

## 智能配电网广域同步相量测量体系设计方案研究

熊文, 危国恩, 王莉, 吴任博, 徐全, 陈吕鹏

引用本文:

熊文, 危国恩, 王莉, 等. 智能配电网广域同步相量测量体系设计方案研究[J]. 南方能源建设, 2021, 8(2): 85-90.

XIONG Wen, WEI Guoen, WANG Li, et al. Research on the Design Scheme of Wide Area Synchronous Phasor Measurement System for Smart Distribution Grid[J]. *Southern Energy Construction*, 2021, 8(2): 85-90.

---

## 相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

### 多端柔性直流配电网的可靠性和经济性评估

Reliability and Economy Assessment of Multi-terminal Flexible DC Distribution Network

南方能源建设. 2020, 7(4): 67-74 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.04.010>

### 高可靠性主动配电网供电模式研究

Study on Feeding Mode for Active Distribution System with High Reliability Demand

南方能源建设. 2017, 4(1): 92-95 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.01.017>

### 智能配电网项目综合效益分析评价方法研究

Research on Comprehensive Benefits Evaluation of Smart Distribution Grid

南方能源建设. 2017, 4(1): 134-137 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.01.026>

### 构建一流智能电网标准设计体系研究实践

Research on the Construction of First-class Smart Grid Standard Design System

南方能源建设. 2020, 7(z1): 1-7 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.S1.001>

### 智能配电终端技术现状分析与市场前景探讨

Analysis of Technology Situation and Discussion on Market Potential for Intelligent Power Distribution Terminal

南方能源建设. 2016, 3(z1): 88-92 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.S1.019>

# 智能配电网广域同步相量测量体系设计方案研究

熊文<sup>1</sup>, 危国恩<sup>1</sup>, 王莉<sup>1</sup>, 吴任博<sup>1</sup>, 徐全<sup>2</sup>, 陈吕鹏<sup>3,✉</sup>

(1. 广东电网有限责任公司广州供电局, 广州 510620; 2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510530;  
3. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

**摘要:** [目的] 随着配电网大规模分布式电源和柔性负荷的接入, 传统终端测量的准确性和速度难以满足实际需要, 而采用新一代配电网微型同步相量测量装置 (Distribution Micro Synchronous Phasor Measurement Unit, D-PMU) 是解决上述问题的一个重要途径。[方法] 首先, 分析了D-PMU的工作原理和应用; 其次, 提出了配电网同步相量测量系统及安装部署方案; 然后, 根据示范区域的业务需求, 提出配电网广域测量控制系统的体系架构及部署方案; 最后, 对D-PMU在智能配电网的应用进行了总结。[结果] 示范建设成效验证了项目所研制的关键技术及设计方案的可行性和经济性。[结论] 为D-PMU进一步与配网其他传统领域融合推广提供了丰富的工程经验。

**关键词:** 配电网微型同步相量单元; 智能配电网; 设计方案; 示范工程案例

中图分类号: TM7; TM72

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2021)02-0085-06

开放科学(资源服务)二维码:



## Research on the Design Scheme of Wide Area Synchronous Phasor Measurement System for Smart Distribution Grid

XIONG Wen<sup>1</sup>, WEI Guoen<sup>1</sup>, WANG Li<sup>1</sup>, WU Renbo<sup>1</sup>, XU Quan<sup>2</sup>, CHEN Lüpeng<sup>3,✉</sup>

(1. Guangdong Power Grid Co., Ltd. Guangzhou Power Supply Bureau, Guangzhou 510620, China;

2. CSG Electric Power Research Institute, Guangzhou 510530, China;

3. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** [Introduction] With the access of large-scale distributed generation and flexible load in distribution network, the accuracy and speed of traditional terminal measurement are difficult to meet the actual needs, while the new generation of distribution micro synchronous phasor measurement unit (D-PMU) is an important way to solve the above problems. [Method] Firstly, the working principle and application of D-PMU were analyzed; secondly, the synchronized phasor measurement system of distribution network and its installation and deployment scheme were proposed; then, according to the requirements of the demonstration area, the architecture and deployment scheme of wide area measurement and control system of distribution network were proposed; finally, the application of D-PMU in intelligent distribution network was summarized. [Results] The effectiveness of the demonstration construction verifies the feasibility and economy of the key technology and design scheme developed by the project. [Conclusion] It provides rich engineering experience for the further integration and promotion of D-PMU with other traditional fields of distribution network.

**Key words:** distribution micro synchronous phasor measurement unit; smart distribution network; design scheme; case analysis of demonstration projects

2095-8676 © 2021 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2020-11-30 修回日期: 2021-03-31

基金项目: 国家重点研发计划“智能电网技术与装备”重点专项“配电网广域测量控制技术研究与应用(2017YFB0902900)”

随着大规模分布式电源和电动汽车等负荷的接入<sup>[1]</sup>, 配电网运行状态更加复杂多变, 传统终端的测量面临谐波、间谐波、噪声、阶跃等干扰, 测量结果的准确性和快速性均面临巨大挑战<sup>[2-3]</sup>。

同步相量测量装置 (Phasor Measurement Unit, PMU) 已在电力系统发电和输电网中得到广泛应用<sup>[4-6]</sup>, 目前也正积极向配电网推广<sup>[7-9]</sup>。不同于传统的测控装置, PMU 具备三个显著的特征: “快”、“准”和“全”。“快”指 PMU 需支持的上传速率和动态响应速度快; “准”指无论动态还是稳态情况, PMU 均需满足严格的精度考核指标; “全”指 PMU 不仅可以测出幅值、频率和功率等, 同时可测出全网的同步相角和功角, 同时量测数据带全网统一的时标。正是由于这三个特征, PMU 已不仅仅是其发明初期仅用来监测同步相角的装置, 而已经成为电力系统不可或缺的工具。在向配电网进行推广的过程中, 配电网同步相量测量装置与配网传统终端进行了融合, 形成一种配电网新一代配电网微型同步相量测量装置 (Distribution Micro Synchronous Phasor Measurement Unit, D-PMU), 具有传统测控保护类终端的功能, 同时具有快速性、准确性、可靠性和扩展性, 应用领域也

从监测推广到辨识、分析、控制和保护。

为在配电网推广应用此新技术, 亟需设计 D-PMU 安装部署方案和典型应用场景的示范工程, 本文将从 D-PMU 的技术原理及作用、系统及安装部署方案和工程案例三个部分进行介绍。

## 1 配电网微型同步相量单元的原理和应用

D-PMU 能以微秒级采样周期采集配电网运行过程中的电流、电压等相量信息, 计算并获得测点功率、相位、功角等信息, 通过 GPS/北斗提供时间同步信号, D-PMU 可将每个状态量同步到同一个时间断面上, 对配电网运行信息进行实时同步监测。

通常 D-PMU 包含以下几个模块:

- 1) 处理器模块。
- 2) 通信模块。
- 3) 北斗/GPS 时钟授时模块。
- 4) 模拟和数字量模块。

D-PMU 的系统总体结构如图 1 所示。

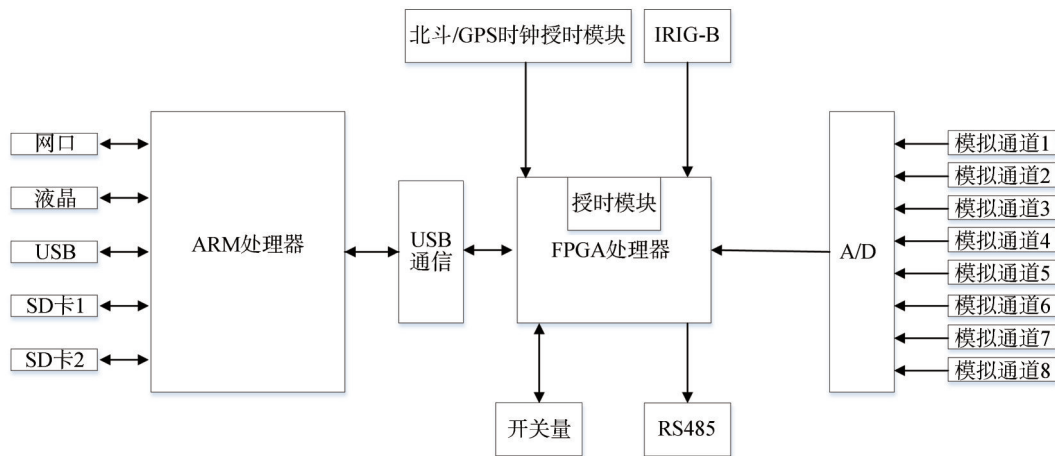


图1 D-PMU 的系统总体结构

Fig. 1 Overall system structure of D-PMU

全面掌握配电网运行状态, 是协调优化、正确决策的关键前提条件。D-PMU 的量测精度和采样频率均高于传统常规量测手段。因此, 已在配电网多个领域得到关注和研究, 主要应用领域包括:

### 1) 配电网的状态估计和态势感知<sup>[10-13]</sup>

配电网中大规模的风电、光伏等分布式电源以及电动汽车的接入, 导致配电网谐波、间谐波、电压暂升暂降、频率偏差等电能质量问题更加突出。同时新能源的随机冲击和负荷的动态波动, 对配电网的安全可靠运行带来了新的挑战。因此, 需要建

立以高精度和快响应的同步相量测量装置为基础的适用于配电网的新一代状态估计和态势感知系统, 以保障配电网安全可靠运行。配电网状态估计的难点主要在于配电网谐波噪声等干扰严重导致量测点的误差较大, 同时量测数据较少, 而增加高精度的同步相量测量数据将有利于解决这些问题。

### 2) 故障诊断和精确定位<sup>[14-15]</sup>

当前配电网故障诊断和精确定位难点主要如下: (a) 配电网运行方式和网络拓扑动态变化, 随着分布式电源接入, 线路潮流的方向大小等随机变

化,导致故障机理难以分析;(b)配电网谐波噪声干扰严重,加大了故障信息提取难度;(c)配电网节点分支较多,增加了故障线路和非故障线路的区分难度。传统故障诊断和定位技术是基于电流幅值,并综合多点的量测结果来确定故障点,但系统中需要的量测节点众多,且各节点不具备同步性,仅能利用故障电流的幅值信息。同步相量测量装置引入,增加了高速率的量测数据和同步相角等信息。

### 3) 协调控制<sup>[16]</sup>

基于同步量测数据的多维信息融合的配电网协调控制,主要集中在:继电保护、配网自动化、电压无功控制和低周减载等方面。考虑配电网电动汽车和大规模分布式电源(光伏、风机等)接入及用户与电网的供需互动,基于PMU的同步实时数据与分布式电源、柔性负荷、用电营销等系统信息融合的协调控制技术,目前也正在研究中。多维信息融合的协调控制的一个基础是准确快速获取电力系统各节点的电压电流信息,而同步相量测量装置由于其快速的相量上传和高精度的相量测量,同时可以测出各节点的同步信息并带有全网统一的时标,所以可以快速反映电力系统动态运行状态,是多维信息体系中重要的基础数据。

## 2 配电同步相量测量系统及安装部署方案

### 2.1 典型配电网运行监控开关柜

典型配电网运行监控开关柜结构如图2所示,主要包括柜体500、三相五柱式电压互感器10、行波传感器11、进线三相双绕组电流互感器12、出线三相双绕组电流互感器13和同步相量测量装置14。具体地,三相五柱式电压互感器10的第一端连接母线,第二端连接行波传感器11的一端,行波传感器11的另一端接地;进线三相双绕组电流互感器12的第一端连接母线,第二端通过连接电缆23连接外部电力设备;出线三相双绕组电流互感器13的第一端连接母线,第二端通过出线电缆24外部设备;三相五柱式电压互感器10的第三端、行波传感器11的第三端、进线三相双绕组电流互感器12的第三端和出线三相双绕组电压互感器13的第三端均通过控制电缆连接到同步相量测量装置14,将所采集的数据传输到同步相量测量装置14进行

分析,从而能够实现对配电网的运行调度。采用上述配电网运行监控开关柜对配电网进行监控和运行调度,在适应配电网不断发展的需求的同时,能够不对原有的开关柜进行改造,造成的停电时间较少,大大提高了配电网的可靠性。

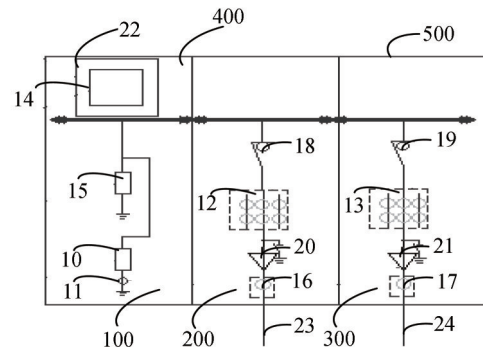


图2 配电网运行监控开关柜结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of distribution network operation monitoring switch cabinet

通过航空插头22把同步相量测量装置接入开关柜中,有效地提高了操作便利性,并且,在同步相量测量装置14发生故障时,可以直接替换,不用停电维修。

根据功能的不一样,将配电网运行监控开关柜内的各个器件按照功能划分,分别置于不同的间隔内,每一间隔内的器件均组成完整电路。电压互感器间隔100内的电路、进线间隔200内的电路、出线间隔300内的电路和二次小室400。相互之间独立工作,在其中一个间隔内的电路出现故障时,不会对另外间隔的电路产生影响,增强了配电网运行监控开关柜的可靠性。

### 2.2 配电网同步相量测量系统安装部署方案

配电网同步相量测量系统结构示意图如图3所示,章节2.1所述的配电网运行监控开关柜,还包括待改造开关柜,配电网运行监控开关柜通过连接电缆23与待改造开关柜的出线间隔的冷缩电缆头25相连接。待改造开关柜的进线间隔的冷缩电缆头26的一端通过待改造开关柜的进线开关与母线连接,另一端连接进线电缆27,进一步地通过进线电缆27与外部设备相连。待改造开关柜通过进线间隔的冷缩电缆头26与外部电力系统连接,从而采集外部电力系统的电压与电流,对外部电力系统的电压与电流进行监控。



### 3.2 示范工程高级功能设计

示范工程功能应用主要包括:自适应状态估计、精确故障定位、源网荷协调控制等功能。

#### 3.2.1 自适应状态估计

在示范区分别设置配网同步相量测量装置覆盖率达100%、SCADA+PMU覆盖率达100%以及量测不足三种情况,用于对比测试不同配置下状态估计效果。所以选取WL站部分和BTF2、BTF3、BTF19配网PMU覆盖率达100%,可验证量测充足情况下的快速状态估计效果。选取BTF9作为SCADA和配网PMU覆盖率达到100%示范区域,以验证量测充足情况下的高精度状态估计效果。选取BTF1、BTF4、BTF8、BTF10、BTF13、BTF14、BTF16以验证量测不足情况下的鲁棒状态估计效果。

#### 3.2.2 精确故障定位功能

示范区考虑MZF5线路较长,分支较多,电缆和架空线混合,多T接,所以选取为从化示范区的精确故障定位高级应用功能示范点。选取线路首端即MZ变电站F5馈线端,分支末端HKCLJLD配变、HXC配变、KYXJC和HXXY专用高压房安装带有行波功能的同步相量测量装置,以示范高精度故障定位功能。

#### 3.2.3 源网荷协调控制及孤岛运行

示范区考虑BT变电站为主要供电电源,选取BT变电站及下属各馈线示范源网荷协调控制高级应用功能和孤岛切换及稳定控制功能。考虑工业园区含光伏电源容量为17.8 MWp, CCHP (Combined Cooling Heating and Power, 冷热电联产系统)容量为30 MW,充电桩容量为0.8 MW,工业大负荷容量为66.1 MW,所以此示范区重点示范源网荷协调控制。考虑BTF8、BTF9、BTF10涵盖医院、政府、派出所、客运站等重要负荷,选取此示范区重点示范孤岛切换及稳定控制功能。

### 3.3 示范工程建设成效

示范区建成后,示范区内状态估计精度高于95%;故障检测准确率高于99%;故障定位精度小于0.2 km;源-网-荷快速协调控制系统的闭环控制平均时延小于200 ms。

通过配电网故障诊断与精确定位技术,可大幅提高故障检测准确率,平均缩短故障处理时间

48.25 min,年减少用户停电损失约314万元。

通过源荷协调控制,实现配电网与用户的灵活互动,削减示范区柔性负荷峰值约13%,延缓输配电基础设施投资约416万元,减少调峰备用电源建设费用约1170万元。

### 3.4 示范工程意义

建成涵盖柔性负荷、分布式电源、充电桩等配网典型负荷,涵盖变电站、配电房、集装箱、户外杆塔等配网典型安装环境,涵盖基于D-PMU的自适应状态估计、故障精确定位和源网荷协调控制及孤岛运行等配网典型高级应用功能的示范工程,对国家重点研发计划项目相关内容进行试验,为后续大规模推广和复制积累工程经验。

## 4 结论

本文详细介绍了配电网同步相量测量装置的技术原理及作用、系统及安装部署方案和工程案例。本文的先进性和主要工作如下:

1) 分析了配电网微型同步相量单元的工作原理和典型的应用场景。

2) 提出了一种配电网同步相量测量系统及安装部署方案,该方案不需要对原有的开关柜进行改造,造成的停电时间较少,可大幅提高配电网的可靠性。

3) 提出了D-PMU高级功能示范设计方案,通过关键技术的示范应用,全面提升配电网的安全与经济运行水平,具有显著的经济效益。

本文工作为D-PMU进一步与配网其他传统领域融合推广提供了丰富的工程经验。在进一步推广应用时,需要针对不同的区域特点和功能需求,研究D-PMU的最优布点方案,提高经济性。

#### 参考文献:

- [1] 董逸超,王守相,闫秉科. 配电网分布式电源接纳能力评估方法与提升技术研究综述[J]. 电网技术,2019,43(7):2258-2266.  
DONG Y C, WANG S X, YAN B K. Review on evaluation methods and improvement techniques of DG hosting capacity in distribution network [J]. Power System Technology, 2019, 43 (7):2258-2266.
- [2] 于建成,迟福建,徐科,等. 分布式电源接入对电网的影响分析[J]. 电力系统及其自动化学报,2012,24(1):138-141.  
YU J C, CHI F J, XU K, et al. Analysis of the impact of distributed generation on power grid [J]. Proceedings of the CSU-EP-

- SA, 2012, 24(1):138-141.
- [3] 辛华. 低碳经济与电动汽车发展:趋势与对策 [J]. 开放导报, 2009(5):31-35.  
XIN H. Low carbon economy and electric vehicles: trends and policies [J]. China Opening Herald, 2009(5):31-35.
- [4] 段刚, 严亚勤, 谢晓冬, 等. 广域相量测量技术发展现状与展望 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1):73-80.  
DUAN G, YAN Y Q, XIE X D, et al. Development status quo and tendency of wide area phasor measuring technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1):73-80.
- [5] 张敏, 沈健, 侯明国, 等. 相量测量单元实现同步振荡在线辨识和告警的探讨 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16):143-146+152.  
ZHANG M, SHEN J, HOU M G, et al. Discussion on on-line identification and warning of subsynchronous oscillation for phasor measuring unit [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16):143-146+152.
- [6] 朱利鹏, 陆超, 黄河, 等. 基于广域时序数据挖掘策略的暂态电压稳定评估 [J]. 电网技术, 2016, 40(1):180-185.  
ZHU L P, LU C, HUANG H, et al. Wide-area time series data mining based transient voltage stability assessment [J]. Power System Technology, 2016, 40(1):180-185.
- [7] 邓丰, 李鹏, 曾祥君, 等. 基于D-PMU的配电网故障选线和定位方法 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44(19):160-167.  
DENG F, LI P, ZENG X J, et al. Fault line selection and location method based on synchrophasor measurement unit for distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19):160-167.
- [8] 王宾, 孙华东, 张道农. 配电网信息共享与同步相量测量应用技术评述 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(增刊1):1-7.  
WANG B, SUN H D, ZHANG D N. Review on data sharing and synchronized phasor measurement technique with application in distribution systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(Supp. 1):1-7.
- [9] LIU Y, ZHAN L, ZHANG Y, et al. Wide-area-measurement system development at the distribution level: an FNET/grideye example [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(2):721-731.
- [10] 孔祥玉, 袁泉泉, 王玉婷, 等. 配电网D-PMU优化配置方法和软件实现技术 [J]. 南方电网技术, 2019, 13(4):25-30.  
KONG X Y, YUAN X X, WANG Y T, et al. Optimal configuration method and software implementation technology for D-PMU in distribution network [J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(4):25-30.
- [11] 刘灏, 毕天姝, 徐全, 等. 配电网高精度同步相量测量技术方案与展望 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44(18):23-29.  
LIU H, BI T S, XU Q, et al. Scheme and prospect of high-precision synchrophasor measurement technology for distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(18):23-29.
- [12] 盛万兴, 方恒福, 沈玉兰, 等. 考虑量测时延基于3种数据融合的配网状态估计 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(12):108-115.  
SHENG W X, FANG H F, SHEN Y L, et al. Distribution state estimation based on fusion of three data sources considering measurement delay [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 31(12):108-115.
- [13] 王澍, 严正, 孔祥瑞, 等. 主动配电网多目标PMU最优配置 [J]. 电网技术, 2019, 43(3):833-840.  
WANG S, YAN Z, KONG X R, et al. Multi-objective optimal placement of PMU in active distribution network [J]. Power System Technology, 2019, 43(3):833-840.
- [14] 张黎元, 黄潇潇, 张杰, 等. 基于D-PMU量测信息的有源配电网故障诊断方法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(10):145-150.  
ZHANG L Y, HUANG X X, ZHANG J, et al. Fault diagnosis method for active power distribution network based on D-PMU measurement information [J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2019, 31(10):145-150.
- [15] 于力, 焦在滨, 王晓鹏, 等. 基于PMU的中压配电网精确故障定位方法及关键技术 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44(18):30-38.  
YU L, JIAO Z B, WANG X P, et al. Accurate fault location scheme and key technology of medium-voltage distribution network with synchrophasor measurement units [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(18):30-38.
- [16] 徐箭, 廖思阳, 魏聪颖, 等. 基于广域量测信息的配电网协调控制技术展望 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44(18):12-22.  
XU J, LIAO S Y, WEI C Y, et al. Prospect of coordinated control technology in distribution network based on wide-area measurement information [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(18):12-22.

#### 作者简介:

##### 熊文

1973-, 男, 湖南常德人, 高级工程师, 博士, 主要从事电力系统调度 (e-mail) dqxw66@sina.com。



熊文

##### 陈吕鹏 (通信作者)

1995-, 男, 海南文昌人, 硕士, 主要从事配电网规划设计 (e-mail) chenlvpeng@gedi.com.cn。

(责任编辑 李辉)