

运用细菌群体趋药性优化的电力系统广域阻尼控制

卢旻, 吴华仁, 李晓慧

(南京师范大学, 江苏 南京 210042)

摘要: 分析了广域阻尼控制器(WADC)的超前-滞后环节补偿广域测量信号大时滞的效果。介绍了确定WADC参数的方法。根据时滞引起的广域信号滞后角的大小选择超前或滞后补偿,并确定时间常数。介绍了细菌群体趋药性(BCC)优化算法及其应用,并采用BCC优化算法获得WADC的增益以改善电力系统阻尼。优化过程中采用时间加权误差平方的积分(ITSE)作为性能指标。4机2区域测试系统大扰动仿真结果表明,这种WADC在运行点大范围变化的情况下可以抑制互联电网中出现的低频振荡,有效改善电力系统稳定性。

关键词: 电力系统稳定; 时滞补偿; 广域控制; 细菌群体趋药性

Wide area damping control of power systems using bacterial colony chemotaxis

LU Min, WU Hua-ren, LI Xiao-hui

(Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: The effectiveness of lead-lag compensation of a wide area damping controller (WADC) for offsetting the long time delay of wide area signals is analyzed. A method for determining the parameters of WADC is presented. The lead or lag compensation and time constants are selected according to the lag-angle of wide area signal caused by time delay. Algorithm and application of the optimization with bacterial colony chemotaxis (BCC) are introduced and the gain of WADC is obtained using BCC for improving power system damping. An integral of the time-weighted squared error (ITSE) is used as performance index. The simulation results of a four-machine two-area system with large disturbance show that WADC can damp the low frequency oscillations and improve power system stability for multiple time delays with a wide operating range.

Key words: power system stability; time delay compensation; wide area control; bacterial colony chemotaxis

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)15-0007-05

0 引言

在互联大电网中广域测量系统(WAMS)提供的广域反馈信号用于励磁控制以抑制区域间低频振荡。没有时滞的广域信号可以显著提高电力系统的稳定性。然而在工程实际中会不可避免地存在通讯时滞,有时滞的信号会降低广域控制效果。有多种方法可以减小时滞带来的不利影响。

文献[1]分析了时滞对电力系统广域鲁棒控制器的不利影响,用Pade有理式近似表示传输时滞,基于线性矩阵不等式(LMI)设计的鲁棒控制器可以适应可能出现的时滞。文献[2]研究了计及时滞影响的电力系统稳定器(PSS)的 H_∞ 控制,仿真表明该控制器可以抑制机组振荡,提高电网稳定性。文献[3]运用基于广域信号的多级控制结构提高大电网的运行稳定性,利用史密斯预估有效地补偿了在

测量和通信环节所产生的时滞。文献[4]讨论了利用时滞输入信号的PSS对振荡阻尼的影响,提出使用时滞补偿环节消除时滞影响,并用仿真证明了其优点。文献[5]描述了南方电网公司所进行的一个实验,实验结果表明了使用时滞补偿环节和带通滤波器良好效果。文献[6]讨论了基于LMI的多机系统广域阻尼控制器的设计和比例微分网络的时滞补偿效果。

上述文献都没有讨论时滞大于500ms的情况。光纤通讯、微波和卫星通讯正在研究用于WAMS,文献[7]指出卫星信号的时滞会超过700ms。文献[8]提出将切换控制用于广域励磁控制以补偿较长的时滞,但这需要通过仿真估计第一个摇摆的周期。文献[9]提出利用细菌群体趋药性(BCC)算法对电力系统进行无功优化。

本文给出了广域阻尼控制器(WADC)的设计

结构, 该控制器利用超前-滞后补偿环节补偿时滞, 用 BCC 优化算法进行控制器增益选择。同时本文通过 4 机 2 区域测试系统给出 WADC 应对不同时滞的仿真示例, 证明了其在补偿大时滞方面的良好效果。

1 广域阻尼控制器设计

1.1 超前-滞后补偿环节

超前-滞后补偿环节的传递函数如式(1)、式(2)所示。

$$G_W(s) = K_W \left(\frac{1 + \alpha_W T_W s}{1 + T_W s} \right)^n \quad n=1, 2 \text{ 或 } 3 \quad (1)$$

$$G_W(j\omega) = |G_W(j\omega)| e^{j\varphi_W} \quad (2)$$

其中: K_W 为增益; α_W 为常数; T_W 为时间常数; φ_W 为角度。定义一个振荡周期为 360° 。由于通信传输造成的信号延时, 经广域测量系统传送到的广域信号较原始信号滞后 φ_{lag} 角度。

超前-滞后补偿环节用于补偿广域信号时滞的方法是使得补偿后得到的信号尽量与原始信号同相位。若时滞造成的滞后角 φ_{lag} 在 $0^\circ \sim 80^\circ$ 之间, 本文选择超前-滞后补偿环节的参数满足 $K_W > 0$ 与 $\varphi_W > 0$; 若滞后角 φ_{lag} 在 $80^\circ \sim 180^\circ$ 之间, 则超前-滞后补偿环节的参数满足 $K_W < 0$ 与 $\varphi_W < 0$; 若滞后角 φ_{lag} 在 $180^\circ \sim 260^\circ$ 之间, 则超前-滞后补偿环节的参数满足 $K_W < 0$ 与 $\varphi_W > 0$; 若滞后角 φ_{lag} 在 $260^\circ \sim 360^\circ$ 之间, 则超前-滞后补偿环节的参数满足 $K_W > 0$ 与 $\varphi_W < 0$ 。

1.2 广域阻尼控制器模型

广域测量系统提供的广域信号包含轴转速、转子角和电压等。本文利用轴转速作为 WADC 的输入信号。图 1 为发电机 i 的 WADC 示意图。

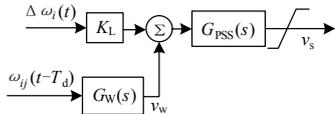


图 1 广域阻尼控制器 (WADC)

Fig.1 Wide area damping controller

图 1 中 $G_{\text{PSS}}(s)$ 与 $G_W(s)$ 分别表示 PSS 和 WADC 中超前-滞后补偿环节的传递函数。 V_s 作为励磁系统的辅助稳定信号, K_L 为增益, $\Delta\omega_i(t) = \omega_i(t) - 1$ 为发电机 i 的本地转速反馈信号, $\omega_{ij}(t-T_d) = \omega_i(t-T_d) - \omega_j(t-T_d)$, 其中 $\omega_j(t-T_d)$ 为发电机 j 的广域反馈信号, T_d 为通信时滞, v_w 为 WADC 的输出信号。

1.3 设计步骤

众多文献都研究过 PSS 设计, 因此不再赘述。

WADC 设计分为两步: 第一步确定式(1)中的参数 n 、 α_W 和 T_W , 第二步运用 BCC 优化算法确定增益 K_W 。

第一步首先根据时滞 T_d 的大小和 $\omega_{ij}(t)$ 的振荡周期算出滞后角 φ_{lag} , 再按第 1.1 节叙述的方法得出式(2)中的 φ_W , 然后根据 φ_W 的大小确定超前-滞后补偿环节的级数 n , 最后用式(3)和式(4)计算 α_W 和 T_W :

$$\alpha_W = \frac{1 + \sin(\varphi_W / n)}{1 - \sin(\varphi_W / n)} \quad (3)$$

$$T_W = \frac{1}{\omega_{\text{osc}} \sqrt{\alpha_W}} \quad (4)$$

其中 $\omega_{\text{osc}} = 2\pi f_{\text{osc}}$, f_{osc} 是 $\omega_{ij}(t)$ 的振荡频率。

2 细菌群体趋药性算法及其应用

作为一种从生物行为中获得灵感的优化方法, BCC 算法是在结合细菌趋药性 (BC) 算法与种群优化算法基础上发展而来的。在 BCC 算法中, 细菌不再是一个单一的个体, 而是以种群形式出现。

以寻求目标函数最小值的优化过程为例, 细菌趋药性行为运动规律如下^[9]:

菌群中每个细菌将根据式(5)确定新位置。

$$\vec{x}_{\text{new}} = \vec{x}_{\text{old}} + n_\mu l \quad (5)$$

其中: \vec{x}_{new} 为细菌新位置; \vec{x}_{old} 为细菌上一位置; n_μ 为正则化后新轨线的单位方向向量。

n_μ 和 l 可通过以下几个步骤求得:

步骤一: 确定算法中系统参数。

在设定期望的计算精度 ε 后, 便可得到如式(6)~(8)所示的三个系统参数。

$$T_0 = \varepsilon^{0.30} \cdot 10^{-1.73} \quad (6)$$

$$b = T_0 \cdot (T_0^{-1.54} \cdot 10^{0.60}) \quad (7)$$

$$\tau_c = \left[\frac{b}{T_0} \right]^{0.31} \cdot 10^{1.16} \quad (8)$$

步骤二: 确定细菌的移动方向 n_μ 与步长 l 。

新方向与原来运动轨迹的夹角根据新确定的方向向左或向右偏转分别依据以下高斯概率分布:

$$p(X_i = \alpha_i, v_i = \mu_i) = \frac{1}{\delta_i \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\alpha_i - v_i)^2}{2\delta_i^2} \right]$$

$$p(X_i = \alpha_i, v_i = -\mu_i) = \frac{1}{\delta_i \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\alpha_i - v_i)^2}{2\delta_i^2}\right] \quad (9)$$

α_i 的范围为 $[0^\circ, 180^\circ]$, 向左或向右的确定按照式(10)所示的统一的概率密度分布:

$$p(X_i = \alpha_i) = \frac{1}{2} [p(X_i = \alpha_i, v_i = \mu_i) + p(X_i = \alpha_i, v_i = -\mu_i)] \quad (10)$$

期望 μ 和方差 δ 分别由如下的方式决定:

$$\text{如果 } \frac{f_{pr}}{l_{pr}} < 0, \text{ 则 } \begin{cases} \cos \theta = e^{-\tau_c \tau_{pr}} \\ \mu = 62^\circ(1 - \cos \theta) \\ \delta = 26^\circ(1 - \cos \theta) \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{如果 } \frac{f_{pr}}{l_{pr}} > 0, \text{ 则 } \mu = 62^\circ, \delta = 26^\circ \quad (12)$$

式中: f_{pr} 为当前点和上一个点的函数值的差; l_{pr} 为变量空间中当前点和上一个点的向量的模; τ_{pr} 为细菌上一运动轨线的持续时间。

细菌移动时间 τ 由式(13)所示的概率分布决定:

$$p(X = \tau) = \frac{1}{T} e^{-\frac{\tau}{T}} \quad (13)$$

$$T = \begin{cases} T_0 & \text{for } \frac{f_{pr}}{l_{pr}} \geq 0 \\ T_0(1 + b \left| \frac{f_{pr}}{l_{pr}} \right|) & \text{for } \frac{f_{pr}}{l_{pr}} < 0 \end{cases}$$

根据所得偏移角度便可求出 \vec{n}_μ , 设定细菌单位速度为1, 根据 τ 便可求出移动步长 l 。

步骤三: 在每次移动到新位置之前, 细菌都要感知周围环境, 试探周围是否有其他位置更好的细菌。如果感知到其他更好位置的细菌, 那么将趋向移动到这些拥有更好位置细菌的中心点。假定菌群有全局感知功能, 则在移动步数为 k 时细菌 i 附近有更好位置的同伴的中心点由式(14)决定:

$$C(x_{i,k}) = A(x_{j,k} \mid f(x_{j,k}) < f(x_{i,k})) \quad (14)$$

其中: $A(x_1, x_2, \dots, x_n) = \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) / n$ $i, j = 1, 2, \dots, n$

将所得中心点与该细菌上一位置求差便得出 \vec{n}_μ , 移动步长 $l = rand() \cdot D(x_{i,k}, C(x_{i,k}))$, $rand()$ 为服从0~2间均匀分布的随机值, $D(x_{i,k}, C(x_{i,k}))$ 表示 $\vec{x}_{i,k}$ 与 $C(x_{i,k})$ 间的距离。

BCC优化算法可以用于确定WADC增益 K_W 。在 m 台发电机的电力系统中, 假设有 $m-1$ 台发电机安装了WADC。每台发电机的WADC增益有待确定, 即

共有 $m-1$ 个待定参数。用细菌位置 \vec{x}_i 的坐标值表示WADC增益, 因此每个细菌的位置有 $m-1$ 个坐标, 电力系统的性能指标就是细菌位置的函数值 $f(\vec{x}_i)$ 。BCC优化算法寻找最小函数值 $f(\vec{x}_i)$ 及其对应的细菌位置 \vec{x}_i 的方法可用于寻找最小性能指标时对应的WADC增益。

如果选用式(15)的时间加权误差平方的积分(ITSE)作为性能指标, 则已知 $m-1$ 个WADC增益时, 可以通过解电力系统微分方程求得性能指标值。

$$P_1 = \int_0^{t_f} t \left[\omega_{1m}^2 + \omega_{2m}^2 + \dots + \omega_{(m-1)m}^2 + w(v_{W1}^2 + v_{W2}^2 + \dots + v_{W(m-1)}^2) \right] dt \quad (15)$$

式中, w 为权重。

3 仿真实例与分析

本文依据4机2区域系统进行仿真, 该系统如图2所示, 发电机和电网参数见文献[10]。4台发电机都装有PSS。G1、G2和G3还装有WADC。

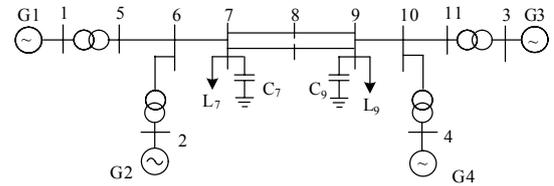


图2 4机2区域系统

Fig.2 Four-machine two-area system

下面用大扰动测试WADC的性能。大扰动为一回路线中点三相短路, 0.12 s后切除该回线路, 再过0.5 s重合闸成功。仿真表明未安装WADC时 $\omega_{14}(t)$ 、 $\omega_{24}(t)$ 和 $\omega_{31}(t)$ 的振荡频率近似为0.61 Hz。

根据式(3)~(4)可得出 α_W 和 T_W 。当时滞 $T_d = T_{d1} = T_{d2} = T_{d3} = 0.364$ s, 即 $\varphi_{lag} = 80^\circ$ 时, 选择 $\varphi_W = \varphi_{lag} = 80^\circ$, $n = 2$, 求得 $\alpha_W = 4.6$, $T_W = 0.122$ s。n为超前-滞后补偿环节级数。

由BCC优化算法得出 $K_{W1} = 1.94$, $K_{W2} = 2.21$, $K_{W3} = 0.89$ 。图3中的曲线a和d分别显示有WADC和没有WADC时G1与G4之间的转子角差 $\delta_{14}(t)$, 曲线a和d表明WADC可以增强电力系统的稳定性。曲线b和c分别是G2与G4间的转子角差 $\delta_{24}(t)$ 和G1与G3间的转子角差 $\delta_{13}(t)$ 。

图 4 中曲线 a 是转速差 $\omega_{14}(t)$ ，曲线 b 是发电机 G1 的 WADC 输出 $v_{W1}(t)$ 。图 4 表明 $v_{W1}(t)$ 与 $\omega_{14}(t)$ 基本同相，较好地补偿了 $\omega_{14}(t-T_{d1})$ 的时滞。

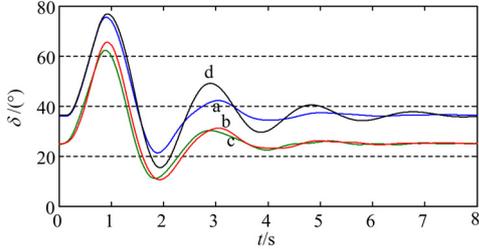


图 3 时滞为 0.364 s 时的转子角差

Fig.3 Rotor angle differences for $T_d=0.364$ s

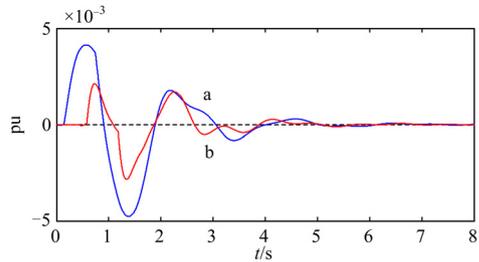


图 4 时滞为 0.364 s 时的转速差和 WADC 输出

Fig.4 Speed differences and the output of the WADC for

$T_d=0.364$ s

若时滞 $T_d=0.5$ s，则 $\varphi_{lag}=110^\circ$ 。选择 $\varphi_w=110^\circ-180^\circ=-70^\circ$ ，表示采用滞后补偿。选 $n=2$ ，由式 (3) ~ (4) 得： $\alpha_w=0.27$ ， $T_w=0.502$ s。再由 BCC 优化算法得出 $K_{W1}=-43.56$ ， $K_{W2}=-38.9$ ， $K_{W3}=-22.93$ 。图 5 中曲线 a、b 和 c 分别表示时滞为 0.5 s 时转子角差 $\delta_{14}(t)$ 、 $\delta_{24}(t)$ 和 $\delta_{13}(t)$ ；曲线 d 表示没有 WADC 时 G1 与 G4 之间的转子角差 $\delta_{14}(t)$ 。比较图 5 中的曲线 a 与 d，说明 WADC 可以改善电力系统的稳定性。

图 6 中曲线 a 和 b 分别表示 $\omega_{14}(t)$ 和 $v_{W1}(t)$ 。

比较图 3 和图 5 可见，时滞 $T_d=0.364$ s 时，WADC 能减小第一个摇摆的峰值，而 $T_d=0.5$ s 时，WADC 对第一个摇摆的峰值几乎没有影响。 $T_d=0.364$ s 时，采用超前补偿，具有微分作用。 $T_d=0.5$ s 时，采用滞后补偿，具有积分效应，从 $\omega_{14}(t)$ 的第二个半波开始， $v_{W1}(t)$ 的波形与 $\omega_{14}(t)$ 较接近，所以抑制后继摇摆的效果较好。

若时滞 $T_d=1.0$ s，则 $\varphi_{lag}=220^\circ$ 。选择 $\varphi_w=220^\circ-180^\circ$ ，使用 2 级超前补偿，此时 $\alpha_w=2.04$ ， $T_w=0.183$ s。三个 WADC 的增益分别为 $K_{W1}=-2.34$ ， $K_{W2}=-1.25$ 和 $K_{W3}=-1.67$ 。图 7 中曲线 a 和 d 分别表示有和没有 WADC 时转子角差 $\delta_{14}(t)$ 。图 7 表

明 WADC 可以有效平抑时滞达到 1.0 s 时的低频振荡。

图 8 中曲线 a 和 b 分别表示 $\omega_{14}(t)$ 和 $v_{W1}(t)$ 。

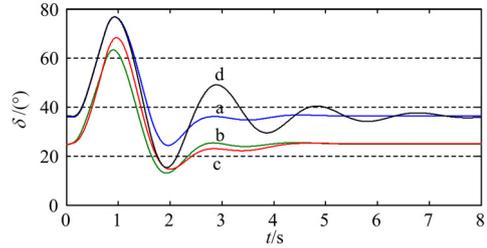


图 5 时滞为 0.5 s 时的转子角差

Fig.5 Rotor angle differences for $T_d=0.5$ s

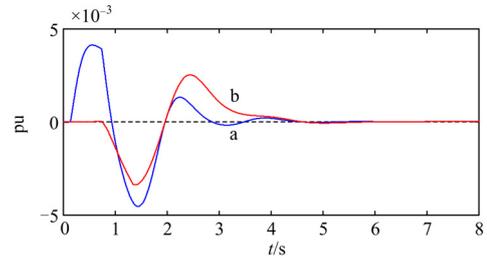


图 6 时滞为 0.5 s 时的转速差和 WADC 输出

Fig.6 Speed differences and the output of the WADC for

$T_d=0.5$ s

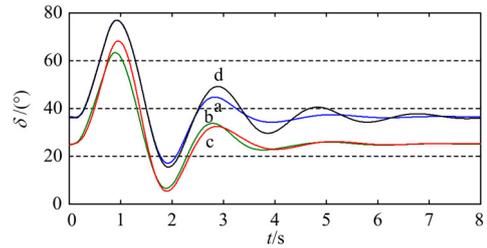


图 7 时滞为 1.0 s 时的转子角差

Fig.7 Rotor angle differences for $T_d=1.0$ s

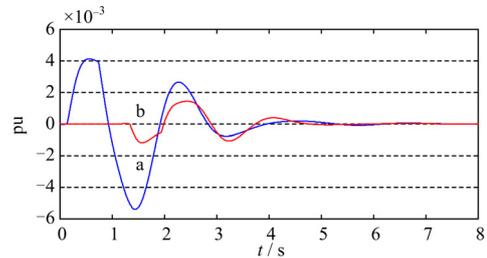


图 8 时滞为 1.0 s 时的转速差和 WADC 输出

Fig.8 Speed differences and the output of the WADC for

$T_d=1.0$ s

WADC 也可以用于多时滞广域阻尼控制，例如 $T_{d1}=0.2$ ， $T_{d2}=0.25$ 和 $T_{d3}=0.3$ s。图 9 中曲线 a、b 和 c 分别表示转子角差 $\delta_{14}(t)$ ， $\delta_{24}(t)$ 和 $\delta_{13}(t)$ 。比较图 9 中曲线 a 与 d 可知，WADC 在应对多时滞时可

以提高电力系统的稳定性。

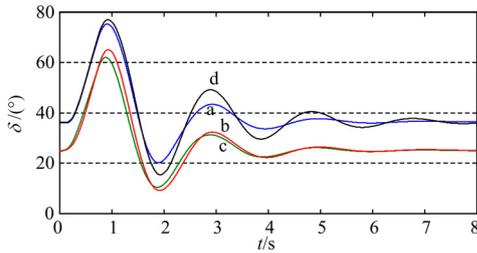


图9 多时滞转子角差
Fig.9 Rotor angles for multiple time delays

图 10 说明在另一种运行情况下, WADC 仍可以保持其良好特性。故障前有功负荷为原来的 50%, 图中曲线 b 是时滞为 0.2 s, 有 WADC 的摇摆曲线。曲线 a 是没有 WADC 的摇摆曲线。图 10 表明在运行点变化较大的情况下, WADC 仍可以有效地改善电力系统阻尼。

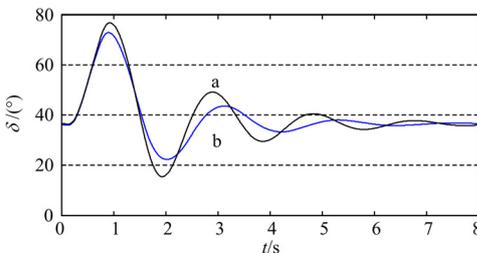


图 10 另一运行点转子角差
Fig.10 Rotor angles for another operator condition

4 总结

本文用实例说明超前-滞后补偿可以有效补偿广域信号中较大的时滞。用细菌群体趋药性优化算法求出广域阻尼控制器增益, 使其在平抑互联大电网低频振荡方面效果明显。

参考文献

[1] WU Hong-xia, HUI Ni, Heydt G T. The impact of time delay on robust control design in power systems[C]// Power Engineering Society Winter Meeting. 2002:1511-1516.
[2] 蔡超豪, 赵敏, 郝福忠. 计及时滞影响的电力系统稳定器的H ∞ 控制[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(24): 19-23.
CAI Chao-hao, ZHAO Min, HAO Fu-zhong. H ∞ control of PSS in consideration of time-delay[J]. Power

System Protection and Control, 2008, 36(24): 19-23.
[3] Zabaïou T, Okou F A, Dessaint L A, et al. Time-delay compensation of a wide-area measurements-based hierarchical voltage and speed regulator[C]//Can J Elect Comput. 2008: 77-85.
[4] ZHANG Jian-yun, SUN Yuan-zhang. Effect of delayed input on oscillation damping using wide area power system stabilizer[C]//Transmission and Distribution Conference and Exhibition, IEEE/PES. Asia and Pacific: 2005: 1-4.
[5] He J, Lu C, Wu X, Li P, et al. Design and experiment of wide area HVDC supplementary damping controller considering time delay in China Southern power grid[J]. IEEE Proc Generation, Transmission & Distribution, 2009, 3: 17-25.
[6] Wu H, Wang Q, Li X. PMU-based wide area damping control of power systems[C]. //International Conference on Power System Technology, PowerCon. New Delhi(India): 2008.
[7] Moursi M E, Joos G, Abbey C. A secondary voltage control strategy for transmission level interconnection of wind generation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23: 1178-1190.
[8] Wu H, Wu D, Wang Q, et al. Switched-control based Wide-area damping control of power systems[C]. //The First International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, SUPERGEN. Nanjing(China): 2009.
[9] 赵义术, 李磊, 王大鹏. 基于细菌群体趋药性算法的电力系统无功优化[J]. 继电器, 2007, 35(16): 50-54.
ZHAO Yi-shu, LI Lei, WANG Da-peng. Power system reactive power optimization based on the bacterial colony chemotaxis[J]. Relay, 2007, 35(16): 50-54.
[10] Kundur P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.

收稿日期: 2009-09-10; 修回日期: 2009-11-08

作者简介:

卢昱(1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: automanlm@163.com

吴华仁(1956-), 男, 博士, 副教授, IEEE/NFPA 电弧短路联合研究工程技术咨询委员会委员, 研究方向为电弧短路, 电力系统分析与控制;

李晓慧(1960-), 女, 副教授, 研究方向为电力系统分析与控制。

(上接第 6 页 continued from page 6)

收稿日期: 2010-03-15; 修回日期: 2010-06-21

作者简介:

刘海涛(1972-), 女, 副教授, 博士研究生, 从事电力

系统自动化及控制方面的教学、研究工作; E-mail: sealy232@sohu.com

龚乐年(1941-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统运行与控制、大型发电机组轴系扭振、自控理论与电力市场方面的教学与科研工作。