

# 发电机组一次调频 原理及试验

华电电力科学研究院 组编  
黄道火 主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

# 发电机组一次调频 原理及试验

华电电力科学研究院 组编

黄道火 主编



中国电力出版社

CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

目前,电力系统所有调频方式中,在不使用切负荷手段前提下,一次调频是维持电力系统频率稳定最为实时、快捷、经济的手段之一,在源网协调中扮演着重要的角色。

本书由八章内容组成,包括电网频率波动与频率调整,发电机组一次调频功能,电力系统一次调频模型及仿真分析,并网发电机组一次调频功能试验方法,并网发电机组一次调频实例,并网发电机组一次调频控制性能优化,一次调频与电力系统低频振荡,并网发电机组一次调频功能管理。

本书为从事相关专业的工程技术人员提供参考。

金 盾 文 野 泉

### 图书在版编目(CIP)数据

发电机组一次调频原理及试验/黄道火主编;华电电力科学研究院组编. —北京:中国电力出版社,2017.12

ISBN 978-7-5198-1415-1

I. ①发… II. ①黄… ②华… III. ①发电机组—自动频率控制—试验 IV. ①TM310.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第286845号

---

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街19号(邮政编码100005)

网 址:<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:娄雪芳(010-63412375) 孙 晨

责任校对:王开云

装帧设计:王红柳 左 铭

责任印制:蒯义舟

---

印 刷:北京雁林吉兆印刷有限公司

版 次:2017年12月第一版

印 次:2017年12月北京第一次印刷

开 本:787毫米×1092毫米 16开本

印 张:9.25

字 数:215千字

定 价:58.00元

---

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

# 前 言

电网频率是衡量电力系统电能质量的重要指标之一，关乎电网的运行安全和电力用户的用电安全。维持电网频率稳定是电力系统运行的主要目标之一，也是保障电网安全稳定运行的重要手段。电网频率稳定是指当电力系统突然出现较大幅度的有功功率不平衡时，电网调度侧与发电侧通过调节热备用出力或自动切除部分负荷来维持系统电力系统的频率稳定，最大限度减弱电网频率的波动。

目前，电力系统所有调频方式中，在不使用切负荷手段前提下，一次调频是维持电力系统频率稳定最为实时、快捷、经济的手段之一，在源网协调中扮演着重要的角色。电力系统运行过程中，发电机组本质上是充当电力系统频率调整的宏观执行机构，各大区域电网均要求并网运行的发电机组必须参与电网一次调频，而且调频的性能指标必须满足并网细则的相关要求。为此，一次调频性能监测和考核管理系统陆续组建。由于电网结构与系统用电结构的日趋复杂，一次调频在电力系统运行过程中充当的角色越显重要，电网对一次调频功能所具有的性能指标越趋严格。深入了解一次调频的本质问题，优化一次调频控制回路的控制策略、提高一次调频控制性能指标，以及如何标准化、规范化管理一次调频功能的投运等诸多问题是相关专业技术人员亟须解决的问题。

本书是作者对多年来科研和实际工程工作经验的总结。书中所涉内容从电网侧和电源侧两方面对一次调频本质问题进行深度剖析，充分揭示电力系统一次调频的本质，为从事相关专业的工程技术人员提供参考。作者从电网频率波动机理、调频原理、电力系统一次调频控制回路模型、发电侧一次调频控制策略及如何提高发电机组一次调频性能、并网发电机组一次调频功能投运的奖励与考核管理方法等多方面进行了深入浅出的讲解，力求将电力系统运行中一次调频的整个过程和涉及的相关内容展现给读者。

本书由八章内容组成。第1章详细介绍了电网频率的波动机理和调整原理，及其相应的调频方式，阐述了并网发电机组的一次调频能力对电网安全运行的重要性；第2章详细论述了并网发电机组实现一次调频控制功能的方式，从控制系统角度分析论述一次调频控制回路；第3章从理论层面对电力系统一次调频进行深层次的分析，并进行实例仿真；第4章就网内不同类型发电机组的一次调频特性进行了论述和分析，以表述机组调频能力的差异性和互补性；第5、6章主要介绍了并网发电机组一次调频性能测试方法，并指出了影响发电机组一次调频性能的各种因素，通过分析各影响因素的特点，就提高电网运行的频率合格率提出了一整套发电机组一次调频性能优化的控制策略；第7章对目前电力系统运行中比较突出的低频振荡问题进行了论述，并结合理论与实例详细论述了机组一次调频与低频振荡之间的内在联系；第8章介绍了一次调频考核、奖励管理系统的主要内容，通过该管理系统建立一种常态的考核机制，并激励和指引发电企业从技术和管理上提升并网发电机组一次调频各项性能指标。

本书由黄道火负责统稿工作。第1、3、4章由黄道火编写，第2章由蔚伟编写，第5章由刘思捷编写，第6章由许伟强编写，第7章由万文军编写，第8章由曾志坚编写。

本书写作过程中，参阅了许多相关领域的文献资料，包括互联网上的技术文档、国内外期刊、电力科研院所的各种技术报告等，在此对提供这些文献和技术资料的所有作者和机构表示感谢。同时，本书的顺利完成也离不开众多同行的鼎力支持，其中包括广东电网有限责任公司电力科学研究所的诸多专家，在此表示感谢！

电力科技日新月异，限于作者水平，书中难免有不足之处，望读者不吝指正。

作者

2017年10月

# 目 录

## 前言

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| <b>第 1 章 电网频率波动与频率调整</b> .....      | 1  |
| 1 电能质量简介 .....                      | 1  |
| 2 电网频率波动机理及特性 .....                 | 3  |
| 3 电网频率调整原理 .....                    | 5  |
| 4 一次调频特点 .....                      | 12 |
| <b>第 2 章 发电机组一次调频功能</b> .....       | 15 |
| 1 发电机组一次调频控制 .....                  | 15 |
| 2 发电机组一次调频特性分析 .....                | 20 |
| 3 发电机组一次调频相关参数 .....                | 22 |
| 4 一次调频同自动发电控制 (AGC) 的联系 .....       | 27 |
| 5 一次调频功能与孤岛运行 .....                 | 30 |
| <b>第 3 章 电力系统一次调频模型及仿真分析</b> .....  | 32 |
| 1 系统频率动态变化机理 .....                  | 32 |
| 2 一次调频动态特性仿真 .....                  | 34 |
| 3 电力系统仿真模型 .....                    | 36 |
| 4 模型参数辨识 .....                      | 38 |
| 5 电力系统一次调频的实时仿真实例 .....             | 41 |
| <b>第 4 章 并网发电机组一次调频功能试验方法</b> ..... | 46 |
| 1 试验目的 .....                        | 46 |
| 2 试验内容 .....                        | 46 |
| 3 试验方法与步骤 .....                     | 47 |
| 4 迟缓率的测量 .....                      | 51 |
| 5 频率响应试验方法与步骤 .....                 | 52 |
| 6 一次调频动作调节品质的测试 .....               | 53 |
| 7 数据记录表格 .....                      | 55 |
| 8 标准与评价 .....                       | 56 |

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| <b>第 5 章 并网发电机组一次调频实例</b> .....     | 57  |
| 1 水电机组一次调频 .....                    | 57  |
| 2 燃气-蒸汽联合循环机组一次调频 .....             | 74  |
| 3 燃煤发电机组一次调频 .....                  | 81  |
| 4 原子能发电机组一次调频 .....                 | 85  |
| 5 风电参与一次调频简介 .....                  | 94  |
| 6 其他形式的一次调频手段 .....                 | 95  |
| <b>第 6 章 并网发电机组一次调频控制性能优化</b> ..... | 96  |
| 1 并网发电机组一次调频控制策略 .....              | 96  |
| 2 并网发电机组一次调频性能测试 .....              | 97  |
| 3 影响发电机组一次调频性能的因素 .....             | 100 |
| 4 发电机组一次调频控制策略的优化 .....             | 101 |
| 5 调节汽门流量特性曲线的整定 .....               | 107 |
| <b>第 7 章 一次调频与电力系统低频振荡</b> .....    | 114 |
| 1 低频振荡概念与机理 .....                   | 114 |
| 2 原动机调节系统对系统阻尼的影响 .....             | 116 |
| 3 一次调频回路对阻尼系数的影响 .....              | 117 |
| 4 一次调频作用引发的低频振荡实例 .....             | 117 |
| 5 低频振荡治理 .....                      | 124 |
| <b>第 8 章 并网发电机组一次调频功能管理</b> .....   | 126 |
| 1 一次调频功能要求 .....                    | 126 |
| 2 一次调频考核管理 .....                    | 128 |
| 3 评价算法 .....                        | 132 |
| 4 一次调频管理若干问题讨论 .....                | 136 |
| <b>附录 A 飞升时间物理意义</b> .....          | 138 |
| <b>附录 B 空载与带负荷后的动态特性</b> .....      | 139 |
| <b>参考文献</b> .....                   | 141 |

## 电网频率波动与频率调整

电网频率的稳定是衡量电力系统电能质量的重要指标之一。所谓频率稳定性是指系统遭受严重的故障造成出力与负荷出现较大的不平衡时，维持频率在可接受的范围内的能力。它取决于系统出力的调整能力。频率不稳定的过渡过程可能只有几秒，也可能持续几分钟，可分为短期和长期稳定性。频率稳定是电力系统安全稳定运行的重要因素，它反映了电力系统中有功功率供需平衡的基本状态。由于电能无法大量储存，电力系统运行过程中，供需两侧有功功率和有功负荷时时处于不完全平衡状态，从而导致电网频率的随机波动。频率异常将会严重影响发电机和电力系统的安全、经济运行及用户的安全。因而，电力系统运行的主要目标之一是在任何情况下，通过各种调频手段，维持电网频率稳定，确保电网运行安全，提供合格的电能产品供用户使用。《电力工业技术管理法规》规定电网运行的频率额定值统一为 50Hz，考虑到目前电网的容量等方面，我国现行电能质量指标规定，电网频率的合格范围是  $(50 \pm 0.2)$  Hz。

### 1 电能质量简介

#### 1.1 电能质量指标

随着基于计算机系统的控制设备与电子装置的广泛应用，电力系统中用电负荷结构发生改变，其中，变频装置、电弧炉炼钢、电气化铁道等非线性、冲击性负荷对电能质量造成污染与破坏。电能作为商品，人们对电能质量提出更高的要求，电能质量已逐渐成为全社会共同关注的问题。电能质量可定义为导致用户设备故障或不能正常工作的电压、电流或频率偏差。这个定义简单明晰，概括了电能质量问题的成因和后果。

电能质量通常是指公用电网、发电企业、用户受电端的电能质量，其内容包括以下五方面：

- (1) 电力系统频率允许偏差。
- (2) 电压允许偏差。
- (3) 电压允许波动和闪变。
- (4) 三相电压允许不平衡度。
- (5) 电网谐波允许指标。

上述五大类质量指标在相关的标准文件中均有详细的定义和量化标准，此处不再赘

述。这些指标不仅关乎电能质量，也是电力系统安全运行的决定性因素。这些指标的控制均应在电力系统运行过程中通过各种手段进行实时调整与补偿来完成。其中，频率偏差质量指标控制过程涵盖了电力系统运行的各个环节，频率调节的过程除电网自身调整外还必须由发电侧各发电机组参与系统出力的调整。

## 1.2 电网频率及偏差

电网频率是电力系统中同步发电机产生的交流正弦电压的频率。在稳态运行条件下，所有发电机同步运行，整个电力系统的频率是相等的。系统稳态时，并列运行的每台发电机组的转速与系统频率的关系为

$$f = \frac{p \times n}{60} \quad (1-1)$$

式中  $f$ ——电力系统频率，Hz；

$p$ ——发电机转子极对数；

$n$ ——发电机组的转速，r/min。

依据式(1-1)，单极的并网发电机组（如我国绝大部分火力发电机组），其转子的额定转速为3000r/min。目前，由于电能还无法大量储存，整个电力生产和消耗是在同一时间进行，由于用电量随机变化等因素，发电机组存在机械惯性致使输入功率变化较缓慢，无法立即响应用电负荷的随机变动的问题，电网供应侧有功功率和需求侧有功负荷无法处于一种稳定的平衡状态下，平衡的打破直接影响并网发电机组的转速，继而带来电力系统运行频率的实际值偏离电网额定频率，这个偏移量被称为电网频率偏差。考虑到目前电网的容量等诸方面因素，我国现行电能质量的频率允许偏差指标为±0.2Hz。换言之，我国电网运行过程中，频率的合格范围是49.8~50.2Hz。在系统实际运行过程中，系统频率偏差保持在额定频率的0.2%（0.1Hz）以内。

电网频率允许偏差是世界公认的电能质量指标中最重要的指标，关系国家经济发展全局。同一个频率偏差值对于不同容量的电力系统的安全威胁相差较远，即在系统频率都偏低0.1Hz时，大容量电网的有功缺额会比小容量系统的有功缺额大很多，对电网安全运行的威胁程度也不同。目前，经济发达国家的电网频率偏差允许范围为±0.1Hz，日本最严格，为±0.08Hz。随着高新技术的不断发展，各国对电网频率允许变动范围的要求将越来越严格，预计再过若干年，规定的范围还将进一步减小。由于我国电网频率偏差允许范围为±0.2Hz，因此许多重要产品质量比不上经济发达国家，也限制了我国要求电网频率偏差范围为±0.1Hz的高新技术研究与发展。为此，早在1995年11月，电力工业部在全国电网运行工作会议上，要求各电网把频率偏差范围从±0.2Hz降到±0.1Hz作为电网内部运行和考核目标，且在1996年3月又正式下文重申。可见频率偏差这项电能质量指标的重要性。

## 1.3 电网频率合格率

为了对电网运行质量指标中的频率进行量化考核，在统计频率质量指标时引入了电网频率合格率的概念。

对某电力系统，通过连续监视并直接或间接地统计在某考核时段内系统频率超限的时

间,以获得表征电网频率在规定范围运行的合格率,可以用下式表示:

$$\text{频率合格率}(\%) = \left[ 1 - \frac{\text{统计的频率超限时间总和}(s)}{\text{总的统计区段时间}(s)} \right] \times 100\% \quad (1-2)$$

例如,某电力系统规定的频率允许偏差是 $\pm 0.2\text{Hz}$ ,该系统全年由于直流输电线路一回故障跳闸和其非线性冲击负荷等原因导致系统频率在 $49.8\text{Hz}$ 以下运行了 $232\text{s}$ 。那么,该系统全年运行频率合格率为

$$\text{系统全年运行频率合格率} = \left( 1 - \frac{232}{365 \times 24 \times 3600} \right) \times 100\% = 99.9993\%$$

频率的合格率可以直接反映出电力系统提供给用户电能质量中频率的优劣程度,电力系统会依据实际的电网运行情况给出相应的考核限值。

## 2 电网频率波动机理及特性

### 2.1 频率波动机理

由于电能无法大量储存,电力生产、输送、分配及消费几乎在同一时刻完成,决定了生产和消费需要维持相对平衡,即电力系统运行时必须保证供应侧和需求侧的平衡。正是电力生产的这种天然禀赋导致系统频率处于微观波动状态。

系统稳定时,电网频率实际是由电力系统并列运行的同步发电机转速共同决定。我们首先通过单台并网运行发电机的转子动力学方程来分析发电机转子转速变化的机理。由动力学知识得知,转子的动力学方程为

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_t - M_g - M_f \quad (1-3)$$

式中  $J$ ——发电机组转子的转动惯量,  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ;

$\omega$ ——发电机转子的角速度,  $\text{rad/s}$ ;

$M_t$ ——原动机输入的转矩,  $\text{N} \cdot \text{m}$ ;

$M_g$ ——发电机电磁转矩,  $\text{N} \cdot \text{m}$ ;

$M_f$ ——发电机组的机械阻力转矩,  $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

不失一般性,假设外界有功负荷增加时,发电机的电磁转矩立即增大,原动机由于存在机械方面的惯性,输入的转矩难以立刻发生变化,此时机械阻力转矩几乎不变。根据式(1-3)可知,发电机的转速会随着电网负荷的增大而减小,即电压频率比上一时刻值偏低。当原动机输入转矩的变化同发电机电磁转矩和机械阻力转矩的变化相抵消后,转速才会恢复至原来转速。

当电力系统未发生振荡时,可以将系统内所有并网发电机组看成单台发电机组。按照上述理论,当电网需求侧有功负荷发生变化时,而电网供应侧的发电机组无法及时弥补有功功率的缺额,电网的频率也就开始波动。同样的道理,当供应侧的有功功率突然变化(如大型发电机组跳闸事故),也将导致系统有功功率平衡的破坏,致使电网频率发生波动。由此可知,在稳态情况下,电力系统的频率是全系统一致的运行参数,系统频率的变化是由于有功负荷与原动机输入的有功功率之间失去平衡所致,即当总出力(电网提供的有功功率)和总负荷(包括网损)发生不平衡时,就会产生频率的偏差。当电网总有功负

荷增大，并大于电网有功功率时，电网频率减小；反之，电网频率增大。由于负荷是经常发生变化的，任何一处的负荷变化都会引起全系统的功率不平衡，因而导致系统频率的波动就难以避免。

由此可以推断，假如分离的区域没有参与频率调节的旋转备用，则有三种因素会导致分离区域的系统频率下降：①过负荷的量（即发电出力的缺额）；②代表区域内所有发电机总转动惯量的惯性常数；③备用容量的大小。

## 2.2 频率波动的随机特性

根据上节论述的频率波动机理可知，当电网有功负荷增加时，电网的频率减小，等到发电侧提供的有功功率增加后，频率才会渐渐回复至变化前水平。反之，电网有功负荷减少时，电网的频率就会增大。由于电力系统运行过程中无法准确预测负荷的变化，导致电网频率波动的不确定性。用户负荷的随机性和使用电能行为的随机性决定了电网频率变化具有明显的随机特点。因此，电网频率是随时间动态变化的随机变量，其相应频谱中含有不同的频率成分。对电网频率进行大量统计后发现，频率偏差量实际上是由频率为 0.02~1Hz 和频率大于 0.02Hz 波动量的两种成分叠加而成。其中，周期较短的 0.02~1Hz 的波动成分表现出较强的随机性，这种短周期随机波动的频率就必须由发电机组的一次调频功能进行相应调整。

有些文献将电网的频率偏差量用具有特定功率谱、均值为 0 的随机变量来表述，用随机过程相关知识可以将电网频率偏差表述为

$$\begin{cases} E(\Delta f) = \int_{-\infty}^{\infty} \Delta f \cdot f(\Delta f) = 0 \\ S_{\Delta f}(j\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|\Delta f(j\omega)|^2}{T} = \text{const} \end{cases} \quad (1-4)$$

式中  $\Delta f$ ——频率偏差，Hz；

$E(\Delta f)$ ——频率偏差的数学期望，即概率意义上的平均值，Hz；

$f(\Delta f)$ ——频率偏差分布概率密度；

$S_{\Delta f}(j\omega)$ ——频率偏差的功率谱密度， $\text{Hz}^2/\text{s}$ 。

如果将频率波动量作为随机变量看待，那么电网的调频，特别是一次调频即可看成与频率波动密切相关的一种随机过程。

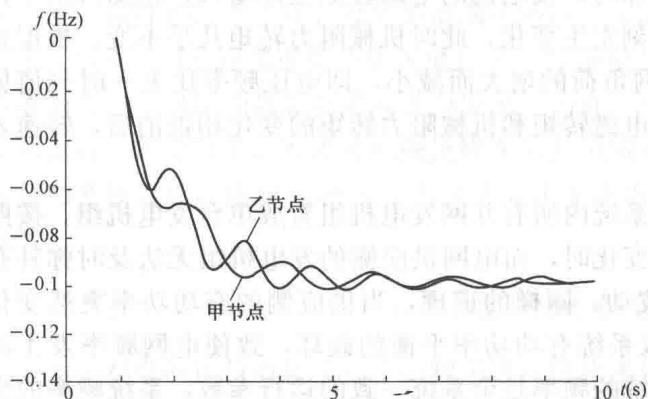


图 1-1 电力系统动态过程中不同节点的电压频率偏差

宏观上看，并网的所有发电机均同步，即理论上，电网频率是全系统一致的参数。事实上，全网频率的差异性也是电网频率随机特性的另一种表现形式。动态过程中，电力系统不同节点区域，特别是系统发生振荡后，全网的频率表现就不完全一致，电力系统的不同节点电压频率，其所测量的频率却不完全一致。差异主要表现在短周期的快变分量上，长周期的慢变分量还

是一致的。如图 1-1 为电力系统动态过程中不同节点的电压频率偏差，该图充分证实了电网频率的统一性和分散性的特点。然而，在研究系统一次调频时，关注的是相对长周期（2s 以上）的频率波动行为，可认为频率在整个系统是一致的，即忽略了系统中各发电机的相互摇摆，假定各发电机组具有相同转速。

## 2.3 频率变化的影响

电网频率时刻都处于波动状态，电力系统中的发电设备与用电设备都是按额定频率设计和制造的，只有在额定频率附近运行时，才能发挥最好的效能。系统频率过大的波动，对用户和发电厂运行都将产生不利影响。

### 2.3.1 频率变化对电能用户的影响

(1) 电力用户使用的电气设备中绝大多数是异步电动机，其转速与系统频率有关。频率变化将引起电动机转速变化，从而影响产品的质量，出现残、次品的几率增加，直接影响工业企业的效益。

(2) 电动机的有功功率与系统频率有关。系统频率降低，会使电动机的有功功率降低，将影响所传动机械的出力，降低生产率。

(3) 国防和科学研究部门广泛使用电子设备。系统频率的稳定与否会影响电子设备的工作特性，降低准确度，造成误差。频率过低时，雷达、电子计算机等重要设施将无法正常运行。

### 2.3.2 频率的变化对发电厂及系统本身的影响

(1) 火力发电厂的主要厂用电设备是泵和风机，均由异步电动机带动（采用变频器除外），如果系统频率降低，将使电动机输出功率减少，则它们所供应的水量和风量就会迅速减少，影响锅炉和发电机的正常运行。若系统频率降低过多，电动机将停止运转，严重时会引起发电机的故障跳闸，导致电网频率稳定性进一步恶化，形成恶性循环，直接威胁到电网的安全、稳定运行。

(2) 系统在频率较低的情况下运行时，原动机可能会处于临界转速附近运行，机组振动剧增；同时，容易引起汽轮机叶片共振，缩短叶片寿命。因此，现代大型汽轮发电机组对系统频率有相当严格的要求。

(3) 系统处于低频状态下运行时，异步电动机和变压器由于主磁通量的增加，励磁电流随之增大、系统所需无功功率大幅增加，导致系统电压水平降低，给系统电压调整带来困难，将使电能质量进一步恶化。

综上所述，电网频率偏差必须保证在允许的范围内。为了稳定电网频率，在电力系统运行过程中，专业技术人员必须掌握有功平衡这一本质性问题，利用一切技术手段平衡系统有功功率与有功负荷，达到调整电网频率的目的。

## 3 电网频率调整原理

### 3.1 电力系统有功功率的平衡

电网频率的调整过程实际可看成是不断建立系统有功功率和有功负荷平衡的过程。所

谓电力系统有功功率平衡是指电网运行的任何时刻系统发电机有功功率的总和等于系统负荷（包括发电厂厂用负荷）需要的有功功率及输、变、配电过程中网络元件消耗的有功功率之和，可以用下式表示这种平衡关系。

$$\sum P_G - \sum P_p = \sum P_L + \sum P_{\Delta} \quad (1-5)$$

式中  $\sum P_G$  ——系统内所有有功电源的发电有功功率之和，MW；

$\sum P_p$  ——系统所有电源点厂用电有功负荷之和，MW；

$\sum P_L$  ——系统所有有功负荷之和，MW；

$\sum P_{\Delta}$  ——电网所用输、配、变电元件有功损耗之和，MW。

通常在无法改变系统负荷达到有功功率的平衡时，最为科学的方法就是调整电网供应侧输入的有功功率来适应用户有功负荷的变化（包括网损），从而使得电网频率稳定在额定范围附近。要改变供应侧的有功功率，系统必须拥有相应的有功电源和足够的备用容量。

### 3.2 有功功率电源及备用容量

系统有功电源实际上由各类发电厂的发电机充当，电力系统中的电源容量不一定是所有机组额定容量简单之和（该项为装机容量），因为不是任何时候所有机组都处于运行状态，可能有些机组故障停机或计划停机检修。另外，投入运行的机组也不一定都能按额定容量发电，设备缺陷、水文条件限制水电厂发电机出力，夏天循环水温升高限制火力发电机组出力等原因，致使发电机的发电能力不一定等于额定容量。系统调度部门均要及时、准确地掌握各发电厂各机组的发电能力，可投入发电设备的可发功率之和，才是真正可供系统调度的电源容量。

电力系统有功电源容量必须大于包括用户最大有功负荷、网损及厂用电在内的全系统最大发电负荷。电源容量大于发电负荷的部分称为系统的备用容量，如图 1-2 所示。

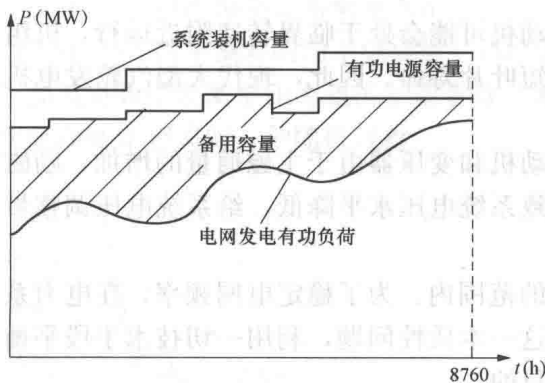


图 1-2 电力系统的各种有功容量比较示意图

系统备用容量按其作用可分为以下几类。

(1) 负荷备用：为调整系统中短期负荷波动和日计划外的负荷增加，确保系统频率质量而在系统中留有的备用容量（Primary Frequency Control Reserve）。这种备用容量的大小要根据系统总负荷的大小及运行经验，并考虑系统中各类用户的比重来确定，一般为最大负荷的 2%~5%。大系统取小值，小系统取大值。

(2) 事故备用：为防止系统中某些发电设备发生偶然性事故时，电力用户受到严重影响，要维持系统正常供电而在系统中留有事故备用容量。事故备用容量的大小，要根据系统中机组台数、机组容量的大小、机组的故障率及系统的可靠性指标等来确定，一般为最大负荷的 5%~10%，但不能少于系统中一台最大机组容量。

(3) 检修备用：为保证系统的发电设备进行定期检修时不致影响供电而在系统中应有的备用容量，发电设备的检修一般是分期分批安排在一年中最小负荷季节（大修）和节假日（小修）进行。防止在这期间内，不能完全安排某些机组的大、小修才设置所需的检修备用容量，一般为最大发电负荷的4%~5%。

(4) 经济发展备用：考虑用户的超计划生产，新用户的出现等而设置的备用容量。这种备用容量的大小要根据国民经济的增长情况来确定，一般为最大发电负荷的3%~5%。

这些备用容量存在方式分为热备用和冷备用两种类型。热备用又称旋转备用，是指运转中的发电设备可发最大功率与系统发电负荷之差；冷备用则是指未运转但能随时启用的发电设备可发最大功率。显然检修中的发电机组不属于冷备用，为保证频率质量及供电可靠性，负荷备用和事故备用应全是热备用，但考虑运行的经济性，热备用容量又不宜过大。实际上热备用容量的大小不需要按负荷备用和事故备用的总和来确定，两者是可通用的。作为调频的负荷备用要随时应付系统负荷的变化，应全以热备用的形式存在，但可将部分事故备用以冷备用形式存在，在总的备用容量中，热备用和冷备用的分配存在发电机组启停最优组合问题，这个问题一直处于不断深入研究之中，本书不作论述。

### 3.3 负荷特性

为了说明电力系统的调频方式，有必要认清有功负荷的特性，该特性包括频率特性及负荷分类两部分内容。

#### 3.3.1 负荷分类

电力系统调度和运行过程中，依据频率波动的周期与幅度将系统中负荷变化分成三种类型。第一种幅度很小（0.05%额定频率以下），周期又很短（一般小于10s），具有无法预测的随机性质，称为微小变动分量，如图1-3中的 $P_1$ 所示。第二种变动幅度较大（0.1%~1%额定频率），周期大约在10s至3min之间，属于冲击性的负荷变动，这类负荷主要由电炉、液压机械、电气机车等启停操作引起，也可能由负荷预测与实际负荷偏差较大造成的发电计划安排不足或过多，区域交换计划与实际联络线功率偏差等所致，如图1-3中的 $P_2$ 所示。第三种是长周期分量，周期大约在3min以上，引起负荷变化的原因主要是工厂的作息制度，人们的生活习惯及气象条件的变化等引起的负荷变化，如图1-3中的 $P_3$ 所示，第三种变化量有其规律性，可以提前预测。这三种特性的负荷变化叠加就构成了电力系统实际运行的负荷曲线 $P_\Sigma$ 。以上不同形式的负荷变化决定了不同的调频方式。

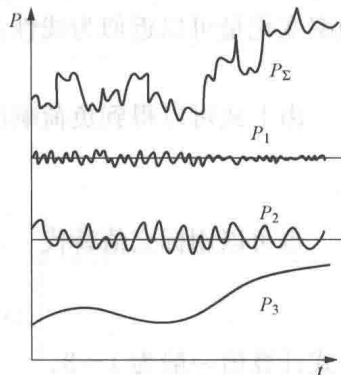


图1-3 电力系统负荷分解图

#### 3.3.2 有功负荷的频率特性

当系统频率变化时，整个系统的有功负荷也要随着改变，这种现象称为负荷的功率-频率特性，也是负荷的静态特性。系统有功负荷的这种特性，可以归纳为以下几类。

- (1) 与频率无关的负荷，如照明、电磁炉、电阻炉、整流负荷等。
- (2) 与频率成正比的负荷，如金属切削机床，往复式水泵和压气机、发电厂的球磨

机、压缩机、卷扬机等。

(3) 与频率二次方成正比的负荷，主要是电网网损中的变压器涡流损耗。

(4) 与频率三次方成正比的负荷，如通风机、离心式泵与风机、静水头阻力不大的循环水泵等。

(5) 与频率更高次方成正比的负荷，如电厂锅炉电动给水泵等。这类负荷在整个电网占有份额较小，一般可以忽略不计。

由此可知，在全系统电压不变且系统综合用电负荷（即用电设备）不变的前提下，假设系统频率变小，系统有功负荷将会减少；反之，电网频率上升，系统的有功负荷将增加。在频率波动在允许范围之内时，这种特性可用以下关系式表述：

$$P_L = P_{L0} \left[ \alpha_0 + \alpha_1 \left( \frac{f}{f_N} \right) + \alpha_2 \left( \frac{f}{f_N} \right)^2 + \alpha_3 \left( \frac{f}{f_N} \right)^3 + \dots + \alpha_n \left( \frac{f}{f_N} \right)^n \right] \quad (1-6)$$

式中  $P_L$ ——频率变动后电网有功负荷，MW；  
 $P_{L0}$ ——额定频率下电网有功负荷，MW；  
 $\alpha_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ ——各类负荷的权重系数；  
 $f$ ——波动后的系统频率，Hz；  
 $f_N$ ——系统额定频率，Hz。

假定某电源点一台机组突然跳闸，即式(1-5)等号左边小于等号右边的值，机组频率下降。依据系统负荷-频率特性可知，系统的有功负荷将按照频率偏差的比例减小，这样一来式(1-5)等号右边的量也将降低，使得等式两边的有功差距缩小，即有功平衡破坏程度将比起初减弱，频率的偏差量也就自然下降，把这种负荷参与了调节频率的现象称为负荷的调节效应，有时称为系统频率自愈特性。当电力系统的频率偏差在允许的小范围变化时，式(1-6)转化成变化量表达式时，即可忽略高阶量，那么有功负荷的变化量和频率变化量可以近似为线性关系，即

$$\Delta P_L = K_L \times \Delta f \quad (1-7)$$

由上式可以得到负荷响应系数为

$$K_L = \frac{\Delta P_L}{\Delta f} \quad (1-8)$$

也可以用标幺值替代

$$K_L^* = \frac{\Delta P_L}{\Delta f} / \frac{P_{L0}}{f_0} \quad (1-9)$$

上式计算值一般为1~3。

**【例 1-1】** 某电力系统，在某时段总有功负荷为 32 000 MW，负荷构成见表 1-1。

表 1-1 负 荷 构 成

| 序号 | 负荷类别         | 份额 (%) |
|----|--------------|--------|
| 1  | 与频率无关的负荷     | 30     |
| 2  | 与频率成正比的负荷    | 40     |
| 3  | 与频率二次方成正比的负荷 | 10     |
| 4  | 与频率三次方成正比的负荷 | 20     |

当电网频率从 50Hz 下降至 49.85Hz 后, 系统的有功负荷是多少? 相应的负荷效应系数是多少?

解: 依据式 (1-6) 得

$$P_L = P_{L0} \sum_{i=0}^3 \alpha_i \left( \frac{f}{f_N} \right)^i = 32\,000 \times \left[ 0.3 + 0.4 \times \frac{49.85}{50} + 0.1 \times \left( \frac{49.85}{50} \right)^2 + 0.2 \times \left( \frac{49.85}{50} \right)^3 \right]$$

$$= 32\,000 \times 0.996\,41$$

$$= 31\,885(\text{MW})$$

$$K_L = \frac{\Delta P_L}{\Delta f} = \frac{32\,000 - 31\,885}{50 - 49.85} = 766.7(\text{MW/Hz})$$

即如果该系统此时频率下降 1Hz, 相应的有功负荷就会下降 766.7MW。

显然, 这种自愈特性无法将系统频率恢复至额定值附近。特别当负荷大范围变化时, 依靠系统的自愈能力将直接威胁到系统运行安全。故而, 在电力运行过程中, 调度及自动化系统总是依据不同的负荷变化特点采用不同的调频方式来调整系统有功平衡。

电力系统的惯性存在于旋转设备中, 包括原动机和负载。惯性在电力系统频率控制中充当了重要角色。

### 3.4 互联系统联络线功率频率特性

该节主要从静态特性上进行分析, 假定发电机的调差系数已知 (后续章节将有详细介绍), 电网的负荷频率调差系数已知。首先研究两个互连控制区的联络线功率频率特性, 如图 1-4 所示。

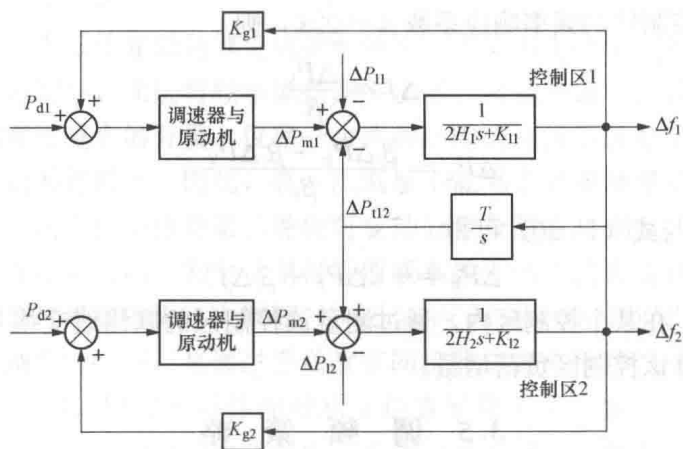


图 1-4 两个具有一次调频功能的联络控制区传递函数框图

$K_{g1}$ 、 $K_{g2}$ —控制区 1 与控制区 2 中发电机频率调差系数;  $K_{11}$ 、 $K_{12}$ —两个控制区负荷响应系数 (也称负荷-频率调差系数);  $H_1$ 、 $H_2$ —系统的惯性系数;  $T$ —两个控制区之间功率同步系数;

$\Delta P_{112}$ —控制区 1 与控制区 2 之间联络线上交换功率的变化量

如果假设在某时刻, 控制区 1 负荷增加了  $\Delta P_{11}$ , 控制区 2 负荷增加了  $\Delta P_{v2}$ , 互连控制区对应的频率静态变化值为

$$\Delta f_1 = \Delta f_2 = \Delta f \quad (1-10)$$

对控制区 1, 下式成立:

$$\Delta P_{m1} - \Delta P_{t12} - \Delta P_{l1} = \Delta f_1 \times K_{11} = \Delta f \times K_{11} \quad (1-11)$$

对控制区 2, 下式成立:

$$\Delta P_{m2} + \Delta P_{t12} - \Delta P_{l2} = \Delta f_2 \times K_{21} = \Delta f \times K_{12} \quad (1-12)$$

而具有一次调频控制功能的静态功率变化量与发电机的调差系数有关, 即

$$\Delta P_{m1} = -K_{g1} \Delta f \quad (1-13)$$

$$\Delta P_{m2} = -K_{g2} \Delta f \quad (1-14)$$

将式 (1-13) 和式 (1-14) 分别代入式 (1-11) 和式 (1-12), 得

$$\Delta f(K_{g1} + K_{11}) = \Delta P_{t12} - \Delta P_{l1} \quad (1-15)$$

$$\Delta f(K_{g2} + K_{12}) = \Delta P_{t12} - \Delta P_{l2} \quad (1-16)$$

联立上面两式可得

$$\begin{aligned} \Delta f &= -\frac{\Delta P_{l1} + \Delta P_{l2}}{(K_{g1} + K_{11}) + (K_{g2} + K_{12})} \\ &= -\frac{\Delta P_{l1} + \Delta P_{l2}}{\beta_1 + \beta_2} \end{aligned} \quad (1-17)$$

$$\Delta P_{t12} = \frac{\beta_2 \Delta P_{l1} + \beta_1 \Delta P_{l2}}{\beta_1 + \beta_2} \quad (1-18)$$

其中

$$\beta_1 = K_{g1} + K_{11}, \beta_2 = K_{g2} + K_{12}$$

式中  $\beta_1$ 、 $\beta_2$ ——控制区 1 和控制区 2 的频率响应系数。

依据上述推导, 可以将互连控制区扩展至  $n$  个进行讨论。令  $\Delta P_{vi}$  为第  $i$  个控制区与其他控制区的交换功率变化量,  $\Delta P_{lc}$  为  $n$  个控制区负荷增量总和,  $\Delta P_{li}$  为第  $i$  个控制区负荷增量。并假设所有控制区的频率响应系数  $\beta_c = \sum_{i=1}^n \beta_i$ , 则

$$\Delta f = \frac{\Delta P_{lc}}{\beta_c} \quad (1-19)$$

$$\Delta P_{vi} = \frac{\beta_i \Delta P_{lc} - \beta_c \Delta P_{li}}{\beta_c} \quad (1-20)$$

由式 (1-19) 与式 (1-20) 可得

$$\Delta P_{vi} = -(\Delta P_{li} + \beta_i \Delta f) \quad (1-21)$$

上述演算表明, 在某个控制区内, 通过测量该控制区的联络线交换功率的变化量和频率变化值便可以核算该控制区负荷增量。

### 3.5 调 频 策 略

电力系统运行过程中, 电网频率调整是按照负荷变化的周期和幅值大小区别对待的。针对上一节负荷分类中介绍的三种负荷变化的频谱特性, 频率调整策略相应划分为频率一次、二次和三次调整。

#### 3.5.1 频率一次调整

上节介绍的第一种形式的负荷变动分量引起的频率偏移具有变化周期较短与幅度较小的特点, 需要系统及时、快捷补充相应的有功功率, 这可由发电机组的调速器自动进行调整, 通常称为频率的一次调整, 简称一次调频 (Primary Frequency Regulation, PFR), 一次调频是指机组在设定功率不变的情况下, 系统侧发生负荷波动引起机组出力