

南方电网直调机组 AGC 研究

赵旋宇

(中国南方电网电力调度通信中心, 广东 广州 510623)

摘要: 根据南方电网直调机组分布于各省电网内这一特点, 对其实施 AGC 集中控制的特殊性和复杂性进行分析, 提出了直调 AGC 和各中调 AGC 在控制方式上的协调方法, 并解决了直调 AGC 的频率特性系数的取值困难。另外, 针对直调机组 AGC 可能带来的线路或断面过载的安全问题, 提出了基于有功灵敏度分析思想的模糊安全校正控制方法, 该方法适合工程应用, 用电网实际运行方式离线模拟, 效果好。

关键词: AGC; 有功灵敏度分析; 频率特性系数; 校正控制

Research on AGC for generations directly controlled by CSG

ZHAO Xuan-yu

(CSG Electricity Dispatching Communication Center, Guangzhou 510623, China)

Abstract: AGC for generations directly controlled by CSG have some unique problems which caused by the generations' location in every provincial grids. Those problems include how to cooperate with the AGC of provincial grid and how to decide the frequency characteristic coefficient of the AGC for generations directly controlled by CSG. In this paper, the solutions of the above problems are presented. Furthermore, based on the principle of sensitivity coefficient of active power, a new approach, fuzzy remedial control, for AGC to relieve the overload of tie line is presented in detail.

Key words: automatic generation control (AGC); sensitivity coefficient of active power; frequency characteristic coefficient; remedial control

中图分类号: TM73; TM76

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2008)07-0054-05

0 引言

自动发电控制 AGC (Automatic generation control) 是现代化大电网不可缺少的重要技术, 南方电网中由总调直接调度的机组 (直调机组) 的装机容量已经超过 1000 万 kW, 随着直调机组装机容量的进一步增加, 直调机组 AGC 对电网稳定将起着越来越重要的作用。由于直调机组散布于各省电网内部, 其控制方式的选择、控制参数的确定和安全策略的选取相对于普通 AGC 控制有其特殊性和复杂性。

1 控制方式的选择

对于互联电网来说, AGC 的区域控制模式主要有三种: 联络线频率控制方式 (TBC)、恒定频率控制方式 (CFC) 和恒定联络线控制方式 (CNC), TBC 方式对于有确定电力交换计划的互联区域电网来说是最优的控制方式, 有利于电网的稳定和频

率快速恢复, 在国内外普遍采用, 南方电网内各省电网的 AGC 控制也采用这种方式, 实际运行效果良好。所以当直调机组参与 AGC 时, 各省电网 AGC 控制方式没有必要改变。

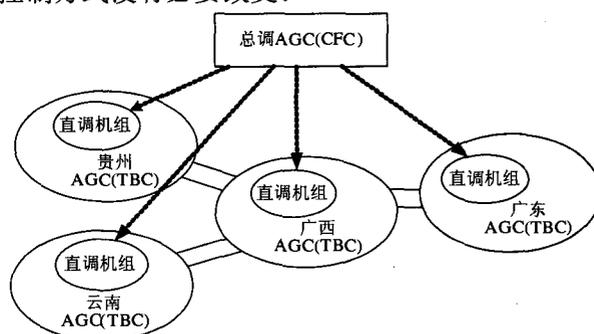


图1 直调机组 AGC 和各中调 AGC 配合图

Fig.1 Cooperation of provincial AGC and AGC of CSG

相对于各省电网 AGC, 直调机组 AGC 有如下特点:

直调机组分布在各省电网,没有一个明确的控制区域。

没有明确的控制负荷和联络线计划。

直调 AGC 起协调全网的频率稳定的作用。

且南方电网是个相对独立的电网,只通过直流和国家电网联系,在稳态情况下,直流可以认为是定功率电源,电网的负荷频率特性是完全独立的。所以直调 AGC 采用 CFC 控制方式为最佳选择。如图 1。

值得注意的是,图中直调机组在各省电网形成一个飞地区域,直调机组的出力调节必然会引起所在省交换断面的功率变化。如果此时中调 AGC 根据断面的实际功率来确定联络线偏差,并依据该偏差来调节机组的话,调节效果必然抵消直调机组的调节,是不合理的。例如,当直调机组因为频率过低增加出力时,机组所在省的联络线送出增加导致该省区域偏差(ACE)增加,中调为消除本区域 ACE 就会减少省内机组出力。所以中调 AGC 的联络线功率应该是消除直调机组影响的联络线交换功率,用公式表达为:

$$P_C = P_R - \sum P_G$$

其中: P_C 为中调控制用交换功率, P_R 为实际交换功率, P_G 为直调机组实际出力。实际的省间交换功率被分成两部分:受中调 AGC 约束的控制用交换断面功率和受总调控制的直调机组出力。中调用 P_C 进行控制就可以有效地解决中调和总调 AGC 之间的有害耦合关系。

2 频率特性系数的选择

2.1 频率特性系数原理

电力系统频率特性系数指系统功率不平衡时频率的变化。频率特性系数可分为静态频率特性系数和动态频率特性系数,和 AGC 有关的频率特性系数为静态频率特性系数,本文所说的频率特性系数特指静态频率特性系数。

电力系统的频率特性系数取决于负荷的频率特性系数和发电机的频率特性系数:

$$K = K_L + \rho \cdot K_G$$

其中: K 为频率特性系数, K_L 为负荷的频率特性系数, K_G 为发电机的频率特性系数, ρ 为备用容量系数,等于全系统投入的发电机额定容量总和与全系统总负荷之比。

发电机的频率特性系数指发电机随频率波动而增减出力的特性,和发电机调速器的调差系数 δ 有

$$\text{固定关系: } K_G = \frac{1}{\delta} \times 100\%$$

负荷的频率特性即负荷随着频率增减的特性:

$$K_L = \frac{dP_L}{df}$$

对于整个南方电网来说,频率特性是各省电网中机组特性及负荷特性和直调机组特性共同作用的结果。在电网实际运行中,负荷特性和机组特性的构成非常复杂,开机方式,负荷水平和备用容量也在随时变化,要精确得到电网的频率特性系数非常困难,所以在实际计算中,采用如下近似的工程算法:通过大机组跳闸后频率的响应情况,得到南方电网的总的频率特性系数。各区域电网根据区域内电网的负荷水平和机组情况将总的频率特性系数按比例分配给各区域,得到各区域电网的频率特性系数。区域内负荷越大,机组越多,则分得的频率特性系数越大。

2.2 频率特性系数对 AGC 控制的作用

电网的频率特性系数是 AGC 控制中最为关键的参数之一。在通常的 AGC 控制中,控制系统通过计算电网 ACE 得到总的有功调整需求,再将调整需求分配给各电厂控制器(PLC),总调节需求计算如下:

$$P_R = \alpha \cdot ACE + \beta \cdot \int ACE dt$$

$$ACE = K \cdot \Delta f + \Delta P \quad (\text{TBC 控制方式})$$

$$ACE = K \cdot \Delta f \quad (\text{CFC 控制方式})$$

其中: Δf 为电网频率偏差, ΔP 为联络线偏差, P_R 为调节需求, α 为比例增益系数, β 为积分增益系数。调节需求的前半部分为比例分量,后半部分为积分分量,积分分量通常占很小部分。

从计算公式看出,AGC 的 P_R 和 K 呈近似正比的关系, K 越大,机组每次调节的量越大。由于 AGC 是一个带积分环节的过程控制,理论上无论 K 取值多少,总是能达到控制目标,但是 K 过大和过小都是不适合的,过大造成机组过调节而引起功率震荡,过小会增加调整次数从而延长控制时间。

2.3 直调 AGC 频率特性选取的问题及算法

直调机组分布于各省电网中,没有所谓的直调区域负荷,如果在确定直调 AGC 的频率特性系数时只考虑直调机组的频率特性,得出的频率特性系数是个负值,将其用于 AGC 控制就会得到相反的控制效果,显然是不适合的。所以有必要采用其他方法得到一个合理的频率特性系数用于 AGC 控制。

基于直调 AGC 机组的功能定位不同,对频率特性的选取有不同的考虑。

2.3.1 机组承担正常调频责任

如果直调机组和其他省中调调度的机组一样承担主力调频责任,可以采用虚拟直调区域的处理方法,从而得到直调区域的频率特性系数。

将全网直调机组和一部分负荷虚拟出来作为一个控制区,该虚拟负荷的大小可以根据直调机组承担的调频责任的大小来决定。取负荷和出力相等则相对公平合理。

这样处理后,直调区域就可以参与全网的频率特性系数的分配。假设直调机组的特性和其他机组的特性和开机方式相同,可以得到直调区域的频率特性系数:

$$K_{zd} = K_{nf} \frac{P_{zd}}{P_{nf}}$$

其中: K_{zd} 为直调区频率特性系数, K_{nf} 为南方电网总的频率特性系数, P_{zd} 为直调机组一段时间内的总平均出力水平, P_{nf} 为南方电网一段时间内平均负荷水平。

值的指出的是,此时各省电网的频率特性系数应该随着调整,调整的原则依然是根据各省的负荷水平和机组情况分配剩下的频率特性系数 ($K_{nf} - K_{zd}$)。

2.3.2 机组承担辅助调频责任

辅助调频就是:当电网频率偏差不大时,电网的调频责任由各省电网完全承担,当频率偏差较大时直调机组才参与调频。直调机组调频的目的是使电网频率能够快速恢复到较小偏差范围内。所以在这种情况下,频率特性系数的确认可以根据辅助调频的调节需求反推来确定。

例如,当某省内突然失去一台发电机出力导致全网频率降低 0.1 Hz 时,其他省机组理论上不需要提供支援仍然可以满足各种考核和评价要求,如果这时要求直调机组提供功率缺额一半的支援,使全网频率快速恢复,则我们可以得到直调 AGC 频率死区门槛为 0.1 Hz,频率特性系数取一半的 K_{nf} 。

在这种模式下,南方电网总的频率特性系数分配给各省中调,直调区域不参与分配。

3 AGC 和机组的协调

通常情况下,电厂监控系统提供给调度端有关机组调节性能的实时数据很少,所以在 AGC 控制中常会遇到各种困难,如:水机组的震动区因为和水头等各种因素有关而难以在调度端设定;采用全厂控制模式时组合震动区更加复杂;调度端设定

的火电机组的起停磨区段及出力范围和实际不一致;采 SIS 的火电厂内部负荷的再分配时全厂的调节速率不是确定的数值等。

随着电厂监控系统自动化程度的提高,调度端 AGC 系统在控制中遇到的以上难题都可以在电厂端解决,即电厂端向调度端提供详细的受控对象相关特性数据,调度端 AGC 系统据此对电厂进行精确安全控制。

具体而言,不管是单机控制模式(没有 SIS 系统的火电厂或特殊运行方式下的水电厂)下每台机组一个控制器,还是全厂控制模式(有 SIS 系统的火电厂或通常运行方式下的水电厂)下多台机组一个控制器,对调度端 AGC 系统来说,关心的是控制器控制的机组表现出的总的外部特性,而不是单台机组的特性。

所以电厂端需要实时向调度端传送控制器(PLC)的调节外部特性,作为调度端控制的依据。其中基本的且可能随时变化的外部特性参数如下:

1) PLC 的控制上限和下限。用于告诉调度端在该 PLC 下机组总的上限和下限值,保证调度端的出力命令在该范围内。

2) PLC 的上升速率和下降速率。用于告诉调度端该 PLC 下机组在现在运行工况下能达到的总的上升和下降速率,提供给调度端来合理分配调节需求。

3) PLC 的增出力闭锁和减出力闭锁。用于告诉调度端,由于电厂内部的特殊情况要求(如引水式水机组消除水锤压力振荡,火电机组启停磨时)暂时不能执行出力的增加或减少,以便调度端将调节需求分配给其他机组。

4) PLC 的不可长时间运行的区域。用于告诉调度端在负荷调整中需要快速跨过的运行区域,如水电厂 PLC 下机组群的组合震动区等。

南方电网直调机组绝大部分是新上机组,容量大,自动化程度高,基本都能实现以上实时信息的上传。为 AGC 控制和电厂辅助服务质量评价提供可靠依据。

4 直调 AGC 安全问题及解决

4.1 直调机组特有的安全问题

1) 省间送受断面的安全问题。

在没有直调机组参与 AGC 的情况下,各中调采用 TBC 控制,其控制目标是消除频率偏差和联络线偏差。所以在 AGC 正常调节下,联络线偏差不会和送受电计划有太大的偏离,而送受计划总是有一定的安全裕度,所以联络线安全稳定比较有保障。

但是直调机组采用的是 CFC 控制, 机组分布在各省, 控制目标只和电网频率有关, 因为联络线潮流增加了直调机组引起的波动分量, 且这种波动的幅度是不受约束的, 所以直调机组参与 AGC 必然会导致省间联络线的过极限的风险大大增加。

2) 各省内部电网安全问题。

由于机组位于各省境内, 直调机组的出力调节可能会导致机组周边电网的线路或变压器过极限, 这种过极限可能存在于电网的总调直调部分, 也可能存在于中调调度部分, 情况较一般的 AGC 控制要复杂得多。

4.2 现有的解决方法及缺陷

由于传统 AGC 在分配机组出力时只考虑机组的调节能力和电网的调节需求, 没有考虑在机组出力调整时可能会引起稳定断面越限。针对这种情况, 国内外主要有如下解决方法:

简单实用的措施是将断面极限作为 AGC 暂停的判据, 即当系统达到稳定断面极限时暂停 AGC 功能, 使所有机组出力维持不变, 等待调度员人工处理, 这种处理方法的缺点是系统不能自动重新恢复到安全状态, 且此时无机组参与调频, 影响系统频率稳定。

安全约束调度和 AGC 结合起来是另一种解决方法, 但在实际应用中存在很多困难, 如其所依赖的状态估计的适应性不够强, 经常不能得到正确完整的系统运行状态, 且存在不收敛问题, 所以可靠性太差。

线路对发电机出力的灵敏度分析方法用于 AGC 校正控制能很好地解决收敛性问题, 但是由于计算过程中需要依赖电网的大量参数和遥信遥测量, 且对分布在整个南方电网的直调机组作灵敏度分析必须建立整个南方电网的计算模型, 所需信息量更为庞大。在电网的实时控制中, 控制的可靠性是第一位的, 控制中依赖的信息量越多控制越不可靠, 所以该方法在可靠性方面也存在问题。

4.3 基于有功灵敏度思想的模糊校正控制

一台发电机对于一条线路有功潮流的灵敏度的定义为: 当发电机增加一个单位的出力时, 线路增加 a 个单位的有功潮流, a 即为线路相对于该发电机的灵敏度。调度员在实际处理断面或线路越限时不自觉地运用到该思想。

实际电网中, 调度员关注的危险断面情况并不复杂, 一般都能通过简单分析电网的拓扑结构, 来决定机组的增减来消除断面或线路的越限危险, 并不需要借助计算工具来判断。

通过对南方电网内部运行人员关心的危险断面

进行灵敏度分析计算, 发现在拓扑结构不发生大的改变时, 机组对于所有危险断面的灵敏度在不同的负荷水平下和运行方式下变化并不大。

而在消除断面危险过程中, 使电网有快速有效的返回安全区域是最重要, 其他方面的精确和优化, 例如机组的调整量最小、所调整的机组数量最少等方面的考虑则是次要的。

所以, AGC 可以利用模糊灵敏度的方法, 对电网的危险断面进行自动校正控制, 该方面的好处在于不需要大量的数据计算, 处理方法简单有效。

通过对机组和断面在各种负荷水平和运行方式下灵敏度的计算, 灵敏度总是可以分为如表 1 所示情况。

表 1 机组相对断面的灵敏度分类

Tab.1 Classification of sensitivity coefficient between generations and tie line

	机组 1	机组 2	机组 3	机组 4
断面 1	+	-	o	*
断面 2	-	-	+	o
断面 3	+	+	-	o
断面 4	o	+	-	-

+ 表示机组为断面为正灵敏度; - 表示机组对断面为负灵敏度; o 表示机组对断面灵敏度接近于零, 是弱相关机组; * 表示机组对断面的灵敏度在不同的方式下变化很大, 不能确定, 这种情况在实际电网中很少。

有了灵敏度分类后, AGC 在实际调整中作如下处理:

当断面处于危险区时, AGC 以最大步长减少灵敏度为正的发电机组, 并以最大步长增加灵敏度为负的发电机组, 二者的出力差加上电网的调节需求分配给其余机组。灵敏度不确定机组则出力保持不变。

当两个以上断面同时处于危险区时, AGC 以最大步长减少对所有断面灵敏度都为正的发电机组, 并以最大步长增加灵敏度都为负的发电机组, 二者的出力差加上电网的调节需求分配给其余机组。灵敏度不确定或对于所有危险断面的灵敏度符号有相反情况的机组出力则保持不变。

4.4 离线仿真计算实例

下面以南方电网的实际运行方式和潮流计算工具来仿真云南送出断面越限时 AGC 的调整。

云南 500 kV 送出断面的危险门槛值为 2300 MW, 云南境内的运行的直调机组为滇东电厂 3 台 60 万机组, 实际出力每台 40 万。图 2 是投入运行

的直调机组在不同负荷水平和方式下测得的灵敏度情况。

表 2 直调机组对云南送出断面的灵敏度

Tab.2 The sensitivity coefficient between directly controlled generations and Yunnan tie line

机组	灵敏度范围	灵敏度性质
滇东	0.85~0.89	+
天一	-0.09~-0.11	o
天二	-0.09~-0.11	o
龙滩	-0.08~-0.10	o
鲁布革	-0.09~-0.11	o
盘南	-0.08~-0.10	o
贵港	-0.08~-0.10	o
鲤鱼江	-0.06~-0.09	o

当云南送出断面达 2350 MW 时, AGC 以最大步长减少云南直调机组出力, 并将减少的出力加上电网应有的处理需求分配给其他直调机组。滇东电厂 3 台机同时动作, 单机调节速率为 12 MW, 最大步长为 20 MW。经计算, 1.5 min 后云南断面回到安全状态。

5 结论

南方电网直调机组 AGC 应该发挥协调全网频率的作用, 采用 CFC 控制方式为最好的选择。为了协调直调 AGC 和各中调 AGC 的控制, 各中调 AGC 的联络线和用于 AGC 控制的频率特性系数有必要作的调整, 直调 AGC 的频率特性系数的选取则需要根据直调机组的调频功能定位来合理的选择。采用有功灵敏度分析原理的模糊灵敏度控制方法来对线路和断面过载进行安全校正控制, 用到的实时信息少, 原理简单, 可以克服现在国内其他方法的缺点, 是符合实际电网情况的可靠解决方法。

(上接第 37 页 continued from page 37)

- [9] 倪明, 高晓萍, 单渊达. 证据理论在中期负荷预测中的应用[J]. 中国电机工程学报, 1997, (5): 199-203.
NI Ming, GAO Xiao-ping, SHAN Yuan-da. Application of Evidential Theory in Middle-term Load Forecasting [J]. Proceedings of the CSEE, 1997, (5): 199-203.
- [10] 叶在福, 单渊达. 基于信度的不确定性推理——证据理论及其在电力系统规划中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2000, 24(6): 5-8.
YE Zai-fu, SHAN Yuan-da. Uncertainty Reasoning Based on Belief Degree——Evidential Theory and Applications in Power System Planning[J]. Proceedings of the EPSA, 2000, 24(6): 5-8.

参考文献

- [1] 张小白. 用 AGC 实现稳定断面越限的预防和校正控制[J]. 电网技术, 2005, 29(19): 56-59.
ZHANG Xiao-bai. Implementation of Preventive and Remedial Control for Tie Line Overload by Use of Automatic Generation Control[J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 56-59.
- [2] ZHAO Jin-quan, JIANG Xiao-dong, ZHANG Bo-ming. A Successive Linear Programming Based On-line Static Security Corrective Control Approach[J]. Power System Technology, 2005, 29(5): 25-30.
- [3] 魏 晖, 沈善德, 朱守真, 等. 系统自然频率特性系数的实测与计算[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(5): 49-51.
WEI Hui, SHEN Shan-de, ZHU Shou-zhen, et al. Survey and Calculation of Frequency Character Quotient of Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(5): 49-51.
- [4] 唐跃中. AGC 按联络线偏差控制时频率偏差系数的确定[J]. 电网技术, 1997, 21(6): 5-7.
TANG Yue-zhong. Principles of Getting a Rational Area Frequency Bias in AGC of Tie-line Bias Control Model[J]. Power System Technology, 1997, 21(6): 5-7.
- [5] 高宗和. 自动发电控制算法的几点改进[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(12): 5-9.
GAO Zong-he. Some Algorithmic Improvement on AGC Software[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(12): 5-9.

收稿日期: 2007-08-24; 修回日期: 2007-09-23

作者简介:

赵旋宇(1974-), 男, 硕士, 工程师, 长期从事电力系统自动化工作。E-mail: zhaoxy@csg.cn

- [11] 陈静, 吴杰, 等. 多种负荷预测曲线的优化综合方法[J]. 江苏电机工程, 2006, (1): 38-41.
CHEN Jing, WU Jie, et al. Optimal Synthesis Manifold Load Prediction Curve[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2006(1): 38-41.

收稿日期: 2007-06-29; 修回日期: 2007-09-28

作者简介:

李如琦(1959-), 女, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统规划、负荷预测、电力系统分析与计算;

唐卓贞(1984-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统负荷预测的理论、建模、算法。E-mail: tangzhuozhen2005@163.com