



21st CENTURY

十一五规划教材

21世纪全国高等院校

自动化系列

实用规划教材



电力系统自动化

主 编 孟祥忠 王 博
副主编 杜兆文 王 蔚 徐 蓉

中国林业出版社
China Forestry Publishing House



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材

电力系统自动化

主 编	孟祥忠	王 博	
副主编	杜兆文	王 蔚	徐 蓉
参 编	朱 慧		

中国林业出版社
China Forestry Publishing House



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书共分 8 章, 主要介绍了电力系统自动化基础、电力调度自动化 SCADA 技术、电力系统远动技术、同步发电机自动并列原理、同步发电机自动励磁控制系统、电力系统频率控制技术、电力系统电压调节技术和配电网自动化等内容。

本书既可作为高等院校电气工程及其自动化专业和电力系统及其自动化专业的专业课教材, 也可作为研究生或电力工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统自动化/孟祥忠, 王博主编. —北京: 中国林业出版社; 北京大学出版社, 2006.8

(21 世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材)

ISBN 7-5038-4397-7

I. 电… II. ①孟… ②王… 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 090055 号

书 名: 电力系统自动化

著作责任者: 孟祥忠 王 博 主编

策划编辑: 李 虎

责任编辑: 李娉婷 曹 岚 张 敏

标准书号: ISBN 7-5038-4397-7

出 版 者: 中国林业出版社(地址: 北京市西城区德内大街刘海胡同 7 号 邮编: 100009)

<http://www.cfph.com.cn> E-mail: cfphz@public.bta.net.cn

电话: 总编室 66180373 营销中心 66187711

北京大学出版社(地址: 北京市海淀区成府路 205 号 邮编: 100871)

<http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com> E-mail: pup_6@163.com

电话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

印 刷 者: 北京飞达印刷有限责任公司

发 行 者: 北京大学出版社 中国林业出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 17.75 印张 400 千字

2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 25.00 元

《21 世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材》

联合编写学校名单（按拼音顺序排名）

- | | |
|---------------|-------------|
| 1 安徽建筑工业学院 | 30 南昌工程学院 |
| 2 安徽科技学院 | 31 平顶山工学院 |
| 3 北华大学 | 32 平顶山学院 |
| 4 北京工商大学 | 33 青岛科技大学 |
| 5 北京建筑工程学院 | 34 山东建筑工程学院 |
| 6 长春大学 | 35 山东科技大学 |
| 7 长春工程学院 | 36 陕西科技大学 |
| 8 长春工业大学 | 37 陕西理工学院 |
| 9 长春理工大学 | 38 沈阳大学 |
| 10 成都理工大学 | 39 沈阳工程学院 |
| 11 东北电力学院 | 40 沈阳工业大学 |
| 12 福州大学 | 41 沈阳化工学院 |
| 13 广东工业大学 | 42 四川理工学院 |
| 14 桂林工学院 | 43 太原科技大学 |
| 15 合肥工业大学 | 44 潍坊学院 |
| 16 河南工业大学 | 45 武汉大学 |
| 17 河南科技学院 | 46 武汉理工大学 |
| 18 河南农业大学 | 47 西安工程科技学院 |
| 19 华东交通大学 | 48 西安建筑科技大学 |
| 20 黄石理工学院 | 49 西安科技大学 |
| 21 吉林工程技术师范学院 | 50 西安理工大学 |
| 22 吉林化工学院 | 51 西安石油大学 |
| 23 吉林建筑工程学院 | 52 西安外事学院 |
| 24 江南大学 | 53 西安邮电学院 |
| 25 焦作工学院 | 54 西南大学 |
| 26 兰州理工大学 | 55 西南科技大学 |
| 27 聊城大学 | 56 浙江大学 |
| 28 辽宁大学 | 57 中北大学 |
| 29 内蒙古大学 | 58 中北大学分校 |

《21 世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材》

专家编审委员会

主任委员 张德江

副主任委员 (按姓氏拼音顺序排名)

陈 静 丁坚勇 侯媛彬

纪志成 任庆昌 吴 斌

秘书长 于微波

委 员 (按姓氏拼音顺序排名)

陈志新 戴文进 段晨旭 樊立萍

范立南 公茂法 关根志 嵇启春

蒋 中 雷 霞 刘德辉 刘永信

刘 原 马永翔 孟祥萍 孟彦京

聂诗良 王忠庆 吴旭云 燕庆明

杨新华 尤 文 张桂青 张井岗

总 序

我们所处的时代被称为信息时代。信息科学与技术的迅速发展和广泛应用,深深地改变着人类生产、生活的各个方面。人类社会生产力发展和人们生活质量的提高越来越得益于和依赖于信息科学与技术的发展。自动化科学与技术涉及到信息的检测、分析、处理、控制和应用等各个方面,是信息科学与技术领域的重要组成部分。在我国经济建设的进程中,工业化是不可逾越的发展阶段。面对全面建设小康社会的发展目标,党和国家提出走新型工业化道路的战略决策,这是一条我国当代工业化进程的必由之路。实现新型工业化,就是要坚持走科技含量高、经济效益好、资源消耗低、环境污染少、人力资源优势得到充分发挥的可持续发展的科学发展之路。在这个过程中,自动化科学与技术起着不可替代的重要作用,高等学校的自动化学科肩负着人才培养和科学研究的光荣的历史使命。

我国高等教育中工科在校大学生数占在校大学生总数的 35%~40%,其中自动化类的学生是工科各专业中学生人数最多的专业之一。在我国高等教育已走进大众化阶段的今天,人才培养模式多样化已成为必然的趋势,其中应用型人才是我国经济建设和社会发展需求最多的一大类人才。为了促进自动化领域应用型人才培养,发挥院校之间相互合作的优势,北京大学出版社组织了此套《21 世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材》。

参加这一系列教材编写的基本上都是来自地方工科院校自动化学科的专家学者,由此确定了教材的使用范围,也为“实用教材”的定位找到了落脚点。本系列教材具有如下特点:

(1) 注重实用性。地方工科院校的人才培养规格大多定位在高级应用型,对这一大类人才的培养要注重面向工程实践,培养学生理论联系实际、解决实际问题的能力。从这一教学原则出发,本系列教材注重实用性,注意引用工程中的实例,培养学生的工程意识和工程应用能力,因此将更适合地方工科院校的教学要求。

(2) 体现新颖性。更新教材内容,跟进时代,加入一些新的先进实用的知识,同时淘汰一些陈旧过时的内容。

(3) 院校间合作交流的成果。每一本教材都有几所院校的教师参加编写。北大出版社事先在西安市和长春市召开了编写计划会和审纲会,来自各院校的教师比较充分地交流了情况,在相互借鉴、取长补短的基础上,形成了编写大纲,确定了编写原则。因此,这一系列教材可以反映出各参编院校一些好的经验和做法。

(4) 这一系列教材几乎涵盖了自动化类专业从技术基础课到专业课的各门课程,到目前为止,列入计划的已有 30 多门,教材门数多,参与的院校多,参加编写人员多。

地方工科院校是我国高等院校中比例最大的一部分。本系列教材面向地方工科院校自动化类专业教学之用,将拥有众多的读者。教材专家编审委员会深感教材的编写质量对教学质量的重要性,在审纲会上强调了“质量第一,明确责任,统筹兼顾,严格把关”的原则,要求各位主编加强协调,认真负责,努力保证和提高教材质量。各位主编和编者也将尽职尽责,密切合作,努力使自己的作品受到读者的认可和欢迎。尽管如此,由于院校之间、编者之间的差异性,教材中还是难免会出现一些问题和不足,欢迎选用本系列教材的教师、学生提出批评和建议。

张德江

2006年1月

前 言

《电力系统自动化》是许多高等院校电气工程及其自动化和专业电力系统及其自动化专业的专业课教材。本书特点为坚持理论联系实际,突出应用技术。由于我国幅员辽阔,电力网络发展不平衡,不仅各种发电厂种类并存,而且电力系统自动装置类型繁多,技术发展的步伐也不一致,因此,本书在讲述电力系统自动化理论和控制技术时,既注意到了电力系统使用的传统自动化装置,也考虑到了现代电力系统自动化的新技术和新装置。考虑到目前电气工程及其自动化和电力系统及其自动化专业的学生的就业方向,除了进入电力系统有关部门工作外,较多的还是进入大中型企业从事电气技术工作,所以,本书也讲解了配电自动化技术的有关知识以拓宽读者的知识面。

本书由青岛科技大学孟祥忠、长春工程学院王博任主编,山东科技大学杜兆文、长春工业大学王蔚、陕西理工学院徐蓉任副主编,青岛科技大学朱慧参加编写。

全书共分8章:第1章介绍电力系统自动化基础,由孟祥忠编写;第2章讲述电力调度自动化 SCADA 技术,由孟祥忠和朱慧合编;第3章系统地介绍电力系统远动技术,由王蔚编写;第4章讲解同步发电机自动并列原理,由徐蓉编写;第5章讲授同步发电机自动励磁控制系统的相关知识,由杜兆文编写;第6章讲述电力系统频率控制技术,第7章介绍电力系统电压调节技术,这两章由王博编写;第8章讲授配电网自动化,由王蔚和徐蓉合编。全书由孟祥忠统稿并定稿。

本书既可作为高等院校电气工程及其自动化专业和电力系统及其自动化专业的专业课教材,也可作为研究生或电力工程技术人员的参考用书。

由于条件和学术水平有限,本书一定存在不少缺点和错误,希望读者批评指正。同时,在编写本书的过程中,曾参考、引用了许多文献与技术资料,在此特向有关作者深表谢意!

编 者

2006年5月

目 录

第 1 章 电力系统自动化基础 1

1.1 概述 1

1.1.1 电力系统运行控制的特点 1

1.1.2 电力系统运行控制目标 2

1.2 电力系统自动化基本内容 4

1.2.1 电网调度自动化 5

1.2.2 电厂自动化 11

1.2.3 变电站综合自动化 11

1.2.4 配电自动化 11

1.3 电力系统自动化发展趋势 13

1.3.1 控制理论的应用 13

1.3.2 数字化电力系统的 概念与构架 13

1.3.3 电力自动化系统 新技术与趋势 15

本章小结 16

思考题与习题 16

第 2 章 电力调度自动化 SCADA 技术 17

2.1 电力调度自动化系统结构 17

2.1.1 信息采集和命令 执行子系统 17

2.1.2 信息传输子系统 18

2.1.3 信息收集处理与 控制子系统 18

2.1.4 人机联系子系统 19

2.2 电量参数信息采样方式 与算法设计 19

2.2.1 电量信号变换原理 与传感器 19

2.2.2 直流采样方式原理 26

2.2.3 交流采样方式与算法 29

2.3 电力系统自动化数据采集系统 33

2.3.1 模拟量信号采集 33

2.3.2 数字量 I/O 系统 39

2.3.3 基于单片机的电力系统 自动化数据采集系统设计 41

2.4 电力自动化 SCADA 系统 设计实例 43

2.4.1 SCADA 基本功能 43

2.4.2 SCADA 设计实例 44

本章小结 45

思考题与习题 46

第 3 章 电力系统远动技术 47

3.1 信息传输基础 47

3.1.1 模拟通信和数字通信 47

3.1.2 二进制数字信号通信 49

3.1.3 数字通信传输方式 49

3.1.4 信息传输速率与码误率 51

3.1.5 异步传输和同步传输 51

3.2 电力系统远动通信系统简介 54

3.2.1 数字信号传输系统 基本结构 54

3.2.2 数字信号的调制与解调 55

3.2.3 现场总线通信方式 60

3.2.4 局域网信息传输 61

3.3 信息传输差错控制原理 64

3.3.1 信息传输差错控制 的必要性 64

3.3.2 差错控制方式 64

3.3.3 差错控制的实现途径 65

3.4 电力系统远动装置功能与结构 68

3.4.1 远动装置概述 68

3.4.2 远动装置功能 69

3.4.3 远动装置的基本构成 71

3.4.4 远动装置的软件结构 73

3.5 RTU“四遥”单元设计原理	73	5.1.1 电力系统无功功率控制的必要性	109
3.5.1 遥测量采集单元设计	73	5.1.2 同步发电机励磁系统的任务	110
3.5.2 遥信量采集单元设计	74	5.1.3 对同步发电机励磁系统设计的基本要求	117
3.5.3 遥控量输出单元设计	75	5.2 同步发电机励磁系统	118
3.5.4 遥调量输出单元设计	76	5.2.1 同步发电机励磁系统的基本构成	118
3.6 电力系统远动通信规约	77	5.2.2 常用同步发电机励磁系统的工作原理	118
3.6.1 RTU与调度中心通信的特点	77	5.3 励磁调节装置的基本原理	122
3.6.2 RTU与调度中心之间的通信规约	78	5.3.1 励磁调节装置的基本原理与调节特性	122
本章小结	83	5.3.2 ZTL型励磁调节器的构成与工作原理	124
思考题与习题	83	5.3.3 ZTL型励磁调节器静态工作特性	133
第4章 同步发电机自动并列原理	84	5.4 同步发电机励磁调节器静态特性的调整	135
4.1 概述	84	5.4.1 同步发电机电压调节特性的调整	135
4.1.1 并列操作的意义	84	5.4.2 发电机调节特性的平移	138
4.1.2 对并列操作的基本要求	85	5.5 同步发电机励磁系统的动态特性	139
4.1.3 并列操作方式	85	5.5.1 概述	139
4.2 自动准同期装置的组成	85	5.5.2 同步发电机励磁系统的传递函数	140
4.2.1 准同期并列的理想条件	85	5.6 微机型励磁调节器	152
4.2.2 并列误差对并列的影响	86	5.6.1 概述	152
4.2.3 典型自动准同期装置的组成及并列原理	88	5.6.2 微机型励磁调节器硬件构成	152
4.3 ZZQ-5模拟式自动准同期装置	93	5.6.3 微机型励磁调节器软件结构	154
4.3.1 ZZQ-5的合闸部分原理	93	本章小结	159
4.3.2 ZZQ-5的均频均差部件	96	思考题与习题	159
4.3.3 ZZQ-5的均压部件	100		
4.4 微机自动准同期装置	101		
4.4.1 角差的预报方法	101		
4.4.2 微机自动准同期装置的合闸部分	104		
4.4.3 微机自动准同期装置的均频与均压部分	104		
本章小结	107		
思考题与习题	108		
第5章 同步发电机自动励磁控制系统	109	第6章 电力系统频率控制技术	160
5.1 同步发电机励磁系统的任务	109	6.1 电力系统频率调节的必要性	160
		6.1.1 频率对电力用户的影响	160

6.1.2 频率对电力系统的影响.....	160	7.4 无功功率的平衡与电压	
6.1.3 频率调整的必要性.....	160	水平的关系.....	198
6.1.4 联合电力系统对调频的		7.4.1 无功功率的平衡	198
要求.....	161	7.4.2 无功功率的平衡和	
6.2 电力系统频率特性	161	电压水平的关系	199
6.2.1 概述.....	161	7.5 电力系统的电压管理	200
6.2.2 电力系统负荷的		7.5.1 电压中枢点的选择	200
功率—频率特性.....	163	7.5.2 中枢点电压的允许	
6.2.3 发电机组的		变化范围	201
功率—频率特性.....	165	7.5.3 中枢点的调压方式	202
6.2.4 电力系统的频率特性.....	170	7.6 电力系统电压调节方法	203
6.3 电力系统自动调频方法	173	7.6.1 发电机调压	203
6.4 联合电力系统的频率调整	176	7.6.2 改变变压器分接头调压	204
6.4.1 频率和有功功率控制		7.6.3 改变系统无功功率	
的数学模型.....	176	分布调压	209
6.4.2 互联系统的频率和		7.6.4 改变电力网参数调压	214
有功功率控制.....	180	7.7 电力系统的自动电压控制技术	217
6.4.3 自动发电控制(AGC)技术	183	7.7.1 电压稳定破坏的控制	218
6.5 电力系统稳定控制装置	186	7.7.2 自动电压控制(AVC)	219
6.5.1 常规稳定装置.....	186	本章小结	221
6.5.2 微机稳定装置.....	188	思考题与习题	221
本章小结	189	第 8 章 配电网自动化	223
思考题与习题	189	8.1 变电站综合自动化	223
第 7 章 电力系统电压调节技术.....	191	8.1.1 变电站综合自动化系统	
7.1 电力系统电压调节的必要性	191	的研究内容	223
7.1.1 电压对电力用户的影响.....	191	8.1.2 变电站综合自动化的现状	
7.1.2 电压对电力系统的影响.....	191	与发展趋势	224
7.2 电力系统的无功电源	192	8.1.3 变电站综合自动化系统的	
7.2.1 发电机.....	192	功能	225
7.2.2 调相机.....	193	8.1.4 变电站综合自动化系统	
7.2.3 静电电容器.....	193	结构	231
7.2.4 静止无功补偿器.....	194	8.2 配电网自动化	235
7.2.5 静止无功发生器.....	195	8.2.1 概述	235
7.3 电力系统中的无功负荷		8.2.2 配电自动化的现状	236
和无功损耗.....	196	8.2.3 配电自动化系统的功能	238
7.3.1 电力系统的无功负荷.....	196	8.2.4 配电自动化系统的组成	242
7.3.2 电力系统的无功损耗.....	197	8.3 馈线自动化	243
		8.3.1 概述	243

8.3.2 自动重合器.....	244	8.5 配电网自动化系统的通信方式	260
8.3.3 分段器.....	245	8.5.1 概述	260
8.3.4 馈线智能终端设备 FTU	247	8.5.2 配电线路载波通信	261
8.3.5 馈电线路故障隔离与自动 恢复原理.....	248	8.5.3 无线扩频通信	262
8.4 负荷自动控制技术	257	8.5.4 光纤通信	264
8.4.1 负荷控制的必要性.....	257	8.5.5 电话线通信	265
8.4.2 电力负荷控制类型.....	258	8.5.6 无线电通信	266
8.4.3 负荷自动控制系统的功能.....	258	8.5.7 混合通信	269
8.4.4 负荷自动控制系统 工作原理.....	258	本章小结	269
		思考题与习题	269
		参考文献	270

第 1 章 电力系统自动化基础

电力系统是指由进行电能生产、变换、输送、分配和消费的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。它由发电厂、变电所、输配电线路及各种用电设备组成。为了确保电力系统安全、优质、稳定、经济地运行，必须提高自动化水平。电力系统自动化除包括继电保护与自动装置外，电力通信、调度自动化及自动调控设备等二次系统的种种装备都是必备的。本章主要从现代电力系统自动化的作用及其重要组成部分来讲述电力系统自动化基础知识。

1.1 概 述

1.1.1 电力系统运行控制的特点

电力系统同其他的工业系统相比有着明显的特点，主要表现在以下几个方面。

1. 电能不能大量储存

电能的生产、变换、输送、分配和消费等都是在同一时间内进行的，不能大量储存。在任何时刻电力系统中发电厂生产的电能都取决于同一时刻用电设备消费的能量与输送、分配中损耗的电能之和。这是电能生产的最大特点。这个特点要求在运行时保持电源和负荷之间的功率平衡。另外，它不但要求每一时刻发出的总电能等于系统消费的总电能，而且要求所有的中间传输环节都畅通无阻，以使发出的电能有秩序地输送出去，耗尽无遗。因此，电力系统的各个设备环节之间具有十分紧密的相互依赖关系。不论生产和变换能量的原动机、发电机还是输送、分配电能的变压器、输配电线路以及用电设备等，只要其中的任何一个元件设备发生故障，就会影响电力系统正常工作。

2. 电能供应的重要性

由于电能与其他能量之间转换方便，易于进行大量生产、集中管理、远距离输送、自动控制，使用电能较使用其他能量有显著优点。因此，电能是国民经济各部门和人们物质文化生活中使用的主要能源，其供应的中断或不足将会直接影响国民经济各部门的正常运转和人们的生活质量。

3. 暂态过渡过程十分迅速

电力系统中任何一处发生的电磁变化过程，都会以光速传播而影响整个电力系统，所以电力运行中发生突变所引起的电磁方面的变化过程是极其迅速的。电力系统的正常操作，如发电机、变压器、电力线路、电动机等元件的投入和退出都是在极短时间内完成的；电力系统出现的故障，如雷击引起线路闪络、导致相间短路或接地故障以及运行人员误操作造成发电机误跳闸等，都是在一瞬间完成的。因此在电力系统中要求进行快速控制和快速排除故障，否则将危及整个电力系统的安全稳定运行。

4. 电力系统结构复杂性

由于现代电力系统装机容量越来越大——多达几亿千瓦。供电距离几千千米，其中所包含的厂、站及线路的数量很大——达数百个，而且纵横联线，分布辽阔。在控制系统的分类中，它属于复杂系统。

1.1.2 电力系统运行控制目标

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. 保证电力系统运行的安全可靠地运行

电力生产中最常提到的口号是“安全第一”。安全，就是不发生事故，这是电力企业的头等大事。因为人们都了解，电力系统一旦发生事故，其危害是非常严重的，轻者导致电力设备的损坏，使少数用户停电，给生活和生产造成一定的损失；重者则波及到电力系统的广大区域，甚至引起整个电力系统的瓦解，使成千上万的用户失去供电，使生产设备受到大规模的严重损坏，甚至造成人员的伤亡，使国民经济遭受极大损失。

电力系统的安全运行控制可以用等式约束条件和不等式约束条件来描述。在稳态运行中，电力系统应能持续不间断地完成发电、输配电和供电的生产过程，在数量和质量上满足用户用电要求。为此，必须保证满足两种条件方程，也称为约束方程。

(1) 等式约束条件 系统发出的总的有功功率和无功功率应在任一时间与总的有功和无功负荷(包括网损)相等，即

$$\left. \begin{aligned} \sum P_{Gi} - \sum P_{Lj} - \sum P_{LS} &= 0 \\ \sum Q_{Gi} - \sum Q_{Lj} - \sum Q_{LS} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中 P_{Gi} 、 Q_{Gi} ——发电机 i 的有功功率和无功功率；

P_{Lj} 、 Q_{Lj} ——负荷 j 的有功功率和无功功率；

P_{LS} 、 Q_{LS} ——电力系统中各种配电和输电线路及设备的总有功功率和无功功率损耗。

(2) 不等式约束条件 为了保证系统安全运行，有关电气设备的运行参数都应处于运行允许值范围内，即

$$\left. \begin{aligned} P_{Gimin} &\leq P_{Gi} \leq P_{Gimax} \\ Q_{Gimin} &\leq Q_{Gi} \leq Q_{Gimax} \\ S_{ijmin} &\leq S_{ij} \leq S_{ijmax} \\ U_{imin} &\leq U_i \leq U_{imax} \\ f_{min} &\leq f \leq f_{max} \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

式中 P_{Gi} 、 P_{Gimax} 、 P_{Gimin} ——分别为发电机 i 有功功率及其上、下限值；

Q_{Gi} 、 Q_{Gimax} 、 Q_{Gimin} ——分别为发电机 i 无功功率及其上、下限值；

S_{ij} 、 S_{ijmax} 、 S_{ijmin} ——分别为输电线路 $i-j$ 和变压器的视在功率及其上、下限值；

U_i 、 U_{imax} 、 U_{imin} ——分别为节点 i 电压及其上、下限值；

f 、 f_{max} 、 f_{min} ——分别为系统频率及其上、下限值。

(3) 电力系统的运行状态 由两种约束条件可将系统的运行分为五种状态，即正常状态、预警状态、紧急控制状态、崩溃状态和恢复状态等。随着运行条件的改变，电力系统将在各种状态之间进行转换，如图 1.1 所示。

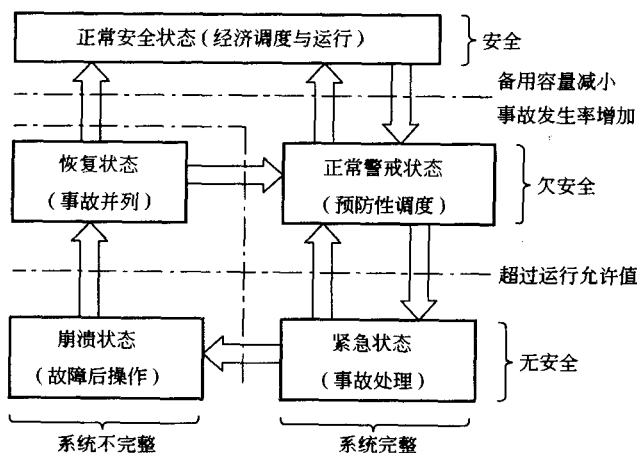


图 1.1 电力系统运行状态及其转换框图

在正常运行状态下，所有等式和不等式约束条件都满足，表明发电和负荷平衡，没有设备过载，有足够的备用储备使系统能承受一定的干扰而保持在适当的安全水平。当扰动概率增加，使系统安全水平逐步降低而进入警戒状态。此时，虽然所有约束条件仍然满足，但是备用储备减少，某些干扰可能导致不等式约束破坏（如设备过载），使系统安全受到威胁。在这种状态下，应采取预防控制使系统恢复到正常状态。采取预防控制前，如发生严重的干扰，系统进入紧急状态。此时，不等式约束被破坏，系统安全水平为零。但是，系统仍然完整，应启动紧急控制措施使系统至少恢复到警戒状态。如果紧急控制措施未及时采取或失效，系统将解列和进入极端紧急状态。在极端紧急状态中，等式和不等式约束都被破坏，系统不再完整，系统大部分负荷丧失。紧急控制作用应尽可能多地挽救解裂后的子系统，以避免整个系统的完全崩溃。一旦崩溃停止，如果仍有设备运行在额定容量之内，或某些设备紧跟崩溃而重新启动，则系统可能进入恢复状态。采取恢复控制措施，重新带上所有失去的负荷和连接系统，系统可能过渡到警戒状态或正常状态则视情况而定。

电力系统发生事故既有外因也有内因，外因如狂风、暴雨、雷电、冰雪以及地震等自然灾害；内因则是电力系统本身存在的薄弱环节、设备隐患和运行人员技术水平差等多方面因素。一般来说，电力系统的事故多半是由外因引起，又是由于内部的薄弱环节或调控不当而引起的。要想避免事故的发生，一方面需要电力系统本身更加“强大”，发电能力和相应的输电、变电设备都留有足够的裕度，各种安全和自动设备非常灵敏可靠，电力系统自身具有抵抗各种事故的能力；另一方面，要不断提高具有电力系统运行控制重大职责的各级调度中心的调度技术水平。现代电力系统不断扩大，结构日趋复杂，监视控制所需的实时信息越来越多，仅凭人的知识、技术和经验是越来越难于应付了。只有采用由当代

最新技术装备起来的电网调度自动化系统,才能使调度人员真正做到统观全局,科学决策,正确指挥,以保证电力系统的安全运行。

2. 保证电能质量

衡量电能质量的标准是频率、电压和波形三项指标。

频率是电能质量标准中最严格的一项,频率允许的波动范围在我国是 $50 \pm 0.2 \text{ Hz}$ (有的国家是 $50 \pm 0.1 \text{ Hz}$)。使频率稳定的关键是保证电力系统有功功率的供求数量时时刻刻都是平衡的。前面已经说过,负荷是随时变动的,因此,只有让发电厂的有功出力时时刻刻跟着负荷的有功功率,并随其变动而变动。调频过程是由自动装置自动进行的,要始终保持系统频率合格,必须依赖一整套自动化的调节控制系统。

电压允许偏移范围一般是额定电压的 $\pm 5\%$ 左右。能使电压稳定的关键条件是让系统中的无功功率供需平衡,并且要求在系统各个局部就地平衡,以减少大量无功功率在线路上传输。其具体的调压措施有发电机的励磁调节、调相机和静止补偿器的调节、有载调压变压器的分接头调节以及并联补偿电容器组的投切等。现代电力系统一般都配有无功/电压自动控制系统,以满足对电压稳定性的要求。

发电机发出电压的波形是正弦波,由于电力系统中各种电器设备在设计时都充分考虑了波形问题,在一般情况下,用户得到的电压波形也是正弦波。如果波形不是正弦波,其中就会包含许多种高次谐波成分,这对许多电子设备会有很大的不良影响,对通信线路也会造成干扰,还会降低发电机的效率,甚至还可能造成电力系统发生危险的高次谐波谐振,使电力设备遭到严重破坏。现代柔性电力系统中广泛应用电力电子设备装置,产生谐波的主要根源。因此,要加强对波形的自动监测和采取有效的抑制措施。

3. 保证电力系统运行的经济性

电力系统运行控制的目标,除了首要关注的安全问题和电能质量问题外,还应当合理安排各类发电厂所承担的负荷,力求降低发电成本,减少网络传输损失,已获得最大的经济效益,全面地提高整个电力系统运行的经济性。

1.2 电力系统自动化基本内容

自动化是指机器设备(动力)或者生产过程、管理过程,在没有人直接参与下,经过自动检测、信息处理、分析判断、操纵控制,实现预期的目标、目的或完成某种过程。自动化是自动化技术和自动化过程的简称。自动化技术主要有两个方面。

(1) 用自动化机械代替人工的动力方面的自动化技术。

(2) 在生产过程和业务处理过程中,进行测量、计算、控制等,这是信息处理方面的自动化技术。

电力系统自动化也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,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,以保证电力系统安全经济地运行和具有合格的电能质量。同时,电力系统自动化是由许多子系统组成的,每个子系统完成一项或几项功能。

可以将电力系统自动化内容划分为电力系统调度自动化、发电厂自动化和变电站自动化等三部分。调度自动化又可分为发电和输电调度自动化(通常称为电网调度自动化)、配电网调度自动化(通常称为配电网自动化或配电自动化)。

1.2.1 电网调度自动化

电网调度自动化系统概念的提出是在 20 世纪 50 年代中期,这标志着现代电网自动化的开始。当时的基于模拟计算机和模拟通信信道的自动发电控制(Automatic Generation Control, AGC),主要包括负荷—频率控制(LFC)和经济调度(ED)。20 世纪 60 年代数字计算机首次应用于电力系统控制中心,出现了电网 SCADA 系统。发电厂、变电所所设的 RTU 将所收集到的信息通过双向信道传送给主站。其主要运行信息可及时自动地传送给控制中心,调度员可通过遥控装置直接远距离操作发电厂、变电所开关;80 年代,AGC 系统不再独立存在,而是以 AGC 软件包的形式和 SCADA 系统结合,形成能量管理系统(Energy Management System, EMS),很快 EMS 的作用已超出 AGC。其中,状态估计(SE)软件的出现对于实时信息的处理是一个重大突破。由于 SCADA 采集的实时数据(“生数据”)中不可避免地含有误差(测量误差、传输误差),因此利用状态估计来改进原始信息,以得到精确、完整、可靠的运行参数,建立反映电力系统实时状态的数据库(“熟数据库”)。同时,也可根据系统累计的历史纪录数据进行母线负荷预测,还可实现在信息丢失或电网不可观察(通道可能中断,RTU 可能停运等)情况下的伪量测。网络熟数据库的建立,为各种电力系统的优化软件(如线损修正、无功优化、最优潮流等)的开发提供了条件。另外,其他用于 EMS 的还有无功功率/电压调度控制,短期负荷预计,水电厂调度,处理报警信息的专家系统等。

电网调度自动化系统是确保电网安全、优质、经济地发供电,提高电网调度运行管理水平的重要手段,是电力生产自动化和管理现代化的重要基础。自 1979 年我国 500kV 平武线输电工程引进第一套计算机与运动终端(RTU)一体化的 SCADA 系统(SINDAC-3)起,就确立了计算机与运动相结合的 SCADA 理念。但如何与 SCADA 结合接入实时系统并直接控制发电过程,却是个新问题,这就导致了 20 世纪 80 年代后期东北、华北、华中、华东四大电网 EMS 的引进工作。和第一次 SCADA 的引进不同,这次 EMS 的引进是有选择地引进。重点放在 EMS 的支撑平台和自动发电控制(AGC)上,EMS 高级应用软件完全由国内开发。从英国西屋公司引进的 WESDAC-32 系统,使用了美国 ESCA 公司的 HABITAT 支撑平台和 AGC 软件。电力部两院参与引进,并各自分担两网的现场验收、系统汉化和 RTU 接入等任务。四大网 EMS 投入运行不久,电力部通信调度局的 H80E 系统也随着通调局升为国家电力调度中心而由西门子的 SPECTRUM 分布式系统所取代。第二次引进,在较高层面上实现了又一次“引进—消化—开发—创新”,导致 20 世纪 90 年代自主版权 EMS 支撑平台和应用软件的先后问世。SD-6000、OPEN-2000、CC-2000 就是这个时代的产物,其主要任务包括以下五个方面。

- (1) 发挥设备最大能力满足负荷的需要。
- (2) 使整个电网安全可靠地运行和连续供电。
- (3) 保证电能质量。
- (4) 经济合理利用能源。