

现代电网应用技术丛书

# 现代电网 频率控制

高翔等 编著

## 应用技术



中国电力出版社

[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

现代电网应用技术丛书

# 现代电网 频率控制

## 应用技术

高翔 严正 李端超 沈丛奇 高伏英 编著



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

# 前言

电网频率本质上反映发电与负荷的平衡度，电网正常运行情况下的频率调节控制主要通过调节发电机的有功出力完成，即通常所谓的三级频率控制。各级之间功能互补、相辅相成。一级频率控制，又称一次调频，是负荷、发电机对电网频率变化作出的自动响应，主要针对变化周期短（秒级），变化幅度小的负荷分量，其中主要是发电机组的一次调频；二级频率控制，也称二次调频，主要是电网调度中心的自动发电控制（AGC）软件通过远动通道对发电机有功出力进行控制，从而快速恢复频率偏移，针对变化周期较长（分钟级）、变化幅度较大的负荷分量；三级频率控制，也就是备用管理、调峰、经济调度等，通过优化方法对发电厂的有功出力进行经济分配，主要针对变化缓慢、变化幅度大的负荷分量，例如：由于气象条件、作息制度、人们生活规律等引起的负荷变化。

随着交流互联电网的发展，控制区之间的联络线潮流控制构成了电网频率控制的关键环节，其实质意义在于联络线口子潮流变化引起的频率变化，实际上反映某个控制区“挪用”了其他控制区的电能，并将运行安全风险转移至其他控制区。因此，依据电力系统当前负荷、发电功率和频率等因素形成的区域控制偏差 ACE，反映了区域内发电与负荷的平衡情况，并构成了交流电网联络线频率控制的基础。互联电力系统中大扰动频率的恢复需要通过发电机组及互联电力系统中各个组成部分协调控制来完成。电力系统各种技术的发展，超临界大机组的运行，超高压、远距离输电线路的大量运行，交流电网的频率调节控制对于电网安全、稳定、经济运行的价值就越来越大。

2005年11月20日华东电网发生了龙政直流双极闭锁事件，损失区外来电3000MW，频率瞬时跌至49.518Hz，约5min电网频率恢复正常。事后分析表明，华东电网内机组一次调频响应特性在事故中的差异极大，同时，还存在一次调频与二次调频的控制指令的不协调等问题。

2006年7月1日华中电网因事故引起多条500kV线路和220kV线路跳闸，系统发生较大范围、幅度的功率振荡，系统功率振荡期间最低频率为49.11Hz，华中电网与川渝电网解列，事故发展过程中，河北、湖北、湖南、江西四省电网低频减载装置动作切除负荷1600MW，河南省电网减供负荷2765MW。

2006年11月4日22点10分（北京时间5日凌晨5点30分），西欧大陆互联电网UCTE（Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity）发生大面积停电事故，事故发生的十几分钟内，大量输电线路和电厂机组相继跳闸退出运行，电网随之瓦解成三个部分，事故影响之大在欧洲是史无前例的。事故累计损失负荷17000MW。法国和德国人

口最密集地区以及比利时、意大利、西班牙、奥地利的部分地区受到严重影响。其中，法国损失负荷 5000MW 左右，约 500 万人受到影响。德国超过半数（4100 万人）的居民受到停电影响，涉及 5 个州铁路也一度中断。

“11·4”事故将西欧电网解列为三个部分，电网解列后西部系统失却从东部受入的 9500MW 电力，同时系统内 10 700MW 机组在扰动中跳闸，电网频率在 8s 内跌至 49Hz。通过低频减载自动装置切除 17 000MW 负荷，并启动 1600MW 处于抽水状态的抽水蓄能机组，避免了电网进一步崩溃。值得注意的是：按照 UCTE 的规定，当系统频率在 47.5~51.5Hz 之间时，发电机应保持联网运行。而实际上在扰动时许多小容量机组跳闸，其中风电机组占 40%，约 30%热电联供的机组跳闸，西班牙电网 700MW 的常规机组跳闸。事故解列后西部电网启动了 16 400MW 备用，占事故前系统出力 182 700MW 的 8.98%，实际备用为 18 500MW 约为事故前系统出力的 10%。

上述典型事故表明，电网事故情况下频率控制措施协调的重要性。因此，系统性地研究电网的频率控制目标、频率控制技术、频率评价标准，完善频率控制体系对于大电网的安全、稳定、经济运行具有重大的现实意义。基于对电网频率调节控制体系的系统性思考，构成了本书的基本框架和思路。以期通过研究频率控制的基础知识、理论及国内外相关的先进经验，深入分析频率控制理论，为电网频率控制体系的实施提供参考思路。

本书第 1 章绪论，阐述了电力系统运行基本特征，引入了频率控制的基本概念，介绍了基本频率控制技术和频率性能评价体系；第 2 章电网频率稳定概述，介绍了电网频率的基本特性、频率稳定的分析方法、电网频率控制目标、频率协调控制及低频减载的基本理论；第 3 章发电机组的功率和频率控制，介绍了发电机组调频基本原理，一次调频和 AGC 控制技术，不同类型机组的一次功率和频率调节的基本特点等；第 4 章自动发电控制技术，介绍了二次调频的基本原理、电网调度端控制系统、AGC 调节容量需求以及机组 AGC 控制性能评价标准 SCPS 等；第 5 章互联电网频率控制，介绍了互联电网频率控制基本策略，控制区控制参数及性能评价标准等；第 6 章负荷预计与经济调度，介绍了三次调频的基本原理，以及与其密切相关的负荷预计技术；第 7 章电网备用，介绍了备用容量的基本组成、运行监测技术及备用容量可靠性评估方法；第 8 章电力市场环境下的频率控制，介绍了辅助服务的基本概念，AGC 市场交易模式，备用服务的市场模型等；第 9 章电网频率质量评价，阐述了频率评价的基本原则，并对主要频率控制评价标准进行了可靠性、经济性等方面的分析。

本书的主要基础来源于“11·20”事故后华东电网所组织的“电网频率控制体系”项目研究，随着项目研究的进展，对于电网频率控制体系的脉络渐渐清晰。即电网频率控制应包含正常情况下的频率控制和异常情况下的频率调节，交流互联电网的联络线偏差控制，机组一次调频控制，二次调频控制，事故情况下的发电机频率保护，低频/低压减载等。项目开展过程中紧密结合了与电网频率控制相关的其他项目研究成果，借鉴了与华东电力试验研究院合作研究项目“华东电网大机组调速系统建模和参数实测”，与上海交通大学电气工程系合作研究项目“基于关键线路约束的备用可靠性评估方法”，“电力市场辅助服务研究”，与浙江大学电气工程学院合作研究项目“华东电网基于电力市场辅助服务的有功功率

优化控制模式研究”，与南京自动化研究院合作研究项目“华东电网低频减载方案研究”等的成果。

项目研究过程中华东电力调度中心、华东电力试验研究院、华东电力咨询公司等相关调度、运方、计划、自动化、热工、保护等专业人员参与了相关工作。在此对于华东电网张磊、汪德星、冯贵明、曾兆琪、孙勇、罗凯明、王亮、黄琳、杨增辉、余颖辉、庄侃沁、倪腊琴等人的贡献表示感谢。

本书第1、2、7章由高翔编写，第3章由沈丛奇编写，第4、6章由李端超编写，第5章由高伏英编写，第8、9章由严正编写。全书由高翔统稿。其中沈丛奇、李端超、高伏英参与了《电力系统调频与自动发电控制》的编著。上海交通大学电气工程系贾燕冰博士参与了本书部分章节的编撰及书稿整理，在此表示感谢。

鉴于作者对于电网频率控制应用技术理解的局限性，书中难免会有不当之处，恳请同行不吝赐教。希望本书能够对电网的频率控制与安全、稳定、经济运行起到积极的作用。

作者  
2010年5月



# 目 录

## 前言

<b>第 1 章</b>	<b>绪论</b> .....	1
1.1	概述 .....	1
1.2	频率控制技术 .....	12
1.3	频率性能评价 .....	17
1.4	小结 .....	24
<b>第 2 章</b>	<b>电网频率稳定概述</b> .....	25
2.1	频率稳定的基本概念 .....	25
2.2	频率稳定分析 .....	32
2.3	电网频率控制目标 .....	48
2.4	小结 .....	59
<b>第 3 章</b>	<b>发电机组的功率和频率控制</b> .....	60
3.1	发电机组调频基本原理 .....	60
3.2	水电机组的频率和功率控制 .....	65
3.3	燃煤发电机组的频率和功率控制 .....	75
3.4	燃机发电机组的功率—频率控制 .....	89
3.5	电网频率大偏差时一次调频 .....	97
3.6	机组一次调频测试 .....	98
3.7	机组一次调频在线监测 .....	99
3.8	小结 .....	102
<b>第 4 章</b>	<b>自动发电控制技术</b> .....	103
4.1	AGC 基本原理 .....	103
4.2	自动发电控制主站系统 .....	108
4.3	AGC 调节容量需求 .....	116
4.4	机组 AGC 控制性能评价标准 .....	121

4.5	小结	127
<b>第 5 章</b>	<b>互联电网频率控制</b>	<b>128</b>
5.1	互联电网控制技术和策略	128
5.2	互联电网频率控制其他问题	135
5.3	互联电网控制参数及性能评价方法	142
5.4	小结	158
<b>第 6 章</b>	<b>负荷预计与经济调度</b>	<b>159</b>
6.1	经济调度基本原理	159
6.2	负荷预计技术	161
6.3	实时经济调度技术	176
6.4	小结	181
<b>第 7 章</b>	<b>电网备用</b>	<b>182</b>
7.1	电网备用的基本组成	182
7.2	电网备用配置原则	186
7.3	电网旋转备用运行监视技术	191
7.4	基于可靠性的电网备用评估	195
7.5	小结	213
<b>第 8 章</b>	<b>电力市场环境下的频率控制</b>	<b>214</b>
8.1	辅助服务基本概念	214
8.2	AGC 辅助服务市场	221
8.3	备用市场	226
8.4	小结	235
<b>第 9 章</b>	<b>电网频率质量评价</b>	<b>236</b>
9.1	频率的检测与评价	236
9.2	影响频率质量的因素	237
9.3	电网频率质量的可靠性评价	240
9.4	电网频率质量的经济性评价	246
9.5	小结	255
	<b>参考文献</b>	<b>256</b>

# 绪 论

## 1.1 概 述

### 1.1.1 电力系统运行特点

随着现代社会政治、经济和文化生活的发展,以及人民生活水平的提高,对能量的需求不断提高,当前社会所需要的大部分能量是以电能形式提供的,世界各国电能消耗占总的能量消耗的比重日益增大。电能需求的日益增长,促使发电设备的容量不断增大,同时也扩大供电的范围。电力系统就是在单个发电机组(或发电厂)对邻近用户供电所形成的孤立电网基础上发展起来的,并向大型联合电力系统发展,这是世界各国电力工业发展的共同趋势。

大规模的联合电力系统能经济、合理地利用水力、火力和原子能等资源,解决各地区间能源资源与负荷分布的不平衡;利用时差和季节错开负荷高峰,提高电力系统机组的利用效率;采用大容量机组,节省建设投资和运行费用,提高投资效益和运行经济性;在电力系统发生故障时,各地区间发电出力的相互支援,提高电力系统运行的可靠性。

电力系统与其他行业相比,其突出的特点是电能的生产、传输、消费同时进行,且产品难以储存,根据电能生产、传输、消费的特殊性,电力系统的运行需满足如下基本要求:

(1) 可靠持续供电。

供电中断将使生产停顿、生活混乱,甚至危及人身和设备安全,造成严重后果,国内外历次大停电事故表明,停电给国民经济造成的损失远远超过电力系统本身的损失。因此,电力系统运行首先要满足可靠、持续供电的要求。

电力系统中形成事故的原因很多,某电力系统的统计资料表明,稳定性破坏事故的直接原因中,由设备质量差引起的占 32%,自然灾害引起的占 16.6%,继电保护误动作引起的占 13.2%,人员过失引起的占 17%,运行管理水平低引起的占 21.2%。因此,减少这种系统性事故应从多方面着手,防止设备事故的对策在于严密监视设备的运行情况,及时维修,防患于未然。同时,要求运行人员不断提高技术技能水平,在发生事故时能迅速、正确地处理事故。此外,完善电力系统的网架结构,提高其抗扰动能力,采用基于现代信息技术的电网调度运行控制系统也是重要的技术措施。

虽然,保证可靠供电是对电力系统运行的首要要求,但并非所有负荷都绝对不能停电。一般按对供电可靠性的要求将负荷分为三级:① 一级负荷:中断供电将造成人身伤亡;或政治、经济上将造成重大损失。② 二级负荷:中断供电将在政治、经济上造成较大损失。③ 三级负荷:一般的电力负荷,如工厂的附属车间、小城镇等。此外,还有为数极少或持续时间很短的特殊重要负荷要求绝对可靠的不间断供电。



## (2) 保证电能质量。

电能质量包含电压质量、频率质量和波形质量三个方面，电压质量和频率质量一般都以偏移量是否超过给定值来衡量。例如，给定的允许电压偏移为额定值的 $\pm 5\%$ ，给定的允许频率偏移为 $\pm 0.2\sim 0.5\text{Hz}$ 等。波形质量则以畸变率是否超过给定值来衡量。所谓畸变率（或正弦波形畸变率，是指各次谐波有效值平方和的均方根值与基波有效值的百分比）给定的允许畸变率常因供电电压等级而异，例如，以380、220V供电时为5%，以10kV供电时为4%等。所有这些质量指标，都必须采取一切必要的手段予以保证。

我国电力部门对电网的电能质量有明确要求，并将其作为考核电力系统运行指标的重要内容之一。我国对波形质量的要求是在系统中谐波污染日益严重的情况下才开始注意的，有关规定还有待继续完善。所谓保证波形质量，就是指限制系统中电流、电压的谐波，而其关键则在于限制各种换流装置、电热电炉等非线性负荷向系统注入的谐波电流。限制这类谐波电流的方法，包括更改环流装置的设计、装设滤波器、限制不符合要求的非线性负荷的接入等。

## (3) 提高电力系统运行经济性。

电能生产的规模很大，消耗的一次能源在国民经济一次能源总消耗中占的比重约为 $1/3$ ，而且电能变换、输送、分配时的损耗绝对值也相当可观。因此，降低每生产一度电所消耗的能源和降低变换、输送、分配时的损耗有极重要的意义。有两个衡量电力系统运行经济性的重要指标，即煤耗率和线损率。煤耗率是指每生产1kWh电能所消耗的标准煤，以g/(kWh)为单位，标准煤则是指含热量为29.31MJ/kg的煤。线损率或网损率，是指电力网络中损耗的电能与向电力网络供应电能的百分比。

为保证电力系统运行的经济性，应开展系统经济运行工作，使各发电厂所承担的负荷能合理分配。例如，使水力发电厂能充分利用水能，避免弃水；使火力发电厂中经济性能好的多发电，差的少发电，并避免频繁开停机组；使功率在系统中合理分布以降低电能变换、输送、分配中的损耗等。

除此之外，环境保护问题日益为人们所关注，对电能生产过程中的污染物质如飞灰、灰渣、废水、氧化硫、氧化氮等排放量的限制，也成为对电力系统运行的基本要求。

### 1.1.2 现代电网主要特征

现代电力工业的主要特征是发展大型互联电力系统，它可以节省电力交易中的大量费用，减少容量要求和紧急备用，以最有效方式利用经济能源。我国经济的迅速增长，对电能提出了更多的需求，然而我国能源资源的分布极不均衡，煤炭资源集中在西北地区，水电资源集中在西南地区，而能源消费则主要集中在华东、华中和华南等经济发达的沿海地区。只有通过大型互联电网进行远距离输电，才能满足经济增长对能源的需要，补偿季节变化的需要，把能源需求的峰谷拉平，节省成本和增加电力系统的可靠性。此外，如果仍以发展燃煤的火电为主，将成为大气污染的主要来源。通过开发西部地区丰富的水能资源，可以在保护环境的情况下，给予电力必需的发展。因此，“西电东送”和“南北互供”成为我国电力发展的重要战略。

现代电网体现为大机组、高电压、长距离输送电力等特征，系统的结构和运行方式越来越复杂多变，特别是很多远距离大功率输电线路和系统间弱联络的出现，增加了发生系统性事故和导致大面积停电的几率。在电力系统中任一地点发生故障，都将在不同程度上影响整个电力系统的正常运行，并会对社会的政治、经济和人民生活造成极大的损失和灾难。

以下举几个主要的例子。

(1) 美国东部时间 2003 年 8 月 14 日 15 时 06 分，美国俄亥俄州北部五条超高压输电线路因线路对树放电陆续发生故障跳闸，由于 EMS 系统故障等一系列原因，控制人员没有及时采取有效措施制止事故的进一步蔓延，使输电系统发生了连锁反应，到 16 时 11 分事故蔓延到包括纽约在内的美国东北部 8 个州以及加拿大南部大部分地区，造成了自 1965 年以来北美洲最严重的停电事件，使美加中东部近 5000 万人在瞬间失去了赖以生存的电力供应。至 15 日 21 时 03 分，纽约市区的电力供应才基本恢复。

(2) 2006 年 7 月 1 日 20 时 48 分，华中电网 500kV 嵩郑两回线因保护误动导致相继跳闸，并造成另 2 条 500kV 线路停运，河南电网 500kV 网架结构发生重大改变，功率转移导致多条 220kV 线路跳闸。20 时 59 分，系统发生功率振荡，多台发电机组停运，灵宝直流闭锁，川渝电网与华中电网解列。事故发生后，河南省调、华中网调和国调中心实施了紧急停运机组、拉限负荷、与华北电网解列、增加华中南部电网机组出力等措施，由于判断准确，处理果断，21 时 05 分，振荡平息，系统迅速恢复正常。事故中河南、湖北、江西、湖南低频减负荷装置动作切除负荷 160 万 kW，河南拉闸限电 98 万 kW，共损失负荷 258 万 kW。

(3) 2006 年 11 月 4 日 22 时 10 分，西欧 8 个国家发生了大面积停电事故。这是欧洲 30 年来最严重的一次停电事故，1000 多万人受到影响。这也是继 2003 年北美“8·14”大停电之后又一次严重的大停电事故。事件的起因是德国最大的能源公司—E.ON 电网公司为了让 Meyerwerft 造船厂新的“挪威珍珠”号轮船通过 Ems 河驶入北海，断开了河上从 Conneforde 到 Diele 的 380kV 双回线路。11 月 4 日 21 时 38 分进行开断操作，22 时 10 分 13 秒，Landesbergen 到 Wehrendorf 的线路由于过负荷保护跳闸。随之发生的一系列连锁跳闸，导致欧洲输电协调联盟 UCTE 电网内解裂为 3 块，并大量切机切负荷。

尽管引发大停电的事件各不相同，但从以上三次典型事故的演变过程依然可以发现这样一些规律：一回（或多回）线路故障，造成系统中大范围的潮流转移，使得并行输电通道上其他线路过载或保护误动而相继开断，一系列的连锁反应激发系统振荡并最终导致系统大面积停电甚至瓦解。这些事故所带来的教训启迪异常深刻。

### 1.1.3 基本概念

#### 一、频率

电工学定义交流电在 1s 内正弦参量交变的次数为频率  $f$  (frequency)，其单位为赫兹 (Hertz)，记为 Hz。交变（正负变化）一次所需的时间称为周期 ( $T$ )，频率和周期互为倒数。频率是对单位时间内连续变量进行的计量，要求被测系统是一个相对稳定的动态系统，

因此,当系统在受到某种原因的干扰而失去均衡的过程中,定义的有效性就必然难以应用,为此引入了动态频率的概念。

交流电的频率是和发电机组转速直接相对应的电频率,其关系式为

$$f = \frac{pn}{60} \quad (1-1)$$

式中  $p$ ——发电机极对数;

$n$ ——机组每分钟转数。

机组转速取决于机组输入、输出能量的平衡程度,并受机械惯性的制约,具有惯性,写成标幺值表示的关系式为

$$\begin{cases} T_J d\omega/dt = M_m - M_e - D\omega \\ d\delta/dt = \omega \end{cases} \quad (1-2)$$

式中  $T_J$ ——机组惯性常数;

$\delta$ ——转子  $q$  轴与以同步速旋转的坐标实轴之间的夹角;

$M_m$ ——机械功率;

$M_e$ ——电磁功率;

$D$ ——机械阻尼系数;

$\omega$ ——角频率,  $\omega = 2\pi f$ 。

系统中综合负荷的频率特性(负荷功率与频率的关系)是非线性的,只有频率作小范围的变动时,可近似地视为线性。在考虑系统作动态意义上的变动时,则不能忽视其非线性的作用。

电力系统频率在稳定运转的状态下,负荷功率的增减,发电机出力的变化,一直不间断的发生着,所属设备的操作也时有发生,使得系统中不同节点的频率产生不同程度的波动,这种波动是寻求系统能量均衡的动态过程,在不破坏整个系统稳定运行的前提下,用测量设备在不同节点同时检测,不易察觉到波动的差异,即从概率统计的意义上各节点的频率是相等的,并在作同步的变化。在这样的条件下,由任一节点测得的频率,均为系统频率。

在系统动态过程中,电源的频率取决于自身原动机能量输入和其他机组同步力矩对它的牵制及负荷的分布。因此,电源频率和其他节点的频率存在着差异,在系统失步的过程中这种差异尤为明显,而且带来的危害也很大。

负荷节点的频率,实际上取决于系统内各电源等值电动势相量相对运动,传递到该节点的电压相量在时间轴上的运动轨迹。负荷中旋转的机械惯性,仅是电源机组的几百分之几,或几十分之几。在这种惯性动态支撑下,负荷群失去电源之后的几十毫秒内,在残压的衰减过程中,伴随着频率的衰减。低频减负载装置为防止负荷电压反馈引起误动,增加了一定的延迟动作时间,就是为了避开这种频率衰减引起的电源未中断假象。

动态过程中,若系统处于稳定运行的临界状态,或已失步及失步后转入再同步的过程中,系统各节点的频率值不等,但在仍能维持同步的系统局部区域内,电源动态等值机组的转速主导着该局部区域的“局部系统频率”,可用来作为分析系统工况的一个参数。



## 二、备用

电力系统与其他行业相比，其突出的特点是电能的生产、传输、消费同时进行，且产品难以储存，而负荷需求在一定范围内随机波动、机组可能强迫停运。因此，电网运行需要一定的电力备用容量来平抑由于负荷预计偏差或机组意外跳闸引起的发用电不平衡，这是电力系统运行的重要特征之一。备用不足会造成部分用户的需求得不到满足，在紧急情况下甚至会危及系统的安全稳定运行；但备用过量则会造成很大的经济损失。从一般意义上来说，交流互联电网控制区对发生在其区内的扰动，有调用事故备用予以恢复的职责。因此，各控制区都应留有足以应付常规扰动的事故备用，同时，必须保证电力系统有充足的负荷备用容量以满足非计划的用户需求。在现代的互联电力系统中，往往采用共享事故备用的方法来降低全系统事故备用容量，达到节能降耗的效果。

基于投入的时间和是否同步，可以将备用容量按表 1-1 分类。

表 1-1 备用容量的分类

备用名称	启动时间	是否同步
瞬时响应备用	瞬时	是
10min 旋转备用	小于 10min	是
10min 非旋转备用	小于 10min	否
30min 备用	10min 至 30min	否
60min 备用	30min 至 60min	否
冷备用	大于 60min	否

各国电网对备用容量的分类略有不同，随着电力市场的建立与不断完善，还有一种特殊的备用，即可中断负荷。可中断负荷是负荷管理的一部分，通过经济合同实现，在系统峰荷以及故障时，以此来减少系统负荷需求，等效地增加了系统备用容量。我国备用容量按照运行备用、事故备用、负荷备用进行分类。

为保证电力系统的可靠运行，必须保证电力系统有充足的备用容量，满足各种事故情况下的系统有功需求，但是，在保证电力系统可靠性的同时，也必须考虑到系统运行的经济性。备用容量设置过大，首先必须增大系统的装机容量，增大系统的建设投资；其次，旋转备用容量是通过资源损耗来维持的，过大的旋转备用容量设置，将会增大系统的运行成本，不利于提高系统的经济性。因此，可靠并经济的确定系统的备用容量总额成为各国电网提高系统可靠性与经济性的研究重点。

通常采用确定性和概率性两种方案来确定系统所需的备用容量。确定性准则以运行经验为基础，采用装机制备用、运行备用容量确定及输电网络的  $N-1$  准则来确定系统所需的备用容量总额。随着电网的运行，逐步凸显出了确定性准则的缺点。概率性准则正在逐步用于各国电网的备用容量确定，概率性准则反映了元件故障的概率，并以概率的形式表现出系统的可靠性。

概率性准则用于电网的备用容量时，在系统备用容量总额确定后，通常采用解析法或蒙特卡洛抽样法对现有的备用容量确定方案的可靠性进行评估，寻找系统的薄弱环节进行

改进。对备用容量的可靠性评估时,根据是否考虑输电线路的影响,将其评估方法分为两类:① 不计及输电线路约束的评估方法;② 只计及区域联络线传输极限约束的评估方法。不考虑备用容量在各机组的分配方案对备用容量可靠性的影响,只评估发电容量充裕性。根据实际系统运行经验,当系统出现功率缺额时,实际有效备用容量通常会由于输电线路的约束而小于系统可用备用容量,造成系统实际可靠性低于预计值。因此,在对线路受限情况较为严重的区域进行备用容量可靠性评估时,必须考虑输电线路约束对系统可靠性的影响。

### 三、电网调频

电力系统的频率控制分解为三级,各级之间功能互补、相辅相成。一级频率控制,又称一次调频,是负荷、发电机对电网频率变化作出的自动响应,主要针对变化周期短(秒级),变化幅度小的负荷分量,其中主要是发电机组的一次调频;二级频率控制,也称二次调频,主要是电网调度中心的自动发电控制(AGC)软件通过远动通道对发电机有功出力进行控制,从而快速恢复频率偏移,针对变化周期较长(分钟级)、变化幅度较大的负荷分量;三级频率控制,也就是备用管理、调峰、经济调度等,通过优化方法对发电厂的有功出力进行经济分配,主要针对变化缓慢、变化幅度大的负荷分量,例如:由于气象条件、做息制度、人们生活规律等引起的负荷变化。

当电力系统发生大扰动时,即发电功率与负荷发生严重不平衡时,电网频率的恢复需要依靠三级频率控制的协调运作。首先,需要发电机的一次调频发生作用,一次调频可以起快速的缓冲作用,是频率控制的第一道防线,但火电机组参与系统一次调频的作用时间是短暂的,不同类型的火电机组,由于蓄热量不同,一次调频的作用时间为几十秒;且一次调频属于有差调节,不能实现对系统频率的无差调整。因此,大扰动时电网频率的最终恢复要靠事故备用的自动(AGC)或人工的调用。

#### (一) 一次调频基本概念

电力系统综合的一次调节特性是系统内所有发电机和负荷的一次调节特性的总和,具有一次调节作用的电力系统模型如图 1-1 所示,从图 1-1 中可以看出,由于具有一次调节作用的电力系统中存在发电机的转速(即系统频率)的负反馈调整环节,将起到稳定系统频率的作用。

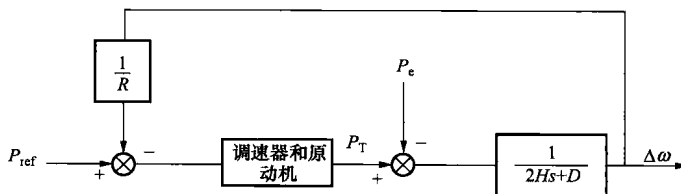


图 1-1 具有一次调节作用的电力系统传递函数方框图

$P_{ref}$ —基准功率;  $R$ —机组的调差系数;  $P_T$ —机械功率;  $P_e$ —电磁功率;  $D$ —机械阻尼功率;  $\Delta\omega$ —转速偏移量

一次调节对系统频率变化的响应快,根据 IEEE 的统计,电力系统综合的一次调节特性时间常数一般在 10s 左右。由于发电机的一次调节仅作用于原动机的阀门位置,而未作用于火力发电机组的燃烧系统。当阀门开度增大时,锅炉中的蓄热暂时改变了原动机的功

率，由于燃烧系统中的化学能量没有发生变化，随着蓄热量的减少，原动机的功率又会回到原来的水平。因而，火力发电机组一次调节的作用时间是短暂的。不同类型的火力发电机组，由于蓄热量的不同，一次调节的作用时间为 0.5~2min 不等。

发电机的一次调节采用的调整方法是有差特性法，其优点是所有机组的调整只与一个参变量有关（即与系统频率有关），机组之间互相影响小。但是，它不能实现对系统频率的无差调整。

根据电力系统频率一次调节的特点可知，一次调节在频率控制中的作用是：自动平衡第一种负荷分量，即那些快速的、幅值较小的负荷随机波动。对异常情况下的负荷突变，起缓冲作用。

图 1-2 显示了北美西部互联电力系统在一台 1040MW 发电机跳闸时，在一次调节的作用下，系统频率变化的情况。

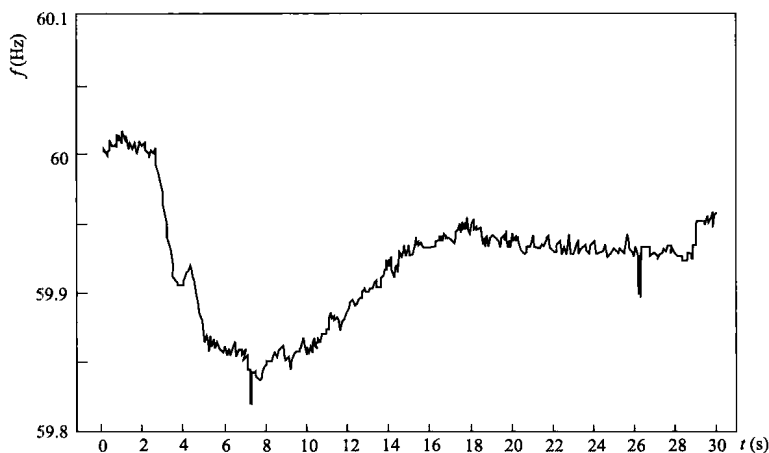


图 1-2 北美西部互联电力系统 1040MW 发电机跳闸时频率变化曲线

频率一次调节是控制系统频率的一种重要方式，但由于它的作用衰减性和调整的有差性，不能单独依靠一次调节来控制系统频率。要实现频率的无差调整，必须依靠频率的二次调节。

## （二）二次调频基本概念

由于发电机组一次调节实行的是频率有差调节，因此，早期的频率二次调节，是通过控制调速系统的同步电机，改变发电机组的调差特性曲线的位置，实现频率的无差调整。但未实现对火力发电机组的燃烧系统的控制，为使原动机的功率与负荷功率保持平衡，需要依靠人工调整原动机功率的基准值，达到改变原动机功率的目的。随着科学技术的进步，火力发电机组普遍采用了协调控制系统，由自动控制来代替人工进行此类操作。在现代化的电力系统中，各控制区则采用集中的计算机控制。这就是电力系统频率的二次调节，即自动发电控制（AGC），具有频率二次调节作用的电力系统的模型如图 1-3 所示。

频率的二次调节（不论是分散的，还是集中的调整方式），采用的调整方式对系统频率是无差的。在协调控制的火力发电机组中，由于受能量转换过程的时间限制，频率二次调节对系统负荷变化的响应比一次调节慢得多，它的响应时间一般需要 1~2min。频率的



二次调节对机组功率往往采用比例分配，使发电机组偏离经济运行点。

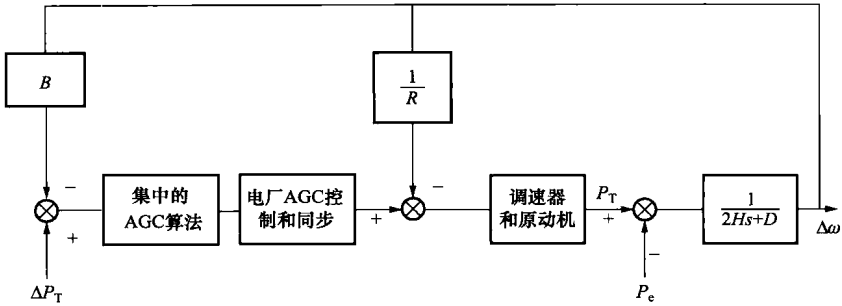


图 1-3 频率二次调节模型框图

$R$ —机组的调差系数； $B$ —系统控制区的频率响应系数； $P_T$ —机械功率； $P_e$ —电磁功率；  
 $\Delta P_T$ —系统控制区需调整的机械功率； $D$ —机械阻尼功率； $\Delta\omega$ —转速偏移量

根据电力系统频率二次调节的这些特点可知，由于二次调节的响应时间较慢，因而不能调整那些快速的负荷随机波动，但它能有效地调整分钟级及更长周期的负荷波动。频率二次调节的另一主要作用是实现频率的无差调整。

由于二次调频的响应时间较慢，因而不能调整那些快速变化的负荷随机波动，但它能有效地调整分钟级和更长周期的负荷波动。二次调频的作用可以实现电力系统频率的无差调节。由于响应时间的不同，二次调频不能代替一次调频的作用；而二次调频的作用开始发挥的时间，与一次调频开始逐步失去的时间基本相当。因此，两者若在时间上配合好，对系统发生较大扰动时快速恢复频率相当重要。二次调频带来的使发电机组偏离经济运行点的问题，需要由三次调频（经济调度）来解决；同时，集中的计算机控制也为三次调频提供了有效的闭环控制手段。一次调频与二次调频作用示意图见图 1-4。

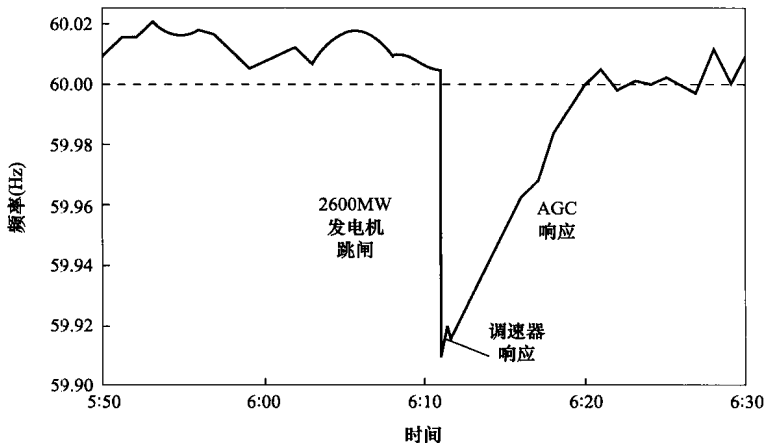


图 1-4 一次调频与二次调频作用示意图

### (三) 三次调频基本概念

电力系统频率三次调节又称负荷经济分配，其任务是经济、高效地实施功率和负荷的平衡。频率三次调节要解决的问题是：以最低的开、停机成本（费用）安排机组组合，以



适应日负荷的大幅度变化。在机组之间经济地分配负荷，使得发电成本（费用）最低。在地域广阔的电力系统中，需考虑发电成本（发电费用）和网损（输电费用）之和最低。预防电力系统故障时对负荷的影响，在机组之间合理地分配备用容量。在互联电力系统中，通过调整控制区之间的交换功率，在控制区之间经济地分配负荷。

频率三次调节与频率一、二次调节不同，不仅要实际负荷的变化作出反应，更主要的是要根据预计的负荷变化，对发电功率作出安排。频率三次调节不仅要解决功率和负荷的平衡问题，还要考虑成本或费用的问题，需控制的参变量更多，需要的数据更多，算法也更复杂，因此其执行周期不可能很短。

频率三次调节主要是针对一天中变化缓慢的持续变动负荷安排发电计划（即调峰）以及在负荷或发电功率偏离经济运行点时，对负荷重新进行经济分配。其在频率控制中的作用主要是提高控制的经济性。但是，发电计划的优劣对频率二次调节的品质有重大的影响，如果发电计划与实际负荷的偏差越大，则二次调节所需的调节容量越大，承担的压力越重。因此，应尽可能提高三次调节准确度。

#### 1.1.4 频率质量对社会和电力企业的影响

电力系统频率是电能质量的三大指标之一，是反映电力系统安全稳定运行和电能质量的重要指标，反映了发电有功功率和负荷之间的平衡关系，是电力系统运行的重要控制参数，当系统的有功功率有盈余时，频率就会上升超过额定值  $f_n$ ；当发送的有功功率有缺额时，频率就会下降低于额定值，当电力系统因事故出现严重的有功功率缺额时，其频率也会随之急剧下降。电网频率与广大用户的电力设备以及发供电设备本身的安全和效率有着密切的关系，频率偏差不利于电网安全、可靠、经济运行，甚至会损害电网中的运行设备，影响产品的质量，严重时会造成系统崩溃。

##### （一）频率波动对发电厂设备的影响

发电厂的汽轮机及其叶片是按照额定转速（频率）和进汽没有冲击时保证能有最大的轴功率来设计的。因而降低旋转频率会引起蒸汽冲击叶片的损耗，同时增加了转矩；而提高旋转频率则会导致减小转矩，使叶片背面的冲击增加。因而，汽轮机运行在额定频率下最为经济。此外，降低频率运行还会使汽轮机工作叶片和其他零件加速磨损。

频率的变化会影响到发电厂厂用电动机（如给水泵、循环水泵、引风机、送风机等）的正常运行。压头只消耗在克服输水系统动态阻力压头的水泵，其出力与转速的一次方成正比

$$Q_1/Q_2 = n_1/n_2 \quad (1-3)$$

有静阻力压头时，水泵出力与角频率的关系可由下式来确定

$$Q = \sqrt{(k_1 \omega - HCT) / \Sigma R} \quad (1-4)$$

式中  $Q$  —— 出力；

$n$  —— 转速；

$\omega$  —— 角频率；

$HCT$  —— 被克服的静压头；

$\Sigma R$ ——输水管阻力；

$k_1$ ——由机组结构及尺寸所确定的系数。

有了静压头，水泵将在频率不到零的某一频率时便停止给水，这个频率被称为临界频率。根据这一定义，临界频率为

$$\omega k_p = \sqrt{HCT} / k_1 \quad (1-5)$$

图 1-5 示出了临界频率为 45.8Hz 的电动给水泵试验和计算的特性曲线。由此可知，电动给水泵的出力与交流电网的频率有很大的关系。即使频率下降的幅度很小，水泵的出力也会降低很多，会破坏发电厂的正常工作，或者完全停止向锅炉给水，而使锅炉安全运行和发电厂以及整个电力系统的运行可靠性受到威胁。频率超过额定值时，给水泵发出的压头超过所必需的压头，因而使厂用电能的消耗增大。上述情况也适用于循环水泵，只是影响的程度较小而已。

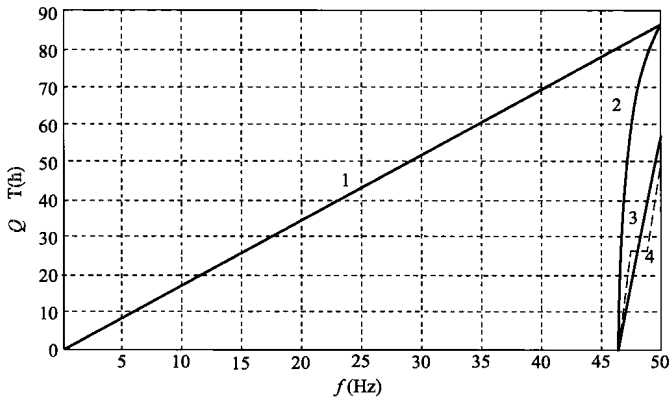


图 1-5 电动给水泵频率特性曲线

- 1—电动给水泵没有反压力时的频率特性曲线；2—按公式（1-4）绘出的电动给水泵的频率特性曲线；  
3—电动给水泵的试验频率特性曲线，实验 1；4—电动给水泵的试验频率特性曲线，实验 2

频率低于额定值将使通过汽轮机凝汽器的水量减少，这就等于使凝汽器的真空度降低，结果使汽轮机的效率下降，汽耗量增大。频率超过额定值会使通过汽轮机凝汽器的水量增加，使电能消耗增加。

除水泵以外，发电厂内还有大量具有通风力矩的机械（一次风送风机、二次风送风机、引风机），在没有静压头时，这些机械的出力与频率的一次方成正比。然而试验证明，随着频率的降低，送风机和引风机的出力远较频率下降得快。频率提高时，送风机和引风机所产生的压头就大为增加，这种情况与出力（压力）降低一样，会引起锅炉运行方式的破坏。锅炉的经济性决定于排出烟气中 CO 和 CO<sub>2</sub> 的含量，以及燃烧室内的过剩空气量。CO 和 CO<sub>2</sub> 的含量与所供给的空气量和排出的烟气量有关，因此，锅炉运行的经济性首先取决于送引风装置的运行状况。

频率降低时，送风机的出力降低，进入燃烧室的空气量较少，此时化学不完全燃烧损失增加，而同时减少了排烟损失。频率提高时，送风机的出力提高，化学不完全燃烧损失减少，而排烟损失增加。锅炉中的最低损失一般是在一个确定的过剩空气量（CO<sub>2</sub> 的含量）