

文章编号:2095-0411(2015)03-0070-05

基于可编程器件的电能质量监测终端设计

孙广辉^{1,2},朱正伟²,郭 枫²,张 丹²

(1. 南京邮电大学 通达学院,江苏 扬州 225127;2. 常州大学 信息科学与工程学院,江苏 常州 213164)

摘要:针对目前电能质量监测终端存在集成度低、硬件电路调试繁琐等问题,提出一种基于 FPAA(Field Programmable Analog Array)技术和 FPGA(Field Programmable Gate Array)技术的远程电能质量监测系统。通过 FPAA 和 FPGA 技术的结合提高系统的集成度,利用 FPAA 技术的可重构特性减低电路调试繁琐问题。系统实现了太阳能并网系统电能质量基本参数、谐波、三相不平衡等参数的实时监测,实验运行证明终端具有硬件电路调试简单、升级自由度大、布置方便、智能性高的优点。

关键词:FPGA;FPAA;电能质量监测;可编程器件

中图分类号:TH 86

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2015.03.014

The Power Quality Monitoring Terminal Based on Programmable Device

SUN Guanghui^{1,2}, ZHU Zhengwei², GUO Feng², ZHANG Dan²

(1. Tongda College, Nanjing University of Posts & Telecommunication, Yangzhou 225127, China;
2. School of Information Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: To deal with problems such as low precision and cumbersome in hardware circuit debugging, a remote power quality monitoring system based FPAA and FPGA is proposed in this paper. The system improves the integration of the system by FPAA and FPGA, it also reduces the debugging problem of the circuit by the reconfigurable characteristics of FPAA. The system implements real-time measurement of the basic parameters of power quality in the micro-grid, such as harmonic, there-phase imbalance, voltage/current, power factor. The terminal is easy to be debugged and installed, which is proved by experimental results.

Key words: FPGA; FPAA; power quality monitoring system; programmable device

随着能源危机日益严重,对可再生能源的研究日益增多,其中对太阳能转换、并网等方面的研究颇多,由于太阳能发电具有很大的随机性,并网时对电网造成很大冲击,这对电能质量监测系统的实时性提出了更高的要求^[1]。开发一种控制简单、实时性好、测量精度高的电能质量监测系统对太阳能并网的电能质量状况进行实时监测,具有非常重要的实

际意义。

目前电能质量监测终端系统设计的整体架构主要有两种:单控制器架构^[2-3]、双控制器协作架构^[4-5]。单控制器架构外围电路较复杂,集成度低,硬件电路调试繁琐,同时存在运算、分析等功能弱问题;双控制器协作架构通过牺牲硬件资源来提高系统性能致使对资源的利用率较低。针对上述问题,

收稿日期:2014-11-11。

基金项目:江苏省科技厅技术支撑(工业)计划项目(BE2013005-3)。

作者简介:孙广辉(1986—),男,山东广饶人,硕士,主要从事测量控制与仪器、FPAA 技术应用研究。通讯联系人:朱正伟(1963—),E-mail:zhuzw888@126.com

本文提出一种基于 FPAA 和 FPGA 技术的远程电能监测系统。该系统充分利用可编程器件(FPAA 和 FPGA)集成度高、可重构、易设计、易升级等基本特征,提出一种集成高、易升级、稳定性高的在线电能质量监测终端。

1 总体设计方案

电能质量监测系统由主站系统和电站终端系统 2 大部分组成,选用分布式结构,各级主站系统采用金字塔结构逐级连接,其中底层主站系统与电站监测终端相连,上级主站系统通过下级主站系统与电站监测终端相连和直接与电站监测终端相连,所述连接为以太网通信网络或 GPRS(General Packet Radio Service)通信网络或两者的有机结合。此结构采用积木式组合可实现灵活分级、物理上分散监测、逻辑上数据分级集中管理。具体拓扑结构如图 1 所示。

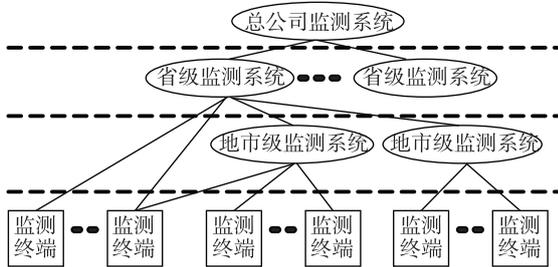


图 1 系统拓扑结构图

Fig.1 System topology diagram

1.1 主要指标和分析方法

电能质量定义种类繁多,目前没有达成统一共识。我国依据国情提出 6 项电能质量标准:电能质量供电电压偏差(GB/T12325-2008)、电能质量三相电压不平衡(GB/T15543-2008)、电能质量电力系统频率偏差(GB/T15945-2008)、电能质量公用电网谐波(GB/T14549-2000)、电能质量暂时过电压和瞬态过电压(GB/T18481-2001)、电能质量电压波动和闪变(GB/T12326-2008)^[6]。本文对电压偏差、频率偏差、谐波、三相不平衡度等电能质量参数展开研究,对频率测量、谐波监测、三相电压不平衡度测量方法进行详细说明。

1.1.1 频率测量

结合设计要求以及现有文献,本设计采用易实现的周期法进行频率测量。周期法就是通过测量信号通过零点的时间,此法实现简单,为了克服高频信

号测量时精度低的问题,频率较高时采用等精度测量法。

等精度测频原理为首先设置精确门时间,然后由预置门上升沿触发精确门,计数器分别对标准信号和待测信号进行计数,则待测信号的频率为:

$$f = f_n \times M/N \quad (1)$$

式中: f 为待测信号频率, f_n 为标准信号频率, M 为待测信号计数, N 为标准信号计数。

1.1.2 谐波监测

随着电网技术的不断成熟,谐波监测方法也越来越多,常用的有基于模拟滤波器、基于 FFT 的最小二乘法、瞬时无功功率理论法、小波变换法、神经网络算法等。文献[7-8]中对上述方法进行了对比分析,基于傅里叶变换的谐波监测法更加符合设计要求,本系统设计采用基于 FFT(Fast Fourier Transformation)的最小二乘法。应用同步等间隔采样方式来消除泄漏效应、栅栏现象,即采样频率为基波信号的整数倍。

1.1.3 三相电压不平衡度测量

三相电压不平衡主要由供电或用电负荷不平衡造成的,主要分为正常性和事故性 2 类,正常性主要由系统负载不对称造成的,事故性则是由于单相、双相断线或接地造成的。在《电能质量三相电压不平衡度》(GB/T15543-2008)中指出“三相不平衡度用电力系统在正常运行条件下电压、电流负序基波分量或零序分量与正序基波分量的方根值的百分比表示”^[9]。即

$$\epsilon = \frac{U_2}{U_1} \times 100\% \quad (2)$$

常用的测量主要有对称分量法、三相电压法和负荷容量法 3 种,从运算复杂度及测量复杂度考虑,本设计选用充分利用三相电压有效值的三相电压法。计算公式采用国际电工委员会推荐公式,具体表达式见式(3)

$$\epsilon_U = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6L_U}}{1 + \sqrt{3 - 6L_U}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $L_U = \frac{U_a^4 + U_b^4 + U_c^4}{(U_a^2 + U_b^2 + U_c^2)^2}$, U_a 、 U_b 、 U_c 分别为三相电压有效值。

1.2 终端系统硬件设计

终端系统基本工作流程:电压、电流互感器从电网上获得电压信号,信号经过磁耦隔离器传输到信号调理电路,信号经过调理以满足模数转换电路输

入要求,调理后的信号传输到模数转换器,FPGA 单元对采集到的数据进行电能质量各项参数的运算、分析,分析后的结果通过通信单元传输到上位机,并通过人机交互界面实时显示,同时各类数据参数保存到存储单元以备打包上传,如果对结果分析、判断有故障时,通过通信单元及时将故障信息传输至上位机,同时终端报警单元发出警报。具体结构框图如图 2 所示。

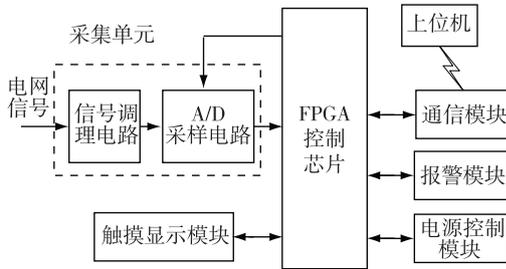


图 2 终端系统结构图

Fig.2 The terminal system structure diagram

1.2.1 采集单元

采集单元由互感器、调理电路、模数转换电路组成,其中互感器选用上海和华电子科技有限公司生产的电流互感器 SCT254FK 和电压互感器 SPT204A,调理电路由单端转差分电路和 FPAA 放大、滤波电路组成,单端转差分电路采用 AD8138 芯片实现,FPAA 选择 Andigm 公司生产的 AN221E04 芯片进行设计,具体电路图如图 3 所示。

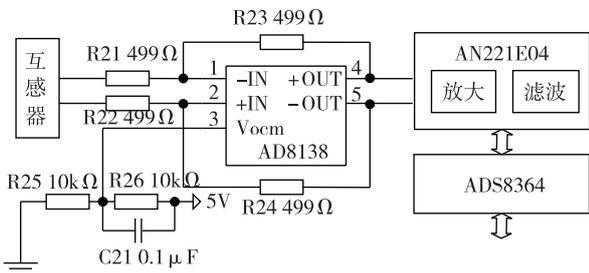


图 3 调理电路结构图

Fig.3 The adjust circuit structure diagram

电网输出标称电压一般为 220V、380V,通过电压互感后输出电压的大小分别为:

$$V_{out(220V)} = 220\sqrt{2} \times \frac{1}{2000} \approx 0.16 V$$

$$V_{out(380V)} = 380\sqrt{2} \times \frac{1}{2000} \approx 0.27 V$$

为了使电流互感器信号转换成电压信号,在输出端并联 100Ω 的高精度电阻 R₀(在互感器单元内部没有单独画出),其输出最大电压

$$V_{R_0} = 2.5mA \times 100\Omega = 0.25V$$

FPAA 芯片 AN221E04 端口最大输入电压为 4V,进而推得本设计放大器采用 15 倍放大。为了 6 个通过数据同时采集转换,本设计中模数转换电路 ADS8364 采用 3 个保持信号一起控制,3 个保持信号分别对应芯片引脚/HOLDA、/HOLDB、/HOLDC。HOLD 为低电平时,6 通道同时采集,采集结果装入寄存器。RD 和 CS 被拉低时,16 位数据并行存入 FPGA 双向存储器,整个过程需要 20 个时钟周期。转换结束时 EOC 引脚输出低电平,触发 FPGA 控制器中断,进而激活 Nios 相关控制^[10]。

1.2.2 通信单元

太阳能发电并网电能质量监测系统数据具有数据量大、种类多、共享性强、应用环境复杂等特点,为更好符合上述特点,系统采用 GPRS 无线通信和以太网有线通信结合方式。对于不便于有线布置的地方,通过 GPRS 对终端进行远程控制、传输各种采集参数、配置参数;对于有线连接比较方便的地方,依据具体需求选择不同以太网传输速率的有线网络。

从便携性和经济性两方面分析以及市场调研及考察,系统选用 SIM900A 模块进行远程无线数据传输,具体电路如图 4 所示。以太网模块采用 Nios II 内部生成的 MAC 核和通信协议实现;内核配置界面接口类型采用 MILL/GMII,版本采用 10/100/1 000Mb Ethernet MAC,采用内部 FIFO,内部 FIFO 配置为 AUTO 型和 8 位宽度、2 048 * 8bits 深度。

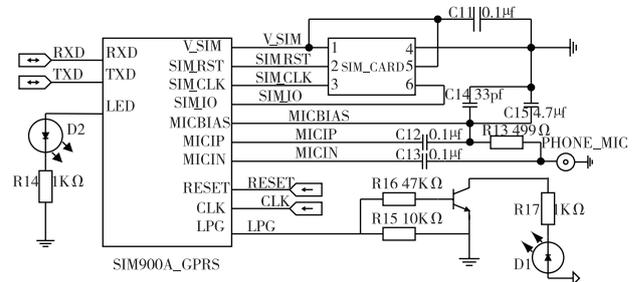


图 4 GPRS 连接电路图

Fig.4 The GPRS circuit

1.2.3 电源监控单元

为了提高系统的健康性,系统中添加了电源监控和复位电路。本系统选用 TI 公司生产的三端监控芯片 TPS3307-18 对监测板外接 5V 电源、FPGA 控制器 1.5V 电源、液晶显示屏 3.3V 电源进行监控,具体电路图如图 5 所示。其中 SENSE1、

SENSE2、SENSE3 分别对应 3.3、1.5V 和 5V 外接转换端,nRESET 和 RESET 分别为低电平、高电平复位信号,/MR 为手动复位,当按下复位开关,对整个系统复位。系统通电期间,当电源电压低于 1.1V,nRESET 一直输出低电平,系统将一直复位状态;当系统电源电压高于 1.1V,才开始对系统所用电压进行监控。

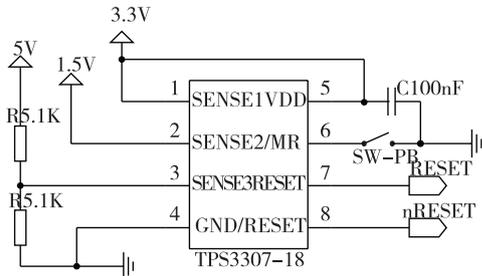


图 5 电源监控电路图

Fig.5 The power control circuit

2 软件设计

系统主程序首先对系统硬件自检,然后进行初始化。初始化主要是对系统初始值的读入,系统初始化内容包括 FPGA、模数转换芯片、FPAA 芯片、触摸屏模块、GPRS 和以太网通信模块、RS232 串行通信电路等。系统初始化后,通过互感器将信号转换成调理电路可以处理的原始信号,然后通过 FPAA 调理电路对信号进行放大、滤波,再通过模数转换电路将采集到的信号转换成 FPGA 控制可以识别的数字信号。被测信号通过 FPGA 控制器进行相应处理,出来后的数据通过人机交互界面显示,并通过 GPRS 无线或以太网有线发送到上位机。同时,通过 GPRS 无线或以太网有线通信上位机可以终端进行远程控制。系统主流程图如图 6 所示。

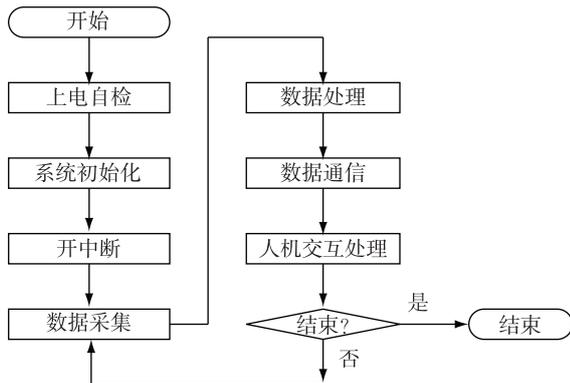


图 6 主程序流程图

Fig.6 The main program flow chart

2.1 FFT 子程序

本系统采用高速 FPGA 芯片为核心控制器,负责系统各个单元控制及各种电能参数运算,FPGA 程序好坏直接影响着整个系统性能。为了实现时序“无缝”配合,本系统采用基于乒乓操作的 FFT 算法。乒乓操作主要通过增加寄存单元实现输入数据单元与输出数据单元时间互补,达到数据缓冲与处理的无缝连接的目的,以克服数据的溢出或断流。其中第 m 级输入数据选择单元和输出数据选择单元每 4^{L-M} ($L = \log_4 N$) 个时钟周期切换一次。

2.2 数据采集子程序

为了获得 50 次谐波,依据奈奎斯特采样定理得采样频率不低于 5 000Hz,为了克服频谱误差,本文采用锁相环电路实现同步电路,且采样频率为被测信号的 512 倍,进而实现每周期 512 个采样点目标。

为了 6 通道同时采集,本设计采用 ADS8364 的 3 个保持信号 (/HOLDA、/HOLDB、/HOLDC) 一起控制。HOLD 为低电平时 6 通道同时采集、转换,每组转换完之后 EOC 引脚发送一个中断信号,FPGA 控制器对中断进行计数。为了减小后期计算中的有效值计算、存储量,系统通过对一个周期的 512 个数进行均匀提取 32 个数进行计算,同时为了便于电能质量指标计算间隔的判定,系统对电网周期波进行相应计数,具体 ADS8364 中断子程序流程如图 7 所示。

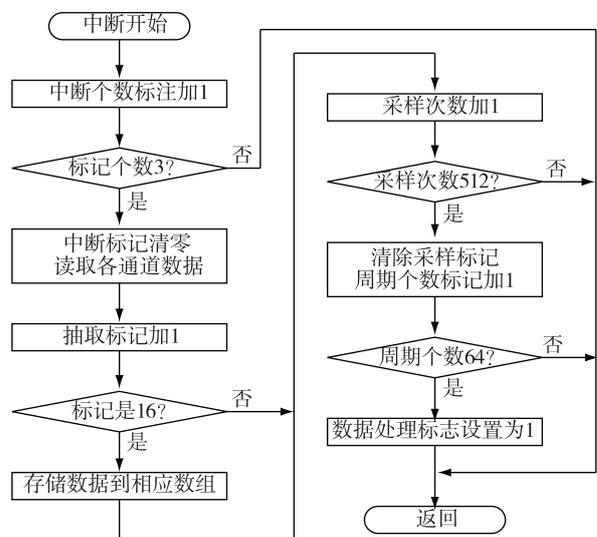


图 7 ADS 中断子程序控制流程图

Fig.7 The ADS interruption subroutine flow chart

2.3 通信子程序

GPRS 模块 SIM900A 与主控芯片 FPGA 之间通过发送 AT 命令实现通信,通过串口通信完成两者之间命令的发送来实现终端与上位机的数据交互。在数据的收发过程通过定时控制维持链路连接,时间设置为应答时间的 1.5 倍。如果在规定时间内没有收到应答数据,就认为连接断开,此时发送指令要求系统进行重连接处理。

3 系统测试

系统应用周立功致远电子公司生产的 E8000 在线电能质量分析仪进行实验测量。E8000 可以

“监测电网 50 次的各次谐波分量,包括 2~50 各次谐波畸变率、总谐波畸变率、偶次谐波总畸变率、奇次谐波总畸变率、谐波相角、间谐波,满足国标 GB/T14549 和 IEC 61000-4-7 对公用电网谐波的测试要求”,实验结果表明设计精度达到设计预期效果。如测频模块采用阶梯式测试方案,测试频率信号由信号发生器提供各频率的标准正弦波,测得结果见表 1,最大偏差 0.14Hz,误差为 0.3%,符合国家电能质量频率偏差(GB/T 15945-2008)±0.2Hz 标准;50Hz 正弦波和方波对谐波计算单元进行抽样测试对比结果见表 2,谐波误差小于 3.0%,符合电能质量国家标准(GB/T 14549-2000)5%的误差标准。

表 1 频率测试对比表

Table 1 Comparative table of frequency test

| | Hz | | | | | | | | |
|-----|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 准确值 | 50.12 | 100.03 | 200.15 | 250.21 | 300.02 | 350.99 | 400.17 | 450.60 | 500.36 |
| 测量值 | 50.14 | 100.05 | 200.13 | 250.26 | 299.95 | 351.05 | 400.20 | 450.55 | 500.22 |

表 2 50Hz 正弦波和方波谐波畸变率

Table 2 50Hz sine wave and square wave harmonic distortion rate %

| 谐波次数/次 | 正弦波 | | 方波 | | 测量值 |
|--------|-----|------|-----|-------|-------|
| | 理论值 | 测量值 | 理论值 | 测量值 | |
| 基波 | 50 | 49.8 | 基波 | 42.21 | 42.20 |
| 3 | 0 | 0.1 | 3 | 14.14 | 14.13 |
| 5 | 0 | 0.2 | 5 | 8.52 | 8.51 |
| 7 | 0 | 0.1 | 7 | 6.12 | 6.12 |
| 9 | 0 | 0.1 | 9 | 4.78 | 4.80 |
| 11 | 0 | 0.2 | 11 | 3.98 | 3.97 |
| 13 | 0 | 0.1 | 13 | 3.33 | 3.32 |
| 15 | 0 | 0.1 | 15 | 2.92 | 2.90 |
| 17 | 0 | 0.2 | 17 | 2.59 | 2.62 |
| 19 | 0 | 0.1 | 19 | 2.33 | 2.30 |
| 21 | 0 | 0.1 | 21 | 2.13 | 2.19 |
| 23 | 0 | 0.2 | 23 | 1.96 | 1.94 |
| 25 | 0 | 0.1 | 25 | 1.81 | 1.78 |
| 27 | 0 | 0.2 | 27 | 1.69 | 1.66 |

4 结论

采用 FPAA 技术和 FPGA 技术相结合方式,提出了一种远程电能质量监测系统。FPAA 和 FPGA 具有可重构、集成度高的特性,系统便于调试、扩展和升级;系统具有集成度高、调试方便等特点;通信设计采用有线和无线结合方式,大大提高设备布置灵活度。系统在常州某太阳能开发公司研发及试运

行中,体现出终端硬件电路调试简单、升级自由度高、布置方便、智能性高等优点。

参考文献:

[1]SALMERON P, LITRAN S P. Improvement of the electric power quality using series active and shunt passive filters [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2): 1058-1067.

[2]程晓燕, 庞涛, 许丽佳. 基于嵌入式平台的实验室电能质量监测系统的设计[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(6): 1501-1504.

[3]张秀国, 高树勋, 刘润梅. 基于单片机 AT89S51 电能质量检测系统的设计[J]. 电源技术, 2012, 36(7): 1035-1036, 1041.

[4]唐志辉, 龙允聪, 谢俊. 基于动态测度的电能质量监测系统[J]. 低压电器, 2013(9): 50-54.

[5]孙志强, 田铭兴. 基于 DSP28335 的电能质量监测系统的设计[J]. 水电能源科学, 2013, 31(6): 233-235.

[6]吴海强. 多功能电能质量检测仪的研究与设计[D]. 长沙: 中南大学, 2012.

[7]贾志玲. 新型电能质量实时监控系统的研制[D]. 西安: 西安科技大学, 2012.

[8]刘斌, 张承江. 混合遗传算法的最优通信频率分配研究[J]. 常州信息职业技术学院学报, 2014, 13(4): 21-23.

[9]田丰. 基于 VS2005 的电能质量监测系统的设计[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.

[10]朱正伟, 孙广辉, 张丹, 等. 基于 FPAA 技术的工频滤波器设计方法研究[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2012, 25(3): 57-61.

(责任编辑:李艳)