

# 基于 ARM + FPGA 的电压监测仪现场 校验装置设计与实现

黄亚龙, 孙 雄, 徐浩然, 叶加星

(江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102)

**摘要:** 针对电压监测仪因受器件老化及现场环境影响等导致测量准确度降低和现场校验困难等问题, 提出了一种基于 ARM + FPGA 的电压监测仪现场校验设计方案。介绍了校验系统的校验原理及指标, 并给出了校验系统的组成及设计原理框图; 详细阐述了 ARM + FPGA 主控模块、幅值调整电路、滤波电路、功率放大电路和通信电路等硬件模块设计。考虑到日趋严重的电网谐波污染, 引入鲁棒锁相环实现谐波电压检测以提高监测精度。给出校验系统的软件设计流程, 并实现电压监测及误差校验等功能。在无谐波和有谐波环境下进行了系统准确度和长时间稳定度测试。实验结果表明, 该校验装置能产生精度为 0.05 级的标准电压源, 以满足校验和长时间工作稳定性要求, 有效解决了电压监测仪现场校验难题。

**关键词:** 电压监测仪; 现场校验; 谐波; 鲁棒锁相环

中图分类号: TM935

文章编号: 1000-0682(2024)02-0061-06

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.02.011

## Design and implementation of field calibration device for voltage monitor based on ARM + FPGA

HUANG Yalong, SUN Xiong, XU Haoran, YE Jiaying

(Jiangsu Frontier Electric Technology Co., Ltd., Jiangsu Nanjing 211102, China)

**Abstract:** For solving the accuracy reduction of voltage monitor due to aging and bad environment, a field calibration scheme for voltage monitor based on ARM + FPGA is proposed in this paper. The principle and index of the calibration system are introduced, as well as design diagram of the system. The design scheme of ARM + FPGA control module, amplitude adjustment circuit, filter circuit, power amplifier circuit and communication circuit are described in detail. Considering serious harmonic pollution of power grid, a robust phase-locked loop is used to realize harmonic detection for improving system accuracy. The software of the calibration system is described, realizing functions of voltage monitoring and error calibration. Accuracy and long-term stability of the system are tested in non-harmonics and harmonic environments. The experimental results show that the calibration system can produce a standard voltage source with 0.05 precision, meets the requirements of calibration and long-term stability, and can solve the problem of field calibration of voltage monitor.

**Keywords:** voltage monitor; field calibration; harmonic; robust phase-locked loop

## 0 引言

随着我国双碳战略的实施和新型电力系统的建设与发展, 大量新能源接入电网, 同时柔性交直流输电以及电动汽车等应用日益增多, 导致电网的三相不对称、谐波和电压波动等供电电压问题日益严重<sup>[1]</sup>, 供电电压质量及其合格性监测和评估已成为

收稿日期: 2023-10-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51577086); 国家电网有限公司科技项目(OFW-23737-JS)

第一作者: 黄亚龙(1984—), 男, 工学硕士, 高级工程师, 主要从事电力计量与检测方面的研究工作。E-mail: 3378406424@qq.com

电力供应和能源管理的重要问题。

目前,电力部门大量采用电压监测仪完成电网电压合格率的日常监测、统计和记录存储,以便相关部门进行分析。一个市级供电局就需要几千台甚至上万台电压监测仪对辖区内的电压进行监测<sup>[2]</sup>。根据行业标准 DL/T 500—2017《电压监测仪的不同使用技术合格条件》等相关要求<sup>[3]</sup>,需定期对电压监测仪的监测电压精度和稳定性开展检验校验。传统校验方式需将现场安装的电压监测仪拆下送回实验室校验,工作量大,拆装人工成本高。目前常用的电压监测仪表大多是按反映工频正弦量来设计的,随着大量非线性负荷和电源接入到电网,电压谐波问题日趋严重,部分监测仪在畸变环境下会出现较大误差,传统的校验台难以满足相关校验的要求。

针对传统的电压监测仪校验平台精度和效率较低且现场携带不便等问题,开展了电压监测仪的现场校验电压研究。文献[4]提出一种基于 FPGA 直流电压监测系统,实现了现场电压信号测量、分析和报警等功能,但该系统目前只针对 110 V 直流电压;文献[5]提出电压监测装置自动检定系统,实现 6 台设备同时检定、检验结果数据库保存;文献[6]讨论了电压监测仪检测涉及的交流电压指标要求,可为校验提供一定参考;文献[7]提出一种基于北斗通信技术的电压监测仪自诊断系统,实现远程实时诊断电压监测仪运行状态和故障原因,方便运维人员维护,但其未考虑谐波影响,且监测和校验误差有待进一步提升。此外,还有不少研究者从检测与故障诊断自动化、精度改善以及平台环境等方面<sup>[8-11]</sup>开展了探索,为当前电压监测仪科学校验提供了可行参考。

针对电压监测仪测量准确度降低和现场校验困难等问题,该文提出了基于 ARM + FPGA 的电压监测仪现场校验设计方案,给出了校验系统的组成及设计原理,详细阐述了硬件模块设计和软件设计,实现电压现场检测与误差校验等功能,并在无谐波和有谐波测试环境下均取得较好的实验结果。

## 1 校验系统的校验原理及指标

电压监测仪校验系统包括电压监测仪现场校验装置、电压传感器、电压标准源和待检电压监测仪,其校验原理如图 1 所示。校验系统既可以将电网电压作为参考电压接入待检测的电压监测仪,也可让现场校验装置控制电压标准源生成检测参考电压,判断电压监测仪误差值。

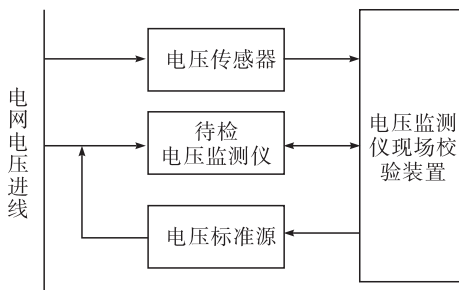


图 1 电压监测仪校验原理图

现场校验时,首先人工选择电网电压或电压标准源作为参考电压,当选择其一时,另外一个电压参考源需断开连接;然后用电压监测仪和现场校验装置分别读取电压检测结果,通过比较电压标准源和待检电压监测仪实测结果,得到电压监测仪测量误差。如果误差在允许的范围,说明电压监测装置工作正常,否则电压监测仪现场校验装置显示校验不合格。校验系统主要技术指标见表 1。

表 1 校验系统主要技术指标

项目	量程/范围	误差限值
电压/V	100, 220, 380	0.05%
频率/Hz	45 ~ 65	0.002 Hz
谐波/次	2 ~ 50	0.10% ± 0.05%

## 2 校验系统组成及原理框图

校验系统主要包括 ARM + FPGA 主控模块、16 位高速 A/D 和 D/A 转换模块、信号调整放大模块、电源管理模块、GPS/北斗通信模块、滤波器、按键及显示模块等,系统组成原理框图如图 2 所示。

在正常工作条件下电压监测仪监测的是市电电压,当需要对电压监测仪进行检验时,控制中心服务器端通过 GPS/北斗远程通信模块发出检验指令,校验装置通过远程通信模块接收并执行检验指令,控制模块把电压监测仪的监测电压由市电电压切到校验装置的终端标准电压输出端。ARM + FPGA 主控模块利用 16 位的 D/A 数模转换芯片和滤波器产生幅值可调的信号源,再经过功率放大电路得到精度为 0.05 级的标准电压源,进而模拟监测电压波形。RS232 接口将电压监测仪测量结果数据传送至现场校验装置,比对标准电压源数据和电压监测仪传送数据,若结果误差在允许的误差范围内,说明该电压监测仪工作状态正常,这时电压监测仪现场校验装置会显示检测结果“合格”。如果 2 组数据对比误差超出了误差允许范围,则说明该电压监测仪误差偏大,可由其他现场校验装置对该电压监测仪校验确认。

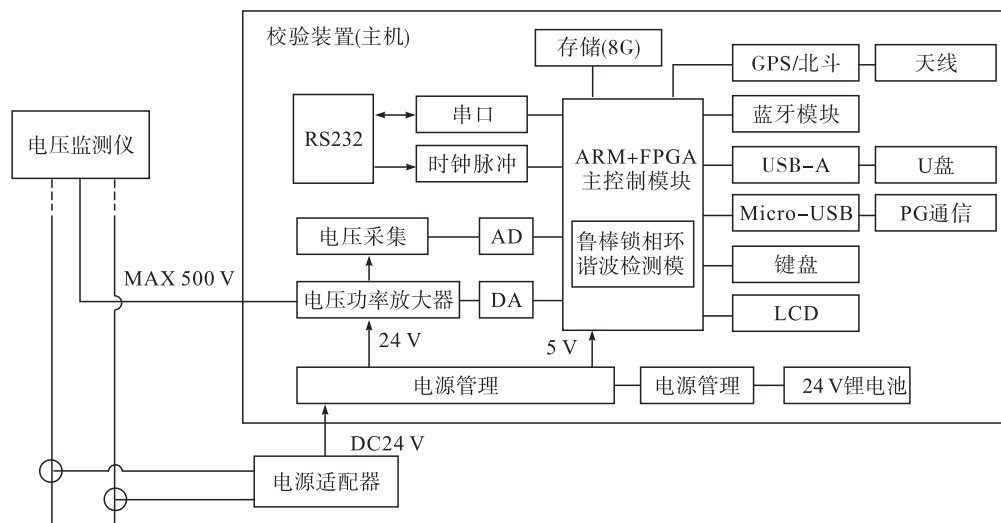


图2 现场校验装置原理框架图

校验系统的 ARM + FPGA 主控模块的 FPGA 主要负责通信功能、模数转换、谐波检测和电压校验等,ARM 主要用于完成人机交互、模块控制和电源管理等功能。主控模块通过 RS232 接口与电压监测仪进行本地数据通信。GPS/北斗通信模块实现远程通信,可以对时钟信号进行实时校验,也可以将检测数据回传。电源管理模块为硬件结构中的各个模块提供电源,并进行电源过压、过流和短路保护。

### 3 系统重要部分硬件设计

#### 3.1 幅值调整电路

由于现场安装的电压监测仪一般为 1.0 级,根据计量校准规范要求,需要设计 0.1 级且输出幅值可调的标准装置,因此该校验系统选取德州仪器 TLV5618AIDR 数模转换芯片。由电路原理可知,输出端电压值与 D/A 芯片的外部基准电压和存储器输出的电压幅度值有关,幅值调整电路如图 3 所示。

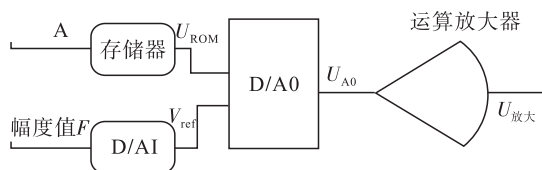


图3 幅值调整电路原理框图

D/A<sub>1</sub>数模转换芯片电路的输出电压  $V_{ref}$  被用来作为 D/A<sub>0</sub>数模转换芯片电路的基准电压,因此只要改变 D/A<sub>1</sub>数模转换芯片的输入端幅度值代码(二进制),波形合成电路中 D/A<sub>0</sub>数模转换芯片的基准电压  $V_{ref}$  就可以被改变。这样只需采用位数足够多

的 D/A<sub>1</sub>数模转换芯片,就可以使得基准电压的调节细度非常小,就可以得到精度非常高的输出电压。

D/A<sub>1</sub>数模转换芯片输出端电压  $U_{A1}$  为:

$$U_{A1} = F/2^{16} U \quad (1)$$

D/A<sub>0</sub>的输出端电压  $U_{A0}$  为:

$$U_{A0} = U_{ROM}/2^{16} U_{A1} \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)得:

$$U_{A0} = \frac{U_{ROM}}{2^{16}} \times \frac{R}{2^{16}} U \quad (3)$$

#### 3.2 功率放大电路设计

功率放大电路将幅值调整电路产生的正弦波信号放大为具有功率电压信号。它要将小幅度正弦信号的模拟量转换成理想放大倍数下的正弦波,且要求输出稳定。功率放大电路如图 4 所示,主要由基本放大、稳压反馈以及前馈补偿 3 个环节组成。基本放大环节是由滤波器输出的小幅电压按照升压比放大;稳压反馈环节是将变压器输出的电压反馈到输入端,形成闭环使输出稳定;前馈补偿利用了运算放大器输出反向的原理对稳压反馈环节给系统带来的扰动进行补偿。

放大电路的前端 A<sub>1</sub> 和 A<sub>2</sub> 模块分别为运算放大电路和功率放大电路,电阻  $R_f$  为电压负反馈,使电压放大器输出电压稳定,一般  $R_3 R_f \ll_{R1} (R_3 + R_4)$ 。在输出端按所需比例配置变压器,可得到校验装置所需的标准源电压  $U'_0$ 。根据运算放大器虚短原理,可分别求出前置放大器的放大倍数,最后求出整个功率放大电路的放大倍数。经分析可得到放大电路的总放大倍数  $A_u$  为:

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = - \frac{(R_{12} + R_{13})(R_2 R_7 + R_1 R_3) R_4 R_{10} R_f n_0}{[n_0 R_4 R_3 R_8 R_{12} R_f + (R_{12} + R_{13})(n_1 R_5 R_7 R_f + n_0 R_4 R_3 R_8) R_{10}] R_1} \quad (4)$$



下的电压测量。

### 3.5 通信电路设计

校验系统的本地通信模块采用 RS232 串行通信。由于 RS232 接口电路电压与主控模块之间的电平不一致,因此,电压监测仪与主控 FPGA 通信时,必将信号电平进行适配转换。该设计采用了

MAX2323 芯片,并配备专用的低电压差式发射器,能在 3.0 ~ 5.5 V 的电压内实现完全兼容 RS232;此外只需使用 4 个 0.1  $\mu\text{F}$  的外部小型电荷泵电容且仅需 1 根数据线和 1 根驱动线。串口通信 RS232 接口原理设计如图 7 所示。

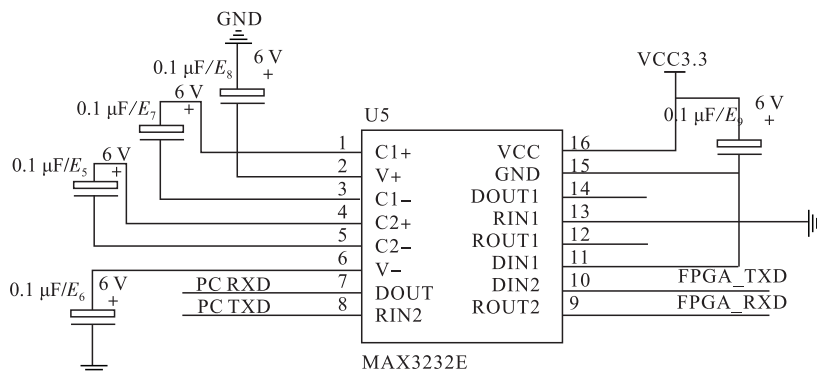


图 7 串口通信 RS232 接口原理图

## 4 校验系统软件设计

电压监测仪现场校验装置软件部分主体是在 ARM + FPGA 主控模块实现的。校验系统主程序流程如图 8 所示。首先进行校验系统初始化,包括参数和面板按键值设置。然后进行系统的时钟配置,并与待检电压监测仪进行对时。校验系统可分别选择电网电压或标准电压源作为参考电压,由主控模

块决定校验类别。待测电压监测仪接收到校验信号后,由通信接口传输校验所需数据。主控模块通过将同一时标下上传的瞬时电压值和电压统计数据与参考电压数据相比较,计算出待检表的精度误差;当误差在正常范围内,待检电压监测仪合格,结束校验;当误差超标,主控模块自动地对误差超标的电压监测仪进行校验。待误差在正常范围内时,将校验结果上传至数据存储器并在 LCD 上显示,最后完成校验。

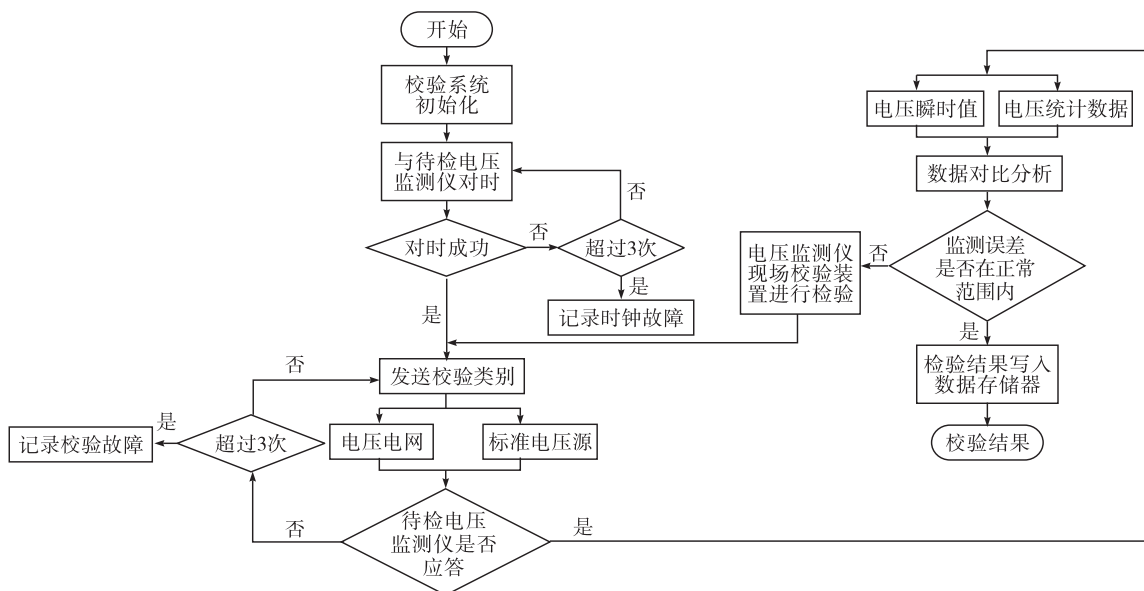


图 8 电压监测仪现场校验装置软件流程图

## 5 实验分析

电压监测仪校验装置的准确度直接影响电压监

测仪监测电网电压的准确性,所以校验装置电压输出的准确度级别是其作为标准应用的重要指标。为检验该现场校验装置输出的校验电压各参量的准确度等级是否满足现场要求,采用美国 RADIANT 公司