

智能变电站过程层网络跳闸的时间特性

卜强生¹, 袁宇波¹, 杨逸飞², 高 磊¹

(1.江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211113;

2.南京理工大学自动化学院, 江苏 南京 210093)

摘 要: 过程层网络直接影响智能变电站的安全、可靠运行, 研究过程层不同组网方式的性能, 可为智能变电站过程层网络方式的选择是提供必要的参考, 介绍过程层直采直跳、网采网跳等不同组网方式的特性, 阐述虚拟局域网、优先级等技术工程应用的原则, 详细测试不同网络方式和不同网络工况下继电保护的動作时间, 分析过程层跳闸时间特性。试验结果表明, 直跳的时间稳定, 网跳的时间随着网络流量的增加而增大, 且离散性较大。

关键词: 智能变电站; 过程层; 虚拟局域网; 优先级; 跳闸方式; 时间特性

0 引言

智能变电站应用网络技术实现了信息传输的数字化、网络化、共享化, 消除了常规电缆传输信号的多点接地、电流回路二次开路、电压回路二次短路、传输损耗等隐患, 简化了保护、测控等设备的二次接线, 实现资源优化分配。网络传输信息具有一定延时, 且随着网络流量不同具有不确定性^[1], 因此网络技术的应用带来了信息传输可靠性、实时性等新问题^[2]。智能变电站关键的过程层网络存在着“直采直跳”、“直采网跳”、“网采网跳”、“三层共网”等不同的实现方式^[3]。由于网络流量、信息流划分的不同, 这些方式的信息传输特性也不尽相同, 在可靠性、实时性、经济性方面各有优缺点, 尤其是对继电保护跳闸时间特性具有较大影响^[4]。因此, 在工程应用过程中, 需要对不同网络方式的性能进行详细论证、测试^[5]。

本文针对智能变电站过程层不同的网络跳闸方式, 研究 GOOSE 信息传输时间特性, 并讨论虚拟局域网 (Virtual Local Area Network, VLAN)、优先级等技术应用后对网络跳闸的影响。最后通过具体工程实践测试, 分析不同跳闸方式下继电保护的動作时间特性, 为智能变电站过程层跳闸方式的选择提供一定的参考。

1 智能变电站过程层网络方式比较

过程层采用网络方式实现信息传输的数字化、网络化是智能变电站区别与常规变电站的显著特点

之一。网络的应用同时也带来信号传输实时性、可靠性等新问题。智能变电站过程层网络的性能直接影响到变电站的安全、可靠性运行, 因此过程层网络方式的选取一直是关注的焦点。目前, 智能变电站过程层网络方式主要有“直采直跳”、“直采网跳”、“网采网跳”等方式。随着新一代智能变电站建设的推进, 正在研究“三层共网”的可行性。

1.1 直采直跳方式

直采直跳是保护装置通过光纤点对点方式直接接收采样值, 并通过光纤点对点方式直接跳闸^[6], 如图 1 所示。此方式信息传输机理采用网络通信原理, 传输途径只经过光纤, 不采用交换机, 是最简单的网络方式。

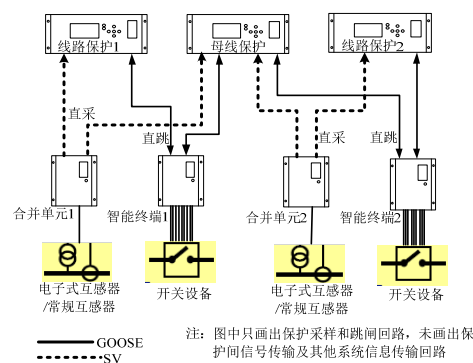


图 1 直采直跳方式接线示意

直采直跳方式信息传输路径简单, 不依赖交换机, 不同设备信息传输互不影响, 可靠性高。这种方式的信息传输时间在微秒之内, 实时性得到保证。

直采直跳方式保证了继电保护的可靠性和实时

性，在智能变电站建设中得到了广泛应用。

但是此方式对装置接口数量、处理性能要求高，增加装置成本，不利于信号的监视和分析^[7]。

1.2 直采网跳方式

直采网跳方式在采样方面，保护装置与合并单元之间采用光纤直连方式；在跳闸方面通过交换机实现设备间的信息交互，如图 2 所示。

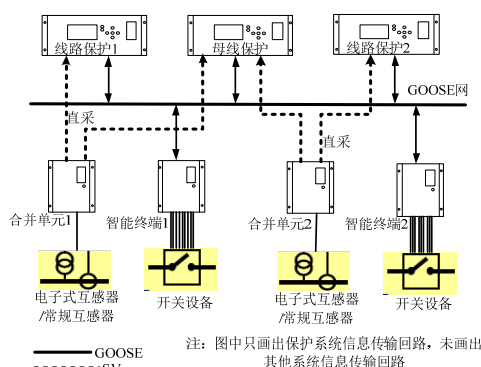


图 2 直采网跳方式接线示意

此方式在采样方面避免了流量大对采样性能的影响。在跳闸方面，利用网络的信息共享优势，简化了装置的接口。GOOSE 采用快速重发机制保证跳闸的可靠性，而且 GOOSE 流量小，对信息传输实时性影响不大。因此，这种方式在智能变电站建设初期被采纳和应用。

此方式的跳闸依赖于网络的性能，尤其是受网络风暴的影响，跳闸时间会存在一定的离散性。

1.3 网采网跳方式

网采网跳方式是指采样和跳闸信息都通过网络交换机传输，如图 3 所示。这种方式利用网络信息共享的优势，简化装置的硬件设计和光纤接线，便于信号的监视分析。但同时降低了信息传输的实时性和可靠性，继电保护动作可靠性受网络可靠性的影响。

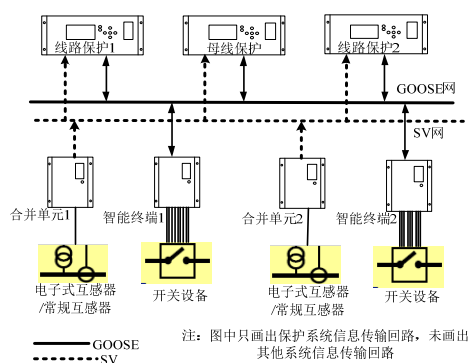


图 3 网采网跳方式接线示意

此方式对交换机性能提出了更高要求。而且网采方式对数据同步提出了新要求，网络中传输的采样数据必须同步。此方式在智能变电站试点工程中得到了一些应用。

1.4 三层共网方式

随着新一代智能变电站建设推进，三层共网方式被提上了可行性研究的日程。三层共网方式基于二次设备和网络交换机性能高度可靠的基础上，GOOSE、SV、MMS 等所有信息在同一个物理网络中交互，如图 4 所示。此方式信息高度共享、资源充分优化、接线简单。这种方式下，继电保护的動作时间及可靠性不仅受 SV、GOOSE 的影响，同时也受 MMS 信息的影响，不确定因素大。这种方式目前仅在 110kV 的后备保护试点应用。

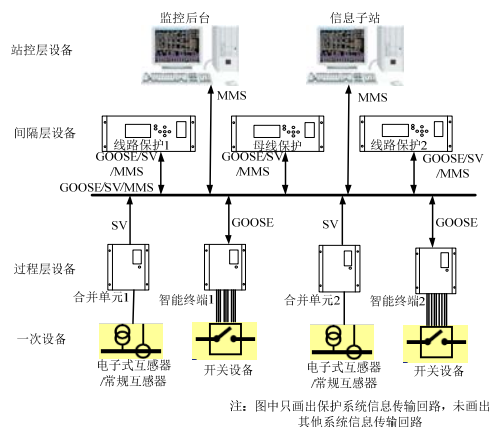


图 4 三层共网方式接线示意

2 不同网络方式时间特性分析

常规变电站中，通过电缆方式直接传输模拟量和开关量电信号。一般认为，电信号在电缆中以光速传输，而变电站内电信号传输距离一般都在 500m 以内，因此常规变电站中可以忽略信号的传输延时。

智能变电站中，采用以太网机制传输信号，存在信号存储转发、冲突避让、排队等待等时间，导致信号传输需要一定的时间，从而信号传输实时性成为智能变电站过程层的重要指标。

网络传输延时主要由以下几部分时间组成。

1) 光纤传输延时 T_{WL} 。一般认为，信号在光纤中以 $2/3$ 光速传输，因此信号在每公里光纤中传输时间约为 $5\mu s$ 。变电站中，设备之间距离一般不超过 500m，因此，GOOSE跳闸由光纤传输引起的延时在 $2.5\mu s$ 以内。

2) 交换机存储转发延时 T_{SF} 。目前, 智能变电站应用的网络交换机都是采用存储转发原理实现信息交换, 需要一定的时间接收网络报文, 并同时进行检查, 然后再转发。存储转发延时为报文接收所需的时间, 即为报文帧长除以传输速率。GOOSE跳闸报文中的数据通道由具体装置功能而定, 但不会太多, 报文长度有限, 以 300Byte的GOOSE报文为例, 加上 8Byte的报文帧头, 其在 100Mb/s 网络中存储转发延时 $T_{SF} = (300+8) \times 8/100 = 24.64\mu s$ 。

3) 交换机交换处理延时 T_{SW} 。交换机交换处理延时一般为固定值, 取决于交换芯片处理MAC地址表、VLAN、优先级等所需要的时间。工业级以太网交换机的交换处理延时一般不超过 $10\mu s$ ^[8]。

4) 交换机帧排队延时 T_Q 。以太网采用冲突载波监听多路访问/冲突检测 (CSMA/CD) 方法实现报文的可靠发送。当网络报文传输发生冲突时, 会顺序排队等待发送, 这给交换机延时带来不确定性, 尤其同一交换机上各端口流量都大时, 报文排队等待延时明显。考虑最不利的情况, K 个端口的交换机中有 $K-1$ 个端口同时向另一端发送报文, 则报文最大的排队延时可表示为 $(K-1) T_{SF}$, 而最短排队延时为 0, 平均排队延时可表示为 $(K-1) T_{SF} / 2$ 。

以上述 300Byte 的 GOOSE 报文接入 16 个端口交换机, 考虑端口预留, 若此交换机 10 个端口接入设备, 则 GOOSE 报文最长排队延时为 $221.76\mu s$, 平均排队延时为 $110.88\mu s$ 。

由上述分析可知, 采用直跳方式时, GOOSE 报文传输延时固定, 且非常小, 在 $2.5\mu s$ 以内。当采用网跳方式时, GOOSE 报文传输延时增大, 波动明显, 经过一台交换机, 最大传输延时为 $255.9\mu s$, 最小传输延时为 $34.14\mu s$ 。经过两台交换机, 传输延时几乎增加一倍。因此, 直跳方式, 网络延时最小, 基本可忽略; 网跳方式, 由于 GOOSE 网络流量小, 冲突概率小, 因此网络延时在几十微妙的量级; 三层共网方式, 由于 GOOSE、SV、MMS 在同一个网络传输, 网络流量和突发性大, 如果网络不进行虚拟隔离和优化, 报文冲突概率大, 网络延时将达到百微妙以上。

3 VLAN 及优先级技术应用

VLAN 和优先级技术可以对网络流量进行有效隔离, 并保证重要报文的实时性, 因此在智能变电站网络中得到广泛应用, 以保证网络的实时性和可靠性。

3.1 VLAN 技术应用

VLAN技术是通过将同一物理局域网内的设备逻辑地划分成不同网段, 从而实现组建虚拟工作组的技术, 达到报文有效隔离、减少报文传输冲突和广播风暴、增强网络安全性的目的^[9-11]。因此智能变电站直采网跳、网采网跳、三层共网等应用中, 应充分利用VLAN技术进行无关报文的有效隔离, 保证网络的实时性和可靠性。

智能变电站中过程层GOOSE网络的VLAN应用时需考虑网络实时性和可靠性、设备运行维护的方便、检修处理的安全隔离等因素, 建议遵循以下原则: ① 3/2 接线方式设备, 宜按串设置VLAN; ② 双母接线方式设备, 宜按间隔设置VLAN^[12]; ③ 母线保护和主变保护宜单独设置VLAN; ④ GOOSE和SV宜划分在不同的VLAN中, 减少SV对GOOSE的影响; ⑤ 尽量采用交换机端口VLAN (PVID) 方式, 这样只需管理交换机的VLAN配置, 而在装置消缺、升级过程中无需关注VLAN的配置。

3.2 优先级技术应用

网络优先级技术基于入IEEE802.1p 流量优先级控制协议, 每个报文都有一个 3 比特的标签表示其优先级, 交换机在每个端口采用多缓冲区队列的方式进行报文分类, 当报文到达交换机端口时, 根据其优先级标签分配到对应的缓冲区队列中, 交换机采用优先和排队机制确定哪些报文可以被优先传输, 保证实时性要求高的报文被及时传输, 缓解实时数据和非实时数据竞争网络资源的情况^[13]。优先级技术可以通过适当的设置, 使GOOSE报文优先传输, 减少其在交换机中的帧排队等待时间。

网络报文的优先级应针对装置进行设置, 需要考虑网络流量、实时性和可靠性的要求, 建议智能变电站中网络优先级设置遵循以下原则: ① GOOSE 报文的优先级应高于 SV 报文和 MMS 报文的优先级, 工程中可以设置 GOOSE 报文优先级为 6 (优先级从低到高分 0~7, 共 8 个等级), SV 报文优先级为 4, MMS 优先级低于 4; ② 全站优先级按报文类型设置, 以方便管理, 即所有装

置的 GOOSE 报文为同一优先级，SV 报文为同一优先级；③ 优先级在配置文件的控制块中进行设置；④ 交换机中优先级通过策略宜设置为按比例通过，即优先级高的报文可以大量优先传输，优先级低的报文也有一定数量可以传输量，这样避免了异常情况下，低优先级报文被全部阻塞的问题。

4 过程层跳闸时间特性试验

智能变电站中应用网络跳闸方式时，设计阶段应进行充分的论证，系统集成阶段应进行优化设置，调试阶段应进行严格测试，以保证网络跳闸的实时性和可靠性。下面以具体工程实例介绍网络跳闸时间特性试验。

某 220kV 智能变电站试点工程的 220kV 线路、母线、主变保护同时存在直跳和网跳的方式，在系统集成测试过程中，对其线路保护的网跳性能进行详细试验。分别测试直跳和网跳的性能以及网跳在不同网络负荷和交换机级联情况下的性能。

4.1 直跳和单交换机网跳试验

试验系统如图 5 所示，线路保护、合并单元、智能终端以及交换机之间按照工程实际接线，合并单元直接接入测试仪的电压/电流模拟量，为保护提供 SV 直接采样；智能终端接受 GOOSE 跳闸命令后，驱动继电器，将继电器节点返回至测试仪，测试继电保护整组动作时间。

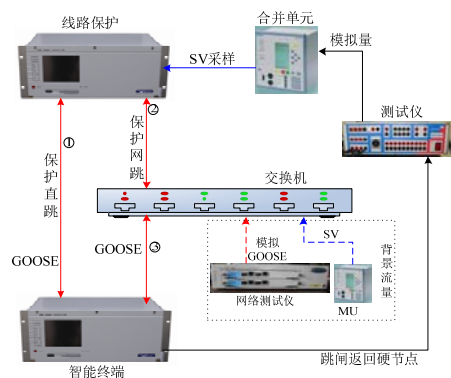


图 5 直跳和单交换机网跳试验系统

进行直跳试验时，将保护网跳光纤断开，即将图 5 中光纤②和③断开；进行网跳试验时，将保护直跳光纤断开，即将图 5 中光纤①断开，同时通过网络测试仪和 MU 给网络交换机施加一定的流量，并修改网络流量和保护 GOOSE 报文的优先级，考验网跳在不同网络情况下的性能。考虑到实

际复杂故障时会有多个保护动作，并伴随着大量开关量变位，短时流量较大，因此网络测试仪提供的背景流量为网络中真实的 GOOSE 报文，但与被试智能终端无关，尽可能模拟实际情况。考虑到某些应用中 GOOSE 和 SV 共网传输，采用 MU 模拟实际情况的 SV 流量，每个 SV 流量约为 7 Mb/s。交换机优先级策略设置为按比例传输。

试验共进行了以下 6 项具体测试：① 保护直跳；② 保护正常网跳，无背景流量；③ 保护网跳，施加 88Mb/s 的 GOOSE 流量和约 14Mb/s 的 SV 流量，所有报文无优先级；④ 保护网跳，GOOSE 跳闸报文优先级为 6，施加 70Mb/s 优先级为 7 的 GOOSE 流量；⑤ 保护网跳，GOOSE 跳闸报文优先级为 6，施加优先级均为 7 的 88Mb/s 的 GOOSE 流量和 14Mb/s 的 SV 流量；⑥ 保护网跳，报文优先级为 6，网络测试仪通过 2 个端口分别施加 88Mb/s 优先级为 7 的 GOOSE 流量，背景流量达 176Mb/s。

具体试验结果图 6 的跳闸时间曲线所示，表 1 给出了直跳和单交换机网跳时间试验数据的统计指标。

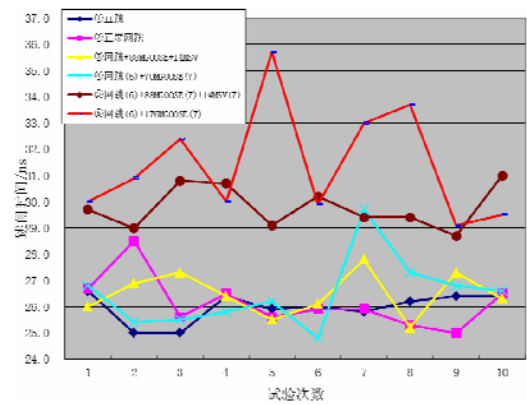


图 6 直跳和单交换机网跳时间曲线

表 1 直跳和单交换机网跳时间统计指标(单位/ms)

统计指标	①	②	③	④	⑤	⑥
平均值	25.97	26.15	26.48	26.49	29.80	31.42
均方差	0.57	0.99	0.84	1.36	0.82	2.18
平均绝对误差	0.44	0.72	0.68	0.95	0.70	1.82
最大偏差	1.0	2.4	1.3	3.2	1.2	4.3

由图 6 和以上试验数据可以看出：

- 1) 直跳情况下，跳闸时间平均值最小，且很稳定；
- 2) 无网络风暴的正常情况下，保护直跳与网跳的时间差别不大，都约为 26ms，但网跳时间

离散度比较大;

3) 若网络中有异常报文, 且异常报文无优先级或与保护跳闸报文的优先级相同, 则在网络满负荷情况下, 跳闸时间稍微偏大, 但并不明显;

4) 若网络中有异常报文, 且异常报文的优先级比保护跳闸报文的优先级高, 则当网络重负荷下, 跳闸时间会增大, 特别是网络满负荷情况下, 跳闸时间明显增大, 且离散度大大增加。

4.2 交换机级联网跳时间

交换机级联情况下, 网跳时间试验系统如图 7 所示, 保护装置与智能终端之间通过两台交换机交互信息。网络测试仪分别或同时为 2 台交换机提供与被测装置无关的 GOOSE 背景流量。其余装置接线和作用与图 5 相同。

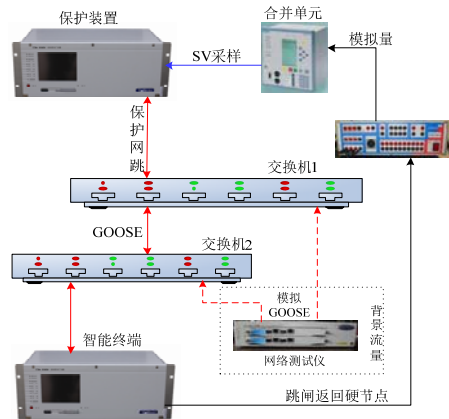


图 7 交换机级联网跳试验系统

交换机级联网跳性能试验共进行了 4 项具体试验: ① 保护正常网跳, 无背景流量; ② 保护网跳, 交换机 1 上施加 100Mb/s 的 GOOSE 流量, 所有报文无优先级; ③ 保护网跳, 优先级为 6, 交换机 1 施加 100Mb/s 优先级为 7 的 GOOSE 流量; ④ 保护网跳, 优先级为 6, 交换机 1 和交换机 2 分别施加 100Mb/s 优先级为 7 的 GOOSE 流量, 背景流量达 176Mb/s。

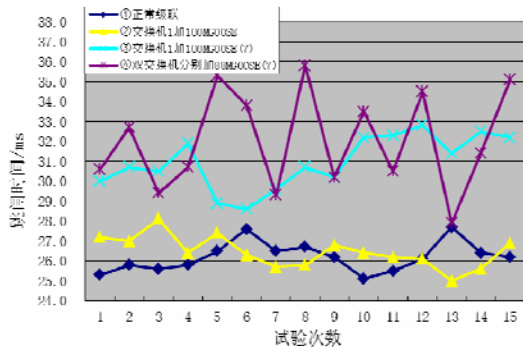


图 8 交换机级联网跳时间曲线

表 2 交换机级联网跳时间统计指标

试验次数	①	②	③	④
平均值	26.20	26.46	30.97	32.05
均方差	0.75	0.79	1.34	2.50
平均绝对误差	0.56	0.62	1.14	2.18
最大偏差	1.50	1.64	2.37	4.15

具体试验结果见图 8 的跳闸时间曲线所示, 表 2 给出了交换机级联网跳时间试验数据的统计指标。

图 8 给出了继电保护直跳和各种情况下单交换机网跳的时间曲线。由图 8 和以上试验数据可以看出:

1) 正常情况下, 交换机级联后, 继电保护网跳时间增大并不明显, 只是离散性较大;

2) 交换机级联后, 只要一个交换机上产生异常报文, 整个网络上都会存在异常报文;

3) 网络中存在异常报文, 且无优先级或与保护跳闸报文的优先级相同时, 在网络满负荷情况下, 跳闸时间稍微偏大, 但不明显;

4) 网络中存在异常报文, 且优先级比保护跳闸 GOOSE 报文优先级高, 在网络重负荷下, 跳闸时间会增大, 特别是网络满负荷情况下, 跳闸时间增大明显, 且离散度大大增加。

由上述试验、分析可看出, 智能变电站过程层采用直跳方式, 跳闸实时性得到保证, 且跳闸时间稳定。采用网络跳闸方式, 在正常情况下, 无论是单台交换机, 还是少量级联, 跳闸实时性也能得到保证, 只是跳闸时间离散性稍有增大。采用网络跳闸方式, 随着网络中背景流量的增大、背景流量优先级提高、跳闸信息传输路径增加, 跳闸时间会增加, 且离散性会显著增大。

因此, 智能变电站工程应用中, 从可靠性方面考虑, 过程层跳闸方式优先选用直跳方式。从信息共享、先进性等方面考虑, 过程层跳闸方式可适当选用网络跳闸方式, 并在应用成熟后可推广。但是采用网络跳闸方式时, 应注意信息传输路径的优化, 尽量减少级联数量, 提高跳闸报文的优先级, 并采用 VLAN 等技术进行有效隔离, 提升网络传输信息可靠性。对于网络采样、三层共网等方式, 考虑到目前依赖外部时钟信号的数据同步方式还不成熟、网络传输大流量信息的实时性和可靠性还有待验证, 目前可在充分论证的前提下考虑试点应用, 并在试点中积累经验。

5 结束语

智能变电站过程层网络方式直接关系到整个继电保护系统的可靠性、实时性,因此工程设计必须注重过程层网络方案的论证,调试过程中必须验证过程层网络的性能。通过实际工程测试,网跳方式会对跳闸时间产生一定的影响,尤其是网络中出现异常情况时。因此,工程应用中,必须进行优化设计,并采用 VLAN、优先级等技术对网络数据进行有效隔离,确保重要数据报文的实时性和可靠性。

参考文献:

- [1] 窦晓波,胡敏强,吴在军,等. 数字化变电站通信网络性能仿真分析[J]. 电网技术, 2008, 32 (17): 98-104.
- [2] 李广华. 数字化变电站组网技术[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 142-146 .
- [3] 陈晓捷. 智能变电站保护装置跳闸方式比较[J]. 电力与电工, 2011, 33 (4): 28-30.
- [4] 王松, 陆承宇. 数字化变电站继电保护的 GOOSE 网络方案[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(3): 51-54.
- [5] 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.
- [6] 樊陈, 倪益民. 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.
- [7] 韩本帅, 王倩, 孙中尉, 等. 智能变电站继电保护跳闸实现方式研究[J]. 中国电力, 2012, 45(8): 24-27.
- [8] 周志勇, 孙中尉, 张凡, 等. 智能变电站交换机选型[J]. 中国电力, 2011, 44(7): 40-43.
- [9] 牛占平. VLAN 技术在智能化变电站网络中的应用探讨[J].电力系统保护与控制, 2009, 37 (23): 75-78.
- [10] 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.
- [11] 张文璟,田肖艳,邵剑峰,等. 220 kV 泸定智能变电站过程层网络的优化[J]. 华东电力, 2012, 40(6): 70-74.
- [12] 徐春霞,张艳霞,葛跃田. 智能变电站过程层网络数据流的分析与研究[J]. 中国电力, 2013, 46(8): 153-159.
- [13] 王璐. 智能变电站过程层组网分析与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2):141-150.

作者简介:

- 卜强生(1983-), 男, 江苏江阴人, 硕士, 工程师, 从事智能变电站试验及新技术、继电保护故障分析研究,
E-mail: tc16002315@163.com;
- 袁宇波(1975-), 男, 博士, 江苏丹阳人, 高级工程师, 主要从事电力系统继电保护的研究工作;
- 杨逸飞(1990-), 男, 硕士研究生, 江苏盐城人, 主要从事电子式互感器研究工作;
- 高磊(1982-), 男, 硕士, 山东青岛人, 主要从事继电保护、智能变电站方面的研究工作。