

DOI: 10.7667/PSPC161542

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

余越¹, 周春霞¹, 詹荣荣¹, 李岩军¹, 詹智华¹, 李泽¹, 张磐²

(1. 电网安全与节能国家重点实验室, 中国电力科学研究院, 北京 100192;

2. 国网天津市电力公司电力科学研究院, 天津 300384)

摘要: 网络传输给智能变电站的数据共享带来了便利, 但同时网络压力也给智能变电站的可靠运行带来了风险。因此, 分析网络压力产生的原因, 研究网络压力的表现形式, 对网络环境下保护装置的性能进行测试, 显得尤为重要。通过研究网络压力产生的原因及表现形式, 提出了一种智能变电站继电保护的网路压力测试方法, 并给出了相应的技术要求。通过较为真实地模拟不同网络压力情况下的报文, 该方法能够测试保护装置在非订阅广播报文及 GOOSE/SV 报文网络压力下的动作性能, 同时也能全面系统地测试智能变电站继电保护装置在不同类型的订阅报文网络压力环境下的装置性能。为保护装置在智能变电站网络环境下的安全稳定运行奠定了基础。

关键词: 智能变电站; 网络压力; 网络风暴; 继电保护; 测试方法

Research on network stress causes and test method of relay protection in smart substation

YU Yue¹, ZHOU Chunxia¹, ZHAN Rongrong¹, LI Yanjun¹, ZHAN Zhihua¹, LI Ze¹, ZHANG Pan²

(1. State Key Laboratory for Security and Energy Saving, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. State Grid Tianjin Electric Power Company Electric Power Research Institute, Tianjin 300384, China)

Abstract: Networking brings advantages of data fully sharing in smart substation, but at the same time, network stress also brings risks of operation safety and reliability. Therefore, to find out the reasons of network stress generated, to research the manifestations of network stress, and to test the performance of protection devices under network stress, are particularly important. By researching the causes and manifestations of network stress, this paper gives a network stress test method of relay protection in smart substation and gives the technical requirements. By simulating the packets under different network stress situation, this test method can test the performance of protection devices during the broadcasting packets network stress and unsubscription GOOSE/SV packets network stress. Also it can test the performance during the subscription packets network stress completely and systemic, which ensures the protection devices operating safe and stable in smart substation network environment.

Key words: smart substation; network stress; network storm; relay protection; test method

0 引言

随着智能变电站的不断推广, 站内网络建设数量也在不断加大。保护装置、合并单元及智能终端设备利用过程层网络传输 SV、GOOSE 报文已经成为目前主流的组网方式。而新一代智能变电站更是率先试点了间隔层、过程层和站控层 3 层共网的组网方式。网络传输为智能变电站的数据共享创造了条件, 但同时也给智能变电站的可靠运行带来了风

险, 这种风险在发生网络风暴或者是网络压力异常时体现得最为明显, 影响最为严重。网络压力异常除了会造成网络堵塞、系统大面积断网等影响外, 还会冲击过程层、间隔层中所有组网设备, 大量占用 CPU 资源, 导致各组网设备软件程序死机或重启, 危害智能变电站的安全稳定运行^[1]。

一方面, 网络规模、网络设备数量在不断扩大, 另一方面, 网络内传输的信息内容在不断增加, 这就使得网络传输质量、网络传输性能显得越发重要, 同时继电保护装置所要应对的网络压力风险也越来越大。因此, 探明网络压力产生的原因, 研究网络压力的表现形式, 并对继电保护装置在网络压力情

基金项目: 国家电网公司科技项目“提升数据源差异及数据异常情况下保护设备可靠性关键技术研究”

况下的装置性能进行测试,就显得尤为重要。

目前,对于网络压力的表现形式的了解尚不确切,对继电保护装置的网路性能测试方法也比较笼统,并不能反映出保护装置在实际发生较大网络压力情况下的真实性能^[1-5]。本文通过研究智能变电站的网络结构及装置特点,找到可能导致网络压力突然增大的系统薄弱点,并分析网络压力报文的可能形态。在此基础上,构建了网络压力测试的试验平台,研究提出了智能变电站继电保护装置网络测试方法,并对应用于智能变电站的继电保护装置提出了性能要求,为保证继电保护装置在智能变电站网络环境中的安全稳定运行奠定基础。

1 网络压力产生的原因

当网络数据突然增大到远远超过正常的流量,直到交换机端口的流量超过了限制,将导致数据传输不稳定、数据包丢失或传输受阻,这种现象被称为网络压力^[6-8]。广播数据包的量是网络压力过程中产生的数据特征之一。一个数据帧或包被传输到本地网段(由广播域定义)上的每个节点就是广播;由于网络拓扑的设计和连接问题,或其他原因导致广播在网段内大量复制,传播数据帧,导致网络性能下降,甚至网络瘫痪^[9]。这就是广播风暴,也称为网络风暴。目前,智能变电站中网络的规模越来越大,网络结构也逐渐变得复杂,网络中接入的设备数量也在不断扩大,因此,发生网络风暴的风险越来越大。广播报文网络风暴发生后,会占用大量的网络资源,严重影响了网络的传输性能。

智能变电站中过程层网络连接过程层设备与间隔层设备,主要是传输过程层内部、间隔层内部以及过程层与间隔层之间的数据信息,内容以GOOSE和SV报文为主。根据智能变电站网络特点,站控层网络传输的MMS报文数据量较小,实时性要求不高。而过程层网络传输的GOOSE报文和SV报文数据量大,实时性要求高,不能容忍网络拥塞或是传输时延^[10-14]。

为了限制网络流量、增加系统灵活性、提高系统的可靠性,工程应用中网络报文采用组播通信方式,通过使用VALN(虚拟局域网)或GMRP(组播注册协议)等网络隔离措施对各类报文进行隔离,减少广播风暴的发生,便于网络管理,提高安全性。但VLAN不能彻底解决网络压力的问题^[15-19]。

为了解网络压力的可能形式,本文分析研究了可能导致网络压力或网络风暴的各种原因。

1) 网络拓扑环网

由于网络拓扑结构的划分和管理不合理,可能

造成网络拓扑中存在环网。当网络拓扑中存在环网,就会造成一帧或多帧广播或组播报文都在网络中被重复转发,引发网络风暴。交换机任一端口收到广播或组播报文后,由于在MAC地址表中没有记录对应的端口,就会将该报文转发至所有端口,如果恰好有2个或多个端口间存在环形通信,交换机就会以最大转发速率全端口转发广播报文,造成网络风暴,引起网络中断。

2) 组网设备网卡损坏或者交换器端口损坏

组网设备二次设备应用程序缺陷,比如应用程序失控地将大量报文写入报文缓冲区,导致不断的发送错误包造成网络阻塞,引起网络风暴或者网络压力。

3) 网络设备使用不规范

相关人员误将集线器当作交换机使用,由于集线器的工作原理,收到任一端口发出来的所有数据包均会在所有端口转发,因此在网络繁忙时,由于集线器处理能力的限制,会导致网络阻塞、中断等,引发网络压力。

设备生产厂家为节省成本使用交换芯片代替多个独立芯片,若交换芯片损坏导致原有的端口划分失效,设备相当于一台全通的交换机,破坏原有网络结构,严重的情况下可能导致网络形成环路,引发网络压力或是网络风暴。

4) 多点同时故障

当系统中由于闪络等原因发生连续故障时,大量二次设备相继动作,可能使得网络中传送的信息突然增多。交换机及保护装置都需要同时转发或处理大量有用的网络报文。

2 网络压力的表现形式

研究网络压力的表现形式是研究网络压力测试方法的基础。不同的组网方式下,网络压力的表现形式也不尽相同。

2.1 过程层不同组网方式下的网络压力

1) 点对点方式通信:过程层网络SV及GOOSE均采用点对点方式通信。

此种条件下的网络风暴,一般是由于硬件或软件故障导致,故障原因不同,其主要特征也不尽相同,一般有正常报文重复发送、异常报文重复发送、错误报文重复发送3类。

2) 单组网通信:过程层网络分为SV网和GOOSE网,分别独立组网,物理隔离。

此种条件下的网络风暴,除由于硬件或软件故障导致外,由于交换机的存在,也增加了网络风暴形成的可能,即由于交换机端口损坏或网络环路造

成的网络风暴，环路后造成的网络压力特征为 SV 网或 GOOSE 网中存在大量复制的正常 SV 或 GOOSE 组播报文。此类风暴模拟时需考虑 SV 或 GOOSE 节点的数量、报文长度信息。

3) 双组网通信：过程层网络 SV 与 GOOSE 共网。

此种条件下的网络风暴特征为网络中存在大量复制的正常 SV 和 GOOSE 组播报文。此类风暴模拟时除要考虑 SV 和 GOOSE 节点的数量、报文长度信息外，还要考虑各类报文的流量。

4) 多网通信：过程层网络与录波网等其他网络共网。

此种条件下的网络风暴特征较为复杂，根据网络风暴报文的特点可分为 ARP 广播风暴、SV 网络风暴、GOOSE 网络风暴、环网网络风暴。

(1) ARP 广播风暴：网络中充斥大量 ARP 广播包，影响正常报文的发送和接收。

(2) SV 网络风暴：网络中充斥大量 SV 组播报文，影响正常报文的发送和接收。

(3) GOOSE 网络风暴：网络中充斥大量 GOOSE 组播报文，影响正常报文的发送和接收。

(4) 环网网络风暴：网络中充斥大量复制的正常广播和组播报文，影响正常报文的发送和接收。

2.2 网络压力的表现形式

目前智能变电站继电保护装置多采用点对点方式进行采样和跳闸。同时，SV、GOOSE、录波共用过程层网络，向录波器传输 SV、GOOSE 信号；过程层网络还用于过程层设备之间失灵、联闭锁等信号的传输。因此，智能变电站继电保护装置所处的网络环境较为复杂，可能遇到的网络压力报文情况也较为复杂。为了便于后续试验模拟，将网络压力报文分为以下 4 类情况。

1) 交换机异常引起的非订阅报文压力

交换机异常等情况可能导致 VLAN 机制失灵，使得大量原本属于不同 VLAN 网络数据包在各 VLAN 之间转发。在这种情况下，保护装置可能接收到大量的广播报文以及非订阅的 GOOSE 或 SV 报文，其流量可能达到端口的最大带宽。

2) 软硬件异常引起的订阅报文压力

组网设备网卡或端口异常、应用程序缺陷、蠕虫病毒或 ARP 攻击，可能会导致网络设备发送大量的异常报文，每一个控制块发送报文的频率是每一个中断发送一帧。对于保护装置，中断频率一般与采样频率相同，若采样频率是每周期 24 点，则报文的输出频率为每 0.833 ms 一帧。在这种情况下，订阅该 GOOSE 控制块的其他设备最多每 0.833 ms 就能收到一帧 stNum 或 sqNum 变化的异常

报文。

3) 网络拓扑等异常引起的订阅报文压力

由以集线器作为交换机、网线短路、网络拓扑异常引起的网络压力，可以让一帧或多帧报文在网络中被多次转发直至带宽被完全占用。在这种情况下，保护装置可能会收到大量的订阅 SV 或 GOOSE 报文，保护设备的网卡和 CPU 资源可能被大量占用。

4) 多点同时故障引起的信息雪崩

多点同时故障发生时，网络中同时增加大量有用的变位报文。在这种情况下，保护装置同时收到多个 GOOSE 控制块发送的变位报文，每条变位信息均需要保护 CPU 进行解析处理。

3 网络压力测试平台

现有的网络压力下保护装置运行性能的测试方法主要有两种，一是使用网络性能测试仪，二是交换机环网。网络性能测试仪可以模拟复杂网络的不同情况，使用更加便捷，因此也得到了更为广泛的应用。

如图 1 和图 2 所示，建立了过程层网络压力测试平台和站控层网络压力测试平台，可测试在不同类型网络压力下保护装置的运行性能。

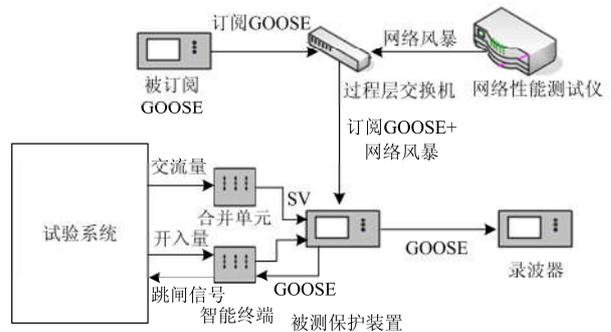


图 1 过程层网络压力测试平台

Fig. 1 Process layer network stress test platform

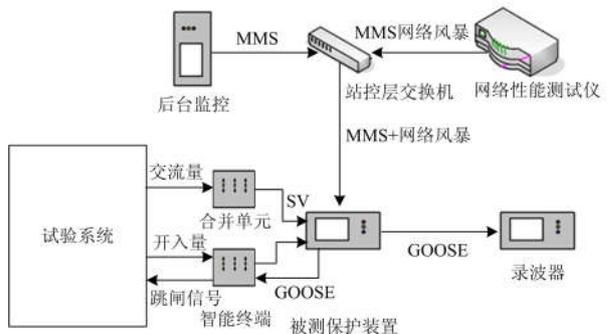


图 2 站控层网络压力测试平台

Fig. 2 Station layer network stress test platform

4 网络压力测试方法及技术要求

4.1 非订阅报文过程层网络压力测试

1) 检测方法

在原有网络数据流量的基础上使用网络测试仪对组网口施加非订阅 GOOSE、SV 和 ARP 等类型的报文,注入流量 100 M(实测基础流量),网络压力持续时间不小于 2 min。网络压力持续过程中,模拟区内外故障及与各订阅 GOOSE 控制块报文相关的故障(如断路器失灵、死区故障或手合断路器于故障等),查看保护装置动作情况,如图 3 所示。

图 3 保护控制装置接收报文示意(APPID 非订阅, MAC 订阅的 GOOSE 报文,注入流量 99 M)
Fig. 3 Packets received by protection control device (99 M GOOSE Packets with unsubscription APPID and subscription MAC Address)

2) 技术要求

保护装置应不受非订阅报文的影响,不应受 ARP 广播报文网络风暴影响,装置运行正常,不误动、不误发报文,不应出现死机、重启等异常现象,装置面板不应有异常告警;发生区内故障时,保护装置应能可靠动作,发生区外故障时,保护装置不应误动。保护装置应能正确接收点对点口及组网口订阅 GOOSE 控制块报文的正常变位或联锁信号并正确动作。

4.2 订阅 GOOSE 报文过程层网络压力测试

1) 检测方法

对保护装置组网口施加如下类型的单个或多个订阅 GOOSE 报文,网络压力持续时间不小于 2min:

- (1) StNum 不变, SqNum 不变,注入流量为 1~100 M(实测基础流量);
- (2) StNum 不变, SqNum 递增,每控制块 GOOSE 变化报文 0.833 ms 发送 1 帧;
- (3) StNum 递增, SqNum 为 0,每控制块 GOOSE 变化报文 0.833 ms 发送 1 帧。

网络压力持续过程中,模拟区内外故障及与各

订阅 GOOSE 控制块报文相关的故障,查看保护装置动作情况,如图 4 所示。

图 4 保护控制装置接收报文示意(订阅 GOOSE 报文, StNum 递增, SqNum 为 0,每 0.833 ms 发送 1 帧)

Fig. 4 Packets received by protection control device (one frame subscription GOOSE Packets per 0.833 ms with StNum increase one by one, and SqNum is 0)

2) 技术要求

保护装置运行正常,不误动、不误发和发生网络压力的订阅控制块无关的异常报文,不应出现死机、重启等异常现象,装置面板不应有和发生网络压力的订阅控制块无关的异常告警;发生区内故障时,保护装置应能可靠动作,发生区外故障时,保护装置不应误动。保护装置应能正确接收点对点口及组网口其他订阅 GOOSE 控制块报文的正常变位或联锁信号并正确动作。

4.3 订阅 SV 报文过程层网络压力测试

1) 检测方法

对保护装置点对点口施加单个订阅 SV 报文 (SmpCnt 不变,报文内容不变),注入流量为 1~100 M (实测基础流量),网络压力持续时间不小于 2 min。网络压力持续过程中,模拟区内外故障及与各订阅 GOOSE 控制块报文相关的故障,查看保护装置动作情况,如图 5。

2) 技术要求

保护装置运行正常,不误动、不误发和发生网络压力的订阅控制块无关的异常报文,不应出现死机、重启等异常现象,装置面板不应有和发生网络压力的订阅控制块无关的异常告警。保护不能正常运行时应有正确告警。

4.4 订阅 GOOSE 报文网络压力极限测试

1) 检测方法

对保护装置组网口施加如下类型的单个或多个订阅 GOOSE 报文,网络压力持续时间不小于 2 min。

| 序号 | 时间 | 时差 | 间隔(微秒) | 信息 | APPID | 采样序号 | 大小 |
|----|-------------------------------|--------|----------|------------------|----------------|------|-----|
| 1 | 2016-05-13 14:39:20.00003720 | | | 0x40000000]风暴 | 0x4001_高压侧CT10 | 3316 | 283 |
| 2 | 2016-05-13 14:39:20.00002620 | 24 560 | -225 440 | 0x40000000]重复/风暴 | 0x4001_高压侧CT10 | 3316 | 283 |
| 3 | 2016-05-13 14:39:20.00002940 | 24 560 | -225 440 | 0x40000000]重复/风暴 | 0x4001_高压侧CT10 | 3316 | 283 |
| 4 | 2016-05-13 14:39:20.00007400 | 24 560 | -225 440 | 0x40000000]重复/风暴 | 0x4001_高压侧CT10 | 3316 | 283 |
| 5 | 2016-05-13 14:39:20.00010190 | 24 560 | -225 440 | 0x40000000]重复/风暴 | 0x4001_高压侧CT10 | 3316 | 283 |
| 6 | 2016-05-13 14:39:20.00011980 | 77 820 | -172 080 | 0x40000000]重复/风暴 | 0x4001_高压侧CT10 | 3316 | 283 |
| 7 | 2016-05-13 14:39:20.00020440 | 24 560 | -225 440 | 0x40000000]重复/风暴 | 0x4001_高压侧CT10 | 3316 | 283 |
| 8 | 2016-05-13 14:39:20.00023000 | 24 560 | -225 440 | 0x40000000]重复/风暴 | 0x4001_高压侧CT10 | 3316 | 283 |
| 9 | 2016-05-13 14:39:20.00025360 | 24 560 | -225 440 | 0x40000000]重复/风暴 | 0x4001_高压侧CT10 | 3316 | 283 |
| 10 | 2016-05-13 14:39:20.000278120 | 24 560 | -225 440 | 0x40000000]重复/风暴 | 0x4001_高压侧CT10 | 3316 | 283 |
| 11 | 2016-05-13 14:39:20.000302680 | 24 560 | -225 440 | 0x40000000]重复/风暴 | 0x4001_高压侧CT10 | 3316 | 283 |
| 12 | 2016-05-13 14:39:20.000327240 | 24 560 | -225 440 | 0x40000000]重复/风暴 | 0x4001_高压侧CT10 | 3316 | 283 |
| 13 | 2016-05-13 14:39:20.000351800 | 24 560 | -225 440 | 0x40000000]重复/风暴 | 0x4001_高压侧CT10 | 3316 | 283 |
| 14 | 2016-05-13 14:39:20.000376360 | 24 560 | -225 440 | 0x40000000]重复/风暴 | 0x4001_高压侧CT10 | 3316 | 283 |
| 15 | 2016-05-13 14:39:20.000429720 | 53 360 | -116 840 | 0x40000000]重复/风暴 | 0x4001_高压侧CT10 | 3316 | 283 |
| 16 | 2016-05-13 14:39:20.000448840 | 49 120 | -200 880 | 0x40000000]重复/风暴 | 0x4001_高压侧CT10 | 3316 | 283 |
| 17 | 2016-05-13 14:39:20.000503400 | 24 560 | -225 440 | 0x40000000]重复/风暴 | 0x4001_高压侧CT10 | 3316 | 283 |
| 18 | 2016-05-13 14:39:20.000527960 | 24 560 | -225 440 | 0x40000000]重复/风暴 | 0x4001_高压侧CT10 | 3316 | 283 |
| 19 | 2016-05-13 14:39:20.000552520 | 24 560 | -225 440 | 0x40000000]重复/风暴 | 0x4001_高压侧CT10 | 3316 | 283 |
| 20 | 2016-05-13 14:39:20.000577080 | 24 560 | -225 440 | 0x40000000]重复/风暴 | 0x4001_高压侧CT10 | 3316 | 283 |
| 21 | 2016-05-13 14:39:20.000601640 | 24 560 | -225 440 | 0x40000000]重复/风暴 | 0x4001_高压侧CT10 | 3316 | 283 |
| 22 | 2016-05-13 14:39:20.000626200 | 24 560 | -225 440 | 0x40000000]重复/风暴 | 0x4001_高压侧CT10 | 3316 | 283 |
| 23 | 2016-05-13 14:39:20.000679560 | 53 360 | -116 840 | 0x40000000]重复/风暴 | 0x4001_高压侧CT10 | 3316 | 283 |
| 24 | 2016-05-13 14:39:20.000704120 | 24 560 | -225 440 | 0x40000000]重复/风暴 | 0x4001_高压侧CT10 | 3316 | 283 |
| 25 | 2016-05-13 14:39:20.000728680 | 24 560 | -225 440 | 0x40000000]重复/风暴 | 0x4001_高压侧CT10 | 3316 | 283 |
| 26 | 2016-05-13 14:39:20.000771800 | 49 120 | -200 880 | 0x40000000]重复/风暴 | 0x4001_高压侧CT10 | 3316 | 283 |
| 27 | 2016-05-13 14:39:20.000826360 | 24 560 | -225 440 | 0x40000000]重复/风暴 | 0x4001_高压侧CT10 | 3316 | 283 |
| 28 | 2016-05-13 14:39:20.000850920 | 24 560 | -225 440 | 0x40000000]重复/风暴 | 0x4001_高压侧CT10 | 3316 | 283 |
| 29 | 2016-05-13 14:39:20.000881480 | 24 560 | -225 440 | 0x40000000]重复/风暴 | 0x4001_高压侧CT10 | 3316 | 283 |
| 30 | 2016-05-13 14:39:20.000906040 | 24 560 | -225 440 | 0x40000000]重复/风暴 | 0x4001_高压侧CT10 | 3316 | 283 |
| 31 | 2016-05-13 14:39:20.000929400 | 53 360 | -116 840 | 0x40000000]重复/风暴 | 0x4001_高压侧CT10 | 3316 | 283 |

图 5 保护控制装置接收报文示意(订阅 SV 报文, SmpCnt 不变, 报文内容不变, 注入流量 99 M)
Fig. 5 Packets received by protection control device (99 M subscription SV Packets with unchanged SmpCnt and contents)

(1) StNum 不变, SqNum 递增, 1~100 M(实测基础流量);
(2) StNum 递增, SqNum 为 0, 1~100 M(实测基础流量)。
网络压力持续过程中, 模拟区内外故障及与各订阅 GOOSE 控制块报文相关的故障, 查看保护装置动作情况, 如图 6 所示。

| 序号 | 时间 | 时差 | 间隔(微秒) | 信息 | APPID | StNum | SqNum | 大小 | |
|----|----------------------------|----|----------|---------------|----------------|----------------|-------|-------|-----|
| 1 | 2016-05-10 16:06:40.000036 | | | 0x40000000]风暴 | 0x0027_500kV自投 | 0 | 48270 | 372 | |
| 2 | 2016-05-10 16:06:40.000036 | 32 | -4999968 | 5000000 | 0x40000000]风暴 | 0x0027_500kV自投 | 0 | 48271 | 372 |
| 3 | 2016-05-10 16:06:40.000036 | 32 | -4999968 | 5000000 | 0x40000000]风暴 | 0x0027_500kV自投 | 0 | 48272 | 372 |
| 4 | 2016-05-10 16:06:40.000101 | 32 | -4999968 | 5000000 | 0x40000000]风暴 | 0x0027_500kV自投 | 0 | 48273 | 372 |
| 5 | 2016-05-10 16:06:40.000101 | 60 | -4999944 | 5000000 | 0x40000000]风暴 | 0x0027_500kV自投 | 0 | 48274 | 372 |
| 6 | 2016-05-10 16:06:40.000180 | 32 | -4999968 | 5000000 | 0x40000000]风暴 | 0x0027_500kV自投 | 0 | 48275 | 372 |
| 7 | 2016-05-10 16:06:40.000225 | 32 | -4999968 | 5000000 | 0x40000000]风暴 | 0x0027_500kV自投 | 0 | 48276 | 372 |
| 8 | 2016-05-10 16:06:40.000225 | 32 | -4999968 | 5000000 | 0x40000000]风暴 | 0x0027_500kV自投 | 0 | 48277 | 372 |
| 9 | 2016-05-10 16:06:40.000313 | 56 | -4999944 | 5000000 | 0x40000000]风暴 | 0x0027_500kV自投 | 0 | 48278 | 372 |
| 10 | 2016-05-10 16:06:40.000344 | 32 | -4999968 | 5000000 | 0x40000000]风暴 | 0x0027_500kV自投 | 0 | 48279 | 372 |
| 11 | 2016-05-10 16:06:40.000425 | 60 | -4999940 | 5000000 | 0x40000000]风暴 | 0x0027_500kV自投 | 0 | 48280 | 372 |
| 12 | 2016-05-10 16:06:40.000425 | 32 | -4999968 | 5000000 | 0x40000000]风暴 | 0x0027_500kV自投 | 0 | 48281 | 372 |
| 13 | 2016-05-10 16:06:40.000446 | 32 | -4999968 | 5000000 | 0x40000000]风暴 | 0x0027_500kV自投 | 0 | 48282 | 372 |
| 14 | 2016-05-10 16:06:40.000500 | 32 | -4999968 | 5000000 | 0x40000000]风暴 | 0x0027_500kV自投 | 0 | 48283 | 372 |
| 15 | 2016-05-10 16:06:40.000500 | 32 | -4999968 | 5000000 | 0x40000000]风暴 | 0x0027_500kV自投 | 0 | 48284 | 372 |
| 16 | 2016-05-10 16:06:40.000563 | 32 | -4999968 | 5000000 | 0x40000000]风暴 | 0x0027_500kV自投 | 0 | 48285 | 372 |
| 17 | 2016-05-10 16:06:40.000620 | 56 | -4999944 | 5000000 | 0x40000000]风暴 | 0x0027_500kV自投 | 0 | 48286 | 372 |
| 18 | 2016-05-10 16:06:40.000660 | 60 | -4999940 | 5000000 | 0x40000000]风暴 | 0x0027_500kV自投 | 0 | 48287 | 372 |
| 19 | 2016-05-10 16:06:40.000660 | 32 | -4999968 | 5000000 | 0x40000000]风暴 | 0x0027_500kV自投 | 0 | 48288 | 372 |
| 20 | 2016-05-10 16:06:40.000745 | 32 | -4999968 | 5000000 | 0x40000000]风暴 | 0x0027_500kV自投 | 0 | 48289 | 372 |
| 21 | 2016-05-10 16:06:40.000775 | 32 | -4999968 | 5000000 | 0x40000000]风暴 | 0x0027_500kV自投 | 0 | 48290 | 372 |
| 22 | 2016-05-10 16:06:40.000807 | 32 | -4999968 | 5000000 | 0x40000000]风暴 | 0x0027_500kV自投 | 0 | 48291 | 372 |
| 23 | 2016-05-10 16:06:40.000828 | 32 | -4999968 | 5000000 | 0x40000000]风暴 | 0x0027_500kV自投 | 0 | 48292 | 372 |
| 24 | 2016-05-10 16:06:40.000870 | 32 | -4999968 | 5000000 | 0x40000000]风暴 | 0x0027_500kV自投 | 0 | 48293 | 372 |
| 25 | 2016-05-10 16:06:40.000925 | 88 | -4999915 | 5000000 | 0x40000000]风暴 | 0x0027_500kV自投 | 0 | 48294 | 372 |
| 26 | 2016-05-10 16:06:40.000927 | 32 | -4999968 | 5000000 | 0x40000000]风暴 | 0x0027_500kV自投 | 0 | 48295 | 372 |
| 27 | 2016-05-10 16:06:40.001019 | 32 | -4999968 | 5000000 | 0x40000000]风暴 | 0x0027_500kV自投 | 0 | 48296 | 372 |
| 28 | 2016-05-10 16:06:40.001020 | 50 | -4999915 | 5000000 | 0x40000000]风暴 | 0x0027_500kV自投 | 0 | 48297 | 372 |

图 6 保护控制装置接收报文示意(订阅 GOOSE 报文, StNum 不变, SqNum 递增, 注入流量 99 M)
Fig. 6 Packets received by protection control device (99 M subscription GOOSE Packets with StNum unchanged, and SqNum increase one by one)

2) 技术要求
保护装置在订阅报文网络压力测试条件下应运行正常, 不误动、不误发报文, 不应出现死机、重启等异常现象。网络压力消失后装置正常运行, 发生区内故障时, 保护装置应能可靠动作, 发生区外故障时, 保护装置不应误动, 保护装置应能正确接

收点对点口及组网口订阅 GOOSE 控制块报文的状态变位或联锁信号并正确动作。

4.5 雪崩测试

1) 检测方法

对保护装置组网口同时施加多个订阅 GOOSE 报文(线路保护装置及变压器保护装置的控制块数量可为 6 个, 母线保护装置的控制块数量可为 48 个, StNum 不变, SqNum 递增, 每控制块 GOOSE 变化报文 1 s 发送 1 帧, 连续发送 10 次)。网络压力持续过程中, 模拟区内外故障及与各订阅 GOOSE 控制块报文相关的故障(如断路器失灵、死区故障或手合断路器于故障等), 查看保护装置动作情况。

2) 技术要求

保护装置不应受非订阅报文网络风暴影响, 装置运行正常, 不误动、不误发报文, 不应出现死机、重启等异常现象, 装置面板不应有异常告警; 发生区内故障时, 保护装置应能可靠动作, 发生区外故障时, 保护装置不应误动。保护装置应能正确接收各订阅 GOOSE 控制块报文的状态变位或联锁信号并正确动作。

4.6 站控层网络压力测试

1) 检测方法

去除站控层交换机广播风暴抑制, 对交换机端口注入广播报文(ARP、UDP、TCP), 注入流量为 1 M~(100 M-实测基础流量)。网络压力持续过程中, 模拟区内外故障及与各订阅 GOOSE 控制块报文相关的故障, 查看保护装置动作情况。

2) 技术要求

保护装置不应受站控层广播报文网络风暴影响, 装置运行正常, 不误动、不误发报文, 不应出现死机、重启等异常现象; 装置面板不应死机, 不应有异常告警; 发生区内故障时, 保护装置应能可靠动作, 发生区外故障时, 保护装置不应误动。保护装置应能正确接收点对点口及组网口订阅 GOOSE 控制块报文的状态变位或联锁信号并正确动作。

5 试验结果

国家电网仿真中心对国内主流二次设备厂家生产的继电保护装置进行了网络压力下的性能试验。试验结果情况表明, 大部分参试继电保护装置的性能指标能满足技术要求, 部分厂家不能正确过滤 MAC 地址及 APPID 仅一个为订阅的错误 GOOSE 报文, 还有部分厂家的保护装置在订阅报文网络压力极限测试中管理板出现死机并且重启的现象。试验中发现, 部分厂家在 StNum 不变, SqNum 不变

的订阅 GOOSE 报文过程层网络压力测试中, 仍然能有效过滤异常 GOOSE 报文并响应该 GOOSE 控制块的变位信息, 继电保护装置在网络压力下的动作性能得到了提高。

试验过程中发现的问题, 有关厂家对此高度重视, 积极分析, 及时解决了问题, 并在补充试验中进行了验证。

6 结论

本文研究了智能变电站网络压力产生的原因及表现形式, 提出了智能变电站继电保护装置网络压力测试方法, 并给出了相应的技术要求。这种测试方法可以测试保护装置在广播报文压力和非订阅 GOOSE/SV 网络压力下的装置性能, 还可以测试在订阅报文网络压力下的装置性能, 较为真实全面地模拟了实际可能发生的网络压力环境, 系统地测试了保护装置在网络压力环境下的装置性能, 确保了在智能变电站网络环境下继电保护装置的运行安全稳定。同时, 在网络压力测试过程中, 记录整理不同网络压力流量下保护装置的动作行为, 研究保护装置的网路压力承受能力, 也能够为网络拓扑的规划设计提供指导依据。

参考文献

- [1] 浮明军, 刘秋菊, 左群业. 智能变电站网络风暴测试研究[J]. 现代电力, 2013, 30(3): 85-89.
FU Mingjun, LIU Qiuju, ZUO Qunye. Research on the network storm testing of smart substation[J]. Modern Electric Power, 2013, 30(3): 85-89.
- [2] 詹智华. 智能变电站继电保护动模测试平台建设及测试技术研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2015.
ZHAN Zhihua. Research on construction and testing technology of smart substation relay dynamic simulation platform[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2015.
- [3] ZHANG Xiaofei, WANG Jiesong, ZHANG Daoyin, et al. Research on testing technologies of network system in smart substations[J]. Electricity, 2012(3): 19-23.
- [4] 李松林, 罗建, 钟加勇, 等. 智能变电站系统网络性能测试与分析[J]. 微计算机信息, 2012, 28(1): 107-108.
LI Songlin, LUO Jian, ZHONG Jiayong, et al. System network performance testing and analysis of Intelligent substation[J]. Microcomputer Information, 2012, 28(1): 107-108.
- [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.
LIU Haoyu, ZUO Qunye, ZHANG Baoshan. Process level network performance testing and analysis in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 112-116.
- [6] 曹津平, 李伟, 秦应力, 等. 数字化变电站过程层的通信技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(12): 60-68.
CAO Jinping, LI Wei, QIN Yingli, et al. Research on digital substation process level communication technology[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(12): 60-68.
- [7] 欧阳帆, 刘海峰, 赵永生, 等. 智能变电站通信网络阻塞故障及其防范措施分析[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 7-11.
OUYANG Fan, LIU Haifeng, ZHAO Yongsheng, et al. Analysis on communication network congestion occurred in smart substation and preventive measures[J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 7-11.
- [8] 杨贵, 王兆强, 王文龙, 等. 智能变电站过程层交换机关键技术探讨[J]. 电气技术, 2012(1): 51-55.
YANG Gui, WANG Zhaoqiang, WANG Wenlong, et al. Intelligent substation process level switch key technology discussion[J]. Electrical Technology, 2012(1): 51-55.
- [9] 陈文杰. 基于 IEC61850 的数字化变电站技术的实用化探讨[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
CHEN Wenjie. Practical analysis of the digital substation technology based on IEC61850[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [10] 易永辉, 王雷涛, 陶永健. 智能变电站过程层应用技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 1-5.
YI Yonghui, WANG Leitao, TAO Yongjian. Process level application scheme in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 1-5.
- [11] 胡春潮, 蔡泽祥, 竹之涵. 提高数字化变电站关键报文传输可靠性方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 91-96.
HU Chunchao, CAI Zexiang, ZHU Zhihan. Frame-based transmission reliability analysis of the digital substation key messages[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 91-96.
- [12] 张宪军, 刘颖, 余华武, 等. 智能变电站 MMS、GOOSE、SV 三网合一通信过载隔离抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 120-126.
ZHANG Xianjun, LIU Ying, YU Huawu, et al. Overload isolation and control strategy of smart substation MMS,

- GOOSE, and SV three-in-one communication network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 120-126.
- [13] 杨贵, 吕航, 袁志彬, 等. 智能变电站过程层网络流量控制和同步方法研究与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 70-74.
- YANG Gui, LÜ Hang, YUAN Zhibin, et al. Research and realization of intelligent substation process level network flow control and synchronization method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 70-74.
- [14] 李红因, 李晨曦. 监控网与GOOSE网合一的通信网实时性分析[J]. 陕西电力, 2015, 43(4): 28-31.
- LI Hongnan, LI Chenxi. Communication network real-time analysis based on combination of MMS and GOOSE nests[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(4): 28-31.
- [15] 汤超. 潮湖变电站站内交换机网络结构优化[J]. 宁夏电力, 2012(增刊 1): 24-28.
- TANG Chao. The optimization of the switch network structure in Chaohu substation[J]. Ningxia Electric Power, 2012(S1): 24-28.
- [16] 杨贵, 孙磊, 李力, 等. 区域保护与控制系统网络拓扑方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 101-107.
- YANG Gui, SUN Lei, LI Li, et al. Research on regional protection and control system network topology[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 101-107.
- [17] 王松, 黄晓明. GOOSE 报文过滤方法研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(19): 54-57.
- WANG Song, HUANG Xiaoming. Filtering methods of GOOSE messages[J]. Automation of Electric Power System, 2008, 32(19): 54-57.
- [18] 宋丽君, 王若醒, 狄军峰, 等. GOOSE 机制分析、实现及其在数字化变电站中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(14): 31-35.
- SONG Lijun, WANG Ruoxing, DI Junfeng, et al. Analysis and implementation of GOOSE mechanism and its application in digital substation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(14): 31-35.
- [19] XU Xin, NI Yimin. Analysis of networking mode caused by GOOSE delay of smart substation[C] // 2013 IEEE 4th International Conference on Software Engineering and Service Science: IEEE, IEEE Beijing Section, 2013: 4.
-
- 收稿日期: 2016-09-18; 修回日期: 2017-02-08
- 作者简介:
余越(1985—), 女, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: yuyue2010@epri.sgcc.com.cn
- (编辑 周金梅)