

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1026.2012.24.008

微电网协调控制过程中 EtherCAT 总线的应用

李 哲, 刘 澄, 徐石明, 丁孝华, 李文威

(中国电力科学研究院(南京), 江苏省南京市 210003)

摘要:微电网在联网运行时,一旦主网侧或微电网侧发生故障会引起保护动作跳闸,主电源会随着联网点断路器的跳闸迅速从 PQ 运行模式切换到 V/f 运行模式,但由于受到主从控制器之间通信速度的制约,无法达到无缝切换的效果。为解决这一问题,文中提出采用工业实时以太网 EtherCAT 总线替代传统的以太网 Ethernet 总线,以提高各控制器之间的通信速度。给出了带有 EtherCAT 接口的主控制器和从控制器的研制方案,并以 EtherCAT 总线为通信总线连接各控制器搭建微电网的协调控制系统。该方法提高了主从控制策略的实时性,实现了微电网在故障状态下从联网模式向孤岛模式的无缝切换。

关键词:微电网; EtherCAT 总线; 协调控制; 无缝切换

0 引言

近年来,光伏发电、风力发电等可再生能源得到了越来越多的重视和应用。这些分散的新能源的应用主要是以微电网的形式接入主网,由此带来了微电网的协调控制问题,考虑到应用分布式电源的用户的专业性,对微电网的协调控制必须实现高度智能化。微电网的运行方式分为联网和孤岛 2 种稳态运行模式,以及由联网到孤岛模式切换、由孤岛到联网模式切换 2 种暂态运行模式^[1]。目前,对于微电网的控制策略主要分主从控制和对等控制 2 种^[2]:主从控制由上层主控制器和底层从控制器组成,主控制器向从控制器下发控制命令,主控制器与从控制器之间依靠通信传递信息;对等控制是指所有分布式电源控制器在控制上都具有同等的地位,各控制器间不存在主从的关系,每个分布式电源都根据接入系统点电压和频率的就地信息进行控制,对等控制目前尚处于实验室研究阶段^[3],本文不作讨论。当微电网控制系统采用主从控制策略时,通常把储能装置作为主电源。联网运行时,主电源采用 PQ 运行模式;孤岛运行时,主电源采用 V/f 运行模式。在微电网联网运行时,一旦主网侧或微电网侧发生故障引起保护动作,联网点断路器要瞬时跳闸,微电网从联网模式向孤岛模式快速切换,主电源也要迅速从 PQ 运行模式切换到 V/f 运行模式。但由于受到主从控制器之间通信速度的制约,很难使主电源随微电网运行模式的切换,同步实现

从 PQ 运行模式到 V/f 运行模式的无缝切换,因此,有可能造成系统的频率和电压出现较大波动,部分分布式电源有可能在低频或低压保护动作下退出运行,严重时可能导致微电网全部退出运行,不利于对一些重要负荷的不间断供电^[2,4]。

在智能电网推广之前,国内电力自动化领域普遍采用的通信方式是 LonWorks, CAN, RS-485 等现场总线,但现场总线的数据吞吐量小,通信速率较低,很难满足信息快速传输的要求。随着智能电网的推广和发展,以太网技术被引入电力自动化领域,但传统的以太网由于采用载波监听多路访问/冲突检测(CSMA/CD)机制,在确定性和实时性方面无法满足智能电网的要求。为此,建立了世界范围内智能变电站的统一标准 IEC 61850,目前国内很多厂家在开发微电网协调控制系统时也沿用了 IEC 61850 标准。但 IEC 61850 标准主要是针对智能变电站的分层分布式结构和面向间隔的设计而制定的,适用于接入变电站内数量众多的智能组件,是一个非常庞大的协议系统,而微电网的结构比较简单,主要包含分布式电源、联网点断路器和负荷,采用 IEC 61850 标准有舍简求繁的感觉。同时,IEC 61850 协议对于类似保护跳闸这种实时性要求较高的操作需要采用专门的通用面向对象变电站事件(GOOSE)报文,而微电网协调控制的整体策略都需要很高的实时性,如果全部采用 GOOSE 报文并不合适。

鉴于上文所述,现有电力自动化领域的通信技术应用于微电网时存在不足。为提高微电网协调控制系统的通信速度,本文提出了在微电网协调控制

系统中利用 EtherCAT 总线技术代替电力自动化领域现有通信技术的新方案,以实现微电网协调控制策略的实时性。

1 利用 EtherCAT 总线技术实现微电网协调

EtherCAT (Ethernet for control automation technology) 技术于 2003 年由德国 BECKHOFF 自动化公司提出,2007 年 12 月被国际电工委员会 (IEC) 制定为 IEC 61158-12 (Type12) 国际标准^[5]。

EtherCAT 是一种实时工业以太网^[6],使用主从模式访问控制。一个 EtherCAT 通信网络应包括至少一个主站和若干从站,网络中所有的通信均由主站发起。当由主站发出的报文经过从站节点时, EtherCAT 从站根据识别出的命令由数据链路层的硬件来完成数据的提取或插入操作。而不必像传统以太网那样,先接收完整个报文,再进行解码,然后再将过程数据复制到各个设备。由于信息的处理都在硬件中完成,延迟时间非常短。每个从站处理完报文后都将报文传输至下一个从站,最后一个从站发回经过完全处理的报文,并由第 1 个从站将其作为相应报文送回主站,由于每个报文都包含了大量的设备信息,因此报文中的有效数据率可达到 90%^[7]。

如图 1 所示,基于 EtherCAT 总线的微电网协调控制系统由主控制器和各种就地终端组成,主控制器和就地终端采用 EtherCAT 总线进行通信连接。主控制器作为 EtherCAT 主站,各就地终端作为 EtherCAT 从站,主站控制从站发送或接收数据。主站发送数据报文,从站设备在报文经过其节点时读取相应的编址数据,同样,输入数据也在报文经过时插入报文中。报文经过所有从站并与从站进行数

据交换后,由 EtherCAT 网段中的末端从站将报文返回。此通信过程完全由从站控制器 (ESC) 芯片完成,对于下接 20 个从站的系统,处理延时只有 100 ns 左右,与传统以太网相比,实时性得到了显著提高。

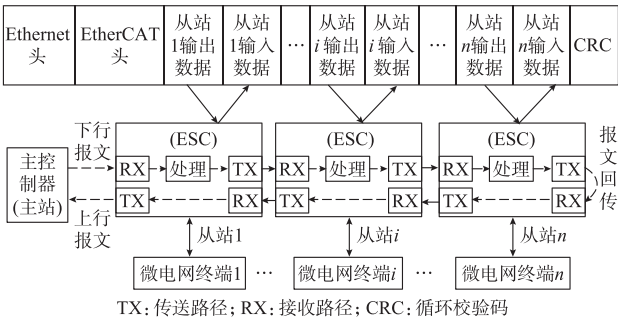


图 1 基于 EtherCAT 总线的微电网协调控制系统结构
Fig. 1 Structure of microgrid coordinate and control system based on EtherCAT bus

EtherCAT 报文使用标准以太网帧, EtherCAT 帧符合 ISO/IEC 802.3 标准,为区别于其他以太网帧,申请了自己的以太网帧类型为 0x88A4。EtherCAT 报文可通过 2 种传输方式传送:第 1 种方式 EtherCAT 帧直接在以太网数据区传递,一次可以传递多个 EtherCAT 报文,通信局限于单一以太网络,数据无需路由转发,可以满足实时控制的应用场合;第 2 种方式包含网络通信协议 (IP) 和用户数据报协议 (UDP) 数据报头,适用于实时性能要求不是很严格的场合。有效的 EtherCAT 报文嵌入在 Ethernet 帧的数据区,可以包括多个子报文,子报文总长度最大可达 1 498 字节^[8]。EtherCAT 子报文由 EtherCAT 报文头、数据域和工作计数器 (WKC) 组成。图 2 所示为 EtherCAT 协议报文结构,图中括号内的数字为字节数。

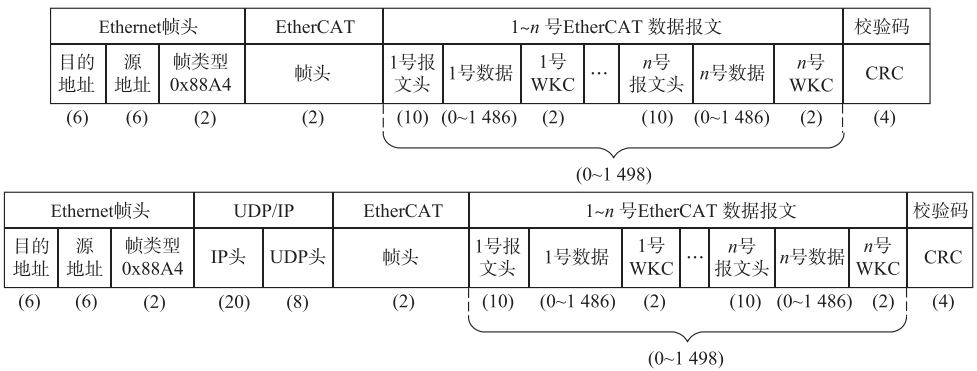


图 2 EtherCAT 协议报文结构
Fig. 2 EtherCAT protocol packet structure

主控制器作为 EtherCAT 的主站,通常采用标准的以太网网卡 NIC 作为主站硬件接口,采用 PC

机或嵌入式 PC 作为硬件基础。其功能则通过软件实现。软件部分包括基础程序和应用程序 2 个部分:基础程序主要完成初始化、拓扑结构辨识、参数设置、数据显示与存储等基本功能;应用程序主要针对微电网的运行状况作出决策,并把决策后的调节控制命令通过 EtherCAT 总线发给各就地终端,应用程序主要包括微电网联网运行决策程序、孤岛运行决策程序、联网转孤岛决策程序、孤岛转联网决策程序等。

就地终端作为 EtherCAT 的从站,硬件主要由从站控制 ESC 芯片、应用层 CPU 芯片等组成,如图 3 所示。ESC 芯片主要实现与 EtherCAT 总线的数据交换,应用层 CPU 芯片主要实现 AD 采样、数据计算与处理、开入信号处理、控制出口处理等功能。根据所连接微电网系统内的对象的不同,可分为联网点终端、主电源终端、负荷终端、分布式电源终端、环境监测终端等。

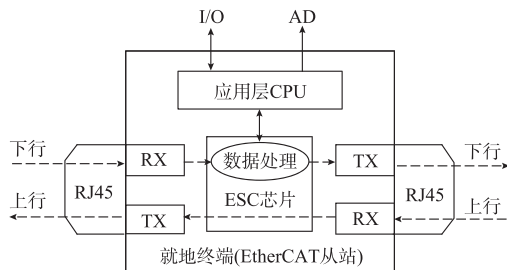


图3 EtherCAT从站硬件示意图

Fig.3 Schematic diagram of EtherCAT slave station hardware

2 具体实施方案

主控制器作为 EtherCAT 主站,选用型号为 CP6202 的面板型 PC 作为硬件平台。该 PC 采用 Intel Core 双核处理器,主频 2.26 GHz,配置 1 GB 内存,80 GB 硬盘,主板集成双以太网适配器,自带触摸屏作为人机界面,预装 Windows Embedded Standard 操作系统。CP6202 有 2 个以太网口,选用其中一个以太网口通过 TCP/IP 与上层能量管理系统连接;另一个以太网口通过安装 EtherCAT 驱动程序使其成为主站的 EtherCAT 接口,通过网线与第 1 个 EtherCAT 子站的网口相连接。

EtherCAT 主站的功能主要由软件实现,主站软件架构如图 4 所示。其主站功能主要包括:①解读可扩展标记语言(XML)描述文件,根据 XML 文件的相关信息配置主站与从站的组态;②通过发送数据帧来初始化从站,为通信作好准备;③使用邮箱方式对从站进行组态配置;④进入正常工作阶段,实现过程数据的实时通信,监控从站的实时状态,作出及时的控制响应。

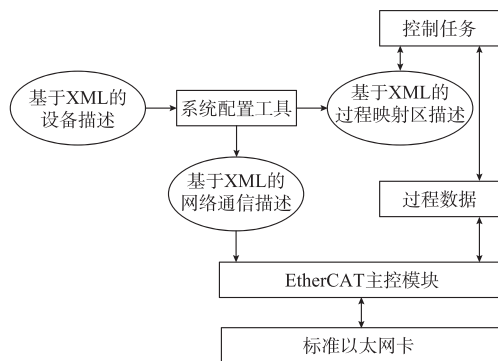


图4 主站软件架构

Fig.4 Software framework of master station

主站软件的研发可以考虑 3 种方案:①自主研发主站软件;②利用现成的主站样本代码,将主站样本代码嵌入到嵌入式环境中,开发人员只需要把这些样本代码与目标硬件及所使用的实时操作系统加以匹配即可;③直接购买成熟的主站软件。

为了缩短研发周期,选用成熟的 TwinCAT 软件作为 EtherCAT 的主站软件,TwinCAT 软件内部集成了 EtherCAT 协议栈和实时内核。TwinCAT 软件的主平台是系统管理器,通过系统管理器可以读取 EtherCAT 从站节点、DC 时钟同步、拓扑结构、配置从站参数、实时查看从站 I/O 量等功能。TwinCAT 软件的配置信息以 XML 文件的形式存在,内置 XML 解释器,分为主站配置文件和从站配置文件。主站配置文件中可以设定网段参数、启动时执行的命令、从站的基本配置、运行环境的配置等;从站配置文件可以设定从站的初始化配置和从站信息,经解释后可下载到从站。

就地终端作为 EtherCAT 从站,选用 ET1100 芯片作为 EtherCAT 从站通信控制 ECS 芯片,实现了 EtherCAT 从站协议的物理层和数据链路层。该芯片有 4 个物理通信端口,支持 100 Mbit/s 的全双工通信,内部有 8 KB 的双端口随机存储器(DPRAM)用于与应用层 CPU 交换数据,ET1100 还自带 32 位数字 I/O 接口,通过 I/O 接口回路完成开关量的采集和控制的出口。从站的应用层 CPU 芯片选用数字信号处理(DSP)芯片 TMS320C28335,该芯片是一款 32 位浮点型 CPU,具有 68 KB 的 RAM 和 512 KB 的 Flash,12 位 AD,处理能力很强。一方面,TMS320C28335 通过总线方式与 ET1100 的 DPRAM 连接,双方通过 DPRAM 交换和共享数据。另一方面,TMS320C28335 通过 AD 采样回路实现就地终端的电流、电压等模拟量的采集。就地终端的硬件架构如图 5 所示。

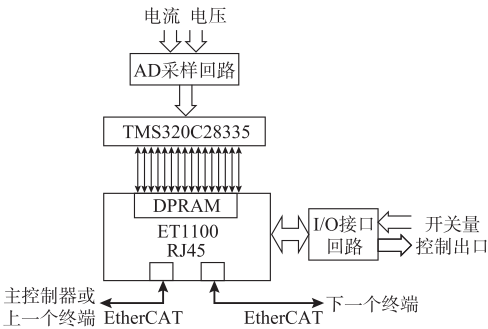


图 5 就地终端硬件架构
Fig. 5 Architecture of local terminal controller hardware

3 模拟切换试验

微电网协调控制的难点之一在于由故障产生的非计划性从联网模式切换到孤岛模式的过程,其主要过程如图 6 所示。联网点终端检测到主网侧或微电网侧出现故障时,输出故障跳闸信号到微电网协调控制器,并启动联网点开关跳闸;微电网协调控制器接收到故障跳闸信号后,向可控负荷终端和可切负荷终端发跳闸命令,使其从微电网切除;同时向主电源控制器发模式切换启动指令;微电网协调控制器检测到联网点开关分闸后,向主电源控制器发模式切换指令,主电源收到命令后立即将 PQ 模式转换为 V/f 模式,实现重要负荷的不间断供电。

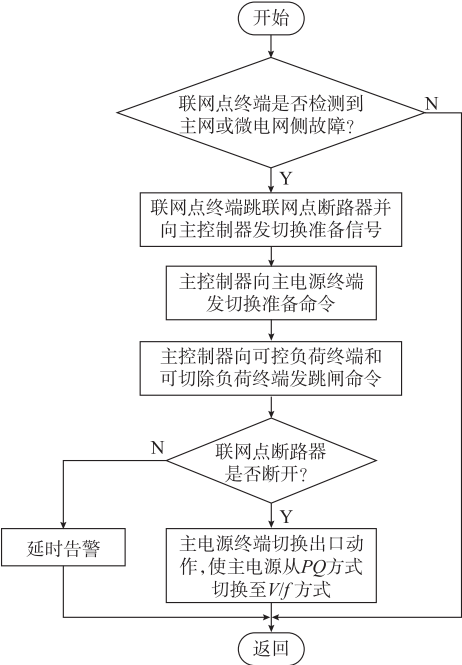


图 6 非计划性从联网模式切换到孤岛模式的流程
Fig. 6 Flow chart of unplanned switch from grid-connected mode to islanded mode

采用 2 种实验方案进行了试验和比较:第 1 种方案采用本文介绍的基于 EtherCAT 总线的微电网主控制器及联网点终端和主电源终端,如图 7 所示;第 2 种方案则采用了基于传统以太网 Ethernet 的微电网主控制器以及联网点终端和主电源终端,如图 8 所示。

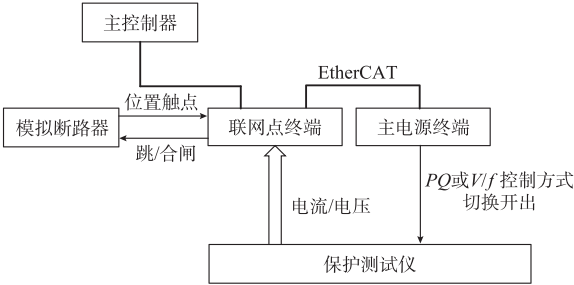


图 7 基于 EtherCAT 的试验方案
Fig. 7 EtherCAT based pilot program

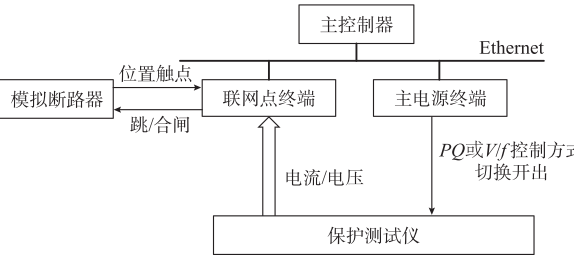


图 8 基于 Ethernet 的试验方案
Fig. 8 Ethernet based pilot program

试验方法采用继电保护测试仪,将试验电流、电压加入联网点终端,将联网点终端的过电流保护的过流定值整定为 6 A,时间定值整定为 0 s,联网点终端 I/O 接口外接模拟断路器。将主电源终端切换模式的出口继电器接回到继电保护测试仪。模拟故障电流为 10 A 的过电流故障,利用保护测试仪测试保护动作时间的功能测量从故障发生到主电源终端模式切换继电器出口动作的时间。结果如表 1 所示。

表 1 切换时间试验数据
Table 1 Switching time test data

序号	切换时间/ms	
	基于 EtherCAT	基于传统以太网
1	187.6	640.3
2	171.5	631.5
3	151.9	495.7
4	168.8	702.1
5	170.1	808.6
平均	169.0	655.6

从表 1 可以发现,基于传统以太网的微电网协调控制系统在发生故障时的平均切换时间为 655.6 ms,且不稳定;而基于 EtherCAT 总线的微电网协调控制系统在发生故障时的平均切换时间为 169.0 ms,且基本稳定。考虑到光伏发电及风力发电的逆变器具备 625 ms 的低电压穿越能力,要实现模式的无缝切换必须使切换时间小于低电压穿越的时间,因此,采用基于 EtherCAT 总线的微电网协调控制系统更利于实现微电网的无缝切换。

4 结语

本文通过采用 EtherCAT 总线作为微电网协调控制系统的通信架构,满足了微电网协调控制系统的实时性。保证在联网运行产生故障时,主电源能够随着分布式电源运行模式的切换,同步实现从 PQ 运行模式到 V/f 运行模式的快速切换;提高了主从控制策略对整个微电网系统协调控制的实时性,为微电网在故障状态下从联网模式向孤岛模式的无缝切换提供了可靠的保障。

参 考 文 献

- [1] 杨占刚,王成山,车延博.可实现运行模式灵活切换的小型微电网实验系统[J].电力系统自动化,2009,33(14):89-92.
YANG Zhangang, WANG Chengshan, CHE Yanbo. A small-scale microgrid system with flexible modes of operation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(14): 89-92.
- [2] 郭力,王成山.含多种分布式电源的微电网动态仿真[J].电力系统自动化,2009,33(2):82-86.
GUO Li, WANG Chengshan. Dynamical simulation on microgrid with different types of distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(2): 82-86.

- [3] 王成山,杨占刚,王守相,等.微电网实验系统结构特征及控制模式分析[J].电力系统自动化,2010,34(1):99-105.
WANG Chengshan, YANG Zhangang, WANG Shouxiang, et al. Analysis of structural characteristics and control approaches of experimental microgrid systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 99-105.
- [4] 章健,艾芊,王新刚.多代理系统在微电网中的应用[J].电力系统自动化,2008,32(24):80-82.
ZHANG Jian, AI Qian, WANG Xingang. Application of multi-agent system in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(24): 80-82.
- [5] 刘艳强,黄帅,马秋霞.基于工业以太网 EtherCAT 的 DCS 控制系统设计[J].制造业自动化,2010,32(11):21-23.
LIU Yanqiang, HUANG Shuai, MA Qiuxia. Design of DCS system based on the industrial Ethernet EtherCAT [J]. Manufacturing Automation, 2010, 32(11): 21-23.
- [6] IEC/PAS 62407 Real-time Ethernet control automation technology (EtherCAT)[S]. 2005.
- [7] 赵君,刘卫国,彭喆.基于 EtherCAT 总线的分布式测控系统设计[J].计算机测量与控制,2012,20(1):11-14.
ZHAO Jun, LIU Weiguo, PENG Zhe. Distributed measurement and control system based on EtherCAT bus[J]. Computer Measurement & Control, 2012, 20(1): 11-14.
- [8] ETG. EtherCAT introduction [EB/OL]. [2007-12-27]. http://www.ethercat.org.cn/pdf/cn/EtherCAT_Introduction.pdf. 2007.

李 哲(1971—),男,通信作者,硕士,高级工程师,主要研究方向:微电网协调控制及智能用电。E-mail: lizhe3@epri.sgcc.com.cn

刘 澄(1985—),男,硕士,工程师,主要研究方向:用户侧分布式电源协调控制。

徐石明(1967—),男,硕士,研究员级高级工程师,主要研究方向:用电及能效管理。

Application of EtherCAT Bus in Microgrid Coordinate and Control Process

LI Zhe, LIU Cheng, XU Shiming, DING Xiaohua, LI Wenwei

(China Electric Power Research Institute (Nanjing), Nanjing 210003, China)

Abstract: When microgrid connected to main power grid is operating, the breakdown at the main network side or microgrid side may cause protection acting to trip. Then the main power source will operate switching from PQ mode to V/f mode rapidly along with tripping of the breaker at interconnection point. The seamless switchover cannot achieve, because of communication speed limitation between master controller and slave controller. In order to solve this problem, adopting industrial real-time Ethernet EtherCAT bus to replace traditional Ethernet bus for increasing communication speed between controllers is proposed. A scheme to develop master controller and slave controllers with EtherCAT interfaces and using EtherCAT bus as communication bus to connect controllers in order to build up a coordinate and control system of microgrid is also given. The method proposed enhances the real-time of master-slave controlling strategy, and realizes the seamless switchover of microgrid operation mode from grid-connected mode to islanding mode when microgrid is in breakdown.

Key words: microgrid; EtherCAT bus; coordinate control; seamless switchover