

基于 TMS320F28335 的电力系统稳定器的研究

李志军¹, 郝伟峰^{1,2}, 张利², 任晓辉²

(1. 河北工业大学电工厂, 天津 300130; 2. 河北工业大学电气与自动化学院, 天津 300130)

摘要: 目前国内普遍采用以电功率作为输入信号的单输入电力系统稳定器(PSS), 然而在原动机功率发生变化时, PSS本身不能区分系统波动和原动机功率波动, 容易引起“反调”。设计了一种基于 TMS320F28335 的双输入 PSS, 发电机的电功率和转子角速度作为该 PSS 的输入信号。论述了双输入 PSS 的模型, 硬件设计部分主要包括总体结构的设计, 软件设计部分包括总体设计及流程图。运用附加双输入 PSS 励磁调节器进行了阶跃和反调实验, 结果表明该 PSS 能够有效抑制低频振荡, 很好地解决“反调”问题。

关键词: 电力系统稳定器(PSS); 低频振荡; 阻尼; TMS320F28335; 反调

Research of power system stabilizer based on TMS320F28335

LI Zhi-jun¹, QIE Wei-feng^{1,2}, ZHANG Li², REN Xiao-hui²

(1. Electrical Equipment Factory of Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: At present, the single-input power system stabilizer (PSS) taking electric power as input signal is widely applied in China. But when the power of prime mover changes, PSS can not distinguish system fluctuations and prime mover's electric power fluctuations, which easily leads to "anti-regulation". In order to solve this problem, the dual-input PSS based on TMS320F28335 is designed, whose input signals are the angular speed of rotors and the electrical power of generator. The model of dual-input PSS is firstly described in the design. Then the part of hardware design mainly includes the design of the overall structure; the part of software design includes the overall design and the flow chart. At last, the step experiment and the "anti-regulation" experiment are conducted by using the excitation regulator of additional dual-input PSS. The results of experiments show that the PSS can effectively suppress low frequency oscillations and solve the problem of "anti-regulation".

Key words: power system stabilizer; low-frequency oscillations; damping; TMS320F28335; anti-regulation

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)06-0112-05

0 引言

随着电力工业的迅速发展, 电力系统的规模越来越大, 单机容量也越来越大, 许多大型发电机组都普遍采用快速励磁调节器。快速励磁调节器在提高系统响应速度的同时, 却大大减小了励磁系统时间常数, 降低了系统阻尼, 使系统中经常出现弱阻尼甚至负阻尼, 导致了系统抑制低频振荡的能力下降^[1]。低频振荡严重时会导致系统解列或失去稳定, 是大型电力系统互联影响系统稳定性的最重要的问题之一^[2]。目前, 主要通过附加励磁控制装置来解决低频振荡问题, 其中电力系统稳定器是一种有效的附加励磁控制^[3]。电力系统稳定器(Power System Stabilizer, PSS)是励磁装置的一个附加部件, 用于

提高电力系统阻尼能力, 抑制系统的低频振荡, 提高电力系统的稳定性。

目前国内生产的电力系统稳定器多数只采用电功率作为输入信号, 然而用电功率作为输入信号的 PSS 在原动机功率发生变化时, 由于 PSS 自己不能区分系统波动和原动机功率波动, 仍然会产生信号作用于励磁系统, 造成无功功率波动, 这种现象就叫“反调”^[4]。解决“反调”问题的有效措施之一就是采用双输入信号的 PSS。本文设计了基于 TMS320F28335 的电力系统稳定器, 其在不影响阻尼效果的情况下解决了“反调”问题。

1 双输入电力系统稳定器的模型

IEEE 给出的双输入电力系统稳定器的模型^[5],

如图 1 所示。其中, 输入信号 ω 表示发电机转子角速度; P_e 表示机组的电功率; $\Delta\omega$ 为转子角速度偏差; ΔP_e 为电功率偏差; ΔP_a 为发电机的加速功率偏差。为了有效地隔离稳态分量, 以工程微分的方法对每个输入都采用二阶直流隔离环节, 隔直时间常数如图 1 中 $TW1 \sim TW4$ 所示。在稳态运行时, 由于隔直环节的作用, PSS 的输出信号为零。当系统

受到扰动时, 系统的低频振荡分量是 PSS 输出信号产生阻尼低频振荡的转矩。图中 $Ks3$ 正常为 1, 而 $Ks2$ 为 $T_7/(2H)$, H 是同步电机惯性常数。指数 N 和 M 允许表示成“斜坡跟踪”和较简单的滤波器特性。相位补偿由二级超前一滞后或滞后一超前环节 $T_1 \sim T_4$ 来实现^[6]。

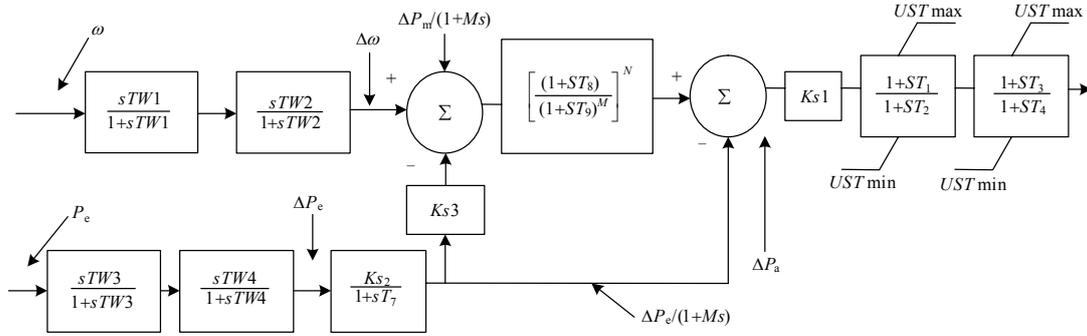


图 1 双输入电力系统稳定器模型图

Fig. 1 Dual-input power system stabilizer

根据旋转物体的力学定律, 同步电机转子有如下式 (1) 数学关系式:

$$M \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e \quad (1)$$

式中: M 为机组转子的转动惯量; T_m 为原动机转矩; T_e 为发电机的电磁转矩。

采用标幺值表示式 (1) 后, 在速度变化不大时采用功率代替转矩, 则该关系式变为:

$$\frac{M}{\omega_0} \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e \quad (2)$$

式中, ω_0 为同步转速, 标幺值为 1。则有

$$M \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e \quad (3)$$

写成偏差形式, 用 S 代替 d/dt , 可得:

$$Ms\Delta\omega = \Delta P_m - \Delta P_e \quad (4)$$

由式 (4) 可以得到:

$$\Delta\omega = \frac{\Delta P_m - \Delta P_e}{Ms} \quad (5)$$

若 Ms 足够大, 则: $Ms \approx 1 + Ms$, 所以

$$\Delta\omega = \frac{\Delta P_m - \Delta P_e}{1 + Ms} \quad (6)$$

移项得到:

$$\frac{\Delta P_m}{1 + Ms} = \Delta\omega + \frac{\Delta P_e}{1 + Ms} \quad (7)$$

由于 $\Delta\omega$ 中还有各种噪音, 在式 (4) 两端乘以 $G(s)$ 函数滤去噪音可得:

$$\frac{\Delta P_m}{1 + Ms} G(s) = (\Delta\omega + \frac{\Delta P_e}{1 + Ms}) G(s) \quad (8)$$

其中: $G(s)$ 为陷波器, 本文选用的陷波器函数为:

$$G(s) = \left[\frac{1 + sT_8}{(1 + sT_9)^M} \right]^N \quad (9)$$

所以发电机的加速功率偏差 ΔP_a 为:

$$\Delta P_a = \frac{\Delta P_m}{1 + Ms} G(s) - \frac{\Delta P_e}{1 + Ms} \quad (10)$$

如图 1 所示, 将算出的 ΔP_a 作为 PSS 的输出, 以加速功率偏差 ΔP_a 为输出信号的 PSS 是没有“反调”现象的。

2 电力系统稳定器的硬件设计

硬件设计主要包括两大部分, 一是 F28335 芯片的扩展部分设计, 包括外围存储器扩展以及外围接口扩展电路等^[7], 主要包括电源模块、A/D 转换模块及外围存储器模块等; 二是各个功能模块的设计, 主要包括触摸式显示器、在线修改参数及故障录波等模块。电力系统稳定器的系统硬件结构图如图 2 所示。

测量回路将发电机机端三相电压和三相电流、转子电流和转子电压等信号进行隔离并处理, 经过 A/D 转换后, 输入到 F28335 中, 经过交流采集算法及数字滤波实现系统数据采集。然后根据测量到的机端电压来计算有功功率和无功功率等, 在发电机励磁控制器上附加一个控制信号, 为励磁控制器提供一个附加控制。

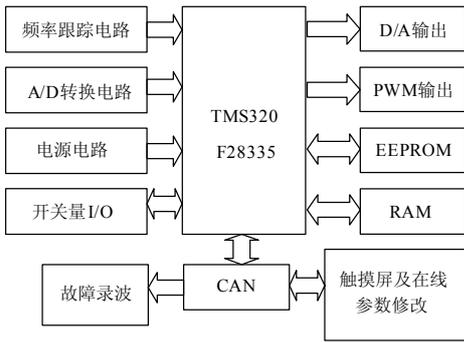


图 2 PSS 系统硬件结构图

Fig.2 Diagram of the PSS system hardware structure

系统的工作过程如下：系统上电复位后，TMS320F28335 首先执行其内部固化的引导程序，选择引导方式为 Flash 引导加载，执行位于内部 Flash 中的程序。同时，三相电压、三相电流信号经滤波器接到 F28335 的 ADCIN 引脚；开关量输入信号经过光耦隔离后，经过电平变换，接到 F28335 的 GPIO 引脚。F28335 对这些输入信号进行计算处理后输出给 D/A 转换模块完成控制信号的输出。特别注意的是 TMS320F28335 中 A/D 转换模块要求输入电压在 0~3 V，所以来自于电压、电流互感器的信号需要通过电平转换电路进行电压转换，以满足 F28335 的要求。图 3 为本文设计的双输入 PSS 实物图。

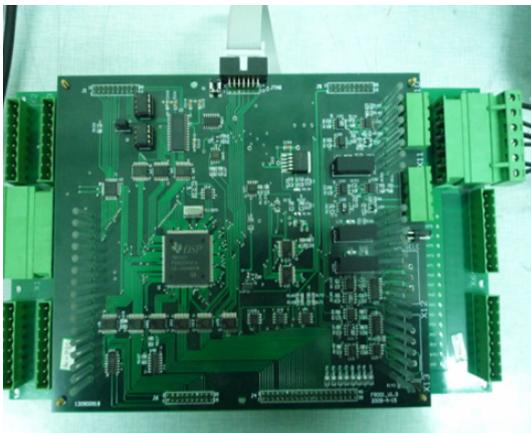


图 3 双输入 PSS 实物图

Fig.3 Physical picture of dual-input PSS

3 电力系统稳定器的软件设计

3.1 软件的总体设计

软件的总体设计如图 4 所示。从图中可以看出，整个软件设计的核心在于 PSS 的计算部分，在这里我们采用了简单而又准确的离散化算法，同时在设计中，使用浮点计算，保证其正确性和精度。

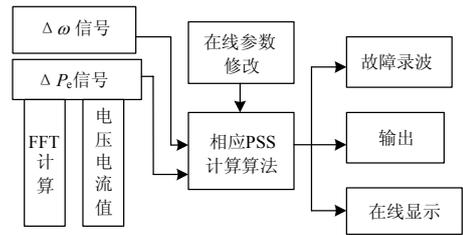


图 4 软件总体设计图

Fig.4 System design diagram of software

整个程序采用了模块化设计，即在不同的模块中完成不同的子程序功能，这样既条理清晰，又易于修改。主程序的流程图如图 5 所示。

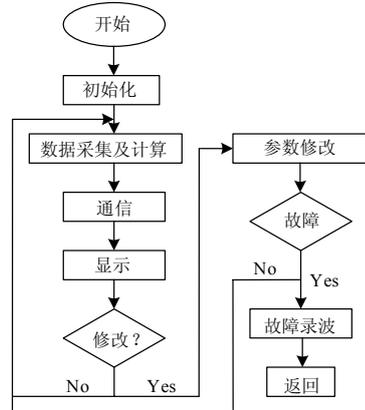


图 5 主程序流程图

Fig. 5 Flow diagram of main program

3.2 转速信号的获取

目前应用最广泛的双输入电力系统稳定器的输入信号为电功率信号 P_e 和转子转动角速度 ω 。由于电功率信号 P_e 在励磁控制器中已经存在，不需要特别求解。对于转子角速度 ω 信号，通常有两种方法获取：一种为硬件实现方法；另一种为软件实现方法。硬件产生内电势的方法简单易行，但其中的交轴电抗为一个变值，所以很难获得，而且硬件模拟的交轴电抗容易改变，这是该方法的最大缺点，因而在实际应用中很少用这种方法获得转速 ω 信号^[8]。相对而言，用软件方法获得 ω 信号简单可靠，灵活方便，所以被广泛采用。

本文仅对转速信号的软件获取方法进行简单的介绍。通过求解电势三角形求得内电势的大小，再求解内电势与发电机机端电压的夹角，进而求得内电势的角频率。发电机具有图 6 所示的向量关系，据此可以求解其中的向量三角形，从而获得内电势的角频率，以内电势的角频率变化量来代替发电机角速度偏差量，所以获取转子角速度的关键是求得内电势的角频率。

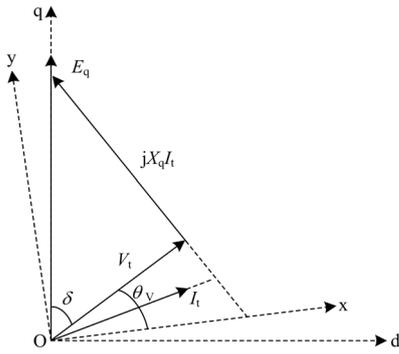


图 6 发电机功角计算向量图

Fig. 6 Vector diagram of power torque angle

在图 6 中, oxy 为同步坐标系, odq 为 dq 坐标系 (od 为发电机转子的直轴, oq 为发电机转子的交轴), V_t 和 I_t 分别为相电压和相电流。可以看出, 由于 $\theta_q = \delta + \theta_v$, 而相电压 V_t 与 x 轴的夹角 θ_v 可以通过对采样的电压互感器信号进行过零检测得到, 因而要确定发电机转子的位置 θ_q (q 轴与 x 轴的夹角), 需要求出发电机内电势与相电压的夹角, 即功角 δ 。内部电势的幅值 E_q 可以由式 (11) 求出:

$$E_q = \frac{V_{AB}}{1.732} + x_q I_c \quad (11)$$

式中: V_{AB} 为 AB 相的线电压; I_c 为 C 相的相电流; x_q 为同步交轴电抗。则有:

$$\delta = \arccos \frac{E_q^2 + V_t^2 - (x_q I_t)^2}{2E_q V_t} \quad (12)$$

求得发电机功角 δ 后, 再根据 $\theta_q = \delta + \theta_v$, 得到发电机转子的位置 θ_q , 机组内电势角频率可通过对 θ_q 求导得到, 以内电势的角频率变化量来代替发电机角速度偏差量^[9], 即获取了转速信号。

4 PSS 实验

在下面的实验中, 通过调节, 将发电机的有功功率设为 4 000 W, 无功功率设为 1 000 W; 双输入 PSS 中的参数值设置如下:

$TW1=4$ s, $TW2=4$ s, $TW3=2$ s, $TW4=2$ s, $T_1=0.1$ s, $T_2=0.1$ s, $T_3=0.1$ s, $T_4=0.1$ s, $T_7=1.000$ s, $T_8=0.5$ s, $T_9=0.1$ s, $Ks1=0.5$ p.u., $Ks2=1$ p.u., $Ks3=1$ p.u., $M=5$, $N=1$ 。

单输入 PSS 中的参数, 只需将双输入 PSS 中转子角速度 ω 一路参数 $TW1$, $TW2$ 设置为零即可, 其余参数不变。

4.1 PSS 功能试验

在励磁调节器的综合输入点上输入一个持续的

振荡信号, 观察发电机输出有功功率和 PSS 输出的变化曲线, 比较两者的波形。实验用来证明当发电机有功功率振荡时, PSS 有输出并起到抑制振荡的作用。通过实验可以得到有功功率和 PSS 输出响应曲线如图 7。其中, 波形 A 表示有功功率; B (放大 10 倍) 表示 PSS 输出。

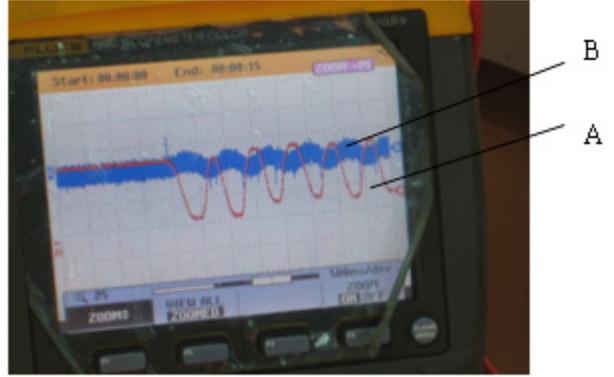


图 7 有功和 PSS 输出波形图

Fig.7 Active power and PSS output waveform diagram

如图 7 所示, 有功功率出现振荡时, PSS 有输出, 并且同有功功率的波形相位相差 180° 。实验证明了 PSS 对有功功率的振荡有抑制作用。

4.2 PSS 阶跃实验

电压阶跃响应实验是用以检验 PSS 抑制系统振荡的能力。在励磁调节器的综合给定点上输入一个电压给定值 5% 的阶跃信号, 先不投入 PSS, 观测发电机有功功率变化曲线, 再投入 PSS, 观测发电机输出有功功率的变化曲线, 比较两者波形变化的差别。通过实验得到的有功功率和 PSS 输出响应曲线如图 8。其中, 波形 A 表示有功功率; B (放大 10 倍) 表示 PSS 输出。



图 8 阶跃实验波形

Fig.8 Waveforms of step experiment

如图 8 所示, PSS 投入前, 发电机有功在阶跃作用下开始振荡。在 PSS 投入时刻, PSS 有输出, 输出波形和有功功率的波形相位相差 180° , 并且

在 PSS 投入后有功功率振荡幅值迅速降低。这就证明了 PSS 能够有效提高发电机的阻尼, 显著降低系统的低频振荡。

4.3 “反调”实验

无功反调: 就是在仅以电功率为输入信号的电力系统稳定器投入的条件下, 当通过减小原动机的输入功率来减小发电机出力时, 若调整速度较快, PSS 会误动作而输出信号给励磁调节器从而导致发电机的无功输出突然大幅度增加。如果增加有功, PSS 也会误动作而输出信号给励磁调节器导致发电机的无功输出突然大幅度减小。

运用附加单输入 PSS 模型励磁调节器做实验。调节原动机的输入功率来调节发电机出力, 即调节有功。发电机有功和 PSS 输出情况如图 9 所示, 其中, 波形 A 表示有功功率; B (放大 10 倍) 表示 PSS 输出。

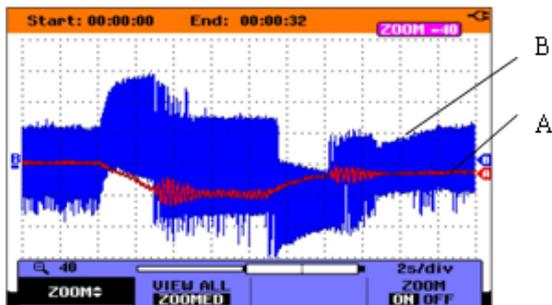


图 9 单输入信号 PSS “反调”实验录波

Fig.9 Anti-regulation experiment recorded-wave of single-input PSS

如图 9 所示, 在发电机有功功率减小时, PSS 有输出, 并且输出波形同有功波形反相; 当发电机有功功率增加时, PSS 有输出且波形同有功波形反相。实验说明在有功功率变化时, PSS 动作, 输出信号出现“反调”现象。

运用附加双输入 PSS 模型励磁调节器重新做实验, 发电机有功和 PSS 输出情况如图 10 所示, 其

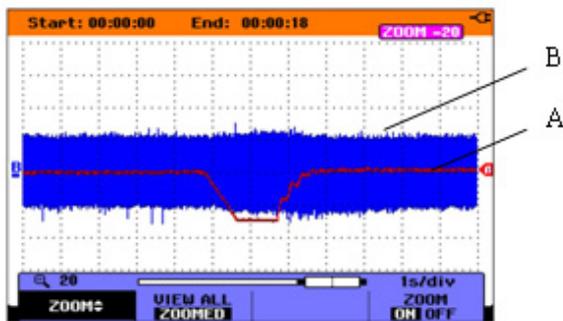


图 10 双输入信号 PSS “反调”实验录波

Fig.10 Anti-regulation experiment recorded-wave of dual-input PSS

中, 波形 A 表示有功功率; B (放大 10 倍) 表示 PSS 输出。

如图 10 所示, 在发电机有功功率减小和升高时, PSS 基本没有动作, 没有信号输出, “反调”现象基本没有。

5 结论

本文设计的电力系统稳定器利用 TMS320F28335 强大的运算能力和丰富的外围接口, 实现了电功率和转子角速度的双信号输入。该电力系统稳定器为用户提供友好的人机界面, 使用户能够方便地实现 PSS 参数显示和修改, 故障诊断和定位, 故障录波, 实时在线帮助和仿真等功能。实验结果表明双输入电力系统稳定器能够很好地解决以电功率为输入信号的单输入电力系统稳定器无法解决的“反调”问题。

参考文献

[1] 李奇,陈维荣,段涛,等.基于随机聚焦粒子群算法的多机系统 PSS 参数优化[J].电力系统保护与控制, 2009, 37(13): 13-18, 57.
 LI Qi, CHEN Wei-rong, DUAN Tao, et al. Parameter optimization of multi-machine power system stabilizers based on stochastic focusing particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(13): 13-18, 57.

[2] 荣雅君, 贾艳, 刘琳, 等. 基于粒子群优化算法的电力系统稳定器设计[J]. 继电器, 2008, 36(4): 23-26.
 RONG Ya-jun, JIA Yan, LIU Lin, et al. Design of power system stabilizer on particle swarm optimization[J]. Relay, 2008, 36(4): 23-26.

[3] 杨立环, 徐峰, 胡华荣, 等. 电力系统稳定器 PSS2A 现场试验及参数整定[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 112-114,128.
 YANG Li-huan, XU Feng, HU Hua-rong, et al. Test and parameter-setting of power system stabilizer- PSS2A[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 112-114,128.

[4] 韩石成. 小浪底水电厂电力系统稳定器无功反调现象及分析[J]. 水电能源科学, 2007, 25 (2): 116-118.
 HAN Shi-cheng. Analysis of unit reactive power antiregulation at Xiaolangdi hydropower plant[J]. Water Resources and Power, 2007, 25 (2): 116-118.

[5] IEEE Std 421.5—1992 IEEE recommended practice for excitation system models for power system stability studies[S]. New York, NY 10016-5997, USA, IEEE, 2006.

(下转第 130 页 continued on page 130)

- ZHANG Hao, WANG Wei, XU Li-jie. Application of image recognition technology in electrical equipment on-line monitoring[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38 (6) : 88-91.
- [3] 耿健. 流媒体在网络视频监控中的应用[J]. 科技资讯, 2009 (26) : 13-15
- GENG Jian. Application of streaming media technology in network[J]. Science & Technology Information, 2009, (26) : 13-15.
- [4] 陈超. 电力系统图像监控技术的研究[J]. 硅谷, 2008 (22) : 15-16.
- CHEN Chao. Research of electric power image monitoring system[J]. Silicon Valley, 2008 (22) : 15-16.
- [5] 丁正胜. 无人值班变电站远程图像监控系统应用[J]. 大众用电, 2009 (3) : 24-25.
- DING Zheng-sheng. Application of non-attended substation substation image remote-monitoring system[J]. Popular Utilization of Electricity, 2009 (3) : 24-25.
- [6] 雍文涛. 输电线路危险点远程图像监控系统[J]. 电力信息化, 2008 (1) : 52-55.
- YONG Wen-tao. Image remote-monitoring system of transmission lines dangerous items[J]. Electric Power Information Technology, 2008 (1) : 52-55.
- [7] 李万红. 基于流媒体的视频监控技术在施工工程中的应用[J]. 电脑知识与技术, 2009 (14) : 3779-3780.
- LI Wan-hong. Application of video-monitoring technique based on streaming media to engineering projects[J]. Computer Knowledge and Technology, 2009 (14) : 3779-3780.
- [8] 马冬雪. 视频监控在安阳供电公司的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (11) : 128-133.
- MA Dong-xue. Video surveillance in the application of Anyang power supply company[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (11) : 128-133.
- [9] 杨俊宏, 李晓彤. 电力远程图像监控系统建设[J]. 云南电力技术, 2009 (1) : 36-37.
- YANG Jun-hong, LI Xiao-tong. Construction of electric power image remote-monitoring system[J]. Yunnan Electric Power, 2009 (1) : 36-37.
- [10] 洪洲, 潘功茂, 赵江良. 变电站图像监控系统[J]. 农村电气化, 2008 (10) : 25-27.
- HONG Zhou, PAN Gong-mao, ZHAO Jiang-liang. Transformer substation image monitoring system[J]. Rural Electrification, 2008 (10) : 25-27.

收稿日期: 2010-04-06; 修回日期: 2010-05-20

作者简介:

练笔战 (1964-), 男, 学士, 高级工程师, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: 51805745@qq.com

杨扬 (1982-), 女, 硕士, 助理工程师, 研究方向为信息化技术。

(上接第 116 页 continued from page 116)

- [6] 李辉. 加速功率型 PSS 在抽水蓄能电站的应用[J]. 电网与清洁能源, 2007, 10 (5) : 46-49.
- LI Hui. Application of acceleration power PSS to pumping-storage power station[J]. Power System and Clean Energy, 2007, 10 (5) : 46-49.
- [7] 宫鑫, 宋稳力. 基于 TMS320F28335 的三相 PWM 整流器设计与实现[J]. 机械与电子, 2008, 10 (3) : 75-77.
- GONG Xin, SONG Wen-li. Design and realizing of three-phase voltage PWM rectifier based on TMS320F28335[J]. Mechanical and Electronic, 2008, 10 (3) : 75-77.
- [8] 许其品, 胡先洪, 陈小明. 双输入电力系统稳定器实现方法探讨[J]. 水电自动化与大坝监测, 2008, 32 (5) : 8-11.
- XU Qi-pin, HU Xian-hong, CHEN Xiao-ming. Methods for realization of dual-input power system stabilizer[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2008, 32 (5) : 8-11.
- [9] 康健, 丁凯. 加速功率型电力系统稳定器输入变量的获取[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (11) : 87-96.
- KANG Jian, DING Kai. Discussion on input state variables of an improved rotational speed power system stabilize[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (11) : 87-96.

收稿日期: 2010-04-05; 修回日期: 2010-05-29

作者简介:

李志军 (1964-), 男, 教授级高级工程师, 博士, 硕士生导师, 长期从事电力系统及自动化设备的设计和研究工作;

郝伟峰 (1984-), 男, 硕士研究生, 现从事励磁装置、电力系统稳定器的研究; E-mail: qieweifeng@163.com

张利 (1986-), 女, 硕士研究生, 现从事励磁装置、电力系统稳定器的研究。