智能配电网测控保护一体化终端研究与开发

智能配电网的发展对配电网自动化产品提出了新的要求，具有保护、测量及控制等多种功能，配备人机交互接口，兼容多样化的远方双向实时通信模式是配电网智能终端典型的技术特征。综合考虑了未来配电网的典型接入场景及配电网高级自动化技术特征，设计了用于智能配电网的测控保护一体化终端，具备功能多样、布置灵活等特点，为智能配电网的建设提供了经济有效的技术手段。

雷　琪　黄佳斌　陈　健　苗世洪/强电磁工程与新技术国家重点实验室（华中科技大学）

雷　琪/硕士研究生

关键词/Keywords

智能配电网·

保护·

测量·

智能终端·

智能配电网是智能电网的重要组成部分，配电系统作为电力系统的最后一个环节，直接面向终端用户，其完善与否直接关系着广大用户的用电可靠性和用电质量。目前，我国的配电网还存在着部分设备老化、自动化程度不高及缺乏基础通信设施等问题；另一方面，随着二次系统一体化在配电网中的逐步推进，智能电网下的高级配电运行对计量、保护和控制设备提出了新的需求[1-4]。为了高效经济地推进现有配电网向智能配电网的升级，实现对配电网全域线路及设备的综合信息监测，进而开展诸如需求侧管理、网络优化及接纳分布式新能源等综合能效管理工作，在配电网中各接入点部署具有高级自动化技术特征的一体化终端设备，将是未来配电网领域的工作重点，也是建设智能配电网的技术前提[5-7]。

在智能配电网的建设过程中，对现有的自动化设备进行升级改造，需花费极大的人力物力，且不能灵活适用于不同的配电网运行环境。本文从未来配电网的典型接入场景着手，综合考虑了高级配电网运行中需要的信息类型与通信模式，设计了用于智能配电网的测控保护一体化终端，该终端具有布置灵活、功能多样、双向实时通信及便于就地配置等特点，可以适用于环网柜、柱上馈线单元及变压器台区等多种配电网运行环境，为尽快实现配电网智能化作出了有益探索。

终端方案设计

随着通信及自动化技术的发展，智能配电网下的高级配电运行对配电网自动化设备提出了以下新的需求及发展方向：

1）避免测量、控制及保护等不同功能单元以分立的方式进行布置，从而解决占地面积大、各单元之间接口不统一、安装维修困难及使用率不高等问题。

2）配备多样化的远方通信方式，实现与配电中心主站实时、双向的信息交换。

3）改变使用液晶屏、指示灯及按键的方式作为人机交互接口的传统模式，由于环境温度高、不方便近距离观察等原因，在环网柜柜内或柱上等工作场合考虑采用无线接入的方法解决人机交互需求。

综合考虑以上问题及未来配电网运行管理的需要，本文设计的终端总体方案如图1所示。按照功能单元进行分区，实现了功能上的可扩展性。以太网及GPRS接口为与主站进行双向实时通信提供了链路保证；基于WLAN的Web服务器/浏览器模式作为人机交互接口，可用于就地配置/信息获取，并且可以灵活适

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

用于不同的工作场合；交流单元及开入/开出单元的设计可以满足典型配电网接入点的测量、保护和控制需求；通过串口扩展的非电量单元可以接入多种运行现场的环境数据，为实现综合在线监测提供了数据支撑。终端内部的接线原理如图2所示，各单元的主要组成及功能如下。

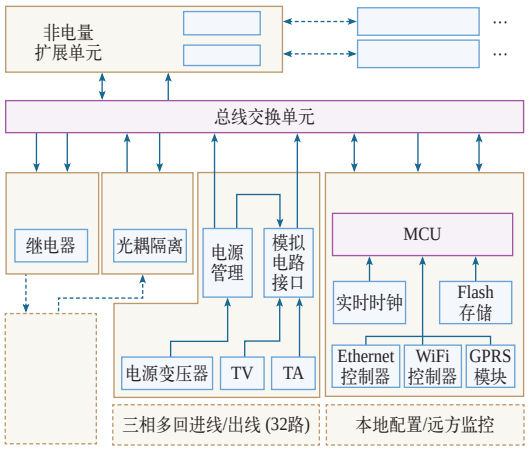

图1 智能配电网保护测控一体化终端总体结构

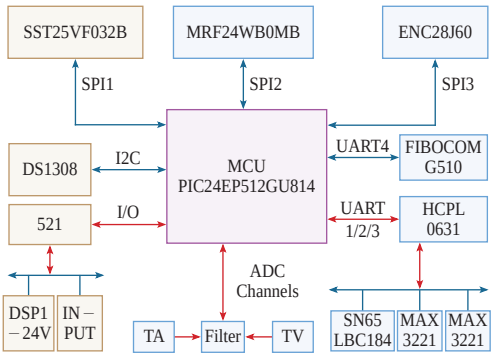

图2 一体化终端接线原理

1）CPU单元：由混合信号控制器PIC24EP512GU814负责系统整体所有的数值计算、逻辑事件处理及任务调度；带I2C接口的实时时钟芯片DS1308用来提供整个系统的工作时标；带SPI接口的32 MB Flash芯片SST25VF032B用来存储系统的工作参数、测量保护定值以及记录事件信息等；以太网控制器ENC28J60为系统提供了10 BASE－T的网络接口，可用于本地信息配置或经路由器转发后接入远方配电中心；WLAN控制器MRF24WB可为系统建立WiFi接入点，方便现场操作人员进行本地配置；GPRS模块G510用于建立基于2G/3G公用GPRS网络的数据传输链路，可以接入配电监控中心APN专网。

2）总线交换单元：为系统中各独立的处理单元提供统一的信号交换总线和电源分配网络，对不同的信号总线进行必要的隔离操作以防止干扰，方便各单元进行独立测试与维护，同时它具有一定的冗余能力，可为系统的功能升级提供接口。

3）交流单元：可以接入最多32路交流（电流或电压）进行A－D采样，采样信号链路中包含完整的滤波及保护电路。同时，电源变压器和电源管理电路构成的电源模块可以为系统提供24 V、5 V等多路相互隔离的工作电源。

4）开入单元：可以接入20路外部开入，再经光耦隔离后接入CPU单元进行处理，用于保护逻辑判断及配电网二次回路的运行状态检测。

5）开出单元：根据来自CPU单元的开出信号驱动16路继电器，进而控制断路器线圈，用于就地手动分合闸、遥控分合闸、保护跳闸、重合闸、预告及告警信号输出等，同时也可以扩展为其他类型的输出功能。

6）非电量扩展单元：提供多路RS 232/485通信接口，并支持常用的Modbus等通信规约，同时可以与带有标准RS 232/485接口的非电量采集模块连接，如温度采集模块、湿度采集模块等，为系统提供所需的运行环境参数。另外，通信接口也可以作为其他扩展用途使用。

终端软件开发

1. 任务调度及信息流程

本文设计的一体化终端需要实时响应丰富的外部采样/开入信息，并能处理复杂的通信任务，因此需要设计高效的任务调度算法，并建立完整的系统信息流程。由于终端中采样任务、保护逻辑任务及协议栈运行都是基于中断响应，因此，本文在中断响应的基础上设计了整体的软件工作流程，考虑到各功能单元之间的相对独立性及程序扩展性，在不同任务之间设计了独立的程序/数据接口，使软件整体逻辑清晰且便于移植扩展。软件整体的流程如图3所示。图中，1～2、T1～T3

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

为程序接口；A～E为数据接口，各接口的具体功能如下。

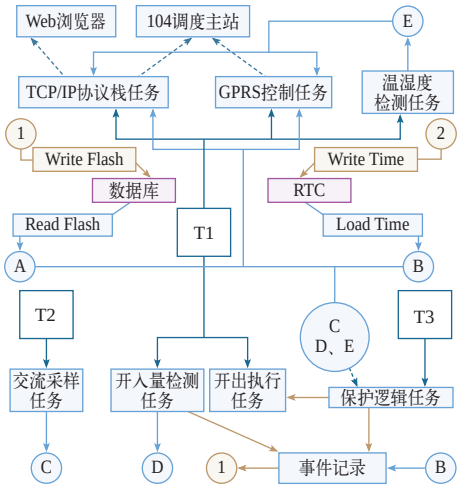

图3 终端整体程序及数据接口

1：数据库写入并校验，将事件记录、采样值及工作参数等数据按照统一的结构写入数据库。

2：更新本地时间，将104规约下发的时间或本地网页配置的时间信息写入实时时钟模块。

T1：系统级1 ms中断，负责TCP/IP协议栈计时，提供非时钟用1 ms时标，控制LED指示灯和16路继电器开出，记录开关变位事件，具有中等优先级。

T2：系统级1.667 ms中断，控制MCU内部ADC模块完成12点A－D采样，具有最高优先级。

T3：系统级5 ms中断，完成保护程序傅里叶计算，进行速断、限时速断、过电流及重合闸等保护逻辑判断，完成动作事件记录，优先级较低。

A：指定字段的数据库记录值。

B：本地实时时间。

C：交流通路采样及计算值。

D：开入量信息。

E：温湿度检测值。

2. 保护及测量程序模块设计

配电网中的设备种类多，需要根据不同的运行环境配置测量线路的接线方式及保护种类，本文设计的一体化终端功能之一是灵活适用于不同的配电网一次设备，如环网柜、馈线单元和配电变压器等。因此，本终端在软件系统中实现了保护与测量程序模块的独立设计，具体运行流程如图4所示。

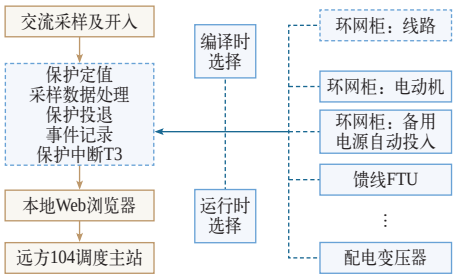

图4 保护测量程序模块流程

针对不同的保护及测量类型，将图4的程序及数据接口中与保护及测量相关的部分封装成独立的C文件。在现场运行时，有两种方式可以实现不同保护测量类型的选择：一是在编译时选择，通过头文件和宏定义的方式进行选择性编译，从而调用对应的C文件；二是在运行时选择，软件中为所有程序及数据接口预留了配置位，当通过本地Web浏览器或者远方104规约下发新的运行种类时，程序会自动进行数据初始化，并根据新的配置位选择对应的程序接口，完成不同的功能。采用编译时选择与运行时选择相结合的方式，可以极大地增加终端配置的适应性及灵活性，在一定程度上避免了配电网运行环境改变时重新布置设备的复杂工作。

3. TCP/IP协议栈开发

在本终端的网络模块设计中，用于本地信息配置的Web服务器/浏览器运行机制是基于HTTP应用层协议开发的，而用于远方配电中心监控的104通信规约需基于Berkeley Socket应用层协议开发，这就要求本终端的软件系统中需要集成一种适用于嵌入式平台的TCP/IP协议栈。在物理层上，可以驱动ENC28J60以太网接口及MRF24WB无线局域网模块；在应用层上，可以提供HTTP、Berkeley Socket等多种接口[8-9]。目前，嵌入式TCP/IP有多种协议栈可供选择，本文采用的是Microchip公司官方提供的开源TCP/IP协议栈，该协议栈具有接口丰富、代码量适中及方便移植等特点。

基于Microchip的TCP/IP协议栈，本文需解决的一个重要问题是实现以太网任务与WiFi任

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

务在同一个嵌入式协议栈下的并行运行。由于官方的协议栈代码只提供一种物理层接口，物理层以上的数据和程序接口也只针对一种接口设计（ENC28J60或MRF24WB），因此需要对原始协议栈进行二次开发。

二次开发分为如下四个步骤完成。

1）精简官方协议栈：针对配电网自动化通信的特点，简化协议栈服务接口，只保留TCP、UDP、IP和HTTP等基本服务接口，提升协议栈运行效率。

2）实现新的物理层接口：重新编写ENC28J60及MRF24WB与MCU之间的SPI接口，定义新的协议栈文件调用及组织接口。

3）协议栈维度拓展：重新定义协议栈全局数据及程序接口，将原来的一维结构拓展到多维结构。

4）设计协议栈调度程序：针对以太网任务与WiFi的不同特点，按照时间片轮转及中断查询相结合的方法，实现以太网与WiFi的任务调度。

经过二次开发的协议栈可以高效地实现以太网及WiFi任务的并行处理，并可以方便地拓展到多路以太网及WiFi运行，满足更复杂的配电网运行环境需要。

整体测试

本文设计的一体化保护测控终端可以安装在环网柜、10 kV线路杆等多种场合，配电中心可以实时监控终端的遥测、遥信状态并执行遥控等操作，终端在柱上安装时配电中心的监控画面如图5所示。

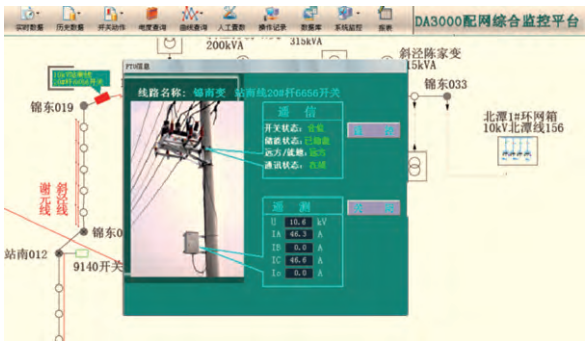

图5　配电网管理中心实时状态监测画面

1. 保护及测量功能

本终端可以对最多32路交流输入进行采样，电流、电压、进线及出线可以按照不同的工作现场进行配置，测量数据准确度满足DL/T 614—2007《多功能电能表》的规范要求。保护程序中可以按照现场运行要求投入速断、限时速断、过电流、零序过电流和重合闸等保护类型，并能执行控制回路断线、温度越限告警、瓦斯告警及装置自检等辅助功能，保护动作时间、动作值及动作特性等参数满足GB/T 7261—2000《继电器及装置基本试验方法》的规范要求。

2. 网络性能

终端的远方通信端口主要包括10 BASE－T以太网接口及GPRS传输接口。其中，以太网接口采用IEC 60870－5－104 协议，已经完成了与配电网监控主站的联合调试，并通过了规约一致性测试，可以实现主站总召唤、对时、遥控、开关变位与SOE事件的突发上送功能。

GPRS模块与主站采用相同的104协议通信，本文对GPRS模块的网络性能进行了测试。测试时，终端作为TCP Client连接到配电管理中心主站，使用端口为2048，将终端及主站设置为每隔100 ms向对方传送一帧数据，其中每帧数据长度按照104规约的最大报文长度（255 Byte）设计，该测试环境下双向通信的数据容量可以满足配电网中终端设备与主站通信时传送实时数据流及突变的大颗粒数据需求。主站端使用WireShark报文分析软件，基于TCP通信端口抓取上行/下行数据包[10-11]，分析结果如图6所示。由图6可见，在上述

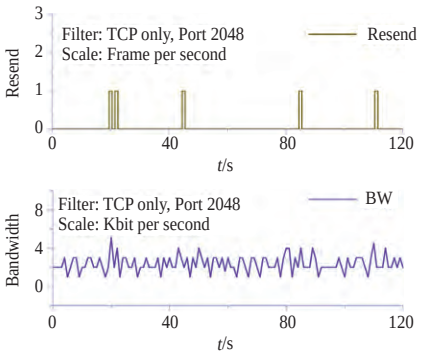

图6　G510 GPRS模块网络传输带宽分析

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

测试模式下，GPRS链路带宽比较均衡，多终端同时使用时不会对公用网络造成巨大负载压力，且数据报重传概率较小，表明网络没有出现明显的延时情况，GPRS传输协议及控制模式的设计能够较好地满足现场运行需要。

终端的本地配置及人机交互接口通过WLAN网络实现，通过iPad对终端进行保护配置及数据读取的页面如图7所示。本终端的WLAN网络主要参数为：①通过Ad hoc自组网模式创建，无须接入设备进行复杂的配置工作；②最大1 000 Kbit/s的传输速率，配合RFA－02－5－F7H1外部天线使用可最大覆盖50 m距离；③可通过外部以太网/串口等远动规约实现远程网络重启、关闭等控制。

图7 移动设备接入终端WLAN网络配置页面

结束语

智能配电网是未来配电网的发展趋势，随着能源与环保问题的日益严峻，提高配电网的分配效率、在配电网中接入更大规模的分布式可再生能源将是未来配电网研究的重点，同时需求侧管理及配电网运行优化等项目也将在配电网中得到更广泛的应用，作为实现上述工作的技术前提，在配电网汇流点部署具备测量、保护和控制等多功能的智能终端是一项复杂的工程，本文设计的一体化终端具备对配电网汇流点设备进行全面管理的多样功能，能保障配电网一次设备的安全可靠运行，且具备友好的本地人机交互接口，能为远方配电管理中心提供双向实时的多类型综合业务数据，为智能配电网的建设提供方便快捷的技术实现手段。

参考文献

[1] 徐丙垠，李天友，薛永端．智能配电网与配电自动化 [J]．电力系统自动化，2009，33 (17)：38-41．

[2] 余贻鑫．新形势下的智能配电网 [J]．电网与清洁能源，2009，25 (7)：1-3．

[3] 栾文鹏．高级量测体系 [J]．南方电网技术，2009，3 (2)：6-10．

[4] Leeuwerke R P，Brayford A L，Robinson A，et al．Developments in ring main unit design for improved MV network performance [J]．Power Engineering Journal，2000，14 (6)：270-277．

[5] 钟志伟，冯文胜．浅谈10 kV环网柜在城市配电网中的应用 [J]．广东电力，2001，14 (4)：45-46．

[6] 邓玲慧，王志新，沈剑鸣，等．智能配电技术及其应用 [J]．电网与清洁能源，2012，28 (3)：10-15．

[7] 宗剑，张鑫，牟龙华．智能配电网馈线终端单元FTU设计方案 [J]．电工技术，2004 (1)：11-12．

[8] 孙军平，盛万兴，王孙安．新一代变电站自动化网络通信系统研究 [J]．中国电机工程学报，2003，23 (3)：16-19．

[9] 杨扩武，周宗锡．变电站自动化设备中嵌入式以太网设计 [J]．计算机技术与发展，2009，19 (4)：199-201．

[10] 池智伟，林华，邓伯发．运用Wireshark排查GPRS终端通信故障的高级分析技术 [J]．电力系统通信，2012，33 (10)：77-81．

[11] 罗青林，徐克付，臧文羽，等．Wireshark环境下的网络协议解析与验证方法 [J]．计算机工程与设计，2011，32 (3)：770-773．

（收稿日期：2015－05－07）EA

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net