

前 言

随着电力系统的不断扩大，电力系统的结构和运行方式越来越复杂而多变，用户对供电的要求也日益增长，所以提高和保证电力系统的安全性、经济性和供电质量（电压和频率）已成为电力系统发展和运行中的首要目标。为了实现这个目标，必须对电力系统的各个元件乃至整个系统进行不同程度的自动控制。

电力系统自动控制是一门综合性的技术，涉及到很多领域，它是在电力系统运行理论、计算机技术、现代控制理论、通信技术等基础上发展起来的。由于受篇幅的限制，本书不可能对所有涉及的问题都进行详细的叙述，读者如需对某些问题作进一步的了解，请参考本书最后所列出的参考文献。

本书由浙江大学电机系韩祯祥、顾锦汶、钱源平和邱家驹编写。其中第一、四章由韩祯祥编写，第二章由钱源平编写，第三章由钱源平和邱家驹编写，第五章由邱家驹编写，第六、七章由顾锦汶编写，韩祯祥任主编。

本书是根据能源部核定的1990~1992年高等学校教材编审出版计划编写的，1989年在杭州召开的电力工程类教学委员会自动远动教学组会议上讨论了编写提纲。本书由华中理工大学樊俊教授主审，他对本书提出了不少宝贵的意见，在此表示衷心的感谢。

本书为高等院校“电力系统及其自动化”专业的教材，也可供从事电力系统规划、设计和运行的工程技术人员参考。

限于编者的水平和条件，本书中难免存在缺点和错误，敬希读者指正。

编 者

1993年3月

目 录

第一章 电力系统及其自动控制的概述	1
第一节 电力系统的构成及其运行特点	1
第二节 电力系统自动控制的目的是内容	5
第三节 人和信息在电力系统控制中的地位和作用	10
第二章 电力系统的频率和有功功率控制	14
第一节 频率和有功功率控制的必要性	14
第二节 电力系统的有功功率平衡	15
第三节 电力系统的频率特性	16
第四节 电力系统的频率调整	27
第五节 电力系统的自动调频方法	30
第六节 电力系统有功负荷的经济分配	36
第七节 电力系统的网损及网损微增率	44
第八节 自动发电控制	48
第九节 机组的经济组合	50
第三章 电力系统的电压与无功功率控制	54
第一节 电压与无功功率控制的必要性	54
第二节 电力系统的电压控制	57
第三节 电力系统无功功率的最优补偿	58
第四节 同步发电机励磁控制系统	60
第五节 自动励磁调节装置	64
第六节 励磁控制系统的动态特性	71
第四章 电力系统的安全控制	79
第一节 电力系统安全运行的要求	79
第二节 电力系统正常运行状态时的安全分析和控制	81
第三节 电力系统的紧急状态控制	94
第四节 电力系统的恢复状态控制	112
第五章 电力系统最优运行	114
第一节 最优潮流问题	114
第二节 非线性规划最优潮流	115
第三节 线性规划最优潮流	121
第六章 电力系统的自动监视和控制	129
第一节 电力系统自动监视和控制系统的的基本任务和功能	129
第二节 电力系统自动监视和控制系统的的基本构成	130
第三节 电力系统的分层控制	147
第四节 电力系统的状态估计	150

第七章 配电网的控制.....	160
第一节 配电网的构成.....	160
第二节 配电网的自动控制系统	161
第三节 负荷控制.....	167
附录 潮流计算中的有功、无功功率分解法.....	177
主要参考文献.....	179

第一章 电力系统及其自动控制的概述

第一节 电力系统的构成及其运行特点

一、电力系统构成

电力系统是电能生产、变换、输送、分配、消费的各种设备按照一定的技术和经济要求有机组成的一个统一系统的总称。分布在不同地域的火力发电厂、水力发电厂、核电厂等将燃料、水力、核能等一次能源转换成电能，通过变压器、输电线和配电线传送和分配到各个电力用户，以实现电能从生产到消费的过程。为了保证电力系统在统一的管理和监视下正常运行，电力系统还包括通信、自动装置、继电保护、调度自动控制等相应的辅助系统和设施。

电力系统作为一个电能供应系统，与其他能量供应系统（如供气、供煤系统）不同，电能一般不能储藏，生产、输送、分配和消费是在同一时间内进行的。一年内夏、冬季的负荷较春、秋季的大；一周内星期日和假日的负荷较平时的小；一天中也有高峰和低谷之分。随着社会的经济活动、生活习惯和气候的变化，电力系统的负荷也有所不同。所以，在电力系统中，电能的生产量应每时每刻与电能的消费量保持平衡，并需保证电能质量。

因为整个电力系统在电和磁上是互相联系在一起，所以在电力系统中，任何一点发生的电磁变化过程，都以光速传播，瞬时间会影响和波及全系统，因此在电力系统中要求进行快速的控制。

最初，单个发电机组（或发电厂）对邻近用户供电，形成简单的孤立电力系统。随着工农业生产的发展和人民物质和文化水平的不断提高，电能需求迅速增长，发电设备及其出力和供电范围也相应增大，为了互通各孤立电力系统间的电力，提高运行的经济性和安全性，逐步发展成跨地区的联合电力系统。联合电力系统的优越性是：能更经济合理地利用水力、火力和核能等一次能源，以解决能源资源与负荷分布地域间的不平衡；可以利用电力系统供电地区内时差和季节差以及各地区电力消费习惯不同、负荷曲线不同等因素，错开负荷高峰，减少总的系统装机容量；有利于采用大容量的发电机组，可以节省建设投资和运行费用，以提高投资效益和运行经济性；便于在电力系统发生故障时，各地区间出力的相互支援，提高系统运行的安全性；便于集中管理，统一调度和分配电力等。目前，世界上已出现了总装机容量达几亿千瓦，供电范围纵横几千公里的巨大电力系统。

二、电力系统运行状态

电力系统运行状态指电力系统在不同运行条件（系统接线，出力配置，负荷水平，故障等）下的运行状况。电力系统的运行条件一般可采用三组方程式来描述。一组微分方程式用来描述系统元件及其控制的动态规律；两组代数方程式则分别构成电力系统运行的等式和不等式约束条件。

等式约束条件就是系统发出的有功和无功功率应在任一时间都与系统中随机变化着的

总的有功和无功负荷（包括线损）相等。这是电力系统正常运行的必要条件，可用下列数学公式表示

$$\Sigma P_{Gi} - \Sigma P_{Dj} - \Sigma \Delta P_s = 0 \quad (1-1)$$

$$\Sigma Q_{Gi} - \Sigma Q_{Dj} - \Sigma \Delta Q_s = 0 \quad (1-2)$$

式中 P_{Gi} 、 Q_{Gi} ——发电机或其它电源设备（ i ）发出的有功和无功功率；
 P_{Dj} 、 Q_{Dj} ——各种负荷（ j ）的有功和无功功率；
 ΔP_s 、 ΔQ_s ——电力系统中各种有功和无功功率损耗。

不等式约束条件就是涉及系统供电质量和安全运行的某些参数（如母线电压，线路潮流等）应处于系统或设备安全运行的允许范围之内（上限及下限）。例如

$$\left. \begin{aligned} U_{i \min} < U_i < U_{i \max} \\ P_{Gi \min} < P_{Gi} < P_{Gi \max} \\ Q_{Gi \min} < Q_{Gi} < Q_{Gi \max} \\ S_{ij \min} < S_{ij} < S_{ij \max} \\ f_{\min} < f < f_{\max} \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

式中 U_i 、 $U_{i \max}$ 、 $U_{i \min}$ ——母线电压及其上、下限值；
 P_{Gi} 、 $P_{Gi \max}$ 、 $P_{Gi \min}$ ——发电机有功出力及其上、下限值；
 Q_{Gi} 、 $Q_{Gi \max}$ 、 $Q_{Gi \min}$ ——发电机无功出力及其上、下限值；
 S_{ij} 、 $S_{ij \max}$ 、 $S_{ij \min}$ ——线路或变压器的功率潮流及其上、下限值；
 f 、 f_{\max} 、 f_{\min} ——系统频率及其上、下限值。

根据不同的运行条件，一般可将电力系统的运行状态分为正常状态、警戒状态、紧急状态、系统崩溃和恢复状态等。随着运行条件的变化，电力系统将在各种状态间进行转变，如图1-1所示。

1. 正常状态

在这种运行状态下的电力系统，所有等式和不等式约束条件均满足，表明电力系统以合格的质量，满足负荷对电能的需求；电力系统中各发电设备和输变电设备均在规定的限额内运行；电力系统中各母线电压和系统频率均在允许的偏差范围以内。正常运行状态的电力系统，其发电和输变电设备还保持一定的备用余量，使电力系统具有一定的安全水平，能承受正常的干扰（如电力负荷的随机变化，正常的设备操作等），而不致进一步产生有害的后果；同时，在保证安全的条件下，可以实现系统的经济运行。电力系统对每时每刻的不大的负荷变化的反应，可以认为是电力系统从一个正常状态连续变化到另一个正常状态。

2. 警戒状态

电力系统受到灾难性干扰的机会不多见，大量的情况是许多不大的干扰或变化。例如，负荷的增加，发电机的计划外停役，以及发电机、变压器、输电线路运行环境的恶化，使电力系统中各元件的备用余量减少到不允许的程度。这些干扰或变化有可能导致电力系统安全水平的降低，使系统进入警戒状态。处于警戒状态下的电力系统，上述的等式和不等式约束条件还是满足的，系统也能供应质量合格的电能，但系统的安全水平已下降到不能承受各种正常的干扰，特别是在电力系统中发生各种故障时，就有可能不满足某些不等式

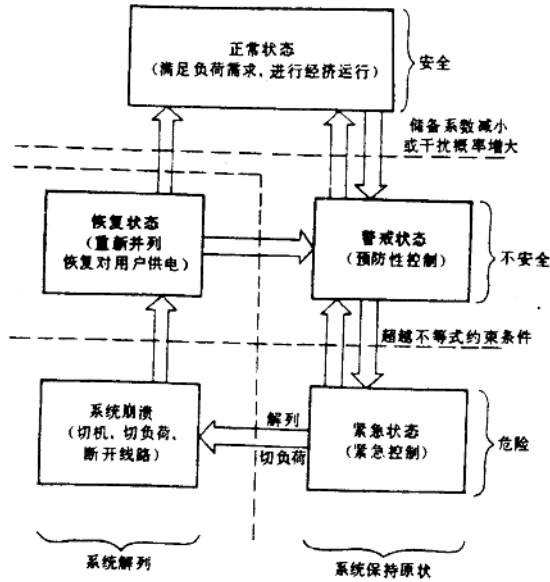


图 1-1 电力系统运行状态示意图

约束条件。例如，可能使某些线路或变压器过载，某些母线电压低于下限值等。这时，应采取预防性控制措施，使系统回复到正常状态。例如，增加和调整发电机出力，调整负荷的配置，切换线路等。

3. 紧急状态

一个处于正常状态和警戒状态的电力系统，如果发生严重的干扰，例如短路或大容量发电机组的非正常退出工作等，系统将进入紧急状态。这时，上述的等式约束条件仍可能得到满足，即负荷还是得到供应，但其质量已不能达到标准（频率或电压不满足要求）。这时，电力系统的某些不等式约束条件遭到破坏，例如某些线路或变压器过载；某些母线电压低于其下限值。在快速消除故障原因，并采取有效的紧急控制措施后，系统有可能恢复到警戒以至正常状态。

4. 系统崩溃

在紧急状态下，如不及时清除故障和采取适当的控制措施，或者这些措施不能奏效，则电力系统就可能失去稳定。由于自动解列装置或调度人员的操作，可能使电力系统解列成几个子系统。这时，上述等式和不等式约束条件均遭破坏，发电出力与负荷间出现不平衡。在一些子系统中由于电源不足，不得不大量切除负荷，而在另一些子系统中，由于出力大大超过负荷，而不得不让发电机组退出，以至出现全系统的大面积停电。此时应尽可能避免连锁性的事故发展，挽救系统各解列部分，使能维持部分供电，避免全系统的崩溃。

5. 恢复状态

在系统崩溃以后，由于自动装置的作用或调度人员的操作使事故停止扩大，待电力系

统大体上稳定下来后，则系统可进入恢复状态。这时，有部分用户停电，部分线路、变压器或发电机组处于断开状态，应采取各种恢复出力和送电能力的措施，迅速而平稳地对用户恢复供电，使解列的系统重新并列。根据系统的实际情况，从这种状态可以恢复到正常状态或警戒状态。

目前，对电力系统运行状态没有严格和统一的定义。上面介绍的五种运行状态也只是一种分类的方法，至于从一种状态转移到另一种状态也有很大的假定性。但是，通过这样一种电力系统运行状态的分析，可以使我们比较清楚地了解电力系统运行的概念及在各种情况下控制的特点，为下面各部分内容的讨论打下基础。

三、电力系统运行主要目标

根据电力系统的特点，为了充分发挥电力系统的功能和作用，将电力系统实际运行的主要目标概括如下：

1. 满足用户供电的需要，包括供电的数量和质量

在正常运行情况下，应该满足用户的用电需求，只有在出力不足的情况下才有计划地限制供电。在事故发生后的紧急情况下，当不能满足供电需求时，要有选择地切除一部分不重要的负荷，以保证重要负荷（如交通、医院、连续生产的工厂等）的供电和全系统的安全。

在稳态运行情况下，电力系统的频率是一个全系统统一的运行参数和质量指标。当电力系统的总出力与总负荷（包括线损）发生不平衡时，电力系统的频率就要发生变化。由于电力系统的负荷是经常发生变化的，任何一处的负荷发生变化，都要引起全系统的有功功率不平衡，因而导致电力系统频率的变动。所以，电力系统运行中的重要任务之一，就是要根据出力和负荷的变化对电力系统的频率进行监视和控制。

和频率一样，供电电压也是电力系统质量的重要指标之一。电压值的变化对用户的运行特性有很大影响。电力系统中的无功功率配置及其传输是影响电压的重要因素，所以应有效地调节电力系统的无功功率出力及电压，保持用户的电压在允许范围之内。

电能质量还包括电压和电流的波形质量及交流三相系统的电压和电流的不对称度。

2. 电力系统的安全性，保证电力系统能以质量合格的电能充分地对用户连续供电

一个能够保证安全供电的电力系统必须具有经受一定程度的干扰和事故的能力。这也就是说，当系统中出现预先规定性质和规模的干扰或事故后，电力系统凭藉其本身具有的抗干扰能力（如发电出力的备用容量，电力网的合理结构，以及输、变电设备的合理备用等）和继电保护及自动装置的作用，以及运行人员的控制和操作，仍能保持连续供电。但是，当电力系统中出现一个超出规定的事故后，就有可能使电力系统部分失去供电的能力。一个安全的电力系统，在严重的事故情况下也应尽量避免使事故扩大，以至波及电力系统其它正常运行的部分，造成大面积停电；同时，应迅速消除事故的后果，恢复正常供电。

保证电力系统安全运行的自动控制系统的的功能包括：安全监视、安全分析和安全控制。

3. 经济性, 即以最小发电成本为目的的经济运行, 使系统中并列运行的发电机组间合理地分配出力

当发电机组经过输电线路对负荷供电时, 还要考虑线损的影响。在电力系统正常运行中, 还应根据负荷的变化, 相应地开停发电机组, 以达到减少燃料消耗的目的。在有水电和火电的混合电力系统中, 要求在充分发挥水力发电能力, 有效地利用水力资源的条件下, 满足发电成本最小的要求。

4. 满足环境保护和生态条件的要求

在一些发达国家中, 十分重视电力工业对环境和生态的影响。电力系统所包含的发电厂, 在运行过程中会产生相当数量的固体和气体废料, 造成对大气和水的严重污染, 所以要控制发电厂排放的烟气成分(如硫的氧化物 SO_2 , 氮的氧化物 NO_x , 及烟尘等)、温度、扩散速度, 冷却水的排放温度和流速。对于核电厂则要控制其放射性的污染。在输变电设备方面则要考虑输电线(如电晕放电)对周围环境的影响以及变压器噪声对周围环境的影响。

5. 合理使用燃料及其他资源

在电力系统中, 应根据国家的能源政策, 以及燃料的供应和运输条件、价格等因素来综合考虑和协调全系统的燃料使用计划。例如, 由于燃油的限制而改为烧煤, 由于减少大气污染和运输上的原因改烧油为烧液化天然气等。在有水电厂的电力系统中, 还必须考虑水库的综合利用, 如灌溉、航运、防洪等。

在不同的电力系统运行状态下, 对上述目标的要求是各不相同的。这些目标是相互联系的, 但又是不同性质的, 有时彼此还是相互矛盾的, 所以实际的电力系统运行是一个多目标和多约束的复杂优化问题。例如, 在正常运行状态下, 用户供电需求是必须满足的, 但在紧急状态下, 当不能满足供电需求时, 可有选择地切除一部分不重要的负荷, 以保证系统的安全性和重要用户的供电。在正常运行时, 以发电成本(或输电成本)为最小是电力系统的主要目标, 但在警戒状态时, 安全性就是主要考虑的目标, 必要时应适当降低对于经济性的要求以保持系统具有最大的安全性。

第二节 电力系统自动控制的目的是内容

为了适应电力系统的特点, 以及电力系统规模和容量的不断扩大和系统结构、运行方式的复杂多变, 为了实现上述电力系统运行的目标, 为了正确和及时地掌握每时每刻都在变化着的电力系统运行情况, 为了协调和控制电力系统各组成部分的运行方式, 单纯依靠人力已经是不可能了, 必须应用现代控制理论、电子技术、计算技术、通信技术、图象显示技术等科学技术的最新成就来实现电力系统的自动控制。对电力系统自动控制的基本要求是:

- (1) 迅速而正确地收集、检测和处理电力系统各元件、局部系统或全系统的运行参数;
- (2) 根据电力系统的实际运行状态和系统各元件的技术、经济和安全要求, 为运行人员提供调节和控制的决策, 或者直接对各元件进行调节和控制;

(3) 实现全系统各层次、各局部系统和各元件间的综合协调, 寻求电力系统质量、经济和安全的多目标的最优运行方式;

(4) 电力系统自动控制不仅能节省人力, 减轻劳动强度, 而且还能减少电力系统事故, 延长设备寿命, 全面改善和提高运行性能, 特别是在发生事故情况下, 能避免连锁性的事故发展和大面积停电。

一、电力系统自动控制的发展过程

电力系统自动控制是在应用各种自动装置逐步取代人工操作的过程中发展起来的。最先, 运行人员在发电机组、开关设备等电力系统元件的近旁直接监视设备状态并进行手工操作和调节, 例如人工操作开关、调节发电机的出力 and 电压等。这种工作方式与运行人员的素质和精神状态有关, 也与监视仪表和调节操作装置的完善性有密切关系, 往往不能及时而正确地对系统进行调节和控制, 特别在发生事故时, 由于来不及反应事故的发生和发展, 反而使事故扩大。

随着单个设备或单个过程(如发电机励磁系统)自动装置的应用, 直接以运行参数的变化作为控制装置的输入信号, 来起动设备的操作和控制。如利用各种继电器来反应系统故障情况下的电流和电压的变化, 使断路器开断故障线路; 根据发电机端电压变化的信号来调节励磁等。这种单参数、单回路的调节和控制装置的应用, 节省了人力, 并能比较正确而及时地控制运行状态。自动装置的组成元件也由最初的电磁型发展成晶体管、集成电路的无触点型, 进一步采用以微型计算机(或微处理器)为基础的可编程序控制器等先进设备。

电力系统的发展, 发电厂(发电机)及其他电力系统元件数量的增加, 以及对运行的安全、经济和供电质量提出的越来越高的要求, 使得协调各元件间的控制成为必要。所以, 在一个发电厂、局部电力系统以至整个电力系统开始应用先进的计算机和通信设备来完成数据收集和处理, 并且利用计算机的高速运算能力、大容量内存和高度的逻辑判断能力, 实现一个发电厂、局部电力系统以至整个电力系统的集中监视、决策和控制。

随着电力系统各元件及发电厂组成的日益复杂, 以及对控制的要求日益严格, 进一步用计算机进行集中控制越来越困难。这是由于信息量庞大, 通道拥挤, 对计算机的容量要求高, 响应速度变慢, 运行复杂所致。利用计算机性能价格比日益提高的趋势, 对被控对象多、每个对象需要监控的参数量大、各个对象在地理上较分散的电力系统, 控制方式从集中控制发展为分层控制。电力系统本身在结构上就具有这种分层控制的结构, 如有中心调度所, 地区调度所、发电厂(变电所)控制中心等分层控制中心。分层控制的最低层可以在获得数据的地方由就近设置的控制装置或计算机处理数据, 并进行控制。这样可以避免大量信息的来回传送, 减轻上层控制装置或计算机的负担, 提高信息处理的实时性。只有涉及全系统的综合性信息, 才由下一层转送给上一层进行处理和控制, 在上层作出决策后向下层发送控制信息。

二、电力系统自动控制的主要内容和现状

(一) 电力系统调度自动控制

为了合理监视、控制和协调日益扩大的电力系统的运行状态, 及时处理影响整个系统

正常运行事故和异常现象，在形成电力系统的最早阶段，就注意到电力系统的远方监视和控制问题，并提出必须设立电力系统调度控制中心。在开始阶段由于通信设备等技术装备的限制（如只有电话），调度人员需要花费很多时间才能掌握有限的代表电力系统运行状态的信息，电力系统的很大一部分监视和控制功能是由电力系统中所属发电厂和变电所的运行人员直接来完成的。

运动技术和通信技术的发展，使电力系统的实时信息直接进入调度控制中心成为可能，调度人员可根据这些信息迅速掌握电力系统的运行状态，及时发现和处理发生的事故。

60年代开始用数字式运动设备，使信息的收集和传输在精度、速度和可靠性上都有很大的提高。运动装置从1对1发展为1对N的集中控制方式，使统一处理收集到的信息成为可能，并为信息与计算机的联系提供了方便。电子计算机和图象显示技术在电力系统调度控制中心的应用使自动控制程度达到一个新的水平。在开始阶段，计算机与相应的运动装置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（包括信息的收集、处理和显示）、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，一般称为监视控制和数据收集系统SCADA（Supervisory Control and Data Acquisition）。

60年代后期国际上出现多起大面积停电事故以后，为了解决电力系统安全问题，要求加强对全系统的安全监视、分析和控制，要求这种控制系统不仅能完整地、实时地了解全系统的实时状态，同时要在计算机及其外围设备的帮助下，能在正常和事故情况下及时而正确地作出控制的决策。这种包括SCADA功能、安全分析与控制功能以及其他调度管理和计划功能的系统称为能源管理系统EMS（Energy Management System）。利用这种先进的自动控制系统，运行人员已从过去以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先进的自动控制系统，几乎全部或部分地承担了调度人员可能涉及的所有各方面工作，大大减轻了运行人员的劳动强度并提高了运行水平，成为实现电力系统自动监视和控制不可缺少的手段。

电力系统调度自动控制系统由下列四个子系统所组成：

（1）信息收集和执行子系统，用于在各发电厂、变电所收集各种信息，并将其向调度控制中心发送。如果在一些厂（所）设有微型计算机为核心的远方终端RTU（Remote Terminal Unit），那末，所传送的信息将是已经处理和加工过的。这个子系统能同时接受上级控制中心发来的操作、调节或控制命令，例如操作开关、起停机组、调节功率等，在接到命令后，或者直接作用于控制机构，或者按一定的规律将命令转发给各被控设备。

（2）信息传输子系统，用于将收集到的信息通过传输媒介送到调度控制中心或反之，传输媒介有电力载波、微波、光纤、同轴电缆、公共话路等。

（3）信息处理子系统，是以电子计算机为核心的自动控制系统的主要组成部分，用于对收集到的信息进行处理、加工，为监视和分析计算电力系统运行状态提供正确的数据。分析计算的结果为运行人员提供控制决策的依据，或者直接实现自动控制。这种分析计算

主要有：①调节系统频率和电压的电能质量计算；②经济调度计算；③安全监视和安全分析计算。计算机还可用于完成日发电计划编制、检修计划编制、统计计算等工作。

(4) 人机联系子系统，用于向运行人员显示和输出信息，同时也用于输入运行人员的控制和操作命令。通过这一子系统使运行人员与电力系统及其控制系统构成一个整体。人机联系设备包括图形显示器及其控制台和键盘、模拟盘、制表或图形打印机、记录器(仪)等。

(二) 火电厂的自动控制

现代火电厂的发展趋势是采用高温、高压、中间再过热的大型单元式发电机组，机组的单机容量大而热力系统复杂，其运行工况多变，操作频繁而复杂，控制的对象和参数多，所以对火电厂的自动控制程度提出了很高的要求，传统的监控仪表和运行方式已满足不了火电厂安全经济运行的要求。近十几年来已经应用计算机来代替常规调节仪表对单项参数的控制，或者用一些相对独立的自动控制系统来完成局部设备的控制(如锅炉自动控制，喷燃器自动控制、汽轮机自动启动，自动同步等)，或者在传统的仪表和控制器的基础上增加电子计算机的协调和控制。其主要的功能有下列几方面。

1. 安全监视

利用计算机对发电机组的各种参数和各类设备的运行状态进行巡回和周期性的测量和检查。检测的内容和周期对于不同的运行工况(如正常、异常、起停过程、事故)是不同的。采集数据后还要进行必要的计算机处理，例如判断数据的正确性，对某些参数的修正，进行参数滤波等；同时，可对收集到的信息进一步校验是否越限，并通过声光显示或打印输出向运行人员报告；还可以根据获得的数据进行计算，得出如功率总加、锅炉效率、厂用电率等性能指标。

2. 正常调节

在正常运行时，对锅炉、汽轮机、发电机等主辅设备进行直接或间接控制。在运行中，因不断受到内外部条件及干扰的影响，一些被调参数(如汽压、水位、流量、风量等)经常发生变化，这就要利用自动调节器，根据被调量的偏差值，按规定的调节规律进行调节。用于进行正常调节的最简单的系统是单回路调节系统。利用计算机可以同时控制若干回路，并考虑各参数的相关因素。

3. 机组起停

高参数和大容量机组的汽水系统、燃烧系统、辅助系统、除氧给水系统十分复杂，使机组起停时的控制十分困难。在从冷态启动到带满负荷(几小时到十几小时)的过程中，包括锅炉点火、升温升压、汽机升速、初负荷保持、升负荷等几个阶段，工况不断变化。为了保证启动设备的安全，减轻运行人员的劳动强度，要对各种参数和设备状态进行监视、判断和计算，然后对各调节器和程序控制回路发出指令，或者直接去调节和操作发电机组。

4. 事故处理

该项功能用于对生产过程进行趋势预报，报警分析。事故发生后，首先应通过事故识别程序查明事故性质及原因，然后转入相应的事故处理程序。如果事故继续发展，以致危及机组及系统安全时，应采取紧急措施(如减负荷、停机)。在事故处理过程中，要监视

和记录设备的状态及主要参数，供运行人员进行事故后的分析。

（三）水电厂的自动控制

水电厂除了按计划发电外，还在电力系统中起着调峰、调频和事故备用的作用，所以机组起动频繁，工况多变（如调相改发电，抽水蓄能发电厂的抽水改发电等）；水电厂一般要通过远距离输电线将电能送到负荷中心，易出现稳定问题；同时水电厂还应考虑水力资源的综合利用。所以，水电厂的自动控制要能适应这些要求。

水电厂自动控制也是从单机自动控制开始，首先实现机旁的仪表监视和报警，就地操作和单个元件的自动控制，例如电气液压型的调速器，励磁调节器等。随着水电厂机组数量和单机容量的扩大，逐步实现全水电厂中央控制室的集中控制，采用对全厂运行状态的巡回检测，全厂主辅机的集中起停，自动调频和有功及无功功率的成组调节，机组的优化运行，稳定的监视和控制（如切机、电气制动、低频自动起动机组等）。

近十几年来，在水电厂自动控制中广泛应用计算机技术和微处理机，机组的基础自动控制装置实现微机化，例如微机化的调速装置、励磁调节器、同步系统等，给水电厂的基础自动控制带来了极大的方便。多微机的分布式计算机控制系统的应用，可使水电厂实现全厂的安全监视、自动发电控制和经济运行、自动电压控制、事故顺序记录和水库经济调度等。在梯级开发的水系，该系统还可进行全梯级水电厂的集中调度和控制。

随着自动控制水平的提高，在一些中、小型水电厂可以实现无人值班和中心调度所的远方监控。

水电厂除了本身机组及电气设备的监视和控制外，还要考虑水力系统（上、下游，以至跨流域）对水电厂的约束，实现水库长、中、短期的优化调度，以及防洪、灌溉、航运、供水、养殖的综合利用，所以，广义的水电厂自动控制还包括对水库的调节和管理，以及大坝的自动监视和管理。目前，已采用先进的无线电通信手段和以微型计算机为基础的水库流域水情测报及防洪调度自动控制系统，定时收集全流域的气象和水文（包括降雨，上、下游用水情况等）实时数据，经过处理后可以得到未来时段水库的入水流量变化过程及洪水预报。在某些水电厂应用自动测量和数据处理系统观察大坝各项变量（如温度、应变、应力、坝缝开度、渗透压力等）。

（四）配电网的自动控制

配电网（又称配电系统）是电力系统生产和供应电能的最后一个环节，其自动控制的主要任务是保证安全经济供电和负荷供需平衡的控制和管理，使用户得到充裕、优质、廉价的电力供应。所以配电网自动控制的主要功能为：①对配电网的监视和自动操作，如通过远方投切配电网中联络断路器或分段断路器，以便切除故障或调整潮流；②在系统频率下降时，切除负荷，或者在电压变动时自动投切静电电容器或者调整变压器分接头；③通过对负荷的直接控制来调节负荷曲线和保持电能供需平衡。

最初用时间开关来控制用户的负荷，定时切换用户的不同计价电表，用经济的手段来管理负荷。对工业用户采取控制最大需电量、分时计价、按合同规定用电时间等办法进行控制。为了直接控制每一用户的负荷，可采取工频、音频、载波、无线电等控制手段，由配电网调度所根据上级调度所的指令和系统的实际运行状态，直接发出控制信号，操作被

控用户的断路器，对事先已分类的负荷进行控制。

随着自动控制装置和被控设备可靠性的提高，中、小型变电所的控制可由就地操作过渡到远方操作和自动操作。近年来也开始在变电所内建立以微机为基础的综合自动控制系统，可以实现继电保护、安全监视、电压和无功综合控制等功能。一些变电所已实现无人值班或远方控制的自动控制运行体制。

最近几年，世界上已出现了把电力系统实时运行的能量管理系统（EMS）和在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，构成一个综合自动控制系统，以便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的配合起来，使电力系统运行的安全性、经济性提高到一个新的水平。

本书的下面各章将重点讨论有关电力系统调度和配电网的自动控制。火电厂和水电厂的自动控制本书将不再进行讨论。

第三节 人和信息在电力系统控制中的地位和作用

电力系统运行人员的主要任务是监视电力系统的运行状态，调节、控制和协调电力系统各元件的状态及其参数，使电力系统维持对用户供电的数量和质量，保证全系统的最大安全性和经济性。因为没有一个绝对安全的电力系统，所以运行人员又必须随时随地为事故的来临作好准备，迅速而正确地对事故作出反应，以尽量缩小事故的后果，极力避免事故的扩大和灾难性的大面积停电，尽快地使系统恢复到一个较安全的运行状态。如图1-2所示，为了有效地达到上述目的，从电力系统中收集到分散在各处的信息，经过加工处理，通过各种显示装置反映给运行人员；运行人员根据这些信息，应用人类思维的创造性、学习性和适应性，加以分析、综合和判断，作出决策；再通过执行器官（手或声音）对控制设备进行操作或发出命令，来实现对电力系统的控制。这样，被控制的电力系统及其控制

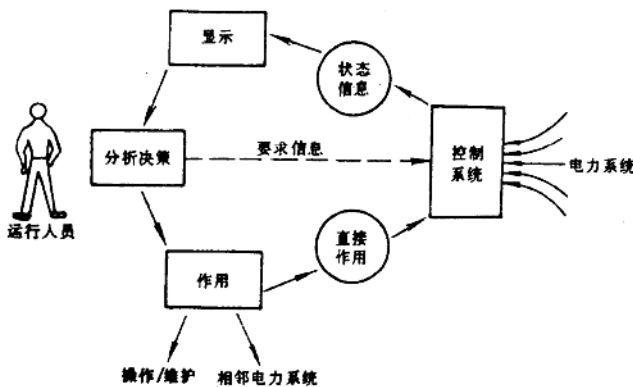


图 1-2 人机联系示意图

设备（包括信息收集和传输设备）与运行人员就构成一个有机的整体，这就是人机联系。系统越复杂，规模越大，人机联系的有效性对完成控制任务的影响越大。

科学技术的进步，使电力系统自动控制的水平越来越高，特别是电子计算机在电力系统运行中的应用，取代了原来很多需要人工进行的重复和简单的工作，为运行人员提供了很多人力所不及的新功能（如大量信息的快速收集、处理和显示等）。但是，自动控制水平的提高并没有丝毫减少运行人员在整个电力系统运行和控制过程中的主导作用。技术水平高的自动控制系统需要有相应文化和科学技术水平的运行人员去正确而熟练地掌握和使用，才能充分发挥它们的作用，使运行人员处于主动掌握和控制电力系统的地位。特别是在事故情况下，要求运行人员能应付突然来临和未能预测的严重运行状态，及时作出反应，采取正确的操作步骤和控制措施。对很多重大事故的分析表明，由于运行人员对系统及设备的情况不熟悉，或者情况不明，判断错误，以致处理不当，往往是使事故扩大或延续较长时间的重要原因之一。所以，在选择运行人员时，应充分考虑他们的文化技术水平和运行经验，同时还应注意他们的精神素质，平时要拟定综合性的训练和提高计划，对他们进行定期的有计划的培训。要编制和经常修订各种运行规程（包括各种事故处理导则），并督促运行人员严格贯彻和执行。对于电力系统中各级运行人员的职责要有明确规定，要求相互密切配合。上一级运行人员缺乏指挥下一级运行人员的权威，各级运行人员间工作的不协调，也往往是拖延事故处理时间和扩大事故的又一重要原因。

根据电力系统的特点，在实际运行中主要是通过通过对正常运行方式的观察、操作来培训运行人员。实际电力系统发生故障的机会是很少的，所以不可能以实际的事故或制造人为的故障来积累经验，并培训运行人员。传统的做法是，依靠对实际事故后的总结分析或对预想事故的分析来训练和培养运行人员处理事故的能力。但是，这种方法并不能使运行人员对事故的发生和发展及其后果有实际的感觉，而且对假想的安全控制和处理措施的正确性缺乏实际的校核。为了使运行人员能在错综复杂而变化迅速的正常和事故情况下，预见到事故的发展过程，及时作出正确的事故判断及处理措施，保证系统的安全运行，十分需要创造一个具有实际感的训练环境，用以实践运行操作和锻炼事故处理的能力，加速培养和扩大运行人员的运行操作经验。70年代中期以后，一些工业发达的国家开始创建电力系统运行人员的专用培训模拟设备，使其成为整个电力系统实际运行中的一个有机组成部分。

用模拟设备培训运行人员，在其它工业部门中已有较长的历史，特别是在航空工业中，开发了很完善的培训飞行员的模拟机。飞行员置身于完整的模拟座舱中进行“驾驶”活动，能获得和真实飞行一样的视觉、触觉、听觉和加速感觉。这些模拟机可以进行基本起飞、正常飞行和各种故障情况下的操作等项目的训练。使用这种设备能多快好省地训练飞行员，而且能保证训练的安全性，并节省燃料。在电力工业中，核电厂运行人员的培训也应用了模拟设备。

在1972~1973年间，国外开始应用模拟式的自动发电控制（AGC）系统等局部模拟设备来离线培训运行人员。小型数字计算机的应用以及电力系统计算方法的进步，促进了电力系统培训模拟设备的发展。在国外几次大面积停电事故发生以后，加深了人们对培训模

拟设备的认识，促进了它的进步。

根据国内外应用电力系统培训模拟设备的实践经验可以看出，用这种方法训练和提高运行人员有下列几方面的特点：

(1) 可以使运行人员通过培训建立对电力系统电气和机械特性的基本概念，并了解其运行特性。

(2) 可以从最基本的训练开始，逐渐增加运行操作的复杂性，以至进行各种严重事故的试验；可以利用人机联系设备很方便地显示和说明正在进行的过程；必要时可以重复任一过程和事件，也可造成一个人为的环境，试验某一特定元件或操作的效应。

(3) 特别是对于事故的模拟和控制，可以增加运行人员对处理事故的适应性，减少紧张程度，保证较熟练地控制电力系统。对于恢复过程，在模拟设备上不仅能有效地进行恢复控制的实践，而且能系统地开发恢复顺序。

(4) 用模拟设备来培训运行人员，可以减少在实际培训中所需的燃料、设备和人员的费用，可以避免因事故或操作错误等原因而造成对设备、人员及社会的危害。

如上所述，在一个现代化的电力系统中，运行人员为了能正确和及时地掌握每时每刻都在变化着的电力系统运行情况，控制和协调电力系统的运行方式，处理影响整个电力系统正常运行的事故和异常情况，保证电力系统的安全和经济运行，必须具备一个完善的电力系统信息收集和执行系统，将分散在几十公里、几百公里以至上千公里以外的各发电厂和变电所的大量表征电力系统运行状态的信息，迅速、正确、可靠地送到控制中心，同时将控制中心的控制和调节命令传送到各发电厂和变电所，实现对电力系统的自动监视和控制。

在电力系统发展的初始阶段，由于通信等技术装备的限制(如只有电话)，运行人员只能掌握有限的表示电力系统运行状态的信息。一般来讲，这些信息又是历史性的(不是实时的)和非同时性的。运行人员只能根据这些有限的非实时的信息，凭着他们的运行经验，作出对电力系统运行状态的判断，再进行控制和操作。

电力系统不断扩大的结果是系统结构的日益复杂和运行方式的复杂多变；另一方面，对电能质量和供电安全性及经济性的要求也日益提高。在这种情况下，要求运行人员利用原有的技术装备，在很短的时间里，掌握这样复杂多变的电力系统运行状态的信息，并作出正确的判断，是很困难的，甚至是不可能的。很多事故后的分析表明，在一些正常或事故情况下，由于缺少某些电力系统实时运行方式的重要而基本的信息(如线路潮流、主设备运行状态、母线电压等)，或者由于传送信息有误差(如断路器状态的不对应)，而使运行人员对系统的现状缺乏正确的概念，未能及时发现问题和处理问题，或者由于根据错误信息作出错误的判断，而造成事故的扩大。特别是在发生事故后，信息收集系统能及时反映系统迅速变化着的状态，使运行人员易于抓住事故特点，及时作出正确判断。事故情况下，由于通信失灵，各级运行人员间无法进行联系和正确的指挥，也往往是使事故扩大或处理延缓的重要原因。

运动技术和通信技术的发展，使电力系统的实时信息直接进入电力系统各级控制中心成为可能，运行人员可根据这些信息迅速掌握电力系统的实时运行状态，及时地对电力系

统运行方式的改变作出决定，并能及时发现和迅速地处理所发生的事故。但是，随着电力系统的不断扩大，在复杂的事故情况下，要求运行人员能及时地掌握和分析这么多信息，并迅速地作出正确的判断往往是很困难的。在某些情况下，反而由于大量的信息的出现，使运行人员不知所措，以致延误了事故处理的时间，甚至会作出错误的决定，导致事故的进一步扩大。同时，无人值班的发电厂和变电所的发展也加重了控制中心的任务。因此，电力系统的运行实践向人们提出了进一步提高电力系统信息收集、传输和处理的要求。以计算机为中心的信息和处理系统能对众多的信息实行加工处理(如状态估计,功率总加等),将向运行人员提供反映系统实时状态最重要的信息。

第二章 电力系统的频率和有功功率控制

第一节 频率和有功功率控制的必要性

电力系统频率是电力系统中同步发电机产生的交流正弦电压的频率。在稳态条件下各发电机同步运行，整个电力系统的频率是相等的。它是电力系统运行参数中最重要参数之一和表征电能质量的最重要指标之一。电力系统的额定频率为50 Hz或60 Hz，中国及欧洲地区采用50 Hz，美洲地区都采用60 Hz。

并列运行的每一台发电机组的转速与系统频率的关系为

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

式中 p ——发电机转子极对数；

n ——发电机组的转速 (r/min)；

f ——系统频率 (Hz)。

显然，频率控制实际上就是调节发电机组的转速。

电力系统中的发电与用电设备，都是按照额定频率设计和制造的，只有在额定频率附近运行时，才能发挥最好的效能。系统频率过大的变动，对用户和发电厂的运行都将产生不利的影响。电力系统频率变化对用户的不利影响主要有三个方面：①频率变化将引起异步电动机转速的变化，由这些电动机驱动的纺织、造纸等机械的产品质量将受到影响，甚至出现残、次品。②系统频率降低将使电动机的转速和功率降低，导致传动机械的出力降低。③工业和国防部门使用的测量、控制等电子设备将因系统频率的波动而影响准确性和工作性能，频率过低时甚至无法工作。电力系统频率降低时，将对发电厂和系统的安全运行带来影响，如：①频率下降时，汽轮机叶片的振动变大，轻则影响使用寿命，重则产生裂纹。电力系统的额定频率为50 Hz时，当频率低到45 Hz附近，某些汽轮机的叶片还可能发生共振而引起断裂事故。②频率降低时，由异步电动机驱动的火电厂厂用机械（如风机、水泵及磨煤机等）的出力降低，导致发电机出力下降，使系统的频率进一步下降。特别是频率下降到47~48 Hz以下时，将在几分钟内使火电厂的正常运行受到破坏，系统功率缺额更为严重，使频率更快下降，从而发生频率崩溃现象。③在核电厂中，反应堆冷却介质泵对供电频率有严格的要求，如果不满足，这些泵将自动断开，使反应堆停止运行。④系统频率降低时，异步电动机和变压器的励磁电流增加，所消耗的无功功率增大，结果引起电压下降。当频率下降到45~46 Hz时，各发电机及励磁机的转速均显著下降，致使各发电机的电势下降，全系统的电压水平大为降低。如果系统原来的电压水平偏低，还可能引起电压不断下降，出现电压崩溃现象。发生频率或电压崩溃，会使整个系统瓦解，造成大面积停电。因此，根据我国《电力工业技术管理法规》规定，正常运行时电力系统的频率应保持在 50 ± 0.2 Hz的范围内。当采用现代自动调频装置时，频率的误差可不超过0.05~0.15