

智能变电站 PMU 装置测试仪研制

何 笠¹ 滕予非¹ 石 涛² 冯世林¹ 刘明忠¹ 黄俏音³ 陈罗飞³ 李东升³

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610041;

2. 四川蜀能电力有限公司高新分公司 四川 成都 610041;

3. 北京博电新力电气股份有限公司 北京 100176)

摘要: 目前尚缺乏针对智能变电站有效的 PMU 装置测试手段。根据智能变电站 PMU 装置接线和传输协议等方面介绍智能变电站 PMU 测试仪研制的需求,并开展智能变电站 PMU 测试仪的研制。根据 PMU 装置的安装特点,提出 PMU 装置不同安装方式下的测试流程。通过智能变电站 PMU 装置测试方法和 PMU 测试仪的研制,能快速实现对智能变电站 PMU 装置的精度检测,减少了繁琐的数据处理工作和报告编制工作,提高了智能变电站 PMU 装置测试效率和正确性。

关键词: 智能变电站; PMU 装置; PMU 测试仪; 测试流程; 精度检测

中图分类号: TM76 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2018)03-0061-07

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.03.013

Research on Development of PMU Tester in Smart Substation

He Li¹, Teng Yufei¹, Shi Tao², Feng Shilin¹, Liu Mingzhong¹,

Huang Qiaoyin³, Chen Luofei³, Li Dongsheng³

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. Sichuan Shuneng Electric Power Co., Ltd., (Gaoxin Branch), Chengdu 610041, Sichuan, China;

3. Ponovo Power Co., Ltd., Beijing 100176, China)

Abstract: There lacks the effective testing methods for PMU in smart substation at present. The demands of PMU tester in smart substation are introduced according to the connection of PMU and data transfer protocol in smart substation, and PMU tester is developed based on these requirements. The testing procedure is proposed according to the characteristics of PMU installation. The proposed methods and the development of PMU tester in smart substation can quickly implement the accuracy test of PMU, simplify the complicated data processing and report composing, and improve the testing efficiency and validity of PMU in smart substation.

Key words: smart substation; PMU; PMU tester; testing procedure; accuracy test

0 引 言

PMU 装置能够基于同一时标测量电力系统各种状态下的各个元件的电压、电流、有功以及无功等的幅值和相角^[1-2]。其广泛应用在电力系统的主站 WAMS 动态监测、状态估计、系统保护、区域稳定控制、系统分析和预测等领域^[3-4],是保障电网安全稳定运行的重要设备^[5-6]。

PMU 装置的检测一直是学术界关注的焦点^[7]。

文献[8]提出了 PMU 装置的动态算法,并根据其完成检测系统的研制。文献[9]讲述了 PMU 装置的测试与评估标准。文献[10]详尽阐述了 PMU 装置的研制和运行标准,并将两者进行了比对。文献[11]针对智能变电站,研制了基于 IEC 61850 协议的 PMU 装置测试仪。目前缺少有效的智能变电站 PMU 测试手段,而且测试的诸多项目均是在各种运行条件下的静态和动态响应精度^[12-13]。检测项目繁多,测试误差难以控制,需要大量的工作来完成数据处理和试验报告的编写,工作量较大且正确性也难

以保证^[14]。

为了解决智能变电站 PMU 测试的上述问题 根据文献 [14] ,研制了一种智能变电站 PMU 装置测试仪。该测试仪通过 IEC 61850 - 9 - 2 协议发送测试数据并通过接收 PMU 集中单元以太网协议信号来实现闭环比对测试;该测试仪针对智能变电站 PMU 装置采集单元和集中单元安装特点 ,完成 PMU 装置的测试工作;通过测试项目自动勾选 ,完成 PMU 装置的静态和动态响应精度检验及误差计算 ,并最终由 PMU 测试仪自动生成测试报告。

1 PMU 测试仪研制

1.1 智能变电站 PMU 装置特点及测试仪功能分析

智能变电站 PMU 装置主要是由采集单元和集中单元构成 ,两者通过光纤连接 ,其中采集单元为光纤接口 ,接收电流电压等 IEC 61850 - 9 - 2 光纤信号 ,集中单元处理这些光纤信号 ,将其转换为以太网协议信号后通过网口输出。

根据智能变电站 PMU 装置的特点 ,其测试仪在整个检测过程中 ,主要起到了 3 个方面的作用:为 PMU 装置采集单元发送数据;接收 PMU 装置集中单元数据;数据比对处理以及检测报告的自动生成。其中:PMU 测试仪需设置数据发送模块 ,能够模拟合并单元发送 IEC 61850 - 9 - 2 报文给 PMU 装置采集单元;PMU 测试仪需设置有数据接收模块 ,能够通过网线从 PMU 集中单元接收以太网报文;GPS 将正确接收到时钟 ,同时与 PMU 采集单元和 PMU 集中单元同步;PMU 测试需要将发送数据和接收数据通过软件程序进行解析计算比对 ,并将最终的结果生成试验报告。

1.2 测试仪研制的硬件架构

PMU 测试仪由 ARM 板和 DSP 板、FPGA 板、对时回路组成 ,其中对时回路可以接收 GPS 信号。

如图 1 所示 ,ARM 板和 DSP 板中的 ARM 能够与外部 PC 机通信 ,通过以太网接收来自 PC 客户端上的测试仪软件的命令、上传给测试仪采样值以及 GOOSE 探测结果。ARM 把接收到的命令下达给 DSP ,由 DSP 产生相应的数字化信号 ,然后 DSP 通过和 FPGA 之间的地址总线、数据总线、控制信号把数据及命令下发给 FPGA ,FPGA 中的数据处理及光口、组数配置单元根据接收到的命令确定本次操作。发送的数据按 IEC 61850 - 9 - 2 规格打包 ,标示特

定的时标 ,光纤以太网口负责测试数据的输出 ,转换为光纤信号输出到被测 PMU 采集单元中。

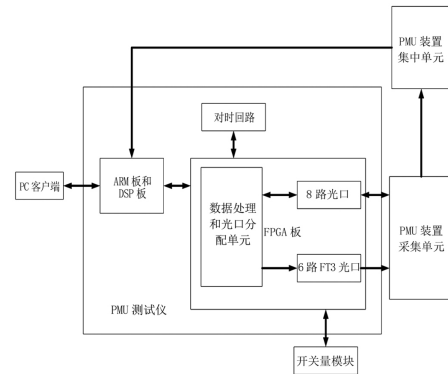


图 1 智能变电站 PMU 测试仪硬件架构

当 PMU 采集单元将数据传输至 PMU 集中单元后 ,PMU 集中单元将数据汇集并转化成以太网络格式 ,回送至 PMU 测试仪。通过对时标解析出发送数据和回送数据值 ,将两者作对比后通过软件算法计算出精度误差。

1.3 测试仪算法解析

1) 解析算法

当测试仪开始测试时 ,可初始化 t_1 ,然后经过一个周期 Δt_1 的延时后 ,发送 IEC 61850 - 9 - 2 数据进入 PMU 装置采集单元。若测试不停止 ,则自动增加 $\Delta t_n (n = 1, 2, 3, \dots)$,继续发送 IEC 61850 - 9 - 2 数据至 PMU 装置采集单元 ,若测试结束或人为停止时 ,则生成测试数据文件。由于 PMU 测试仪发送的数据为 IEC 61850 - 9 - 2 格式数据 ,而接收的数据为以太网数据格式^[15] ,两者格式不同 ,则需要对两者进行解析 ,解析过程如图 2 所示 ,通过解析以太网协议数据的时间和实际数据来进行数据比对。

PMU 测试仪电流电压基波检测计算采用全周滑动数据窗 DFT 算法 ,其相量递推公式为

$$A_{c_1}(k) + jA_{s_1}(k) = A_{c_1}(k-1) + \frac{2}{N}[x(k) - x(k-N)]\cos\left(\frac{2k\pi}{N}\right) + j \times \left\{ A_{s_1}(k-1) + \frac{2}{N}[x(k) - x(k-N)]\sin\left(\frac{2k\pi}{N}\right) \right\} \quad (1)$$

相角计算公式为

$$\varphi(k) = \arctan \left\{ \frac{A_{s_1}(k-1) + \frac{2}{N}[x(k) - x(k-N)]\sin\left(\frac{2k\pi}{N}\right)}{A_{c_1}(k-1) + \frac{2}{N}[x(k) - x(k-N)]\cos\left(\frac{2k\pi}{N}\right)} \right\} \quad (2)$$

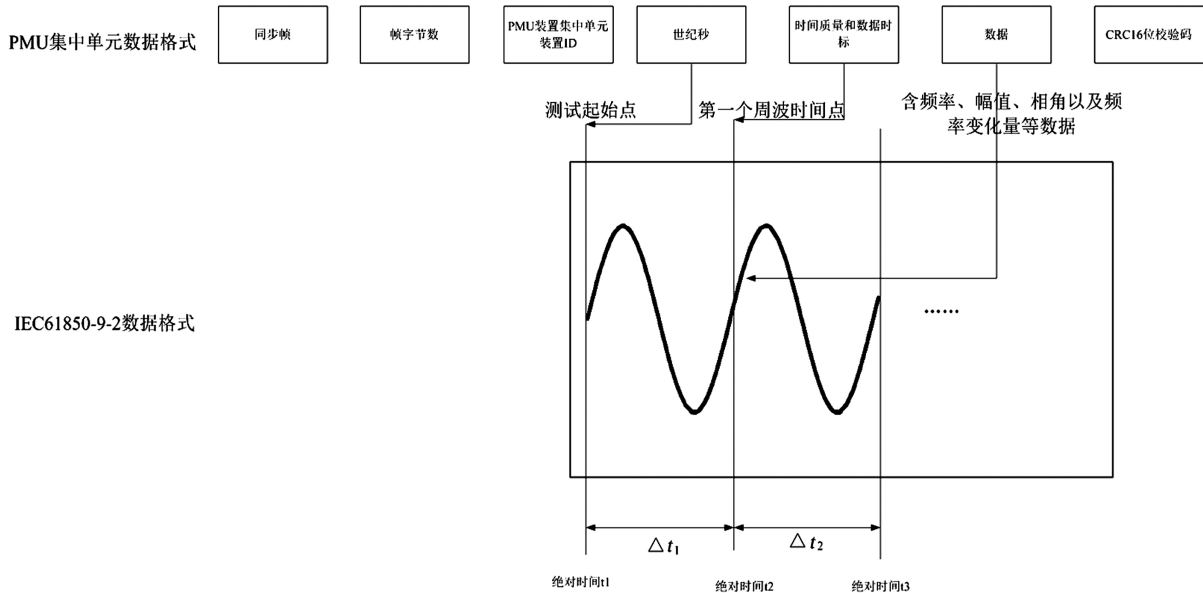


图 2 智能变电站 PMU 装置报文解析

式中: A_{c_i} 为电流电压实部计算值; A_{s_i} 为电流电压虚部计算值; N 为采样点数。

复功率计算式为

$$S =$$

$$\begin{aligned} & [(U_{ar}I_{ar} + U_{ax}I_{ax}) + (U_{br}I_{br} + U_{bx}I_{bx}) + (U_{cr}I_{cr} + U_{cx}I_{cx})] + \\ & j[(U_{ax}I_{ar} - U_{ar}I_{ax}) + (U_{bx}I_{br} - U_{br}I_{bx}) + (U_{cx}I_{cr} - U_{cr}I_{cx})] \end{aligned} \quad (3)$$

式中: U_{ar} 、 U_{br} 、 U_{cr} 、 I_{ar} 、 I_{br} 、 I_{cr} 为 a、b、c 三相电压电流实部; U_{ax} 、 U_{bx} 、 U_{cx} 、 I_{ax} 、 I_{bx} 、 I_{cx} 为 a、b、c 三相电压电流虚部。

频率计算公式为

$$f = f_0 + \frac{\Delta\theta}{2\pi t} \quad (4)$$

式中: f_0 为基波频率; $\Delta\theta$ 为 t 时间内的相位变化。

频率变化率公式为

$$\left. \frac{df}{dt} \right|_t = \frac{f_t - f_{t-100\text{ms}}}{100} \quad (5)$$

式中: f_t 为 t 时刻的频率; $f_{t-100\text{ms}}$ 为 f_t 前 100 ms 时的频率。

2) 指标计算

根据文献 [14] 定义电流电压的误差为

$$E_{xm} = \frac{\sum_{i=1}^N \left| \frac{X_{mi} - X_{si}}{X_d} \right|}{N} \times 100\% \quad (6)$$

式中: E_{xm} 为测量总误差; X_{mi} 为第 i 次测量值; X_{si} 为第 i 次实际值; X_d 为基准值, 相电压幅值基准值取 70 V, 当电流互感器二次侧额定电流是 1 A 时, 电流

幅值基准值取 1.2 A; 当电流互感器二次侧额定电流是 5 A 时, 电流幅值基准值取 6 A, 功率基准值为 3 倍相电压幅值基准值与电流基准值的乘积。

根据文献 [14], 定义相角、频率以及频率变化率的误差计算为

$$E_m = \frac{\sum_{i=1}^N |Y_{mi} - Y_{si}|}{N} \quad (7)$$

式中: E_m 为测量误差; Y_{mi} 为第 i 次测量值; Y_{si} 为第 i 次实际值; N 为测量次数。各测试项误差标准可参考文献 [14]。

2 PMU 装置测试接线及工作流程

2.1 测试接线

1) 同 PC 端接线测试

在此情况下, PMU 装置采集单元与集中单元距离较近, 可以采用同一 PC 客户端通过网线实现 PMU 装置数据的发送和接收, 并在 PMU 测试仪中进行发送数据和接收数据的处理, 具体接线如图 3 所示。

可以看出, 此种接线在 PC 客户端和 PMU 测试仪之间接了一个网络交换机, 可以实现仅使用同一台 PC 客户端向 PMU 测试仪的发送数据, 并接收 PMU 装置集中单元数据, 从而实现数据的比对和处理。

2) 非同 PC 端接线测试

在此情况下, PMU 装置采集单元与集中单元距

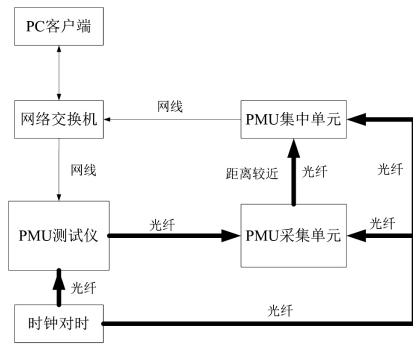


图 3 PMU 集中单元与 PMU 采集单元距离较近时接线原理
离较远,集中单元和采集单元缺乏连接光纤,无法只采用一个 PC 客户端通过一条网线从 PMU 集中单元接收数据。此时采用两个 PC 客户端,分别通过 PC 客户端 1 向 PMU 装置采集单元发送数据,通过 PC 客户端 2 接收 PMU 装置集中单元。由此在 PC 客户端 1 形成带时标的发送数据文件,同时在 PC 客户端 2 形成带时标的接收数据文件,最后将两个文件导入 PMU 测试仪软件中进行处理,自动生成测试报告。具体接线如图 4 所示。

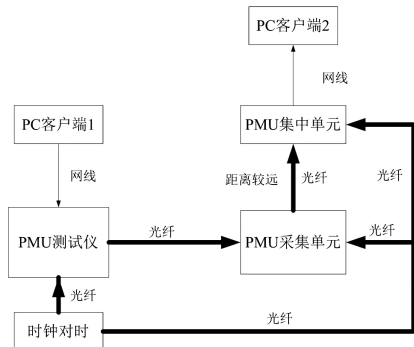


图 4 PMU 集中单元与 PMU 采集单元距离较远时接线原理

可以看出,此种接线通过两个 PC 客户端和 PMU 装置形成闭环接线测试,适用于 PMU 装置集中单元和采集单元距离较远时的情况,其中一个客户端向 PMU 装置采集单元发送数据,另一个客户端接收 PMU 装置集中单元数据,通过对比相同时刻的数据来计算测试误差。

2.2 工作流程

按照智能变电站 PMU 装置采集单元和 PMU 装置集中单元的安装位置特点,供用户选择不同的测试模式。PMU 测试仪软件设计流程图如图 5 所示。

通过选择不同的测试模式,智能变电站 PMU 测试仪可以持续完成所有的测试项目,计算测试误差,自动生成测试报告。

3 测试案例分析

3.1 测试背景

所研制的 PMU 测试仪已经应用在某新建 500 kV 智能变电站中。该变电站的 500 kV 部分为 3/2 接线,本期投入 4 串;220 kV 部分为双母双分段接线,本期 10 回出线。

变电站 220 kV 采集单元和集中单元在 220 kV 继电保护小室里面,共组一个屏,500 kV 采集单元在 500 kV 继电保护小室里面,单独组屏。220 kV 采集单元距离 PMU 装置集中单元距离较近,500 kV 采集单元距离 PMU 装置集中单元较远。

3.2 智能变电站 220 kV 间隔测试

下面以一条 220 kV 新建线路为例,重点阐述其 PMU 装置的电压电流静态检测和动态检测。由于 220 kV 采集单元与 PMU 装置集中单元在同一屏柜,根据 2.1 节的接线原理,可以用“同 PC 端收发模式”进行测试,即用一个 PC 客户端完成测试数据的发送和接收。按照文献 [14] 设置相关静态动态测试标准。 U_n 为额定电压, I_n 为额定电流,所有测试值均为 2 次值。测量中仅仅列举典型的电流电压测试(静态测试)和幅值调制(动态测试)的测试结果,见表 1 和表 2。

表 1 智能变电站 220 kV 线路间隔静态电流电压测试结果

测试项	测试名称	标准值	测量值	误差 / %
U_a 幅值 / V	10% U_n	5.773 5	5.772 3	0.001 7
	10% I_n			
	50% U_n	28.867 5	28.866 7	0.001 1
	50% I_n			
I_a 幅值 / A	100% U_n	57.735 0	57.733 4	0.002 3
	100% I_n			
	10% U_n	0.100 0	0.099 9	0.005 6
	10% I_n			
I_a 相位 / (°)	50% U_n	0.500 0	0.499 8	0.016 8
	50% I_n			
	100% U_n	1.000 0	0.999 6	0.029 7
	100% I_n			
I_a 相位 / (°)	10% U_n	0.000 0	-0.028 6	0.028 6
	10% I_n			
	50% U_n	0.000 0	-0.028 6	0.028 6
	50% I_n			
I_a 相位 / (°)	100% U_n	0.000 0	-0.028 6	0.028 6
	100% I_n			

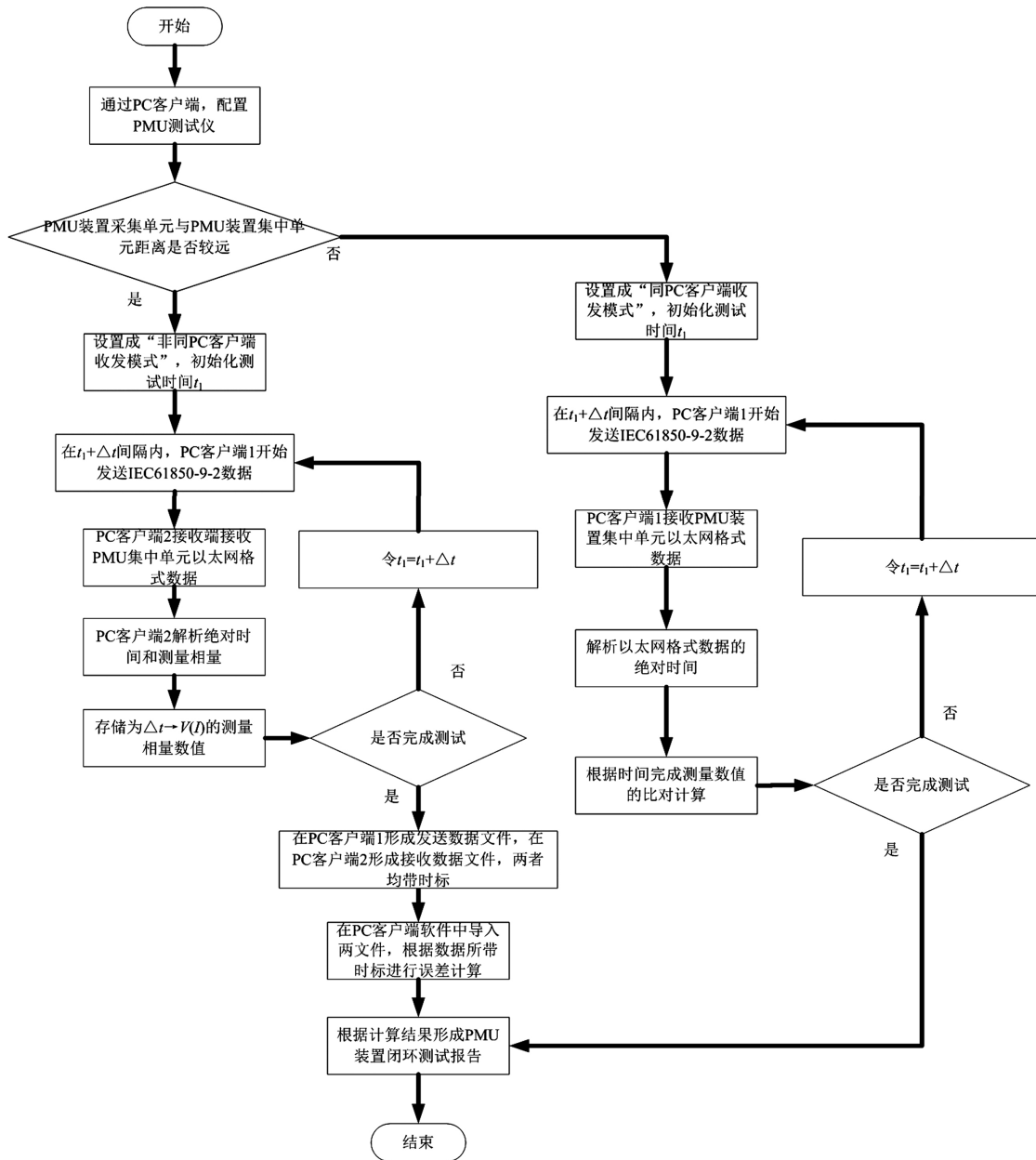


图 5 智能变电站 PMU 测试仪软件流程

通过测试结果可以看出,此条线路的 3 个测试项目均合格。而在实际现场调试中,通过 PMU 装置采集单元屏柜显示核对和调度主站之间的加量核对结果,均可以看出 PMU 装置的静态和动态数据测试均有较为满意的效果。

3.3 智能变电站 500 kV 间隔测试

以 1 条 500 kV 新建线路为例,重点阐述其 PMU 装置的电压电流静态测量和动态测量。由于 500 kV 采集单元与 PMU 装置集中单元在同一屏柜,根据图 4,可以用“非同 PC 端收发模式”进行测试,即用两个 PC 客户端完成测试数据的发送和接收。所有测试条件设置与 3.2 节相同,测试结果见表 3 和表 4。

表 2 智能变电站 220 kV 线路间隔
0.1 Hz 幅值调制测试结果

测试项	标准值	测量值	误差 / %
U_a / V	57.740 0	57.730 0	0.014 4
U_b / V	63.053 4	63.062 6	0.013 2
U_c / V	56.586 9	56.576 9	0.014 4
U_a 相角 / (°)	0.000 0	-0.166 2	0.166 2
U_b 相角 / (°)	-120.000 0	-120.155 0	0.155 0
U_c 相角 / (°)	120.000 0	119.845 6	0.154 4
基波频率 / Hz	50.000 0	50.000 0	0.000 0
频率变化率 / (Hz · s ⁻¹)	0.000 0	-0.001 0	0.001 0

表 3 智能变电站 500 kV 线路间隔静态电流电压测试结果

测试项	测试名称	标准值	测量值	误差 /%
U_a 幅值 /V	10% U_n	5.773 5	5.772 3	0.001 7
	10% I_n			
	50% U_n	28.867 5	28.866 7	0.001 1
	50% I_n			
	100% U_n	57.735 0	57.733 4	0.002 3
100% I_n				
U_a 相位 /($^\circ$)	10% U_n	0.000 0	-0.028 6	0.028 6
	10% I_n			
	50% U_n	0.000 0	-0.028 6	0.028 6
	50% I_n			
	100% U_n	0.000 0	-0.028 6	0.028 6
	100% I_n			
I_a 幅值 /A	10% U_n	0.100 0	0.099 9	0.005 6
	10% I_n			
	50% U_n	0.500 0	0.499 8	0.016 8
	50% I_n			
	100% U_n	1.000 0	0.999 6	0.029 7
100% I_n				
I_a 相位 /($^\circ$)	10% U_n	0.000 0	-0.028 6	0.028 6
	10% I_n			
	50% U_n	0.000 0	-0.028 6	0.028 6
	50% I_n			
	100% U_n	0.000 0	-0.028 6	0.028 6
	100% I_n			

通过测试结果可以看出,此条线路的 4 个测试项目均合格。而在实际现场调试中,从 PMU 装置采集单元屏柜显示核对和调度主站之间的加量核对中,均可以看出 PMU 装置的静态和动态数据测试都有较为满意的效果。

表 4 智能变电站 500 kV 线路间隔 0.1 Hz 幅值调制测试结果

测试项	标准值	测量值	误差 /%
U_a /V	52.315 2	52.305 2	0.014 5
U_b /V	63.463 0	63.472 2	0.013 3
U_c /V	52.747 1	52.736 5	0.015 3
U_a 相角 /($^\circ$)	0.000 0	-0.177 6	0.177 6
U_b 相角 /($^\circ$)	-120.000 0	-120.172 2	0.172 2
U_c 相角 /($^\circ$)	120.000 0	119.834 1	0.165 9
基波频率 /Hz	50.000 0	50.000 0	0.000 0
频率变化率 /($\text{Hz} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.000 0	-0.001 0	0.001 0

3.4 测试比对

采用“同 PC 端收发模式”并考虑典型的电流电压静态测试和幅值调制动态测试方法,将测试仪分

别用于两个智能变电站 PMU 装置的主流厂家的设备进行测试,测试合格标准和测试条件均不变,测试结果如图 6 所示。

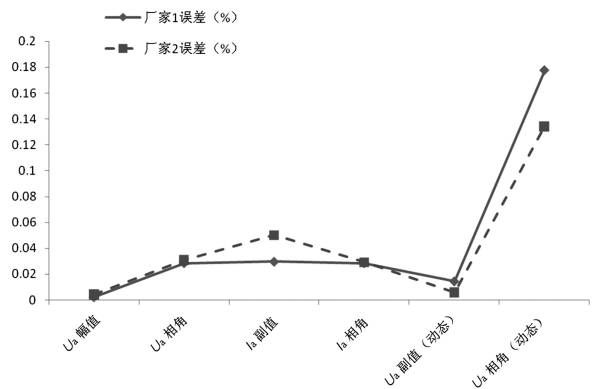


图 6 不同厂家测试结果比对

图 6 中 I_a 幅值(动态)和 U_a 相角(动态)是指基于 50 Hz 的 0.1 Hz 调制频率的幅值调制试验,其余均为 50 Hz 的静态电流电压测试。从数据对比来看,两个厂家的测试均合格;而厂家 1 的静态测试精度更好,厂家 2 的动态测试精度更好。

5 结 语

前面根据智能变电站 PMU 装置现场实际情况,研制出智能变电站 PMU 测试仪,并着重介绍该测试仪研制的关键点,介绍了两种方式下的测试流程。通过智能变电站 PMU 装置测试方法和 PMU 测试仪的研制,能快速实现对智能变电站 PMU 装置的静态和动态响应精度检测,减少了繁琐的数据处理工作和报告编制工作,提高了智能变电站 PMU 装置测试效率和正确性。

经某新建 500 kV 智能变电站的 PMU 装置测试证明,该测试仪功能实用性强、操作灵活方便、界面友好,为数字化变电站 PMU 的可靠应用提供了保证。PMU 测试仪的使用,可大大提高中国大电网广域测量系统的建设质量,保证智能电网的可靠运行。

参考文献

- [1] 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):81-83.
- [2] 段刚,严亚勤,谢晓东,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.
- [3] 马庆法.高精度电力系统轻型广域测量装置及系统

[D]. 济南: 山东大学, 2014.

[4] 张恒旭, 靳宗帅, 刘玉田. 轻型广域测量系统及其在中国的应用[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(22): 85-90.

[5] 谢潇磊, 刘亚东, 孙鹏, 等. 新型配电网线路 PMU 装置的研制[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 15-20.

[6] M. Zima, M. Larsson, P. Korba, et. al. Design Aspects for Wide-area Monitoring and Control Systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(5): 980-996.

[7] 许勇, 王慧铮, 李倩, 等. 智能变电站同步相量测量装置研制[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 1-5.

[8] 毕天姝, 刘灏, 杨奇逊. PMU 算法动态性能及其测试系统[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1): 62-67.

[9] 张晓莉, 周泽昕, 张道农, 等. 同步相量测量装置的测试与评估[J]. 电力科学与技术学报, 2011, 26(2): 31-36.

[10] 张道龙, 刘灏, 毕天姝, 等. 中外 PMU 静态标准及评估方法对比分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 140-145.

[11] 包伟, 裴愉涛, 潘武略, 等. 一种基于 IEC 61850 的

(上接第 47 页)

[8] Glenn A D, Thomas E D. Short-time Thermal Ratings for Bare Overhead Conductors [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1969, 88(3): 194-199.

[9] Chen Shelly L, Black William Z. High-temperature Sag Model for Overhead Conductors [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(1): 183-188.

[10] 徐青松, 韩芳, 王孟龙. 架空导线载流量的等效风速系数算法[J]. 高电压技术, 2008, 34(10): 2200-2204.

[11] 马国栋. 电线电缆载流量(2版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2013: 41-111.

[12] 配网运行规程: Q/GDW 519-2010 [S] 2010.

(上接第 51 页)

统接入地铁牵引供电系统的研究较少, 上述所建立的模型和光伏并网方法可以起到借鉴作用。

参考文献

[1] 何颖, 赵争鸣. 新疆光伏发电现状及发展对策[J]. 能源工程, 2004(4): 35-37.

[2] 胡仁祥, 王晓斌, 常喜强. 并网光伏发电系统对吐鲁番地区配电网影响的研究[J]. 四川电力技术, 2012, 35(3): 27-29.

[3] MB Caracciolo, R Faranda, S Leva. Photovoltaic Applications in Railway Stations [C]. International Conference on Electricity Distribution 2007.

[4] Mayer O, Lynass M, Gómez M, et al. Design Aspects for

PMU 测试仪的研制[J]. 电测与仪表, 2015, 52(17): 125-129.

[12] Communication Networks and Systems for Power Utility Automation: Part 7-4 Basic Communication Structure—Compatible Logical Node Classes and Data Object Classes: IEC 61850-7-4 [S] 2010.

[13] IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems: IEEE Standard C37.118.1: 2011 [S], 2011.

[14] 智能变电站自动化设备检测规范 第 6 部分: 同步相量测量装置: Q/GDW 11202.6-2014 [S] 2015.

[15] 电力系统实时动态监测系统 第 2 部分: 数据传输协议: GB/T 26865.2-2011 [S] 2011.

作者简介:

何 笠(1985), 工程师、硕士, 主要研究方向为智能电网技术、继电保护及自动化、电力系统稳定与控制等;

滕予非(1984), 博士, 主要研究方向为智能电网技术、电力系统稳定与控制、高压直流输电等。

(收稿日期: 2018-01-06)

[13] 张尧, 周鑫, 牛海清, 等. 单芯电缆热时间常数的理论计算与试验研究[J]. 高电压技术, 2009, 35(11): 2081-2086.

[14] 苏瑞波, 王鹏, 康守亚, 等. 空气敷设下 10 kV 三芯电缆应急时间计算[J]. 南方电网技术, 2015, 9(11): 78-83.

[15] 阮班义, 王金生, 汪光煌, 等. 基于热路模型的架空导线暂态载流量研究[J]. 绝缘材料, 2015, 48(8): 73-77.

作者简介:

张 禹(1988), 硕士、工程师, 主要从事电力设备在线监测、负荷管理和绝缘方面的研究工作。

(收稿日期: 2018-01-16)

High Voltage MW PV Systems for Railway Power Supply [C]. European PV Solar Energy Conference 2014.

[5] 倪卫标, 沈小军, 赵时旻, 等. 光伏发电系统接入城市轨道交通供电系统模式研究[J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17(11): 78-81.

[6] Li Qiang. Analysis on the Application of Photovoltaic Power Generation Project in a Metro Section [J]. Electric Railway, 2016(4): 32-35.

[7] 张国梁, 李虹, 刘立群, 等. 基于改进扰动观察法的光伏 MPPT 研究[J]. 电源技术, 2017(1): 111-114.

作者简介:

郭晓宇(1970), 本科, 高级工程师, 主要从事铁道供电相关研究工作。

(收稿日期: 2018-01-29)