

新型配电系统智能终端分布式控制通信方案

杨小莲¹, 卞蓓蕾², 张烨华³, 赵连强⁴, 许泰峰^{4*}, 沈兵兵¹

(1. 南京渡易能源技术咨询有限公司, 江苏省 南京市 210019;

2. 国网浙江省电力有限公司宁波供电公司, 浙江省 宁波市 315000;

3. 国网浙江省电力有限公司信息通信分公司, 浙江省 杭州市 310020;

4. 易源士创信息科技(南京)有限公司, 江苏省 南京市 210019)

Intelligent Terminal Distributed Control Communication Solutions for New Power Distribution System

YANG Xiaolian¹, BIAN Beilei², ZHANG Yehua³, ZHAO Lianqiang⁴, XU Taifeng^{4*}, SHEN Bingbing¹

(1. Nanjing DUEE Energy Technology Consulting Co., Ltd., Nanjing 210019, Jiangsu Province, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Company Ningbo Power Supply Company, Ningbo 315000, Zhejiang Province, China;

3. State Grid Zhejiang Electric Power Corporation Information & Telecommunication Branch, Hangzhou 310020, Zhejiang Province, China;

4. Yearstrong Information Technology (Nanjing) Co., Ltd., Nanjing 210019, Jiangsu Province, China)

Abstract: The new distribution grid will be heavily connected to distributed energy resources, it will become the main battlefield of constructing new power systems. However, the silo communication architecture of the traditional distribution grid and its 101/104 communication protocol cannot support the D2C and D2D communication requirements of the new distribution grid. It is urgent to improve the information collection and convergence, edge computing, plug and play capabilities for intelligent terminals of the distribution grid, and seek communication solutions that meet the communication requirements of the new distribution grid, to provide the underlying technical framework support for the reliable operation of the new distribution grid. Therefore, this paper proposes an intelligent terminal distributed control communication solution for the new distribution system. First, a more efficient distributed coordinated control architecture allowing distributed intelligent nodes to interact with each other is proposed. Then, IEC 61850 modeling technology is used to model the intelligent terminal, and IEC 62361 standards are followed to solve the problem of the CIM model and IEC 61850 model integration. Finally, a highly reliable and highly real-time Internet of Things communication protocol-DDS is proposed to

realize the mapping of the model on the protocol. Through this communication solution, intelligent terminals have the ability to plug and play, and intelligent terminals can communicate with each other and share important information locally, which facilitates the implementation of distributed power coordination and mutual aid strategy. This paper also introduces a use case of the grid access configuration process of the intelligent terminal, and a use case of distributed feeder automation based on this communication solutions to verify the plug and play function and the effect of distributed control.

Keywords: new distribution grid; communication solutions; intelligent terminal; distributed control; plug and play

摘 要: 新型配电网大量接入分布式能源, 成为构建新型电力系统的主战场。传统配电网的竖井式通信架构, 及其101/104通信协议已不能满足新型配电网的云-边、边-边通信需求, 亟需提升配电网智能终端的信息采集与汇聚、边缘计算、即插即用能力, 并寻求满足新型配电网通信需求的通信方案, 为新型配电网的可靠运行提供底层技术架构支撑。为此提出了新型配电系统智能终端分布式控制通信方案。首先提出更高效的、允许分布式智能节点相互交互的分布式协调控制架构; 其次使用IEC 61850建模技术对智能终端建模, 并遵循IEC 62361标准, 解决CIM模型与IEC 61850模型融合的问题; 最后提出通过高可靠性、高实时性的物联网通信协议DDS来实现模型在协议上的映射。基于所提出的通信方案, 智能终端具备即插即用能力, 智能终端之间互联互通, 可就地分享重要信息。通过智能终端的入网配置流程用例, 基于所提通信方案的分布式馈线自动化用例, 验证了即插即用功

基金项目: 国网浙江省电力有限公司科技项目(分布式能源互联网信息交换及通信技术研究与实践, 5211XT20008P)。

Science and Technology Foundation of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. (Research and Practice of Information Exchange and Communication Technology Based on Distributed Energy Internet, 5211XT20008P).

能和分布式控制的效果。

关键词: 新型配电网; 通信方案; 智能终端; 分布式控制; 即插即用

0 引言

随着可再生能源和分布式能源的渗透率不断提高, 以高比例分布式可再生能源和微电网为重点的多元配电系统改变了传统配电网的形态^[1-4], 形成新型配电系统。新型配电系统需安装数量庞大的智能终端用以对分布式能源监控。急剧增加的监控信息不可避免地加重了配电系统数据传输、储存和分析负担^[5-7]。

中国现有配电系统使用的控制技术为集中式和就地式, 采用远动通信协议(IEC 60870-5-101/104)交互信息, 其通信及计算能力已无法对海量分布式能源进行集中监控, 将对配电网的安全、可靠、稳定运行及控制带来诸多方面的影响; 其控制技术无法高效通信及处理海量边缘数据, 无法对多个分布式电源系统进行协调互济。文献[8-12]研究了智能终端的建模技术, 遵循IEC 61850标准, 使用统一的数据模型与信息交换模型, 支撑终端的即插即用, 以及终端与终端之间、终端与主站之间的互联互通。文献[13]研究了配电系统控制, 提出适应未来配电网的分布式控制技术。但由于现有配电系统在信息通信方面存在以下问题, 无法实现智能终端的即插即用和分布式控制的应用。

1) 严重依赖控制中心, 决策低效。分布式电源系统源端、网络、负荷、储能等各环节的信息交互与决策均严重依赖控制中心, 各环节和设备之间不支持信息就地交换, 使得智能配电终端、智能逆变器等设备无法实现信息的高效共享和就地处理, 其整体可靠性取决于控制中心。

2) 标准化程度不高, 建设运维成本高。未实现监控终端的即插即用功能, 调试工作量大、可扩展性差。当前区域电网中存在来自不同供应商的电力设备, 缺乏标准的信息模型, 通信协议多, 严重阻碍了有效的本地数据交互, 在接入数量和种类不断增加的多元设备时, 需要进行大量的配置和联调工作, 使得建设运维成本高。

3) 不支持高效分布式控制。传统的通信协议非面向对象, 扩展性差, 不能交换设备模型; 而面向消费级的物联网通信协议, 在安全性和实时性上又稍显不足, 无法支撑分布式控制的高效应用。

高效、可信的调度决策过程, 是配电网快速、前

瞻地应对可再生能源发电等不确定性的重要支撑。为此, 本文提出新型配电系统智能终端分布式控制通信方案。首先提出更高效的允许分布式智能节点相互交互的分布式协调控制架构; 其次使用IEC 61850建模技术对智能终端建模, 并遵循IEC 62361标准, 解决公共信息模型(common information model, CIM)与IEC 61850模型融合的问题; 最后提出用高可靠性、高实时性的物联网通信协议(Data Distribution Service, DDS)来实现模型在协议上的映射。通过本通信方案, 支撑智能终端即插即用, 并且实现智能终端之间互联互通, 就地交换信息, 便于分布式电源协调互济的策略实施。

1 分布式协调控制架构

分布式协调控制架构如图1所示, 端设备可通过私有协议(Modbus、DNP等)或统一标准协议, 与边设备经适配器进行数据交互; 边设备根据物联网协议(DDS)通过分布式消息总线分发数据, 与主站前置、SCADA以及其他边设备经适配器进行数据交互, 以上形成了完整的信息交互架构。其中, 端、边设备是融合物联网通信技术的智能终端, 对其使用IEC 61850建模技术形成规范语义的公共模型, 信息易于交换而不会产生歧义。

分布式协调控制架构是一个允许分布式智能节点相互交互的体系结构。分布式协调架构支持基于字段的应用程序, 应用程序支持可扩展的点对点发布/订阅信息, 使用集中式和分布式逻辑来协调系统与终端的数据。配电网边缘设备之间以及与其配电主站进行数据交互时, 使用现场消息总线(field message bus, FMB)分发数据进行通信。每个节点定义为边缘代理网关, 与现场智能终端、逆变器等智能化设备通信, 以及对上与主站通信。该分布式协调控制架构可减少信息延迟, 使分布式通信成为可能。

2 智能终端的信息模型

2.1 IEC 61850建模技术

为解决电力系统智能终端互操作、即插即用问题, IEC TC57提出了一个完整的通信标准体系——IEC 61850。当前, IEC TC57发布了配电自动化系统技术报告IEC 61850 90-6, 储能系统技术报告IEC 61850 90-9, 分布式能源建模标准IEC 61850 7-420,

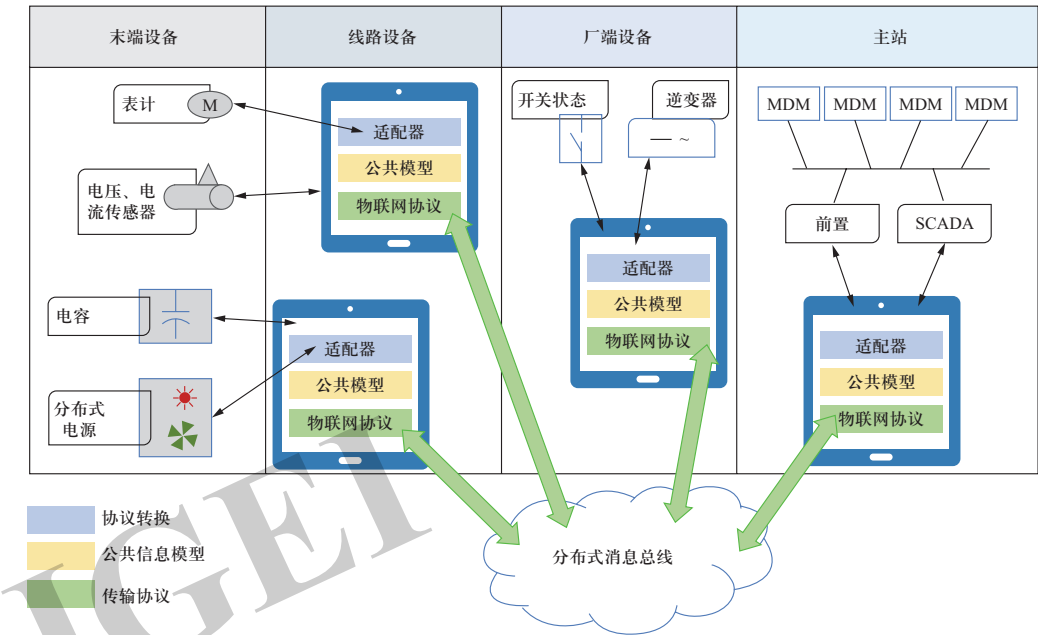


图 1 分布式协调控制架构
Fig. 1 Architecture and framework of distributed coordinated control

用以指导配电自动化应用IEC 61850标准。为进一步适应分布式能源的发展，TC57 WG17工作组正在制定微电网信息模型。

IEC 61850标准具备以下显著的技术特点：分层分布式体系结构，面向对象的信息统一建模，信息模型与底层通信协议独立，具备数据自描述。文献[9-19]研究了IEC 61850标准在配电终端、微电网的技术应用，展现出IEC 61850在配电网上广泛的应用场景。应用IEC 61850建模技术，可以为配电网智能终端提供统一、标准化的模型，支撑即插即用、互操作功能。根据IEC 61850的信息建模思想，其步骤可分为：逻辑节点建模→逻辑设备建模→服务器建模→物理装置建模。

2.2 模型融合

IEC在2018年发布了IEC_TS62361-102电力系统管理和相关信息交换-长期的互操作性^[8]，实现了IEC 61850与IEC CIM之间有效信息交换的技术方法，定义IEC 61850 SCL XSD控制的数据到CIM 统一建模语言（unified modeling language，UML）控制的数据的转换，既不改变变电站配置描述语言（substation configuration description language，SCL），也不改变CIM UML。因此，主站系统IEC CIM与终端的IEC 61850的模型融合问题遵循IEC_TS62361-102标准可以

得到很好的解决。

为尽可能地使IEC CIM与IEC 61850两个标准对模型的描述趋于一致，通过对IEC CIM与IEC 61850模型的差异分析，制定如图2所示的模型融合方案。①对IEC CIM与IEC 61850模型中相互缺少的部分根据自身的建模风格新增建模；②对两者都有相应模型的某

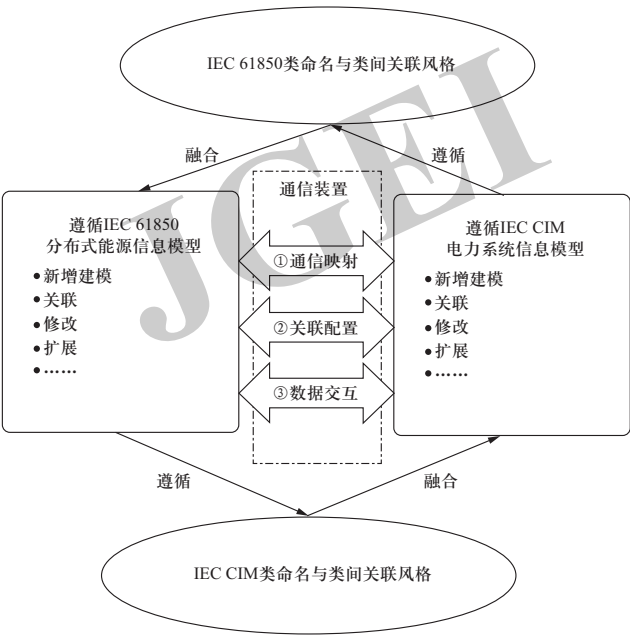


图 2 IEC CIM与IEC 61850模型融合方案
Fig. 2 Model fusion scheme of IEC CIM and IEC 61850

些对象的部分进行关联; ③对某些用IEC 61850模型描述更好的对象部分, 以IEC 61850为标准, 根据IEC CIM建模风格修改IEC CIM里对应的模型, 同样对某些用IEC CIM模型描述更好的对象部分, 以IEC CIM为标准, 根据IEC 61850建模风格修改IEC 61850里对应的模型; ④对IEC CIM与IEC 61850模型中都没有的部分, 需要同时扩展, 根据自身的建模风格新建; ⑤对于枚举缺少的部分进行增补。

3 电力物联网通信协议DDS

随着电力物联网的发展, 配电系统的信息交换与计算需求日益增长。除了在配电系统的边缘建设智能终端以满足数据采集的需求, 还需寻求高效的通信方式以解决数据传输问题^[20-24]。物联网通信中AMQP (Advanced Message Queuing Protocol)、CoAP (Constrained Application Protocol)、MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)、DDS (Data Distribution Service) 等协议都已被广泛使用。

DDS是基于发布/订阅 (data centric publish subscribe, DCPS) 模型并以数据为中心的物联网通信规约, 具有低延迟、高吞吐量、丰富的服务质量QoS (Quality of Service) 策略等特点, 支持点对点、点对多、多对多通信方式。DDS可在QoS的控制下建立有效连接, 自动分析、发现和配置网络技术参数。文献[25-30]分析了DDS作为中间件在应用上的设计与实现。DDS仅需关注数据本身的传输, 多达21种实时QoS参数, 为分布式实时系统中的数据传输提供松耦合、高性能、高可靠和可扩展的解决方案^[26]。DDS协

议适用于分布式高可靠性、实时传输设备数据的通信方案, 很好地支持设备之间的数据分发和设备控制, 以及设备和云端的数据传输, 同时DDS数据分发的实时效率非常高, 可达到秒级内同时分发百万条消息, 且在QoS上提供了保障途径^[23]。

CoAP是适合端-边的简单协议, 一般应用于数据采集的场合。MQTT是基于控制中心架构的协议, 适用边-云通信, 不适用于边-边通信, 在这种架构下, 设备控制能力弱, 实时性较差。相较于CoAP、MQTT协议, DDS能满足分布式控制和管理实时数据交互需求。通过支持高质量、可扩展、低延迟的实时信息基础架构, 为新型配电系统提供了行之有效的解决方案, 有助于提高性能、数据质量、数据合规性, 并节省成本。本文将DDS与101/104、MQTT等协议的技术指标进行了对比, 如表1所示。

4 智能终端入网配置

4.1 智能终端入网配置

IEC 61850 标准定义了SSD (系统规范描述) 文件、ICD (终端能力描述) 文件、SCD (系统配置描述) 文件、IID (实例化终端描述) 文件、SED (系统交换描述) 文件。

通过智能终端的入网配置, 每个位于馈线沿线并参与此馈线相关的终端, 都会获取到通信接口和拓扑等信息, 这些信息也可以提供给其他设备。

4.1.1 新接入馈线或馈线组的终端配置

当引入一个新的馈线或馈线组, 首先需要使用SCL方案创建与该线路相关的SSD文件, 包括线路

表 1 协议对比
Table 1 Communication protocol comparison

协议	通信模式	传输层	架构方式	性能	安全	QoS	动态发现	互操作性
101/104	请求/应答	TCP	D2C	1000 req/s		TCP自定义	否	否
AMQP	发布/订阅	TCP	D2D D2C C2C	1000 sub/ms	TLS	3种	否	是
CoAP	请求/应答	UDP	D2D	100 req/s	DTLS	确认/非确认	是	是
MQTT	发布/订阅	TCP	D2C	1000 msg sub/s	TLS	3种	否	部分
DDS	发布/订阅	UDP TCP	D2D D2C C2C	100 000 msg sub/s	TLS,DTLS,DDS-QoS	>21种	是	是

注: req表示request (请求); sub表示subscribe (订阅); msg表示message (消息)。

(即馈线和配电变电站)的单线图,以及故障指示器、FLISR(故障定位、隔离和供电恢复)、保护、控制、监控等相关功能。然后由馈线或馈线组的智能终端的SSD文件、通信相关参数和ICD文件生成一个SCD文件。根据需要的配电网自动化功能,将SSD文件中列出的功能映射到选定的智能终端支持的逻辑节点(logical node, LN)。接下来,“SCL配置有效载荷”,例如,每个终端的CID(配置的终端描述)文件将从SCD文件导出。除了项目特定的通信参数、LD(逻辑设备)实例、LN实例和数据类型的模板外,“SCL配置有效载荷”还包含所需的本地拓扑信息以及相邻终端的通信信息。

终端可以在本地或远程配置。如果对终端进行远程配置,则首先对终端进行认证参数、通信参数的配置,并利用注册和发现机制建立与新终端和远程配置工具的通信链路。然后“SCL配置有效载荷”通过配置文件管理器发送给每个终端。如果终端是在本地配置的,“SCL配置有效载荷”直接从本地配置工具上传到终端。

4.1.2 馈线配置新加单个智能终端

如果将一个终端接入一个馈线,该馈线的部分设备已被现有的终端监控,系统配置器需要根据新导入的配电自动化功能、对其他终端的数据流、通信相关参数和拓扑信息创建一个新的SCD文件。也就是说,将集成现有的SCD文件和新的单独的ICD文件用以创建一个新的SCD文件,然后这个新的终端特定的CID文件将被提取并远程或本地上传到该终端。如果引入新的终端时增加了主要设备,也需要新的SSD文件。

4.1.3 更新现有终端配置

如果系统更改对现有终端配置有影响,例如其执行的功能和通信参数,相关的主要设备,或与其他终端相关的数据流有所改变,该终端的配置可能需要更新。在这种情况下,应该使用导致对现有SCD文件进行系统更改的所有信息来更新的SCD文件。然后,将为所有受影响的终端生成更新的CID文件,并以本地或远程方式上传到这些终端。导致系统变更的信息可能由IID文件、SED文件、SSD文件、ICD文件或其他私有类型文件承载。

4.2 智能终端即插即用实现流程

基于IEC 61850对智能终端建模,使该模型在DDS协议映射,可实现终端的即插即用,其入网配置流程如图3所示。

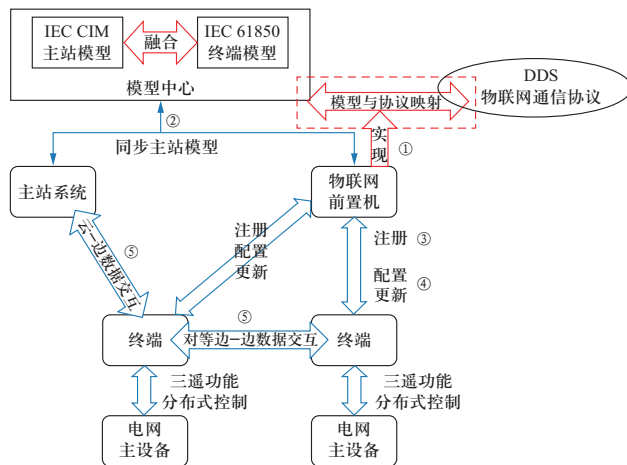


图3 终端即插即用实现流程

Fig. 3 The implementation process of terminal plug and play

1) 部署物联网前置机。完成主站模型与终端模型在物联网通信协议DDS映射,以支撑终端与主站的边-云通信,终端之间的边-边通信。

2) 关联配置。对终端进行生产配置,生成自描述文件。在物联网前置机将终端与一次设备关联,如终端在馈线组的位置及功能。

3) 自动注册。终端接入馈线组时,向物联网前置机自动发送注册文件进行注册。与主站模型进行信息比对,自动识别。前置机生成配置文件,如拓扑文件,下发到终端进行配置、重新配置或者无操作。

4) 异动更新。当主站模型发生异动时,终端自动同步主站变化后模型,识别变化,向物联网前置机请求更新。前置机将主站模型与终端模型匹配后,终端自动向物联网前置机重新发送注册申请,并发送注册文件进行注册,实现配置更新。

5) 结果通知。完成配置后,前置机向主站和所有的终端通知配置结果。

终端成功接入馈线组后,终端与主站之间运行即插即用的进程,以实现终端与主站之间的数据交互;同时同馈线组的终端互相识别,实现边-边通信网络下的实时数据交互。终端实现即插即用后,可以大大减少配电网的运维调试工作。

5 分布式馈线自动化用例

分布式馈线自动化(feeder automation, FA)是通过终端之间相互对等通信实现故障定位、隔离和供电恢复。文献[31-36]均对分布式FA的实现有所研究,其中文献[34]根据IEC 61850的信息建模原则,对分

布式FA的逻辑节点进行了研究, 但终端与主站的信息交互运用多种通信方式, 没有统一的标准通信协议和解决方案来实现高可靠性、高实时性的分布式FA、即插即用、四遥数据等功能。

本用例在开环馈线的分布式配电自动化系统(DAS)中, 馈线终端(feeder terminal unit, FTU)使用IEC 61850模型配置故障恢复功能, 使用DDS的数据分发技术进行交换故障和控制信息。在检测到永久故障后, 馈线上的相关FTU会相互通过对等通信网络交换故障检测和控制信息, 识别并隔离故障区段, 恢复非故障区段的供电服务。

如图4所示, FTU01与FTU02分别监控两个变电站的主断路器, FTU1—7监控开关S1—7, 相邻的FTU之间互相通信。假设故障发生在S1、S2和S5之间的区段F1, 由于FTU01与FTU1会检测到过流, FTU2与FTU5没有检测到过流, FTU1会判断出故障在其相邻的下游区段, 然后将开关S1打开, 并给FTU2、FTU5发送跳闸命令来跳开下游相邻开关S2、S5以隔离故障。FTU1在收到FTU2、FTU5的故障隔离确认信息后, 会广播“故障已经隔离”的信息给FTU01和FTU4来启动所有非故障区段的供电恢复。FTU01会合上主断路器CB1来恢复故障点上游非故障区段的供电服务, FTU4会合上联络开关S4来恢复故障点下游非故障区段的供电服务。

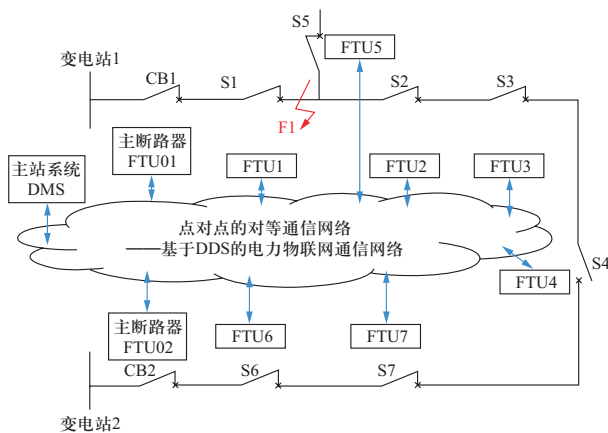


图4 开环架空线路分布式FA

Fig. 4 A distributed FA for an open loop overhead feeder

值得注意的是, 当FTU4收到“故障已经隔离”的信息后, 会给对端变电站的FTU02发送请求对端主断路器CB2电流裕度(I_{marg})的信息, 给FTU2发送请求故障点下游相邻开关S2的故障之前的负荷电流 I_{s2} , 此电流就代表了总的需要恢复的负荷电流。

如果 $I_{\text{marg}} > I_{s2}$: 说明对端主断路器有足够的电流裕度来恢复故障点下游的供电服务。于是, FTU4会合上S4来完成供电恢复操作。

如果 $I_{\text{marg}} < I_{s2}$: FTU4会请求S3的故障之前的负荷电流 I_{s3} , 并将 I_{marg} 与 I_{s3} 进行比较。

如果 $I_{\text{marg}} > I_{s3}$: FTU4会发送跳闸信号给FTU3将S3打开, 合上S4来恢复满足断路器CB2裕度的非故障区段的供电服务, 若电流裕度不足以恢复联络开关S4相邻区段的服务, FTU4不会采取任何行动。

在故障定位、隔离和供电恢复过程中, 故障点上游的馈线FTU会向配电管理系统(distribution management system, DMS)汇报故障定位和隔离的结果。主变电站内主断路器的FTU和联络开关的FTU会向DMS汇报供电恢复结果。在配电自动化系统中, 馈线上的FTU会通过对等通信网络相互交换故障和控制信息来实现故障定位、隔离和供电恢复, 不需要主站的干预。

6 结论

随着新型电力系统的构建发展, 新型配电系统安装有数量庞大的智能终端, 传统配电主站的通信效率低, 以及计算能力有限, 已无法满足新型配电系统对智能终端的分布式就地控制需求。为实现对智能终端分布式就地控制, 以适应新型配电系统的建设发展, 本文利用分布式协调控制架构提出了智能终端的分布式控制通信方案, 并分析了智能终端的入网配置流程, 即插即用实现流程, 以及故障定位、隔离与供电恢复用例。主要结论如下。

1) 分布式协调控制架构可以友好替代传统竖式架构, 它允许分布式智能节点相互交互, 使终端设备间互联互通, 提升了分布式控制的时效性和可靠性。

2) 使用IEC 61850建模技术, 使数据模型具有继承机制与自描述能力, 可以从模型层面支撑即插即用功能, 提高互操作性, 具有足够的开放性和稳定性。

3) 分布式控制需要高实时性、高可靠性的通信协议支撑。本文应用的物联网通信协议DDS, 具有低延迟、高吞吐量、丰富的QoS策略, 可实现自发现、自识别机制, 支持云-边、边-边通信, 从协议层支撑了分布式就地控制。

新型配电系统智能终端分布式控制通信方案, 为分布式控制提出了更高效、更可靠的技术架构; 使智

能终端具备即插即用功能,可减少运维工作量;在海
量分布式能源接入配电网后,可以通过智能终端高效
交互,为分布式边缘数据计算提供实时可靠的高质量
数据,为新型配电系统提供底层技术支撑。

参考文献

- [1] 江冰. 构建面向30·60的新型电力系统: 中国电力4.0的思考[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(6): 534-541.
JIANG Bing. Building new power system for 30·60—reflections on China's electricity 4.0[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(6): 534-541(in Chinese).
- [2] LIU W J, CHEN Y, DING F. Distributed generator-based distribution system service restoration strategy and model-free control methods[J]. Global Energy Interconnection, 2021, 4(2): 126-135.
- [3] 吴在军, 谢兴峰, 杨景刚, 等. 直流配电网电压控制技术综述[J]. 电力工程技术, 2021, 40(2): 59-67.
WU Zaijun, XIE Xingfeng, YANG Jinggang, et al. A review on voltage control strategies in DC distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 59-67(in Chinese).
- [4] 高厚磊, 徐彬, 向珉江, 等. 5G通信自同步配网差动保护研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 1-9.
GAO Houlei, XU Bin, XIANG Minjiang, et al. Research and application of self-synchronized differential protection for distribution networks using 5G as the communication channel[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 1-9(in Chinese).
- [5] 邓科, 侯晓松, 林湘宁, 等. 基于5G通信的电气设备监测终端性能在线评估方案[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 39-47.
DENG Ke, HOU Xiaosong, LIN Xiangning, et al. Online evaluation scheme for the performance of an electrical equipment monitoring terminal based on 5G communication[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 39-47(in Chinese).
- [6] 任汝飞, 胡旌伟, 孙秋野. 信息能源系统的边缘节点可信评估及控制策略[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(6): 552-559.
REN Rufe, HU Jingwei, SUN Qiuye. Edge-node reliability assessment and control strategy in cyber energy systems[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(6): 552-559(in Chinese).
- [7] 方如举, 葛瑜, 孙伟, 等. 基于WSNs的智能配电网通信数据传输带宽的优化分配策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(23): 88-95.
FANG Ruju, GE Yu, SUN Wei, et al. Transmission bandwidth optimal allocation strategy of communication data for a smart distribution grid based on WSNs[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(23): 88-95(in Chinese).
- [8] 徐丙垠. 未来配电网控制新技术: 分布式控制技术[J]. 供用电, 2015, 32(2): 48-49.
- [9] 武会超, 吴奕, 朱海兵, 等. 基于IEC 61850标准的配电自动化终端即插即用体系研究[J]. 供用电, 2015, 32(1): 60-63.
- [10] 顾建伟, 赵翠然, 张铁峰. 基于IEC 61850的配电终端即插即用实现技术研究[J]. 电力系统通信, 2012, 33(4): 31-35.
GU Jianwei, ZHAO Cuiran, ZHANG Tiefeng. Research on plug and play implementation technology of power distribution terminal based on IEC 61850[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2012, 33(4): 31-35(in Chinese).
- [11] 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(in Chinese).
- [12] 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): 165-170.
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): 165-170(in Chinese).
- [13] 张相国, 韩红梅. 配电终端自动发现技术的实现[J]. 科技创新, 2018(23): 177-178.
- [14] International Electrotechnical Commission. Power systems management and associated information exchange—Interoperability in the long term—Part 102: CIM-IEC 61850 harmonization: IEC TS 62361-102:2018-03[S]. 2018.
- [15] 朱越, 高媛, 刘强, 等. 面向配电物联网的配电终端公共信息模型框架[J]. 供用电, 2021, 38(7): 51-57.
ZHU Yue, GAO Yuan, LIU Qiang, et al. The frame of distribution terminal common information model facing power distribution IoT[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(7): 51-57(in Chinese).
- [16] 张庆辉, 崔勇, 马延立. 基于IEC 61850的IED配置工具研究与实现[J]. 电测与仪表, 2014, 51(2): 81-85.
ZHANG Qinghui, CUI Yong, MA Yanli. Research and realization of IED configuration tool based on IEC 61850 standard[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(2): 81-85(in Chinese).
- [17] 贾转转, 张茜, 冯建强, 等. 基于IEC 61850的配置工具的研究与实现[J]. 电器与能效管理技术, 2017(11): 69-73.
JIA Zhuanzhuan, ZHANG Qian, FENG Jianqiang, et al. Research and implementation of configuration tools based on IEC 61850[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2017(11): 69-73(in Chinese).
- [18] 邓卫, 裴玮, 齐智平. 基于IEC 61850标准的微电网信息交互[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(3): 6-11.
DENG Wei, PEI Wei, QI Zhiping. Microgrid information exchange based on IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3): 6-11(in Chinese).
- [19] 高志远, 黄海峰, 徐昊亮, 等. IEC 61850应用剖析及其发展探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 162-169.

- GAO Zhiyuan, HUANG Haifeng, XU Haoliang, et al. Discussion on applications of IEC 61850 and its development[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 162-169(in Chinese).
- [20] 陆旭, 陈影, 许中平, 等. 面向电力-通信网融合与时延优化的服务功能链部署方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(22): 43-50.
- LU Xu, CHEN Ying, XU Zhongping, et al. A delay-optimized placement method for a service function chain considering the integration of grids and public communication networks[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22): 43-50(in Chinese).
- [21] 陈兆雁, 程紫运, 徐慧慧, 等. 泛在电力物联网通信需求及技术适用性分析[J]. 内蒙古电力技术, 2020, 38(1): 1-5.
- CHEN Zhaoyan, CHENG Ziyun, XU Huihui, et al. Analysis on communication requirement and technical applicability of ubiquitous power Internet of Things[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2020, 38(1): 1-5(in Chinese).
- [22] 王毅, 陈启鑫, 张宁, 等. 5G通信与泛在电力物联网的融合: 应用分析与研究展望[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1575-1585.
- WANG Yi, CHEN Qixin, ZHANG Ning, et al. Fusion of the 5G communication and the ubiquitous electric Internet of Things: application analysis and research prospects[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1575-1585(in Chinese).
- [23] 曾凡太, 刘美丽, 陶翠霞. 物联网之智: 智能硬件开发与智慧城市建设[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [24] 张建雨, 姜睿智, 李俊刚, 等. 基于5G通信的配电网差动保护技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 17-23.
- ZHANG Jianyu, JIANG Ruizhi, LI Jungang, et al. Research on differential protection of a distribution network based on 5G communication[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 17-23 (in Chinese).
- [25] 何旭, 张国超, 代中华. 基于DDS中间件的数据分发平台的设计与实现[J]. 电子技术与软件工程, 2021(11): 45-47.
- [26] 沈卓炜, 高鹏, 许心宇. 基于安全协商的DDS安全通信中间件设计[J]. 信息安全, 2021, 21(6): 19-25.
- SHEN Zhuowei, GAO Peng, XU Xinyu. Design of DDS secure communication middleware based on security negotiation[J]. Netinfo Security, 2021, 21(6): 19-25 (in Chinese).
- [27] 魏兴云, 任祥维, 谭陆媛. 基于主题发布-订阅的分布式通信总线设计与实现[J]. 通信技术, 2021, 54(7): 1702-1708.
- WEI Xingyun, REN Xiangwei, TAN Luyuan. Design and implementation of distributed communication bus based on topic publish subscribe[J]. Communications Technology, 2021, 54(7): 1702-1708(in Chinese).
- [28] 吴翼虎, 钱宏文, 朱江伟. 嵌入式异构平台DDS中间件设计[J]. 电子与封装, 2021, 21(8): 56-61.
- WU Yihu, QIAN Hongwen, ZHU Jiangwei. Design of DDS middleware for embedded heterogeneous platform[J]. Electronics & Packaging, 2021, 21(8): 56-61(in Chinese).
- [29] 张鹏, 张伟业, 刘涛. 基于DDS的民机机电系统分布式建模与仿真研究[J]. 计算机应用与软件, 2021, 38(6): 60-65.
- ZHANG Peng, ZHANG Weiye, LIU Tao. Distributed modeling and simulation of civil aircraft electromechanical system based on DDS[J]. Computer Applications and Software, 2021, 38(6): 60-65(in Chinese).
- [30] 王鹏, 杨妹, 彭勇, 等. DDS在分布式仿真系统中的应用研究[C]// 中国计算机用户协会仿真应用分会. 全国仿真技术学术会议论文集. 2021.
- [31] 王浩之. 基于分布式控制技术的DIFA系统研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
- [32] 范开俊. 智能配电网分布式控制技术及其应用[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [33] 朱正谊, 徐丙垠, Tony YIP, 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(in Chinese).
- [34] 陈云国, 戴胜, 杨乘胜, 等. 基于IEC 61850的智能分布式馈线自动化系统建模[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 189-193.
- CHEN Yunguo, DAI Sheng, YANG Chengsheng, et al. IEC61850-based modeling of intelligent distributed feeder automation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 189-193(in Chinese).
- [35] 陈绍辉. 配电网分布式智能馈线自动化系统的通信研究[J]. 电气应用, 2021, 40(3): 44-48.
- CHEN Shaohui. Communication research of distributed intelligent feeder automation system in distribution network[J]. Electrotechnical Application, 2021, 40(3): 44-48(in Chinese).
- [36] 钱肖, 温彦军, 张文杰, 等. 基于无线通信的智能分布式馈线自动化技术[J]. 电力工程技术, 2021, 40(3): 135-140.
- QIAN Xiao, WEN Yanjun, ZHANG Wenjie, et al. Intelligent distributed FA technology based on wireless communication[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(3): 135-140(in Chinese).

收稿日期: 2021-12-20; 修回日期: 2022-03-08.

作者简介:



杨小莲

杨小莲(1994), 女, 研究方向为配电自动化、新能源发电及并网, E-mail: 867056759@qq.com.

卞蓓蕾(1971), 女, 硕士, 研究方向为电力系统自动化.

张烨华(1993), 男, 硕士, 研究方向为电力系统信息化.

赵连强(1988), 男, 研究方向为配电自动化、新能源发电及并网, E-mail: zhaolianqiang@foxmail.com.

许泰峰(1982), 男, 研究方向为电力系统与自动化. 通信作者, E-mail: 45017979@qq.com.

沈兵兵(1955), 男, 研究员级高级工程师, 教授, 研究方向为智能配用电技术, E-mail: sbb_hhdx@163.com.

(责任编辑 李锡)