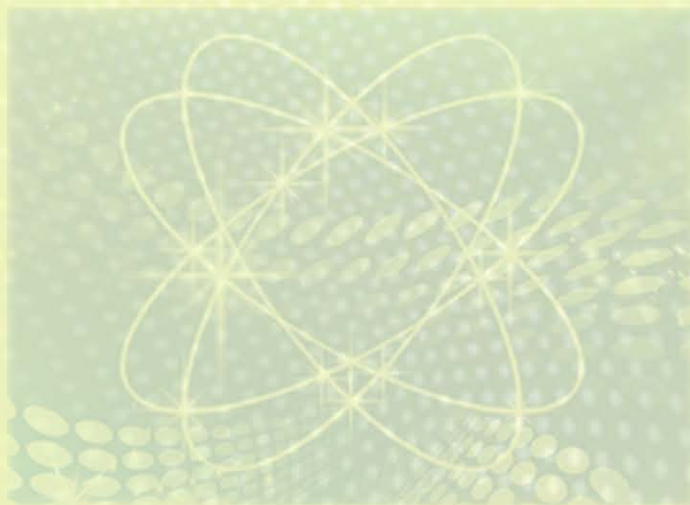


电力系统自动化



前 言

现代社会对电力的依赖，决定了电力系统在国民经济中的地位，社会对电力系统运行的稳定性、安全性、经济性和可靠性要求也越来越高。现代的电力系统规模巨大、装备先进，运行管理离不开技术先进、功能完善的自动化系统。因此，电力系统自动化是电力系统中的重要环节。随着社会经济的发展，电力系统自动化在现代电力系统运行管理中的作用越来越重要，其发展趋势是在电力系统的各个方面实现自动化技术的综合。目前，电力系统自动化正在向着功能更加强大的、更高层次的综合自动化技术方向发展。同时，电力系统学科也得到更新、丰富与发展，对电力技术工作者的要求也越来越高，各电力部门急需大量的既懂电力知识又懂计算机、通信技术等方面的综合性人才。

本书作为电力系统及其自动化专业的教材，内容安排力求使学生对电力系统自动化有一个较全面的了解，并根据当前高等教育注重多方面综合、宽口径发展的教学需要，紧密结合电力系统的最新发展技术来安排和编写，是融电力系统知识、自动化技术、发电机的自动控制为一体的综合自动化课程。

在本书的编写过程中，对书中引用的有关资料的作者，在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，加之电力系统新技术发展之快，书中错误和不足之处在所难免，敬请专家和读者批评指正，作者不胜感激。

编 者

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 电力系统自动化的重要性	1
1.2 电力系统自动化的主要内容	2
1.3 电力系统运行状态及调度控制	4
1.4 电力系统自动化发展趋势	10
第 2 章 电力系统测控装置的基本原理	14
2.1 概述	14
2.2 直流采样方式原理	17
2.3 交流采样方式与算法	20
2.4 模拟量的采集与处理	25
2.5 开关量信息采集系统	42
2.6 脉冲量 / 数字量输入电路	48
第 3 章 发电机的自动并列原理	52
3.1 概述	52
3.2 准同期并列的基本原理	53
3.3 数值角差、整步电压与越前时间	58
3.4 自动准同期装置举例	65
第 4 章 电力系统频率和有功功率的自动控制	79
4.1 电力系统的频率特性	79
4.2 电力系统频率和有功功率控制的必要性	80
4.3 电力系统频率和有功功率自动控制的基本原理	81
4.4 电力系统中有功功率负荷的优化和分配	93
第 5 章 变电站综合自动化	98
5.1 变电站自动化概述	98
5.2 变电站电压、无功综合控制子系统	103
5.3 变电站备用电源自动投入装置	110
5.4 变电站综合自动化系统的数据通信系统	113
5.5 变电站综合自动化	123
5.6 变电站综合自动化设计实例	135
5.7 配电网的构成及其自动化	146
5.8 负荷控制技术	155
5.9 配电网综合自动化	158
第 6 章 电力系统调度自动化	164
6.1 概述	164
6.2 电力系统调度的主要任务	171

目 录

6.3 电力系统调度自动化的主要内容	173
6.4 自动发电控制	176
6.5 电网调度自动化系统实例	182
第 7 章 电力系统安全控制	186
7.1 概述	186
7.2 电力系统运行状态的安全分析	189
7.3 各种运行状态的安全控制	192
7.4 电力市场环境下的安全稳定控制	202
参考文献	205

第 1 章 概述

1.1 电力系统自动化的重要性

电力系统是指由进行电能生产、变换、输送、分配和消费所需的发电机、变压器、电力线路、断路器、母线和用电设备等各种设备按照一定的技术和经济要求有机组成的统一整体。为了确保电力系统安全、优质、稳定、经济地运行，还存在一个对以上一次系统进行监视、控制、保护、调度的辅助系统，即二次系统。它由自动监控设备、继电保护装置、远动和通信等设备组成。

电力系统自动化是电工二次系统的一个组成部分，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、经济地运行并具有合格的电能质量。

1.1.1 电力系统的复杂性

电力系统同其他工业系统相比有着明显的特点，主要有以下几个方面。

(1) 电能不能像其他工业产品那样大量储存，而是即用即发。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。

(2) 电能供应十分重要，电力系统一旦发生事故，就会在短时间内影响到大量电力用户，造成很大的经济损失。

(3) 暂态过渡过程十分迅速，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同一瞬间完成的。电力系统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) 电力系统结构复杂而庞大，现代电力系统跨越几十万甚至几百万平方公里地域，它的高低电压输、配电线路纵横交错，各种规模的发电厂和变电站遍布各地，连接着城乡的厂矿、机关、学校以及千家万户。

电力系统运行控制的目标，就是始终保持整个电力系统的正常运行，安全经济地向所有用户提供合乎质量的电能。同时，在电力系统发生偶然事故的时候，能够迅速排除故障，防止事故扩大，并尽快恢复电力系统的正常运行。

1.1.2 电力系统自动化的重要性

第一，由电力系统以上特点可知，电力系统中，被控制的发、输、变、配电设备很多，通过不同电压等级的电力线路连成网状，使整个系统在电磁上相互耦合连接。因此，电力系统中任何一点发生故障，都会在瞬间影响和波及全系统。这就要求电力系统要有快速控

制的能力。显然，依靠人工监视是做不到这一点的，必须借助于自动监视控制装置来完成，也就是借助各种自动装置和自动化系统才能保证电力系统的稳定运行。

第二，电力系统需要监视和控制很多参数，包括电力系统频率、节点电压、线路电流、功率等。因为用电设备所消耗的有功功率和无功功率总是随机变化的，所以需要电力系统内的发电机组和无功补偿设备发出的有功功率和无功功率随之变化。显然，监视和控制成千上万的运行参数必须要有整个系统或局部系统的自动化装置。

第三，电力系统发生故障时，实质上对电力系统自动控制系统会产生一个扰动。随着电力系统故障的随机发生，相应就会有故障切除。也就是说，在扰动的同时，会伴随被控对象结构的变化，这就增加了控制的复杂性。因此，需要借助自动化系统对电力系统进行实时、精确、快速的控制。

总之，电力系统安全、优质、经济地运行单靠发电厂、变电站和调度中心运行值班人员人工监视和操作是根本无法实现的，必须依靠自动化系统才能实现。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安全运行的。

1.2 电力系统自动化的主要内容

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。从不同侧面可以将电力系统自动化的内容划分为几个部分。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、发电厂综合自动化、变电站综合自动化和配电网综合自动化。发电厂综合自动化又分为火电综合自动化和水电综合自动化。从电力系统自动控制的角度又可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等。

1.2.1 电力系统调度自动化

电力系统调度自动化的功能可概括为：调度整个电力系统的运行方式，使电力系统在正常状态下安全、优质、经济地向用户供电，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并恢复正常供电。电力系统调度自动化的任务是综合利用计算机、远动和通信技术，实现电力系统调度管理自动化，有效帮助调度员完成调度任务。可概括为遥测、遥信、遥控、遥调、遥视这“五遥”功能，或称为 SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) 系统。

电力系统调度自动化的特点是统一调度，分层控制。电力系统是一个庞大的产、供、销电能的整体。根据电力生产的特点，电力系统中的每一环节都必须在调度机构的统一领导下，随用电负荷的变化而协调运行。我国电力体制实现厂网分开，已成立国家电网公司和南方电网公司。

所谓电力系统分级管理，是指根据电力系统分层的特点，为了明确各级调度机构的责任和权限，有效地实施统一调度，由各级电网调度机构在其调度管辖范围内具体实施电网管理的分工。我国实行电网运行，其管理体制是五级分级调度管理。如图 1-1 所示。

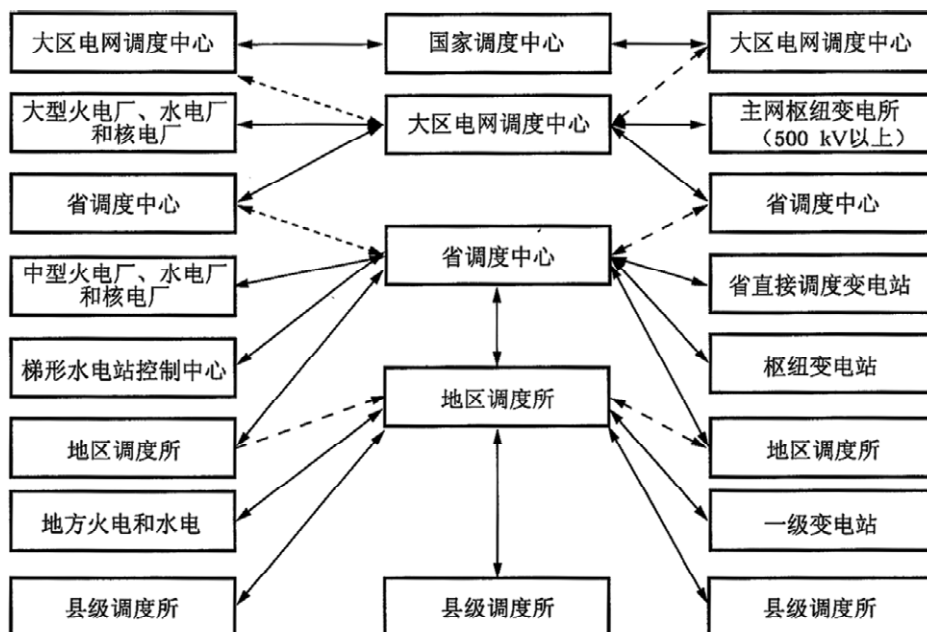


图 1-1 五级调度管理图

1.2.2 发电厂综合自动化

对各类发电厂的运行实施自动控制是现代电力系统的必然要求。发电厂自动化系统主要包括动力机械自动控制系统、自动发电量控制（AGC）系统和自动电压控制（AVC）系统。

针对各个发电厂的类型不同，其控制要求与控制规律也大不相同。火电厂的动力设备主要为蒸汽机、燃气轮机、内燃机等。因此，火电厂自动控制系统主要包括锅炉自动控制系统、汽轮机自动控制系统、机炉协调主控系统、辅助设备自动控制系统、计算机监视系统等。而水电厂主要控制的是水轮机、调速器、闸门启闭及水轮发电机励磁等。因此，水电厂自动控制系统主要有水轮发电机组控制系统、水轮机调速控制系统、水电厂自动发电控制系统、水电厂计算机监控系统等。一般而言，水电厂的自动化程度比火电厂要高。

1.2.3 变电站综合自动化

变电站自动化是在原来变电站常规二次系统基础上发展起来的。因变电站设备比较简单，其自动化在较长时间没有得到重视，运行时主要依靠人工监视和操作。为保证电气设备安全、可靠、经济地运行，设置了由集成电路或有触点的继电器装置构成的二次回路对变电站设备进行控制和保护，这些回路被称为“变电站常规二次系统”。

随着微机技术在电力系统调度和电厂自动化中的应用，逐渐将微机技术引入变电站二次系统中，在变电站监控、控制、远动、继电保护等方面实现了微机化，称为“变电站自动化”。

随着计算机技术的进一步发展，20世纪70年代各个发达国家相继开展了将变电站监控、控制、远动、继电保护等功能进行统一考虑，构成一个统一计算机系统的研究工作。

经过 10 年努力，于 80 年代末进入了工业实用阶段。这就是“变电站综合自动化”。

变电站常规二次回路包括控制系统、信号系统、测量系统、同步系统和二次回路电源；变电站自动化包括微机监控系统、微机远动系统两部分；变电站综合自动化将变电站自动化推向了一个更高的阶段，其功能包括变电站远动、继电保护、开关操作、测量、故障录波、事故顺序记录和运行参数自动打印记录等。

1.2.4 配电网综合自动化

配电网是从输电网接受电能，再分配给各电能用户的电力网。配电网自动化是电力系统自动化的一个重要组成部分。配电网自动化是利用计算机、电子和通信技术，对配电网和用户中的设备以及用电负荷进行监视、控制和管理。

配电网自动化包括配电网调度自动化系统、配电变电站自动化系统、配电线路自动化系统和用户自动化系统等。一般来说，配电网自动化的功能有以下 7 方面：数据采集与控制（SCADA）、负荷管理、电压 / 无功综合控制、可靠性管理、信息管理、配电网计算机图示系统、安全和节能。

1.3 电力系统运行状态及调度控制

由于电力负荷始终是变动的，而且系统故障具有不可预见性，为了有效地控制电力系统，需要将电力系统的运行状态进行分类，以便在不同运行状态时对电力系统实行控制。电力系统的运行状态可以用一组包含电力系统状态变量（如各节点的电压幅值和相位角）、运行参数（如各节点的注入有功功率）和结构参数（网络连接和元件参数）的微分方程组描述。目前，电力系统运行状态尚没有严格定义，一般将其分为正常状态、警戒状态、紧急状态、崩溃状态和恢复状态。

1.3.1 电力系统的正常运行状态和非正常运行状态

从客观上讲，电力系统的运行状态可分为正常状态和非正常状态。电力系统正常运行时，运行参数在允许的上、下限值之内。当有一个或几个运行参数在允许的上、下限之外时，电力系统就处于不正常状态了。正常状态可用数学式描述，即

$$f_{\min} \leq f \leq f_{\max} \quad (1-1)$$

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad (1-2)$$

$$P_{Gi,\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,\max}$$

$$Q_{i,\min} \leq Q_i \leq Q_{i,\max} \quad (1-3)$$

$$S_{ij,\min} \leq S_{ij} \leq S_{ij,\max}$$

式中：

f 、 f_{\max} 、 f_{\min} ——系统频率及其上下限值；

U_i 、 $U_{i,\max}$ 、 $U_{i,\min}$ ——母线 i 的电压及其上、下限值；

P_G 、 $P_{Gi,\max}$ 、 $P_{Gi,\min}$ ——第 i 台发电机有功出力及其上、下限值；

Q_i 、 $Q_{i,\max}$ 、 $Q_{i,\min}$ ——第 i 个无功电源无功出力及其上、下限值；

第1章 概述

S_{ij} 、 $S_{ij,max}$ 、 $S_{ij,min}$ ——节点 i 和 j 之间线路或变压器的功率潮流及其上、下限值；
 i 、 j ——发电机组或电压结点的序号。

如果式 (1-1) ~ 式 (1-3) 成立，则电力系统运行正常，否则就不正常。式 (1-1) ~ 式 (1-3) 也称为电力系统运行的不等式约束条件。

式 (1-1) ~ 式 (1-2) 是通过调节系统内有功和无功输入使之与系统内所消耗的有功和无功保持平衡实现的。将其用数学式描述，即

$$\sum_{i=1}^n P_{Gi} = \sum_{j=1}^m P_{Lj} = \sum_{k=1}^l P_{Sk} \quad (1-4)$$

$$\sum_{i=1}^n Q_i = \sum_{j=1}^m Q_j = \sum_{k=1}^l Q_k \quad (1-5)$$

式中：

P_{Gi} 、 Q_i ——系统内第 i 个电源发出的有功功率和无功功率；

n ——系统内电源的个数；

P_{Lj} 、 Q_{Lj} ——系统第 j 个负荷在频率满足式 (1-1)、电压满足式 (1-2) 时所消耗的有功功率和无功功率；

m ——系统内负荷的个数；

P_{Sk} 、 Q_{Sk} ——系统内第 k 个输、配电设备在满足式 (1-1) 和式 (1-2) 时的有功功率和无功功率损耗；

L ——系统内输、配电设备的个数。

式 (1-4) 说明，系统内所有电源发出的有功功率总和等于系统内所有负荷和输配电设备运行在系统频率允许的范围之内消耗的有功功率总和时，系统频率就在允许的上、下限之内，否则就会高出上限值或低于下限值。式 (1-5) 说明，系统内所有无功电源发出的无功功率总和等于系统内所有负荷和输、配电设备运行在系统电压 U_i 允许的范围之内 [即满足式 (1-2)] 所消耗的无功功率总和时，系统电压就在允许的上、下限值之内，否则就会高出上限值或低于下限值。因此，式 (1-4) 和式 (1-5) 也被称为等式约束条件。显然，式 (1-4) 与式 (1-1) 是一致的，式 (1-5) 与式 (1-2) 是一致的。

1.3.2 电力系统运行状态及其相应的调度控制

电力系统的运行状态及其相应转换关系如图 1-2 所示。

1. 正常运行状态

正常运行状态时，系统满足所有的约束条件，即有功功率和无功功率都保持平衡，给所有负荷正常供电，电压、频率均在正常的范围内，各种电力设备都在规定的限额内运行，同时还有足够的备用裕度，因而可以承受各种预计的扰动（如一条输电线路或一台发电机断开等），而不产生任何有害的后果（如设备过载等）。

2. 警戒状态

电力系统受到严重的扰动或者一系列小扰动（如负荷持续升高等）逐步积累，使电力

系统总的备用裕度减少、安全水平降低后，就可能进入警戒状态。在警戒状态下，各种约束条件也能满足，但随时都有可能由于一个偶然故障或渐进性的负荷增加，使某些不等式约束条件被破坏，而校正越限时会导致丢失负荷。因而处于警戒状态的电力系统是欠安全的，应及时采取预防性控制措施，使电力系统恢复到正常状态。

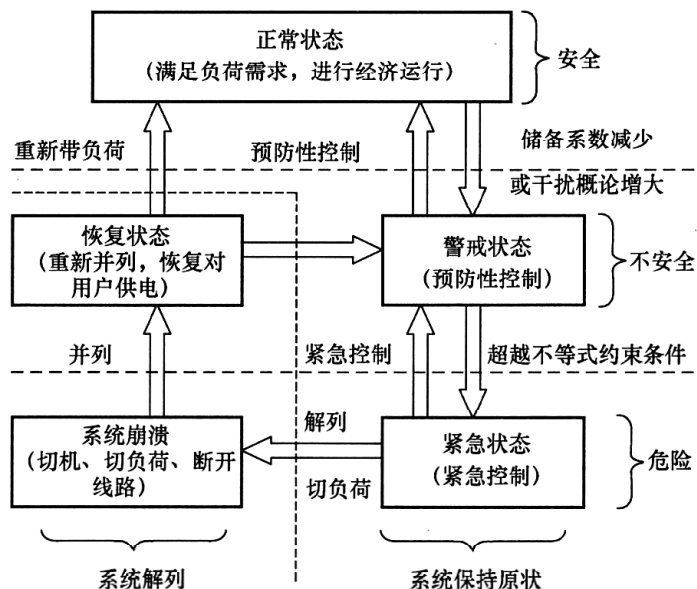


图 1-2 电力系统运行状态及其相应转换关系示意图

3. 紧急状态

一个处于正常状态或警戒状态的电力系统，如果受到严重干扰，例如短路和大容量机组被切除，使运行极限被破坏，系统就进入了紧急状态。这时系统频率、电压和某些线路潮流都可能严重越限，但系统中的发电机组仍然可继续同步运行。紧急状态下的电力系统是危险的，如不及时采取有效的控制，系统可能失去稳定，导致大量发电机组跳闸或甩掉大量负荷，使等式约束条件也遭破坏。这时电网调度控制应尽快消除故障的影响，采取紧急控制措施，争取使电力系统恢复到警戒状态或正常状态。

4. 崩溃状态

在紧急状态下，如果不能及时消除故障并采取适当的控制措施，或者措施不得力，电力系统就可能失去稳定。在这种情况下为了不使事故进一步扩大并保证对部分重要负荷供电，自动解列装置可能动作，调度人员也可以进行调度控制，将一个并联运行的电力系统解列成几部分。这时电力系统进入了崩溃状态。系统崩溃时，在一般情况下，解列成的各个子系统中等式约束条件和不等式约束条件均不能成立。一些子系统由于电源功率不足，不得不切除大量负荷；而另一些子系统可能由于电源功率大大超过负荷而不得不让部分发电机组解列。

5. 恢复状态

通过自动装置和调度人员的调度控制，在崩溃系统大体上稳定下来以后，可使系统进

入恢复状态。这时调度控制应重新并列已解列的机组，增加并联运行机组的出力，恢复对用户供电，将已解列的系统重新并列。根据实际情况将系统恢复到警戒状态或正常状态。

1.3.3 电网调度的任务

电网调度是电力系统生产运行的一个重要指挥部门，负责领导电力系统内发电、输电、变电和配电设备的运行，负责系统内重要的操作和事故处理。可以说，电力系统能够安全、经济地运行，能够连续地向广大用户供应符合质量标准的电能，是与各级电力系统调度所做的工作密不可分的。

电网调度的任务可概括为：监视、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。电网调度自动化系统的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。

根据电力工业的基本任务和电网调度的工作任务，电网调度的几项基本工作如下。

1. 预测负荷

要求预测月、日最大、最小负荷，并要考虑节日、天气等各种因素对负荷的影响。另外，调度要考虑到季节的变化、人民生活和生产活动的规律，来做好负荷预测。准确的负荷预测以及据此做出的发电计划，是保证系统频率合格的关键。

负荷预测一般可分为超短期、短期、中期和长期负荷预测。调度自动化主要进行的是超短期和短期负荷预测。

(1) 超短期负荷预测是指未来 1h 以内的负荷预测：用于质量控制需 5 ~ 10s 的负荷值，用于安全监视需 1 ~ 5min 的负荷值，用于紧急状态处理需 10 ~ 60min 的负荷值，使用对象是调度员。

(2) 短期负荷预测通常是指 24h 的日负荷预测和 168h 的周负荷预测：主要用于火电分配、水火电协调、机组经济组合，使用对象是编制计划的工程师。

(3) 中期负荷预测是指未来一年之内的用电负荷预测：主要用于水库调度、机组检修计划和燃料计划，使用对象是编制中长期运行计划的工程师。

(4) 长期负荷预测是指未来数年至数十年的用电负荷预测：主要用于电源发展规划和网络发展规划，使用对象是规划工程师。

2. 编制发电计划

根据预测负荷，编制发电计划，并确定机组的抢修和备用方式。发电计划要考虑经济运行。特别是日计划（即次日的计划），一般是当日 12h 以前做好，下午将计划发出。发电计划包括次日从零点开始一直到 24h 的安排曲线，规定了哪些机组带基本负荷、哪些用来调峰、哪些用来备用。另外还要计算经济调度方式，水电应发多少，火电应发多少等。

3. 倒闸操作

电力系统中送电线路，凡涉及两个以上单位的，都必须由调度指挥进行倒闸操作。母线上倒闸操作涉及发电和送电，变压器中性点接地隔离开关多合一个或少合一个与系统零

保护有关，这些必须由调度统一考虑和决定。

4. 事故处理

电网内发生严重事故可能危及人们生命财产安全，造成国民经济的重大损失。因此必须正确地迅速处理事故，尽快恢复正常供电。

5. 经济调度

应不断调整各发电厂有功和无功，以实现电网的经济运行。在洪水季节水电站应当满发，用火电调峰。其次，在一天的负荷变化中调整开停机组，在已开的机组中，按照等微增率来安排机组出力。

1.3.4 电力系统的分层调度控制

1. 分层调度控制与集中调度控制

从理论上讲，可以对电力系统实行集中调度控制，也可以实行分层调度控制。所谓集中调度控制就是把电力系统内所有发电厂和变电站的信息都集中在一个调度控制中心，由一个调度控制中心对整个电力系统进行调度控制。从经济上看，由于电力系统的设备在地理位置上分布很广，通过远距离通道把所有的信息传输并集中到一个地点，投资和运行费用都是比较高的。从技术上看，把数量很大的信息集中在一个调度中心，使得调度中心的规模巨大，计算机系统复杂。另一方面，调度值班人员不可能全部顾及和处理。此外，从数据传输的可靠性看，传输距离越远，受干扰的机会就越大，数据出现错误的机会也就越大。

鉴于集中调度控制的缺点，目前世界各国的大型电力系统都是采用分层调度控制的。国际电工委员会标准提出的典型分层结构就将电力系统调度中心分为主调度中心、区域调度中心和地区调度中心。这些相当于中国的大区电网调度中心（简称网调）、省调度中心（简称省调）和地区调度所（简称地调）。分层调度控制将全电力系统的监视控制任务分配给属于不同层次的调度中心。下一层调度除完成本层次的调度控制任务外，还接受上一级调度组织的调度命令，并向上层调度传递所需信息。分层调度控制可以克服集中控制的缺点，并具有以下优点：

（1）便于协调调度控制。

电力系统调度控制任务有全局性的，亦有局部性的，但大量的调度任务则是属于局部性的。分层调度控制将大量的局部性调度控制任务由下层相应的调度机构完成，而全系统性或跨地区的调度控制可以由上层相应的调度机构完成。这种结构模式便于协调电力系统的调度与控制。同时，电力系统不断扩大，运行信息大量增加，分层调度控制各层次的调度控制中心根据各自分担的调度控制任务采集和处理相应的信息，可以大大地提高信息传输和处理的效能。

（2）提高系统可靠性。

采用分层调度控制方式，每一个调度控制中心或调度所都有一套相应的调度自动化系统收集自己管辖范围内的电力系统运行状态信息，完成所分工的调度任务。当某一调度所的调度自动化系统出现故障或停运时，只影响它分工的那一部分，而其他调度控制中心的

调度自动化系统仍然照常工作，这就提高了整个系统的可靠性。

(3) 改善系统响应。

电力系统调度控制的实时性是很重要的，事故处理、负荷调度、不正常运行状态的改善和消除都必须在规定时间内完成。采用分层调度控制方式使不少调度控制任务由不同层次的调度自动化系统并行处理，从而加快了处理速度，亦即改善了整个系统的响应时间（从系统的输入发生变化起，到系统做出控制决策并将决策输出为止所需的时间）。

在实施分层调度控制时，合理确定分层数和每层的功能，对保证电力系统可靠、灵活地运行是很重要的。

2. 我国电网的分层调度

我国目前的电力体制已实现厂网分开，成立了国家电网公司和南方电网公司。国家电网公司管辖五个大电网以及一些省网，并且在大网之间通过联络线进行能量交换。南方电网公司目前管辖着广东、广西、云南、贵州等省网。

我国现行电网运行、管理体制实行五级分层调度管理，以国家电网公司系统而论，五级调度分别是：国家电网调度、大区级电网调度、省级电网调度、地（市）级电网调度和县级电网调度。

电网调度管理实行分级管理的体系，奠定了电网分层控制的模式。各级调度中心是各级电网控制中心，信息分层采集，逐级传送，命令也按层次逐级下达，各级调度都规定了相应的职责。以上各级调度之间实现数据通信，并逐步联成网络，构成对电力系统的运行实行分层控制的调度自动化系统。因此我国电网调度的基本原则是统一调度、分级管理、分层控制。图 1-3 为电网分层调度控制示意图。

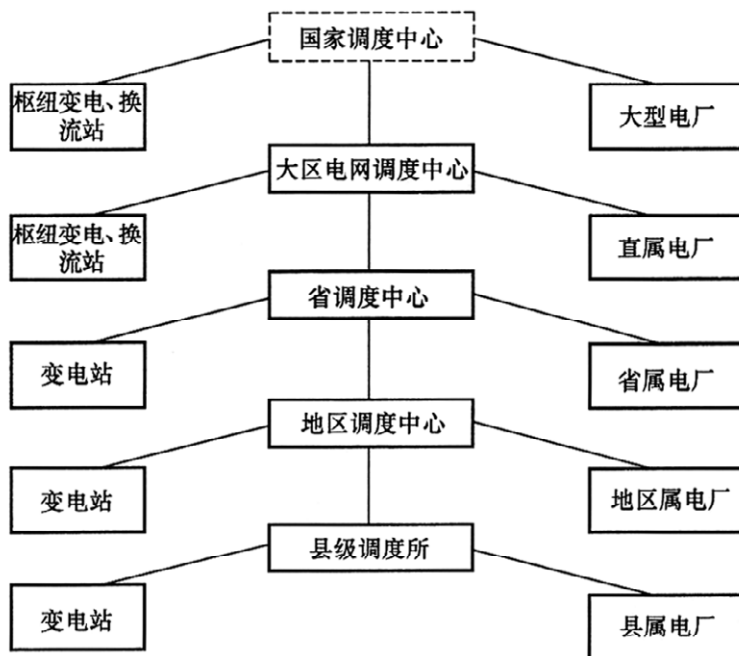


图 1-3 电网分层调度控制示意图

在实行厂网分开，竞价上网和市场化取向的电力体制下，发电厂与电网公司实现了产权分离，发电企业不再由电网公司管理，而分别由大唐、华能、华电、中国电力投资集团等发电公司管理，但发电厂仍必须遵守统一调度的原则，所有并网电厂必须与相应的电网调度中心签订并网调度协议，以确保整个电网安全、优质、经济地运行。

1.4 电力系统自动化发展趋势

1.4.1 控制理论的应用

随着电力装机容量和供电区域的不断扩大，电力系统的结构和运行方式越来越复杂多变。同时对供电质量、供电可靠性和运行经济性的要求越来越高。半个世纪来，电力系统自动化理论的发展经历了以下三个阶段。

- (1) 20 世纪 60 年代之前的经典控制理论阶段。
- (2) 20 世纪 70 年代注入了控制论，形成以计算机为基础的现代控制论阶段。
- (3) 20 世纪 90 年代以后注入了经济理论，从而达到电力市场的理论阶段。

当今控制领域的技术仍在不断拓展，新的控制方法层出不穷。智能控制领域发展尤其迅猛，有相当部分已投入实用。智能控制最大的吸引力在于实现多变量控制而不必列出繁琐的数学模型，于是神经网络、模糊逻辑和遗传算法成为优选的方法。由于模糊技术、人工神经网络与遗传演化技术等的发展，自动控制技术已有了进一步优化的新方向，即智能技术的方向。综合各种智能方法，互补优势，能把自动控制的适应范围进一步扩大深化，将推动工业建设与生产的发展，同时也促进电力系统自动化的发展。混杂系统（hybrid system）是系统科学领域中新提出的概念和理论。电力系统是一个标准的混杂系统，它的上层（调度中心）给出的调度决策主要是逻辑性的操作指令，而下层控制（如发电机的励磁与调速控制）主要是连续型的。如何将不同性质的上层和下层控制恰当地结合起来以达到电力系统的多目标优化控制，这是一个重要理论问题和应用问题。因此，借鉴控制领域的新理论，发展起在电力系统中的运行与应用，应当具有良好的前景。

自动控制从线性开环发展到闭环，使电力系统的各项控制提高到了一个新的水平。随着计算机应用的迅速发展，各项以前手算难以处理的问题，如矩阵运算、有限元法及微分方程的数字解等，都可利用计算机调用标准程序来解决。辨识、建模、在线监控等技术使自动化进入到现代化的新水平。

1.4.2 数字化电力系统的概念与构架

电力系统是由原动机、发电机、电力网络、负荷和控制中心等组成的。原来的电力网络是不可控的。近年来，随着电力电子技术的发展，柔性交流输电技术（FACTS）设备引入了电力网，使电力网络也变成可控的了。然而电力系统在增加了灵活性的同时，也增加了复杂性。图 1-4 表示的是两个大区域网络互联的电力系统。在它们之上还有高一级的调度中心，这可以说是多区互联电力系统的一个一般的结构形式。

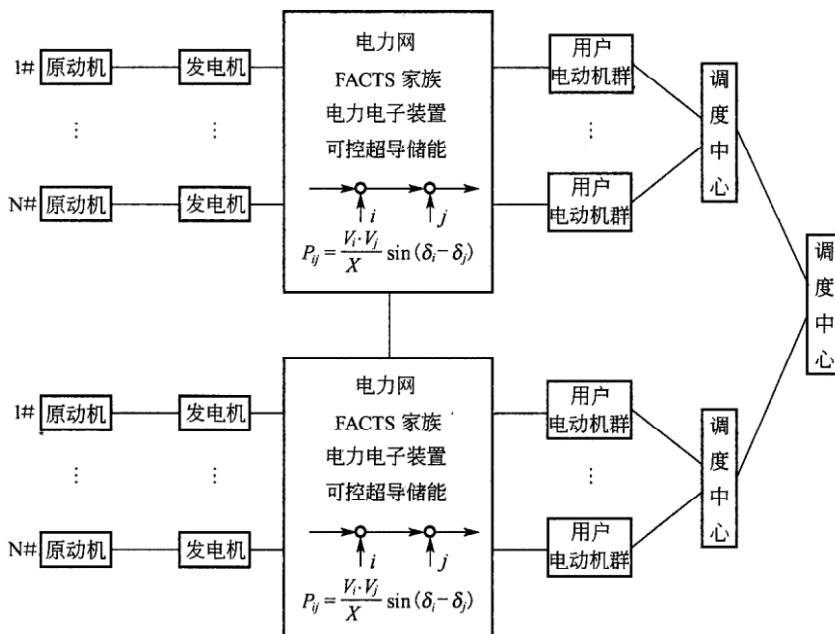


图 1-4 大区域电力系统结构

数字电力系统 (Digital Power System, DPS) 的含义, 是指对某一实际运行的电力系统的物理结构、物理特性、技术性能、经济管理、环保指标、人员状况、科技活动等数字地、形象化地和实时地描述与再现。如果做到了这一点, 就可以说建立了该实际电力系统的数字电力系统。某个电力系统的数字电力系统包括电力系统的物理结构 (也即真实结构)、其各组成部件 (单元) 及整体的物理性能、运行方式和运营策略、管理的模式、人员的信息等; 电力系统的各个元件、各个网络、各节点的实时状态变量; 各种自动控制装置的动作特性 (包括继电保护装置); 发电厂、变电站的主要设备的“健康”状态; 经济结构、市场信息。21 世纪, 中国的电力市场的概念更加明确。将来的电价会类似股票那样波动、变化, 比如半个小时刷新一次电价。电力市场的出现提出了新的问题, 就是这里所说的“经济结构和市场的信息”包含的内容。影响电力系统安全的特殊自然环境, 比如某一条超高压线路正处于落雷区或者台风袭击中, 可能造成灾害, 数字电力系统应能及时提示运行人员给予特别关注, 以免发生重大灾难。21 世纪, 我国环保指标和环保问题被提到非常重要的位置, 关系到是否能够可持续发展的问题。我国环境保护法将对于不能达到环保要求的工厂、企业给予重罚。环保设备的水平和设备情况, 也应该由 DPS 实时地通报。电力系统的各个环节的实时效率, 包括热力系统、汽轮机、发电机系统、网络损耗、用户、电压等环节的效率, 数字电力系统也应实时显报。重要的信息比如人才的信息、科教活动的信息在数字电力系统中应该有所记录和通报。有了数字电力系统, 就可以不断地对电力系统的安全稳定性进行再评估、再调整, 以达到最佳的安全运行状态。

图 1-5 给出了数字电力系统的图像化思考。在图的右边是一个运行中的电力系统, 图的左边是一个 DPS。DPS 通过实时数据通信, 软跟踪这个实时的电力系统。如上所述 DPS 在正常运行时给出建议, 通过调度人员进行闭环。在最紧急的情况下, 将紧急地不通

过调度人员进行闭环，然后再“通知”调度人员，刚才进行了什么操作，产生了什么效果等。如果没有 DPS（现在的系统即是如此），则调度管理人员在运行中是相当盲目的，突然发生故障后他们不知道电力系统中发生了什么问题，产生了什么后果，稳定域如何变化，状态点在稳定域的什么位置等。如果发生了故障，调度人员茫然不知所措，甚至会进行误操作，1996 年、1997 年美国西部电力系统发生事故后的情况就是如此。如果有 DPS 的帮助，电力系统运行的安全性和稳定性将会得到极大的提高。

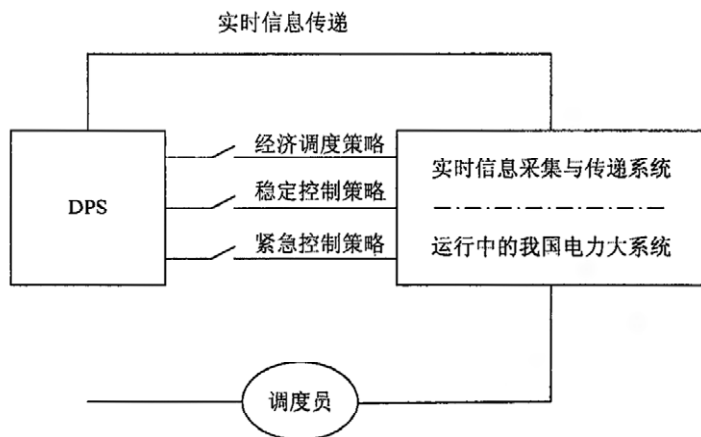


图 1-5 数字电力系统

1.4.3 电力自动化系统新技术与趋势

20 世纪 40 年代将数据展现在模拟盘上，增强了调度员对实际系统运行变化的感知能力；50 年代自动发电控制（AGC）将调度员从频繁的操作中解脱出来；电网调度自动化系统概念的提出是在 50 年代中期，这标志着现代电网自动化的开始。以前只有远动装置及机电式的调频装置，不成为系统。60 年代初，有些电力公司利用数字计算机实现电力系统经济调度，开始了计算机在调度中的应用。在 1965 年美国东北部大停电后，多数电力公司意识到依靠远动装置在模拟盘上显示信息的方式已远不能满足复杂电网安全运行的要求，便开始把计算机系统的应用从以考虑经济为主转移至以安全为主，出现了所谓电网 SCADA 系统。随着计算机技术、控制技术、通信技术和电力电子技术的不断发展，“电力系统自动化”无论其内涵或外延都发生了巨大的变化。如今电力系统已经成为一个 CCCPE 的统一体，即计算机（computer）、控制（control）、通信（communication）和电力电子（power electronics）的产生、输送、分配装置以及电力电子装置。当然，在 21 世纪，不掌握电力市场知识便很难承担电力调度工作。自动化设备所占的投资比例虽然不大，但其重要性与主设备一样。而且先进的自动装置不仅可以改善一次主设备的运行状况，提高其运行效率，甚至可以推迟或避免新建一些主设备，节省数额可观的一次设备投资。电力系统产生的电能必须与消费的电能实时平衡，这只能靠自动调节和控制装置来维持。这种平衡不仅要在正常的稳态运行时而且要在各种扰动状态下从毫秒级到分钟级都能实现这一要求。为了满足这种调节与控制要求，电力系统自动装置可以分为正常运行自动装置、异常状态下的安全稳定控制装置及保护装置。

第 1 章 概述

现代社会对电能供应的“安全、可靠、经济、优质”等各项指标的要求越来越高，相应地，电力系统也不断地向自动化提出更高的要求。电力系统自动化技术不断地由低到高，由局部到整体地发展。

当今电力系统的自动化技术正趋向于：

- (1) 由发、输电自动化向发、输、配电自动化全面发展；
- (2) 柔性交流输电技术（FACTS）的发展进一步提高输电、配电自动化水平；
- (3) 在控制策略上日益向最优化、适应化、智能化、协调化、区域化发展；
- (4) 在设计分析上日益要求面对多级系统模型来处理问题；
- (5) 在理论工具上越来越多地借助现代控制理论；
- (6) 在控制手段上日益增多了微机、电力电子器件和远程通信的应用；
- (7) 在研究人员的构成上日益需要多“兵种”的联合作战。

整个电力系统自动化的发展则趋向于：

- (1) 由开环监测向闭环控制发展，例如从系统功率总加到 AGC（自动发电控制）；
- (2) 由高电压等级向低电压扩展，例如从 EMC（能量管理系统）到 DMC（配电管理系统）；
- (3) 由单个元件向部分区域及全系统发展，例如 SCADA（监测控制与数据采集）的发展和区域稳定控制的发展；
- (4) 由单一功能向多功能、一体化发展，例如变电站综合自动化的发展；
- (5) 装置性能向数字化、快速化、灵活化发展，例如继电保护技术的演变；
- (6) 追求的目标向最优化、协调化、智能化发展，例如励磁控制、潮流控制；
- (7) 以提高运行的安全、经济、效率为目标，同时向管理、服务的自动化扩展，例如 MIS（管理信息系统）在电力系统的应用；
- (8) 现场总线技术在变电站综合自动化系统中的应用。