

# 电力市场下 AGC 机组运行的经济补偿研究

石方迪, 邵能灵, 侯志俭

(上海交通大学电气工程系, 上海 200030)

**摘要:** 为了维护电网安全、可靠、经济地运行, 必须公正合理地确定各发电厂的 AGC 辅助服务功能, 并对参与电网 AGC 的电厂进行考核和结算。国内电力市场一般将辅助服务价格包含在发电电价中, 并用期货电量的形式予以补偿。这种运营规则曾经起过一定的积极作用, 但由于它缺乏合理的量化理论依据, 不能真正体现市场的公平性, 一定程度上制约了 AGC 机组性能的提高和更加有效地运行。在解析 AGC 运行和结算过程的基础上, 提出一种量化的补偿算法, 来评价机组退出 AGC 运行对系统造成的影响。结合 IEEE 14 节点测试系统, 分别用等微增率法和动态规划法来说明该补偿算法的有效性。

**关键词:** 电力市场; AGC 退出运行; 经济补偿; 等微增率法; 动态规划法

**中图分类号:** TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2003)02-0001-04

## 1 引言

随着我国社会主义市场经济的发展, 电力运营体制也孕育着一场深刻的电力市场变革, 逐步由计划经济体制下的独家垄断经营转变为市场经济下商业化运营。随着电力市场研究和实践的不断深入, 辅助服务问题由于其重要性和技术上的复杂性吸引了越来越多的研究者和电力公司的兴趣<sup>[1]</sup>。其中, AGC(Automatic Generation Control, 自动发电控制)辅助服务是保证电网安全稳定和经济运行的关键, 承担着电网频率调节、网际联络线交换功率控制和经济调度的重要任务。在传统的运行机制下, 调度员可以命令发电公司无偿提供诸如 AGC 等的辅助服务, 但在电力市场环境下, 发电公司是独立的经济实体, 不愿无偿提供辅助服务。这就需要系统运营商为每种辅助服务制定合理、明确的价格, 从而提高发电公司提供各种辅助服务的积极性, 保证电网安全、稳定运行。

国外电力市场通过建立独立的 AGC 辅助服务竞价市场, 或与能量交易市场统一考虑等形式来保障电网 AGC 的实施<sup>[2,3]</sup>。而国内电力市场则将其包括在发电电价中, 用期货电量等方式实现 AGC 机组电量的定量补偿。这种补偿方式在一定程度上提高了机组投入 AGC 运行的积极性, 但是由于补偿方式缺乏合理的量化理论依据, 不能真正体现市场的公平性, 一定程度上制约了 AGC 机组性能的提高和更加有效地运行。因此有必要量化 AGC 机组对电网

的贡献, 并采用经济的方式予以体现。另一方面, 作为整个 AGC 运行结算系统的一部分, 当 AGC 机组违反运营规则时, 则必须要给出定量的经济惩罚。本文在解析 AGC 运行原理和结算过程的基础上, 提出了一种量化的补偿算法, 来评价机组退出 AGC 运行对系统造成的影响。结合 IEEE 14 节点测试系统, 分别用等微增率法和动态规划法说明了该补偿算法的有效性。

## 2 AGC 的结算原则

AGC 的主要功能是维持系统频率和联络线交换功率为计划值。当系统频率或联络线交换功率偏离计划值时, 产生区域控制偏差 (Area Control Error, 简称 ACE), AGC 主程序启动一套算法, 根据 ACE 的大小分配每台 AGC 机组承担的调节量, 然后将调节量转换成控制脉冲发布给各 AGC 机组。由于 AGC 调节是一个包含反馈的控制过程, 在很短的时间内系统频率和联络线交换功率将逐步恢复到计划值。

由于 AGC 调节是先有偏差后有调节的滞后的控制过程, 同时各机组之间的调节性能也存在很大差异, 那些能快速响应的机组总是很快接近调节上限或下限, 而那些响应速度慢的机组仍有很大的调节度, 这样将使系统失去向上或向下的快速调节能力, 从而降低系统维持安全运行的能力。所以有必要应用超短期负荷预报理论周期性地预测短期内电网负荷的变化量, 再由经济负荷分配软件对超短期负荷预报出的变化量进行分配<sup>[5]</sup>。这样即可实现超短期负荷预报和 AGC 的有效结合, 增强系统的安全运行能力。

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目

一般来说,系统为了保证其运行的安全性,必须确保有一定量的 AGC 备用容量。因为市场成员间的平等关系,电网公司必须向发电公司购买这部分 AGC 备用容量。发电公司向电网公司上报 AGC 机组的报价曲线,电网公司根据系统当前的运行状况和预测的负荷变化量,运行经济负荷分配软件得出购买定量 AGC 备用容量所需的最小费用,将这部分费用作为该 AGC 机组的调节容量费用支付给发电公司。当 AGC 机组在系统需要的情况下响应了调度员的控制命令,电网公司必须向发电公司支付电量费用。这部分电量费用主要由该 AGC 机组的调节容量、调节速率和调节精度决定。

当电网公司的调度员监测到发电公司的某个 AGC 机组并没有投入运行,为保证系统运行安全性,调度员必须额外调用 AGC 备用容量,这使得电网公司必须支付给发电公司更多的 AGC 容量费用。根据责任转移原则,电网公司既然已经购买了这部分 AGC 备用容量,由于发电公司自身原因而造成的额外费用必须由该发电公司承担。本文的工作就是量化这部分费用。

### 3 AGC 的补偿算法

当调度员监测到某个 AGC 机组没有投入运行时,必须在短时间内追加 AGC 备用容量以弥补由于该机组的退出运行造成的 AGC 调节容量缺额。事后电网公司可以根据该机组退出运行对系统安全造成的影响和电网公司必须额外支付的 AGC 辅助服务费,对该机组进行经济惩罚。

#### 3.1 间接补偿法

在电力市场交易中,等报价法具有快速有效的优点,但要求报价曲线为非下降曲线;动态规划法对各种形状的曲线均能得到有效的结果,其缺点是运算速度不够快,本文则分别运用等微增率法和动态规划法两种方法来计算这部分补偿费用。由于我国的电力市场还处于起步阶段,发电侧竞争正在试运营,因此很难让发电公司提供 AGC 机组的报价曲线。在不改变补偿原理的情况下,作者采用 AGC 机组的发电成本曲线来替代报价曲线;并用等微增率法来替代等报价法(这种变通的方法已经得到上海市电力公司的认可,并将在实时系统中试运行)。

间接补偿法总的目标是计算得出该 AGC 机组在投退两种情况下的 AGC 辅助服务差值。在该机组投退两种情况下购买 AGC 辅助服务时,电网公司的目标总是要求向所有发电公司支付的辅助服务费

用最小。其数学模型如下:

目标函数

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n G_i \cdot C_i(P_i) \quad (1)$$

约束条件

总的 AGC 备用容量要求:

$$\sum_{i=1}^n G_i \cdot P_i = P_{\text{ACC}} \quad (2)$$

各台 AGC 机组的调节容量:

$$G_i \cdot P_{\text{ACCmin}} \leq G_i \cdot P_i \leq G_i \cdot P_{\text{ACCmax}} \quad (i=1, \dots, n) \quad (3)$$

其中, $n$  为 AGC 机组数目, $C_i(P_i)$  为  $i$  机组的 AGC 备用容量调节量为  $P_i$  时的成本, $P_{\text{ACC}}$  为需要的 AGC 容量。 $G_i$  为整形值,当它为 1 时表示该机组被电网选中提供 AGC 备用容量;当它为 0 时表示该机组没有选中。若有机组退出 AGC 运行,假设为  $s$  机组,则只要在上述的数学模型中去掉  $i=s$  这种情况即可。两次运算的差值即为该  $s$  机组退出运行时的补偿费用。以下简单给出两种方法的思路。

#### 3.1.1 等微增率法

假设成本曲线为  $C_i(P_i) = a_i P_i^2 / 2 + b_i P_i + c_i$ , 则微增率为  $dC_i/dP_i = a_i P_i + b_i$ , 当各机组的微增率相等时其总费用最小,即  $dC_i/dP_i = a_i P_i + b_i = \lambda$ , 可得  $P_i = (\lambda - b_i) / a_i$ , 代入总容量约束方程解得  $\lambda$ ; 然后返回求得各机组的  $P_i$ , 检查其是否满足各机组的 AGC 容量约束方程,如满足则本次运算结束,从机组中去掉退出 AGC 运行的机组,重新再计算一遍;若不满足则将超出容量限制的机组的 AGC 备用容量设为其限制值,即若超出上限,则设为上限值,若超出下限,则设为下限值,返回开始重新计算。

#### 3.1.2 动态规划法

动态规划法采用在正序造表的时候将一台台机组依次追加上去,形成所有机组组合而成的等效报价曲线,然后由所需 AGC 容量得到对应的报价,即可计算得到电网公司支付给其他 AGC 机组的辅助服务费用;当有 AGC 机组退出运行时,则形成所有其他机组组合而成的等效报价曲线。两次运算值的差额即为电网公司向退出 AGC 运行的机组收取的补偿费用,即为对该 AGC 机组的经济惩罚。该动态规划法递推公式的推导如下所示:

假设  $F_{i\text{Equal}}$  表示由  $i$  台机组合成的等效报价曲线, $F_i$  表示第  $i$  台机组的报价曲线。

#### (1) 1 台机组的报价曲线

$$F_{1\text{Equal}}(P_{1\text{Equal}}) = F_1(P_1) \quad (4)$$

(2) 2 台机组的报价曲线

$$F_{2\text{Equal}}(P_{2\text{Equal}}) = \text{Min}[F_2(P_2) + F_1(P_1)] = \text{Min}[F_2(P_2) + F_1(P_{1\text{Equal}} - P_1)] = \text{Min}[F_2(P_2) + F_{1\text{Equal}}(P_{1\text{Equal}} - P_1)] \quad (5)$$

(3)  $i$  台机组的报价曲线

$$F_{i\text{Equal}}(P_{i\text{Equal}}) = \text{Min}[F_i(P_i) + F_{i-1\text{Equal}}(P_{i-1\text{Equal}} - P_i)] \quad (6)$$

其中  $P_{i\text{Equal}}$  为  $i$  台机组的等值负荷,即  $P_{i\text{Equal}} = P_i$ , 其上限值也满足此公式。

### 3.2 直接补偿法

当有机组退出 AGC 运行时,系统可以根据它申报的 AGC 调节容量和由其它机组综合而得到的 AGC 辅助服务报价曲线,直接得到对该 AGC 机组的经济惩罚。更为严厉的惩罚是将系统频率偏差也考虑在内。在系统急需 AGC 机组参与调频时,即系统频率与标准频率产生偏差的时候,AGC 机组的退出运行会影响系统的调频效果,在计算该机组的补偿费用的时候应该将这部分影响也计算入内,即在计算该机组退出 AGC 运行时所缺的调节容量时应该加入频率偏差造成的功率缺额。即

$$P = P_{\text{sAGC}} - B \cdot f \quad (7)$$

其中:  $P_{\text{sAGC}}$  为退出 AGC 运行的  $s$  机组的 AGC 调节容量,  $B$  为系统频率偏差(单位: MW/0.1Hz),  $f = (f - f_s)$  为频率偏差,  $f$  为实时频率,  $f_s$  为标准频率(50Hz)。

## 4 算例分析

这里应用了 IEEE-14 节点标准测试系统的数据。它包含 5 台发电机,其发电机经济参数及出力限值如表 1 所示,成本曲线用来代表 AGC 机组容量成本的报价曲线,  $a$ 、 $b$ 、 $c$  分别是成本曲线的二次系数、一次系数和常数项。机组有功出力上下限用来代表  $P_{\text{AGC max}}$ 、 $P_{\text{AGC min}}$ ,即为最高、最低 AGC 调节容量。所有数据都是以 100 MVA 为功率机制的标么值,其中成本的单位为(S/h)。

表 1 AGC 机组经济参数及调节范围

Tab. 1 The parameters and power limits of AGC generators

机组	a	b	c	$P_{\text{AGC max}}$ (标么值)	$P_{\text{AGC min}}$ (标么值)
1	63.00	200.0	0	1.0	0.1
2	350.0	175.0	0	0.5	0.2
3	1250.0	100.0	0	0.8	0.15
4	166.8	325.0	0	0.45	0.1
5	500.0	300.0	0	0.45	0.1

### 4.1 间接补偿法

显然一台机组和多台机组同时退出 AGC 运行对系统的影响程度不同,下面分别就这两种情况讨论补偿费用。

#### 4.1.1 一台机组退出 AGC 运行

这里假设系统所需的 AGC 备用容量为 1.90(标么值);机组 2 由于某种原因退出 AGC 运行,由于机组 2 承担的 AGC 容量比较小,能够通过增加其他运行机组的 AGC 调节容量来满足要求。下面用上述两种方法计算对该机组的经济补偿,结果如表 2 所述。

表 2 机组 2 退出 AGC 运行前后的辅助服务费用及其惩罚值

Tab. 2 The ancillary service fee of the generator 2 for its stopped AGC

所用方法	机组 2 退出前的辅助服务费用/S $\text{h}^{-1}$	机组 2 退出后的辅助服务费用/S $\text{h}^{-1}$	对机组 2 的经济惩罚/S $\text{h}^{-1}$
等微增率法	567.25	636.61	69.36
动态规划法	564.64	636.62	72.00

由表 2 可以看出两种方法得出的误差很小,说明两种方法可以很好地吻合。由等微增率法可得电网公司应对机组 2 收取 69.36 S/h 的经济补偿费,作为由于机组 2 的退出使得电网公司支付给其他 AGC 机组额外费用的回收。

#### 4.1.2 多台机组退出 AGC 运行

假设系统所需的 AGC 备用容量是 1.90(标么值),机组 2 和机组 4 由于某种原因推出 AGC 运行,此时系统重新进行 AGC 备用容量分配,得到总的赔偿费用以后,再根据他们先前承担的 AGC 备用容量的大小,在机组 2 和机组 4 间分摊这部分费用。机组退出前后的 AGC 备用容量分配情况如表 3 所示。

表 3 机组 2 和机组 4 退出运行前后的备用容量分配情况

Tab. 3 Spare power capacity arrangement caused by the running condition of generator 2 and 4

机组	机组退出前		机组退出后		补偿费用
	AGC 容量 (标么值)	容量费用 /S $\text{h}^{-1}$	AGC 容量 (标么值)	容量费用 /S $\text{h}^{-1}$	
1	0.90	208.56	0.90	208.56	
2	0.30	89.250	0	0	
3	0.14	52.500	0.65	450.94	248.00
4	0.35	129.80	0	0	
5	0.21	84.525	0.35	153.12	

由表 3 可得总的补偿费用为 248.00 S/h,由于机组 2 和 4 先前承担的 AGC 备用容量分别为 0.30(标么值)和 0.35(标么值)。同他们的备用容量成正比,机组 2 和 4 分别承担的补偿费用为:

114.45 S/h和133.55 S/h。由上述两表对照可以看出,同为机组2退出AGC运行,当多台机组同时退出AGC运行的时候,比1台机组退出AGC运行补偿费用要大。显然,因为多台机组退出AGC运行比1台机组退出AGC运行对系统的安全性和经济性影响更大,所以惩罚也应更为严厉,即当多台机组退出AGC运行的时候应该将他们综合起来考虑。

#### 4.2 直接补偿法

假设机组2由于某种原因退出AGC运行,此时系统的频率为49.8Hz。由文[7]得到上海电网的系统频率偏差系数 $B = 80.3 \text{ MW}/0.1 \text{ Hz}$ ,转换成标么值可得:

$$P = 0.3 - 10 \times 80.3 \times (49.8 - 50) / 100 = 1.90$$

考虑是否将频率偏差计算入内,可分两种情况予以讨论,其计算结果如表4所示。

表4 机组2退出运行的经济补偿费用

Tab.4 The compensated fee of the generator  
2 for its stopped AGC

考虑情况	AGC容量缺额(标么值)	补偿费用/S h <sup>-1</sup>
不计频率偏差	0.30	64.725
计及频率偏差	1.90	636.62

由表4中可以看出是否考虑频率偏差对机组的经济惩罚相差一个数量级,由此得出考虑频率偏差时惩罚的严厉性。同时对表2和表4可得间接补偿法和直接补偿法的结果十分接近。

## 5 结语

由于电力市场中的电网公司和发电公司是独立的经济实体,电网公司必须向发电公司购买AGC辅助服务,并支付辅助服务费用。相应地,当发电公司由于某种原因不能提供AGC辅助服务容量的时候,

电网公司可以对该发电公司进行经济惩罚,以平衡电网公司的收支平衡。本文就是通过等微增率法和动态规划法来量化这部分经济惩罚,算例结果证明该量化方法是有效的。当然还有其他情况没有深入讨论,例如当AGC机组退出运行时,不仅会对系统的经济性产生影响,而且会对系统的可靠性产生影响。由于系统可靠性的降低,迫使电网公司支付更多的其他辅助服务,对这一问题将另文探讨。

#### 参考文献:

- [1] 于尔铿,等. 电力市场[M]. 中国电力出版社,1998.
- [2] Harry Singh. Auctions for Ancillary Services[J]. Decision Support Systems, 1999, 24:183 - 191.
- [3] Kwok W Cheung, et al. Energy and Ancillary Service Dispatch for the Interim ISO New England Electricity Market[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2000, 15(3):968 - 974.
- [4] 吴玉生,等. 发电竞价算法(三) - 动态规划法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(6):19 - 22.
- [5] 高宗和,等. 利用超短期负荷预报实现AGC的超前控制[J]. 电力系统自动化, 2000, (6):42 - 44.
- [6] 李端超,等. AGC机组调节效能定量评估与补偿方式研究[J]. 电网技术, 2001, 25(8):15 - 19.
- [7] 汪德星. 华东电网AGC运行的若干技术问题[J]. 华东电力, 1998, (5):41 - 44.

收稿日期: 2002-07-02; 修回日期: 2002-09-12

作者简介:

石方迪(1977-),男,硕士研究生,从事电力市场的研究工作;

邵能灵(1972-),男,博士后,主要从事电力市场、电力系统继电保护、电力系统安全稳定控制的研究工作;

侯志俭(1942-),男,博士生导师,主要从事电力市场,电力系统的安全经济运行、控制、规划等的教学和研究工作。

### Research on financial compensation of AGC units in electricity market

SHI Fang-di, TAI Neng-ling, HOU Zhi-jian

(Department of Electrical Engineering at Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** In order to make the power systems operate securely, reliably and economically, the function of the AGC ancillary service in plants should be confirmed fairly and reasonably, and the examination and settlement should be made in the plants, participating in AGC. In China, the prices of Ancillary Services are included in the energy price, and compensated through future energy. This kind of operating rule has ever made a little progress, but due to its lack of reasonable quantitative theory, the fairness of the market can't be embodied, and the improvement of the performance and the more effective running of AGC units are restricted on some extent. In this paper, based on the analysis of the running and settlement process of AGC, a quantitative compensation arithmetic is presented to evaluate the effect of AGC's exiting on the power systems. Combining the IEEE-14 test system, the validity of the compensation arithmetic is illuminated by using Equal Increment Method and Dynamic Programming Method respectively.

**Key words:** electricity market; AGC's exiting; financial compensation; equal increment method; dynamic programming method