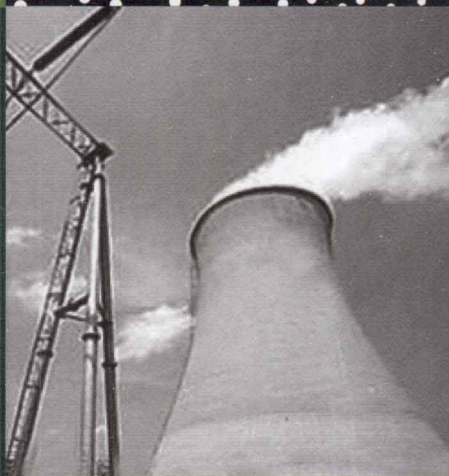


电厂实用技术
读·本·系·列



DIANQI
YUNXING JI SHIGU CHULI

电气 运行及事故处理

张进 杨余彪◎编



化学工业出版社



电厂实用技术
读·本·系·列

电 气 运行及事故处理

兴强 张进 杨余彪 © 编



化学工业出版社

· 北 京 ·

序

P R E F A C E

各类电厂作为我国能源产业重要的一环，肩负着向全社会工农业生产和人民生活提供电力等保障的重任，而火力发电厂目前仍是我国各电网中发电厂的最主要形式。随着我国经济发展对电力日益增长的需求，面临煤炭原料价格上涨的市场压力，加之安全生产、环保达标与节能降耗等标准的日趋严格，对电厂企业的各项管理提出了更为严苛的要求。企业管理的基础是构建先进的企业文化，打造一支科学严谨的管理队伍和一支高素质的员工队伍，就需引导全体员工认真学习，掌握电厂的科技知识与操作技能，成就一个学习型的企业，使电厂不仅“安、稳、长、满、优”地发电，还为提升经济效益做出贡献。

我们组织编写的这套《电厂实用技术读本系列》丛书主要面向火力发电厂生产一线员工，可以作为他们专业知识和现场运行技术学习的系列教材，同时也可以作为火力发电厂技术人员、管理人员以及在校大中专学生的学习教材。

丛书共分五册，分别为《锅炉运行及事故处理》、《汽轮机运行及事故处理》、《电气运行及事故处理》、《化学运行及事故处理》和《热工仪表及自动化控制系统》，各分册既自成一本读本，又相互配套成为一个完整系列。本丛书各分册从介绍电厂专业基本知识入手，重点对电厂常见设备运行基本操作知识和事故处理等方面内容进行阐述，为运行人员提供分析解决问题的基本理论与操作方法；本着理论适度够用、强化实践技能的原则，还纳入了现代发电厂的一些新设备、新技术的应用和先进的企业管理理念，具有实践性强、适用性广的特点，同时也为生产管理人员提升知识以帮助，并为相关自学人员提供参考，并可作为发电企业的培训教材之一。

本丛书在编写过程中得到了中国石化仪征化纤股份公司热电中心有关领导和工程技术人员的大力支持，在此表示感谢。

丛书编委会

前言

F O R E W O R D

本书是《电厂实用技术读本系列》丛书之一，是为发电厂电气运行人员及设备维修人员学习电气专业基础知识、掌握有关运行操作技能而编写的。书中介绍了火力发电厂电气运行的基础知识，发电厂电气一、二次系统常见设备的基本原理、构造特点、运行管理及事故处理方法，并结合最新电气技术发展动态介绍了一些新技术装备。全书分3章，共13节、48个主题小节。第1章电厂电气运行专业基础知识，内容包括发电厂电气系统的基础知识和电气运行操作及事故管理知识；第2章电厂电气一次设备的运行及事故处理，内容包括发电机、变压器、高低压配电装置和电动机设备的运行与事故处理，以及发电厂电气系统接线和电气过电压的有关运行知识；第3章电厂电气继电保护与自动装置，内容包括输电线路、发电机、变压器保护和电气自动装置、直流系统的构成原理与运行，以及继电保护基础知识。

本书紧密联系现场生产实际，考虑到不同层次人员的学习需求，内容上由浅入深，以浅显易懂为主，注重实用性。读者能结合不同火力发电厂的实际情况，了解有关电力专业知识，掌握现场运行操作与事故处理的方法，具备担任火力发电厂电气运行值班员的必要技能。

本书主要供发电厂电气运行人员、设备维修人员培训学习使用，也可以作为电气专业技术管理人员及大、中专院校学生的学习参考资料。

本书第1章的1.1和第3章由张进编写，第1章的1.2和第2章的2.4、2.5由杨余彪编写，第2章的2.1、2.2、2.3、2.6由谭兴强编写，全书由谭兴强审核并统稿。本书在编写过程中得到了中国石化仪征化纤股份公司热电中心有关领导和工程技术人员的大力支持，在此表示感谢。

限于编写时间仓促，书中难免有不妥之处，恳请读者批评指正。

编者

目 录

C O N T E N T S

第1章 电厂电气运行专业基础知识

1.1 电厂电气系统知识	2
1.1.1 发电厂与电力系统简介	2
1.1.2 电力系统频率与有功功率管理	6
1.1.3 电力系统电压与无功功率管理	11
1.1.4 电气短路分析	18
1.2 电气运行操作和事故处理	26
1.2.1 电气倒闸操作管理	26
1.2.2 电气事故处理原则与管理	32
1.2.3 电气运行操作典型事故案例分析	35

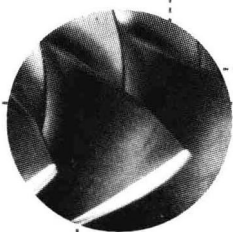
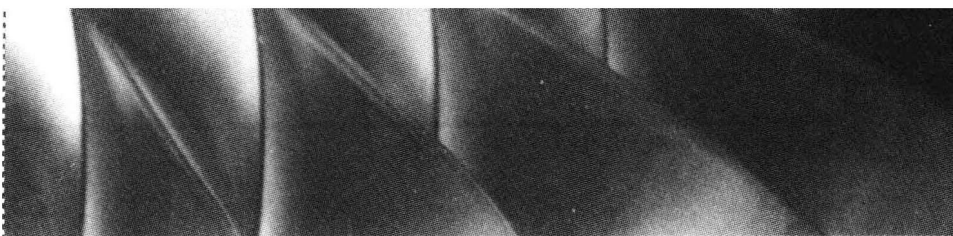
第2章 电厂电气一次设备的运行及事故处理

2.1 电气系统接线与运行	44
2.1.1 电厂电气主系统接线与运行	44
2.1.2 电厂电力系统中性点接地方式与运行	52
2.1.3 发电厂厂用电系统接线与运行	56
2.2 发电机运行及事故处理	61
2.2.1 同步发电机的运行原理	61
2.2.2 发电机的励磁系统	72
2.2.3 发电机的运行控制与管理	81
2.2.4 发电机的事故处理	91
2.3 变压器运行及事故处理	95
2.3.1 电力变压器的基本知识	95
2.3.2 电力变压器的运行管理	104
2.3.3 电力变压器的故障诊断与事故处理	115
2.4 配电装置的运行及事故处理	120
2.4.1 高压配电装置的选择与布置	120
2.4.2 高压开关设备的运行及事故处理	126
2.4.3 互感器和电抗器的运行及事故处理	142
2.4.4 母线和电缆的运行	150
2.4.5 电厂的低压配电装置	157
2.5 电动机的运行及事故处理	163

2.5.1	电动机的运行	163
2.5.2	交流异步电动机的调速	172
2.5.3	电动机的事故预防与处理	179
2.6	电厂电气过电压	182
2.6.1	电气过电压原理	182
2.6.2	避雷器运行	186
2.6.3	电气接地装置	190
2.6.4	电气过电压预防及事故案例分析	193

第3章 电厂电气继电保护与自动装置

3.1	继电保护基础知识	200
3.1.1	概述	200
3.1.2	电力电子技术	204
3.1.3	微机保护	209
3.2	输电线路保护	215
3.2.1	电流保护和方向性电流保护	215
3.2.2	距离保护	223
3.2.3	高频保护	234
3.3	发电机和变压器保护	242
3.3.1	发电机定子绕组保护	242
3.3.2	发电机励磁回路保护	250
3.3.3	变压器差动保护	253
3.3.4	变压器气体保护	259
3.3.5	变压器相间电流后备保护	261
3.3.6	变压器零序保护	265
3.4	电气自动装置	269
3.4.1	同期装置	269
3.4.2	备用电源自动投入装置	273
3.4.3	输电线路自动重合闸	278
3.5	发电厂的直流系统	286
3.5.1	直流系统设备及运行	286
3.5.2	直流系统故障处理与案例分析	295
参考文献		300



第 1 章

电厂电气运行专业 基础知识





1.1 电厂电气系统知识

1.1.1 发电厂与电力系统简介

1.1.1.1 电力系统与联合电力系统

把发电、变电、输电、配电和用电等各种电气设备连接在一起的一个整体，能够完成电能从生产、输送到分配、使用的全过程的设备系统称为电力系统。

在电力系统中，由不同电压等级的变电所和输配电线路构成的网络结构称为电力网络，简称电力网或电网。按电压的高低，电力网可分为低压网（1kV 以下）、中压网（1～35kV）、高压网（110～220kV）、超高压网（330～750kV）、特高压网（1000kV 及以上）。按接线方式，电力网还可分为一端电源供电网（又称为开式网）、两端电源供电网（又称为环网）、多端电源供电网（又称为复杂网）。

现代电力系统是由过去多个中小型电力系统逐渐并列联络而成，形成了高电压、大容量、远距离输电的联合电力系统，现代联合电力系统具有下列优越性。

① 提高电力系统供电的可靠性。电力系统中运行的设备都有发生故障的可能性，但系统中多个同类设备（如发电厂）同时发生事故的概率远较单一设备发生事故的概率小得多，组成联合电力系统后，可使系统供电可靠性得到提高。

② 减少系统备用容量的比重。电力系统的备用容量是为机组的事故停电及设备检修而又不中断对用户的供电而设置的，联合电力系统中各子系统的备用容量是可以互相通用的，这样系统容量越大，备用容量占总装机容量的百分比就越小，从而减少了系统投资。

③ 可更多采用高效率的大容量机组。联合电力系统的容量很大，某一机组的开停或者故障，对系统的影响相对较小，这样，就为大容量高效率机组的使用创造了条件，目前我国主要电力系统中 1000MW 火力发电机组已经大量投入运行。

④ 可减少总负荷的峰值。在联合电力系统中，由于不同地区用电负荷间的生产、生活及时差等条件的差异，通过合理调度，可降低电力系统的最大负荷，减少总的装机容量，使联合后的电力系统的最大负荷小于联合前各子系统最大负荷之和。

⑤ 可充分利用水电厂的水能资源等可再生能源。联合电力系统形成的跨地区特点，可以更好地合理调度水力发电、风能发电等可再生能源能力与火力发电之间的分配，减少煤耗量。同时，水电厂担负电力系统的调频任务时，进行负荷的增减也较为方便。

改革开放以来，我国电力工业获得了长足发展。目前，我国已形成了多个跨省电力系统，500kV 超高压电压等级线路也已成为这些大系统的骨架，750kV 超高压和 1000kV 特高压电网建设也已进入一个新的发展阶段。

1.1.1.2 电力系统运行特点和基本要求

电力系统作为电能生产、输送、分配和使用的一种特殊的系统，其运行管理具有以下特点。

① 电能不能大规模地储存。电能生产是一种能量形态的转换，电能的生产、输送、分

配和使用是同时进行的。所以要求电力系统应统一调度、保证整个系统各个环节的连贯性,使发电厂发出的电能在每一个时点都恰好等于用户所需汪洋大海般的电能和输送分配过程中的电能损耗之和。

② 电能的生产与国民经济及人民生活关系密切。当今社会电能的使用越来越广泛,这使得电力系统的安全稳定增长运行将成为社会关注的重点和热点,当电力系统发生严重故障时甚至会引发社会灾难。

③ 由于电是以光速传播的,电力系统中各元件的投、切和电能输送过程几乎都在一瞬间进行,即电力系统从一种运行方式过渡到另一种运行方式的过渡过程非常短暂。因此电力系统的运行要求具有较高的自动化程度,如大量配置继电保护、自动装置和实时监控等。

电力系统运行的根本任务是:最大限度地为用户提供安全、可靠、优质、廉价的电能。根据这个任务和电能生产的特点,对电力系统的基本要求如下。

① 最大限度地满足用户需求。电力系统要满足各行业及人民生活不断增长的用电需求,而且要求电力行业的发展要超前于其他行业的发展,才能为国民经济和社会生活的各个部门提供充足的电力。

② 保证供电的安全可靠。保障对用户的可靠供电是电力系统的首要任务,可靠的供电就是要求电能生产的安全与连续,防止供电中断造成社会生产停顿和生活混乱,危及人身和设备的安全。

③ 提供优质的电能。对一般用户主要是满足电能的频率和电压。随着以计算机技术为核心的高新技术装备在电力系统中的广泛应用,电能的波形、三相电压不平衡度等也成为衡量电能质量的重要指标。

④ 系统运行的经济性。任何经济活动都要讲求经济性,电力系统生产也不例外,电力系统运行中应考虑合理分配各发电厂间的负荷、降低发电厂燃料消耗和厂用电、降低电力网的电能损耗和管理成本,以最大限度地降低电力生产和运行成本。

1.1.1.3 发电厂的几种基本类型

发电厂是电力系统的最重要组成部分,按使用能源的种类划分有下述基本类型。

(1) 火力发电厂

火力发电是利用燃烧燃料(煤、石油及其制品、天然气等)所得到的热能进行发电的形式。火力发电的发电机组有两种主要形式:利用锅炉燃烧(以煤炭为主的)燃料产生高温高压蒸汽冲动汽轮机旋转并带动发电机发电,称为汽轮发电机组;(以天然气为主要品种的)燃料进入燃气轮机燃烧驱动燃气轮机旋转来带动发电机发电,称为燃气轮机发电机组。目前火力发电厂仍是以汽轮发电机组为主的发电厂。

为节约燃料运输费用,减轻运输压力,大型火电厂往往建设在煤炭等主要能源产地或交通运输比较方便的港口附近,再通过高电压远距离输电将电能送到电能用户相对集中的大城市、工业中心。

(2) 水力发电厂

水力发电是将高处的河水(或湖水、江水)通过导流引到下游形成落差推动水轮机旋转带动发电机发电,以水轮发电机组发电的发电厂称为水力发电厂。

水力发电厂按水库调节性能又可分为以下几种。

① 径流式水电站:无水库,基本上来多少水就发多少电的水电厂。

② 日调节式水电站:水库很小,水库的调节周期为一昼夜,将一昼夜天然径流通过水



库调节发电的水电厂。

③ 年调节式水电厂：对一年内各月的天然径流进行优化分配、调节，将丰水期多余的水量存入水库，保证枯水期放水发电的水电厂，我国的水电厂主要是这种类型的。

④ 多年调节式水电厂：将不均匀的多年天然来水量进行优化分配、调节，多年调节的水库容量较大，将丰水年的多余水量存入水库，补充枯水年份的水量不足，以保证电厂的可调出力，大型水库发电厂如三峡电站就具有这种特性。

(3) 核能发电厂

核能发电是利用原子反应堆中核燃料（例如铀）裂变（或聚变）所放出的热能加热产生蒸汽（代替了火力发电厂中的锅炉）驱动汽轮机再带动发电机旋转发电。以核能发电为主的发电厂称为核能发电厂，简称核电厂。根据核反应堆的类型，核电站可分为压水堆式、沸水堆式、气冷堆式、重水堆式、快中子增殖堆式等。核电厂需要远离大城市并靠近江、海边，我国的核能发电近年来发展很快，采用的工艺技术也在不断优化，但 2011 年日本福岛核电站出现的核辐射问题也给我们的核电安全敲响了警钟。

(4) 再生能源发电厂

再生能源发电厂主要有风力发电厂、地热发电厂、潮汐发电厂、太阳能发电厂等，这些类型的发电厂通常是根据特殊的地理位置和自然条件来建设的，如太阳能发电更多的是在建筑物上分散建设的小容量发电系统，而不是规模建设的太阳能发电厂。

风力发电厂是我国目前发展最为迅速的这一类电厂，它利用风力吹动建造在塔顶上的大型桨叶旋转带动发电机发电称为风力发电，由十数座、数十座甚至数百座风力发电机组成的发电场地称为风力发电场。我国主要建设在北方草原和东部沿海地区，其占地很大，所以通常称其为风力发电场。

1.1.1.4 电能质量与电力负荷

(1) 电能质量

电能是发电厂及电力系统的主要产品，应当有产品质量的一些指标制定标准。衡量电能质量是否满足标准的指标主要有频率、电压、波形、电压波动和闪变、三相电压不平衡度等项。

理论上理想的电能应当符合的标准是：频率和电压为额定值，波形为正弦波，无电压波动现象，不存在有闪变和三相电压不平衡的情况。然而，在电能生产、输送和使用的任何一个环节都会对电能质量产生影响，而对电能质量指标的控制也需要一定的投入，如电网结构的改进，有功功率和无功功率的平衡，各种调频、调压、滤波和无功补偿装置的使用以及调度和运行技术管理等，所以电能质量指标与额定的标准值之间的偏差是不可避免的。

(2) 电力负荷的分类

电力系统中电力负荷的类型不同，对供电的可靠性、连续性要求也不同。根据用户对供电可靠性的要求不同，目前我国将电力负荷分为一级、二级和三级负荷三类。

一级负荷是非常重要的负荷，属于这类负荷的包括有大型冶金、矿山、化工生产企业、医院、重要国家机关、国防、通信、新闻机构、铁路与城市交通等公共设施的用电负荷等，此类负荷发生供电中断时可能造成人身伤亡、环境污染、重要设备损坏、社会秩序混乱或造成社会、政治、军事的重大影响。因此对于一级负荷，必须由两个或两个以上的独立电源供电。

二级负荷是比较重要的负荷，对此类负荷的供电中断将造成工厂大量减产、城市中大量

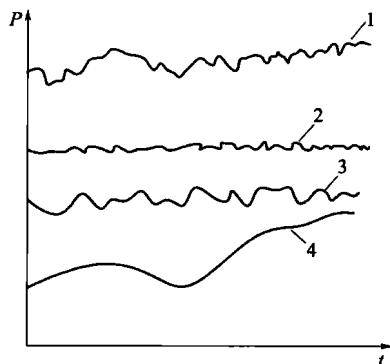
居民的正常生活受到影响等后果。这类负荷可由两路电源供电或专用线路供电。

三级负荷是不属于一级、二级负荷，受停电影响不大的其他负荷，如非连续生产的加工厂、次城镇和农村的一般性负荷等。这类负荷中断供电通常不会造成损失，对其供电不作特殊要求。

对用电负荷进行分类，其主要目的是为确定供电工程设计和建设标准，保证使建成投入运行的供电工程的供电可靠性能满足生产安全、社会安定的需要；也为正常电网调度提供依据，不同级别的负荷在某些时候也是变化的，如涉及抗旱时相应农村地区的用电就可能必须作为重要负荷来对待。

(3) 负荷曲线

电力负荷是随电力系统中用电设备的启动、停止及负荷的大小而变动，这种变动有很大的随机性，但也可以找出其显示出的某种程度的规律性：例如某些负荷随季节、企业工作制的不同发生的变动是有一定规律性的，这种变动可用负荷曲线来描述以帮助人们更好地了解其规律性。可以用图 1-1 来说明电力负荷的变动与其负荷曲线的变化情况：图中曲线 2 代表了电力负荷中的随机分量，这种负荷曲线的变化频率快、周期短、幅度很小，是由无法预测的小负荷经常性变化引起的；图中曲线 3 代表了电力负荷中的脉动分量，这种负荷曲线的变化频率较慢、周期较长（变化周期一般在 10s 以上到 30min 以内）、幅度较大，是由于一些冲击性、间歇性负荷的变动引起的；图中曲线 4 代表了电力负荷中的持续分量，这种负荷曲线的变化非常缓慢、幅度很大，是由季节变化与气候条件、工厂作息时间与人的生活规律等因素所引起的，这种负荷是可以预计的；曲线 1 是曲线 2、曲线 3 和曲线 4 的总和，是实际综合电力负荷的实时变化曲线。



■ 图 1-1 各类电力负荷变动曲线示意图

所谓负荷曲线就是指在某一段时间内用电设备有功、无功负荷随时间变化的图形，分别构成有功负荷曲线（ P ）和无功负荷曲线（ Q ），常用的是有功负荷曲线。负荷曲线可分为日负荷曲线、年最大负荷曲线、年持续负荷曲线等类型。

在分析负荷曲线时通常会使用以下几个指标参数。

① 年最大负荷 $P_{\max}$ ，是全年中负荷最大的工作班内消耗电能最大的半小时的平均功率，为防止偶然性，这个最大负荷不是偶然只出现一次的最大值，而是在全年最大负荷月份中至少出现两三次以上的负荷，也称为半小时最大负荷 P_{30} 。

② 平均负荷 P_{av} ，是指电力负荷在一定时间 t 内平均消耗的功率。

③ 负荷系数 K_L ，是平均负荷 P_{av} 与最大负荷 $P_{\max}$ 的比值，即 $K_L = \frac{P_{\text{av}}}{P_{\max}}$ ，也称为负荷率。对负荷曲线来说，负荷系数又称为负荷曲线填充系数，它表征负荷曲线的不平坦程度，所谓“削峰填谷”就是利用该曲线所进行的工作。一般工业用电 K_L 为 0.7~0.75 左右。

④ 年最大负荷利用小时 $T_{\max}$ ，这是一个假想的时间——在这个时间内，电力负荷按年最大负荷 $P_{\max}$ 持续运行所消耗的电能，恰好等于该电力负荷全年实际消耗的电能。即用户全年所耗用的电能与一年内的最大负荷相比所得到的时间称为年最大负荷利用小时，用数学式表示为 $T_{\max} = \frac{W_c}{P_{\max}}$ 。它是表征电力负荷特征的一个重要参数，反映了实际负荷在一年内



变化的程度：如果负荷曲线比较平坦，即负荷随时间的变化较小，则 $T_{\max}$ 的值较大；如果负荷变化比较明显，即负荷随时间的变化较大，则 $T_{\max}$ 的值就小。

负荷曲线对电力系统和发电厂的生产调度管理及运行控制有关重要意义。对发电厂而言，它是现场负荷控制、安排发电计划、确定运行方式和组织发电机组等设备检修工作以及编制发电厂扩建新建规划的重要依据。

1.1.2 电力系统频率与有功功率管理

1.1.2.1 频率与负荷频率特性

(1) 频率

电力系统的频率是指电力系统中同步发电机产生的交流正弦波基波电压的频率。它是电力系统运行参数中最重要的参数之一。在稳态条件下所有发电机同步运行，整个电力系统的频率是相同的。

我国电力系统的额定频率统一为 50Hz，频率允许偏差过去的标准为 $\pm 0.2\text{Hz}$ ，甚至当系统容量较小时，偏差值可以放宽到 $\pm 0.5\text{Hz}$ ；频率合格率是指实际运行频率在允许偏差范围内累计运行时间与对应总的统计时间之比的百分比。现代电力系统的频率允许偏差标准和合格率标准趋于更严格，通常由各个联合电力系统根据自己的情况作出具体规定。

在分析电力系统频率和有功功率控制管理时，常将电力系统内并联运行的所有机组用一台等效机组代替，将电力系统内所有负荷用一个等效负荷代替，然后进行分析和计算。

(2) 负荷随频率变化的分类

电力系统频率变化时，系统负荷耗用的有功功率也将随之有微小改变，这种有功负荷随频率变化的特性称为负荷的静态频率特性，所谓“静态”系指这种关系是系统处于静态下确定的。不同负荷种类在频率变化时的微小变化关系也是不同的，根据负荷随频率变化关系可以将有功负荷分成以下几类。

① 与频率变化无关的负荷。这类负荷从电网中耗用的有功功率与频率无关，如照明、电热器、电弧炉、整流负荷等。

② 与频率的一次方成正比的负荷。这类负荷的阻力矩 M 等于常数，如金属切削机床、卷扬机、球磨机、压缩机等，其从电网吸收的有功功率与频率的一次方成正比。

③ 耗用的有功功率与频率的二次方成正比的负荷，如变压器中的涡流损耗。

④ 与频率的三次以上高次方成正比的负荷。这类用电设备从电网中耗用的有功功率 P 与系统频率 f 的高次方成正比例。如火电厂的厂用辅机多属于此类，如锅炉风机、给水泵、循环水泵等。

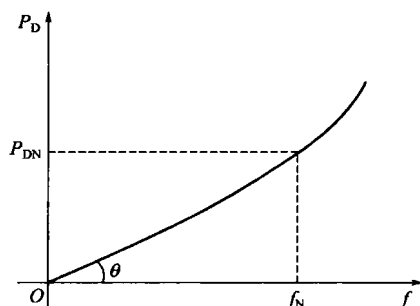
(3) 电力系统综合负荷的静态特性曲线

电力系统综合负荷的频率静态特性曲线近似为一条直线，如图 1-2 所示。从图中可以看出，在额定频率 f_N 时，系统负荷耗用的功率为 P_{DN} ，当系统频率下降时负荷耗用的有功功率将降低，频率升高时负荷耗用的有功功率将增加。有功负荷的这种静态频率特性表明：电力系统有功功率失去平衡引起系统频率变化时，系统综合负荷将参与对频率的调整，当实际负荷增加时，系统频率会下降。但与此同时，负荷实际耗用的功率也因频率的下降而有所减小，这有利于发电机的调频，这种现象称为电力系统负荷的频率调节效应，简称负荷调节效应。

图 1-2 中曲线的斜率就是负荷的频率自动调节效应系数 K ，可表示为

$$K = \tan\theta = \frac{\Delta P}{\Delta f} \quad (1-1)$$

K 的数值取决于整个电力系统中各类负荷的比重，是电力系统调度部门要掌握的一个数据，它是考虑按频率减负荷方案和低频率事故时用一次切除负荷来恢复频率的计算依据。

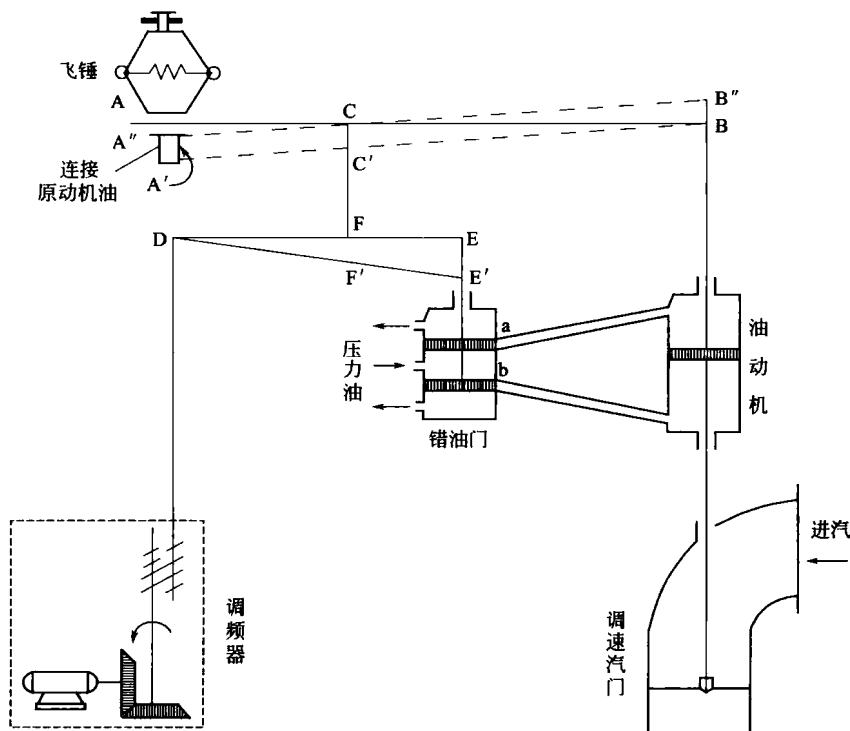


■ 图 1-2 电力系统综合负荷的静态特性曲线

1.1.2.2 发电机组的功率频率特性

电力系统中发电机的原动机均装设自动调速装置，当系统有功功率平衡被破坏引起频率变化时，原动机的调速系统会自动改变原动机的功率输入（如进汽量），从而相应地增加或减少发电机的出力并建立起新的功率平衡关系。

原动机的调速系统有很多种，下面以传统的离心式液压调速系统为例来简要介绍发电机组的频率特性，即发电机调速系统在电力系统频率变化时实现自动调节的工作原理。图 1-3 为离心式液压调速系统示意图。



■ 图 1-3 离心式液压调速系统示意图

当飞锤等系统在原动机轴的带动下以额定转速旋转时，飞锤的离心力与弹簧的拉力相平衡，杠杆 ACB 在水平位置，错油门管口 a 、 b 被活塞堵住，压力油不能经过错油门进入油动机，油动机活塞不动，调节汽门的开度保持不变，汽轮机进汽量也不变，发电机发出原有的功率不变。当系统负荷变化引起了频率偏移时，发电机组上的调速系统将调整原动机的输入功率，以系统负荷增加引起系统频率下降为例（即使是微小的下降）来说明调速系统的动作



过程。

系统频率下降时，发电机与原动机转速下降，飞锤因离心力减小，在弹簧力作用下回缩并整体下落（从 A 位置到 A' 位置）。由于油动机活塞两边油压相等，B 点不动，杠杆以 B 点为中心转动到 A'C'B 的位置。在调频器不动作的情况下，杠杆 DFE 以 D 点为中心转动到 DF'E' 的位置。E 点移动到 E' 位置后，错油门活塞下移，开启油门 b，带有压力的油经过错油门进入油动机活塞下部。在油压的作用下，油动机活塞上移，开大调速汽门的开度，使进入原动机的汽量增加，使得原动机输入功率增加，发电机输出有功功率增加，发电机与原动机转速增加。油动机活塞上升开大调速汽门开度的同时，使 B 点移动到 B''，由于汽轮机转速有了增加，飞锤离心力增大，使 A' 移动到 A''，杠杆 A'C'B 移动到 A''CB'' 的位置。杠杆 DF'E' 又回到原来的 DFE 位置，关闭错油门 b，停止压力油继续进入油动机的下部，油动机活塞的上下两侧油压又归于相互平衡，并在一个新的位置暂时稳定下来，调速过程暂告一段落。这时杠杆 AB 的 B 端由于汽门已开大而略有上升到达 B'' 点的位置，而 C 仍然保持原来的位置，A 点则略有下降，到达 A'' 点的位置，与这个位置相对应的转速，将略低于原来的数值。

这种因系统负荷变化引起频率和发电机转速的变化，继而通过发电机组调速系统动作达到自动调节系统频率的过程，称为频率的一次调整，发电机的这种特性称为调速装置的有差特性。反映调整过程结束后发电机输出功率和频率的关系称为发电机组的功率频率静态特性，这种特性可以用图 1-4 中曲线 1（或 2 或 3）来表示。

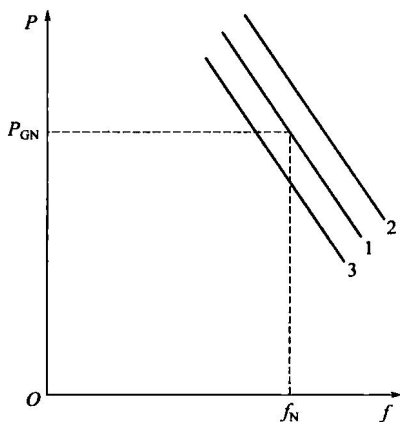
图 1-4 中曲线的斜率 $k_f = -\frac{\Delta P}{\Delta f}$ 就是发电机组的功率频率静态特性系数，式中的负号表示发电机组输出有功功率的变化与频率的变化方向相反。现场常用调差系数 $\sigma\%$ 来描述一次调频时发电机组的频率特性，它是斜率 k_f 标么值 k_{f*} 的倒数百分比，其关系用式(1-2)来表示：

$$k_{f*} = \frac{1}{\sigma\%} \times 100 \quad (1-2)$$

调差系数 $\sigma\%$ 或 k_{f*} 是一个可以整定的机组特性参数，汽轮发电机组一般为： $\sigma\% = 3 \sim 5$ 或 $k_{f*} = 33.3 \sim 20$ 。

为使系统负荷变化后发电机组仍能维持原始转速，即使得频率恢复到原来的值，这就要求有频率的二次调整，这种频率的二次调整称为二次调频，它是通过调节发电机组的调频器系统来完成的。仍以前面所举系统负荷增加发电机组完成一次调频后的过程来介绍，在图 1-3 中：值班人员主动调节调频器，发出增加负荷的指令，通过涡轮、涡轮传动将 D 点抬高，再一次开启错油门 b 使调速汽门的开度再增大，进一步增加进汽量，机组转速上升，离心飞锤使杠杆由 A'' 点向恢复上升到 A 点；在油动机活塞向上移动的同时，杠杆 AB 又是绕 A 逆时针转动的，带动了 C、F、E 点向上移动，再次堵塞错油门小孔，结束调节过程。这里，适当选择 D 点位移，A 点就有可能回到原来的位置，从而使频率恢复为原值，在需要控制频率达到某一定值时也可以通过这种调整实现。

频率的二次调整使机组的静态频率特性曲线左右平移，即图 1-4 中曲线 1 平移得到曲线



■ 图 1-4 发电机组的功率
频率静态特性

2 或曲线 3, 原动机的运行特性不断地从一条曲线过渡到另一条曲线。

1.1.2.3 电力系统有功功率平衡与调频

(1) 电力系统有功功率平衡

电力系统有功功率平衡可表示为

$$\sum P_G = \sum P + \sum P_c + \sum \Delta P \quad (1-3)$$

式中 $\sum P_G$ ——系统各发电厂发出的有功功率总和 (工作容量);

$\sum P$ ——系统综合有功负荷;

$\sum P_c$ ——电力网各元件有功损耗总和;

$\sum \Delta P$ ——各发电厂厂用电有功功率总和。

在实际电力系统中, 负荷随时在变化, 必须靠调节发电机发出的功率以适应负荷功率的变化。

(2) 电力系统备用容量

在电力系统规划和运行时, 为了保证电力系统对用户负荷的可靠供电和合格的电能质量, 系统电源容量应大于包括网络损耗和厂用电在内的即时系统发电负荷。系统电源容量大于系统发电负荷的部分称为系统的备用容量。

电力系统的备用容量按其运行方式可以分为热备用和冷备用, 也可以分为负荷备用、事故备用、检修备用和国民经济备用。

所谓热备用是指运转中的发电设备可能发的最大功率与系统发电负荷之差, 也称运转备用或旋转备用。冷备用指未运转的发电设备可能发的最大功率。检修中的发电设备由于不能由调度随时动用, 不属于冷备用。

发电设备从冷状态至投入系统、再到发出额定功率所需一定时间, 短如水电厂需要数分钟到数十分钟, 长如火电厂则需要几小时到十几小时。这一时间对保证用户负荷可靠供电和电能质量而言显然过长。所以从保证供电可靠和合格的电能质量来看, 热备用越多越好, 但从保证系统运行的经济性考虑, 热备用又不宜过多, 应综合考虑。

负荷备用又称为调频备用, 是为了适应短时间内的负荷波动以稳定系统频率, 并担负一天内计划外增加而设置的备用。系统的负荷备用必须是旋转备用, 即相应机组连接于系统但不满载运行。负荷备用容量的大小应该根据系统负荷的大小、运行经验以及系统中各类用户的比重来确定, 一般取为系统最大发电负荷的 2%~5%, 大系统采用小的百分数, 小系统采用大的百分数。负荷备用首先由应变能力强的有调节库容的水电厂承担。

事故备用是为了电力系统中发电设备故障时, 保证系统重要负荷供电所设置的备用容量。在规划设计中, 事故备用容量的大小应根据系统容量、发电机数量、单位机组容量、机组的事故概率、系统的可靠性指标等因素确定, 一般取系统最大发电负荷的 5%~10% 左右, 并且不小于系统中一台最大机组的容量。事故备用可以是停机备用, 事故发生时, 启动停机备用的机组需要一定的时间, 由于汽轮发电机组从启动到满载需要数小时以上, 而水轮发电机组需要时间较短, 因此, 一般以水轮发电机组作为事故备用机组。

检修备用容量是指系统中的发电设备为定期的计划检修等而设置的备用容量, 一般应结合系统负荷特性、发电机数量、设备新旧程度、检修时间的长短等因素确定, 以满足可以周期性地检修所有机组、设备的要求。从经济上考虑, 为尽量减少专门设置的检修备用容量, 可将发电设备的大、小修分别安排在系统季节性负荷低谷期和节假日进行。只有空出容量不足又要保证全部机组周期性检修的需要时, 才需要设置检修备用容量。



除满足当前负荷的需要设置上述几种备用外,为满足工农业生产的超计划增长对电力的需求而设计的备用容量,这种备用称为国民经济备用。

(3) 主调频厂与辅助调频厂

电力系统调频的实质就是维持系统有功功率的平衡,保持系统频率的稳定和在允许范围内运行。

当系统负荷变化时,有可调容量的机组均应参与频率的一次调整,而频率的二次调整则只能是由较少的发电厂作为调频厂来承担,即二次调频是在调频厂进行的。根据各个发电厂在系统频率调整过程中的作用不同,可将发电厂分为主调频电厂、辅助调频电厂和基载厂。主调频电厂承担系统的负荷备用,负责保持系统频率在额定频率的允许偏移范围内,一个系统理论上只设一个。辅助调频厂在系统频率超过某规定的范围时才参加系统频率调整工作,一个系统中会设置若干发电厂作为辅助调频厂。基载厂按照系统调度控制中心预先下达的负荷曲线运行,而不参加频率二次调整,系统中大多数电厂为基载厂。

主调频电厂应满足下列条件:

- ① 具有足够的调频容量和可调范围;
- ② 能比较迅速地调整出力,允许的出力调整速度应能满足系统负荷变化速度的要求;
- ③ 调整出力时应符合安全及经济原则;
- ④ 联络线上交换功率的变化不致影响系统的安全运行。

根据上述条件,在以水力发电和火力发电为主、各类发电厂并存的现代电力系统中,一般应选择大容量有调节库容的水电厂作为主调频电厂,其他有调节库容的水电厂可以作为辅助调频电厂,大型火电厂中效率较低的机组也可作为辅助调频电厂。

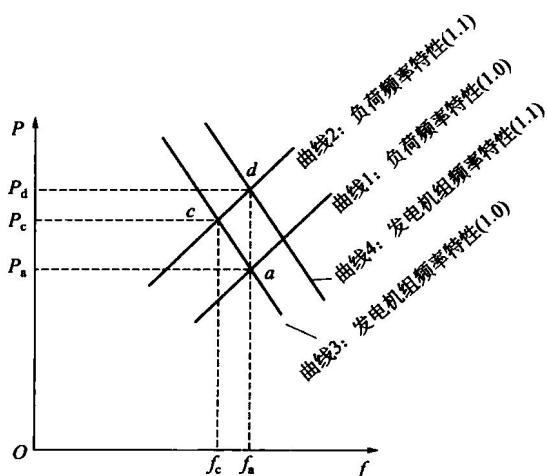
在没有水电厂的电力系统中,可以装设特制的带尖峰负荷的汽轮发电机组,这种机组结构简单,启停快,通流部分间隙大,能适应较大的温度变化。

(4) 电力系统的频率调整过程

在图 1-1 中,电力系统中的综合负荷曲线分解为的三种不同的分量负荷曲线:随机分量负荷由系统中发电机组的一次调频来解决;脉动分量负荷通过发电机组的二次调频来解决,二次调频首先是在主调频电厂中完成,当频率变化较大时,辅助调频厂便参与调频;持续分量负荷由于其变化规律可根据运行经验进行预测,系统调度可事先安排好各电厂次日每小时的发电负荷曲线,这种主动安排发电出力来调整系统频率的过程称为系统频率的三次调整。

用发电机组有功功率频率静态特性曲线和系统综合负荷频率静态特性曲线来说明系统频率的调整过程,如图 1-5 所示。

设系统起始运行于 a 点,此时综合负荷容量(包括损耗)的标么值为 1.0,即负荷频率特性曲线 1,根据系统平衡原则,发电机也运行于标么值为 1.0 的功率频率特性曲线 3,此两的交点即 a 点,频率等于 f_a 。当综合负荷容量的标么值增加到 1.1,此时负荷频率特性为曲线 2,在发电机未调整时,系统频率下降引起发电机组一次调频作用,发电机发



■ 图 1-5 系统频率的一、二次调整

出的功率将沿频率特性向上增加，同时负荷耗用功率也将因其本身频率特性调节效应而向下减少。经过一个衰减的振荡过程，抵达一个新的平衡点 c ，即曲线 2 和曲线 3 的交点。

在图 1-5 中，系统的一次调频可以使系统频率运行于一个新的平衡点，但不能使频率恢复到原来的值，此时的系统频率 $f_c < f_a$ 。当需要进一步控制系统频率波动范围或恢复系统原运行频率时，则需要进行二次调频，即主调频电厂的值班人员通过调频器来调整发电机功率频率特性，使其由曲线 3 右移到曲线 4（对应标么值为 1.1），这时发电机组出力增加到 P_d ，系统频率恢复到 f_a ，这个调节过程称为频率的二次调整。

如果电力系统发生较大的电源事故，引起系统有功功率的严重不平衡，导致系统频率大幅度下降时，应迅速投入负荷备用等并通过低频率减负荷装置等来恢复系统有功平衡，防止频率的进一步下降。如果事故非常严重，在采取了上述措施后，频率仍然大幅度地下降，系统调度人员应迅速启动备用发电机组、切除部分负荷甚至将系统解列成多个小系统等来抑制主要系统频率下降，避免发生频率崩溃。

1.1.3 电力系统电压与无功功率管理

1.1.3.1 电压与负荷电压特性

电压是衡量电能质量的重要指标。电压质量对电力系统的安全与经济运行、对保证用户安全生产和产品质量以及电气设备的安全与寿命都有至关重要的影响。电力系统的无功平衡是保证电压质量的基本条件。

(1) 电压偏移的影响

各种用电设备都规定有额定工作电压，且在额定电压下运行时能在经济技术综合指标上取得最佳的效果，即用电设备最理想的工作电压是它的额定电压。若电压偏移过大，则会对用电设备的经济和安全运行造成不利影响。如异步电动机，当端电压变化时，异步电动机的转矩、电流和效率都要变化。电动机的转矩与端电压的平方成正比，若端电压下降 10%，则转矩就要降低 19%；若电压过低，则异步电动机的转速将降低，电流增大，引起异步电动机绕组温度升高，加速绝缘老化，严重时还会烧毁异步电动机。另一方面，若电压过低，则可能会因转矩太小而造成停转或不能启动。

电压偏移过大不但对用电设备的运行和安全不利，而且对电力系统本身的安全和经济运行也不利。电压降低时，发电厂中由异步电动机拖动的厂用机械（如风机、水泵等）出力将减少，影响到锅炉、汽轮机的出力，并使其效率降低。当电压过低时，将使发电机、变压器、线路过负荷，严重时还会降低系统并列运行的稳定性甚至引起设备跳闸。

(2) 电力系统综合负荷的电压静态特性

系统电压变动时，用电设备实际吸收的有功功率和无功功率都是变化的，无功功率受电压的影响更大。电力系统综合负荷的电压静态特性是指系统频率等于额定值且符合连接容量不变时，系统综合无功功率与电压的关系曲线。电力系统中不同负荷的电压静态特性是不同的，由于白炽灯等负荷通常视为不消耗无功功率，在电力系统中，异步电动机占综合负荷的绝大多数，因此，系统综合负荷的电压静态特性曲线近似于异步电动机的电压静态特性曲线。

异步电动机在消耗有功功率来驱动机械的同时，也需要耗用感性无功功率来建立磁场，异步电动机用于励磁而吸收的无功功率与电压的平方成正比，当端电压接近额定电压时，异