

# 电力市场中负荷跟踪辅助服务模型的研究

郭小红,刘瑞叶

(哈尔滨工业大学电气工程系,黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 构建一个完善的电力市场已成为全世界的一大趋势。由于系统频率是否发生偏移可以反映市场的供需是否处于平衡状态,所以可以利用辅助服务方式之一的负荷跟踪服务通过负荷监测器实时监测负荷波动,并将负荷信息传送到发电端,进行功率调整。本文在此基础上对负荷跟踪控制模型进行市场下的改进,考虑市场因素,形成控制结构,根据可能出现的各种发电及负荷变化对模型加以修正,对其动态响应进行实时模拟,得到优化模型。利用该模型可以实现供求平衡,调整系统频率,提高供电质量。

**关键词:** 负荷跟踪; 辅助服务; 电力市场; 频率偏移

**中图分类号:** TM714 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2003)11-0011-04

## 1 引言

为了能更好地利用电力资源及设备,建立完善的电力市场已成为当今世界上一大趋势。辅助服务是由机组、传输线及各种设备提供的使系统安全稳定运行的服务。在电力市场中辅助服务也成为了商品,应该给予补偿,系统应根据需求的量分摊辅助服务的费用。因此,各项辅助服务也会形成竞争。近几年有许多研究电力市场辅助服务的文献,大多是研究在一定数量的发电商参与竞价的同时,由系统运行部门代表消费者对每一种辅助服务提出要求的情况<sup>[1,2]</sup>。

系统稳定运行要求发电量要与需求量一致,但系统负荷是实时变化的,而发电则会有一定的延时<sup>[3]</sup>。传统上短期实时供求差异由AGC(automatic generate control 自动发电控制)机组或MGC(manual generate control 人工发电控制)机组调整机组出力计划,达到供求平衡从而控制频率波动<sup>[4,5]</sup>。电力市场中AGC服务成为辅助服务之一。除了AGC外,辅助服务中还有负荷跟踪(load following)也能进行供求量的调整。文献[6]研究双边市场中在发电和用户之间直接进行负荷跟踪交易,说明了这种交易的种种好处及这种贸易的可行性。

本文假设市场设备齐全,负荷跟踪服务可以通过负荷监测器实时监测负荷波动,并可以将负荷信息传送到发电端,进行功率调整。在市场环境下对系统负荷跟踪服务模型进行研究,并根据可能出现的各种发电及负荷变化对模型及时加以修正,对其动态响应进行实时模拟,逐步得到优化模型。该模型可以实时监控市场供求关系,加强电网频率管理

提高供电质量。

## 2 系统频率波动与供求平衡的关系

频率是衡量电网电能质量的一个重要指标,它与发电机的转速有着严格的关系<sup>[1]</sup>。发电机转子运动方程可由下式表示:

$$J \frac{d}{dt} = M_T - M_e \quad (1)$$

式中:  $J$  为发电机转动惯量( $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$ );

为转子角加速度( $\text{rad}/\text{s}^2$ );

为原动机机械角速度( $\text{rad}/\text{s}$ );

$M_T$  为原动机转矩( $\text{kg} \cdot \text{m}$ );

$M_e$  为发电机输出的电磁转矩( $\text{kg} \cdot \text{m}$ )。

由电机学可知:  $\omega = p \cdot f = 2 \pi f$

式中:  $\omega$  为电气角速度( $\text{rad}/\text{s}$ );

$p$  为发电机转子极对数;

$f$  为转子频率(Hz)。

由式(1)可得:

$$J \frac{d}{dt} = \frac{1}{p} \frac{d}{dt} = 2 \frac{1}{p} \frac{df}{dt} = M_T - M_e \quad (2)$$

式(2)两边同时乘以  $f$ ,可推出:

$$f \frac{df}{dt} = \frac{p^2}{4} (P_T - P_e)$$

两边积分得:

$$f^2_t - f^2_{t_0} = \frac{p^2}{2} \int_{t_0}^t (P_T - P_e) dt \quad (3)$$

式(3)中:  $P_T$  为原动机输入的功率(W);

$P_e$  为发电机输出的电磁功率(W)。

$P_T$  是扣除了励磁损耗和各种机械损耗的值,随着转子运动速度的变化而实时改变,是时间的函数;

$P_e$  由系统的运行状态决定,在任何时候都是系统需要的有功功率总和(加入各种用电设备所需功率和网络有功损耗),也是时间的函数。

由式(3)可知,当  $P_T = P_e$  时也即供求实时平衡时,  $f_i = f_e$ , 频率不产生波动。但由于电力系统负荷是实时变化的,所以必将引起系统频率发生相应的变化,而供求不平衡功率的大小及持续时间的长短决定了系统频率波动程度的高低。

在互联系统中,可以通过 EMS 系统测取系统的实时频率,从而计算不平衡功率的大小,用于改变发电机出力,减小系统频率偏差,这是个闭环效应。

在电力市场环境下应考虑市场规则。在  $t$  时刻  $i$  区内  $j$  发电公司 (Gencos) 的发电控制误差为  $P_{\Delta j}$ , 其等式为:

$$P_{\Delta j} = \sum_{k,m} (C_{jk} \cdot P_{L,k}) - P_{Gj} \quad (4)$$

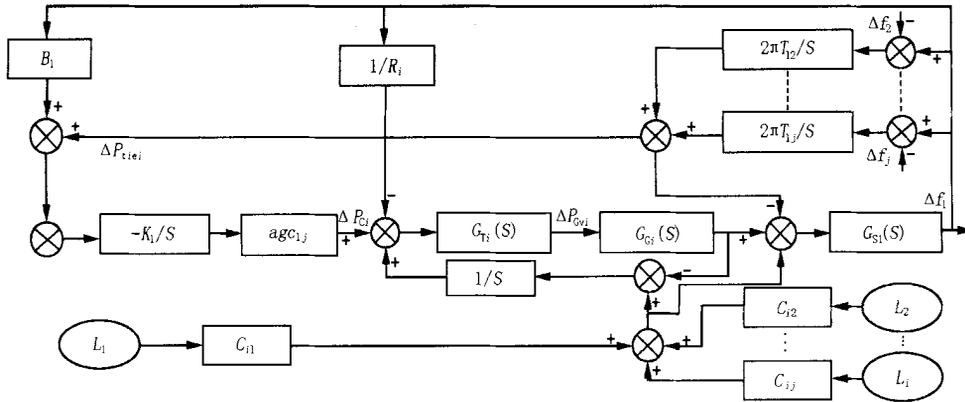


图 1 1 区域第  $i$  发电公司反馈模型

Fig. 1 Feedback model of  $i$  gencos in 1 area

其中:

- 调速系统传递函数:  $G_{Ti}(S) = 1 / (1 + ST_{Ti})$
- 发电机系统传递函数:  $G_{Gi}(S) = 1 / (1 + ST_{Gi})$
- 系统传递函数:  $G_{Si}(S) = K_{P1} / (1 + ST_{P1})$
- $T_{Gi}$  为  $i$  发电公司发电机等值时间常数;
- $T_{Ti}$  为  $i$  发电公司等值调速时间常数;
- $T_{P1}$  为 1 区域系统时间常数;
- $K_{P1}$  为 1 区域系统反馈增益;
- $T_{1j}$  为 1、 $j$  区之间转换系数;
- $F(S)_j$  为  $j$  区频率偏差;
- $P_{\Delta j}$  为  $j$  发电公司输出中间变量;
- $P_{Gj}$  为  $j$  发电公司 AGC 调节量;
- $P_{tie1}(S)$  为 1 区联络线实时功率;
- $agc_{1i}$  为  $i$  发电公司参与 1 区 AGC 调节因子;
- $R_i$  为  $i$  公司等值调差系数;

- 其中:  $C_{jk}$  为  $j$  公司与  $k$  负荷需求合约因子;
- $m$  为负荷需求集合;
- $P_{Gj}$  为第  $j$  个发电公司实时输出;
- $P_{L,k}$  为第  $k$  个签约负荷需求功率。

如上所述,发电控制误差即为供求不平衡量,当  $P_{\Delta j} = 0$  时系统频率会发生变化。发电机调整出力使得  $P_{\Delta j} = 0$  时,则供求达到平衡,频率恢复原值,供电质量得到提高。

### 3 负荷跟踪辅助服务模型

#### 3.1 系统状态方程描述

负荷跟踪这种辅助服务需借助负荷监测器,直接向发电端传送所测得的实时负荷信息,实际是一个具有积分环节的闭环控制系统。

图 1 即为区域 1 中第  $i$  发电公司的闭环反馈模型。

- $K_1$  为 1 区等值增益;
- $B_1$  为 1 区等值频率偏差系数。

由图 1 传递函数图,列出系统的状态方程:

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{f}_i &= -\frac{1}{T_{Pi}} f_i + \frac{K_{P1}}{T_{Pi}} \left[ \sum_{j \in N_i} P_{Gj} - (C_{jk} \cdot P_{L,k}) - P_{tie1} \right] \\ \dot{P}_{Gj} &= -\frac{1}{T_{Tj}} (P_{Gj} - P_{\Delta j}) \\ \dot{P}_{\Delta j} &= \sum_{k \in m_i} (C_{jk} \cdot P_{L,k}) - P_{Gj} \\ \dot{P}_{\Delta j} &= -\frac{1}{T_{Gj}} \left( \frac{1}{R_j} f_i - P_{\Delta j} + P_{\Delta j} - P_{Gj} \right) \\ \dot{P}_{Gj} &= -agc_j \cdot K_i (B_i f_i + P_{tie1}) \\ \dot{P}_{tie1} &= 2 \sum_{j \in N_i} T_{ij} (f_i - f_j) \end{aligned} \right. \quad (5)$$

其中:  $m$ 、 $n$  为负荷需求及发电公司集合;

$n_i$ 、 $m_i$  为  $i$  区内发电公司及负荷需求集合;

$N_i$  为不包括  $i$  区的区域集合;

$i$  为  $i$  区,  $j$  为  $j$  发电公司,  $k$  为  $k$  需求公司。

设

$$X = [ F_i \quad P_{Gj} \quad P_{Lj} \quad P_{Gbj} \quad P_{Cj} \quad P_{tiei} ]^T$$

状态方程可表示成:

$$\dot{X} = AX + Bu \quad (6)$$

式中:  $u$  为扰动向量;  $F_i$  为  $i$  区域频率偏差。

### 3.2 稳定状态分析

稳定时系统联络线功率应达到签约量:

$$P_{tiei} = \sum_{j \in n_i} \left( \sum_{k \in m_i} C_{jk} \cdot P_{Lk} \right) - \sum_{k \in m_i} \left( \sum_{j \in n_i} C_{jk} \right) \cdot P_{Lk} \quad (7)$$

发电公司输出功率应为签约量:

$$P_{Gj} = \sum_{k \in m} \left( C_{jk} \cdot P_{Lk} \right) \quad (8)$$

由于控制器中存在积分环节的, 仅从系统稳定性方面来说, 各区域频率偏差稳态时应为 0。

## 4 模型修正与仿真

首先假设有两互联系统 A 与 B, 各有发电公司及需求公司 3 家, 分别表示为  $G_1, G_2, G_3, L_1, L_2, L_3$  及  $G_4, G_5, G_6, L_4, L_5, L_6$ 。设定 A 区中只有  $G_1$ , B 区中  $G_5, G_6$  参与 AGC 调频; 系统具备进行负荷跟踪辅助服务的硬件条件。参数取自文献[7,8], 负荷变动均为阶跃形式(单位均为 p. u.)。

### 算例 1 采用忽略调差环节及 AGC 控制的模型

$t$  时刻系统负荷没有签约外扰动, 各发电公司拥有的发电量分别为 0, 0.2, 0.1, 0, 0 及 0.1。本例采用忽略调差环节及 AGC 控制的模型(即系数  $R = \infty$ ,  $P_C = 0$ ), 只有从负荷端传送到发电端的负荷信号。

采用这种控制模型, 可以得到图 2 的仿真结果。图中可以看出, 系统频率偏差最终为零, 正是因各发电公司达到各自的签约量, 达到供需平衡。由于没有 AGC 控制, 又没有签约负荷, A 区中  $P_{G1}$  的动态曲线始终为零; 在初始时刻, 由于系统负荷的增加, 频率下降,  $G_2, G_3$  按各自的调速时间迅速满足需求, 使得供需平衡。B 区中  $P_{G4}, P_{G5}$  及  $G_6$  也按此规律调整。

### 算例 2 采用考虑发电机等值调差环节的模型

本例在算例 1 所用模型的基础上考虑发电公司发电机等值调差环节即系数  $R = Const$ , 形成频率偏差闭环反馈, 仿真结果见图 3。比较图 2、图 3, 可以

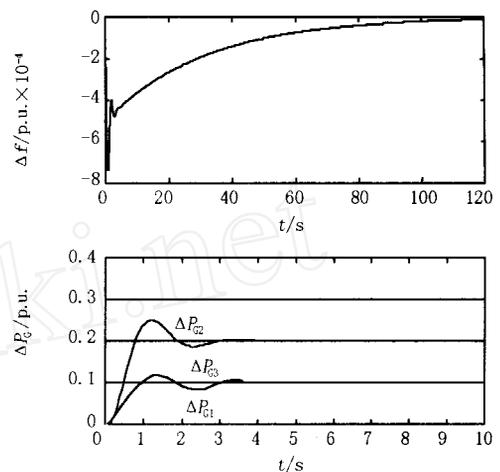


图 2 算例 1 区域 A 频率及各发电公司发电动态响应

Fig. 2 Dynamic response for  $f_1, P_{G1}, P_{G2}, P_{G3}$  in area A (case 1)

看到加入这一反馈回路, 系统频率恢复原值的速度加快, 但并不影响各发电公司的发电响应。

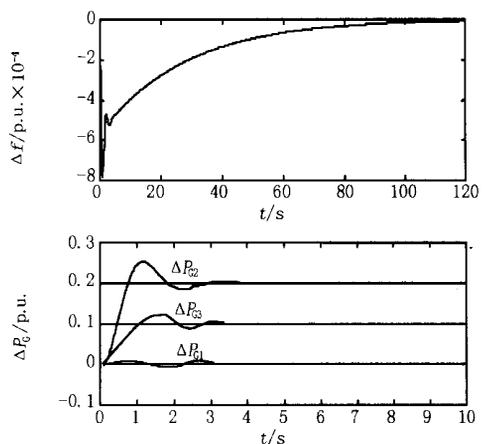


图 3 算例 2 区域 A 频率及各发电公司发电动态响应

Fig. 3 Dynamic response for  $f_1, P_{G1}, P_{G2}, P_{G3}$  in area A (case 2)

### 算例 3 考虑合约外扰动及 AGC 控制

由系统的动态响应看出算例 2 的模型可以得到更好的频率响应, 使系统更快稳定, 所以本例中采用算例 2 的模型。假设区域 A 在  $t$  时刻有 +0.1 p. u. 的合约外负荷扰动进行仿真, 得到动态响应如图 4 (a) 所示, 可以看出在没有 AGC 控制的情况下,  $f$  无法趋于零值, 因为各发电公司也只按各自的签约量发电, 无法满足实际负荷需求。这种情况下系统频率无法恢复原值。

在此基础上加入 AGC 控制( $P_C = 0$ ), A 区的仿真结果如图 4 (b) 所示, 可知系统频率能回归原值,

达到二次调频的效果。由于两区域中只有  $G_1, G_2, G_3$  三个发电公司参与 AGC 控制,在调整初期这三个公司均参与调整,但只有 A 区有扰动,而 AGC 按联络线频率偏差控制模式,稳定时只有  $G_1$  发电达到扰动量。

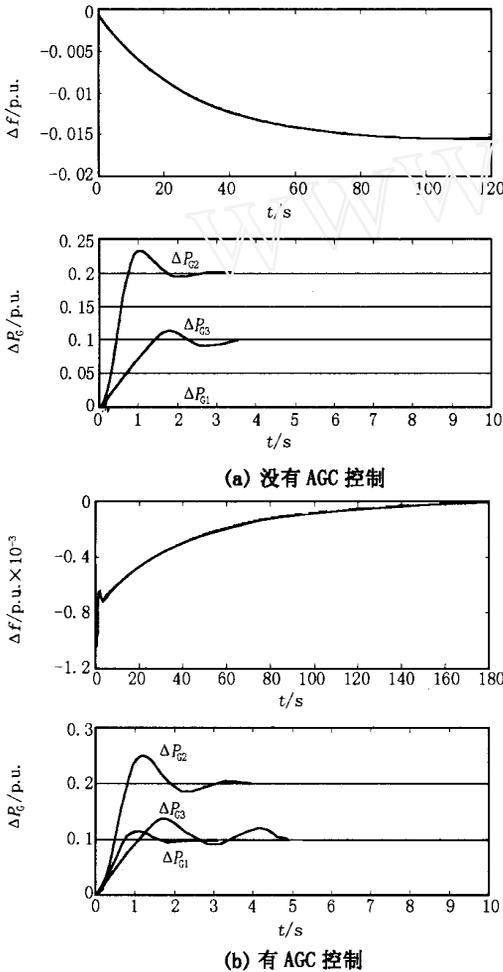


图 4 算例 3 区域 A 频率及各发电公司发电动态响应  
Fig. 4 Dynamic response for  $f_1, P_{G1}, P_{G2}, P_{G3}$  in area A (case 3)

算例 4 考虑跨区交易

在市场环境下,会存在跨区域交易。在算例 3 的基础上,区域 A 中原来由  $G_2$  提供的  $+0.1 \text{ p.u.}$  功率改由 B 中的  $G_6$  提供。动态仿真结果如图 5 所示,可知调整结束后系统频率达到稳定,参与 AGC 调节的  $G_1$  发电量达到扰动值,  $G_2$  及  $G_3$  的发电量各自为签约量。此时供需平衡。

通过以上 4 个算例的仿真的分析,可知当系统无合约外负荷扰动时,可以不考虑 AGC 控制,而只存在负荷跟踪服务也能使系统频率稳定。假设系统具备完善的负荷端监视器,能实时向发电端传送负

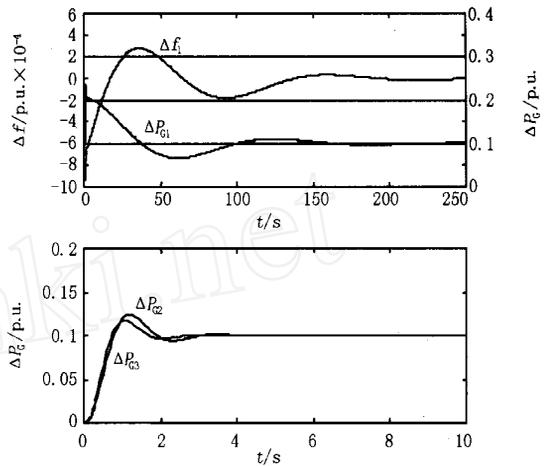


图 5 算例 4 区域 A 频率及各发电公司发电动态响应  
Fig. 5 Dynamic response for  $f_1, P_{G1}, P_{G2}, P_{G3}$  in area A (case 4)

荷变化信息,每一负荷与各发电公司签订发电因子  $C$ ,那么各发电公司可根据  $C$  随时发出扰动时应发的份额。这样就能使供求平衡,系统频率稳定,其仿真结果与图 3 相似。

5 结语

本文探讨了系统频率与市场供求平衡之间的关系,在硬件设备允许的前提下,对负荷跟踪控制系统进行市场环境下的改进,推导该模型状态方程,分析其修改部分。通过对市场中可能出现的实际情况逐步进行模型修正,并进行动态实时仿真,对比分析结果,得出优化模型,验证了模型的正确性及合理性。通过仿真模拟可以看出,在无合约外扰动时,没有自动发电控制负荷跟踪服务也能随时保证供求平衡,保证频率质量。利用此模型能随时进行负荷及发电调整,使得市场供求平衡,达到随时监控系统频率及提高供电质量的效果。

参考文献:

- [1] Hirst E, Kirby B. Creating competitive markets for ancillary services. Oak Ridge National Laboratory.
- [2] Kumar J, K - H Ng, G Sheblé AGC simulator for price - based operation - Parts I - II[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(2) :527 - 538.
- [3] 何仰赞,温增银,汪馥瑛,等. 电力系统分析(下) [M]. 武汉:华中理工大学出版社,1995.
- [4] Jaleeli N, VanSlyck L S, Ewart D N, Fink L H, Hoffmann A G. Understanding automatic generation control [J]. IEEE Trans on Power System, 1992, 7(3) : 1106 - 1122.

(下转第 19 页)

级绝缘变压器中性点绝缘和中性点避雷器是危险的。

#### 参考文献:

- [1] 王梅义,等. 高压电网继电保护运行技术(第一版)[M]. 北京:电力工业出版社,1981.

- [2] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术(第一版)[M]. 北京:电力工业出版社,1981.

收稿日期: 2003-05-19; 修回日期:2003-06-19

#### 作者简介:

张芜(1967-),女,电气工程师,现从事化工企业电气管理工作。

### Relations between phase - sequence current and voltage on open phase running in electric power system

ZHANG Wu

(Ningxia Petrochemical Branch of Petro China Co., Ltd, Yinchuan 750026, China)

**Abstract:** This article describes phasor diagram analysis method that is used for the phase - sequence current and voltage on open phase running in electric power system. It's brief and easy to understand and calculate with clear concepts, and easy for field debugging staffs and operators to understand and accept the concepts of open phase running in electric power system operation. Thus operation maintenance and debugging quality can be enhanced. Furthermore, the problems which should be noticed in the operation are introduced in this article that can make electric power system be reliable and stable.

**Key words:** broken line; open phase; negative - sequence voltage; negative - sequence current; unsymmetrical

(上接第 14 页)

- [5] Green R K. Transformed automatic generation control [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996,11(4):1799 - 1804.
- [6] Nobile E, Bose A, Tomsovic K. Feasibility of a Bilateral Market for Load Following [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001,16(4):782 - 787.
- [7] Elgerd O I, Fosha C. Optimum megawatt - frequency control of multiarea electric energy systems [J]. IEEE Trans on Power Apparatus & Systems, 1970, PAS - 89 (4):556 - 563.
- [8] Fosha C, Elgerd O I. The megawatt - frequency control prob-

lem: A new approach via optimal control theory [J]. IEEE Trans on Power Apparatus & Systems, 1970, PAS - 89 (4):563 - 579.

收稿日期: 2003-02-27; 修回日期: 2003-05-30

#### 作者简介:

郭小红(1978-),女,硕士研究生,从事电力系统分析与控制研究;

刘瑞叶(1963-),女,副教授,从事电力系统分析与控制研究。

### Simulation and modification for load following auxiliary service model

GUO Xiao-hong, LIU Rui-ye

(Dept. of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Setting up a developed electricity market is the tendency throughout the world. The paper discusses the relations of the imbalance between the supply and the demand to the frequency deviation of the system. The load following, one of the auxiliary services, lets generator get a demand signal directly from the load monitors. On the basis, the paper proposes a load following controller, considering the market environment, just to deal with the frequency deviation by contrasting the results of the dynamic response, which are obtained by modifying the old one.

**Key words:** load following; auxiliary services; electricity market; frequency deviation