

智能变电站合并单元延时特性现场测试仪的设计

倪兆瑞¹, 王延安²

(1. 华北水利水电大学, 河南 郑州 450046; 2. 济南供电公司, 山东 济南 250001)

摘要: 分析了智能变电站合并单元的同步问题以及通过现场核相及查看差流这一验证差动保护各侧电流是否同步的方法的局限性。提出了智能变电站合并单元延时特性现场测试仪的设计需求, 基于需求分析提出一种现场测试仪的体系结构并进行了详细设计。最后对依据本设计方法实现的测试仪的时间粒度与合并单元的时间响应配合方面进行了详细计算和比较分析。分析表明, 该测试仪可有效验证合并单元延时参数的现场正确设置, 杜绝误整定, 符合现场验收需求。

关键词: 合并单元; 延时特性; 测试仪; 时间粒度; 设计; 现场测试

Design of field testing instrument for merging unit delay characteristics in smart substation

NI Zhao-rui¹, WANG Yan-an²

(1. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;

2. Jinan Power Supply Company, Jinan 250001, China)

Abstract: The synchronization of merging unit in smart substation and limitations of the method of validating whether the current at each side of differential protection is synchronous by using on-site phase and differential current check are analyzed. The design requirements of field testing instrument with merging unit delay characteristics of smart substation is proposed. The system structure and the detailed design of field testing instrument is introduced based on the design requirements. Finally, the detailed calculation and comparative analysis of tester time granularity and the time response with the merging unit is done. Analysis shows that, the tester can validate that the merging unit delay parameters are set correctly, which can prevent incorrect setting and accord with the site acceptance requirements.

Key words: merging unit; delay characteristics; testing instrument; time granularity; design; field testing

中图分类号: TM764

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)10-0119-06

0 引言

随着智能电网的发展, 智能电网将承载并推动第三次工业革命^[1], 智能变电站作为智能电网的重要环节, 正得到逐步推广应用和大力建设。合并单元作为过程层设备与间隔层智能电子设备间采样数据的传输桥梁, 其同步采样和网络延时特性将直接影响间隔层智能电子设备的正确动作行为。合并单元的同步问题在差动保护中尤为突出^[2-3]。近期发生的合并单元交流电流采样数据不同步引起差动保护装置误动作事故, 正是由合并单元内部软件延时参数设置错误导致差动保护采样不同步所引起的。文献[2]分析了线路差动保护、智能化变压器差动保护、智能化母线差动保护等这类分散采样差动保护同步性在现场难以测试的问题。指出了在工程现场对差动保护进行采样同步测试的必要性。目前, 工

程现场针对差动保护装置各支流电流是否同步的验证, 往往通过送电时核相和查看差流进行; 但在正常运行情况下, 此方法对存在整数倍周波(20 ms)延时的不同步现象难以察觉。

合并单元的采样同步特性是研究者关注的焦点之一^[3-8]。文献[3]针对智能变电站分布式母线保护同步问题, 提出一种基于 IEEE 1588 对时协议的实现方案。文献[4]介绍了面向传统电压/电流互感器合并单元的采样值模型及采样值同步问题, 指出合并单元的采样精度和网络延时技术指标对二次保护控制单元的应用性能的直接影响, 并给出了合并单元的传输延迟时间测试方案, 该方案需要 GPS 同步对时装置, 测试方案复杂。文献[5]从研制合并单元装置的角度, 介绍了基于 IEEE 1588 标准的装置校时和合并单元采样同步技术。文献[6]指出智能变电站网络通信的成功取决于收发报文的准确性和传输报

文的实时性。提出一种采用合并单元相位校准补偿传输延时以提高模拟采样值时标的准确性，并通过测算以太网的最大传输延时验证 SAV 报文实时性的方法。文献[7]提出一种校验点对点传输模拟量采样值额定延迟正确性的方法，该方法结合模拟量采样值的相位误差校验和模拟量采样值报文发送延迟的测量来验证其额定延迟数值的正确性。文献[8]分析了不同类型保护受合并单元输出数据的同步品质的影响，认为同步品质对主保护影响较大，对仅依赖信号幅值的后备保护影响较小。指出若各合并单元对同步跟踪的处理方法不一致，可能严重影响保护设备的安全运行。以上研究主要关注合并单元在装置开发和研制阶段对合并单元实时性和完整性（包括同步特性）的实现方法。另外，从目前已经出现的智能继电保护测试仪和数字信号分析仪^[9]来看，他们主要专注于智能继电保护装置的逻辑测试和网络通信协议的实时解析和监视功能。而面向智能变电站，便于现场验收工作使用的合并单元延时参数测试方法、测试装置的研究还比较少见。

在技术标准方面我国已经制定了智能变电站设计规范^[10]，智能变电站继电保护技术规范^[11]，合并单元技术规范^[12]和合并单元测试规范^[13]等一系列技术标准。IEC 61850 标准中也规定了包括合并单元在内的智能电子设备的系统生命周期，及其从研发阶段到停产、退运阶段的全过程的质量保证^[14]。这些技术规范和标准对合并单元投入运行前需进行的试验类型、测试内容做了相关规定，为合并单元的质量保证提供了相关标准依据。

由于保护装置网络共享采样技术和电子式互感器在智能变电站的试点应用中还不十分稳定，目前智能变电站普遍采用基于传统互感器的合并单元与保护装置点对点通信方式^[15]，本文的研究就是面向“传统互感器加合并单元与保护装置点对点通信”的情况展开。

本文分析了合并单元的同步问题，指出当变压器三侧合并单元的延时参数相差整数倍周期（20 ms）时，无法通过核相和查看差流的方法发现三侧延时不同步的缺陷，但是当有穿越性故障电流时，将会产生故障差流，导致保护误动。针对智能变电站现场验收实际情况，提出了合并单元延时特性现场测试仪的设计要求。根据设计要求给出了测试仪的系统结构并进行了详细设计。最后对本文所设计的测试仪的时间响应特性进行了分析，测试仪的时间粒度（小于 11.51 μs），远小于合并单元的时间粒度（大于 260.1 μs），测试仪的时间响应性符合设计要求。该测试仪的实现将有效弥补目前对合并

单元延时参数设置正确性缺乏验证手段的现状。

1 合并单元的同步问题

智能变电站中合并单元的数据同步问题可分为如下几个方面：1）同一间隔电流、电压采样之间的同步（例，接收 PT 合并单元电压量的间隔合并单元）；2）间隔之间的数据同步（例，变压器差动保护、母线保护）；3）站站之间的数据同步（例，线路纵差保护）。解决数据同步问题的方法主要有两种，即插值重采样同步和基于外时钟同步^[16]。

插值重采样同步适合标准^[11]规定的模拟量应直采的方式。该方式由数据接收端（例，保护装置）依据发送端（合并单元）报文中的额定延时推算接收端时间系统下的采样值。

在“传统互感器+合并单元+直采”模式下，发送端报文中的额定延时是指合并单元的合并同步处理延时。此延时的设定错误将导致保护误动。变压器三侧采样电流录波波形，如图 1 所示。

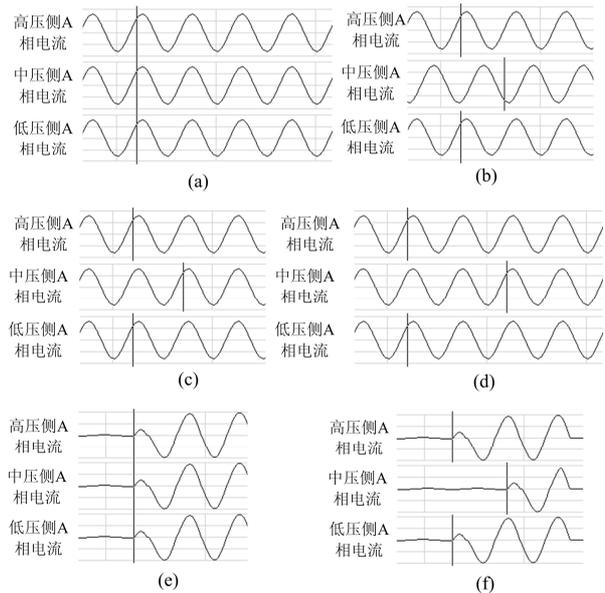


图 1 变压器三侧采样电流波形

Fig. 1 Waveform of the transformer sampling current at three sides

图 1 中 (a)、(b)、(c)、(d) 分别表示系统正常运行时，变压器高、中、低三侧电流采样同步、不同步（中压侧滞后非整数倍周期）、不同步（中压测滞后 1 个周期）、不同步（中压测滞后 2 个周期）的情况。(e)、(f) 分别表示系统有穿越性故障电流时，变压器高、中、低三侧电流采样同步、不同步（中压测滞后 1 个周期）的情况。由图 1 (b) 可见通过核相和在变压器保护装置上查看差流即可发现

缺陷。由图 1 (c)、(d) 可知, 因为差流为 0, 相位相差 360° 的整数倍, 所以无法通过核相和差流发现缺陷。但是当有穿越性故障电流时, 将会产生故障差流, 导致保护误动, 如图 1 (f) 所示。因为目前变压器差动速断保护整组动作时间 (包括继电器固有时间) 一般小于 20 ms, 因此只要相差 1 个周期, 即可误动。

产生以上缺陷的原因是合并单元的延时参数设置错误。

2 设计要求

设计智能变电站合并单元延时特性现场测试仪的关键是准确模拟变电站系统的故障运行情况, 并且便于现场验收操作。应满足如下要求。

(1) 准确模拟变电站现场实际情况。

当区外系统故障时, 故障电流是由正弦正常电流为起点增大为正弦故障电流 (起始阶段含高次谐波除外)。故障电流的采样路径为: 系统一次电流 \rightarrow 电流互感器 \rightarrow 二次电缆回路 \rightarrow 合并单元采样。

(2) 测试仪的时间粒度应远小于合并单元采样传输的时间粒度。

为了准确测量合并单元的延时参数, 测试仪的时间粒度应小于合并单元采样传输时间粒度。按每周 80 点采样^[16-17], 应比 0.25 ms 小一个数量级。

(3) 方便现场验收操作。

智能变电站现场验收的试验项目繁多, 测试合并单元的延时参数只是现场验收工作任务中的一个细小项, 因此所设计的测试仪应满足操作方便的特点。

(4) 技术方案易于实现。

3 测试仪整体方案及其设计

3.1 整体方案

基于第 2 节的设计要求, 本文所提出的测试仪数据流如图 2 所示。即模拟电力系统故障电流并输入被测试合并单元, 捕捉被测试合并单元首次输出

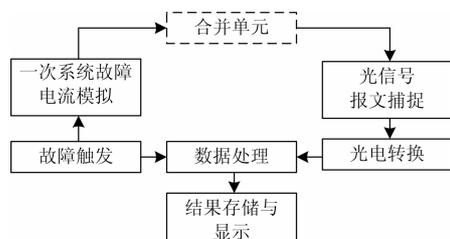


图 2 合并单元延时特性现场测试仪数据流图

Fig. 2 Flow diagram of data delay of merging unit test instrument

的含故障电流信息的报文, 通过对比合并单元接收故障电流和输出故障报文两者的时间差得到合并单元的延时参数。其中数据流时间响应的及时性是设计成功的关键。

测试仪的系统框图共分为四个模块: DSP 系统模块、电流输出模块、报文接收模块和电源系统模块, 如图 3 所示。

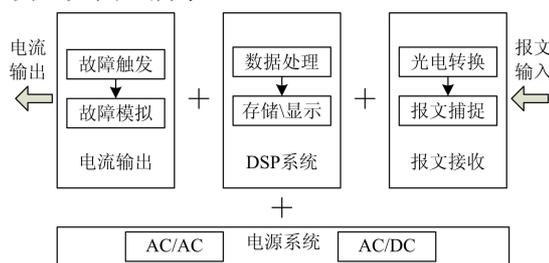


图 3 合并单元延时特性现场测试仪系统框图

Fig. 3 Block diagram of the system with the merging unit delay test instrument

其中, DSP 系统模块实现数据的处理和测试结果的存储与显示, 负责对电流输出模块的控制、接收并分析来自报文接收模块的 SV 报文 (IEC61850-9-2 格式)。报文接收模块与被测试合并单元的光纤输出接口相连, 接收合并单元输出的 SV 报文信号, 实现光电转换和报文捕捉功能, 并向 DSP 系统提供 SV 报文输入。电流输出模块用于模拟电力系统故障, 为测试过程提供逼真的电力系统实际故障时所产生的故障电流, 负责完成变电站现场实际运行情况的准确模拟。电源系统模块具备两方面功能, 其一经 AC/DC 变换后向测试仪弱电系统提供直流, 其二经 AC/AC (工频变压器变换) 向测试环节提供正常或故障电流。

3.2 测试仪设计

本系统报文接收模块的光电转换部分选用 HFBR-57E5APZ 收发器; 该收发器具备 LC 光纤接口是目前智能变电站保护装置、合并单元等 IED 设备广泛采用的光信号收发器, 可实现测试仪信号链路与实际运行环境相符。DSP 系统模块以 TMS320F2812 芯片为核心搭建, 该芯片指令周期为 6.67 ns, 自带 16 路 12 位 A/D 转换器, A/D 快速转换时间为 80 ns, 具备丰富的通用数字 I/O 管脚, 最小脉冲宽度为一个指令周期, 其时间响应级差方面符合要求。

电流输出模块目前无现成商用模块可选^[18], 是本文设计的重点。本文采用工频变压器不同负载的变换来模拟产生故障电流。电流输出模块包括单相工频变压器和负载控制模块, 等效电路图如图 4 所

示。当 S_1 和 S_2 都关断时，工频变压器的负载为 R_1 和 R_2 （串联）；当 S_1 和 S_2 都导通时，工频变压器的负载 R_2 被短接，其负载仅为 R_1 ；这样通过控制负载 R_2 的投退来模拟故障电流的发生。

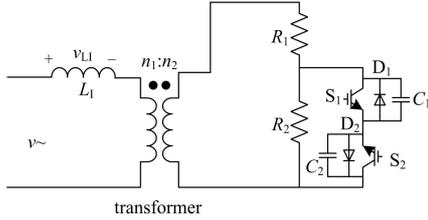


图 4 电流输出模块等效电路

Fig. 4 Current output module equivalent circuit

其中，单相工频变压器的变比为 36，连接于单相 220 V 工频试验电源，其输出电压为 6.11 V；负载 R_1 选用 RXLG-200W-0.2Ω 型（0.2 Ω、200 W）铝壳电阻器，负载 R_2 选用 RXLG-20W-2Ω 型（2 Ω、20 W）铝壳电阻器；当 S_1 、 S_2 全关断时，变压器输出电流为 2.78 A，当 S_1 、 S_2 全导通时，变压器输出电流为 30.56 A。开关 S_1 、 S_2 为 IGBT 开关器件，选用 SEMIKRON 公司 SK80GM063 模块，其在 25 °C 时的关断电压为 600 V，导通电流为 81 A，开关导通时间为 45 ns。D₁、D₂ 为 IGBT 的反并联二极管。C₁、C₂ 为并联于 IGBT 两端的无感电容，实现电路运行时的零电压开关（zero-voltage switching, ZVS），用于保护电路中的 IGBT 器件和降低其开关损耗。本转换电路 IGBT 的控制触发信号采用 DSP 芯片的中断产生，触发脉冲同时施加于开关器件 S_1 、 S_2 的门极。

电流输出模块在一个测试周期内有 4 个工作模式（Mode 1~ Mode 4）。以工频正半波为初始导通点为例说明如下。

Mode 1 为 D₁、D₂、S₁ 和 S₂ 都处于关断状态，用于模拟电力系统正常运行状态的电流，它代表测试的初始状态。Mode 2 为开关 S₁ 收到高电平触发信号到其完全导通的中间态，C₁、C₂ 参与开关 S₁ 的开通换流使其保持零电压开通（如果在波形的过零点开通，则无此模式），此状态持续时间非常小，约为 45 ns。Mode 3 为 S₁、D₂ 完全导通后的阶段。Mode 4 为工频负半波电流流通的状态，因为在此之前 S₂ 已经被触发导通，因此可自然换流，无需 Mode 2 的强制换流过程。此后工频正负半波电流持续流过开关 S₁、D₂ 和 S₂、D₁ 支路（负载 R₂ 被短路），直至测试结束。以负半波为初始导通点的情况与此类似。需要说明的是，当开关支路导通时，开关支路（开关器件的导通电阻）的阻值相比 R₂ 的阻值可

忽略不计；当开关支路关断时，开关支路（开关器件的关断电阻）的阻值相比 R₂ 的阻值为无穷大。

4 时间响应特性分析

时间响应的及时性是测试仪设计的关键，测试仪的工作流程如图 5 所示。

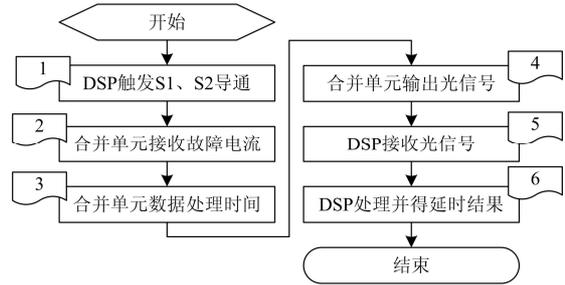


图 5 测试仪工作流程

Fig. 5 Testers work flow

由第 3 节可知，图 5 流程各个时间段的延时如表 1 所示。

表 1 合并单元测试数据流延时

Table 1 Merging unit test data stream delay

环节	延时过程	时间
1	DSP 触发信号发出至 S ₁ 和 S ₂ 导通延时 Δt ₁	<0.1 μs
2	合并单元 A/D 时间 Δt ₂	<0.1 μs
3	合并单元数据处理时间 Δt ₃	>250 μs
4	合并单元输出光信号延时 Δt ₄	10 μs
5	DSP 接收光信号延时 Δt ₅	10 μs
6	DSP 的 A/D 采样和处理时间 Δt ₆	<1.41 μs

目前合并单元采用每周期 80 点采样，合并单元数据处理时间至少大于一个采样点时间间隔。DSP 的数据处理在中断程序中进行比较运算，因此执行指令周期数低于 200 条，则 DSP 的 A/D 采样和处理时间为 1.41 μs。整个数据流延时期间，Δt₁、Δt₅、Δt₆ 是测试仪的延时，Δt₂、Δt₃、Δt₄ 属于合并单元的延时。由表 1 可知，测试仪的时间粒度（小于 11.51 μs），远小于合并单元的时间粒度（大于 260.1 μs），测试仪的时间响应性符合设计要求。测试回路测试仪的最大不确定延时 Δt₁+Δt₆(1.51 μs)，远小于合并单元的最小不确定延时 Δt₂+Δt₃(250.1 μs)。因此可以采用式（1）获得合并单元的延时设置参数。

$$\Delta t = \left[\frac{(t_2 - t_1 - \Delta t_5)}{250} \right] \times 250 \mu s \quad (1)$$

其中：Δt 为合并单元的延时设置参数；t₁ 为 DSP 开始触发开关 S₁ 和 S₂ 导通的时刻；t₂ 为 DSP 捕捉到

合并单元输出第一帧故障电流报文的时刻。

5 结语

1) 分析了在核相和查看差流方法的验证下系统表现正常, 而当有穿越性故障电流时, 将会产生故障差流, 导致保护误动的原因。

2) 提出了智能变电站合并单元延时特性现场测试仪的设计要求。

3) 对智能变电站合并单元延时特性现场测试仪进行了详细设计, 并对其与被测对象时间粒度配合方面进行了计算和比较分析。验证表明, 依据本文设计方法实现的测试仪可有效验证合并单元延时参数的现场正确设置, 杜绝误整定问题, 符合现场验收需求。

参考文献

- [1] 刘振亚. 智能电网与第三次工业革命[N]. 科技日报, 2013-12-05.
- [2] 卜强生, 宋亮亮, 张道农, 等. 基于 GPS 对时的分散采样差动保护同步测试方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(22): 149-154.
BU Qiang-sheng, SONG Liang-liang, ZHANG Dao-nong, et al. Research on the test method of distributed sampling differential protection synchronization based on GPS time[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22): 149-154.
- [3] 刘伟, 倪传坤, 杨恢宏, 等. 智能变电站分布式母线保护实现方案[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(16): 139-146.
LIU Wei, NI Chuan-kun, YANG Hui-hong, et al. Implementation of distributed busbar protection applied to smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(16): 139-146.
- [4] 梁晓兵, 周捷, 杨永标, 等. 基于 IEC 61850 的新型合并单元的研制[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 85-89.
LIANG Xiao-bing, ZHOU Jie, YANG Yong-biao, et al. Development of a new type of merging unit based on IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7): 85-89.
- [5] 胡国, 唐成虹, 徐子安, 等. 数字化变电站新型合并单元的研制[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(24): 51-54.
HU Guo, TANG Cheng-hong, XU Zi-an, et al. Development of a new type MU for digital substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(24): 51-54.
- [6] 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 Chi-fu, 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.
- [7] 徐敏, 鲍有理, 李宝伟, 等. 智能变电站中点对点传输采样值延迟及延迟校验方案[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 145-149.
XU Min, BAO You-li, LI Bao-wei, et al. Delay of point-to-point transmission of sampled values in smart substation and its calibration scheme[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 145-149.
- [8] 吕航, 李力. 变电站同步信号异常对保护装置影响及对策[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(19): 89-93.
Lü Hang, LI Li. Countermeasures and impacts of substation synchronous signal abnormalities on protections[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19): 89-93.
- [9] <http://www.ponovo.cn/a/zhinengzhuangzhiceshiyi/>, 2013.
- [10] Q/GDW393 110(66) kV~220 kV 智能变电站设计规范[S]. 北京: 国家电网公司, 2010.
- [11] Q/GDW 441-2010 智能变电站继电保护技术规范[S]. 北京: 国家电网公司, 2010.
Q/GDW 441-2010 technical specifications of protection for smart substation[S]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2010.
- [12] Q/GDW 426-2010 智能变电站合并单元技术规范[S]. 北京: 国家电网公司, 2012.
Q/GDW 426-2010 the technical specification for merging unit in smart substation[S]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2012.
- [13] Q/GDW 691-2011 智能变电站合并单元测试规范[S]. 北京: 国家电网公司, 2012.
Q/GDW 691-2011 testing specification for merging unit in smart substation[S]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2012.
- [14] DL/T 860.4-2004 变电站通信网络和系统 第 4 部分: 系统和项目管理[S]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

- DL/T 860.4-2004 communication networks and systems in substations part 4: system and project management[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [15] 邱智勇, 陈建民, 朱炳铨. 基于 IEC 61850 标准的 500 kV 三层结构数字化变电站建设[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(12): 103-107.
QIU Zhi-yong, CHEN Jian-min, ZHU Bing-quan. Practice of building 500 kV three-level digital substation based on IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(12): 103-107.
- [16] 冯军. 智能变电站原理及测试技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [17] 王晓晨, 黄继东. 基于直采直跳模式的智能变电站的母线保护应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(19): 150-154.
WANG Xiao-chen, HUANG Ji-dong. Practical research on point-to-point model of bus protection in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(19): 150-154.
- [18] 李辰, 李开成, 陈浩, 等. 继电保护测试仪用大电流功率放大电路的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 129-134.
LI Chen, LI Kai-cheng, CHEN Hao, et al. Research on high-current power amplifying circuit in protective relay test device[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 129-134.

收稿日期: 2014-02-03; 修回日期: 2014-02-23

作者简介:

倪兆瑞(1993-), 女, 本科, IEEE Membership (student), 主要从事电力系统自动化、智能变电站相关技术研究;
E-mail: nzs1993@sina.com

王延安(1976-), 男, 通信作者, 博士, IEEE Membership, 高级工程师, 主要从事智能变电站、电力电子相关技术研究。