

数字化变电站过程层组网方案

梁国坚¹, 段新辉², 高新华³

(1. 广东电网公司 中山供电局, 广东 中山 528400; 2. 广东电网公司 生产技术部, 广东 广州 510000;

3. 广东电网公司 电力科学研究院, 广东 广州 510600)

摘要: 在介绍数字化变电站系统基本结构和组网方案的基础上, 通过对报文传输的测试, 提出数字化变电站过程层组网方案。星形结构在运行维护、传输时间等多方面优于总线型、环形结构, 宜采用双星形结构构建过程层网络。在不同的交换机数据传输流量下对采样值和保护跳闸命令 2 类最重要的报文传输进行了测试, 结果表明: 交换机数据流量大时, 会造成采样值变化和 GOOSE 传输延时。提出 3 种过程层组网方案: 过程层 GOOSE 网络和采样数据传送网络分开, 采样数据传输采用 IEC60044-8 或 IEC61850-9-1 标准的点对点光纤传输; 过程层 GOOSE 网络和采样数据传送网络分开, 采样数据传输采用 IEC61850-9-2 标准的 100 Mbit/s 光纤以太网; 过程层 GOOSE 网络和采样数据传送网络统一。可根据变电站结构和规模、重要性以及所选网络设备考虑过程层组网。

关键词: 数字化变电站; 过程层; 网络; 报文传输; 测试

中图分类号: TM 63; TP 393.02

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2011)02-0094-05

0 引言

数字化变电站是电子式互感器、智能化一次设备、网络化二次设备在 IEC61850 通信协议基础上分层构建, 实现智能电子设备间信息共享和互操作的现代化变电站^[1]。由于高速以太网^[2-3]和 IEC61850 标准^[4-5]的应用, 数字化变电站的系统结构在继承分层分布式变电站结构优点的同时, 又有了不同于常规变电站的革新性变化^[6-9]。文献^[10-13]探讨了变电站内的通信网络结构, 但未对数字化变电站过程层组网以及数据传输可靠性等问题进行讨论; 文献^[14-15]从过程总线和变电站总线两方面讨论了数字化变电站的结构, 但没有定量分析各种结构的可靠性。本文在介绍数字化变电站系统基本结构和组网方案的基础上, 通过对报文传输的测试, 提出数字化变电站过程层组网方案。

1 基本组网方式

数字化变电站的功能在逻辑上被分配到过程层、间隔层和变电站层中, 如图 1 所示。在这 3 层中有 10 类逻辑接口, 分别接入过程总线(process bus)以及变电站总线(station bus)2 类总线^[4]。

过程总线可以采用不同的逻辑组网方式, IEC61850 标准中列举了 4 种基本方式, 如图 2 所示^[4], 它们体现了不同的组网原则, 可以满足不同的数据流要求及可靠性要求, 并可应用于不同场合。

方式 1 为面向间隔, 每个间隔有其自身的总线

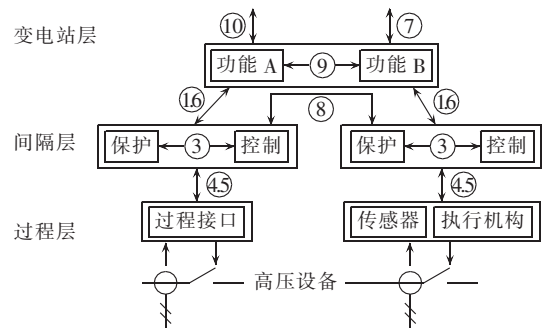


图 1 数字化变电站功能层与逻辑接口

Fig.1 Functional levels and logical interfaces of digital substation

段。为使保护和控制设备可以获得来自其他总线段的数据, 装设一个独立的全站范围的总线。该总线用交换机与各间隔的总线段连接, 传输需要的数据流。该方案适用于 220 kV 及以上电压等级系统以及重要间隔。

方式 2 为面向位置, 每个间隔总线段覆盖了几个间隔。多段总线需要的数据流通过交换机传输。

方式 3 为单一总线, 在全站范围内只用一个通信总线, 所有设备都与该总线连接。该方案系统可靠性差, 需要较高的总线速率, 适用于网络负载较轻且实时性要求不高的中、低压系统。

方式 4 为面向功能, 总线段按照保护区域设置, 使总线段之间数据交换量最少。

2 过程层网络拓扑结构

在物理上, 过程层网络拓扑不仅可以选择总线型, 还可以选择星形和环形, 这也是数字化变电站的主要优点。这 3 种基本网络的结构如图 3 所示^[2]。

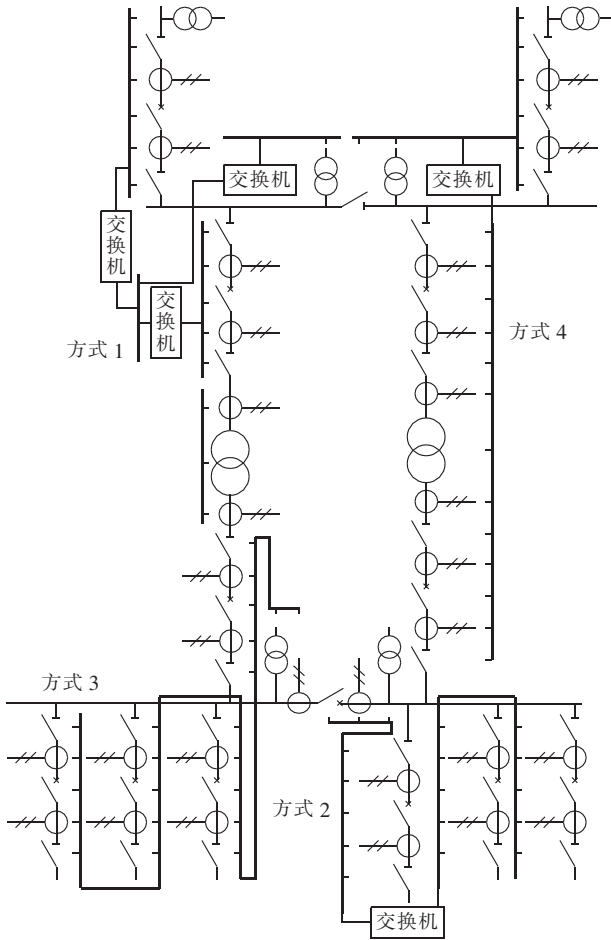


图 2 可选的过程总线结构

Fig.2 Alternative architectures of process bus

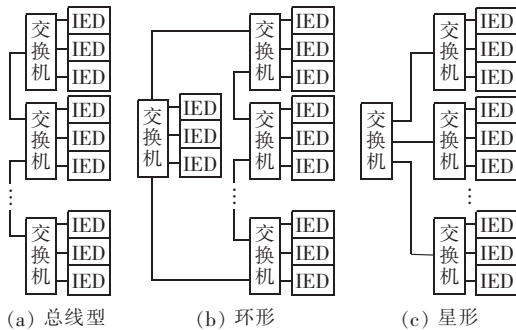


图 3 基本网络结构

Fig.3 Basic network architectures

总线型网络结构简单,但传输速度慢,网络效率和传输性能不高,维护困难。星形网络结构简单,便于维护,报文延时固定,在结构上没有广播风暴的风险。环形网络冗余度好,交换机数量较少,但网络结构较复杂,维护困难,报文延时不固定,在结构上存在广播风暴的风险。3种基本网络结构之间的比较结果见表 1。

星形结构在运行维护、传输时间等多方面优于总线型和环形结构,适合用于构建过程层网络。

3 数据流量对报文传输延时影响

每个过程层设备 IED 能够向网络发送任意大小

表 1 3 种基本网络结构比较

Tab.1 Comparison among three basic network architectures

网络结构	可靠性	网络延迟	造价
总线型	最低	较大	最低
星形	较低	最小	中
环形	较高	较大	最高

和速率的报文,多个 IED 发送不节制的网络流量可能会引起网络过载,特别在故障情况下,由于网络流量剧增可能出现网络拥塞、流量冲突等问题,不能保证时间紧急信息传输的时延上界,出现信息丢失或超出传输时限要求。针对该问题,在不同的交换机数据传输流量下对采样值和保护跳闸命令 2 类最为重要的报文传输进行了测试。

3.1 交换机性能测试

数字化变电站过程层网络交换机使用了以下技术:

- a. 采用带 IEEE 802.1Q 优先级标签的以太网数据帧,使得具有高优先级的数据帧获得更快的响应速度^[15];
- b. 采用虚拟局域网 VLAN(Virtual Local Area Network)技术^[3],将局域网内的设备按照逻辑关系(而不是物理关系)划分成多个网段。

对交换机性能进行了 2 种情况下的测试。

- a. 正常工况下交换机 3 层级联性能测试,结果见表 2。

表 2 正常工况下交换机性能测试结果

Tab.2 Results of switch performance test in normal condition

负载率/%	单组类(A)传输延时/ μs	2 组类丢包率/%	
		A 组	B 组
20	83	0	0
40	83	0	0
60	83	33	2.4
80	83	61.2	16.5
100	2195	68.2	34

传输延时测试信息只有一个组类(A组):测试信息流量达到网络负载率 100% 时,时延较大。丢包率测试信息包括 2 个组类,A 组为低优先级 0,B 组为高优先级 4;测试信息流量超过网络负载率 50% 时开始丢包,高优先级丢包率小于低优先级。

- b. 不同加量网络广播风暴条件下交换机 3 层级联丢包率测试,结果见表 3。

全部测试信息只有一个组类(B组)时,测试结果

表 3 不同广播流量条件下交换机丢包率测试结果
Tab.3 Results of switch performance test under different broadcast flow conditions

负载率/%	单组类(B)丢包率/%		2 组类丢包率/%	
	B(5M)	B(10M)	B(50M)	A(50M)
20	0	0	0	0
40	0	0	0	0
60	0	0	11.8	11.8
80	0	0	24.7	24.7
100	4.7	9.4	29.4	29.4

果表明:广播流量小时,丢包率小。全部测试信息分别选用 2 个不同组类,A 组为低优先级 0,B 组为高优先级 4,测试结果表明:加 50 M 广播流量条件下,优先级的设置基本不影响丢包率。

3.2 采样值报文传输

IEC61850 规范了 2 种采样值传输映射实现方式,分别在标准的 9-1 和 9-2 中定义^[4]。在过程层网络传输采样值数据可使用的数据速率:

$$f_R \times L_{\max} \times n_{\text{MU}} \leq D_R$$

其中, D_R 为交换机数据速率(100 Mbit/s); f_R 为采样频率(Hz); L_{\max} 为最大报文长度(984 bit); n_{MU} 为所连接的合并单元(MU)的数目。

采样频率为 400×50 Hz 时,100 Mbit/s 以太网的带宽不足以让 3 个以上合并单元向同一个接收设备传送采样值。

采样频率为 200×50 Hz 时,推荐选择 100 Mbit/s 以太网。

采样精度受交换机报文流量影响。在过程层交换机中对传输采样值的同一 VLAN 加面向 MAC 网络地址的不同流量的网络报文,在小于 50% 流量的条件下采样误差在要求范围内。在过程层交换机中对传输采样值的不同 VLAN 加面向 MAC 网络地址的不同流量的网络报文,在 100% 流量的条件下采样误差仍在要求范围内。测试结果见表 4。

表 4 不同报文流量下采样值

Tab.4 Sampling value under different message flow conditions

对象	测试条件	I_a/A	I_b/A	I_c/A	
输入		$2 \angle 0^\circ$	$2 \angle -120^\circ$	$2 \angle 120^\circ$	
采样值	同一 VLAN	10% 流量	2.03 $\angle 0^\circ$	2.03 $\angle -119^\circ$	2.03 $\angle 120.5^\circ$
		50% 流量	2.03 $\angle 0^\circ$	2.03 $\angle -120^\circ$	2.03 $\angle 118^\circ$
		80% 流量	1.78~2.12 $\angle 0^\circ$	1.74~2.17 $\angle -111^\circ \sim -126^\circ$	1.78~2.17 $\angle 112^\circ \sim 126^\circ$
	不同 VLAN	100% 流量	2.03 $\angle 0^\circ$	2.03 $\angle -120.5^\circ$	2.04 $\angle 119.5^\circ$

3.3 跳闸命令传输

GOOSE 提供了网络通信条件下快速信息传输和交换的手段。GOOSE 服务直接映射到网络数据链路层上,确保重要信息的优先级传递,使用广播地址进行信息的多路发送^[4]。

在没有事件发生时,GOOSE 报文按固定时间间隔发送,间隔相对较长。发生事件时,数据发生了变化,发送时间间隔先设为最小,后逐渐增大(一般以间隔 2 ms、4 ms、8 ms……顺序重发),直到事件状态稳定,GOOSE 报文发送又变为固定时间间隔。报文传输时间如图 4 所示^[4]。

在下述 3 种条件下测量 GOOSE 跳闸方式与常规出口跳闸的相对延时。

条件 1:过程层交换机不加网络报文。

条件 2:过程层交换机不按装置地址加不同流量

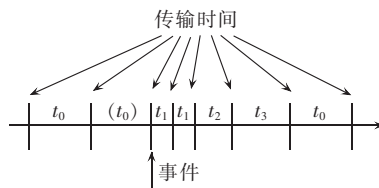


图 4 GOOSE 报文传输时间

Fig.4 GOOSE message transmission time

的普通网络报文。

条件 3:过程层交换机按装置地址加不同流量的 MAC 网络报文。

测试结果见表 5。

表 5 不同报文流量下 GOOSE 跳闸时间

Tab.5 GOOSE tripping time under different message flow conditions

序号	测试条件	t/ms
1		2.4
2		1.6
3		2.2
4		2.2
5	条件 1	2.2
6		2.0
7		1.7
8		1.6
9		2.6
10		1.8
11		1.7
12	条件 2	2.2
13		2.0
14		3.8
15		3.9
16		3.4
17	条件 3	8.8
18		16.7
19		13.7
20		1.7
21	2.3	
22	2.7	
23	16.5	
24	15.3	
25	GOOSE 未见出口	
26	GOOSE 未见出口	

注: t 为 GOOSE 出口比常规接点出口延时。

测试结果表明:交换机网络数据流量大时,会造成 GOOSE 传输延时。IEC61850-5 规定 GOOSE 报文传输延迟不得超过 4 ms,在过程层组网中应注意保证跳闸命令传输的实时性。

4 过程层组网

监控层网络数据量大,突发性强,传送实时性要求不高。过程层 GOOSE 网络数据量不大,具有突发性,传输要求可靠性高、实时性强;采样数据传送网络数据量特别大,实时性、稳定性、可靠性都要非常高,延时需要确定。

为避免监控层网络数据流量影响采样值和跳闸出口,过程层 GOOSE 网络和采样数据传送网络可与

监控层网络从物理上分开。

4.1 方案 1

方案 1:过程层 GOOSE 网络和采样数据传送网络分开,采样数据传输采用 IEC60044-8 或 IEC 61850-9-1 标准的点对点光纤传输^[16]。

过程层 GOOSE 网络采用星形双光纤以太网,按电压等级分开组网;并采用支持优先级和 VLAN 功能的交换机。在应用 IEEE802.1Q 时,不同报文采用不同的优先级;保护跳闸命令和闭锁命令设为最高级,遥控分合闸、断路器位置信号等设为次高级,刀闸位置信号和一次设备状态信号设为普通级。采用 VLAN 技术,将局域网内的设备按网络化保护功能逻辑划分成多个网段,可减少网络流量。

4.2 方案 2

方案 2:过程层 GOOSE 网络和采样数据传送网络分开,采样数据传输采用 IEC61850-9-2 标准的 100 Mbit/s 光纤以太网,按间隔分段,接入不超过 5 个合并器,采样报文数据速率为 $(200 \times 50) \times 984 \times 5 = 49.2 \times 10^6$ (bit/s) $\ll 100$ (Mbit/s),不大于 50%,可保证精度。

利用 VLAN 技术实现母线电压的多间隔共享,避免大量的采样数据同网传输。

采用分布式母线保护子站从间隔获取采样数据,经过处理形成低采样速率的同步数据,然后通过光纤送给主站,降低对带宽的要求,如通过子站将 200×50 Hz 的采样频率降到 20×50 Hz,接入 20 个间隔时网络数据速率为 $(20 \times 50) \times 984 \times 20 = 19.68 \times 10^6$ (bit/s) $\ll 100$ (Mbit/s)。

GOOSE 网络设置同方案 1。

4.3 方案 3

方案 3:过程层 GOOSE 网络和采样数据传送网络统一,采样数据传输采用 IEC61850-9-2 标准的 100 Mbit/s 光纤以太网,按间隔分段。本间隔电流和线路电压采样频率需降低至 20×50 Hz,报文数据速率为 $(20 \times 50) \times 984 \times 1 = 0.984 \times 10^6$ (bit/s) $\ll 100$ (Mbit/s),不大于 1%,可保证 GOOSE 出口可靠性。采样数据与保护跳闸命令、闭锁命令设为最高优先级。

4.4 方案比较及案例

方案 1 敷设光纤多,使用交换机较少,采样数据与 GOOSE 网络分开,可靠性较高,适用于重要程度高的 220 kV 及以上变电站。

方案 2 敷设光纤少,使用交换机较多,采样数据与 GOOSE 网络分开,可靠性较高,适用于一般 220 kV、110 kV 变电站。

方案 3 采样数据与 GOOSE 网络统一,结构简单,但数据传输延时受网络流量影响,可靠性较低,适用于线路-变压器组等接线简单、无录波要求的 110 kV 变电站。

案例:某枢纽 220 kV 数字化变电站 220 kV、110 kV 为双母线带旁路,6 回 220 kV 出线、7 回 110 kV

出线、3 台变压器;过程层采用方案 1 组网。图 5 为线路故障时保护动作跳闸录波图。

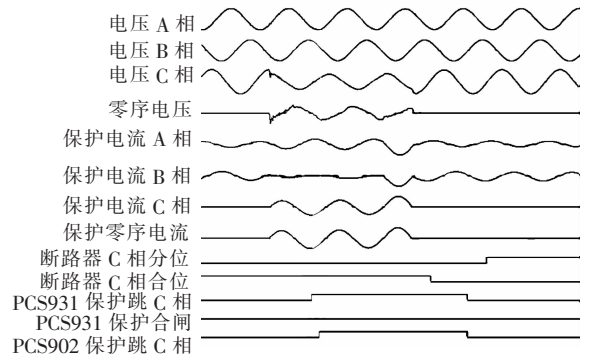


图 5 线路故障录波

Fig.5 Recorded fault waveforms

线路保护动作出口时间见表 6。

表 6 线路保护动作时间

Tab.6 Action time of line protection

保护装置	跳闸出口 t_1/s		重合闸出口 t_2/s	
	常规接点	GOOSE	常规接点	GOOSE
931 保护	37.646	37.650	38.500	38.502
902 保护	37.649	37.651	38.500	38.503

实际运行情况表明:采样值正常,GOOSE 出口只比常规接点出口延时 2~4 ms,满足要求。

5 结语

研究表明:交换机数据流量大时,会造成采样值变化和 GOOSE 传输延时。本文提出了 3 种过程层组网方案,可根据变电站结构和规模、重要性以及所选网络设备考虑过程层组网,保证数字化变电站过程层数据传输的实时性和可靠性。

参考文献:

- [1] 高翔. 数字化变电站应用技术[M]. 北京:中国电力出版社,2008: 14-21.
- [2] 习博,方彦军. 嵌入式监测系统中网络通信的研究与实现[J]. 电力自动化设备,2004,24(7):68-70.
XI Bo, FANG Yanjun. Research and implementation of network communication in embedded monitoring system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(7): 68-70.
- [3] 张奇智,尹汝波. 交换式工业以太网的现状和研究[J]. 传感器世界,2005,11(2):34-39.
ZHANG Qizhi, YIN Rubo. The state of art switched industrial Ethernet[J]. Sensor World, 2005, 11(2): 34-39.
- [4] IEC. IEC61850 Communication networks and systems in substations[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2004.
- [5] 谭文恕. 运动的无缝通信系统体系结构[J]. 电网技术,2001,25(8): 7-10.
TAN Wenshu. Seamless telecontrol communication architecture [J]. Power System Technology, 2001, 25(8): 7-10.
- [6] 张沛超,高翔,顾黄晶,等. 全数字化保护系统的主要问题及解决方案[J]. 电力自动化设备,2007,27(6):104-107.
ZHANG Peichao, GAO Xiang, GU Huangjing, et al. Main issues of all-digital protection system and solutions[J]. Electric Power

- Automation Equipment, 2007, 27(6): 104-107.
- [7] 曾庆禹. 变电站自动化技术的未来发展二——集成自动化、寿命周期成本[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(20): 1-5.
ZENG Qingyu. The development of substation automation in the near future part two Integrated automation, life cycle costs[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(20): 1-5.
- [8] 朱大新. 数字化变电站综合自动化系统的发展[J]. 电工技术杂志, 2001(4): 20-22.
ZHU Daxin. The development of integrated automation system of digital transformer station[J]. Electrotechnical Journal, 2001(4): 20-22.
- [9] 丁书文. 数字化变电站自动化系统的网络选型[J]. 继电器, 2003, 31(7): 37-40.
DING Shuwen. Choosing internal communication network of digital substation integrated automation system[J]. Relay, 2003, 31(7): 37-40.
- [10] 吴在军, 胡敏强. 基于 IEC61850 标准的变电站自动化系统研究[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 61-65.
WU Zaijun, HU Minqiang. Research on a substation automation system based on IEC61850[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 61-65.
- [11] 王海峰, 丁杰. 对变电站内若干网络通信问题的探讨[J]. 电网技术, 2004, 28(24): 65-68.
WANG Haifeng, DING Jie. Research on several issues of substation network communications[J]. Power System Technology, 2004, 28(24): 65-68.
- [12] 田国政. 变电站自动化系统的通信网络及传输规约选择[J]. 电网技术, 2003, 27(9): 66-68.
TIAN Guozheng. Selection of communication network and protocol for substation automation system[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 66-68.
- [13] 李强, 窦晓波, 吴在军, 等. 数字化变电站通信网络规划与实时特性改进[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(5): 73-76.
LI Qiang, DOU Xiaobo, WU Zaijun, et al. Communication network of digital substation and improvement of real-time performance[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(5): 73-76.
- [14] 窦晓波, 胡敏强, 吴在军, 等. 数字化变电站通信网络的组建与冗余方案[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(1): 38-43.
DOU Xiaobo, HU Minqiang, WU Zaijun, et al. Configuration and redundancy of communication networks in digital substations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(1): 38-43.
- [15] 辛建波, 段献忠. 基于优先级标签的变电站过程层交换式以太网的传输方案[J]. 电网技术, 2004, 28(22): 26-30.
XIN Jianbo, DUAN Xianzhong. A transfer scheme based on priority-tag in switched Ethernet for substation process-level[J]. Power System Technology, 2004, 28(22): 26-30.
- [16] 刘琨, 周有庆, 彭红海, 等. 电子式互感器合并单元(MU)的研究与设计[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(4): 67-71.
LIU Kun, ZHOU Youqing, PENG Honghai, et al. Research and design electronic transducer merging unit[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(4): 67-71.

(编辑: 李育燕)

作者简介:

梁国坚(1973-), 男, 广东中山人, 高级工程师, 硕士, 现主要从事变电技术管理工作(E-mail: lianguojian@126.com);

段新辉(1964-), 男, 青海西宁人, 高级工程师, 现主要从事继电保护和自动化技术管理工作;

高新华(1968-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 高级工程师, 现主要从事电力系统自动化技术管理工作。

Networking schemes for process level of digital substation

LIANG Guojian¹, DUAN Xinhui², GAO Xinhua³

(1. Zhongshan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Zhongshan 528400, China;

2. Production Technology Department, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510000, China;

3. Power Science Research Institute, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510600, China)

Abstract: The basic structure and networking schemes of digital substation are introduced, and some networking schemes are proposed for the process level of digital substation based on the message transmission tests. As star structure is superior over bus and ring structures in operational maintenance, transmission time and so on, dual-star structure is proposed for process level networking. The transmission of sampling value message and protection trip message is tested under different conditions of switch data flow. Results show that large flow will cause sampling value change and GOOSE transmission delay. Three networking schemes are proposed for process level: the sampling data transmission network adopts IEC60044-8 or IEC61850-9-1 via point-to-point fiber, separated from the GOOSE network; the sampling data transmission network adopts IEC61850-9-2 via 100 M Ethernet, separated from the GOOSE network; one network for both sampling data and GOOSE transmission. The scheme is selected according to the structure, scale and importance of substation and the applied network devices.

Key words: digital substation; process level; network; message transmission; test