

基于相似度计算的学习型模板库在虚回路设计和校验中的应用

高 磊¹, 闫培丽², 阮思烨³, 许志勇⁴, 李 鹏⁵, 顾俊捷⁵

(1. 国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 210036; 2. 国网北京经济技术研究院, 北京 102209;

3. 华北电力设计院有限公司, 北京 100120; 4. 国网江苏省电力公司, 江苏 南京 210024;

5. 南京五采智电电力科技有限公司, 江苏 南京 211106)

摘要: 智能变电站二次回路设计基本相通, 由于虚端子描述尚不统一, 使得新建站虚端子连接无法复用, 仍采用人工点对点连接, 导致效率不高。提出自动创建虚回路模板库, 通过关键字匹配实现虚回路的自动设计和完整性及正确性校验, 其核心在于学习型模板库海量学习已有配置描述(SCD)文件, 采用中文分词技术进行关键字提取, 引入经典的 RKR-GST 算法完成虚端子描述的相似度计算, 从而进行关键字的匹配整合, 从而创建、整理和完善虚回路模板库。试验证明, 通过该方法对新建智能变电站的虚端子连接效率和准确性都有较大提升。

关键词: 智能变电站; 配置描述文件; 相似度; 学习型模板库; 虚回路; 设计; 校验

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.07.031

0 引言

目前, 新建智能变电站配置描述 SCD(Substation Configuration Description)文件^[1-2]虚回路的连接主要通过人工方式进行, 效率低且正确性直接取决于配置人员的技术水平, 往往需要经过大量次数的修改完善后才能形成某个智能变电站的最终版 SCD 文件^[3]。

由于智能变电站二次回路的连接原理基本相通^[4-6], 完全可以考虑建立标准的虚端子连接模板, 存储典型连线中智能电子设备(IED)和虚端子的关键字, 连接时不断匹配复用从而提高效率。现阶段通过建立模板库实现虚回路连接的方法实施不便的主要原因是受限于虚端子描述尚未完全统一(“六统一”的保护装置已经完成了虚端子描述的统一)^[7], 因此造成虚端子连接模板库不易覆盖所有设备厂商的虚端子, 即使通过手动的方式进行创建, 后期维护和完善虚端子连接模板库的工作量也是巨大的。可以说, 一个对各类虚端子描述具有高覆盖率的虚端子连接模板库是实现虚回路自动设计和正确性校验的基础, 同时也是至关重要的。

目前, 关于智能变电站虚回路设计和校验的研究较少, 部分研究提出了模板库或知识库的概念, 分别实现虚回路的设计或校验^[8-9], 但需要手动创建、修改及丰富模板库或知识库, 势必覆盖面不高; 另外, 国内目前比较通用的一些可视化设计 SCD 文件的辅助工具^[10], 具有典型间隔替换、相同间隔复制

等功能, 但局限性较高, 要求同类的 IED 及相同的虚端子条件, 无法广泛适用于不同类型的设备生成虚端子连接。

本文通过导入海量 SCD 文件, 借助分词技术、相似度计算算法^[11-15]以自动学习的方式创建并丰富虚端子连接模板库, 并通过匹配虚端子连接模板库的关键字完成虚回路的自动设计和正确性校验。

1 学习型模板库的自动创建

本文最重要的工作就是研究如何方便快捷准确地建立虚端子连接模板库, 并使模板库具有人工智能的属性, 实现自动学习、自动整理和自动完善。

1.1 存储结构设计

从后期维护管理的便捷性、存储的信息量、层次关系表达上考虑采用可扩展标志语言(XML)文件存储的方式。模板建立方法参照 SCD 文件中 Inputs 容器的存储方式, 以接收设备为参照, 仅表达接收侧的连线关系。以某 IED 模板为例进行说明: 每个 IED 下连线先通过 GOOSE 和 SV 进行分类, 再通过发送 IED 进一步分类, 因此模板的层级分为 4 层, 第 1 层为 IED 模板, 第 2 层为 GOOSE 接收和 SV 接收, 第 3 层为外部 IED, 第 4 层为虚回路关系, 如图 1 所示。单个的 IED 模板为一种典型的设备类型, 一般分为线路保护、母线保护、变压器保护、合并单元、智能终端、测控等^[16-19], 如“500 kV 线路保护 A”、“110 kV 线路智能终端 A”等, 所有典型的设备模板共同构成虚端子连接模板库。

1.2 存储格式设计

500 kV 线路保护最小化模板的文件模板见图 2。图中元素说明如下: IED 表示设备类型; descKey

收稿日期: 2016-12-15; 修回日期: 2017-05-26

基金项目: 国家电网公司科技项目(新一代智能变电站二次系统虚回路自动连接与扩建回路自动重构技术研究)

Project supported by the Science and Technology Research Program of SGCC(Research on Automatic Connection of Virtual Loop and Automatic Reconfiguration of Extension Circuit of Secondary Circuit in New Generation Smart Substation)

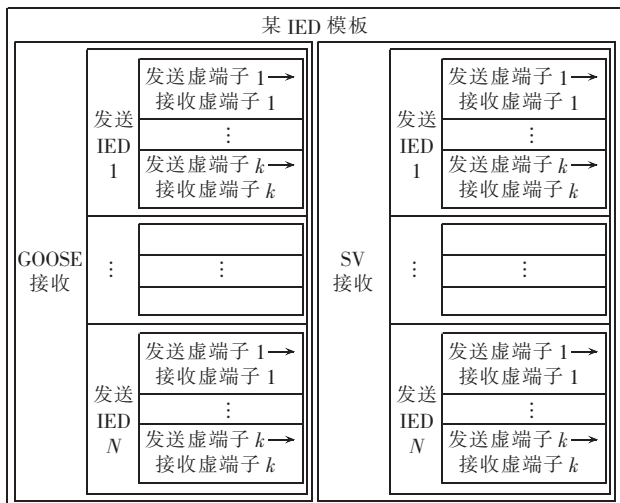


图 1 模板文件结构

Fig.1 Structure of template file

```
<IED nameKey "descKey="{500 kV and 线 and 保护 And A} or {500 kV and 线 and 保护 And 1}" nameKey="PL5 and A">
<GoRx>
<TxIED nameKey" descKey="{500 and 断路器 and 智能终端 and A}"nameKey="IB5 and A">
<VLink desc="边断路器分相跳闸位置 TWJa">
<Rx descKey="跳闸 and TWJa"/>
<Tx descKey="断路器 and 位置 and A 相"/>
</VLink>
</TxIED>
</GoRx>
<SvRx>
<TxIED descKey="220 and 合并单元 and 线 and A" nameKey="ML22 and A">
<VLink desc="保护 A 相电压 1">
<Rx descKey="保护 and A and 电压 And Ua1"/>
<Tx descKey="A and 电压 and 1"/>
</VLink>
</TxIED>
</SvRx>
</IED>
```

图 2 500 kV 线路保护最小化模板

Fig.2 Minimized template file of 500 kV line protection

表示描述关键字;nameKey 表示 IEDname 的关键字;GoRx 表示 GOOSE 接收,一个 IED 元素含有一个 GoRx 元素;SvRx 表示 SV 接收,一个 IED 元素含有一个 SvRx 元素;TxIED 表示发送侧设备,一个 GoRx 或 SvRx 元素含有一个或多个 TxIED 元素;VLink 表示虚回路,一个 TxIED 含有一个或多个 VLink;Desc 表示虚回路的描述名;Rx 表示虚回路接收侧,一个 VLink 元素包含一个 Rx 元素;Tx 表示虚回路发送侧,一个 VLink 元素包含一个 Tx 元素。

虚端子连接模板库创建的目的是方便设计人员自动完成虚端子连接及正确性校验,因此需要考虑模板文件和 SCD 文件的匹配问题,只有 2 种文件匹配成功,才能实现模板文件与实例文件的一一映射,考虑到 IED 描述及虚端子描述的不确定性,模板库无法采用固定全描述,只能采用关键字匹配的方式。

SCD 文件匹配包括 2 种匹配:一种是 IED 的匹配,另一种是虚端子的匹配。

IED 的匹配主要通过 IED 的描述关键字进行匹配,如“500 kV 龙泉线合并单元 A 套”或“500 kV 龙泉线合并单元 1”,关键字可以为“{500 and 合并单元 and 线 and A}|or{500 and 合并单元 and 线 and 1}”,关键字通过逻辑符号连接,and 表示与,or 表示或,{·}表示优先处理。名称关键字也可作为辅助匹配项,如 PL5 and A。

虚端子匹配同样主要通过描述关键字匹配的方式,如虚端子描述为“断路器位置 A 相”或“开关位置 A 相”,描述关键字为“{断路器 and 位置 and A 相}|or{开关 and 位置 and A 相}”,其表达式的含义同上。

1.3 学习型模板库自动创建的若干技术难点

模板库采用全自动的方式进行创建。自动创建的过程中需要解决关键字自动提取、IED 和虚端子关键字归类整理的问题。具体的分析如下。

1.3.1 关键字的自动提取

关键字主要指 IED 和虚端子的描述关键字,关键字一般是高频词。目前相关文献已较深入地研究了中文分词技术,中文分词技术可从大量的描述文字自动分解词语,提取关键字,此外可通过导入用户词典的方式提供更接近用户业务对象的分词结果。

本文采用汉语词法分析系统(ICTCLAS)。ICTCLAS 是中国科学院计算技术研究所研发的一款先进的分词系统,其支持用户词典导入,关键字提取。该系统提供了详细的 C++ 等开发文档,本文主要用到的关键接口有:导入用户词典,NLPIR_ImportUserDict;增加用户词条,NLPIR_AddUserWord;获取关键字,NLPIR_GetKeyWords;获取分词结果,NLPIR_ParagraphProcess。关键字自动提取流程见图 3。

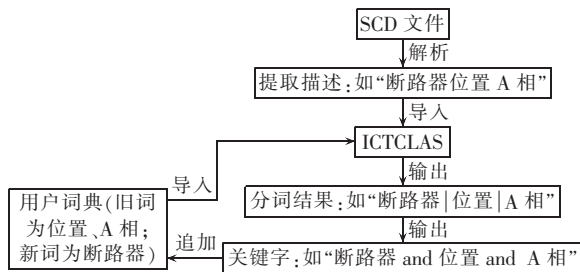


图 3 关键字自动提取流程

Fig.3 Flowchart of automatic keyword extraction

a. 创建初始关键字词典,如“位置、A 相”,存储成文本文件;

b. 解析 SCD 文件,提取 IED 的描述或虚端子的描述,并将其存储成文本文件,如“断路器位置 A 相”;

c. 将上述用户词典和描述信息导入 ICTCLAS 中进行分词,获取分词结果及关键字;

d. 将新产生的关键字追加写入用户词典。

1.3.2 IED 和虚端子关键字归类整理

模板中虚端子有关键字:“断路器 and 位置 and

A 相”,当扫描 SCD 文件中提取到“开关 and 位置 and A 相”,需要最终合并为“{断路器 and 位置 and A 相}or{开关 and 位置 and A 相}”。此时遇到无法在模板文件中找到同种设备类型继而合并关键字的问题。模板中 IED 的关键字也有同样的问题。

因此,就需寻找一种用于字符串相似度比较的算法来有效地匹配相似字符串,然后再提取、合并关键字。常见的字符串相似度匹配算法有:编辑距离算法、最长公共子串(LCS)算法、随机串匹配(KR)算法、贪心覆盖(GST)算法、RKR-GST 算法等。编辑距离算法、LCS 算法、KR 算法都是有序匹配的算法;GST 算法、RKR-GST 算法都是无序匹配的算法。考虑到本应用中的实际情况是各厂家设备模型内定义是无序的,例如“断路器位置 A 相”和“A 相断路器位置”代表的意思相同,若采用有序算法,相同意义的 2 个字符串的相似度会很低,而采用无序算法相似度不会因关键字在字符串中位置的变化而改变。RKR-GST 算法由 Michael Wise 于 1993 年提出,该算法采用了 KR 算法,同时改进了 GST 算法的时间复杂度,其平均时间复杂性接近线性,相比 GST 算法,RKR-GST 算法的运行效率更高,平均时间复杂度可控在 $O(n) \sim O(n^2)$ 之间,最坏情况下时间复杂度为 $O(n^3)$ 。

RKR-GST 算法的基本思想是:模式串于文本串中的每个元素不需要一一进行比较,只有当模式串子串的散列值与文本串子串的散列值相同时才进行比较,其是一种运行效率较高的模式匹配算法。

RKR-GST 算法的流程如图 4 所示。

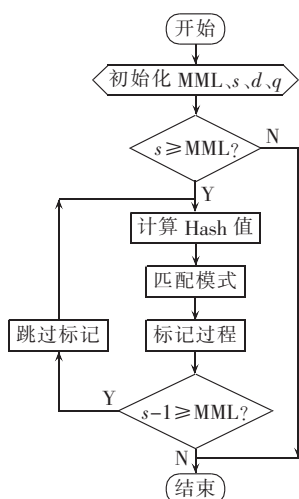


图 4 RKR-GST 算法流程图

Fig.4 Flowchart of RKR-GST algorithm

a. 初始化 MML、s、d、q。MML 为最小匹配长度,凡是小于这个匹配长度的都忽略不计;s 为搜索长度,使用长度 s 对字符串 $P = "p_1 p_2 \cdots p_m"$ 与 $T = "t_1 t_2 \cdots t_n"$ 进行划分,分别切割为 $m-s+1$ 和 $n-s+1$ 个长度为 s 的子串;d 为字符串 P 与 T 内出现字符

的集合 Σ 个数, $d = |\Sigma|$; q 为一个较大的素数,一般取 $q > d^s$ 。

b. 判断 s 是否不小于 MML,若 $s < \text{MML}$ 则程序结束。

c. 通过式(1)计算字符串 P 与 T 子串的 Hash 值。假设从字符串 X 的 k ($k < m-s+1$) 处取长度为 s 的子串 $X(k) = "x_k x_{k+1} \cdots x_{k+s-1}"$;把各个字符取其内码值(例如 ASCII 码),假设 x_k 的码值为 x'_k ,进而将该模式子串 X(k) 数值化,该数值又称为散列值。

$$\text{Hash}(X'(k)) = \text{mod}(X'(k), q) =$$

$$\text{mod}(x'_k d^{s-1} + x'_{k+1} d^{s-2} + \cdots + x'_{k+s-2} d + x'_{k+s-1}, q) \quad (1)$$

d. 将 P 与 T 各自按长度 s 划分后子串的 Hash 值依次进行比较,如果相等,则认为这 2 个长度为 s 的子串匹配。再对相等的长度为 s 的子串进行贪婪匹配,如果其后的字符依然相同,继续匹配,直到不能匹配为止,记录匹配长度 l、P 中的匹配位置 m、T 中的匹配位置 n,并将这些信息 (m, n, l) 存储起来。如果有 2 次找到的最大匹配长度相同,那么将新找到的匹配信息记录到前一个与其匹配长度相同的后面,进而形成一个长度由大到小的匹配链表。

e. 在形成的匹配链表中,取出第一行元素放入集合 S_{Tiles} 中,并把匹配的字符根据在字符串 P 和 T 中的开始位置及长度标记,取出第二行元素,首先判断是否与前一个匹配重叠,若重叠则舍弃,若没有重叠,则继续放入集合 S_{Tiles} 中,依次重复进行,直到所有匹配结束为止,这个过程称为标记过程。

f. 按一定方法改变 s 的值,若依然大于或等于 MML,则继续上述循环,只是在按长度 s 划分时跳过标记过的字符串;反之则程序结束。

g. 程序结束后,将集合 S_{Tiles} 中所有元素的长度 l_{Coverage} 返回。最终计算出 P 与 T 的相似度 α 为:

$$\alpha = \frac{2l_{\text{Coverage}}}{L_{\text{length}}(P) + L_{\text{length}}(T)} \times 100\% \quad (2)$$

下面通过实际虚端子信息进行举例。

根据 RKR-GST 算法计算 $P = \text{"低气压闭锁重合闸"}$ 与 $T = \text{"压力低闭锁重合闸"}$ 的相似度。

因以上 2 个字符串的字符较少,故可人为随意定义 [低]=1, [气]=2, [压]=3, [闭]=4, [锁]=5, [重]=6, [合]=7, [闸]=8, [力]=9; $d=9$; 初始化最小匹配长度 $\text{MML}=1$; 初始化 s, 因字符串较短,可以设置一个较小的 s 值,可先取模式串 P 的一半 $s=3$, 素数 $q > 9^3$, 取 $q=733$ 。2 个字符串分别按长度 s 划分,并计算出相应的散列值,如表 1 所示。

例如按长度为 $s=3$ 划分 T 的 Hash (压力低) = $\text{mod}(3 \times 9^2 + 9 \times 9^1 + 1, 733) = \text{mod}(325, 733) = 325$ 。

由表 1 可知,字符串 P 与 T 按 $s=3$ 拆分后,子串中有 3 组散列值相等,由第一组开始进入贪婪匹配,通过 Hash 函数不断往后匹配,最终得到最长匹配为

表 1 字符串拆分后的散列值
Table 1 Hash value of split strings

P 的子串	散列值	T 的子串	散列值
低气压	102	压力低	325
气压闭	193	力低闭	9
压闭锁	284	低闭锁	122
闭锁重	375	闭锁重	375
锁重合	466	锁重合	466
重合闸	557	重合闸	557

“闭锁重合闸”,保存信息 (m,n,l) 后继续循环剩余散列值相等的子串,最终形成 $s=3$ 的匹配链表,如表 2 所示。再依次判断是否与上一条重叠,若重叠则舍弃,不重叠则放入 S_{Titles} 中,并将其标记,标记部分下个循环直接跳过。最终匹配结果如表 3 所示。

表 2 匹配链表
Table 2 Matching list

标号	子串描述	m,n,l	判断
1	闭锁重合闸	4,4,5	放入 S_{Titles}
2	锁重合闸	5,5,4	舍弃
3	重合闸	6,6,3	舍弃

表 3 最终匹配结果
Table 3 Final results of matching

P 匹配位置	T 匹配位置	匹配长度	匹配内容
4	4	5	闭锁重合闸
1	1	1	低
3	1	1	压

由式(2)计算相似度 α 为:

$$\alpha=\frac{2\times(5+1+1)}{8+8}\times100\%=87.5\% \tag{3}$$

同时对于智能变电站虚回路内存在的一些特定关键字字符,肯定不会去合并其他关键字的情况,如代表电压等级的 500 kV、220 kV 等,代表双套设备标注的 A、B、第一、第二等,可以提高相关关键字的优先级,匹配遇到此类关键字不同的 2 个字符串,可以直接跳出匹配。

依照此方法,可以计算出 2 个字符串的相似度,将不同部分关键字进行合并,可以完成 IED 关键字的归类整理,同时也能完成 TxIED 关键字的归类整理。

通过 IED 和 TxIED,可将虚端子的匹配定位到同一发送 IED 下几根连线中,而在虚端子的保护连线中,同一发送 IED 的最大 GOOSE 连线数目一般为 5 根(如 500 kV 的断路器保护接收智能终端的 ABC 位置、闭锁重合闸、低气压闭锁重合闸),最大 SV 连线数目一般为 15 根(如 220 kV 线路保护接收合并单元的延迟、双向 AD 三相电流、双向 AD 三相电压、双向 AD 同期电压),通过对模板文件的每个发送虚端子或接收虚端子与 SCD 文件的虚端子进行字符串的相似性比对,挑选相似率最高的作为最优映射,并归类整理。

1.4 学习型模板库自动创建及学习流程

学习型模板库自动创建及学习流程如图 5 所示。

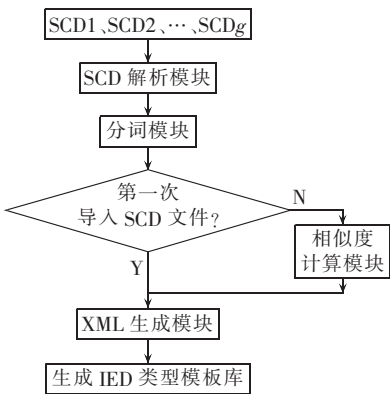


图 5 模板库自动创建及学习流程
Fig.5 Flowchart of automatic template library creation and learning

具体流程说明如下。

a. 导入第 1 个 SCD 文件样本,软件解析 SCD 文件内 IED 描述、虚回路描述等内容。

b. 根据用户词典,将完整描述进行中英文分词和提取关键字。

c. 将软件解析的 IED、虚回路等信息的完整描述及提取的关键字分别通过 XML 生成模块,填入相应 XML 的相应元素的属性中去,最终生成各 IED 类型的 XML 模板文件,形成模板库。

d. 导入第 2 个 SCD 文件样本,软件解析 SCD 文件 IED 描述、虚回路描述等内容。

e. 根据 IEDname、IED 描述遍历 XML 模板库,通过关键字匹配的方式找到对应的 IED 类型模板。

f. 根据用户词典,将完整描述进行中英文分词和提取关键字,新增关键字增补进用户词典。

g. 将解析第 2 个 SCD 文件得到的 IED 描述、虚端子描述与模板库内已存在的 IED 描述、虚端子描述通过相似度算法模块进行比较;若计算结果大于阈值,则软件将提取的关键字自动以或的方式合并入模板文件相应元素的属性中;若计算结果小于阈值,则由用户自行判断分词提取的关键字是否合并入模板文件中。

h. 依次导入多个 SCD 文件,不断重复上述过程。

通过导入大量的 SCD 文件,不断地丰富用户词典,通过用户词典内的同义词,将虚回路模板库内的 IED 及虚端子描述进行同义词的合并,从而不断增加模板库的复用性,使虚回路的自动设计和校验性能不断提升。

2 虚回路的自动设计和校验

通过自动学习生成的模板库可以应用到 2 个方面:虚回路的自动设计和校验。虚回路设计流程见图 6。

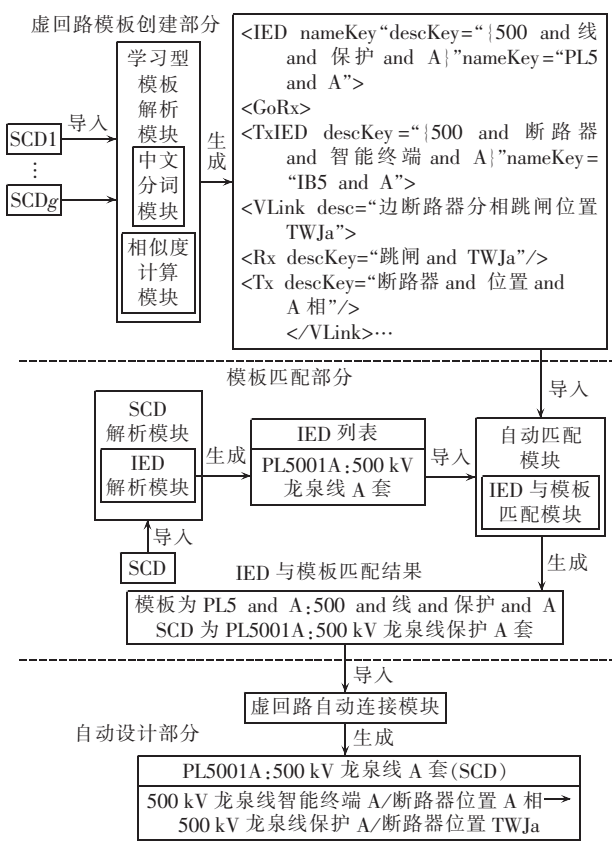


图 6 虚回路自动设计流程

Fig.6 Flowchart of automatic virtual circuit design

a. 虚回路模板创建部分:在虚端子连接回路编辑模板,通过海量 SCD 文件样本自动学习创建。

b. 模板匹配部分:导入 SCD 文件,解析 IED 列表,获取 IED 信息。通过自动匹配,可以在模板文件库匹配到相应的 IED 模板。

c. 自动设计部分:按照模板的 IED 虚端子信息在 SCD 文件内通过描述关键字进行对应查找,将匹配结果进行生成,存储到 SCD 文件中。

虚回路校验流程如图 7 所示。

a. 虚回路模板创建部分:在虚端子连接回路编辑模板,通过海量 SCD 文件样本自动学习创建。

b. 解析和匹配部分:导入 SCD 文件,解析 IED 列表、虚回路信息,获取 IED 信息和虚端子信息。通过关键字,可在模板文件库匹配到相应的 IED 模板。

c. 匹配生成和展示部分:将模板的 IED 虚端子信息和 SCD 文件内的虚端子通过描述关键字进行对应查找,将匹配结果进行生成及展示。

3 实际应用

根据上述方法开发了模板自动创建软件、虚回路自动设计软件和虚回路自动校验软件。

3.1 模板自动创建软件

随机导入不同设备厂商不同电压等级的 3 个实际 SCD 文件进行测试,对测试情况定义了 3 个判断

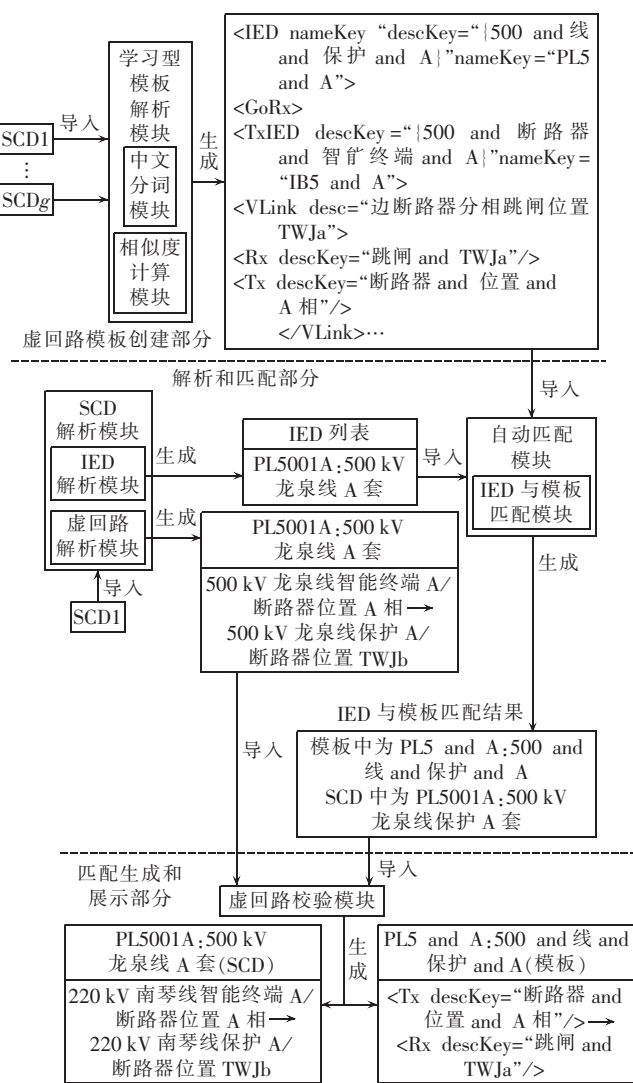


图 7 虚回路自动校验流程

Fig.7 Flowchart of automatic virtual circuit check

标准,分别为效率(软件解析 SCD 文件的时间)、有效性(软件自动提取关键字进行合并的比率)、正确性(提取并加入的关键词与原有关键词是否为同义词的比率)。软件测试结果如表 4 所示。

表 4 模板库测试结果

Table 4 Test results of template library			
SCD 文件电压等级 /kV	效率 /s	有效性 /%	正确性 /%
110	13	65	88
220	31	72	82
500	44	62	93

通过对 3 个 SCD 文件进行测试,可以发现模板库对不同大小的 SCD 文件解析的时间可以控制在 1 min 内;虽然对各类描述建立最低 60 % 相似度的写入门槛,有效提取的比率依然可达到 6 成以上,其余 4 成需要人工干预;以上说明虽然需要 4 成的人工干涉,但却有效提高了模板创建的准确性。

由于 SCD 文件内 IED 及虚端子描述都为较短的字符串,所以相似度在多个字符不同的情况下会

明显降低,经大量测试后暂定了 6 成的门槛值,以确保准确性维持在一个较高的水平。抬高门槛值对效率指标无影响,虽然可以提高自动提取合并的有效性,但在一定程度上会降低模板创建时同义词合并的准确性。国网“六统一”规范对智能变电站的虚端子的引用名“ref”作了规范,后期考虑加入虚端子的引用名“ref”关键字作为辅助判断,比如“断路器分相跳闸位置 TWJa”的引用名“ref”为:“PIGO/GOING-GIO1.DPCSO1.stVal”,“ref”的关键字为“PIGO*/GOINGGIO*.DPCSO.stVal”,* 代表通配符,由此在不降低准确性的情况下提高门槛值,减少人工干预的比率。

3.2 虚回路自动设计软件

以 220 kV 德银变为例说明,在设计软件中选中接收侧待连接设备,如“220 kV 马塘 1 线线路保护 A”,同时选中对侧装置“220 kV 马塘 1 线智能终端 A”,点击自动连接,软件将自动匹配 220 kV 线路保护模板,解析获得模板接收装置(220 kV 线路保护 A 套)和模板发送装置(智能终端)。从而,根据模板对虚回路进行自动设计,最终自动完成此线路保护与对应智能终端的虚端子连线。虚回路自动设计结果如表 5 所示。

表 5 虚回路自动设计结果

Table 5 Results of automatic virtual circuit design

连接类型	连接名称	匹配的接收信号	匹配的发送信号
GOOSE	断路器分相跳闸位置 TWJa	断路器分相跳闸位置 TWJa;PIGO/GOINGGIO1.DP...	断路器 A 相位置: RPIT/XCBR6.POS...
GOOSE	断路器分相跳闸位置 TWJb	断路器分相跳闸位置 TWJb;PIGO/GOINGGIO1.DP...	断路器 B 相位置: RPIT/XCBR7.POS...
GOOSE	断路器分相跳闸位置 TWJc	断路器分相跳闸位置 TWJc;PIGO/GOINGGIO1.DP...	断路器 C 相位置: RPIT/XCBR8.POS...
GOOSE	压力低闭锁重合闸	低气压闭锁重合闸: PIGO/GOINGGIO3.SPC...	压力低闭锁重合闸入 4;RPIT/GGIO8.Ind4...
GOOSE	闭锁重合闸	闭锁重合闸-1: PIGO/GOINGGIO2.SPC...	闭锁重合闸开入 6: RPIT/GGIO8.Ind6...

3.3 虚回路自动校验软件

同样以 220 kV 德银变为例说明,可以发现通过校验软件针对 SCD 文件的各个虚回路信息能够找到相应的模板信息,并自动根据描述关键字进行校验,其校验结果如图 8 所示。对于校验不成功的虚端子,可从以下几方面进行判断:虚端子连接级别是否不对、是否为功能性出错、是否漏连必要虚端子、是否存在新名词等,然后再进行相应的修改。

3.4 学习型模板库方案优劣分析

以 220 kV 德银变为例,分别采用本文技术方案与传统方案对德银变 SCD 文件的虚回路进行重新设计和校验测试,结果如表 6 所示。引入可以自动创

校验 220 kV 马塘 1 线线路保护 A(PL2203A)...

IED[220 kV 马塘 1 线线路保护 A(PL2203A)]匹配到对应的 IED 连接模板[220 kV 线路保护 A 套(PL22 and A)]!

GOOSE 虚回路[220 kV 马塘 1 线智能终端 A(IL2203A)]匹配到对应的 GOOSE 虚回路连接模板[(IL22 and A)]!

未找到 GOOSE 虚端子连接模板[压力低闭锁重合闸]!

GOOSE 虚端子连接[断路器分相跳闸位置 TWJa]匹配到对应的 GOOSE 虚端子连接模板[断路器分相跳闸位置 TWJa]!

GOOSE 虚端子连接[断路器分相跳闸位置 TWJa]接收侧[断路器分相跳闸位置 TWJa]匹配!

GOOSE 虚端子连接[断路器分相跳闸位置 TWJa]发送侧[断路器 A 相位置]匹配!

GOOSE 虚端子连接[断路器分相跳闸位置 TWJb]匹配到对应的 GOOSE 虚端子连接模板[断路器分相跳闸位置 TWJb]!

GOOSE 虚端子连接[断路器分相跳闸位置 TWJb]接收侧[断路器分相跳闸位置 TWJb]匹配!

GOOSE 虚端子连接[断路器分相跳闸位置 TWJb]发送侧[断路器 B 相位置]匹配!

GOOSE 虚端子连接[断路器分相跳闸位置 TWJc]匹配到对应的 GOOSE 虚端子连接模板[断路器分相跳闸位置 TWJc]!

GOOSE 虚端子连接[断路器分相跳闸位置 TWJc]接收侧[断路器分相跳闸位置 TWJc]匹配!

GOOSE 虚端子连接[断路器分相跳闸位置 TWJc]发送侧[断路器 C 相位置]匹配!

GOOSE 虚端子连接[闭锁重合闸-2]匹配到对应的 GOOSE 虚端子连接模板[闭锁重合闸]!

GOOSE 虚端子连接[闭锁重合闸-2]接收侧[闭锁重合闸-2]匹配!

GOOSE 虚端子连接[闭锁重合闸-2]发送侧[开入 28]不匹配!

GOOSE 虚回路[220 kV 母线保护 A(PM2200A)]匹配到对应的 GOOSE 虚回路连接模板[(PM22 and A)]!

GOOSE 虚端子连接[闭锁重合闸-3]匹配到对应的 GOOSE 虚端子连接模板[闭锁重合闸]!

GOOSE 虚端子连接[闭锁重合闸-3]接收侧[闭锁重合闸-3]匹配!

GOOSE 虚端子连接[闭锁重合闸-3]发送侧[支路 6_保护跳闸]匹配!

SV 虚回路[220 kV 马塘 1 线合并单元 A(ML2203A)]匹配到对应的 SV 虚回路连接模板[(ML22 and A)]!

SV 虚端子连接[MU 额定延时]匹配到对应的 SV 虚端子连接模板[额定延时]!

SV 虚端子连接[MU 额定延时]接收侧[MU 额定延时]匹配!

SV 虚端子连接[MU 额定延时]发送侧[MU 额定延时]匹配!

SV 虚端子连接[保护 A 相电流 I_{a1}]匹配到对应的 SV 虚端子连接模板[保护 A 相电流 1]!

SV 虚端子连接[保护 A 相电流 I_{a1}]接收侧[保护 A 相电流 I_{a1}]匹配!

SV 虚端子连接[保护 A 相电流 I_{a1}]发送侧[保护 A 相电流 I_{a1}]匹配!

SV 虚端子连接[保护 A 相电流 I_{a2}]匹配到对应的 SV 虚端子连接模板[保护 A 相电流 2]!

SV 虚端子连接[保护 A 相电流 I_{a2}]接收侧[保护 A 相电流 I_{a2}]匹配!

SV 虚端子连接[保护 A 相电流 I_{a2}]发送侧[保护 A 相电流 I_{a2}]匹配!

：

校验 220 kV 马塘 1 线线路保护 A(PL2203A)完成,模板个数 20 个,SCD 实际连线数 19 条,即缺少连线 1 条,不正确连线 2 条。

图 8 虚回路自动校验结果

Fig.8 Results of automatic virtual circuit check

表 6 学习型模板库方案优劣分析

Table 6 Comparison between manual method and learning template library method

性能	传统方案	本文方案
模板库生成	无	自动
虚回路设计	人工	自动
虚回路校验	人工	自动
虚回路设计时间	2 d	30 min
虚回路校验时间	0.5 d	5 min
虚回路设计准确性	虚回路总数 2472, 实际重连数 2353	虚回路总数 2472, 实际重连数 2427

建并完善的学习型模板库,在虚回路设计与校验两方面同时实现自动化,大幅提高了虚回路设计和校验的效率以及虚回路设计的准确性。

智能变电站的新建、改造、扩建等工程中,SCD文件虚回路设计、校验是工程实施的必要条件。传统方案下,虚回路的设计和校验都由设计人员或集成商手动完成,随电压等级的升高,变电站规模越大,IED设备数量越多,虚回路的设计和校验耗时(以d为单位)也将成倍增加,虚回路手动连接的准确性相应降低。同时虚回路的设计、校验耗时和准确性也受限于不同人员对智能变电站了解程度的水平差异,对智能变电站工程的调试周期影响较大。

本文提出的基于相似度计算的学习型模板库在虚回路设计和校验中的应用,引入虚回路模板库概念,在模板文件生成方面通过分词技术和相似度算法,实现模板文件的自动创建和学习完善,形成以设备类型区分的虚回路模板库,为虚回路自动设计和校验定下可靠基础。在虚回路设计和校验方面,通过匹配虚回路模板文件内 IED 和虚端子的关键字,实现自动完成虚回路的设计和校验,有效提高了虚回路设计和校验的效率及准确性,为智能变电站工程的调试展开提供有力的辅助手段。

4 结论

鉴于当前的虚回路设计依然主要依靠人工方式单根连接完成,SCD文件的虚回路正确性校验也少有进行系统研究,本文提出了一套较为完整的解决方案,不但定义了虚回路模板的具体格式,而且通过引入中英文分词技术和 RKR-GST 算法解决了模板自动创建的问题,通过虚回路模板可以解决自动设计和校验两方面问题;在进行虚回路设计时,通过导入 SCD 文件根据 IED 进行模板匹配,可以实现虚回路的自动设计;在进行 SCD 正确性校验时,通过导入 SCD 文件,根据 IED 和虚回路进行模板匹配,可以实现虚回路的自动校验。

实际工程验证证明:本文方案兼容性强,适应各类设备厂商装置,可帮助设计、调试、运维人员自动设计和校核虚回路的正确性,保证了 SCD 文件二次回路的标准、准确性,提高了各专业工种的工作效率。

参考文献:

- [1] 国家电网公司. 智能变电站技术导则:Q/GDW 383—2009[S]. 北京:中国电力出版社,2009.
- [2] 国家电网公司. 智能变电站二次系统信息模型校验标准:Q/GDW 11156—2014[S]. 北京:中国电力出版社,2014.
- [3] 周化,梅德冬,郑文彬,等. 一种智能变电站虚端子设计的优化方法:CN104318006A[P]. 2015-01-28.
- [4] 笃峻,叶翔,葛立青,等. 智能变电站继电保护在线运维系统关键技术的研究和实现[J]. 电力自动化设备,2016,36(7):163-168.

- DU Jun, YE Xiang, GE Liqing, et al. Key technology of online maintenance system for relay protections in smart substation and its implementation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7):163-168.
- [5] 傅旭华,黄晓明,王松,等. 数字化变电站 GOOSE 技术工程化应用[J]. 电力自动化设备,2011,31(11):112-116.
- FU Xuhua, HUANG Xiaoming, WANG Song, et al. Reactive power compensator with regulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(11):112-116.
- [6] 葛遗莉,葛慧,鲁大勇. 数字化变电站设计、运行中面临的问题[J]. 电力自动化设备,2010,30(12):113-117.
- GE Yili, GE Hui, LU Dayong. Problems in design and operation of digital substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(12):113-117.
- [7] 尹箴,苟旭丹,郑永康,等. 基于六统一规范的智能变电站虚端子设计相关技术方案[J]. 电气应用,2015,34(18):105-109.
- [8] 陈盼,林传伟,汤惠芳,等. 基于关键字符匹配的虚端子自动关联方法[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(18):132-137.
- CHEN Pan, LIN Chuanwei, TANG Huifang, et al. A method for virtual terminal automatic connection based on key-character matching[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(18):132-137.
- [9] 侯亮,冯亮,杨庆伟. 智能变电站虚拟回路自动化校核技术的研究[J]. 电网清洁与能源,2015,31(6):44-48.
- HOU Liang, FENG Liang, YANG Qingwei. Research of smart substation virtual circuit automatic checking[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(6):44-48.
- [10] 林俊,胡华威. 智能变电站中基于 CAD 的图形化模型设计软件开发方案[J]. 电力自动化设备,2012,32(9):142-148.
- LIN Jun, HU Huawei. Software development scheme based on AutoCAD for graphical model design of smart substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(9):142-148.
- [11] 裴云,邢益良,陈敏,等. RKR-GST 算法研究与应用[J]. 硅谷,2015(2):48-49.
- PEI Yun, XING Yiliang, CHEN Min, et al. Research and implementation of RKR-GST algorithm[J]. Silicon Valley, 2015(2):48-49.
- [12] 徐黎明. 基于 GST 字符串近似匹配算法的研究[J]. 内蒙古科技与经济,2016(7):87-89.
- XU Liming. Research on approximate matching algorithm based on string[J]. Inner Mongolia Science Technology and Economy, 2016(7):87-89.
- [13] 牛永杰,张成. 多种字符串相似度算法的比较研究[J]. 计算机与数学工程,2012(3):14-17.
- NIU Yongjie, ZHANG Cheng. Comparison of string similarity algorithm[J]. Computer and Digital Engineering, 2012(3):14-17.
- [14] 于海英. KR 字符串匹配算法的研究和实现[J]. 现代计算机,2012(2):12-14.
- YU Haiying. Research and implementation of KR string matching algorithm[J]. Modern Computer, 2012(2):12-14.
- [15] WISE M J. YAP3:improved detection of similarities in computer program and other texts[J]. Acm Sigcse Bulletin, 1996, 28(1):130-134.
- [16] 国家电网公司. 线路保护及辅助装置标准化设计规范:Q/GDW 1161—2014[S]. 北京:中国电力出版社,2013.
- [17] 国家电网公司. 变压器、高压并联电抗器和母线路保护及辅助装置标准化设计规范:Q/GDW 1175—2013[S]. 北京:中国电力出版社,2013.
- [18] 国家电网公司. 10 kV~110 kV 线路保护及辅助装置标准化设计规范:Q/GDW 1766—2015[S]. 北京:中国电力出版社,2015.

[19] 国家电网公司. 10 kV~110 kV 元件保护及辅助装置标准化设计规范:Q/GDW 1767—2015[S]. 北京:中国电力出版社,2015.

作者简介:

高 磊(1982—),男,山东青岛人,高级工程师,硕士,主要从事电力系统继电保护试验方面的研究工作(E-mail:gaolei.seu@gmail.com);

闫培丽(1972—),女,山西五台人,教授级高级工程师,主要从事继电保护、调度自动化及智能变电站研究与设计方



高 磊

面的工作(E-mail:yanpeili@chinasperi.sgcc.com.cn);

阮思烨(1982—),男,福建宁德人,高级工程师,博士,主要从事继电保护及安高压直流输电技术方面的研究工作(E-mail:ruan-siye@sgcc.com.cn);

许志勇(1978—),男,江苏盐城人,高级工程师,主要从事电力工程设计与建设管理方面的工作(E-mail:xzydl@139.com)。

Application of similarity-calculation-based learning template library in design and check of virtual circuit

GAO Lei¹, YAN Peili², RUAN Siye³, XU Zhiyong⁴, LI Peng⁵, GU Junjie⁵

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 210036, China;

2. State Grid State Power Economic Research Institute, Beijing 102209, China;

3. North China Electric Design Institute Limited Company, Beijing 100120, China;

4. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China;

5. Nanjing Five-C Smart Power Grid Technology Co. Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: Though the design principle of smart substation secondary circuits is basically same, because the virtual terminal description has not been unified, the virtual terminal connection of new substation is still manually implemented with low efficiency. A method is proposed to automatically create the virtual circuit template library for realizing the automatic design and the integrity and correctness check of virtual circuits based on the keyword matching. Massive SCDs (Substation Configuration Descriptions) stored in the learning template library are explored, the Chinese word segmentation technology is applied to extract the keywords and the classic RKR-GST algorithm is introduced to calculate the similarity of virtual terminal descriptions for the matching and integration of keywords as well as the creation, organization and improvement of the virtual circuit template library. Experiments show that, with the proposed method, the efficiency and accuracy of virtual terminal connection for new smart substation are greatly improved.

Key words: smart substation; substation configuration description; similarity; learning template library; virtual circuit; design; check

(上接第 204 页 continued from page 204)

Improved PI-R current control strategy with complete compensation for coupled harmonic voltage and current of DFIG rotor

QIN Shiyao¹, LIU Qihui², SONG Shiyu², LI Shaolin¹, ZHAO Yanan²

(1. State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems, Renewable Energy

Research Center, China Electric Power Research Institute (CEPRI), Beijing 100192, China;

2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The DFIG (Doubly-Fed Induction Generator) control strategy based on PI-R current controller in the harmonic environment of power grid is improved. A dynamic DFIG model considering grid harmonics is established and the commonly-used DFIG control strategies in the harmonic environment of power grid are analyzed. Since the commonly-used DFIG control strategies do not consider the coupled harmonic voltage and current of DFIG rotor, an improved control strategy is put forward, which compensates the cross coupling between them to realize the decoupled fast dynamic control and improve the control performance. A method for designing the PI-R current controller with rotor harmonic voltage and current coupling compensation is presented. PSCAD/EMTDC simulations are carried out to verify the correctness and effectiveness of the improved strategy and the simulative results prove that, the influence of grid harmonics on the current distortion and power fluctuation of DFIG rotor is effectively suppressed and the power quality is further enhanced, while the good control performances of PI-R controller are kept, such as the AC/DC variable control without static error and the excellent frequency selectivity.

Key words: doubly-fed induction generator; wind power; harmonic analysis; electric current control; dynamic model; decoupling control; PSCAD/EMTDC