

IEEE 802.11ac在智能电网自动化中的应用

世界各地的智能电网建设正在迅猛发展。为了连接变电站及不同的用户，现有的智能电网网络基础设施需要不断地更新与扩建。考虑到电缆部署的复杂性与困难性，现阶段无线通信链路的使用越来越广泛。探讨了将IEEE 802.11ac应用于基于IEC 61850的智能电网自动化系统中的某些问题，在智能电网中测试了IEEE 802.11ac中的某些性能，并与常规的电缆有线连接进行了对比。结果表明：当网络负载低于30 Mbit/s时，使用IEEE 802.11ac无线链路测试结果与有线连接时基本相似，能满足智能电网系统标准IEC 61850的要求；而当网络负载为80 Mbit/s时，测试结果平均值为5.4 ms，最大值为10 ms，在满足IEC 61850标准中传输时间要求的同时，传输量得到了进一步的提升。

黄卫菊/佛山电力设计院有限公司

0 引言

随着全球经济的飞速发展，传统的电能获取方式已远不能满足工业发展的需求，在此大背景下，智能电网应运而生^[1]。智能电网可实现各种可再生能源和分布式发电单元的互联互通^[2-3]，同时这需要对所构成的大量分布式能源及储能系统进行高效稳定且智能化的监测与控制，以满足各类电力用户安全、可靠、优质、经济和环保的电力供应以及其他附加需求^[4-5]。为此，有效地结合信息技术、自动控制、传感技术以及智能电力设备等实现高效优质的通信网络建设是关键。考虑到有线通信中电缆部署的困难程度及投资成本，在过去的几年中，无线通信在智能电网和变电站自动化中变得越来越重要，应用也越来越广泛^[6-7]。在无线通信中，对不同电网系统间信息共享及交互的及时性提出了较高要求，即无线通信中的网络负载数据的

传输时间需要满足相关标准的要求^[8]。如IEC 61850-5标准^[9]中规定，对分布式能源及储能系统中要求无线链路的传输时间范围是3 ms~1 s。

本文重点研究最新修订的IEEE 802.11ac无线标准协议^[10]，通过建立相应的实验系统测试无线链路中的传输时间，以此来评估IEEE 802.11ac协议提供的通信性能是否满足面向智能电网的IEC 61850标准。

1 理论概述

1.1 面向智能电网的IEC 61850标准

从智能电网的角度来看，IEC 61850的目的是定义电力系统自动化的参考架构。IEC 61850引入了一种抽象的数据模型，以简化构成变电站（主变电站和次变电站）及安装在客户端的装置（如保护装置和本地控制器）等电气设备的建模过程。

IEC 61850标准定义了一组协议：制造报文规范（MMS），面向通用变电站事件（GOOSE）和采样测量值（SMV）。部分协议映射到TCP/IP协议栈，其他协议（如GOOSE和SMV）则直接映射到第2层以优化通信延迟，并满足某些特定应用的要求。例如，使用GOOSE消息来监测断路器状态的变化，同时使用MMS通信实现监控和数据收集。

此外，IEC 61850-5标准定义了每项服务的通信性能，包括传输时间（Transfer Time）、时间同步、可用性及



黄卫菊/工程师

关键词/Keywords

IEC 61850 ·
IEEE 802.11ac ·
时间同步 ·
智能电网 ·
电网自动化 ·

安全性。诸多性能中,尤其集中于对传输时间的特性研究。传输时间被定义为从发送方到接收方的信息传输中发生的整个延迟。传输时间不仅包括通信延迟,还包括信息处理的时间。根据不同的时间限制规定了6种传输时间级别 ($T_{\text{tra}0} > 1 \text{ s}$, $T_{\text{tra}1} < 1 \text{ s}$, $T_{\text{tra}2} < 0.5 \text{ s}$, $T_{\text{tra}3} < 100 \text{ ms}$, $T_{\text{tra}4} < 20 \text{ ms}$, $T_{\text{tra}5} < 10 \text{ ms}$, $T_{\text{tra}6} < 3 \text{ ms}$)。为了满足服务要求,通常使用高速交换式以太网来完成IEC 61850安装的部署工作。然而,该标准对物理传输媒介无任何限制,易形成异构网络。因此,正确地选择通信媒介、网络体系架构和协议类型对保证智能电气化系统的正常工作至关重要。

IEC 61850中定义的各项服务连接着变电站系统中的某些接口（IFs）或变电站自身，如图1所示。

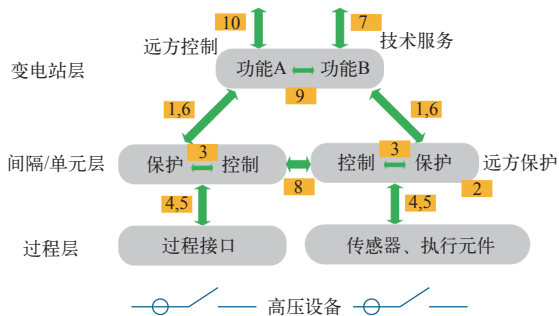


图1 IEC 61850定义的通信模型

IEC 61850-7根据接口之间交换数据的服务对变电站组件进行建模。定义的逻辑接口如下。

IF1: 间隔层和站层之间交换保护数据。

IF2: 间隔层和远方保护之间的交换保护数据, 如线路保护等。

IF3: 间隔层之间交换数据。

IF4: 间隔层和过程层之间的交换采样数据, 即来自CT和VT的样本。

IF5: 间隔层和过程层之间的交换控制数据。

IF6: 间隔层和站层之间的交换控制数据。

IF7: 站层和远方工程师之间的交换数据。

IF8: 间隔层之间的交换直接数据, 尤其适用于联锁等快速功能。

IF9: 站层之间的交换数据。

IF10: 站层和远方控制中心之间的交换数据。

1.2 IEEE 802.11ac及其特性

经过3年的研发，IEEE 802.11ac标准于2014年1月发布。从本质上来说，IEEE 802.11ac是IEEE 802.11n标准的增强版，其进一步优化了IEEE 802.11n的各种性能，尤其在于物理层及吞吐率的提高。具体来说，信道带宽增至80 MHz，甚至达到160 MHz；调制模式高达256-QAM（编码速率为5/6），即阶数达到256阶，单个子载波的数据比特数提升至8；多达8个空间流的多输入/多输出编码（MIMO）等。基于这些特性，超高吞吐量物理层（VHT-PHY）可允许数据传输速率高达866.6 Mbit/s，相比于之前IEEE 802.11n定义的高吞吐量物理层（HT-PHY），在考虑多用户多输入多输出（MU-MIMO）的情况下，其性能将提升10倍之多。

成功应用在HT-PHY中的多项特性在VHT-PHY中也得到进一步改进,例如:与长训练字段(LTF)相关的声音选项及改进IEEE 802.11n中的“显式压缩反馈协议”后用于波束成形技术的所有机制;校准发射功率和选择天线的程序等。此外,部分功能进行下调,如为支持2.4 GHz频段等。出现此种情况的原因如下。

1) 频率范围只能容纳单个80 MHz信道, 导致空间非常拥挤占用。

2) IEEE计划将2.4 GHz频谱长期预留给蓝牙、ZigBee等带宽要求较低的应用。

在媒介访问控制层 (MAC)，IEEE 802.11ac 标准引入了一种智能的多信道载波监听和强制请求发送/允许发送协议 (Request To Send/Clear To Send, RTS/CTS)。RTS/CTS 协议主要用于解决“隐藏终端”问题，让设备在其发送期间停止传输，避免造成冲突。考虑到 80 MHz 将用更多的信道，故此进一步提升 RTS/CTS 机制来处理信道上的冲突问题就显得尤为必要。

2 实验测试

IEC 61850-5标准中给出了通信性能相应指标的定義, 而IEC 61850-10标准則定义了测试

过程。为了测试IEEE 802.11ac在智能电网中的应用的可行性和可靠性,本文搭建了相应的测试系统,即通过测量电网中两个信号之间的时间间隔来估计传输时间。其中,一个信号为通过装置触发IEC 61850事件产生的信号,而另一个为由设备产生的对前者进行应答处理的响应信号。

2.1 实验建立

本文搭建的测量系统具体如图2所示,用于估计所演示的测试实验中的传输时间。其中,一对GPS天线为RSG2488交换机提供精确的本地时间参考,用于生成一个1PPS(即每秒一个脉冲)的信号。发送器与接收器(树莓派2代B型,900 MHz四核ARMCortex-A7 CPU,1 GB内存)布置于网络的左右相对位置。

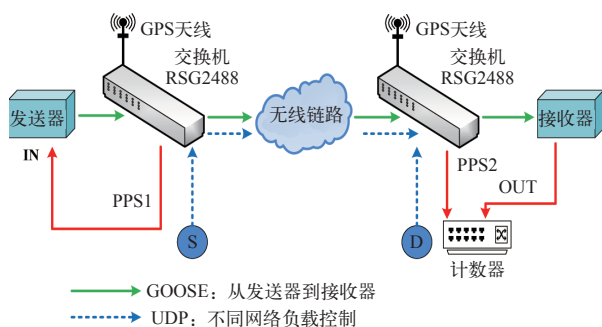


图2 用于测量传输时间的实验系统

具体来说,测量过程包括以下步骤。

- 1) 触发信号的产生。被测链路左侧的交换机RSG2488产生PPS1信号,由发送器的输入引脚(IN)接收。
- 2) GOOSE传输。发送器在检测到输入引脚的上升沿信号时发送GOOSE信息。
- 3) 网络传输。信号通过交换机和被测试的无线链路进行传输。
- 4) GOOSE接收。GOOSE信息被接收器接收处理后,在其输出引脚(OUT)上发出信号。
- 5) 传输时间估计。主要通过计数器测量PPS2信号和输出信号之间的时间间隔来确定,其中PPS2由无线链路右侧的交换机RSG2488产生。

因此,传输时间 T_{tra} 可表示为

$$T_{tra} = T_{in} - T_{out} = T_{PPS1} - T_{out} \quad (1)$$

式中, $T_{in} = T_{PPS1}$ 为PPS1信号的上升沿时间; T_{out} 为接收器输出信号的上升沿时间。

在接收侧,计数器通过下式计算时间间隔 T_{cou}

$$T_{cou} = T_{PPS2} - T_{out} \quad (2)$$

式中, T_{PPS2} 为PPS2信号的上升沿时间。

需要说明的是,由于两台RGS2488交换机均以同一本地时间为参考,因此PPS1和PPS2两个信号同步共存,即

$$T_{PPS1} = T_{PPS2} + \delta \quad (3)$$

式中, δ 为两个GPS接收器之间的同步偏移量。因此,将式(2)、式(3)代入式(1),可得传输时间为

$$T_{tra} = T_{cou} + \delta \quad (4)$$

综上,对两个GPS接收器的同步准确度进行估计后,可以通过 T_{cou} 值来计算 T_{tra} 值。

2.2 基于GPS的仪器准确度评估

如2.1节所述, T_{tra} 值计算的准确性依赖于嵌入交换机RSG2488中GPS接收器的同步准确度 δ 。本文测试系统中利用计数器(安捷伦53230A通用频率计数器)直接比较两个交换机产生的PPS信号。PPS1与PPS2信号之间的短期时间偏移分布如图3所示。

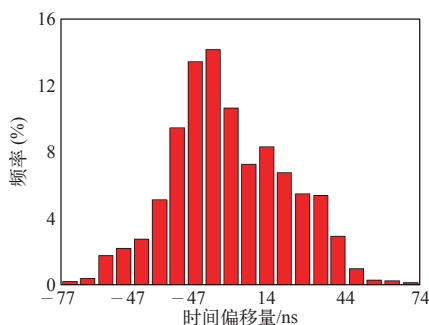


图3 PPS1相对于PPS2的时间偏移的频率分布

实验中测量了3 600个样本数据。根据图3数据分布求得平均值 $\mu_{t_0} = 6$ ns, 标准偏差 $\sigma_{t_0} = 25$ ns, 极差为151 ns。因此,短期内同步扩展不确定度为(令 $k=2$,置信区间95%)

$$U_{t_0} = k \sqrt{\delta_{t_0}^2 + \mu_{t_0}^2} = 52 \text{ ns} \quad (5)$$

IEC 61850-5标准定义的最短传输时间要求为 $T_{tra6} < 3$ ms,而测量系统中估计的扩展不确定度远

远小于此值。因此，上述测量系统中估计的不确定度足以满足IEC 61850所定义的传输时间特性。故式(4)可写为

$$T_{\text{tra}} = T_{\text{cou}} \pm U_{\text{to}} \quad (6)$$

2.3 有线连接的参考案例

为了进行对比，本节评估了有线连接方式对传输时间的影响。根据图2所示，用铜制电缆将两个以太网交换机RSG2488直接连接用以代替无线链路。测试步骤与2.1节中大致相同。由于无线链路被移除，故没有无线链路的作用，即发送器不发送GOOSE信息，触发接收器也不产生输出信号。对传输时间 T_{tra} 进行测量，利用采集的7 000个样本数据，作出其频率分布，如图4所示。

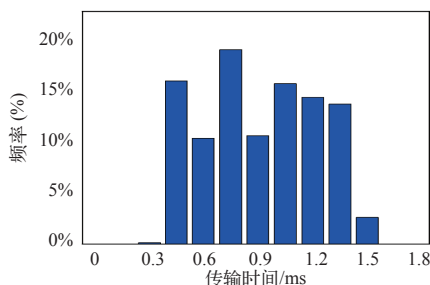


图4 有线连接方式下传输时间频率分布图

从图4中可以得出：传输时间平均值为 $\mu_{\text{wired}} = 0.8 \text{ ms}$ ，标准偏差为 $\sigma_{\text{wired}} = 0.3 \text{ ms}$ ，传输时间几乎均匀分布在0.3~1.4 ms范围内。因此，有线连接方式下，传输时间波动性较小，基本稳定在某一时间区间。

2.4 IEEE 802.11ac无线链路的特性分析

本节对第2.1节中所搭建的无线链路传输时间进行了性能评估。需要说明的是，IEEE 802.11ac在无线链路上可以保持较高的吞吐量，因此可通过改变吞吐量的大小实现传输时间的性能评估。由图2可见，在测试网络中部署了两个可产生和控制用户数据报协议(User Datagram Protocol, UDP)网络流量的装置。其中一个设备被配置为iPerf UDP客户端，另一设备被配置为能产生至80 Mbit/s速率的iPerf UDP服务器。

图5为测试过程中不同网络负载下传输时间的概率密度函数。图5中不同条件下均测试了1 000个

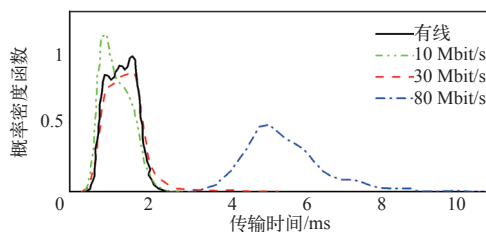


图5 不同网络负载下概率密度函数分布图

样本数据。

由图5可看出，当网络负载增加时，传输时间极差值会增加，当网络负载低于30 Mbit/s时，其结果与有线连接时基本相似，且满足IEC 61850-5标准所定义的最短传输时间($T_{\text{tra6}} < 3 \text{ ms}$)等级要求；而当网络负载为80 Mbit/s时，测试结果平均值为5.4 ms，最大值为10 ms，在满足IEC 61850标准的同时传输速率却大幅增加，进一步提升了传输效率。不同网络负载下传输时间计算结果如下表所示。

表 不同网络负载下传输时间计算结果

网络负载/(Mbit/s)	传输时间/ms			
	平均值	标准差	最小值	最大值
有线	1.3	0.1	0.7	2.3
10	1.2	0.4	0.6	2.7
30	1.4	0.5	0.6	4.8
80	5.4	0.9	3	10.1

此外，实验时还评估了数据包的丢失情况。正如预期所料，吞吐量越大，丢失的数据包数量就越多，如传输速度为10 Mbit/s时，总数为800 K的数据包会丢失2个数据包，而总数为80 M的数据包则会丢失16个数据包。

3 结束语

本文探讨了将IEEE 802.11ac应用于基于IEC 61850的智能电网自动化系统中的某些问题，在智能电网中测试了IEEE 802.11ac中的某些功能，并且借助GPS仪器与常规的电缆有线连接进行了对比。结果表明：当网络负载低于30 Mbit/s时，使用IEEE 802.11ac无线链路测试结果与有线连接时基本相似，能够满足智能电网系统标准IEC 61850的要求；而当网络负载为80 Mbit/s时，测试结果平均值为5.4 ms，最大值为10 ms，在满足IEC 61850标

准中传输时间要求的同时,传输量得到了进一步的提升。

参考文献

- [1] 张东霞,姚良忠,马文媛.中外智能电网发展战略[J].中国电机工程学报,2013,33(31):1-15.
- [2] 林彦明,张树彬.智能电网通信技术研究[J].应用能源技术,2011(6):43-47.
- [3] 舒印彪.加快电网互联互通,推动能源转型发展[J].中国经贸导刊,2016(34):54-56.
- [4] 江辉.智能配电网在电力营销中应用的研究[J].低碳世界,2016(9):36-37.
- [5] 叶永春.提高配电网分布式能源接纳能力的储

能系统优化配置技术研究[J].企业技术开发,2017,36(12):56-57,75.

- [6] 俞弦,施健,唐云善,等.智能电网通信管理系统建设研究[J].电力系统通信,2011,32(5):101-105.
- [7] 木树娟,黄铭,余江,等.智能电网通信标准分析及关键技术探讨[J].电力系统通信,2011,32(7):76-80.
- [8] 毕艳冰.面向智能电网的通信中间件的关键技术研究[D].济南:山东大学,2013.
- [9] IEC 61850 Communication networks and systems for power utility automation [S].

(收稿日期:2018-02-25) **EA**

(上接第51页)

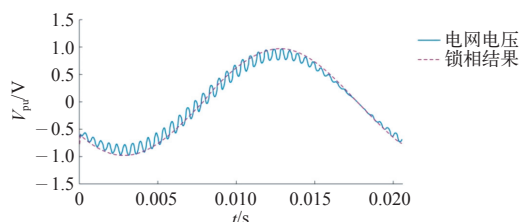


图16 高次谐波注入市电时的锁相结果

4 结束语

本文提出一种新型单相逆变电源的数字锁相方法,该方法通过构造单相市电电压矢量,采用PI控制器控制单相正弦矢量鉴相器快速收敛在稳态值附近,实现锁相功能。

该锁相方法仅采用上一时刻的采样数据,占用内存少,计算简单快速、稳定可靠。搭建Matlab仿真模型和实物样机实验平台,验证了该数字锁相方法可对单相交流电压的相位进行精确跟踪。在市电注入各次谐波及市电频率偏移等工况下,

该方法也有较强的适应性。

参考文献

- [1] 董祖毅,陈国栋.新型单相软件锁相环的研究[J].上海电器技术,2006(4):31-34.
- [2] 赵文才,范声芳,熊健,等.基于DFT算法的单相数字锁相环[J].电力电子技术,2011,45(4):79-81.
- [3] Ciobotaru M, Teodorescu R, Blaabjerg F. A new single-phase PLL structure based on second order generalized integrator [C]. Proceeding of the 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, Jeju, 2006: 1-6.
- [4] Mojiri M, Karimi-Ghartemani M, Bakhshai A. Estimation of power system frequency using an adaptive notch filter [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(6): 2470-2477.

(收稿日期:2017-11-30) **EA**