

高等学校教材

电力系统自动监视与控制

浙江大学 韩祯祥 编

水利电力出版社

前 言

随着电力系统的不断扩大,系统的结构和运行方式也越来越复杂而多变,用户对供电的要求也日益增长,所以,提高电力系统的供电质量(电压和频率)、保证运行的经济性和安全性已成为电力系统发展的重大问题。为了实现上述目的,必须建立合理的电力系统监视和控制系统。随着运动技术、通信技术和电子计算机的迅速发展,近二十年来,在国内外数百个电力系统中已分别建立了不同规模的电力系统监视、控制和管理系统,使电力系统运行人员能迅速而正确地获得电力系统的实时信息,完整地掌握电力系统的实时运行状态,及时发现电力系统中出现的问题(包括各种事故)并作出处理。

本书的内容着重阐述电力系统监视和控制系统的基木要求和构成,以及电力系统监视和控制功能的基本理论和方法。由于电力系统监视和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、计算机科学、现代控制理论、通信技术等基础上发展起来的,所以在本书中不可能对所有涉及到的问题都有详细的阐述。读者如需对某些问题作进一步了解时,请参考有关的专门书籍。本书最后所列出的本书编写过程中重点引用的参考文献,也可供读者进一步深入学习本书时参考。

本书是根据高等院校水利电力类教材编审委员会于1982年制订的教材计划而编写的。本书由华北电力学院北京研究生部李先彬教授主审,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”专业的选修课教材,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。

限于水平和条件,书中难免存在缺点和错误,敬希读者指正。

编 者

1987年12月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 电力系统及其监视和控制系统的发展	1
第二节 电力系统的运行状态和调度控制的基本内容	3
第三节 电力系统调度控制自动化系统的基本结构	8
第二章 电力系统调度控制自动化系统	11
第一节 电力系统的信息收集和执行系统	11
第二节 电力系统的信息传输系统	16
第三节 电力系统的信息处理系统	23
第四节 人机联系系统	33
第五节 电力系统的分层控制	38
第三章 电力系统的状态估计	42
第一节 概述	42
第二节 电力系统状态估计算法	44
第三节 错误数据的检测和识别	57
第四章 电力系统的安全运行和控制	61
第一节 概述	61
第二节 电力系统的安全控制	65
第三节 电力系统的安全分析	75
第四节 电力系统运行人员的安全运行培训	88
第五章 电力系统经济运行和电能质量控制	92
第一节 电力系统自动调频的任务及调整准则	92
第二节 电力系统的经济运行	97
第三节 机组的经济组合	102
第四节 电力系统无功功率及电压的控制	105
第五节 电力系统经济运行和质量控制与安全控制的协调——最佳潮流控制	109
附录 I 潮流计算中的有功-无功功率分解法	113
附录 II 线损公式的推导	115
参考文献	119

第一章 绪 论

第一节 电力系统及其监视和控制系统的發展

现代社会经济生活的发展, 不断增加对能量的需求。当前社会所需要的大部分能量是以电能的形式提供的。随着工农业生产的发展和人民物质和文化生活水平的不断提高, 发电设备容量也相应增大, 同时也扩大了供电的范围。电力系统从单个发电机组(或发电厂)对邻近用户供电所形成的孤立电网逐步发展成为大型联合的电力系统, 以满足这种不断增长的电能需求, 这是世界各国电力系统发展的共同趋势。大规模联合电力系统的优越性是: 能更经济合理地利用水力、火力和原子能等能源, 以解决能源资源与负荷分布地域间的不平衡; 可以利用时差和季节差错开负荷高峰, 减少总的系统装机容量; 有利于采用大容量机组, 节省建设投资和运行费用, 以提高投资效益和运行经济性; 便于在发生故障时, 各地区间出力的相互支援, 提高系统运行的可靠性等。目前, 世界上已出现了总装机容量达几十万兆瓦, 供电范围纵横几千公里的巨大电力系统。我国目前已形成华北、东北、华东、华中、西北、西南和华南七个跨省的区域电力系统。随着跨区交、直流超高压输电线路的建设, 将逐步形成华中—华东、西北—华北、西南—华南等联合电力系统, 东北也将和华北联网, 并为进一步形成全国统一的电力系统打下基础。

随着电力系统的不断扩大, 系统的结构和运行方式也越来越复杂而多变。提高供电质量(电压和频率)和电力系统运行的经济性和可靠性已成为电力系统发展的重大问题。为了保证供电质量, 必须时刻监视电力系统各部分的电压和频率, 并通过各种调节手段和装置自动(或手动)地连续调节有功或无功电源, 或者通过网络结构的变化和负荷的切换来保证供电质量。巨大电力系统在运行中的经济性越来越显得重要, 以我国目前的电力工业为例, 1987年的年发电量已超过4900亿kWh, 在实际运行中如能通过对一次能源的合理调度, 机组的合理启停和负荷分配, 减少网络的损耗等, 都能节约大量能源, 其经济效益是十分巨大的。巨大电力系统运行中的可靠性或安全性近年来已被认为是头等重要的问题。因为, 在电力系统中任一地点发生故障, 均将在不同程度上影响整个电力系统的正常运行。特别是在主要干线或发电厂附近发生故障时, 如不能及时而正确地处理, 将使事故扩大, 波及电力系统其它正常运行部分, 以致造成大面积停电, 其在政治、经济和人民生活上所造成的影响将是十分巨大的。六十年代以来, 国际上出现了多次大面积停电事故, 如1977年7月13日美国纽约电力系统在事故发生59min后全市停电, 前后延续25h, 影响九百万居民的供电。根据最保守的估计, 这次停电带来的直接和间接经济损失约三亿五千万美元。

如上所述, 电力系统在地域上分布辽阔, 甚至超越国界、洲界, 但在运行上却是联在一起的。同时, 电力系统又是生产、传输、分配、消费电能的连续过程, 是当代社会中最

复杂的工业过程，所以，电力系统的发展对运行的安全、经济和供电质量提出了越来越高的要求，人们再也不能应用电力系统发展初期所使用的简单的人工就地调节发电设备出力和电压，以及人工就地进行操作和单个设备的就地自动控制（如自动调节励磁、自动切除故障线路等）来达到对现代化电力系统运行的要求了。

为了合理监视、控制和协调日益扩大的电力系统的运行方式和及时处理影响整个系统正常运行事故和异常情况，人们在形成电力系统的最早阶段，就注意到电力系统的远程监视和控制问题，并提出必须设立电力系统的调度控制中心。在开始阶段，由于通讯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的时间才能掌握有限的代表电力系统运行状态的信息。为了保证电力系统运行的可靠性，在事故情况下，除了继电保护装置、电源和负荷的紧急控制装置外，差不多完全依靠调度人员和发电厂、变电所的运行人员根据这些有限的信息和运行经验，作出判断，再进行电力系统的调度和操作。在这一发展阶段，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。所以，在这一阶段，电力系统监视和控制的快速性和正确性都受到一定的限制。

随着电力系统的进一步扩大和复杂化，要求调度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，并作出正确的判断是很困难的，甚至是不可能的。运动技术和通讯技术的发展，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，在复杂的事故情况下，要求调度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，反而由于大量信息的出现，使调度人员不知所措，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调度控制中心的任务。因此，电力系统的运行实践向人们提出了使电力系统监视和控制进一步自动化的要求。

在六十年代，开始应用数字式运动设备来代替传统的模拟式运动设备，使信息的收集和传输技术在精度、速度和可靠性上都有了一个很大的提高，使调度控制中心能正确、迅速而经济地得到调度控制用的电力系统实时数据。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，使电力系统的监视和控制大为改观。在开始阶段，计算机与相应的运动装置及通讯设备组成的系统，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、自动出力控制及经济运行，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）。如上所述，自六十年代后期国际上出现很多大面积停电事故以后，电力系统运行的安全性已成为人们注意的中心。解决电力系统运行的安全问题，除了要从电力系统的结构、设备的质量及其维护、各种保护措施和自动装置等方面进行努力以外，关键在于加强全系统的安全监视、分析和控制，在出现任何局部故障后，能迅速处理和恢复正常运行，不使任何局部的故障扩大为全系统

的事故。同时，应尽可能做到“防患于未然”，即应在计算和分析当前运行状态的基础上估计出各种可能发生的故障，预先采取措施，以尽可能避免事故的发生和发展。就当前的技术水平而言，对电力系统的安全控制要求能做到自动控制功能和人工控制功能的合理配合，使运行人员成为整个电力系统控制系统的有机组成部分。这个控制系统不仅能综观全局，完整地、了解全系统当前的运行情况，同时在计算机及其外围设备的帮助下，能保证在正常和事故情况下及时而正确地作出控制的决定。这种包括SCADA功能、安全控制功能以及其它调度管理和计划功能的系统称为能量管理系统（EMS—Energy Management System）。利用这些先进的自动化系统，运行人员已从过去以记录为主的状态转变为较多地进行分析、判断和决策，而由计算机取代日常的记录事务。此外，近一、二十年来，由于电子计算机及其附属设备价格的相对大幅度下降，使电网调度自动化所花费的投资可在很短的时间内回收，例如，有人估计使用计算机后经济调度的效果，可使调度自动化所增加的投资在3~5年内回收，而防止事故的发生和扩大所减少的损失则是不可估量的。根据美国19家公司的统计，电网调度自动化的投资平均3.8年即可回收，而系统使用年限平均为13.7年。最少8年，最长达20年。因此，电网调度自动化是一项投资少、见效快、能提高电力系统安全运行水平并获得较大经济效益的有力措施。

目前世界上已有200多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。我国自六十年代末就在华北、东北、华东电网的调度控制中心开始应用电子计算机，并于1978年8月在京、津、唐电网第一次实现了用国产电子计算机对电网进行实时安全监视。近年来，我国在引进国外先进技术（包括设备）和自行设计与开发的基础上，各跨省电力系统及一部分省级和地区电力系统也进行了电力系统调度和控制自动化的研究和实践，不同程度地实现了信息的采集、传输、处理、监视、显示、打印等功能。在第七个五年计划期间（1986~1990年），要求6个大区调度所、23个省级调度所以及50个地区调度所实现不同程度的用计算机监视和控制的自动化调度系统。可以预期，在不远的将来，我国电力系统自动监视和控制水平将会很快接近和赶上世界先进水平，使我国电力系统的运行水平大大提高一步。

第二节 电力系统的运行状态和 调度控制的基本内容

在讨论电力系统的调度控制功能以前，先来分析一下电力系统运行的各种状态及其条件。在图1-1中示出了各种运行状态及其相互间的转变关系。

电力系统的运行条件一般可用三组方程式组来描述。一组微分方程式组用来描述系统元件及其控制的动态规律；两组代数方程式组则分别构成电力系统运行的相等和不等约束条件。所谓相等约束条件就是系统发出的总的有功和无功功率应在任一时刻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：

$$\sum_i P_{Gi} - \sum_j P_{Lj} - \sum_i \Delta P_i = 0 \quad (1-1)$$

$$\sum_i Q_{Gi} - \sum_j Q_{Lj} - \sum_i \Delta Q_i = 0 \quad (1-2)$$

式中 P_G, Q_G ——发电机或其它电源设备发出的有功和无功功率;
 P_L, Q_L ——各种负荷的有功和无功功率;
 $\Delta P_i, \Delta Q_i$ ——电力系统中各种有功和无功功率的损耗。

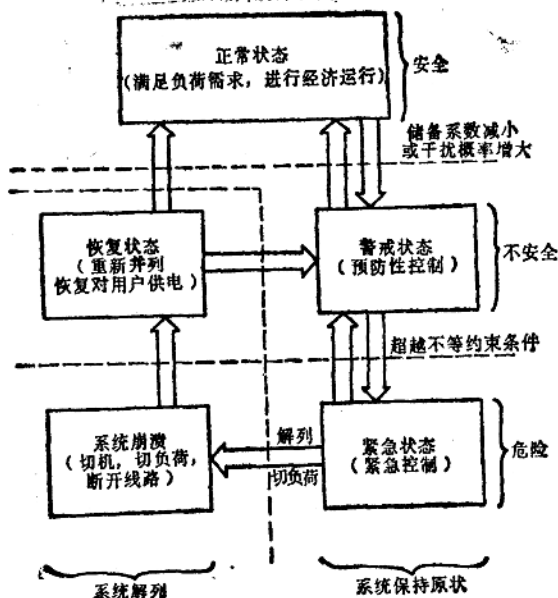


图 1-1 电力系统运行状态

所谓不等约束条件就是在系统正常运行条件下涉及系统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，

$$\left. \begin{aligned} U_{imin} &\leq U_i \leq U_{imax} \\ P_{Gimin} &\leq P_{Gi} \leq P_{Gimax} \\ Q_{Gimin} &\leq Q_{Gi} \leq Q_{Gimax} \\ S_{ijmin} &\leq S_{ij} \leq S_{ijmax} \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

式中 U_i, U_{imax}, U_{imin} ——母线电压及其上、下限值;
 $P_{Gi}, P_{Gimax}, P_{Gimin}$ ——发电机有功出力及其上、下限值;
 $Q_{Gi}, Q_{Gimax}, Q_{Gimin}$ ——发电机无功出力及其上、下限值;
 $S_{ij}, S_{ijmax}, S_{ijmin}$ ——线路 $i-j$ 的功率潮流及其上、下限值。

在本书中，我们将分下列五种电力系统运行状态来进行讨论。

一、正常运行状态

在正常运行状态下,符合所有上述约束条件,才表明电力系统能以质量(电压和频率)合格的电能满足负荷的用电需求,也就是说,电力系统中总的有功和无功出力能和负荷总的有功和无功功率的需求达到平衡,同时电力系统的各母线电压和频率均在正常运行的允许偏移范围内,各电源设备和输变电设备又均在规定的限额内运行。在这种状态下,发电及输变电设备均有足够的备用余量,使系统具有适当的安全水平,能承受正常的干扰(如无故障断开一条线路或发电机),而不致进一步产生有害的后果(如设备过载)。在正常的干扰下,系统能达到一新的正常运行状态。电力系统运行的目的就是尽量维持正常运行状态。

在正常运行状态下,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。运行的主要目的就是使发电的出力与负荷(包括线损)的需要相适应,同时,还应在保证安全的条件下,实现电力系统的经济运行。

二、警戒状态

电力系统受到灾难性干扰的机会并不多见,大量的情况是在正常状态下一系列不大干扰的积累效应,它使电力系统总的安全水平逐渐降低,以至进入警戒状态。现举下列几个方面的例子加以说明。

1. 发电机出力备用的减少 如计划外负荷的增加、燃料供应不足、发电机计划外的停役以及外界条件(如循环水温升高)等原因而使发电机出力降低;由于辅机故障而使发电机出力减少;变更检修计划等。

2. 减少输送能力 计划外的输电线或变压器的断开;负荷的不正常分配;由于高温等自然现象而减少送电能力等。

3. 干扰几率的增大 风暴、水灾、地震等自然灾害,以及社会治安等因素。

所以,在运行中要注意并尽早发现电力系统由正常运行状态向警戒状态的转变,应特别监视系统中的薄弱环节。

在警戒状态下,各种约束条件还是满足的,但系统的安全储备系数大大减少了,对外界干扰的抵抗能力削弱了。所以,在随后一个不能预测的干扰或渐进性的负荷增长条件下,就有可能使某些不等约束条件越限(如某些设备过载),而使系统的安全运行受到威胁和破坏。因此,在运行中应及时发现电力系统向警戒状态的变化,并应及时采取预防性的控制措施,使系统尽快恢复到正常状态,例如,增加和调整发电机出力,调整负荷的配置,切换线路等。

三、紧急状态

如果在进行各种预防性控制以前就发生一个足够严重的干扰(例如短路故障,切除大容量机组等),那末,系统将进入紧急状态,某些不等约束条件将受到破坏,如线路潮流或系统其它元件的负荷超过极限值,系统电压或频率超过或低于允许值等。这时,如果能及时而正确地采取一系列紧急控制措施,则仍有可能使系统回复到警戒状态。

四、系统崩溃

在紧急状态下,如果不及时采取适当的控制措施,或者这些措施不够有效,或者初始

的干扰及其所产生的连锁反应十分严重，则系统有可能失去稳定，并解列成几个系统。此时，由于出力和负荷间的不平衡，不得不大量切除负荷及发电机，从而导致全系统的崩溃。图1-2是发生故障后系统崩溃过程的例子。系统在这种状态下，相等及不等约束条件均遭到破坏。安全控制的功能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。

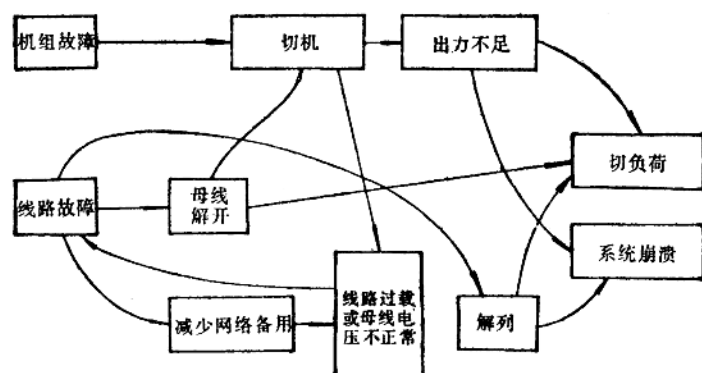


图 1-2 电力系统故障后系统崩溃过程的例子

五、恢复状态

在紧急状态后，借助继电保护和自动装置将故障区隔离，使事故停止扩大。待电力系统大体上稳定下来后，如果仍有部分设备运行于额定能力范围之内，或者若干设备已重新启动，则系统可进入恢复状态。这时，对于仍接在系统中的设备，相等约束条件已能满足，但部分用户停电，或者部分发电机或线路（变压器）处于断开状态，或者电力系统已分解成几个部分。这时，应采取各种恢复出力和送电能力的措施，迅速而平滑地对用户恢复供电，使分开的系统重新并列。根据系统的实际情况，从这种状态可恢复到正常状态或警戒状态。

目前，对电力系统的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能是一种分类的方法，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叙述打下基础。

电力系统调度控制的基本任务，就是根据电力系统实时的运行状态和相应的运行目标提出调度控制任务和措施。在上述每种电力系统运行状态下，都将提出不同的调度控制目标。在电力系统运行中，一般有下列几个主要的目标：

- （1）满足用户供电需要，包括供电的数量和质量（电压和频率）；
- （2）系统安全性，保证连续的系统功能；
- （3）最小成本（发电和传输）；
- （4）环境保护（使对环境和生态的影响最小）；
- （5）节约燃料和其它资源。

在不同的电力系统运行状态下，对上述各调度控制目标的要求是不同的，所以电力系统调度控制可以讲是一个随电力系统状态变化的多目标优化问题。上述五个目标是不可相比的，有时彼此还是矛盾的，在不同的运行状态下，目标的优先级也是不一样的。

在正常运行状态下，满足用户供电需求是一个硬性的约束条件，但是在紧急状态下，当不能满足供电需要时，要有选择地切除一部分不重要的负荷，以保证重要负荷的供电（如交通、医院、连续生产的工厂）和全系统的安全。

几十年来，以最小成本为目的的经济运行一直是一个重要的运行目标。六十年代后期，由于电力系统的不断增大，出现了前所未见的现象，安全性受到重视。运行人员意识到加在经济运行上的安全性限制，例如在安排出力计划时应保证每一地区的最小出力和避免主要干线的过载。在正常状态下，由于一般有足够的出力，所以主要的目标是受安全约束的最小成本。在实际的正常运行条件下，安全性目标可能是很起作用的，也可能不甚引人注目。但在警戒状态下，安全约束就很重要了。在出力不足时，就需要注意受安全和燃料约束的最大供电负荷。在紧急状态下，需要使全系统得到最大的安全性，而在解列状态，则要保护设备。在这些情况下，最小发电成本将不是主要的目标。

在一些工业发达国家的现代化调度控制中，已提出电力系统运行对环境和生态的影响问题，这就更加复杂化了。环境影响问题主要应在设计阶段考虑，但在运行过程中也很有作用。因为发电厂产生相当数量的固体和气体废料，影响空气和水的污染，所以要控制诸如：烟（卤）气成分（ SO_2 、 CO_2 、 NO_x 、粒子含量）、温度、扩散速度；冷却水的流出温度和流速；噪音等。要注意的是上述量的瞬时水平或速率，或者平均水平。

节约燃料是与燃料的供应条件、价格等因素有关，并与国家的能源政策有关，例如由于燃油的限制而改为烧煤等。

上述各种运行目标在各种运行状态中的要求仅仅作例子，但足以表明电力系统状态及其相应的运行目标的可变性。

电力系统的调度控制就是在电力系统的不同状态下为达到相应的运行目标而进行的工作，其基本内容可分为三个方面。

（1）从几个小时到几个月的短期运行计划，是在考虑出力资源的可用性、负荷预测、出力计划和机组开停计划、交换功率计划、无功功率计划、网络配置和开关操作计划等条件下制订的调度计划，其目的是在保证供电质量及系统安全可靠的前提下，使系统的运行费为最少。

负荷预测应考虑社会工农业发展趋势及天气预报等。

能源资源的可用性包括燃料的供应条件，价格的变化，水源情况等。

在运行计划中还要考虑：负荷分布及网络的限制，检修计划，机组的可用率及出力容量的限制，在有水电厂的系统中还包括水流来量的预测，环境限制，所需调节容量积聚的快慢等。

（2）瞬时运行是为了实现预定的计划，并监视和控制电力系统，使符合实时的需要，包括对出力、负荷、电压的监视（包括上、下限值的校核），以及保护系统的动作、设备的损坏等的监视，通过操作和控制，调整和重新安排出力及网络结构。

要保证瞬时的功率供需平衡,使电能保持额定频率,这也叫频率控制,是系统稳定运行的必要条件。

为保证电力系统的电压水平,控制中心要监视电压并调节或操作切换无功功率电源(如发电机励磁系统,并联电容器等)。

控制中心的作用除正常监视有功和无功功率负荷外,要准备系统经受可能出现事故。每一个电力系统均有各自的设计判据和安全运行准则,一般要求系统能承受:①发电机组的断开;②输电线或变压器的断开;③瞬时故障。

在故障情况下,控制中心的运行人员应采取相应的措施,如改变出力,变更网络结构等。在故障消除后,则要迅速恢复系统的正常供电。

(3)运行报表及事故处理。前者是为了向运行人员及有关机构提供运行报告和统计资料与数据。事故记录可按事故发生的时间及性质分类,使运行人员能及时确定故障发生的地点及其原因。此外,事故数据的记录(如电压、潮流)有助于事故后的系统恢复,以及事后的分析。

第三节 电力系统调度控制自动化系统的基本结构

以计算机为中心的电力系统调度控制自动化系统的基本结构如图1-3所示。在这个系统中可根据其完成功能的不同,分为信息收集和执行业子系统,信息传输子系统,信息处理子系统和人机联系子系统。今分别介绍如下。

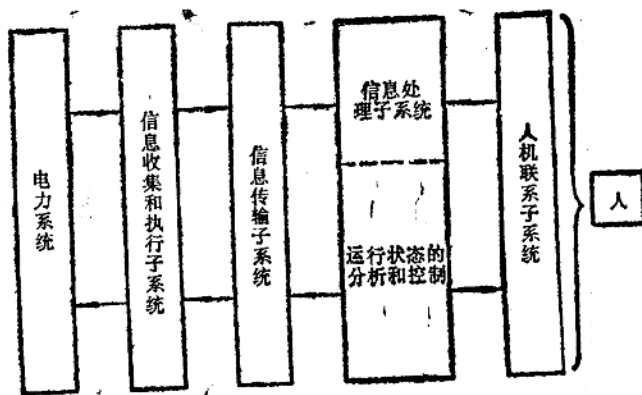


图 1-3 电力系统调度控制自动化系统的基本结构图

一、信息收集和执行业子系统

信息收集和执行业子系统的作用是在电力系统中各发电厂、变电所或线路上收集各种表征电力系统运行状态的实时信息,并根据运行需要向调度控制中心提供各种监视、分析和控制电力系统所需要的信息。电力系统的运行状态(如频率、电压、功率潮流、断路器状态等)将通过运动装置传送到调度控制中心。在现代化的电力系统自动控制系统中还应包

括与电力系统运行有关的周围环境的信息，如温度、湿度、云层复盖度等。所有这些信息可以是直接由远动装置所在的厂（所）收集的，也可以是下一级控制中心转送来的信息。如果在一些厂（所）设有以微型计算机（或微处理机）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信息。

在这个子系统中，同时接受上级控制中心根据运行的需要而发出的操作、调节或控制命令，例如开关操作，启停机组，调节功率等。在接到命令后，或者直接作用于操作机构，或者按一定的规律将命令转发给各有关装置的操作和调节机构。

本子系统属电力系统的厂（所）基础自动化工作，量大面广，最好是在建设发电厂或变电所的过程中加以考虑。如果没有坚实的基础自动化工作，整个电力系统的调度控制自动化系统好象没有耳、目、手、脚的人一样，是无法正常运转的。

二、信息传输子系统

由远动装置收集到的信息应及时通过传输系统传送给调度控制中心。在电力系统中主干通道的传输手段一般为电力线载波和微波二种。对电力系统中各支线通道则应根据具体情况而定。对于离开主干通道距离较远或者远离控制中心的监视点可用电力载波或微波线路连接；在主干通道附近的监视点可采用电缆（如光纤、同轴电缆等）；对那些离主干通道很远的、地理和气象环境都不好的电网终端监视点，可租用邮电部门公共话路来解决，并选最短路径接入电网内通道。由于电力系统在地域上分布辽阔，所以信息传输系统的投资很大，同时最易受环境、气候条件及其它意外事故的影响。因此，对这个子系统应充分考虑它的经济性和可靠性，同时要保证传输信息的速度及准确率。

三、信息处理子系统

这是整个自动化系统的核心，以电子计算机为其主要组成部分。对采集到的信息需要进行加工处理，因为在实时信息中不可避免地包含有误差（测量误差、传输误差、外界干扰等），加上设备条件的限制，不可能收集到所有需要的运行参数，所以要利用收集得到的多余信息，通过状态估计等技术，消除误差，改进原始信息，使得到精确和完整的运行参数，并将其存贮在反映电力系统实时状态的数据库中。数据库将向所有电力系统监视和运行控制计算提供统一的正确数据。在信息处理过程中，还可根据预先设定的参数上、下限值，校核实时信息。当超出上、下限时，将通过故障显示或报警来引起运行人员的注意，以便及时采取相应的控制措施。

为了预报电力系统近期和远期的未来运行状态，可以根据数据库中保存的历史记录数据及实时信息，进行未来的负荷预测计算，为未来的经济运行、安全分析及编制计划（发电计划、检修维护计划、水库调度计划等）提供依据。

运行状态的分析计算为运行人员作出控制决策或自动控制提供依据。这种分析计算主要有电能质量、经济运行和安全性三类。

（1）电能质量分析计算的功能之一是控制发电厂出力的分配，以达到维持系统频率为额定值和联络线的交换功率为给定值。这种过程大约几秒钟要执行一次，计算的结果将对所控制的机组发出增加或降低出力的控制信号。

另一种电能质量分析计算的功能是实现电压和无功功率的自动控制，它是通过调节发

电机励磁、变压器分接头和并联电容器（或电抗器）来调节电压，并使线损为最小。在实际运行中，定期地校验电压，当发现电压偏移超出规定范围时，就去启动控制电压的计算，还可以定期地进行最小线损计算和控制。

（2）经济调度计算一般几分钟进行一次，以确定各发电厂的经济负荷分配，使全系统的发电成本为最小。在有水电厂和火电厂的电力系统中还应考虑水、火电厂的联合调节问题。

（3）运行状态安全性的分析包括安全监视和安全分析两种功能。安全监视的功能是在线识别和显示电力系统的实际运行状态（正常、警戒、紧急、恢复和崩溃状态）。最一般的监视方法是校核有关运行参数的上、下限，以确定是否临近危险的运行方式。在操作后（操作信号可由运行人员通过人机联系设备直接给出，或者通过下一级调度中心或发电厂、变电所运行人员执行），可以通过安全监视来验证操作的正确性。

安全分析的第一个功能是确定电力系统当前运行状态是安全的，还是不安全的。预防性安全分析就是在一组假想事故分析（例如在断开一台发电机后）的基础上，确定电力系统的安全性。在安全分析中可分为静态的和动态的两种。目前一般仅限于静态的安全分析，用以校核设备的过负荷及频率和电压水平的偏移，以避免它们超过容许值。

安全分析的第二个功能是确定使电力系统保持安全的校正措施，以便在发生故障的情况下提出处理的对策，在故障后的恢复期间提出合理的恢复步骤。

除了上述三大类信息处理的计算外，计算机系统还用于完成日发电计划编制、检修计划编制、统计计算等工作。

四、人机联系子系统

这个子系统将采集到的信息，经过加工处理，通过各种显示设备、打印设备和其它信息输出设备，为运行人员提供完整的电力系统实时状态信息。运行人员可以根据这些信息和预定的目标，通过分析、综合和判断后作出决策，然后对控制设备进行操作或发出命令，通知控制系统执行，以实现人对电力系统的控制，这就是人机联系。通过人机联系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，使运行人员在充分利用现代化监视、控制手段的基础上充分发挥其对电力系统的调度和控制作用。

电力系统自动监视和控制系统中的人机联系设备，一般包括：模拟盘，图形显示设备及其控制台和键盘，有声报警，记录器（仪），制表或图形打印设备等。特别是，图形显示设备能快速地显示各种图表、曲线，并通过其键盘方便地进行人机对话。所以，目前这种设备已成为电力系统运行中最有效的人机联系设备。

虽然我们可以将整个电力系统调度控制自动化系统分成上述四个子系统来讨论，但是在实际运行中只有把注意力放在整个系统上，才能充分发挥调度自动化系统的全面作用和其实用性，缺少任何一部分系统就不是完整的，就不能正常运转。例如，如果只注意计算机系统的配置，而忽视了其它子系统的配置，那末，计算机系统所取得的信息，不是数量上不足，就是精度不完全达到标准，因此人机联系子系统所提供的信息就不能作为生产调度或统计工作的依据。

第二章 电力系统调度控制自动化系统

第一节 电力系统的信息收集和执行系统

在一个现代化的电力系统中，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、可靠地送到调度控制中心，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，由于通讯等技术装备的限制（如只有电话），调度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）和不一致性的（不是同一瞬间所取得的信息）。调度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，再进行调度和操作。在这一发展阶段，电力系统中很大一部分监视和控制的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就地完成的。在事故情况下，除了继电保护装置、电源和负荷的紧急控制装置外，差不多全是依靠运行人员的判断和人工操作的。所以，在这阶段，电力系统安全监视和控制的快速性和正确性都受到很大的限制。

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，而且往往因延误时机和处理错误，导致事故的扩大。

远动技术和通讯技术的发展使这种要求成为现实和可能。远动装置位于被选定的发电厂（所）中，完成预定的信息收集功能，是与电力系统直接相联的一部分。图 2-1 示出了利用远动装置的信息收集过程。

电力系统自动监视和控制所需的信息，随着电力系统自动化水平的不同而有所差别。一般在电力系统中的各发电厂、变电所母线及线路两侧设

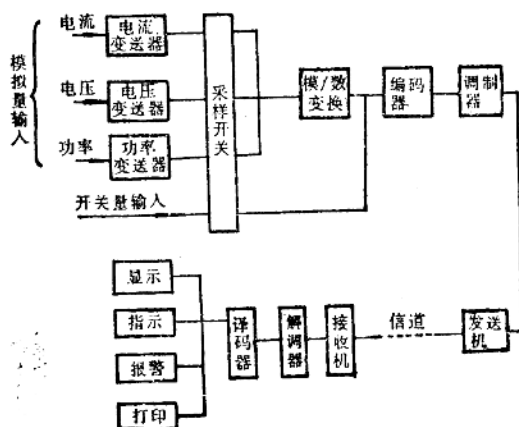


图 2-1 电力系统信息收集系统

有遥测点，用来测量母线电压、频率和通过线路（或变压器）及注入母线（发电机出力或负荷）的有功和无功功率，有时也测量通过线路（或变压器）的电流。在某些线路上，也测量线路的功率角。这些测量值或者是周期性的扫描收集（全部量测量按固定周期统一扫描，或者将量测量分成不同扫描周期的组），或者根据每一量测量的变化情况进行信息传送，即设定一变化范围，当量测量与上次收集的值相比超过这一规定的变化范围时才进行第二次的收集，后者常用于低速信道的情况。

发电厂、变电所的电量信息，可用脉冲计数器得到，它有二个寄存器，一个是连续计数，另一个是时间寄存器，根据本身的时钟或请求，将计数器中的信息传送出去。

在需要进行水库调节的电力系统中，还应有水库水位等非电测量的信息。

在一些先进的调度控制中心，为了预测未来的负荷，分析自然现象对运行安全性的影响，还需要收集各地区的气象信息（如雨量、风力、温度等）。

在表2-1中列出了电力系统运行中所需的主要遥测信息。

表 2-1 电力系统运行所需主要信息

传 送 方 向	类 别	信 息 名 称
发电厂和变电所或 下级调度控制中心 ↓ 调度控制中心	遥 测 信 息	线路潮流(有功、无功功率)或电流(包括联络线功率) 变压器潮流(有功、无功功率)或电流 发电机(发电厂)出力(有功、无功功率)，负荷的有功、无功功率 母线电压(电压控制点) 变压器分接头位置 频率(每一可能解列的部分) 功率角 水库水位 气象信息(温度、雨量等)
	通 信 信 息	断路器合、分状态 隔离开关合、分状态 继电器和自动装置动作状态 发电机组开、停状态 发电机出力上、下限，变压器分接头上、下限等设备状态
	其 它	通信变位 遥测变化(变化到一定程度才传送) 事件顺序记录和各类报表 转发厂(所)送来的信息 对时信号 厂(所)端设备的某些限值数据和可变参数 调度控制中心要求执行任务的结果

为了进行电力系统结构状态的监视，检测电力系统结线的变化，需要有表示各断路器和隔离开关合闸和分闸状态、机组的开停状态等的遥信信号。在事故情况下，为了及早了解事故的性质、地点和范围，使运行人员能正确判断和及早处理事故，以免其扩大，也将主要设备继电保护装置的动作信号传送到控制中心。一般在出现状态变化时，才传送遥信信号。在控制系统启动或重新启动时则要进行一次完整的扫描。某些系统中也采用周期

性收集所有遥信信号的方案。表2-1中也示出了电力系统运行所需的主要遥信信息。

遥测量经相应的变送器（如电流变送器、电压变送器等）变换成标准的直流电压信号（0~5V）后，送入远动装置。在早期的模拟式远动装置中，直接将直流电压信号调制或便于传输的交流信号，然后经发送机将信息通过信道（如电话线、光导纤维、电力载波或微波信道）传送到控制中心。在接收端，接受机将收到的信息解调后，就可用表计来表示遥测量；遥信信号则在模拟盘上用灯光信号表示，配合系统模拟图，供运行人员了解全系统的实时状态。

远动装置不仅把信息收集起来，经过处理，为运行人员进行电力系统安全监视提供可靠而完整的信息，同时在运行人员或计算机系统作出决策后，将控制和调节信号通过信道传送到各发电厂（或变电所）的被控对象。表2-2中列出了电力系统运行中主要的控制和调节信息，其中改变设备状态的控制命令（如断路器的合闸/断开命令，机组的启停命令）称作遥控信息，而连续或断续改变设备运行参数的信息（如改变发电机出力）称作遥调信息。遥控和选择测量有相似之处，为了避免误操作，要求遥控信息的传递非常可靠。因此，对于这类信息的传送采用“回送复核”方式，以提高操作的可靠性。例如，要断开某一断路器，控制中心先发“断开”的性质码和该断路器的地址码。接收端在收到这个遥控命令后，并不立即执行，而是将这命令先寄存下来，同时向控制中心回送一个表示收到的回答信号。控制中心将这个回答信号与原来发出的命令核对无误后，再向接收端发执行命令，去断开该断路器。

表 2-2

电力系统运行的主要控制和调节信息

传 送 方 向	类 别	信 息 名 称
调度控制中心 ↓ 发电厂和变电所或 下级调度控制中心	遥 控 信 息	断路器操作命令 隔离开关操作命令 机组启动或停止等操作命令 投入或切除并联电容器的操作命令
	遥 调 信 息	发电厂或机组有功出力的给定值 发电厂或机组无功出力的给定值 变压器的分接头值
	其 它	对时信号 索取和查询各种信息的命令 厂(所)的远方诊断所需信息 厂(所)远动装置软件的某些控制和计算参数

通常遥控表示执行个别控制命令。某些先进的控制系统中，可执行顺序控制，就是发一个命令后，可按事先规定的次序执行一系列操作，并包括相应的安全校核和时滞，例如在倒换母线时的一系列操作。

遥调一般有遥测信息的反馈，因而不采用回送复核方式。接受端收到命令后，就可按地址码选好调节对象，并按给定值进行调节。

遥控和遥调信息可以是人工给出的，也可自动按事件或规定时间启动。闭环控制是完

全自动执行命令,如本书第五章中的自动调频,它的作用是调节发电机出力,以满足频率值和维持联络线功率。根据测得的系统频率、发电机出力和交换功率,可计算出合适的控制量,传送到各发电厂。

为了提高信息传输的可靠性和速度,目前广泛采用数字式远动装置。例如,遥测量在进入远动装置后,要经过模数变换,就是将模拟量变成二进制的数字量。对于遥信号,每一位二进制数刚好表示一个具有双位特征的设备状态,如“1”表示断路器的分闸,“0”表示断路器的合闸,这样一个十位二进制数就可以表示十个不同断路器的状态。

远动装置从最初的晶体管和后来的集成电路组成的布线逻辑单元,到今日的以微处理机(有内存贮器及逻辑功能)为基础的灵活性单元,简称远方终端(RTU)。

按照上述对远动装置的要求,远方终端的基本功能是在厂(所)集中收集信号、模拟量及数字量,也用来收集和累计电量计算的脉冲信号。它同时可以接受上级控制中心的命令,输出开关控制信号、增减控制信号或调节设备的整定值,并返回已完成操作的信息。由于远方终端有数据存贮和处理功能,所以可以对收集到的数据进行不同方式的计算、处理(如功率总加、越限报警)和传递。远方终端如备有足够的内存,就可以将一次扫描周期内的状态变化记录下来,在下次扫描中表示出来。事件顺序记录(*Sequence-of-events Recording*),就是将事故发生前及事故后一段时间内的重要参数记录下来,供事故后分析用。例如,相差距离保护和接地距离保护同时动作时,其时间差很小,当需要知道哪个先动作,是否是正确的动作顺序时,可在远方终端中存贮发生的顺序及时间,并在下一次扫描中传送给控制中心。它可以识别几毫秒级的时间差。另外,数据排队功能可使远方终端能以非同步方式从电力系统和控制中心接收数据。

进一步的发展可以将就地的调节器功能引入远方终端,这就是厂(所)的计算机系统了,同时可配置显示设备(或模拟盘)和其它外围设备(如打印机),可实现就地的人机联系,具有部分或全部的SCADA功能。

远方终端一般的响应时间:信号改变为1~2s,数据值为2~10s。可以有不同的方法来收集数据,如全周期收集(完全扫描),不同速度的扫描以及对局部数据的扫描。在事故情况下当信息拥挤时,为了减少传输网络的负荷,适应信道的有限容量,可以对不同信息排定优先级。

远方终端的硬件设备可从小的只有几个输入/输出的单板远方终端大到有几千个输入/输出的以微处理机为基础的大型远方终端。不同的远方终端其功能也是不一样的。远方终端的硬件包括:中央处理单元(CPU),内存,输入/输出接口,通讯接口和电源(图2-2)。这些元件可以有各种不同的配置,其最终的结构与远方终端的规模和要实现的要求及功能有关。小的远方终端一般用一个微处理机和固定数目的输入/输出,或者可以扩充的输入/输出。中等和大型远方终端一般做成模块式,属于模块化和面向总线的硬件结构,如图2-3所示。它的优点是功能的适应性强,随着远方终端功能的变化可以增加硬件。在总线系统中,很容易增加输入/输出数目。

远方终端的软件与其功能有关。简单功能的远方终端,其软件可固定在PROM(可编程序只读存储器)中。在运行时,从PROM中读出程序,给远方终端以固定的功能内容。