

# 微型机继电保护测试装置监控系统的研制

陈铸华<sup>1</sup>, 彭红海<sup>2</sup>, 李晓<sup>2</sup>

(1.长沙电力职业技术学院, 湖南 长沙 410131; 2.湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 针对已研制的继电保护测试装置对数字化、模块化、小型化、嵌入式人机界面等功能的需求。从硬件结构和软件设计两个方面考虑, 该文提出了一种微机继电保护测试装置的监控系统设计方案。整机采用两套 DSP+CPLD 分别作为信号发生和人机监控模块, 其中监控 DSP 系统赋予了整机能交互和保护自检功能, 系统采用自定义内部通信协议由内部 CAN 通讯接口传输数据, 实现各种继电保护测试功能。文中分析了在监控系统中应用实时操作系统 DSP/BIOS 的软件结构设计与实现。该系统目前正在一种新型继电保护测试装置中得到应用。

**关键词:** 继电保护测试仪; 监控系统; DSP; CPLD; 实时操作系统

## Research of monitoring system used in microcomputer protective relay test device

CHEN Zhu-hua<sup>1</sup>, PENG Hong-hai<sup>2</sup>, LI Xiao<sup>2</sup>

(1.Changsha Electric Power Technical College, Changsha 410131, China; 2.College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082,China)

**Abstract:** In order to satisfy with the needs of digitalize, modular, small and man-machine interface function which applies to the new microcomputer typed relay protection test device and considering the hardware structure and the software, this paper proposes one kind of monitoring system design for new typed relay protection test device system. The machine takes the DSP and CPLD as the signal generation module and the man-machine monitoring system module. The monitoring system module makes this device possess man-machine interface function and protection self-checking function. The system uses the definition of internal communication protocol by the internal CAN interface data communication to achieve a variety of relay testing. The paper analyzes the application of real-time operating system DSP/BIOS software design and implementation of structural in the monitoring system. The system has been currently applied in a new type of relay protection test devices.

**Key words:** protective relay test device; monitoring system; DSP; CPLD; real-time operating system

中图分类号: TM935.1 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)21-0090-05

## 0 引言

继电保护测试装置的发展趋势要求具备数字化、高效的数据处理能力、完善的测试和自检功能、装置模块化、小型化、人机界面友好等特点, 特别是由微型机继电保护测试装置与被测装置所构成的继电保护闭环自动测试系统 CCARTS (Closed Loop and Automatic Relay Test System) 是今后一段时期内继电保护测试技术发展的主流<sup>[1]</sup>。同时, 随着数字式继电保护装置与电子式互感器接口研究的深入, 研发工作中迫切需要一种能提供从实际高压电网采样输出模拟量的高精度小电压信号或是全数字量的测量和保护信号发生装置。该微机继电保护测试装置是在研制成功的“TQWX 微型机继电保护测试仪”基础上, 采用两套 DSP+CPLD 构成信号发生主控模块和嵌入式人机监控模块, 采用自定义内部

通信协议, 通过模块间内部 CAN 通讯接口传输测试数据, 尤其与湖南大学研制的“多功能微机保护与变电站综合自动化实验培训装置”相结合, 构成一套完整的培训系统, 可以根据实验需要灵活配置, 通过从上位机下载保护程序软件, 可完成电流、电压、功率方向等多种继电保护实验以及自动重合闸、低频减载、振荡闭锁、故障录波和故障测距等多种功能。测试装置新增的人机监控 DSP 系统赋予了整机能交互和保护自检功能, 同时还增加了基于 IEC60870-5-103 协议的微机保护装置闭环自动测试功能。利用 103 规约进行通信, 测试装置与被测试微机保护设备之间可通过开关量电缆、模拟量电缆和通讯介质联成一个闭环系统, 完成对微机保护装置的模数变换系统、开关量输入回路检验和遥控三种主要测控功能的闭环调试任务<sup>[2]</sup>。

### 1 系统设计原理

新型继电器保护测试装置的软硬件系统结构均采用模块化设计, 系统硬件主要由信号主控模块、嵌入式人机监控模块、功放模块、通讯模块、电源模块以及上位 PC 机组成。软件设计上上位机和下位机两部分: 上位机采用 VC6.0 软件设计监控平台, 通过人机交互界面下载相应测试操作程序模块至 DSP 运行即可。下位机程序包括波形生成算法程序(完成变频、变幅、变相、谐波叠加等), 通讯模块程序, 控制液晶显示程序以及 PID 神经元网络闭环控制算法程序。DSP 通过间隔查表算法输出所需波形的数字信号, 再经过 16 位高精度串行 DA 数模转换器转换成模拟信号, 最后通过低通滤波器滤波后得到精度高、失真小的多路电压信号, 输出相位精度可达  $0.1^\circ$ , 对于 50 Hz 的基波由 360 个点高密度拟合。监控 DSP 系统的 ADC 端口再将采集到的模拟量转化为数字量送到 DSP 进行比较和计算, 通过自适应 PID 神经元控制算法实现微小信号输出的闭环稳定控制。小信号还可以经功放输出放大的电压和电流测试信号, 其范围  $0\sim 120\text{ V}$  和  $0\sim 30\text{ A}$ 。另外, 本系统还采用了 10 M 以太网控制器 CS8900A 与 DSP 芯片的以太网接口设计方案, 使装置具备了输出符合 IEC60044-7/8 标准要求的全数字量测试信号功能。整机系统结构如图 1 所示。本文着重分析监控模块的软硬件设计, 装置其它部分另撰文论述。

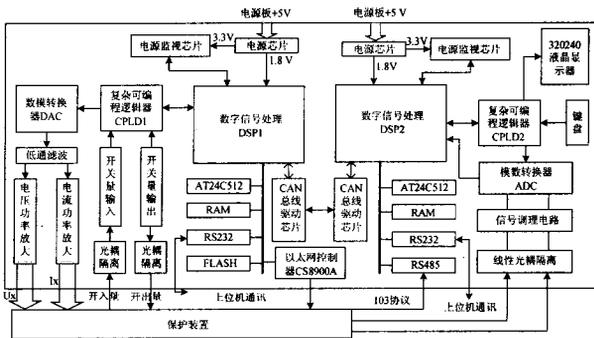


图 1 新型继电器保护测试装置的系统结构图

Fig.1 New microprocessor relay protection testing device structure

### 2 人机监控系统总体设计

人机监控系统模块 (man-machine-interface module) 包括监控 DSP 板及外围硬件电路、CPLD EPM7256 逻辑控制电路、A/D 模数转换电路、键盘和液晶显示驱动电路等。具体功能包括各类继电器保

护试验程序的下载与调用、对被测保护装置进行闭环自动调试、提供装置调试和试验模块选择界面、提供修改定值及参数的界面、循环显示电压电流输出信号的状态和参数、显示本身的运行状况、显示故障信息等。人机监控系统模块结构图如图 2 所示。

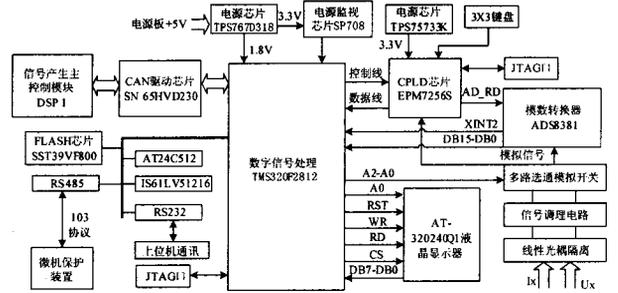


图 2 人机监控系统模块结构图

Fig.2 MMI system module structure

继电器保护测试装置一般由上位机 (PC 机) 控制下载试验程序完成相应测试任务, 当装置脱离 PC 机独立工作时, 嵌入式人机监控系统就充当了上位机的作用。监控系统内置的  $320\times 240$  点阵大屏幕高分辨率液晶显示屏用于人机交互, 各组试验和控制操作可通过液晶显示屏由键盘设定, 操作界面和试验结果均可汉化显示, 直观清晰。由于功率放大器功耗大, 并且电压源不允许短路, 在发生过温、电压源短路等故障信号时, 系统一方面通过硬件保护电路立刻动作切断被保护芯片电源, 另一路将由 CPLD EPM7256 内部逻辑检测到后把保护信号送往上位机程序判断, 并切断 DAC 输出信号, 从而使设备有自我保护和一定的故障自诊断功能。

监控系统采用了 TI 公司的 32 位高性能 DSP 芯片 TMS320F2812。其最高时钟频率为 150 MHz, 内部有 128 K Flash, 18 K SARAM, 片上资源丰富<sup>[3,4]</sup>。复杂可编程逻辑器件 (CPLD) 在主控板中作为逻辑粘合芯片。设计中采用 ALTERA 公司 MAX7256S 系列的 EPM7256QC-10 芯片。CPLD 可实现在系统编程 (In System Programmable), 应用 MAX+Plus II 或 Quartus 开发工具软件, 采用 VHDL 语句可以方便地进行编程并修改设计以实现一定的逻辑输入和输出功能<sup>[5]</sup>。系统采用自顶向下的设计方法并综合了 VHDL 语言和图形设计完成了系统的逻辑译码、时序控制和键盘输入扩展功能。除扩展 I/O 口之外, CPLD 还和 DSP 的其它控制信号和数据线相连, 利用等精度测频法完成高精度频率的测量任务<sup>[6]</sup>。

液晶显示模块采用了台北晶采科技股份有限公司生产的 AT-320240Q1 型液晶显示屏, 其内部嵌有 SED1335 控制器<sup>[7]</sup>。另外, 装置中的 A/D 转换模

块采用了高精度ADC转换芯片ADS8381，并通过CPLD逻辑控制完成对测试仪模拟输出信号的采集和A/D转换功能。为实现装置内部与主控制DSP模块之间的CAN通讯，人机监控模块采用了CAN通讯收发接口芯片SN65HVD230，该芯片具有差分收发能力，抗电磁干扰能力很强，最高通讯速率可达1 Mbit/s。同时，监控模块还通过片上一路SCI串口控制器扩展了RS232调试串口。通过与相应的上位机软件的配合，调试串口为用户提供包括修改装置参数、调试装置各模块功能、查看装置运行信息、查看故障信息、查看装置实时录波数据等。

为了调试和存储部分临时变量，系统还扩展了一片外部SRAM芯片IS61LV51216(512 K×16 bit)，采用CS6信号进行片选，占据片外0X100000~0X1FFFFFF空间。为了保存下载的各类试验程序，系统通过片外数据线和地址线扩展了一片FLASH芯片SST39VF800(512 K×16bit)。该芯片内页长度为2 K，块长度为32 K，擦写次数可达10万次，数据可保持100年以上，采用CS2信号进行片选，占据片外0X80000~0XFFFFFF空间。另外，系统还通过SPI串行接口扩展了一片串行EEPROM芯片，用来保存定值和控制字等需要频繁改动的重要信息。

### 3 人机监控系统软件设计

人机监控DSP系统软件程序主要包含主运行程序、定时采样中断服务程序、键盘中断处理程序、告警模块程序和通讯程序。调试菜单程序和告警模块程序采用模块化设计。为保证实时处理和高速性的要求，装置采用多线程实时操作系统DSP/BIOS<sup>[8]</sup>来开发人机监控系统软件。基于DSP/BIOS的监控DSP板系统软件流程图如图3所示。

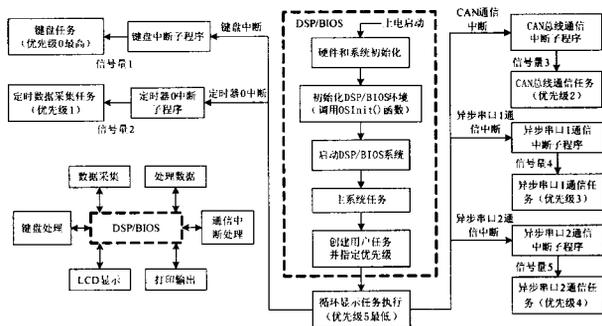


图3 基于DSP/BIOS的监控系统流程图

Fig.3 MMI system based on DSP/BIOS flowchart

#### 3.1 DSP/BIOS 实时操作系统的应用程序设计

新型继电保护测试装置工作在调试和运行两种状态下。装置处于调试状态时，系统停止定时采样

中断，这时人机接口程序实现时间、口令、通讯接口的设置，对装置的开关量通道和模数/数模通道进行全面的检查，实现多层菜单界面和键盘的管理，通过按键选择相应试验模块和参数设置；装置处于运行状态时，启动定时采样中断，由A/D定时采样(2 400 Hz)输出模拟信号，采用递推式快速差分傅氏算法进行电气参数的实时计算<sup>[9,10]</sup>，监控程序可实时显示日期、时间、装置编号、各路采样电压电流的有效值及相位、各相差值或波形以及各种错误告警信息。

使用DSP/BIOS开发的应用程序对于所有与硬件有关的操作都必须通过调用一系列DSP/BIOS实时库中的API(应用编程接口)函数来实现。其中主要应用了硬件中断HWI、软件中断SWI和任务TSK三个核心模块来实现监控程序的任务调度。应用程序为每个任务指定一个优先级，各子程序在DSP/BIOS调度下按任务、中断的优先级排队等待执行<sup>[8]</sup>。一般来说，用到硬中断的任务放到HWI来完成，用到定时器的任务可以放到PRD(周期任务)中完成，其它任务放到SWI来完成。然后是确定线程之间的关系，根据它来设定各个线程的优先级，以及用什么方式通讯和交换数据。DSP/BIOS可根据各个任务的要求，完成资源(包括存储器、外设等)管理，消息管理，任务调度，硬/软中断处理以及异常处理等工作。在编写程序时，可以分别编写A/D数据采集、电气量傅氏算法、采样数据处理、按键处理、LCD液晶显示等各个任务，不必同时将所有任务运行的各种可能情况记在心中，大大减少了程序编写的工作量，减少了出错可能，保证了最终程序的高可靠性。

#### 3.2 监控DSP系统内部通信协议的应用

通讯协议是保持上位机(PC机或监控DSP)与下位机(主控DSP)之间数据交换的桥梁。本测试装置采用自定义的内部通讯协议主要由一批通讯命令集合组成。通讯格式统一格式为：命令名称(3字节)+参数大小(6字节)+累加和(1字节)，共10个字节。其中前三个字节(ASCII码字符)为参数命令的三个英文字母，如“A相电压”以“MUA”表示，其ASCII码为：4d 55 41。最后一个字节(十六进制)是前九个字节的累加和校验，溢出部分不管。中间六个字节(十六进制)中，对于电压、电流而言，第四、五个字节表示幅值，第六、七个字节表示相角大小(范围0000-3 600，表示0~360°)，没有用到的填零；其它命令有：相位角设定ANL、波形下载DAT、延时命令DLY、频率设定FRQ、谐波叠加HAM、跳转指令JMP、开入开出查询

KRC、直流量设定 MDC、电流  $x$  相设定 MI $x$ 、电压  $y$  相设定 MU $y$ 、差动电流设定 MIO、零序电压设定 MUO、录波数据读取 RDW、录波开始 REC、开入触发设定 TRG、开出触发设定 TRP、联机及版本查询 VER、下载波形设定 WAV 以及 103 规约报文控制命令集。每条通讯命令由发送字符串命令 SST 开始, 以结束字符串命令 SED 结束。波形数据输出以命令 STA 开始, 以命令 END 结束。命令可以单个执行, 也可以是命令串的方式连续执行。保护装置测试实验时, 上位机往往是连续发送多条命令, 然后统一开始执行, 下位机对接收的命令进行解析处理并执行输出。监控 DSP 与主控 DSP 之间使用 CAN 控制器发送/接收内部通讯协议数据。系统采用默认的 SCC 工作模式<sup>[4]</sup>, 省略时标功能, 监控 DSP 邮箱 1 配置为发送方式, 邮箱 0 为接收方式, 与主控 DSP 邮箱的配置相反。CAN 口的数据发送采用查询方式, 数据接收采用中断方式。监控 DSP 系统 CAN 口中断服务程序流程图如图 4 所示。

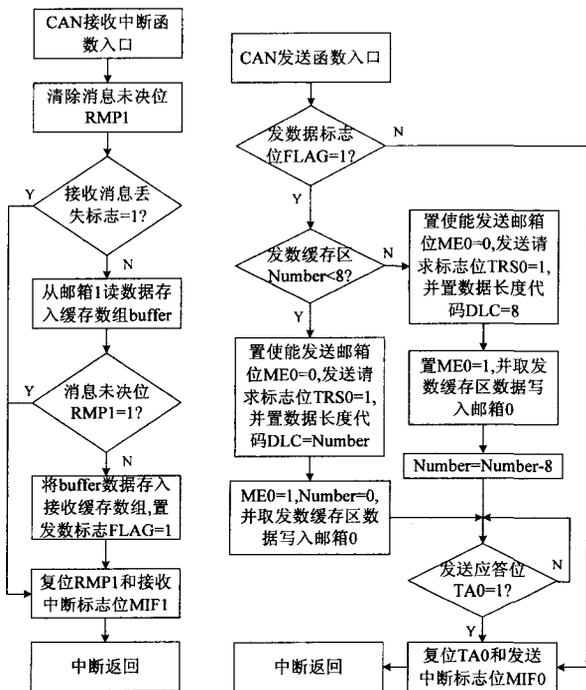


图 4 CAN 通信口中断服务程序流程图

Fig.4 CAN communication interrupt service program flowchart

在CAN接收中断函数读取数据以后, CPU必须验证RMP位没有被再次置位。如果RMP位已被置位, 则数据可能已被破坏。CPU需要再次读取数据, 因为在CPU读取旧消息时, 又接到了一个新的消息。

### 3.3 异步串行下载程序的应用

新型继电保护测试装置允许通过 DSP 芯片的

串行通信接口 SCI 将监控 DSP 的系统程序以及各类仿真试验程序加载到片内 Flash 存储器中<sup>[11,12]</sup>。F2812 DSP 芯片本身并不支持串行加载技术, 要为之进当对 Flash 进行程序下载时, 必须先将对 Flash 编程的函数写入到 F2812 片内 RAM 中运行。F2812 片内 Flash 共有 10 个不同大小页, 调用 API 库中的擦除函数 Flash\_Erase() 可实现分页擦除, 擦除之后就可调用 API 函数库中的编程函数 Flash\_Program() 进行对 Flash 的编程操作。编程结束后将接收缓冲区和 Flash 中写入的数据进行比较, 数据相同表示编程结果正确。最后, 上位机发送最后一段编程代码为新的用户程序入口地址, 并加上专门的数据包头。DSP 接收到新的用户程序入口地址后, 重新进入软中断调用 API 函数对 F2812 高地址端 Flash J 页进行擦除和编程, 从而将新的 Flash 空间入口地址写入 Flash 复位向量单元 0x3F7FF6 和 0x3F7FF7。

TI 公司的 CCS 编程连接生成的是 COFF 格式目标文件。该文件不能用常规方法打开, 这里可采用 Hex-Conversion Utility 工具将 COFF 格式目标文件转化成 ASCII16 进制格式的数据流文件, 包括常用的 HEX, Intel 等类型。从中提出有效的 Flash 编程代码, 包括 5 个初始化段 (分别是 .cinit、.text、.const、.econst、.switch) 和复位向量单元 .reset 段的内容, 并将这些代码按接收缓冲区大小进行分页打包发送。

## 4 结论

嵌入式人机监控系统为继电保护测试装置提供友好的人机界面操作、整机自检和自动测试功能, 能够有效地提高测试装置的工作效率并可脱离 PC 机工作。采用多线程实时操作系统 DSP/BIOS 设计监控系统软件可满足系统实时处理和高速性的要求。该系统在微机继电保护测试装置中应用前景广阔。

## 参考文献

- [1] 韩笑, 赵景峰, 邢素娟. 电网微机保护测试技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. 1-16.
- [2] 周森, 郑玉平, 刘晗, 等. IEC60870-5-103 规约在微型继电保护测试系统中的应用[J]. 继电器, 2005, 33(23): 16-18.
- [3] ZHOU Sen, ZHENG Yu-ping, LIU Han, et al. Application of IEC60870-5-103 Standard in the Field of the Testing of Microprocessor-based Protective Relay[J]. Relay, 2005, 33(23): 16-18.
- [4] Texas Instruments Incorporated. TMS320C28X 系列 DSP 的 CPU 与外设 (上) [M]. 张卫宁, 译. 北京: 清华大学出版社, 2005. 53-65, 97-119, 171-193.
- [4] Texas Instruments Incorporated. TMS320C28X 系列 DSP 的 CPU 与外设 (下) [M]. 张卫宁, 译. 北京: 清华大学

- 出版社, 2005.532-559, 561-612.
- [5] 求是科技. CPLD/FPGA 应用开发技术与工程实践[M]. 北京:人民邮电出版社, 2005.23-36, 359-372.
- [6] 王阳光, 游大海, 徐天奇. 微机继电保护中频率测量的 CPLD 实现[J]. 继电器, 2005, 33(20):19-22.  
WANG Yang-guang, YOU Da-hai, XU Tian-qi. CPLD Realization of Frequency Measure in Digital Relay Protection Equipment[J]. Relay, 2005, 33(20):19-22.
- [7] 王文静, 何顶新. DSP与SED1335的接口设计及控制实现. 微机发展[J], 2005, 15(2):126-129.  
WANG Wen-jing, HE Ding-xin. DSP-SED1335 Interface Design and Control Implementation[J]. Microcomputer Development, 2005, 15(2):126-129.
- [8] 彭启琮, 管庆, 等. DSP 集成开发环境—CCS 及 DSP/BIOS 的原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2004.250-382.
- [9] 王建勋, 杨梅, 纪延超. 一种递推式单次谐波快速傅立叶算法[J]. 继电器, 2003, 31(5):14-15.  
WANG Jian-xi, YANG Mei, JI Yan-chao. A Recursive Fast Fourier Transform of Single Harmonic Component[J]. 2003, 31(5):14-15.
- [10] 黄恺, 孙苓生. 继电保护傅氏算法中滤除直流分量的一种简便算法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4):50-51.  
HUANG Kai, SUN Ling-sheng. A Compact Algorithm for Filtering Decaying DC Component in Relay Protection Fourier Algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4):50-51.
- [11] 崔伟成, 王民钢, 杨尧. TMS320F240DSP 片内 Flash 串行加载及校验技术[J]. 电子测量技术, 2007, 3(3):71-73.  
CUI Wei-cheng, WANG Min-gang, YANG Yao. Serial Loading and Verification Technology of TMS320F240DSP on-chip Flash Based on SCI[J]. Electronic Measurement Technology, 2007, 3(3):71-73.
- [12] 罗欣, 刘震. TMS320F28xDSP 片内 Flash 的在线编程技术[J]. 仪表技术与传感器, 2005, 7:40-43.  
LUO Xin, LIU Zhen. In-application Programming Technology of On-chip Flash in TMS320F28xDSP[J]. Instrument Technique and Sensor, 2005, 7:40-43.

收稿日期: 2008-11-11; 修回日期: 2008-12-12

作者简介:

陈铸华(1976-), 男, 硕士研究生, 讲师, 研究方向为电力系统微机继电保护、变电站综合自动化与配电自动化; E-mail: chenzhuhua66666@163.com

彭红海(1972-), 男, 博士研究生, 讲师, 研究方向为电力系统微机继电保护、变电站综合自动化与配电自动化;

李 晓(1975-), 女, 汉, 硕士研究生, 讲师, 研究方向为电力系统微机保护、电能质量分析与控制技术。

(上接第 30 页 continued from page 30)

- [9] Song Y D, Dhinakaran B, Bao X Y. Variable Speed Control of Wind Turbines Using Nonlinear and Adaptive Algorithms[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000, 85: 293-308.
- [10] Sandra Eriksson, Andreas Solum, Mats Leijon, et al. Simulations and Experiments on a 12 kW Direct Driven PM Synchronous Generator for Wind Power[J]. Renewable Energy, 2008, 33: 674-681.
- [11] 刘其辉, 贺益康, 张建华. 交流励磁变速恒频风力发电机的运行控制及建模仿真[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 43-50.  
LIU Qi-hui, HE Yi-kang, ZHANG Jian-hua. Operation Control and Modeling-simulation of AC-excited Variable-speed Constant-frequency(AEVSCF) Wind Power Generator[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2006, 26(5): 43-50.
- [12] 叶杭冶. 风力发电系统控制技术[M]. 北京:机械工业出版社, 1998.
- [13] Xiang Da-wei, Ran Li, Bumby J R, et al. Coordinated Control of an HVDC Link and Doubly Fed Induction Generators in a Large Offshore Wind Farm[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(1): 463-471.
- [14] Santoso Surya, Le Ha Thu. Fundamental Time-domain Wind Turbine Models for Wind Power Studies[J]. Renewable Energy, 2007, 32: 2436-2452.
- [15] 伍小杰, 王晶鑫, 乔树通. 异步风力发电机软并网过渡过程研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(4): 80-83.  
WU Xiao-jie, WANG Jing-xin, QIAO Shu-tong. Study on Transition Process of Soft Cut-in of Wind Turbines System[J]. Proceedings of Electric Power System and Automation, 2007, 19(4): 80-83.
- [16] Baroudi J A, Dinavahi V, Knight A M. A Review of Power Converter Topologies for Wind Generators[J]. Renewable Energy, 2007, 32: 2369-2385.
- [17] 范高锋, 王纯琦, 乔元, 等. SVC补偿型定速风电机组模型及其特性分析[J]. 电网技术, 2007, 31(22): 64-68.  
FAN Gao-feng, WANG Chun-qi, QIAO Yuan, et al. Model of Fixed Speed Wind Turbine with SVC and Its Characteristic Analysis[J]. Power System Technology, 2007, 31(22): 64-68.

收稿日期: 2008-11-18; 修回日期: 2009-02-23

作者简介:

冯希科(1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为风力发电技术, 配电系统继电保护; E-mail: esport06@163.com

邵能灵(1972-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护, 电力系统安全控制。