

# 伴随 AGC 机组控制过程的潮流模型与算法

蒋哲<sup>1</sup>, 韩学山<sup>1</sup>, 王孟夏<sup>1</sup>, 康凯<sup>2</sup>

(1. 山东大学电气工程学院, 山东省济南市 250061; 2. 山东烟台供电公司, 山东省烟台市 260041)

## Model and Algorithm for Power Flow Accompanying With Automatic Generation Control Process

JIANG Zhe<sup>1</sup>, HAN Xue-shan<sup>1</sup>, WANG Meng-xia<sup>1</sup>, KANG Kai<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong Province, China;

2. Shandong Yantai Electric Power Company, Yantai 260041, Shandong Province, China)

**ABSTRACT:** It is difficult to handle power flow status during the process of automatic generation control (AGC). For this reason, a model of power flow accompanying with the control process of AGC unit and corresponding algorithm are built according to the base power and participation factor of AGC unit determined by secure economic dispatching and the nodal distribution factor provided by super-short-term load forecasting and the variation law of power factor, as well as combining with the concepts of dynamic power flow and electro-thermal coupling power flow and using real-time area control error (ACE) signal. The proposed model and algorithm are verified by practical calculation examples. Verification results show that the calculation of power flow status is very important and it is conducive to the tracking of temperature change of transmission line and the monitoring of security performance of power system during the tracking of AGC process.

**KEY WORDS:** power system; automatic generation control (AGC); dynamic power flow; electro-thermal coupling; nodal distribution factor

**摘要:** 针对自动发电控制(automatic generation control, AGC)过程中难以把握潮流状态的问题, 在安全经济调度确定的AGC机组的基点、参与因子, 以及超短期负荷预报提供节点分配因子和功率因数变化规律的基础上, 结合动态潮流、电热耦合潮流等概念, 利用实时区域控制偏差(area control error, ACE)信号, 建立了伴随AGC机组控制过程的潮流模型和算法。实际算例对所提模型和算法进行了验证, 结果表明, 在跟踪AGC控制过程中计算潮流非常重要, 这对于跟踪输电线路温度变化, 监视系统安全性能等都是有益的。

**关键词:** 电力系统; 自动发电控制; 动态潮流; 电热耦合; 节点分配因子

## 0 引言

自动发电控制(automatic generation control, AGC)是电力系统调度自动化实现的核心和基础<sup>[1-3]</sup>。自动发电控制方式有定频率、定联络线计划功率及混合控制3种。但不管采用何种控制方式, 其核心是区域控制偏差(area control error, ACE)信号, 以及该信号由AGC机组应对的策略。就AGC机组应对策略而言, 关键是机组基点(调度基点)的设置及响应ACE信号的比例(称为参与因子)<sup>[4-5]</sup>。自动发电控制必然是滞后性的控制过程, 滞后的时间及频率变化的快慢是衡量自动发电控制品质的尺度<sup>[6]</sup>。这一尺度与AGC机组的数量、基点和参与因子的决策密切相关<sup>[7-8]</sup>。

由于负荷预报的偏差以及负荷偶发性扰动, 自动发电控制过程中系统频率出现波动在所难免。尤其是随着间歇性能源发电(如风电等)量的不断增加, 该频率波动可能对电力系统的频率质量构成威胁。目前AGC机组的基点和参与因子在一段时间内(如10 min左右)都是不变的, 由此自动发电控制失调的可能性就必然存在<sup>[9]</sup>。

一直以来, 所谓在线的潮流或状态估计, 一般10 min进行一次。这在对负荷变动规律把握很好的前提下, 是符合实际的。然而由于间歇性电源的存在, 潮流变动可能超越人们的把握, 由此更实时地对其计算或估计是有必要的。就这段时间间隔的潮流计算而言, 之所以对此问题没有研究, 难点在于这一时间间隔内的各节点负荷变化规律难以准确确定。现在看来, 由于电网依据不同电压等级可以划分为不同的层次, 不同层次之间、同层次不同区域之间的节点负荷有较强的牵制规律性。文献[10]

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50677036)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50677036).

根据这一思想,利用系统有功功率负荷总量和节点参数量(节点分配因子和节点功率因数),提出了计及节点的超短期有功功率和无功功率负荷的预测方法。借用上述思想,本文试图解决伴随自动发电控制过程的潮流计算问题。

文献[11]基于电热协调的思想,将输电元件温度变化纳入到电力系统状态量中,提出电热耦合潮流算法,其用意在于将输电元件传输功率限制转化为最大允许温度的限制,扩大调度域和挖掘输电元件潜在的输电能力。这一电热耦合潮流的研究与本文解决的问题在思想上是一致的,只不过此文是按常规潮流进行的理论研究。然而动态潮流的概念<sup>[12-16]</sup>和解法符合本文处理问题的思想,只是动态潮流的焦点是多平衡母线处理的研究,属于静态范畴,其动态涵义在于多平衡母线。

本文在安全经济调度确定 AGC 机组基点和参与因子的前提下,依据考虑节点的超短期有功和无功负荷预测方法及提供的节点参数量,利用实时的 ACE 信号规律,结合电热耦合潮流理论,建立伴随 AGC 机组控制过程的潮流模型和算法,并给出实际系统的算例分析。

## 1 电热耦合潮流

正常运行状态下,输电线路的热微分方程<sup>[17]</sup>中发热项(载流和日照)和散热项(对流和辐射)相等,温度对时间的微分为 0,温度维持不变。当系统发生扰动时,根据线路热微分方程,载流的变化会引起线路温度的动态变化。线路电阻是温度的函数,所以系统网络参数会随温度发生变化,进而影响系统潮流分布。可见潮流和温度以电阻为纽带耦合在一起,这就是所谓的电热耦合潮流,其修正方程可表达为

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial V} V & \frac{\partial \Delta P}{\partial T} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial V} V & \frac{\partial \Delta Q}{\partial T} \\ \frac{\partial \Delta E}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta E}{\partial V} V & \frac{\partial \Delta E}{\partial T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \frac{\Delta V}{V} \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $\Delta \theta$ 、 $\Delta V$  和  $\Delta T$  为电压相角、电压幅值和温度的修正列向量;  $\Delta P$ 、 $\Delta Q$  为有功、无功的偏差向量;  $\Delta E$  为将线路热微分方程离散化处理后得到的温度偏差向量。

式(1)中前 2 行代表潮流方程,最后 1 行代表线路的热微分方程,具体推导可见文献[11]。

## 2 伴随 AGC 机组控制过程的潮流

实际系统中,由于预报的偏差和负荷的偶发性扰动,系统出现不平衡功率时,AGC 机组会调整其输出功率来平衡负荷。无论是电热耦合潮流或是常规潮流,都是基于单平衡节点思想,面临实时环境无法直接使用。本文的潮流基于动态潮流的多平衡节点思想,更加符合实际。这样只需对式(1)中的功率偏差表达予以修正,而形式不变。

ACE 能够实时地反映负荷的总体波动,但每个节点的负荷情况并不明确,这样在 AGC 执行过程中,无法实现潮流跟踪。然而利用超短期负荷预测提供的有功分配因子和功率因数可以由负荷总体的波动得到各个节点的有功和无功负荷的变化情况。系统负荷发生扰动后,各节点的负荷可由系统量测值修正为

$$\begin{cases} P_{Di} = P_{Di}^0 + \gamma_i \left( \sum_{j=1}^{n_g} P_{Gj}^m - A_{CE} - \sum_{j=1}^{n_g} P_{Gj}^B \right) \\ Q_{Di} = Q_{Di}^0 + \gamma_i \left( \sum_{j=1}^{n_g} P_{Gj}^m - A_{CE} - \sum_{j=1}^{n_g} P_{Gj}^B \right) \tan \varphi_i \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $P_{Di}^0$  和  $Q_{Di}^0$  为超短期负荷预测到的负荷值;  $n_g$  为总发电机组数;  $\sum_{j=1}^{n_g} P_{Gj}^m$  为各发电机输出功率的量测值之和;  $\sum_{j=1}^{n_g} P_{Gj}^B$  为经济调度得到的机组输出功率之和(基值之和);  $\gamma_i$  和  $\varphi_i$  为节点  $i$  处负荷对应的节点分配因子和功率因数角。

式(1)中,有功、无功的偏差向量可变为

$$\Delta P_i = P_{Gi} - P_{Di} - \alpha_i P_A - V_i \sum_{j=1}^n V_j \{ G_{ij}[T(t)] \cos \theta_{ij} + B_{ij}[T(t)] \sin \theta_{ij} \} \quad (3)$$

$$\Delta Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} - V_i \sum_{j=1}^n V_j \{ G_{ij}[T(t)] \sin \theta_{ij} - B_{ij}[T(t)] \cos \theta_{ij} \} \quad (4)$$

式中:  $\alpha_i$  为节点  $i$  处发电机组分摊不平衡功率的系数,即机组的参与因子;  $G_{ij}[T(t)]$  和  $B_{ij}[T(t)]$  为节点导纳矩阵对应元素的实部和虚部,二者均为温度的函数,  $t$  为时间;  $n$  为系统节点总数;  $P_A$  为不平衡功率量,可以表达为

$$P_A = \sum_{j=1}^{n_g} P_{Gj} - \sum_{k=1}^{n_l} P_{Dk} - P_{\text{loss}} \quad (5)$$

$$P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^n \{ V_i \sum_{j=1}^n V_j [G_{ij}(T(t)) \cos \theta_{ij} + B_{ij}(T(t)) \sin \theta_{ij}] \} \quad (6)$$

式中:  $n_l$  为总的负荷节点数;  $P_{\text{loss}}$  为系统的网损有

功率。

由此, 式(1)(3)(4)即为伴随 AGC 机组控制过程的潮流修正方程。考虑到 AGC 机组响应时间为分钟级, 本文忽略其暂态变化过程。每分钟由监视控制和数据集(supervisory control and data acquisition, SCADA)提供一次系统的量测数据, 根据式(2)修正系统负荷值, 然后进行本文的潮流计算, 其在线运行示意如图 1 所示。每分钟对负荷值进行修正之后, 出现发电量与负荷值的不匹配, 从而 AGC 机组会依据相应的控制策略调整其输出功率, 这势必会造成系统运行模式的改变, 从而引起输电线路温度的动态变化过程。本文潮流可以在负荷值修正之后跟踪温度的连续变化过程, 直至下一分钟再次进行负荷值的修正。可见, 本文潮流不但实现了 10 min 内系统潮流状态的观测, 而且可以跟踪相邻运行模式之间温度的连续变化过程。

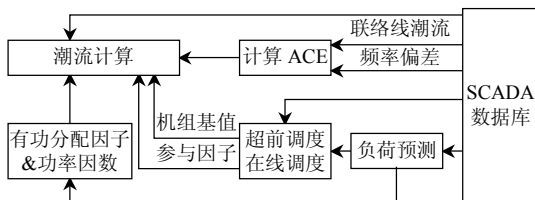


图 1 在线运行结构

Fig. 1 Structure of online operation

### 3 算法处理

本文潮流随时间连续变化, 其运算量较大, 因而对计算速度要求较高, 否则将无参考价值。为满足这一要求, 本文做如下 2 步有效处理。

#### 1) 初值的选取。

初值的选取对潮流计算的迭代次数有较大影响。每个时间断面上的潮流计算, 可以避免使用常规的平启动, 而采用前一个时间断面上的潮流结果作为本次计算的初值。一般情况下相邻时间断面的潮流结果变化不大, 所以该处理可以显著减少每个时间断面上潮流计算的迭代次数, 加快计算速度。

#### 2) 潮流、温度迭代过程中的解耦处理。

由于温度变化引起电阻的变化很小, 潮流迭代计算过程中有功和无功变化对温度不敏感, 可以将式(1)的迭代修正方程按潮流与温度解耦为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial V} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \\ \Delta E = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta E}{\partial I} & \frac{\partial \Delta E}{\partial T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I \\ \Delta T \end{bmatrix} \end{cases} \quad (7)$$

这样每次迭代过程中电流的修正量  $\Delta I$  可以用  $\Delta V$ 、 $\Delta \theta$  间接求得。矩阵  $\frac{\partial \Delta E}{\partial I}$  和  $\frac{\partial \Delta E}{\partial T}$  均为对角阵, 减少了矩阵相乘和求逆的运算量。在计算过程中, 将潮流和温度解耦后, 单个时间断面的计算量和常规潮流相比, 计算量增加并不明显。

经过以上 2 点处理后, 伴随 AGC 机组控制过程的潮流计算效率有所提高, 其迭代过程如下:

- 1) 根据式(2)修正负荷。
- 2)  $t$  时刻, 令  $K_P=0$ ,  $K_T=0$ , 计算  $\Delta P$ 、 $\Delta Q$  是否满足精度。若满足则转步骤 4); 否则转步骤 3)。
- 3) 求解  $\Delta \theta$  和  $\Delta V$ , 并修正  $\theta$  和  $V$ , 令  $K_P=1$ 。
- 4) 计算  $\Delta E$  是否满足精度, 若满足精度则转步骤 6); 否则转步骤 5)。
- 5) 求解  $\Delta T$ , 并修正  $T(t)$ , 用  $T(t)$  修正网络参数  $G[T(t)]$  和  $B[T(t)]$ , 令  $K_T=1$ 。
- 6) 若  $K_P$ 、 $K_T$  不全为 0 则转步骤 2); 否则转步骤 7)。

7) 判断  $t$  是否达到设定的结束时间, 是则转步骤 1); 否则令  $t=t+\Delta t$ , 转步骤 2)。

### 4 实例分析

由前文分析, 假设伴随 AGC 控制过程的潮流为每分钟执行一次, 每次延续 60 s 的温度变化轨迹(考虑一个运行模式下的温度变化过程)。为验证该算法的计算时间能够适应在线应用的要求, 本文在 P4 2.8 GHz 的计算机上对 IEEE 14、IEEE 30 和 IEEE 118 节点系统进行了仿真, 计算时间如表 1 所示。由表 1 可见, 本文算法的计算时间随系统规模的增加而以小于线性正比的关系增加。

表 1 计算时间

Tab. 1 Time of calculation

项目	IEEE 14	IEEE 30	IEEE 118
CPU 时间/ms	16	32	78
差分步长/s	10	10	10
仿真时间/s	60	60	60
精度	$10^{-5}$	$10^{-5}$	$10^{-5}$

下面以山东 500 kV 电网为例对本文提出的模型和算法予以验证。图 2 给出了山东电网 500 kV 网络结构, 其中有 8 台等值发电机, 13 个等值负荷。该网络基本覆盖了全省各地市, 结构清晰, 发电主要分布在西部地区, 负荷主要分布在胶济铁路沿线和东部沿海地区, 整体呈现西电东送之势。其中节点 6 处有并网风电场, 山东参与 AGC 调节的机组均为煤电机组。

为简单说明问题, 本文选取 2008 年 7 月 25 日

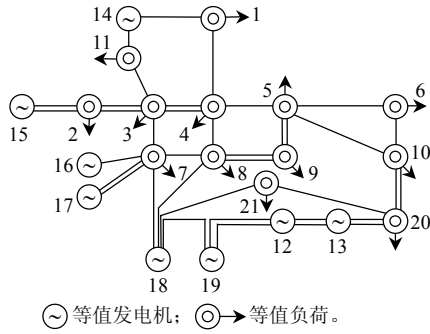


图2 山东电网500kV网络结构

Fig. 2 Structure of Shandong power grid 500 kV

山东电网500kV的运行数据,以实际负荷数据和给定的发电机参与因子作为原始数据。超短期负荷预报提供节点分配因子和功率因数,每min的ACE信号由超短期负荷预报的偏差确定,8台发电机均为AGC机组。表2给出了输电线路热微分方程的相关参数。

表2 线路热动态平衡方程参数

Tab. 2 Coefficient of line thermal behavior equation

$q_s/(W/m)$	$A_s/(W/m \cdot ^\circ C)$	$A_r/(W/m \cdot ^\circ C)$	$\beta/(\Omega \cdot ^\circ C)$	$T_a/^\circ C$
14.08	1.03	$2.5 \times 10^{-9}$	0.003 9	32

选取早晨负荷快速攀升的场景,假定当前时刻为第10min。在早上高峰运行模式下,负荷迅速攀升。在0~10min时段负荷预报值较系统实际负荷值偏低,随着负荷值的增加,8台AGC机组按照给定的参与因子自动调整输出功率。各节点负荷值除节点6外均单调上升。由于节点6含风电场,故负荷值在上升过程中出现小幅波动。

按上述条件进行计算,图3和4分别给出了部分负荷节点的电压幅值和相角的变化曲线。在前10min内,节点6的电压幅值和相角随其负荷变化出现一定波动,由于节点5和10距节点6的电气距离较近,其电压幅值和相角也相应出现一定波动。而节点8和11距节点6的电气距离较远,所以其电压幅值和相角单调下降,未出现波动。

图5给出了其中7条温升较为严重的输电线路

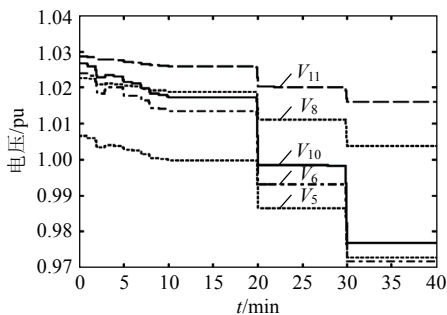


图3 电压幅值变化曲线

Fig. 3 Curve of voltage amplitude fluctuation

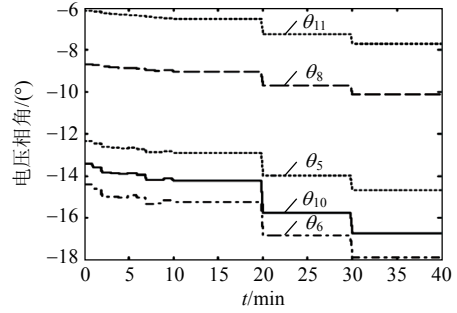


图4 电压相角变化曲线

Fig. 4 Curve of voltage angle fluctuation

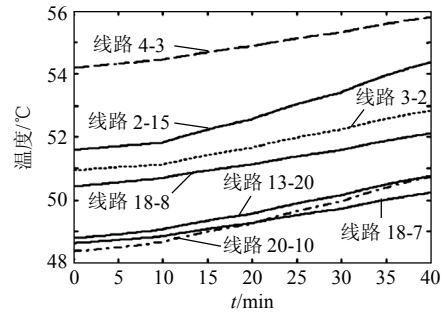


图5 输电线路温度变化曲线

Fig. 5 Curve of transmission line temperature fluctuation

每min内的温度变化轨迹。且根据超前调度结果,图3~5还超前地给出了未来30min节点电压幅值、相角和输电线路温度的变化轨迹,供调度员参考。由图5可见,在高峰运行模式下,负荷的快速增长可能造成某些输电线路温度发生较大变化,应该予以重视。

## 5 结论

1) 本文潮流是围绕AGC机组控制过程的自动潮流跟踪。它对系统安全的监视及校正是有利的。

2) 本文保留了传统潮流计算的迭代格式,通过输电元件的载流和温度的耦合实现了电与热的衔接与协调,且有较高的计算速度,符合实际输电线路温度追踪,使电热耦合潮流进一步与实际接近。

3) 本文潮流不但实现了潮流、输电线路温度的连续跟踪,而且如果与超前调度有机结合,可给出输电线路温度未来的变化规律,这为调度员关注关键输电元件提供了有效依据。

## 参考文献

[1] 于尔铿,刘广一,周京阳,等. 能量管理系统[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 92-98.  
 [2] 刘永奇,韩福坤. 华北电网自动发电控制综述[J]. 电网技术, 2005, 29(18): 1-5.  
 Liu Yongqi, Han Fukun. A survey on automatic generation control system in North China power grid[J]. Power System Technology, 2005, 29(18): 1-5(in Chinese).

- [3] 刘维烈. 电力系统调频与自动发电控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006: 3-27.
- [4] 赵泰峰, 孙继杰. 调度主站 AGC 软件负荷分配的研究[J]. 电网技术, 2005, 29(18): 46-52.  
Zhao Taifeng, Sun Jijie. Research on electric grid dispatching center age software load allocation[J]. Power System Technology, 2005, 29(18): 46-52(in Chinese).
- [5] 杨小煜, 沈松林, 黄文伟, 等. 多区域自动发电控制软件的开发与应用[J]. 电网技术, 2005, 27(7): 25-31.  
Yang Xiaoyu, Shen Songlin, Huang Wenwei, et al. Development and application of multi-area automatic generation control software[J]. Power System Technology, 2005, 27(7): 25-31(in Chinese).
- [6] 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, 2005, 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, 2005, 28(21): 75-79(in Chinese).
- [7] 郭勇, 朱长胜. TBC 方式下改善蒙西电网 AGC 控制性能的方法[J]. 电网技术, 2005, 29(18): 42-45.  
Guo Yong, Zhu Changsheng. Method of improving the AGC's performance under the TBC's mode about Inner Mongolia west power network[J]. Power System Technology, 2005, 29(18): 42-45(in Chinese).
- [8] 周接英, 张伯明, 郭玉金, 等. 火电 AGC 机组超前控制策略[J]. 电网技术, 2005, 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, 2005, 29(21): 57-60(in Chinese).
- [9] 张小白, 高宗和, 钱玉妹, 等. 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): 55-59.  
Zhang Xiaobai, Gao Zonghe, Qian Yumei, et al. Implementation of preventive and remedial control for tie line overload by use of automatic generation control[J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 55-59(in Chinese).
- [10] 韩力, 韩学山, 负志皓, 等. 多节点超短期负荷预报方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(21): 30-34.  
Han Li, Han Xueshan, Yun Zhihao, et al. A method for ultra-short term multi-node load forecasting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(21): 30-34(in Chinese).
- [11] 王孟夏, 韩学山, 蒋哲, 等. 计及电热耦合的潮流数学模型与算法研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(14): 30-34.  
Wang Mengxia, Han Xueshan, Jiang Zhe, et al. Study on the power flow model accounting for electrothermal coordination and its arithmetic[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(14): 30-34(in Chinese).
- [12] Xu G Y, Galiana F D, Low S. Decoupled economic dispatch using the participation factors load flow[C]. IEEE/PES 1984 Summer Meeting, 1984.
- [13] Ramanathan R, Ramchandani H, Sackett S A. Dynamic load flow technique for power system simulators[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1986, 1(3): 25-30.
- [14] 郎兵. 动态潮流模型在电网调度仿真系统中的应用[J]. 北方交通大学学报, 2002, 26(4): 83-87.  
Lang Bing. Research on dynamic load flow model for power system dispatcher training simulator[J]. Journal of North Jiaotong University, 2002, 26(4): 83-87(in Chinese).
- [15] 崔丽华, 陈根军. 多平衡机潮流计算在调度员潮流中的应用[J]. 广东电力, 2006, 19(9): 13-17.  
Cui Lihua, Chen Genjun. Application of multi-slack load flow calculation in dispatcher power flow[J]. Guangdong Electric Power, 2006, 19(9): 13-17(in Chinese).
- [16] 余小燕, 于继来. 基于有功无功联合调整的动态潮流[J]. 电网技术, 2005, 29(22): 61-65.  
Yu Xiaoyan, Yu Jilai. A dynamic power flow algorithm with joint regulation of active and reactive power[J]. Power System Technology, 2005, 29(22): 61-65(in Chinese).
- [17] 熊信银. 发电厂电气部分[M]. 3 版. 北京: 中国电力出版社, 2004: 55-80.



蒋哲

收稿日期: 2009-07-13。

作者简介:

蒋哲(1985—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制, E-mail: jiangzhe@mail.sdu.edu.cn;

韩学山(1959—), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统优化调度、EMS、电力市场领域的研究和教学工作;

王孟夏(1983—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制;

康凯(1971—), 男, 工程师, 从事电力系统调度运行工作。

(责任编辑 王晔)