

配电网微型 PMU 与故障录波装置研究与开发

李江,徐志临,李国庆,高亚如,魏文震

(东北电力大学 电气工程学院,吉林 吉林 132012)

摘要:针对低电压等级配电网设计开发了一种配电网微型相量测量单元(PMU)与故障录波装置。该装置具有同步相量测量、综合数据采集、设备授时以及故障录波等多个功能。装置充分考虑了硬件成本和安装难度,在满足数据准确度的前提下显著降低成本。装置采用虚拟过零相量测量算法实时测量电压相量;在故障录波中,提出了电气量偏移率与波形曲率相结合的启动判据。给出了相应的硬件设计方案。测试结果表明,该装置测得的数据准确,故障识别速度快,能满足配电网分析的基本要求。

关键词:配电网;微型 PMU;综合能量监测;故障录波

中图分类号: TM 72

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.09.008

0 引言

20 世纪 60 年代 SCADA 被广泛应用到能量管理系统(EMS)中来,来进行状态估计,但其实时性较差,表征的只是稳态或准稳态过程。全球定位系统(GPS)的普及使得同步相量的实时测量成为可能,广域测量系统(WAMS)就是以相量测量单元(PMU)为基础构建而成的,该技术以其在电力系统监视、保护和控制上的重大影响成为 21 世纪电力系统的先进技术之一^[1]。

同步相量的测量需要高精度的全球同步卫星精确授时。美国 GPS 导航系统、俄罗斯 GLONASS 导航系统以及中国的北斗导航系统在同步卫星授时领域占据主导,其中以 GPS 最为先进,其终端不需要发送信号,且授时精度最高。相量测量算法中比较经典的有过零检测法、离散傅里叶变换法、最小二乘法、牛顿法、卡尔曼滤波法、瞬时值法、小波变换法等^[2]。

国内外部分先进 PMU 整合了故障录波功能^[3]。现代电力系统中常用的故障录波启动判据大致采用如下判据信息:发电机角速度、瞬时有功功率和电压的变化、电流瞬时值、电流斜率等。目前广泛应用的故障录波装置普遍采用单一判据信息来识别故障,有些注重故障识别的快速性,有些则偏重于故障识别的准确度,往往不能兼顾二者。目前,PMU 在输电网和发电厂中得到了广泛的应用^[4-5],其技术较成熟。然而随着分布式电源大规模接入电网,配电网的双向潮流、多源故障等诸多问题日益凸显^[6],如何提高配电网的观测性成为配电网首先需要解决的问题^[7]。

配电网中高渗透率的分布式电源和有源负载会导致传统电网从缓慢变化的辐射网变为更加动态化的多源网络。尽管这在原则上可以改善整个系统的可靠性和电能质量,但是新的控制保护的挑战可能会更加严峻,传统的处理办法并不能完全适应这样的电网。配电网传统控制和管理中只测量电压幅值并上传控制中心进行处理,这不仅可能破坏这些新动态,还有可能潜在地导致电网操作中更加严重的隐患。因此,系统范围的配电网动态分析和控制可能需要新的相量数据,这些数据来自 PMU,并合并到配电管理系统(DMS)的功能中去。在未来的配电网的监视、保护和控制中,PMU 极有可能扮演不可或缺的角色。配电网 PMU 在不同系统状态下可以直接测量和提供同步的电压、电流相量的测量结果,这种能力为探知动态配电网状态和健康的信息提供了巨大可能。

输电网 PMU 成本过高,安装条件苛刻,需要专用通信线路等问题使其难以大范围应用于配电网^[8-9],同时,普通故障录波启动判据无法兼顾故障识别的速度和准确性。针对以上问题,本文开发出一种集同步相量测量、电气量综合数据采集和故障录波功能于一体的微型同步相量测量单元(μ PMU)。

1 μ PMU 硬件架构及装置功能

该装置的硬件架构总体上可分为微控制器模块、综合电能监测模块、GPS 授时模块、过零检测模块、故障录波模块、人机接口模块和上位机通信模块等。图 1 为该装置的硬件架构示意图,各模块之间相互协作,完成各个电量的采集计算和显示。整体硬件封装在 160 型铝型材仪表壳体内。

(1)微控制器模块。

该装置以 AVR 单片机中性能优越的 ATmega64 芯片作为微控制器。ATmega64 有如下特点:64 K 字节的系统内可编程 Flash,2 K 字节带电可编程可擦除

收稿日期:2015-12-28;修回日期:2016-05-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51307018)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51307018)

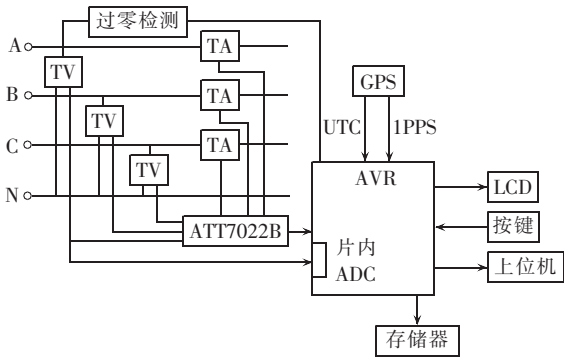


图 1 系统整体架构示意图
Fig.1 Schematic diagram of system architecture

程序存储器(EEPROM),4 K 字节静态随机存储器(SRAM),53 个通用 I/O 口线,32 个通用工作寄存器,实时计数器(RTC),4 个具有比较模式的 PWM 定时器/计数器(T/C),2 个通用同步/异步串行接收/发送器(USART),面向字节的两线串行接口,8 路 10 位具有可选差分输入级可编程增益的模数转换器(ADC),具有片内振荡器的可编程看门狗定时器,1 个 SPI 串行端口,与 IEEE1149.1 标准兼容的、可用于访问片上调试系统及编程的 JTAG 接口,以及 6 个可以通过软件进行选择的省电模式。ATmega64 为本装置数据处理和控制应用提供了灵活且低成本的解决方案。

(2)综合电能监测模块。

该装置选用功能强大、成本低廉的电能计量芯片 ATT7022B^[10]。ATT7022B 是高精度三相电能专用计量芯片,适用于三相三线和三相四线系统。ATT7022B 集成了 6 路二阶 sigma-delta-ADC,参考电压电路以及所有功率、能量、有效值、功率因数以及频率测量的数字信号处理等电路;能够测量各相以及合相的有功功率、无功功率、视在功率、有功能量以及无功能量,同时还能测量各相电流、电压有效值、功率因数、相角、频率等参数;支持全数字域的增益、相位校正,即纯软件校表;可以对基波有功、无功功率进行测量,提供脉冲输出,提供瞬时基波有功功率以及基波无功功率信息,可直接用于基波的校正;提供 2 类视在能量输出,即持续输出(RMS)视在能量以及有功/无功(PQS)视在能量;提供一个 SPI 接口,方便与外部微型控制单元(MCU)之间进行计量参数以及校表参数的传递。

(3)GPS 授时模块。

该装置选用 NEO-7m 模块进行授时。NEO-7m 为美国 GPS 和俄罗斯 GLONASS 互备系统,自带高增益有源天线,可自带可充电后备电池,掉电保持星历,实现热启动,其接口采用 TTL 电平,兼容 3.3 V/5 V 系统,工作温度为-40~85℃,适合在户外工作,功耗极低,工作电流 35 mA,电压 2.7~5 V,授时精确,可

提供秒脉冲精度误差为 100 ns 以内,且无累积误差,让装置同步授时成为可能^[11-14]。

(4)过零检测模块。

该装置采用互感器前取信号、光耦隔离的过零检测电路。如图 2 所示,直接取工频信号,正半周时发光二极管导通并驱动三极管产生低电平防止负半周电流损坏单向光耦,本电路采用光耦隔离,抗干扰性好。每次过零点会产生下降沿,触发单片机中断。

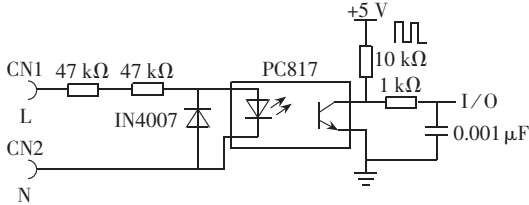


图 2 过零检测电路
Fig.2 Zero-crossing detection circuit

该电路配合 GPS 授时模块和综合电能测量模块,在 MCU 中进行处理和计算,可以得到精确的电压相量。

(5)故障录波模块。

本装置将待测信号直接接入 STM32 片内 ADC 进行数模变换,如遇电网故障,故障时的数据会被识别出来并打上故障时的时间标签存入存储器内进行事故分析,因数据量庞大,必须片外扩展存储芯片,本装置采用 16G 工业 SD 卡,实现故障波形存储。

(6)人机接口模块。

该装置配有 12864 LCD 液晶显示器,可以实时显示测得的所有数据,包括相量、综合电能监测的电量及当前国际标准时间(UTC),设计了 5 个按键分别控制 A、B、C 相和合相数据显示,人机界面友好,为现场工作人员提供就地显示,方便调试。

(7)上位机通信模块。

该装置可以通过 HL-340 串口转 USB 数据线方便地实现与笔记本等上位机的连接,测得所有数据均实时通过串口发送到上位机上,通过简单的串口调试工具即可实现与上位机通信。故障数据存于 SD 卡内,便于读取和事故追忆。

表 1 为传统 PMU 与 μ PMU 各方面的综合对比。

表 1 传统 PMU 与微型 PMU 综合对比
Table 1 Comparison between traditional PMU and micro PMU

对象	传统 PMU	μ PMU
成本	150000~200000 元/台, 不包含安装成本	传统 PMU 的 10%~20%, 无安装成本
授时系统	单一 GPS	GPS/GLONASS 双备用
通信系统	光纤电力专线	无需专用通信通道
相别	三相	三相/单相
安装地点	变电站、电厂高压母线	配电网、低压系统

2 虚拟过零相量测量算法

电网相量由有效值 X 和相角 φ 组成。但同一信号在不同的时间基准点下,得到的测量结果是不一样的,其大小取决于时间基准点。因此在一个统一的时间基准下,电网的相量测量结果才有意义,高精度的全球同步卫星授时可为相角的测量提供一个标准统一的时间基准。在此统一的时间基准之下,可求取两地的任意 2 个相量的相角差^[15]。

考虑到 AVR 单片机的运算速度、硬件承受能力、成本等问题,本文对传统的 PMU 相量测量算法加以改进,提出虚拟过零相量测量算法。传统 PMU 将电压信号过零时间记录后,与世纪秒(1970 年 1 月 1 日午夜)进行比对,即全网设置统一基准过零点,计算所得的电压相量均以此为参考。本文将 GPS 秒脉冲(1PPS)信号作为虚拟动态过零点,全网同一时间下所对应的参考过零点始终保持动态一致,计算所得相量在精度相同的情况下应与传统的相量测量算法相同。此算法对于硬件计算速度要求极低,可以满足实时性。

本文选用互感器前取信号、光耦隔离的过零检测电路和 GPS 所提供的秒脉冲相配合,利用单片机内部定时器的精确计时能力实现相角实时测量,信号源经数字抗混叠滤波和全周傅里叶变换程序处理,能够有效滤除噪声和高次谐波。装置利用 GPS 秒脉冲构建出一个虚拟的标准 50 Hz 工频信号,即以秒脉冲为虚拟过零点。接收到 GPS 上精确的秒脉冲信号后立即开启单片机定时器,此时过零检测电路正常工作,当秒脉冲信号过后第一个下降沿来临,立即读出此时定时器的值,计算出此时所对应的相角,公式如下:

$$\varphi = \frac{t \times 360^\circ}{20000} \tag{1}$$

虚拟过零检测法电压相角计算原理如图 3 所示。

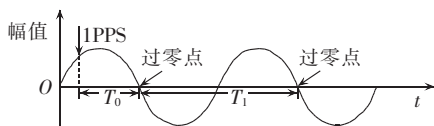


图 3 电压相角计算原理

Fig.3 Principle of voltage phase angle calculation

由于计算速度限制,首次过零时间计算时下次过零信号就会到来,如果处理完首次过零时间再继续记录,那么就会丢失后面几个周期的过零时间记录。为解决这个问题,本文在单片机内部开辟出一个包含 55 个元素的数组,每次过零时间都存放在里面,存放满之后下一个秒脉冲到来之前,这个数组就会通过串口发送到上位机上。由于发送时可能会丢失下一次秒脉冲,所以本文开辟了 2 个相同数组,一个存放满

之后开始通过串口传输,同时另一个数组开始存放数据,而第一个数组传输完成之后就会清空并发送就绪信号,如此循环。流程图如图 4 所示。

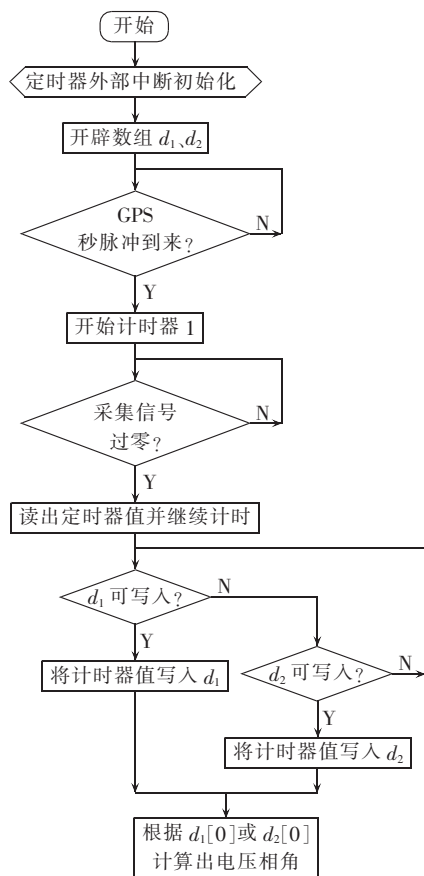


图 4 电压相角计算流程图

Fig.4 Flowchart of voltage phase angle calculation

计算得到的数组存放在如图 5 所示的数组元素中。

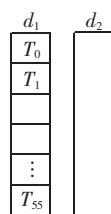


图 5 数组 d_1, d_2

Fig.5 Array d_1 and d_2

理论上,当电网频率为非标准的 50 Hz 时,相角会随着时间变化,变化规律如下^[16]:

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = 2\pi(f - f_0) \tag{2}$$

由于本文所采用的算法中计算得出的相角本身就是一个相对量,同一电网下的所有节点频率一致,所以可以抵消相角随频率的变化,无需补偿。

相角测量结果如表 2 所示,3 次采样结果基本一致,可见该装置的相角测量实时性高,准确度好,测得相量与计算所得结果基本吻合,可以满足配电网对于相量测量的需求,可以提高状态估计的冗余度。

表 2 相角测量结果
Table 2 Results of phase angle measuring

采样次数	相角/(°)				
	采样点 1	采样点 2	采样点 3	采样点 4	采样点 5
第 1 次	6.72	7.17	9.87	7.62	8.51
第 2 次	10.31	10.95	13.51	11.32	12.11
第 3 次	24.61	24.70	27.14	25.50	26.35

3 故障录波启动判据

本装置利用 stm32 单片机内部模数转换模块完成对当前相电压和电流瞬时值的实时采样,采样结果经过快速一阶滤波,所得波形与标准正弦波比对。本文提出了电气量偏移率与波形曲率相结合的故障录波启动判据。

3.1 电气量偏移率

现定义工频电气量偏移率为:

电气量偏移率= $\frac{\text{实际量}-\text{基准量}}{\text{基准量}}$ (3)

由过零检测电路检测出正弦交流电过零点,该时刻开始记录 AD 采样数据,一个周期(20 ms)内,采样 64 个点,相邻 2 个采样点之间的时间差为 20/64=0.3125(ms),角度差为 360°/64=5.625°,那么每个点总会有一个标准值与之对应,例如,220 V 所对应的数字量为 100,则第 1 个点为 141.4×sin 0°,第 2 个点为 141.4×sin 5.625°,第 3 个点为 141.4×sin 11.250°,依此类推。这 64 个点对应的数字量为基准量,构成一个基准量表。各点实际采样所得的数字量为实际量,则可求得每个采样点所对应的电气量偏移率。

3.2 波形曲率

曲率是用来表征曲线弯曲程度的特征量。如图 6 所示,曲线 C 光滑,点 M₀ 作为度量弧 s 的基点。曲线上点 M 对应于弧 s,在 M 处切线倾角为 α,另外一点 M' 对应弧 s+Δs,在点 M' 处切线倾角为 α+Δα,弧段 MM' 长度为|Δs|,当动点从 M 移动到 M' 时切线转过的角度为|Δα|。比值|Δα/Δs|称作弧段 MM' 的平均曲率。当 Δs→0 时,平均曲率的极限称作曲线 C 在点 M 处的曲率。平面曲线的曲率表征曲线偏离直线的程度。线路发生故障时,电流突变点和

电流峰值点的曲率大于正常时,因此可以通过计算电流波形曲率来快速识别故障的发生。

根据曲率定义,得到通过电流采样点计算电流波形曲率的方法:

$$\Delta\alpha=\arctan\frac{I_i-I_{i-1}}{t_d}-\arctan\frac{I_{i+1}-I_i}{t_d}$$
 (4)

$$\Delta s=\frac{\sqrt{(I_i-I_{i-1})^2+t_d^2}+\sqrt{(I_{i+1}-I_i)^2+t_d^2}}{2}$$
 (5)

$$k_i=\frac{\Delta\alpha}{\Delta s}$$
 (6)

其中,I 和 t_d 分别为采样电流值和采样时间间隔,由于两者单位不同,在进行计算前要进行归算处理。

3.3 实验测试

从理论上讲,用曲率进行识别的主要优势是可以对故障时刻的电流突变进行识别,在短路电流变化率和瞬时值还未增大到一定数值时判定故障发生,可以显著提高识别速度。但如果故障发生在峰值点附近,曲率的变化则不能及时完全识别故障,甚至不识别^[17],而电气量偏移率的变化则可以识别出这种故障。针对这种情况,本文采用电气量偏移率和波形曲率相结合的故障录波启动判据。

GPS 秒脉冲来到后第一个过零点开始进行筛选,直到下一个秒脉冲来临之前,其间如果波形曲率超过整定值或连续 20 个点的电气量偏移率超过整定值,则判定此时为故障,将此秒脉冲后,下一个秒脉冲前所有采样数据(共 50 个周期左右)写入容量为 16G 的外接 SD 存储卡内,时间标签打在每帧数据之前。分析故障波形时,读出存储卡内的数据,在上位机相应软件上绘制波形图,利用相应算法,找到精确的故障发生的时间点,精确度可达 0.5 ms。

该测试中,故障发生在如图 7 所示的 220 V 等效系统中。图 8—11 为配电网单相接地故障下该装置

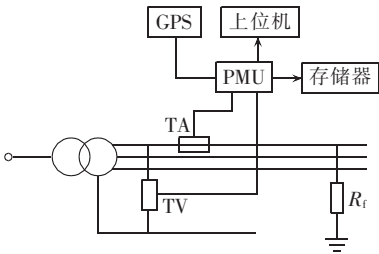


图 7 单相接地故障测试系统
Fig.7 Test system for single-phase grounding fault

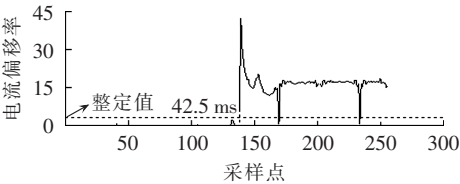


图 8 电流偏移率图
Fig.8 Diagram of current deviation rate

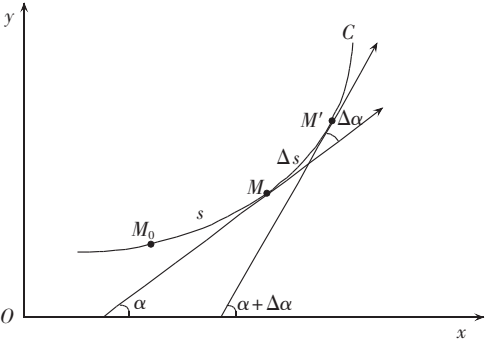


图 6 曲率定义
Fig.6 Definition of curvature

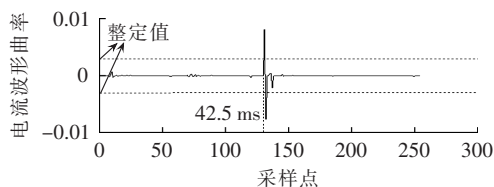


图 9 电流波形曲率图

Fig.9 Diagram of current waveform curvature

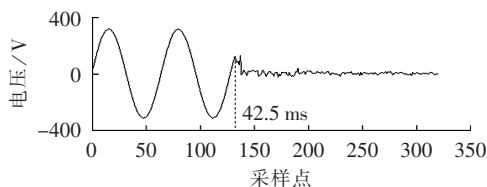


图 10 故障电压波形

Fig.10 Waveform of fault voltage

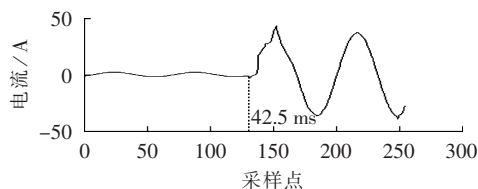


图 11 故障电流波形

Fig.11 Waveform of fault current

记录的部分电压、电流波形。

经运算可得,在第 136 个采样点处发生故障,每个采样点之间相距 0.3125 ms,由此可知,故障发生点时刻为 2015 年 6 月 20 日 13 点 27 分 18 秒 42.5 ms。

4 结论

本文设计开发了一种低成本的 μ PMU 与故障录波装置,给出了各功能模块及其硬件选型架构,介绍了该装置的主要功能和相量测量算法,提出了电气量偏移率和波形曲率相结合的故障录波启动判据以及故障时间点的确定算法。该装置经测试,充分满足配电网相量测量的需求,可以准确确定故障发生的时间点并准确记录故障波形。未来,随着分布式电源的大规模接入配电网,以此数据为基础,将会产生大量的配电网高级应用,具有较高的研究意义和工程应用价值。

参考文献:

- [1] 刘取,刘宪林. 21 世纪电力系统的先进技术[J]. 电力自动化设备,2010,30(7):1-5.
LIU Qu,LIU Xianlin. Advanced technologies of power system in the 21st century[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(7):1-5.
- [2] 陈亮,毕天姝,薛安成,等. 基于断路器零阻抗特性的 PMU 量测状态估计方法[J]. 电力自动化设备,2014,34(5):105-110.
CHEN Liang,BI Tianshu,XUE Ancheng,et al. State estimation based on PMU measurements considering zero-impedance characteristics of circuit breaker[J]. Electric Power Automation Equip-

ment,2014,34(5):105-110.

- [3] 蒋长江,刘俊勇,刘友波,等. 基于广域测量系统和 CELL 理论的强迫振荡在线感知与定位[J]. 电力自动化设备,2015,35(2):125-132.
JIANG Changjiang,LIU Junyong,LIU Youbo,et al. Online forced oscillation detection and identification based on wide area measurement system and CELL theory[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(2):125-132.
- [4] LIU C W. Phasor measurement applications in Taiwan[C]//2002 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. Yokohama,Japan:IEEE,2002:490-493.
- [5] 蔡超,陆于平. 一种提高智能变电站 PMU 相量测量精度的改进采样值调整算法[J]. 电力自动化设备,2014,34(3):149-154.
CAI Chao,LU Yuping. Improved sampled value adjustment algorithm increasing measurement precision of smart substation PMU [J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(3):149-154.
- [6] 别朝红,李更丰,王锡凡. 含微网的新型配电系统可靠性评估综述[J]. 电力自动化设备,2011,31(1):1-6.
BIE Zhaozhong,LI Gengfeng,WANG Xifan. Review on reliability evaluation of new distribution system with micro-grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(1):1-6.
- [7] 王克英,穆钢,陈学允. 计及 PMU 的状态估计精度分析及配置研究[J]. 中国电机工程学报,2001,21(8):29-33.
WANG Keying,MU Gang,CHEN Xueyun. Precision improvement and PMU placement studies on state estimation of a hybrid measurement system with PMUs[J]. Proceedings of the CSEE,2001,21(8):29-33.
- [8] 薛禹胜,徐伟. 关于广域系统及广域保护系统的评述[J]. 电力系统自动化,2007,31(15):1-5.
XUE Yusheng,XU Wei. Review on wide-area system and wide area protection system[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(15):1-5.
- [9] 王正风,黄太贵,吴迪,等. 广域测量技术在电力系统中的应用[J]. 华东电力,2007,35(5):32-36.
WANG Zhengfeng,HUANG Taigui,WU Di,et al. Application of wide area measurement system to power systems[J]. East China Electric Power,2007,35(5):32-36.
- [10] 郝静,尹维春,孙澄宇. 基于 ATT7022B 的多功能防窃电三相电能表[J]. 东北电力大学学报,2007,27(1):46-48.
HAO Jing,YIN Weichun,SUN Chengyu. Design of three phase multi-function and stealing power preventing watt-hour meter based on ATT7022B[J]. Journal of Northeast Dianli University,2007,27(1):46-48.
- [11] 郎兵,骆平,汪祥. 基于全球定位系统和锁相环技术的同步相量测量装置的实现[J]. 中国电力,2006,39(7):84-88.
LANG Bing,LUO Ping,WANG Xiang. The realization of synchronized phasor measurement unit based on GPS and PLL [J]. Electric Power,2006,39(7):84-88.
- [12] 李建,谢小荣,韩英铎,等. 北斗卫星导航系统与 GPS 互备授时的分布式相量测量单元[J]. 电网技术,2005,29(9):1-5.
LI Jian,XIE Xiaorong,HAN Yingduo,et al. Study on distributed PMU for synchronous phasor measurement using mutually backup synchronization signals from both beidou satellite navigation system and global positioning system [J]. Power System Technology,2005,29(9):1-5.
- [13] 曾祥君,尹项根,LI K K,等. GPS 时钟在线监测与修正方法[J]. 中国电机工程学报,2002,22(12):41-46.

ZENG Xiangjun,YI Xianggen,LI K K,et al. Methods for monitoring and correcting GPS-clock[J]. Proceedings of the CSEE, 2002,22(12):41-46.

[14] 王元虎,周东明. 卫星时钟在电网中应用的若干技术问题[J]. 中国电力,1998,31(2):10-13.

WANG Yuanhu,ZHOU Dongming. Some technical problems of satellite clock applied on power network [J]. Electric Power, 1998,31(2):10-13.

[15] Working Group H-7 of the Relaying Channels Subcommittee of the IEEE Power System Relaying Committee. Synchronized sampling and phasor measurement for relaying and control [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1994,9(1):442-452.

[16] 卢志刚,穆永民. GPS技术在实时相角测量中的应用[J]. 电力自动化设备,2000,20(6):20-22.

LU Zhigang,MU Yongmin. Application of GPS in real-time phasor measurement[J]. Electric Power Automation Equipment, 2000,20(6):20-22.

[17] 杨尚谨,武守远,戴朝波. 基于电流波形曲率的短路故障快速识别方法[J]. 电网技术,2013,37(2):551-553.

YANG Shangjin,WU Shouyuan,DAI Chaobo. Method to fast recognize short-circuit fault based on curvature of line current waveform[J]. Power System Technology,2013,37(2):551-553.

作者简介:



李江

李江(1979—),男,四川射洪人,副教授,博士,研究方向为电力系统的分析与控制(E-mail:lijiang@mail.nedu.edu.cn);

徐志临(1990—),男,山东金乡人,硕士研究生,研究方向为配电自动化(E-mail: 362707716@qq.com);

李国庆(1963—),男,吉林长春人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统

的安全性及稳定性分析。

Research and development of micro PMU and fault wave recording device for distribution network

LI Jiang,XU Zhilin,LI Guoqing,GAO Yaru,WEI Wenzhen

(School of Electrical Engineering,Northeast Dianli University,Jilin 132012,China)

Abstract: A micro PMU(Phasor Measurement Unit) and fault wave recording device is developed for the low-voltage distribution network,which has several functions,including synchronous phasor measuring,comprehensive data acquisition,equipment time synchronization and fault wave recording. Its hardware cost and installation difficulty are fully considered and the cost is significantly reduced while the data accuracy is satisfied. The virtual zero-crossing phasor measuring method is adopted to measure the voltage phasor in real time and the startup criterion combining the deviation rate with the waveform curvature of electrical variable is applied in the fault wave recording. The corresponding hardware design is given. Test results show that,the measured data are accurate and the fault is quickly identified,satisfying the basic requirements of power distribution network analysis.

Key words: distribution network; micro PMU; comprehensive energy monitoring; fault wave recording