

# 基于现代内点理论的互联电网控制性能评价标准下的 AGC 控制策略

李滨<sup>1</sup>, 韦化<sup>1</sup>, 农蔚涛<sup>2</sup>, 李林峰<sup>2</sup>, 吴阿琴<sup>1</sup>, 阳育德<sup>1</sup>

- (1. 广西大学电气工程学院, 广西壮族自治区 南宁市 530004;
2. 广西电网调度通信中心, 广西壮族自治区 南宁市 530012)

## AGC Control Strategy Under Control Performance Standard for Interconnected Power Grid Based on Optimization Theory

LI Bin<sup>1</sup>, WEI Hua<sup>1</sup>, NONG Wei-tao<sup>2</sup>, LI Lin-feng<sup>2</sup>, WU A-qin<sup>1</sup>, YANG Yu-de<sup>1</sup>

- (1. College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China;
2. Guangxi Electric Power Dispatching and Communication Center, Nanning 530012, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China)

**ABSTRACT:** An interior point algorithm for automatic generation control (AGC) strategy under the control performance standard (CPS) in the interconnected power grids according to the operation of interconnected power grid and evaluation standard of CPS is presented, after the discussion of the practical operating situation and the existent problems of AGC in power system. The new mathematic optimization model for AGC control strategy is proposed, which can be solved by the interior point nonlinear programming algorithm with the complementarity constraints. Extensive numerical simulations on the practical power systems have shown that this control strategy is promising due to reducing the number of order effectively, improving the CPS performance significantly, and the guarantees of the frequency quality and the safety operation in power system. This control strategy has been applied in Guangxi power grid successfully.

**KEY WORDS:** automatic generation control; control performance standard; optimization theory; control strategy; interconnected power grid

**摘要:** 分析电力系统中现有电力系统自动发电控制(automatic generation control, AGC)策略的运行情况和存在问题。根据电力系统实际运行情况和控制性能评价标准(control performance standard, CPS)考核要求, 提出基于现代内点理论的互联电网 CPS 标准下的 AGC 控制策略, 建立相应的最优化数学模型, 确定解算条件, 导出含互补约束条件的非线性规划算法。大量的仿真实验和比较算例表明所提的 AGC

控制策略能有效地减少 AGC 机组的下令次数, 大幅度提高 CPS 指标, 保证电网频率质量和安全运行, 降低电网调节成本, 实现电网运行的精细化管理。该成果已在广西电网投入开环运行。

**关键词:** 自动发电控制; 控制性能评价标准; 最优化理论; 控制策略; 互联电网

## 0 引言

现代电网已发展成为多控制区域构成的互联系统。电力系统自动发电控制则是保证电力系统安全稳定运行最有效的控制手段之一, 其控制策略决定了控制效果。

选择合适的性能评价标准是建立规范的秩序、促进AGC技术应用的重要环节。通用的评价标准主要为北美电力可靠性协会(North American electric reliability corporation, NERC)提出的行为准则, 其经历了从A1/A2 标准(简称A标准)评价, 到控制性能评价标准的发展过程<sup>[1-2]</sup>。已于 1998 年开始正式实施的CPS标准克服了A标准的缺陷, 更具科学性:

1) CPS 标准中对频率的控制目标有明确的规定。

2) CPS 标准不要求区域控制偏差(area control error, ACE)在规定时间内过零, 可减少一些不必要的调节, 改善机组的运行条件。

3) CPS 标准对各控制区域对电网频率质量的“贡献”评价十分明确, 特别有利于某一控制区域内发生事故时, 其它控制区域对其进行支援, 充分

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(50467001); 广西研究生教育创新计划项目(2006); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20060593002)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(NSFC)(50467001).

发挥大电网的优越性。

目前，国内外各大电网都在研究并逐步实施 CPS 标准<sup>[3-6]</sup>，已完成对 CPS 指标的实时监控和统计<sup>[7-11]</sup>；同时，对 CPS 标准下控制策略的研究也取得了相当大的进展，并在 AGC 实际运行和考核中发挥了一定作用<sup>[12-15]</sup>。但迄今为止，这方面的研究工作没有完全摆脱 A 标准控制策略的束缚，大部分沿用了 A 标准控制策略，只是进行了不同程度的改进，无法大幅度提高 CPS 指标，不能充分体现互联电网各 AGC 控制区之间的相互支援，不能适应各地不同发电特性的需要。

本文详细分析现行 AGC 控制策略的运行情况和存在问题，提出基于现代内点理论的互联电网 CPS 标准下的 AGC 控制策略，大量仿真实验表明所提算法能有效减少 AGC 机组的下令次数，大幅度地提高 CPS 指标。

## 1 现行 AGC 控制策略分析

目前，国内各省调大多采用南瑞调度系统的 CPS 标准控制策略，该策略是由 A 标准控制策略改进而来。控制区总调节功率  $P_R$  由比例分量  $P_p$ 、积分分量  $P_i$  及 CPS 控制分量  $P_{CPS}$  3 部分组成<sup>[12,15]</sup>：

$$P_R = P_p + P_i + P_{CPS} \quad (1)$$

式中： $P_p = -G_p E_{ACE}$ ； $G_p$  为比例增益系数； $E_{ACE}$  为滤波后的 ACE 值； $P_i = -G_i I_{ACE}$ ； $G_i$  为积分增益系数； $I_{ACE}$  为当前考核时段(如 10min)累计的 ACE 积分值； $P_{CPS} = -10G_{CPS} \Delta F$ ； $G_{CPS}$  为频率增益系数； $\Delta F$  为滤波后的频率偏差。在现行 AGC 控制策略中，增益系数均取经验值， $G_p$  取 1， $G_i$  取 0.5， $G_p$  取 10.5。

该策略已相继应用于国内多个电网，取得了一定的效果，但也存在如下问题：

1) 实现的控制本质是改进的 PI 控制。虽然加入了 CPS 控制分量，但当各增益系数取经验值时，其在决定控制区总调节功率时所占比重较小，起主要作用的仍是比例分量，也就是说还是如原有的 A 策略一样，要求 ACE 过零。这样改进的 PI 控制对未来情况没有预测，对控制指标不能全局把握，更没有办法保证 AGC 控制区内各单位的经济效益，无法体现 CPS 标准的优越性。

2) 在计算下令值时，只是计及联络线功率偏差和频率偏差，对于 CPS 指标值的控制、机组的有功功率限制、调节容量、调节速率等各种经济安全

性约束条件都没有直接引入，而在电力系统运行中，这些约束条件都是必须遵守的。

3) 对各分量增益系数的确定非常模糊。通常增益系数都是经验值，没有定量的工具进行评估。如广西电网 50% 左右为水力机组，但 AGC 控制系统仍采用以火电机组为主的华中电网的增益系数。由于水火电机组特性的不同，这样的增益系数往往造成 AGC 机组过调，使 AGC 机组频繁调节，导致水能的大量浪费，CPS 合格率下降。

4) 在电力市场环境下必须考虑经济性问题。随着电力系统市场化进程的加快，AGC 软件在满足 CPS 标准的基础上，要适应发电厂竞价上网的需要，接受电力交易制定的计划值，根据发电机组对电力系统的贡献，得到合理的市场回报。

由此可见，互联电网 CPS 标准下的 AGC 控制策略已不是传统的计算功率加闭环控制的问题，而是多约束的大型电力系统综合性问题，须另辟蹊径，引入新的思考方式和先进算法，研究大区域互联系统 AGC 控制策略与技术，确保电网频率质量。

## 2 互联电网 CPS 标准下最优 AGC 控制策略的数学模型

AGC 控制过程可简单地用图 1 表示。AGC 控制策略可看成一个黑箱，外界所关心的输入量是频率偏差  $\Delta f$  和联络线偏差  $\Delta P_T$ ，输出量是 AGC 机组新增功率  $\Delta P_G$ ，而  $\Delta P_T$  和负荷变化又决定了  $\Delta f$  和  $\Delta P_G$ ，从而形成了一个负反馈。对该反馈的考核是使其满足 CPS 控制指标和 AGC 机组功率限制等各种系统限制。同时，在市场环境下还必须满足一定的经济性。能实现这样的控制过程当然有很多方案，如现有的改进 PI 控制过程等。但为达到最佳效果，必须把对最佳效果的追求置于严格的数学理论基础和整套系统化计算方法之上，并提供快速高效的计算工具。



图 1 AGC 控制策略过程的简单描述

Fig. 1 Curt description of AGC strategy

互联电网 CPS 标准下的最优 AGC 控制策略指满足系统功率平衡、CPS 控制指标及各种安全性不等式约束条件下，求以 AGC 机组发电量电价变化最小或 CPS1 指标最优为目标函数的最优 AGC 机组出力。

1) 目标函数分经济性目标函数和指标性目标

函数。经济性目标函数为

$$\min f(\cdot) = \sum_{t=1}^T \sum_{i \in S_G} c_i \sum_{k=1}^t \Delta P_{Gi}^k \quad (2)$$

指标性目标函数为

$$\min f(\cdot) = (2 - K_{CPS1})^2 \quad (3)$$

式中： $\Delta P_{Gi}^k = u^k w_i^k R_{Gi}$  为第  $i$  台 AGC 机组第  $k$  时刻的加减发电量； $u^k$  为第  $k$  时刻 AGC 机组加减速启停值； $w_i^k$  为第  $k$  时刻第  $i$  台 AGC 机组出力限制值； $R_{Gi}$  为第  $i$  台 AGC 机组线性调节速率； $c_i$  为第  $i$  台 AGC 机组的线性经济系数，可是电价或辅助服务费用等； $S_G$  为 AGC 机组的集合； $T$  为考核的时间段； $K_{CPS1} = 2 - \sum [E_{AVE-\min} \Delta F_{AVE-\min} / (10B_i)] / n / \varepsilon_1^2$  为 CPS1 指标值； $E_{AVE-\min}$  为每分钟 ACE 的平均值； $\Delta F_{AVE-\min}$  为每分钟频率偏差的平均值； $B$  为控制区频率偏差系数； $n$  为分钟数； $\varepsilon_1$  为实际频率与标准频率偏差的 1 min 平均值的均方差；为兼顾互联区域的频率稳定性和本区域的经济性，取 CPS1 接近而不是大于 200% 为最优。

2) 等式约束为联络线功率偏差。

$$\sum_{i \in S_G} \sum_{k=1}^t u^k w_i^k R_{Gi} + P_G^0 - P_D^t - P_{TP}^t - \Delta P_T^t = 0 \quad (4)$$

式中： $t = 1, 2, \dots, 600N / \Delta t$ ； $\Delta P_T^t$  为第  $t$  时刻的联络线功率偏差； $P_G^0$  为区域总发电量初值； $P_D^t$  为第  $t$  时刻的负荷值； $P_{TP}^t$  为第  $t$  时刻的联络线计划值； $N$  为考核时间周期，min。

3) 不等式约束。

$$\underline{K}_{CPS1} \leq K_{CPS1}(m) \leq \overline{K}_{CPS1} \quad (5)$$

$$K_{CPS2} \leq L_{10} \quad (6)$$

$$\underline{P}_{Gi} \leq P_{Gi}^t \leq \overline{P}_{Gi} \quad (7)$$

$$\Delta \underline{P}_T^t \leq \Delta P_T^t \leq \Delta \overline{P}_T^t \quad (8)$$

$$w_i^t = \begin{cases} 1, & \underline{P}_{Gi} \leq P_{Gi}^t \leq \overline{P}_{Gi} \\ 0, & \underline{P}_{Gi} > P_{Gi}^t \text{ 或 } P_{Gi}^t > \overline{P}_{Gi} \end{cases} \quad (9)$$

$$u^t = \begin{cases} 1 \\ 0 \\ -1 \end{cases} \quad (10)$$

$$[u^t - u^{t-1}]^2 [T^{t-1} - T_{\min}] \geq 0 \quad (11)$$

式中： $m = 1, \dots, N$ ； $t = 1, 2, \dots, 600N / \Delta t$ ； $i \in S_G$ ；

$K_{CPS2} = \frac{1}{600 / \Delta t} \sum_{t=600/\Delta t+1}^{600/\Delta t} (10B \Delta f^t + \Delta P_T^t)$  为 CPS2 指

标； $L_{10}$  为 CPS2 考核指标值； $\Delta P_T^t$  为联络线功率

偏差； $P_{Gi}^t = P_{Gi}^0 + \sum_{k=1}^t u^k w_i^k R_{Gi}$  为第  $i$  台 AGC 机组在

第  $t$  时刻的有功出力； $T_{\min}$  为最小加减速时间； $T^{t-1}$  为 AGC 机组在第  $t-1$  时刻连续加减速时间。

### 3 互联电网 CPS 标准下最优 AGC 控制策略的求解算法

#### 3.1 含互补约束的非线性规划问题

互联电网 CPS 标准下的最优 AGC 控制策略是一个包含互补约束条件的大型混合整数非线性规划问题，整数变量表示为互补约束条件形式，为式 (9)~(10)，因此必须将非线性互补约束模型引入到求解算法当中。

互补约束的数学规划问题 (mathematical programs with complementarity constraints, MPCCs)<sup>[16-21]</sup> 的数学描述为

$$\begin{cases} \min f(\mathbf{x}) \\ \text{s.t. } \mathbf{h}(\mathbf{x}) = 0 \\ \underline{\mathbf{g}} \leq \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \overline{\mathbf{g}} \\ 0 \leq \mathbf{x}_1 \perp \mathbf{x}_2 \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中： $0 \leq \mathbf{x}_1 \perp \mathbf{x}_2 \geq 0$  为互补约束条件； $\mathbf{x} = (\mathbf{x}_0, \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$ ， $\mathbf{x}_0 \in R^n$ ， $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2 \in R^p$ 。互补约束表示的逻辑关系如下： $\mathbf{x}_1 \geq 0$ ， $\mathbf{x}_2 \geq 0$ ，同时  $x_{1i} = 0$  或  $x_{2i} = 0$ ， $i = 1, \dots, p$ 。

由于非线性互补约束条件违反了在可行点上的 Mangasarian-Fromovitz 约束条件 (Mangasarian Fromovitz constraints qualification, MFCQ)，当  $\mathbf{x}_1$  和  $\mathbf{x}_2$  在界时，无法使其脱离边界的束缚，造成收敛困难，所以常规的非线性规划算法包括现代内点算法都很难直接求解。当前，将互补约束的非线性规划问题转化成常规的非线性规划问题一般用松弛法<sup>[16,18,20,22]</sup>：引入松弛参数  $\varepsilon$ ，在每次迭代后更新，随  $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$  变小而逐渐趋于 0。但随着  $\varepsilon$  越小，解域越小，数值性将会变差。式 (12) 转化为

$$\begin{cases} \min f(\mathbf{x}) \\ \text{s.t. } \mathbf{h}(\mathbf{x}) = 0 \\ \underline{\mathbf{g}} \leq \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \overline{\mathbf{g}} \\ \mathbf{x}_1 \geq 0 \\ \mathbf{x}_2 \geq 0 \\ -\varepsilon \leq x_{1i} x_{2i} \leq \varepsilon, i = 1, \dots, p \end{cases} \quad (13)$$

#### 3.2 本问题的求解算法

本问题中有 2 个约束条件是要用互补约束策略进行处理，转化成常规的非线性规划问题，以便很

好地利用现代内点算法<sup>[23]</sup>进行计算。

互补约束条件式(9)可转化为

$$\begin{cases} 0 \leq w'_i \leq 1 \\ -\varepsilon_{1w} \leq (\bar{P}_{Gi} - P'_{Gi})(P'_{Gi} - \underline{P}_{Gi})(1 - w'_i) \leq \varepsilon_{1w} \\ -\varepsilon_{2w} \leq (P'_{Gi} - \bar{P}_{Gi})(\underline{P}_{Gi} - P'_{Gi})w'_i \leq \varepsilon_{2w} \end{cases} \quad (14)$$

式中： $i \in S_G; t = 1, 2, \dots, 600N / \Delta t$ 。

互补约束条件式(10)可转化为

$$\begin{cases} -1 \leq u' \leq 1 \\ -\varepsilon_u \leq u'(1 - u')(1 + u') \leq \varepsilon_u \end{cases} \quad (15)$$

式中  $t = 1, 2, \dots, 600N / \Delta t$ 。

### 4 测试算例

测试的内容包括：

1) 最优模式。由给定时间段的系统已知数据以最优 AGC 控制策略计算的下令情况及 CPS 指标值。

2) 3G 模式。由 1) 计算结果按最小二乘法反推  $G_p$ 、 $G_I$ 、 $G_{CPS}$  数据，根据给定时间段的系统已知数据全息仿真南瑞调度系统的 AGC 控制策略的工作方式。

3) 实际模式。由已知的 ACE 等各值按照南瑞调度系统工作方式全息仿真的下令情况及 CPS 指标值，各分量增益系数取的是广西实际系统运行的增益系数值  $G_p = 1, G_I = 0.5, G_{CPS} = 10.5$ 。

本文所提算法在 Dell(2.8GHz, 512MB)/PC 上用 Matlab7.1 编程实现。数据样本为广西电网 2007-03-09 全天实时运行数据。所投入的 AGC 机组为广西大化电厂 2 台 114 MW 机组，广西右江电厂 1 台 135 MW 机组，AGC 机组的调节速率为线性，3 台机均是 70 MW/min·台。CPS 每 10 min 为 1 个考核点，全天 144 个考核点。计算精度为  $10^{-6}$ 。

表 1 比较了各种模式下 AGC 机组下令次数和 CPS 考核情况。 $T_1$  为  $K_{CPS1} \geq 200\%$  的考核点总数， $T_2$  为满足  $100\% \leq K_{CPS1} < 200\%$  和  $K_{CPS2} \leq L_{10}$  的考核点总数，3 G 模式推出的各分量增益系数分别为  $G_p = 0.2944, G_I = 0, G_{CPS} = 9.47$ 。

图 2 展示了 3 种模式下 CPS1 的考核情况，可看到，在最优模式下，CPS1 指标被很好地控制在

1.25~2.85 之间，避免了 CPS1 值过高而带来的经济性差或 CPS1 值过低而被考核。同时，由 3 G 模式推出的实际系统增益系数进行的全息仿真，效果也明显好于实际模式。图 3 展示了 3 种模式下 CPS2 的考核情况，在最优模式下，CPS2 指标全被控制在给定的范围里。

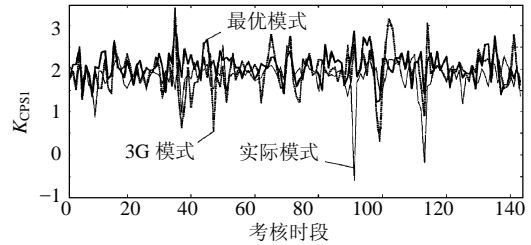


图 2 3 种模式下的 CPS1 趋势图  
Fig. 2 Curves of CPS1 in three patterns

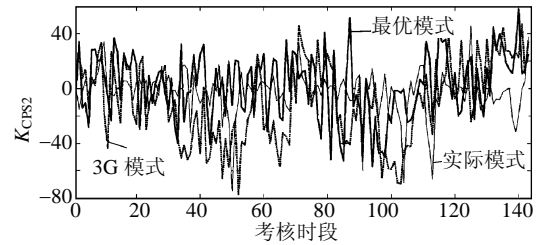


图 3 3 种模式下的 CPS2 趋势图  
Fig. 3 Curves of CPS2 in three patterns

3 种模式下仿真表明：

1) 在最优模式下，CPS1 和 CPS2 指标有了明显提升，合格率由原来的 97.2% 升为 100%，消除了 4 个不合格点。

2) 在最优模式下，运行系统的 CPS 指标形态得到了非常好的控制。在保证安全稳定运行的同时，保证了最大的经济性。

3) 最优模式和实际模式相比，下令次数减少 64.3%，避免了机组反复操作和系统振荡。

4) 通过和 3G 模式的比较，对于广西电网，原有经验增益系数定得过高，实为过调节，应该根据控制区域自身的特点进行调整，即可在现有控制策略的基础上，不须大改动就取得较好的效果。该方法已在广西电网应用。

同时，所提算法具有计算快速、鲁棒性好等特点。以计算 2007-03-09 的 08:40—08:50 时段和 20:30—20:40 时段为例，图 4 给出了在最优模式中 CPS1 指标最优为目标函数计算值，可看到在有限迭代后，CPS1 的值能稳定收敛在可行范围内。图 5 展示了同时段互补间隙的收敛情况，说明该算法具有良好的收敛性。最优模式每次计算的时间不超过 0.5 s。

表 1 2007-03-09 全天的下令和 CPS 考核情况比较  
Tab. 1 Comparison results for the orders and CPS

测试内容	下令次数	$T_1$	$T_2$	总合格率/%
最优模式	335	86	58	100
3G 模式	220	60	80	97.2
实际模式	943	41	99	97.2

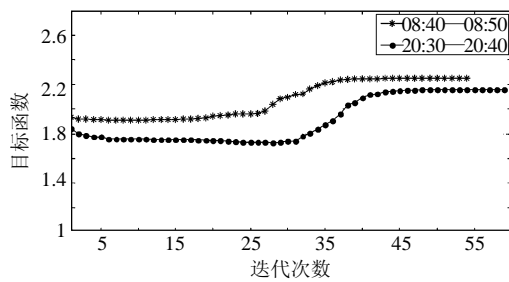


图4 目标函数随迭代次数变化趋势图

Fig. 4 Curves of objective function with iterations

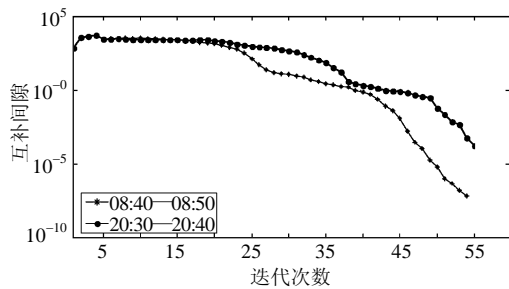


图5 互补约束随迭代次数变化趋势图

Fig. 5 Curves of complementary gaps with iterations

## 5 结论

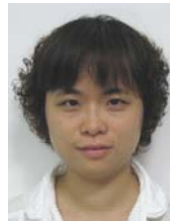
本文提出了基于最优化理论的互联电网 CPS 标准下确定 AGC 控制策略的数学模型, 导出基于现代内点理论的含互补约束条件的非线性规划算法。该模型综合考虑了电力系统的安全性和经济性、CPS 考核标准、机组的调节特性等多方面条件约束, 求出在各种负荷情况下 AGC 最优控制运行方式, 提高对电网 AGC 机组的控制水平, 提高水能利用率, 降低发电成本, 提高电网的安全、经济运行水平, 实现电网运行的精细化管理。模型是广西电网 AGC 控制为设计样本, 但同样适合其他各大电网 AGC 控制。2007 年 6 月, 本项目顺利通过了南方电网广西公司组织的鉴定, 投入开环运行。

## 参考文献

- [1] Jaleeli N, VanSlyck L S. NERC's new control performance standards[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1999, 14(3): 1092-1099.
- [2] Maruejols N, Margotin T, Trotignon M, et al. Measurement of the load frequency control system service: comparison between American and European indicators[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2000, 15(4): 1382-1387.
- [3] Rerkpreedapong D, Atic N, Feliachi A. Economy oriented model predictive load frequency control[C]. Large Engineering Systems Conference on Power Engineering, Montreal, Quebec, Canada, 2003.
- [4] Atic N, Rerkpreedapong D, Hasanovic A, et al. NERC compliant decentralized load frequency control design using model predictive control[C]. Power Engineering Society General Meeting, Toronto, Canada, 2003.
- [5] Tetsuo S, Dynamic K E. Analysis of generation control performance standards[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2002, 17(3): 806-811.
- [6] Yao M J, Shoultz R R, Kelm R. AGC logic based on NERC's new control performance standard and disturbance control standard[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2000, 15(2): 852-857.
- [7] 成海彦, 黄定成, 郑广辉, 等. TBC 方式下河北南部电网的 AGC 控制策略分析[J]. 电网技术, 2005, 29(18): 53-55.  
Cheng Haiyan, Huang Dingcheng, Zheng Guanghui, et al. Analysis on control strategy of AGC in southern Heibei power grid under tie-line load and frequency bias control mode[J]. Power System Technology, 2005, 29(18): 53-55(in Chinese).
- [8] 汪德星, 杨立兵. 自动发电控制(AGC)技术在华东电力系统中的应用[J]. 华东电力, 2005, 33(1): 24-29.  
Wang Dexing, Yang Libing. Application of AGC technology in East China electric power system[J]. East China Electric Power, 2005, 33(1): 24-29(in Chinese).
- [9] 唐跃中, 张王俊, 张健, 等. 基于CPS的AGC控制策略研究[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 75-79.  
Tang Yuezhong, Zhang Wangjun, Zhang Jian, et al. Research on control performance standard based control strategy for AGC[J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 75-79(in Chinese).
- [10] 林静怀, 黄文英. 控制策略标准在福建区域联络线控制与考核中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(8): 51-54.  
Lin Jinghui, Huang Wenying. Application of control performance standard in control and valuation of area tie-line in Fujian power system[J]. Power System Technology, 2004, 28(8): 51-54(in Chinese).
- [11] 钱玉妹, 刘华伟, 刘金官. 频率系数对省际联络线电力电量考核影响分析[J]. 江苏电机工程, 2004, 23(5): 18-20.  
Qian Yumei, Liu Huawei, Liu Jinguan. Analysis of the influence of frequency deviation on electricity examination on inter-provinces lines[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2004, 23(5): 18-20(in Chinese).
- [12] 高宗和, 滕贤亮, 张小白. 互联电网CPS标准下的自动发电控制策略[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 40-44.  
Gao Zonghe, Teng Xianliang, Zhang Xiaobai. Automatic generation control strategy under control performance standard for interconnected power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 40-44(in Chinese).
- [13] 马飞, 陈雪波, 李小华. 改进的粒子群算法在电力系统AGC中的应用[J]. 控制工程, 2005(S2): 52-55.  
Ma Fei, Chen Xuebo, Li Xiaohua. Application of improved particle swarm optimization algorithm to AGC of power systems[J]. Control Engineering of China, 2005(S2): 52-55(in Chinese).
- [14] 郭钰锋, 于达仁. CPS在线计算的递推算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 73-77.  
Guo Yufeng, Yu Daren. The recurrence algorithm of CPS online computation[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 73-77(in Chinese).
- [15] 高宗和, 滕贤亮, 涂力群. 互联电网 AGC 分层控制与 CPS 控制策略[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(1): 78-81.  
Gao Zonghe, Teng Xianliang, Tu Liqun. Hierarchical AGC mode and CPS control strategy for interconnected power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(1): 78-81(in Chinese).
- [16] Leyffer S, Gabriel L C, Nocedal J. Interior methods for mathematical programs with complementarity constraints[J]. SIAM Journal on

- Optimization, 2006, 17(1): 52-77.
- [17] Leyffer S. Complementarity constraints as nonlinear equations: theory and numerical experience[J]. Optimization with Multivalued Mappings, 2006, 2(2): 169-208.
- [18] Raghunathan A U, Biegler L T. An interior point method for mathematical programs with complementarity constraints (MPCCs) [J]. SIAM Journal on Optimization, 2005, 15(3): 720-750.
- [19] Fletcher R, Leyffer S. Numerical experience with solving MPECs as NLPs[J]. Optimization Methods and Software, 2004, 19(1): 15-40.
- [20] Ralph D, Wright S J. Some properties of regularization and penalization schemes for MPECs[J]. Optimization Methods and Software, 2004, 19(5): 527-556.
- [21] Leyffer S. A note on multiobjective optimization and complementarity constraints[R]. Argonne, USA: Mathematics and Computer Science Division Argonne National Laboratory, 2005.
- [22] Rosehart W, Roman C, Schellenberg A. Optimal power flow with complementarity constraints[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2005, 20(2): 813-823.
- [23] Forsgren A, Gill P E, Wright M H. Interior methods for nonlinear

optimization[J]. SIAM Review, 2002, 44(5): 525-597.



李滨

收稿日期: 2007-12-12。

作者简介:

李滨(1975—), 女, 博士研究生, 讲师, 研究方向为电力系统最优化, [tftlb@163.com](mailto:tftlb@163.com);

韦化(1954—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为优化理论在电力系统中的应用;

农蔚涛(1979—), 男, 工程师, 研究方向为电力系统分析计算;

李林峰(1965—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统调度自动化;

吴阿琴(1980—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统最优化;

阳育德(1971—), 男, 博士研究生, 副教授, 研究方向为电力系统最优化。

(编辑 谷子)