



21 世纪高等学校规划教材
Textbook Series of 21st Century

电力系统自动化

付周兴 王清亮 董张卓 合 编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



21 世纪高等学校规划教材
Textbook Series of 21st Century

TM76
12

电力系统自动化

付周兴 王清亮 董张卓 合 编
张伏生 主 审



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书是 21 世纪高等学校规划教材。

全书共分六章。其主要内容包括：电力系统自动化的基本概念、发展趋势；电力系统中测控单元的构成、工作原理和相关的实现技术；电网调度自动化中主站、远动终端单元的功能以及实现方法；变电站综合自动化；配电网自动化的功能、原理、实现的方法以及电磁兼容方面的知识。

本书在描述电力系统自动化原理与技术的同时，力求紧密结合实际，紧跟最新技术的发展，选排并分析了各类应用实例，是一本内容系统、理论联系实际和具有较强系统性、先进性、实用性的教材，可作为高等学校“电气工程及其自动化”的专业课教材，也可供从事电力系统自动化设计、开发、运行、维护工作的技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统自动化/傅周兴编. —北京：中国电力出版社，2006

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 7 - 5083 - 4372 - 7

I. 电... II. 傅... III. 电力系统—自动化—高等学校—教材 IV. TM76

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 045950 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2006 年 6 月第一版 2006 年 6 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15.25 印张 354 千字

印数 0001—3000 册 定价 23.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换)

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的,是融电力系统知识、自动化技术、计算机网络技术、通信技术为一体的综合自动化课程。全书以电力系统为对象,计算机信息处理为主线,现代先进的保护、控制技术为手段,紧密结合实际,对电力系统自动化的理论、技术、应用及其新发展做了系统、全面、深入的阐述和介绍。

本书作者结合多年来从事电力系统自动化方面的科研、教学以及工程规划设计的经验与教训,从6个方面对电力系统自动化的技术与方法进行了论述与探讨。第一章对本课程的体系和电力系统自动化的基本概念、工作模式及发展趋势做了阐述。第二章通过工程实例,介绍电力系统中测控单元的构成和工作原理,使读者能够掌握自动化技术现场数据的采集和现场一次设备的控制、调节的方法,为后续各章节的讨论奠定了理论基础。第三~第五章详细地分析了变电站综合自动化、电网调度自动化、配电网自动化的构成、功能以及各种自动化控制设备的原理和设计、实现的方法,并给出了工程实例。针对电力系统课程实践性很强的特点,编者在写作中力求思路清楚、简明扼要。在介绍电力系统自动化原理与技术的同时,着重结合实际工程及最新技术的发展,选排并详细分析了大量的各类应用实例,集中体现了新技术、新知识、新方法在电力系统中的综合运用。

本书由傅周兴、王清亮、董张卓共同编写,由傅周兴教授负责全书的统稿工作。

承蒙西安交通大学电气工程系张伏生教授在百忙中仔细审阅了本书稿，并提出了许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

在本书的编写过程中，对西安西瑞保护控制设备有限责任公司负保记总经理（高级工程师）给予的大力支持和帮助，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

2006年1月

目 录

前言	
第一章 概论	1
第二章 电力系统测控装置的基本原理	12
第一节 概述	12
第二节 模拟量信息采集的硬件构成	15
第三节 交流采样软件	32
第四节 常用交流采样算法	36
第五节 开关量信息采集系统	44
第六节 脉冲量/数字量输入电路	50
第七节 测控单元设计实例	53
第三章 变电站综合自动化	59
第一节 变电站自动化	59
第二节 变电站综合自动化系统的功能	64
第三节 变电站综合自动化的硬件结构形式	67
第四节 变电站电压、无功综合控制子系统	73
第五节 变电站备用电源自动投入装置	80
第六节 变电站微机故障录波装置	82
第七节 变电站综合自动化系统的数据通信系统	87
第八节 变电站综合自动化系统的组态软件	96
第九节 变电站综合自动化设计实例	101
第四章 电网调度自动化	111
第一节 电力系统运行状态和相应的调度控制	111
第二节 电网调度自动化系统的功能	116
第三节 电力系统状态估计	123
第四节 安全分析与安全控制	131
第五节 调度主站系统的硬件构成	140
第六节 电力系统远动终端单元	145

第七节 远动系统信息传送	154
第八节 远动通信基本原理	160
第九节 电网调度自动化系统实例	172
第五章 配电网自动化	176
第一节 配电网自动化	176
第二节 馈线自动化技术	182
第三节 远程自动抄表计费系统	188
第四节 负荷控制技术	192
第五节 配电自动化系统的通信方式	195
第六节 配电网地理信息系统	202
第六章 自动化系统的电磁兼容	207
第一节 电磁兼容	207
第二节 变电站中的干扰源	212
第三节 抗干扰措施	215
第四节 电缆的屏蔽	218
第五节 电磁暂态(浪涌)防护	222
第六节 提高抗干扰的其他措施	224
附录	231
附录一 缩写术语便览	231
附录二 常用词汇	234
参考文献	237

第一章 概 论

一、电力系统运行监视、控制的复杂性

现代社会存在各种各样的工业生产系统，但是没有哪一种系统能像电力系统这样庞大和复杂。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；电力系统运行时，系统的状态行为变化很快。因而，现代电力系统已被公认为是一种最典型的大系统。

现代电力系统的运行监视、控制，与其他各种工业生产系统相比，更为复杂。电能不能像其他工业产品那样可以储存，而是“以销定产”，即用即发。各种发电、变电、输电、配电和用电设备，在同一瞬间，按着同一节奏，遵循着统一的规律，有条不紊地运行着。各个环节环环相接，严密和谐，不能有半点差错。然而，电力设备总会因各种原因出现各种异常，各类电力用户的用电负荷随时随机变化，电力系统的各个环节必须及时跟踪用电负荷的变化，不断进行控制和调整，以保证电力系统的安全、稳定运行。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，电力系统运行时事故隐患必须及时地发现和排除。

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，安全经济地向用户提供合格质量的电能；在电力系统发生事故的时候，迅速切除故障，防止事故扩大，尽快恢复电力系统的正常运行。简单地说，电力系统运行控制的目标可以概括为八个字：安全、可靠、优质、经济。

二、电力系统自动化的重要性

电力系统中，被控制的发、输、变、配电设备数量很多，通过不同电压等级的电力线路连接成网状系统。控制与管理复杂而庞大电力系统，使之安全、优质和经济地运行，将是十分困难而艰巨的。为此，监视和控制电力系统，必须借助自动监视控制装置来完成，也就是借助各类自动装置和自动化系统才能保证电力系统的运行，离开自动化装置和自动化系统根本不可能管理电力系统。

电力系统自动化是指应用各种具有自动检测、决策和控制功能的装置系统，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、调节和控制，保证电力系统安全、可靠、经济运行和向电力用户提供合格的电能。

控制管理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。由于整个电力系统在电磁上是互相耦合和连接的，所以仅靠控制调节电气设备自身的自动装置是很不够的，还必须有整个系统或局部系统的自动化装置，通过信息共享和功能互补，实现电力系统生产管理。

从自动控制学角度看，电力系统故障是自动控制的扰动信号。电力系统故障的发生是

随机的，而且故障的发生和切除几乎是同时存在的，也就是说扰动的同时伴随着被控制对象结构的变化，这就更加增加了控制的复杂性。有时电力系统故障，致使系统失去了稳定，会造成灾难性的后果。借助自动化系统对电力系统运行的实时监控，做到防患于未然，当电力系统发生扰动时，做到精确测量，快速控制，防止系统稳定破坏，即使在电力系统出现故障造成停电时，也能较快地使系统恢复正常。

在发达国家的电力系统，早在 20 世纪 50 年代就开始建设和实施全系统的自动化系统，目前电力系统的运行管理已全面计算机化，其自动化设备和系统，无论是功能和性能，达到了很高的水平，我国和这些发达国家相比，有较大的差距。在未来的 10~20 年内，我国电力系统将面临大容量远距离输电和大电网互联问题。我国中部形成沿长江流域包括四川、华中、华东电网在内的三峡交直流电力系统，与此同时，北方的华北、东北、西北电网将实现互联，南方电网将进一步加强，届时，全国将形成北、中、南三大互联电网的格局，通过它们之间的互联，基本实现全国电网互联。全国互联的电力系统在带来巨大好处的同时，也带来了很大的潜在的问题。互联系统牵一发而动全身，系统运行的稳定性问题更为突出，大面积停电的危险更大了。这种停电事故不但在经济上造成了巨大的损失，而且对人民生活造成了一定程度的影响。大容量远距离输电和大电网互联使得电力系统实现功能更强大的自动化显得更为迫切。

总之，保证电力系统安全、优质、经济的运行，单靠发电厂、变电站和调度中心的常规、单一功能的自动装置是不够的。电力系统的实时性、快速性、稳定性要求，必须依靠各系统的各种功能更多、性能更优的自动化才能实现。可以毫不夸张地说，没有电力系统各环节的自动化和调度自动化水平的提高，现代电力系统是不能安全运行的。

三、电力系统自动化的发展历程

1. 局部自动化阶段

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导致事故扩大。

随着用电负荷的大幅度增长，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，设备现场人工就地监视和操作不能满足电力系统运行的需要。为了保证电力系统安全运行和向用户供应合格电能，出现了某一区域或针对一个一次设备的自动装置。这些自动装置有：故障自动切除装置，如继电保护装置，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，如备用电源自动投入、发电机自动调压和自动调速装置等。

电力系统局部自动化阶段的特点是：

- 1) 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功能。
- 2) 电力系统中各发电厂与变电站之间的自动装置没有什么联系。

2. 调度自动化系统的兴起

20世纪60年代,随着电网规模的加大,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,对系统内其他厂(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的管理和指挥,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,这个机构就是电力调度所,也称电力调度中心。

初期的调度中心,由于通信设备等技术的限制,电力调度主要靠电话。电力调度中心没有办法及时了解和监视各个厂、站的设备的运行情况,更谈不上对各电厂和输电网进行直接控制,对线路的潮流、各节点电压、电厂各机组的出力以及出力的分配是否合理等情况,调度中心都不能及时掌握。在调度中心,每天由各厂站值班人员定时打电话向调度员报告本厂、站的机组出力、线路潮流、母线电压等数据,严格地说,调度员了解的厂、站的信息,已经属于“历史”信息。调度员需根据这些情况进行汇总、分析,通过大量人工计算得到系统运行方式,结合这些有限的“历史”性的信息,加上个人的知识和运行经验,选择一种运行方式,再用电话通知各厂站值班人员,由他们在现场进行操作。一旦电力系统发生事故,了解现场的情况,需要花费较长时间,然后凭经验进行事故处理,恢复正常运行。

显然,这种落后的状况与电力系统在国民经济发展中所占的重要地位是很不相称的。这种调度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。20世纪60年代,美国、加拿大和其他一些国家的电力系统曾相继发生了大面积停电事故,在全世界引起大震动。人们开始认识到,安全问题是电网运行的最核心问题,比经济问题更重要,一次大面积停电事故给国民经济造成的损失,远远超过许多年的节电效益。于是,开始研究和实施电力系统自动监视和控制问题。随着计算机在调度自动化技术中的应用,国外普遍开始建设计算机化的调度中心,进行电力系统的安全监视和控制,这样就出现了电力调度数据采集与监视系统。

此阶段通信技术的发展,为解决调度的实时性问题奠定了基础,出现了远距离信息自动传输装置。在厂、站安装远动装置,采集各机组出力、线路潮流和各母线电压、以及各断路器开关的实时数据,然后通过远动通道传送给调度中心并直接显示在调度台的仪表和系统模拟屏上,调度员可以随时看到运行参数和系统运行方式,还可以立刻“看到”断路器的事故跳闸。遥测、遥信方式的采用,等于给调度中心安装了“千里眼”,可以有效地对电力系统的运行状态进行实时的监视,但仅能监视仍不能满足调度的要求。随着计算机技术和通信技术进一步成熟,远动系统提供了遥控、遥调的手段,一些调度开始实施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。

20世纪70年代末,我国开始四大电网的自动化技术引进,同时国内的自动化研究机构和设备制造企业开始自动化系统的研究开发,到80年代后期,我国的第一代调度自动化系

统在各省、地得到了应用。我国第一代调度系统的功能主要为实现遥测和遥信的调度 SCADA 系统。

这一阶段继电保护、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、自动监控和远动技术作为三门独立的技术进行研究应用。在这一阶段电力自动化系统有以下特点：

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) 电力系统的统一运行主要靠电力系统调度中心的调度员根据遥测、遥信传来的信息，加上自己的知识和经验通过电话或遥控和遥调来指挥，部分系统实现了遥控和遥调。

3. 电力系统自动化成熟应用和快速发展

20 世纪 80 年代，随着经济的发展，电力系统规模和装机容量、电力系统的结构和运行方式变得更加复杂，同时对电能质量、供电可靠性和运行经济性提出了更高的要求。

虽然远动技术使电力系统的实时信息直接进入了调度中心，调度员可以及时掌握系统的运行状态，帮助他们及时地对电力系统运行实施调度指挥，并能及时发现和处理事故，为调度计划和运行控制提供了科学的依据，但是，现代电力系统的结构和运行方式的复杂性，在仅实现了遥测、遥信、遥控、遥调的调度中心，调度人员面对着大量不断变动的实时数据，有时可能反而会弄得手足无措，以致延误了事故处理，甚至做出错误的决定，导致事故扩大，特别是在紧急的事故情况下更是如此。这些情况表明，调度中心只是装备了“千里眼”甚至“千里手”，也还不能合理调度电力系统的运行，调度人员必须借助建立在各类模型基础上的电力系统实时分析软件，才能进行电网运行的合理安全和经济调度。为此，电力调度系统普遍采用各类分析软件，出现了电力系统在线潮流、安全分析等许多功能，统称为能量管理系统（EMS——Energy Management System）。调度中心装备了大型计算机，配置了彩色屏幕显示器等人机联系手段，在厂、站端侧配置基于微机的远方终端，使调度中心得到信息的数量和质量都大大超过了旧式布线逻辑式远动装置。近年来还研制了可以模拟电力系统各种事故状态用以培训高水平调度员的“调度员培训模拟系统”。

目前，我国的电网调度自动化系统的基础信息平台的功能也已完善，各个调度中心开始应用能量管理系统（EMS），即实时在线的状态估计、调度员在线潮流、电网静态安全分析、自动发电控制等电力系统实时在线分析软件得到应用，调度自动化系统的应用跨上了一个新的台阶。在配电网的自动化领域，我国在 90 年代中期开始应用。鉴于主网调度系统的应用经验，配电自动化的技术起步就较高，建设的配电调度自动化系统已在各地普遍开始应用，系统中的配电管理系统（DMS——Distribution Management System）开始应用。

在变电站中，这一阶段变电站的自动化水平得到了快速发展，由传统的继电保护装置、远动装置、测量装置，以各自自成体系的模式向综合自动化方面发展，使基于微处理机系统的综合自动化技术得到了完善，变电站普遍开始采用综合自动化系统。目前变电站自动化系统的特点为：

(1) 从集中控制、功能分散型向分散网络型发展。传统的保护、运动及站级监控系统、故障录波等设备和系统是按功能分散考虑的。发展趋势是从一个功能模块管理多个电气单元或间隔单元, 向一个模块管理一个电气单元或间隔单元, 实现地理位置高度分散的方向发展。这样, 自动化系统故障时对电网可能造成的影响大大减小, 自动化设备的独立性、适应性更强。

局域网 (LAN) 在变电站中得到应用, LAN 网传输介质可选择双绞线、电缆和光纤, 拓扑结构有总线、树形和环形等。网络传输速率为 $1\sim 20\text{Mbit/s}$, 最大传输距离可达 25km , 接入网最大设备数可达几百到几千个, 综合自动化系统采用现场 (I/O) 单元控制装置就近综合处理, 通过引入局域网 (LAN) 技术将所有智能装置连接在一起。各节点的智能控制装置、间隔级单元和站级测控主单元与就地监控主站系统联成网络, 完成对现场的协调控制和监视管理。各间隔单元就地独立工作, 不依赖于通信网和站级测控主单元。同时该网络与调度 (控制) 中心的远程监控主站系统互相通信, 实现对全网的安全监控、经济调度等。

光纤通信具有损耗低、频带宽、数据传输速率高、抗电磁干扰能力强等优点, 很适合作为传输介质。采用光纤局域网可以使计算机网络抗电磁干扰和射频干扰的能力大大提高, 同时满足大容量数据传输要求。

(2) 从专用设备到平台。传统方式中, 每个控制或保护功能都为专用设备, 种类也多。现在变电站自动化设备的功能仅由软件决定, 硬件因 I/O 所要求的数量而异。通用标准型的、灵活的硬件和软件平台, 能适用于所有保护和控制, 系统有开放性和数据一致性的特点, 统一遵循国际标准, 便于不同厂家相互接口和维护操作。

保护功能可由算法实现且可以由用户任意设置。各种保护算法经过优化设计并综合在一起, 达到更好的选择性、更高的冗余度和数字保护多功能化, 可以记录存储实时参数和定值; 多功能保护装置可具有各种录波功能, 按间隔分散录波, 可靠性更高。分散采集的数据可随时由就地监控主站系统或远方监控主站系统调用。

(3) 从单一功能控制向综合智能方向发展。由传统单一的控制发展成综合智能控制, 电气设备开始实现机电一体化、控制和保护的整体化。将控制、保护系统与一次设备就近安装在一起。现场总线技术, 大大减少了电缆使用量, 计算机 CRT 显示或大屏幕显示可以取代传统的模拟屏, 减小了控制室面积并且显示系统扩展、可维护性大大增强, 为调度 (控制) 中心的运行人员提供更多的、更合理的实时信息, 提高了调度 (控制) 中心对电网调度管理的控制性能, 操作更加方便、可靠。

(4) 从室内型向户外型演变。由于被控对象多在户外, 因此控制设备、保护设备按一次间隔单元分散安装或现场安装, 这就是通常所指的户外型 RTU 和间隔级 I/O 单元, 以及分散型单元保护装置。

国外户外型 RTU 近十几年来得到迅速普及, 在变电站主要用于以下几个方面: ①分散式变电站综合自动化系统, 以 RTU (间隔级 I/O) 作为现场数据采集及控制部件将分散设置在高压断路器或中压开关柜上或附近而不需要另建小室; ②相对集中式 (分散集中组屏) 综合自动化系统, 用于变电站扩建工程时, 可减少其工作量、配置灵活、减少投资; 户外

型 RTU 具有交流直接采样、硬件模块化、功能综合化等特点。

(5) 从单纯的屏幕数据监视到多媒体监视。计算机控制、信息处理及通信技术的发展,将使计算机监控从静、动态实时数据向声、像辅助监控等多方位发展,以适应电力系统的需要,特别是电力市场的需要。其中利用工业电视提供的视觉信息,应用计算机图像识别技术,将有可能迅速地辨别图像或将多个相关图像进行综合判断,及时发出处理指令,进一步扩大与提高电力系统自动化的功能和水平。如一种用于电力系统自动化中的视觉信息辨识监视方法的基本构思是这样的:利用 CCD 摄像机,摄入现场图像(视频信号),经通信系统传送至控制端,在控制端进行图像的高速数字采集,计算机处理后输出监视信号(包括打印报警),构成视觉信息辨识监视系统。其核心是将系统各部门采集的实时监视视觉信息输入计算机,与事先存在计算机中的系统各部分的正常工作或极限状态的基准视觉信息进行比较辨识,并进行各相关信息的逻辑判断。可以看出,采用视觉信息构成的自动化功能不同于现行自动化系统,它们之间可以互补。

目前自动化系统的特点:

(1) 在变电站,综合自动化系统得到广泛的应用,用一套自动化系统或装置来完成以往两套或多套单一功能的自动化系统或装置所完成的工作。

(2) 调度中心的各类涉及电力系统实时在线分析功能的软件得到应用。

(3) 调度系统能实现遥测、遥信、测控、遥调。

(4) 各级调度的信息能实现共享。

(5) 新的通信技术、计算机技术、控制技术、电力电子技术,为电力自动化的新装备和新系统奠定了基础,是自动化技术快速发展的阶段。

四、电力系统自动化的新技术和发展趋势

目前,电力系统自动化技术发展很快,许多新领域、新方向都在研究之中,对电力自动化具有重要影响的三项新技术如下。

1. 电力系统的智能控制

电力系统的控制研究是基于传递函数的单输入、单输出控制,线性最优控制、非线性控制及多机系统协调控制发展到智能控制阶段。电力系统智能控制的特点是:

(1) 电力系统是一个具有强非线性的、变参数(包含多种随机和不确定因素的、多种运行方式和故障方式并存)的动态大系统。

(2) 具有多目标寻优和在多种运行方式及故障方式下的鲁棒性要求。

(3) 不仅需要本地不同控制器间协调控制,也需要异地不同控制器间协调控制。

智能控制是当今控制理论发展的新阶段,主要用来解决那些用传统方法难以解决的复杂系统的控制问题,特别适用于那些具有模型不确定性、强非线性、要求高度适应性和鲁棒性的复杂系统。智能控制系统所具有的功能有:

(1) 自适应功能。

(2) 自学习功能。

(3) 自组织功能等。

智能控制的主要设计手段包括专家系统、人工神经网络、模糊控制、自学习控制等。

智能控制在电力系统工程应用方面具有非常广阔的前景,例如,快关汽门的人工神经网络适应控制,基于人工神经网络的励磁、电掣动、多机系统中的 ASVG (新型静止无功发生器) 的自学习功能等。

2. FACTS 和 DFACTS

所谓“柔性交流输电系统”,又称“灵活交流输电系统”(FACTS—Flexible Alternative Current Transmission System),是指在输电系统的重要部位,采用具有单独或综合功能的电力电子装置,对输电系统的主要参数(如电压、相位差、电抗等)进行调整控制,使输电更加可靠,具有更大的可控性和更高的效率。这是一种将电力电子技术、微机处理技术、控制技术等高新技术应用于高压输电系统,以提高系统可靠性、可控性、运行性和电能质量,并可获取大量节电效益的新型综合技术,世界各国电力部门对这项新技术都十分重视,因此该技术从一开始就得到了迅速发展。其良好发展势头来自于良好的背景条件:输电系统建设(充分利用现有线路、减少输电走廊占地、节省输电网建设投资)和运行(安全性、经济性、灵活性)的需要;克服直流输电存在网络结构方面缺陷的需求;电力电子技术和元器件的发展支持;已有 FACTS 技术产品的研制和运行经验的积累等方面。其中前两个是发展 FACTS 的需求动力,后两个是支撑条件,FACTS 技术发展顺利的原因,就在于这两方面较完美的结合。

现有的 FACTS 包括以下一些主要装置:

- (1) 新型静止无功发生器 (Advanced Static Var Generator);
- (2) 可控串联电容补偿器 (Thyristor Controlled Series Compensation);
- (3) UPFC 综合潮流控制器 (Unified Power Flow Controller);
- (4) SVC 静止无功补偿器 (Static Var Compensator);
- (5) TCPR 可控移相器 (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator);
- (6) SSCB 固态断路器 (Solid-State Circuit Breaker);
- (7) NCH-SSR Damper 次同步振荡阻尼器 (Narain C. Hingorani Subsynchronous Resonance);
- (8) 超导蓄能器 (Superconducting Magnetic storage System);
- (9) BESS 电池蓄能系统 (Battery Energy Storage System) 等等。

DFACTS 是指应用于配电系统中的灵活交流技术。其主要内容是:对供电质量的各种问题采用综合的解决办法,在配电网和大量商业用户的供电端使用新型电力电子控制器。

3. 基于 GPS 统一时钟的新一代 EMS 和动态安全监控系统

目前,电力系统监测手段主要有侧重于记录电磁暂态过程的各种故障录波仪和侧重于系统稳态运行情况的监视控制与数据采集(SCADA)系统。前者记录数据冗余,记录时间较短,不同记录仪之间缺乏通信,使得对系统整体动态特性进行分析比较困难;后者数据刷新间隔较长,只能用于分析系统的稳态特性。两者还具有一个共同的不足,即不同地点之间缺乏准确的共同时间标记,记录数据只是局部有效,难以用于对全系统动态行为的分析。

1995 年以来, GPS (全球卫星定位系统) 技术在电力系统中开始推广使用,它为电力

系统提供了较方便的全网统一时钟信号,其定时精确度小于 $1\mu\text{s}$ 。给实测数据加上时间标签,可以实现异地数据在相同的时间参考坐标系中进行比较。GPS系统的出现及其在电力系统中的应用,使电力系统的运行人员和科研人员得以在时间和空间两维坐标系下实时地研究和观察动态问题,具有十分重要的意义。

迄今,GPS技术、通信技术、DSP(数字信号处理)技术以及电力系统的动态电量和在线参数辨识等关键技术的发展,已经给实现电力系统EMS具有整体动态监测功能提供了必要的条件,从而可使已有的状态估计及安全分析等功能发展为动态监测和分析控制的工具。

基于GPS的新一代动态安全监控系统,是新动态安全监测系统与原有SCADA的结合。电力系统新一代动态安全监测系统,主要由同步定时系统、动态相量测量系统、通信系统和中央信号处理机四部分组成。采用GPS实现的同步相量测量技术和光纤通信为相量控制提供了实现的条件。GPS技术与相量测量技术结合的产物——PMU(相量测量单元)是近年来发展的一项新技术,它利用GPS系统的高精确度实时信号和相量测量技术对系统中各关键点的电压、电流相量进行同步采样,能够实时地观测整个电网运行状态。

以直接测量系统状态变量为基础的动态安全监测是未来电力系统监测技术的发展方向,它必将使现有的SCADA和EMS系统发生重大变革,并为电力系统稳定控制提供可靠和实时的数据资源。电力系统的稳态监测及动态实时监测的结合,将使电力系统的监测和控制日臻完善。

近20年来,随着计算机技术、通信技术、控制技术的发展,现代电力系统已成为一个计算机(Computer)、控制(Control)、通信(Communication)和电力装备及电力电子(Power System Equipments and Power Electronics)的统一体,简称为“CCCP”。其内涵不断深入,外延不断扩展。电力系统自动化处理的信息量越来越大,考虑的因素越来越多,直接可观可测的范围越来越广,能够闭环控制的对象越来越丰富。

现代社会对电能供应的“安全、可靠、优质、经济”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、由局部到整体发展。当今电力系统的自动化技术正趋向于:

- (1) 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。
- (2) 在设计分析上日益要求面对多机系统模型来处理问题。
- (3) 在理论工具上越来越多地借助于现代控制理论。
- (4) 在控制手段上日益增加了微机、电力电子器件和远程通信的应用。
- (5) 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趋势趋向于:

- (1) 由开环检测向闭环控制发展。
- (2) 由高电压等级向低电压等级扩展,例如从EMS(能量管理系统)到DMS(配电管理系统)。
- (3) 由单个元件向部分区域及全系统发展。
- (4) 由单一功能向多功能、一体化发展。

(5) 装置性能向数字化、快速化、灵活性发展。

(6) 追求的目标向最优化、协调化、智能化发展。

(7) 由以提高运行的安全、经济、效率向管理、服务的自动化发展，例如 MIS 系统在电力系统中的应用。

五、电力系统自动化的内容

电力系统自动化是二次系统的一个组成部分。通常是指对电力设备及系统（或局部系统）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。从电力系统运行管理来区分，可以将电力系统自动化的内容划分为几个部分：电网调度自动化、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可分为火电厂综合自动化和水电厂综合自动化。

1. 电网调度自动化系统

电网调度自动化系统的功能可概括为：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和恢复正常供电。电网调度自动化系统的任务是综合利用计算机、远动和通信技术，实现电力调度管理自动化，有效地帮助调度员完成调度任务。

图 1-1 是调度自动化系统的结构简图。图中主站（MS）安装在调度中心，远动终端（RTU）安装在发电厂和变电站。在实现了综合自动化的厂（站）里 RTU 就是该厂（站）的自动监控系统的通信控制器。在 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。

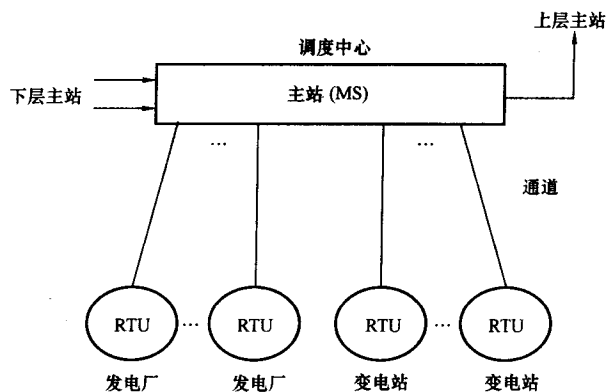


图 1-1 调度自动化系统结构图

远动终端（RTU）实现现场数据的采集和接收主站下达的各类命令。采集所在厂（站）电力设备的运行状态和运行参数，如电压、电流、有功功率和无功功率、有功电量和无功电量、频率、水位、断路器分合信号、继电保护动作信号等，发送到主站。RTU 接收主站通过通道送来的调度命令，如断路器控制信号、功率调节信号、改变设备整定值的信号及返回给主站的执行调度命令后的操作信息。

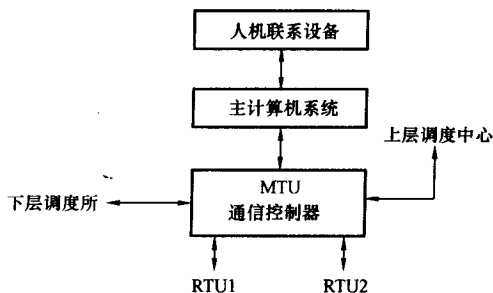


图 1-2 调度中心主站系统结构图

图 1-2 是调度中心主站系统的结构简图。主站通信控制器（MTU）接收各厂（站）用 RTU 送来的信息，将其送往主计算机，并将主计算机或调度员发出的调度命令送往各厂

(站)的 RTU。主计算机系统是主站的核心,负责信息加工和处理等。人机联系设备有屏幕显示器(CRT)、模拟屏、键盘、打印机等。显示器将主计算机信息处理结果显示出来;键盘接收调度员命令,决定是否对电力系统实行控制和调节。主站还要将经过处理的信息向上—层的调度中心转发,通常通过数据通信网进行。

电网调度自动化系统结构的一个特点是分层结构。通常电网调度控制分为国调、网调、省调、地区调、县调五个层次。

在发电厂和变电站装设的远动终端(或当地计算机监控站)直接采集实时信息,只有涉及上层调度网的信息才向上层调度传送。调度中心集中信息后作适当处理再向更高层次的调度转发。这种分层采集信息和分层控制简化了系统结构,减少了通道量和信息量,使信息的实时性明显提高。

2. 变电站综合自动化系统

变电站综合自动化系统包括变电站微机监控、微机保护、微机自动装置、电压和无功综合控制等子系统。

变电站微机监控系统的功能,应包括变电站模拟量、开关量、电能量的数据采集,事件顺序记录(SOE),故障录波和测距,谐波分析与监视,变电站操作控制,人机联系,现场级通信及与上级调度通信的全部功能。

在变电站综合自动化系统中微机保护装置与微机监控系统是相互独立的。由于微机保护的重要地位,微机监控仅综合其信号部分,不允许综合保护的功能。而微机保护装置却综合了部分自动装置的功能(例如低频减载的功能)。但对重要的自动装置,如备用电源自动投入装置,其功能仍需相互独立。

电压和无功综合控制系统实现对变电站电压和无功的自动控制,主要是自动调节有载调压变压器的分接头位置和自动控制无功补偿设备(电容器、电抗器、调相机)的投、切或控制其运行工况。变电站的电压和无功综合控制系统与调度中心的电压和无功综合控制系统是不同的。前者的控制仅在变电站内实现,并且要接受调度中心的调节控制命令。

3. 配电网综合自动化系统

配电网自动化是近几年发展起来的,目前国家尚无统一标准,各地情况也不尽相同。针对这种情况,国家电力公司安全运行与发输电运营部最近公布了《配电系统自动化规划设计导则试行方案》。根据该导则,配电系统自动化应包括配电网调度自动化系统、变电站、配电所自动化系统、馈线自动化系统(FA)、自动制图(AM)/设备管理(FM)/地理信息系统(GIS)、用电管理自动化系统、配电系统运行管理自动化系统、配电网分析软件系统(DPA)等。

配电网自动化涉及面广、范围大、内容多且复杂,是一个庞大的系统工程。随着社会的发展,对配电网质量的要求越来越高,故其功能也在不断增加、调整,新的综合自动化设备还在不断涌现,配电网综合自动化将以更新的面貌出现。

一般认为配电自动化的发展大致分为三个阶段:

(1) 第一阶段。第一阶段是基于自动化开关设备相互配合的配电自动化阶段,其主要设备为重合器和分段器等,不需要建设通信网络和计算机系统,其主要功能是在故障时通