

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191294

基于无线射频通信的变电站间隔相量校核装置的研究

汪冬辉¹, 罗建平², 方芳¹, 袁振宇², 裘愉涛³, 王松¹

(1. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014; 2. 武汉凯默电气有限公司, 湖北 武汉 430223;
3. 国网浙江省电力有限公司, 浙江 杭州 310007)

摘要: 为了解决变电站跨间隔相量校核不便的问题, 针对跨间隔模拟量与模拟量、数字量与数字量以及模拟量与数字量这三种不同的相量校核应用, 给出了基于无线射频通信技术的变电站跨间隔相量校核方法。针对无线数据传输及采样同步这两项关键技术给出了具体实现方案。介绍了装置的硬件和软件设计, 并为不同的相量校核应用分别设计了相应的相位补偿算法。采用该装置在变电站现场进行了相关测试, 并对测试结果进行了分析。测试结果表明, 通过采用无线射频通信, 该装置实现了对传统跨间隔相量校核方式的优化, 同时满足了不同应用下变电站跨间隔相量校核的实际需要。

关键词: 变电站; 相量校核; 跨间隔; 无线射频同步; SV 报文

Research on a substation interval phasor check device based on RF communication

WANG Donghui¹, LUO Jianping², FANG Fang¹, YUAN Zhenyu², QIU Yutao³, WANG Song¹

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China; 2. Wuhan Kemov Electric Co., Ltd., Wuhan 430223, China; 3. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, China)

Abstract: In order to solve the problem of the inconvenience of a cross-interval phasor check in a substation, a method of cross-interval phasor check based on radio frequency communication technology is proposed for substations, aiming at the three different applications of cross-interval phasor check between analog and analog, digital and digital, as well as analog and digital. A specific implementation scheme is provided for the two key technologies of both wireless data transmission and sample synchronization. The hardware and software designs of the device are introduced. Corresponding phase compensation algorithms are designed for the different phasor checking applications. The device is used in the relevant test at the substation scene, and the test results are analyzed. The test results indicate that by adopting radio frequency communication, the device optimizes the traditional cross-interval phasor checking method, and the actual needs of a cross-interval phasor check under different applications in substation are also satisfied.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5100-201946264A) and Science and Technology Project of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. (No. 5211DS18002T).

Key words: substation; phasor checking; trans-interval; wireless radio frequency synchronization; SV message

0 引言

电力系统是三相供电系统, 三相之间有固定的相位差, 当两路或两路以上相位或相序不同的交流电源并列或合环时, 将会产生很大的冲击电流, 造成发电机或电气设备的损坏^[1-3]。为避免非同期并列, 要求系统一次侧与二次侧均保证相位和相序正

确^[4-6]。不仅如此, 在新建、改建和扩建变电站之后, 输电线路投运前或者输电线路检修完毕向用户送电前, 都必须进行电压相位校核和电压电流相量测试, 以防止继电保护误动作, 保障电网及设备安全^[7-10]。

线路送电以及主变送电前都需要进行电压核相和电压电流相量测试, 以验证保护装置交流回路以及 CT、PT 一次及二次回路接线的正确性, 验证变比大小是否与定值单整定一致, 验证潮流方向是否满足保护方向要求^[11-13]。

目前, 跨间隔跨开关场的异地相量校核采用拉

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(5100-201946264A);
国网浙江省电力有限公司科技项目资助(5211DS18002T)

电缆的方式进行, 较长的电缆不便于测试, 而且还存在安全隐患^[14]。若采用分布式设计, 在目标位置就地布置相量校核装置, 通过无线方式实现相量校核可以大幅提高变电站的电压核相、电压电流相量校核的精度及效率。

智能变电站的建设与发展对变电站相量校核提出了新的要求。接入保护装置的电压电流二次值既可以是常规互感器输出的模拟量, 又可以合并单元输出的光数字量——IEC61850 标准的 SV 报文, 因此涉及数字量的跨间隔相量校核也是急需解决的问题^[15-17]。

从对变电站跨间隔相量校核需求入手, 兼顾常规及智能变电站二次侧不同的采集方式, 提出了一种基于无线射频同步技术的变电站二次相量校核方法, 采用无线射频同步技术解决了跨间隔相量校核过程中的采样同步以及远距离无线数据传输问题, 并对该装置在常规及智能变电站中不同应用组态和对应的相位补偿算法进行了描述。

1 基于无线射频技术的变电站相量校核关键技术

使用两台装置进行跨间隔无线相量校核, 要解决数据传输及采样同步问题。

1.1 数据传输

无线通信解决数据传输问题。文中的无线数据传输在分别以主机、从机定义的两台装置之间进行: 主机是从机同步的时间基准也是通信的发起方; 从机以主机的时间基准采样同步后双方即可互发数据包。

首先, 主机给从机发送同步包, 它仅包含主机的时间戳信息, 用于主从机之间实现采样同步。

然后, 在同步的基础上, 主从机之间交换数据包, 该数据包则包含了采样所得的所有电气参量信息。为实现可靠的无线通信, 采取如表 1 所示的数据包格式。

表 1 数据包格式

Table 1 Packet format

| 项目 | 前导码 | 同步字 | 长度域 | 地址域 | 数据域 | CRC-16 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------|
| 字节数 | 4 | 2 | 1 | 1 | 73 | 2 |

为获得较大的表示范围和较好的数据精度, 幅值、相角与频率均采用了 32 位浮点型数据表示。

位于不同间隔的装置会以固定的周波数对各相别的电压、电流进行等频率采样, 将计算所得的电气参量, 以表 2—表 4 所示的数据结构构成数据包中的数据域。

表 2 数据域结构

Table 2 Data domain structure

| 项目 | 数据域 | | |
|-----|-----|------|------|
| 子项目 | 标识码 | 电压通道 | 电流通道 |
| 字节数 | 1 | 36 | 36 |

表 3 数据域—电压通道数据结构

Table 3 Data domain—voltage channel data structure

| 相别 | A 相电压 | | | B 相电压 | | | C 相电压 | | |
|-----|-------|----|----|-------|----|----|-------|----|----|
| 参数 | 幅值 | 相角 | 频率 | 幅值 | 相角 | 频率 | 幅值 | 相角 | 频率 |
| 字节数 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |

表 4 数据域—电流通道数据结构

Table 4 Data domain—current channel data structure

| 相别 | A 相电流 | | | B 相电流 | | | C 相电流 | | |
|-----|-------|----|----|-------|----|----|-------|----|----|
| 参数 | 幅值 | 相角 | 频率 | 幅值 | 相角 | 频率 | 幅值 | 相角 | 频率 |
| 字节数 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |

为方便观测和记录, 装置的相量校核以每秒一次的更新频率实时获取线路各电气参量的数值, 所以采用了高达 500 kbps 的数据传输速率来保证上述数据包在主从机之间的 1 s 内互传。

1.2 采样同步

采样同步解决相量校核的精度问题。相量校核是通过比较同一时刻两波形的相位关系实现的, 所以必须实现采样同步, 消除非同步采样引入的相位偏差^[18-22]。

为实现高精度采样同步, 本文设计了具有亚微秒级同步精度的采样同步协议。该协议基于图 1 所示的乒乓通信方式实现: 主机每秒都会向从机发送 Forward1 报文, 要求从机开始采样同步, 从机在收到 Forward1 报文后立即向主机发送 Backward 报文予以应答, 主机在收到 Backward 报文后立即向从机发送 Forward2 报文。

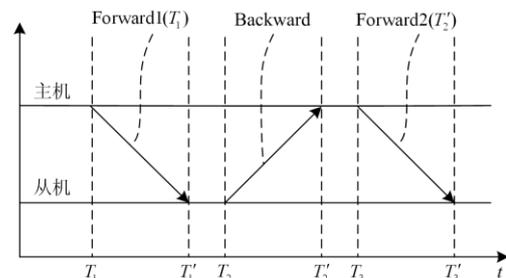


图 1 乒乓通信同步原理

Fig. 1 Ping Pong communication synchronization principle

在上述通信过程中, 主机向从机发送 2 次, 从机向主机发送 1 次, 发送方的发送时刻和接收方的接收时刻各对应一个本地时间戳, 因此 3 次发送合

计 6 个时间戳，这 6 个时间戳中按产生时间顺序的前 4 个时间戳—— T_1 、 T_1' 、 T_2 、 T_2' 即是从机以主机为基准实现采样同步的关键参数。

其中， T_1 为主机发送 Forward1 报文时刻的时间戳，该时间戳被包含在 Forward1 报文内发送给从机， T_1' 为从机收到 Forward1 报文时刻的时间戳，此时从机获取了所需的前两个参数 T_1 、 T_1' 。 T_2 为从机发送 Backward 报文的时间戳， T_2' 为主机收到 Backward 报文时刻的时间戳，主机将时间戳 T_2' 通过 Forward2 报文发送给从机，从机获取了所需的全部四个参数 T_1 、 T_1' 、 T_2 、 T_2' 。

在点对点无线通信方式下，主机与从机之间的双向路径延时相等，设为 T_d ，定义时间偏差 T_0 为从机时间减去主机时间。

由于时间延迟与发送方向无关，而时间偏移 T_0 与发送方向有关，所以在主机向从机发送 Forward1 报文过程中有

$$T_1' - T_1 = T_0 - T_d \quad (1)$$

在从机向主机发送 Backward 报文过程中有：

$$T_2' - T_2 = T_0 + T_d \quad (2)$$

根据式(1)和式(2)，可以计算出从机侧所需修正的误差 T_0 。

$$T_0 = (T_1' - T_1 - T_2' + T_2) / 2 \quad (3)$$

在主机的驱使下，从机以 1 s 一次的周期根据 T_0 不断修正自己的时钟，与主机保持时间同步，然后主机和从机在时间同步后的固定时刻输出表征采样同步的秒脉冲信号。

上述采样同步协议基于对时间戳的运算实现，时间戳的精度会直接影响采样同步精度，为了最大限度提高采样同步精度，需要在硬件底层加硬件时间戳。由于通用的射频通信模块无法满足上述要求，因此需要定制射频同步模块，采用 2.4 GHz RF 收发器作射频模拟前端，FPGA 作基带处理，在图 2 所

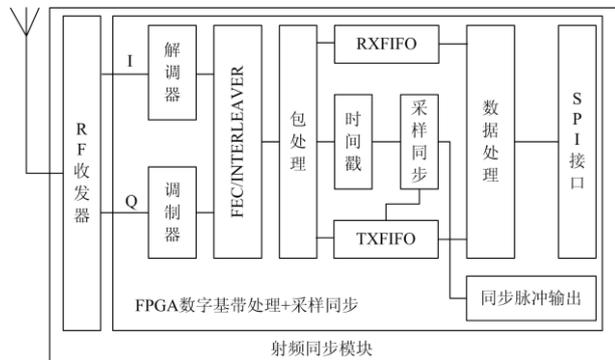


图 2 射频系统模块框图

Fig. 2 RF system module block diagram

示的包处理中加硬件时间戳，消除 FIFO 延迟不确定性对硬件时间戳的影响^[23-26]，在物理层实现了高精度的硬件时间戳。

射频同步模块以主从模式工作，在硬件与软件协同下，实现了高达 800 ns 精度的同步采样脉冲输出。在工程应用上，电网 50 Hz 工频条件下，800 ns 同步精度的采样脉冲带来的相角误差仅为 0.0144°，对相量校核的影响较小。

2 系统设计与实现

2.1 硬件系统设计

装置的硬件系统如图 3 所示，由数字系统、模拟系统、射频系统以及电源系统组成。

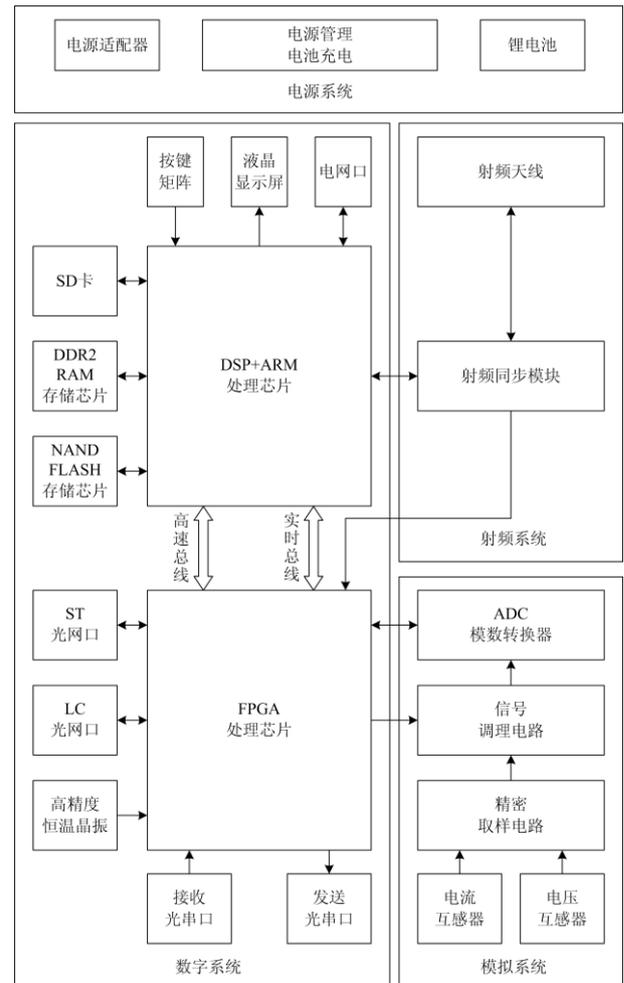


图 3 手持无线相量校核装置硬件结构图

Fig. 3 Hardware structure diagram of handheld wireless phasor checking device

数字系统由工业级 ARM+DSP 双核应用处理器、大规模高速 FPGA 以及其他外围电路组成。双核应用处理器的 ARM 内核运行 Linux 操作系统；

DSP 内核与 ARM 内核之间采用共享内存的方式完成数据交互, 与 FPGA 之间采用 EMIF、MII 高速总线和 uPP 实时总线的方式完成数据交互。FPGA 上挂载了 ADC、LC 光网口、ST 光网口、接收光串口和发送光串口。

模拟系统由高精度电压、电流互感器、精密取样电路、信号调理电路, 以及高精度、多通道、同步采样 ADC 组成。

射频系统由射频同步模块与射频天线组成。

电源系统由电源管理电路及电池充电电路、电源适配器和锂电池组成。

系统工作时, FPGA 接收射频系统输出的同步采样脉冲后加硬件时间戳, 同时触发光网口或模拟系统的同步采集, 并给采集到的第一个样点加硬件时间戳。采集完成后, FPGA 将样点数据和上述时间戳信息发送给 DSP 和 ARM 进行傅里叶运算和相位补偿, DSP 和 ARM 将运算结果发送给射频系统, 由射频系统将本侧的运算结果发送给对侧。

2.2 软件系统设计

装置的软件系统由系统软件和应用软件组成, 各子功能模块的组成如图 4 所示。



图 4 装置软件结构图

Fig. 4 Software structure diagram of the device

系统软件主要包括 Linux 操作系统、底层驱动、傅里叶算法、顶底层数据交换模块以及报文收发模块。Linux 操作系统为所有软件的运行提供基础平台, 底层驱动负责对硬件的控制、读写等操作, 傅里叶算法用于对采样值进行算法处理, 获取幅值、频率、相位等电参量, 顶底层数据交换模块作为应用软件与系统软件之间的接口, 起到参数以及数据传递的作用, 报文收发模块负责底层的报文收发处理。

应用软件主要包含的功能模块有: 向量同步校核模块、SMV 监测模块、GOOSE 监测模块、MMS 相量校核模块和时钟监测模块。向量同步校核模块用于对跨间隔模拟量、数字量的任意组合进行向量

校核, SMV 监测模块用于解析合并单元输出的数字化采样报文, GOOSE 监测模块用于实时显示开入开出状态, MMS 相量校核模块用于对站控层 MMS 报文中的数字相量信息进行校核, 时钟监测模块用于对输入的对时信号进行监测。

2.3 相位补偿算法

相位补偿基于 FPGA 硬件时间戳和软件算法修正实现。在不同的应用组态下, 软件自动调用不同的算法实现相位补偿。为方便说明, 主机、从机分别记为 A、B, 在下述三种应用组态中, 同步秒脉冲到达时, A 和 B 内部的 FPGA 分别打硬件时间戳 T_{0A} 、 T_{0B} , 且 T_{0A} 等于 T_{0B} 。

(1) 模拟量相量校核的相位补偿算法

模拟量与模拟量相量校核时, 系统连接如图 5 所示。

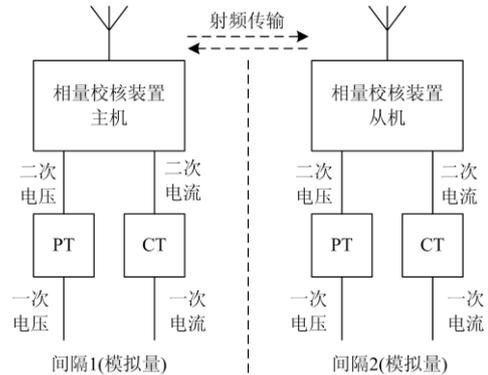


图 5 跨间隔模拟量相量校核

Fig. 5 Trans-interval analog phasor check

如图 6 所示, 收到同步秒脉冲后, A 和 B 的 FPGA 向各自的 ADC 发出采样保持信号, 记下硬件时间戳 T_{1A} 、 T_{1B} 。根据 SAR 型同步采样 ADC 的工作原理, 该时间戳是 ADC 的实际采样时刻, 因此待补偿相位 $\Delta\varphi$ 如式(4)所示, 其中 $f = 50 \text{ Hz}$ 。

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi f[(T_{1A} - T_{0A}) - (T_{1B} - T_{0B})]}{2\pi f(T_{1A} - T_{1B})} \quad (4)$$

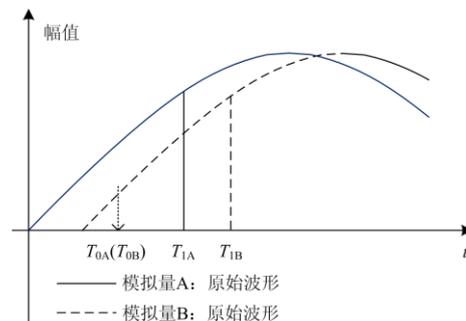


图 6 模拟量采集下硬件时间戳示意图

Fig. 6 Hardware timestamp diagram under analog acquisition

(2) 模拟量与数字量相量校核的相位补偿算法
模拟量与数字量相量校核时，系统连接如图 7 所示，B 侧 MU 延时为 T_{muB} 。

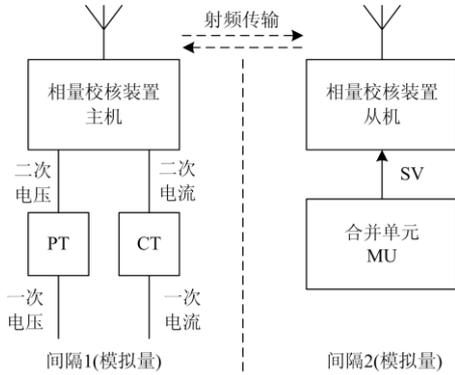


图 7 跨间隔模拟量与数字量相量校核

Fig. 7 Trans-interval analog and digital phasor check

如图 8 所示，收到同步秒脉冲后，A 随即启动采样保持，打硬件时间戳 T_{1A} ，而 B 于采集到 SV 第一个采样点时打硬件时间戳 T_{1B} ，因此待补偿相位 $\Delta\varphi$ 如式(5)所示，其中 $f = 50 \text{ Hz}$ 。

$$\Delta\varphi = 2\pi f [(T_{1A} - T_{0A}) - (T_{1B} - T_{0B} - T_{muB})] = 2\pi f (T_{1A} - T_{1B} + T_{muB}) \quad (5)$$

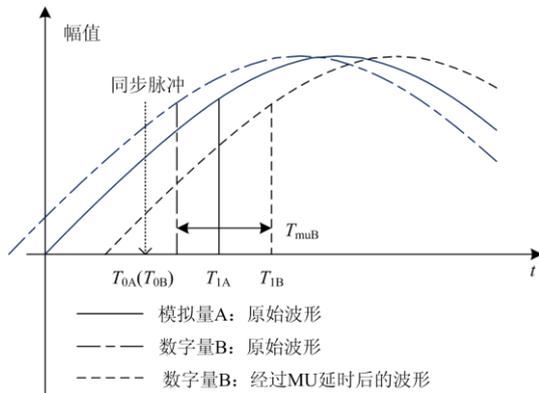


图 8 模拟量数字量混合采集下硬件时间戳示意图

Fig. 8 Hardware timestamp diagram under analog and digital mixed acquisition

(3) 数字量相量校核的相位补偿算法

在“直采”模式下，合并单元不经交换机，直接输出 IEC61850-9-2 SV 给保护装置，两个跨间隔异地数字量与数字量之间进行相量校核时，系统如图 9 所示连接，记 A、B 两侧 MU 延时分别为 T_{muA} 和 T_{muB} 。

如图 10 所示，收到同步秒脉冲后，A 和 B 分别在采集到 SV 的第一个数字采样值时打硬件时间戳 T_{1A} 和 T_{1B} ，因此待补偿相位 $\Delta\varphi$ 如式(6)所示，其中 $f = 50 \text{ Hz}$ 。

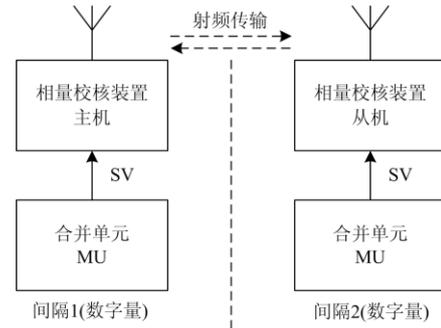


图 9 跨间隔数字量相量校核

Fig. 9 Trans-interval digital phasor check

$$\Delta\varphi = 2\pi f [(T_{1A} - T_{0A} - T_{muA}) - (T_{1B} - T_{0B} - T_{muB})] = 2\pi f (T_{1A} - T_{1B} - T_{muA} + T_{muB}) \quad (6)$$

(6)

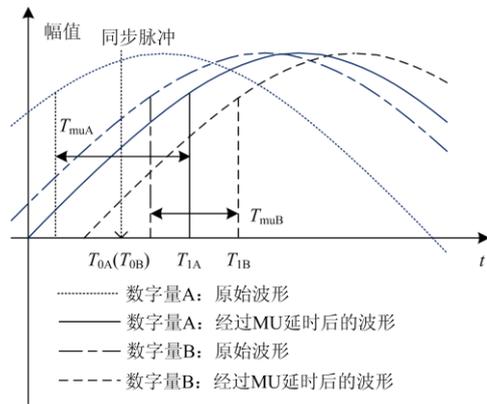


图 10 数字量采集下硬件时间戳示意图

Fig. 10 Hardware timestamp diagram under digital acquisition

3 现场测试分析

2018 年 6 月，手持式跨间隔无线相量校核装置用于某变电站主变压器的相量校核及相关测试，如图 11 所示。



图 11 测试现场

Fig. 11 Test on site

现场先使用三相相位伏安表对高压侧 PT 进行了模拟电压核相，然后采用长距离拉电缆的方法，

以主变高压侧 PT 的 A 相电压为基准, 依次对中压侧 PT 的各相模拟电压进行了核相, 整理测试结果如表 5 所示。

表 5 三相伏安表电压核相结果

Table 5 Voltage phase-detecting results by three-phase voltmeter

| 电参量 | 主变高压侧 | 中压侧 |
|---------|-------------------------------|-------------------------------|
| U_a/V | $59.588 \angle 0.00^\circ$ | $59.583 \angle 0.05^\circ$ |
| U_b/V | $59.481 \angle -119.87^\circ$ | $59.476 \angle -119.89^\circ$ |
| U_c/V | $59.529 \angle 120.11^\circ$ | $59.572 \angle 120.12^\circ$ |

测试结果表明, 主变压器高压侧和中压侧 PT 的接线方式正确, 对应相别电压的幅值及相位关系正确。

随后采用手持式跨间隔无线相量校核装置对主变高压侧 PT 和中压侧 PT 进行了跨间距模拟电压核相, 无线传输距离约 60 m, 测试结果如表 6 所示。

表 6 文中装置电压核相数据统计

Table 6 Voltage phase-detecting data statistics by instrument in text

| 电参量 | 主变高压侧 | 主变中压侧 | 相角差 |
|---------|-------------------------------|-------------------------------|---------------|
| 频率/Hz | 50.102 | 50.085 | — |
| U_a/V | $59.595 \angle 0.00^\circ$ | $59.602 \angle 0.06^\circ$ | -0.06° |
| U_b/V | $59.487 \angle -119.86^\circ$ | $59.494 \angle -119.90^\circ$ | 0.04° |
| U_c/V | $59.538 \angle 120.10^\circ$ | $59.597 \angle 120.14^\circ$ | -0.04° |

手持式跨间隔无线相量校核装置与三相相位伏安表测试结果一致, 验证了手持式跨间隔无线相量校核装置的有效性。

在一次通流带负荷试验中, 以电容器组作负荷, 使用手持式跨间隔无线相量校核装置对主变高低压侧进行了电压电流相量校核, 同时对电力潮流方向进行了判定, 导入定值单将待测量进行比例处理后的测试结果如表 7 所示。

表 7 电压电流相量校核数据统计

Table 7 Voltage and current phasor checking data statistics

| 电参量 | 主变高压侧 | 主变低压侧 |
|---------|-------------------------------|------------------------------|
| 频率/Hz | 50.070 | 50.081 |
| U_a/V | $58.325 \angle 0.00^\circ$ | $58.318 \angle 30.14^\circ$ |
| U_b/V | $58.336 \angle -119.89^\circ$ | $58.322 \angle -89.97^\circ$ |
| U_c/V | $58.312 \angle 120.15^\circ$ | $58.307 \angle 150.12^\circ$ |
| I_a/A | $0.113 \angle 59.88^\circ$ | $0.113 \angle -89.96^\circ$ |
| I_b/A | $0.113 \angle -59.93^\circ$ | $0.113 \angle 150.11^\circ$ |
| I_c/A | $0.113 \angle -179.95^\circ$ | $0.113 \angle 30.09^\circ$ |

高低压侧 CT 均采用封变压器侧的 Y 接线方式, 所以高压侧二次电流相位应超前低压侧对应相别约 150° 左右, 实验结果与之相符。容性负荷作用下, 高压侧电流约超前对应相别电压 60° 左右, 低压侧电流约滞后对应相电压 120° 左右, 计算高低压侧有

功率 P 、无功功率 Q 、视在功率 S 和功率因数 $\cos\phi$, 主变高低压侧功率相关数据如表 8 所示。

表 8 主变高低压侧功率相关数据统计

Table 8 Voltage and current phasor checking data statistics

| 相别 | 主变高压侧 | | | | 主变低压侧 | | | |
|----|-------|---------|--------|------------|-------|---------|--------|------------|
| | P/W | Q/var | S/VA | $\cos\phi$ | P/W | Q/var | S/VA | $\cos\phi$ |
| A | 3.31 | -5.7 | 6.59 | 0.502 | -3.3 | 5.7 | 6.59 | -0.502 |
| B | 3.3 | -5.71 | 6.59 | 0.501 | -3.29 | 5.71 | 6.59 | -0.499 |
| C | 3.3 | -5.7 | 6.59 | 0.502 | -3.3 | 5.7 | 6.59 | -0.5 |

结合表 7 数据并对比表 8 中各相别主变高低压侧相应的功率数据可以看出, 在本次带负荷试验中, 有功功率从高压侧流入, 从低压侧流出, 电力潮流方向正确, 满足保护方向要求, 验证了变压器高低压侧 PT、CT 一次及二次回路接线的正确性, 同时也证实了互感器变比与定制单整定一致, 确保了变压器差动保护的可靠性。

4 结论

从文中可以看出, 本装置满足了常规变电站与智能变电站建设、维护、改造过程中, 对常规互感器二次侧模拟量、IEC61850-9-2 SV 数字量相量校核的需要, 实现了模拟量与模拟量、模拟量与数字量、数字量与数字量的校核需求。

针对跨间隔以及跨开关场异地相量校核进行了优化, 通过采用无线射频技术, 将传统有线校核方式改为分布式无线校核, 给现场测试接线带来了方便, 消除了长距离拉电缆线带来的安全隐患。

通过采用无线射频及同步技术, 本装置很好地实现了跨间隔及跨开关场异地相量校核, 具有携带方便、操作简单、相量校核准确等优点。

参考文献

- [1] 甘国晓, 王主丁, 李瑞, 等. 配电网合环冲击电流计算方法及其简化计算公式[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(20): 115-120.
GAN Guoxiao, WANG Zhuding, LI Rui, et al. Methods and simplified formulas for calculating surge currents from loop closing in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(20): 115-120.
- [2] 刘健, 孙泉, 张小庆, 等. 配电网合环分析与合环条件判断[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(11): 130-135.
LIU Jian, SUN Quan, ZHANG Xiaoqing, et al. Analysis and judgment of closing conditions of distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11): 130-135.
- [3] 田茂城. 基于超导储能装置的电磁合环环流抑制技术研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(8): 82-86, 96.

- TIAN Maocheng. Research on circulating current suppression technology of electromagnetic closed-loop based on superconducting energy storage device[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2018, 55(8): 82-86, 96.
- [4] 王友怀, 杨增力, 周虎兵, 等. 相序不对应合环对继电保护的影响[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(18): 99-102, 112.
- WANG Youhuai, YANG Zengli, ZHOU Hubing, et al. The effect of non-correspond phase sequence closed loop on relay protection[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(18): 99-102, 112.
- [5] 叶志军, 苟炬龙, 曾文辉, 等. 非同期合闸引起的变压器铁心饱和[J]. *电机与控制学报*, 2019, 23(1): 89-98.
- YE Zhijun, GOU Julong, ZENG Wenhui, et al. Transformer core saturation caused by non-synchronization switching[J]. *Electric Machines and Control*, 2019, 23(1): 89-98.
- [6] 杨东俊, 丁坚勇, 李继升, 等. 同步发电机非同期并网引起强迫功率振荡分析[J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(10): 99-103.
- YANG Dongjun, DING Jianyong, LI Jisheng, et al. Analysis of power system forced oscillation caused by asynchronous parallelizing of synchronous generators[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(10): 99-103.
- [7] 罗胤. 一起蓄能机组核相过程电压异常分析[J]. *高压电器*, 2013, 49(12): 88-94.
- LUO Yin. Analysis on an abnormal voltage fault during phase-checking process of pumped storage unit[J]. *High Voltage Apparatus*, 2013, 49(12): 88-94.
- [8] 张鸿博, 蔡晓峰, 鲁改凤. 基于全相位 FFT 改进相位差法的自动准同期并列参数测量[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(4): 76-83.
- ZHANG Hongbo, CAI Xiaofeng, LU Gaifeng. Generator quasi synchronization parameter measurement method based on improved phase difference method of all-phase fast Fourier transform[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(4): 76-83.
- [9] 张巍, 周国鹏, 汪洋, 等. 一起 220 kV 主变压器保护装置发 TV 异常告警的原因分析[J]. *华电技术*, 2019, 41(6): 23-26, 37.
- ZHANG Wei, ZHOU Guopeng, WANG Yang, et al. Analysis of an abnormal alarm of TV for a 220 kV main transformer protection[J]. *Huadian Technology*, 2019, 41(6): 23-26, 37.
- [10] LIU Y, MELIPOULOS A P, SUN L, et al. Protection and control of microgrids using dynamic state estimation[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2018, 3(4): 340-352. DOI: 10.1186/s41601-018-0104-2.
- [11] 李本瑜, 陈海龙, 刘志文, 等. 大型发变组保护 CT 极性 & 保护方向自动检测技术研究[J]. *电测与仪表*, 2018, 55(14): 100-105.
- LI Benyu, CHEN Hailong, LIU Zhiwen, et al. Research on CT polarity and protection direction automatic detection technology for large generator transformer unit[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2018, 55(14): 100-105.
- [12] 刘家军, 田东蒙, 贺长宏, 等. 基于电网间同期并列装置的统一潮流控制器进行联络线融冰的仿真研究[J]. *电网技术*, 2012, 36(4): 89-93.
- LIU Jiajun, TIAN Dongmeng, HE Changhong, et al. Simulation research on ice-melting of tie line by UPFC based on synchronizing device[J]. *Power System Technology*, 2012, 36(4): 89-93.
- [13] 杜喜来. 电流互感器接地点原则及案例分析[J]. *华电技术*, 2018, 40(8): 31-33.
- DU Xilai. Principle and case analysis of current transformer ground point[J]. *Huadian Technology*, 2018, 40(8): 31-33.
- [14] 朱卫列, 王智微, 李振华. 基于设备特征值的电站设备状态检修[J]. *热力发电*, 2018, 47(12): 72-76.
- ZHU Weilie, WANG Zhiwei, LI Zhenhua. Condition based maintenance for power station equipments based on equipment characteristic value[J]. *Thermal Power Generation*, 2018, 47(12): 72-76.
- [15] 杨高峰, 谢兵, 曾志安, 等. 基于 SCD 与 CCD 校准的智能变电站跨间隔检修技术研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(2): 175-181.
- YANG Gaofeng, XIE Bing, ZENG Zhi'an, et al. Research on cross-interval maintenance technology of intelligent substation based on SCD and CCD calibration[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(2): 175-181.
- [16] 王利平, 庞晓艳, 朱雨, 等. 基于物联网和移动互联网的二次设备运维技术研究与应用[J]. *中国电力*, 2019, 52(3): 177-184.
- WANG Liping, PANG Xiaoyan, ZHU Yu, et al. Research and application of intelligent maintenance system based on internet of things and mobile internet technology[J]. *Electric Power*, 2019, 52(3): 177-184.
- [17] 周静, 孙媛媛, 胡紫巍, 等. 智能电网信息通信架构演进探讨[J]. *中国电力*, 2018, 51(3): 131-135.
- ZHOU Jing, SUN Yuanyuan, HU Ziwei, et al. Discussion on smart grid information & communication architecture evolution[J]. *Electric Power*, 2018, 51(3): 131-135.
- [18] 李博, 孙建军, 王朝亮, 等. 考虑高次谐波影响的智能

- 配电合并单元改进采样数据同步方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 20-27.
- LI Bo, SUN Jianjun, WANG Chaoliang, et al. Improved sampling synchronization method used by merging unit in smart distribution network considering higher harmonic effects[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 20-27.
- [19] 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.
- YUAN Mingjun, JIANG Hao, LI Qiang, et al. Research on key technology of four unified four standard phasor measurement unit[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 182-187.
- [20] 张建东, 冯小明, 吴国平, 等. 基于 TDFFT 非同步采样谐波测量的小电流接地故障信号处理方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 117-124.
- ZHANG Jiandong, FENG Xiaoming, WU Guoping, et al. Signal processing method of small current grounding fault based on TDFFT non synchronous sampling harmonic measurement[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 117-124.
- [21] 王振华, 于同伟, 马志敏, 等. 一种分布式间隔单元的低成本准同步采样系统的研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(15): 132-136.
- WANG Zhenhua, YU Tongwei, MA Zhimin, et al. Research of the low-cost quasi-synchronous sampling system in distribution terminal unit[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(15): 132-136.
- [22] 陶维青, 祝鑫, 方陈, 等. 配电网相量数据集中器主要指标及测试方法[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 801-809.
- TAO Weiqing, ZHU Xin, FANG Chen, et al. Research on main indicators and test methods of distribution network phasor concentrator[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 801-809.
- [23] 钟景川. 短距离无线通信中可编程调制解调基带收发机的电路设计[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- ZHONG Jingchuan. Design of programmable modulation and demodulation baseband transceiver for short distance wireless communication[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [24] 刘大林, 王琦, 黄华明. 基于 FPGA 的高精度 IEEE1588 时间戳的设计与实现[J]. 光通信技术, 2015, 39(6): 27-29.
- LIU Dalin, WANG Qi, HUANG Huaming. Design and implementation of high-precision IEEE1588 timestamp based on FPGA[J]. Optical Communication Technology, 2015, 39(6): 27-29.
- [25] 刘益青, 高伟聪, 高厚磊, 等. 适用于智能变电站混合数据源接入的保护同步采样方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(11): 158-164.
- LIU Yiqing, GAO Weicong, GAO Houlei, et al. Protection synchronous sampling method for hybrid data source access in intelligent substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11): 158-164.
- [26] 杨海峰, 王岩国, 王太宏, 等. RFID 射频收发器可编程配置模块设计[J]. 固体电子学研究与进展, 2013, 33(2): 153-157.
- YANG Haifeng, WANG Yanguo, WANG Taihong, et al. Design of programmable configuration module in RFID transceiver[J]. Research & Progress of Solid State Electronics, 2013, 33(2): 153-157.

收稿日期: 2019-10-21; 修回日期: 2019-12-15

作者简介:

汪冬辉(1989—), 男, 硕士, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 342736679@qq.com

罗建平(1970—), 男, 通信作者, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: jiangzhuoyan@kemov.com

(编辑 张爱琴)