

基于神经网络自适应PI控制的SSSC潮流控制器

张爱国¹, 韩军锋², 蒋程³

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 河南省电力勘测设计院, 河南 郑州 450007;
3. 华锐风电科技(集团)股份有限公司, 北京 102206)

摘要: 提出了一种基于神经网络自适应PI控制的SSSC潮流控制策略,并设计了控制器的结构。该控制器主要由系统辨识和PI参数整定两个神经网络组成,并给出了它们的学习算法。该控制器在动态过程中,利用神经网络对SSSC的有功控制器和无功控制器的PI参数进行在线调整,提高了控制器的自适应能力和鲁棒性。在Matlab动态仿真环境中建立了控制系统的仿真模型,并基于此模型对系统的暂态行为和输电线路潮流的调节过程进行了仿真,仿真结果验证了该控制器在潮流控制上的有效性和适应性。

关键词: 静止同步串联补偿器(SSSC); 自适应PI控制; 神经网络; 潮流控制

Power flow control of SSSC based on adaptive PI controller with neural networks

ZHANG Ai-guo¹, HAN Jun-feng², JIANG Cheng³

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Hehan Electric Power Survey & Design Institute, Zhengzhou 450007, China; 3. Sinovel Wind Group Co., Ltd, Beijing 102206, China)

Abstract: The power flow control strategy of SSSC based on self-adaptive PI controller with neural network is proposed, and the controller structure is designed. This controller is composed of identification network and PI self-tuning parameter network whose training algorithm is presented. In dynamic process, PI parameters of the real power and reactive power controller are on-line adjusted with neural networks, which improves the robustness and adaptability of the controller. The simulation model of the control system is built in the MATLAB dynamic simulation platform, based on which the regulating process of transmission line power flow is simulated. The result verifies the feasibility and adaptability of the proposed control strategy in power flow control.

Key words: SSSC; adaptive PI control; neural network; power flow control

中图分类号: TP183

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2010)22-0015-05

0 引言

作为一种串联于输电线路路上的补偿设备,静止同步串联补偿器(SSSC)具有快速调整输电线路的有功和无功功率的能力,可以使电力网络的功率传输能力和电压的可控性大为提高,为改善电力系统的稳定性提供了强有力的手段^[1]。

快速潮流控制是SSSC的主要功能之一,如何充分发挥SSSC装置的作用,选择好的控制方法是关键^[2]。PI控制方法具有理论完善、概念清晰、调整方便和易于实现的特点,被广泛应用于SSSC的控制上来^[3]。但是,装有SSSC的电力系统是一个非线性,不确定系统,特别是当电力系统负载变化和偶发故障时,系统的结构和参数都会发生变化,常规

PI控制策略由于其参数固定不变而缺乏一定的适应性和鲁棒性,控制效果不理想^[4]。

针对这个问题,文献[1]提出了一种模糊自整定PI控制策略,文献[2]设计了基于模糊自整定PI的SSSC潮流控制器,该控制器利用模糊逻辑对PI参数进行在线调整,具有一定的适应性和鲁棒性,但模糊变量的量化等级和模糊规则的制定都受到一定的限制,在隶属度函数的确定方面还没有统一的理论指导,需要依靠专家的经验。文献[5]提出了基于神经元自适应PID的STATCOM直接电压控制方法,该方法虽然实现了PI参数的在线调整,但是它们的调整过程是独立的且是线性了,不能满足非线性系统的要求。

综合考虑装设有 SSSC 的电力系统的特点和各种控制方法的优劣, 本文提出了一种基于神经网络自适应 PI 控制的 SSSC 潮流控制策略。具体做法是用一个单神经网络对含 SSSC 的电力系统进行在线辨识, 建立其近似动态模型, 然后利用一个三层 BP 神经网络对 PI 控制器的参数进行在线调整, 使控制器具有适应性, 从而实现了线路潮流实时、有效和快速控制。

1 系统模型

含有 SSSC 的单机无穷大电力系统如图 1 所示。

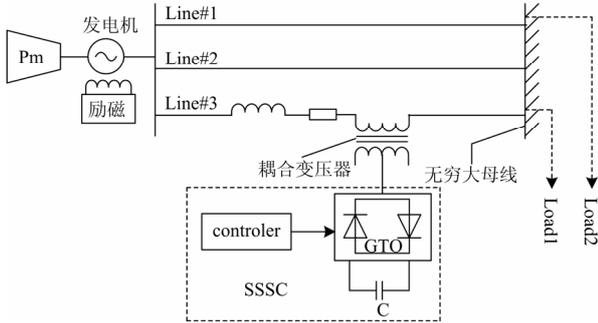


图 1 系统的等效电路图

Fig.1 Single power system with SSSC

其中: Line#1, Line#2, Line#3 代表线路, Load1 和 Load2 代表负载, SSSC 为同步静止串联补偿器。

图 1 所示系统在 d-q 坐标系下系统的微分方程^[3], 如式 (1) 所示。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & w \\ -w & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_{sd} + v_{cd} \\ v_{sq} + v_{cq} + |V_r| \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: w 为同步角速度; i_d 、 i_q 为线路电流的 d-q 分量; v_{sd} 、 v_{sq} 和 v_{cd} 、 v_{cq} 分别代表发电机端电压和 SSSC 发出电压的 d-q 分量; V_r 代表无穷大母线电压的幅值。

2 控制器的设计

2.1 d-q 轴解耦

由式 (1) 可以看出电流的 d-q 分量之间存在复杂的耦合关系, 从而增加了控制系统的复杂性, 给控制系统的设计带来一定的难度, 为了有效设计 SSSC 的控制器, 必须对其进行解耦^[4]。

因此设:

$$v_{cd} = u_1 - wLi_q \quad v_{cq} = u_2 + wLi_d \quad (2)$$

把式 (2) 代入式 (1), 整理就可以得到 d-q 解耦模型, 如式 (3) 所示。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_{sd} + u_1 \\ v_{sq} + u_2 + |V_r| \end{bmatrix} \quad (3)$$

由式 (3) 可以看出 d、q 之间已实现了动态解耦, 其控制框图如图 2 所示。

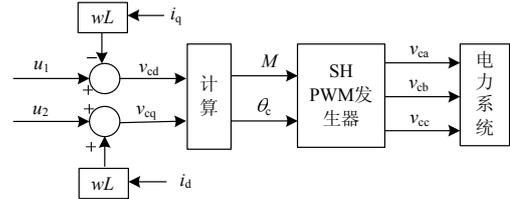


图 2 d-q 轴解耦控制框图

Fig.2 Decoupling control block for d-q axes

图中: M 代表调制比; θ_c 代表初相角。

2.2 控制系统框图

控制系统框图如图 3 所示, 本文只给出了有功部分。整个控制器主要由系统辨识、参数整定、控制算法三大模块组成, 其中控制算法选用传统的 PI 算法, 系统辨识模块是一个单神经元的 BP 网络, 参数整定模块是一个三层 BP 网络。

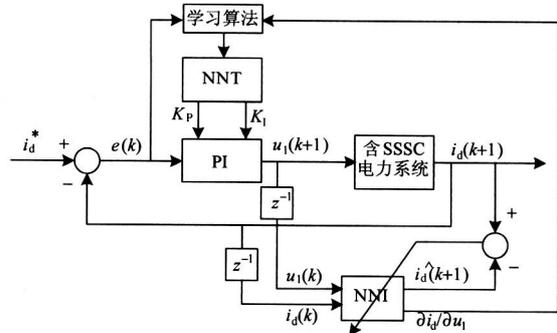


图 3 SSSC 控制系统框图

Fig.3 Control system block of SSSC

图中: PI (Proportional Integral) 为传统的比例积分控制器; NNI (Neural Network Identification) 为单神经元神经网络, 主要用来辨识系统的参数, 对系统建模; NNT (Neural Network Tuning) 为 BP 神经网络, 其主要的作用是提供 PI 控制器的 2 个参数 K_p 和 K_i 。

2.3 系统的神经网络模型 (NNI)

考虑式 (3) 系统的微分方程, 本文建立了系统的神经网络模型(有功部分), 网络由单神经元构成,

神经网络框图如图4所示。

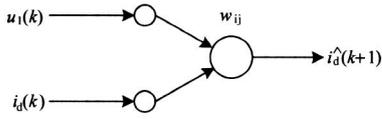


图4 单神经元网络

Fig.4 Single layer network

其中: $u_1(k)$, $i_d(k)$ 分别为系统 k 时刻的输入和输出; w_{ij} 为输入层到神经元的权系数; $i_d^{\wedge}(k+1)$ 为模型网络的输出。

本文采用神经网络 NNI 的输出 $i_d^{\wedge}(k+1)$ 代替系统的实际输出 $i_d(k+1)$, 当 $i_d^{\wedge}(k+1)$ 与 $i_d(k+1)$ 的偏差较大时, 可以通过误差反传在线调整权系数 w_{ij} 。因此 NNI 的输出满足式 (4)。

$$i_d^{\wedge}(k+1) \approx i_d(k+1) \quad k \in 1, 2, 3 \dots \quad (4)$$

式 (4) 等式两边分别对 u_1 求得:

$$\frac{\partial i_d^{\wedge}(k+1)}{\partial u_1} \approx \frac{\partial i_d(k+1)}{\partial u_1(k)} = w_{ij}^1(k+1) \quad (5)$$

神经网络 NNI 的输出为:

$$i_d^{\wedge}(k+1) = w_{ij}(k) * [u_1(k), i_d(k)]^T \quad (6)$$

取性能指标函数为:

$$E = \frac{1}{2} e^2(k) = \frac{1}{2} * (i_d(k+1) - i_d^{\wedge}(k+1))^2 \quad (7)$$

则 E 对 w_{ij} 的导数为:

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ij}(k)} = \frac{\partial E}{\partial i_d^{\wedge}(k+1)} * \frac{\partial i_d^{\wedge}(k+1)}{\partial w_{ij}(k)} = e(k) * \begin{bmatrix} u_1(k) \\ i_d(k) \end{bmatrix} \quad (8)$$

基于最速下降法^[8], 沿 E 的负梯度方向调整权系数 w_{ij} , 由式 (8) 可以得到 w_{ij} 的递推公式, 如式 (9) 所示。

$$w_{ij}(k+1) = w_{ij}(k) - \eta e(k) * \begin{bmatrix} u_1(k) \\ i_d(k) \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中, η 为学习速率, $0 < \eta < 1$ 。

2.4 PI参数整定网络 (NNT)

BP算法的基本思想是, 学习过程由信号的正向传播与误差的反向传播两个过程组成。正向传播时, 输入样本从输入层传入, 经各隐含层处理后, 传向输出层。若输出层的实际输出与期望的输出不符, 则转入误差的反向传播阶段。误差反传是将输出误差以某种形式通过隐含层向输入层逐层反传, 将误差分摊给各层的所有单元, 从而获得各层单元的误

差信号, 此信号作为修正各单元的权值的依据。

本文选用三层BP网络整定PI控制器的参数, 网络模型如图5所示 (有功部分)。

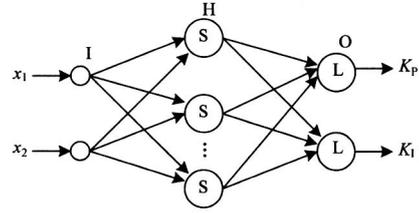


图5 三层BP网络

Fig.5 Three layer BP network

其中: I代表输入层; H代表隐含层; O代表输出层。

网络的输入为:

$$X = [x_1, x_2]^T \quad (10)$$

隐含层的输入 H_i 和输出 H_o 为:

$$H_i = w_{IH}(k) * X \quad H_o = f(H_i) \quad (11)$$

输出层的输出为:

$$O_i = w_{HO}(k) * H_o \quad (12)$$

其中: x_1 , x_2 分别为第 k 和 $k+1$ 次的误差, 即 $x_1 = i_{d-ref} - i_d(k)$, $x_2 = i_{d-ref} - i_d(k+1)$; $w_{IH}(k)$ 为网络输入层到隐含层的权系数; $w_{HO}(k)$ 为网络隐含层到输出层的权系数; $f(\bullet)$ 为活化函数, 如式 (13) 所示。

$$f(x) = (e^x - e^{-x}) / (e^x + e^{-x}) \quad (13)$$

令:

$$\begin{bmatrix} K_p(k) \\ K_i(k) \end{bmatrix} = O_i \quad (14)$$

于是, PI控制器的输出为:

$$u_1(k) = [e(k), e_i(k)] * \begin{bmatrix} K_p(k) \\ K_i(k) \end{bmatrix} = [e(k), e_i(k)] * O_i \quad (15)$$

其中: $e(k)$ 为参考电流的d轴分量与实测电流d轴分量的差值; $e_i(k) = \sum_{j=0}^k e(j)T$, T 为采样周期。

取性能指标为:

$$E = 1/2 * (i_d^* - i_d)^2 \quad (16)$$

式 (16) 对 w_{HO} 和 w_{IH} 求偏导数, 得:

$$\frac{\partial E}{\partial w_{HO}} = \frac{\partial E}{\partial i_d} * \frac{\partial i_d}{\partial u} * \frac{\partial u}{\partial O_i} * \frac{\partial O_i}{\partial w_{HO}} \quad (17)$$

$$\frac{\partial E}{\partial w_{IH}} = \frac{\partial E}{\partial i_d} * \frac{\partial i_d}{\partial u} * \frac{\partial u}{\partial O_i} * \frac{\partial O_i}{\partial w_{IH}} \quad (18)$$

式 (12) 对 w_{HO} 求偏导数得:

$$\frac{\partial O_i}{\partial w_{HO}} = H_o^T \quad (19)$$

式 (11)、(12) 对 w_{IH} 求偏导数, 整理得:

$$\frac{\partial O_i}{\partial w_{IH}} = \frac{1}{2}(1 - f^2(H_o)w_{HO})^T X^T \quad (20)$$

式 (15) 两边分别对 O_i 求偏导数得:

$$\frac{\partial u}{\partial O_i} = \frac{\partial u}{\partial [K_p(k), K_I(k)]^T} = [e(k), e_i(k)]^T = PI(k) \quad (21)$$

由式 (17) ~ (21) 可以得到误差 E 的梯度, 如式 (22), 式 (23) 所示。

$$\frac{\partial E}{\partial w_{HO}} = e(k)w_{ij}^1(k+1)PI(k)H_o^T \quad (22)$$

$$\frac{\partial E}{\partial w_{IH}} = e(k)w_{ij}^1(k+1)PI(k)\frac{1}{2}(1 - f^2(H_o)w_{HO})^T X^T \quad (23)$$

基于最速下降法, 沿 E 的负梯度方向调整权系数 w_{HO} 和 w_{IH} , 学习算法如式 (24)、(25) 所示。

$$w_{HO}(k+1) = w_{HO}(k) - \eta \frac{\partial E}{\partial w_{HO}} \quad (24)$$

$$w_{IH}(k+1) = w_{IH}(k) - \eta \frac{\partial E}{\partial w_{IH}} \quad (25)$$

其中, η 为学习速率, $0 < \eta < 1$ 。

3 数字仿真

为了验证本文所设计控制器的有效性和适应性, 并比较该控制器与传统 PI 控制器的控制效果, 在 Matlab 中建立了图 2 所示系统的仿真模型, 仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真模型参数

Tab.1 Parameters of the simulation model

发送端电压 V_s (相电压) /pu	1∠30°
接收端电压 V_r (相电压) /pu	1∠0°
最大直流电容电压/pu	0.5
系统等效电感 L /pu	0.005 8
系统等效电阻 R /pu	0.06

图 6 为有功给定值增加时, 系统的阶跃响应曲线。图 7 为有功给定值减少时, 系统的阶跃响应曲线。其中: 曲线 1 为采用传统 PI 控制器时, 系统的阶跃响应曲线, 曲线 2 为采用神经网络自适应 PI 控制器时, 系统的阶跃响应曲线。从中可以看出本文所设计的控制器不但具有传统 PI 控制器的优点, 而且系统响应速度明显加快。

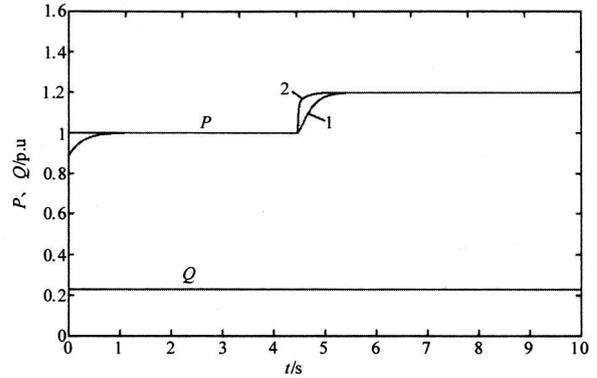


图 6 有功增加时的阶跃响应

Fig.6 Step response when active power increases

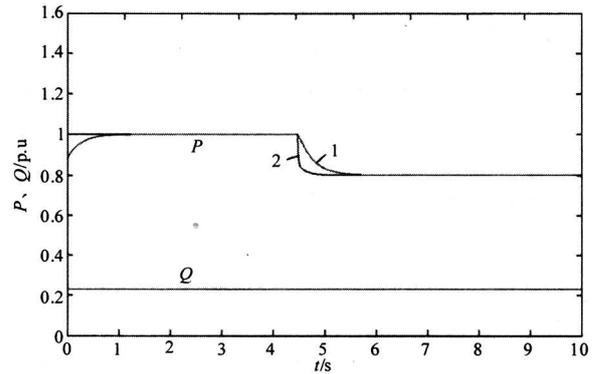


图 7 有功减少时的阶跃响应

Fig.7 Step response when active power decreases

为了验证本文所设计控制器的适应性和鲁棒性, 把表 1 中的 R 从 0.06 减小到 0.05, 其他参数均不变, 再进行仿真。图 8 为有功给定值增加时, 系统的阶跃响应曲线。图 9 为有功给定值减少时, 系统的阶跃响应曲线。其中: 曲线 1 为采用传统 PI 控制器时, 系统的阶跃响应曲线, 曲线 2 为采用神经网络自适应 PI 控制器时, 系统的阶跃响应曲线。从中可以看出, 曲线 1 在调节过程中出现很大的超调, 而曲线 2 的响应速度很快, 并且没有明显的超调, 因此传统 PI 控制器的控制效果不理想, 而本文所设计的控制器依然具有良好动态特性。

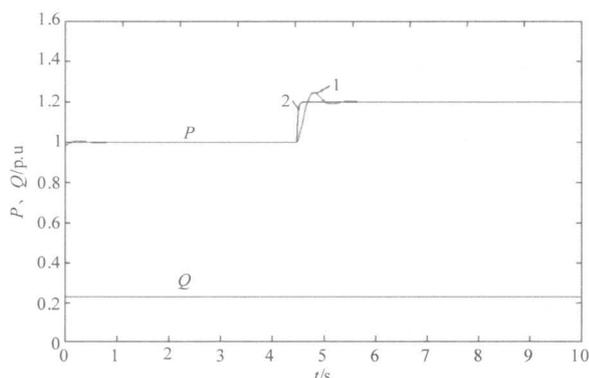


图8 有功增加时的阶跃响应

Fig.8 Step response when active power increases

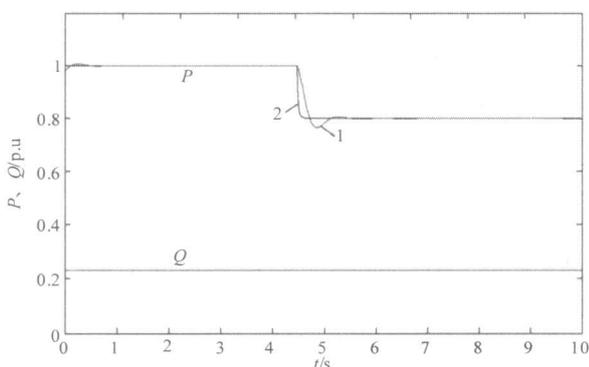


图9 有功减少时的阶跃响应

Fig.9 Step response when active power decreases

图10为故障情况下,故障时间为50ms,有功功率的响应曲线,其中曲线1为传统PI控制下的有功功率的响应曲线,曲线2为神经网络自适应控制下的有功功率的响应曲线,显然采用本文所设计的控制具有更好的动态性能。

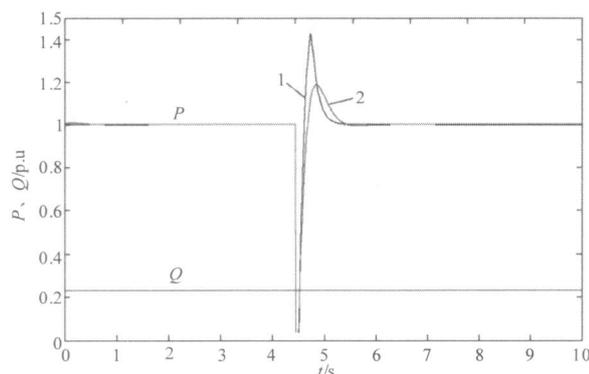


图10 有功减少时的阶跃响应

Fig.10 Step response when active power decreases

4 总结

从仿真结果可以看出, 本文设计的自适应

PI控制器与传统PI控制器相比,具有更快的调节速度和更好的动态特性。当系统故障时,本文所设计的控制器在动态调节过程中具有更小的超调和更快的响应速度。

本文创新点: 装设有SSSC的电力系统是一个非线性,不确定系统,特别是当电力系统负载变化和偶发故障时,系统的结构和参数都会发生变化,常规PI控制策略由于其参数固定不变而缺乏一定的适应性和鲁棒性,控制效果不理想。本文用神经网络自适应PI控制算法设计了SSSC的潮流控制器,使控制器具有适应性,从而实现了线路潮流实时、有效和快速控制。

参考文献

- [1] 王辉,王耀南,许维东. 基于模糊自整定PI控制的SSSC潮流控制器研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(7): 65-69.
WANG Hui, WANG Yao-nan, XU Wei-dong. Investigation of a power flow controller of SSSC based on self-tuning PI controller with fuzzy logic[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(7): 65-69.
- [2] 王庆红,胡国根. 一种基于48脉波电压源逆变器的静止同步串联补偿器的设计与建模[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(5): 61-66.
WANG Qing-hong, HU Guo-gen. Modeling and control design of a 48-step inverter based static synchronous series compensator[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(5): 61-66.
- [3] 欧剑波,罗安,唐杰. 基于神经元自适应PID的STATCOM直接电压控制方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(12): 77-80.
OU Jian-bo, LUO An, TANG Jie. A direct voltage control method of STATCOM based on neuron self-adaptive PID[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(12): 77-80.
- [4] Ahmadian T M, Kazemi A. A decoupling technique to improve the efficacy of the vector control model for SSSC[C]. //2006 IEEE Power India Conference. Bombay (India): 2006.
- [5] 杨凌,宋军,金强. 基于改进Elman网络的精馏塔建模及仿真[J]. 微计算机信息, 2008, 8(22): 248-249.
YANG Ling, SONG Jun, JIN Qiang. Modeling of rectifying column based on modified Elman neural-fuzzy networks[J]. Microcomputer Information, 2008, 8(22): 248-249.
- [6] 韩力群. 人工神经网络理论、设计及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.

(下转第24页 continued on page 24)

2008, 20 (4) : 113-119.

[3] 丁军威, 胡扬, 夏清, 等. 竞价上网中的水电优化运行[J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (3): 19-23.
DING Jun-wei, HU Yang, XIA Qing, et al. Hydro power optimization in competition with thermal generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (3): 19-23.

[4] Scott T J, Read E G. Modeling hydro reservoir operation in deregulated electricity market[J]. International Transactions in Operational Research, 1996, 3 (3-4): 243-253.

[5] 叶琳浩, 夏成军, 陈丽丹, 等. 改进遗传算法在韶关小水电群优化调度的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21 (3): 53-57.
YE Lin-hao, XIA Cheng-jun, CHEN Li-dan, et al. Application of optimal operation based on improved genetic algorithm for small hydropower stations in Shaoguan[J]. Proceedings of the CSU- EPSA, 2009, 21 (3): 53-57.

[6] 吴至复, 曾鸣, 刘宝华, 等. 定火电机组合方式下水火电系统动态优化调度电力市场中水火电优化调度模型及其应用[J]. 电网技术, 2006, 30 (15): 45-49.
WU Zhi-fu, ZENG Ming, LIU Bao-hua, et al. An optimum dispatching model of hydro-thermal power system in market environment and application[J]. Power System Technology, 2006, 30 (15): 45-49.

[7] Bushnell J. A mixed complementarity model of hydro-thermal electricity competition in the western united states[J]. Operations Research, 2003, 51 (1): 80-93.

[8] Villar J, Rudnick H. Hydrothermal market simulator using game theory: assessment of market power[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18 (1) : 91-98.

[9] 袁智强, 侯志俭, 蒋传文, 等. 水火电系统古诺模型的均衡分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(4): 17-21.
YUAN Zhi-qiang, HOU Zhi-jian, JIANG Chuan-wen, et al. Analysis of cournot equilibrium of hydro thermal system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (4) : 17-21.

[10] 刘瑞丰, 王秀丽, 朱振青, 等. 水电厂参与市场竞争下的市场模拟及其市场力削弱[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (16) : 21-24.
LIU Rui-feng, WANG Xiu-li, ZHU Zhen-qing, et al. Hydrothermal power market simulating and the market power mitigation of hydro power plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (16) : 21-24.

[11] Day C J, Hobbs B F, Pang J S. Oligopolistic competition in power networks: a conjectured supply function approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 17 (3) : 597-607.

[12] Hobbs B F. Linear complementarity models of nash-cournot competition in bilateral and POOLCO power markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16 (2) : 194-202.

[13] 朱成章. 水力发电概况—水力发电技术知识丛书第一分册[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.

[14] Cottle R W, Pang J S, Stone R E. The linear complementarity problem[M]. Boston: Academic Press, 1992.

[15] Ferris C, Munson T S. Complementarity problems in GAMS and the PATH solver[R]. University of Wisconsin, 1998.

[16] Bautista G, Quintana V H. An oligopolistic model of the integrated market for energy and spinning reserve[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2006, 21 (1) : 132-142.

收稿日期: 2009-11-30; 修回日期: 2010-03-03

作者简介:

杨建林 (1980-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力市场、电力系统稳定分析; E-mail: yjlscttju@sjtu.edu.cn

耿静 (1986-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力市场、节能调度、电力系统无功优化;

严正 (1964-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为电力市场、电力系统稳定分析。

(上接第 19 页 continued from page 19)

[7] 刘敬, 吕立华. 基于模糊推理的PI控制器参数整定方法[J]. 控制工程, 2007, 14: 30-32.
LIU Jing, Lü Li-hua. Tuning method of PI controller based on fuzzy inference[J]. Control Engineering of China, 2007, 14: 30-32.

[8] Wei Qiao, Harley R G. Indirect adaptive internal neuro-control for a static synchronous series compensator (SSSC) connected to a power system[C]. //IEEE Industrial Electronics Society Conference. Atlanta (USA) : 2005.

收稿日期: 2010-02-03; 修回日期: 2010-04-15

作者简介:

张爱国 (1976-), 男, 博士研究生, 工程师, 主要研究方向为电力系统分析、运行与控制;

韩军锋 (1982-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与分析;

蒋程 (1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子与电力传动. E-mail: jc_2002@163.com