

数字化变电站通信网络的性能测试技术

何磊, 郝晓光

(河北省电力研究院, 河北 石家庄 050021)

摘要: 对数字化变电站通信网络性能测试的必要性进行了分析。从数字化变电站的实际出发, 参照局域网验收测评规范 GB/T 21671-2008, 提出了数字化变电站通信网络性能测试的具体项目, 并给出了具体的测试方法。介绍了光功率测试和交换机组网后传输时延、丢包率测试两个实际案例, 并对测试结果进行了分析。对数字化站网络测试技术进行了展望。

关键词: 数字化变电站; 通信网络; 网络测试; 交换机; IEC61850

Acceptance test technology of communication network in digitalized substation

HE Lei, HAO Xiao-guang

(Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: The necessity of communication network testing in digitalized substation is analyzed. By referring to the acceptance test specification for LAN systems GB/T 21671-2008, communication network testing items and testing methods in digital substation are proposed. Two testing examples are given, including optical power testing and the switch latency and frame lost testing. The testing results are analyzed too. At last the prospect of test technology of communication network is analyzed.

Key words: digital station; communication network; test of network; switch; IEC61850

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)10-0075-04

0 引言

变电站自动化技术的发展对变电站内部的通信网络提出了更高的要求, 传统的现场总线由于其通信速率低、标准繁多而不能满足应用需求, 而以太网技术以其应用广泛、价格低廉、通信速率高及软硬件资源丰富等优点逐渐成为工业控制网络首选的解决方案。但是以太网在实时性、可靠性、安全性等方面的问题不容忽视, 网络一旦出现问题, 用户所承担直接损失和间接影响往往是巨大的, 因此需要对其进行测试评价, 判断网络的建设质量能否满足电力工业现场高可靠性、高安全性、高稳定性的要求。采用以太网作为工业控制的石油化工、交通及军事领域等, 对网络测试也都有需求并实际开展过测试工作。针对我国局域网系统验收的具体要求, 2008 年国家正式公布了 GB/T 21671-2008《基于以太网技术的局域网系统验收测评规范》, 为用户和第三方测试机构提供了一个清晰的标准来验收网络系统^[1], 成为保证网络建设质量的一个有力工具。

1 数字化变电站开展网络测试的必要性

与传统变电站相比, 数字化变电站中的通信网

络在结构、功能、性能和重要性等方面存在较大差异^[2]。例如在过程层采用以太网的数字化站中, GOOSE 网络实际上相当于传统变电站中保护测控装置的跳合闸回路, 一旦网络出现问题同时系统又发生故障, 就有可能出现保护动作但跳闸报文无法及时传输, 从而导致断路器无法及时跳开的情况, 与之连接的保护装置将完成不了正常工作, 处于瘫痪状态, 所以通信网络的建设质量和性能决定了数字化站运行的可靠性。

据统计在局域网出现的网络故障中, 有 75% 以上是由网络传输介质引起的, 因此需要对网络传输用的双胶线、光缆进行严格测试, 以提前识别和矫正潜在的网络问题, 从而尽早清除, 保证对未来的网络性能造成影响的问题不会被隐藏。

数字化变电站对网络交换机有较高的要求^[3], GOOSE 网一般采用带网管型工业交换机。网管型交换机有复杂的软件管理系统, 它实质上也是一个智能装置 IED, 具有和保护装置相比的复杂性, 因此对交换机 IED 的功能进行测试是十分必要的。KEMA 公司也已经将以太网交换机作为 IEC61850 测试的一部分。

交换机的测试分为型式试验和现场试验两部

分,某些指标如电磁兼容性,在现场可能不具备测试条件,只能通过查看厂家提供的型式试验报告的方法来分析和考核。但是型式试验报告只提供单台装置的数据,并不能完全满足网络测评的需要,例如网络传输延时一般由帧收发时延、交换时延、线路传输时延和帧排队时延4个部分组成^[4-5],针对单台交换机测试只能得到帧收发时延加交换时延,线路传输时延和帧排队时延则由具体的网络结构和网络负荷状况决定,只能在现场实测得到,因此开展交换机的现场试验工作是十分必要的。

2 数字化变电站网络性能测试的具体内容

2.1 物理层传输介质的测试

光纤传输数据的误码率和光功率密切相关,因此需要对光口交换机、有光纤连接的各保护装置、测控装置和合并单元、智能单元的光口发送功率、光口接收灵敏度进行测试。对传输介质单模/多模光纤,不仅要对其长度/通道衰耗进行测试,还可以通过测试分析光缆的OTDR曲线以鉴定光纤链路耦合器、熔接点的连接质量。

数字化站中大量采用了光纤,光缆的敷设和走向给习惯了电缆的设计施工人员带来了新课题。设计施工人员可以参考GB50312-2007《综合布线系统工程验收规范》,测试验收人员也可以参考该规范对整个数字化站光缆的布线进行全面的检验。

2.2 数据链路层网络交换机的测试

2.2.1 交换机的型式试验

IEC61850-3标准强调一般工业环境的抗干扰要求对于变电站来说是不足的,交换机作为数字化站内的IED,其可靠性尤其是抗电磁干扰的能力应达到或高于对保护装置的要求。IEC61850-3规定了通信设备应能承受的环境要求和供电要求。环境要求有温度、湿度、大气压力、机械和振动、污染和腐蚀及抗电磁干扰性能等;供电要求有正常工作时的电压范围、电压容差、电压中断和频率、谐波含量、纹波等电压质量^[6]。IEEE1613是IEEE制定的有关交换机的另外一个国际标准,它规定了变电站内通信网络设备的标准环境和测试要求,其CLASS 2版本规定交换机在进行型式试验过程中,不能发生通信故障、通信中断,通信延迟不能增加。数字化变电站中的交换机应按照这些标准,进行相应的低温试验、干热试验、湿热性能、静态振动、冲击、自由坠落、静态加载、抗电磁干扰、电磁辐射、绝缘强度试验等,其型式试验报告应该提供这些指标的测试结果。

2.2.2 交换机的现场试验

交换机的现场试验包括功能测试、性能测试。

a. 交换机的功能测试应包括:

1) 端口自由镜像功能。为了实现对于网络上传输的信息完整记录,实现网络记录功能,要求交换机可以将某一端口的所有数据复制到一个指定的镜像端口,测试时需要检查在目的端口上能否观察到源端口上的数据包。

2) VLAN划分功能。交换机采用IEEE 802.1q VLAN虚拟局域网技术,减少广播流量,隔离带有关键实时数据的设备和产生大量数据输出的其他设备,保证关键设备的报文传输实时性,提高网络安全性。测试时需要检查划分成不同VLAN的端口之间是否实现了有效隔离^[7]。

3) 报文优先级QoS功能测试。采用IEEE 802.1p优先级技术的过程层网络,对重要的报文如GOOSE赋予了较高的优先级,测试检查GOOSE报文能否优先传输。

4) 交换机广播风暴抑制功能测试。损坏的网卡、感染病毒的机器和环形网络结构都有可能引发广播风暴,测试时检测交换机的端口速率限制功能能否限制其发送的大量广播报文。

5) 交换机安全功能测试。实际网络中会出现各种各样可能的数据包,在某种情况下就会造成交换机的故障,因此需要开展交换机的安全性测试,检查交换机是否存在管理上的安全漏洞,对交换机进行DoS攻击测试其是否有抗攻击能力。

6) 交换机告警功能测试。检查装置发生失电、端口速率不匹配等异常现象时,交换机能否及时予以报警,提醒运行人员。

b. 交换机的性能测试应包括:

1) 端口吞吐量测试。吞吐量是指交换机在可接受的丢包率下,所能达到的最大的数据包转发速率。应按照不同的帧长度(64字节、256字节、512字节、1024字节和1518字节等)进行测试。

2) 传输时延测试。传输时延是指数据包从发送端到目的端口所需经历的时间,一般由帧收发时延、交换时延、线路传输时延和帧排队时延4个部分组成。单台交换机测试得到的是帧收发时延加交换时延。

3) 丢包率测试。丢包率是由于网络性能问题造成部分数据包无法被转发的比例,需按照不同的帧长度进行丢包率测试。

2.3 交换机组网后的测试

1) 传输时延测试。和单台交换机相比,多台交换机级联延时增加了线路传输时延和帧排队时延。对于局域网中的传输距离来说线路传输时延可以忽

略不计。在网络负载重的情况下, 交换机将在缓存内存中将帧进行排队, 帧排队给延时引入了非确定性因素, 可能会造成传输延时大幅度增加。

2) 丢包率测试。交换机组网后可能由于网络性能问题造成部分数据包无法被转发, 因此需要对丢包率进行测试。

3) 对数据链路层健康状况测试。对于具备 SNMP 流量监测功能的交换机, 可以通过直接提取 SNMP 端口的方法来实现对被监测网段的流量统计, 测试网络链路利用率、错误帧率、广播帧和组播帧的数量、冲突率等指标。

4) VLAN 划分测试。若网络划分了 VLAN, 则应该检测 VLAN 之间的报文能否进行有效隔离, 从而实现广播隔离和提高网络安全性。

5) RSTP 快速生成树协议测试。对于采用环形拓扑结构和采用冗余技术来保证运行可靠性的网络, 需要利用 RSTP 快速生成树协议提供快速的网络重构时间。在环形网中配置生成树协议后, 通过测试验证只有一条链路可用, 然后人为断开此链路后验证另一条备用链路恢复使用。对于采用星形结构的网络, 此项测试可以不做。

3 网络测试方法与实际案例

3.1 网络测试方法

数字化变电站内的通信网络在可靠性、安全性、稳定性上比一般的局域网要求更严格, 具体体现为在某些测试指标上要求更高, 例如 GOOSE 网不允许有丢包, 丢包率必须为 0。但是数字化变电站内的通信网络其传输介质、网络设备、网络结构与一般的通信局域网相比并无本质不同, 所以在测试方法上二者是基本相同的, 例如网络吞吐量、传输延时、丢包率等指标的具体测试方法可参照相关的国家标准或行业标准, 如 GB/T 21671《基于以太网技术的局域网系统验收测评规范》、YD/T 1141《以太网交换机测试方法》、YD/T 1628《以太网交换机设备安全测试方法》等^[8]。但是与一般通信局域网测试不同, 为了使测试更真实地反映变电站实际情况, 在测试过程层网络时应尽量采用 GOOSE 报文作为测试报文, 而在测试站控层网络时应主要以 MMS 报文和 GOOSE 报文作为测试报文。

3.2 实际测试案例

3.2.1 光功率测试

光功率测试包括光口输出功率测试和光口接受灵敏度测试。

1) 首先将光功率计调整到相应波长档位, 然后把光功率计接到交换机光口输出端进行测量, 此功

率也是间隔层装置的正常接收光功率。

2) 如图 1 所示, 首先在交换机至间隔层装置光纤链路中串接衰耗器, 调整光衰耗器, 使间隔层装置处于接收数据正常和丢帧的临界状态, 断开输入 1 接上输入 2 光功率计, 测量此时光衰耗器输出的光功率, 即为间隔层装置的光口接受灵敏度。

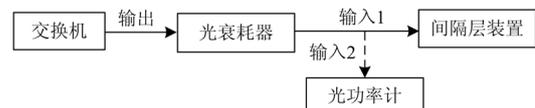


图 1 光口接收灵敏度测试方法

Fig.1 Testing of optical port receiving sensitivity

表 1 为变电站某间隔内交换机和装置光功率测试的结果。

表 1 光功率测试值

Tab.1 Testing result of optical power

序号	测试项目	平均值	裕度值
1	交换机光口输出功率	-10.5 dbm	24.2 dbm
2	装置的光口接受灵敏度	-34.7 dbm	

3.3.2 网络性能测试举例

测试对象为某数字化站的双星型 100 Mbit/s 交换式以太网, 在进行级联测试时选择了该网最长的三层级联路径。表 2 列举了 99%网络负载时的单台交换机和三台交换机级联时延。单台交换机时延测试值由帧收发时延和交换时延组成, 级联时延测试值由帧收发时延、交换时延、线路传输时延和帧排队时延组成。从表 2 中可以看出, 交换机级联后时延比单台传输时延大大增加。

表 2 时延测试值

Tab.2 Testing result of latency

	时延平均值/ μ s						
	64	128	256	512	1024	1280	1518
单台	7.8	13.1	23.4	43.3	84.2	105.1	124.0
级联	21.7	32.0	52.0	96.6	182.3	224.1	265.7

如表 3 中所示, 当网络负载为 99%时测得三台交换机级联丢包率为 0, 当网络负载增大到 100%时, 出现了少量数据包丢失的现象。

表 3 丢包率测试值

Tab.3 Testing result of frame lost

	丢包率百分比						
	64	128	256	512	1024	1280	1518
99%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
100%	0.002	0.001	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

4 结论

在采用 GOOSE 网的数字化站中, GOOSE 网实际

上相当于传统变电站中保护测控装置的跳合闸回路，其地位已经上升到和继电保护及安全自动装置同样的高度，所以应该提高对网络重要性的认识，需要像对保护装置检验一样对通信网络开展测试工作。本文从数字化变电站网络性能测试的必要性出发，以国家颁布的验收测评规范 GB/T 21671-2008 为参照，结合变电站自动化的实际，提出了数字化变电站通信网络的具体测试项目和测试方法。

对于保护装置来说已经有成熟的《继电保护和自动装置检验规程》等规范提供检验方法和指标，数字化站的通信网络测试也需要一个类似的规范文件来提供参考。对数字化站的网络测试方法和结果进行归纳总结，可以形成通信网络的测评规范，对以后的测试工作提供指导。

参考文献

[1] GB/T 21671-2008 基于以太网技术的局域网系统验收测评规范[S].
GB/T 21671-2008 acceptance test specification for local area network (LAN) systems based on Ethernet technology[S].

[2] 任雁铭, 秦立军, 杨奇逊. 变电站自动化系统中内部通信网的研究[J]. 电网技术, 2000, 24(5): 42-44.
REN Yan-ming, QIN Li-jun, YANG Qi-xun. Study on communcation network in substation automation system[J]. Power System Technology, 2000, 24(5): 42-44.

[3] 殷志良, 刘万顺, 杨奇逊, 等. 基于 IEC 61850 标准的过程总线通信研究与实现[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 84-89.
YIN Zhi-liang, LIU Wan-shun, YANG Qi-xun, et al.

Research and implementation of the communication of process bus based on IEC61850[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 84-89.

[4] 辛建波, 蔡子亮. 数字化变电站通信网络的传输时延不确定性分析[J]. 继电器, 2007, 35(5): 45-49.
XIN Jian-bo, CAI Zi-liang. Study on the delay-non-determinism of communion network of digital substation[J]. Relay, 2007, 35(5): 45-49.

[5] 董楠, 朱林, 段献忠. 基于 OPNET 的变电站过程层网络的仿真研究[J]. 继电器, 2006, 34(21): 40-46.
DONG Nan, ZHU Lin, DUAN Xian-zhong. Study on process-level network in substation using OPNET simulation[J]. Relay, 2006, 34(21): 40-46.

[6] IEC61850 communication networks and systems in substations Part 3: General Requirements, IEEE[S].

[7] 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): 60-63.
CAO Jin-ping, LI Wei, QIN Ying-li, et al. Research on digital substation proless level communication technology[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(12): 60-63.

[8] YD/T 1141-2001 以太网交换机测试方法[S].
YD/T 1141-2001 testing methods for ethernet switch[S].

收稿日期: 2009-07-01; 修回日期: 2009-12-30

作者简介:

何 磊 (1982-), 男, 工程师, 硕士, 从事数字化变电站方面的研究; E-mail: ksc200420042004@163.com
郝晓光 (1980-), 男, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护及智能电网。

(上接第 47 页 continued from page 47)

XU Chen, ZHAO Rui-zhen, GAN Xiao-bing. Wavelet analysis: application algorithm[M]. Beijing: Science Press, 2004. 104-111.

[6] 桂延宁, 焦李成, 张福顺. 航空制导炸弹惯性参数遥测中的小波去噪[J]. 西安电子科技大学学报, 2003, 30 (1): 117-119.
GUI Yan-ning, JIAO Li-cheng, ZHANG Fu-shun. Study of the inertia parameter measurement in telemetering for guided bombs with a wavelet de-noise technique[J]. Journal of Xidian University, 2003, 30 (1): 117-119.

[7] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

ZHANG Xian-da. Modern signal processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.

[8] Tayjasanant T, Wang W, Li C, et al. Interharmonics-flicker curves[J]. IEEE Trans Power Del, 2005, 20 (2): 1017-1024.

[9] Feilat E A. Detection of voltage envelope using prony analysis-hilbert transform method[J]. IEEE Trans Power Del, 2006, 21 (4): 2091-2093.

收稿日期: 2009-07-07; 修回日期: 2009-09-17

作者简介:

沈 杨 (1986-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统电压闪变检测分析. E-mail: yshen2021@126.com