

# 发电侧电力市场下的 AGC 容量确定与机组选择

林万菁<sup>1</sup>, 刘 烧<sup>1</sup>, 李卫东<sup>1</sup>, 武亚光<sup>2</sup>, 张 锐<sup>3</sup>, 金钟鹤<sup>3</sup>

(1. 大连理工大学电气工程与应用电子技术系, 辽宁省大连市 116023)

(2. 东北电网有限公司, 辽宁省沈阳市 110006; 3. 辽宁省电力调度通信中心, 辽宁省沈阳市 110006)

**摘要:** 现有自动发电控制(AGC)容量确定方法只考虑了安全性,因而造成计算结果偏大,而已有的优先顺序法只考虑用一种指标进行 AGC 机组选择。文中利用统计分析方法,通过考察发电机组 AGC 执行历史数据来确定不同 AGC 容量需求对应的概率;并在 AGC 运行费用中计入了因调节容量不足所造成的惩罚费用,将 AGC 运行费用最低点的概率所对应的 AGC 容量作为系统所需 AGC 调节容量。同时,提出了可考虑多种指标的改进型优先顺序法,该方法可综合考虑性能和价格两方面的因素。通过对某省实际电网的算例分析,验证了所提出的方法的可行性和实用性。

**关键词:** 电力市场; 自动发电控制; 容量确定; 机组选择

**中图分类号:** TM73; F123.9

## 0 引言

自动发电控制(AGC—automatic generation control)是电力市场辅助服务的一个重要组成部分,其主要功能是当系统负荷波动时调整发电机组出力,实现任意时刻电能的供需平衡,从而将系统频率和联络线交换功率维持在计划值,并使每台发电机组最经济地带负荷。

为了实现上述功能,电力市场运营机构需要获取一定的 AGC 调节容量,用以补偿各种随机事件引起的发电与负荷之间较小的实时偏差。从电网运行的可靠性看,获取的 AGC 容量越多越好,但从市场运营的经济性考虑,AGC 容量又不宜过多,否则将造成资源的浪费。

在市场化以前,由于我国电力系统自动化水平低,具备 AGC 能力的机组不多,为了保证电网的安全、稳定运行,往往让几乎所有具备 AGC 能力的机组无偿参与调节,并按机组装机容量分摊全网 AGC 调整容量。至今,对于系统 AGC 容量需求的确定问题,世界范围内还没有成熟的理论计算方法,一般都是根据调度员的经验,规定参与调节的 AGC 容量大于总装机容量或系统负荷的某个百分数,如确定 AGC 容量为系统最大负荷的 2%~5%,大系统取小值,小系统取大值等。

这种基于运行经验确定 AGC 容量的做法,没有很好地兼顾电网运行的可靠性和市场运营的经济性,在电力市场建立后不再适用。于是,如何确定电

力市场环境下的系统 AGC 容量需求,如何选取参调 AGC 机组,就成为我国电力市场化进程中亟待解决的重要问题<sup>[1]</sup>。文献[2]将 AGC 容量作为一种广义的备用容量来讨论其获取与定价问题,但是这样做显然忽略了 AGC 特有的调节特性。文献[3]结合辽宁省发电市场运营实际,建立了电力市场下 AGC 机组调配的数学模型,提出了模型中 AGC 容量和速率这两个关键系统量的确定方法。然而,利用这种方法确定的 AGC 容量偏大,使得市场运营机构的经济性要求得不到满足。文献[4]提出了考虑负荷需求不确定性的条件下,计入联络线调节偏差处罚的 AGC 容量获取和调度的数学模型,通过经济与安全的均衡来确定 AGC 容量需求。

本文首先建立了发电市场 AGC 辅助服务的基本框架,在此基础上提出了一种从概率学角度考察历史发电数据以确定系统所需 AGC 容量的方法,然后采用改进型优先顺序法,综合考虑调节性能和容量报价两方面因素的方法选取参调 AGC 机组。最后,结合辽宁省实际电网算例,验证了所提出的容量确定方法与机组选择方案的可行性和实用性。

## 1 AGC 辅助服务的基本框架

我国从 1998 年起开始实行“厂网分开、竞价上网”的电力改革,并确定浙江、上海、辽宁等省(直辖市)电网为试点单位,建立发电侧开放的电力市场,市场主体是市场运营机构(如省(直辖市)电网调度中心)和各独立发电厂。

由于 AGC 在电力系统中的特殊地位和重要作用,具备 AGC 能力的机组需要单独组织一个优先

于日前有功市场的 AGC 辅助服务市场<sup>[5]</sup>, 进行 AGC 交易, 交易结果将最终影响机组出力。发电侧电力市场下的 AGC 辅助服务的基本框架如图 1 所示。

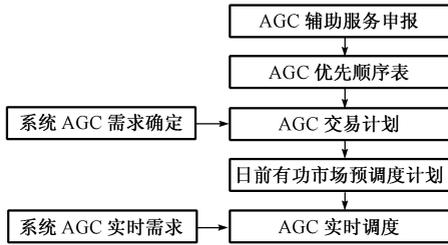


图 1 AGC 辅助服务基本框架

Fig. 1 General framework of AGC ancillary service

在计划交易日前日, 各独立发电厂进行 AGC 辅助服务申报, 内容包括: AGC 机组的容量报价及调节容量、调节速率、响应时间等技术性能指标。

AGC 机组的调节容量实质上是针对负荷实时波动而设置的能够快速响应的备用容量, 其大小由机组的有效 AGC 出力范围决定。

AGC 机组的调节速率则反映了机组在其 AGC 服务工作区间内调节出力的快慢。为使问题简化, 认为 AGC 机组正、负两个方向的负荷跟踪能力一致, 上调和下调速率相同。

AGC 机组的响应时间是指从调度指令发出到机组产生调节动作之间的延迟时间。

市场运营机构根据发电厂的申报制定 AGC 机组调度的优先顺序表, 根据历史数据预测系统 AGC 容量和速率需求, 进而确定由哪些机组提供 AGC 服务。剩余机组则自动进入有功市场, 与非 AGC 机组一起竞争, 参与制定有功市场的预调度计划。

在实时市场中, 所有被选中参调的 AGC 机组不分优先顺序, 都必须根据调度指令参与系统频率和联络线功率调整。当系统 AGC 总容量或总跟踪能力不足时, 则对 AGC 市场中剩余机组按优先顺序表中的排序进行计划外购买。

## 2 AGC 容量需求的概率学确定

### 2.1 系统 AGC 调节出力的统计分析

本文以辽宁省电网调度中心主机存储的机组历史发电数据库为数据源, 数据以记录的形式存储。调度中心从市场中具备 AGC 能力的机组获取 AGC 容量, 以满足系统各个连续上调或下调时段 ( $t_{j1} \sim t_{j2}$ ) 的调节出力需求  $\Delta P$ :

$$\Delta P = \sum_{j=1}^{j_2} \sum_{i=1}^N \Delta P_{i,j}$$

式中:  $N$  为 AGC 机组数量;  $\Delta P_{i,j}$  为机组  $i$  在  $t_j$  时刻

相对于  $t_{j-1}$  时刻的调节出力, 即

$$\Delta P_{i,j} = P_{i,j} - P_{i,j-1}$$

于是, 利用某典型日 AGC 机组的历史发电数据, 可以得到该日各时段系统 AGC 调节出力需求  $\Delta P$ , 可将  $\Delta P$  看做具有一定概率分布  $\rho(\Delta P = k)$  的离散型随机变量, 如图 2 所示。

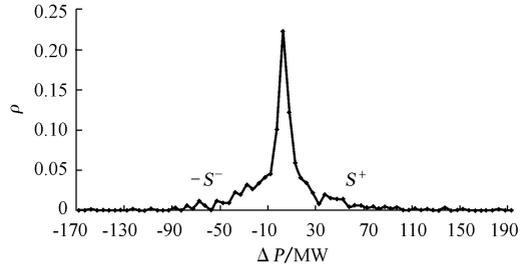


图 2 辽宁电网某典型日 AGC 调节出力概率分布曲线  
Fig. 2 Daily AGC regulating generation probability curve

取定调节出力概率  $\rho$ , 即可确定此概率下的上调容量  $S^+$  和下调容量  $S^-$ , 则调节容量  $S$  为:

$$S = S^+ + S^-$$

图 3 为某典型日系统 AGC 调节容量曲线, 可以看出:  $\rho$  越小,  $S^+$  和  $S^-$  越大,  $S$  也越大。当  $\rho = 0$  时,  $S^+$  ( $S^-$ ) 即为系统该日最大上调 (下调) 功率, 这就是文献[3]用以确定 AGC 调节容量的方法。

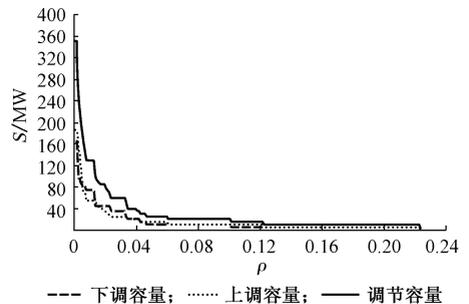


图 3 辽宁电网某典型日 AGC 调节容量曲线  
Fig. 3 Daily AGC regulating capacity curve

假设  $S^+$  和  $S^-$  已经确定, 则  $\Delta P$  的区间分布有以下 3 种可能情况:

a.  $\Delta P < -S^-$ , 系统下调容量不足, 导致发电出力大于负荷, 电网频率上升, 联络线功率偏差可能超出允许范围而受到惩罚;

b.  $-S^- \leq \Delta P \leq S^+$ , 系统获取的调节容量充裕, 发电出力调整能够跟随负荷波动, 最终将系统频率偏差和联络线功率偏差控制在允许范围之内;

c.  $\Delta P > S^+$ , 系统上调容量不足, 导致发电出力小于负荷需求, 电网频率下降, 联络线功率偏差可能无法满足要求而受到惩罚。

为叙述方便, 本文引入了调节容量不足概率 (RCLP—regulating capacity lack probability, 记

为  $\rho_{RCLP}$ ), 用以评估系统 AGC 运行的可靠性。RCLP 是指在一个给定的交易时段内, 系统调节出力需求大于所获 AGC 容量的概率:

$$\rho_{RCLP} = \rho(\Delta P < -S^-) + \rho(\Delta P > S^+) = 1 - \rho(-S^- \leq \Delta P \leq S^+) = 1 - \sum_{k=-S^-}^{S^+} \rho(\Delta P = k)$$

图 4 所示为某典型日系统不同调节出力概率  $\rho$  下的 AGC 调节容量不足概率曲线。

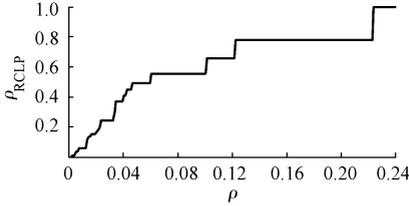


图 4 辽宁电网某典型日 AGC 调节容量不足概率曲线  
Fig. 4 Daily AGC RCLP curve

应该说明的是, 如果历史数据中存在系统频率或联络线功率越限的情况, 说明这时的系统调节容量不足, 则可将该时刻的调节容量和速率指定为系统现有最大的 AGC 调节容量和速率(尽管该最大的 AGC 调节容量和速率也未能满足要求), 然后利用上述方法进行计算。

### 2.2 系统 AGC 调节容量的确定

电网调度中心 AGC 辅助服务运营的目标是: 在系统可靠运行的前提下, 使得 AGC 运营总成本最小。AGC 运营总成本包括<sup>[4]</sup>: 支付给发电厂的 AGC 容量费用、实际调节费用以及支付给区域电力公司的惩罚费用。

a. 发电机组为了提供 AGC 服务, 必须加装额外的控制设备, 这些设备的投资应该计入到容量费用中。另外, AGC 机组为维持一定的负荷跟踪能力, 将在能量市场中损失部分发电量, 从而引起利润下降, 容量费用中还应包含这部分少发电的机会成本。

b. AGC 机组一旦投运, 还应支付一定的调节费用以奖励其为维护系统安全运行所做出的贡献。因为在投运期间, AGC 机组运行状态不断变化, 不能稳定运行于其最佳经济运行点, 发电效率降低, 而且, AGC 机组的频繁调节会造成隐性损伤, 相应地增加了维修成本。

c. 若系统获取的 AGC 容量不足, 联络线交换功率偏离计划值, 将受到所属区域电力公司的经济惩罚。

综上所述, AGC 辅助服务运营的目标函数及约

束条件为:

$$\begin{aligned} \min \Pi(\rho) &= E\{\delta S(\rho) + \lambda |\Delta P_G| + \eta |\Delta P - \Delta P_G|\} \\ \text{s. t. } \Delta P_G &= \begin{cases} -S^-(\rho) & \Delta P < -S^-(\rho) \\ \Delta P & -S^-(\rho) \leq \Delta P \leq S^+(\rho) \\ S^+(\rho) & \Delta P > S^+(\rho) \end{cases} \\ \rho_{RCLP}(\rho) &\leq e \\ 0 &\leq \rho \leq 1 \end{aligned}$$

式中:  $E\{\cdot\}$  表示数学期望;  $\Delta P_G$  为实际调节出力;  $\delta$  为调节容量费率;  $\lambda$  为实际调节出力费率;  $\eta$  为调节容量不足时的惩罚费率;  $e$  为系统允许的调节容量不足概率;  $\rho$  为调节出力概率。

图 5 为某典型日系统不同调节出力概率下的 AGC 运行费用曲线, 曲线最低点  $(\rho_0, \Pi(\rho_0))$  费用最小,  $S(\rho_0)$  则被确定为系统所需 AGC 调节容量。

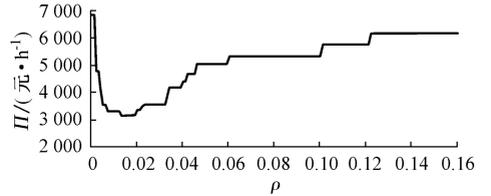


图 5 辽宁电网某典型日 AGC 运行费用曲线  
Fig. 5 Daily AGC operation expenses curve

### 3 AGC 机组选择的改进型优先顺序法

在 AGC 容量需求确定后, 即可进行参调 AGC 机组的选择。传统优先顺序法在 AGC 机组选择时更多地考虑了调节速率等性能指标, 而忽略了容量报价因素, 结果可能导致报价较高的机组成为边际机组, 抬高了市场清算价格, 增加了容量购置费用。本文对优先顺序法进行了改进, 首先对市场中的商品(AGC 辅助服务)按其性能价格比确定优先权顺序, 然后依次选取机组参与电网 AGC, 直至 AGC 容量满足系统需求。该方法简单实用, 综合考虑了 AGC 机组的调节性能和容量报价两方面的因素, 其关键在于性能价格比  $K_i$  的确定:

$$K_i = \frac{K_{r,i}}{K_{c,i}}$$

式中:  $K_{r,i}$  为机组  $i$  的综合调节性能指数;  $K_{c,i}$  为机组  $i$  的容量报价指数。

$$K_{c,i} = 1.0 + \frac{C_i - \bar{C}}{\bar{C}}$$

$$\bar{C} = \frac{\sum_{i=1}^N C_i S_i}{\sum_{i=1}^N S_i}$$

式中:  $C_i$  为机组  $i$  单位容量报价;  $\bar{C}$  为供选机组平均

报价;  $N$  为供选机组数量。

借鉴文献[6]中 AGC 机组调节性能定量评估的方法,根据辽宁电网对 AGC 技术指标的要求<sup>[1]</sup>,确定按下述公式对 AGC 机组调节性能进行评估:

$$K_{s,i} = 1.0 + 0.5 \left( \frac{S_i}{S_{e,i}} - 30\% \right)$$

$$K_{v,i} = 1.0 + 10 \left( \frac{V_i}{S_{e,i}} - 1\% \right)$$

$$K_{t,i} = 1.0 + 0.05 \left( 1.0 - \frac{T_i}{30} \right)$$

$$K_{r,i} = \frac{K_{s,i} + K_{v,i} + K_{t,i}}{3}$$

式中:  $K_{s,i}$  为机组  $i$  的调节容量指数;  $K_{v,i}$  为机组  $i$  的调节速率指数;  $K_{t,i}$  为机组  $i$  的响应时间指数;  $S_{e,i}$  为机组  $i$  的装机容量;  $S_i$  为机组  $i$  的调节容量;  $V_i$  为机组  $i$  的调节速率;  $T_i$  为机组  $i$  的响应时间。

需要说明的是,水电机组和火电机组在动力特

性上存在巨大差异,故其 AGC 调节性能应当分开评估。辽宁电网所有 AGC 机组均为火电机组,因此上述公式也是针对火电机组的,但该评估方法同样适用于水电机组,不同之处只是在于某些系数取值不同而已。

#### 4 算例

利用本文提出的 AGC 容量需求的概率学确定方法,对 20 个典型日的历史发电数据进行了统计分析,并取  $\delta=19$  元/(MW·h),  $\lambda=10$  元/(MW·h),  $\eta=380$  元/(MW·h),  $e=0.01$ 。结果如下:  $S^- = 125$  MW,  $S^+ = 137$  MW,  $S = 262$  MW,  $\rho_{RCLP} = 0.00772$ ,  $\Pi=2219$  元/h。与实际调度情况吻合得很好。

AGC 容量需求确定之后,采用改进型优先顺序法进行 AGC 机组选择,结果如表 1 所示。

表 1 AGC 机组调节性能、容量报价参数及机组选择结果  
Table 1 Performance, price parameters and selection results of AGC units

机组编号	装机容量/MW	调节容量/MW	调节速率/(MW·min <sup>-1</sup> )	响应时间/s	容量报价/(元·(MW·h) <sup>-1</sup> )	综合调节性能指数	容量报价指数	性能价格比
A√	200	60	5.0	25	126.70	1.052 8(6)	0.660 0	1.595 2(2)
B√	200	60	5.0	25	126.70	1.052 8(7)	0.660 0	1.595 2(3)
C√	200	60	5.0	25	126.70	1.052 8(8)	0.660 0	1.595 2(4)
D√	200	60	6.0	20	126.70	1.072 2(1)	0.660 0	1.624 7(1)
E√	200	60	5.0	25	126.70	1.052 8(9)	0.660 0	1.595 2(5)
F	200	60	5.0	25	126.70	1.052 8(10)	0.660 0	1.595 2(6)
G	200	60	5.5	10	330.00	1.069 4(2)	1.718 9	0.622 2(15)
H	200	60	5.5	10	330.00	1.069 4(3)	1.718 9	0.622 2(16)
I	350	150	4.0	15	196.95	1.034 5(11)	1.025 9	1.008 4(11)
J	350	150	3.0	15	278.05	1.034 5(12)	1.448 3	0.714 3(14)
K	350	150	2.0	15	251.65	1.015 5(15)	1.310 8	0.774 7(13)
L	350	150	4.0	15	186.37	1.034 5(13)	0.970 8	1.065 7(10)
M	350	150	3.0	15	210.00	1.025 0(14)	1.093 9	0.937 1(12)
N	350	150	2.0	15	127.09	1.015 5(16)	0.662 0	1.534 0(9)
O	200	60	3.0	20	127.04	1.055 6(4)	0.661 7	1.595 2(7)
P	200	60	3.0	20	127.04	1.055 6(5)	0.661 7	1.595 2(8)

注: √表示该机组被选中;()内数字为机组排序。

电网调度中心购置的 AGC 容量为 300 MW, AGC 边际机组容量价格为 126.70 元/(MW·h)。如果只按照综合调节性能来进行机组的选择,那么被选中的机组为 D, G, H, O, P, A 等 6 台,购置的 AGC 容量为 360 MW, AGC 边际机组容量价格为 330.00 元/(MW·h)。

通过比较表明,采用本文提出的 AGC 机组选择方案可以在满足系统容量和速率需求的情况下选中报价较低的机组,有利于降低市场统一边际价格,从而降低整个系统的 AGC 容量购置费用。

#### 5 结语

本文从我国发电侧电力市场特点出发,提出了一种从概率学角度利用机组历史发电数据确定系统 AGC 容量需求的方法,而对于机组选择,则充分考虑了 AGC 机组的调节速率等性能参数以及容量报价等经济因素。

实际算例表明,本文提出的 AGC 容量确定方法兼顾了电网运行的可靠性和市场运营的经济性,而采用的机组选择方案则在满足系统需求的情况下降低了 AGC 容量获取成本和系统的购电费用。

