

DOI: 10.7667/PSPC151612

四川电网 AGC 机组协调优化控制策略研究与应用

郭亮¹, 于昌海², 吴继平², 滕贤亮², 温丽丽¹

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211000)

摘要: 四川电网电源结构以水电为主, 同时还包含燃气机组、燃煤机组等多种类型的发电资源, 由于不同发电机组间调节性能差异大, 自动发电控制(AGC)机组的协调配合已成为一个亟待解决的难题。针对 AGC 机组调节性能的差异, 通过动态分组方案跟踪不同负荷分量, 实现 AGC 机组在不同时间尺度上的协同配合。同时, 为改善 AGC 机组计划执行情况, 提出分时段的自适应均衡控制策略, 根据负荷曲线不同时段的变化特点自动切换机组调配策略。运行结果表明, 该策略较好地适应四川电网电源结构特点与运行需求, 提高了四川电网 AGC 区域调节品质, 并实现了机组间的均衡协调。

关键词: 自动发电控制; 机组调配; 动态分组; 协调控制; 自适应均衡控制

Research and application of AGC generators coordinated optimization control strategy in Sichuan power grid

GUO Liang¹, YU Changhai², WU Jiping², TENG Xianliang², WEN Lili¹

(1. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, China;

2. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211000, China)

Abstract: Sichuan power grid mainly embraces hydroelectric power, and also contains a variety of other energy resource, such as gas turbine generating units and coal fired generating units, in which the performance of generation units varies widely, and therefore the coordinate control between automatic generation control (AGC) units becomes very urgent and important. According to the characteristics of AGC units, a dynamic grouping scheme is proposed, that is each regulation group follows different load parts separately, the units' cooperation in time dimension is realized. Meanwhile, to improve units' schedule performance, an adaptive balance control strategy is proposed either, which is to switch units' dispatch strategy automatically according to the characteristics of load curve. The on-spot operation shows that the proposed strategies adapt Sichuan Grid's power resource structure characteristics and its performance requirements well, the dispatching control quality is improved efficiently and the balance coordinated regulation between multiple units is realized.

Key words: automatic generation control (AGC); units dispatch; dynamic grouping; coordination control; adaptive balance control

0 引言

四川电网装机规模持续快速增长, 截止 2014 年底全网统调装机总容量达 45 186 MW, 其中水电占比为 70.5%, 火电占比为 28.4%, 水电总装机容量远超火电。除了满足区域负荷用电平衡外, 四川电网还承担着水电外送的战略输电任务, 其 AGC 系统在维持电网发用电实时平衡和频率稳定中承担着重要角色。四川电力调度控制中心一直积极推进 AGC 系统的建设, 并在华中五省一市控制性能评价标准(CPS)考核中名列前茅^[1]。但是, 四川电网水火

发电机组间调节性能差异大, AGC 系统在实际运行中存在着火电机组投入容量小且参与 AGC 控制积极性不高、枯水期可调节容量不足、水火电协调困难等问题, 制约了四川电网 AGC 功效的充分发挥。

四川电网电源结构以水电为主, 其中径流式水电机组占据较大比例, 该类水电机组发电能力、振动区限值、可调范围受水头变化影响加大, 造成全网 AGC 调节能力在丰枯期差别较大^[2-3]。火电机组跟踪负荷波动的频繁调节行为会带来机组磨损增大、煤耗增加、运行维护费用升高等一系列问题, 导致火电厂对投入 AGC 控制的意愿较低。进而导

致四川电网内发电机组参与 AGC 的机组容量相对较少,在负荷波动剧烈时段 AGC 调节容量不足,容易造成 CPS 指标不合格。这种情况在枯水期尤为突出。

因此,如何充分发挥各发电机组的调节性能,实现不同调节性能发电机组间的协调配合,提高发电机组投入 AGC 控制的积极性是目前亟需解决的问题。

文献[4-6]针对 AGC 机组的经济性调配策略展开了研究,提出了多种 AGC 机组调节费用计算的数学模型及优化算法,通过对目标函数最优值求解得到机组的分配量。上述研究从机组调节的经济性与公平性出发,并未考虑不同类型机组间调节性能的差异,制约了区域电网 AGC 调节品质的进一步提升。文献[7-12]提出利用超短期负荷预测对火电机组实施超前控制,配合水电机组调节区域控制偏差(ACE)的协调控制方案,并在实际系统得到了检验。文献[13]提出一种多控制区协调 AGC 模型,根据水电机组枯期与汛期出力特性差异,通过切换大小运行方式实现主子控制区协调。文献[14]采用层次分析法获得机组的综合评估指标,进而建立优化决策模型,以实现 AGC 机组控制模式的优化调控。但上述研究成果仅适用于水火比例相对均衡的区域电网,且始终保证有快速调节的水电机组的假定过于局限,未能充分考虑发电机组实际调节性能的差异,当电网内水火结构关系或水电调节能力发生变化时,缺乏应变机制。此外,不同考核标准下的 AGC 控制策略研究也取得了一系列研究成果^[15-21],但 AGC 调节行为对发电机组负荷水平、实发电量等运行状态造成的影响鲜见关注。在发电机组参与电网负荷波动调节的同时,使其调节动作能够较好地反映发电计划特征,是“三公”调度的基本要求,也是提高发电机组投入 AGC 控制积极性的重要手段。

本文针对四川电网水电为主、机组调节性能差异大的电源结构特性,提出了基于机组调节特性一致性分析的动态分组协调控制方案,根据控制组调节性能差异分配不同时间维度的负荷分量调节任务;并针对 AGC 实时调节行为对机组运行状态造成的影响,提出了机组均衡控制相关的改进控制算法。

1 水火机组的协调控制

一直以来,四川电网 ACE 的实时调节任务主要由二滩与瀑布沟两座大型水电站承担,其他水火发电机组仅参与辅助调节,调节资源未得到充分利用。

为实现多机组间的协调配合,本文提出了一种基于调节性能一致性分析的动态分组协调控制策略。首先,针对四川电网内机组类型多、调节性能差异大的特性,提出按照综合性能指标动态分组方案,保证控制组内机组调节特性的相对一致;在此基础上,根据各控制组调节性能的差异,令其分别跟踪不同时间尺度的负荷分量,在负荷跟踪控制的时间维度上实现协调配合。

根据负荷调节时序递进、分级细化的控制思路,时间尺度愈是精细,对机组下发的调节指令愈是密集,同时对机组跟踪响应特性的要求越高。鉴于此,本文制定的多功能调节组协调控制方案如表 1 所示。

表 1 分组协调控制方案
Table 1 Packet coordinated control scheme

| | ACE 调节组 | 超短期跟踪组 | 日前计划组 |
|--------|----------|---------------|----------|
| 机组性能要求 | 好 | 一般 | 较差 |
| 主要功能 | 实时功率平衡调节 | 跟踪 15min 负荷趋势 | 跟踪日前发电计划 |

目前,功能调节组的划定多采用主观经验,甚至直接将发电类型或者装机容量作为划分依据,缺乏合理性与科学性的指导。该经验分组方法尤其不适用于水电装机比重大的四川电网,由于天然入库水量随气象等影响因素随机变化,水电机组的发电能力与调节性能均存在不确定性^[22]。

为解决科学分组的问题,本文以机组综合调节性能指标为基础计算综合性能指标,然后参考调节功能组的备用容量需求,筛选调节性能相对一致的机组编入同一调节控制组。具体实现步骤如下。

Step 1. 每日定时计算并统计机组综合性能指标日均值,并依此对所有 AGC 机组进行排序处理,综合性能指标计算公式如式(1)所示。

$$\begin{cases} K_p = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \\ K_1 = T_{\text{resp}} / T_n \\ K_2 = V_{\text{rate}} / V_n \\ K_3 = P_{\text{accu}} / \Delta P_n \end{cases} \quad (1)$$

式中: K_p 为机组的综合性能指标; K_1 为机组的响应时间指标; K_2 为机组的调节速率指标; K_3 为机组的调节精度指标; T_{resp} 为机组的响应时间,单位 s; T_n 为机组标准响应时间,单位 s; V_{rate} 为机组的调节速率,单位 MW/min; V_n 为机组的标准速率,单位 MW/min; P_{accu} 为机组的跟踪精度,单位 MW; ΔP_n 为机组调节允许偏差,单位 MW。

Step 2. 统计上一日 ACE 最大值,并将该值作

为 ACE 调节组上/下调节备用要求,按照机组综合性能指标由高到低依次编入 ACE 调节组。

Step 3. 统计上一日负荷峰谷差,并将该值作为超短期跟踪组的容量要求,按照机组综合性能指标由高到低依次编入超短期跟踪组。

Step 4. 将其他剩余机组编入日前计划组。

根据上述动态分组方法完成 ACE 调节组、超短期跟踪组与日前计划组的划分,充分考虑其调节性能的差异,制定不同跟踪目标与控制策略,以实现负荷控制不同时间尺度上的衔接与配合:

(1) 在省网负荷有规律地升降过程中,由日前计划机组承担跟随负荷大幅度增减的基础容量,该调节组对机组调节性能要求较低,指令往返变化次数少,适用于调节性能较差的火电机组或容量较小的水电机组,可充分挖掘其调节能力,扩大 AGC 机组的调节容量;

(2) 由 15 min 超短期负荷预测机组跟踪未来负荷趋势,使部分调节速率较慢的机组实现 AGC 的超前控制,从而减轻 ACE 调节机组的调节压力、降低调节备用需求;

(3) ACE 调节机组则负责区域电网有功功率的实时平衡。

2 机组自适应均衡控制

AGC 控制指令由基点功率和调节功率两部分构成。机组的基点功率由控制模式决定,反映了不同时间尺度下负荷扰动的调节责任;机组的调节功率反映了对区域电网实时功率平衡调节的贡献。

目前,机组参与区域调节功率分配的方式主要有比例分担与优先排序两种方式:

(1) 比例分担方式下各空闲机组在每次调节中均会按分担因子承担调节量。因各机组分担因子不同,且机组调节性能也存在差异,经过长时间运行后各机组的负荷率及电量完成情况会出现较大差异;而且,当调节方向变化频繁时,会导致机组往复调节,增加了机组间抵消调节的概率,机组自身磨损也增大。

(2) 优先排序策略根据排序因子(一般为调节裕度、调节速率、计划偏差等)对机组进行排序,然后顺序调用。该方法既可以实现调节机组的轮换调用,减少指令下发次数,又可以在轮换调用过程中,实现机组某一指标的动态平衡^[23]。

综上所述,优先排序策略可以实现机组特定指标(取决于优先级)的动态平衡,在均衡控制方面优于比例分担策略。但固定排序因子不能兼顾 AGC 区域调节品质与机组运行状态的均衡。为解决该问

题,本文依据四川电网负荷变化特点对优先排序策略提出改进。

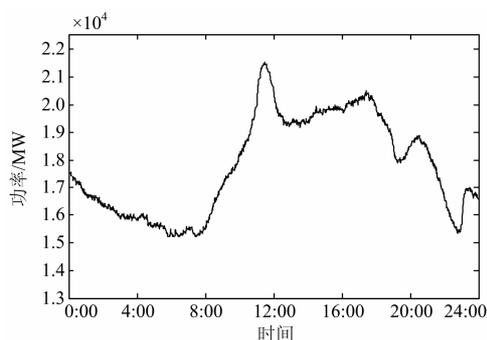


图 1 四川电网典型日统调负荷曲线

Fig. 1 Typical curve of load in Sichuan power grid

图 1 为四川电网典型日统调负荷曲线。从图中可以看出,四川电网负荷曲线存在两个剧烈变化的时段:在 08:00~12:30 时间区间负荷有一个快速攀升与快速回落的变化过程;在 17:00~24:00 时间区间负荷总体处于快速回落阶段,其间又有较大幅度波动。其他时段系统负荷则相对平稳。

根据该特点,四川电网参与 ACE 调节的机组排序因子采取分时段自适应调整策略,即,在系统负荷急剧变化时段,AGC 调节的首要任务为实现系统负荷的快速跟踪,优先考虑调用调节速率快、调节裕度大的机组;在负荷平稳阶段,可更多关注机组计划电量的完成情况,优先考虑调用计划完成率低与负荷率低的机组。

为实现上述控制策略,本文引入了综合排序因子代替之前的单一排序因子,即排序因子为电量完成率、调节裕度、调节速率、计划偏差等多因素的加权值。综合排序因子计算公式为

$$fac_{tot,i} = \sum fac_{j,i} \times wt_{j,i} \quad (\sum wt_{j,i} = 1) \quad (2)$$

式中: $fac_{tot,i}$ 为机组 i 的综合排序因子; $fac_{j,i}$ 为机组 i 的第 j 项优先因子; $wt_{j,i}$ 为为机组 i 的第 j 项优先因子所占权重。

该策略在不同时段自动调整综合排序因子的各优先因子的权重系数,从而决定机组均衡控制的倾向目标,既保证了负荷波动的快速平抑,又兼顾了计划电量的执行情况。

3 试验与运行

本文提出的优化策略已在四川电网 D5000 智能调度控制系统 AGC 软件中实施应用,在调度生产实际中取得了良好的控制效果。

表 2 为某一天系统运行的分组结果。从表中分

组情况可以看出,该分组结果较为客观,同一功能组包含了调节性能相近的水电机组与火电机组。

表 2 机组分类结果

Table 2 Units classification results

| | | ACE 调节组 | 超短期跟踪组 | 日前计划组 |
|------|---------|---------|---------|---------|
| 机组名称 | 瀑布沟(水电) | | 亭子口(水电) | 东岳厂(火电) |
| | 二滩(水电) | | 泸定厂(水电) | 关州厂(水电) |
| | | | 金堂厂(火电) | 桃坪厂(水电) |
| | | | 戎州厂(火电) | 金康厂(水电) |
| | | | ... | ... |

CPS1 指标体现了控制区域对互联电网频率质量贡献的大小,策略执行前后相邻年份某同一月份的 CPS1 日平均值比对情况如图 2 所示。从图中 CPS1 曲线可以看出,启用新策略后四川电网 CPS1 考核指标亦有所改善。

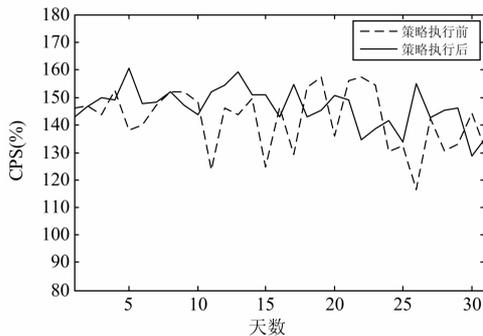


图 2 CPS1 日平均值曲线对比

Fig. 2 Comparison of daily mean CPS1

对二滩与瀑布沟两座水电站在新策略执行前后某月的日平均调节次数、指令折返次数、调节深度进行统计,结果如表 3 所示。

表 3 二滩与瀑布沟电站 AGC 调节行为比对

Table 3 Comparison of regulation performance about Er'tan and Pubugou plant

| 机组 | 策略执行前 | | | 策略执行后 | | |
|-----|-------|------|---------|-------|------|---------|
| | 调节次数 | 折返次数 | 调节深度/MW | 调节次数 | 折返次数 | 调节深度/MW |
| 二滩 | 1 504 | 362 | 74 822 | 1 220 | 246 | 51 738 |
| 瀑布沟 | 1 889 | 408 | 92 947 | 1 533 | 316 | 76 429 |

从表中数据可以看出,执行新策略后 AGC 向二滩水电厂下发的调节指令次数及指令折返次数均下降明显,尤其调节深度改善显著。以上数据表明,超短期负荷预测组与计划跟踪组的投入提升了四川电网调节资源的利用水平,显著降低了 ACE 机组调节压力。

为进一步检验 AGC 调节对机组发电计划的影

响,本文对瀑布沟水电站在策略执行前后两年同一日电量完成情况比对分析结果见表 4 所示。数据表明新策略实施以后,AGC 调节机组的计划电量完成情况也得到显著改善。

表 4 瀑布沟电站计划电量完成率

Table 4 Completion rate of planed power about Pubugou plant

| 日期 | 策略执行前 (2014 年) | | | 策略执行后 (2015 年) | | |
|-----|-------------------|---------|----------|-------------------|---------|----------|
| | 计划电量/MW | 实发电量/MW | 电量完成率(%) | 计划电量/MW | 实发电量/MW | 电量完成率(%) |
| 3/1 | 21 100 | 26 142 | 123.9 | 14 000 | 14 056 | 100.4 |
| 3/2 | 17 250 | 24 844 | 144 | 14 000 | 15 513 | 110.8 |
| 3/3 | 20 200 | 26 109 | 129.3 | 14 000 | 13 914 | 99.4 |
| 3/4 | 21 350 | 18 468 | 86.5 | 14 000 | 17 263 | 123.3 |
| 3/5 | 16 700 | 25 926 | 155.2 | 17 175 | 16 041 | 93.4 |
| 3/6 | 19 800 | 17 503 | 88.4 | 16 025 | 14 189 | 88.5 |
| 3/7 | 18 700 | 22 499 | 120.3 | 15 325 | 18 374 | 120 |

4 结论

通过对四川电网一段时间的运行观察与分析,本文提出的多类型机组协调控制策略是合理、可行的,有效解决了四川电网实际运行中存在的问题。

(1) 由日前发电计划机组、超短期负荷跟踪机组与 ACE 调节机组构成的水火协调方案,解决了四川电网长久以来存在的 AGC 可调节容量不足、水火电联调困难,火电机组投入容量小且投入 AGC 控制积极性不高等问题,充分发挥了 AGC 调节效能。

(2) 基于机组调节性能一致性分析的动态分组策略,为四川电网分组协调控制的实现提供有效支撑,也为分组控制方案提供了一种科学的指导方法。

(3) 考虑负荷变化特点的自适应均衡控制策略,有效解决了 AGC 机组调频任务与计划发电相冲突的难题。

参考文献

- [1] 孙毅,路轶. 四川电网自动发电控制(AGC)应用及分析[J]. 华中电力, 2007, 20(1): 29-31, 34.
SUN Yi, LU Yi. The analysis and application of AGC in Sichuan power grid[J]. Central China Electric Power, 2007, 20(1): 29-31, 34.
- [2] JA LLELI N, VANS LYCK L S, EWART D N, et al. Understanding automatic generation control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(3): 1106-1122.
- [3] CH ANGCHIEN L R. An automatic generation control with adaptive frequency bias setting for current NERC performance standards[D]. West Lafayette, IN, USA:

- Purdue University, 2002.
- [4] 王建国, 丛聪, 韩娜, 等. AGC 机组调配经济性的改进免疫算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(18): 32-36.
WANG Jianguo, CONG Cong, HAN Na, et al. Research of improved immune algorithm for economic AGC unit dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(18): 32-36.
- [5] 黄伟峰, 姚建刚, 韦亦龙, 等. 带遗传算子模拟植物生长算法在 AGC 机组调配经济性中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 72-77.
HUANG Weifeng, YAO Jianguo, WEI Yilong, et al. Application of plant growth simulation algorithm with genetic operators in the economical AGC unit dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 72-77.
- [6] 李卫东, 吴海波, 武亚光, 等. 电力市场下 AGC 机组调配的遗传算法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(15): 20-24.
LI Weidong, WU Haibo, WU Yaguang, et al. Application of genetic algorithm to AGC service dispatch in a deregulated power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(15): 20-24.
- [7] 孙素琴, 滕贤亮, 戴飞, 等. 河南电网 AGC 水火电联调试验研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(6): 99-103.
SUN Suqin, TENG Xianliang, DAI Fei, et al. Experimental investigation on coordinate control between hydro units and thermal units in Henan power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(6): 99-103.
- [8] 刘和森, 石恒初, 滕贤亮, 等. 云南电网水火机组 AGC 协调优化控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(20): 96-99.
LIU Hesen, SHI Hengchu, TENG Xianliang, et al. Hydro-thermal AGC generators coordinated optimization control strategy in Yunnan power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(20): 96-99.
- [9] 谭涛, 姜杰, 何潜, 等. 省级电网 AGC 控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(16): 63-66.
TAN Tao, JIANG Jie, HE Qian, et al. Research on provincial power grid AGC control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(16): 63-66.
- [10] 高宗和, 丁恰, 温柏坚, 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, 24(11): 42-44.
GAO Zonghe, DING Qia, WEN Bojian, et al. AGC in advanced control based on super-short-term load forecasting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(11): 42-44.
- [11] 周劫英, 张伯明, 郭玉金, 等. 火电 AGC 机组超前控制策略[J]. 电网技术, 2006, 29(21): 57-60.
ZHOU Jieying, ZHANG Boming, GUO Yujin, et al. Strategy of automatic generation control in advance for thermal generator[J]. Power System Technology, 2006, 29(21): 57-60.
- [12] 夏天宇, 李辰, 柳进. 基于超短期负荷预测的 Non-AGC 与 AGC 协调控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 42(18): 38-43.
XIA Tianyu, LI Chen, LIU Jin. Research on non-AGC and AGC coordination and control strategy based on ultra-short-term load forecasting[J]. Power System Protection and Control, 2015, 42(18): 38-43.
- [13] 赵川, 朱涛, 叶华. 多控制区协调自动发电控制的研究与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 46-51.
ZHAO Chuan, ZHU Tao, YE Hua. Research and realization of coordinated automatic generation control based on multi-control zone[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 46-51.
- [14] 李利利, 仇晨光, 张勇, 等. 发电计划闭环中 AGC 机组控制模式决策方法[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(7): 1-5, 11.
LI Lili, QIU Chengguang, ZHANG Yong, et al. Decision-making method of AGC unit control mode for generation scheduling closed-loop[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(7): 1-5, 11.
- [15] HAWKINS D, ZHANG P. CPS based control algorithms for modern AGC systems[R]. Folsom, CA: California Independent System Operator, 2002.
- [16] SHOULTS R R, KELM R. AGC logic based on NERC's new control performance standard and disturbance control standard[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2): 852-857.
- [17] 高宗和, 陈刚, 杨军峰, 等. 特高压互联电网联络线功率控制(一)AGC 控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(15): 51-55.
GAO Zonghe, CHEN Gang, YANG Junfeng, et al. Active power control for tie-lines in UHV interconnected power grid part one AGC control strategies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(15): 51-55.
- [18] 高宗和, 陈刚, 滕贤亮, 等. 特高压互联电网联络线功率控制(二)AGC 性能评价[J]. 电力系统自动化, 2009,

- 33(16): 61-64, 101.
GAO Zonghe, CHEN Gang, TENG Xianliang, et al. Active power control for tie-lines in UHV interconnected power grid part two AGC performance assessment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(16): 61-64, 101.
- [19] 汪德星. 通用的联络线功率控制性能标准的研究[J]. 华东电力, 2011, 39(1): 1-8.
WANG Dexing. Study on the power control performance standard for general tie line[J]. East China Electric Power, 2011, 39(1): 1-8.
- [20] 余涛, 张水平. 在策略 SARSA 算法在互联电网 CPS 最优控制中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 211-216.
YU Tao, ZHANG Shuiping. Optimal CPS control for interconnected power systems based on SARSA on-policy learning algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 211-216.
- [21] 田启东, 翁毅选. 基于 CPS 标准的互联电网最优自动发电控制策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(6): 33-38, 43.
TIAN Qidong, WENG Yixuan. Research of the optimal automatic generation control strategy of interconnected power grid based on CPS standard[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(6): 33-38, 43.
- [22] 赵永龙, 牛蓓. 四川电网水电运行管理探讨[J]. 四川水利发电, 2004, 23(3): 81- 83.
- [23] 滕贤亮, 高宗和, 张小白, 等. 有功调度超前控制和在线水火电协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(22): 16-20.
TENG Xianliang, GAO Zonghe, ZHANG Xiaobai, et al. Look-ahead control for active power dispatching system and online hydro-thermal coordinated control strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(22): 16-20.
-
- 收稿日期: 2015-09-09; 修回日期: 2015-12-02
作者简介:
郭亮(1982-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电网调度自动化的研究与运行管理;
于昌海(1987-), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为电网调度自动化、新能源协调控制; E-mail: yuchanghai@sgepri.sgcc.com.cn
吴继平(1984-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为智能电网调度自动化。
- (编辑 周金梅)