

## 高性能同步相量测量装置的研制与应用

李辉<sup>1,2</sup>, 徐建源<sup>2</sup>, 刘飞<sup>1</sup>, 陈轩恕<sup>1</sup>, 林莘<sup>2</sup>, 尹婷<sup>1</sup>, 杜砚<sup>1</sup>, 许任重<sup>1</sup>

(1. 国网电力科学研究院, 湖北 武汉 430074; 2. 沈阳工业大学, 辽宁 沈阳 110178)

**摘要:** 利用同步时钟授时实现异地相量同步测量, 研制一种双 CPU 结构的高性能同步相量测量装置。介绍了基于双 CPU 结构的同步相量测量装置的软硬件设计方案。针对硬件设计, 介绍了数据采集单元、同步时钟单元、高速通信网络单元的设计; 针对软件设计, 采用嵌入式实时操作系统 uC/OS II 开发软件, 重点阐述软件的移植和任务的划分, uC/OS II 的引入使同步相量测量装置的开发和维护变得简单。通过高速以太网实现异地 SPMU 的互联, 构建全网动态稳定监视与控制系统。

**关键词:** 同步相量测量; 双 CPU; 同步时钟; 以太网通信; uC/OS II

### Research and application on high performance synchrophasor measurement unit

LI Hui<sup>1,2</sup>, XU Jian-yuan<sup>2</sup>, LIU Fei<sup>1</sup>, CHEN Xuan-shu<sup>1</sup>, LIN Xin<sup>2</sup>, YIN Ting<sup>1</sup>, DU Yan<sup>1</sup>, XU Ren-zhong<sup>1</sup>

(1.State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China;

2.Shenyang University of Technology, Shenyang 110178,China)

**Abstract:** The deviationism phasor is synchronized measured based on GPS synchronized clock. A double CPU method of high performance synchrophasor measurement unit is designed. The software and hardware design of synchrophasor measurement unit are introduced based on the double CPU structure. The data collected unit, synchronized clock unit and high speed communication network unit are represented at hardware design aspect. The software is developed based on embedded real-time system uC/OS II and software transplanted and task divided at software design aspect are stressed. The development and service is easy with uC/OS II. The deviationism SPMU is connected by high speed ethernet communication. The wide-area dynamic stability monitoring and control system is constructed.

**Key words:** SPMU; double CPU; synchronized clock; ethernet communication; uC/OS II

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)07-0081-05

## 0 引言

随着大电网互联和电力负荷需求的急剧增长, 电网稳定性问题显得尤为重要。构建全网动态稳定性监视与控制系统成为当前电力系统急需解决的问题之一, 同步相量测量装置 (Synchronous Phasor Measurement Unit, SPMU) 可实现异地相量实时同步采集、处理、记录和远程传输, 克服了电力系统中 SCADA 和故障录波器的不足, 它是搭建全网动态稳定监控系统的重要设备之一<sup>[1-2]</sup>。随着全球定位系统 (Global Position System, GPS) 授时在电力系统中的应用、高速网络通信技术的诞生、数字信号处理技术和高性能处理器的发展为 SPMU 的研制奠定了基础, 使得具有高精度同步、高处理性能和高速通信能力的 SPMU 研制成为可能, 克服了以往相量测量装置数据处理慢、通信速率低的缺点。SPMU 能测量电网中电压、电流、频率、有功功率、无功功率, 也能测量电网中各个节点电压和电流的同步

相量和绝对相角, 通过高速以太网可构建全网动态稳定监视与控制系统, 也可广泛应用于输电线路故障定位、自适应失步保护、动态故障录波、电网状态估计以及防灾预警系统等方面。

## 1 相量测量算法

同步相量测量是电力系统中电压、电流相量在同一时间标准下采集, 它主要与同步时钟和相量算法有关。目前, DFT 法是相量测量计算中应用最为广泛的算法<sup>[3]</sup>。传统 DFT 算法是假设在一个周期内采样  $N$  次, 则采样间隔为  $T_s = \frac{T}{N}$ , 设当前采样时刻

$t_0 = rT_s$ , 则 DFT 的公式可表达为:

$$\begin{cases} A_k(r) = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N X(i+r-N) \sin \left[ \frac{2\pi k}{N} (i+r-N) \right] \\ B_k(r) = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N X(i+r-N) \cos \left[ \frac{2\pi k}{N} (i+r-N) \right] \end{cases} \quad (1)$$

从式(1)不难看出, 使用 DFT 算法计算信号的

一个谐波分量，共需要  $2N$  次乘法和  $2(N-1)$  次加法，计算量相当大，而且全部数字信号处理的运算量随所需计算的信号种类数、谐波数目和每周周期采样点数  $N$  的增加而显著增加。因此，人们考虑了多种手段以减少 DFT 的运算量或者提高其响应速度：一种方法是尽可能地减少采样点数  $N$ ，测量精度较低，可应用于对相量测量精度要求不高的保护装置；另一种方法是对信号模型适当简化，减少运算同时精度不减。观察式子 (1)，第  $r$  次采样和第  $(r-1)$  次采样的 DFT 公式的差别只在第  $r$  次采样值和第  $r$  次采样值的前一周期的相同相位点即第  $(r-N)$  次采样值，而其他  $(N-1)$  项相同。据此，可得到下列改进型递推公式：

$$\begin{cases} A_k(r) = A_k(r-1) + \frac{2}{N} [X(r) - X(r-N)] \sin\left(\frac{2\pi k}{N} r\right) \\ B_k(r) = B_k(r-1) + \frac{2}{N} [X(r) - X(r-N)] \cos\left(\frac{2\pi k}{N} r\right) \end{cases} \quad (2)$$

显然，计算式 (2) 只需要 2 次乘法和 4 次加、减法，且与  $N$  选取无关，减少了 DFT 的运算量，而且不需要任何简化<sup>[4]</sup>。本文采用改进型 DFT 递推公式，极大地提高了相量测量精度同时减少运算量。

## 2 同步相量测量装置的硬件设计

本装置采用新型双 CPU 结构 (DSP+ARM)，确保了同步相量测量装置的高速采集、高精度同步、高速传输的性能；针对本装置需要高速采集和高精度同步的特点，利用 DSP 处理器和 GPS 同步时钟实现相量数据的高速、高精度同步采集性能；针对本装置需要高速通信的特点，利用 ARM 和以太网实现向量数据的高速传输性能。

将高精度采集模块的采样数据送给 DSP 处理器进行计算处理和存储，并通过双口 RAM 将 DSP 处理过的数据传送给 ARM 处理器。同步相量测量装置主要由数据采集单元、同步时钟单元和高速通信网络单元组成，其系统结构如图 1 所示。

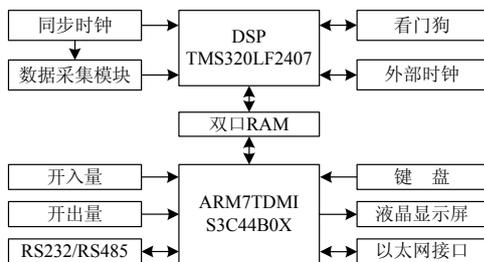


图 1 同步相量测量装置系统结构图  
Fig.1 System structure diagram of synchronized phasor measurement device

## 2.1 数据采集单元

数据测量的同步性是同步相量测量的关键。测量的同步性主要取决于“频率同步性”和“时间同步性”<sup>[5]</sup>。频率同步性是指采样频率与被测信号在时间上的同步采样，由频率自适应采样单元确保。时间同步性是指异地被测信号在时间上的同步采样，由 GPS 授时的同步时钟提供秒脉冲信号确保异地采样时间同步。数据采集单元由保护用互感器、信号叠加电路、隔直带通滤波器、锁相倍频电路、同步时钟装置、A/D 转换器等组成，如图 2 所示。

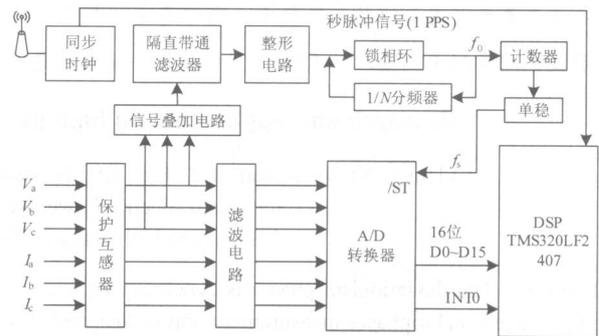


图 2 数据采集单元结构图

Fig.2 Structure diagram of data collected unit

自适应采样单元用以  $f_0$  脉冲序列信号为基准形成的采样脉冲序列信号来控制 A/D 转换器进行转换，确保被测信号每个周期采样数据的完整性和等间隔性。计数器是一个可预置数自动重载的计数器（其输入为  $f_0$  脉冲序列），当计数到预置计数值时重触发单稳电路得到一个脉冲陡度和宽度都满足要求的等间隔采样脉冲序列信号  $f_s$ ，每个  $f_s$  脉冲信号一方面启动 A/D 转换器开始转换，另一方面同时复位计数器使其重载计数值并重新开始计数。如此周而复始，从而实现能够自动跟踪被测信号基波频率变化的自适应连续采样，并实现“频率同步性”。通过 GPS 同步时钟串口为相量数据打上的时标，同时由 DSP 记录下由负到正过零点时间，可算出被测信号频率，再根据相量数据的时标实现异地相角的计算和相角差值计算。

## 2.2 同步时钟单元

同步时钟单元主要考虑授时精度和授时可靠性<sup>[6]</sup>。本装置采用 GPS 授时，时间误差为  $1 \mu s$  的秒脉冲 (1 PPS)， $1 \mu s$  误差对于 50 Hz 的电网相当于采样相角误差  $0.018^\circ$ ，满足 IEEE Std C37.118-2005 对同步时钟的要求<sup>[7]</sup>。本同步时钟单元是晶振时钟通过锁相环跟踪 GPS 秒脉冲进行授时；因此，同步时钟单元有很高精度。同步时钟可能出现的故障有两种：一种是 GPS 信号中断或 GPS 故障；另

一种是晶振损坏; 当 GPS 授时信号中断或故障时, 通过补偿晶振时钟进行授时或通过接收双卫星授时 (GPS 和北斗卫星授时) 提高可靠性但成本较高; 当晶振损坏时, GPS 直接对相量测量装置进行授时。

同步时钟单元由晶振、GPS 接收器、锁相环、计数器、比较器、PIC16F873、电/光转换、时间/状态显示等构成。其结构原理如图 3 所示。GPS 接收器接收来自轨道卫星的协调世界时间 (UTC) 时钟信息, 输出全球同步的秒脉冲信号 (1 PPS) 及时间串口报文。用 PIC16F873 芯片来协调和控制整个装置。

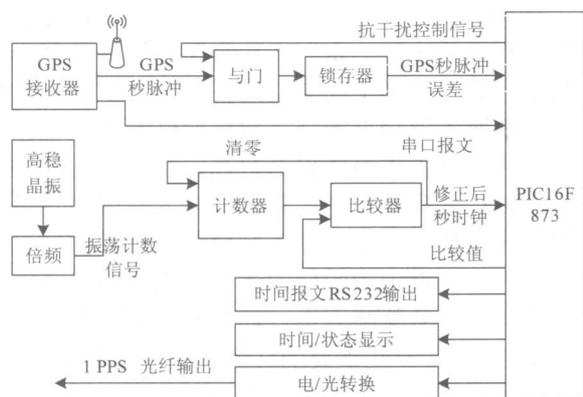


图 3 同步时钟装置原理图

Fig.3 Schematic diagram of synchronizing clocks equipment

此装置可实现以下功能:

- (1) 高精度秒时钟输出和 GPS 秒脉冲输出; 采用计数器和比较器对高稳晶振进行分频产生晶振秒时钟信号, 晶振秒时钟与 GPS 秒时钟进行比较修正, 晶振秒时钟的累计误差由 CPU 设置比较值进行修正, GPS 秒时钟误差由锁存器测量和修正;
- (2) GPS 接收器输出数据帧的接收及时间报文的实时处理并通过 RS232 串口进行发送;
- (3) GPS 实时工作状态;
- (4) 当前时间、工作方式和时钟告警的显示;
- (5) 秒脉冲经过电/光转换后通过光纤发送。

### 2.3 高速通信网络单元

同步相量测量装置间应该有很好的通信性, 并且应具备高速通信能力, 将通信时间压缩最短, 以给稳定监控系统留有更多的决策时间。SPMU 数据通信的延时会直接影响主站的同步相量处理断面, 从而直接影响主站对电力系统各节点控制的实时性。SPMU 的设计和使用必须遵循一定的标准。目前, 不同时期和不同厂商遵循的标准不一致, 导致 SPMU 在应用中出现相量数据一致性差、通信协议混乱等问题, 无法发挥 SPMU 作用<sup>[8]</sup>。本装置按照电力系统实时动态监测系统技术规范编写通信格

式<sup>[9]</sup>, 解决了不同厂家装置的互联问题; 采用高速以太网通信技术解决了数据传输的延时和阻塞。

本装置的以太网控制接口采用 Realtek 公司第三代快速以太网控制芯片 RTL8019, 内嵌 16 Kbit SRAM, 可以通过以太网交换机在双绞线上实现 10 Mbps 或 100 Mbps 自适应同时发送和接收数据, 具有 16 位数据线接口和 20 位地址线接口, 支持 8 位或 16 位的数据模式, 支持跳线和免跳线两种模式, 支持 8 条线路的中断请求, 支持 3 种标准电源关闭模式。

RTL8019 芯片构成的以太网通信电路原理图。如图 4 所示。采用跳线工作方式 (即网卡的 I/O 和中断由跳线决定); JP 引脚接高电平, 选择 16 位数据总线; S3C44B0X 处理器通过 4 条地址线 A0~A3 选择 RTL8019 的寄存器地址和存储器地址, 控制并实现数据的读取; 指示网卡状态的引脚连接到 Green/Red LED, 便于直观判断以太网通信状态; 通过可编程逻辑器件 (PSD4235G2) 对 RTL8019 的片选信号进行控制。RTL8019 以太网芯片不能单独工作, 还必须有一个网络变压器在 RJ-45 接口和 RTL8019 中间进行电平转换。

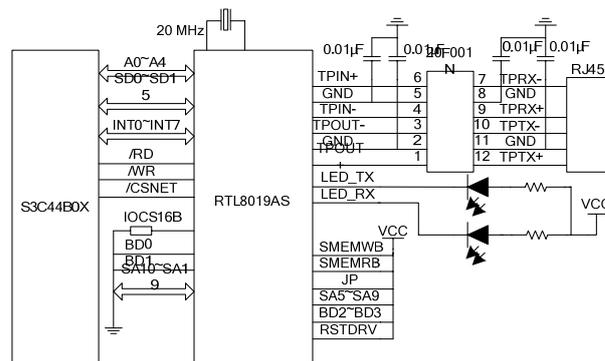


图 4 以太网通信模块原理图

Fig.4 Schematic diagram of ethernet

另外, 本系统预留了以下接口: RS-485 接口, 用于与其他智能电子设备 (IED) 互连; RS-232 接口, 用于接收 GPS 时间信息和连接打印机; USB 接口, 用于装置信息的现场下载和上传; JTAG 接口, 用于装置程序的下载和烧写。

### 3 同步相量测量装置的软件设计

同步相量测量装置运行时处理任务十分繁杂, 包括模拟量采集转换、算法逻辑、开入开出量、高速通信、人机交互及自检等任务, 并且对任务的实时性要求很高。因此, 同步相量测量装置的软件设计是一件很复杂的工作。嵌入式实时操作系统

(RTOS)的出现为开发复杂多任务提供了很好的解决方案<sup>[10]</sup>。本同步相量测量装置采用 uC/OS II 作软件平台，具有超强的稳定性、可靠性和可维护性。软件系统按功能模块进行任务划分，分别为采样模块任务、数据预处理模块任务、数据通信模块任务、人机接口模块任务、开关量模块任务、自检模块任务。RTOS 的引入将功能模块的编写与底层驱动的开发分离，极大地加快了同步相量测量装置的软件开发进度。各模块可以单独升级，单个模块发生异常时不会影响其他模块的正常运行。

### 3.1 uC/OS II 的移植

uC/OS II 是一种实时处理能力很强的操作系统，本装置所采用的 S3C44B0X 处理器完全满足 uC/OS II 要求的移植条件，因此可以将 uC/OS II 系统方便地移植到该处理器上。针对同步相量测量装置对 uC/OS II 的需求，对 uC/OS II 系统进行裁剪，使内核达到最小；并根据所用处理器编写相关资源，对硬件资源编写驱动任务程序。在移植操作系统前，针对 S3C44B0X 处理器做了如下几方面工作：(1) 编写 S3C44B0X 处理器所用资源。uC/OS II 向 S3C44B0X 处理器的移植时采用 ADS 编译器，需要处理器内核具有用户模式和系统模式。S3C44B0X 内核具有用户、系统、管理、中止、未定义、中断和快中断 7 种模式。由于管理、中止、未定义、中断和快中断这 5 种模式与异常相关，不适合 uC/OS II 任务使用。uC/OS II 任务可以使用的模式应该是用户模式和系统模式。为了实现任务工作模式的切换，在移植时给 uC/OS II 添加了两个模式切换的系统函数：ChangToSysMode () 和 ChangToUSRMode ()。移植过程中由于基于 ARM7 内核的各处理器存在或多或少的差异，ADS 集成环境编译代码是个公用平台，因此，需要用户或厂家编写部分启动代码。S3C44B0X 处理器的启动代码已由三星厂家编好，可将部分代码添加到启动代码中。(2) 不同处理器支持堆栈的增长方向是不同的，因此在对 uC/OS II 移植时，一定要正确定义堆栈的格式。(3) uC/OS II 要求用户提供一个周期性的时钟源，触发中断来实现任务的调度和转换，本系统采用 S3C44B0X 的定时器作为系统时钟，每经历一个时钟节拍的时间将产生一次中断，内核来判断是否进行任务切换和调度新任务。(4) 采用 uC/OS-II 之后，应用程序变成操作系统之上的各个任务，需要对各个功能模块进行任务优先级划分，其任务优先级分别为：采样模块中断级、数据预处理模块 6 级、数据通信模块 7 级、人机接口模块 8 级、开关量模块 9 级、自检模块 10 级。(5) 中断程序的编

写代码较简单，关键在于把程序与芯片的相关中断源连接起来，使芯片在产生响应的中断后，会调用相应的处理程序。

### 3.2 uC/OS II 的任务划分

uC/OS II 的任务分为处理器产生的中断服务程序和 RTOS 内核调度执行的任务，中断可以打断任何执行任务，并驱动新的任务。uC/OS II 用多任务的方式来提升系统速度，任务分得越细并行的速度越快，但是任务越多系统越复杂，系统堆栈的消耗也越大。合理地划分、创建和调度中断及任务，是确保同步相量测量装置正确、高效运行的关键。

任务的划分是建立在同步相量测量装置实际数据流程基础上的。uC/OS II 的任务调度是基于优先级抢占式的，由中断驱动的任务是保护装置的核心，中断服务流程见图 5。对实时性要求高的数据采集任务，将优先级别设为最高，任务执行时独占 S3C44B0X 处理器资源；其次为开入量采集任务、开出量执行任务；通信任务和显示任务的实时性要求相对较低，设定为较低的优先级别，各任务的优先级存储在任务就绪表中。同步相量测量系统是一个硬实时系统，一些重要的任务也是由中断驱动的，创建任务时必须考虑任务的执行时间。通过调度器完成不同优先任务之间的转换。

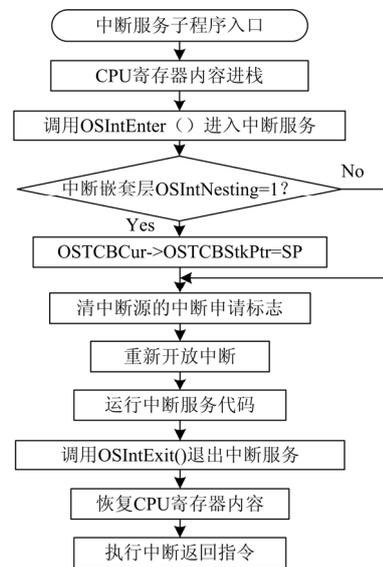


图 5 中断服务流程图

Fig.5 Flow chart of interrupt service

uC/OS II 支持 64 个不同优先级的任务，但不宜把每个任务都分配不同优先级别，因为装置中数据流模型非常复杂，包括各种周期性、随机和突发数据，某些任务的启动时间不可预知（特别是保护动作时），为防止在一段时间内最低优先级的任务始终

无法获得处理器资源的情况, 实时性要求不高的任务(如通信任务和显示任务)可设定为同等优先级, 并采用同等级任务轮转方式进行调度。

#### 4 基于 SPMU 构建全网动态稳定监视与控制系统

随着电力系统中大电网互联的发展, 对电网稳定控制要求的提高, 传统的故障录波器记录故障的时间较短, 不能够完整记录系统动态过程; SCADA 系统数据的刷新周期较长, 也不能够充分记录系统的动态过程; 因此, 这些监测系统难以对系统动态过程监测。全网动态稳定监视与控制系统可以有选择性、连续性地自动记录电力系统的动态过程数据, 并根据电网稳定分析与控制机理, 将这些数据重演, 给调度中心控制和显示使用。全网动态稳定监视与控制系统的组成如图 6 所示。

全网动态稳定监视与控制系统的原理为对电网中不同处的变电站和发电厂安装 SPMU, SPMU 对母线模拟信号进行采样, 并利用 GPS 产生的时钟信号对全网同步授时, 使各节点所测量的电量有一致的时间标准, 不同地点测量和计算得到的数据加上对应的时标, 并遵循标准协议将数据打包, 变电站或电厂内部局域网通过以太网连接, 变电站、电厂、调度中心间通过高速双光纤冗余通信网络连接传送到控制中心, 在控制中心对各个节点的相量按照不同的控制算法进行处理, 进行在线分析和离线分析, 并对历史数据进行定期备份, 并通过高速通信网络下达控制命令, 确保电网稳定可靠运行。

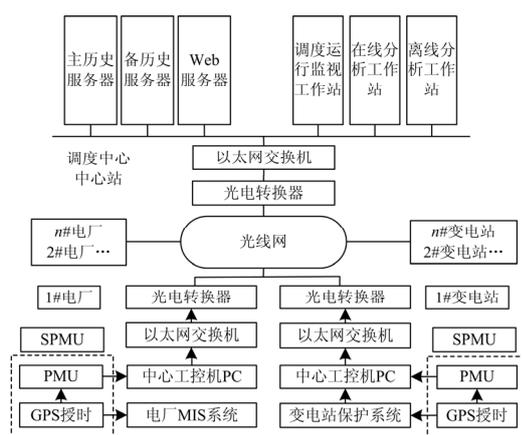


图 6 全网动态稳定监视与控制系统

Fig.6 Wide-area dynamic stabilization monitoring and control system

#### 5 结论

本文对全网动态稳定监视与控制系统中 PMU 的功能进行分析, 根据现场的实际需要研制一种基于双 CPU 结构的同步相量测量单元。相量测量算法采用改进 DFT 算法, 有良好的测量精度。通过光纤通信网构建全网动态稳定监视与控制系统, 实现全网稳定监视与控制。本 SPMU 具有可靠性高、功能强大等优点, 具有巨大推广价值和 market 潜力。目前此装置已在辽宁省某区域电网部分节点投入运行, 状况良好。

#### 参考文献

- [1] 许树楷, 谢小荣, 辛耀中. 基于同步相量测量技术的广域测量系统应用现状及发展前景[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 44-49.  
XU Shu-kai, XIE Xiao-rong, XIN Yao-zhong. Present Application Situation and Development Tendency of Synchronous Phasor Measurement Technology Based Wide-area Measurement System[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 44-49.
- [2] 闵勇, 丁任杰, 任勇, 等. 电力系统全网同步监测系统[J]. 清华大学学报, 1997, 37(7): 86-88.  
MIN Yong, DING Ren-jie, REN Yong, et al. Wide-area and Synchronous Monitoring System[J]. Journal of Tsinghua University, 1997, 37(7): 86-88.
- [3] WANG Mao-hai, SUN Yuan-zhang. A Practical, Precise Method for Frequency Tracking and Phasor Estimation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(4): 1547-1552.
- [4] 王茂海, 孙元章. 基于 DFT 的电力系统相量及功率测量新算法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(2): 20-24.  
WANG Mao-hai, SUN Yuan-zhang. A DFT-based Method for Phasor and Power Measurement in Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(2): 20-24.
- [5] 杨贵玉, 江道灼, 邱家驹. 相量测量装置的同步精度问题[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(14): 57-61.  
YANG Gui-yu, JIANG Dao-zhuo, QIU Jia-ju. Synchronous Measurement Precision of Phasor Measurement Unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(14): 57-61.
- [6] 龚庆武, 刘美观, 左克锋, 等. 基于 GPS 同步采样装置中防止干扰 GPS 秒脉冲信号的措施[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(1): 45-47.  
GONG Qing-wu, LIU Mei-guan, ZUO Ke-feng, et al. Anti-jamming Methods for Pulse Per Second Signal in Synchronized Sampling Unit Based on GPS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(1): 45-47.
- [7] IEEE Std, C37.118-2005(Revision of IEEE Std 1344-1955)IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems[S].

(下转第 90 页 continued on page 90)

- China Electrical Equipment Industry, 2005, 51 (2): 36-39.
- [3] 肖白, 束洪春, 高峰. 小电流接地系统单相接地故障选线方法综述[J]. 继电器, 2001, 29 (4): 16-20.  
XIAO Bai, SHU Hong-chun, GAO Feng. Survey of the Methods of Fault Line Selection for Single-phase-to-earth Fault in Networks with Ungrounded Neutral[J]. Relay, 2001, 29 (4): 16-20.
- [4] 桑在中, 张慧芬, 潘贞存, 等. 用注入法实现小电流接地系统单相接地选线保护[J]. 电力系统自动化, 1996, 20 (2): 11-12, 35.  
SANG Zai-zhong, ZHANG Hui-fen, PAN Zhen-cun, et al. Protection for Single Phase to Earth Fault Line Selection for Ungrounded Power System by Injecting Signal[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20 (2): 11-12, 35.
- [5] 张慧芬, 潘贞存, 桑在中. 基于注入法的小电流接地系统故障定位新方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (3): 64-66.  
ZHANG Hui-fen, PAN Zhen-cun, SANG Zai-zhong. Injecting Current based Method for Fault Location in Neutral Isolated Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (3): 64-66.
- [6] 吴清, 许云峰. 小电流接地选线装置的现场接地选线试验[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (17): 105-107.  
WU Qing, XU Yun-feng. A Field Testing of Fault Line Selection Device for Small Current Grounding Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (17): 105-107.
- [7] 许云峰. 小电流接地相关问题探讨[J]. 赛尔电力自动化, 2009, 78 (4): 61-62.  
XU Yun-feng. Discussion on Fault Line Selection for Small Current Grounding Systems[J]. Sale Automation of Electric Power, 2009, 78 (4): 61-62.
- [8] 戴逸松. 微弱信号检测方法及仪器[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994.  
DAI Yi-song. Method and Apparatus for Detecting Weak Signal[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1994.
- [9] 戴逸松, 石要武. 测量 nV 正弦电压的互功率谱方法[J]. 电工技术学报, 1992, 5 (2): 38-42.  
DAI Yi-song, SHI Yao-wu. An Approach Using Cross Power Spectrum Estimator for Measurement of nV Sinusoidal Signal[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1992, 5 (2): 38-42.
- [10] 胡广书. 数字信号处理-理论、算法与实现[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.  
HU Guang-shu. Digital Signal Processing-Theory, Algorithm and Realization[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [11] 李一兵, 岳欣, 杨莘华. 多重自相关函数在微弱正弦信号检测中的应用[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2004, 25 (4): 525-528.  
LI Yi-bing, YUE Xin, YANG Xin-hua. Multiple Autocorrelation Method for Detecting Weak Sinusoidal Signal[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2004, 25 (4): 525-528.
- [12] 杨新峰, 杨迎春, 苑秉成. 强噪声背景下微弱信号检测方法研究[J]. 舰船电子工程, 2005, 25(6): 123-125.  
YANG Xin-feng, YANG Ying-chun, YUAN Bing-cheng. Study on Weak Signal Detection Method in a Stronger Noise Background[J]. Ship Electronic Engineering, 2005, 25 (6): 123-125.

收稿日期: 2009-04-16; 修回日期: 2009-06-27

作者简介:

陶利国 (1972-), 男, 工程师, 主要研究方向为电力系统自动化;

许云峰 (1962-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为小电流接地选线技术。E-mail: Xuyunfeng5511@163.com

(上接第 85 页 continued from page 85)

- [8] 李刚, 王少荣, 程时杰. 广域电网同步状态监测系统实时通信[J]. 电网技术, 2004, 28(18): 39-43.  
LI Gang, WANG Shao-rong, CHENG Shi-jie. Real-time Communication in a Synchronous States Monitoring System for Wide Power Systems[J]. Power System Technology, 2004, 28(18): 39-43.
- [9] 国家电网公司. 电力系统实时动态监测系统技术规范[Z]. 2006.  
State Grid Company. Technology Guidance of Power System Real-time Dynamic Monitoring System[Z]. 2006.
- [10] Labrosse J J. 嵌入式实时操作系统 uC/OS-II [M]. 邵贝贝, 译. 北京: 航空航天大学出版社, 2003.  
Labrosse J J. Embedded Real-time Operation System uC/OS-II [M]. SHAO Bei-bei, Translation. Beijing: University of Aeronautics and Astronautics Press, 2003.

收稿日期: 2009-05-14; 修回日期: 2009-06-27

作者简介:

李辉 (1982-), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为电力系统自动化和智能电器。E-mail: lihui00312@163.com