

基于业务模型的智能变电站配置文件智能校核技术研究与应用

张 韬¹, 胡紫豪², 黎鹏程¹, 丁 凯¹, 皮杰明¹

(1. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096; 2. 国网江西省电力有限公司, 江西 南昌 330096)

摘 要:针对智能变电站配置文件(substation configuration description, SCD)校核效率低、版本管理混乱、人工依赖性强等问题,文中提出了一种基于业务模型的智能校核技术,结合复杂网络分析和Louvain社区发现算法,解析SCD文件构建继电保护业务模型,设计可通过人工经验自学习的虚回路校核经验库,支持自动识别回路多余、缺失、错误等典型问题;开发配置文件回读接口,通过循环冗余校验(cyclic redundancy check, CRC)实现装置配置文件与SCD文件的一致性验证。实际工程应用表明,该技术可显著提升配置文件审查效率,有效排查铁路线路闭锁回路缺失、母线合并单元延时错误等典型隐患,并在500 kV新建工程中验证了投运文件的一致性保障能力。

关键词:智能变电站;配置文件校核;业务模型;SCD文件;虚回路;Louvain社区发现算法

中图分类号:TM 7432 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-348X(2025)02-0015-06

0 引言

智能变电站应用以太网和光纤取代了常规变电站的二次回路,采用统一信息模型,实现二次设备间的信息交互^[1]。配置文件作为智能变电站二次系统联系的核心载体,其运行状态对整个系统的稳定性和安全性有着重要的影响^[2-3]。智能变电站在建设和运维过程中,配置文件的管理面临诸多挑战,存在建设期间配置文件频繁修改、离线存储版本混乱,装置下装配置文件与审查的配置文件不一致的情况,难以追溯和确认文件的准确性^[4];缺乏有效的校核手段,配置文件可视化程度低,文件内容抽象,运维人员难以直观理解设备配置和连接关系,人工校核效率低下且容易出错,给故障诊断和维护工作带来困难^[5];因配置文件问题,导致保护异常动作事件也时有发生^[6-8]。因此,开展智能变电站配置文件正确性和一致性管控校核技术研究,对于保障电力系统稳定运行至关重要。

国外相关研究主要聚焦于IEC 61850标准框架的理论层面^[9],但在配置文件的实际工程应用管控领域仍研究较少。文献[10]的调研表明,国外智能变电

站运维人员普遍缺乏对SCD文件的深层解析能力,日常操作中仅能执行基础性浏览,难以实现配置数据的功能性挖掘;文献[11]针对配置描述语言(substation configuration description language, SCL)的识别问题,提出了基于深度优先遍历的识别策略,试图缓解文件应用效率低下的问题;文献[12]则揭示了SCD文件在管理便捷性上的固有缺陷,指出其难以适配智能变电站高效运维需求,以上文献均未提供系统性改进方案。

国内学者在配置文件可视化方面做了大量研究,将配置文件中的复杂数据和信息以图形化的方式展示,形成直观的可视化界面,使运维人员能够更加直观地观察设备配置和运行状态,对故障问题做到精准识别与快速处理^[13-14];配置文件管控方面,基于流程管理和解耦方法,实现了文件的分段管理和并行修改,实现配置文件的流转管理^[15-16];配置文件校核方面,部分学者基于知识图谱、自定义规则库、CRC码、SCL模型,提出了一些配置文件校核理论方法,但对其方法的实际应用未进行有效验证^[17-20]。常规虚回路校核工具难以实用化的主要原因在于特定业务规则编码的技术路线,与不同时期变电站保护配置及回

收稿日期:2025-03-15

作者简介:张韬(1995),男,硕士,工程师,从事电力系统继电保护与控制研究。

路的差异化、多元化、多样性不匹配。

对此,文中提出了一种基于业务模型的配置文件智能校核技术,通过SCD文件可视化新视角的研究,更加直观地展示智能变电站的继电保护配置信息,研究模型自适应特征匹配技术,实现不同变电站分布式训练与特征集中应用,实现配置文件准确性校核,开发一致性校核接口与工具,并开展验证应用。

1 配置文件基本原理

1.1 配置文件结构组成

SCD文件作为智能变电站配置描述文件,包含了全站二次设备的配置信息,是虚回路配置和校核的基础。完整的变电站配置描述文件由Header、Substation、Communication、IED(Intelligent Electronic Device)、Data Type Templates五部分组成,文件的各节点以树形层次结构组织起来,如图1所示。Header部分包含SCD文件标识文件版本、配置工具、文件修改历史记录等信息;Substation主要描述变电站的功能结构标识一次设备及其之间的电气连接关系;Communication部分定义了通信子网中IED接入点的相关通信信息;IED1~n部分描述了IED的配置情况;Data Type Templates部分是可实例化的数据类型模板。

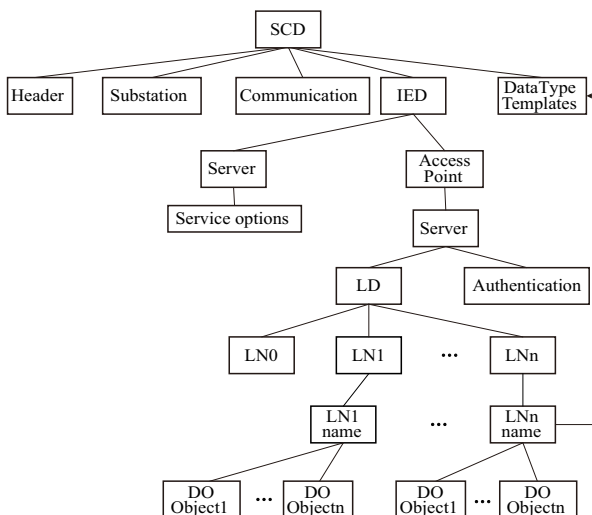


图1 变电站配置描述文件(SCD)结构示意图

1.2 配置文件连接关系

在SCD文件中,一个SV/GOOSE报文的完整配置包括三个部分:控制块参数(sampled value control/gse control)、通信参数(SMV/GSE)、数据集配置(Da-

taSet)。通过比对IED名称、访问点名称、逻辑设备实例名(LDinst)和控制块名称,可定位到与控制块(如sampled value control)对应的通信参数(如SMV);控制块的数据Set属性值需与数据集名称(DataSet name)完全一致,从而将数据集绑定到控制块。数据集定义了报文中传输的具体数据项(DO/DA),其条目通过prefix(前缀)、lnClass(逻辑节点类)、lnInst(逻辑节点实例)、doName(数据对象名)、daName(数据属性名)等属性获取唯一标识。

SCD文件中的Inputs节点描述了各个IED对外部信号的引用(订阅)情况,根据外部引用所指定的IED name、LDinst可找到外部信号所在的IED和逻辑设备LDevice,查看该LDevice下所有DataSet条目,通过比对ldInst、prefix、lnClass、lnInst、doName和daName可找到匹配的数据集条目,结合控制块与数据集的绑定关系,最终明确该Inputs条目订阅的目标IED所具体对应的控制块及数据集条目。

2 基于业务模型的配置文件校核技术

配置文件的校核要求对继电保护相关的功能回路、采样回路、出口回路进行正确性审查,对象包括保护装置、保测一体、合并单元、智能终端、合智一体等众多智能电子设备,当前采用的大多为集成单位使用的集成配置工具,此类以单个设备为中心的可视化工具,进行人工核查,缺乏二次系统的整体观,不能以继电保护专业人员的视角进行展示,且操作使用复杂,对使用人员的技术水平要求极高,核查工作量大、效率低、容易出现漏查情况。对此,提出一种基于继电保护业务模型的实用化校核技术,从继电保护专业的业务视角对配置文件进行划分,形成通用的典型实例数据,并基于经验模型库的构建,实现不同智能站之间的通用性。

2.1 继电保护业务模型的构建

2.1.1 复杂网络构建

1) 确定节点并编号。对SCD文件中的各个设备或逻辑单元(即节点)进行编号,解析SCD文件获取装置数据,提取SCD文件中该IED节点的信息,解析IED节点的name属性值,得到对应装置对象的电压等级、间隔类型、间隔标识,将IED节点的name属性

值作为装置对象的名称属性值,将IED节点的desc属性值作为装置对象的描述属性值,解析IED节点的type属性值,得到对应装置对象的类型、CRC校验码属性值,将IED节点的manufacturer属性值作为对应装置对象的设备厂商属性值,将IED节点的config-Version属性值作为对应装置对象的版本号属性值。组合每个节点电压等级 voltage_num、一次类型 pri_type、二次类型 sec_type、套别 set_num 生成列表,按照典型类型对每个节点进行编号。

2) 确定节点连接关系。在SCD文件中,这些连接关系基于IED设备之间的虚回路关系,清洗掉无关数据,只保留保护回路相关连接,提取两端的IED设备,将两个设备间所有的连接关系组成一个集合后聚合为一条关系,以此作为两个节点的边。

3) 构建连通性矩阵。在确定了节点和连接后,可以构建连通性矩阵(邻接矩阵)来表示这些节点之间的连接关系。基于所生成的连接关系,其两端节点作为一个节点对,表示为 (i,j) ,其中 i 和 j 是节点的编号,遍历所有节点对 (i,j) ,如果节点 i 和节点 j 之间存在连接,则将矩阵中第 i 行第 j 列的元素设置为1;如果节点 i 和节点 j 之间不存在连接,则将矩阵中第 i 行第 j 列的元素设置为0。

假设有四个节点(编号为1,2,3,4),并且它们之间的连接关系如下:

节点1连接到节点2和节点3;

节点2连接到节点1和节点4;

节点3仅连接到节点1;

节点4连接到节点2。

那么,邻接矩阵可以简单表示为:

$$X(i,j) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

在这个矩阵中,第 i 行第 j 列的元素表示节点 i 是否连接到节点 j ,依此聚合SCD文件中的所有节点,生成复杂网络模型。

2.1.2 业务模型转换

在构建好的复杂网络模型上,应用Louvain社区发现算法,基于模块度(modularity)优化将网络中的节点划分为若干个社区,识别出关键的设备社区。根

据社区发现结果,将SCD文件中的设备和虚回路按照社区进行划分,形成若干个相对独立的子系统。

模块度定义如下:

$$Z = \frac{1}{2m} \sum_{ij} (X_{ij} - \gamma \frac{k_i k_j}{2m}) \quad (2)$$

式中: Z 表示模块度; m 表示节点边数; i 和 j 表示相邻节点; X 表示邻接矩阵; k 表示节点度数; γ 表示上不完全伽马函数。

上述公式可以简化成:

$$Z = \sum_{c=1}^n \left[\frac{L_c}{m} - \gamma \left(\frac{k_c}{2m} \right)^2 \right] \quad (3)$$

式中: c 表示社区序数; L 表示社区边数; k_c 表示社区中的节点度数之和; n 表示社区数量。

初始化SCD中每个节点为一个社区,对每个节点,尝试划分到相邻社区中,并选择到模块度增益最大且为正的社区。重复执行以下迭代过程,直至模块度不再改善。

按照编号顺序遍历每个节点 i ,尝试将节点 i 从社区A移入其邻居节点 j 所在的社区B。计算移动 i 后整个网络的模块度变化量:

$$\Delta Z = \frac{k_{i, \text{in}}}{2m} - \gamma \frac{\sum_{\text{tot}} k_i}{2m^2} \quad (4)$$

式中: ΔZ 表示模块度变化值; $k_{i, \text{in}}$ 是节点 i 与社区B的连边的权重和; $\sum_{\text{tot}}$ 是与社区B相连的所有的权重和。

如果 ΔZ 大于预定阈值,视作对模块度有改善,则将 i 移动到 j 社区B;若本轮遍历模块度无改善,停止迭代。

将上一步迭代形成的社区视为节点,构建新的网络,节点之间边的权重是连接两个社区所有边的权重之和。在新的网络上重复上述过程,直到不能再优化模块度或优化前后差异不超过预定阈值。

事先根据一次类型定义社区“间隔类型”的属性标签,并定义各间隔类型中主保护作为该社区的核心节点。通过复杂网络中解析结果,查找其中存在的核心节点,将核心节点所存在的社区贴上对应的“间隔类型标签”,转换成以间隔保护功能配置为视角、按保护配置与保护回路进行输出,如图2所示。

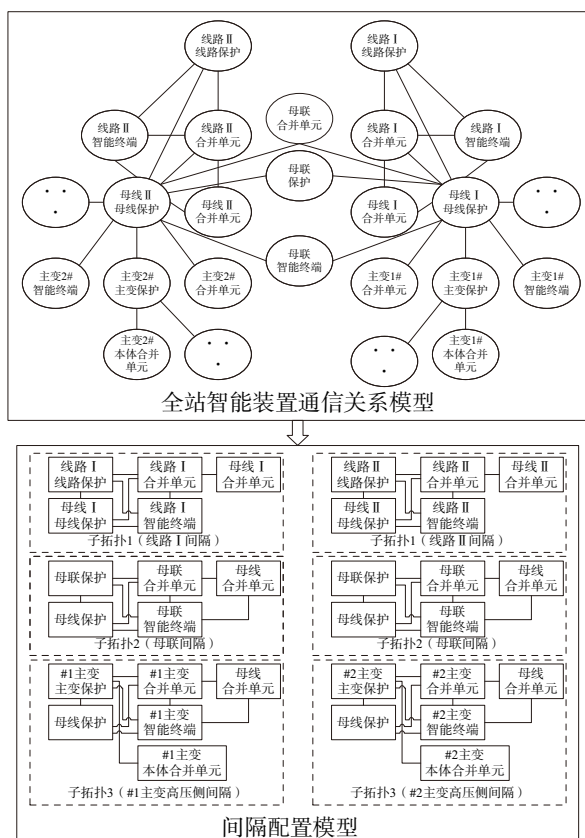


图2 全站智能装置业务关系模型拆分示意图

2.2 配置文件正确性校核技术

2.2.1 配置文件正确性校核模型

首先,依据 Q/GDW 11471《智能变电站继电保护工程文件技术规范》^[21]、Q/GDW 11662《智能变电站系统配置描述文件技术规范》^[22]等标准及现场实际要求,建立标准化经验虚端子模型,作为比对校核技术的基础。每个经验模型对象都有系列外部特征信息,且一个经验模型对象的外部特征信息总和能够确定该经验模型的唯一性,如图3所示。依据前文配置文件连接关系解析方法以及业务关系图结构样本数据,解析出待校核对象,确保其颗粒度大小和经验模型对象的颗粒度大小一致。将待校核对象包含的虚回路与经验数据库中每个经验数据唯一对应的校核依据进行匹配,判断是否存在与经验数据特征相同的图结构样本数据。若判定存在与所述间隔保护配置特征相同的经验数据特征,再与经验数据中每一组不同类型的智能电子设备间的虚回路连接关系进行对比。

若所述虚回路连接关系存在一条虚回路,而在经验数据中不存在,且收发两侧虚端子均不存在,则将此虚回路定义为多余回路;若所述虚回路连接关系不

存在一条虚回路,而在经验数据中存在,且收发两侧虚端子均不存在,则将所述虚回路定义为缺失回路;若所述虚回路连接关系存在一条虚回路,且在经验数据中也存在,但有一侧虚端子正确,另一侧虚端子不正确,则将所述虚回路定义为错误缺失回路;若所述虚回路连接关系存在一条虚回路,且在经验数据中也存在,但两侧虚端子路径与经验数据的虚端子路径不同,则将所述虚回路定义为短地址错误;若所述虚回路连接关系存在一条虚回路,而所述虚回路的接收端还存在另一条虚回路,则将所述虚回路定义为接收端子重复,将对比后所述虚回路定义输出为校核结果。

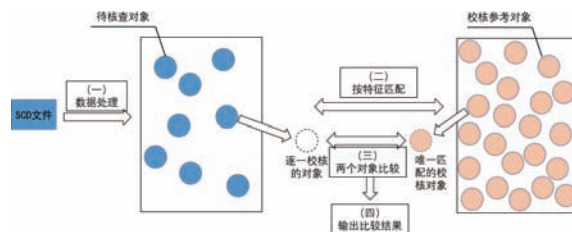


图3 SCD虚回路校核基本框架

2.2.2 校核经验模型库构建

由于变电站二次回路多元多样化,在不同电压等级、接线形式、一次设备特点、间隔类型、间隔保护配置等因素影响下,相同类型的两个装置的回路均会存在差异,所以对同一保护间隔,需构建足够丰富的典型虚回路对象。不同智能站的一次设计不同,校核模型库中将会存在大量的数据,难以一次性配置完整。因此对于前述判定不存在与所述间隔保护配置特征相同的经验数据特征样本,将通过专家人工确认正确后纳入标准样本,以达到通用数据实例的积累,如图4所示。

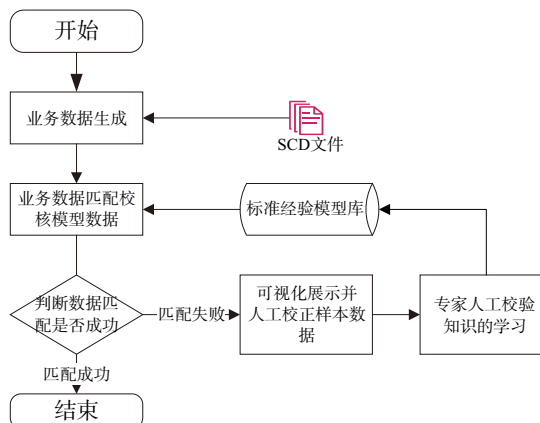


图4 虚回路校核模型数据生成流程图

2.3 配置文件一致性校核技术

2.3.1 配置文件一致性校核模型

为解决建设过程中配置文件版本管理混乱,最终下装文件与经检测正确的存档配置文件一致性无法确认的问题,通过核对装置回路实例配置文件(configuration circuit description, CCD)与SCD文件的一致性,自动从SCD中生成对应的CCD文件,经CRC实现装置CCD文件与SCD生成的CCD文件的一致性核对,具体核对流程如图5所示。

为实现装置CCD文件与SCD文件的一致性验证,需执行以下技术处理:数据清洗,移除CCD文件中非关键属性(如desc、IED元素冗余属性、FCDA元素的非bType属性)及格式符号(空格、换行符等),仅保留有效数据值;编码转换,将清洗后的数据转换为UTF-8编码序列;校验码生成,基于RC-32算法计算四字节校验码,并与SCD文件校验结果进行比对,确保配置一致性。

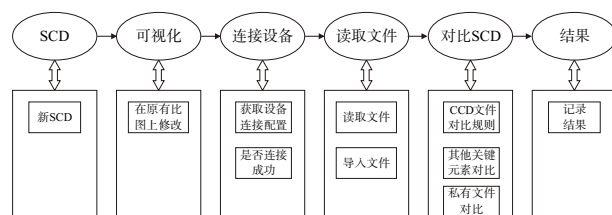


图5 装置配置一致性核对流程图

2.3.2 配置文件读取接口

在网络介质层面,将校核工具连接路由器无线网络,路由器WAN口通过网线或者光纤连接现场装置网线调试口或者光纤口。按照装置清单,定位需上召配置的装置,读取预先装置配置信息,获取其调试口IP以及配置文件存储地址。校核工具设置路由器IP地址,确保工具与目标现场装置处于同一网络段内,并且网络连接稳定可靠,无任何阻碍数据传输的防火墙或安全策略限制。使用文件传输协议(file transfer protocol, FTP)调用配置文件存储地址,访问文件路径,查询配置文件名称,找到后下载到工具软件中进行核对。

默认情况下,FTP使用20和21这两个端口,其中20用于数据连接(传递数据),21用于控制连接(传递控制信息)。用户的输入逻辑会被用户协议解释器解析,转换成FTP命令,通过控制连接(一个tcp连接, port 口为21)给到装置服务器协议解释器,得到一个

FTP应答,并且根据传输过来的FTP命令类型,服务器协议解释器可能需要启动服务器数据传输功能,其过程包括服务器主动发起建立一个tcp连接(用port 口20),通过该连接服务端和客户端就可以进行数据传输。

3 应用效果

文中所研究技术在大量220 kV及以上智能变电站开展了试点应用,实现了所有厂家不同时期的装置在各种应用场景下的虚回路自动比对,显著提升了配置文件审查效率,有效排查出变电站配置文件典型问题,具体如下:

1) 回路多余类:母联保护刀闸位置多余;一个保护装置连接多个无关合并单元或智能终端。

2) 回路缺失类:地铁线路(三相重合闸方式)两套保护间缺少相互闭锁重合闸回路;母线合并单元至各间隔合并单元延时缺失;110 kV线路保护合后位置缺失;线路同期电压为单AD采样;零序电压采样缺失(需确认是否外接零序电压)。

3) 回路错误类:主变、母联间隔保护跳闸拉至智能终端使用TJQ或TJF而未使用TJR;模拟量采集双AD交叉;电压短地址错误。

4) 回路重复类:主变合并单元同时接受A、B两套母线合并单元级联电压,接受端子使用重复。

在多项220 kV及500 kV新、改、扩建工程中应用校核工具,开展投运前配置文件下装一致性校核,通过自动计算比对校验码的方式替代人工审查核对,有效提升了校核效率,可将现场校核时间由15人·天缩短至0.5人·天,保障了工程的高效顺利投运。

4 结语

文中提出的基于业务模型的智能校核技术,基于间隔保护配置特征解析配置文件,提取图结构样本数据,与所建立的校核经验库内模型数据进行比对校核,实现配置文件正确性的自动化审查,有效解决了传统人工校核效率低、漏检率高的问题;通过人工校核经验积累丰富校核经验库,解决当前校核工具通用性不强的问题;开发装置配置文件读取接口,实现装

置下装配置文件一致性校核,解决配置文件建设过程中版本管理混乱的问题。在 220 kV 及以上变电站试点应用后,成功排查出闭锁回路缺失、双 AD 采样交叉等隐患,支撑工程顺利投运,有效保障电网稳定运行。

参考文献:

[1] 宋璇坤,闫培丽,吴蕾,等.智能变电站试点工程关键技术综述[J].电力建设,2013,34(7):10-16.

[2] 张勇志,汤晓晖,吴乾江,等.一种应用于智能变电站的系统配置描述文件配置方法[J].电气技术,2024,25(4):52-58.

[3] 朱长银,吕航,丁杰.基于模板复用的智能变电站系统配置描述文件自动配置方案[J].电气技术,2022,23(3):77-81.

[4] 朱江波.智能变电站文件管控问题及系统解决方案[D].西安:西安科技大学,2019.

[5] 姚建锋,张磊.智能变电站配置文件管理的探索与实践[J].企业管理,2018(增刊):152-153.

[6] 万海逸,李根.智能变电站配置文件错误导致跳闸的事故分析[J].机电信息,2023(20):24-27.

[7] 张浩,张艳.智能变电站智能终端私有配置文件错误导致保护异常动作问题的分析[J].电气自动化,2016,38(6):58-61.

[8] 温树峰,孙丹,王珍珍.智能变电站配置文件错误分析[J].能源与节能,2015(1):176-178.

[9] 国际电工委员会,通信网络和系统在变电站中的应用:IEC 61850—2003[S].2003.

[10] Mekkanen, M. Virrankoski R, Elmusrati M, et al. Enhancement of IEC 61850 as using Vendor-Natural system tool[P]. Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2014 IEEE 27th Canadian Conference on, 2014.

[11] Kieran McLaughlin, Magnago F. Monitoring and controlling services for electrical distribution systems based on the IEC 61850 standard[J]. Energy & Power Engineering, 2017, 3(3): 299-309.

[12] Tarlochan S, Lim II-Hyung. Design of a backup IED for IEC 61850-Based substation[P]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018.

[13] 曹海欧,崔玉,宋亮亮,等.智能变电站配置文件可视化技术的改造与升级[J].自动化技术,2024(11):78.

[14] 徐岩,单肆超.基于SCD文件的智能变电站二次回路可视化[J].电力系统及其自动化学报,2023,35(3):69-76.

[15] 王光亮,陈文,唐明帅,等.基于相关间隔解耦的SCD文件管控系统设计与开发[J].电力系统保护与控制,2019,47(11):160-164.

[16] 张沛超,姜健宁,杨漪俊,等.智能变电站配置信息的全生命周期管理[J].电力系统自动化,2014,38(10):85-89,131.

[17] 张锋,张朔严,乔利红,等.基于知识图谱的变电站配置文件智能校核技术研究与应用[J].电测与仪表,2024,61(4):64-69.

[18] 万勇,辛建波,谢国强,等.基于双层CRC校核的智能变电站配置文件在线诊断方法[J].电力系统保护与控制,2019,47(7):176-180.

[19] 牛健,刘海涛,嘉楠,等.基于规则库的SCD文件虚回路隐患自动核查技术[J].河北电力技术,2023,42(6):48-52.

[20] 黄代雄,杨嘉玮,周伟.基于SCL模型的智能变电站配置文件实模一致性校验方法[J].产品可靠性报告,2024(11):77-78.

[21] 国家电网有限公司.智能变电站继电保护工程文件技术规范:Q/GDW 11471—2015[S].北京:中国电力出版社,2015.

[22] 国家电网有限公司.智能变电站系统配置描述文件技术规范:Q/GDW 11662—2015[S].北京:中国电力出版社,2015.