DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)07-0167-05

配电自动化设备模块化单元自动检测系统研究

范炜豪, 唐达燊, 印吉景, 揣振国

(国网江苏省电力有限公司泰州供电分公司,江苏 泰州 225300)

摘　要:配电自动化设备的可靠性是配电网稳定运行的重要基础,直接影响供电质量与故障处理效率。传统的设备检测技术没有统一的检测标准,难以适应数量逐渐增多的自动化设备检测需求。且人工方式难以模拟设备实际运行工况,导致检测精度偏低。鉴于此,文章通过研究配电自动化设备的作业模式,确定了配电自动化设备的标准化模块单元,在此基础上搭建了多个模块同步检测的配电自动化设备自动检测系统,同时对自动检测系统的软硬件及实现方式进行研究以实现不同模块的检测功能。系统采用 RTDS 实时数字仿真仪模拟实际工况,硬件以 ARM+FPGA 为主控架构,配以高精度互感器及补偿电路。最终经由测试,该检测系统可基于仿真形式完成不同配电终端设备的同步、自动、高精度检测,该系统显著提升了检测效率与精度,为配电网智能化运维提供了有效支撑。

关键词:配电网;自动化设备;模块单元;检测; RTDS

中图分类号: TP277;TM76　　**文献标志码**: A　　**文章编号**: 1003-7241(2026)07-0167-05

Research on automatic detection system of modular unit of distribution automation equipment

Fan Weihao, Tang Daao, Yin Jijing, Chuai Zhenguo

(State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Taizhou Power Supply Branch, Taizhou 225300, Jiangsu, China)

Abstract: The reliability of distribution automation equipment serves as a crucial foundation for the stable operation of the distribution network, directly impacting power supply quality and fault handling efficiency. Traditional equipment inspection technologies lack unified standards, making them difficult to meet the growing demands for automated device testing. Moreover, manual methods struggle to simulate real operational conditions, resulting in lower inspection accuracy. Addressing these issues, the article investigates the operational modes of distribution automation equipment, establishes standardized modular units for such devices, and builds an automated inspection system capable of synchronous testing across multiple modules. It also explores the software, hardware, and implementation methods of this system to achieve detection functions for different modules. The system employs RTDS real-time digital simulators to replicate actual operating conditions, adopts an ARM + FPGA-based control architecture, and incorporates high-precision current transformers and compensation circuits. Through testing, the system demonstrates the ability to perform synchronous, automatic, and high-precision inspections of various distribution terminal devices in a simulated environment. This significantly enhances inspection efficiency and accuracy, providing effective support for the intelligent operation and maintenance of distribution networks.

Keywords: distribution; automation equipment; module unit; inspection; RTDS

新型电力系统建设是响应国家“双碳”目标的重要举措,是能源转型背景下的必然趋势。作为电网与用户的桥梁,配电网在新型电力系统中扮演着重要的角色[1]。在智能配电网建设中,配电网自动化系统成为优化电能质量、提升供电效率、确保供电可靠性的关键手段。配电自动化设备的故障检测不仅关系到电力系统的稳定运行,也直接影响到电力供应的可靠性和安全性[2]。

配电自动化设备是配电网系统中对线路进行控制和保护的重要设施,也是配电自动化系统进行数据采集和监控的起始点,对配电网故障的自动识别与处理有直接影响。为了配电系统的安全可靠运行,必须保证配电自动化设备的高质量[3]。在配电自动化改造与新建过程中,大量终端数据须迁移、接入核对,以往通常采用人工电话核对的方式,成本高、效率低,存在信息核对不完整的风险,对后期配电网安全生产工作产生影响[4];人工检测的方式难以模拟设备实际的作业工况,存在自动化设备检测精度较低的问题。

针对上述问题,本文将以实时数字仿真仪(real time digital simulator、RTDS)为例,其利用模块化单元模拟各类配电自动化设备的性能,全面覆盖不同设备的运行场景,

收稿日期:2024-12-30;**录用日期**:2025-02-11

基金项目:国网江苏省电力有限公司泰州供电分公司(SGJSTZ00BJJS2311419)

作者简介:范炜豪(1982—),男,高级工程师,研究方向为电力安全生产。

引用本文:范炜豪, 唐达燊, 印吉景, 等. 配电自动化设备模块化单元自动检测系统研究[J]. 自动化技术与应用, 2026,45(7):167-170,188. (Fan Weihao, Tang Daao, Yin Jijing, et al. Research on automatic detection system of modular unit of distribution automation equipment[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026,45(7):167-170,188.)

实现不同设备接入前的同步仿真检测,为配电网安全运行提供全方位支撑。

1 配电自动化设备模块化研究

配电自动化设备主要用于配电自动化系统中的开关监控与数据采集等,主要包含三种类型的设备,具体为:开闭所终端(distribution terminal unit、DTU)、配电变压器监测终端(transformer terminal unit、TTU)以及馈线终端装置(feeder terminal unit、FTU)。

DTU 通常被安装在常规的开闭所、户外小型开闭所、环网柜、小型变电站和箱式变电站等地,负责采集和计算开关设备的位置信号、电压、电流、有功功率、无功功率、功率因数以及电能量等数据。其不仅能对开关进行分合闸操作,还具备馈线开关的故障识别、隔离及非故障区间的恢复供电功能。为实现上述功能,DTU 需要配备电源模块、串口通信模块、遥控模块以及遥信模块。其中电源模块用于为 DTU 设备供电;串口通信模块用于配电自动化系统主站的双向通信功能;遥控模块则主要用于配电站外部开关的控制;遥信模块用于对配电站线路数据的监测采集。

FTU 和 TTU 作为配电自动化系统中的关键设备,其运行状态直接关系到整个配电网的稳定性和可靠性[5]。TTU 是专门应用于配电站变压器工况的监测装置,可根据变压器低压侧的电压和电流采样值定时计算相对应的电压、电流、有功功率以及无功功率有效值等变压器运行数据并实时上传至配电自动化系统的主站中,利用主站系统可生成配电变压器的历史运行记录,并根据历史纪录为预测下一阶段的电能质量合格率、负荷特性以及变压器故障率等参数提供依据。为实现上述功能,TTU 至少包含电源模块、串口通信模块以及遥信模块。其中电源模块为 TTU 设备提供电能;串口通信模块用于与配电自动化系统主站系统的双向通信需求;遥信模块用于对配电变压器设备工况数据的监测与采集。

其次配电网的自动化程度会对供电的质量产生直接影响,FTU 装置担负着配电网馈线状态监测、故障定位等关键功能,是配电网实现自愈、高效运维的根基[6]。馈线 FTU 是一种安装在配电室或馈线上的智能终端设备,实时监测配电室与馈线的运行状态,并及时采集包括开关状态、相间故障、接地故障以及故障时间在内的运行参数。同时,执行配电自动化系统主站下发的命令,对配电设备进行调节和控制,实现故障定位、故障隔离和非故障区域快速恢复供电等功能。智能电网要求电力系统具备更高的自愈能力、更强的互动性和 更优的资源配置能力,这都对 FTU 通信终端提出了更高的要求[7]。因此为实现上述功能,馈线 FTU 至少应具有电源模块、串口通信模块、遥控模块以及遥信模块。其中,电源模块用于馈线 FTU 设备的电能供给;串口通信模块用于 FTU 与配电自动化系统主站以及子站之间的双向通信;遥信模块用于对配电室以及馈线运行参数数据的监测和采集;遥控模块用于对配电室以及馈线开关的智能控制。

根据上文研究可知,配电自动化设备的功能与结构需求基本一致,所以可将配电自动化设备进行模块化处理,具体划分为电源模块、串口通信模块、遥控模块以及遥信模块。为保障配电自动化设备的稳定运行,下文将对基于模块化划分的配电自动化设备进行检测系统设计以减少配电自动化设备人工检修的次数,提升配电自动化系统运行效率。

2 模块单元自动检测系统设计

2.1 自动检测系统总体设计

针对传统人工检测方法效率低、成本高,且传统检测方式只能在问题出现以后才能发现,导致出现设备性能下降或者停机等问题[8]。为较好地解决不同类配电自动化终端设备入网检测问题,研究将借鉴计算机仿真的理念,利用 RTDS 模拟并创设模块化配电自动化设备的运行机制,以此实现设备的同步仿真检测,并生成相应的检测报告。对配电自动化设备的检测主要是对设备内不同模块进行检测,具体包括电压、电流以及数据通信检测,因此自动化检测系统应具有主控模块、数据检测模块、数据通信模块以及存储模块。自动检测系统结构如下图 1 所示。

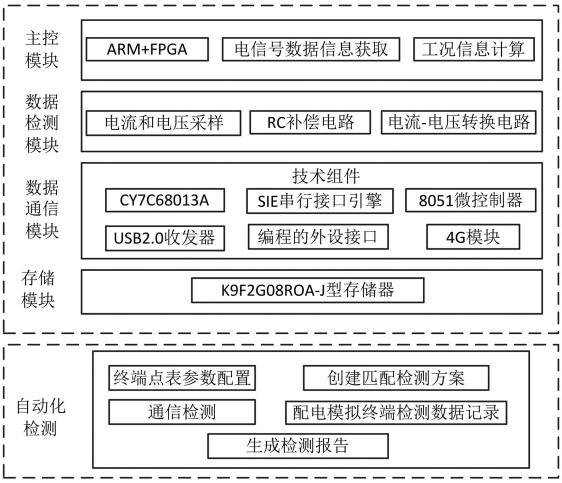


图 1 自动检测系统结构

Fig. 1 Structure of the automatic detection system

2.2 硬件设计

2.2.1 主控模块

主控模块作为自动化监测系统的控制和交互终端,是实现配电模拟终端入网实验仿真的核心支撑,主控模块在获取配电自动化设备的电信号数据信息后可计算各模块的工况信息,根据工况信息,主控模块可对配电自动化设备的模块单元进行模拟仿真以判断设备模块是否正常。自动化检测系统的主控模块采用 ARM+FPGA 架构,对外接口有 IEC104 接口、USB 接口、授时接口(GPS/北斗)、SD 卡接口。其中高级精简指令集机器(advanced risc machine、ARM)处理器采用的是 i. MX 6Quad 系列处理器,内置 Linux3. 0 操作系统;现场可编程门阵列(field-

programmable gate array、FPGA)处理器选用 CycloneIII 系列中的 EP3C10E144C8 芯片。

2.2.2 数据检测模块

数据检测模块是对配电自动化设备模块单元检测的核心节点,根据上文研究可知,配电自动化设备通常具有电源模块、串口通信模块、遥信模块以及遥控模块,为实现对上述模块工况的检测,应对上述模块的电流、电压进行采样分析。为避免传统配电自动化设备检测方法中拆解设备的繁琐性,本文选用互感器对上述设备模块单元进行参数采集。选用型号为 TA22D21-100A/50mA 的测保一体式电流互感器进行配电自动化设备模块单元的电流采集,该电流互感器具有采集精度高、测量范围广的优点,完全适用于配电自动化设备的检测需求。

本文选用型号为 ZMPT101B 的电压互感器进行配电自动化设备模块单元的电压采集,该电压互感器具有精度高、耐压性高、工作温度范围广以及电压测量范围大等优点,能够完全胜任系统对自动化设备模块单元电压测量的需求。但也不无缺点,精度等级数值越小,互感器的测量精度越高,但相应的制造成本也随之提升[9]。

另外为减少配电网中其他设备对互感器采样精度的干扰,自动化检测系统的数据采样模块中还应加装电流-电压转换电路以及 RC 补偿电路[10-11]。具体的,电流-电压转换电路可以将互感器输出的电流信号直接转成可供 AD 芯片使用的电压信号以减少因互感器负载能力带来的小信号测量误差;RC 补偿电路可对电路信号的相位进行精度补偿进一步提高电流和电压的相角精度。

2.2.3 数据通信模块

本文主控模块采用的是 ARM 芯片以及 FPGA 组合式的芯片架构,因此为保障系统内的数据通信的准确性与流畅性,应设立连接所有模块的数据通信模块,进一步提升数据传输能力。本文研究中选用型号为 CY7C68013A 的通信芯片作为数据通信模块,该控制器的特点是集成了串行接口引擎(serial interface engine、SIE)、8051 微控制器、USB2.0 收发器和可编程的外设接口,使其具有低功耗特性的同时能够完成多种数据通信模式的转换。另外还需在上述芯片中内置 4G 模块用于外部通信,利用 4G 通信模块可实现自动检测系统与电网控制系统的双向通信。

2.2.4 存储模块

配电自动化设备模块单元自动化检测系统中还应内置存储模块用于设备运行数据的存放,本文选取三星公司生产的 K9F2G08ROA-J 型存储器作为系统存储模块,该存储器属于 NAND FLASH 存储器类型,具有成本低、性能好以及数据不可擦除的优势。

2.3 软件设计

依据配电自动化终端设备入网前功能及性能检测的需求,配电自动化设备影响自动化检测系统输入电压与电流信号,然后自动化系统利用获取设备各模块的电信号信息分析与其对应设备的工作情况以实现不同终端设备模块的自动化检测。自动化检测功能实现的流程如图 2 所示。

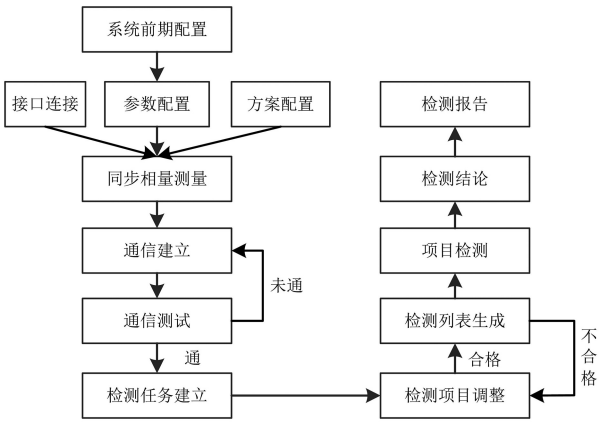


图 2 系统的自动化检测流程

Fig. 2 Automatic detection process of the system

首先,需要录入待检测的配电模拟终端的遥信、遥控和遥测相应的信息体地址(点号),并完成终端表参数配置[12]。根据具体的检测需求和设备类型差异,选择或创建匹配的检测方案,方案应包含检测项目、功能,配置个性化的检测参数。然后,通过终端接口建立通信连接,并进行通信检测,以确认终端能否与主站实现正常通信。为了实现检测系统的自动化检测,具体步骤如下所示。

Step 1 首先,录入待检测的配电模拟终端的遥信、遥控和遥测相应的信息体地址(点号),并完成终端表参数配置[13]。通过参数配置,可以明确需要进行同步相量测量的具体电压信号点。

Step 2 引入同步相量测量的算法。通过规定时间内的脉冲信号作为采样标准,采集配电模拟终端的电压信号。利用同步相量测量算法对采集到的数据进行处理,以计算出准确的电压幅值。设模拟信号的函数表达式为

$$x(t) = V_m\cos(\omega_0 + \varphi) \tag{1}$$

式中,V_m 表示电压最大值,ω_0 表示相位角,φ 表示相位差,当模拟信号 $x(t)$ 的正向过零点(即零电平的瞬间)与每秒的脉冲信号重合时,该时刻的相位角 ω_0 可以认为是 -90°。根据这个基准相位角,可以推算出信号在其他时刻的相位角度。离散傅里叶变换是一种将时域信号转换为频域信号的数学方法。通过使用离散傅里叶变换法,可以将模块化单元中的被测信号进行频谱分析,从而获取信号的幅度和相位信息[14]。则模块化单元中的被测信号为

$$x(t) = A\cos(2Tf + \delta) \tag{2}$$

式中,f 表示被测信号的频率,T 代表被测信号的周期,δ 代表被测信号的初始相位,在频率不变的情况下,设定每个周波采样的个数 N,那么能够计算出采样周期和频率,为

$$\begin{cases} T_s = \dfrac{T}{n} \\ f_s = N \cdot f \end{cases} \tag{3}$$

通过上面的公式联立,对被测信号用A/D能够计算

出采样序列,将得到的采样序列通过数字信号处理器的系列计算,能够求解出电压的相量值。

Step 3 建立通信连接,并进行通信检测。通过终端接口,与待检测的配电模拟终端建立通信连接,并发送相关指令以验证终端与主站之间的通信是否正常。如果成功采集到配电模拟终端的电压信号,说明与终端之间的通信连接正常,可确认终端能够与监测系统建立有效的通信链接。这样的采集过程可用于验证通信连接情况,确保终端与主站的通信正常运行[15-16]。

Step 4 系统将自动记录配电模拟终端检测数据,通过处理、分析,生成检测结论,存储至数据库之中,根据预设的模板可生成检测报告。

3 系统的实现

3.1 系统平台搭建

基于模块化配电自动化设备的自动化检测系统,将以 WindowsXP 作为操作平台进行有效性测试,实验环境如下图 3 所示,实验设置如下表 1 所示。

表 1 实验设置

Tab. 1 Experimental setup

项目	参数
编程软件	Delphi7. 0
数据库	SQLServer2015
数据库引擎	Delphi 内置的数据库引擎
仿真环境	RTDS 实时数字仿真仪
电压等级	10 kV
配电网模型	电缆混合线路

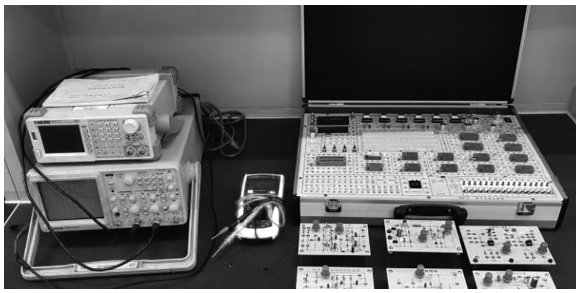


图 3 实验环境

Fig. 3 Experimental environment

基于上述参数,创设多个配电模拟终端并行仿真检测的环境,用以模拟各类配电终端设备的运行状态。应用中,系统作业要求低电平采样时间最小值为 32 ns,高电平采样时间最小值为 15 ns,因此在进行电流数据采样作业时以 3 个低电平和 1 个高电平为数据读取周期,即每 4. 79 us 完成一次数据采集。

3.2 系统应用结果分析

结合上述系统框架及硬件构成,为验证该系统的实际应用效果,对额定功率下的电压幅值进行检测,测试最小值为 1 V,最大值为 100 V,允许误差为标准值的 0. 5,电压幅值检测结果如表 2 所示。

表 2 电压幅值检测结果

Tab. 2 Voltage amplitude detectionresults V

序号	标准值	本系统检测值	存在误差
1	1. 00	1. 00	0
2	10. 00	10. 01	0. 01
3	20. 00	20. 00	0
4	30. 00	30. 00	0
5	40. 00	40. 07	0. 07
6	50. 00	50. 00	0
7	60. 00	60. 00	0
8	70. 00	70. 10	0. 10
9	80. 00	80. 00	0
10	90. 00	90. 00	0
11	100. 00	100. 09	0. 09

分析表 2 可知,电压幅值检测结果中,本系统检测值出现误差的仅有 4 组,且误差最大仅为 0. 10,明显小于误差标准值,表明设计系统可有效检测电压幅值。

基于上述电压检测结果,为进一步验证设计系统的实用性,选用本文设计的配电自动化设备模块单元自动检测系统对标准配电自动化终端进行自动化检测。根据检测终端输入相应的终端端口号及主站号,选择进行通信检测,点击连接,若连接失败,则未通过通信检测,该检测系统将自动弹出连接失败的对话框,相反,若连接成功将显示连接成功。依照上述检测流程配置不同配电自动化设备进行通信检测,所得检测结果如表 3 所示。

表 3 某标准配电终端设备自动化检测项目及结果

Tab. 3 Automation of standard distribution terminal equipment testing items and results

自动化检测项目	检测结果	检测时间/s
状态量采集	合格	2. 5
电能表数据采集	合格	3. 2
交流电压、电流模拟采集	合格	1. 5
直流模拟采集	合格	2. 0
变压器运行统计	合格	2. 8
电能表运行状态	合格	1. 6
谐波数据统计	合格	2. 1

根据表 1,可以看出设计的配电自动化设备模块单元自动检测系统能够有效地检测出不同配电自动化设备的通信状态,并且检测时间较短,说明该系统具有较高的检测效率和准确性。同时,从检测结果中可以看出,各个检测项目均合格,说明这些配电自动化设备在状态量采集、电能表数据采集、交流电压和电流模拟采集、直流模拟采集、变压器运行统计、电能表运行状态以及谐波数据统计等方面均符合要求,检测过程运行平稳、所得结论准确,能够实现配电网的自动化控制和监测,具有实践应用的可行性。

(下转第 188 页)