

DOI: 10.7667/PSPC171264

# 基于PI的合并单元同步校准实用技术

唐志军

(国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建 福州 350007)

**摘要:** 智能变电站合并单元的同步性直接关系到所采集的电气量实时数据的时间一致性。高效的合并单元同步校准系统保证了合并单元数据的一致性。研究了合并单元的同步源和同步误差产生的原因, 讨论了常见的时钟同步方法。提出了基于移相法和频率微调法的合并单元校准系统, 并引入比例积分调节器对合并单元校准系统进行了同步控制。实际测试结果表明: 采用所提方法后, 同步偏差的波动范围从原先的 600 ns 至 900 ns 区间下降到 40 ns 左右, 证明了所提方法的有效性。

**关键词:** 合并单元; 同步; 校准; 比例积分调节

## Practical technology of synchronization calibration based on PI for merging unit

TANG Zhijun

(State Grid Fujian Electric Power Research Institute, Fujian 350007, China)

**Abstract:** The synchronization of the intelligent substation merging unit is directly related to the time consistency of the collected real-time data. The efficient merge unit synchronization calibration system ensures the data consistency of merging unit. This paper studies the reasons of the synchronization source and synchronization error of the merging unit, and discusses the common clock synchronization method. A merging unit calibration system based on phase shift method and frequency fine adjustment method is proposed, and the proportional integral regulator is introduced to synchronize the control system of the merging unit calibration system. It introduces the implementation process of PI-based merging unit synchronization calibration system. The actual test results show that the range of the synchronization deviation fluctuates from the original 600 ns to 900 ns interval to about 40 ns after using this method, which proves the effectiveness of the method.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Fujian Electric Power Company Ltd. (No. 521304150043).

**Key words:** merging unit; synchronization; calibration; proportional integration adjustment

## 0 引言

随着智能化变电站应用的不断深化, 作为智能变电站的核心元件, 高效能的合并单元成为当前研究的热点<sup>[1]</sup>。虽然学界和工业界研发了各种功能先进的合并单元<sup>[2]</sup>, 但研究的侧重点在于合并单元的功能性, 而对于合并单元的同步性等关键指标容易忽略<sup>[3]</sup>。

合并单元的同步性对保障变电站的平稳运行具有重要意义<sup>[4]</sup>。文献<sup>[5]</sup>详细描述了一起由于合并单元不同步引起 500 kV 智能变电站继电保护异常的

真实事故, 由于合并单元的数据不同步, 造成了同时出现主变保护和北母线的差动同时误动, 而南母线保护拒动的严重情况。其中, 主变 220 kV 侧变压器差动保护用电流波形滞后 500 kV 侧电流一个周波, 造成变压器差动保护误动作, 主变三侧跳闸。220 kV 母差保护中的线路间隔电流滞后运行于 220 kV 北母线的主变间隔电流波形一个周波, 造成 220 kV 北母差动保护动作。而 220 kV 南母线差动保护用各间隔电流均同步(实际均滞后统一时标一个周期), 母差动保护未动作。

合并单元的同步性, 直接关系到所采集的电气量实时数据的时间一致性, 相对于功能性, 合并单元的同步性指标不容易量化<sup>[6]</sup>。当前合并单元的现

基金项目: 国网福建省电力有限公司科技项目 (521304150043)

场校正过程中,通常采用电气量角度偏差在工频下对应的的时间值,这是合并单元自身设备的一种相对的时间偏差,不具有全站的绝对时间延时的意义<sup>[7]</sup>。

当合并单元自身的时间基准出现偏差时,就会导致电气量实时数据不具有同步性。合并单元的时间基准偏差越大,电气量实时数据也因为同步性越差而降低可用性。

随着不同厂家的合并单元在智能变电站中更加广泛地使用,合并单元更加多样化,而且合并单元在强电磁干扰环境下长时间运行,亟需采用先进的合并单元校准系统,以便能够对合并单元进行全面、准确的测试。尤其是合并单元的同步性测试等技术难点,为电力设备检验、运行维护等部门提供统一、可靠的合并单元测试结果,是保障智能变电站安全可靠运行的基础<sup>[8]</sup>。

## 1 □ 同步校准

智能变电站依赖于合并单元提供统一的数据供各种类型的智能电子设备共享,数据的同步性至关重要,电力学界和工业界正在积极开展对合并单元同步性的测试和校准研究。

文献[9]针对变电站合并单元测试设备技术性能中“延时特性”和“准确度”两项关键指标缺乏有效校验手段的问题,提出了一种校验变电站合并单元测试设备技术性能的方法。文献[10]利用了布置在变电站就地各个间隔汇控柜内的同步信号作为测试输出的基准,实现智能变电站同步整组试验方法。文献[11]提出了一种基于精确离散时间控制的合并单元暂态时间特性测试方案,采用数字相位锁定器消除数字量时序抖动,利用突变量检测确定初始时刻,再结合相位提取进行时差补偿修正的方法。文献[12]分析了合并单元测试过程中合并单元不能提供时间准确度测试接口,每秒采样的数据信息中没有绝对时间信息,从而导致传输延迟无法测量等问题。

上述文献从不同角度研究了合并单元同步测试方法,但较少从合并单元同步校准技术方面进行研究。文献[13]针对环境温度对时钟同步设备精度造成的影响,提出一种基于遗传算法和PID控制原理的时钟自适应误差修正方法。本文将在该文的理论研究基础上,从电力工程应用的角度,研究一种适用于合并单元同步校准的实用化方法。

## 2 同步性

### 2.1 同步源

智能变电站配备全站统一的时间同步系统,给

变电站内包括合并单元在内的所有装置提供同步信号,同步时钟方式包括简单网络时间协议(Simple Network Time protocol, SNTP)、IEEE1588(IEC 61588)、IRIG-B(串行时间B码)、1PPS秒脉冲对时等上述主要方式<sup>[14-16]</sup>。

SNTP通过以太网报文方式提供网络时间服务,SNTP根据同步源和网络路径的不同,能够提供1~50ms的时间精确度。IEEE1588(IEC 61588)是一种采用主从结构的高精度网络时钟同步协议,可以达到亚微秒级别的同步精度,精度高于SNTP方式,但对网络芯片的硬件要求较高,要求能够支持生成时间戳。IRIG-B(DC)码的同步精度可达几十纳秒量级,但需要额外的通信串口来实现时间的传送。GPS的1PPS秒脉冲用来指示整秒的时刻,通常是用PPS秒脉冲的上升沿来标示,精度高达纳秒级,并且没有累积误差。

SNTP和IEEE1588需要依靠通信网络进行对时,尤其IEEE1588需要底层网络硬件支持,IRIG-B需要专门的额外的通信串口,而1PPS秒脉冲对时方式实现相对简单,在变电站对时系统中得到了广泛应用,如表1所示。本文将重点考虑当前合并单元同步校准系统中普遍采用的1PPS秒脉冲对时方式。

表1 智能变电站主要同步方式比较  
Table 1 Comparison of main synchronization modes of intelligent substation

同步方式	同步精度	时钟方式	支持
SNTP	1~50 ms	以太网报文	软件实现
IEEE1588	亚微秒级	以太网报文	硬件时间戳
IRIG-B	几十纳秒级	串口	额外串口
1PPS	纳秒级	脉冲	无特殊要求

### 2.2 同步误差

无论采用基于以太网报文的SNTP和IEEE1588同步方式,或是基于串口的IRIG-B(DC)码,以及1PPS秒脉冲同步对时,合并单元校准系统主要依靠外部同步信号到达时校正时间。而外部同步时钟没到来之前的大部分时间,合并单元校准系统需依靠自身的时钟来保持同步信号。

合并单元校准系统的控制器通常采用本地的晶振类时间振荡器提供时间基准,尽管当前电子市场上已出现精度较高的晶振,但受限于晶振材料、制造工艺、长时间运行出现老化现象等自身因素影响,同时受到变化的温度和湿度等外界因素影响,晶振振荡过程中会产生一定的偏差,长时间运行所累积的偏差将会导致同步误差偏大。

晶振振荡过程中会产生一定程度的偏差,需要借助于同步时钟源进行校准;而如何将合并单元校准系统快速地修正到稳定的同步值,则有赖于高效的同步校准方法。同时,在同步时钟源没有到来的时刻,也需要有效的校准方法,能自适应地校正由晶振所引起的同步偏差。

### 2.3 同步校准方法

智能变电站的时间同步主要有直接清零法、移相法和频率微调法三种方式<sup>[7]</sup>。直接清零法利用外部时钟信号对合并单元校准系统的时钟进行直接清零以实现时间同步,清零脉冲的信号波形是否完好直接影响同步精度,而且受清零时刻的影响导致合并单元校准系统的时钟波动较大。

移相法通过比较外部时钟与合并单元校准系统自身时钟的偏差,根据该偏差对自身时钟信号移相从而逐步实现两种时钟的同步。频率微调法是外部时钟信号没有到达合并单元期间,合并单元校准系统对本地时钟自适应调整以实现时间同步的一种方式。

直接清零法虽然实现较为简单,但由于直接对合并单元校准系统的计数时钟清零,具有“暴力性”,割断了清零前后时刻的同步时钟的承接性,容易造成同步时钟的“凸点”问题。而移相法则在外部时钟到来时采用相对平稳的修正方法,因此,本文采用移相法和频率微调法方法实现合并单元校准系统的同步功能,具体原理如图 1 所示。

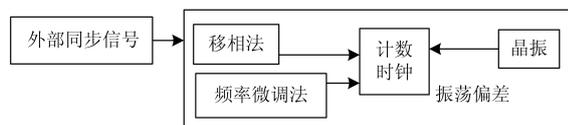


图 1 时钟同步功能原理

Fig. 1 Clock synchronization function principle

合并单元校准系统控制器的计数时钟,通常由不断进行累加的计数器组成,该计数器由晶振提供时间基准。由于晶振自身的振荡偏差,尤其长时间运行将造成较大的累积误差,将借助于外部同步信号进行计数时钟的调整。

外部时钟到达时,结合当前计数时钟的数据,采用移相法对控制器计数时钟的数值进行同步调整;外部时钟未到达时,采用频率微调法自适应地调整控制器的计数时钟。

控制器计数时钟的数值调整过程,涉及到当前数值以及期待的同步目标,实际上是一个闭合的控

制调整过程。由于比例积分 PI 调节器在闭环控制领域具有良好表现,比例积分 PI 调节器有望实现计数时钟数值的高效、平稳设置。

## 3 PI 的同步控制

### 3.1 比例积分 PI 调节器

作为一种经典的线性控制模式,比例积分 PI 调节器将目标值与输出值之间的差值作为控制偏差,控制偏差经过比例和积分环节后按线性组合构成控制量,从而形成一个稳定、高效的闭环控制系统<sup>[8]</sup>。

比例积分 PI 调节器由比例控制和积分控制两个环节组成。比例控制中,根据当前控制系统的偏差,按比例生成调节值,并将该调节值进行控制以以减少偏差。比例系数的选择,对比例控制效果具有直接影响。如果比例系数整定得比较大,则控制系统的响应速度较快,可以较快地达到目标控制值;比例系数整定得过于大,则可能出现系统超调的情况,严重时会降低系统的稳定性,甚至造成系统的不稳定。

积分控制则用于消除控制系统的稳态误差,提高无误差度。当控制系统存在误差时,积分控制就开始调节直至无差。积分作用的强弱取决于积分系数,当积分系数较小时,积分控制效果较强,系统的响应速度较快,但存在闭环系统超调的风险较大,反之亦然。

比例积分 PI 调节器综合了比例控制和积分控制两种规律的优点,比例部分能迅速响应控制作用,积分部分则最终消除稳态偏差,因而比例积分 PI 调节器得到了广泛的应用。

### 3.2 具体实现方法

以智能变电站最常见的 1PPS 秒脉冲作为同步信号,采用比例积分 PI 调节器,调整合并单元校准系统控制器的计数时钟,以修正合并单元校准系统控制器晶振的振荡偏差导致的同步误差,实现高效、稳定的同步性能。

合并单元校准系统控制器大多采用嵌入式系统,可以采用查询、中断等方式进行外部时钟处理。由于中断方式可以设置成处理级别较高的中断程序,时钟同步中断程序可以优先得到及时处理。

为了方便表述,在合并单元校准系统控制器中,设置辅助快照时间纳秒寄存器,用于接收外部秒脉冲同步信号和比例积分 PI 调节器的输出结果,同时输出纳秒部分计算值,并与整秒计数值做比较,形成差值,如图 2 所示。

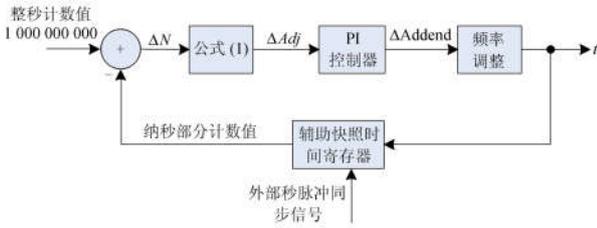


图 2 基于 PI 的同步功能

Fig. 2 PI-based synchronization

基于 PI 的合并单元校准系统同步功能如图 2 所示，具体实现流程包括：

(1) 将 1PPS 秒脉冲同步信号接入合并单元校准系统控制器的中断管脚，并注册相应的中断响应，完成外部同步信号的中断管脚初始化。

(2) 当秒脉冲同步信号的第一个上升沿到来时，在中断响应函数中使用粗调方法，分别初始化本单元的主控制器系统时间秒寄存器和纳秒寄存器为 0。

(3) 当秒脉冲同步信号后续的上升沿到来时，在中断响应函数中读取辅助快照时间寄存器的计数值，计算其与整秒计数值(1 000 000 000)的差值  $\Delta N$ ，通过式(1)计算主控制器系统时间的频率变化量  $\Delta Adj$ ，具体表达式为

$$\Delta Adj = \frac{\Delta N}{1\,000\,000\,000} \cdot ADDEND \quad (1)$$

其中，ADDEND 为主控制器系统时间的频率调整因子，具体表达式为

$$ADDEND = \frac{f_{iCLK}}{f_{iCLK}} \times 2^{32} \quad (2)$$

式中： $f_{iCLK}$  为主控制器系统时间的频率标准值； $f_{iCLK}$  为主控制器系统参考频率。

(4) 将  $\Delta Adj$  作为 PI 控制律的输入量，通过 PI 算法计算主控制器系统时间的频率调整量  $\Delta Addend_i$ ，具体表达式为

$$\Delta Addend_i = k_p \times \Delta Adj + k_i \times \Delta Addend_{i-1} \quad (3)$$

式中： $k_p$  和  $k_i$  分别是 PI 控制律中比例控制因子和积分控制因子； $\Delta Addend_{i-1}$  是上一次的频率调整量。

(5) 更新主控制器系统时间的频率调整寄存器  $pEMAC\_PTP\_ADDEND$ ，具体表达式为

$$*pEMAC\_PTP\_ADDEND = ADDEND + \Delta Addend_i \quad (4)$$

(6) 重复步骤(3)—(5)，在每个外部秒脉冲同步信号到来时调整系统时间。

## 4 测试与分析

搭建合并单元校准系统的同步测试平台，由继

电保护测试仪、合并单元校准系统、数字示波器或精密时间分析仪组成，如图 3 所示。

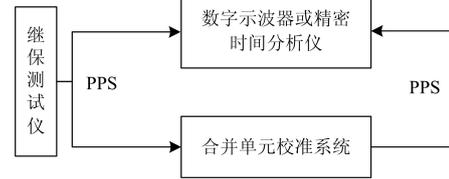


图 3 测试平台

Fig. 3 Testing platform

继电测试仪输出 1PPS 秒脉冲给合并单元校准系统，合并单元校准系统跟踪外部输入的 PPS 信号调整自己时钟并输出 PPS。数字示波器或精密时间分析仪记录两个 PPS 的上升沿时间差，通过数字示波器或精密时间分析仪的测试结果，验证合并单元校准系统的对时准确度，从而实现合并单元校准系统的时间检验功能的验证<sup>[19-20]</sup>。

首先测试当合并单元校准系统没有采用 PI 同步功能时的时间偏差，记录 1 000 次 1PPS 秒脉冲到达合并单元校准系统的测试过程中该系统的同步波动范围，如图 4 所示。

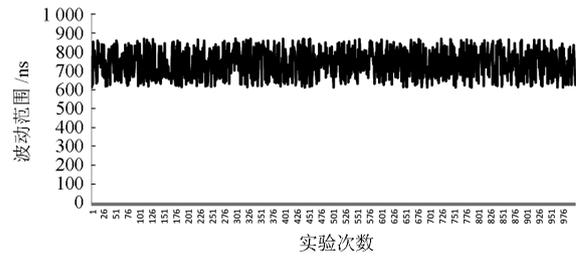


图 4 非 PI 方法的同步时钟波动范围

Fig. 4 Synchronization clock fluctuation range of non-PI method

从图 4 的实测数据可以看到，没有采用 PI 方法进行校准时，同步时钟偏差的波动范围较大，主要集中在 600 ns 到 900 ns 的百兆纳秒的范围，而且单个时刻的同步时钟偏差也较大，高达几百纳秒的偏差范围。

接着采用本文介绍的基于 PI 同步功能时的时间偏差，同样记录 1 000 次 1PPS 秒脉冲到达合并单元校准系统的测试过程中该系统的同步波动范围，如图 5 所示。

从图 5 的实测数据可见，采用 PI 方法进行校准后，合并单元校准系统的同步时钟偏差已经大幅度缩小到几十纳秒级别，普遍不到 40 ns，表明基于 PI 控制器的合并单元校准系统具有较好的稳定性，而且同步时钟的偏差也较小。

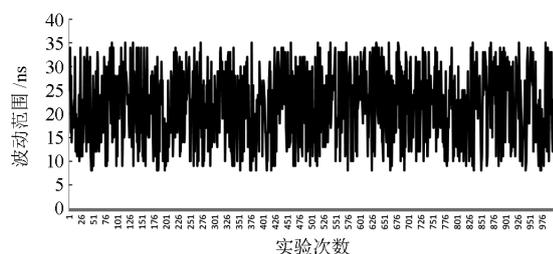


图 5 基于 PI 方法的同步时钟波动范围

Fig. 5 Synchronous clock fluctuation range based on PI method

## 5 结语

合并单元担负着提供智能变电站电气量数据的重要任务，合并单元的同步性决定着电气量数据的可用性，因此合并单元亟需高效、可靠的同步校准技术。本文在分析合并单元的同步源和同步误差产生的原因基础上，提出了一种基于 PI 的合并单元校准实用技术，介绍了基于 PI 的合并单元同步校准实用方法的具体实现流程。实际测试结果表明，采用本文方法后，同步偏差的波动范围从原先的 600~900 ns 区间下降到 40 ns 左右，证明了该方法的有效性。

## 参考文献

- [1] 李帅, 虞小燕, 龚世敏, 等. 数字量输入式合并单元的白噪声处理[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 128-133.  
LI Shuai, YU Xiaoyan, GONG Shimin, et al. White noise processing in merging unit of digital input[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 128-133.
- [2] 曹海鸥, 高翔, 杨毅, 等. 基于全模型 SCD 二次系统在线检测及智能诊断应用分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 136-141.  
CAO Haiou, GAO Xiang, YANG Yi, et al. Analysis of online monitoring and intelligent diagnosis based on the full model SCD secondary system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 46(14): 136-141.
- [3] 李晓朋, 裘愉涛, 钱建国, 等. 智能变电站二次设备互换性探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 76-81.  
LI Xiaopeng, QIU Yutao, QIAN Jianguo, et al. Discussion on interchangeability of secondary devices in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 76-81.
- [4] 梁福波, 郑伟, 智勇, 等. 智能变电站投运事故分析及其动模仿真[J]. 中国电力, 2013, 46(5): 61-65.  
LIANG Fubo, ZHENG Wei, ZHI Yong, et al. Accident analysis and dynamic simulation of smart substation[J]. Electric Power, 2013, 46(5): 61-65.
- [5] 牛雪媛, 翟建帆, 李春林, 等. 合并单元不同步引起的智能变电站事故分析[J]. 电工技术, 2015(2): 38-39.  
NIU Xueyuan, ZHAI Jianfan, LI Chunlin, et al. Fault analysis of smart substation caused by non synchronization of merging unit[J]. Electric Engineering, 2015(2): 38-39.
- [6] 周春霞, 李明, 张维. 针对 500 kV 数字化变电站过程层采样的动模试验及若干问题探讨[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 219-223.  
ZHOU Chunxia, LI Ming, ZHANG Wei. Dynamic simulation test on sampling of process layer in 500 kV digital substation and analysis on several related problems[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 219-223.
- [7] 左军, 王永庆, 马磊. 基于多层次模糊综合评价法的配电网风险评估研究[J]. 陕西电力, 2016, 44(8): 28-32.  
ZUO Jun, WANG Yongqing, MA Lei. Distribution grid risk assessment based on multilevel fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(8): 28-32.
- [8] 侯亮, 冯亮, 杨庆伟. 智能变电站虚拟回路自动化校核技术的研究[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(6): 44-48.  
HOU Liang, FENG Liang, YANG Qingwei. Research of smart substation virtual circuit automatic checking[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(6): 44-48.
- [9] 欧阳帆, 朱维钧, 陈宏, 等. 变电站合并单元测试设备校验系统及其实现[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(18): 1-7.  
OUYANG Fan, ZHU Weijun, CHEN Hong, et al. Calibration system for substation merging unit test equipment and its implementation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(18): 1-7.
- [10] 贺晓, 李俊, 陈洁羽, 等. 智能变电站配置文件管控系统建设方案研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(8): 75-81.  
HE Xiao, LI Jun, CHEN Jieyu, et al. Construction scheme study on configuration file management and control system in intelligent substation[J]. Smart Power, 2017, 45(8): 75-81.
- [11] 舒展, 汤汉松, 谢国强, 等. 模拟量合并单元暂态时间特性测试技术研究[J]. 电测与仪表, 2015, 52(7): 40-45.  
SHU Zhan, TANG Hansong, XIE Guoqiang, et al. Technology of time characteristic testing of analog quantity merging unit in transient state[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(7): 40-45.
- [12] 刘海涛, 黄鸣宇, 赵旭阳. 智能变电站合并单元时间性能测试问题的研究[J]. 华东电力, 2013, 41(1): 119-121.

LIU Haitao, HUANU Mingyu, ZHAO Xuyang. Time measurement for merging units of intelligent substation[J]. East China Electric Power, 2013, 41(1): 119-121.

[13] 李德新, 钟俊. 基于遗传算法与PID原理的IEEE1588从时钟同步研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 96-101.

LI Dexin, ZHONG Jun. Research on IEEE 1588 slave time synchronization based on genetic algorithm and PID control theory[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 96-101.

[14] 贺春, 陈光华, 张道农. IEEE Std 1588-2008 精确时间同步协议行业规范在电力系统的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 133-138.

HE Chun, CHEN Guanghua, ZHANG Daonong. Research on standard profile for use of IEEE Std 1588-2008 precision time protocol in power system applications[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 133-138.

[15] 李俊刚, 刘星, 张爱民, 等. 智能变电站 IEEE1588 时钟同步冗余技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 97-101.

LI Jungang, LIU Xing, ZHANG Aimin, et al. Research on redundant technology of IEEE1588 clock synchronization system in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 97-101.

[16] 王东亮, 李旭阳, 王洪新. 基于 NTP 协议网络应用时间戳同步机制的研究与应用[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 1): 477-483.

WANG Dongliang, LI Xuyang, WANG Hongxin. Research and application on the timestamp synchronization mechanism of NTP network applications[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 477-483.

[17] 周华良, 郑玉平, 姜雷, 等. 适用于合并单元的等间隔采样控制与同步方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(23): 96-100.

ZHOU Hualiang, ZHENG Yuping, JIANG Lei, et al. An equal-interval sampling control and synchronization method for merging unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(23): 96-100.

[18] 汪先兵, 费树岷, 徐清扬, 等. BP 神经网络 PID 控制的永磁真空开关储能电容恒流充电特性分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(10): 212-218.

WANG Xianbing, FEI Shumin, XU Qingyang, et al. Constant current charging characteristic analysis of storage capacitor based on BP neural network PID control for permanent magnet vacuum switch[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(10): 212-218.

[19] 李文正, 李宝伟, 倪传坤. 智能变电站光纤差动保护同步方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(16): 136-140.

LI Wenzheng, LI Baowei, NI Chuankun. Study on synchronization method for optical differential protection in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(16): 136-140.

[20] 黄灿, 肖驰夫, 方毅, 等. 智能变电站中采样值传输延时的处理[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 5-10.

HUANG Can, XIAO Chifu, FANG Yi, 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.

收稿日期: 2017-08-22; 修回日期: 2017-10-08

作者简介:

唐志军(1973—), 男, 本科, 工程硕士, 高工, 主要研究方向为继电保护与自动化. E-mail: 13705004007@139.com

(编辑 张爱琴)