

DOI: 10.7667/PSPC180027

基于静态组播搜索的电力交换机检修技术研究

冯自权, 赵景峰, 陈罗飞

(北京博电新力电气股份有限公司, 北京 100080)

摘要: 分析了电力交换机静态组播技术在智能变电站数据采样通信中的应用, 阐述了静态组播设置有误导致网络风暴或保护装置采样数据异常的现象, 不当的组播机制会导致保护装置产生误动或拒动结果。针对智能变电站电力交换机缺乏检测手段的现象, 介绍了一种基于静态组播搜索模式的电力交换机检修系统。该系统对交换机一个端口动态地发送不同 MAC 地址的组播流, 同时回采并统计交换机其他端口组播流类别, 利用一口发多口收的闭环测试方法来搜索交换机所有端口的 MAC 地址, 并形成电力交换机各端口静态组播配置表。实验证明, 闭环模式下组播搜索的方法能够实现电力交换机 MAC 地址表的测试, 具有很好的实用性。

关键词: 智能变电站; 电力交换机; 静态组播; 搜索; MAC 地址; 闭环自动测试

Maintenance technology research of power switch based on static multicast search

FENG Ziquan, ZHAO Jingfeng, CHEN Luofei

(Ponovo Power Co., Ltd, Beijing 100080, China)

Abstract: This paper analyzes the application of static multicast technology in data sampling communication of intelligent substation, describes the phenomenon of abnormal data sampling caused by network storm or protection device caused by static multicast setting error, and states that improper multicast mechanism can cause the protection device to produce maloperation or rejection results. A power switch maintenance system based on static multicast search mode is introduced in view of the lack of detection means in intelligent substation power switch. The system dynamically sends multicast streams with different MAC addresses to one port of the switch, collects and counts the multicast streams of other ports of the switch, searches the MAC addresses of all ports of the switch by using a closed loop test method of one-port multi-port receiving, and forms a static multicast configuration table for each port of the power switch. Experimental results show that the method of multicast search in closed-loop mode can test the MAC address table of power switch, thus it has good practicability.

Key words: intelligent substation; power switch; static multicast; search; MAC address; closed loop automatic test

0 引言

智能变电站是坚强智能电网的建设基础和重要组成部分, 是未来智慧电网发展的方向^[1]。随着智能电网的大力发展, 越来越多的智能变电站投入使用。智能变电站比传统变电站最大的优势是采样数据高度共享, 而实现数据共享的基础是电力交换机^[2-3]。伴随着 GOOSE、SV 和 1588 对时报文等多网合一模式的开发应用^[4], 交换机 VLAN 与静态组播技术在抑制网络风暴^[5-6], 实现 SV 等采样报文快速传输的优势也越来越明显。尤其是静态组播技术, 其便捷的设置可以将 SV 等数据直接转发到需要的端口, 对其他端口则停止转发。这样一方面能够降低交换

机网络传输压力, 避免交换机网络风暴的产生, 实现保护动作快速出口^[7]; 另一方面可以实现 SV 等数据快速转发, 减少网络传输延时和报文抖动性^[8], 避免由于报文采样异常而引起的智能变电站保护装置误动或拒动现象的发生^[9]。

智能变电站继电保护装置的使用技术和调试技术已经趋于成熟^[10], 而对电力交换机的调试检修还处于起步探索状态^[11-12]。一方面是因为电力技术人员对电力交换机重视不够, 另一方面是因为目前缺乏能够实现电力交换机专项测试的仪器和手段。尤其在电力交换机静态组播测试方面, 主要依靠交换机厂家技术人员根据 MAC 划分设计方案进行配置, 缺乏相关的监督检修机制。特别是采用组网模

式的智能变电站^[13], 站内电力交换机的数量较多, 工程技术人员在划分 MAC 地址时, 会由于设计方案更改等多方因素导致端口 MAC 配置错误, 后果将会导致保护装置采集不到 SV 等数据或者交换机对保护装置发送无用的 SV 数据报文从而造成保护装置接收端口压力增大, 这些都会影响智能变电站的顺利投运和安全运行。

本文主要介绍一种基于静态组播搜索的电力交换机检修系统, 通过闭环搜索模式自动描绘出被检修交换机的静态 MAC 地址配置表。MAC 地址配置表与智能变电站交换机 MAC 地址划分设计方案进行人工对比, 能够快速定位电力交换机静态组播功能与划分的正确性, 为电力交换机的闭环自动测试提供一个新的发展思路。

1 静态组播在智能变电站中的应用

1.1 静态组播传输原理

交换机之所以能够直接对目的节点发送数据包, 而不是像集线器一样以广播方式对所有节点发送数据包, 最关键的技术就是交换机可以动态识别连在网络上的节点的网卡 MAC 地址, 并把它们放到一个叫做 MAC 地址表的地方。这个 MAC 地址表存放于交换机的缓存中, 并记住这些地址, 这样一来当需要向目的地址发送数据时, 交换机就可在 MAC 地址表中查找这个 MAC 地址的节点位置, 然后直接向这个位置的节点发送。

电力交换机静态组播技术就是在交换机所有端口上固定配置对应接收方数据的 MAC 地址, 即形成 MAC 地址表^[14]。交换机在进行电力组播报文存储转发时, 首先解析接收报文的的目的 MAC, 当设备接收到报文的的目的 MAC 与 MAC 地址表中一致时^[15], 设备直接将该报文从 MAC 地址表项中对应

的交换机端口转发发送, 即采用单播一对一转发模式; 当设备接收到报文的的目的 MAC 与 MAC 地址表中不一致时, 设备将采取广播方式将报文向除接收接口外所有交换机接口转发, 即采用广播一对多转发模式。

1.2 电力交换机在智能变电站中的应用

智能变电站通常采用三层(过程层、间隔侧、站控层)两网(过程层网络和站控层网络)典型物理结构^[16], 其中电力交换机是智能变电站主要设备之一。特别是在组网采样模式的智能变电站系统中^[17], 电力交换机是智能变电站二次设备间通讯的枢纽, 其应用非常普及重要。全站系统配置文件(SCD)中通信部分配置了过程层 SV 与 GOOSE 报文的组播 MAC 地址, 这类 MAC 地址在变电站交换机中是唯一的。智能变电站过程层网络中, 交换机通过组播 MAC 技术, 利用 MAC 地址能够实现 SV 与 GOOSE 报文的快速、准确传输。以某 220 kV 智能变电站线路合并单元为例, 传输的 SV 报文的网络结构如图 1 所示, 合并单元输出的 1 组采样 SV 报文要传输给线路保护、母线保护、测控装置、备自投装置和安自装置等 6 台相关二次保护设备。采用组网模式的智能变电站将线路合并单元输出的相关 SV 报文直接发送到对应间隔的电力交换机上, 交换机内部设定静态 MAC 地址表^[18], 利用组播传输技术直接将该组 SV 报文传输给 6 台相关二次保护设备对应的交换机接收端口。这样, 一方面保证改组 SV 报文不在转发无关的二次保护间隔, 避免交换机网络风暴的形成, 减少 SV 报文的传输延时, 保证 SV 报文抖动不超过 10 μ s; 另一方面, 不一致 MAC 地址的 SV 及其他组播报文不在转发给该 6 台二次保护设备, 减少通信干扰, 保证通信的可靠传输。

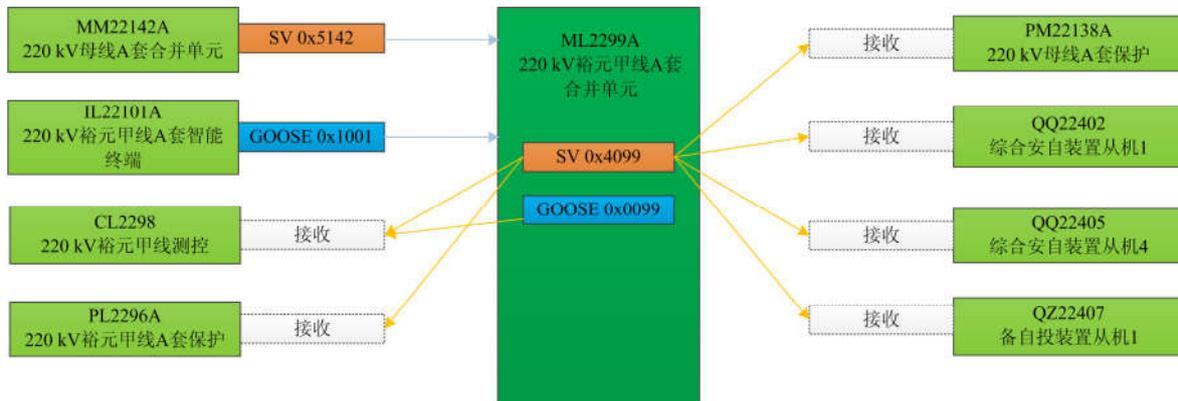


图 1 合并单元 SV 报文传输组网结构

Fig. 1 Sampled value networking architecture of merging unit

2 组播搜索原理

2.1 组播搜索的原理

电力交换机组播处理技术^[19]主要基于静态组播 MAC 地址来实现 GOOSE、SV 报文的快速传递,通常组播测试采用闭环验证方法^[20],即测试仪器采用 1 发送口、1 接收口和 1 监听口的闭环测试模式来实现,其功能原理图如图 2 所示。测试仪器通过发送端口发送 2 条不同目的 MAC 地址组播报文,分别为组播报文 1 和组播报文 2,组播报文 1 目的 MAC 仅在电力交换机端口 2 静态 MAC 配置表中,组播报文 2 目的 MAC 均不在交换机端口 2 和端口 3 静态 MAC 配置表中,根据交换机静态组播工作原理,组播报文 1 只能被转发到交换机端口 2,即交换机测试仪接收口能收到组播报文 1,而监听口不能收到报文 1;组播报文 2 会被交换机以广播发送转发到交换机端口 2 和端口 3,即交换机测试仪接收口和监听口都能收到组播 2 报文。

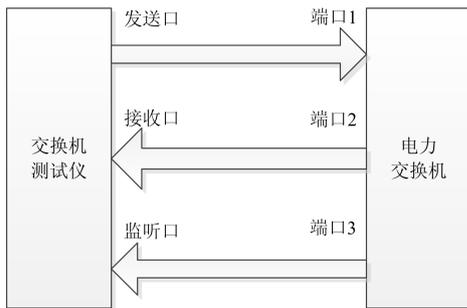


图 2 静态组播闭环验证测试原理

Fig. 2 Test principle of static multicast closed loop verification

静态组播搜索模式是在闭环验证原理的基础上升级设计的,其通过测试仪 1 个口发送不同 MAC 地址的组播报文,其他接收口查看不同 MAC 地址的组播报文转发情况来验证各个端口的 MAC 地址表。具体原理如图 3 所示。



图 3 静态组播搜索模式测试原理

Fig. 3 Test principle of static multicast search mode

以 8 端口交换机测试仪和 16 端口电力交换机为例,各端口一一对应连接。要实现交换机各端口组播 MAC 地址表搜索测试,则必须保证交换机每个端口至少有一次作为接收口的机会。因此,设计相关测试仪前 2 个端口依次分别作为发送口,其他端口作为接收口来实现。其具体流程如下。

1) 设置发送组播报文的 MAC 地址范围 M,将测试 8 个端口与交换机前 8 个端口相连,启动测试程序。

2) 将测试仪光口 1 作为发送口,其他光口作为接收口,发送组播报文 1,当 7 个接收口全部接收到数据时,说明发送报文目的 MAC 不在交换机 7 个端口的静态组播 MAC 配置表,交换机以广播报文方式转发,继续发送第 2 条组播报文;当 7 个接收口均不能接收到数据时,说明该 MAC 地址存在与交换机另外 8 个端口组播 MAC 地址表中,继续发送第 2 条组播报文;当 7 个接收口中部分口接收到该组播报文时,说明组播报文 1 对应的 MAC 地址存在与能够接收到该报文的交换机对应接口的 MAC 地址表,将组播报文 1 的 MAC 地址存储在能够接收到该组播报文的对应口数据集下,继续发送第 2 条组播报文。

3) 依次发送不同 MAC 目的地址的组播报文,直到最大范围 M,根据步骤 2 测试过程记录下 7 个接收口(光口 2、3、4、5、6、7、8)对应的 MAC 地址表数据集。

4) 将光口 2 作为发送口,其他 7 个口作为接收口,再次进行步骤 2 和步骤 3 操作,记录下 7 个接收口(光口 1、3、4、5、6、7、8)对应的 MAC 地址表数据集。

5) 将步骤 3 和步骤 4 的接收口对应 MAC 地址表数据集取逻辑或,则可以得出交换机前 8 个口的 MAC 地址表数据集。

6) 将测试仪 8 个端口与交换机后 8 个端口相连,依次进行步骤 2、步骤 3、步骤 4 和步骤 5 操作,则可以得出后交换机后 8 个端口的 MAC 地址表数据集。交换机各端口 MAC 地址表数据集即为交换机各端口的组播 MAC 地址配置表。

2.2 基于 MAC 跳变原理的组播搜索

电力交换机主要用于传输 GOOSE 与 SV 报文,根据标准规《智能变电站继电保护通用技术条件》定,GOOSE 报文目的 MAC 地址范围为 010CCD010000-010CCD0101FF,SV 报文目的 MAC 地址范围为 010CCD040000-010CCD0401FF,而在实际运用过程中,后两个字节的最大范围通常使用到 0FFF。因此,在电力交换机的实际测试中,为了测试效率,


```
[Module=0]2017-12-26 13:46:13 [info]:
<XET>
  <ParaDetail>
    <Port Port="1:1:1">
      <Flow StreamName="1-2.0" TxFrames="74405" RxFrames="0" />
      <Flow StreamName="1-3.0" TxFrames="74405" RxFrames="0" />
      <Flow StreamName="1-4.0" TxFrames="74405" RxFrames="0" />
      <Flow StreamName="1-5.0" TxFrames="74404" RxFrames="0" />
    </Port>
    <Port Port="1:1:2">
      <Flow StreamName="1-2.0" TxFrames="0" RxFrames="74405" />
      <Flow StreamName="1-3.0" TxFrames="0" RxFrames="74405" />
      <Flow StreamName="1-4.0" TxFrames="0" RxFrames="0" />
      <Flow StreamName="1-5.0" TxFrames="0" RxFrames="74404" />
    </Port>
    <Port Port="1:1:3">
      <Flow StreamName="1-2.0" TxFrames="0" RxFrames="0" />
      <Flow StreamName="1-3.0" TxFrames="0" RxFrames="74405" />
      <Flow StreamName="1-4.0" TxFrames="0" RxFrames="0" />
      <Flow StreamName="1-5.0" TxFrames="0" RxFrames="74404" />
    </Port>
    <Port Port="1:1:4">
      <Flow StreamName="1-2.0" TxFrames="0" RxFrames="74405" />
      <Flow StreamName="1-3.0" TxFrames="0" RxFrames="0" />
      <Flow StreamName="1-4.0" TxFrames="0" RxFrames="0" />
      <Flow StreamName="1-5.0" TxFrames="0" RxFrames="74404" />
    </Port>
    <Port Port="1:1:5">
      <Flow StreamName="1-2.0" TxFrames="0" RxFrames="0" />
      <Flow StreamName="1-3.0" TxFrames="0" RxFrames="74405" />
      <Flow StreamName="1-4.0" TxFrames="0" RxFrames="0" />
      <Flow StreamName="1-5.0" TxFrames="0" RxFrames="74404" />
    </Port>
    <Port Port="1:1:6">
      <Flow StreamName="1-2.0" TxFrames="0" RxFrames="74405" />
      <Flow StreamName="1-3.0" TxFrames="0" RxFrames="0" />
      <Flow StreamName="1-4.0" TxFrames="0" RxFrames="0" />
      <Flow StreamName="1-5.0" TxFrames="0" RxFrames="74404" />
    </Port>
    <Port Port="1:1:7">
      <Flow StreamName="1-2.0" TxFrames="0" RxFrames="0" />
      <Flow StreamName="1-3.0" TxFrames="0" RxFrames="0" />
      <Flow StreamName="1-4.0" TxFrames="0" RxFrames="74405" />
      <Flow StreamName="1-5.0" TxFrames="0" RxFrames="74404" />
    </Port>
    <Port Port="1:1:8">
      <Flow StreamName="1-2.0" TxFrames="0" RxFrames="0" />
      <Flow StreamName="1-3.0" TxFrames="0" RxFrames="0" />
      <Flow StreamName="1-4.0" TxFrames="0" RxFrames="0" />
      <Flow StreamName="1-5.0" TxFrames="0" RxFrames="74404" />
    </Port>
  </ParaDetail>
</XET>
```

图 5 组播报文实际脚本测试结果

Fig. 5 Actual script test results of multicast message

对应目的 MAC 为 01-0C-CD-04-00-02 组播流报文, StreamName="1-4.0" 对应目的 MAC 为 01-0C-CD-04-00-03 组播流报文, StreamName="1-5.0" 对应目的 MAC 为 01-0C-CD-04-00-04 组播流报文, TxFrames 对应发送报文帧数, RxFrames 对应接收报文帧数。

将表 1 的理论分析与图 5 的实际测试结果做对比, 发现两者一致, 因此 MAC 搜索测试电力交换机静态组播功能是行的通且正确的。在相关的组播 MAC 配置表搜索时, 只需要扩展发送组播报文的 MAC 地址个数, 即增加 MAC 地址范围而已, 整个测试结构仍一致。

4 结论

本文提出一种基于搜索原理的电力交换机组播测试方法。利用 MAC 地址跳变发送模式实现交换机端口组播 MAC 范围的快速定位, 通过分析电力交换机转发不同 MAC 地址报文的闭环原理实现静态组播的搜索, 最终获取电力交换机全部端口的组播 MAC 地址。同时, 实验结果进一步证明了搜索

模式测试电力交换机组播功能的可行性, 这对智能变电站电力交换机的静态组播等其他功能测试提供了一种新的思路。

参考文献

- [1] 黄益庄. 智能变电站是变电站综合自动化的发展目标[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 45-48. HUANG Yizhuang. Intelligent substation is the development goal of substation integration automation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 45-48.
- [2] 黄鑫. 智能变电站网络交换机发展综述与技术验证[J]. 电力信息与通信技术, 2015, 13(5): 6-11. HUANG Xin. Development review and technical verification of network switch in smart substations[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2015, 13(5): 6-11.
- [3] 赵华云, 张冉, 陈卓. 智能变电站中工业以太网交换机的应用技术[J]. 低压电器, 2010(18): 14-17. ZHAO Huayun, ZHANG Ran, CHEN Zhuo. Application technology of industrial ethernet switch in smart substation[J]. Low Voltage Apparatus, 2010(18): 14-17.
- [4] 余越, 周春霞, 詹荣荣, 等. 智能变电站继电保护装置网络压力产生原因及测试方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 156-162. YU Yue, ZHOU Chunxia, ZHAN Rongrong, et al. Research on network stress causes and test method of relay protection in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 156-162.
- [5] 鲍兴川, 余勇. 波分隔离交换机及其在智能变电站通信组网中的应用[J]. 电力信息与通信技术, 2015, 13(4): 16-21. BAO Xingchuan, YU Yong. WDM isolation switch and its application in smart substation communication network[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2015, 13(4): 16-21.
- [6] 刘明慧, 赵晓东, 司梦, 等. 智能变电站过程层网络流量管理方式研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(23): 87-92. LIU Minghui, ZHAO Xiaodong, SI Meng, et al. Research and application of process level network flow management in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(23): 87-92.
- [7] 庞福滨, 杨毅, 袁宇波, 等. 智能变电站保护动作时间延时特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 86-92. PANG Fubin, YANG Yi, YUAN Yubo, et al. Research on characteristics of intelligent substation protection time delay[J]. Power System Protection and Control, 2016,

- 44(15): 86-92.
- [8] 戴志辉, 张天宇, 刘譞, 等. 面向状态检修的智能变电站保护系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 14-21.
DAI Zhihui, ZHANG Tianyu, LIU Xuan, et al. Research on smart substation protection system reliability for condition-based maintenance[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 14-21.
- [9] 高吉普, 徐长宝, 戴宇, 等. 交换机端口安全策略在智能变电站中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 117-122.
GAO Jipu, XU Changbao, DAI Yu, et al. Research on application of switch port access control in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 117-122.
- [10] BO Zhiqian, LIN Xiangning, WANG Qingping, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.
- [11] 张小飞, 但富中, 马莹. 智能变电站的工业以太网交换机组网测试技术[J]. 电力系统通信, 2010, 31(6): 1-4.
ZHANG Xiaofei, DAN Fuzhong, MA Ying. Network test technology of industrial Ethernet switching unit in Smart Substation[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2010, 31(6): 1-4.
- [12] 冯善强, 黄曙, 胡春潮. 智能变电站用工业以太网交换机测试技术研究[J]. 广东电力, 2012, 25(11): 25-29.
FENG Shanqiang, HUANG Shu, HU Chunchao. Research on testing technology of industrial Ethernet network switch used in smart substation[J]. Guangdong Electric Power, 2012, 25(11): 25-29.
- [13] 李辉, 刘海峰, 赵永生, 等. 智能变电站过程层组网改进方案[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 218-223.
LI Hui, LIU Haifeng, ZHAO Yongsheng, et al. Improved process-level networking scheme of smart substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 218-223.
- [14] 高磊, 杨毅, 卜强生, 等. 基于 MAC 地址匹配的智能变电站网络设备拓扑动态识别[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(20): 81-84.
GAO Lei, YANG Yi, BU Qiangsheng, et al. Dynamical topology identification of smart substation network equipment based on MAC address matching[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(20): 81-84.
- [15] 苗新, 卜广全, 赵兵. 提高电力数据网实时性的网络地址空间快速搜索方法研究[J]. 电力信息与通信技术, 2017, 15(10): 28-30.
MIAO Xin, BU Guangquan, ZHAO Bing. Research on the method of accelerating network address space searching to improve the real time of electric power data network[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2017, 15(10): 28-30.
- [16] 刘昊昱, 左群业, 张保善. 智能变电站过程层网络性能测试与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(18): 112-116.
LIU Haoyu, ZUO Qunye, ZHANG Baoshan. Test and analysis of process layer network performance of intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 112-116.
- [17] 樊陈, 倪益民, 窦仁辉, 等. 智能变电站过程层组网方案分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(18): 67-71.
FAN Chen, NI Yimin, DOU Renhui, et al. Analysis of network scheme for process layer in smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(18): 67-71.
- [18] 周旭峰, 杨贵, 袁志彬, 等. 交换机流量限制技术及其在智能变电站的应用[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(18): 114-119.
ZHOU Xufeng, YANG Gui, YUAN Zhibin, et al. Development of the switch used in process level of smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 114-119.
- [19] 王文龙, 杨贵, 刘明慧. 智能变电站过程层用交换机的研制[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(18): 72-76.
WANG Wenlong, YANG Gui, LIU Minghui. Development of process layer switch for intelligent substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(18): 72-76.
- [20] 刘井密, 李彦, 杨贵. 智能变电站过程层交换机延时测量方案设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 111-115.
LIU Jingmi, LI Yan, YANG Gui. Design of delay measurement switch in intelligent substation process level[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 111-115.

收稿日期: 2018-01-06; 修回日期: 2018-03-26

作者简介:

冯自权(1986—), 男, 本科, 研究方向为智能变电站继电保护测试仪器及测试技术; E-mail: ziquan1222@163.com

赵景峰(1973—), 男, 本科, 研究方向为智能变电站继电保护测试仪器及测试技术; E-mail: zjf@ponovo.cn

陈罗飞(1985—), 男, 本科, 研究方向为智能变电站继电保护测试仪器及测试技术. E-mail: chen.luofei@ponovo.cn

(编辑 魏小丽)