高 等 学 校 教 材

电力系统自动化

商国才　编著

天 津 大 学 出 版 社

内 容 提 要

本书系统地介绍了电力系统自动化的主要内容，包括电力系统调度自动化、电力系统频率和有功功率自动控制、电力系统电压和无功功率自动控制、电力系统安全控制、同期并列和低频自动减负荷、变电站自动化、配电网自动化、火电厂自动化、水电厂自动化、微机调速器、微机励磁调节器和微机自动同期装置。

本书可作为高等学校电力系统“继电保护与自动远动技术”专业的专业课教材，也可以作为“电力系统及其自动化”和其它相关专业日校、函授和职业培训的教材，并可供从事电力系统运行、设计和科研工作的工程技术人员参考。

前　言

电力系统结构复杂、运行方式多变并分布在辽阔的地理区域。目前，世界上已经出现了总装机容量达几亿千瓦、供电距离达几千公里的大型电力系统。电力系统的自动化系统是为了保证电力系统安全、优质、经济运行和向用户提供可靠、合格、廉价电能的许多辅助系统的总称。没有电力系统自动化的参与，现代电力系统是无法运行的.

电力系统自动化是一门综合性技术，它涉及电力系统运行理论、自动控制理论、计算机技术、通信技术等许多方面的知识。电力系统自动化的内容十分丰富，可分为电力系统调度自动化、火电厂自动化、水电厂自动化、变电站自动化和配电网自动化；还可分为电力系统频率和有功功率自动控制、电压和无功功率自动控制、安全控制和电力系统中的断路器控制。本书系统地介绍了电力系统自动化的主要内容。

在编写本书时注意了内容的先进性。书中较全面地介绍了计算机技术在电力系统自动化领域的应用。这些内容分布在调度计算系统及人机联系设备、火电厂自动化和水电厂自动化、数字电液调节器、同步发电机微机励磁系统、微机自动同期装置、变电站综合自动化和配电网综合自动化等章节里。它们既可和原章节的内容融为一体，也可以抽出来和本书中一些其它内容组合成相对独立的部分。例如，第三章第二、五、六节可以组合成发电机组微机调速系统；第四章第三、四、八、六节可以组合成发电机微机励磁调节系统；第六章第一、二、四节可以组合成微机同期并列。将上述三部分组合到一起可以作为发电厂微机自动控制装置方面的教材。

目前，高校的办学层次多（日校本科、专科，函授本科、专科，在职培训等）、教学计划多变（专业合并、加强基础课、减少专业课计划学时等）。因此，在编写本书时尽量使各章节内容既完整又独立。这样，对于不同的教学层次和教学计划学时，选取其中有关章节的内容进行适当组合就可以满足要求。例如，选取第一章（第二节的内容适当精简），第二章第一～第四节（第二节的内容适当精简），第三章第一、二、四（或三、五）、六、七、九节，第四章第一～第七节和第五章，可以作为“电力系统自动化导论”性质的教材。又例如，选取第一章（第二节内容适当精简），第二章第一～第四节，第四章第一、二节和第七章，可以作为城市供电专业的电力系统自动化教材，等等。

本书对所讲述的问题及所涉及的公式，尽量做到问题叙述完整、公式推导清楚，以便于自学，使那些没有机会进入课堂听讲的学员也能看懂。

本书作为电力系统“继电保护与自动远动技术”专业的专业教材，内容包括全国高校电力工程类专业教学指导委员会 1994 年 4 月制订的电力系统自动化课程教学基本要求的全部内容，也包括了上述教学指导委员会 1994 年 4 月制订的电力系统自动控制技术课程基本要求的全部内容。本书除了作为“继电保护与自动远动技术”专业的教材之外，还可以作为“电力系统及其自动化”和其它相关专业日校、函授和在职培训的电力系统自动化教材。本书也可供从事电力系统运行、维护、设计和科研工作的工程技术人员参考。

限于作者水平，书中难免存在缺点和错误，诚恳希望读者批评指正。

作者

1998 年 9 月

于华北电力大学

目　录

第一章　概论 …… (1)
第一节　电力系统自动化的重要性及其发展历程 …… (1)
第二节　电力系统自动化的内容 …… (6)
第三节　电力系统的运行状态及调度控制 …… (21)
第二章　电力系统调度自动化 …… (24)
第一节　电力系统调度自动化是如何实现的 …… (24)
第二节　远动和信息传输设备的配置与功能 …… (32)
第三节　调度计算机系统及人机联系设备 …… (46)
第四节　电力系统的分层调度控制 …… (55)
第五节　电力系统状态估计 …… (57)
第三章　电力系统频率和有功功率自动控制 …… (67)
第一节　电力系统频率和有功功率控制的必要性 …… (67)
第二节　发电机组调速控制的基本原理 …… (68)
第三节　机械液压调速器的基本原理 …… (72)
第四节　模拟电气液压调速器 …… (76)
第五节　数字电液调速器 …… (82)
第六节　同步发电机组调速系统的数学模型 …… (95)
第七节　电力系统频率和有功功率自动控制的基本原理 …… (102)
第八节　联合电力系统的频率和有功功率控制 …… (112)
第九节　电力系统自动调频方法和自动发电控制 …… (118)
第十节　电力系统经济调度 …… (122)
第四章　电力系统电压和无功功率自动控制 …… (124)
第一节　电力系统电压和无功功率控制的必要性 …… (124)
第二节　电力系统电压和无功功率控制 …… (126)
第三节　同步发电机励磁控制系统的主要任务和对它的基本要求 …… (133)
第四节　同步发电机的励磁自动控制系统 …… (142)
第五节　比例式励磁自动控制的基本原理 …… (150)
第六节　同步发电机励磁控制系统的静态特性 …… (165)
第七节　同步发电机励磁控制系统的动态特性 …… (170)
第八节　同步发电机微机励磁系统 …… (190)
第五章　电力系统的安全控制 …… (203)

第一节　概述 …… (203)
第二节　电力系统运行状态的安全分析 …… (206)
第三节　电力系统正常运行时的安全控制 …… (221)
第四节　电力系统紧急状态的控制 …… (222)
第五节　电力系统恢复状态的控制 …… (229)
第六章　电力系统中断路器的控制 …… (231)
第一节　电力系统并列概述 …… (231)
第二节　自动准同期并列的基本原理 …… (236)
第三节　模拟式自动准同期装置 …… (241)
第四节　微机自动同期装置 …… (254)
第五节　自动低频减负荷 …… (257)
第七章　变电站和配电网自动化 …… (267)
第一节　变电站自动化 …… (267)
第二节　变电站综合自动化 …… (270)
第三节　配电网的构成 …… (275)
第四节　配电网自动化 …… (278)
第五节　负荷控制 …… (284)
第六节　配电网综合自动化 …… (294)
参考文献 …… (299)

第一章 概 论

第一节 电力系统自动化的重要性及其发展历程

一、电力系统自动化的重要性

自动化诞生于工业生产,是指用自动进行调节、检查、加工和控制的机器及设备进行生产作业,以代替人工直接操作。一般说来,自动化可以增加产品产量、降低成本、提高产品质量、改善劳动条件等。随着科学技术,尤其是电子、计算机和通信技术的发展,自动化逐渐向非工业领域扩展,形成了诸如办公自动化、家务劳动自动化等许许多多的自动化,使得自动化有了更多的内涵。

电力系统自动化是自动化的一种具体形式。它是指应用各种具有自动检测、决策和控制功能的装置并通过信号系统和数据传输系统对电力系统各元件、局部系统或全系统进行就地或远方的自动监视、协调、调节和控制,保证电力系统安全经济运行和具有合格的电能质量。

(一) 电力系统的特点及对电力系统运行的要求

电力系统自动化是为电力系统服务的。因此,电力系统自动化工作者必须熟悉电力系统的特点及对电力系统运行的要求。只有这样,才能做好电力系统自动化工作。

电力系统同其它的工业系统相比有着明显的特点,主要有以下几个方面。

1) 结构复杂而庞大 一个现代化的大型电力系统装机容量成百上千万千瓦。世界上最大的电力系统装机容量达几亿千瓦,供电距离达几千公里。电力系统中各发电厂内的发电机、各变电站中的母线和变压器、各用户的用电设备等,通过许许多多条不同电压等级的电力线路结成一个网状结构,不仅结构十分复杂,而且覆盖辽阔的地理区域。

2) 电能不能储存 电力系统中的电能不能储存。电能的生产、输送、分配和使用是在同一时刻完成的。在任何时刻,电力系统中电源发出的功率都等于该时刻电力系统负荷和电能输送、分配过程中所消耗的功率之和。

3) 暂态过程非常迅速 电能以电磁波的形式传输,传播速度为 3×10^5 km/s。发电机、变压器、输电线路、用电设备的投入或退出运行都是在一瞬间完成的。电力系统故障的发生和发展以及运行方式改变所用的时间都是十分短暂的。

4) 特别重要 国民经济的各个部门、人民的文化和物质生活都离不开电能。供电不足或突然停电往往给国民经济造成巨大损失,给人民生活带来不便。

根据电力系统的这些特点,对电力系统运行的基本要求如下。

1) 保证供电可靠性　供电中断会使生产停顿、生活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,电力系统运行的首要任务是可靠地向用户供电。

2) 保证电能质量　电能质量以电压、频率以及正弦交流电的波形来衡量。电压和频率过多地偏离额定值对电力用户和电力系统本身都会造成不良影响。这些影响是,轻则使用户减产或产生废品,严重时可造成设备损坏或危及电力系统的安全运行。

3) 保证运行的经济性　合理分配每座电厂所承担的负荷,合理调度电力系统潮流,会降低生产每一度电能所消耗的能源,降低电能输送、分配时的损耗,从而提高电力系统运行的经济性。这样,就用最少的一次能源 (水、煤、石油等) 消耗获得最多的、有用的电能,使电能成本最低。

(二) 电力系统自动化的重要性

通过对电力系统的特点及对电力系统运行要求的介绍,不难想像,控制与管理一个现代大型电力系统,使之安全、优质和经济地运行,将是十分困难而艰巨的。

首先,被控制的对象复杂而庞大。被控制的设备多,有成千上万台发、输、配电设备;被控制的设备分散,分布在辽阔的地理区域之内,纵横跨越一个或几个省;被控制的设备间联系紧密,通过不同电压等级的电力线路连结成网状系统。由于整个电力系统在电磁上是互相耦合和连接的,所以在电力系统中任何一点发生的故障,都会在瞬间影响和波及全系统,往往会引起连锁式反应,导致事故扩大,在严重的情况下会使系统发生大面积停电事故。因此在电力系统中要求进行快速控制。显然,对这种结构如此复杂而又十分庞大的被控对象进行快速控制,是十分困难的。

其次,是被控制的参数很多。这些参数包括电力系统频率、节点电压和为保证经济运行的各种参数。为了保证电能质量,要求在任何时刻都应保证电力系统中电源发出的总功率等于该时刻用电设备在其额定电压和额定频率下所消耗的总功率。而电力系统用户用电却是随机的,需要用电时就合闸用电,而且用电量往往是变化的;不需要用电时就拉闸断电。这就需要控制电力系统内成百上千台发电机组和无功补偿设备发出的有功和无功功率等于随时都在变化着的用电设备所消耗的有功和无功功率。显然,监视和控制成千上万个运行参数是十分困难的任务。

第三,干扰严重。从自动控制角度看,电力系统故障是电力系统自动控制系统的扰动信号。电力系统故障的发生是随机的,而且故障的发生和切除是同时存在的,也就是说扰动的同时伴随着被控制对象结构的变化。这就增加了控制的复杂性。电力系统故障有时会使电力系统失去稳定,造成灾难性后果。因此,如何控制才不致使电力系统失去稳定,在电力系统失去稳定后又如何控制才能使电力系统恢复稳定,已成为当前电力系统控制研究的重大课题之一。

上述分析说明,保证电力系统安全、优质、经济运行单靠发电厂、变电站和调度中心运行值班人员进行人工监视和操作是根本无法实现的,必须依靠自动装置和设备才能实现。实际上,电力系统规模的不断扩大是与电力系统采用自动监控技术、远动技术分不开的。可以毫不夸张地说,电力系统自动化是电力系统安全、优质、经济运行的保证之一。没有电力系统自动化,现代电力系统是不能运行的。

二、电力系统自动化的发展历程

(一) 单一功能自动化阶段

在电力工业发展初期,发电厂都建在用户附近,电厂规模很小,电力系统也是简单而孤立的。运行人员在发电机、开关设备等电力元件的近旁直接监视设备状态并进行手工操作,例如人工操作开关、调节发电机的出力和电压等。这种工作方式的效果与运行人员的素质和精神状态有关,往往不能及时而正确地进行调节和控制。特别是在发生事故时,往往来不及对事故的发生和发展做出反应而使事故扩大。

随着工农业生产和人民生活用电的增长,电力系统内的发电设备及其出力不断增加,供电范围也不断扩大。在这种情况下,在设备现场人工就地监视和操作就不能满足电力系统运行的需要了。为了保证电力系统安全运行和向用户供应合格电能,出现了单一功能的自动装置。这些装置有故障自动切除装置(即继电保护装置,自动切除出现故障的发电机、变压器和输电线路等设备)、自动操作和调节装置(如断路器自动操作、发电机自动调压和自动调速装置等)和远距离信息自动传输装置(即远动装置)。

为了提高电力系统供电的可靠性和运行的经济性,逐步地将孤立的电力系统连接起来发展成了跨地区的电力系统。由于电力系统中每座发电厂和变电站的运行值班人员只知道本厂(站)的运行情况,对系统内其它厂(站)的运行情况以及电力系统的运行结构不清楚,所以在跨地区的电力系统形成之后,就必须建立一个机构对电力系统的运行进行统一管理和指挥,合理调度电力系统中各发电厂的出力并及时综合处理影响整个电力系统正常运行的事故和异常情况。这个机构就是电力系统调度所,也称电力系统调度中心。

起初,由于通信设备等技术的限制,电力系统调度主要靠电话。调度员通过电话向系统内各发电厂和变电站运行值班员了解表征电力系统运行状态的各种信息,然后根据这些有限的信息,加上自己的知识和运行经验做出调度决策,再用电话将决策通知发电厂和变电站的运行值班员,由他们在现场进行操作。这种模式使电力系统调度的实时性和正确性受到限制,是不能满足电力系统运行要求的。为了解决调度的实时性问题,随着通信技术的发展,出现了远距离信息自动传输装置。这些装置把电力系统中设备的投入和切除情况、设备运行参数自动地传输到调度中心,即进行遥信和遥测;把调度决策通过远动装置自动地传输到发电厂和变电站,对设备进行调节和控制,即进行遥调和遥控。

随着电力系统的不断扩大和继电保护、自动监控、远动三者的理论和技术的不断发展和日臻完善,电力系统继电保护、自动监控和远动分别发展成了三门独立的技术。电力系统继电保护和远动从电力系统自动化中独立出来之后,电力系统自动化的内容就只包括电力设备的自动监视、控制及与其有关的问题了。尽管如此,如果从高层次来分类,电力系统继电保护、电力系统远动和电力系统自动化仍然同属于“电力系统及其自动化”中的“自动化”范畴。

电力系统自动化单一功能自动化阶段的特点是:①电力系统继电保护、电力系统远动和电力系统自动化三者各自自成体系,分别完成各自的功能;②对单个电力设备和单一过程用分立的自动装置来完成自动化的某项单一功能;③电力系统中各发电厂和变电站之间的自动装置没有什么联系;④电力系统的统一运行主要靠电力系统调度中心的调度员根据遥信、遥测传来的信息,加上自己的知识和经验通过电话或遥控和遥调来指挥。

(二) 综合自动化阶段

随着电力系统装机容量和供电地域的不断扩大,电力系统的结构和运行方式越来越复杂而多变,同时对电能质量、供电可靠性和运行经济性的要求也越来越高。在这种情况下,原有的技术装备已经不能使调度人员在很短的时间里掌握复杂多变的电力系统运行状态,并做出及时而正确的决策。远动和通信技术的发展使得电力系统的实时信息可以直接进入调度中心供调度人员直接掌握系统的运行状态,帮助他们及时地对电力系统运行进行实施调度指挥,并能及时发现和处理事故。但是,在复杂的情况下,大量信息出现在调度人员面前时,常使得调度人员不知所措,以致延误了事故处理,甚至做出错误的决定,导致事故扩大。无人值班电厂和变电站的增加也加重了调度中心的任务。

电力系统的发展向电力系统调度提出了更高的要求。于是,本世纪 60 年代开始研究电力系统自动监视和控制问题。

图 1-1 是电力系统自动控制系统的工作模式图。电力系统的信息,包括电力系统的运行结构、参数和事故状态通过电力系统远动装置的遥信 (YX)、遥测 (YC) 和通信装置传送到调度中心的调度计算机。在调度计算机中,首先对远动传来的信息进行处理,得出表征电力系统运行状态的完整而准确的信息,然后根据电力系统的运行结构求出表征电力系统实时运行状态的数学模型,最后根据电力系统运行的要求求出对电力系统实施控制的决策。调度计算机做出的控制决策再通过远动装置的遥控 (YK)、遥调 (YT) 和通信装置传送到电力系统。电力系统中的自动装置接到从调度计算机传来的 YK 和 YT 信息之后,对电力系统的运行结构和参数进行控制和调节,使电力系统进入一个新的运行状态。这个新的运行状态的运行结构和参数再通过远动装置的 YX、YC 和通信装置传到调度中心的调度计算机。上述过程周而复始地不停进行,实时地对电力系统内众多发电机组和电力设备进行监视和控制。图 1-1 所示的电力系统自动监控系统把电力系统自动控制装置、电力系统远动装置和通信装置有机地结合在一起,组成了一个自动控制系统。这个系统被称为电力系统调度自动化系统或电力系统自动监视与控制系统。这是一个典型的也是规模很大的综合自动化系统。

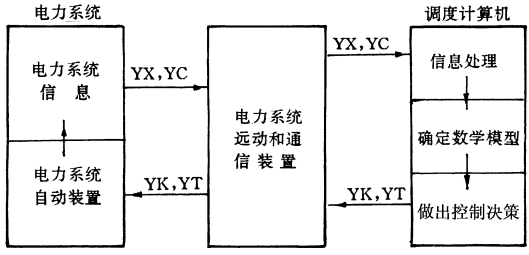


图 1-1 电力系统自动控制系统工作模式图

综合自动化的特点是用一套自动化系统或装置来完成以往两套或多套分立的自动化系统或装置所完成的工作。由于综合自动化不仅可以充分利用计算机监控系统的硬设备资源,而且可以实现分立装置所不能实现的功能,达到分立装置所不能达到的技术性能,所以随着科学技术的进步,尤其是现代控制理论和计算机数字监控技术在电力系统自动化中的广泛应用,电力系统中出现了不少称为"综合自动化"的系统,如发电机组综合自动控制系统、变电站综合自动化、梯级水电厂调度综合自动化等。为了对综合自动化有更进一步了解,下面简单介绍一个

发电机综合自动控制系统。

发电机综合自动控制(Total Automatic Generator Control)系统简称为 TAGEC 系统。它是 1984 年提出来的一种计算机数字综合控制系统,其功能包括发电机组开停顺序控制、励磁控制(AVR)、调速控制(GOV)、稳定余度监视控制等。TAGEC 系统中发电机组调速和励磁控制的原理如图 1-2 所示。它将发电机组作为一个统一的被控对象,按照多变量最优控制理论设计了一个发电机励磁和调速综合最优控制器。综合最优控制器的一路输出控制发电机励磁电流,一路输出控制进入水轮机的水量,实现对发电机频率(f)、有功功率(P)、电压(U_G)、无功功率(Q)、电流(I_G)、功角(δ)、磁通(φ)等运行变量的控制。图 1-2 中 I_L 和 U_L 分别为发电机励磁电流和电压,Y 为导水叶开度,ω_T 为水轮机的转速。在 TAGEC 系统中一台控制计算机完成了多项功能,并具有良好的性能。

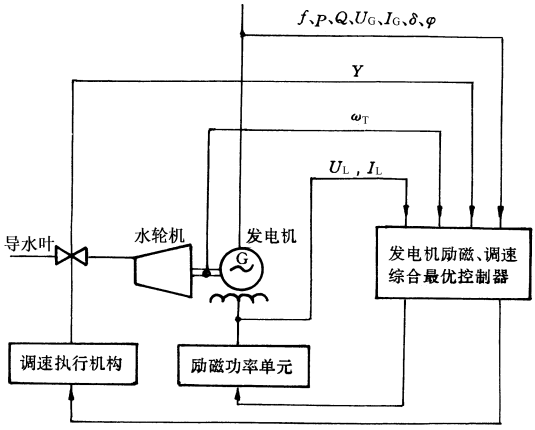


图 1-2 发电机励磁调速综合最优控制示意图

大容量、高速度的大型计算机和微型计算机及其网络系统在电力系统中的应用,充分显示了计算机储存信息量大、综合能力强、决策迅速等许多优点。日益提高的计算机性能价格比为计算机在电力系统自动化方面的普及应用创造了条件,也为电力系统综合自动化提供了物质保证。现在,世界上已出现了把电力系统实时运行的能量管理系统(Energy Management System,EMS)和配电网调度控制中使用的自动控制系统(Dispatch Automation System)以及在电力工业各有关部门中用于管理和规划的管理信息系统(Management Information System)结合起来的综合自动化系统,把不同层次的电力系统调度自动控制功能和日常生产的计划管理功能在信息共享和功能互补上很好地结合了起来,使电力系统运行的安全、经济性提高到了一个新的水平。

可以预计,今后还会出现更多的综合自动化装置和系统,把电力系统自动化提高到一个更高、更新的水平。

第二节　电力系统自动化的内容

通常所说的电力系统是指电能生产、输送、分配和消费所需的发电机、变压器、电力线路、断路器、母线和用电设备等互相联结而成的系统。这是一个能量系统，也称为电工一次系统。电工一次系统中的电力设备常被称为一次设备。在电力系统中还存在一个由对电工一次系统进行监视、控制、保护、调度所需的自动监控设备、继电保护装置、远动和通信设备等组成的辅助系统。这是一个信息系统，也称为电工二次系统。电工二次系统中的设备（或装置）常被称为二次设备（或装置）。

电力系统自动化是电工二次系统的一个组成部分，通常指对电力设备及系统的自动监视、控制和调度。电力系统自动化是一个总称，它由许多子系统组成，每个子系统完成一项或几项功能。从不同的侧面看可以将电力系统自动化的内容划分为几个不同部分。按电力系统运行管理区，可以将电力系统自动化分为电力系统调度自动化、发电厂自动化和变电站自动化。调度自动化又可分为发电和输电调度自动化、配电网调度自动化。发电厂自动化又分为火电自动化和水电厂自动化。从电力系统自动控制的角度，可以将电力系统自动化分为电力系统频率和有功功率自动控制、电力系统电压和无功功率自动控制、电力系统安全自动控制、电力系统中的断路器自动控制等。

一、电力系统调度自动化

电力系统调度的任务可概括为：控制整个电力系统的运行方式，使电力系统在正常状态下能满足安全、优质和经济地向用户供电的要求；在缺电状态下做好负荷管理；在事故状态下迅速消除故障的影响和恢复正常供电。电力系统调度自动化任务是综合利用电子计算机、远动和远程通信技术，实现电力系统调度管理自动化，有效地帮助电力系统调度员完成调度任务。

（一）调度自动化系统的基本构成

图 1-3 是调度自动化系统的结构简图。图中主站（Master Station，MS）安装在调度所，远动终端（Remote Terminal Unit，RTU）安装在各发电厂和变电站。MS和RTU之间通过远动通道相互通信，实现数据采集和监视与控制。RTU是调度自动化系统与电力系统相连接的装置，功能之一是采集所在厂（站）设备的运行状态和运行参数，如电压、电流、有功和无功功率、有功和无功电量、频率、水位、断路器分合信号、继电保护动作信号等。RTU 采集的信息通过通信通道送到主站。RTU 的第二个功能是接收主站通过通道送来的调度命令，输出断路器控制信号、功率调节信号或改变设备整定值的信号给其所在厂（站）的自动控制装置，并向主站返回已完成的操作信息。

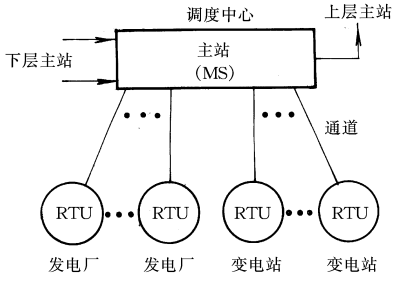


图 1-3　调度自动化系统简图

图 1-4 是主站系统的结构示意图。通信控制器接收各厂（站）RTU 送来的信息，将其送往主计算机，并将主计算机或调度人员发出的调度命令送往各厂（站）的 RTU。主计算机是主站

的核心，负责信息加工和处理：检测一些参数是否越限，断路器是否有变位等，将结果通过人机联系（屏幕显示器或模拟屏）向调度员报告；根据各厂（站）RTU 送来的信息决定是否对电力系统实行控制和调节；接收调度员向计算机输入的各种命令。主站还要将经过处理的信息向上层调度中心转发，通常通过数据通信网进行。

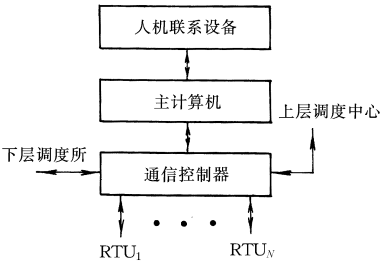


图 1-4 主站系统框图

电力系统调度自动化系统构成的一个特点是其分层结构。电力系统实行分层调度控制与集中调度控制相比有许多优点，可使各种问题得到比较合理的解决。电力系统调度控制一般分为主调度中心、区域调度中心和地区调度中心三级。

在发电厂和变电站装设的远动终端或计算机控制系统直接采集实时信息并控制当地设备，只有涉及全网性的信息才向调度中心传送。调度中心集中信息后作适当处理、编辑后再向更高层次的调度中心转发。上层调度中心做出的决策以控制命令的形式向下级发送。这种分层采集信息和分层控制简化了系统结构，并减少了通道量和信息量，使信息的实时性明显提高。

（二）调度自动化的发展过程

当电力系统中电厂和变电站数量较多时，仅靠电话是无法对电力系统进行实时调度的，特别在电力系统故障时还可能延长事故处理的时间，甚至扩大事故。远动技术能把远方厂（站）的测量量和断路器位置信号及时传送到调度所，通过模拟屏显示出电力系统的运行情况，使调度员能及时了解发生的事件。工业发达国家在第二次世界大战后就进入了电力系统远动阶段，我国于 20 世纪 60 年代开始在电力系统调度中使用远动技术。

当电力系统发展到数百万或上千万千瓦的容量时，远动系统收集远方厂（站）的数据可能达数千或上万个。这会使调度所中的电力系统模拟屏相应增大，其中信号灯和遥测仪表数量大大增加，从而使调度员目不暇接，难以判断电力系统的运行状况和所发生的事故。国际上从 20 世纪 60 年代起出现了以电子计算机为基础的电力系统调度自动化系统。计算机有丰富的软、硬件资源，将所收集的数据进行加工处理，提供更加直观的信息，通过屏幕显示器以多幅画面的形式显示，许多信息还可以用打印机记录下来。这些使调度员省去许多繁琐的工作，使调度效能明显提高。我国在电力系统调度中采用计算机技术开始于 20 世纪 70 年代，80 年代得到普遍推广。

20 世纪 60 年代以来国际上出现了多起大面积停电事故。特别是 1965 年 11 月 9 日和 1977 年 7 月 13 日发生的美国纽约两次大停电事故以及 1978 年 12 月 19 日法国大停电事故，要求调度自动化系统的功能以经济调度为主转向以安全控制为主。同时，随着计算机软、硬件能力的增强，开发了功能更强的应用软件包，如状态估计、在线潮流计算、安全分析、事故模拟等，使调度自动化系统由初期的安全监视功能上升到了能实现安全分析和辅助决策功能。

在 60 年代计算机参与调度的初始阶段，计算机与相应的远动及通信设备组成的系统，主要用来完成电力系统运行状态的监视、远距离开关操作、自动发电控制及经济运行以及制表、记录和统计等功能。一般称这个系统为监视控制和数据采集系统，英文缩写为 SCADA（Supervisory Control and Data Acguisition）。

70 年代初,大型数字计算机应用于电力系统调度工作以后,电力系统调度自动化作为一个完整的课题被提到日程上。在原有 SCADA 功能的基础上又增加了安全分析与安全控制功能以及其它调度管理和计划管理功能。这个系统被称为能量管理系统 (EMS)。利用这个先进的自动化系统,运行人员已从过去的监视记录为主的状况转变为较多地进行分析判断和决策,而日常的记录事务则由计算机取代。

目前世界上已有数百个电力系统应用了以计算机为核心的调度自动化系统。

二、火电厂自动化

火电厂是利用化石燃料燃烧释放出来的热能发电的。根据动力设备的类型,火电厂分为蒸气动力发电厂、燃气轮机发电厂和内燃机发电厂,其中蒸气动力发电厂提供的电能约占火电厂提供电能的 95%。所以,在没有特别说明时,通常所谓火电厂一般均指蒸气动力发电厂。这里提及的"火电厂自动化"也是指蒸气动力火电厂的自动化。

蒸气动力火电厂在现代主要是汽轮机发电厂,主要动力设备有锅炉、汽轮机、汽轮发电机以及一些辅助设备。火电厂的电气部分有配电装置、厂用电和电工二次部分。在火电厂,燃料在锅炉内燃烧放热,将给水加热成蒸气,蒸气在汽轮机内膨胀使热能转换为转子转动的机械能,再由汽轮机驱动发电机将汽轮机输出的机械能转换成电能,最后由配电装置将电能输送入电网。汽轮机排气进入凝汽器被冷凝成水,再由凝结水泵经低压加热器送入除氧器,最后再经给水泵通过高压加热器送回锅炉。这样就实现了火电厂的连续电能生产。

随着火电技术的发展,蒸气参数不断提高。为了充分利用电厂公用设施以降低电能成本,汽轮发电机组的单机容量、单座电厂装机容量也有了很大提高。已投入工业运行的火电机组最大容量达 1 300 MW,最大的火电厂装机容量已达 4 800 MW。

(一) 火电厂自动化及其发展过程

火电厂自动化是利用各种自动化仪表和装置 (包括电子计算机) 对火电厂的生产过程进行自动监视、控制和管理,使之安全、经济运行的技术。自动化是火电厂不可缺少的组成部分,它的目的主要是:

①保证机组安全、经济运行;

②增加机组对电网经济调度和负荷变化的适应能力,保证发电质量;

③减轻操作人员的劳动强度,改善劳动条件,提高运行水平;

④节省人力,提高电厂的劳动生产率;

⑤监视和控制发电过程对环境的污染。

20 世纪 50 年代以前,火电厂的自动化程度很低,以就地控制为主,炉、机、电设备都是各自就地设置控制仪表盘,分别由运行人员进行监视和操作。50 年代中间再热机组广泛应用以后,火电厂采用炉、机、电单元制运行方式,于是火电厂自动化进入了集中控制阶段,即将炉、机、电控制的仪表盘集中布置在单元控制室内,以便运行人员对单元机组的运行状况进行监视和控制。由于需要监视和控制的项目很多,而自动化装置仍以常规模拟式仪表为主,因此,在单元控制室内仍由炉、机、电运行人员分别对各自的设备进行监视与控制。70 年代以来,电子计算机在火电厂自动化中得到了实际应用并迅速发展。起初是计算机和模拟式控制仪表相配合对机组运行状态进行监视。由于计算机技术、通信技术、控制技术和屏幕显示技术的发展,

尤其是微型计算机的可靠性和性能价格比的提高,使得以微型计算机为基础的分散控制系统在火电厂自动化中得到应用,至今仍在继续发展。分散控制系统把各种不同的控制功能,分别由数台以微型计算机为核心的装置实现,而由运行人员在操作站对它们进行统一监视和管理。这既可以对火电机组进行有效控制,又可以实现对全厂的监视和管理。

(二) 火电厂自动化的主要功能

火电厂自动化是一门综合技术。它的主要功能可以概括为自动检测、自动保护、顺序控制、连续控制、管理和信息处理。

1) 自动检测 它包括对整个机组运行状态和参数的测量、指示、记录、参数计算、参数越限和设备故障时发出报警信号、事故记录和追忆、工业电视监视等。

2) 自动保护 它包括主机、辅机和各支持系统及其相互间的连锁保护,以防止误操作。当设备发生故障或危险工况时,自动采取措施防止事故扩大或保护生产设备。

3) 顺序控制 它包括主机、辅机和各支持系统的启停控制,如输煤系统控制、锅炉吹灰系统控制、锅炉补给水处理控制、给水泵启停控制、汽轮机自启停控制、锅炉点火系统控制等。

4) 连续控制 它又称调节控制或自动调节,包括对主机、辅机及各系统中的压力、温度、流量、物位、成分等参数的调节控制,使之保持为预期的数值。

5) 管理和信息处理 对电厂中各台机组的生产情况 (如发电量、频率、主要参数、机组设备的完好率、寿命),电厂的煤、油、水资源情况,环境污染情况进监督、分析,供管理人员做出相应的决策。

(三) 火电厂自动化系统

火电厂自动化的功能是通过各种自动化系统实现的。大容量火力发电机组的自动化系统主要有计算机监视 (或数据采集) 系统、机炉协调主控制系统、锅炉自动控制系统、汽轮机自动控制系统、发电机和电气控制系统、旁路控制系统、辅助设备及各支持系统的自动控制系统、就地控制系统等 8 个部分。

1. 计算机监视系统

这个系统包括厂级监视用计算机及分散控制系统的数据采集系统,作用是对锅炉、汽轮机、发电机及电气系统生产过程参数和设备运行状态进行监视。

计算机监视系统的主要功能有数据采集与处理、越限报警、屏幕显示、性能计算、操作指导、打印制表、事故追忆打印和事件顺序记录和历史数据存贮等。

计算机监视系统与各仪表控制系统都有联系,并取代了部分常规仪表。由于计算机监视系统数据处理能力强,提高了对机组的监视能力,并有大量的历史数据存贮,可供对机组运行问题进行分析。这是传统的常规仪表装置所无法实现的。

2. 机炉协调主控制系统

该系统根据负荷调度命令和电力系统频率,在单元机组所能承担负荷的情况下,对汽轮机自动控制系统和锅炉自动控制系统发出指挥和控制指令。系统还可按负荷需求和机组运行状况采用不同的运行方式。该系统不仅有调节功能,还具有逻辑判断功能。当设备发生故障等异常工况时,发出必要的连锁保护动作指令。

3. 锅炉自动控制系统

该系统包括锅炉的调节控制系统和炉膛安全保护监控系统。

1) 锅炉的调节控制系统 此系统主要包括给水调节、燃料量调节、送风量调节、炉膛负压

调节、过热气温和再热气温的调节系统等。当锅炉和汽轮发电机组成单元制方式运行而且负荷控制采用单元机组协调控制方式时，习惯上把上述锅炉调节控制系统作为单元机组协调控制系统的组成部分。

2) 炉膛安全保护监控系统　该系统又称锅炉燃烧器管理系统，包括燃烧器管理和安全保护两大部分。其主要功能包括安全功能、操作功能和火焰检测。

4. 汽轮机自动控制系统

该系统包括汽轮机调节系统、汽轮机自启停系统、汽轮机监视保护系统和主蒸汽旁路控制系统等。

1) 汽轮机调节系统　该系统的作用是对汽轮发电机组 (由发电机及驱动它的汽轮机组成的整体) 的转速和负荷进行连续调节控制。汽轮机调节系统在电力系统专业范围内常被称为“汽轮发电机组的调速系统”，有机械式和电气液压式两种，其中电气液压式又分模拟式和数字式两种。

2) 汽轮机保护系统　该系统的执行机构是自动主汽门，保护动作时自动关闭自动主汽门实现停机。汽轮机本体附有几种基本保护装置，如超速保护、低真空保护等，以保护汽轮机安全。

3) 汽轮机监视系统　该系统是汽轮机固有保护装置之外的安全监视和保护系统，主要对汽轮机转速、轴向位移、相对膨胀、轴承振动、转子挠度、推力轴瓦和支持轴瓦温度等进行监视和保护。

4) 汽轮机自启停控制系统　该系统的作用是保证汽轮机安全启停并缩短启停时间，延长机组寿命。现代汽轮机设有应力监视系统，可在汽轮机启停过程中控制关键部件的热应力在设计范围之内，并以此为基础实现汽轮机的寿命管理。

5. 发电机和电气控制系统

该系统包括汽轮发电机控制系统、厂用电控制系统、升压变电站 (电厂送电能给主电网的部分) 和直接配电线路 (供电能给电厂附近用户的部分) 的控制系统。

1) 发电机组自动控制系　图 1-5 是火电厂机组自动控制示意图。图 1-5 中，发电机及其励磁系统组成的发电机励磁自动控制系统，控制发电机电压和无功功率；汽轮机、发电机和调

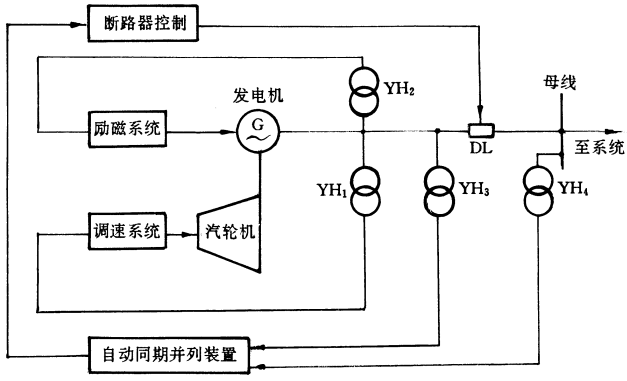


图 1-5　火电厂机组自动控制示意图

速系统组成发电机组调速自动控制系统,控制发电机转速(频率)和有功功率;自动同期并列装置和断路器控制组成发电机同期并列控制。火电厂电气自动化还包括电厂内机组的经济运行组合和负荷的经济分配。机组的经济组合即确定本厂哪些机组运行、哪些机组停止运行更经济。负荷的经济分配即确定把发电厂的总负荷功率分配给已并入电力系统运行的机组各多少运行经济性更好。

2)厂用电控制系统 厂用电对保证火电厂安全可靠运行是十分重要的,一般都设有备用电源和紧急直流电源。厂用电控制系统的作用是确保厂用电不致中断,一般都设有备用电源自动投入装置、蓄电池直流系统、交流不停电电源等。

6.辅助设备及各支持系统的自动控制系统

该系统也称为火电厂辅助系统的自动控制系统。这些控制系统大多属于顺序控制系统,作用是保证电厂中各辅助设备及各支持系统的安全运行。火电厂辅助系统的自动控制系统主要有输煤系统控制、锅炉吹灰系统控制、锅炉补给水处理系统控制、给水泵启停控制、风机起停控制、锅炉点火系统控制、煤粉制备系统控制等。

三、水电厂自动化

水电厂是把水能转换成电能的工厂,又称水电站、水力发电厂等。在水电厂采用集中水头和调节径流等措施,把天然水流中蕴藏的位能经水轮机转换为机械能,再通过发电机转换成电能,最后经输变电设备将电能送入电力系统或直接供电给用户。

水电厂自动化是采用机械、电子设备按预定要求代替人工进行水电厂生产作业的技术。它自动地对水电厂进行控制、监视、调节和管理,目的是提高水电厂运行的安全性、经济性、劳动生产率和供电质量。

水电厂自动化的内容依控制的对象可分为单机自动化(包括水轮发电机组自动控制、水轮机调速和水轮发电机励磁调节的自动控制)、公用设备自动化、全厂综合自动化(包括水电厂自动发电控制、水电厂自动电压控制、水电站计算机监控系统)和梯级水电站综合自动化。依功能,可分为自动控制、安全监视、经济运行、维持电力系统安全稳定运行和运行管理自动化等。

(一)水轮发电机组自动控制

水轮发电机组自动控制是对水轮发电机组的工况及其转换过程自动监视与控制。它以机组自动监控装置为核心,通过水轮机调速器、发电机励磁调节器、自动化元件和机组附属设备,根据控制指令自动完成机组工况转换、安全监视和保护。控制机组的指令可以来自上级调度所,也可来自电站内部最优负荷分配装置或低频自启动装置,也可由运行人员手动给定。近年来多使用微机系统或可编程控制器完成自动监控任务。机组工况有静止、发电、调相三种。工况可在上述三者之间转换。

调相是水轮发电机的一种运行状态。水轮发电机调相运行时,机组并网后按同步电动机方式运行:从电力系统吸收有功功率用来补偿机组的铜耗、铁耗和风摩擦损耗等;向电力系统输送感性无功功率,机组功率因数 $\cos\varphi = 0$。机组调相运行的目的是补偿电力系统无功功率不足,维持电力系统电压水平。

水轮发电机组工况及其转换示意图如图 1-6 所示。图中,静止转发电即机组开机及并网

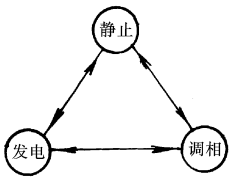


图 1-6　水轮发电机组工况及其转换示意图

控制，发电转静止即机组停机控制。调相转发电、发电转调相、调相转静止、静止转调相等涉及水轮发电机组调相控制，控制比较复杂，就不介绍了。

(二) 水电厂自动电压控制

水电厂自动电压控制是按照预定的条件和要求自动控制水电厂母线电压和全电厂无功功率的技术。它按照维持电厂高压母线电压在一定水平或按照给定全厂无功功率的要求，进行机组间无功功率分配。进行机组间无功功率分配时一般按以下几点考虑：

①首先由调相机组承担无功调节，剩余部分由参加无功调节的机组分担；

②运行机组间的无功功率一般按机组承担无功负荷的能力成比例的分配；

③考虑各运行机组有功负荷的大小，按一定的功率因数分配机组的无功功率；

④当水电厂的升压变压器带有有载调压抽头时，机组的无功功率调整要与变压器的抽头调节相配合，一般在调整变压器抽头之前，应最大限度的利用发电机的电压调整范围；

⑤要考虑机组的最大和最小无功功率的限制。

在当时的技术条件下，单独的自动电压控制装置一般是采用模拟式电子线路制作的。在水电厂采用计算机监控系统时，自动电压控制功能则纳入了水电厂计算机监控系统，由计算机监控系统的一个应用软件包来完成。

(三) 水电厂自动发电控制

水电厂自动发电控制是按照预定条件和要求自动控制水电厂有功功率的技术。它是在水轮发电机组自动控制的基础上实现全厂自动化的一种方式。水电厂自动发电控制根据水库上游来水量或电力系统的要求，考虑电厂及机组的运行限制条件，以经济运行为原则，确定电站机组运行的台数、运行机组的组合和机组间负荷分配。在完成这些功能时，要避免由于电力系统负荷短时波动而频繁启、停机组。

1. 自动发电控制的依据

1) 按上游来水量　这种方式适合于无调节水库的径流式水电厂。它使电厂最大限度地利用上游来水量，以不弃水或少弃水为原则，尽量保持电厂在高水头下运行，以便使电厂获得好的经济效益。

2) 按给定的发电机负荷曲线或实时给定的电厂总有功功率　这种方式是在电力系统统一调度下，电厂参加电力系统的有功功率和频率的调节，完成上级调度下达的计划性或随机性的发电任务。

3) 按维持电力系统频率在一定水平下运行　根据电力系统频率的瞬时偏差或频率偏差的积分值，确定电厂的总出力，直接参加电力系统的调频工作。

4) 按综合因素　诸如，按给定有功功率和电力系统频率偏差、按电力系统对功率的要求和下游用水量的需要等进行控制。

2. 自动发电的限制条件

自动发电的限制条件如下：

①机组及主设备的完好状况；

②机组的出力限制、汽蚀和振动区等工作条件；

③电力系统对电厂要求的备用容量；