

智能变电站电容型设备介质损耗在线监测IED设计

王红亮, 黄新波, 王宏, 朱永灿, 方寿贤

(西安工程大学电子信息学院, 西安 710048)

摘要: 为了及时有效地对设备绝缘特性进行在线监测从而保障电网安全运行, 笔者提出了一种基于 ARM+DSP 双 CPU 结构的智能变电站电容型设备介质损耗在线监测系统 IED 设计方案, 遵循 IEC 61850 协议给出具体软硬件设计。运行结果表明: 该系统可以精确的测得泄漏电流、介质损耗、等值电容等设备运行状态信息, 并可通过 IEC 61850 协议将数据传输至在线监测数据中心。

关键词: 智能变电站; 智能电子设备; 介质损耗; 在线监测; 相对比较法

中图分类号: TM621.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2012)01-0001-06

Design of an On-line Monitoring IED of Dielectric Loss in Capacitive Equipment in Intelligent Substation

WANG Hong-liang, HUANG Xin-bo, WANG Hong, ZHU Yong-can, FANG Shou-xian

(College of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: A system based on the ARM and DSP of double CPU structure online monitoring IED of dielectric loss in capacitive equipment in intelligent substation is designed, according to IEC 61850 protocol the specific hardware and software are given out in details. The running results show that the leakage current, dielectric loss, equivalent capacitance and other equipments operating information can be precisely measured and the information can be transferred to the monitoring centre with the IEC 61850 protocol.

Key words: intelligent substation; IED; dielectric loss; on-line monitoring; relative comparison

0 引言

随着中国经济的快速增长, 电力系统的规模以及容量在不断地扩大, 对电力系统的安全有了更高的要求。电气设备的安全可靠运行是实现整个电力系统稳定运行的基础, 而电气设备尤其是高压设备事故大部分是绝缘损坏引起的^[1-2]。因此及时有效地对设备绝缘特性进行在线监测对于保障电网安全运行具有重要意义^[3-5]。介质损耗角的正切值 $\tan\delta$ ^[6] 可以反映设备的绝缘特性, 因此可间接通过在线监测 δ 来判断电力设备的绝缘情况^[7-9], 达到防患于未然的

目的。笔者设计了一款采用 ARM+DSP 双处理器的智能变电站电容型设备在线监测 IED, 采用模块化设计, 具有良好的扩展性, 其主要功能是完成与容性设备现场监测单元以及上位机的数据通信, 其强大的实时监控能力及高速稳定的通信能力, 可高效、可靠地实现容性设备介质损耗角在线监测工作。

1 智能变电站电容型设备状态监测的原理与系统构架

1.1 相对介损测量原理

传统的介质损耗数字化测量方法是基于硬件实现的, 主要是过零比较法或改进的过零比较法, 即通

收稿日期: 2011-10-22; 修回日期: 2011-11-26

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划, 2009CB724507_3); 陕西省科学技术研究发展项目(2011KJXX09); 西安市科技计划项目(CXY1104); 陕西省教育厅产业化培育项目(2010JC08)。

Project Supported by National Basic Research Program(973 Program, 2009CB724507_3), Science and Technology Research and Development Programs of Shanxi Provincial Committee (2011KJXX09), Science and Technology Plan Project of Xi'an (CXY1104), Ministry of Education Industrialization Cultivation Project from Shanxi Provincial Committee(2010JC08).

过检测电压、电流信号过零点的时间差来计算介损^[10],该方法对过零点的测量准确性要求很高,因而测量精度易受到谐波干扰、零漂等因素的影响。另外,电流电压双处理通道的时延偏差以及对信号的预处理环节,都会带来累计误差的问题。考虑到同相、同电压等级设备相互之间的运行工况、受外界环境温湿度影响的情况接近,电压基准和其他因素对同相设备介损测量的影响相似,系统采用相对介损的在线监测方法。相对比较法原理是通过计算参考设备与被测设备泄漏电流的相位差来计算相对介损,见图 1。泄漏电流间的相对介损即基波相位差 $\Delta\delta=2\pi\Delta T/T$,图 1 中 T 为高速时基脉冲周期, N 为软件计数器计得的脉冲数。为了获得稳定的比较信号,通常选择一组绝缘性能比较好的电容型设备(如新安装的大电容量的介损较小的设备)作为参考的基准。与绝对介损^[6]的测量方法相比,采用相对介损法可有效地削弱外部因素的影响,避免 PT 角差带来的测量上的误差,从原理上大大减小了信号采集带来的误差,提高了绝缘状态诊断结果的可信度。

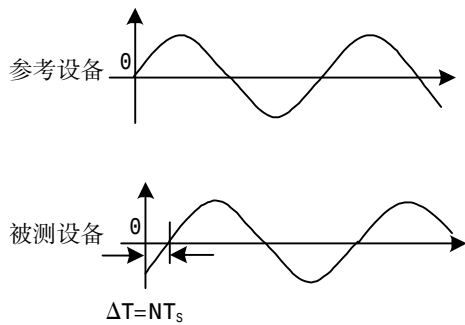


图 1 相对介损的测量原理

Fig. 1 Relative dielectric loss measurement principle

1.2 谐波分析法

一般来说电容型设备的 $\tan\delta$ 值都很小,测量精度要求高,谐波频率、谐波波形畸变率、谐波初相角等因素都对介损监测及频率测量都有一定的影响。该系统采用谐波分析法对采集信号进行处理,使介质损耗因数 $\tan\delta$ 不受谐波分量的影响。系统 IED 对上传的电流信号 $i(t)$ 进行傅里叶级数分解,其表达式为

$$i(t) = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} I_k \sin(k\omega t + \varphi_k) \quad (1)$$

式(1)中: $\omega=2\pi f$, f 为电网频率; I_0 为电流的直流分量; I_k 分别为电流的各次谐波幅值; φ_k 为电流的各次谐波初相角($k=1, 2, 3, \dots, \infty$)。

电容型设备的相对介质损耗因数为

$$\tan\Delta\delta = \tan(\delta_{11} - \delta_{21}) = \tan(\varphi_{11} - \varphi_{21}) \quad (2)$$

式(2)中, φ_{11} 和 φ_{21} 分别为待测电流和基准电流的基波初相角。由此可知,求解电容型设备介质损耗因数的关键就在于去除系统谐波干扰的影响,准确地求得 $i(t)$ 的初相角。考虑到实际获得的 $i(t)$ 是经过离散、量化后的有限长度的离散周期序列,假设用 $x(n)$ 表示采样得到的离散点($0 \leq n \leq N-1$, N 为序列的总长度,对应于离散波形的总采样点数),以 $x(n)$ 经离散傅里叶变换后可得

$$X(k) = \text{DFT}[x(n)] = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \left(\cos\frac{2\pi kn}{N} + j \sin\frac{-2\pi kn}{N} \right) \quad (3)$$

由式(3)可知

$$X_R(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cos\frac{2\pi kn}{N}, X_I(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \sin\frac{-2\pi kn}{N} \quad (4)$$

式(4)中, $X_R(k)$ 、 $X_I(k)$ 分别为 $X(k)$ 的实部和虚部。

由式(4)可看出,序列 $x(n)$ 即 $i(t)$ 的初相角 φ_{ik} 为

$$\varphi_{ik} = \arctan \frac{X_I(k)}{X_R(k)} \quad (5)$$

通过式(5)分别求出 2 个试品的初相角,进而根据式(2)求取相对介质损耗因数 $\tan\Delta\delta$ 。

1.3 智能变电站状态在线监测系统构架

智能变电站系统可分为站控层、间隔层和过程层^[11]。过程层主要完成与一次设备开关量 I/O、模拟量采样和控制命令的发送等功能;间隔层由智能电子设备(IED)组成,完成对站控层控制命令的发送和过程层信息的传输,并对监测终端采集到的数据进行分析以及存储;站控层实现管理间隔层、过程层设备等功能,并完成与控制中心和人机界面等的通信。

根据智能变电站系统结构,提出如图 2 所示的智能变电站电容型设备介损在线监测系统构架。图 2 中双箭头表示有数据双向传输。容性设备在线监测装置通过 RS485 总线与系统 IED 互联。整个系统的工作流程如下:监控主机服务器发出采集指令,经 IED 通过 RS485 传给每一个监控终端。各个终端接到采集指令后,获取 GPS 时钟信号^[12]作为同步时钟,同时刻采集电流信号。当各个终端数据采集完毕后,将采集数据通过 RS485 传给 IED,IED 对数据进行处理,打包以 IEC 61850^[13-15]协议上传给监控主机。监控主机收到数据后经过专家软件对数据进行分析、计算,进而对设备运行状态进行判断并将数据存入数据库作历史分析之用。

2 电容型设备在线监测 IED 的设计

系统 IED 采用 ARM+DSP 双处理器,具有很高

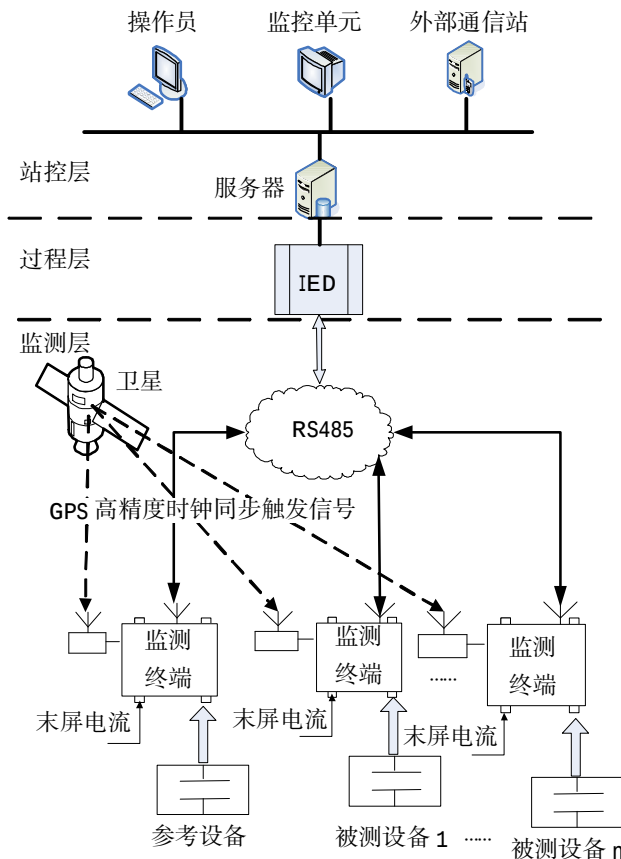


图 2 系统结构图

Fig. 2 System structure diagram

的数据采集、管理和分析能力。不同 CPU 负责不同任务,保证每个环节高效进行,可实现信息的高速、稳定传输,对设备状态进行实时控制更加精确。IED 主要实现的功能有:

- 1)通信功能,接收容性设备在线监测装置采集到的监测数据以及传送站控层服务器的采集命令;
- 2)对监测终端采集到的数据进行分析,并对故障信息进行存储以及本地显示;
- 3)嵌入 IEC 61850 协议,实现变电站的信息共享以及设备的互操作性。

2.1 电容型设备 IED 的硬件设计

电容型设备 IED 作为智能变电站中的间隔层设备,不仅需要实时准确的接收站控层的采集命令并及时下发给过程层监测装置,还要将过程层上传的数据及时发回站控层,对设备上传的异常数据进行分析 and 预警。为了实现系统 IED 运行的高速性和实时性,该系统采用 ARM+DSP 双 CPU 架构为硬件核心。ARM 采用 ARM9 系列芯片,附加外围的键盘、液晶、以太网通讯等硬件设备,用以完成整个系统的管理和控制。ARM 功能包括向 DSP 发送指令,要求回传数据、对数据进一步处理、存储和显示,以及与 DSP 和上位机的通讯。利用 DSP 的高速运算和多种

片上外设的特点完成对容性设备泄漏电流采集命令的下发,并对采集来的数据进行计算和分析,同时实时响应 ARM 的请求,将数据处理的结果发送给 ARM。DSP 与 ARM 的通讯采用 SPI 通讯。系统硬件结构见图 3。

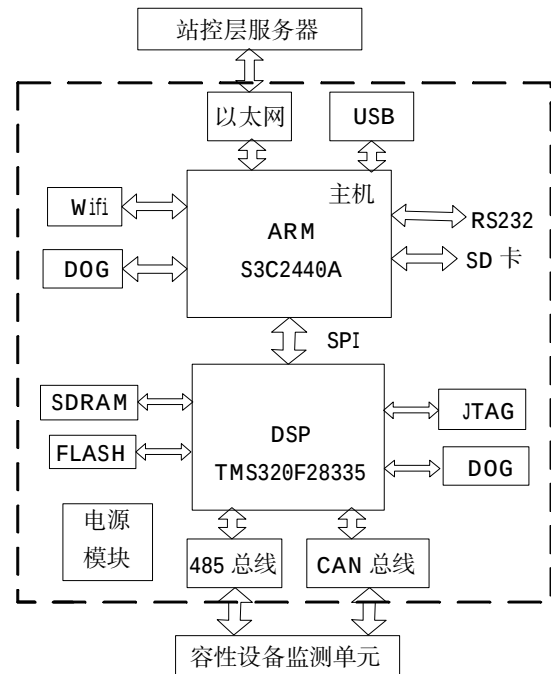


图 3 IED 硬件结构

Fig. 3 IED hardware structure

2.1.1 电源模块

电源模块见图 4。容性设备在线监测 IED 电源部分采用 AC/DC 电源芯片,主要作用是将交流 220 V 电压转换为 5 V 和备用的 12 V 电压。5 V 电压通过线性稳压芯片 MIC29502BU 转换为 3.3 V,提供给 CAN 网络接口电路、以太网网络接口电路和容性设备 IED 上的其他用电器件正常供电。3.3 V 电压通过线性电压调节芯片 LM1117-ADJ 转换为 1.5 V 和 1.9 V,分别给 DSP 内核和 Wifi 接口电路供电。3.3 V 电压通过隔离电源芯片 B0305 提供 5 V 隔离电源给 485 网络接口电路供电。此设计是该系统的关键,部分隔离设计很好的保护供电模块免受外界电磁干扰。

2.1.2 SPI 通讯

主从 CPU 之间的通讯方式可有 3 种:SPI、HPI 以及双口 RAM。在该系统中,DSP 没有 HPI 功能模块,而 SPI 相比较双口 RAM 更加稳定和迅速,所以主从 CPU 之间采用 SPI 通讯方式,可以使整个系统更加可靠、高效。

具体工作流程如下:ARM 发出信号来启动数据传输,DSP 通过中断方式来接收数据,当接收到完整的控制帧时,首先检验控制帧的有效性,对于有效的

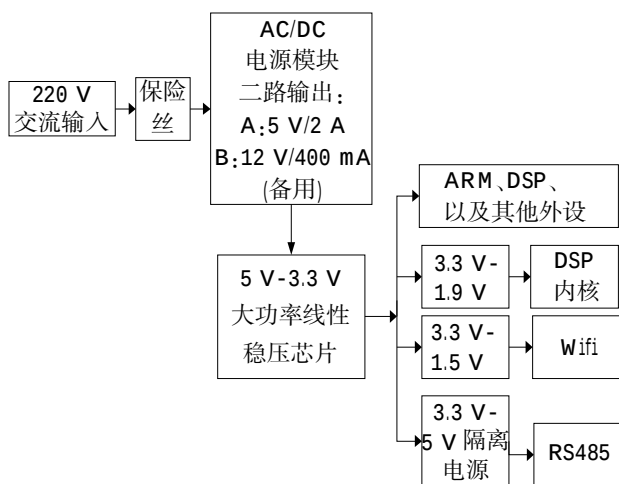


图 4 电源模块

Fig. 4 Power module

控制帧,首先关闭 SPI 中断,同时进行相应的处理。处理完后,再开启 SPI 中断并向 ARM 发送数据。ARM 对于无效的数据帧和超时错误,将回应错误码要求重发,对于不正常的数据将启动预警功能。

2.1.3 GPS 同步授时

设计中选择了摩托罗拉 (Motorola) M12+ Timing 授时模块, M12+ Timing Oncore 接收器是一款具有 12 通道的 GPS 授时模块^[16-17],可同时跟踪 12 颗卫星,能产生高达纳秒级的同步授时,其内部采用 Motorola 的时间 RAIM 算法(接收器自主检测),确保了 GPS 测量的有效性和可靠性。处理器通过串口通信对 M12+ 进行必要的初始化设置后,授时模块内部时钟与 GPS 时间取得同步并给出与协调世界时间(UTC)同步的 1 PPS(秒脉冲)信号及其对应的时间代码,见图 5。微处理器识别到这些信息后,开始接收 M12+ 传送来的时间数据,并将其转换成北京时间。在 GPS 的时间基准上当实时采集被使能或既定的采样间隔到来时,1 PPS 信号的上升沿将同步触发采样逻辑模块并根据采样率在高电平的时间内完成一个周期的 A/D 高速采样。

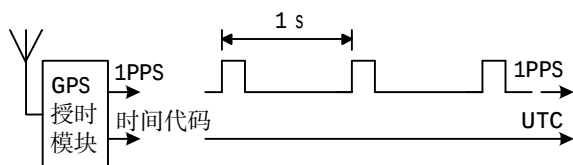


图 5 GPS 授时示意图

Fig. 5 The diagram of GPS timing

2.2 容性设备 IED 软件设计

该系统采用双 CPU、主从式结构,不同 CPU 承担不同的任务,以 ARM 为主,DSP 为从。在 ARM 上嵌入了 Linux 操作系统,ARM 软件设计注重人机界

面以及系统的稳定性;在 DSP 软件设计上,采用 C 程序设计语言,通过 TI 公司的开发软件 CCS3.3 编程开发,进而保证整个软件系统及通讯设计具有较强的实时性。

主机 ARM 根据配置文件启动轮询函数,并根据预先拟定的通信协议将对要采集的终端设备的命令进行提取和下发,DSP 获取命令后对命令的有效位进行截取后转发给智能终端,智能终端返回的数据在 DSP 中根据协议进行解析并对不同的数据进行相关的计算整合,再封装上传至 ARM。进行进一步的处理和通讯。软件流程见图 6。

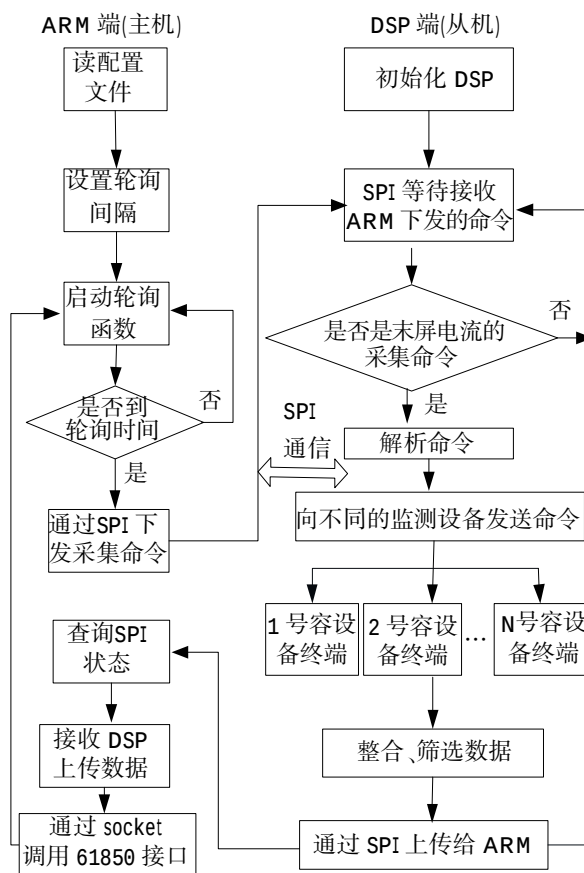


图 6 IED 软件流程图

Fig. 6 IED software flow chart

3 IEC 61850 协议的实现

IEC 61850 是一个开放的通信标准^[18],它具有开放系统的特点,在 IED 设备间能够实现无缝连接。IEC 61850 是第一个关于变电站自动化系统比较完整的通信标准体系,明确提出了信息分层、可实现系统的配置管理、面向对象、采用映射的方法和具体网络独立、数据对象统一建模,符合采用网络传输建立无缝通信系统的要求,已成为无缝通信系统传输协议的基础,避免了繁琐的协议转换,实现了智能电子设备 IED 间的互操作。

容性设备 IED 采用 IEC 61850 所提供的标准对系统 IED 进行模型, 并将这些模型在站控层的服务器、间隔层的 IED 和在线监测装置通过软件联系起来, 进而实现了过程层、间隔层 IED 之间以及站控层服务器之间的通信。容性设备 IED 的分层模型见图 7, 逻辑节点是 IEC 61850 中基本的数据模型^[19-20], 数据模型表达了数据类型、哪些数据需要通信以及这些数据如何通信。其中又包括一定的数据对象, 而数据对象又是由相应的数据属性构成。该容性设备 IED 应用嵌入式以太网, 使其可以不经中央处理单元、通信单元或协议转换单元、网关等中间环节, 直接与变电站自动化系统网络连接, 在站控层也采用 IEC 61850 的情况下, 不仅可以节省整个系统的设计, 还可以节减调试维护时间。监测终端现场安装图见图 8。

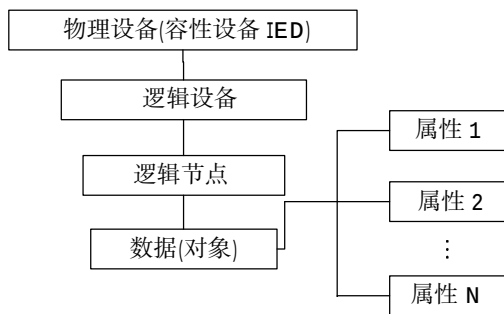


图 7 容性设备 IED 的数据模型

Fig. 7 The data model of capacitive equipment IED



图 8 监测终端现场安装图

Fig. 8 The installation diagram of monitoring terminal

该容性设备介质损耗在线监测 IED 已经顺利通过国网南瑞的一致性测试实验, 实现了符合 IEC 61850 标准的间隔层以太网通信功能。

4 现场数据分析

泄漏电流及相对介损变化趋势图见图 9。容性设备介质损耗在线监测 IED 的试品已成功通过西

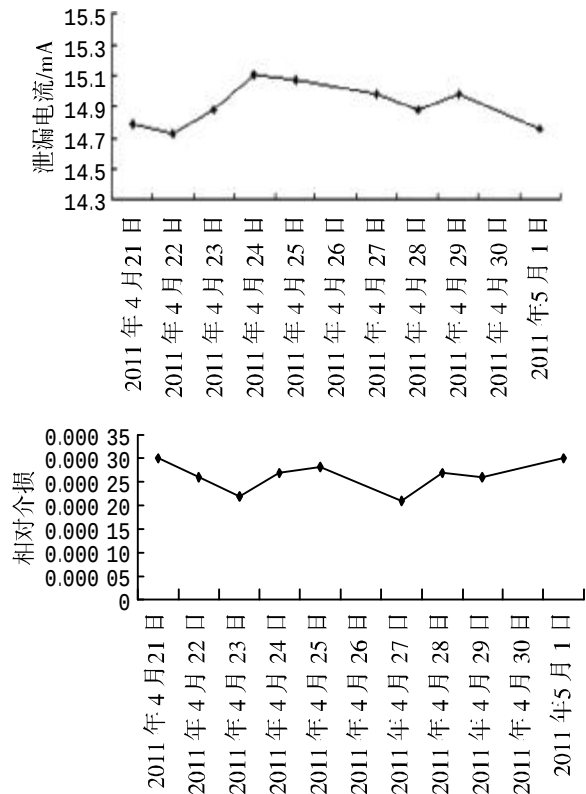


图 9 泄漏电流及相对介损变化趋势图

Fig. 9 Change trend of leakage current and relative dielectric loss

安高压电器研究院有限责任公司的静电放电抗扰度试验、电快速瞬变脉冲群抗扰度试验、浪涌(冲击)抗扰度试验以及工频磁场抗扰度试验, 符合电磁兼容的国标四级设计要求。智能变电站专家软件分为服务器端和客户端两部分。服务器端主要完成采集数据的接收、解析并存入数据库系统。客户端则主要是对采集数据做全方位、多角度的可视化显示、分析等。此系统于 2011 年 4 月在山东变电站投入使用。

采集数据经专家软件处理分析可知, 该系统测量数据准确并保持稳定, 能准确实现容性设备在线监测功能, 符合智能变电站高速采集、快速处理、通信稳定的智能化要求。

5 结语

笔者提出了一种基于 ARM +DSP 双 CPU 结构的智能变电站电容型设备介质损耗在线监测 IED 设计方案。该设计充分利用了 ARM 处理器和 DSP 芯片的高效快速的数字信号处理能力。采用 GPS 高精度授时实现各现场监测终端的异地同步触发, 其同步误差小于 2 ns, 大大提高了系统测量的精度。采用 RS485 有线传输的方式实现容性设备现场监测单元与 IED 之间的指令传输和数据通信, 克服了变电站高压环境下的电磁无线传输的干扰问题, 保证

数据传输的可靠性和实时性。运行结果表明,该设计可以精确测得变电站容性设备在线运行情况,为变电站安全运行提供了可靠的保证。

参考文献:

- [1] 黄新波,程荣贵.变电设备在线监测与故障诊断[M].北京:中国电力出版社,2008.
HUANG Xin-bo, CHENG Rong-gui. Substation-line monitoring and fault diagnosis[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.
- [2] 林建龙,邓敏,林力辉.绝缘设备在线监测系统[J].电网技术,2002,26(1):86-88.
LIN Jian-long, DENG Min, LIN Li-hui. An on-line insulation monitoring system for high voltage current transformer [J]. Power System Technology, 2002, 26(1): 86-88.
- [3] 朱德恒,严璋.电气设备状态监测与故障诊断技术[M].北京:中国电力出版社,2009.
ZHU De-heng, YAN Zhang. Electric equipment condition monitoring and fault diagnosis technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.
- [4] 陈天翔,张保会,陈天韬,等.新型电容型电力设备 $\tan\delta$ 在线高精度测量系统[J].电力系统自动化,2004,28(15):67-70.
CHEN Tian-xiang, ZHANG Bao-hui, CHEN Tian-tao, et al. New on-line high precision $\tan$ monitoring system for capacitive equipment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(15): 67-70.
- [5] 黄建华,何青.电容型设备绝缘在线监测系统及其选用原则[J].高电压技术,2001,27(5):13-16.
HANG Jian-hua, HE Qing. Online insulation monitoring system for capacitive equipment and selection principle [J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(5): 13-16.
- [6] 张会平,董晓鹏.电容型设备 $\tan\delta$ 在线监测的核查模型[J].高电压技术,2001,27(2):35-36.
ZHANG Hui-ping, DONG Xiao-peng. On-line monitoring of capacitive apparatus $\tan\delta$ verification model [J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(2): 35-36.
- [7] 李泽文,曾祥君,覃丹,等.基于 FPGA 的容性设备介质损耗在线测量系统[J].电力自动化,2006,30(12):92-96.
LI Ze-wen, ZENG Xiang-jun, TAN Dan, et al. On-line measuring system of dielectric loss of capacitive apparatus bases on FPGA [J]. Automation of Electric Power System, 2006, 30(12): 92-96.
- [8] 徐大可,严璋.高电电容性设备的在线监测系统[J].高电压技术,2003,29(10):35-38.
XU Da-ke, YAN Zhang. On-line monitoring system on HV capacitive type equipment [J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(10): 35-38.
- [9] 龙锋.电容型设备介质损耗因数在线监测研究[D].成都:西南交通大学,2004.
LONG Feng. On line monitoring research of dielectric loss of capacitive equipment [D]. Chengdu: Southwest Jiao Tong University, 2004.
- [10] 李国庆,庄重,王振浩.电容型电气设备介质损耗角的在线监测[J].电网技术,2007,31(7):55-58.
LI Guo-qing, ZHUANG Zhong, WANG Zhen-hao. On-line monitoring of dielectric loss of capacitive apparatus [J]. Power System Technology, 2007, 31(7): 55-58.
- [11] 吴在军,胡敏强.基于 IEC61850 标准的变电站自动化系统研究[J].电网技术,2003,27(10):62-65.
WU Zai-jun, HU Min-qiang. Research on a substation automation system based on IEC 61850 [J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 62-65.
- [12] 高厚磊,厉吉文,文锋,等.GPS 及其在电力系统中的应用[J].电力系统自动化,1995,19(9):41-44.
GAO Hou-lei, LI Ji-wen, WEN Feng, et al. GPS and its potential applications to power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(9): 41-44.
- [13] IEC 61850-7-4. Communication networks and systems in substations Part7-4: Basic communication structure for substations and feeder equipment-compatible logical node classes and data classes [S].
- [14] IEC 61850-7-3. Communication networks and systems in substations Part7-3: Basic communication structure for substations and feeder equipment-common data classes [S].
- [15] IEC 61850-7-1. Communication networks and systems in substations Part7-1: Basic communication structure for substations and feeder equipment-principles and models [S].
- [16] 邹红艳,郑建勇.基于 GPS 同步时钟的统一校时方案[J].电力自动化设备,2004,24(12):59-61.
ZOU Hong-yan, ZHENG Jian-yong. Time synchronization based on GPS clock [J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(12): 59-61.
- [17] 傅鸿志,朱祖仪.关于电网时间统一系统的探讨[J].电力系统自动化,1994,18(10):44-46.
FU Hong-zhi, ZHU Zu-yi. An inquiry about the time synchronization in power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 1994, 18(10): 44-46.
- [18] 谭文恕.变电站通信网络和系统协议 IEC 61850 介绍[J].电网技术,2001,25(9):11-15.
TAN Wen-shu. An introduction to substation communication net work and system - IEC 61850 [J]. Power System Technology, 2001, 25(9): 11-15.
- [19] 李映川,王晓茹.基于 IEC 61850 的变电站智能电子设备的实现技术[J].电力系统通信,2005,26(9):54-56.
LI Ying-chuan, WANG Xiao-ru. Intelligent electronic equipment in substation based on IEC 61850 technology [J]. Telecommunications for Electric Power System, 2005, 26(9): 54-56.

(下转第 16 页)