

# 基于交易联络线的 TCPAR 的 AGC 频率调节过程研究

李飞, 李咸善, 李洁

(三峡大学电气信息学院, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 以双边交易作为市场环境下的 AGC 的交易模式, 发电和配电公司可以自由签订合同, 也可以跨区域签订用电合同, 通过配电参与矩阵模拟了配电公司与发电公司之间的合同规定。在此背景下, 将 TCPAR (晶闸管控制相角调节器) 安装在联络线上, 参与到 AGC 调节过程中, 建立了考虑和不考虑 TCPAR 的 AGC 动态模型, 分析结果表明, TCPAR 有助于抑制由于电力系统扰动引起的频率和联络线功率的大幅度波动, 从而改善电力系统运行状态, 提高系统稳定性。

**关键词:** 电力市场; 自动发电控制; 配电参与矩阵; 晶闸管控制相角调节器; 频率波动

## AGC frequency regulation with TCPAR under tie-line power change

LI Fei, LI Xian-shan, LI Jie

(College of Electrical Engineering and Information Science, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** This paper takes into account bilateral contracts as the exchange mode under power market. Thus, GENCOs and DISCOs have liberty for contracts, even they may have contracts across their area. The concept of DISCO participation matrix is used to model the contracts between the GENCOs and DISCOs. In this background, TCPAR is installed on the tie-line, joining in the AGC regulation. AGC dynamic models are established without and with TCPAR, simulation results show that TCPAR can introduce good damping of frequency and tie-line power flow oscillations due to the disturbance of power system, and promote the operation condition as well as the stability of the system.

**Key words:** power market; AGC; DISCO participation matrix; TCPAR; frequency oscillations

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)02-0034-06

## 0 引言

20 世纪后期, 随着经济全球化的发展, 以发、输、配企业重组和电力、电量竞争交易为主要特征的电力行业市场化进程正在世界各地迅速展开。电力市场的发展需要良好的环境, 一个安全稳定运行的电力系统是进行电力、电量交易的重要条件。而自动发电控制 (AGC) 对电力系统的安全稳定运行发挥着重要作用, 它表现为提供 AGC 辅助服务。文献[1]对以价格为基础的 AGC 进行了仿真研究, 加入负荷跟踪这一项辅助服务。文献[2]探讨了互联系统中区域频率偏差系数的取值对区域控制误差的影响, 并模拟了市场中可能出现的各种运行状态, 利用此模型能随时进行负荷及发电调整, 达到随时监控系统频率及提高供电质量的效果。在电力市场环境下, 由于厂网分开, 发电, 输电和配电公司可以自由签订合同, 文献[3]将传统的 AGC 模型进行修改, 建立了市场条件下的模型, 并考虑了双

边交易模式。利用配电参与矩阵 DPM 描述了各个市场参与者之间的合同关系。而当前的电力系统正在经历不断的变化和重构, 它所承载的负荷越来越多, 其运行方式也变得多样化, 对输电系统的高效利用变得越来越重要, 电力系统必须灵活地处理各种运行方式之下的稳定性问题。

柔性交流输电系统 (FACTS)<sup>[4]</sup> 的出现为电力系统高效稳定运行提供了一项新兴技术。FACTS 除了可以提高输电能力, 控制线路潮流, 稳定电压幅值和相角等基本功能外, 同时可以稳定 AGC 中由于负荷波动带来的频率和电压幅值的剧烈波动, 提高了电力系统稳定性, 减少了由于频率和电压波动对电力系统造成故障的机会, 使用户可以享用高质量的电能。文献[5]研究了在互联系统中, 利用静止同步串联补偿器 (SSSC) 稳定系统频率波动, 并对 SSSC 进行了控制器的设计。但是目前对 FACTS 与 AGC 协调控制的研究尚少。

TCPAR (晶闸管控制相角调节器) 作为 FACTS

的典型代表器件, 将其安装在联络线上, 与 AGC 协调控制, 通过控制联络线的功率偏差, 进而抑制由于电力系统扰动引起的频率和联络线功率的大幅度波动, 可以改善电力系统的运行状态。

本文分析研究了电力市场下 AGC 模型和计及 TCPAR 的 AGC 模型, 对这两种模型仿真结果的比较分析表明, TCPAR 可对 AGC 调解过程中的频率及联络线功率的震荡幅值有较好的抑制作用, 有利于提高互联系统的频率稳定运行能力。

### 1 电力市场下的 AGC 模型

#### 1.1 市场因素的讨论

本文以双边交易作为市场环境下 AGC 的交易模式, 发电和配电公司可以自由签订合同, 他们甚至可以跨区域签订用电合同。采用配电参与矩阵 (DPM) [3] 表示配电公司 (DISCOs) 与发电公司 (GENCOs) 之间的合同规定, 即各个发电公司对某一配电公司负荷的分配额度。此矩阵的行表示发电公司, 列表示配电公司。每一元素的值代表某一发电公司对某一配电公司承担的负荷额度, 每一列的元素之和为 1。

功率平衡是决定系统频率稳定的主要因素。假定在市场环境下某个区域第  $i$  个发电公司控制误差为  $CE_i$  (Control Error), 其表达式为:

$$CE_i = ACE \cdot apf_i + \left[ \sum_{j \in \text{各个配电公司}} [cpf_{ji} \cdot DF_j] - GF_i \right] \quad (1)$$

式中:  $i$  表示第  $i$  个发电公司;  $apf_i$  为第  $i$  个发电公司参与 AGC 调节因子;  $cpf_{ji}$  为 DPM 矩阵的第  $(i, j)$  个元素;  $DF_j$  为配电网的负荷需求;  $GF_i$  为负荷跟踪下的发电量。

在传统的 AGC 控制中总是由具有 ACE 变量的区域中的 AGC 机组进行二次调整。市场中用负荷签约因子  $cpf_{ji}$  来确定发电机对该负荷的发电合同份额; 第三项为发电公司该时刻发电量; 若负荷  $j$  有违约行为使得该区 ACE 不为零, 则由该负荷所在的区域的发电公司依据因子  $apf_i$  进行分配, 重新调整发电量。如果发电侧没有根据签约因子进行发电, 也会使发电量与需求不平衡, 从而引起系统频率偏差, 此时也应由引起频率变化的区域进行二次调节, 充分体现公平性。在市场中频率偏差系数的选择也会影响系统各个方面的响应速度及调节效率。对于发电公司而言, 控制目标就是让发电偏差在最短时间内减少到零, 也即让式 (1) 的 CE 值调整到自己需要的值, 供需平衡。就整个区域来说, 当各个发电公司的发电量与负荷公司的需求量相等时, 区域的 ACE 值也能降到零值。

#### 1.2 两区域系统的状态空间方程

图 1 所示为电力市场条件下两区域系统的 AGC 结构, 每个区域均含有两个发电公司, 两个配电公司。区域之间通过联络线联系。

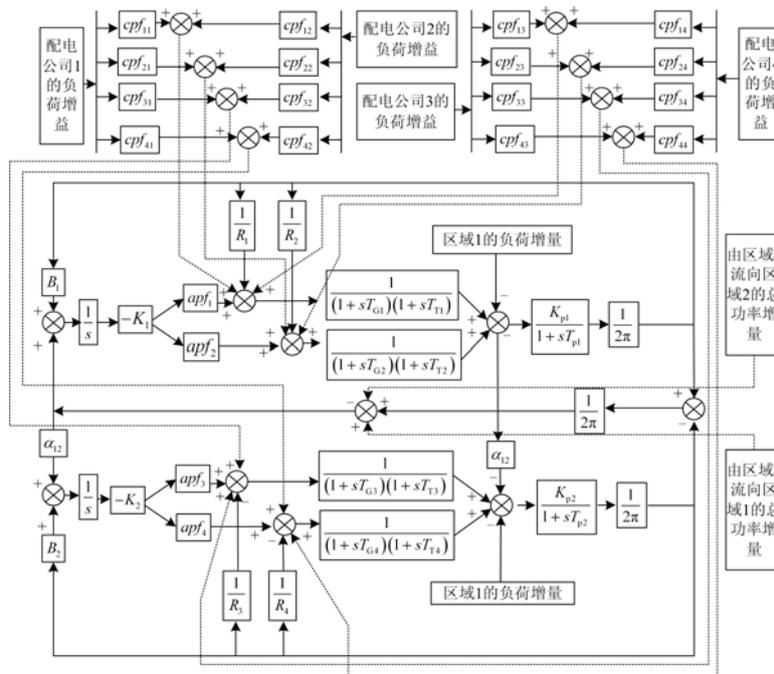


图 1 两区域 AGC 系统框图

Fig.1 AGC framework of two-area system

图 1 中：调速系统的传递函数<sup>[6]</sup>为  $\frac{1}{(1+sT_{Gj})}$ ；汽轮发电机传递函数<sup>[6]</sup>为  $\frac{1}{(1+sT_{Tj})}$ ；系统传递函数<sup>[6]</sup>为  $\frac{K_{pi}}{(1+sT_{pi})}$ 。

该系统的配电参与矩阵为：

$$DPM = \begin{bmatrix} cpf_{11} & cpf_{12} & cpf_{13} & cpf_{14} \\ cpf_{21} & cpf_{22} & cpf_{23} & cpf_{24} \\ cpf_{31} & cpf_{32} & cpf_{33} & cpf_{34} \\ cpf_{41} & cpf_{42} & cpf_{43} & cpf_{44} \end{bmatrix}$$

图 1 中区域控制误差表达式为：

$$ACE_1 = B_1 \Delta f_1 + \Delta P_{tie1-2,偏差}$$

$$ACE_2 = B_2 \Delta f_2 + \alpha_{12} \Delta P_{tie1-2,偏差}$$

而  $\alpha_{12} = -\frac{P_{r1}}{P_{r2}}$  为两区域之间容量转换系数。

$P_{r1}$ ,  $P_{r2}$  分别为两区域的额定容量。当区域容量相等时，其值为-1。 $\Delta P_{tie1-2,偏差}$  为区域联络线功率偏差，其值等于联络线偏差实际值减去计划值。即：

$$\Delta P_{tie1-2,偏差} = \Delta P_{tie1-2,实际} - \Delta P_{tie1-2,计划值}$$

$\Delta P_{tie1-2,实际}$  由联络线功率增量计算表达式得到。

$$\Delta P_{tie1-2,实际} = \frac{T_{12}}{2\pi} (\Delta \omega_1 - \Delta \omega_2)^{[6]}$$

而  $\Delta P_{tie1-2,计划值}$  则是在电力市场下，区域 1 的发电公司承担区域 2 的负荷总量与区域 2 的发电公司承担区域 1 的负荷总量之差。

对于上述两区域中，状态变量记为

$$X = [\Delta \omega_1, \Delta \omega_2, \Delta P_{GV1}, \dots, \Delta P_{GV4},$$

$$\Delta P_{M1}, \dots, \Delta P_{M4}, \int ACE_1, \int ACE_2, \Delta P_{tie}]^T$$

其中： $\Delta \omega_1, \Delta \omega_2$  为各区域频率偏差； $\Delta P_{Mi}, \Delta P_{GVi}$  ( $i=1,2,3,4$ ) 表示图 1 中汽轮发电机环节的输入输出； $\Delta P_{Mi}$  表示发电公司的机械功率偏差； $\Delta P_{GVi}$  表示发电公司的电磁功率偏差； $ACE_1, ACE_2$  表示区域控制误差； $\Delta P_{tie}$  表示联络线功率偏差。

该系统的状态方程如下：

$$\Delta \dot{\omega}_i = -\frac{1}{T_{pi}} \Delta \omega_i + \frac{K_{pi}}{T_{pi}} (\sum_{j \in Ni} \Delta P_{GVj} - \sum_{j \in Mi} \Delta P_{Lj} - \Delta P_{tie1-2}) \quad i=1,2 \quad (2)$$

$$\Delta \dot{P}_{GVi} = -\frac{1}{T_{Ti}} \Delta P_{GVi} + \frac{1}{T_{Ti}} \Delta P_{Mi} \quad i=1,2,3,4 \quad (3)$$

$$\Delta \dot{P}_{Mi} = -\frac{1}{T_{Gi}} (\frac{1}{2\pi R_i} \Delta \omega_i + \Delta P_{Mi} + K_1 apf_i \int ACE_i - \sum_{k=1}^4 cpf_{ik} \Delta P_{Lk}) \quad i=1,2 \quad (4)$$

$$\Delta \dot{P}_{Mi} = -\frac{1}{T_{Gi}} (\frac{1}{2\pi R_i} \Delta \omega_i + \Delta P_{Mi} + K_1 apf_i \int ACE_2 - \sum_{k=1}^4 cpf_{ik} \Delta P_{Lk}) \quad i=3,4 \quad (5)$$

$$ACE_i = \frac{B_i}{2\pi} \Delta \omega_i + \Delta P_{tie1-2} + \sum_{k \in Mi} \left( \sum_{\substack{j \in Ni \\ j \in N}} cpf_{jk} \right) \Delta P_{Lk} - \sum_{\substack{k \in Mi \\ k \in M}} \left( \sum_{j \in Ni} cpf_{jk} \right) \Delta P_{Lk} \quad i=1,2 \quad (6)$$

$$\Delta \dot{P}_{tie1-2} = \frac{T_{12}}{2\pi} (\Delta \omega_1 - \Delta \omega_2) \quad (7)$$

其中： $N$  为发电公司总集合； $M$  为配电公司总集合； $N_i$  为区域  $i$  内发电公司集合， $i=1,2$ ； $M_i$  为区域  $i$  内配电公司集合， $i=1,2$ 。

## 2 计及 TCPAR 的 AGC 模型

电网的互联必然要求系统具有更好的稳定性与可靠性，于是引入了柔性交流输电系统(FACTS)。FACTS 技术的目标在于提高系统的稳态及动态特性。本文考虑 TCPAR 对 AGC 控制过程的影响。

将 TCPAR 安装在联络线上，通过调节 TCPAR 的参数，可以改变联络线的功率，将 TCPAR 应用到 AGC 中后，须改变联络线功率的方程，其他方程无须修改。如图 2 所示。

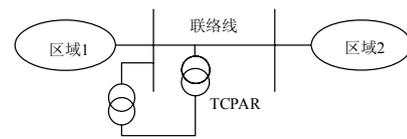


图 2 计及 TCPAR 后系统的简化结构图

Fig.2 Simplified constructed figure of system with TCPAR

TCPAR 装置可以由一个等值电抗来<sup>[7]</sup>代替，即  $\eta = \beta + jr$ ，横分量  $\beta$  影响电压幅值和无功功率，纵分量  $r$  影响电压相位和有功功率，TCPAR 只需控制  $r$  分量就可以控制联络线的功率分布。

$$P_{tie} = b \sin \delta - r b \cos \delta \quad b = \frac{|E_A| |E_B|}{X_\Sigma} \quad (8)$$

式中： $E_A, E_B, X_\Sigma$  为联络线两端的电压幅值和线路等值电抗；电压的相位分别为  $\delta_A, \delta_B$ ，在上述方程中

$$\delta = \delta_A - \delta_B。$$

将稳态时变量的值, 即扰动前的值做记号“ $\hat{\cdot}$ ”, 分别是:  $\hat{P}_{tie}, \hat{\delta}, \hat{r}$ 。

$$\Delta P_{tie} = \left. \frac{\partial P_{tie}}{\partial \delta} \right|_{\delta=\hat{\delta}} \Delta \delta + \left. \frac{\partial P_{tie}}{\partial r} \right|_{r=\hat{r}} \Delta r \quad (9)$$

对上述方程进行修改得到:

$$\Delta P_{tie} = [(1 + \hat{r}^2) \hat{H}_{tie} + \hat{r} \hat{P}_{tie}] \Delta \delta - \hat{H}_{tie} \Delta r \quad (10)$$

式中:  $\hat{H}_{tie} = \left. \frac{\partial P_{tie}}{\partial \delta} \right|_{\delta=\hat{\delta}, \hat{r}=0} = b \cos \delta$

上述方程对应的模型如图 3。

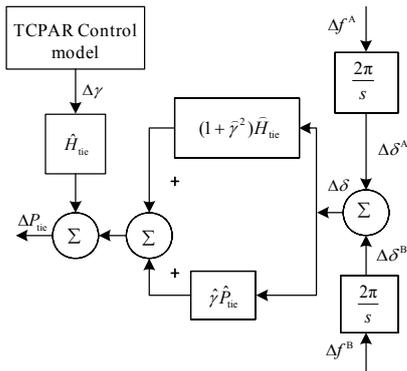


图 3 计及 TCPAR 的联络线模型

Fig.3 Model of tie-line with TCPAR

对 TCPAR 的控制器进行设计时, 将频率偏差和联络线功率偏差信号作为控制器输入, 输出为 TCPAR 的等值电抗参数。其控制器模型见图 4。

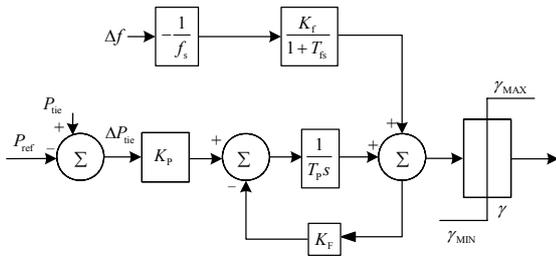


图 4 TCPAR 的控制器模型

Fig.4 Model of TCPAR controller

TCPAR 控制器模型的方程为:

$$r = K_p \Delta P_{tie} \frac{1}{K_f + T_p s} - \frac{\Delta f \cdot K_f}{f_n (1 + T_f s)} \quad (11)$$

按照方程(2)~(7)的通式, 参照图 1 的系统框图, 写出两区域全部的 AGC 系统的状态方程, 并将其中的联络线功率方程(7)修改为加入 TCPAR 后联络线功率方程(10), 再与 TCPAR 控制器方程(11)联立,

利用数值方法<sup>[8]</sup>将微分方程差分化, 再利用线性方程组求解方法求解, 即可得到仿真结果。

### 3 两种模型的仿真分析

此分析的系统采用两区域系统, 每个区域分别有两个发电公司和配电公司, 如图 5 所示。

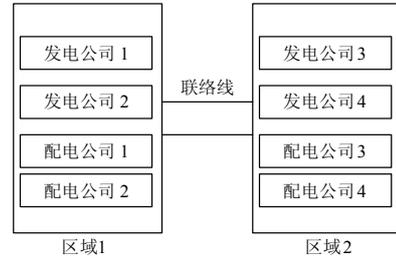


图 5 电力市场下两区域系统图

Fig.5 Figure of two-area system in power market

AGC 中参数设置参见文献[9], 其中, 系统反馈增益  $K_1 = K_2 = 0.6588$ , 频率偏差系数  $B_1 = B_2 = 0.439$ , 区域 1, 2 的系统容量设为 2 000 MW, 联络线上的功率极限设为 200 MW。

TCPAR 的控制参数为:

$$K_p = 0.002, T_p = 5 \text{ s}, K_f = 2 \text{ 000}, T_f = 1 \text{ s}$$

$$K_f = 1, \gamma_{MAX} = 0.2, \gamma_{MIN} = -0.2。$$

算例 1: 将所有发电公司参与 AGC 调节因子设置为 0.5, 设区域 1 发生负荷波动, 配电公司 1, 2 的负荷都增加 0.1, 并定义 **DPM** 如下。

$$DPM = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

配电公司 3, 4 没有负荷需求, 而存在负荷需求的配电公司也由该区域的发电公司承担, 所以计划频率偏差值维持为零。同时发电公司 1, 2 的输出功率最终都提高 0.1。

电力市场下的 AGC 及计 TCPAR 仿真曲线见图 7、图 8, 虚线代表不含 TCPAR 的 AGC 仿真曲线, 实线代表 TCPAR 加入到 AGC 过程中的仿真结果。

算例 2 使每个配电公司的负荷都增加 0.1, 修改 **DPM**。

$$DPM = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.25 & 0 & 0.3 \\ 0.2 & 0.25 & 0 & 0 \\ 0 & 0.25 & 1 & 0.7 \\ 0.3 & 0.25 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

同时修改发电公司参与 AGC 调节因子, 使  $cpf_1=0.75, cpf_2=0.25, cpf_3=0.5, cpf_4=0.5$ 。

联络线功率计划值由发配电公司交易量计算, 即区域 1 的发电公司承担区域 2 的负荷总量与区域 2 的发电公司承担区域 1 的负荷总量之差。由 DPM 可见, 联络线功率偏差为-0.05。

AGC 及计及 TCPAR 仿真结果如下:

图 6、7、8、9 分别在例 1、例 2 的条件下, 对两种模型进行仿真, 当系统不含 TCPAR 时, 系统频率, 联络线功率偏差及个发电机出力都经过很长时间的波动, 而且波动幅值比较大, 最终稳定下来。系统加入 TCPAR 后, 如图中实线所示, 各偏差信号很快到达稳定值, 同时也没有产生较大的波动幅值。

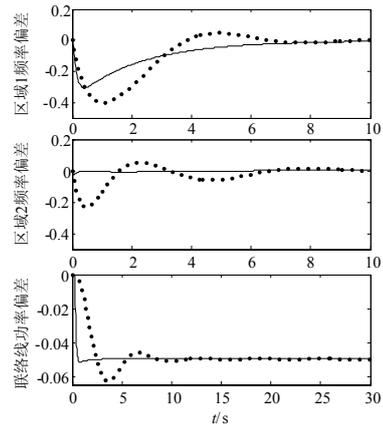


图 8 系统频率和联络线功率偏差

Fig.8 Deviation of frequency and flow of tie-line

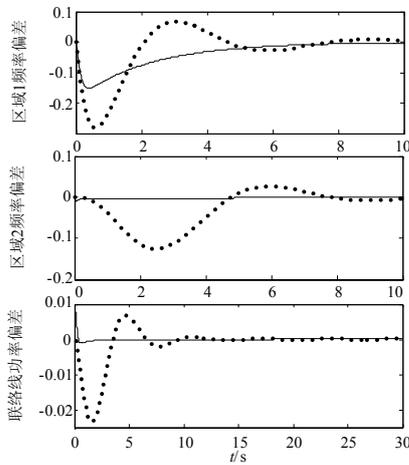


图 6 系统频率和联络线功率偏差

Fig.6 Deviation of frequency and flow of tie-line

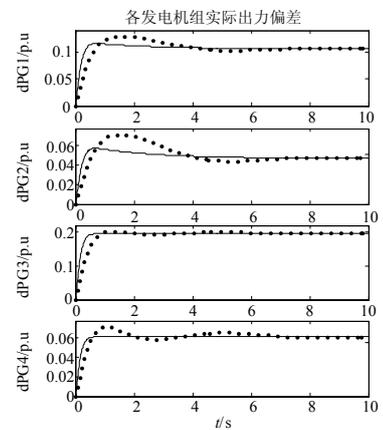


图 9 各发电机组出力偏差

Fig.9 Deviation of generation of each unit

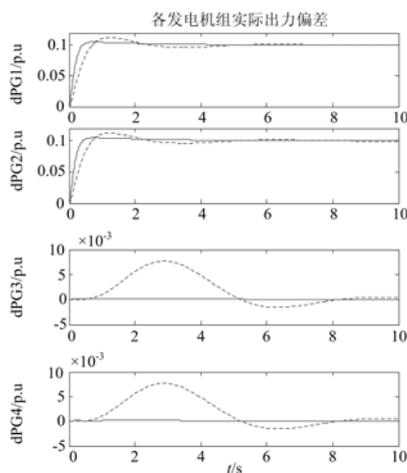


图 7 各发电机组出力偏差

Fig.7 Deviation of generation of each unit

### 4 总结

TCPAR 作为 FACTS 的典型代表装置, 安装在网络的联络线上, 与 AGC 共同协调控制电力系统的频率及联络线功率, 当发生扰动时, 例如负荷波动等, TCPAR 的协调控制可以明显地抑制由于扰动带来的频率大幅变化, 使频率和联络线快速的恢复到计划值, 减少了由于频率波动给系统带来的冲击, 提高系统的安全稳定性。

### 参考文献

[1] 郭小红. 电力市场环境 AGC 的仿真研究[J]. 继电器, 2003, 31(5): 71-76.  
 GUO Xiao-hong. Simulation and Research for AGC in Power Market[J]. Relay, 2003, 31(5): 71-76.

[2] Kumar J, Ng K-H. Sheble G. AGC Simulator for Price-based Operation[J]. IEEE Trans on Power

- Systems, 1997, 12(2): 527-532.
- [3] Vaibhav Donde, Pai M A, Hiskens I A. Simulation and Optimization in an AGC System after Deregulation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(3): 481-488.
- [4] 谢小荣, 姜齐荣. 柔性交流输电系统的原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.  
XIE Xiao-rong, JIANG Qi-rong. Flexible AC Transmission: Principles and Applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [5] Issarachai Ngamroo. Application of Static Synchronous Series Compensator (SSSC) to Stabilization of Frequency Oscillations in an Interconnected Power System[J]. Circuits and Systems, 2001, 2 (2): 113-116.
- [6] 韩肖清. 电力系统运行控制与调度[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.  
HAN Xiao-qing. Control and Dispatch of Operation for Power System[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydroelectricity Press, 1996.
- [7] CIGRE Task Force 38.01.08. Modeling of Power Electronics Equipment (FACTS) in Load Flow and Stability Programs[Z]. 1999, ( 145).
- [8] Kundur P. 电力系统稳定与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.  
Kundur P. Power System Stability and Control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [9] Fosha C, Elgerd O I. The Megawatt-frequency Control Problem: A New Approach Via Optimal Control Theory[J]. IEEE Trans Power Apparatus & Systems, 1970, 89(4): 563-577.

收稿日期: 2009-01-05; 修回日期: 2009-02-21

作者简介:

李飞 (1986-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统运行与分析研究; E-mail: zhijianglifei@126.com

李咸善 (1964-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为水电站仿真及电力系统运行与分析;

李洁 (1985-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统运行与分析研究。

(上接第 17 页 continued from page 17)

- WANG Xiu-jie, LI Hua-qiang, LI Bo. Voltage Stability Assessment for AC/DC Power Systems based on Interior Point Method[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2007, 19(6): 72-77.
- [18] 邸骏. 基于奇异值分解和内点理论的交直流系统无功优化研究硕士学位论文[D]. 成都: 四川大学, 2008.  
DI Tao. Reactive Power Optimization of AC/DC Power System based on Singular Value Decomposition and Interior Point Theory, Thesis[D]. Chengdu: Sichuan University, 2008.
- [19] 李华强, 刘亚梅, Yorino N. 鞍结分岔与极限诱导分岔的电压稳定性评估[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 56-60.  
LI Hua-qiang, LIU Ya-mei, Yorino N. Voltage Stability Assessment for Saddle Node Bifurcation and Limit Induced Bifurcation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 56-60.
- [20] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制[M]. 北京: 科学出版社, 1998.  
LI Xing-yuan. The Operation and Control of HVDC System[M]. Beijing: Science Press, 1998.

收稿日期: 2009-02-16; 修回日期: 2009-04-02

作者简介:

唐国栋 (1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电压稳定及其优化问题; E-mail: tangjt5133@126.com

李华强 (1965-), 男, 博士, 教授, 从事电压稳定及优化问题研究;

肖玲 (1983-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电压稳定及其优化问题。