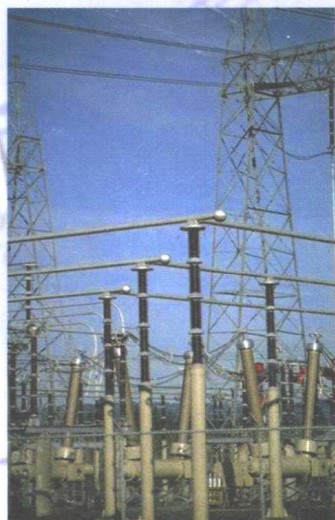


# 电力系统

## 自动控制新技术

郭培源 编著



科学出版社

# 电力系统自动控制新技术

郭培源 编著

科学出版社

2001

## 内 容 简 介

本书系统地论述了电力系统的自动控制技术,从工程角度综合分析了电力系统自动控制技术的最新成果、研究动向,并介绍了高新技术的应用。全书共分7章,内容包括电力系统及其控制技术概述,电力系统稳定及其控制技术,电力系统频率和有功功率控制技术,电力系统电压调整和无功功率控制技术,电力系统调度自动化及自动监视和控制,配电网自动控制技术,灵活交流输电系统控制技术。其中重点论述了低频振荡及附加控制技术以及用综合阻尼系数方法研究电力系统低频振荡的技术;特别对同步发电机励磁系统模糊逻辑控制、人工神经网络在有功功率和频率控制方面的应用以及电力系统无功/电压专家控制技术、智能变结构控制等进行了专题的研究;并分析了近年来电力系统的新技术 GPS 及其监测和控制、电力负荷控制和灵活交流输电系统控制技术及应用。

本书可供从事电力系统研究、设计、运行、维护工作的工程技术人员和从事自动控制方面工作的工程技术人员使用,也可作为高等院校有关专业教师、学生的教学用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

电力系统自动控制新技术/郭培源编著.-北京:科学出版社,2001

ISBN 7-03-009187-6

I. 电… II. 郭… III. 电力系统-自动控制 IV. TM761

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 05032 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2001 年 5 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16  
2001 年 5 月第一次印刷 印张: 11 1/2  
印数: 1—2 500 字数: 260 000

定价: 23.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈环伟〉)

# 前 言

目前中国电力系统正经历着一场以市场经济为导向的巨大变革。以数字电力系统(DPS)为代表的计算机技术、通信技术、控制理论及信息处理技术、新材料、新工艺的高速发展,使得电力系统的技术更新速度大大加快,不同技术之间的相互渗透、相互融合也越来越普遍。中国电力的发展迎来了前所未有的机遇。

随着我国大容量发电机组的投入运行以及超高压远距离和直流输电的混和电网的建设,未来以三峡电网为中心的全国性电力系统的形成,全国电网必将发生巨大的变化。电力系统的不断扩大,使电力系统的结构和运行方式变得越来越复杂多变,对电力系统的自动控制技术水平要求也越来越高。因此,提高和保证电力系统的安全可靠性、供电质量以及运行的经济性已成为电力系统发展的一个重要目标。为了适应我国电力系统的发展并实现这上述目标,必须采取最新的技术和控制手段对电力系统的各种运行状态和设备进行有效的自动控制。因此,研究电力系统自动控制技术的现状和发展具有重要意义。

电力系统自动控制技术是一门涉及电力系统运行理论、计算机技术、现代控制理论、数字通信技术以及信息处理和网络控制技术的综合技术。近年来,模糊控制技术、人工神经网络技术、专家控制技术、灵活交流输电系统、GPS技术与动态监测以及网络控制技术等新技术在电力系统都得到了不同程度的应用。

本书旨在介绍电力系统自动控制技术的最新动向和最新成果,并介绍一些有潜力的新思想、新方法和新技术。全书共分7章,其基本内容如下:

- 第1章简要回顾电力系统的组成特点和要求以及未来的发展,讨论电力系统事故产生的原因及后果,提出保证电力系统安全运行的控制原则。

- 第2章主要阐明电力系统稳定性的基本概念和稳定控制的重要性,介绍电力系统低频振荡及附加励磁控制技术,重点论述用综合阻尼系数方法研究电力系统低频振荡的技术成果。特别就同步发电机励磁系统模糊逻辑控制以及多机电力系统PSS参数协调控制进行专题的研究。

- 第3章分析电力系统频率和有功功率控制技术,重点研究自动发电控制技术和人工神经网络在有功功率和频率控制中的应用。

- 第4章介绍电力系统电压调整和无功功率控制的措施和方法,着重研究电力系统无功/电压专家控制技术。

- 第5章介绍以数字电力系统(DPS)为代表的调度自动化及自动监视和控制技术,重点介绍GPS技术及其在监测和控制方面的应用。

- 第6章研究和阐述在我国刚刚起步的配电自动控制技术,较全面地论述配电网自动化的特点、分类以及控制方式。

- 第7章论述当今电力系统所关注的灵活交流输电系统控制技术,提出若干控制模型,重点研究可控串联补偿装置的智能变结构控制。

- 附录给出阅读正文的有关章节时所需的参考资料。

本书是作者多年从事电力系统自动控制领域教学和科研的总结，同时也是对上述新技术应用进行的专题研究。由于水平有限，书中难免存在缺点和错误，敬请读者指正。

作 者

2001年1月

# 目 录

<b>第 1 章 电力系统及其控制技术概述</b> .....	( 1 )
1.1 电力系统的组成、特点及其基本要求 .....	( 1 )
1.1.1 电力系统组成的特点 .....	( 1 )
1.1.2 电力系统的基本要求 .....	( 2 )
1.2 电力系统事故产生的原因及后果 .....	( 3 )
1.2.1 事故的发生 .....	( 3 )
1.2.2 由系统频率下降引起的事故和事故扩大 .....	( 4 )
1.2.3 由系统电压下降引起的事故和事故扩大 .....	( 5 )
1.2.4 由系统稳定破坏引起的事故和事故扩大 .....	( 6 )
1.2.5 由电力线路过负荷引起的事故和事故扩大 .....	( 7 )
1.3 保证电力系统安全运行的控制原则 .....	( 7 )
1.3.1 电力系统安全控制状态 .....	( 7 )
1.3.2 电力系统安全控制原则 .....	( 9 )
1.3.3 电力系统计算机分层控制 .....	( 9 )
1.3.4 电力系统调度(控制)中心 SCADA 系统 .....	( 10 )
1.3.5 发电厂变电所控制 .....	( 12 )
<b>第 2 章 电力系统稳定及其控制技术</b> .....	( 15 )
2.1 电力系统稳定及控制的重要性 .....	( 15 )
2.2 电力系统稳定性的基本概念 .....	( 15 )
2.2.1 电力系统静态稳定性 .....	( 16 )
2.2.2 电力系统暂态稳定性 .....	( 18 )
2.3 研究电力系统稳定性的基本模型 .....	( 19 )
2.3.1 同步发电机模型及其基本方程式 .....	( 19 )
2.3.2 励磁系统模型及其基本方程式 .....	( 22 )
2.3.3 电力系统稳定器模型 .....	( 25 )
2.3.4 原动机调速系统模型及其基本方程式 .....	( 25 )
2.4 低频振荡及附加控制技术 .....	( 29 )
2.4.1 低频振荡原理及励磁系统对稳定的影响 .....	( 30 )
2.4.2 影响阻尼的因素及改善系统阻尼的措施 .....	( 35 )
2.5 提高电力系统稳定性的控制技术 .....	( 36 )
2.5.1 用 PSS 增强电力系统阻尼防止低频振荡 .....	( 37 )
2.5.2 多机电力系统中 PSS 分散协调控制 .....	( 41 )
2.5.3 采用综合阻尼系数方法研究电力系统低频振荡 .....	( 45 )
2.6 提高和改善电力系统静态和暂态稳定性的自动装置和控制技术 .....	( 51 )
2.6.1 改善同步发电机及励磁调节控制系统参数及功能 .....	( 52 )

2.6.2	改善原动机调速系统的调节特性	( 54 )
2.6.3	减小变压器电抗	( 56 )
2.6.4	改善继电保护和开关的特性	( 56 )
2.6.5	改善输电线路的特性	( 57 )
2.6.6	输电线路采用串联电容补偿控制	( 58 )
2.6.7	并联电抗器补偿控制	( 59 )
2.6.8	静止补偿器控制	( 59 )
2.6.9	发电机采用电阻电气制动控制	( 61 )
2.6.10	调节直流输电功率控制	( 62 )
2.6.11	电力系统失步振荡后的控制	( 63 )
2.7	现代控制技术在电力系统稳定中的应用	( 65 )
2.7.1	线性最优励磁控制技术	( 65 )
2.7.2	模糊逻辑控制基本原理	( 67 )
2.7.3	同步发电机励磁系统模糊逻辑控制	( 75 )
<b>第 3 章</b>	<b>电力系统频率和有功功率控制技术</b>	<b>( 78 )</b>
3.1	电力系统频率和有功功率控制的意义	( 78 )
3.2	电力系统有功功率平衡控制	( 79 )
3.3	电力系统的频率控制	( 80 )
3.3.1	电力系统负荷的频率特性	( 80 )
3.3.2	同步发电机组的频率特性	( 82 )
3.3.3	电力系统的频率特性及其控制	( 83 )
3.3.4	联合电力系统的频率控制	( 85 )
3.4	电力系统的有功功率经济分配控制	( 88 )
3.4.1	发电设备的经济特性	( 88 )
3.4.2	等耗量微增率准则及应用	( 89 )
3.4.3	考虑网络损耗的有功负荷控制原则	( 91 )
3.5	自动发电控制技术	( 92 )
3.5.1	概述	( 92 )
3.5.2	自动发电控制的基本原理	( 93 )
3.6	电力系统频率异常的控制	( 96 )
3.6.1	频率异常的特点和控制措施	( 96 )
3.6.2	消除电力系统频率异常的自动控制装置	( 97 )
3.7	电力系统有功功率与频率的神经网络控制	( 99 )
3.7.1	人工神经网络简介	( 99 )
3.7.2	人工神经网络在有功功率和频率控制中的应用	( 103 )
<b>第 4 章</b>	<b>电力系统电压调整和无功功率控制技术</b>	<b>( 106 )</b>
4.1	电力系统电压控制的意义	( 106 )
4.2	电力系统的无功功率平衡与电压的关系	( 107 )
4.3	电力系统电压控制的措施	( 112 )

4.3.1	发电机控制调压	(112)
4.3.2	控制变压器变比调压	(113)
4.3.3	利用无功功率补偿设备调压	(114)
4.3.4	利用串联电容器控制调压	(118)
4.3.5	电力系统电压控制措施的比较	(120)
4.4	电力系统电压的综合控制	(120)
4.5	电力系统无功功率电源的最优控制	(122)
4.6	电力系统无功/电压专家控制技术	(124)
<b>第5章</b>	<b>电力系统调度自动化及自动监视和控制</b>	<b>(128)</b>
5.1	电力系统调度自动化的功能	(128)
5.1.1	安全监视	(128)
5.1.2	安全分析	(129)
5.1.3	经济调度	(129)
5.1.4	自动发电控制	(129)
5.2	电力系统自动监视和控制	(130)
5.2.1	电力系统信息传输及监视和控制的作用与功能	(131)
5.2.2	GPS技术及监测和控制	(133)
<b>第6章</b>	<b>配电网自动控制技术</b>	<b>(135)</b>
6.1	配电网的任务和要求	(135)
6.2	配电网自动化的特点和分类	(137)
6.2.1	配电线路自动化	(138)
6.2.2	用户自动化	(140)
6.3	电力负荷控制技术	(140)
6.3.1	电力负荷控制的意义	(140)
6.3.2	电力负荷控制的方式	(141)
6.4	低压变配电综合自动化	(146)
6.4.1	概述	(146)
6.4.2	低压变配电所及其综合自动化系统特点	(147)
6.4.3	变配电所自动化系统硬件结构	(149)
6.4.4	变配电所自动化系统软件结构	(151)
<b>第7章</b>	<b>灵活交流输电系统控制技术</b>	<b>(153)</b>
7.1	概述	(153)
7.2	灵活交流输电系统模型	(153)
7.3	统一潮流控制器工作原理	(154)
7.4	可控串联补偿装置的智能变结构控制	(158)
<b>附录一</b>	<b>综合阻尼系数</b>	<b>(162)</b>
<b>附录二</b>	<b>李雅普诺夫稳定性第二方法</b>	<b>(168)</b>
<b>附录三</b>	<b><math>P-Q</math>分解法</b>	<b>(170)</b>
<b>参考文献</b>		<b>(177)</b>



# 第 1 章 电力系统及其控制技术概述

## 1.1 电力系统的组成、特点及其基本要求

电力系统是指由进行电能生产、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统一系统的总称。它由发电厂、变电所、输配电线路及各种用电设备组成。电力系统中的各类发电厂,包括水力发电厂、火力发电厂、核电厂等,将水利、燃料、核能等一次能源转换成电能,再通过高压变电所、输电线路和低压变配电所以及配电线路传送并分配到各用电设备,从而实现电能从生产到消费的过程。为了确保电力系统的安全、可靠运行,电力系统还包括继电保护、自动装置、通信、调度自动化及自动监测和控制系统等设备。

### 1.1.1 电力系统组成的特点

电能的生产、输送、分配具有以下特点:

#### (1) 电能不能大量存储

电能的生产、变换、输送、分配、消费是在同一时间内进行的,是不能贮藏的,即发电厂每时每刻生产的电能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,由于发电和用电同时进行,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,都会影响电力系统正常工作。考虑到能量不能存储的特点,电力系统在运行中还需要注意经济、有效、合理地使用电能,以节约能源。

#### (2) 电能生产与国民经济各部门的关系密切

由于电能与其他能量之间转换方便,适宜进行大量生产、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,现代工业、农业、交通等各部门都广泛使用电能。电能供应的中断或减少都将影响国民经济的各个部门工作的进行。

#### (3) 过渡过程十分短暂

电力系统中电和磁是相互联系在一起的,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,所以电力系统运行中发生突然变化所引起的电磁方面的变化过程是极其迅速的。电力系统中的正常操作,如变压器、输电线路的投入运行和切除都是在极短时间内完成的;电力系统中出现的故障,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。

随着我国经济建设的发展,电能需求迅速增加,电力系统的规模也越来越大,电力系统已跨越省区,形成了“联合电力系统”。

联合电力系统具有下列优点：

(1) 可以减少系统中的总装机容量

由于联合电力系统跨越地域广大,各地最大负荷的出现时间不尽相同,因此,系统的综合最大负荷常小于各个发电厂单独供电时各最大负荷的总和。由于系统综合最大负荷的降低,相应地可减少系统中的总装机容量。

(2) 可合理利用动力资源,实现经济运行

联合电力系统可以充分利用水力资源,在丰水季节可多发水电,以节省燃料;在负荷较轻时,则可停止运行效率低、成本高的火电厂。在正常运行时,可合理组合各类发电厂,使负荷在各发电厂间得到最佳的经济分配。

(3) 有利于安装大容量机组,提高劳动生产率

对于小型电力系统,单机容量不能过大,否则一旦发生故障,对系统影响很大,严重时会使电力系统不能正常运行。因此对于大型联合电力系统,从经济上考虑,可以安装大容量机组,以节省运行费用,机组运行后效率也会很高。

(4) 可以减少备用容量

由于设备的故障或检修,电力系统需要一定的备用容量。由于各地区设备同时发生故障时的概率较小,所以可以通过合理安排检修,使系统总的备用容量减少。

(5) 可提高供电可靠性及电能质量

由于电力系统容量的增大,当系统的一部分发生故障而被切除时会对全系统的影响变小。另外,由于系统间的联系加强,各个地区之间功率可以互相支援,使用户停电概率降低,提高了用电的可靠性及电能质量。

但是,电力系统容量的增大,也会带来一些问题:

① 由于各地区系统之间联系的设备都是超高压设备,一次投资费用增大。

② 电力系统结构将变得复杂,运行难度增大。当发生局部故障时,若处理不及时或不正确,事故将会扩大以至危及整个电力系统的安全,从而带来严重的后果,因此,对自动化控制水平要求很高。

③ 由于电力系统容量的增大,等值并联回路数增加,系统一旦发生故障,故障电流也会相应增大,并且会增大对通信线路的干扰。

随着电力系统运行水平的提高、自动化设备性能的改善以及新技术的应用,特别是计算机技术、通信技术、控制理论及信息处理技术的高速发展和应用,上述缺点正在逐步被克服。目前,世界上电力系统的发展趋势是:规模越来越大,使用的电压等级越来越高,单台发电机容量越来越大,已形成跨国的大型电力系统。目前,世界上最大电力系统容量已超过 100 000 MW,输电距离超过 1 000 km,最高输电电压达 1 000 kV 以上,最大发电机设备容量已超过 1 000 MW。我国目前最大的电力系统容量已超过 10 000 MW,最高输电电压 500 kV,最大发电机设备容量已超过 600 MW。发电量和装机容量均已位居世界第二,全国已形成五个跨省电网、五个独立省网和一个南方联营电网。不久将建成以三峡电网为中心的全国性联合电力系统。

### 1.1.2 电力系统的基本要求

电力系统的上述特点以及电力工业在国民经济中的地位和作用,对电力系统提出了

下列基本要求:

### (1) 保证供电的可靠性

电力系统对用户供电的中断将使生产停顿,生活发生混乱,甚至会危及人身、设备的安全,形成严重的后果。造成供电中断的原因很多,可能是由于电力系统中某些元件设备发生故障(如绝缘击穿导致的短路、雷击、误操作等),也可能是由于系统中各发电厂之间并联运行的稳定性遭到破坏而引起系统运行的全面瓦解。保证供电可靠性的主要措施有:提高电力系统及电气设备的可靠性指标;提高系统运行的稳定性;利用计算机对电力系统运行进行安全监视和控制等。

由于用户对供电可靠性的要求不一样,供电中断造成的后果是不一样的。因此,必须根据实际情况区别对待。对于某些重要用户(如连续生产的化工厂、冶炼厂和矿井等),由于停电会带来人身危险、设备损坏和生产大量废品等后果,所以在任何情况下都必须保证供电不发生中断。对其他不重要的用户则可以允许不同程度的短时停电。通常,根据用户对可靠性的要求,可以将用户分为三类:

① 一类用户 对这类用户如果停止供电,就会带来人身危险,设备损坏,生产大量废品,将长期破坏生产秩序,给国民经济带来巨大损失。

② 二类用户 对这类用户如果停止供电,就会造成大量减产,使人民生活和城市公用事业受到影响。

③ 三类用户 指不属于第一类、第二类的其他用户,一旦短时停电不会带来严重后果,比如工厂附属车间的用电,小城镇、农村的用电等。

当系统发生事故,出现供电不足情况时,首先应当切除三类用户的用电,以保证一、二类用户的正常用电。通常,对一类用户中需要设置两个或两个以上的独立电源,以便在任何一个电源发生故障时,对用户的供电都不致造成中断。

### (2) 保证良好的电能质量

电压和频率是两个主要的电能质量指标,也是供电设备以及用电设备设计和制造的主要技术参数。电力系统的运行电压和频率超过允许的偏移值会影响设备的安全运行,并可能造成供电设备和用电设备的损坏。我国规定,供电电压允许的偏移值是额定值的 $+5\% \sim -7\%$ ,额定频率值是 $50\text{ Hz}$ ,允许的偏移是 $\pm 0.2 \sim \pm 0.5\text{ Hz}$ 。整流负荷的大量出现,对电力系统的波形产生了较大的影响,会使波形发生畸变,影响电气设备的安全和运行,同时也会对通信和广播电视线路造成干扰,对此要特别加以重视。

### (3) 保证电力系统运行的经济性

电力系统消耗的能源在国民经济能源总消耗中所占比重很大。因此,在保证电力系统安全可靠发电、供电以及电能质量达到一定指标的前提下,应当合理安排各类发电厂所承担的负荷,力求降低能源消耗、发电厂自身用电的消耗(厂用电率)以及电力网的输配电功率损耗,以获得最大的经济效益。

## 1.2 电力系统事故产生的原因及后果

### 1.2.1 事故的发生

电力系统是由发电机、变压器、输变电线路及各种用电设备组成的。要保证电力系

统安全正常工作,必须满足两点基本要求:一是所有电气设备处于正常状态,能满足各种运行工况的需要;二是系统的电压和频率应保持在规定的范围内,并且所有发电机保持同步运行。

电力系统内的事故原因是多方面的,自然灾害、设备缺陷以及人为因素都会造成设备事故。例如,变压器绝缘损坏会导致内部故障或套管击穿,运行人员误操作会造成发电机误跳闸,雷击引起线路闪络会导致相间短路或接地故障等,这些事故统称为系统的电气元件事故。在整个事故过程中或事故后,如果系统运行指标异常或遭到破坏,比如,系统电压或频率发生异常甚至崩溃,系统发生严重振荡甚至失去稳定,系统被解列以致大面积停电等,这类事故会波及整个电力系统,故称之为**系统事故**。系统事故的危害性远远超过电气元件的事故。电气元件事故通常由继电保护装置处理,系统事故由系统安全自动装置来控制处理。随着电力系统的容量的不断增加和区域联网的发展,系统事故往往会造成巨大的经济损失和人们生活的混乱。

### 1.2.2 由系统频率下降引起的事故和事故扩大

电力系统的频率是靠调节各发电厂中的发电机出力来保证的。当发电机输出有功功率与负荷平衡时,系统频率维持不变。当发电机出力超过负荷时,系统频率上升;反之系统频率下降。电力系统频率大幅度下降,说明发生了电源事故或系统解列事故,这是由电源与负荷不能保持平衡所造成的。通常,电力系统内部都设置有一定容量的旋转备用和低频率减负荷装置。发生事故时,旋转备用的迅速投入和低频率减负荷装置动作切除部分负荷,可以防止频率进一步下降。一般从频率开始下降至电源与负荷重新维持平衡,频率稳定到新的数值的全过程需经几秒至几十秒钟,时间非常短暂,其频率变化过程如图1-1所示。图中曲线①为系统失去电源后,有足够的旋转备用的情况;曲线②为系统失去电源后,有部分备用的情况;曲线③为系统失去电源后,低频率减负荷装置动作,切除部分负荷的情况;曲线④为系统失去电源后,系统无备用的情况。

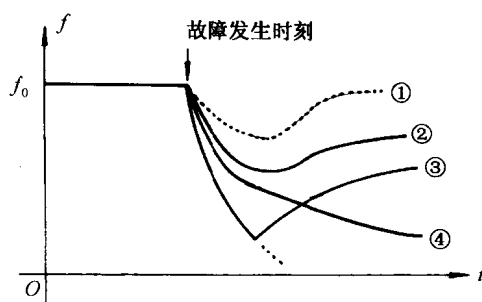


图 1-1 频率变化过程

如果频率不能尽快恢复,电力系统在低频率下运行是很危险的。这是因为电源与负荷在低的频率下的重新平衡很不牢固,稳定性很差,有可能再度失去平衡,此时频率若再度下降将引起系统内发电机低频切机,形成电源功率不足的恶性循环,最终造成大面积的停电,这种现象称为**频率崩溃**。

低频运行对发电厂的影响是非常大的。发电厂本身是一个非常大的电力用户,特别

是火力发电厂,频率降低将产生一系列问题,汽轮机叶片将产生振动使叶片损坏,当系统频率下降到允许的最低频率时,必须把汽轮发电机从系统中切除。发电机组的辅助设备(特别是高压给水泵)因频率下降引起的出力不足会影响到发电厂出力的降低,从而进一步使电力系统频率下降,形成恶性循环。

另外,频率的下降还将引起电网电压的降低。发电机转速的下降,使电势减小,电源无功功率输出降低,发电机输出电压必然降低,而负荷用户中广泛使用的感应电动机和同步电动机,则因频率下降而导致所需励磁用的无功功率反而增加,这样,电压将进一步下降,当系统频率降低到 43~45 Hz 时,容易产生电压崩溃。当频率下降时,旋转式的负荷的转速也将下降,这会使工厂的产品质量生产出次品,特别会对使用抽水机、鼓风机等的厂矿企业的安全造成威胁。对于电子计算机及各种自动控制设备来讲,频率下降将会引起各种误差,例如,计算机外围设备磁盘,频率偏差允许值为  $\pm 0.5$  Hz,计算机本体频率偏差允许值为  $\pm 1.5 \sim \pm 3$  Hz。

因此,当系统频率大幅度下降时,迅速恢复频率至关重要。可采取如下措施恢复频率:①迅速投入电力系统中的旋转备用,使频率尽可能恢复到正常值。②迅速启动备用发电机组。由于电力系统中的水轮发电机启动迅速,调节快捷,因此迅速投入水轮发电机是恢复频率的有效措施。水电厂装设的水轮发电机低频率自启动装置,能在几十秒钟将发电机与电网并列。另外,电力系统中其他发电机例如燃油发电机、燃气轮发电机,启动速度较快,也应该立即启动投入电网中。③当采取上述方法不能恢复正常频率时,应及时切除部分用户负荷以便使频率尽快恢复。

### 1.2.3 由系统电压下降引起的事故和事故扩大

电力系统的电压水平是依靠系统无功功率电源来维持的。当电力系统中无功电源短缺时,电网电压将大幅度下降。此时,当某些枢纽变电所的母线电压遇到一定的扰动时,瞬间将会引起静态稳定的破坏,形成所谓电压崩溃,如图 1-2 所示。这是一种将导致系统瓦解的灾难性事故,此时系统中大量的负荷电动机将停止转动,大量发电机组将甩掉负荷,甚至导致电力系统发生振荡。

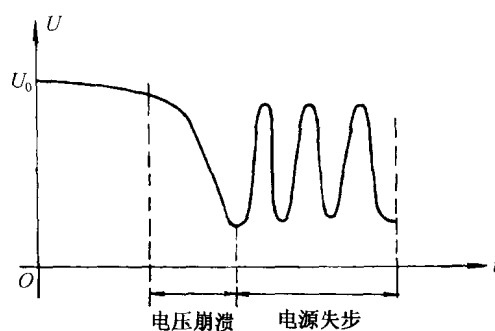


图 1-2 电压崩溃过程

电压降低到发生电压崩溃常常需要一段时间。系统电压降低时,发电机的定子电流将因其功率角的增大而增大,如果发电机的定子电流原已达到额定值,则电压降低后,将

使定子电流超过其额定值,为使发电机定子绕组不致过热,将不得不减少发电机所发出的功率。同理,系统电压降低后,也必须减少输电和配电变压器的负荷。

当电力系统电压降低时,负荷中的异步电动机各绕组中的电流将会增大,温升将增加,效率降低,寿命会缩短。同时,电动机的启动过程将大为延长,可能导致温度过高而使电动机烧毁。所以当电压下降但尚未达到电压崩溃时,应该尽快采取一切可能的方法提高电力系统的电压水平。例如:① 迅速调节发电机的自动励磁调节装置和强行励磁装置,以防止电力系统电压的进一步下降;② 尽快启动发电机和调相机的热无功备用容量,如果有备用发电机组应该迅速将其投入运行;③ 如果上述措施无法实现或没有效果时,应该尽快切除电力系统中电压最低点处的用电负荷。

#### 1.2.4 由系统稳定破坏引起的事故和事故扩大

电力系统在正常运行时,所有发电机的转速(频率)均应相同。也就是说,各台发电机之间应该相互保持同步运行,各台发电机机端电压之间的相角差也应该保持恒定,且小于 $90^\circ$ 。当电力系统发生稳定破坏时,各台发电机组将会失去同步,在失去同步运行的发电机之间,电力系统中有功功率和无功功率都将在一瞬间流入,而在另一瞬间流出;发电厂及变电所的母线电压幅值,将会由小到大交替变化;各台发电机组之间的电压相角差,会在 $0^\circ$ 到 $360^\circ$ 之间周而复始地变化。各台发电机间失去同步,在其所连接输电线路各点的电压,将作周期性的变动。如图 1-3 所示,在电气中心这点(图中 O 点,称为振荡中心)的电压  $U_0$ ,将会出现周期性为零的现象,此时相当于在振荡中心反复出现三相短路,这种现象将会导致事故的进一步扩大。例如,当振荡中心有重要用户负荷时,由于母线电压周期性大幅度降低,将会导致这些负荷自动被切除或破坏负荷的稳定性。

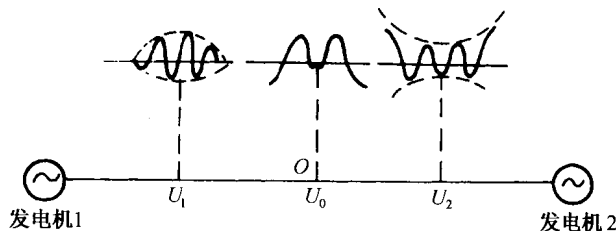


图 1-3 线路各点电压状态变化

一旦发电机失去同步,特别是送端的发电机,其转速将会急剧上升,当转速超过发电机超速保护整定值时,发电机出口断路器会自动跳闸并停机。此时,会使电力系统缺电情况更加严重。对于接收功率的负荷受端系统,必须及时切除一部分重要用户,如果切除负荷的容量较小或动作不及时,将造成系统频率持续大幅度下降。在联合电力系统中,局部系统稳定性的破坏,将会引起整个电网连锁性的稳定破坏,电力系统可能被解列为若干个电源功率不足的局域网和电源功率过剩的局域网,对电源功率不足的局域网,会造成切除大量负荷,或出现频率下降;对电源功率过剩的局域网,会出现频率过度的升高,致使部分发电机组被切除。

### 1.2.5 由电力线路过负荷引起的事故和事故扩大

在电力系统的正常运行中,可以通过调整发电机组的出力或通过切换变压器和输电线路改变网络结构等手段来调节电网中的功率分布。但是,在事故情况下,故障线路和电气设备的切除是靠继电保护自动装置进行的。此时,由于功率会在输电线路中重新分配,有些线路和电气设备就可能过负荷。例如,对于双回路输电线路,因故障被切除一回时,剩下一回输电线路就有可能过负荷。线路如果超过继电保护整定值后,将会引起第二条输电线路跳闸,事故会进一步被扩大。

输电线路的正常安全输送功率一般由动态稳定极限和静态稳定极限确定(详细内容请阅读第2章)。当输电线路在规定的静态稳定极限值运行时,输电线路已承受不了较大的功率波动,负荷有较大幅度的增加和减少,或系统发生不同类型的故障,都会使稳定遭到破坏。当输电线路的输送容量在动态稳定极限值运行时,若发生严重的故障或故障切除时间较长,也会引起稳定破坏。因此,输电线路不论在静态稳定极限或动态稳定极限下运行,都会处于紧急状态,应当尽量避免。

## 1.3 保证电力系统安全运行的控制原则

电力系统的运行状态直接影响到电网的实际安全水平,因此要提高电力系统供电的可靠性,就必须十分注意安全运行的控制问题。

### 1.3.1 电力系统安全控制状态

电力系统的运行控制可以用等式约束条件和不等式约束条件来描述。等式约束条件是指电力系统发出的有功功率和无功功率应该在任一时刻与各个用户的有功负荷和无功负荷(当然也包括了线路及其他电气设备的有功损耗和无功损耗)相等。这一特点可用下列数学公式表示:

$$\sum P_{Gi} - \sum P_{Dk} - \sum \Delta P_L = 0 \quad (1-1)$$

$$\sum Q_{Gi} - \sum Q_{Dk} - \sum \Delta Q_L = 0 \quad (1-2)$$

式中  $P_{Gi}, Q_{Gi}$ ——第  $i$  台发电机或其他电源设备发出的有功功率和无功功率;

$P_{Dk}, Q_{Dk}$ ——第  $k$  个负荷的有功功率和无功功率;

$\Delta P_L, \Delta Q_L$ ——电力系统中各种配电和输电线路及设备的有功功率和无功功率损耗。

不等式约束条件是指要求供电质量和安全运行的某些参数(如母线电压、线路潮流功率)应该处于系统或设备安全运行的允许范围之内。这可以用下列数学公式表示:

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

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

$P_{Gi}, P_{Gi\max}, P_{Gi\min}$ ——发电机有功功率及其上、下限值；

$Q_{Gi}, Q_{Gi\max}, Q_{Gi\min}$ ——发电机无功功率及其上、下限值；

$S_{ij}, S_{ij\max}, S_{ij\min}$ ——输电线路和变压器的视在功率及其上、下限值；

$f, f_{\max}, f_{\min}$ ——系统频率及其上、下限值。

根据电力系统不同的运行条件,可将运行状态分为五种:正常状态、预警状态、紧急状态(事故状态)、系统崩溃、恢复状态(事故后的状态)。随着运行条件的改变,电力系统将在各种状态之间进行转变,如图 1-4 所示。

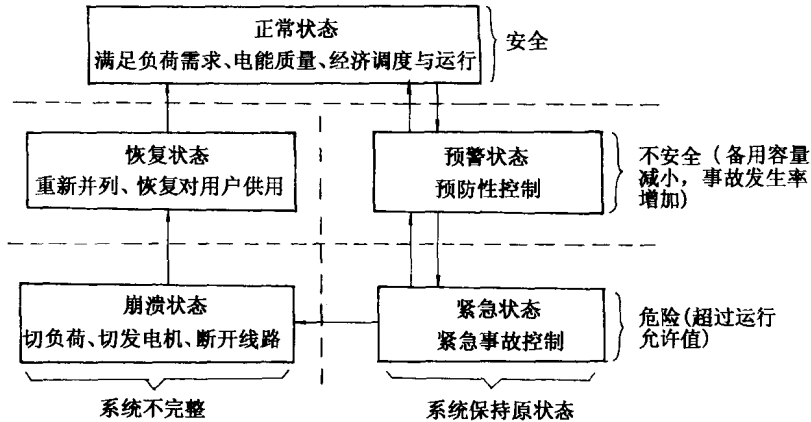


图 1-4 电力系统运行状态转换框图

电力系统安全控制就是要积极采取各种控制措施和手段,使电力系统运行处于正常状态。

#### (1) 正常状态

电力系统在正常运行时,均应满足等式约束条件和不等式约束条件,这才能保证电力系统在数量和质量上都满足用户对电能的需求。这些约束条件包括发电机、变压器和线路,甚至开关和互感器等有关的发电设备和输变电设备都应该处于运行容许值的范围内,各母线电压和系统频率均应该处于允许的偏差范围之内。同时,正常运行状态下的电力系统,其发电设备和输变电设备还应该保持一定的备用余度,使电力系统具有一定的安全水平并能够承受正常的干扰(如电力负荷的随机变化和设备的正常操作等),而不会使电力系统安全水平受到影响。另外,在保证安全的条件下,电力系统可实行各种方式的经济运行以提高电网的运行效率。电力系统经常性的小负荷变动属于正常情况,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的过程。

#### (2) 预警状态

预警状态与正常状态的差别在于安全水平的不同,前者是欠安全的,后者是安全的。从正常安全状态转入预警状态的原因是由于发电机、变压器、输电线路运行环境的恶化,或发电机计划外检修,使电力系统中各电气元件的备用容量减少到安全运行的最低限。处于预警状态下的电力系统,尽管仍然可以满足等约束条件和不等约束条件,系统也能够提供质量合格的电能,但是系统的安全已经下降到很低的水平,这时系统已不能够承受各种正常的干扰,一旦发生干扰,就有可能不满足某些不等约束条件,例如某些线路和变压



器过负荷、某些母线电压低于下限值等。这时,应该采取积极控制措施,调整负荷的合理配置,切换线路,改变和调整发电机功率,使电力系统尽快恢复到正常状态。

### (3) 紧急状态

处于正常状态和预警状态的电力系统,如果发生了严重的干扰,例如,一台主要大容量发电机非正常退出工作或一条主要输电线路发生短路,系统将进入紧急状态。此时,等约束条件可能仍然得到满足,即负荷功率仍然可以得到满足,但是,电能质量(频率或电压)已无法达到合格的标准,某些不等约束条件会遭到破坏,例如某些母线电压会低于其下限值、某些输电线路或变压器过负荷等。上述不等约束条件遭到破坏,可能会使还在运行的其他设备承受不了过电压、过负荷、低周波、低电压,使事故进一步扩大。此时,如果采取有效的紧急控制措施,解除一些设备的越限运行状态,系统就可能恢复到预警状态或正常状态。

### (4) 崩溃状态

电力系统中如果发生事故,正常运行将会遭到破坏,此时如不及时排除故障和采用适当的控制措施,或者这些措施不能产生效果,则电力系统就有可能失去稳定。为了缩小失去稳定的范围,电力系统中的自动解列调节装置和调度人员的有效操作将使电力系统解列成几个子系统,这时等式约束条件和不等式约束条件均会遭到破坏,发电机发出的功率与负荷消耗的功率出现不平衡。在一些子系统中由于电源功率不足,不得不大量切除负荷;而在另一些子系统中,由于电源功率远远超过了负荷的功率,会迫使部分发电机组退出运行。系统解列后的各子系统可靠性降低。此时应尽量使各解列后的系统维持部分供电,以避免全系统的彻底崩溃。

## 1.3.2 电力系统安全控制原则

电力系统的安全控制,简单地说,就是尽可能地使电力系统处于“正常状态”。计算机控制技术在电力系统安全控制中发挥着越来越重要的作用。它的作用主要包括三个方面,一是安全监视的功能,二是安全分析的功能,三是安全控制(或称安全操作)的功能。安全监视是对电力系统运行状态安全情况所进行的监视;安全分析是对电力系统的运行安全水平进行评价并确定系统免遭事故破坏的能力;安全控制是故障发生瞬间迅速作出判断和控制,使系统故障及早得到抑制和排除,以最大程度地提高系统的安全性。

## 1.3.3 电力系统计算机分层控制

随着计算机技术、通信技术、控制理论及信息处理技术的发展和使用,电力系统安全控制的自动化程度也越来越高,以计算机为主体的数据采集和监控系统(SCADA, Supervisory Control And Data Acquisition)已广泛在电网中使用。随着电力系统各电气设备及发电厂组成的日益复杂化,以及对控制要求的提高,如果把全系统中所有发电厂及变电所的信息全部采集到中央调度所进行处理,然后再把处理后的信息送回到各发电厂和变电所中,将会出现信息量庞大、通道拥挤、对计算机的容量要求增大、相应速度变慢、运行复杂等一系列问题,这在技术上和经济上都是不可取的。由于计算机性能价格比日益提高,可以对较分散的需要监控的大量信息采用分层控制,即设立中心调度所、地区调度所、发电厂(变电所)控制中心等分层控制中心。如图 1-5 所示。