基于同步相量测量信息的配电网多功能终端设计与应用

徐志华[1,2]，郑 舒[1,2]，吴 海[2]，胡 国[1,2]，夏 磊[1,2]，方 陈[3]

（1．南瑞集团（国网电力科学研究院）有限公司，江苏 南京 210000；2．国电南瑞科技股份有限公司，江苏 南京 210000；3．国网上海市电力公司电力科学研究院，上海 200437）

摘要：将同步相量测量技术应用到配电网中，设计可大规模应用的微型化、低成本化，并配置兼具配电网保护、控制等多功能的同步相量测量装置，可以全面提高配电网的可观、可测和可控的能力，这将会是未来配电网发展的一个必然趋势。设计了一种基于同步相量测量信息的配电网多功能终端装置，研究了装置的功能需求。在硬件设计上采用融合配电自动化终端架构的分层式集成架构，软件上采用低耦合、分层式软件架构。同时，设计了装置的数据动态融合方案，保证运行效率。设计的基于同步相量测量信息的配电网多功能终端装置灵活运用同步量测信息技术，解决了规模分布式电源、电动汽车和互动负荷等接入对配电网带来的可靠性和电能质量问题，具有很高的工程应用推广价值。

关键词：同步相量测量；配电自动化；可靠性

Design and application of multifunctional terminal for distribution network based on synchronized phasor measurement information

XU Zhihua[1,2], ZHENG Shu[1,2], WU Hai[2], HU Guo[1,2], XIA Lei[1,2], FANG Chen[3]

(1. NARI Group Corporation/State Grid Electric Power Research Institutie, Nanjing 210000, China; 2. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 210000, China; 3. Electric Power Research Institute, State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200437, China)

Abstract: The application of synchronous phasor measurement technology in distribution network, the design of miniaturization and low cost, and the configuration of synchronous phasor measurement device with multiple functions such as distribution network protection and control, can improve the considerable, measurable and controllable ability of distribution network in an all-round way, which will be an inevitable trend in the development of distribution network in the future. A multi-functional terminal device for distribution network based on synchronous phasor measurement information is designed. The functional requirements of the device are studied. In hardware design, a hierarchical integration architecture integrating distribution automation terminal architecture is adopted, and in software, a low-coupling and hierarchical software architecture is adopted. At the same time, the data dynamic fusion scheme of the device is designed to ensure the operation efficiency. The multi-functional terminal device of distribution network based on synchronous phasor measurement information can flexibly use synchronous measurement information technology to solve the reliability and power quality problems caused by the access of large-scale distributed power, electric vehicles, interactive loads and so on. It has high engineering application and popularization value.

Key words: synchronous phasor measurement; distribution automation; reliability

国家重点研发计划项目“基于微型同步相量测量的智能配电网运行关键技术研究”(2017YFB0902800)

0 引言

随着城镇规模和工业用电规模的扩大，我国配电网规模也随之扩大，线路及设备增加，分布式电源、电力电子设备、互动负荷和电动汽车等新型电源及负荷的接入使原本单电源辐射型的结构扩展为多电源环网结构，配电网络变得更加复杂，对其全局监控管理及协调控制提出更高要求[1-4]。

传统的相量测量方式是由调度指挥中心通过电缆或者光纤将相量测量的同步信号发至测量端，并对电网进行监视。同步相量测量单元（PMU）在我国输电网上已经有大量的实际应用，主要配置于可靠性要求高、电网结构复杂和配有重要大负荷的变电站中[5-7]。但当前同步相量测量装置因体积大、价格昂贵的特点，使其无法大面积灵活配置，也使得其在大规模的配电网监测领域的应用非常受限。

将PMU应用到配电网中，设计可大规模应用的微型化、低成本化，并配置兼具配电网保护、控制等多功能的同步相量测量装置(μM－PMU)，可以全面提高配电网的可观、可测和可控的能力，这将会是未来配电网发展的一个必然趋势，具有重大的工程实用价值[8-10]。

1 配电网μM－PMU装置需求分析

1.1 装置需求

配电网规模的增大和复杂度的增高，以及分布式能源的并网对配电网的运行提出更高的要求[11-12]。与大电网的特点不同，针对配电网的稳定、高准确度和低成本的实时监测装置和系统的应用需求主要体现在以下几个方面。

1）配电系统运行环境较为复杂，对装置的抗干扰能力、防护能力有很高的要求。

2）配电网结构复杂、分支线较多，装置全面布点对成本要求较高。

3）配电网小电流接地故障、高阻接地故障频发，故障定位困难。

4）配电网线路短，三相不平衡，量测准确度难以满足要求。

5）分布式电源的接入，配电网出现双向潮流运行方式，波动性、随机性更加显著，谐波、噪声干扰严重。

6）配电系统装置具备多种应用场景，需要与现有自动化装置进行技术融合。

7）配电系统直接面向用户，动态特性难以监控。

1.2 装置应用场景分析

根据配电网实时监测系统的需求，在设计新型配电网μM－PMU的功能时，需要考虑配电网的应用场景，包括配电网故障诊断与定位、区域状态估计、微电网系统故障及孤岛的协调控制[13-14]。

在故障诊断与定位方面，配电网故障定位包含两个问题：一是识别出故障区段；二是故障测距。针对配电网元件众多、多分支线、负荷时变、三相不平衡和混合线路等对故障诊断与定位的挑战，以及大规模分布式电源、电动汽车接入带来的新问题，可应用新型配电网μM－PMU提供的电压、电流、相位和波形等同步数据进行精细化的故障检测、区段定位和故障测距，解决分布式电源大规模接入后配电网的故障精确定位问题[15-17]。考虑当前配电网大规模部署了配电自动化终端装置及自动化系统解决初步的故障诊断及定位问题，新型配电网μM－PMU为了达到大规模推广性，需要融合配电自动化终端装置的就地故障诊断和隔离功能[18]。

在状态估计方面，配电网的源荷变化快速，运行状态复杂多变，多源、多时间尺度和同步/异步数据混合形态下的配电网运行和故障状态的快速感知愈加困难，需要新型配电网μM－PMU提供同步相量测量数据，增加全局准确可观性，对运行状态进行快速感知和预测。配电自动化数据、营销系统数据、用采数据及应用同步相量装置后的量测数据是多时间尺度的混合数据，需要建立基于混合量测的配

电网拓扑结构分析与参数辨识方法，对配电网μM－PMU的通信方式和时标标识方式进行标准化设计。

在微电网系统故障及孤岛的协调控制方面，发挥同步相量测量数据对大规模分布式电源、柔性负荷及电动汽车等在配电网发生故障和运行优化方面的支撑作用，减少停电用户数量和停电时间，提高配电网的安全可靠运行水平。在微电网并网点、分布式电源并网点等重要节点的配电网μM－PMU需要具备数据采集和并网点控制等功能，完成合环和快速故障恢复等操作。

2 配电网μM－PMU硬件架构设计

在配电网μM－PMU的硬件架构设计上，为了满足功能应用的要求，设计采用融合配电自动化终端架构的分层式集成技术。基于ZYNQ芯片的硬件架构设计，分为电源模块、事件录波模块、通信模块、AC/IO模块、应用管理模块以及其他功能模块六部分。电源模块负责向CPU提供正常的工作电源；事件录波模块运行于主CPU板，主要实现事件管理、故障报告管理、日志系统管理和故障录波等功能；通信模块根据应用功能选择，提供协议解析脚本，支持应用自定义规约解析，分别实现装置与数据集中装置或DWAMS系统、装置与微电网协调控制装置之间的协议通信；AC/IO模块负责装置的模拟量数据采集、相量数据计算以及遥控开出等功能；应用管理模块负责各应用程序模块的管理，实现各应用模块对外开放的变量（输入、输出）通过总线注册到数据库中；其他功能模块负责面板LED灯管理、逻辑函数管理、统计、通道自检以及时间同步等功能。

在硬件配置上，需要考虑装置通道数量、通信和接口数量、开入开出情况以及功能配置。考虑到装置的实用性和可推广性，以现有配电自动化装置硬件设计为基础，做功能扩展。

通道的配置上需要具备同步测量三相电压、三相电流、零序电压和零序电流的通道，满足可以计算正序基波电压相量、正序基波电流相量、负序基波电压相量、负序基波电流相量、有功功率、无功功率、功率因数、频率和频率变化率的要求。接口上考虑成本采用航空插头，通道数量不少于四路电压、四路电流，可以参照配电自动化终端装置的设计，按开闭所和分支线的安装地点分别设计多间隔装置与单间隔装置。

在数字信号回路的设计上，配置信号采集功能，包括开关量遥信的信号不少于六路。配置就地和远方控制切换开关及控制硬压板，同时需要支持控制出口软压板。配置故障指示手动复归、自动复归和远程复归的按钮。对时方式选择外接GPS/BD信号或IRIG－B码对时方式。装置设计支持遥信采集及上送的功能，并且是遥信变位优先传递。

在通信方式的设计上，考虑到配电网分支线敷设范围广，需要装置具备光纤和无线专网的通信方式。与μM－PMU进行信息交互的装置和系统包括含同步相量测量信息的运行控制系统（DWAMS）、信息集中器和微电网协调控制设备等。μM－PMU通过同步采样和计算产生实时动态数据，每工频半周波产生一帧断面数据，数据帧中的相量、模拟量和开关量等数据均按绝对时间对齐，处理结束后将结果以DWAMS平台中规定好的传输频率等间隔抽取，并实时发送至DWAMS平台。

在功能设置上，装置需要配置故障检测和故障判别功能，具备负荷越限告警上送功能。测量功能方面，配置采样数据的次同步振荡监测功能，可将次同步振荡主导分量的幅值、频率上送主站。当电力系统发生次同步振荡时，μM－PMU起动采样数据录波，在数据帧的状态字中设置触发标识和原因，发出相应事件告警。其他需要配置的还包括实时数据存储记录、暂态录波记录、SOE事件记录、TV/TA断线告警、直流消失告警、装置故障告警和通信异常告警等常规终端装置的功能。

3 配电网μM－PMU软件架构设计

在配电网μM－PMU的软件架构设计上，为了满足功能应用的要求，区别于传统软件平台，采用低耦合、分层式软件架构设计，分为板级支持包、系统构件与应用模块三层，每层只使用下一层提供的接口和服务，保证层之间的封装性，实现了应用程序与平台软硬件的完全解耦。其中，板级支持包主要用来实现通信接口的控制与驱动、中断的管理及各模块的引导与初始化；系统构件主要负责信号与参数管理、模块间信号交互、任务调度与管理、系统监视与自诊断、程序调试、文件上装、下载；应用模块主要负责人机界面管理、对外通信管理、事件记录和录波管理等。

层次化的软件体系满足大规模复杂数据的访问和操作可定义、可遵循的规则，多个数据处理流程均可以有条不紊地在不同层次上进行协调工作，可以理解为在不同阶段均实现了数据共享，同时从机制上保证了不会发生数据误删除、误修改和误引用，使系统结构变得更加明确、易实现和易维护，有效降低了层与层之间的依赖性，提高了应用程序的模块化、标准化水平，使应用程序的开发和升级不受平台软硬件升级换代的影响。

同时，根据装置软件运行特性，对装置运行的关键指标进行实时监测。根据监测信息进行异常状态的实时捕获，对于运行异常但不影响装置运行的软件模块，设计阶段即采用低耦合架构设计，在模块运行异常时，采取模块微重启的方式执行恢复。

4 配电网μM－PMU数据动态融合技术

配电网μM－PMU装置向与其进行信息交互的装置和系统发送的数据包括实时动态数据、历史动态数据和暂态录波数据三种基础数据。由于数据的混合和多样性，需要采用数据动态融合的技术保证传输和计算效率。装置的ARM单元中的处理模块包括处理量测数据的PMU元件和处理常规配电自动化功能的DTU元件。PMU元件实时运行于ARM1内，DTU元件的起停取决于系统运行特征量及CPU综合负荷率，并根据当前ARM1负荷状态决策是否切换功能于ARM2中，另外，通过对运行关键指标的实时监测，实现DTU元件运行周期的动态调整，保证CPU运行于最优状态。装置数据动态融合示意图如图1所示。

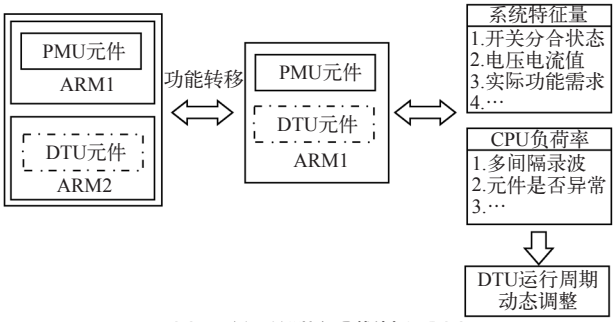


Fig. 1 Schematic diagram of device data dynamic fusion

5 配电网μM－PMU装置工程应用分析

装置工程应用集成示意图如图2所示。配电网μM－PMU实际应用时，设计安装在环网柜、变电站和重要配电线路等位置，需要配合高准确度电子式互感器、数据集中装置和含同步相量信息的智能配电网运行分析与协调控制系统等其他设备，分别部署在主站层、通信层、终端层和设备层，为状态估计、故障诊断和协调控制提供高准确度同步相量信息和故障情况下电流、电压波形，提高系统可观测能力。

主站层部署含同步相量信息的智能配电网运行分析与协调控制系统，与配电网μM－PMU统一数据采集接口设计方案，保证从微型μM－PMU中获取配电网关键节点的同步相量量测数据，满足配电网关键负荷节点、分布式电源与柔性负荷接入点的监控需求。同时，系统与PMS、营销系统、用采系统、EMS和DMS进行信息交互，保证从PMS中获取设备台账信息，从营销系统中获取用户关系型数据，从用采系统中获取配电变压器量测数据及电量数据，从EMS中获取关口数据及输电网等效数

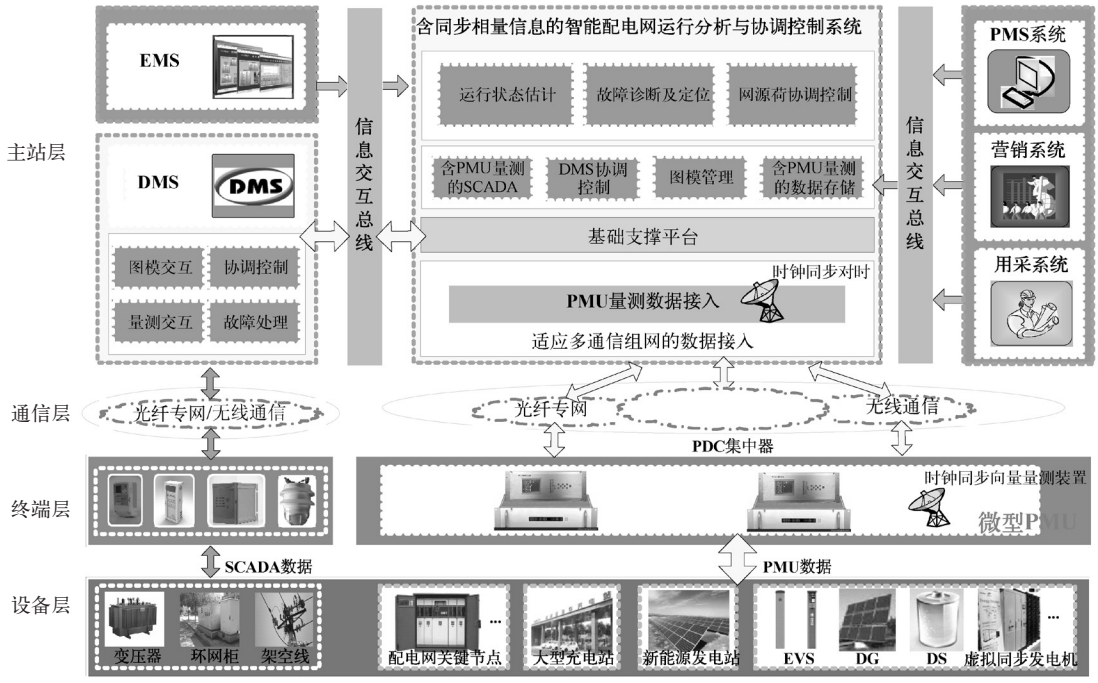


图2 装置工程应用集成示意图

Fig. 2 Integrated schematic diagram of plant engineering application

据等，从DMS中获取图模数据、量测数据并向DMS发送针对传统配电终端的遥控命令，以满足故障处理和协调控制的需求。

在通信层，可依据所建工程的信息传输的需求，采用光纤、无线或光纤结合无线的传输方式，站端的μM－PMU可采用LTE230无线专网方式将数据集中到变电站的数据集中装置，非站端的μM－PMU可采用无线专网或光纤传输的方式将数据集中到数据集中装置，最终数据集中装置采用光纤与DWAMS主站通信。

在终端层和设备层，考虑到配电网终端设备众多，数据来源的复杂性和异构性特征明显，需要配用电全局全量数据，对μM－PMU的量测模型、设备模型及其关系模型进行统一的数据建模，对所有装置的静态数据、动态数据和暂态录波数据制定同步管理、存储管理和访问管理等数据管控机制，满足异构数据库一体化存储、应用和统一访问的需求。

6 结束语

本文设计了一种基于同步相量测量信息的配电网多功能终端装置，对配电网同步相量数据的需求和应用场景进行分析，从而得出装置的功能定位。硬件设计上采用融合配电自动化终端架构的分层式集成技术，软件上采用低耦合、分层式软件架构。同时，设计了装置的数据动态融合方案，保证运行效率。在工程应用上提出在主站层、通信层、终端层和设备层部署装置和系统的集成方案。本文设计的μM－PMU灵活运用同步量测信息技术，解决规模分布式电源、电动汽车和互动负荷等接入给配电网带来的可靠性和电能质量问题，具有很高的工程应用推广价值。

参考文献

[1] 黄晓明，凌万水，吴栋萁，等．基于故障树分析法的配电自动化实用化运维指标研究[J]．电力系统保护与控制，2017，45(24)：92-98.

[2] 沈欣炜，朱守真，郑竞宏，等．考虑分布式电源及储能配合的主动配电网规划运行联合优化[J]．电网技术，2015，39(7)：1913-1920.

[3] 董新洲，葛耀中，徐丙垠．利用暂态电流行波的

输电线路故障测距研究[J]．中国电机工程学报，1999，19(4)：76-80．
[4] 王克英，穆钢，陈学允．计及PMU的状态估计精度分析及配置研究[J]．中国电机工程学报，2001，21(8)：29-33．
[5] 王波，陆进军．基于同步相量测量技术的励磁系统调节性能分析方法及其系统实现[J]．电力系统保护与控制，2012，40(3)：135-140．
[6] 蔡超，陆于平．一种提高智能变电站 PMU 相量测量精度的改进采样值调整算法[J]．电力自动化设备，2014，34(3)：149-154．
[7] 袁明军，江浩，黎强，等．四统一四规范同步相量测量装置关键技术研究[J]．电力系统保护与控制，2019，47(4)：182-187．
[8] 李召兄，吴丽，吴兴全，等．含光伏电站的并网系统线路故障测距研究[J]．电力系统保护与控制，2018，46(22)：104-108．
[9] 吴星，刘天琪，李兴源，等．基于WAMS/SCADA数据兼容和改进FCM聚类算法的PMU最优配置[J]．电网技术，2014，38(3)：756-761．
[10] 李瑞生．适用主动配电网的差动保护方案研究[J]．电力系统保护与控制，2015，43(12)：104-109．
[11] 马腾飞，高亮．含多微网的主动配电网故障区段定位算法[J]．电力系统保护与控制，2017，45(7)：64-68．
[12] 戴志辉，崇志强，李川，等．基于电压偏差向量2-范数的主动配电网故障定位新方法[J]．电力系统自动化，2015，39(15)：96-102．
[13] 张红飞，汤明金，程志友，等．一种快速的配电网单相接地故障时域测距方法[J]．电力系统保护与控制，2018，46(17)：24-30．
[14] 李辉，徐建源，刘飞，等．高性能同步相量测量装置的研制与应用[J]．电力系统保护与控制，2010，38(7)：81-85，90．
[15] 袁澎，艾芊，赵媛媛．基于改进的遗传模拟退火算法和误差度分析原理的PMU多目标优化配置[J]．中国电机工程学报，2014，34(13)：2178-2187．
[16] 邢洁，韩学山，武鹏．使潮流方程直接可解的PMU配置方法的改进[J]．电网技术，2006，30(11)：30-34．
[17] 常鲜戎，王旋，方学珍．基波电流瞬时值检测及同步电流相量测量方法[J]．电力系统保护与控制，2013，41(11)：60-66．
[18] 沈健，周斌，汪昀，等．提升PMU动态测量性能的若干方法[J]．电力系统保护与控制，2015，43(19)：89-94．

作者简介



徐志华

徐志华（1987－），男，工程师，研究方向为配电自动化。

(收稿日期：2019－04－11)EA