

DOI: 10.7667/PSPC160136

基于 WAMS 的 AGC 机组性能在线评估方法研究

宋军英¹, 刘力¹, 黄良刚¹, 张文磊¹, 刘显壮², 安亚锟³

(1. 国网湖南省电力公司, 湖南 长沙 410007; 2. 清华大学电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084; 3. 国网山西省电力公司, 山西 太原 030001)

摘要: 提出了一种基于广域测量技术的 AGC 机组调节性能在线评估方法。首先提出了完整的 AGC 机组性能评估指标体系, 将各类指标有效整合, 从时间尺度和状态维度两个方面对 AGC 性能进行全面的评估。结合 WAMS 高采样率、高精度的数据特点, 将 AGC 调节过程分成三段: 快速控制段、考核控制段和超时控制段。不同的控制段采用不同的处理方法, 从而有效减少计算量和存储量, 满足在线快速评估的要求。该方法应用于湖南电网 AGC 在线评估系统, 验证了该方法的正确性和有效性。

关键词: AGC 系统在线评估; 广域测量系统; 控制评价体系; 分段评估

Online assessment of AGC regulation performance based on wide area measurement system

SONG Junying¹, LIU Li¹, HUANG Lianggang¹, ZHANG Wenlei¹, LIU Xianzhuang², AN Yakun³

(1. State Grid Hunan Electric Power Company, Changsha 410007, China; 2. State Key Lab of Power Systems, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030001, China)

Abstract: An online assessment method for AGC regulation based on WAMS is proposed. Firstly, this paper puts forward the assessment index system which integrates the indices in time scale and state dimension, thus makes a comprehensive appraisal for AGC units. Then responding to the high sampling rate and high precision characteristics of WAMS data, the control process of AGC regulation is divided into three segments: fast segment, assessment segment and time-out segment. Different methods are applied in different segments, so the calculation amounts and data storage can be efficiently declined to meet the requirements of fast online evaluation. The evaluation system has been applied in Hunan Power Grid and the results verify the feasibility and efficiency of proposed method.

Key words: online assessment of AGC regulation; WAMS; control performance standards; sectional assessment

0 引言

频率是衡量电网电能质量的重要指标之一, 频率稳定是大电网安全稳定运行的保证。目前二次调频主要由自动发电控制(Automatic Generation Control, AGC)系统协调完成^[1-3]。我国从 20 世纪 60 年代起在东北、华东和华北三大电网引进 AGC 自动控制系统, 随着自动化技术的提高和各地区 AGC 机组容量的增加, 电网频率合格率有了较大的提高^[4]。由于 AGC 机组性能的差异及其对电网频率控制的贡献差别, 对 AGC 机组性能进行科学公平的评估, 对进一步促进 AGC 机组性能的提高、改

善市场运行效益具有重要意义。

二次调频系统中一般基于 A1/A2 或 CPS1/CPS2^[5-6]标准对二次调频性能进行评估, 主要关注区域控制偏差 ACE, 无法判断单机的 AGC 调节性能。而电网一般以抽样的方式对 AGC 机组调节性能进行试验性质的测试, 时间间隔一般较长, 无法在运行中实时地反映各 AGC 机组的调节性能, 做出全面的掌握与分析。近年来, 随着 AGC 辅助服务的不断完善, 单机 AGC 的性能评估方法研究引起越来越多学者的关注^[7-9], 相关的研究成果已在部分电网得到了实际应用^[10]。但目前的研究和应用实例都是基于 SCADA 和 EMS 系统进行的, 在采样率、采集精度及传输速率方面受到了很大的限制, 难以准确评估机组的动态性能, 已无法满足电力系统对频率控制精度和实时性的要求。近年来广受关注的

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2015BAA01B03); 国网湖南省电力公司科技资助项目(SGHN0000DKJS1300221)

广域测量系统(Wide Area Measurement System, WAMS)是针对稳态过程的 EMS 系统的进一步延伸^[11], 实时采样速率可达到 25~100 帧/秒^[12-13], 应用于 AGC 机组性能参数或其他电网参数的在线计算^[14], 可使得 AGC 动态性能评估的准确性和实时性大大提高。

本文介绍了基于 WAMS 的 AGC 机组性能在线评估方法。首先提出了完整的 AGC 机组性能评估指标体系, 从时间尺度和状态维度两个方面对 AGC 性能进行全面的评估, 并给出了指标及相应效能系数的计算方法。结合 WAMS 高采样率、高精度的数据特点, 将 AGC 调节过程分成三段: 快速控制段、考核控制段和超时控制段。不同的控制段采用不同的处理方法, 从而有效减少计算量和存储量, 满足在线快速评估的要求。该方法应用于湖南电网 AGC 在线评估系统, 在线测试结果表明, 提出的方法可以实时、准确地评估机组的调节性能, 验证了方法的正确性和有效性。

1 AGC 机组性能评估指标体系

AGC 指的是电网调度中心直接通过机组分散控制系统(Distribution Control System, DCS)实现自动增减机组目标符合指令的功能。从系统的角度, AGC 服务的目的是维持系统的频率(或联络线上的潮流)在要求的范围内^[15-16]; 从机组的角度, AGC 服务是提供跟踪指令变化的能力^[17]。因此评估 AGC 服务质量, 就是考核 AGC 机组跟随指令变化是否达到了要求。

图 1 展示了一个比较典型的单机 AGC 调节过程, 其中曲线 Z 表示 AGC 指令曲线, 曲线 P 表示 AGC 机组有功输出曲线。

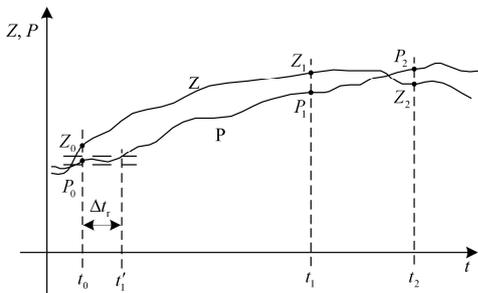


图 1 AGC 调节过程示意图

Fig. 1 Adjusting process of AGC

t_0 时刻, 机组出力与 AGC 指令的差值大于预先设定的 AGC 响应死区, 机组开始增加出力, 到 t_1' 时刻可靠跨出调节死区。在 t_1 时刻, 机组出力和 AGC 指令的差值重新回到 AGC 响应死区之内, AGC 调

节过程结束, t_2 为下一次调节过程的开始。我们把 t_0 到 t_1 时间段称为一个“控制段”, 时间间隔为

$$\delta T = t_1 - t_0 \quad (1)$$

1.1 单一评估指标

一般说来, 评估 AGC 调节性能的指标包括投运率、调节容量、正确动作率、响应时间、调节速率、差动速率和调节精度。

(1) 投运率

指除经调度机构同意退出的时间段外, 机组 AGC 可用时间与总时间的比值, 反映了机组响应 AGC 指令潜在能力的大小。

(2) 调节容量

指正常情况下 AGC 机组受控期间, 有功输出所能达到的最大值和最小值之间的差值, 反映了负荷发生变化时, 机组对系统出力-负荷动态平衡调节所做出贡献的能力的大小。

(3) 正确动作率

指 AGC 机组正确响应 AGC 指令次数与总的有效 AGC 指令次数的比值, 正确响应的定义在算法实现中会详细说明。反映了机组出力跟随 AGC 指令变动而变动能力的大小。

(4) 响应时间

指自动发电控制系统发出 AGC 指令之后, 机组出力在原出力点的基础上, 可靠地跨出与调节方向一致的机组调节死区所用的时间, 是纯延迟时间, 由通信延时和机组响应延时组成^[12], 统称响应时间。

(5) 调节速率

指机组响应负荷指令的速率, 即正常情况下 AGC 机组受控期间, 有功输出对时间的变化率, 反映了机组出力改变的快慢速度, 也就是对维持系统频率贡献的快慢, 单位为 MW/min。根据定义, 写出速率表达式。

$$V_i = \frac{P_1 - P_0}{t_1 - t_0} \quad (2)$$

(6) 差动速率

由于 AGC 指令可能要求发电机出力增加或者减少, 所以调节速率也分为上升速率(对应出力增加)和下降速率(对应出力减少)。所谓差动速率, 就是指机组上升速率和下降速率之间的差值, 反映了机组增加出力能力和减少出力能力之间的差别。一般要求上升速率和下降速率大致相等, 但实际中差异较大, 极端情况下, 少数电厂为了多发电, 人为调整 AGC 机组的整定参数, 增大上升速率, 减小下降速率, 从而牺牲了其他 AGC 机组的利益, 这种行为在生产中必须严令禁止^[17]。

(7) 调节精度

指机组最后稳定时有功输出与 AGC 指令值之间的差值。由于机组性能以及一些人为了因素, 机组实际稳定后有功出力往往和 AGC 指令存在一定的差异, 这种差异会给系统频率的稳定带来不好的影响。我们使用该差值在一段时间内的积分, 即电量的调节偏差来表示。考虑到实际采样取值得到的 AGC 指令值和机组出力值都是离散的, 调节偏差百分比的表达式为

$$\eta = \frac{\sum Z_i \Delta t_{1i} - \sum P_j \Delta t_{2i}}{P_n (t_2 - t_1)} \times 100\% \quad (3)$$

式中: Z_i 表示 AGC 指令在第 i 个采样点处的值; P_j 表示机组出力在第 j 个采样点处的值; Δt_{1i} 和 Δt_{2i} 分别表示 AGC 指令和机组出力的采样间隔。

1.2 效能系数

上节给出的七个性能指标的量纲大小各不相同, 不利于结果呈现。为此, 我们引入效能系数, 将各性能指标近似标么化处理。当性能指标达到某一标准时, 效能系数记为 1.0。性能指标变动时, 效能系数也会相应变动, 保证效能系数越大, 机组性能指标越好。标准一般取当地电网对 AGC 机组相应性能指标的要求值, 以华中地区为例, 《华中区域发电厂并网运行管理实施细则(试行)》(以下简称细则)中的相关定值如表 1 所示。

表 1 部分性能指标定值

Table 1 Values of some performance indices

性能指标	投运率	调节容量	调节速率	调节精度
定值	90%	40% P_n	2% P_n/min	3% P_n

另外三个性能指标细则中没有规定, 根据运行经验, 正确动作率设定为 100%, 响应时间设定为火电机组 1 min、水电机组 20 s, 差动速率设定为 0。效能系数计算公式如下。

(1) 投运率效能系数 k_1

$$k_1 = 1 + \left(\frac{t_a}{t_t} - 90\% \right) \times 10 \quad (4)$$

式中: t_a 表示一段较长时间内 AGC 机组未经允许的非投运时间总和; t_t 表示该段区总的时间长度。

(2) 调节容量效能系数 k_2

$$k_2 = 1 + \left(\frac{\Delta R}{P_n} - 40\% \right) \times 1 \quad (5)$$

式中: P_n 表示机组的额定容量; ΔR 表示机组的最大调节容量。

(3) 正确动作率效能系数 k_3

$$k_3 = 1 + \left(\frac{n_r}{n_t} - 100\% \right) \times 10 \quad (6)$$

式中: n_r 表示一段时间内机组正确响应 AGC 指令的次数, 即快速控制段和考核控制段数量的和; n_t 表示该段时间内总的控制段数。

(4) 响应时间效能系数 k_4

$$k_4 = 1 - \frac{t'_1 - t_0 - 60}{60} \quad (7)$$

(5) 调节速率效能系数 k_5

$$k_5 = 1 + \left(\frac{|V|}{P_n} - 2\% \right) \times 50 \quad (8)$$

式中, V 表示某段时间内的平均调节速率的绝对值, V 和 P_n 都只取数值, 量纲不参与计算。

(6) 差动速率效能系数 k_6

当上升速率不大于下降速率时, 不对差动速率进行考核, 机组的差动速率效能系数 $k_6 = 1.0$, 当上升速率小于下降速率时, 差动速率效能系数计算方法如式(9)。

$$k_6 = 1 - \frac{|V_d| - V_u}{P_n} \times 50 \quad (9)$$

式中, V_u 和 V_d 分别表示机组一段时间内的平均上升速率和平均下降速率。

(7) 调节精度效能系数 k_7

$$k_7 = 1 - (\eta - 3\%) \times 50 \quad (10)$$

1.3 综合评估方法

为了更直观地呈现评估结果, 我们根据时间尺度和状态维度两方面将指标进行分类。按时间尺度, 分为长期和短期性能指标, 其中长期性能指标包含投运率、调节容量、正确动作率和调节精度; 短期性能指标包括响应时间、调节速率、差动速率和调节精度; 按状态维度, 分为静态和动态性能指标, 其中静态性能指标包含投运率、调节容量和调节精度, 动态性能指标包含正确动作率、响应时间、调节速率和差动速率。将多个性能指标按照物理特性分类整合之后, 既能方便调度人员分析判断, 又能方便地横向比较不同机组性能的优劣。图 2 反映了各种性能指标之间的对应关系。

本文中我们以时间尺度为例, 说明综合评估指标的使用。引入短期评估系数 K_{short} 和长期评估系数 K_{long} , 对 AGC 机组在短期(如 1 h)和长期(如 1 天或一个月)两种不同时间尺度下进行评估。在此我们取各能效系数的加权平均值来表征最终的短期和长期评估系数, 即

$$\begin{cases} K_{\text{short}} = \alpha_1 k_4 + \alpha_2 k_5 + \alpha_3 k_6 + \alpha_4 k_7 \\ K_{\text{long}} = \beta_1 k_1 + \beta_2 k_2 + \beta_3 k_3 + \beta_4 k_4 \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^4 \alpha_i = 1, \alpha_i \in [0,1] \\ \sum_{i=1}^4 \beta_i = 1, \beta_i \in [0,1] \end{cases} \quad (12)$$

各权重系数的绝对大小没有实际的物理意义，相互之间的大小关系表示了相应效能系数对于评估系数贡献量的大小。权重系数越大，说明该权重系数所表征的效能系数贡献越大，则相应性能指标越能反映机组的调节性能。至于各系数的具体取值，则需要根据电网具体运行情况和经验来定。

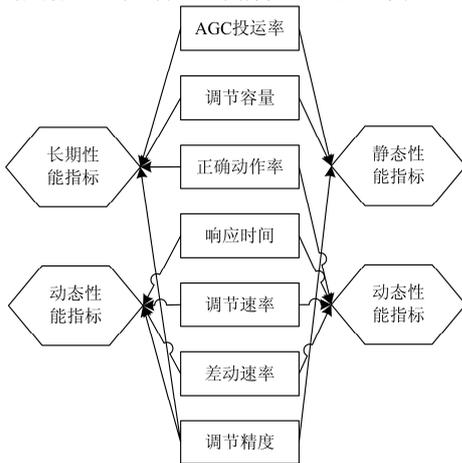


图 2 性能指标分类图

Fig. 2 Classification map of performance indices

2 在线评估算法

AGC 调节性能将会受到很多随机因素的影响^[18]，单次调节后取得的性能指标难以反映机组的真实情况，需要取一段时间内的平均效果参与计算。在本文中取 1 h 为时间间隔，逐段计算输出效能系数，既能有效消除计算结果的随机性，又能保证结果输出的实时性。

随着电网规模的不断扩大，电网负荷变动时分配给单台发电机的出力调整量越来越小，大部分情况下，机组都能在较短的时间内将出力调整至 AGC 指令死区之内，现场采集到的数据也支持上述观点。如果对每一个控制段都进行效能系数的计算，无疑会大大增加不必要的计算量和存储量，而得到的有效考核数据并没有增加多少。因此，为减少计算量和数据存储量，满足在线快速评估的要求，本文将控制段分成三段：快速控制段、考核控制段、超时控制段，对各个控制段进行分段考核。

当控制段时间间隔小于某一给定的 T_{\min} 时，说

明该段时间内 AGC 调节能够快速、准确地跟随响应系统的指令，默认机组在该段时间内的 AGC 调节满足要求，不再对该控制段的性能指标进行计算考核，称为“快速控制段”。当控制段的时间间隔处于 T_{\min} 和 T_{\max} 之间时，说明该段 AGC 调节能够在规定的时间内跟随响应系统的指令，但是需要对该控制段的各性能指标进行计算考核，核算该段时间的性能指标是否满足要求，称为“考核控制段”。快速控制段和考核控制段的调节动作均认为是正确调节。当控制段时间间隔大于 T_{\max} 时，说明该段 AGC 调节没能在规定时间内跟随响应系统的指令，不再对该段内各指标进行考核，记 AGC 错误调节一次，称为“超时控制段”。程序算法流程如图 3 所示。

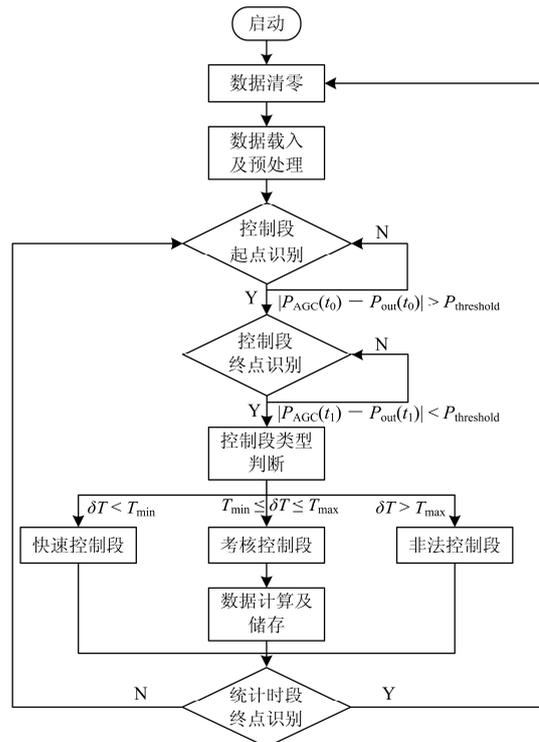


图 3 程序算法流程图

Fig. 3 Flowchart of the algorithm

3 测试结果及分析

我们将上面提出的算法在湖南电网某电厂中进行了测试，得到了一些 AGC 机组的调节性能在线测试数据，利用这些数据对 AGC 机组进行了评估分析。我们选取的测试时间段为 2013 年 10 月 9 日 16:00 至 22:59，测试机组为湘潭电厂 #2 机组，测试所用的数据为基于湖南电网广域测量控制系统采集的机组出力值和 AGC 指令值。先绘出该段时间内出力曲线和 AGC 指令曲线，如图 4。

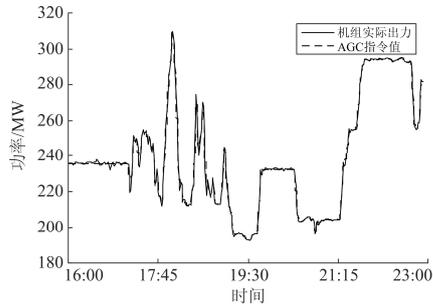


图 4 湘潭电厂#2 机组出力与 AGC 指令曲线

Fig. 4 Output of Plant Xiangtan #2 and curve of AGC instruction

表 2 湘潭电厂#2 机组短期评估结果输出表格

Table 2 Short-term evaluation results of Xiangtan Plant #2

统计时段	控制段数	快速控制段数	考核控制段数	超时控制段数	调节速率%/min	调节精度%	响应时间	短期评估系数
16:00	8	8	0	0	优秀	优秀	优秀	优秀
17:00	6	6	0	0	优秀	优秀	优秀	优秀
18:00	6	6	0	0	优秀	优秀	优秀	优秀
19:00	8	7	1	0	1.125	2.803	48s	1.461
20:00	9	8	1	0	1.314	2.625	75s	1.097
21:00	6	3	3	0	1.207	3.421	41s	1.239
22:00	8	6	1	1	0.927	2.287	68s	0.832
均值	51	44	6	1	1.143	2.784	—	—

表 3 湘潭电厂#2 机组长期评估结果输出表格

Table 3 Result of the long-term evaluation of Xiangtan Plant #2

投运率	正确动作率	调节容量	调节精度	长期评估系数
100%	98.0%	30%	2.784%	1.253

分析上面给出的测试数据, 我们可以得到以下结论。

(1) 在机组进行 AGC 调节的过程中, 虽然控制段数一共有 51 个, 但是 86.3% 的情况下都能在 3 min 之内将机组出力控制到 AGC 调节死区范围之内, 正确动作率达到 98.0%, 说明该机组的 AGC 调节性能很好, 能够满足系统对它的要求。

(2) 从测试数据来看, 平均调节速率大概在 1.2% 左右, 没能达到细则中规定的 2% 的要求。这是由于 AGC 机组的调节存在固有的执行环节, 发电机组出力改变 50 MW、20 MW 或 10 MW 所需要的时间往往是一样的, 并不存在明显的线性比例关系。而电网中 AGC 机组数量较多, 分配给每台机组的调节量往往不大, 可能只有 10 MW 至 20 MW, 这种情况下, 机组很难达到每分钟 2% 额定容量的调节速率的规定。因此, 建议在 AGC 考核规定中弱化对调节速率的考核, 或仅对考核控制段的调节速率进行考核。

4 结论

本文提出了一种基于 WAMS 数据进行机组 AGC

根据湖南电网实际的运行经验, 各权重系数的取值如下:

$$\begin{cases} [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4]^T = [0.1, 0.2, 0.3, 0.4]^T \\ [\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4]^T = [0.2, 0.1, 0.4, 0.3]^T \end{cases} \quad (13)$$

测试结果不光输出短期评估系数, 还将以统计时段为基本单元, 逐一输出该时段的平均调节速率、平均调节偏差百分数和平均响应时间, 以供参考使用, 结果输出如表 2 和表 3。

调节性能在线评估的方法, 从时间尺度和状态维度全面评估 AGC 机组性能指标。在湖南电网的测试结果表明, 提出的方法可实时、准确地评估 AGC 机组调节性能, 计算方法稳定可靠, 具有工程实用价值。

利用本文提出的方法, 能够有效解决 AGC 机组的在线评估问题, 对进一步促进 AGC 机组性能的提高、改善市场运行效益具有重要的推动作用。同时, 该算法经过适当改进后, 可集成为广域测量系统中的高级应用模块, 对提高电网调度自动化水平、推进智能电网建设具有重要意义。

参考文献

- [1] 颜伟, 王聪, 毛艳丽, 等. 基于 OPF 的互联电网 AGC 优化模型[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 35-40.
YAN Wei, WANG Cong, MAO Yanli, et al. AGC optimal model based on OPF technology for interconnected power grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 35-40.
- [2] 于汀, 蒲天骄, 刘广一, 等. 电网 AGC 与 AVC 协调控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 42-47.
YU Ting, PU Tianjiao, LIU Guangyi, et al. Coordinated control method of AGC and AVC in power grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 42-47.
- [3] 颜伟, 赵瑞锋, 赵霞, 等. 自动发电控制中控制策略的研究发展综述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 149-155.

- YAN Wei, ZHAO Ruifeng, ZHAO Xia, et al. Review on control strategies in automatic generation control[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 149-155.
- [4] 付鹏武, 周念成, 王强钢, 等. 基于时滞模型预测控制算法的网络化 AGC 研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 188-195.
FU Pengwu, ZHOU Niancheng, WANG Qianggang, et al. Research on networked AGC system based on delay model predictive control algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 188-195.
- [5] JALEELI N. NERC's new control performance standards[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(3): 1092-1099.
- [6] 席磊, 余涛, 张孝顺, 等. 基于狼爬山快速多智能体学习策略的电力系统智能发电控制方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 93-101.
XI Lei, YU Tao, ZHANG Xiaoshun, et al. A fast multi-agent learning strategy based on DWoLF-PHC(λ) for smart generation control of power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 93-101.
- [7] 李丹, 梁吉, 孙荣富, 等. 并网电厂管理考核系统中 AGC 调节性能补偿措施[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(4): 107-111.
LI Dan, LIANG Ji, SUN Rongfu, et al. Compensation strategies of AGC regulation performance in plants management and assessment system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(4): 107-111.
- [8] 冯玉昌, 滕贤亮, 涂力群. AGC 机组调节速率和精度的实时计算方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(4): 75-77.
FENG Yuchang, TENG Xianliang, TU Liqun. Real-time calculation of regulation speed and regulation precision on AGC software[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(4): 75-77.
- [9] 杨德友, 蔡国伟. 基于广域局部量测信息的复杂电力系统自适应低频保护策略研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(10): 266-275.
YANG Deyou, CAI Guowei. Adaptive under frequency load shedding schemes for complex power systems using local measurements[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(10): 266-275.
- [10] 谢旭, 刘国旗, 杨小煜. 基于 CC-2000 系统的华北电网 AGC 机组调节效能在线测定软件的开发[J]. 电网技术, 2005, 29(18): 22-25.
XIE Xu, LIU Guoqi, YANG Xiaoyu. Development of online measurement software for adjustment efficiency of AGC units in North China power grid based on CC-2000 platform[J]. Power System Technology, 2005, 29(18): 22-25.
- [11] 段刚, 王茂海, 陈程, 等. 基于瞬时值比较的 PMU 动态性能在线评测方法及系统[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 22-27.
- DUAN Gang, WANG Maohai, CHEN Cheng, et al. Instantaneous value comparison based PMU dynamic characteristics evaluation method and system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 22-27.
- [12] 贾燕冰, 高翔, 严正. NERC 与华东电网 AGC 评价标准的比较[J]. 华东电力, 2008, 36(4): 41-44.
JIA Yanbing, GAO Xiang, YAN Zheng. Comparison between SCPS of NERC and AGC of East China Power Grid[J]. East China Electric Power, 2008, 36(4): 41-44.
- [13] 郑涛, 高伏英. 基于 PMU 的机组一次调频特性参数在线监测[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(11): 57-61.
ZHENG Tao, GAO Fuying. On-line monitoring and computing of unit PFR characteristic parameter based on PMU[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(11): 57-61.
- [14] 董雷, 张昭, 蒲天骄, 等. 基于 PMU 量测信息的电压稳定在线评估指标[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 1-6.
DONG Lei, ZHANG Zhao, PU Tianjiao, et al. An online voltage stability index based on measuring information of phasor measurement unit[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 1-6.
- [15] GROSS G, LEE J W. Analysis of load frequency control performance assessment criteria[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(3): 520-525.
- [16] 言茂松, 邹斌. 概率学的 AGC 先验定价和后验考核新方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(2): 1-6.
YAN Maosong, ZOU Bin. A new method of probabilistic prior pricing and posterior assessment for AGC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(2): 1-6.
- [17] 李端超, 江山立, 陈家庚, 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.
LI Duanchao, JIANG Shanli, CHEN Jiageng, et al. Quantitative evaluation of regulation efficiency of generating sets with AGC and study on the compensation modes[J]. Power System Technology, 2001, 25(8): 15-19.
- [18] 鲍谚, 贾利民, 姜久春, 等. 电动汽车移动储能辅助频率控制策略的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(11): 115-126.
BAO Yan, JIA Limin, JIANG Jiuchun, et al. Research on the control strategy of electric vehicle mobile energy storage in ancillary frequency regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(11): 115-126.

收稿日期: 2016-01-25; 修回日期: 2016-04-15

作者简介:

宋军英(1968-), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行与控制。E-mail: 276435879@qq.com

(编辑 魏小丽)