

基于开关控制的电力系统广域阻尼控制器

吴华仁, 吴丹宁, 王启, 李晓慧

(南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏省 南京市 210042)

Switch Control Based Wide-Area Damping Controller of Power Systems

WU Hua-ren, WU Dan-ning, WANG Qi, LI Xiao-hui

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: A wide-area damping controller is researched to improve damping and dynamic stability of interconnected power grids, and a wide-area control algorithm of generator excitation system is proposed. In the proposed algorithm, the switch control is utilized to implement the feedback control of rotating speed from remote generators while the time-delay is taken into account. Using the proposed algorithm the adverse effect of time-delay can be suppressed, meanwhile the communication delay is considered. Through digital simulation of a 4-machine 2-region system, the performance of this wide-area damping controller is tested. Simulation results show that the dynamic stability of interconnected power grids can be improved by this wide-area damping controller.

KEY WORDS: wide-area control; switch control; power system stability; communication delay; wide-area measurement system(WAMS)

摘要: 研究了广域阻尼控制器以改善互联电力系统的阻尼和动态稳定性, 提出了发电机励磁系统的广域控制算法。该算法用开关控制实现来自远方发电机的转速反馈控制, 且考虑了通信时滞。该算法能减小通信时滞的不利影响。励磁系统的广域阻尼控制器以该算法为基础且包含超前-滞后网络。通过4机2区域系统的三相短路故障的数字仿真, 测试了该广域阻尼控制器的性能。仿真结果表明, 该广域阻尼控制器能改善互联电力系统的动态稳定性。

关键词: 广域控制; 开关控制; 电力系统稳定; 通信时滞; 广域测量系统(WAMS)

0 引言

电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)的协调设计能增强多机电力系统阻尼^[1], 但采取这些措施后, 仍不能保证互联电力系统在遭受大扰动后的稳定性^[2-3]。

广域测量系统(wide area measurement systems,

WAMS)能提供广域信号, 为增强多机电力系统阻尼提供了新的有利条件^[4-5]。采用广域信号的两层结构控制器可以改善多机电力系统的稳定性^[6]。文献[7]用广域信号提高了发电机非线性励磁控制和综合控制的效果, 但没有考虑通信时滞的影响; 文献[8]分析了时滞在广域电力系统稳定器设计中的影响, 提出了集中控制器, 当时滞小于0.25 s时, 该控制器能改善电力系统稳定性; 文献[9]设计了具有时滞补偿的励磁控制器, 小扰动仿真显示时滞补偿能改善互联电力系统阻尼; 文献[10]也采用相位补偿装置补偿时滞引起的相位滞后, 并进行了工程试验; 文献[11]用线性矩阵不等式(linear matrix inequalities, LMI)确定广域阻尼控制器参数, 并将简单实用的比例微分网络用于补偿通信时滞, 取得了较好的控制效果; 文献[12]将广域测量信号用于增强互联电网区间阻尼, 并探索用最小二乘预测算法解决通信时滞问题; 文献[13]采用Pade逼近表达通信时滞, 然后用 H_∞ 回路成形技术设计了电力系统阻尼控制器; 文献[14]利用线性多时滞系统稳定时滞域的拓扑性质, 在线性化模型的基础上设计了广域阻尼控制器; 文献[15]将电力系统建模为时滞微分方程的形式, 然后应用时滞系统稳定性理论和LMI确定控制器参数。

当时滞较小时, 以上广域阻尼控制方法能增强互联电力系统的阻尼。如果时滞引起的相位滞后比较大^[16], 则上述方法对改善互联电力系统的稳定性没有明显效果, 因此有必要研究新方法解决互联电力系统弱阻尼问题。

本文提出一种基于开关控制的广域阻尼控制器。该控制器用远方发电机的转速进行反馈控制。开关控制对广域反馈信号进行处理, 以便减小通信时滞的不利影响。4机2区域系统将用于测试该控

制器的有效性^[17]。

1 通信时滞的不利影响

电力系统在受到扰动后, 发电机转速的振荡可能持续十几 s 甚至几 min。如果远方发电机转速反馈信号没有通信时滞, 用这个反馈信号实现广域控制可以明显改善电力系统阻尼。图 1 是发电机 i 的经典 PSS 及广域阻尼控制器示意图, 用于发电机励磁控制。

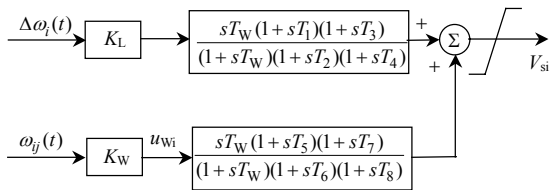


图 1 PSS 及广域阻尼控制器

Fig. 1 PSS and wide area damping controller

图 1 中: V_{si} 是励磁系统引入的辅助稳定信号; $\Delta\omega_i(t) = \omega_i(t) - 1$ 是发电机 i 的 PSS 输入信号, 其中 $\omega_i(t)$ 是发电机 i 的转速; $\frac{(1+sT_1)(1+sT_3)}{(1+sT_2)(1+sT_4)}$ 是 PSS 的超前-滞后补偿网络; $\omega_{ij}(t) = \omega_i(t) - \omega_j(t)$ 是发电机 i 的广域阻尼控制器输入信号, 用于增加互联电力系统阻尼, 其中广域信号 $\omega_j(t)$ 是发电机 j 的转速; $\frac{(1+sT_5)(1+sT_7)}{(1+sT_6)(1+sT_8)}$ 是广域阻尼控制器的超前-滞后补偿网络, 用于补偿励磁机输入到电转矩之间的相位滞后; K_L 和 K_W 是增益。

图 2 为 4 机 2 区域系统, 用于测试广域阻尼控制器, 同步发电机用两轴模型表示^[18]。4 台发电机中只有发电机 G_1 装设经典 PSS 和广域阻尼控制器。文献[17]给出了发电机和 PSS 的参数, $\omega_4(t)$ 是来自发电机 G_4 的广域信号。 $\omega_{14}(t) = \omega_1(t) - \omega_4(t)$ 是发电机 G_1 的广域阻尼控制器输入信号。广域阻尼控制器的超前-滞后补偿网络的参数为: $K_W = 16$, $T_5 = T_7 = 0.06$ s, $T_6 = T_8 = 0.02$ s。

大扰动是在一条联络线路的中点发生三相短路, 断开该联络线两端的断路器切除故障, 故障电流持续时间为 0.1 s, 故障切除后 0.6 s 重合闸成功。

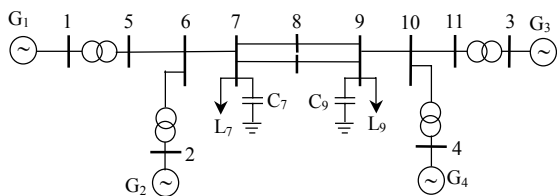


图 2 4 机 2 区域系统

Fig. 2 Four-machine two-area system

对发电机 G_1 有和没有广域阻尼控制器 2 种情况下系统的性能进行了仿真比较, 仿真结果如图 3 所示。图中曲线是发电机 G_1 和 G_4 的功角差 $\delta_{14}(t)$ 。曲线 a 是发电机 G_1 安装了经典 PSS 但没有广域阻尼控制器的情况。曲线 b 是发电机 G_1 安装了经典 PSS, 且 $\omega_{14}(t)$ 作为广域阻尼控制器输入信号的情况。曲线 b 显示系统有好的阻尼, 广域阻尼控制器能明显改善电力系统稳定性。

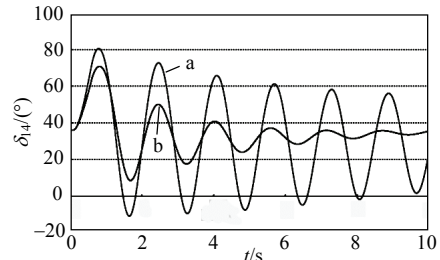


图 3 功角差曲线

Fig. 3 Curve of rotor angle differences

广域信号 $\omega_4(t)$ 在传输过程中不可避免地会出现通信时滞, 所以只能用 $\omega_{14}(t - T_d) = \omega_1(t - T_d) - \omega_4(t - T_d)$ 作为反馈信号, 其中 T_d 表示通信时滞。图 4 说明了通信时滞的不利影响, 图中曲线表示用 $\omega_{14}(t - T_d)$ 作为反馈信号, 时滞 $T_d = 0.45$ s 时的功角差 $\delta_{14}(t)$ 。曲线振荡发散, 说明大扰动后系统不稳定。

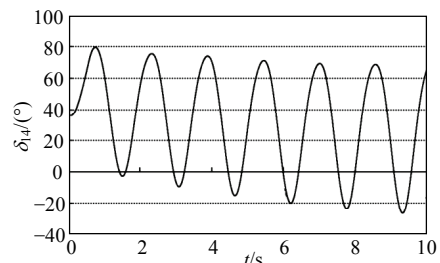


图 4 通信时滞的不利影响

Fig. 4 Negative effect of time delay

2 基于开关控制的广域控制

广域信号的时滞不利于电力系统稳定。本文用开关控制方法减小时滞的不利影响。图 5 解释了开关控制算法。图中 S_1 和 S_2 是开关。信号 $\omega_{ij}(t - T_d) = \omega_i(t - T_d) - \omega_j(t - T_d)$ 被存于寄存器(Buffer)1 和 2 中。

图中信号 $u_{wi}(t)$ 由开关控制产生, 理想情况下

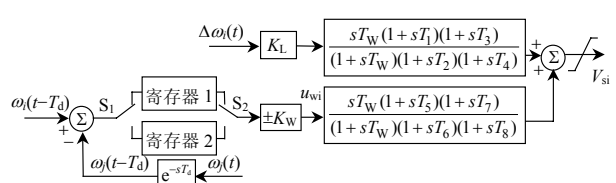


图 5 基于开关控制的广域控制

Fig. 5 Wide area control based on switch control

$u_{wi}(t)$ 应该与 $\omega_{ij}(t)$ 同相位并且成正比。图6用于说明开关 S_1 和 S_2 的切换规则,以便产生信号 $u_{wi}(t)$ 。图6中曲线a、b和c分别表示 $\omega_{ij}(t)$ 、 $\omega_{ij}(t-T_d)$ 和 $u_{wi}(t)$ 。电力系统在 $t=0$ 时受到扰动。由曲线a可知,在 $t=t_1, t_2, t_3, \dots, t_k$ 时, $\omega_{ij}(t)=0$; 而曲线b显示,在 $t=t_1+T_d, t_2+T_d, t_3+T_d, \dots, t_k+T_d$ 时, $\omega_{ij}(t+T_d)=0$, 开关 S_1 在这些时刻进行切换。开关 S_1 在寄存器1和寄存器2之间进行切换。在某个切换时刻,开关 S_1 从寄存器1切换到寄存器2,寄存器2清零,此后 $\omega_{ij}(t+T_d)$ 的半个波的值存于寄存器2中。而在下一个切换时刻,开关 S_1 从寄存器2切换到寄存器1,寄存器1清零,此后 $\omega_{ij}(t+T_d)$ 的半个波的值存于寄存器1中。

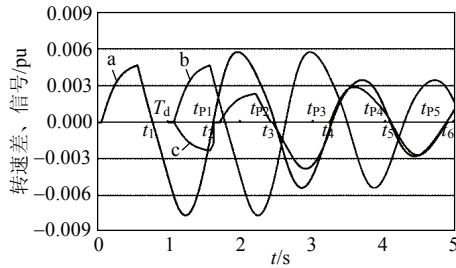


图6 切换时间点

Fig. 6 Switch time points

通过仿真具有经典PSS但没有广域控制的电力系统,可以获得 $\omega_{ij}(t)$ 的振荡周期 T 。用 $T_{P1}, T_{P2}, \dots, T_{Pk}$ 表示 t_2, t_3, \dots, t_{k+1} 的预测值。开关 S_2 在 $T_{P1}, T_{P2}, \dots, T_{Pk}$ 时刻切换,其中 $T_{P1}=cT, T_{P2}=3cT/2, c$ 是校正系数。考虑在增加广域控制后, $\omega_{ij}(t)$ 的振荡周期会有一个小改变。当 $t > T_d+t_1$ 时, t_1 能从 $\omega_{ij}(t-T_d)$ 中获得,所以可算出 $T_{P3}=t_1+3cT/2$ 。类似地, T_{P4} 和 T_{Pk} 可由下式求出

$$T_{P4}=t_2+3cT/2$$

$$T_{Pk}=t_{k-2}+3(t_{k-2}-t_{k-4})/2, \quad k \geq 5$$

因此信号 $u_{wi}(t)$ 可表示为

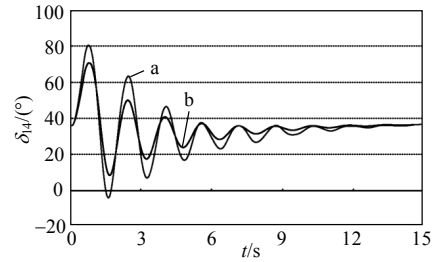
$$u_{wi}(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < T_d \\ -K_w \omega_{ij}(t-T_d), & T_d \leq t < T_{P1} \\ K_w \omega_{ij}(t-T_{P1}), & T_{P1} \leq t < T_{P2} \\ K_w \omega_{ij}(t+t_{k-1}-T_{Pk}), & T_{Pk} \leq t < T_{Pk+1}, k \geq 2 \end{cases} \quad (1)$$

对于 $k \geq 5$, T_{Pk} 与 T 无关,对于 $t > T_{P5}$,如果 $\omega_{ij}(t)$ 的振荡周期发生变化,这个算法能跟踪其变化。

时滞可分为不同的区间: $kT/2 < T_d < (k+1)T/2, k=0, 1, 2$ 。对于不同区间,算法有所不同。由于 T_d 通常小于 $3T/2$,因此只需考虑 $k=0, 1$ 和 2 情况下的算法。上面描述的算法适用于 $k=1$,即 $T/2 < T_d < T$ 的情况。

3 仿真结果

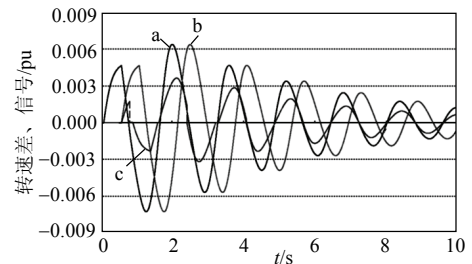
现将上面算法应用于4机2区域系统。该系统仅有发电机 G_1 装设经典PSS和广域阻尼控制器,大扰动事件如上所述。 $T=1.648$ s, $c=0.978$,通信时滞 $T_d=1$ s,即 $T/2 < T_d < T$,仿真结果如图7所示。图中曲线a表示有经典PSS和广域阻尼控制器,且存在 $T_d=1$ s通信时滞的功角差 $\delta_{14}(t)$ 。曲线b表示有经典PSS和广域阻尼控制器,但没有通信时滞的情况。曲线a所示的系统性能不如曲线b,但差别不大,这说明该算法能明显地改善系统阻尼。

图7 $T_d=1$ s时的功角差Fig. 7 Rotor angle differences for $T_d=1$ s

对于 $0 < T_d < T/2$ 的情况,可以推导出类似的算法。开关 S_1 的切换规律与上述相同。开关 S_2 在下列时刻切换: $T_{P1}=cT/2, T_{P2}=cT, T_{P3}=t_1+cT, T_{P4}=t_2+cT, T_{Pk}=t_{k-2}+(t_{k-2}-t_{k-4}), k \geq 5$ 。信号 $u_{wi}(t)$ 的表达式如下:

$$u_{wi}(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < T_d \\ K_w \omega_{ij}(t-T_d), & T_d \leq t < T_{P1} \\ -K_w \omega_{ij}(t-T_{P1}), & T_{P1} \leq t < T_{P2} \\ -K_w \omega_{ij}(t+t_{k-1}-T_{Pk}), & T_{Pk} \leq t < T_{Pk+1}, k \geq 2 \end{cases} \quad (2)$$

$T_d=0.5$ s属于 $0 < T_d < T/2$ 的情况。采用上述算法的广域阻尼控制器性能如图8所示。图中显示了 $T_d=0.5$ s时 $\omega_{14}(t)$ 、 $\omega_{14}(t-T_d)$ 和 $u_{w1}(t)/(2K_w)$ 的曲线。曲线a和b分别表示发电机 G_1 和发电机 G_4 之间的转速差 $\omega_{14}(t)$ 和 $\omega_{14}(t-T_d)$,曲线c表示信号 $u_{w1}(t)/(2K_w)$ 。从曲线a和c可见,信号 $u_{w1}(t)$ 与 $\omega_{14}(t)$ 的相位比较接近。转速差 $\omega_{14}(t)$ 衰减较快,说明系统有较好的阻尼。

图8 $T_d=0.5$ s时的转速差和信号Fig. 8 Speed differences and signal for $T_d=0.5$ s

按照上面原理也可以推导出 $T < T_d < 3T/2$ 情况时的算法。开关 S_1 的切换规律与上述相同。开关 S_2 的切换时刻为： $T_{P1}=3cT/2$ ， $T_{P2}=2cT$ ， $T_{P3}=t_1+2cT$ ， $T_{P4}=t_2+2cT$ ， $T_{Pk}=t_{k-2}+2(t_{k-2}-t_{k-4})$ ， $k \geq 5$ 。

$u_{wi}(t)$ 表示为

$$u_{wi}(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < T_d \\ K_w \omega_{ij}(t - T_d), & T_d \leq t < T_{P1} \\ -K_w \omega_{ij}(t - T_{P1}), & T_{P1} \leq t < T_{P2} \\ -K_w \omega_{ij}(t + t_{k-1} - T_{Pk}), & T_{Pk} \leq t < T_{Pk+1}, k \geq 2 \end{cases} \quad (3)$$

式(2)(3)有相同的形式，但式(3)中的 T_{Pk} 与式(2)中的不同。

图 9 显示了 $T_d=2$ s(即 $T < T_d < 3T/2$)时的广域控制仿真结果。曲线 a, b 和 c 分别表示 $\omega_{14}(t)$ ， $\omega_{14}(t-T_d)$ 和 $u_{w1}(t)/(2K_w)$ 。尽管通信时滞 T_d 达到 2 s，曲线 a 表明系统仍有良好的阻尼。

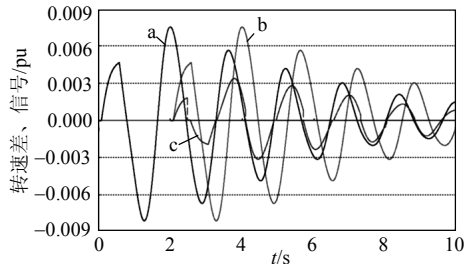


图 9 $T_d=2$ s 时的转速差和信号

Fig. 9 Speed differences and signal for $T_d=2$ s

T_{P1} ， T_{P2} ， T_{P3} 和 T_{P4} 与 $\omega_{14}(t)$ 的振荡周期 T 有关， T 又与系统的结构和参数有关。当系统的结构和运行参数发生变化时， $\omega_{14}(t)$ 的振荡周期 T 也会相应改变。图 10 说明了仿真获得的振荡周期 T 存在误差时广域阻尼控制器的性能。图 10 显示 $T_d=0.5$ s， T 误差为 10% 时的 $\delta_{14}(t)$ 曲线。曲线 a 与 b 只有较小的差别，说明该算法有较好的鲁棒性。

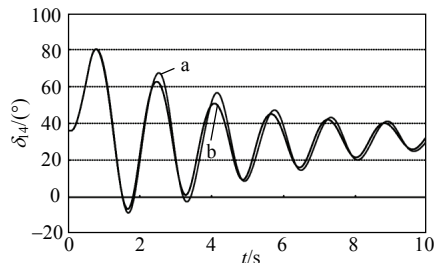


图 10 周期 T 的误差对广域阻尼控制的影响

Fig. 10 Effect of error of T on wide-area damping control

4 结论

本文使用开关控制方法对广域反馈信号进行处理，能减小通信时滞的不利影响。仿真结果显示，即使存在较长的通信时滞，以该算法为基础的广域

阻尼控制器也能明显增强互联电力系统阻尼，改善电力系统稳定性。这种广域阻尼控制器是鲁棒的，并且能跟踪 $\omega_{ij}(t)$ 振荡周期的变化。

参考文献

- [1] 郝正航, 李少波, 周杰娜, 等. 多机电力系统 PSS 参数优化新方法[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(2): 199-204.
Hao Zhenghang, Li Shaobo, Zhou Jiena, et al. Novel approach of parameter optimization for multi-machine power system stabilizers [J]. Control Theory & Applications, 2008, 25(2): 199-204(in Chinese).
- [2] 常乃超, 兰洲, 甘德强, 等. 广域测量系统在电力系统分析及控制中的应用综述[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 46-52.
Chang Naichao, Lan Zhou, Gan Deqiang, et al. A survey on applications of wide-area measurement system in power system analysis and control[J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 46-52(in Chinese).
- [3] 易俊, 周孝信. 电力系统广域保护与控制综述[J]. 电网技术, 2006, 30(8): 7-12.
Yi Jun, Zhou Xiaoxin. A survey on power system wide-area protection and control[J]. Power System Technology, 2006, 30(8): 7-12(in Chinese).
- [4] 陈贺, 刘明, 白宏, 等. 励磁系统的辅助阻尼控制研究[J]. 电网技术, 2007, 31(6): 38-44.
Chen He, Liu Ming, Bai Hong, et al. Research on auxiliary damping control of excitation system[J]. Power System Technology, 2007, 31(6): 38-44(in Chinese).
- [5] 于广亮, 张保会, 谢欢, 等. 不健全广域信息下时滞非线性鲁棒综合控制器设计[J]. 电网技术, 2007, 31(10): 7-13.
Yu Guangliang, Zhang Baohui, Xie Huan, et al. Design of a nonlinear robust integrated controller based on incomplete time-delay wide-area measurement information[J]. Power System Technology, 2007, 31(10): 7-13(in Chinese).
- [6] Okou F, Akhrif O, Dessaint L-A. Power systems stability enhancement using a wide-area signals based hierarchical controller [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(4): 1465-1477.
- [7] 于广亮, 张保会, 谢欢, 等. 基于广域信息的非线性全局综合控制器[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(4): 26-32.
Yu Guangliang, Zhang Baohui, Xie Huan, et al. A nonlinear global integrated controller based on wide-area measurement information [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(4): 26-32(in Chinese).
- [8] Wu H X, Tsakalis K S, Heydt G T. Evaluation of time delay effects to wide-area power system stabilizer design[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(5): 1935-1941.
- [9] 袁野, 程琳, 孙元章, 等. 广域阻尼控制的时滞影响分析及时滞补偿设计[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(14): 6-9.
Yuan Ye, Cheng Lin, Sun Yuanzhang, et al. Effect of delayed input on wide damping control and design of compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(14): 6-9(in Chinese).
- [10] 韩英铎, 吴小辰, 吴京涛. 电力系统广域稳定控制技术及其工程实验[J]. 南方电网技术, 2007, 1(1): 1-8.
Han Yingduo, Wu Xiaochen, Wu Jingtao. Research and experiment of wide-area stability control techniques in electric power systems

- [J]. Southern Power System Technology, 2007, 1(1): 1-8(in Chinese).
- [11] Wu H R, Wang Q, Li X H. PMU-based wide area damping control of power systems[C]. International Conference on Power System Technology, New Delhi, India, 2008.
- [12] 谢小荣, 肖晋宇. 采用广域测量信号的互联电网区间阻尼控制[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(2): 37-40.
Xie Xiaorong, Xiao Jinyu. Inter-area damping control of interconnected power systems using wide-area measurements [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(2): 37-40(in Chinese).
- [13] 石颀, 王成山. 考虑广域信息时延影响的 H_{∞} 阻尼控制器[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 30-34.
Shi Jie, Wang Chengshan. Design of H_{∞} controller for damping interarea oscillations with consideration of the delay of remote signal [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 30-34(in Chinese).
- [14] 王绍部, 江全元, 刘兆燕, 等. 计及反馈信号多时滞特性的广域阻尼控制[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(10): 18-22.
Wang Shaobu, Jiang Quanyuan, Liu Zhaoyan, et al. Wide-area damping control considering multiple delays of feedback signals [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(10): 18-22 (in Chinese).
- [15] 王伟岸, 马平, 蔡兴国. 考虑广域反馈信号时滞影响的附加励磁控制器[J]. 电网技术, 2008, 32(19): 50-55.
Wang Weian, Ma Ping, Cai Xingguo. Additional controller of excitation system considering time delay of wide-area feedback signal [J]. Power System Technology, 2008, 32(19): 50-55(in Chinese).
- [16] Majumder R, Chaudhuri B, Pal B C, et al. A unified Smith predictor approach for power system damping control design using remote signals[J]. IEEE Trans Control Systems Technology, 2005, 13(11): 1063-1068.
- [17] Kundur P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994: 813-814.
- [18] Anderson P M, Fouad A A. Power system control and stability [M]. Iowa: Iowa State University Press, 1977: 377-378.



吴华仁

收稿日期: 2009-01-06。

作者简介:

吴华仁(1956—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电弧短路故障、电力系统分析和控制, E-mail: huarenwu68@yahoo.com.cn;

吴丹宁(1986—), 女, 研究方向为电力系统分析和控制;

王启(1971—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统分析和控制;

李晓慧(1960—), 女, 学士, 副教授, 研究方向为电力系统分析和控制、电弧短路故障。

(责任编辑 王晔)