

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220182

基于5G及IEC61850的韧性配网故障信息智能传输技术研究

孙阳盛¹, 涂崎¹, 赵中华², 黄震宇¹, 赵永森³, 李坤³

(1. 国网上海市电力公司, 上海 200122; 2. 东方电子股份有限公司, 山东 烟台 264000;
3. 山东大学, 山东 济南 250061)

摘要: 现有城市配电网, 尤其是在负荷密集区域, 具有大量的10 kV开关站。但是现有配电网系统缺乏对10 kV开关站设备的有效监管能力, 严重阻碍城市韧性配电网的建设。为此, 提出了基于5G及IEC61850的韧性配网故障信息智能传输技术方案。该方案通过基于态势感知的保护设备自动发现识别技术自动识别感知开关站内网络变化。通过基于IEC61850通信的二次设备自动配置接入技术自动发现并配置保护装置。通过基于IEC61850的面向对象的立体数据模型到扁平化数据模型的免配置转换技术快速准确地实现电网保护故障信息主站与子站之间的信息转换与共享。通过基于5G网络的高速实时业务传输技术实现信息的高速、实时、可靠传输。搭建系统测试环境对该技术方案进行测试并在试点站进行试运行。结果表明该技术方案能够按需及时获取设备实时运行状态和重要动作信息, 实现了对10 kV开关站的有效监管。

关键词: 5G; IEC61850; 免配置; 态势感知; 动态初始化; 数据转换

Intelligent transmission technology of fault information in a resilient distribution network based on 5G and IEC61850

SUN Yangsheng¹, TU Qi¹, ZHAO Zhonghua², HUANG Zhenyu¹, ZHAO Yongsen³, LI Kun³

(1. State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200122, China; 2. Dongfang Electronics Co., Ltd., Yantai 264000, China; 3. Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The existing urban distribution network, especially in load-intensive areas, has a large number of 10 kV switching stations. However, the existing distribution network system lacks the effective supervision ability for 10 kV switching station equipment, and this seriously hinders the construction of a resilient urban distribution network. Therefore this paper proposes an intelligent transmission technology scheme for the fault information of a ductile distribution network based on 5G and IEC61850. In this scheme, the network changes in the sensing switch station are automatically identified by the automatic discovery and identification technology of protection equipment based on situational awareness. The protection device is automatically discovered and configured by the automatic configuration and access technology of secondary equipment based on IEC61850 communication. The information conversion and sharing between the master and slave stations of the power grid protection fault information are quickly and accurately realized by the configuration-free conversion technology from the object-oriented stereo data model based on IEC61850 to the flat data model. High-speed, real-time and reliable transmission of information is realized by the technology based on the 5G network. A system test environment is built to test the technical scheme and run it at the test station. The results show that the technical scheme can obtain real-time operational status in a timely fashion and important action information of the equipment on demand, and realize the effective supervision of 10 kV switching stations.

This work is supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (No. 51677108).

Key words: 5G; IEC61850; configuration free; situational awareness; dynamic initialization; data conversion

0 引言

近年来, 随着全球气候的变化, 台风、冰灾等

极端天气频发, 对电力系统的安全稳定运行造成严重的威胁^[1-4]。电力系统的安全关乎国家和社会经济的稳定。作为与用户密切相关的配电网, 其极端天气应对能力的提高对灾害事故的抵御、人们生产生活的保障具有重要意义。为此, 建设韧性配电网至关重要^[5-8]。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(51677108); 上海市电力公司科技项目资助(520900200082)

文献[9-10]对电力系统韧性的相关概念进行了介绍。韧性配电网是能够全面、快速、准确感知配电网的运行态势,对各类扰动作出主动预判与积极预备、主动防御,快速恢复重要电力负荷,并能自我学习和持续提升的电网^[11-12]。

上海市发布的《上海市推进城市安全发展的工作措施》指出,上海电网将逐步开展世界一流城市韧性配电网的建设工作。然而上海 10 kV 开关站数量巨大且过于分散,缺乏有效的监管技术手段,影响故障处置及供电恢复的速度,严重制约了韧性配电网的建设。

为提高配电网的自动识别与监控能力,文献[13-14]讨论了 IEC61850 标准在配电网自动化中的应用,并基于此对配电终端进行建模。文献[15-20]对 IEC61850 标准在配电自动化系统中的应用做了进一步的深入研究。IEC61850 标准在配电自动化系统中的逐渐成熟,有效解决了配电网终端设备的监控问题、主站系统信息交互问题等^[21-22],为韧性配电网的建设奠定坚实的基础。但是 IEC61850 标准是变电站的标准规约。针对变电站内设备的改变,IEC61850 标准的 SCD、CID 等文件需要人工更改。当 IEC61850 标准引入配电网后,随着配电网结构越来越复杂、规模越来越庞大以及各设备节点的变化逐渐频繁,手工更改文件越来越繁琐,误差逐渐增大。

针对上述问题,本文提出了基于 5G 及 IEC61850 的韧性配网故障信息智能传输技术方案。该技术方案通过基于态势感知的保护设备自动发现识别技术将自动识别技术与电力故障信息系统进行无缝连接;

通过基于 IEC61850 通信的保护设备免配置接入技术建立保护装置即插即用、源端维护的免配置、自动化通信体系;通过基于 IEC61850 的面向对象立体数据到扁平化数据的免配置转换技术实现子站与主站信息转换共享;通过基于 5G 网络的高速实时业务传输技术实现主子站的信息传输。最后本文通过测试及试运行验证了本方案的有效性。

1 基于 5G 及 IEC61850 的韧性配网故障信息智能传输技术

1.1 基于态势感知的保护设备自动发现识别

态势感知覆盖感知(感觉)、理解和预测 3 个层次,是一种基于环境的、动态的、整体的洞悉安全风险的能力;是以安全大数据为基础,从全局视角提升对安全威胁的发现识别、理解分析、响应处置能力的一种方式。在大规模网络环境中,对能够引起网络态势发生变化的安全要素进行获取、理解、显示并预测未来的发展趋势,可以快速发现网络变化并对目标进行识别,可以提供全面的网络安全保障。利用态势感知技术可以检测目标机是否在线、端口开放情况、侦测运行的服务类型及版本信息、侦测操作系统与设备类型等信息。

网络环境下使用设备发现功能是一种比较常见的手段。其通过 ARP、TCP、UDP、ICMP、PING 等协议的操作功能,采用基于全协议栈扫描方式,主动发现目前网络内存在的网络节点,对于预配置的工作方式可以提供一种更加便捷的工作手段。本文将其与 IEC61850 通信结合使用,提出基于态势感知的保护设备自动发现识别技术。其路线如图 1 所示。

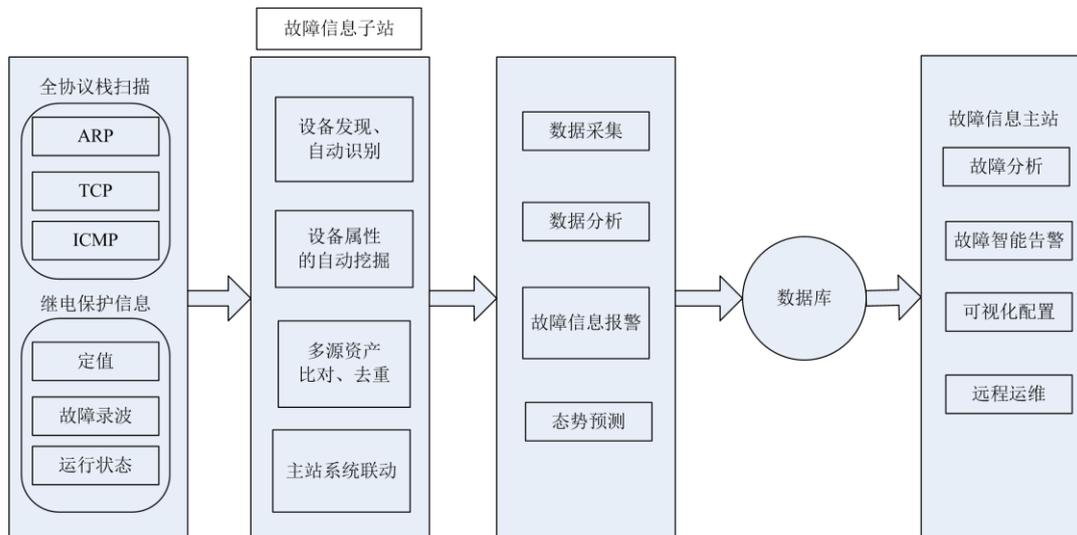


图 1 基于态势感知的保护设备自动发现识别技术路线图

Fig. 1 Roadmap of automatic discovery and identification technology of protection equipment based on situation awareness

该技术对现有的 10 kV 开关站的典型情况进行分析, 针对几种具体类型的保护装置, 根据运行功能、操作系统的不同, 获取自动发现设备的信息; 通过态势评估、预测方法, 结合 10 kV 开关站的数量及分布情况, 并考虑站内运行情况, 针对增补、改扩建的实际情况, 通过 ARP、TCP、UDP、ICMP、PING 等协议的操作功能, 采用基于全协议栈扫描方式, 主动发现目前网络内存在的网络节点; 通过对开关站内各类设备自动识别技术、设备属性自动挖掘判断技术、多源资产信息的比对和去重技术等与主站系统联动, 实现资产信息的主动上送、统一维护等功能。

该技术通过发现、自动感知网络情况的变化, 对新增网络节点进行自动识别、自动读取, 能够避免人为参与的错误; 将自动识别与电力故障信息系统进行无缝联接, 充分发挥、利用已有的网络技术为电力系统自动化提供支撑作用。

1.2 基于 IEC61850 通信的保护设备免配置接入

大量 10 kV 开关站接入保护装置的调试过程复杂、配置过程较多、运行检修难度明显增加; 设备改造涉及系统配置文件的修改和验证, 调试时间长, 停电影响范围大, 现场检修困难; 开关站系统配置文件缺乏技术管控手段, 存在配置文件错误导致保护不正确动作的风险。此外, IEC 61850 标准的系统配置文件配置过程复杂, 难以掌握, 从而带来许多运维问题^[23]。

为此, 本文在 IEC61850 的基础上开发一种基于自动发现、自动配置, 达到保护装置即插即用的免配置、自动化通信体系。

该体系的技术路线如图 2 所示。

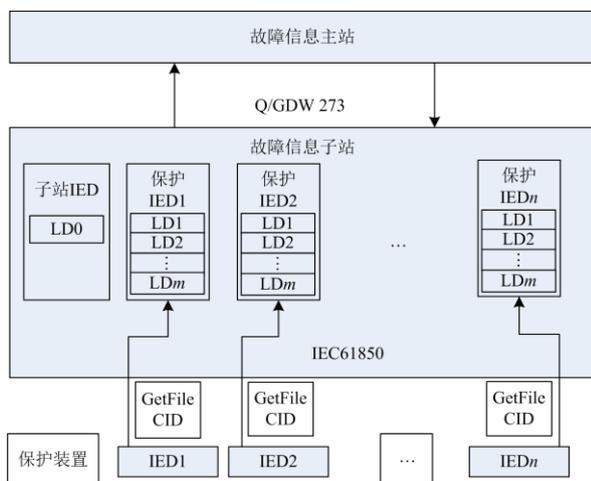


图 2 基于 IEC61850 通信的保护设备免配置接入技术路线图
Fig. 2 Configuration free access technology roadmap of protection equipment based on IEC61850 communication

该技术体系针对现有继电保护故障信息子站的实现流程进行重新实现。本技术首先通过 IEC61850 的文件服务实时获取保护装置的模型文件, 根据 Q/GDW 396 中对保护装置模型的约定, 通过逻辑设备(LD)“PROT”识别出保护设备; 通过修改 IEC 61850 的初始化方式, 由启动时的初始化升级为动态初始化, 实现模型的在线解析; 通过实时解析模型文件建立数据树, 通过解析数据集建立数据点库, 通过读取数据树各节点值初始化数据库属性建立本地数据库, 同时通知主站有配置变化信息, 等待主站的配置数据召唤命令, 更新主站侧的数据库, 达到保护装置免配置接入的目的。

该技术体系取消了系统配置工具和 SCD 的配置, 使用 CID 文件模型动态初始化技术达到了 IEC61850 的保护设备免配置接入的目的; 能够有效节约资源、控制成本、提高效率, 有利于韧性配电网的建设。

1.3 基于 IEC61850 的面向对象立体数据到扁平化数据的转换

IEC61850 标准原属于变电站自动化系统, 而配电网主站主要使用 IEC60870 标准。IEC 61850 引入配电网自动化系统中, 导致基于电网继电保护故障信息主站和继电保护故障信息子站为两套异构的自动化系统。两套系统在建模过程分别遵照各自领域的技术标准, 其中子站为面向对象的数据, 而主站需要的为线性化数据, 两者之间存在差异。

为此, 本文对 IEC60870、IEC61850 和 MMS 的配置文件、报文结构及传输机制、数据及服务的映射进行研究。IEC61850 采用的面向对象的数据结构, 其最外层结构为服务器, 包含设备所有的功能, 其下包含多个逻辑设备, 每一个逻辑设备包含一组有关联的逻辑节点, 每一个逻辑节点表示物理设备内的某一项功能, 包含多个数据, 每一个数据由多个数据属性组成。其中数据集中的数据成员为外部主要关心的数据。IEC60870-5-104 采用的是线性数据结构, IEC104 是 IEC101 的网络化运行, 它的应用规约数据单元 APDU 由启动字符、APDU 长度、控制域及应用服务数据单元 ASDU 组成, 其中 ASDU 采用 IEC101 的 ASDU, 网络层及传输层采用 TCP/IP 协议。它的优点是数据传输实时性好, 可靠性高。在有配置工具参与的情况下, IEC61850 的数据转换配置文件是由配置工具完成。配置文件主要对各个 IEC61850 的数据路径如何向本地数据库映射做了指定, 子站作为 IEC61850 的客户端采集并解析间隔层设备通过 IEC61850 上送的数据, 根据预配置的文件写入本地数据库, 供 IEC104

协议使用, 完成不同结构数据的转换转发。其中需要进行转换的数据主要包括数据集中的遥测、遥信、保护动作告警, 定值、压板等和数据集之外的遥控、遥调, 文件类数据不需要转换。IEC61850 采用报告服务来传输需要采集的数据, 采集到本地并经过本地数据转换后, 再通过 IEC104 中的专用 ASDU 将这些数据上送给主站, 完成数据的采集与转发。

本文对纳入电网调控管理范围的所有设备进行统一分类, 对 IED 模型文件进行详细深入的功能分析和系统功能分类, 设计出一种电网继电保护故障信息主站和继电保护故障信息子站之间数据免配置点表通信的方法。其技术路线如图 3 所示。对于子站 IEC61850 客户端接入的多个保护设备, 每一个

保护设备作为独立的 IED 进行数据转换。根据 Q/GDW 396 中对保护装置数据集的约定, 将各数据集映射至本地不同数据类型, 如数据集名为 dsAin 和 dsRelayAin 中的数据映射为遥测、数据集名为 dsDin 和 dsRelayDin 中的数据映射为遥信、数据集名为 dsTripInfo 和 dsAlarm 中的数据映射为保护动作告警、数据集名为 dsSetting 中的数据映射为定值、数据集名为 dsRelayEna 中的数据映射为压板等, 将功能约束为 CO 的节点映射为遥控等。将 IED 中的数据集序号号映射至主子站协议 IEC103 中的组号, 将数据集中的数据集成员在本数据集中的序号号映射至组号中的条目号, 每一数据点的数据属性通过 IEC 61850 模型树上功能约束 CF 的节点自动获得。

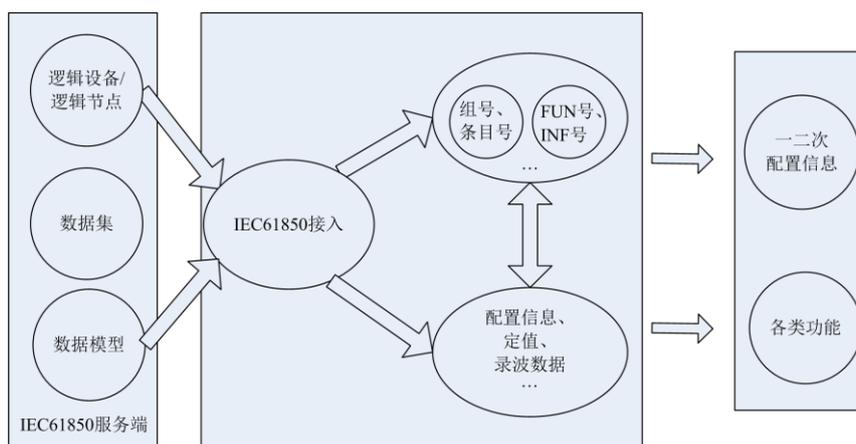


图 3 基于 IEC61850 的面向对象立体数据到扁平化数据的免配置转换技术路线图

Fig. 3 Configuration free conversion technology roadmap from object-oriented stereo data to flat data based on IEC61850

该方法可以将 IEC61850 面向对象的数据和 IEC60870-5-104 面向点的线性数据进行快速、准确的自动转换, 并实现对主子站的免配置通信, 对节约资源、控制成本、提高工作效率、提高供电可靠性具有积极意义。

1.4 基于 5G 网络的高速实时业务传输

配电网中设备节点多, IEC 61850 的配置文件数量多、容量大, 因此亟需大容量、大带宽的通信方式。此外, 上海地区台风较多, 配电网受其影响严重。因此配电网中的信息指令等需要低延时、高速率的通信方式进行传输。

5G 技术作为新一代的无线传输技术, 具有大带宽、低延时、大接入容量的特点。目前 3GPP 组织定稿的 R15 和 R16 两个版本的标准明确了大带宽和低延时两种业务场景的 5G 应用。根据 R15 版本规定, 5G 在 1 ms 的时延内传输 32 字节的误码率不超过 0.001%, 即其传输单字节的误码率在 10^{-7} 左右^[24-25]。URLLC 场景下 5G 空口时延为 1 ms, 端到端时延在

10 ms 以内^[26]。5G 的带宽最低可以达到百兆赫兹, 其接入容量可达每平方千米 100 万台设备^[24]。

为此, 本文对 5G 的组网方案和实际业务传输的可靠性、实时性等关键性技术指标进行研究, 提出基于 5G 网络的高速实时业务传输技术方案。

5G 的组网方式有两种, 分别是 SA(独立组网)和 NSA(非独立组网)。其中独立组网时, 无线使用 5G 无线, 核心网使用 5G 核心网, 此架构为 5G 的终极形态^[27]。经过测试, 本技术方案选择了 SA 独立组网方式, 在实验室周边开通了 5G 低时延切片专网, 将实验室周围的 6 个基站纳入切片网络, 切片网络采用 N41 频段, 带宽为 100 MHz, 采用 TDD 时分双工通信模式, 网络切片技术可以为配网故障信息传输业务提供高可靠、高安全和高速的通信信道。针对配网业务特点, 本技术方案选择了通信运营商的 ToB 模式, 使用 UPF(用户面功能)下沉方式, 将专网的用户信息配置于 SMF 内, 通过用户识别, 指定最近的 UPF 完成数据流的转发。从实际情况来

看, 此方案可以满足配网故障信息传输的要求。

对于 5G 网络下业务传输的可靠性、实时性问题, 在以上组网方案下, 本技术方案采用差动保护装置作为典型装置进行了 5G 通信下可靠性、实时性研究。

5G 通信方式下做的主要研究工作有: 1) 同步算法, 传统光差的乒乓同步算法在接收与发送时延相同的前提下使用; 5G 传输时延具有不确定性, 无法保证收发时延一致, 需解决同步问题。基于卫星授时技术实现远方同步, 是目前相对更可靠、更实用的同步方式。2) 对时, 5G 技术带来的精准授时功能, 能够实现授时精度在微秒级水平, R16 标准的到来已将精度进一步缩小至 10 ns; 可满足保护需求, 是配电网的理想方案。3) 流量控制, 目前的 5G 商用模式, 依然秉持按流量计费的方式, 对于长期运行的设备来说, 流量是个不容忽视的问题, 实际方案的选择对于长期运行的经济性指标起着重要的作用。4) 网络安全, 5G 丰富的安全架构及切片专网能够保证用户身份的合法性; 基于边缘计算的数据传输能力, 使网络数据不出区域, 降低了入侵的风险。

对 5G 通信方式下的关键技术进行研究: 1) 同步原理, 采样数据中携带时间标记, 基于统一时间源进行插值同步, 装置底层采用统一的计时方式,

计时精度可小于 10 μs。2) 通道数据统计, 针对 5G 网络通道的质量, 研究了通道时延、误码等情况, 最小时延为 8.5 ms、最大时延为 160 ms、平均时延为 16.2 ms, 误码率小于 0.001%。3) 网络流量方案, 差动数据对采样频率的需求并不高, 每秒 1000 点的采样频率可以满足差动保护需求, 每秒单向流量最高可以达到 78 KB/s, 每天双向流量最高可以达到 12 GB, 每月双向流量最高可以达到 372 GB。4) 流量实时控制技术, 正常状态下, 仅传送心跳帧, 1 s 内连续传送 2 个周波采样值, 保持实时同步, 完成差流计算, 可实时进行差流异常告警处理, 此模式下流量消耗为全流量的 4%, 大幅提升经济性。从实际情况来看, 可靠性、实时性可以满足配网故障信息传输的要求。

综上所述, 本文所提基于 5G 及 IEC61850 的韧性配网故障信息智能传输技术方案由 4 部分组成, 其技术路线如图 4 所示。本技术方案通过基于态势感知的保护设备自动发现识别技术对新增网络节点信息进行自动识别、自动读取; 通过基于 IEC61850 通信的保护设备免配置接入技术实现保护装置即插即用、源端维护免配置、通信自动化; 通过基于 IEC61850 的面向对象立体数据到扁平化数据的免配置转换技术, 实现电网继电保护故障信息主站和

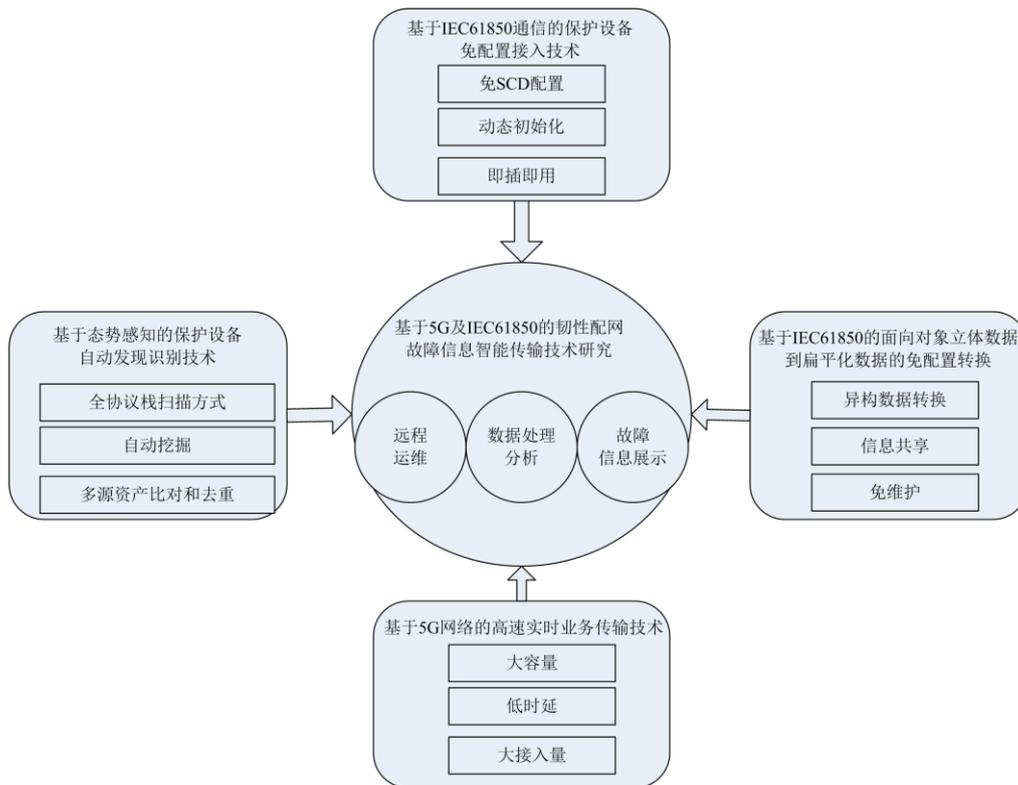


图 4 基于 5G 及 IEC61850 的韧性配网故障信息智能传输技术路线图

Fig. 4 Roadmap of intelligent transmission technology of fault information in resilient distribution network based on 5G and IEC61850

继电保护故障信息子站数据进行快速、准确的信息转换共享,最后通过基于 5G 网络的高速实时业务传输技术实现电网继电保护故障信息主站和继电保护故障信息子站之间信息智能高速实时传输。

2 实验测试

2.1 保护故障信息系统测试环境搭建

10 kV 继电保护故障信息系统测试环境搭建如图 5 所示,被测继电保护故障信息子站系统(以下简称子站系统)采用单机模式,站控层网络单网配置,间隔层设备为 $N+12$ 模式,其中 N 为智能变电站保护信息仿真系统可仿真 30 台以上 IED 装置 MMS 输出,12 为满足“九统一”要求的 12 台继电保护装置,现场通过站控层组网交换机进行组网。

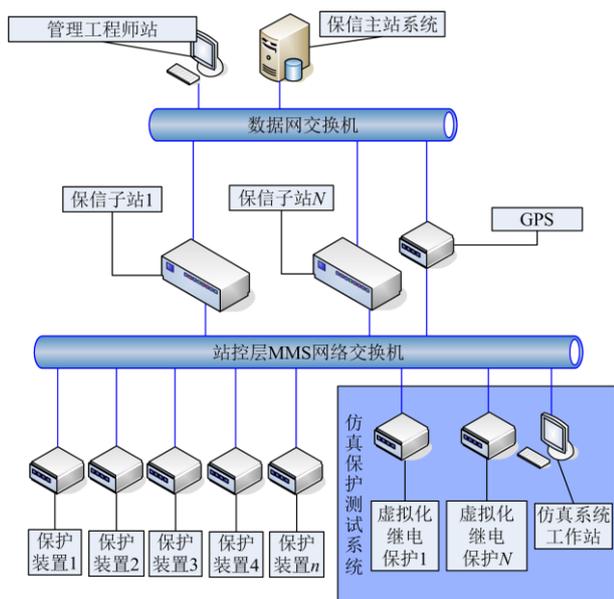


图 5 10 kV 继电保护故障信息系统测试环境搭建示意图

Fig. 5 Schematic diagram of test environment construction of 10 kV relay protection fault information system

保护仿真测试系统通过导入 SCD/CID 模型文件模拟 IEC61850 保护装置的站控层数据交互行为,可仿真 30 台以上 IED 装置 MMS 输出,可用于系统测试过程中基本通信接入与普通对点等项目。

主站系统为符合上海市调要求的 10 kV 继电保护故障信息主站系统(以下简称主站系统)。系统基于独立组网交换机实现与各子站装置的通信,实现相关配网保护装置的设备监视、设备采样及故障信息采集与处理功能。时间同步装置为整个测试环境提供对时功能,站控层设备及主站系统采用 NTP 对时。整个测试系统涉及的继电保护装置、子站装置、主站系统均需要满足上海市调发布的 10 kV 继

电保护故障信息系统技术规范要求的样机或系统。

2.2 开关站设备增补、变更测试

实验环境下,新增一台保护装置并配置合法网络地址,接入 MMS 局域网交换机,通过子站管理工具可以观察到子站装置在 2 min 内能自动发现新的保护装置上线并读取保护装置的 CID 模型文件,完成保护装置的自动建模和 IEC61850 接入,同时子站主动向主站发送配置变更信号并等待主站的配置数据召唤命令来完成保护装置的接入。

运行过程中,修改其中一台保护装置的模型文件,通过子站管理工具可以观察到子站装置能够在配置变更后 2 min 内发现保护装置的配置变更,并完成本地模型文件更新、自动重新建模和 IEC61850 接入装置工作,同时主动向主站发送配置变更信号,等待主站的配置数据召唤命令,完成修改配置后保护装置的接入。与传统人工配置方式相比,区别如表 1 所示。

表 1 增补、变更方式比较

Table 1 Comparison of addendum and change way

配置方式	模型文件	IEC61850 数据转换	完成过程	完成时间
人工配置	系统配置工具完成	映射工具完成	人工参与	1 h 左右
免配置	自动召唤装置模型	自动完成	自动完成	小于 2 min

实验结果表明,对于开关站保护设备增补、配置变更的情况,子站可以在 2 min 内自动发现并更新子站侧模型,完成保护设备的接入,同时子站能够主动向主站发送设备配置变更信号。而传统方式下的设备增补、配置变更通信接入因为需要人工修改配置,完成时间在 1~2 h 不等,并且需要线下通知主站更新配置。由此可以看出,使用本文所提方案时的工作效率有了极大提高。

2.3 保护设备接入测试

对于新接入或配置发生变化的保护设备,通过子站管理工具可以检查保护装置数据的正确性,通过保护装置面板人工修改正常运行的保护定值区及保护定值,通过子站管理工具可以获取变更的保护定值区及保护定值。通过试验仪给保护装置输入电流/电压,通过子站管理工具可以获取保护装置的模拟量。通过试验仪改变保护装置的状态量输入信号,通过子站管理工具可以获取保护装置的状态量变位事件。通过试验仪使保护装置产生新的录波文件,通过子站管理工具可以获取保护装置新的录波文件列表及录波文件内容。人工关闭保护装置电源或拔出保护装置的网线,通过子站管理工具可以实时显

示保护装置的通信状态。

实验结果证明,对于子站自动发现并接入的保护设备,保护设备的定值、定值区、设备采样、实时事件、实时录波、通信状态等数据可以在 1 min 内完成数据的本地映射,并可以正常传输,满足开关站的数据采集要求。

2.4 主站与子站信息转换测试

对于新接入或配置发生变化的保护设备,通过主站管理工具可以检查保护装置数据的正确性。人工修改保护装置的保护定值区,主站可以获取修改后的保护定值区。人工修改保护装置的保护定值,主站可以获取修改后的保护定值。通过保护测试仪更改保护装置的采样信息,主站可以获取最新的保护采样值。通过测试仪输入故障电流、电压、使保护产生故障输出,主站可以获取最新的事件信息。通过测试仪输入故障电流、电压、使保护产生故障录波文件,主站可以获取最新的录波文件列表及录波文件内容。人工关闭保护装置电源或拔出保护装置的网线,主站可以实时反映保护装置的通信状态。人工变更保护装置的模型文件,主站可以自动识别模型文件的更新并下载文件。人工变更子站装置的 CPU、内存、硬盘的使用状态,主站可以实时获取子站装置的运行状态信息。与传统人工配置方式相比,有以下区别,如表 2 所示。

表 2 信息转换方式比较

配置方式	103 数据转换	通知方式	完成过程	完成时间
人工配置	配置工具完成	线下通知	人工参与	1 h 左右
免配置	自动完成	自动通知	自动完成	小于 1 min

实验结果证明,对于保护设备的定值、定值区、设备采样、事件信息、录波信息、保护装置通信状态、子站装置运行状态等数据,本文所提技术方案可以在 1 min 内完成数据向主站的映射,并可以正常传输,满足主站的数据采集要求。同时,因采用了自动数据转换的技术,所以本方案大大降低了人工参与出错的概率。

2.5 5G 网络信息传输测试

基于 5G 的继电保护故障信息系统测试环境搭建如图 6 所示,站端配置和主站端配置与 2.1 节相同,保信子站与保信主站之间通过 5G 网络通信。5G 模块与子站装置独立配置,便于进行场地布置与业务管理,5G 通道与站内通信实现了物理隔离与业务独立,同时可实现双通道配置。切片网络采用 N41 频段,带宽 100 MHz,采用 TDD 时分双工通信模式,选用运营商的 ToB 模式和 UPF(用户面功能)下

沉方式,将专网的用户信息配置于 SMF 内,通过用户识别,指定最近的 UPF 完成数据流的转发。

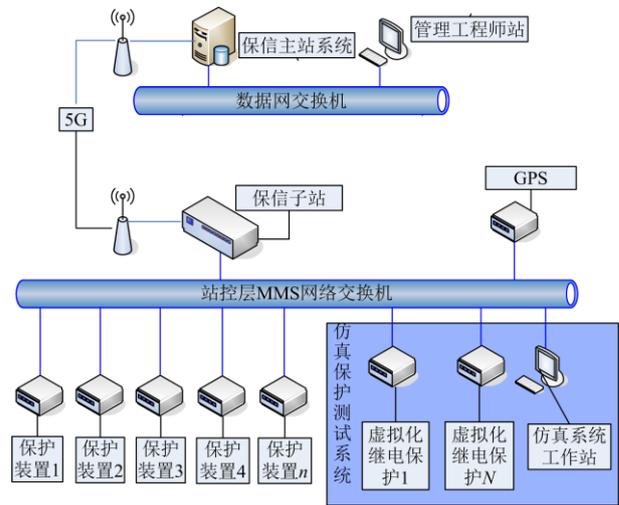


图 6 基于 5G 的继电保护故障信息系统测试环境搭建示意图

Fig. 6 Schematic diagram of test environment construction based on 5G relay protection fault information system

为验证 5G 独立组网模式下的网络带宽及延时能否满足配网故障信息传输的应用要求,本试验分别进行了传统网络连接、单基站测试及多基站测试等不同场景下的功能和性能测试。

5G 数据发送延时测试,在保护装置侧用测试仪触发过流 I 段保护动作信号,在子站侧监视信号转发时间,在主站侧监视信号接收时间,对 5G 数据发送延时作了统计,并与常规连接方式作比较。做多组试验,数据发送延时统计如表 3 所示。

表 3 数据发送延时统计

连接方式	最小 时延/ms	最大 时延/ms	平均 时延/ms	时延小于 100 ms 占比/%
单基站	8.5	130	9.6~20.1	99.8
多基站	9.3	160	12.5~28	98.2
常规直连	0.001	3	1~2	100

5G 数据发送流量测试,测试录波文件传输流量较大的情况,在保护装置侧用测试仪触发产生故障录波文件,录波文件大小约为 1 M,在子站侧监视文件数据收发时间,在主站侧监视文件数据的接收时间,对 5G 发送文件数据完成时间作了统计,并与常规连接方式作比较。做多组试验,发送时间统计如表 4 所示。

图 7 为 5G 网络信息传输测试图片。

实验结果表明,对于子站接入的保护设备,保

护设备的定值、定值区、设备采样、实时事件、实时录波、通信状态等数据均可正常传输到主站。正常 5G 通信时, 通道单向时延大部分集中在 10~20 ms, 对于偶尔网络不好的情况存在长延时的现象, 但是在规范要求传输时间范围之内, 可以满足配网故障信息的实时传输要求。而在大流量数据传输时, 受限于主子站协议中文件传输长度与发送机制, 5G 传输文件与直连方式所需时间相差不大, 5G 传输略慢, 但对于文件和配置信息等类型的数据实时性要求不高, 因此 5G 通信可以满足配网故障信息传输的要求。

表 4 发送文件时间统计

Table 4 Statistics of sending file time

连接方式	最小时间/s	最大时间/s	平均时间/s
单基站	5.8	6.5	6.0
多基站	6	6.8	6.3
常规直连	5	5.5	5.2



图 7 5G 网络信息传输测试图片

Fig. 7 5G network information transmission test photos

3 现场试运行测试

试点为上海浦东某 10 kV 开关站。图 8 为试点站内运行情况图片。



图 8 试点站内运行情况图

Fig. 8 Operation diagram of pilot station

本现场站内通信采用了以太网上的 IEC61850 通信, 受限于试运行现场周围的运营商基站通信情况, 保信子站与保信主站采用数据网专网通信与 5G

通信相结合的双通道配置, 保证主子站通信的可靠性, 5G 作为辅助通信手段, 主要是为了验证方案的可行性。在此基础上对保护设备自动发现识别、IEC61850 通信的保护设备免配置接入、IEC61850 结构化数据向 IEC60870 线性数据的自动转换及 5G 网络信息传输技术进行验证。基于本技术方案所开发的保护装置已于该试点站运行 5 个月, 目前运行正常。保护设备的定值、定值区、设备采样、事件信息、录波信息、保护装置通信状态、子站装置运行状态等数据均可正常上送主站。

与常规方式各项功能对比如表 5 所示。

表 5 功能比较

Table 5 Functions comparison

工作方式	免配置方式	传统方式
新设备接入	自动完成	人工完成
设备变更	自动完成	人工完成
参数配置	自动完成	人工完成
开入(模拟)量	具备	具备
动作(告警)信息	具备	具备
定值(区)功能	具备	具备
录波传输	具备	具备
调试时间	约 1 天	约 7 天

对于各项数据的传输效率, 数据由数据源端保护装置到远方保信主站端的传输时间如表 6 所示。

表 6 数据传输效率比较

Table 6 Comparison of data transmission efficiency

工作方式	免配置方式	传统方式
配置信息	<2 min	人工参与时间不定
开入量	<100 ms	<200 ms
模拟量	<200 ms	<500 ms
动作(告警)信息	<100 ms	<200 ms
定值	<500 ms	<500 ms
定值区	<500 ms	<500 ms
录波文件	<10 s	<10 s
通信状态	<20 s	<30 s

由此可见, 本文所提技术方案在保证功能正常的前提下, 可以有效解决数量庞大的开关站保护装置信息上送方式复杂、配置繁琐、运维难度大的问题, 并且能够简化安装调试流程, 提高运维效率。

4 结论

本文针对目前 10 kV 开关站位置分散、保护设备部署量大、安装调试配置繁琐、通信形式多样化、运维困难、改扩建工作严重依赖厂家人员等方面的问题, 提出了基于 5G 及 IEC61850 的韧性配网故障信息智能传输技术方案。本技术方案主要分为以下

4 部分: 针对 10 kV 开关站的增补、改扩建情况, 提出基于态势感知的保护设备自动发现识别技术; 针对 10 kV 开关站接入保护装置的调试和维护工作复杂、繁琐, 提出基于 IEC61850 通信的保护设备免配置接入技术; 针对电网继电保护故障信息主站和保信子站为两套异构的自动化系统且数据模型存在较大差异, 提出基于 IEC61850 的面向对象立体数据到扁平化数据的自动转换技术; 针对配电网中 IEC61850 配置文件数量多、容量大, 进行信息传递不易, 提出基于 5G 网络的高速实时业务传输方案。最后通过搭建 10 kV 继电保护故障信息系统测试环境以及在上海浦东某 10 kV 开关站进行试运行, 验证了本文所提技术方案的可靠性, 利于上海市“韧性电网”配网建设。

参考文献

- [1] TON D T, WANG W T. A more resilient grid: the U.S. department of energy joins with stakeholders in an R & D plan[J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2015, 13(3): 26-34.
- [2] 薛禹胜, 肖世杰. 综合防御高风险的小概率事件: 对日本相继天灾引发大停电及核泄漏事件的思考[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 1-11.
XUE Yusheng, XIAO Shijie. Comprehensively defending high risk events with low probability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 1-11.
- [3] 赵晓龙, 方恒福, 王罡, 等. 面向弹性配电网防灾减灾的组件重要度评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 28-36.
ZHAO Xiaolong, FANG Hengfu, WANG Gang, et al. Component importance indices evaluation considering disaster prevention and mitigation in resilient distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 28-36.
- [4] 侯慧, 陈希, 李敏, 等. 一种 Stacking 集成结构的台风灾害下停电空间预测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 76-84.
HOU Hui, CHEN Xi, LI Min, et al. A space prediction method for power outage in a typhoon disaster based on a Stacking integrated structure[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 76-84.
- [5] 刘建存, 秦超, 余贻鑫. 考虑 MEG 事故前优化配置的配电网两阶段重构韧性提升方法[J]. 智慧电力, 2020, 48(8): 1-7.
LIU Jiancun, QIN Chao, YU Yixin. Two-stage reconfiguration method for resilience enhancement of distribution networks considering optimal pre-positioning of MEGs[J]. Smart Power, 2020, 48(8): 1-7.
- [6] 和敬涵, 李猛, 罗国敏, 等. 面向韧性提升的异构多源交直流配电网保护与故障恢复方法研究综述[J]. 供用电, 2019, 36(7): 2-7, 12.
HE Jinghan, LI Meng, LUO Guomin, et al. Review of protection and restoration methods for heterogeneous multi-source AC/DC distribution network facing resilience improvement[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(7): 2-7, 12.
- [7] 徐悦, 李博, 孙建军, 等. 基于运行韧性评价的配电网电压暂降治理评估[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(5): 104-110.
XU Yue, LI Bo, SUN Jianjun, et al. Evaluation of voltage sag management in distribution network based on operation resilience assessment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(5): 104-110.
- [8] 周晓敏, 葛少云, 李腾, 等. 极端天气条件下的配电网韧性分析方法及提升措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 505-513, 681.
ZHOU Xiaomin, GE Shaoyun, LI Teng, et al. Assessing and boosting resilience of distribution system under extreme weather[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 505-513, 681.
- [9] WANG J, GHARAVI H. Power grid resilience[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(7): 1199-1201.
- [10] 阮前途, 谢伟, 许寅, 等. 韧性电网的概念与关键特征[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(21): 6773-6783.
RUAN Qiantu, XIE Wei, XU Yin, et al. Concept and key features of resilient power grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 6773-6783.
- [11] 陈志杰, 陈民铀, 赵波, 等. SoS 架构下的多微电网极端场景韧性增强策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(22): 29-37.
CHEN Zhijie, CHEN Minyou, ZHAO Bo, et al. Resilience enhancement strategies for extreme scenarios of multi-microgrid based on system of systems architecture[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 29-37.
- [12] 许寅, 王颖, 和敬涵, 等. 多源协同的配电网多时段负荷恢复优化决策方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2): 123-131.
XU Yin, WANG Ying, HE Jinghan, et al. Optimal decision-making method for multi-period load restoration in distribution network with coordination of multiple sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 123-131.
- [13] 韩国政, 徐丙垠. 基于 IEC61850 标准的智能配电终端建模[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(2): 104-107.
HAN Guozheng, XU Bingyin. Modeling of intelligent

- distribution terminal according to IEC61850[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(2): 104-107.
- [14] 秦立军, 刘麟, 石峻峰, 等. IEC61850 体系下的配电网自动化系统[J]. 电力设备, 2007, 8(12): 13-15.
- QIN Lijun, LIU Lin, SHI Junfeng, et al. Distribution automation system under IEC61850 system[J]. Electrical Equipment, 2007, 8(12): 13-15.
- [15] 韩国政, 徐丙垠. 基于 IEC61850 的高级配电自动化开放式通信体系[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 183-186.
- HAN Guozheng, XU Bingyin. IEC 61850-based open communication system of advanced distribution automation[J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 183-186.
- [16] 朱正谊, 徐丙垠, YIP T, 等. IEC 61850 应用于分布式馈线自动化系统的模型[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(23): 148-154.
- ZHU Zhengyi, XU Bingyin, YIP T, et al. IEC 61850 based models for distributed feeder automation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(23): 148-154.
- [17] HAN Guozheng, LÜ Guangxian, XU Bingyin, et al. An open communication architecture for distribution automation based on IEC 61850[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 54: 315-324.
- [18] HAN Guozheng, XU Bingyin, SUONAN Jiale. IEC 61850-based feeder terminal unit modeling and mapping to IEC 60870-5-104[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4): 2046-2053.
- [19] 王志, 熊文, 陈羽, 等. 基于 IEC 61850 的集中式馈线自动化信息模型[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(8): 133-137.
- WANG Zhi, XIONG Wen, CHEN Yu, et al. Information model of centralized feeder automation based on IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(8): 133-137.
- [20] 席禹, 陈波, 袁智勇, 等. 基于 IEC 61850 的配电自动化终端建模与测试需求研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(7): 41-47.
- XI Yu, CHEN Bo, YUAN Zhiyong, et al. Research on modeling and testing demand of distribution automation terminal based on IEC 61850[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(7): 41-47.
- [21] 韩国政, 陈羽, 徐丙垠. 基于 IEC 61850 的配电网故障检测与保护信息模型[J]. 供用电, 2019, 36(7): 8-12.
- HAN Guozheng, CHEN Yu, XU Bingyin. Information model for distribution network fault detection and protection based on IEC 61850[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(7): 8-12.
- [22] 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): 97-103.
- 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): 97-103.
- [23] 王松, 陈早, 陈明. 智能变电站继电保护免配置文件技术探讨[J]. 浙江电力, 2021, 40(8): 65-71.
- WANG Song, CHEN Zao, CHEN Ming. Discussion on configuration file free technology of relay protection in smart substation[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(8): 65-71.
- [24] 高维良, 高厚磊, 徐彬, 等. 5G 用作配电网差动保护通道的可行性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 1-7.
- GAO Weiliang, GAO Houlei, XU Bin, et al. Feasibility analysis of adopting 5G in differential protection of distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 1-7.
- [25] LI Zhenxing, WAN Jialing, WANG Pengfei, et al. A novel fault section locating method based on distance matching degree in distribution network[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(2): 253-263.
- [26] IUT. ITU-R M.2083, IMT vision—framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond[S]. Geneva: ITU-R, 2015.
- [27] 赵艾萱, 黄杨, 宋戈, 等. 5G 独立组网模式下的配网保护配置策略及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 24-31.
- ZHAO Aixuan, HUANG Yang, SONG Ge, et al. Configuration strategy and application of distribution network protection based on standalone 5G[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 24-31.

收稿日期: 2022-02-15; 修回日期: 2022-05-13

作者简介:

孙阳盛(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: sunyangsheng@sh.sgcc.com.cn

涂崎(1975—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: tuq@sh.sgcc.com.cn

赵中华(1983—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统及其自动化。E-mail: 99485393@qq.com

(编辑 周金梅)