

适用于远距离通信的城市轨道交通区间跟随所 干式变压器本体智能终端开发的关键技术

招康杰¹ 赖沛鑫¹ 麦华仁² 余 龙¹ 谢金莲¹ 王文浩¹

(1. 广州白云电器设备股份有限公司, 510450, 广州;

2. 广州市扬新技术研究有限责任公司, 510540, 广州//第一作者, 助理工程师)

摘 要 目的: 传统干式变压器温度控制器信号传输采用干接点方式, 存在干扰严重、造价成本高、施工复杂及需增设电源供电等缺点, 可靠性和安全性较差, 难以满足远距离信号传输的需求, 需要对适用于远距离通信的干式变压器本体智能终端(以下简称“智能终端”)进行研究。方法: 列举了适用于长大区间(站间距大于 4 km)通信干式变压器的 3 个技术方案, 分别为方案一(传统“硬接线+中间继电器”)、方案二(硬接点转光信号传输)及方案三(基于 IEC 61850 系列标准的光纤通信), 并对这 3 个方案进行了技术对比。在此基础上进一步分析了实施方案三所需的软硬件要求, 以及方案三的组网方式及数据流向, 介绍了基于方案三的智能终端开发的关键技术。最后以我国某城市轨道交通线路为例, 对方案三的工程应用进行了验证。结果及结论: 基于长大区间城市轨道交通线路的远距离信号传输要求, 应优先选择方案三。由案例线路的测试结果可知: 基于方案三的智能终端不仅能有效传输信号, 满足供电系统安全运行要求, 节省建设成本, 还能显著提升干式变压器的智能化水平。光纤传输具有延时小、造价低、传输节点少和不受电磁干扰等优势, 将成为未来城市轨道交通信号传输的主流模式。

关键词 城市轨道交通; 长大区间; 远距离通信; 干式变压器; IEC 61850 系列标准; 光纤网络化; 智能变电所

中图分类号 U231.7

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2023.11.035

Intelligent Terminal Development Key Technologies for Dry-Type Transformer Body at Urban Rail Transit Interval Following Station Adapt to Long-Distance Communication

ZHAO Kangjie, LAI Peixin, MAI Huaren, YU Long, XIE Jinlian, WANG Wenhao

Abstract Objective: The signal transmission of temperature controller for conventional dry-type transformers using dry contacts suffers from severe interference, high cost, complex installation, and the need for additional power supply. The reliability and safety are compromised, making it difficult to

meet the requirements of long-distance signal transmission. To address this, the research focuses on intelligent terminals of dry-type transformer for long-distance communication (abbreviated as intelligent terminal). Method: Three technical solutions suitable for long-distance communication (inter-station distance greater than 4 km) dry-type transformers are proposed, including Solution 1 (traditional 'hard wiring+intermediate relay'), Solution 2 (hard contact to optical signal transmission), and Solution 3 (optical fiber communication based on IEC 61850). A technical comparison of these three solutions is provided. Based on this analysis, the hardware and software requirements for Solution 3, as well as the networking and data flow, are further discussed. The key technologies for the development of intelligent terminal based on Solution 3 are also introduced. Finally, an engineering application of Solution 3 is demonstrated using a city's rail transit line in China as an example. Result & Conclusion: Considering the requirements of long-distance signal transmission on the long-haul interval urban rail transit lines, Solution 3 should be prioritized. The test results from the example line show that intelligent terminal based on Solution 3 can effectively transmit signals and meet the safety requirements of power supply systems, while saving construction costs and significantly improving the intelligence level of dry-type transformers. The advantages of fiber optic transmission, such as low latency, low cost, fewer transmission nodes, and immunity to electromagnetic interference, make it the mainstream mode of signal transmission in future urban rail transit systems.

Key words urban rail transit; long-haul interval; long-distance communication; dry-type transformer; IEC 61850 standard; fiber networked; intelligent substation

First-author's address Guangzhou Baiyun Electric Equipment Co., Ltd., 510450, Guangzhou, China

目前, 在城市轨道交通供电系统中, 为保护干式

变压器安全、可靠运行,通常将其冷却介质及绕组的温度控制在可控范围内,此时采用温度控制器(以下简称“温控器”)对运行状态下的干式变压器进行温度的测量监视、冷却控制及安全闭锁。传统干式变压器温控器采用干节点、硬接线的方式完成与变电所内保护装置跳闸联锁数据的交互,通信规约依据传统 Modbus 协议的 TCP(传输控制协议)/RTU(远程终端单元)方式,监控后台需要经过规约转换方能实现对干式变压器运行状态的远程监控。

城市轨道交通线路的运营里程越来越长,区间跟随所与降压变电所的间距超过 4 km 的情况随之也越来越多。由于传统干式变压器温控器的信号传输存在电压降低问题,需采用硬接线+增加中间继电器的方式实现区间跟随所与降压变电所之间的闭锁与联跳功能。因此,传统干式变压器存在干扰严重、造价成本高、施工复杂及需增设电源供电等缺点,不能保证数据传输及系统运行的可靠性和安全性,难以满足远距离保护联闭锁的使用需求。此外,传统干式变压器温控器不具备接入到智能变电所数字化保护网络的功能,其非标准化的串口通信协议也无法支撑智能变电所高级运维功能的开发,这制约了智能供电数字化的发展。因此,为更好地解决长大区间远距离通信的需要及智能化变电所的建设要求,本文基于 IEC 61850 系列(以下简称“IEC 61850”)标准协议对适用于远距离通信的城市轨道交通干式变压器本体智能终端(以下简称“智能终端”)进行软硬件开发,并通过实际应用案例检验该方案的可行性,以期推动智能终端在城市轨道交通长大区间场景的使用。

1 适用于远距离通信的干式变压器技术方案对比

长大区间地铁线路的站间距较大,由此对智能设备的要求更高。尤其是对于区间跟随所干式变压器的监控和保护联闭锁,要求其必须确保远距离通信传输的可靠和稳定,并满足低延时、施工简单、智能化及通信规约统一等要求。

区间跟随所的配电变压器与 33 kV 开关柜的距离较远,无法采用传统电缆硬件线方式实现变压器异常情况下 33 kV 开关跳闸时的保护功能。此外,常规温控器的监视功能也无法采用传统的串口或电网口通信方式实现。有 3 个技术方案可解决此问题,本文对这 3 个技术方案进行对比分析。

1.1 方案一(传统“硬接线+中间继电器”)

图 1 为方案一的技术路线示意图。方案一的工作为:在发出温控器与保护装置传输超温、干式变压器外围栏门打开(以下简称“门开”)等保护信号及报警信号情况下,通信链路存在抗干扰能力低、施工困难、成本高、容易增加故障节点等问题,需增加中间继电器,以增强信号的传输能力。方案一下,温控器与 PSCADA(电力监控与数据采集)系统间的通信采用传统 Modbus 协议的 TCP/RTU 方式,通信介质为网线,监控信号的长距离传输需经过光电转换装置转为光纤通信。

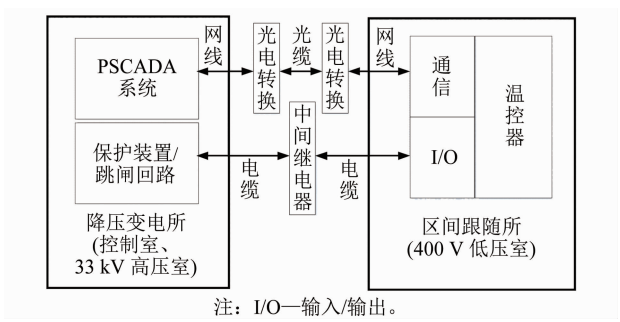


图 1 方案一的技术路线示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the technical route of the Solution 1

1.2 方案二(硬接点转光信号传输)

图 2 为方案二的技术路线示意图。方案二下,监视信号与保护跳闸信号分别通过光电转换装置进行转换,采用光信号进行远距离传输后再转为电信号,接入变电所相应装置。方案二施工较为复杂、繁琐。

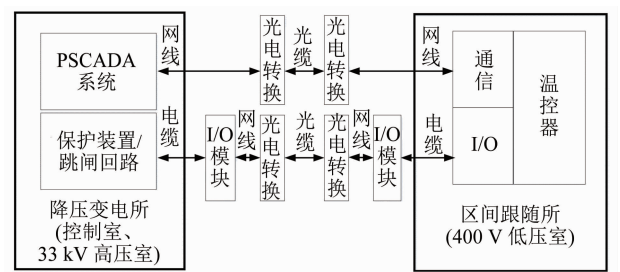


图 2 方案二的技术路线示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the technical route of the Solution 2

1.3 方案三(基于 IEC 61850 的光纤通信)

IEC 61850 定义了比较完备的抽象服务接口,包括基本模型规范和信息交换服务模型。其中,信息交换服务模型包括核心服务模型、GOOSE(面向对象的通用变电站事件)模型及时间同步模型等。

GOOSE 是 IEC 61850 定义的一种通信机制,主要用来传输实时性要求高的信息(如跳闸及闭锁等),其信息传输的内容也可由用户灵活定义。为保证 GOOSE 报文传输的实时性,IEC 61850 规定 GOOSE 采用特殊的映射方式,即不需经过会话层、传输层及网络层,直接从表示层映射到数据链路层,利用 VLAN(虚拟局域网)和优先等级等以太网特性来实现变电站内传输时间小于 4 ms^[1]的要求。

图 3 为方案三的技术路线示意图。方案三下,可直接采用光纤传输监视信号的 MMS(制造报文规范)报文及保护跳闸的 GOOSE 报文。MMS 报文和 GOOSE 报文可分别采用 1 根光纤传输,这样既可减少通信的中间节点(如中间继电器或光电转换装置),又可提高通信的可靠性^[2]。

1.4 技术方案对比

从方案功能的实现上分析,与方案三相比,方案一需增加光电转换设备,进而导致成本增加。与方

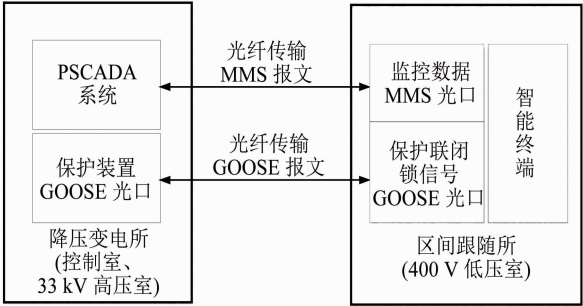


图 3 方案三的技术路线示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the technical route of the Solution 3

案一和方案三相比,方案二需额外增加光电转换设备和光电转换装置电源,因此不仅增加了成本,还多了故障环节。

3 个技术方案部分技术参数对比结果如表 1 所示。由表 1 可知:基于长大区间城市轨道交通线路的远距离信号传输要求,应优先选择方案三。

表 1 3 个技术方案部分技术参数对比结果

Tab. 1 Comparison of technical parameters of 3 technical solutions

方案	传输介质	信号可传输距离/km	通信延时/ms	需增加中间继电器	需增加电源	抗干扰性能	具备自检功能	需要规约转换	支持高级功能(智能分析等)	工程成本
方案一	电缆	<3.5	>45	是	是	较低	否	是	否	高
方案二	电缆+光纤	20.0	>50	是	是	较高	否	是	否	较高
方案三	光纤	20.0	>10	否	否	高	是	否	是	较低

注:方案二和方案三中,光模块选取百兆单模进行参数对比。

2 方案三的关键技术及要求

2.1 硬件要求

适用于远距离通信的干式变压器,其硬件需求主要考虑 PSCADA 监控通信,以及与保护装置远距离信号传输的方式。因区间跟随所至降压变电所的距离超过 4 km,方案三采用光纤通信技术进行传输,设计时应按信号可传输距离为 20 km 这一要求来选配光纤模块。

为了满足数据传输的延时要求,宜采用 MMS 通信网络和 GOOSE 通信网络单独组网的方式。远距离信号传输使用电口时,需额外增加光电转换器及电源,因此智能终端的通信端口宜采用光口的方式,以减少中间环节。此外,为了提高通信的可靠性,采用冗余网络传输较为可靠,因此,在选择智能终端通信端口时,建议采用 2 个光口用于 MMS 通信、2 个光口用于 GOOSE 报文传输的方式。

2.2 软件要求

根据城市轨道交通供电系统的特殊要求,依据 IEC 61850 中的建模标准,采用 MMS 协议与 PSCADA 系统进行通信、GOOSE 协议与 33 kV 继电器保护装置进行信息交互的方式,进行相关 LD(逻辑设备)的扩充及新建,并建立与之相符的智能终端模型文件。

软件需要实现遥测、遥信、遥控等基本信息监控要求,传输延时需控制在 10 ms 以内,并支持多客户端访问。GOOSE 报文将报警、跳闸及通信链路状态等内容传输至保护装置侧,使保护装置及时启动保护告警及跳闸。此外,对于保护装置发送过来的联锁信号,智能终端应能够进行逻辑判断并输出闭锁信号。

2.3 组网方式及数据流向

2.3.1 组网方式

图 4 为方案三的组网示意图。如图 4 所示,智能终端与 PSCADA 系统、保护装置间采用光纤传输信号,与 PSCADA 系统站控层间的通信采用 IEC

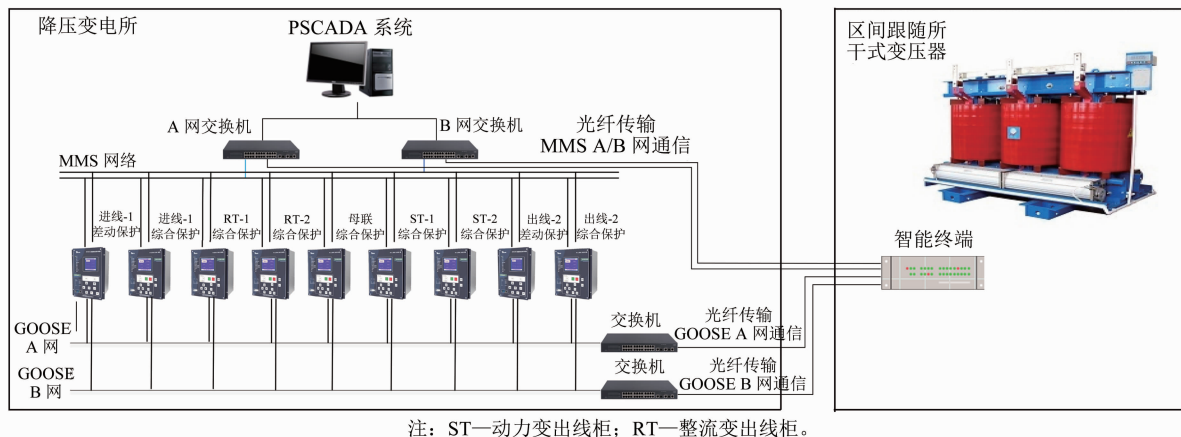


图 4 方案三的组网示意图

Fig. 4 Network diagram of Solution 3

61850 的 MMS 报文格式,超温跳闸及门开跳闸等保护信号传输则由 GOOSE 协议来完成。

2.3.2 数据流向

2.3.2.1 闭锁信号数据流向

图 5 为干式变压器外围栏门电磁锁闭锁信号数据流向示意图。如图 5 所示,本柜维护接地或非本柜维护接地闭锁信号由降压变电所 33 kV 保护装置通过 GOOSE 通信交换机,经光纤传输至区间跟随所的智能终端信号输入模块,智能终端将 MMS 报文经光纤发送给 PSCADA 系统。

交互;智能终端信号处理判断模块做出逻辑判断后,触发干接点分合逻辑。触发干接点闭合逻辑为:干式变压器外围栏门电磁锁带电,外围栏门解锁,此时检修人员可打开外围栏门实施维护检修工作(见图 5 a))。触发干接点打开逻辑为:干式变压器外围栏门电磁锁失电,外围栏门闭锁,无法开启门(见图 5 b))。随后,外围栏门开关状态信号经电缆发送至智能终端信号输入模块,智能终端将 MMS 报文经光纤发送给 PSCADA 系统。

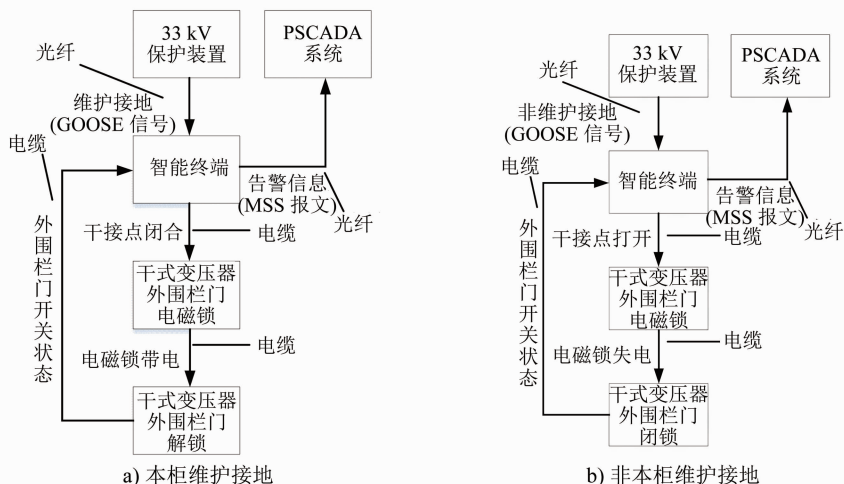


图 5 干式变压器外围栏门电磁锁闭锁信号数据流向示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the data flow for the peripheral fence door electromagnetic latching signal of dry-type transformer

2.3.2.2 保护信号数据流向

图 6 为设备超温故障时保护信号数据流向示意图。如图 6 所示,当区间跟随所干式变压器 A 相线圈温度超过 140°C 时,经温度传感器线束总成采样,温度测量数据被传送至信号输入模块;信号处理判断模块进行模拟量运算,判断出 A 相线圈超温跳闸

故障后,通过通信模块将 GOOSE 报文超温跳闸信号经 GOOSE 通信 A/B 网光纤传输至降压变电所 33 kV 保护装置;保护装置发出的跳闸命令经干接点对 33 kV 开关柜实施断路器跳闸;跳闸后 33 kV 开关柜将断路器分位状态回传至智能终端,跳闸保护动作执行完毕。

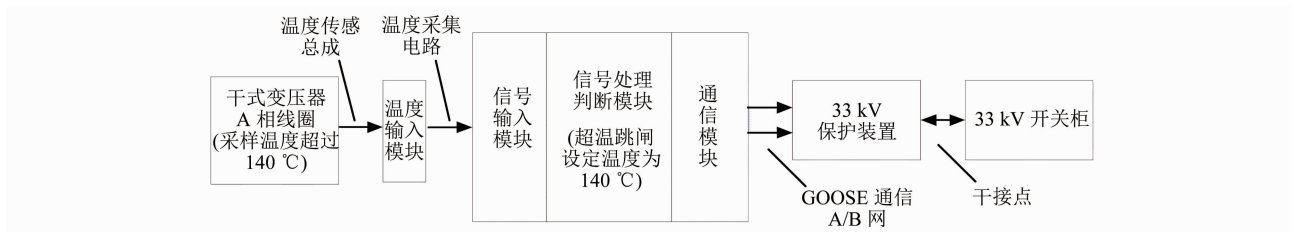


图 6 设备超温故障时保护信号数据流向示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the protection signal data flow during the equipment overtemperature fault

3 智能终端开发

3.1 硬件开发

图 7 为基于 IEC 61850 的智能终端硬件设计原理图。如图 7 所示:基于 IEC 61850 的智能终端由电源、信号输入、信号处理判断、控制输出、IEC 61850 通信及人机界面 6 个模块组成。其中:电源模块主要为智能终端提供电源;信号输入模块负责变压器线圈及铁心温度、运行状态开关量等信息/信号的输入;信号处理判断模块用于对采样数据进行运算处理及逻辑判断,并根据判断结果输出指令;控制输出模块采用干节点直接控制变压器围栏门电磁锁、风机等设备的打开/闭合; IEC 61850 通信模块用以实现装置内外信号的标准化交互与转换;人机界面模块包括液晶屏、指示灯、报警器等设备,用于设备运行状态的显示、查看、提醒及操作。

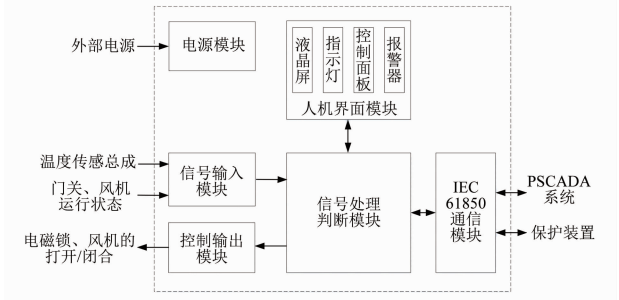


图 7 基于 IEC 61850 的智能终端硬件设计原理图

Fig. 7 Schematic diagram of intelligent terminal hardware design based on IEC 61850

3.2 软件开发

方案三下智能终端的建模应采用标准的 IEC 61850 SCL(变电站配置描述语言),以面向对象的方式建立完备的系统配置模型,用数字化的方式解决通信问题。应基于城市轨道交通长大线路供电系统的特殊要求,依据 IEC 61850 的建模标准进行相关 LD 的扩充及新建,建立与之匹配模型文件。

智能终端通信功能的开发应分两部分进行:与

PSCADA 系统的站控层通信采用 IEC 61850 的 MMS 报文格式;超温跳闸、门开跳闸等保护信号传输由 GOOSE 协议来完成。另外,GOOSE 协议的编码及解码应使用嵌入式 FPGA(现场可编程门阵列)来实现,以提高通信的实时性与可靠性,并支持多客户同时独立订阅^[3]。

3.2.1 智能终端 GOOSE 发送信号

智能终端与保护装置间采用 GOOSE 协议通信,以实现发送保护信号及告警信息等功能,并参与到保护装置非电量保护/告警的逻辑判断中。图 8 为各类保护信号及报警信号采用 GOOSE 协议传输的点表。

区间跟随所智能终端	降压变电所动力变出线柜保护装置
GOOSE 信号发送	GOOSE 信号接收
GST_01 信号发送	GST_01 信号接收
GST_02 信号发送	GST_02 信号接收
GST_03 信号发送	GST_03 信号接收
GST_04 信号发送	GST_04 信号接收
GST_05 信号发送	GST_05 信号接收

注: GST_01—动力门开报警; GST_02—动力变超温报警; GST_03—动力变超温跳闸; GST_04—温控仪故障报警; GST_05—动力变铁心故障报警。

图 8 保护信号、告警信息采用 GOOSE 协议传输的点表

Fig. 8 Point table for protection signals and alarm messages transmitted by the GOOSE protocol

3.2.2 智能终端 GOOSE 接收信号

智能终端接收动力变出线柜保护装置发送的本柜维护接地、本柜非维护接地等闭锁信号,采用 GOOSE 协议传输的点表,如图 9 所示。

降压变电所动力变出线柜保护装置	区间跟随所智能终端
GOOSE 信号发送	GOOSE 信号接收
GST_06 信号发送	GST_06 信号接收
GST_07 信号发送	GST_07 信号接收

注: GST_06—本柜维护接地; GST_07—本柜维护接地。

图 9 闭锁信号采用 GOOSE 协议传输的点表

Fig. 9 Point table for latching signal transmitted by the GOOSE protocol

3.3 模型及通信可靠性检测

3.3.1 智能终端模型的可靠性检测

智能终端模型开发完成后,需根据 IEC 61850 的要求对模型文件进行规约一致性测试,其测试内容如表 2 所示。表 2 中,对各测试项目采用对应测试方法进行检测,如测试结果均满足一致性要求,则可满足 IEC 61850 的要求。满足智能变电所的规约统一要求情况下,可实现装置间的互联互通,从而能够将智能终端的 GOOSE 报文接入过程

层网络中,使之与保护装置共同实现保护联闭锁功能^[4]。

3.3.2 智能终端通信的可靠性检测

智能终端与保护装置的保护联闭锁使用光纤通信技术进行数据传输,其信号传输的可靠性对供电系统的可靠运行有着至关重要的影响,因此,需要进行通信链路的监测及断链测试,并对一路 GOOSE 通信网络断链后 GOOSE 通信双网冗余网络进行可靠性测试,其测试内容如表 3 所示。

表 2 基于 IEC 61850 的智能终端模型规约一致性测试内容
Tab. 2 Content of consistency testing for intelligent terminal model specification in IEC 61850

测试项目	测试方法	满足测试要求的结果
模型是否符合国家电网工程应用模型	使用 ICDcheck(ICD 文件测试)工具检测	符合
模型中 LN(逻辑设备)、DO(数据对象)及 DA(数据属性)是否实例化	使用 ICDcheck 工具检测	已实例化
模型中 DOI(数字对象标识符)中的 desc(属性描述符)字段是否存在	检测数据集中的 FCDA(功能约束数据属性)是否有 desc 字段	存在
模型中模板与国家电网标准是否存在冲突	使用 ICDcheck 工具检测	无冲突
控制类 DO 是否实例化	使用 ICDcheck 工具检测	已实例化
智能终端 ICD 文件的内容与网络上智能终端的实际数据、数据类型和应用服务是否一致	将模型与报文进行对比检查	一致

注:ICD—智能电子设备能力描述。

表 3 网络断链后信号传输可靠性
Tab. 3 Signal transmission reliability after network disconnection

测试项目	测试要求	满足测试要求的结果
MMS A 网通信状态	后台能正确显示告警与复归	正确显示
MMS B 网通信状态	后台能正确显示告警与复归	正确显示
智能终端 MMS 通信状态	后台能正确显示告警与复归	正确显示
GOOSE 断链总告警	后台能正确显示告警与复归	正确显示
光口 0 GOOSE 断链告警	后台能正确显示告警与复归	正确显示
光口 1 GOOSE 断链告警	后台能正确显示告警与复归	正确显示
链路 1 GOOSE 接收 A 网断链告警	后台能正确显示告警与复归	正确显示
链路 1 GOOSE 接收 B 网断链告警	后台能正确显示告警与复归	正确显示
链路 2 GOOSE 接收 A 网断链告警	后台能正确显示告警与复归	正确显示
链路 2 GOOSE 接收 B 网断链告警	后台能正确显示告警与复归	正确显示

GOOSE 通信双网冗余机制是 GOOSE 报文通过两个网络同时发送,这两个网络发送 GOOSE 报文的多播地址、APP(应用程序)的 ID(身份标识号)应唯一。对于同一次发送,两个 GOOSE 报文 APDU(应用协议数据单元)部分的内容应完全相同。正常 GOOSE 报文情况下,StNum(状态号)增加,先到的数据先予以处理。因此,在测试 GOOSE 通信 A 网断链时,GOOSE 通信 B 网若能够无缝衔接,则认为 GOOSE 协议双网冗余网络具有可靠性。

变电所的保护装置都接入过程层 GOOSE 通信网络,以实现数据的互联互通。为了确保供电系统

的安全可靠性,需要对干式变压器智能终端的接入进行可靠性测试,如表 4 所示。

4 工程应用案例

以我国某城市轨道交通线路为例,对方案三的工程应用进行说明。该线区间跟随所的供电来源主要为降压变电所,电能依靠降压变电所的 2 台 33 kV 出线开关柜经电缆传输至区间跟随所干式变压器处并降压至 400 V,再由 400 V 进线柜通过母排分配至各低压抽屉柜。400 V 低压柜主要向站内及隧道中的照明和动力提供电能。

表 4 干式变压器智能终端接入供电系统的可靠性测试

Tab. 4 Reliability testing of intelligent terminal integration into a dry-type transformer power supply system		
测试项目	测试要求	满足测试要求的结果
GOOSE 断链影响	GOOSE 断链后智能终端不会误动作;GOOSE 状态值与保护装置一致	无误动作,正确显示
GOOSE 网络内智能终端对其他保护装置的影响	智能终端发送的 GOOSE 报文,接收装置可正常接收,不影响无关联保护装置的正常运行	接收正确,无误动作
GOOSE 网络内其他保护装置对智能终端的影响	智能终端正常接收 GOOSE 报文,网络中无关联继电保护装置的 GOOSE 报文不影响智能终端的正常运行	接收正常,无影响
GOOSE 报文的发送稳定性	无错发、漏发、多发等情况	发送正常
GOOSE 报文的接收稳定性	无错收、漏收等情况	接收正常

该线采用了 MMS 通信网络与 GOOSE 通信网络单独组网的方式(见图 3)。将两路光纤接到降压变电所站控层的交换机中,智能终端与 PSCADA 系统进行 MMS 通信,并将变压器温度值及告警信号等上传,以实现对于干式变压器运行状态的监控功能。将两路光纤接到过程层交换机中,智能终端与变压器开关

的保护装置进行通信,利用 GOOSE 协议传输超温跳闸、门开跳闸等保护信号,以实现干式变压器的非电量保护功能。表 5 为对该线智能终端进行功能测试及响应时间测算得到的现场测试结果。由表 5 可知:与 PSCADA 系统联调及与保护装置 GOOSE 通信联调的数据均满足现场使用要求^[5]。

表 5 智能终端功能测试及响应时间测算的现场测试结果

Tab. 5 Results of field testing for intelligent terminal functionality and response time calculation				
联调对象	测试项目	测试内容	满足测试要求的结果	满足测试要求的响应时间/ms
与 PSCADA 联调	遥测	A、B、C 相绕组及铁心的温度数据等	数据显示正常	≤2 000.0
	遥信	高温、超温、门开等报警信号;变压器柜门开关状态;风机运行状态	数据显示正常	≤2 000.0
	遥控	风机启停控制	遥控正常	≤2 000.0
与保护装置 GOOSE 联调	保护告警	高温、超温、门开等报警	有报警提醒	5.6
	保护跳闸	超温、变压器门开跳闸信号	断路器跳闸	5.5
	保护联闭锁	维护接地、非维护接地的闭锁信号	电磁锁闭锁	6.0

在实际工程应用中,构建基于 GOOSE 报文光纤传输的网络架构,将智能终端信息以 GOOSE 通信方式传输,可实现智能终端与变电站数据的共享,实现不同装置之间的互操作,满足远距离保护联闭锁需求。智能终端采用 MMS 协议,无需经过规约转换环节,可直接与 PSCADA 系统通信。此外,光纤网络化保护信号回路可通过软件进行监视,使用光纤代替电缆传输信号,一根光纤可传输多个信号,还能同时对传输通道进行监视,因此,光纤传输的优点是电缆传输信号不具备的,采用光纤传输可促进城市轨道交通供电设备的运维管理从计划修向状态修转变^[6]。

5 结语

适用于远距离通信的城市轨道交通干式变压器本体及智能终端基于 IEC 61850 进行开发,满足了智能变电所规约统一的要求,扩展了城市轨道交通供电系统智能化的范围。通过构建基于 GOOSE 报文光纤传输的过程层网络,实现了光纤网络化保

护,解决了远距离保护联闭锁的实际需求,为城市轨道交通供电设备可靠、安全、稳定运行提供了保障。

干式变压器智能终端采用面向对象的建模技术,可灵活面向设备建模及自我描述,以适应功能扩展需求,实现高级应用功能开发和互操作应用;智能终端分别使用两路主备光纤传输 MMS 报文和 GOOSE 报文,GOOSE 通信的双网冗余机制能够使数据接收无缝衔接,冗余网络可确保数据传输的安全、可靠。光纤网络化保护技术使用两路冗余光纤传输替代传统的电缆传输,可满足城市轨道交通长大区间远距离信号传输的要求。光纤传输具有的延时小、造价低、传输节点少和不受电磁干扰等优势,将成为未来城市轨道交通信号传输的主流模式。

通过实际的应用案例及数据检验,长距离 GOOSE 通信光纤传输技术的应用效果将得到进一步验证,并有望在未来延伸至电力的其他应用领域,以打造一个数字化、透明化的城市轨道交通电力系统。

参考文献

- [1] 朱炳铨, 王松, 李慧, 等. 基于 IEC 61850 GOOSE 技术的继电保护工程应用[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(8): 104.
ZHU Bingquan, WANG Song, LI Hui, et al. Application of IEC 61850 GOOSE technology on protective relaying[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(8): 104.
- [2] 张晓臻, 余龙, 廖权保, 等. 基于 IEC 61850 实现地铁交直流供电保护装置的无缝通信[J]. 电气化铁道, 2019, 30(5): 79.
ZHANG Xiaoyi, YU Long, LIAO Quanbao, et al. Seamless communication of AC/DC power supply protection devices in subway based on IEC 61850[J]. Electric Railway, 2019, 30(5): 79.
- [3] 董贝, 薛钟, 张尧, 等. 基于 IEC 61850 逻辑设备管理层次结构的就地化保护装置建模研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 165.
DONG Bei, XUE Zhong, ZHANG Yao, et al. Research and application of modeling for on-site installation protection based on IEC 61850 logical devices management hierarchy[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 165.

- [4] 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.
LIU Haoyu, ZUO Qunye, ZHANG Baoshan. Performance test and analysis of process layer network in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 112.
- [5] 戴观权, 蔡泽祥, 蔡煜, 等. 基于 IEC 61850 的配电网网络化保护通信建模与实时性可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 97.
DAI Guanquan, CAI Zexiang, CAI Yu, et al. Modeling and real-time reliability analysis of communication network for networked protection of distribution network based on IEC 61850[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 97.
- [6] 张巧霞, 贾华伟, 叶海明, 等. 智能变电站虚拟二次回路监视方案设计及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 123.
ZHANG Qiaoxia, JIA Huawei, YE Haiming, et al. Design and application of virtual secondary circuit monitoring in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 123.

(收稿日期:2021-09-09)

(上接第 185 页)

剖面中间底部的盲区位置,可能会出现无法识别出较小的孤石或探测得到的孤石形态比实际形态偏大等情况。

3) 综合考虑探测工作效率及探测精度的要求,建议选取钻孔间距约 10.0 m、激发点距和检波点距均为 1.0 m 进行地震波 CT 探测。

参考文献

- [1] 郭慧丽, 徐佩芬. 地震层析成像在华北克拉通地区的研究进展[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(5): 1557.
GUO Huili, XU Peifen. Progress of seismic tomography applied in the North China Craton[J]. Progress in Geophysics, 2011, 26(5): 1557.
- [2] 张凯, 李振春, 秦宁, 等. 非常规海相碳酸盐岩油气藏地震层析研究进展[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(6): 2993.
ZHANG Kai, LI Zhenchun, QIN Ning, et al. Progress in seismic tomography for unconventional marine carbonate reservoirs[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(6): 2993.
- [3] 沙椿. 工程物探手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社,

2011:1.

SHA Chun. Engineering geophysical prospecting manual[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2011:1.

- [4] 陈志德, 张晶, 卢福珍, 等. 基于零偏 VSP 初至波的地震高频补偿和相位校正[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(5): 2068.
CHEN Zhide, ZHANG Jing, LU Fuzhen, et al. Seismic data high frequency compensation and phase correction based on the direct wave of zero-offset VSP data[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(5): 2068.
- [5] 王辉, 常旭, 刘伊克, 等. 时间域相邻道地震波衰减成像研究[J]. 地球物理学报, 2001, 44(3): 396.
WANG Hui, CHANG Xu, LIU Yike, et al. Seismic neighboring traces attenuation tomography in time domain[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2001, 44(3): 396.
- [6] 郭云峰. 地震波层析成像方法于孤石探测的应用分析[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(5): 2103.
GUO Yunfeng. Seismic tomography method applied in the detection of boulders[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(5): 2103.

(收稿日期:2021-08-17)