

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2019.06.007

# 具有异常分析功能的通用型数字量 输入式合并单元

Universal digital-input merging unit with fault analysis function

谢坤<sup>1,2</sup>, 赵谦<sup>1,2</sup>, 程成<sup>1,2</sup>, 李帅<sup>1,2</sup>, 蔡亮亮<sup>1,2</sup>

XIE Kun<sup>1,2</sup>, ZHAO Qian<sup>1,2</sup>, CHENG Cheng<sup>1,2</sup>, LI Shuai<sup>1,2</sup>, CAI Liangliang<sup>1,2</sup>

(1. 国电南京自动化股份有限公司, 南京 210003; 2. 南京国电南自电网  
自动化有限公司, 南京 211153)

(1. Guodian Nanjing Automation Company Limited, Nanjing 210003, China; 2. Nanjing  
SAC Power Grid Automation Company Limited, Nanjing 211153, China)

**摘要:**数字量输入式合并单元是变电站数字采样基本设备,通过合并电子式互感器数字量报文,实现变电站电气间隔的数字化采样。目前各厂家电子式互感器与数字量输入式合并单元间互操作性不强,输出易产生异常数据而影响可靠性,无法满足当前智能变电站对数字化采样的要求。对数字量输入式合并单元的多规约兼容、异常采样数据监测、链路状态分析等技术进行了研究,并在物理装置上实现。试验测试表明,研究成果可以提升数字采样系统的互操作性,提高数字化采样的可靠性,从而提升变电站智能化水平。

**关键词:**智能变电站;数字量输入式合并单元;异常监测;多规约兼容

**中图分类号:**TM 76 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-1951(2019)06-0033-05

**Abstract:** Universal digital-input merging unit is an important device in smart substation. By receiving and merging digital message from electronic transformer, digital merging unit transfers sampling data to substation. At present, the interoperability between different electronic transformers and digital merging units is low, which affects the reliability of output data. The requirements of digital sampling in smart substation cannot be satisfied. Multi-protocol compatibility, outlier data detection and link state analysis are explored for digital merging unit and the functions are implemented on a physical device. Basing on the experimental results, it shows that the exploration can increase intelligent level for substation by improving its compatibility for digital sampling system and reliability for digital sampling.

**Keywords:** smart substation; merging unit of digital input; outlier data detection; multi-protocol compatibility

## 0 引言

电子式互感器与数字量输入式合并单元(以下简称数字合并单元)是变电站数字采样的基础设备。数字合并单元接收电子式互感器的采样信息,合并转化为特定的数据格式传输至继电保护、测控等二次设备,是变电站内连接一、二次系统的纽带。电子式互感器技术源于国外,20世纪80年代,我国开始进行电子式互感器的相关研究。1999年国内电子式互感器的标准化工作才正式开展,2012年以后才有合并单元的相关国家标准。由于电子式互感器类型众多、各厂家技术特点各不相同,导致与之配套的

数字合并单元种类繁多、设计各异<sup>[1-5]</sup>。

为适应不同类型的电子式互感器,数字合并单元大多采用一对一定制式开发方式,装置可维护性较差,各厂家电子式互感器与数字合并单元间互操作性不高<sup>[6-9]</sup>。

国内常用光串行编码数据作为电子式互感器输出链路,报文监视困难。数字合并单元与电子式互感器的“黑盒”通信方式,导致采样数据和通信链路的可靠性不高,现场通信如发生断链或保护非正常动作,只能通过测试仪进行模拟测试分析。测试仪对数字合并单元与电子式互感器的采样、通信和链路异常不能做到实时分析、实时上送<sup>[10-12]</sup>。

数字合并单元作为变电站内连接一、二次系统的纽带,亟待优化和改进。本文通过对电子式互感器报文的研究,提出一种多规约兼容的方案,以提升

电子式互感器与数字合并单元的互操作性。通过研究新一代智能变电站实时监测电子式互感器采样异常问题,提出适合数字合并单元采样异常的在线监测方法,对数字合并单元与电子式互感器的通信及链路可靠性问题开展研究,提出一种链路异常的在线监测方法。本文提出的通用型数字式合并单元基于 DL/T 282—2012《合并单元技术条件》和 IEC 61850 的多规约兼容,并具备电子式互感器链路和采样数据的在线监测设计的数字式合并单元,将监测与校验信息以面向通用对象的变电站事件(GOOSE)标准协议发送至站控层监控系统<sup>[8-9]</sup>。

## 1 技术方案

### 1.1 数字采样规约及其兼容方案

目前国内智能变电站数字采样方式主要依据两个标准。

(1)基于 IEC 61850-9-2 描述的采样测量值(SV)传输规约,采用以太网作为通信链路,在电子式互感器和数字合并单元间传输电流和电压采样数据,报文格式见文献[13]。该类型的报文格式固定,采样频率分为 4 000 Hz 和 12 800 Hz。

(2)DL/T 282—2012《合并单元技术条件》中电子式互感器规约源于 IEC 60044-8,用于规定电子式电流互感器使用的帧格式(FT3)。传输类型分为同步传输、异步传输;编码方式分为曼彻斯特码、通用异步收发器(UART)码;帧格式类型分为单相互感器、三相电流、三相电压、三相电流电压。传输速率和采样率也各不相同<sup>[14]</sup>。

物理链路兼容性。电子式互感器数据输入端口采用 LC 接口更换式光模块,可保证与各种电子式互感器的链路互通。小型化千兆接口转换器(GBIC)端口(LC 接口)可配置光纤百兆以太网收发一体模块、光纤百兆以太网双收模块、光串行收发一体模块、光串行双收模块等。光电转换回路采用兼容性设计,使得光纤模块可即插即用并互换。

规约软件兼容性。数字合并单元对各种电子式互感器数据采用“积木式”处理模式,均分为类型判别、数据接收、数据插值 3 个过程。

装置初始化时,采用 Power PC 模块对数字采样配置文件进行解析,将装置各光口接收的报文类型写入通用寄存器,再由现场可编程门阵列(FPGA)模块读取通用寄存器,选择接入数据对应的子模块。

数据接收由装置的 FPGA 模块实现,输入数据的采样频率主要为 4 000 Hz 和 12 800 Hz。根据报文类型可细分为 5 个子模块:IEC 61850-9-2 报文模块、基于 DL/T 282—2012 的单相互感器报文模块、

三相电流报文模块、三相电压报文模块、三相电流电压报文模块,负责存放对应帧格式解析后的报文数据。FPGA 模块依据电子式互感器报文到达时刻、固定采样率、固定延时等参数,对各光口接收到的数据进行线性插值处理<sup>[15]</sup>。

通过细分上述功能模块,实现装置对不同规约的兼容性处理。

### 1.2 采样异常的在线监测

在新一代智能变电站中,数字合并单元运行中的常见问题为采样值异常。采样值异常的原因通常是电子式互感器受环境影响出现电流电压突变,造成变电站继电保护装置误动或拒动。在数字合并单元设计采样异常监测功能可有效防范该问题,但存在以下主要难点。

(1)算法可靠性和实时性要求高,数字合并单元的采样异常监测直接影响继电保护的可靠性<sup>[16]</sup>。

(2)数字合并单元一般采用多任务并行处理,包括采样、同步、组包、电压互感器并列切换等。数字合并单元现场应用时需接入多台电子式互感器,导致实时监测采样数据的计算量大,易造成中央处理器(CPU)负荷过载<sup>[16]</sup>。

文献[17]介绍了三周波法的突变量检测方式,文献[18]介绍了一种改进型的突变量算法,依靠保护动作时产生的谐波含量来区分突变量和保护故障。以上突变量的检测方法大多是以三周波计算法为基础,通过对比计算  $A_1, A_2, A_3$  的数值是否一致作为判据( $A_1, A_2, A_3$  分别为第 1, 2, 3 个周波第  $n$  个点的采样值)。

由于数字合并单元接收的采样通道数目和采样频率远大于保护装置,大量数据的存储必然加大 CPU 的资源消耗;此外,以上算法需 3 个周波的数据才能做出判断,实时性不强。

CPU 对判据进行计算时,每次至少需要  $N_{\text{channel}} \times N_{\text{sub}} \times f \times N$  次(式中: $N_{\text{channel}}$  为通道数目; $N_{\text{sub}}$  为最大端口数目; $f$  为单周波采样点数; $N$  为周波数)的计算和数据存储,由此可以得出,当通道数和端口都恒定的情况下, $N$  越小,对资源消耗越少。

新一代智能变电站采用电子式互感器,电子式互感器无励磁饱和,且电力系统正常运行时仅有基波与谐波分量存在,电流、电压波形均为连续的光滑正弦曲线。根据正弦波连续性的特征,对采集的异常采样数据进行分析时,发现这些突变量数据有以下特征:瞬时值比正常波形的有效值大得多,和电网故障相比,突变量通常为单点且当前采样点与前一个采样点不满足连续性,基于以上分析,提出瞬时判断法,判据如下(式(1)和式(2)需同时满足)。

$$|A_{NT} - A_{(N-1)T}| > k_1 \times 2\sin\left(\frac{50\pi}{f_s}\right)A_{\max}, \quad (1)$$

$$|A_{NT} - A_{(N+1)T}| > k_1 \times 2\sin\left(\frac{50\pi}{f_s}\right)A_{\max}, \quad (2)$$

式中:  $A_{NT}$  为当前采样值;  $A_{(N+1)T}$  为下一个采样值;  $A_{(N-1)T}$  为前一个采样值;  $k_1$  为门槛系数, 一般取 1.5 ~ 2.0;  $f_s$  为采样频率;  $A_{\max}$  为前一个周波的最大值。

根据式(1)和式(2), 当  $A_{NT}$  瞬时值等于正常无突变采样数据  $A'_{NT}$ , 或小于  $3A'_{NT}$  为正常电网突变时,  $|A_{NT} - A_{(N-1)T}| \leq k_1 \times 2\sin\left(\frac{50\pi}{f_s}\right)A_{\max}$ ,  $|A_{NT} - A_{(N+1)T}| \leq k_1 \times 2\sin\left(\frac{50\pi}{f_s}\right)A_{\max}$ , 采样值异常模块判断当前电子式互感器输出的采样值正常。

根据国家电网相关要求, 电网发生 3 倍以上的突变视为非正常突变, 因此, 当  $A_{NT}$  瞬时值大于  $3A'_{NT}$  时, 式(1)式(2)成立, 采样值异常模块判断该时刻采样值突变。装置点亮告警灯并通过 GOOSE 发送相应告警信息, 其判别效果将在下文中论证。

为了进一步降低上述采样异常监测功能的资源消耗, 采用“数据用完即释”“有效性预判”等设计。利用 Power PC 内部的定时器来触发中断任务, 完成算法计算、内存申请与释放等功能, 如图 1 所示。

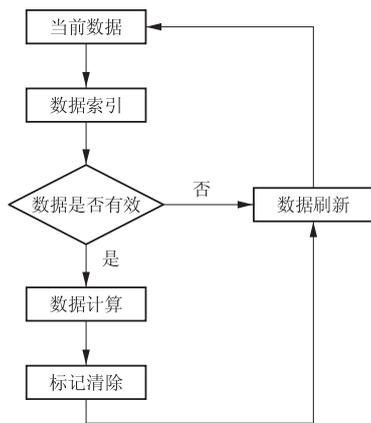


图 1 采样数据判断任务流程

Fig. 1 Task flow of sampling data detection

FPGA 设置一个元素个数为  $N$  的寄存器数组, 用于存储连续采样数据, 并对新获取数据标记有效。Power PC 在定时中断任务中依次进行数据索引、数据有效性判断、采样异常计算、标记清除, 上述步骤循环执行多次直至寄存器数据无效为止。Power PC 对采样异常计算只在数据有效时使能, 避免对无效数据进行操作和计算带来的资源消耗。采样数据读取完毕时, Power PC 清除数据有效标志并触发信号 X1 给 FPGA, 随后 FPGA 清理旧数据、刷新采样数据, 供 Power PC 下次判据使用。

### 1.3 报文品质和链路异常的在线监测

新一代智能变电站中电子式互感器和数字合并单元之间的通信问题主要分为: 电子式互感器因环境影响发出的 FT3 报文品质异常, 因配置、接线等问题导致电子式互感器和数字合并单元报文链路异常。

(1) 品质异常表现为电子式互感器发出的 FT3 报文检修、品质无效、同步失步等。对于该问题, 可采用 FPGA 进行硬解码, 根据配置对报文品质位进行实时扫描判断。

(2) 报文链路异常表现为报文离散性、FT3 帧格式错误。由于电子式互感器规约格式中通道数目、报文头、循环冗余校验 (CRC) 等关键位置相对固定<sup>[14]</sup>, 因此可采用配置比对分析法: 对报文信息进行预配置, FPGA 解析报文比对报文关键字节信息。

Power PC 执行配置解析。Power PC 解析各接收端口配置的电子式互感器报文类型、通道数目、通道类型、额定一次值等信息, 并把解析后的配置信息写入通用寄存器中, 供 FPGA 读取。FPGA 根据通用寄存器的信息 (报文类型、采样频率) 进行整体功能加载。FPGA 对接收的 FT3 报文进行解码, 将报文结构与配置文件进行对比, 从而对通信链路状态进行预判。Power PC 读取 FPGA 的预判结果, 并通过人机界面输出, 或者 GOOSE 上送, 完成对通信链路的实时监测。

## 2 试验验证与应用

### 2.1 异常数据监测判据验证

采用 MATLAB 对上文提出的突变判据可靠性进行校验, 验证在一个完整的周波内判据是否会产生误判或遗漏突变量。

根据式(1)和式(2), 通过以下公式进行校验:

$$y_{NT} = |A_{NT} - A_{(N-1)T}| - k_1 \times 2\sin\left(\frac{50\pi}{f_s}\right)A_{\max}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} y_{NT} > 0 & \text{if } A_{NT} \geq N'A'_{NT}, N' > 3 \text{ (采样突变)} \\ y_{NT} \leq 0 & \text{if } A_{NT} < N'A'_{NT}, N' \leq 3 \text{ (采样正常)} \end{cases}, \quad (4)$$

式中:  $N'$  为突变倍数。

根据式(3)建立单周波 256 点采样率的离散化校验, 对一个完整周波内所有采样点依次进行校验, 以验证判据对任意位置突变量检测的可靠性。

仿真设定幅值  $A_{\max}$  为 1 的正弦波, 采样频率  $f_s$  为 12 800 Hz。在任意时刻产生 3 倍、5 倍、8 倍、20 倍的突变, 计算结果如图 2 所示。

从图 2 可以看出, 该判据可靠性高, 在 3 ~ 20 倍突变量的单周波离散系统校验时, 可以准确判断出任意时刻的突变。

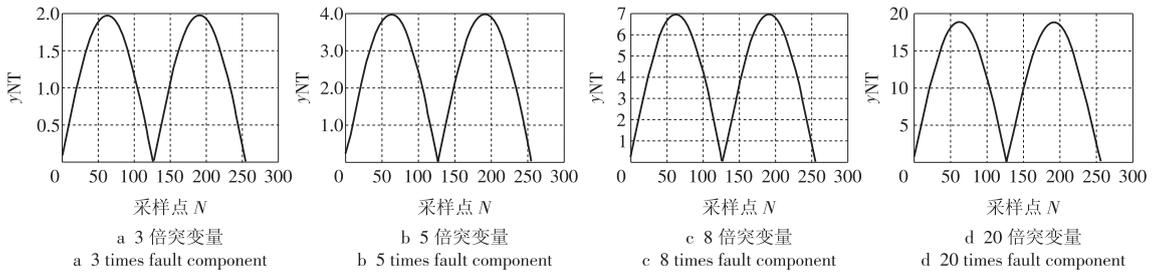


图 2 突变量为 3~20 倍的判据校验结果

Fig. 2 Detection result with 3~20 times fault component as criterion

### 2.2 多规约兼容及性能测试

互通性的增强和实时监测功能的加入势必会对装置的负荷产生影响,其稳定性是考核的重要指标。混合接入多种电子式互感器,并用测试仪模拟装置的多种异常情况,对装置的精度、CPU 负荷和异常信息判断灵敏度进行测试,系统测试框架如图 3 所示。

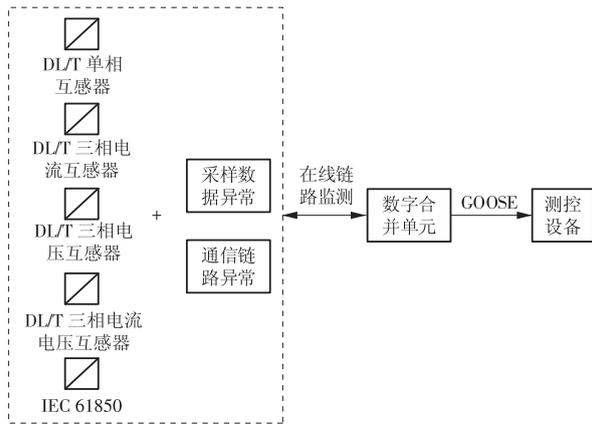


图 3 系统测试框架

Fig. 3 System testing framework

本文提出的数字合并单元可同时兼容 4 000 Hz 采样率的 IEC 61850-9-2 规约,12 800 Hz 采样率的 ABB 电子式互感器格式规约,DL/T 282—2012 中的异步串行 FT3 格式的单相互感器、三相电流、三相电压、三相电流电压规约。图 4 给出了数字合并单元测试的配置信息,其中“SUB\_SMV type”为电子式互感器报文格式代号,从图 4 可以看出,通过配置,装置不同接口可实现接入不同格式报文的功能。

图 5 为单装置的压力测试结构,测试中单台通用性数字合并单元接入 2 台母线合并单元的级联 SV 报文,并同时接入 2 台 12 800 Hz 的 ABB 电子式互感器、2 台异步串行 FT3 格式的单相电子式互感器、2 台异步串行 FT3 格式的三相电压电子式互感器、2 台异步串行 FT3 格式的三相电流电子式互感器、2 台异步串行 FT3 格式的三相电流电压电子式互感器,此时 CPU 最大负荷率为 70%,装置的报文输出比差小于 0.20%,角度差小于 5'(见表 1),效

```

<SUB_SMV type- "282FT3_1" port- "03" >
<FCDA INPUTNO- "53" CHANEL- "01" TYPE- "电压"
<FCDA INPUTNO- "54" CHANEL- "02" TYPE- "电压"
<FCDA INPUTNO- "55" CHANEL- "03" TYPE- "电压"
<FCDA INPUTNO- "56" CHANEL- "04" TYPE- "保护电流"
<FCDA INPUTNO- "57" CHANEL- "05" TYPE- "保护电流"
</SUB_SMV >
<SUB_SMV type- "282FT3_1" port- "04" >
<FCDA INPUTNO- "58" CHANEL- "01" TYPE- "电压"
<FCDA INPUTNO- "59" CHANEL- "02" TYPE- "电压"
<FCDA INPUTNO- "60" CHANEL- "03" TYPE- "电压"
<FCDA INPUTNO- "61" CHANEL- "04" TYPE- "保护电流"
<FCDA INPUTNO- "62" CHANEL- "05" TYPE- "保护电流"
</SUB_SMV >
<SUB_SMV type- "282FT3_2" port- "05" >
<FCDA INPUTNO- "63" CHANEL- "01" TYPE- "电压"
<FCDA INPUTNO- "64" CHANEL- "02" TYPE- "电压"
<FCDA INPUTNO- "65" CHANEL- "03" TYPE- "电压"
<FCDA INPUTNO- "66" CHANEL- "04" TYPE- "电压"
<FCDA INPUTNO- "67" CHANEL- "05" TYPE- "电压"
</SUB_SMV >
<SUB_SMV type- "282FT3_2" port- "06" >
<FCDA INPUTNO- "68" CHANEL- "01" TYPE- "电压"
<FCDA INPUTNO- "69" CHANEL- "02" TYPE- "电压"
<FCDA INPUTNO- "70" CHANEL- "03" TYPE- "电压"
<FCDA INPUTNO- "71" CHANEL- "04" TYPE- "电压"

```

图 4 多种格式配置文件测试示例

Fig. 4 Multi-format configuration file testing example

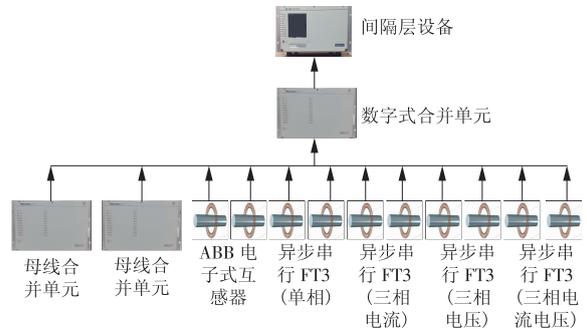


图 5 单装置压力测试结构

Fig. 5 Stress test structure of a single unit

果理想。通过测试仪模拟异常故障,数字合并单元可实时对异常情况进行检测并通过 GOOSE 上送。经测试,所有采集器通信故障全部检测出,包括:采样值突变(3~20 倍,每 5 帧出现 1 帧异常);报文发送额定延时突变;报文丢包(每 5 帧出现 1 帧异常);报文类型错误;发送通道数目错误;CRC 错误(每 5 帧出现 1 帧异常);品质异常(每 5 帧出现 1 帧异常)。

上述各项测试在正常状态下进行多规约格式接入,校验数字合并单元的精度和互通性,然后在施加

各种异常通信故障和采样异常的情况下,再次进行所有项目的测试,校验数字式合并单元对异常信息的检测和性能表现,充分保证数字式合并单元的性能指标能满足现场的需求。

表 1 单装置精度测试结果

Tab.1 Accuracy test results of a single unit

通道类型	输入	输出	最大角度差/(°)	最大比差/%
测量电流	600.0 A	599.9 A	0.12	0.11
电压	110.00 kV	109.98 kV	1.03	0.01
保护电流	600.0 A	599.8 A	2.03	0.10

### 3 结束语

本文分析了现有数字合并单元的不足,研究了多规约兼容技术、采样异常监测技术、链路分析技术,并论述了各功能的实现方案。分析与试验表明,新装置与各种电子式互感器互操作性较好,能有效在线监视采样数据异常,并能分析链路的正确性。后续将进一步开展电子式互感器在线数据分析研究工作。

### 参考文献:

- [1] 余高旺. 新一代智能变电站中多功能测控装置的研制与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 127-132.
- [2] 李孟超, 王允平, 李献伟, 等. 智能变电站及技术特点分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 59-62.
- [3] 李妍, 车勇, 单强, 等. 智能变电站二次系统在线监测评估的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 66-70.
- [4] 叶远波, 孙月琴, 黄太贵, 等. 智能变电站继电保护二次回路在线监测与故障诊断技术[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 148-153.
- [5] 李英明, 郑拓夫, 周水斌, 等. 一种智能变电站合并单元关键环节的实现方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 93-98.
- [6] 路光辉, 邓宇, 周钟, 等. 一种基于 FT3 光纤通信的新型避雷器监测方案[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 119-124.

(上接第 26 页)

- [7] 李鹏, 钟著辉. 一种防反充电电压互感器并列装置的研制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 135-138.
- [8] 燕飞, 沈军. 电压互感器三次谐波电压异常的原因分析[J]. 电测与仪表, 2012, 49(8): 55-60.
- [9] 刘东超, 李铁仲, 张哲, 等. PT 中性线断线的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(5): 73-76.
- [10] 杨锋, 李志, 毛海涛. 基于 PTC 材料的短路限流保护方

- [7] 闫志辉, 周水斌, 郑拓夫. 新一代智能站合并单元智能终端集成装置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 117-121.
- [8] 夏梁, 梅军, 郑建勇, 等. 基于 IEC61850-9-2 的电子式互感器合并单元设计[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(11): 135-138.
- [9] 曹楠, 李刚, 王冬青. 智能变电站关键技术及其构建方式的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 63-68.
- [10] 潘磊, 李斌, 杨光, 等. 交流系统故障时统一潮流控制器处理策略[J]. 电力工程技术, 2017, 36(6): 132-137.
- [11] 于同伟, 蔡玉朋, 金世鑫. 一种面向智能变电站的广域后备自投系统的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 129-135.
- [12] 李鹏, 林金娇, 孔祥平. 统一潮流控制器在苏南 500 kV 电网中的应用[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 20-24.
- [13] Communication networks and systems in substations Part 8-1: Specific communication service mapping (SCSM)—Mappings to MMS (ISO/IEC 9506 Part 1 and Part 2): IEC 61850-8-1[S].
- [14] 合并单元技术条件: DL/T 282—2012[S].
- [15] 谢坤, 余华武, 陈福锋, 等. 一种兼容 Comtrade 格式的新型智能终端[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(4): 111-114.
- [16] 刘振亚. 智能电网技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [17] 杨冠城. 电力系统自动装置原理[M]. 4 版. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [18] 王同文, 谢民, 孙月琴, 等. 智能变电站继电保护系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 58-66.

(本文责编: 刘芳)

### 作者简介:

谢坤(1983—), 男, 江苏南京人, 工程师, 工学硕士, 从事智能变电站过程层研发工作(E-mail: xiekun0719@msn.com)。

赵谦(1985—), 男, 江苏南京人, 工程师, 工学硕士, 从事智能变电站继电保护和过程层研发工作。

程成(1988—), 男, 陕西西安人, 助理工程师, 从事智能变电站继电保护和过程层研发工作。

案及 PTC 限流特性研究[J]. 电力系统保护与控制 2007, 35(12): 10-14.

(本文责编: 陆华)

### 作者简介:

张巍(1987—), 男, 湖北咸宁人, 工程师, 工学硕士, 从事变电站自动化方面的工作(E-mail: zwei1987@yeah.net)。