

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210690

基于智能电子装置建模方法的配电终端自描述技术研究

朱吉然¹, 康童¹, 王风华², 徐波³, 王高海⁴, 陈小强⁵, 张伟伟⁶

(1. 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院, 湖南 长沙 410007; 2. 同济大学电气工程系, 上海 201804;

3. 湖南省湘电试验研究院有限公司, 湖南 长沙 410004; 4. 东方电子股份有限公司, 山东 烟台 264001;

5. 江苏圣通电力新能源科技有限公司, 江苏 镇江 212400; 6. 南瑞集团有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要: 为了实现配电终端设备点表自动生成功能, 降低配电终端设备配置和维护的成本, 提出一种基于智能电子装置的配电终端建模方法。利用面向对象建模方法分析并归纳了分布式配电终端的功能, 然后根据智能电子装置的分层结构分别建立分布式配电终端的逻辑设备、逻辑节点以及数据对象的模型。提出一种基于 XML 语言实例化配电终端模型的方法, 搭建了配电主站-终端设备信息管理平台, 验证了配电终端模型的准确性和适用性。验证结果表明, 基于智能电子装置建模方法建立配电终端的模型是可行的, 建模后的配电终端设备能够自动生成点表, 完成与主站之间的配置工作, 从而提高配电终端接入主站的效率。

关键词: 分布式配电终端; IEC 61850; 自描述模型; 智能电子装置(IED); SCL 语言

Self-description technology of a distribution terminal unit based on IED modeling method

ZHU Jiran¹, KANG Tong¹, WANG Fenghua², XU Bo³, WANG Gaohai⁴,

CHEN Xiaoqiang⁵, ZHANG Weiwei⁶

(1. State Grid Hunan Electric Power Company Limited Research Institute, Changsha 410007, China; 2. Department of Electrical

Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Hunan Xiangdian Test & Research Institute Co., Ltd.,

Changsha 410004, China; 4. Dongfang Electronics Co., Ltd., Yantai 264001, China; 5. Jiangsu Shengtong Power

and New Energy Co., Ltd., Zhenjiang 212400, China; 6. NARI Group Corporation, Nanjing 210000, China)

Abstract: To realize the automatic generation function of a distribution terminal equipment point table and reduce the cost of distribution terminal equipment configuration and maintenance, a distribution terminal modeling method based on an intelligent electronic device (IED) is proposed. This paper analyzes and summarizes the functions of a distributed distribution terminal using an object-oriented modeling method, and then establishes the models of logical devices, logical nodes and data objects of distributed distribution terminal according to the hierarchical structure of intelligent electronic devices. A method of instantiating a distribution terminal model based on the XML language is proposed and a distribution master terminal equipment information management platform is built to verify the accuracy and applicability of the distribution terminal model. The verification results show that it is feasible to establish the distribution terminal model based on the IED modeling method, and the distribution terminal equipment after modeling can automatically generate the point table to complete the configuration with the master station, thereby improving the efficiency of distribution terminal access to the master station.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 5216A019000R).

Key words: distributed DTU; IEC 61850; self-description model; IED; SCL

0 引言

配电网作为泛在电力物联网的基础和纽带, 对

广大群众生产生活产生了巨大影响^[1-8]。然而我国配电网建设处于初级阶段, 相对于输电网和变电站的建设投入较少。配电网自动化建设面临较多问题, 配网停电、线路事故、操作人员人身安全事故频发。配电网一旦出现故障, 查找并排除故障的时间较长, 对企业生产和居民生活产生巨大影响^[9-11]。

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助(5216A019000R); 国网湖南省电力有限公司科技项目资助(5216A5200008)

配电设备中的配电环网柜在整个电力系统中起着为用户配电和供电的重要作用,也是配电网建设中的一个极为重要的组成部分^[12-13]。而配电终端(Distribution Terminal Unit, DTU)是配电环网柜中最为重要的单元之一。随着配电综合自动化系统的形成,配电终端乃至配电环网柜的功能逐渐在拓展和完善,要解决传统环网柜中存在的很多缺陷,需要简化其内部各模块之间的结构,因此对配电终端进行深入研究显得尤为重要^[14-16]。

配电终端在配电网络中数量多、分布广,对配电网的运行和控制起着基础性的关键作用,由于环网柜对其依赖性强,配电终端的功能、技术以及可靠性直接影响配电和供电的稳定性^[17-19]。同时,传统的配电终端需要通过人工配置点表,这大大增加了配电网运行和维护的成本和难度。配电终端内部功能部件过于冗杂,部分功能与环网柜中其他单元的功能重复,且各功能模块之间的配合没有达到优化组合^[20-22]。因此,为了降低配电终端配置和维护的成本,进一步使环网柜更加智能化、高可靠化,本文将对配电终端的自描述功能展开研究。

近年来,有相关研究提出了一种全息感知智能融合环网柜,其具备全息感知和边缘计算能力,能够满足不同终端的即插即用、拓扑自动分析上传等功能^[23-26]。该环网柜采用分布式 DTU,不同于传统的集中式 DTU,分布式 DTU 由公共单元和若干间隔单元共同组成,公共单元负责接收并处理配电站发送的信息和命令,并对间隔单元进行遥控操作,间隔单元负责采集监测各馈线。要满足智能融合环网柜的上述功能,实现分布式 DTU 的信息自描述和即插即用功能十分重要^[27]。文献[28]提出基于 IEC61850 标准的配电网分布式电源的信息交互机制,提升了分布式电源并网运行的有效性。文献[29]提出了采用扩展的 IEC 60870-5-104 协议实现配电站与配电终端之间信息传递的方法,但没有给出建立完善的配电终端模型的方法。相关研究对于分布式 DTU 自描述和即插即用技术的研究少之又少。

为实现环网柜中 DTU 自动配置和维护,本文着重研究分布式 DTU 的自描述模型和即插即用技术。首先分析 IEC61850 的建模方法,总结归纳分布式 DTU 的功能;然后基于变电站配置描述语言(Substation Configuration Description Language, SCL)提出相应智能电子装置(Intelligent Electronic Device, IED)的配置方法,实现了 DTU 的自描述;最后根据自描述模型实现分布式 DTU 在环网柜中的点表

自生成和即插即用功能,优化了配网结构,设备运行信息上送实现了配电可靠性和稳定性的提升。

1 配电终端自描述模型建模

要实现配电终端自描述和即插即用,需要根据 IEC61850 对配电终端设备进行建模,也需要配电站具备识别终端并配置订阅信息的能力。本节首先对分布式 DTU 的各单元进行功能梳理和分析,并搭建配电终端的自描述模型。

1.1 分布式 DTU 的功能梳理

传统 DTU 可实现实时检测线路电压、线路电流、零序电流、设备状态等运行及故障信息,并完成三遥功能。与传统 DTU 不同,分布式 DTU 由两部分组成,分别是公共单元和间隔单元。公共单元主要具备对下通信、对上通信、数据存储、数据转发、维护、日志、通信以及拓扑结构等功能。间隔单元具备故障复位、自行诊断功能,可实现三相电压及零序电压、各回路三相电流及零序电流采集功能,具备三遥综合处理、故障处理、保护、对时定位、通信和线损计算等功能。

一个完整的功能应包含 IEC61850 标准的各项要求,并由若干逻辑节点(Logical Node, LN)组成。每个智能电子装置都包含一个或多个服务器,每个服务器包含若干逻辑设备(Logical Device, LD),每个逻辑设备包含若干逻辑节点,每个逻辑节点包含若干数据对象。逻辑节点表示物理装置中能够代表某一分解的功能或者执行某一操作的对象。逻辑节点是通过抽象功能的特征点而形成的对象。智能电子装置的实际运行流程可通过逻辑分析抽象为若干逻辑节点的组合,即为逻辑设备。数据对象包含某一功能或者执行某一操作的具体数据,可通过服务器访问相关数据。

1.2 分布式 DTU 的逻辑节点

根据功能划分对分布式 DTU 的逻辑节点进行匹配和选取。对不满足的逻辑节点,可适当扩充或者创建新的逻辑节点,逻辑节点的命名方式遵循标准中的定义。

每个逻辑设备都需要包括公用逻辑节点 LPHD 和 LLN0, LPHD 为物理装置信息,负责记录物理装置的铭牌信息、健康状态等信息,LLN0 负责记录物理装置中 IED 的相关数据,包括装置标识、装置自检报文等。

除了上述公用逻辑节点,公共单元和间隔单元的逻辑设备分别具备不同的逻辑节点。具体说明见表 1 和表 2。

表 1 公共单元的逻辑节点说明

Table 1 Descriptions of common unit's logical nodes

逻辑节点	逻辑节点名	描述
湿度	THUM	控制环网柜内除湿器
通用过程 I/O	GGIO	获取故障信号; 设置通用定值
电池	ZBAT	监测电池状态
测量	MMXU	测量三相系统的电压、电流、频率
装置状态	MFTU	检测物理装置的状态
隔离开关	XSWI	获取开关的位置信息
延时过电流	PTOC	重载报警, 重载报警时间, 重载定值
过电压	PTOV	过电压保护
欠电压	PTUV	定时欠电压保护
开关控制器	CSWI	控制过程层之上的分合条件
电压传感器	TVTR	对应环网柜中物理装置
自动重合闸	RREC	获取动作信号, 监测自动重合状态

表 2 间隔单元的逻辑节点说明

Table 2 Descriptions of bay unit's logical nodes

逻辑节点	逻辑节点名	描述
湿度	THUM	检测环网柜的湿度信息
温度	STMP	检测环网柜温度信息
通用过程 I/O	GGIO	投入、退出某个保护和控制功能
测量	MMXU	测量三相系统中的功率
序值和不平衡	MSQI	计算电路的序值
开关控制器	CSWI	控制断路器
断路器	XCBR	控制断路器相关信息
隔离开关	XSWI	开关地刀合位, 开关双位置输出
气体绝缘介质	SIMG	监测 SF6 气体压强
计量	MMTR	计算电能, 用于计费
故障指示	SFPI	记录故障相关信息
扰动记录	RDRE	记录电压电流波形
延时过电流	PTOC	延时过电流保护
电流互感器	TCTR	对应环网柜中物理装置

图 1 为各逻辑节点之间的信息交互图。逻辑节点 IHMI 和 ITMI 属于站控层, 没有具体数据对象。间隔层负责实现测量、保护和控制等功能, 具体功能抽象为逻辑节点 MMXU、MSQI、PTOC 等。DTU 通过 TVTR 和 TCTR 采集环网柜中各设备的电压和电流值, 再通过 MMXU、MSQI 等逻辑节点计算相应电气量, 并上报至站控层实现其对配电端的监测。

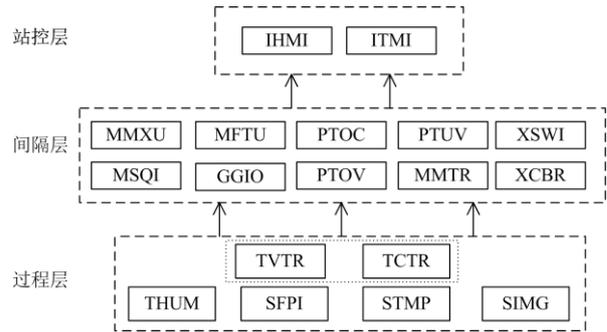


图 1 DTU 的信息交互结构

Fig. 1 Information interaction structure of DTU

由表 1、表 2 可知, 公共单元和间隔单元中存在部分相同的逻辑节点, 但该逻辑节点中包括的数据对象有所不同。例如, 公共单元中逻辑节点 THUM 负责监测环网柜中除湿器的状态, 而间隔单元中该逻辑节点则负责采集环网柜中的湿度值。

根据对 DTU 功能的分析, 选取上述若干逻辑节点, 按照 IEC61850 规定的 IED 分层信息模型, 可将物理装置的 DTU 分成两大部分分别搭建模型, 即按照公共单元和间隔单元进行分类建模。分布式 DTU 的信息模型如图 2 所示。

1.3 数据对象建模

数据对象是不同 IED 之间进行通信和信息交互的实质内容。若要完善 IED 模型, 需要进一步对逻辑节点的数据对象进行建模。选取公共单元和间隔

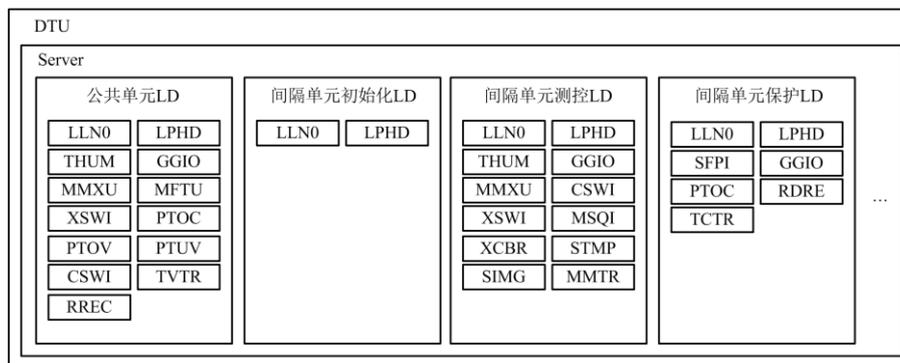


图 2 分布式 DTU 信息模型

Fig. 2 Distributed DTU information model

单元共同的逻辑节点 GGIO 为例，对其数据对象进行建模。

逻辑节点 GGIO 在标准中充当通用装置或者辅助装置的功能。在实际应用中，缺乏描述模拟输出、辅助继电器输出的逻辑节点，同时需要增加一些输入输出代表未定义的装置，如报警器等，然而 IEC 61850 中现有的逻辑节点并未覆盖上述功能，为解决上述问题，本文对逻辑节点 GGIO 的属性内容进行拓展并分类建模。

公共单元 GGIO 的属性对象 Mod、Beh、Health、NamPit 分别存储运行模式、性能、健康状况以及铭牌信息；通过 PlsTmms 控制间隔单元的开入遥信确认时间；由传感器 TVTR 和 TCTR 获取状态信息并由 TURmt 和 Alm 负责装置报警、对时异常等功能。公共单元 GGIO 的数据对象的详细建模如表 3 所示。

表 3 公共单元中 GGIO 的详细建模

Table 3 Detailed modeling of GGIO in common unit

分类	属性名	属性类型	说明	M/O
公共逻辑节点信息	Mod	INC	模式	M
	Beh	INS	性能	M
	Health	INS	健康状况	M
	NamPit	LPL	铭牌	M
控制	PlsTmms	INC	遥信确认时间	O
	TURmt	SPS	远方	O
	状态信息	Alm1	SPS	装置报警
Alm2		SPS	对时异常	O

间隔单元对应的数据对象与公共单元的数据对象之间有一定区别。其中，SPCSO 可实现单点可控状态的输出，SwHprtAct 控制开关的保护动作；状态信息分类包括 RmtCtlLck、PrtTolRst、SwHRmt。间隔单元 GGIO 的数据对象的详细建模如表 4 所示。

表 4 间隔单元中 GGIO 的详细建模

Table 4 Detailed modeling of GGIO in bay unit

分类	属性名	属性类型	说明	M/O
公共逻辑节点信息	Mod	INC	模式	M
	Beh	INS	性能	M
	Health	INS	健康状况	M
	NamPit	LPL	铭牌	M
控制	SPCSO	SPC	单点可控状态输出	O
	ArSwHOff	BSC	操作电源空开的断开	O
	SwHprtAct	BSC	开关本体保护动作	O
状态信息	RmtCtlLck	SPS	挂牌/摘牌(闭锁)	O
	PrtTolRst	SPS	保护总复归	O
	SwHRmt	SPS	开关远方	O

注：INC 为可控的整数状态(controllable integer status)；INS 为整数状态(integer status)；LPL 为逻辑节点铭牌(logical node name plate)；SPS 为单点状态信息(single point status)；SPC 为可控单点型(controllable single point)；BSC 为二进制可控模拟过程值(binary controllable analogue process value)；M 为必选项；O 为可选项。

在建模过程中，公共单元和间隔单元均选用了逻辑节点 GGIO，但逻辑节点的数据对象却不同。数据对象由逻辑节点对应的功能决定，即使为同一逻辑节点，在表示不同功能时所包含的数据对象也存在一定区别。

对分布式 DTU 的不同单元分别进行建模，避免了集中式 DTU 建模时逻辑节点功能覆盖的缺点，简化了各逻辑节点之间的连接方式和交互信息。

2 IED 自描述的实现

2.1 SCL 语言

IEC61850 标准规定了变电站 IED 的配置描述语言，即为变电站配置描述语言 SCL。基于可扩展标记语言(Extensible Markup Language, XML)的 SCL 语言规定并描述了 IED 配置和参数、通信系统配置以及彼此之间关系的文件格式。利用 SCL 语言形成的文件能够在不同厂家的 IED 工程平台和通信系统平台上实现互操作，具备不同信息结构的终端都能够与主站进行信息交互，使终端具备即插即用功能。

SCL 语言可以对以下三部分进行描述，分别是通信系统、应用层通信原理和 IED 相关信息。SCL 语言可描述说明各 IED 与子网络通信的访问节点；能够规范数据组成数据集、IED 触发服务类型以及 IED 信息交互的原理和机制；能够详细描述 IED 配置的逻辑设备、逻辑节点、相关的数据对象和数据属性以及彼此之间的关系。SCL 语言的主要内容如图 3 所示。

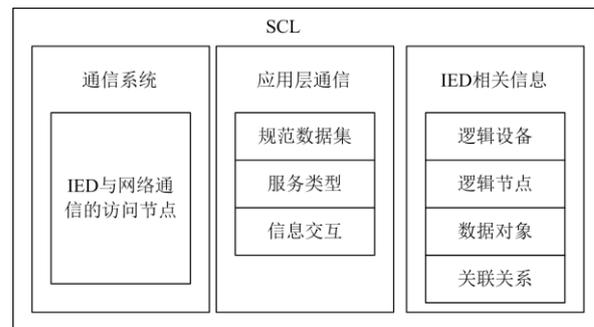


图 3 SCL 语言的主要内容

Fig. 3 Main content of SCL language

针对不同对象，SCL 规定了不同的配置文件来完成相应的配置工作，可实现不同设备交换配置数据功能。具体包括系统规范描述文件(System Specification Description, SSD)，变电站配置描述文件(Substation Configuration Description, SCD)，IED 能力描述文件(IEC Capability Description, ICD)，

IED 配置描述文件(Configured IED Description, CID)、实例化智能电子设备描述文件(Instantiated IED Description, IID)、系统交换描述文件(System Exchange Description, SED)。

2.2 配电终端自动配置机制

传统配电终端的配置需要人工写入点表信息, 配电主站在获取配电终端信息之后, 才能够建立与配电终端之间的通信。建立配电终端自描述模型能够代替传统人工写入点表这一步骤, 为实现配电终端自动配置奠定基础。

图 4 为各配置文件之间的关联关系。文件均为.xml 格式, 区别是文件所描述的内容。SSD 文件能够描述变电站一次设备的拓扑图。ICD 文件由设备直接提供, 若设备无法提供, 则可由 IED 配置工具生成。若将 ICD 文件实例化, 并且加入通信相关内容, 则其变为 CID 文件。系统配置工具负责收集其他文件, 生成 SCD 文件, 同时也可以发出 CID 文件到所连接的设备。对系统配置工具配置过的文件实现实例化即可得到 IID 文件, IID 文件可对 SCD 文件中相应部分进行更新。

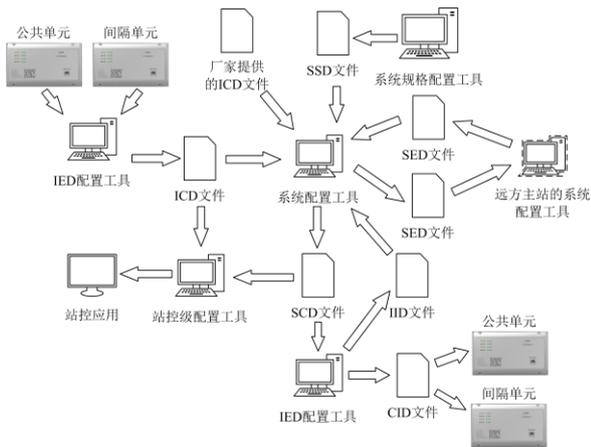


图 4 配置文件之间的关联关系

Fig. 4 Associations between configuration files

配电终端根据统一的自描述模型, 利用 IED 配置工具生成具备统一标准的 ICD 文件, 并将其发送至配电主站, ICD 文件中包含配电终端的点表信息。系统配置工具收集 ICD 文件, 生成 SCD 文件, 在获取配电终端点表信息后, 生成 CID 文件发回至配电终端, 实现了配电终端与配电主站之间的自动配置功能。

2.3 ICD 文件的配置

ICD 文件可描述 IED 的配置和模型结构, 如服务器、逻辑设备、逻辑节点、数据对象等。完整的 ICD 文件包括头、通信、IED 以及数据类型模板,

其中 IED 含有若干服务, 并通过服务接入点获取服务器信息。

ICD 文件结构如图 5 所示。每一个 ICD 文件包括一个头文件, 负责记录 SCL 的版本信息、修订内容、开发工具、模板类型等信息。通信部分包含子

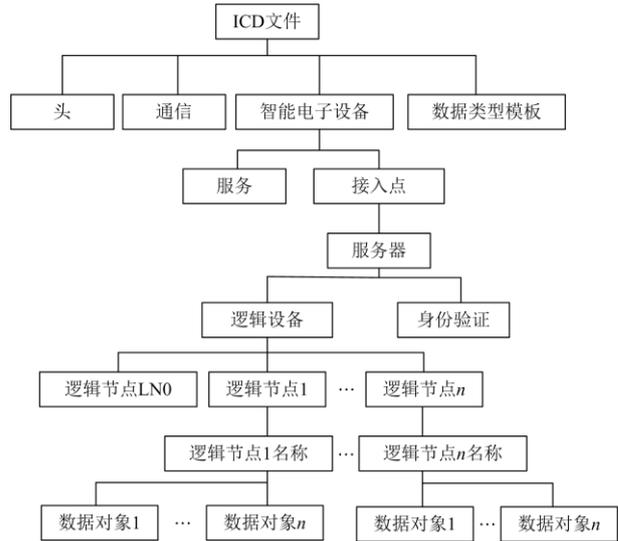


图 5 ICD 文件结构

Fig. 5 Structure of ICD file

网、访问节点和地址。智能电子设备部分介绍了其模型信息和信息交换模型。本文第一部分就根据模型信息搭建了相关的自描述信息模型, 其中 LN 为不同 IED 信息交互的实体, IED 通过访问节点与外界通信。数据类型模板定义数据对象中的数组类型、数据属性类型、数据对象类型等信息。

要实现分布式 DTU 接入的自描述功能, 需要基于对分布式 DTU 的逻辑设备 LD 和逻辑节点 LN 的建模内容进行 SCL 语言的配置并生成相应文件。通过 SCL 语言实例化分布式 DTU 的各个逻辑设备和逻辑节点, 在此基础上确定各逻辑节点的数据对象和数据属性。

本文以分布式 DTU 中选取的逻辑节点 GGIO 为例, 利用 SCL 语言实例化逻辑节点下的数据对象和数据属性。图 6 为以逻辑节点 GGIO 为重点的自描述信息模型结构图, 图中只表示部分数据对象以及数据属性, 此外本文搭建的信息模型中其他逻辑节点并未表示出。逻辑节点 GGIO 中, 装置报警由数据对象 Alm 负责, 通过 Alm.stVal 上传报警信息。开入 1 的遥信确认时间由数据对象 BO1PlsTmms 确认, 通过属性 BO1PlsTmms.setVal 上传状态信息, 遥信确认时间的最小值和最大值分别对应 minVal 和 maxVal; 步长值通过 stepSize 获取。其他开入的

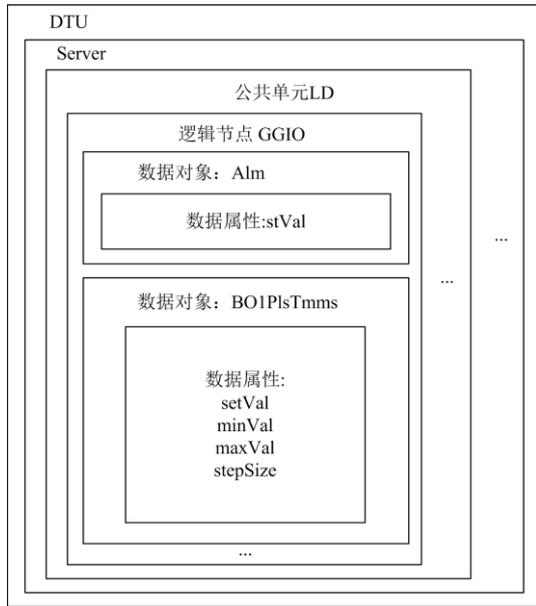


图 6 数据对象的模型

Fig. 6 Model of data object

遥信确认时间的数据对象类似于 BO1PlsTmms。

利用 SCL 语言对上述模型中的内容进行描述。逻辑节点的数据对象和数据属性在数据类型模板中有部分定义，未被定义部分可按照 IEC61850 标准进行扩展。相关的 XML 格式如下：

```
<LN desc="故障信号 1" inst="1" lnClass="GGIO"
lnType="NRR_GGIO_ALM_V2.00_NR__V1.00">
  <DOI desc="装置报警" name="Alm1">
    <DAI name="stVal" sAddr="ZZZJ:B01.dsp.vbi_alm">
      <Private type="IEC_60870_5_104">
        <Address casdu="1" ioa="6" ti="30"/>
      </Private>
    </DAI>
  </DOI>
  <DOI desc="对时异常" name="Alm2">
    <DAI name="stVal"
sAddr="ZZZJ:B01.SyncTime.pps_error">
      <Private type="IEC_60870_5_104">
        <Address casdu="1" ioa="7" ti="30"/>
      </Private>
    </DAI>
  </DOI>
</LN desc="通用定值" inst="2" lnClass="GGIO"
lnType="NRR_GGIO_SG_V2.00_P96TMS__V1.00">
  <DOI desc="开入 1 遥信确认时间"
name="BO1PlsTmms">
    <DAI name="setVal" sAddr="PA:32816">
```

```
<Private type="IEC_60870_5_104">
<Address casdu="1" ioa="32775" ti="203"/>
</Private>
</DAI>
<DAI
name="minVal"sAddr="ZZCS:B05.NR4501_Din.Dopt_s
et_time">
  <Val>0</Val>
</DAI>
<DAI name="maxVal"
sAddr="ZZCS:B05.NR4501_Din.Dopt_set_time">
  <Val>500000</Val>
</DAI>
<DAI name="stepSize"
sAddr="ZZCS:B05.NR4501_Din.Dopt_set_time">
  <Val>1</Val>
</DAI>
</DOI>
```

2.4 自描述功能的实现

配电终端的 ICD 文件可通过 IED 配置工具生成，也可由设备厂家直接提供。配电终端发起注册请求时，配电终端的通信模块将 ICD 文件上传。配电主站的通信模块接收到注册请求后，通过解析该文件获取配电终端的设备信息，包括点表以及配电网拓扑图等，进一步自动生成电网拓扑。配电主站与配电终端设备之间互相识别并建立连接的步骤如图 7 所示。



- ①：请求注册，上传 ICD 文件
- ②：解析文件，获取终端信息
- ③：选择订阅，下发配置信息
- ④：调整信息转发表，与主站建立连接

图 7 主站与设备连接的步骤

Fig. 7 Steps for connecting the master station to the equipment

任何需要接入主站的配电终端设备都需要生成统一格式的文件。在统一的文件格式下，终端才能够实现自动注册，且配电主站才能够对所有的终端进行识别并响应注册请求。满足上述条件的配电终端具备自描述和即插即用的功能。

3 终端接入配电主站实例

基于上述研究内容，搭建了一个配电主站-终

端设备信息管理平台, 并在长沙市高可靠性示范区应用。通过该信息管理平台能够查看当前主站下的终端以及相关点表信息。

配电主站-终端设备信息平台的界面图如图 8 所示。新的配电终端设备发送注册请求的流程如图 9 所示。



图 8 配电主站-终端设备信息管理平台

Fig. 8 Information management platform between distribution master station and terminal equipment



(a) 新设备等待注册



(b) 主站接收注册请求

图 9 配电终端设备发送注册请求

Fig. 9 Distribution terminal equipment sends registration request

该平台可对主站下的终端设备信息进行管理, 能够接受终端设备的注册请求。与主站建立连接的终端设备的点表信息可通过该应用查看。当新的终端设备请求与主站建立连接时, 系统管理员可通过

终端注册界面对终端设备的注册请求进行响应。完成与主站的连接后, 即可在主站管理界面根据关键词信息查找相关终端设备。与主站建立连接后可通过平台查询相关设备, 如图 10 所示。



图 10 查询终端设备的界面

Fig. 10 Interface for querying terminal equipment

由上述结果可知, 基于 IED 建模方法建立的分布式配电终端自描述模型是有效的, 该模型能够使配电终端自动生成点表, 具备自描述能力, 这大大降低了配置和维护配电终端的成本, 提升了配电网系统中环网柜的智能性和可靠性。

4 结论

为提高配电环网柜中配电终端设备的可靠性, 本文提出了一种基于 IED 的配电终端建模方法, 建立了分布式配电终端的自描述模型, 实现了配电终端的自动配置功能。基于 XML 语言对配电终端自描述模型进行描述, 实现了配电终端设备的自描述功能。搭建了配电主站-终端设备信息管理平台, 对主站中的终端设备信息进行可视化操作, 验证了该建模方法在点表自动生成功能中的有效性和可行性, 为配电主站远程配置和维护奠定基础。

参考文献

[1] 李少石, 王主丁, 曾海燕, 等. 一流配电网精益化规划与管理提升策略探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 165-176.
 LI Shaoshi, WANG Zhuding, ZENG Haiyan, et al. Discussion on lean planning and management improvement strategies for first-class distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 165-176.

[2] 江秀臣, 刘亚东, 傅晓飞, 等. 输配电设备泛在电力物联网建设思路与发展趋势[J]. 高电压技术, 2019, 45(5): 1345-1351.
 JIANG Xiuchen, LIU Yadong, FU Xiaofei, et al. Construction ideas and development trends of

- transmission and distribution equipment of the ubiquitous power internet of things[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5): 1345-1351.
- [3] 秦博雅, 刘东. 电网信息物理系统分析与控制的研究进展与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 5816-5827.
QIN Boya, LIU Dong. Research progresses and prospects on analysis and control of cyber-physical system for power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 5816-5827.
- [4] 章博, 刘晟源, 林振智, 等. 高比例新能源下考虑需求侧响应和智能软开关的配电网重构[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 86-94.
ZHANG Bo, LIU Shengyuan, LIN Zhenzhi, et al. Distribution network reconfiguration with high penetration of renewable energy considering demand response and soft open point[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 86-94.
- [5] 谢康胜, 李华强, 王俊翔, 等. 考虑输配电网协同的源荷储资源统筹规划[J]. 电力建设, 2021, 42(9): 41-52.
XIE Kangsheng, LI Huaqiang, WANG Junxiang, et al. Overall planning of source-load-storage resources considering coordination in transmission and distribution network[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(9): 41-52.
- [6] 蔡佳铭, 祝燕萍, 刘波. 协调源荷不确定性的配电网扩展规划[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(3): 67-75.
CAI Jiaming, ZHU Yanping, LIU Bo. Distribution network expansion planning coordinating sourceload uncertainty[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(3): 67-75.
- [7] 黄少雄, 王璨, 孔庆竹, 等. 含短期预测的光伏配电网智能调压策略[J]. 热力发电, 2020, 49(7): 21-27.
HUANG Shaoxiong, WANG Can, KONG Qingzhu, et al. Intelligent voltage regulation strategy of photovoltaic distribution network considering short-term forecasting[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(7): 21-27.
- [8] 卞艺衡, 别朝红, 黄格超, 等. 弹性配电网分布式可再生能源电源最优配置模型[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(3): 213-221.
BIAN Yiheng, BIE Zhao hong, HUANG Gechao, et al. Optimal renewable energy distributed generators placement for resilient distribution system[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(3): 213-221.
- [9] 苏韵掣, 刘俊勇, 刘友波, 等. 大规模中压配电网可靠性建设改造措施优选模型及求解方法[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 201-210.
SU Yunche, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. Optimization model of selecting power supply reliability reconstruction measures in large-scale MV distribution network and its solution method[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 201-210.
- [10] 何正友, 李波, 廖凯, 等. 新形态城市电网保护与控制关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(19): 6193-6207.
HE Zhengyou, LI Bo, LIAO Kai, et al. Key technologies for protection and control of novel urban power grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(19): 6193-6207.
- [11] ALVAREZ-HERAULT M C, LABONNE A, TOURÉ S, et al. An original smart-grids test bed to teach feeder automation functions in a distribution grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 373-385.
- [12] 李桐, 王刚, 刘扬, 等. 配电网智能终端信息安全风险分析[J]. 智慧电力, 2020, 48(9): 118-122.
LI Tong, WANG Gang, LIU Yang, et al. Information security risk analysis of intelligent terminal in distribution network[J]. Smart Power, 2020, 48(9): 118-122.
- [13] 王寅超, 丁银梅, 李卫彬, 等. 基于 COMSOL 仿真分析的环网柜湿度控制[J]. 中国电力, 2020, 53(12): 206-213.
WANG Yinchao, DING Yinmei, LI Weibin, et al. Humidity control of rmu based on COMSOL simulation analysis[J]. Electric Power, 2020, 53(12): 206-213.
- [14] 吕军, 盛万兴, 刘日亮, 等. 配电网物联网设计与应用[J]. 高电压技术, 2019, 45(6): 1681-1688.
Lǚ Jun, SHENG Wanxing, LIU Riliang, et al. Design and application of power distribution internet of things[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(6): 1681-1688.
- [15] 刘小春, 伍惠铖, 李映雪, 等. 配电自动化终端配置的双层优化模型[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 136-144.
LIU Xiaochun, WU Huicheng, LI Yingxue, et al. A bi-level optimization model of distribution automation terminal configuration[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 136-144.
- [16] 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.
- [17] 许寅, 和敬涵, 王颖, 等. 韧性背景下的配网故障恢复研究综述及展望[J]. 电工技术学报, 2019, 34(16): 3416-3429.
XU Yin, HE Jinghan, WANG Ying, et al. A review on distribution system restoration for resilience enhancement[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(16): 3416-3429.

- [18] LEI Hangtian, SINGH C, SPRINTSON A. Reliability modeling and analysis of IEC 61850 based substation protection systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(5): 2194-2202.
- [19] 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.
- [20] 陈锐智, 李析鸿, 陈思羽, 等. 基于 EPSILON 约束法的配电自动化设备多目标优化布点模型[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(24): 51-58.
CHEN Ruizhi, LI Xihong, CHEN Siyu, et al. Multi-objective layout optimization model of distribution automation equipment based on the EPSILON constraint method[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(24): 51-58.
- [21] 刘玉玺, 欧阳红, 李刚, 等. 基于 IEC-CIM 的营配网末端设备公共信息模型设计[J]. 智慧电力, 2019, 47(2): 75-81.
LIU Yuxi, OUYANG Hong, LI Gang, et al. Common information model design for integrated marketing and distribution terminal device based on IEC-CIM[J]. Smart Power, 2019, 47(2): 75-81.
- [22] 李鹏, 范伟, 王罡, 等. 智能变电站 VLAN 配置表自动生成技术的研究和应用[J]. 电力工程技术, 2018, 37(1): 122-129, 135.
LI Peng, FAN Wei, WANG Gang, et al. Research and application of VLAN configuration tables automatic generation technology in smart substation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(1): 122-129, 135.
- [23] 何奉禄, 陈佳琦, 李钦豪, 等. 智能电网中的物联网技术应用与发展[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 58-69.
HE Fenglu, CHEN Jiaqi, LI Qin hao, et al. Application and development of internet of things in smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 58-69.
- [24] CHEN Haoyong, WANG Xiaojuan, LI Zhihao, et al. Distributed sensing and cooperative estimation/detection of ubiquitous power internet of things[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1): 1-8.
- [25] 朱国防, 沈培锋, 王勇, 等. 基于拓扑片的智能分布式馈线拓扑分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 152-157.
ZHU Guofang, SHEN Peifeng, WANG Yong, et al. Dynamic identification method of feeder topology for distributed feeder automation based on topological slices[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 152-157.
- [26] 孙浩洋, 张冀川, 王鹏, 等. 面向配电物联网的边缘计算技术[J]. 电网技术, 2019, 43(12): 4314-4321.
SUN Haoyang, ZHANG Jichuan, WANG Peng, et al. Edge computation technology based on distribution internet of things[J]. Power System Technology, 2019, 43(12): 4314-4321.
- [27] 陈云国, 戴胜, 杨乘胜, 等. 基于 IEC61850 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, 222.
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, 222.
- [28] 谢婧, 叶祺, 陆昱, 等. 分布式电源即插即用信息交互机制研究[J]. 供用电, 2019, 36(10): 52-60.
XIE Jing, YE Qi, LU Yu, et al. Research on plug and play information interaction mechanism of distributed generators[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(10): 52-60.
- [29] 徐迅, 梅军, 钱超, 等. 基于 IEC 60870-5-104 规约扩展的配电终端自描述功能实现方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 128-133.
XU Xun, MEI Jun, QIAN Chao, et al. Research method for implementation of the self-describing function of distribution terminals based on the extended IEC 60870-5-104 protocol[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 128-133.

收稿日期: 2021-06-10; 修回日期: 2021-09-15

作者简介:

朱吉然(1985—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为智能配电网相关研究。E-mail: zhujiran040356@163.com

(编辑 葛艳娜)