决定于河流的来水情况，而水流情况是多变的，很难与电力负荷相适应，往往枯水季节出力不足，而在丰水季节却要弃水。当水电厂投入电力系统后，它的运行情况就可以与火电厂相互调剂组合。在丰水季节，可以让水电厂尽量多发电以减少火电厂的出力，节省燃料；而在枯水季节则让水电厂担负尖峰负荷，火电厂担负固定的基本负荷。这样既充分利用了水能资源，又提高了火电厂的运行效率，降低了煤耗。

（4）提高供电可靠性。在电力系统中，由于是多电源联合供电，机组台数多，即使个别机组或电源发生故障，其他机组或电源仍可以在出力允许的情况下多带负荷，从而提高供电的可靠性。

（5）提高电能质量。电能质量用频率和电压来衡量，其数值应按规定要求，保持在一定的允许变动范围内。由于电力系统容量大，负荷波动所引起的频率和电压波动就会减小，电能质量就可以提高。

^① 数据摘自《1996~1997·中国电力年鉴》。

(6) 提高运行的经济性。形成电力系统后；除了充分利用动力资源外，在系统中还可以经济合理的分配各机组或各发电厂之间的负荷，使运行经济性好、效率高的机组多带负荷，而效率低、发供电成本高的机组少带负荷，从而降低生产电能的成本。

从上可知，形成电力系统有明显的优越性，能显著提高运行的可靠性与经济性。但是随着电力系统的扩大，联系的增强，由于一处发生故障而波及广大地区的情况也越易发生。另外，系统短路电流也随着系统容量的增大而不断增加，甚至达到设备不能允许的程度。因此系统联系的增强也将是有限度的，并不意味着在所有场合下都是系统规模越大越好。

二、电力系统的特点及其要求

(一) 电力系统的特点

(1) 电能的生产与消费具有同时性。由于电能生产和消费是一种能量形态的转换，要求生产与消费同时完成。迄今为止仍未能解决经济、高效的电能大容量贮藏问题。因此电能难于贮存，是它的最大特点。从这个特点出发，在电力系统运行时就要求经常保持电源和负荷的功率平衡，在规划设计时则要求确保电力先行，否则其他工厂即使建成也无法投产。再者，发电和用电同时实现，使电力系统中的各个环节之间具有十分紧密的相互依赖关系。无论转换能量的原动机或发电机，或输送、分配电能的变压器、输配电线路，还是用电设备等，只要其中任何一个元件故障，都可能会影响电力系统的正常运行。

(2) 电能生产与国民经济各个部门和人民生活有着极为密切的关系。

(3) 电力系统的过渡过程十分短暂，电磁变化过程非常迅速。由于电能以光速传播，所以运行情况发生变化所引起的电磁和机电过渡过程是非常短暂的。电力系统的正常操作，用户电力设备的启停或负荷增减都是很快的，电力系统中出现的故障更是极其短暂的，往往用微秒、毫秒或秒来计量。因此，不论是正常运行时所进行的调整和切换等操作，还是故障时为切除故障或为把故障限制在一定范围内以迅速恢复供电所进行的一系列操作都要求十分快速地完成，这仅仅依靠人工是不能达到满意效果的，甚至是不可能的，必须采用各种自动装置（包括计算机）来迅速而准确地完成各项调整和操作任务。电力系统的这个特点给运行、操作等带来了许多复杂的问题。

(4) 电力系统的地区性特点较强。由于电力系统的电源结构与资源分布情况和特点有关，而负荷结构却与工业布局、城市规划、电气化水平有关；至于输电线路的电压等级，线路配置等则与电源与负荷间的距离，负荷的集中程度等有关，因而各个电力系统的组成情况不尽相同，甚至可能很不一样。例如，有的系统是以水电为主，而有的系统则是以火电为主（或完全没有水电）；有的系统电源与负荷距离近，联系紧密，而有的系统却正好相反，等等。

(二) 对电力系统的要求

从电力系统的上述特点出发，根据电力工业在国民经济中的地位和作用，决定了对电力系统有下列基本要求：

(1) 最大限度地满足用户的用电需要，为国民经济各个部门提供充足的电力。为此，首先应按照电力先行的原则，作好电力系统发展的规划设计，认真搞好电力工业的建设，以确保电力工业的建设优先于其他的工业部门。其次，还要加强现有电力设备的运行维护，以

充分发挥潜力，防止事故的发生。

(2) 保证供电的可靠性。这是电力系统运行中一项极为重要的任务。运行经验表明，为保证供电的可靠性，首先要保证系统各元件工作的可靠性，这就一定要保证电力设备的产品质量，努力搞好设备的正常运行维护。其次，要提高运行水平和自动化程度，防止误操作的发生，在事故发生后应尽量防止事故扩大等等。

应该指出，要绝对防止事故的发生是不可能的，而各类电力负荷对供电可靠性的要求也是不同的。首先是保证第一类负荷，然后保证第二类负荷，最后保证第三类负荷。当系统发生事故，出现供电不足的情况时，就应当首先切除第三类负荷，以保证第一、二类负荷的用电。通常，对第一、二类负荷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，保证供电不致中断。

(3) 保证良好的电能质量。主要是维持频率和电压的偏差不超过一定的范围。

(4) 保证电力系统运行的经济性。电能生产的规模很大，所消耗的能源在国民经济总消耗能源中所占的比重相当大，且电能在生产、输送、分配时的损耗也很严重。因此，保证电力系统运行的经济性具有极其重要的经济意义。它有三个主要经济指标，即生产每千瓦时电的能源消耗（煤耗率、油耗率、水耗率等），生产每千瓦时电的自用电（厂用电率），以及供配每千瓦时电在电力网中的电能损耗（线损率）。提高运行经济性，就是在生产和供配一定数量的电能时，使这三个指标达到最小。

把上述各点归纳起来可知，保证对电力负荷不间断地供给充足、可靠、优质而又廉价的电能，这就是电力系统的基本要求。

三、电力系统结构和额定电压等级

(一) 电力系统的基本结构

合理的电力系统结构是保证电力系统安全稳定运行的重要物理基础。所谓合理的电力系统结构，就是指在技术上电源布局合理，并按其地位、作用分区分层接入主电力网；发电机组的规模及参数的选择、电源建设与电网规模，须与发展阶段相适应；电网标准电压等级合理，网络结构清晰，潮流（功率流动）分布均匀、流向合理，使电网能适应负荷和建设的发展需要；电网运行的事故处理具有灵活性，抗干扰能力强；在规划建设上发电、送电、变电都要配套同步；经济上合理，适合国情。大的电力系统有几十个甚至上百个电厂，供电面积大，线路成千上万条，系统的结构相当复杂。从横的方面看，电力系统可分为将一次能源转换为电能的发电系统，将发电系统发出的电能汇集后输出到各处的输电系统和将输送来的电能分配到各用户的配电系统三大部分。从纵的方面看，电力系统具有按电压等级区分的分层结构。

电力系统的基本结构形式，通常根据电源位置、负荷分布等的不同而有所不同，但大致可分为下列两类：

(1) 大城市型。这类系统是向以大城市为中心的负荷密度很高的地区供电的电力系统。它以围绕城市周围的环形系统作为主干，将水、火、核电电源引入主干网络，再向城市配电系统进行再分配，并对大城市用电增长有高度的适应性和供电的高度可靠性。

(2) 远距离输电系统。这类系统一般是指通过远距离输电线路（数百到数千公里）把

远处的大型水电厂、坑口电厂、核电厂的功率送往负荷中心，如图 1-2 所示。这种大容量、远距离的功率输送，既可以用超高压（330kV 及以上）交流输电线路，也可以用超高压直流或交、直流并列的输电线路。我国的水力资源 70% 以上在西南、西北和华中，煤炭资源大部分在华北和西北，而负荷中心主要在东部沿海和中部地区，形成西电东送的格局，因此远距离输电系统在我国电力建设中起重要作用。

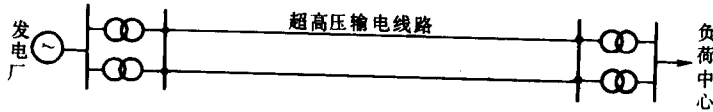


图 1-2 远距离输电系统

电力系统电压分层结构示意图如图 1-3 所示。超高压 500kV 主要用于大功率、长距离输送和跨省联络线，并正在逐步形成跨省互联的网络；高压 220kV 主要形成大电网主干网架；110kV 用于中、小系统的主干线，也用于电力系统的二次网络；城市配电网目前主要采用 10kV、35kV 电压等级，随着城市电力需求的增长，配电网的电压升高，将形成 110kV 配电网。这种划分不是绝对的，要根据具体情况，经过论证分析后决定。

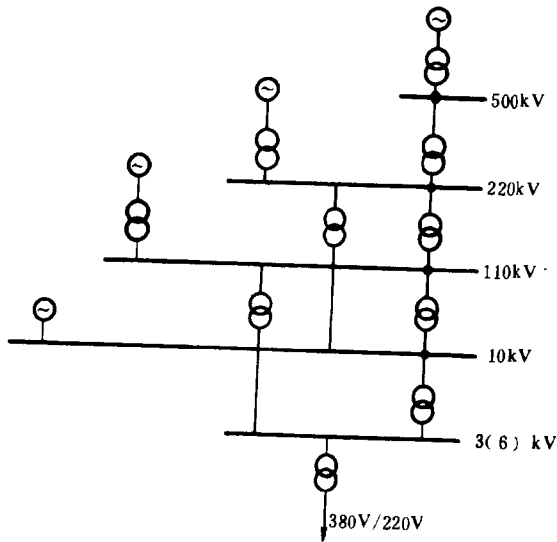


图 1-3 电力系统电压分层结构示意图

电力系统基本结构形态的接线大致可以分为无备用和有备用的两种类型。无备用接线的用户只有一个电源，主要优点是简单、经济、运行方便，其缺点是供电可靠性差，所以它一般不能用于对第一、二类负荷的供电。有备用接线的用户有两个或两个以上的电源对其供电，其特点是供电可靠，能保证对第一、二类负荷的供电，但其缺点是运行操作和继电保护较复杂，投资费用也较大。

(二) 电力系统的额定电压等级

电力系统中的电机、电器和用电设备都规定有额定电压，只有在额定电压下运行时，其技术经济性能才最好，也才能保证安全可靠运行。此外，为了使

电力工业和电工制造业的生产标准化、系列化和统一化，世界上许多国家和有关国际组织都制定有关于额定电压等级的标准。我国所制定的电力网（用电设备）额定电压等级标准如下（均指线电压有效值，单位：kV）：0.38, 3, 6, 10, 35, 110, 220, (330), 500, 1000。

考虑到当线路、变压器传输电能时总会产生一定的阻抗电压降，因而电网中各部分的电压是不同的，其各部分的电压分布大致情况如图 1-4 所示（图中 U_N 为额定电压）。

一般情况下规定线路正常运行的电压降不超过 10%，而又要使用户处的电压波动一般不得超过其额定电压的 $\pm 5\%$ 。因此发电机的额定电压比同一电压等级电力网的额定电压高

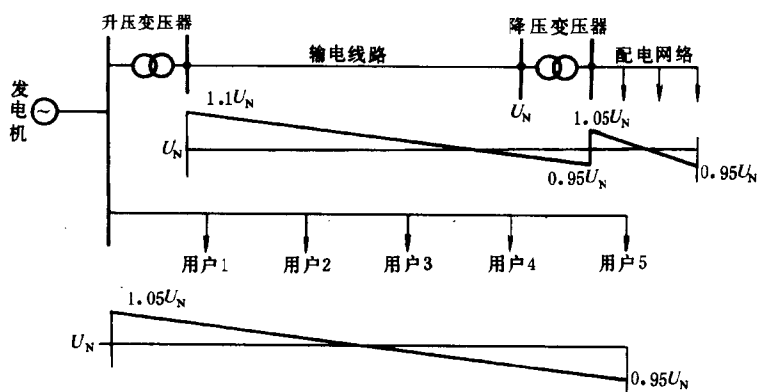


图 1-4 电力网各部分电压分布示意图

5%，而直接与发电机相连的升压变压器一次绕组的额定电压与发电机额定电压相同，接于电力网中（接于线路或变电所母线）的变压器一次绕组的额定电压等于同级电力网的额定电压。变压器二次绕组（相当于供电电源）的空载额定电压一般要比同级电力网的额定电压高出 10%，这样才能满足用户处的电压要求。其他电力设备的额定电压均应与所接电力网的额定电压相一致。

输配电线路电压等级的确定是关系到电力系统投资费用的高低、运行是否方便、设备制造是否经济合理的一个综合性问题，还与输送距离和传输容量的大小有直接关系。线路输送的三相视在功率 S 和线电压 U 、线电流 I 的关系是 $S = \sqrt{3}UI$ 。当输送的 S 一定时，输电电压 U 愈高，线路上的电流 I 就愈小，从而线路上的电压损耗和功率损耗就愈小，电力传输的距离就愈长。而且，线路上的电流小，所需导线载流部分的截面积就小，可以节省线路投资。同样，在相同的电流下，提高电压，就能提高输送功率，所以，一般说来传输功率愈大，输送距离愈远，则选用较高的电压等级较为有利。但是，电压愈高，对绝缘的要求就愈高，结果导致投资增加。综合考虑以上各方面的因素，对应于某一输送容量和输送距离，存在着一个较为经济合理的输电电压。表 1-1 列出了与几种额定电压等级相对应的输送功率和输送距离。

表 1-1 各电压等级下的输送功率和距离

额定电压 (kV)	输送功率 (MW)	输送距离 (km)	额定电压 (kV)	输送功率 (MW)	输送距离 (km)
6	0.1~1.2	4~15	220	100~500	100~300
10	0.2~2	6~20	330	200~1000	200~600
35	2~10	20~50	500	750~1800	400~1000
110	10~50	50~150	1000	1500~3700	1000~2000

通常把 330~750kV 的电压称为超高压，而把 750kV 及以上的电压称为特高压。我国于 1972 年在刘家峡建成第一条 330kV 超高压输电线路，1981 年第一条 500kV 超高压输电线路投入运行。至今 500kV 仍是我国电力系统的最高电压等级，500kV 交流输电线路已构

成我国电力网的骨干网络，至 1996 年底该电压等级的线路长度已近 14000km。葛洲坝到华东的第一条 ±500kV 超高压直接输电线路已于 1990 年投入运行。

第二节 电力系统的电能质量

电力系统的电能质量将直接影响到国民经济各个部门和人们的生活。

电力系统向用户供电的质量好坏，一般可以由以下三个指标表示：

- (1) 电压维持在额定值的程度，即电压质量标准。
- (2) 频率维持在额定值的程度，即电压频率标准。
- (3) 电力连续不断供应的程度，即供电可靠性指标。

另外，还要求电力系统的供电电压（或电流）的波形应为正弦波形。

一、电压质量标准

电压质量对各类电气设备（包括用电设备）的安全经济运行都有直接的影响。因为，电气设备都是按在额定电压条件下运行而设计制造的，当其端电压偏离额定电压时，电气设备的性能就要受到影响。就照明负荷来说，白炽灯对电压的变化是很敏感的。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，白炽灯的寿命将大为缩短。例如，电压比额定值低 10%，则光通量减少 30%；电压比额定值高 10%，则寿命缩减一半。

对电力负荷中大量使用的异步电动机（包括厂用电动机）而言，它的运行特性对电压的变化也是很敏感的。因为异步电动机的最大转矩与端电压的平方成正比，如果电压降低过多，电动机可能停转，或不能起动。且当输出功率一定时，异步电动机的定子电流、功率因素和效率随电压而变化。当端电压降低时，电磁转矩将显著减小，以致转差增大，从而使定子、转子电流都显著增大，导致电动机的温度上升，甚至烧坏电动机。反之，当电压过高时，对于电动机、变压器一类具有励磁铁心的电气设备而言，铁心磁密将增大以致饱和，从而励磁电流与铁耗都大大增加（这种状态称为过励磁），以致电机过热，效率降低，波形变坏，甚至可能产生高频谐振。电压过高还会使各类电气设备绝缘老化过程加快，设备寿命缩短。过电压情况下甚至危及设备运行安全。

对电热装置而言，这类设备的功率也与电压的平方成正比，显然，过高的电压将损伤设备，过低的电压则达不到所需要的温度。此外，电视、广播、传真、雷达等电子设备对电压质量的要求更高，电压过高或过低都将使特性严重改变而影响正常运行。例如，对于收音机和电视机，电压过高将损坏，电压过低影响灵敏度和收听（看）效果。

如上所述，不仅各种用电负荷的工作情况均与电压的变化有着极其密切的关系。而且，电压的过高、过低也给发电厂和电力系统本身造成很大的威胁。故在运行中必须规定电压的允许偏移范围，也就是电压的质量标准。目前世界上许多国家和我国所规定的电压允许偏移范围一般均为额定电压的 ±5%。一般用电设备的电压偏移保持在此规定范围内，不会对工作有任何影响。

由于电力网中总是存在电压损失，为了保证电压质量合乎标准，需要采取一定的调压措施，关于这方面的情况将在本章第三节中介绍。

二、频率质量标准

电力系统频率偏离额定值（我国技术标准规定为 50Hz）过大同样将严重影响电力用户的正常工作，对电动机而言，频率降低将使其转速降低，导致电动机功率的降低，将影响所带动的转动机械的出力，并影响电动机的寿命；反之，频率增高将使电动机的转速上升，增加功率消耗，特别是某些对转速要求较严格的工业部门（如纺织、造纸等），频率的偏差将大大影响产品质量，甚至产生废品。另外，频率偏差对发电厂本身将造成更为严重的影响。例如，对锅炉的给水泵和风机之类的离心式机械，当频率降低时其出力将急剧下降，从而迫使锅炉的出力大大减小，甚至紧急停炉，这样就势必进一步减少系统电源的出力，导致系统频率进一步下降。还有，在低频情况下运行时，容易引起汽轮机叶片的振动，缩短汽轮机叶片的寿命，严重时会使叶片断裂。因此，如果电力系统频率急剧下降的趋势不及时制止，势必造成恶性循环以致使整个系统发生崩溃。此外，系统频率的降低，使异步电动机和变压器励磁电流大为增加，引起系统所需无功功率的增加，其结果是引起电压的降低。频率的变化还将影响到电子钟的正确使用以及计算机、自动控制装置等电子设备的准确工作等。因此，频率的过高过低不仅给用户造成危害，而且对发电厂、电力系统本身也可能造成严重不良后果。所以，对频率变化的允许偏差范围规定更为严格，有的国家规定为不超过额定值的 $\pm (0.1 \sim 0.2)$ Hz。我国规定额定频率为 50Hz，其允许偏差为 $\pm (0.2 \sim 0.5)$ Hz。在并联运行的同一电力系统中，不论装机容量的大小、范围的广阔，任一瞬间的频率在全系统都是一致的。在稳定运行情况下，频率值决定于系统中所有发电机的转速，而机组的转速则主要决定于输出功率和输入功率的平衡情况。所以，要保证频率的偏差超过规定值，首先应当维持电源与负荷间有功功率的平衡，其次，还要采取一定的调频措施，即通过调节使有功功率恢复平衡来维持频率的偏差在上述规定范围之内。只要系统频率的变化在 $50 \pm (0.2 \sim 0.5)$ Hz 范围内，就不会有任何不利影响。

三、供电可靠性指标

电力连续不断的供应是电力用户的一个最基本要求。供电的突然中断将使生产停顿、生活混乱，甚至危及设备及人身安全。它给国民经济带来的损失大于电力系统本身的损失。因此，在电力系统运行中应采取必要的措施，保证持续供电。

停电按性质可分两类：计划停电和故障停电。

计划停电是指有计划安排的停电，可以事先通知用户。因为计划停电是有准备的停电，所以对用户造成的损失较小。故障停电是指由于发生故障造成对用户供电的突然中断。因为事先无法预告，因而给用户造成的损失比计划停电大得多。停电对用户的影响视该用户的用电目的、生活水平、社会环境等不同而不同。按美国的调查结果，用户的不快感受下列因素的影响：①停电频率；②停电规模；③停电持续时间；④停电发生时间；⑤停电发生季节；⑥停电原因。

造成停电事故的原因是多方面的，主要是设备质量差、自然灾害、继电保护误动作、人员过失、运行管理水平低等。因此，要减少停电事故须从以下几方面做出努力：①尽量提高设备自身可靠性，及时认真检修，防患于未然；②改进电力系统结构，尽量减少对用户的停电；③通过设置自动装置等措施，尽量防止事故扩大和尽快恢复供电；④加强培训，提

高运行人员的技术水平；⑤加强运行管理。

通过上述多方面的努力将事故停电次数降到最少，提高供电的可靠性。

可靠性是指一个元件、设备或系统在预定时间内，在规定条件下完成规定功能的能力。电力系统的功能是向用户尽可能可靠地、经济地供给合格的电能。因此，电力系统可靠性定义为向用户提供质量合格的、连续供电的能力。

由于构成电力系统的各种设备的可靠性特点不同，在进行电力系统可靠性评价时，常把整个系统分为三部分进行评价。即：①电源部分——电源可靠性；②送变电部分——送变电可靠性；③配电部分——配电可靠性。关于电力系统常用的可靠性指标，在此不作细述。

电能质量的好坏，不仅决定于系统中是否有充足的供电能力，能否充分实现功率平衡，还与调度管理是否完善、运行调整是否及时有关。因此，完善调度管理制度，提高电力系统综合自动化水平，加强运行人员责任心，并提高技术水平，对保证电力系统电能质量也是非常重要的。

第三节 电力系统的功率平衡

电力系统的功率平衡是指电力系统有功功率的平衡和无功功率的平衡。这种功率平衡也就是电力供需平衡，要求电力系统发送的功率与系统的负荷需要随时保持平衡。

电能的一个最大特点就是不能储存。这就决定了电力系统有区别于其他行业的特点：产、供、销必须同时完成。在任何时刻，电力系统的生产、输送、分配和消费在功率上必须严格保持平衡，否则电能质量就不能保证。供大于求，会造成频率、电压升高；供小于求，会造成频率、电压下降，更严重的还会导致电力系统的崩溃。因此，保持电力系统的功率平衡是其首要任务。在电力系统运行中，为了适应时刻变化着的负荷要求，一定要不断的进行功率调整，亦即频率和电压的调整，才能时刻保持功率平衡，保证电力系统运行的可靠性和电能质量。

一、电力系统有功功率平衡和频率调整

(一) 电力系统有功功率的平衡

1. 有功功率负荷的变动及其调整

电力系统的负荷（或简称负荷）时刻都在作不规则的变化，如图 1-5 所示。对实际负荷变化曲线分析表明：系统负荷可以看作是由三种具有不同变化规律的变动负荷所组成：第一种是变化幅度很小、变化周期短的负荷，负荷变动有很大的偶然性；第二种是变化幅度较大、变化周期较长的负荷，如电炉、压延机械、电力机车等负荷；第三种是变化缓慢的持续变动负荷，如由于生产、生活、气象等变化引起的负荷变动。实际上系统中的负荷无时无刻不在变动之中，是很不规则的， P_{Σ} 曲线则表示这种实际不规则的负荷变动，是上述三种负荷的变动规律的综合。

有功负荷的变化将引起频率的相应变化，电力系统的有功功率和频率调整大体上分一次、二次、三次调整三种。频率的一次调整（或称一次调频）指由发电机组的调速器进行

的,是对第一种负荷变动引起的频率偏移作调整。频率的二次调整(或称二次调频)指由发电机的调频器进行的,对第二种负荷变动引起的频率偏移作调整。频率的三次调整(或称三次调频)的名词不常用,实际上是指对第三种负荷变动引起的频率偏移作调整。这部分负荷将在有功功率平衡的基础上,按照最优化的原则在各发电厂之间进行经济分配。

在此主要从频率调整的角度讨论电力系统的有功功率调整问题。

2. 有功功率的平衡和备用容量

电力系统运行中,在任何时刻,所有发电厂发出的有功功率的总和 ΣP_G (也称发电负荷)都是与系统的总负荷 ΣP_L 相平衡的。而 ΣP_L 包括所有用户的有功负荷 ΣP_D ,所有发电厂厂用电有功负荷 ΣP_S 和网络的有功损耗 ΣP_C ,即:

$$\Sigma P_G = \Sigma P_L = \Sigma P_D + \Sigma P_S + \Sigma P_C \quad (1-1)$$

为保证可靠供电和良好的电能质量,电力系统的有功功率平衡应在额定运行参数下确定。而且,还应有一定的备用容量,也就是在系统最大负荷情况下,系统可用电源容量大于发电负荷的部分。系统的全部备用容量均以热备用和冷备用两种形式存在。热备用容量是指运转中的所有发电机组的最大可能出力大于系统当时发电负荷的余额部分,也叫旋转备用容量。冷备用容量是指系统中处于停机状态,但可以随时听候调度命令起动的发电机组的最大可能出力之和。在检修中的发电机不属于冷备用,因它们不能听命于调度,随时动用。

旋转备用容量的作用就是承担频率调整任务,及时抵偿由于随机事件引起的功率缺额。随机事件包括短时间的负荷波动、日负荷曲线(编制日发电计划时采用,并计及网损和厂用电)的预测误差以及个别发电机组因偶然性事故而退出运行等。所以旋转备用容量也就是系统的调频容量,这种热备用容量一般取系统最大有功负荷的8%~10%为宜。而冷备用容量可作为检修备用、国民经济备用(其值根据国民经济增长额而定)和一部分事故备用。

一般电力系统应设置的备用容量为其综合最大负荷的25%~30%。系统具备一定的备用容量才可能随时保证系统有功功率的平衡,随时调整系统的频率,保证电能质量。又可以满足有功功率在各电厂间或在各发电机组之间的合理分配,从而满足运行的经济性。

要实现电力系统的功率平衡,必须具备以下条件:①充足的供电能力,并留有一定的备用发电能力;②充足的发电调节能力,能够增加或减少发电机的出力,适应负荷峰值和低谷的变化;③充分的电力传输能力,保证所发电力能可靠地送到各处;④合理的配电网布局,保证每个用户都能得到充足和质量合格的电能;⑤有效的对用户负荷的监控手段。

要达到以上要求,必须从系统的规划设计、建设、到运行的各个环节共同努力。在实际电力系统中,电力供需平衡是通过下述方法实现的:

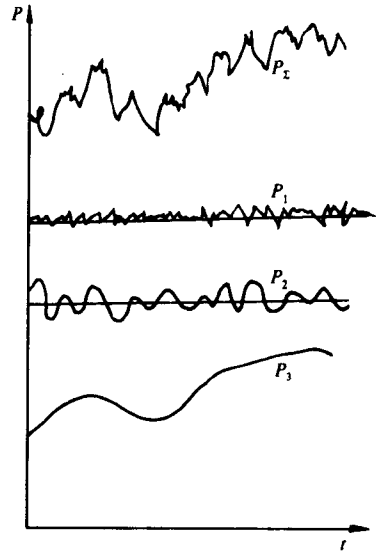


图 1-5 有功功率负荷的变化

P_1 —第一种负荷变动; P_2 —第二种负荷变动;
 P_3 —第三种负荷变动; P_Σ —实际综合的
 不规则负荷变动

(1) 运用规划方法, 实现发、输、配各环节的配套建设, 为电力供需平衡创造物质条件。电力系统是由发电系统、输变电系统和配电系统组成的。发电系统是电能的生产环节, 它将某种一次能源转换为电能。如果发电设备的建设跟不上负荷的增长, 则电力系统不可能提供充足的电力。这时就必然人为地限制用户用电; 如果调峰电源不足, 适应不了电力负荷的变化, 则会造成频率波动, 影响电能质量, 或在峰荷时人为拉闸限电; 如果系统中没有足够的备用容量, 则很难保持系统的安全运行, 也不可能实现经济调度。因此, 发电系统的建设直接影响到电力系统的供需平衡, 影响电能质量和系统安全可靠经济运行。输变电系统和配电系统是由输、配电线路和变、配电站组成的电力输送和分配的网络, 其功能是将发电系统发出的电力可靠地送到用电地区, 再分配给用户。它们与发电系统有机地配合, 共同完成向用户提供所需电能的任务。如果输、配电网的建设落后于负荷的增长, 或者网络结构不合理, 会出现有电送不出去的现象, 影响电力供需平衡。因此, 输、配电网的建设对电力系统运行也是至关重要的。

在现代电力系统的计划管理中, 应用了数学规划方法, 其基本思想是: 以电力系统负荷预测为依据, 在满足电力供需平衡和设备容量限制及可靠性等约束条件下, 确定经济上最优的网络结构、新增设备的容量、安装地点及投资时间。

(2) 运行中实行计划管理, 合理利用现存发输配电设备和一次能源。要根据各类电源的技术经济特性, 合理安排机组起停计划和各类机组的负荷, 合理安排机组检修和备用。具体还必须编制日发电计划, 针对负荷的日(一天 24h)变化规律, 作出各发电厂预测次日的发电负荷曲线(发电负荷对一天 24h 的变化规律曲线), 作为发电厂次日运行的依据。由于负荷变动中还有一种随机变化分量, 很难预测出来, 因此, 在实际运行中, 为了做到瞬时功率平衡, 需要随时进行发电机的出力调整。这种瞬时功率平衡的调整是由自动控制装置来完成的。

(二) 电力系统的频率调整

在正常情况下, 电力系统的频率是一个全系统一致的运行参数。对系统中每一台发电机而言, 其频率与转速都有如下的关系式:

$$f = \frac{pn}{60} \quad (1-2)$$

式中 p ——发电机的极对数;

n ——发电机组转速, r/min。

显然, 要求系统频率稳定, 也就是要求系统中所有发电机的转速都保持稳定。要保持系统中各发电机组的转速稳定不变, 就必须使发电机组的电功率(即所分担的发电负荷)和输入的原动机功率(汽轮机由进汽量决定, 水轮机是由进水量决定)相平衡。这种平衡只能是动态的平衡, 因为电力系统的负荷是时刻在变化的, 这里一台电动机开了, 那里一台电冰箱停了, 对系统来说都是无法预测的随机事件。因此, 保持这种动态平衡的唯一方法就是不断地调节发电机组的输入功率即不断地调节进汽量(汽门开度)或进水量(导水叶开度), 使发电机组的原动机功率紧紧跟踪系统负荷的变化而变化。简言之, 就是要使系统中各发电机组的实际出力能够随着系统负荷的变化而变化, 始终保持系统有功功率的供需

平衡。因此，频率调整的问题就是系统中所有发电厂有功出力的调整问题，但是这种调整也是被动跟踪的方式。由于汽门或导水叶开度的调整必然有机械惯性，无论如何也赶不上瞬息万变的电力负荷的变化，所以，让频率绝对不变化是不可能的，只能让其稳定在一个允许的较小范围内。

1. 电力系统有功功率—频率静态特性

当频率变化时，电力系统中有功负荷（包括用户取用的有功功率和网络中的有功功率损耗）也将发生变化，即有 $P_L = F(f)$ ，而且不同种类的负荷对频率变化的敏感程度不一样，当电力系统处于稳态运行时，系统中有功负荷随频率变化的特性称为负荷的有功功率—频率静态特性。

电力系统中各种有功负荷与频率的关系，可以归纳为以下几类：①与频率关系不大的负荷，如照明、电弧炉、电阻炉、整流负荷等；②与频率成正比的负荷，如切削机床、球磨机、往复式水泵、压缩机、卷扬机等；③与频率的二次方成比例的负荷，如变压器中的涡流损耗，但这种损耗在电网有功损耗中所占比重较小；④与频率的三次方成比例的负荷，如通风机、静水头阻力不大的循环水泵等；⑤与频率的更高次方成比例的负荷，如静水头阻力很大的水泵等。

电力系统综合负荷的有功功率与频率的关系，即负荷的功率—频率特性一般可表示为：

$$P_L = a_0 P_{LN} + a_1 P_{LN} \left(\frac{f}{f_N} \right) + a_2 P_{LN} \left(\frac{f}{f_N} \right)^2 + a_3 P_{LN} \left(\frac{f}{f_N} \right)^3 + \dots + a_n P_{LN} \left(\frac{f}{f_N} \right)^n \quad (1-3)$$

式中 P_L ——电力系统频率为 f 时，整个系统的有功负荷；
 P_{LN} ——电力系统频率为额定值 f_N 时整个系统的有功负荷；
 $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ ——上述各有功负荷与 P_{LN} 的百分数。

式 (1-3) 表明，当电力系统频率降低时，电力系统的有功负荷也降低。在一般情况下，式 (1-3) 的多项式写至三次项即可，因与频率更高次方成正比的有功负荷所占比重很小，故可以忽略。式 (1-3) 称为电力系统负荷的有功功率—频率静态特性方程。在电力系统运行中，允许频率变化范围是很小的。图 1-6 显示电力系统在较小的频率变化范围内，例如在 45~50Hz 范围内，有功负荷—频率静态特性曲线是一条直线，当频率略有下降时，负荷的有功功率成正比自动减小。图中直线的斜率为：

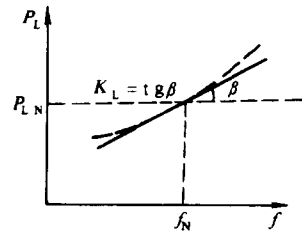


图 1-6 负荷的有功功率—频率静态特性曲线

$$K_L = \text{tg} \beta = \frac{\Delta P_L}{\Delta f} (\text{MW/Hz}) \quad (1-4)$$

或用标么值表示为：

$$K_{L*} = \frac{\Delta P_L / P_{LN}}{\Delta f / f_N} = \frac{\Delta P_{L*}}{\Delta f_*} \quad (1-5)$$

K_L, K_{L*} 表示电力系统有功负荷自动调节效应系数，当频率下降时，有功负荷也自动减小，这种效应将有助于系统频率的恢复，因为正是由于系统中有功功率供小于需才导致了频率