

WAMS 及其支撑通信技术探讨

汤一达

(长沙理工大学,湖南长沙 410114)

摘要:基于相量测量装置(PMU)的广域监测和保护控制正成为智能电网的关键技术,在国内外都得到了广泛的关注。而通信的可靠性和技术指标对其功能的实现起到关键的作用。文中介绍了 PMU/广域测量系统(WAMS)在美国的发展历史、研究和应用现状及发展趋势,根据国内外的标准和规范,总结了 WAMS 对通信的具体要求。并基于国内电力通信网络的现状和通信技术的发展趋势,提出了在不同的 WAMS 应用场景和应用功能下的可行的通信方式及过渡方案。

关键词:PMU;WAMS;广域保护控制;通信技术

中图分类号:TM93

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2016)04-0071-05

由于缺乏高精度的时间源以及受数据通信条件的限制,数据采集与监视控制(SCADA)系统是一个分散处理系统,在时间上是异步的,在空间上是局部的。以其为基础的能量管理系统(EMS)不能满足超大规模电力系统精确的分析和保护控制方面的需求。随着全球定位系统(GPS)的发展,为电力系统分散的测量装置提供了高精度的时间基准源。同时随着以太网技术和光纤技术的发展,当前的电力通信网具有高可用性、高可靠性和高安全性,各个电厂、变电站内部以及它们与调度中心之间有可能实时地交换大量信息。正是在这样的技术背景下,广域测量系统(WAMS)和广域保护控制成为研究和开发的热点^[1]。但在实际应用中,由于网络阻塞、设备问题或信息攻击,WAMS的通信系统往往会造成数据的延时或不完整。这将使得 WAMS 系统的可靠性降低,并进而影响基于 WAMS 高级应用的可靠性和安全性^[2,3]。

1 PMU/WAMS 在美国的发展及应用简介

1.1 PMU/WAMS 在美国的发展

1988年,Bonneville 能源管理局(BPA)在美国西部电网(Western Electric Coordinating Council, WECC)首次安装了相量测量装置(PMU),并对这些装置进行了室内和现场测试。1993年,弗吉尼亚理工成功研制了全球第一台商用的同步相量测量装置,它可以输出带 GPS 时标的正序电压、电流相量、有功和无功率值,采样频率为 2880 Hz。1994年,EPRI 在其一个研究项目中,将这些 PMU 装置在 WECC 投入商业运行。1995年,在美国能源部的支持下,广域电网监测系统/动态运行监测系统在 WECC 投入试运行。

2002年,美国东部互联网的相量项目(Eastern Interconnection Phasor Project, EIPP)在美国东部互联电网启动,希望在东部互联网安装 PMU,并形成一

相量测量网络。2007年,美国能源部(U.S. Department of Energy, DOE)和北美电力可靠性公司(North American Electric Reliability Corporation, NERC)倡导实施了北美电力同步相量倡议计划(North American Synchrophasor Initiative, NASPI)。其目的在于将北美电力系统的多个相量发展计划进行整合,实现信息的共享,并最终形成北美统一的相量测量网络,便于 DOE 和 NERC 能更好地地支持 WAMS 的发展。

1988年到2008年的20年,PMU在北美的的发展相对较缓,主要是安装的 PMU 数量有限。到2008年底仅有200套实验用的 PMU 装置。2009年,受美国政府的 American Recovery and Reinvestment Act 的资助,共有3.28亿美元的资金投向和 PMU 相关的14个项目。如图1所示。计划新安装超过1000套 PMU 装置。



图1 美国 ARRA 资助的 PMU 相关项目

2014年,北美共安装了近1700套 PMU 装置,覆盖了100%的大电网,如图2所示。同时在美国能源部和工业界的投资下,建立了高速相量数据传输网络、PMU 测量、功能和数据格式的交换标准等。美国能源部也资助了各类 PMU 高级分析和应用的研究和开发项目。

NASPI 最近提出了 PMU 在北美应用的远景,希望通过建立 NASPInet(见图3),利用分布式数据分享和

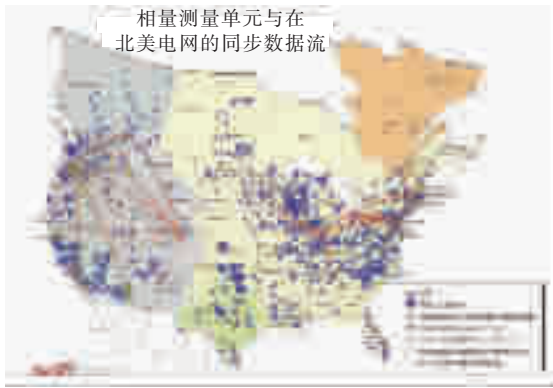


图2 2014年底北美PMU的分布图

交换结构,实现PMU数据在电力公司、区域可靠性委员会和北美可靠性公司(NERC)间的共享和应用,从而可以充分利用PMU提供的信息。

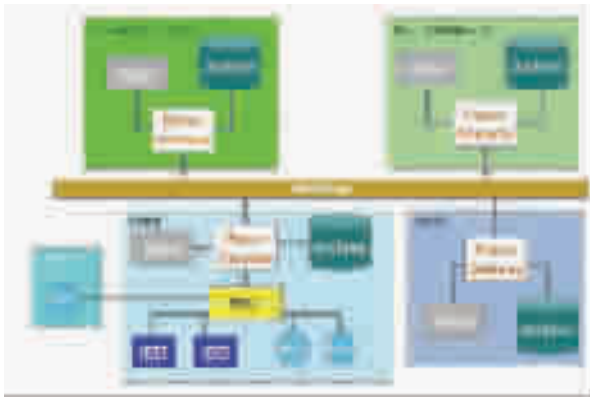


图3 NASPInet远景

PMU/WAMS在北美主要应用在状态感知(Situational Awareness)、监测报警(Monitoring Alarming)、分析估计(Analysis Assessment)、高级应用(Advanced Application)等领域。目前研究和应用的重点:

(1) 在研究方面,主要是失步保护、中短期稳定控制、反馈控制等;

(2) 在规划应用方面,主要是事故分析、模型校核、相量测量网络行为和数据质量监测、新的实时应用的测试等;

(3) 在调度应用方面,主要是状态感知(通过调度屏显示)、实时合规(compliance)监测、频率失稳的判别和解列等;

(4) 在运行应用方面,主要是系统实时行为监测、实时告警和报警、事件判别、故障点判断、预防控制和紧急控制策略制定、线路动态容量确定、互联电网状态估计等。

PMU/WAMS的其他应用还包括^[4]动态过程记录和事后分析、电力系统动态模型辨识、暂态稳定预测及控制、电压和频率稳定监视及控制、低频振荡分析及抑制、故障定位及线路参数测量、扰动重演与仿真校核,同时还可以对新型继电保护、安全自动装置、测量和控制装置进行在线测试。

1.2 广域频率监测网络(FNET)

从2000年开始,田纳西大学的Yilu Liu教授主导建立了一个基于120V用户侧测量的广域频率监测网络(frequency monitoring network, FNET)。它横跨了3个北美电网:东部互联电网(Eastern Interconnection, EI),西部电力协调联盟WECC和德克萨斯电网的电力可靠联盟(Electric Reliability Council of Texas system, ERCOT),目前的信息收集和分析系统在田纳西大学。与常规PMU不同,FNET中带有GPS同步时钟的频率测量单元(Frequency Disturbance Recorders, FDR)安装在用户侧(110/220V),测量电压相量和频率。目前安装了200多个FDR。经过对安装在变电站的PMU和安装在办公室的FDR对统一扰动记录的实测数据分析,在低压侧测得的频率信息与高压侧的频率动态行为高度一致。FNET频率测量准确度达到 $\pm 0.0005\text{ Hz}$ ^[5]。测量信息通过Internet迅速传送到信息管理系统。

记录的数据及分析结果显示了在较低的电压等级上也能够得到大量有价值的大电网动态信息。FNET系统可实现的功能包括事件检测和定位;振荡检测;设备开断和系统解列检测;系统失稳预测和停电预防;提供系统控制输入信号;频率和相角变化动态演示;支持新能源接入等。FDR在北美的分布情况如图4所示。由广域频率监测网络提供的北美地区实时等相角图如图5所示。该网络亦可提供系统实时等频率图。

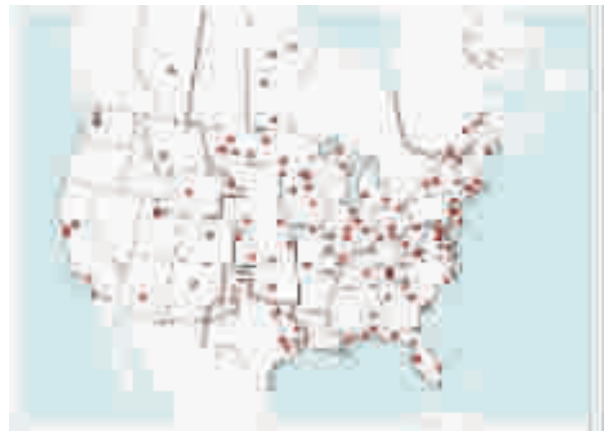


图4 FDR在北美分布图

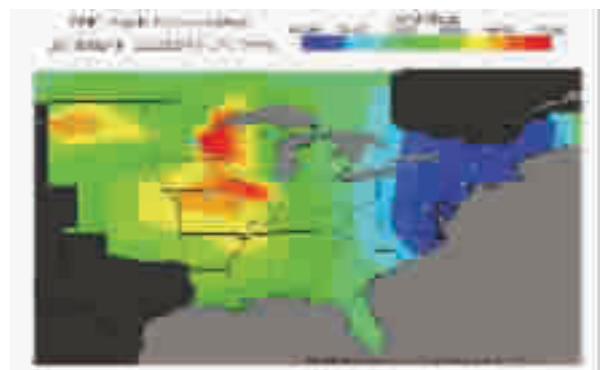


图5 FNET提供的北美地区实时等相角图

1.3 配网侧 μ PMU

美国能源部的 Advanced Research Projects Agency 的 ARPA-E 计划于 2012 年资助加州大学伯克利分校 400 万美元开发用于配电网的微电网同步相量研究。主要是考虑到分布式电源,特别是屋顶光伏和风能主要在配电网接入。相比现在的配网,今后的配网将有电源,潮流也将是双向的。因此在配网侧安装 μ PMU 可以提高配电网和输电网的安全和稳定,促进可再生能源的接入。

与输电侧的 PMU 相比,安装在配电网侧的 μ PMU 面临一些新的挑战,如配电网的电压相角差别小, μ PMU 需有较高的灵敏度;配网测量侧噪声多; X/R 比值不一样;三相不对称;测量点多,因而成本要低。配网侧 μ PMU 项目的主要目标:

- (1) 开发高精度的 μ PMUs,可以测量小于 0.05° 范围的电压相角;
- (2) 理解电压相角作为配电网状态量的作用和意义;
- (3) 研究如何利用配电网的 μ PMU 数据优化系统运行,提高可靠性,促进可再生能源和其他分布式能源的接入;
- (4) 评估特殊的分析和控制功能对 μ PMU 数据的要求;
- (5) 推动该技术的实际应用(规划、监视和诊断、运行和控制)。

目前该项目开发的第一代 μ PMU (PQube) 具有如下的性能指标:16 GB 存储空间;采用基于 TCP/IP 协议以太网方式通信;Certifications (UL, emissions, CE, etc);Five ± 1000 V, 0.01% voltage channels; Eight 0.01% current channels;“Class A”电能质量记录仪;“Class 0.2”电能收益计量表;可拔插扩展模块。

加州大学伯克利分校建设的 μ PMU 实验网络如图 6 所示。在一条 12.47 kV 的线路上安装了 4 个 μ PMU。

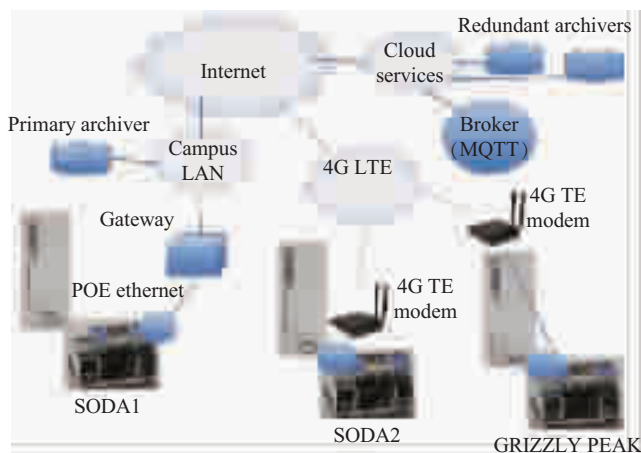


图 6 μ PMU 实验网络

2 WAMS 对通信的要求

广域测量系统由 3 部分组成:分布在厂站的同步 PMU,PMU 数据传输的通信网和安装在调度端的监测中心。

PMU 对安装点的电压和电流进行实时测量,并给测量数据加上时标。带有时标的相量数据按通信规约实时上传监测中心,监测中心对实时相量数据进行分析处理和存储,实现对系统运行状态的实时监测、分析和控制决策的制定。因而通信在其中起到了非常关键的作用。WAMS 由于应用场景不同(输电网、配电网、用户侧)和实现功能不同(监视记录、实时分析、实时控制),其对通信的需求也不一样。国家电网公司 220 ~ 750 kV 相量测量装置对通信的要求:

- (1) 通道要求。相量测量装置与主站通信通道带宽不低于 2 M,宜采用电力系统调度数据网进行数据传输。
- (2) 与主站通信的底层传输协议。在网络通信方式下底层传输协议采用 TCP/IP 协议。
- (3) 与主站通信的应用层协议。相量测量装置与主站通信的应用层协议符合《电力系统实时动态监测系统技术规范》的要求。与主站、当地交互参照电力系统实时动态监测系统数据传输协议。
- (4) 与当地监控系统的通信。相量测量装置向当地厂站监控系统传送装置的状态信息时宜采用符合相关国标、行标的标准。

(5) 通信接口。相量测量单元具有不少于 2 个 100 M 网络接口和不少于 2 个 RS-232/RS-485 接口,数据集中器具有不少于 4 个 100 M 网络接口和不少于 2 个 RS-232/RS-485 接口,接入主站数量且不少于 4 个。

南方电网公司在其同步相量测量装置配置和运行管理规定中,要求 PMU 装置应具有不少于 3 个网络接口,支持接入 2 M 专线通道(接入 MSTP 口或经路由设备接入 E1 口),支持接入调度数据网。IEEE Standard C37.118^[6]将 PMU 分为 2 类:P 类 PMU 和 M 类 PMU。P 类要求通信的延时较小,主要用于广域保护控制;M 类要求精度高,而对延时要求较低,主要用于测量类的应用。在该标准中,对 PMU 测量数据的精度,提出了要求,对 2 类 PMU 都要求其 TVE (total vector error) 小于 1%。用 L_{TVE} 表示,则:

$$L_{TVE}(n) = \sqrt{\frac{(\hat{X}_r(n) - X_r(n))^2 + (\hat{X}_i(n) - X_i(n))^2}{(X_r(n))^2 + (X_i(n))^2}} \quad (1)$$

式(1)中: $X_r(n)$ 和 $X_i(n)$ 是输入信号在时刻 n 的真值, $\hat{X}_r(n)$ 和 $\hat{X}_i(n)$ 是其估计值。

北美电力同步相量倡议计划(NASPI)将 PMU 的应用分为 4 类:闭环控制、开环控制、事件分析、监视和可视化。每一类的应用对通信延时、数据精度和完整性有不同的要求,如表 1 所示。

表 1 PMU 应用分类

特性要求	延时	精度	完整性	应用
A 类	4	4	4	闭环控制
B 类	3	1	1	开环控制
C 类	2	4	3	事件分析
D 类	1	2	2	监视和可视化

1- 不重要;2- 区域性可靠中枢 重要;
3- 很重要;4- 紧要。

3 支撑 WAMS 的通信技术

3.1 电力通信网

国家电网公司的电力通信网(见图 7)是公司除电网外的另一张实体网,由多级骨干通信网和终端通信接入网组成,是全球最大的电力专用通信网络。通信网承载能力正在由 10 G 提升到 400 G。

电力通信网基本实现传输技术手段光纤化、业务承载方式网络化。与运营商相比,在用户终端、服务对象、承载业务、网络架构等方面均存在显著差异。

(1) 调度的通信支撑。调度的通信需求主要是传输 EMS、PMU 以及继电保护、安全自动装置、故障录波等信息,实现对电网调度一体化的实时监控、在线稳定分析、安全预警、调度辅助决策。基于调度的通信需求,主要的通信方式:基于 SDH 技术建设继电保护通道专线,提供高可靠、低时延继保、安稳信号传输要求;基于 TDM 技术构建的 SDH/MSTP 电力调度数据网,提供电网调度、PMU 等电网生产控制业务。

(2) 配电网的通信支撑。以光通信(无源光网络 EPON 和工业以太网)为主干技术,中压载波、无线专

网(光载无线)和无线公网为辅助手段,多种通信技术相结合,形成安全、可靠、多点、实时的智能电网通信信息网络。实现配电网能量流、信息流、业务流的双向运作与高度整合,构建具备集成、互动、自愈、兼容、优化等特征的智能配电系统,促使配电网网架坚强、网络智能。

3.2 配电网各类通信方式的优缺点

(1) 载波通信(Power line Communication, PLC)。PLC 利用电力架空明线或地埋电缆,通过配电载波设备来传递信号,其优点是可用现有的配电线路传输不需另铺线路,而且便于管理。缺点是电力线环境带来严重信号衰减、噪声干扰及输入阻抗不匹配,制约信号传输距离,不适于信号远距离传输。

(2) 同步数字体系(Synchronous Digital Hierarchy, SDH)。SDH 在传统电力传输网中的应用非常广泛,它以优异的性能为电力通信提供了一个健壮的平台。但在配电网通信中,SDH 应用的缺点和它的优点一样的突出。

优点:① 高带宽;② 多种环网保护协议;③ 光纤通信方式。

缺点:① 工作环境要求高;② 高带宽同时带来了带宽的浪费;③ 施工难度大,实现困难;④ 成本投入不切实际。

(3) 通用无线分组业务(General Packet Radio Service, GPRS)。GPRS 通信方式目前在电力集中抄表系统中应用广泛。它依靠租借驻地移动运营商的无线资源组建电力无线专网,这种方式不需要电力投资线缆资源,而且组网灵活。

优点:① 基础资源丰富,不需要投资线路建设;② 组网方便灵活。

缺点:① 带宽较低,最大带宽 114 kb/s,很难满足配网终端接入需求;② 实时性和扩展性较差,受制于

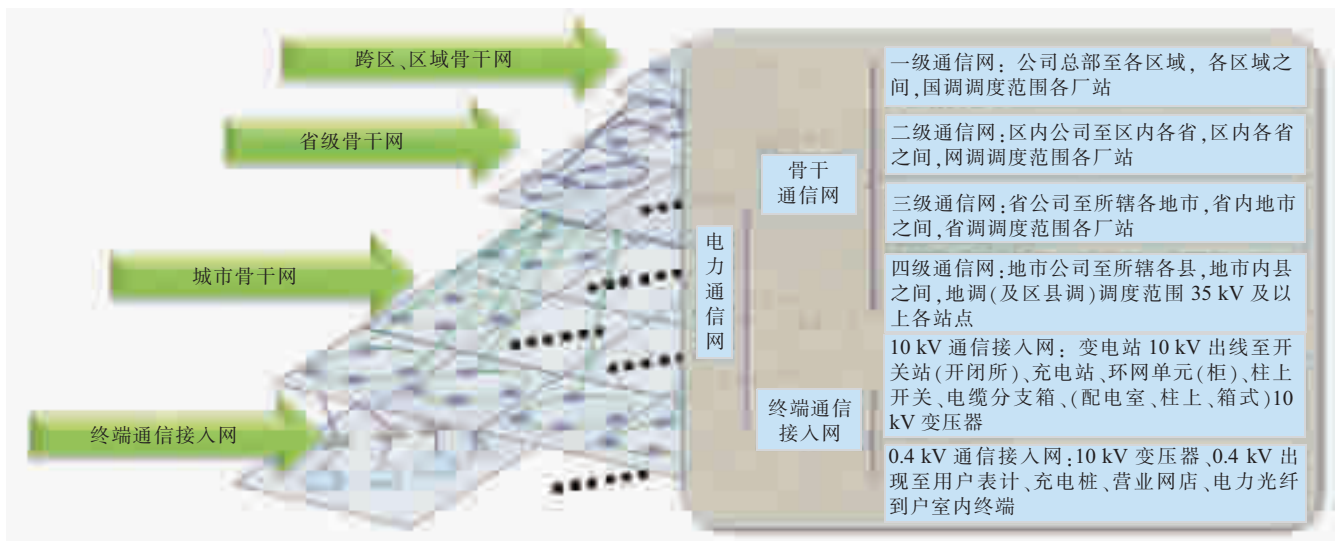


图 7 国网公司电力通信网架结构

运营商;③ 适合遥测、遥信上行采集信号传输,不满足主站下发遥控、遥调控制信号的可靠性传输要求。

(4) 以太网无源光网络 (Ethernet passive optical network, EPON)。EPON 基于以太网无源(光的传输及分配无需电源)光网络,是一种采用点到多点(P2MP)结构的单纤数据双向传输的光纤通信技术。EPON 技术特性:在物理结构和数据流上均实现了点到多点;在光传输上使用无源分光器(无需电源);采用 WDM(波分复用)技术实现单纤双向传输。

优点:① 通过 EPON 分光器可以形成点到多点网络模式,适应复杂的线路资源情况;② EPON 分光器不需要电源,对恶劣的环境的适应能力非常强,工作稳定、不易损坏;③ EPON 网络在扩展新终端和新线路的时候对网络的影响很小,无源分光器的设计使 EPON 网络扩容变得简单、灵活;④ 各 ONU 采用并联方式接入。单点或多点故障不影响系统稳定运行;⑤ 强大的网管功能,管理到 ONU 的 PON 每个端口业务。

缺点:① 全网改造难度大;② 低接入率时覆盖成本高;③ 维护人员素质要求高。

3.3 适应 WAMS 的通信技术探讨

WAMS 系统既可以用于输电网,亦可以应用于配电网(如 μ PMU)和用户侧(如 FNET)。当其应用于输电网时,既可以作为广域测量系统,也可以作为广域控制系统。WAMS 安装的网络不同,所起的作用不同,对通信的要求也不同。根据前面的分析,对以下各类应用场景,建议采用的通信方式:

(1) 输电网的广域测量系统。对延时要求不高,可以采用现有的基于 TCP/IP 的调度数据网。

(2) 输电网的广域控制系统。对延时和测量精度要求都很高,需要采用点对点光纤通信,保证延时的确定性和控制的可靠性。

(3) 配电网的广域测量系统。初期可以采用 PLC

或 GPRS,投资小,见效快。当大规模使用后而且 EPON 网络发展后,可以采用 EPON 网络,以保证系统的可靠性。

(4) 用户侧的广域测量系统。考虑成本的因素,适于通过 Internet 进行数据的通信。

4 结束语

基于 PMU 的广域监测和保护控制正成为智能电网的关键技术,在国内外都得到了广泛关注。其应用已从最初的输电网向配电网和用户侧发展;从单一的监测功能向保护和控制功能发展。而作为广域信息传输的纽带,通信系统的可靠性和技术指标将对广域监测和保护控制的功能实现起到关键作用。

参考文献:

- [1] PHADKE A G, THORP J S. Synchronized Phasor Measurements and Their Applications [J]. Science of the Total Environment, 2008, 37(1):121-128.
- [2] KATSAROS K V, YANG B, CHAI W K, et al. Low latency Communication Infrastructure for Synchrophasor Applications in Distribution Networks [C]// IEEE International Conference on Smart Grid Communications. IEEE, 2014:392-397.
- [3] HUANG C, XIAO C, YI F, et al. A Method to Deal With Packet Transfer Delay of Sampled Value in Smart Substation [J]. Power System Technology, 2011, 35(1):5-10.
- [4] 路志刚. 基于 PMU 的广域测量系统综述 [A]. ABB 杯第三届全国自动化系统工程师论文大赛论文集 [C]. 中国自动化学会, 2008:4.
- [5] WANG L, BURGETT J, ZUO J, et al. Frequency Disturbance Recorder Design and Developments [J]. 2007; 1-7.
- [6] C37.118.1—2011 IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems [S].

作者简介:

汤一达(1995),男,江苏南京人,本科大三在读。

Discussions on WAMS and Its Supporting Communication Technologies

TANG Yida

(Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The wide-area measurement systems (WAMS) and control/protection systems based on phasor measurement units (PMU) are key technologies of smart grid. The reliability and effectiveness of communication infrastructure play a key role in realizing the functions of WAMS. To address the above issues, this paper first reviews the state of art of PMU/WAMS in terms of scholar research and practical application in the United States. Then, the communication requirements for WAMS according to the corresponding standards and specifications are summarized. Finally, given the developing status and trends of electric power communication in China, this paper proposes specific communication technologies and evolution schemes for WAMS under different scenarios.

Key words: PMU; WAMS; wide area control and protection; communication technology