

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191272

基于历史数据语义相似度的智能变电站虚端子自动连接

范卫东¹, 冯晓伟¹, 董金星¹, 胡炎², 王文琪², 高翔³

(1. 国网内蒙古东部电力有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010020; 2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 3. 上海毅昊自动化有限公司, 上海 201204)

摘要: 人工连接智能变电站二次设备虚端子花费时间长, 而且完成质量受到人为因素的影响。基于虚端子功能描述信息, 通过历史虚连接数据计算虚连接语义相似度, 建立二次设备间虚端子自动匹配的数学模型, 使用匹配正确概率完成匹配结果的筛选。根据典型二次间隔对智能变电站二次设备进行划分, 将智能变电站全站虚端子连接问题简化为二次间隔内的二次设备间的虚端子匹配问题。最后利用前旗 220 kV 智能变电站算例验证了所提出方法的有效性。

关键词: 虚端子自动匹配; 虚连接语义相似度; 匹配正确概率; 典型二次间隔

Automatic matching method of a virtual terminal in intelligent substation based on semantic similarity of historical data

FAN Weidong¹, FENG Xiaowei¹, DONG Jinxing¹, HU Yan², WANG Wenqi², GAO Xiang³

(1. State Grid Inner Mongolia Eastern Power Co., Ltd., Hohhot 010020, China; 2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. Shanghai Yihao Automation Co., Ltd., Shanghai 201204, China)

Abstract: It takes a long time to artificially connect the virtual terminal of a secondary substation of an intelligent substation, and the quality of the completion is affected by human factors. Based on the virtual terminal function description information, this paper puts forward a method that calculates the semantic similarity of virtual connections through historical virtual connection data, establishes a mathematical model for automatic matching of virtual terminals between secondary devices, and uses the probability to complete the screening of matching results. The secondary sub-equipment of the intelligent substation is divided according to the typical secondary interval, and the virtual terminal connection problem of the intelligent substation is simplified to the virtual terminal matching problem of the secondary devices in the secondary interval. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified with the example of the 220 kV intelligent substation of Qianqi.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGHAJY00SJJS1700022).

Key words: virtual terminals automatically match; virtual connection semantic similarity; match correct probability; typical secondary interval

0 引言

智能变电站基于 IEC61850 标准, 通过 GOOSE (Generic Object Oriented Substation Event)、SV (Sampled Value) 等网络, 完成智能电子设备 (Intelligent Electronic Devices, IED) 间的信息传递^[1-2]。传统的智

能变电站设计施工的方法不适用于光纤回路, 另一方面, IEC61850 标准第一版中对智能变电站二次设备通信回路考虑不够充分, 逻辑节点模型中能够包含的信息有限。针对这些问题, 国内提出了虚端子的概念。虚端子的引进可以将智能变电站二次设备间的网络通信关系和原有的实际端子对应起来, 同时保证二次设备间的互操作, 极大地便利了智能变电站设计、现场调试和运维^[3-7]。

国内设计院主要采用人工填写虚端子表来描述

基金项目: 国家电网公司科技项目资助 (SGHAJY00SJJS1700022)

各装置之间的虚端子连接关系^[8-9]。这种设计方式工作量大，完成质量容易受到设计人员的熟练程度的影响。此外，当智能变电站进行调试或改扩建时，需修改变电站配置描述文件(Substation Configuration Description, SCD)，导致相关的虚连接关系全部被删除，设计人员需要重新关联虚端子，增加大量重复性劳动。现有研究针对这些问题提出了一些解决方法。文献[10]提出了基于关键字匹配原理实现虚端子自动关联的方法，但其关键字的选取需要通过人工观察完成，主观性较强。文献[11]使用编辑距离定义虚端子连接的相似度，通过建立优化模型计算编辑距离向量适配不同的 IED，但只针对两个 IED 间的虚端子匹配，并未对整个智能变电站的虚端子匹配做验证，同时编辑距离向量的计算容易受到样本的影响而波动，而且计算量大。文献[12]主要针对改扩建工程实施过程中原 SCD 文件更新时存在版本控制、设计交互困难的问题，采用汉语词法分析系统提取虚连接的中文描述的关键字，然后使用关键字构成模板库，根据模板匹配的方法完成 IED 中虚端子连接的自动重构。该方法依赖于原 SCD 文件的 IED 设备连接关系，主要适用于智能变电站改扩建过程中的虚端子连接，对于智能变电站全站虚端子设计有一定局限性。因此有必要研究一种快速准确的智能变电站全站虚端子自动连接技术，提高虚端子表设计的智能化程度以及设计的工作效率。

1 虚端子的组成与连接

虚端子作为智能变电站 GOOSE、SV 输入输出信号的逻辑连接点，因此可以分为四个类型：GOOSE 输入、GOOSE 输出、SV 输入、SV 输出。由于虚端子是国内基于 IEC61850 标准发展而来的，主要通过命名约定的方式实现互操作，所以虚端子命名格式首先要满足 IEC61850 给定的通用信息模型的规定。但由于标准制定者如 ABB、Siemens 等国外厂商的专家，很少考虑装置复归信号，因此国内继电保护装置中常用的保护跳闸出口压板、特色定值等在标准模型中都不能找到对应的数据点进行建模。国内为规范 IEC61850 建模细节，颁布了符合中国电网实际情况的建模标准，其目前最新版本为 Q/GDW1396-2012《IEC 61850 工程化继电保护应用模型》。特定厂商的建模可以和应用规范有出入，但需要用标准规范的语言表述这些差异。

虚端子完整表示包括数据索引、中文描述和 IED 名称。它们之间有各自的作用，又相互关联。

一方面，虚端子的中文描述，数据引用和 IED 名称包含了不同方面的信息，其中 IED 名称表示的虚端子所属 IED 名称，数据引用定义了面向对象模型中 IED 的通信端口，中文描述则给出了端口所对应的具体含义。另一方面，对于专用虚端子，如“PIGO/PTRC3.Tr.phsA”，数据引用本身就具备明确的含义，它与中文描述“跳断路器 A”是对应的；而对于通用虚端子(一般含有的逻辑节点为“GGIO”)，如“PIGO/GOINGGIO2.SPCS01.stVal”。其中文描述“闭锁重合闸-2”可以视作是通用虚端子数据引用的补充，用于说明该虚端子的实际用途。

智能变电站的虚连接是指信号发送 IED 和接收 IED 之间的信号连接，通常由发送 IED 的输出虚端子和接收 IED 的输入虚端子两部分组成。虚端子端口属性和实际用途主要包含在其中文描述中，实际工程人员通过中文描述的语义和电力系统知识完成虚端子的连接，最后通过中文描述和数据索引的对应关系完成 IED 间虚连接的配置和部署。

2 虚连接语义相似度定义

2.1 包含语义信息的虚连接向量表示

为了完成虚端子的自动连接，对虚端子的连接关系进行数学描述，首先要使用数字向量对虚连接的中文描述进行表示^[13]。

本文采用中文分词将虚连接描述拆分成以词语为基本单元的集合，然后利用中文词向量技术将每个中文词语映射 128 维的中文词向量。这样一个虚连接关系就可以由若干个中文词向量的集合构成，最终通过对集合中的所有词向量取平均值得到虚连接的向量表示。该过程示意如图 1 所示。

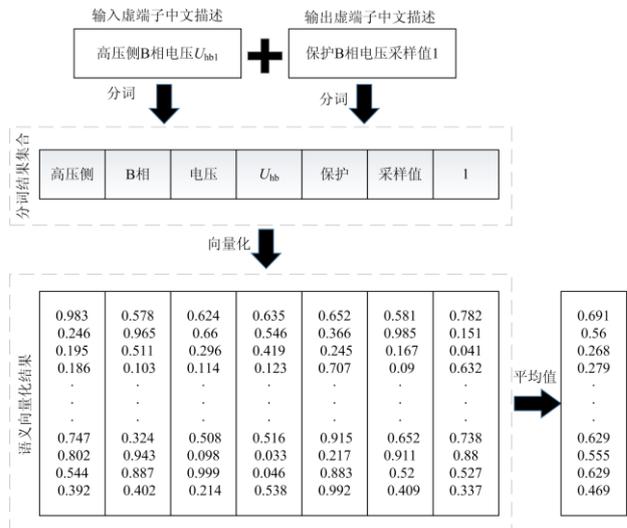


图 1 虚连接向量化过程示意图

Fig. 1 Virtual connection vectorization process diagram

2.2 虚连接语义相似度的计算方法

对于任意两个虚连接和 L_j , 可以通过两个虚连接向量表示的余弦距离表示它们的语义相似度^[14], 如式(1)所示。

$$S(L_i, L_j) = 1 - \cosine(v_i, v_j) = 1 - \frac{v_i^T v_j}{\|v_i\| \|v_j\|} \quad (1)$$

式中, v_i 和 v_j 分别为 L_i 和 L_j 的虚连接向量表示。

3 IED 间虚端子自动匹配数学描述与验证

根据给出的虚连接相似度的定义, 可以对任意虚端子的匹配组合和已有虚连接数据进行比较, 通过组合筛选出最符合已有虚连接数据的匹配结果, 本文使用 k 近邻方法(k-Nearest Neighbor, kNN)完成该筛选过程, 该方法常用于电力系统无监督分类任务^[15-17]。然后计算匹配可信度对匹配结果做进一步的筛选。

3.1 生成匹配数据

对于任意待匹配的 IED, 可以知道与该 IED 相连的发送 IED。具体来说, 假设待匹配 IED 是某 220 kV 线路测控装置, 由设备连接关系可知, 与该 220 kV 线路测控装置相连的发送 IED 设备包括该线路的 220 kV 线路智能终端和 220 kV 线路合并单元。

在确定 IED 具体型号以后, 根据设备生产厂商提供的 ICD 文件(虚端子信息可以使用设备生产厂商的解析软件进行提取), 结合 IED 所在实际线路, 完成 IED 虚端子的实例化(主要是智能终端和测控装置通用接口的实例化)。通过上述方法, 可以获得待匹配的 IED 的输入虚端子以及与之相连的所有发送 IED 的输出虚端子, 分别定义为 $T_{in} = \{T_{in}^1, T_{in}^2, L, T_{in}^{n_{in}}\}$ 和 $T_{out} = \{T_{out}^1, T_{out}^2, L, T_{out}^{n_{out}}\}$, 其中 n_{in} 和 n_{out} 分别为输入、输出虚端子的个数。

对于待匹配 IED 设备的第 i 个输入虚端子 $T_{in}^i (1 \leq i \leq n_{in})$, 其对应的正确的输出虚端子一定包含在 T_{out} 中, 所以有 n_{out} 种可能的虚端子组合, 设这些组合的集合为 $A_i (1 \leq i \leq n_{in})$ 。待匹配 IED 所有输入虚端子生成的虚端子组合为 $A_{Pending}$ 。则 $A_{Pending}$ 可以表示为

$$A_{Pending} = \begin{Bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ M \\ \vdots \\ A_{n_{in}} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} L_{11} & L_{12} & L & L_{1n_{out}} \\ L_{21} & L_{22} & L & L_{2n_{out}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M & M & M & M \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{n_{in}1} & L_{n_{in}2} & K & L_{n_{in}n_{out}} \end{Bmatrix} =$$

$$\left. \begin{Bmatrix} \{T_{in}^1, T_{out}^1\} & \{T_{in}^1, T_{out}^2\} & L & \{T_{in}^1, T_{out}^{n_{out}}\} \\ \{T_{in}^2, T_{out}^1\} & \{T_{in}^2, T_{out}^2\} & L & \{T_{in}^2, T_{out}^{n_{out}}\} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M & M & M & M \\ \{T_{in}^{n_{in}}, T_{out}^1\} & \{T_{in}^{n_{in}}, T_{out}^2\} & K & \{T_{in}^{n_{in}}, T_{out}^{n_{out}}\} \end{Bmatrix} \right\}$$

至此得到了当作测试数据的虚端子组合。

3.2 获取匹配样本数据

已知待匹配的 IED 设备型号, 可以通过已有的智能变电站 SCD 文件获得同种类型 IED 的虚连接样本数据(设包含的 IED 个数为 N_s), 以 IED 个数为基本单元, 用随机抽样的方法将其分为两个部分。一部分(包含 IED 个数为 N_{st})作为训练样本集 $A_{Training}$, 另一部分(包含 IED 个数为 N_{sm})作为匹配样本集 $A_{Matching}$ (根据大量算例测试, N_{st} 与 N_{sm} 的比例为 3:7 比较合适)。设匹配集里的虚连接总数为 n_M 。则 $A_{Matching}$ 可以表示为

$$A_{Matching} = \{L_1, L_2, L_3, L, L_{n_M}\}$$

3.3 选择自动匹配结果

对于第 i 个输入虚端子, 分别计算其虚端子组合 A_i 中第 $j (1 \leq j \leq n_{out})$ 虚端子组合 L_{ij} 与匹配样本集元素 $A_{Matching}$ 中的第 $m (1 \leq m \leq n_M)$ 个虚连接 L_m 的虚连接语义相似度 $S(L_{ij}, L_m)$, 将得到的所有虚连接语义相似度按照从大到小排序, 并取前 k 个。计算示意如图 2 所示, 这里令 $k = N_s$, 即 k 的取值设为虚连接样本集 IED 的个数。原因在于可以假设作为匹配样本的每一个同种类型 IED 内至少有一个虚连接可以使得匹配结果是正确的, 换言之, 匹配样本的每一个同种类型 IED 内至少有一个虚连接和实际正确的虚连接属于同种类型。语义相似度计算过程可以用图 2 表示。

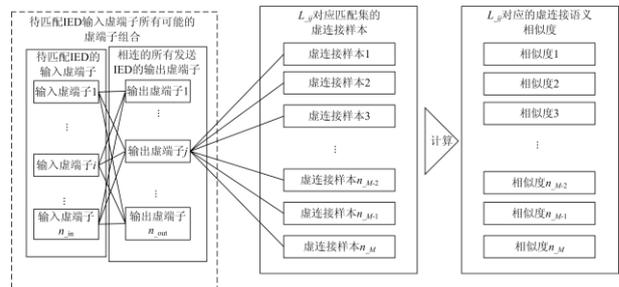


图 2 虚端子组合与虚连接样本的语义相似度计算过程示意图

Fig. 2 Semantic similarity calculation process diagram of virtual terminator combination and virtual connection sample

本文采用如下投票规则提取前 k 大的语义相似度:

若某个近邻在计算时使用了含有输出虚端子 T_{out}^j 的虚端子组合, 则该近邻对输出虚端子 T_{out}^j 投一票。

所有 n_{out} 个输出虚端子的评分可以采用投票分数向量表示: $P_i = [p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{i, n_{out}}]$ 。然后选择投票分数最高的输出虚端子作为第 i 个输入虚端子 T_{in}^i 的自动匹配结果。同理, 可以采用上述方法完成待匹配 IED 剩下的输入虚端子的自动匹配。

3.4 计算自动匹配结果的可信度

对于第 i 个输入虚端子 T_{in}^i 的自动匹配结果(假设其匹配的输出虚端子为 T_{out}^j), 其匹配可信度可以由式(2)求得。

$$C_i = \frac{P_{ij}}{N_{sm}} \quad (2)$$

式中: P_{ij} 为自动匹配结果的投票分数; N_{sm} 为匹配样本集 $A_{Matching}$ 中的 IED 个数。当自动匹配的可信度小于匹配可信度阈值 $C_N = 0.75$ 时, 可以对该匹配结果进行人工校验, 保证虚连接结果的正确性。其中可信度的阈值选取需要考虑两个方面的因素: 一方面阈值选取不能过低, 低阈值会导致自动匹配结果的正确性得不到保证, 影响方法的可靠性; 另一方面阈值选取过高会导致较多虚连接结果需要人工重新校对, 违背了使用自动连接方法提高虚端子连接工作效率的初衷。因此, 可信度阈值选取需要进行权衡, 即在保证自动匹配结果完全准确的前提下, 尽可能选取较低的阈值。本文基于大量算例测试, 选取了 0.75 作为一个较优的结果。

4 智能变电站全站虚端子自动匹配

4.1 智能变电站主要 IED 划分

根据 IEC61850, 智能变电站的结构可分为三个层次, 分别为站控层、间隔层、过程层。其中间隔层的一次系统依据电压等级、主接线方式和一次设备类型, 以断路器或电气元件(如主变压器、母线等)作为划分节点, 通常被划分为线路间隔、母线间隔、主变间隔、母联(分段)间隔、电容(电抗)间隔、站用变压器间隔等。因为智能变电站二次系统服务于一次系统, 保障一次系统正常、可靠运行。因此智能变电站二次系统 IED 的连接和配置与电气间隔密切相关。本文参考智能变电站一次系统间隔划分的方法, 根据 IED 的功能和其关联的一次设备的电压等级、主接线方式, 对智能变电站二次系统的主要 IED 进行划分。划分后的二次系统间隔主要包括线路间隔, 主变间隔、母线间隔和母联间

隔^[18-19]。并且依照一次系统间隔配置的原则和二次系统功能要求, 确定二次系统间隔内 IED 的数量。不同电压等级和主接线方式下 IED 配置数量如表 1 所示^[20-24]。

根据典型间隔的划分和表中配置原则, 可以获得间隔内 IED 以及与间隔相连 IED 的 GOOSE、SV 信号的发送和接收关系^[25-27], 从而搭建 IED 间虚端子匹配和智能变电站全站虚端子连接的桥梁。

表 1 不同电压等级和母线接线方式下 IED 配置原则

IED 类型	220 kV 配置(双套)	110 kV 及以下配置(单套)
线路保护	双母线线路保护	110(66) kV 线路保护
		10(35) kV 线路保护
母线保护	双母线接线和双母分段; 双母线单分段	双母线、单母线、单母分段、双母双分段; 双母单分段、单母三分段
		单母三分段
母联保护	双母线母联(分段)保护	单母线母联(分段)保护
变压器保护	220 kV 变压器保护	110(66) kV 变压器保护
	220 kV 线路(主变)合并单元	110(66) kV 母线合并单元等
智能终端	220 kV 线路(主变)智能终端	110 kV 线路智能终端
	220 kV 母线智能终端	110 kV 主变智能终端 110 kV 母线智能终端 主变本体智能终端等
合并单元智能终端一体化装置	—	110(66) kV 线路合并单元智能终端一体化装置
	—	110(66) kV 主变合并单元智能终端一体化装置
多合一装置	—	35(10) kV 保护、测控、合并单元、智能终端、考核计量多合一装置
多功能测控	220 kV 多功能测控 220 kV 母线测控	110 kV 线路保护测量合一装置
		110 kV 主变测控
		110 kV 母线测控 110 kV 多功能测控
站域保护	220 kV 站域保护	110 kV 站域保护

4.2 算例验证

本文以前旗 220 kV 智能变电站为例对智能变电站虚端子自动连接方法进行覆盖性的测试。根据前旗变的电压等级和一次接线提取典型二次设备间隔, 针对典型二次间隔内主要 IED, 采用本文提出的自动连接方法完成其虚端子的自动连接, 然后与前旗变的实际虚连接进行对比。

1) 结果评价指标

随着电网智能化程度的提高和机器学习技术的成熟, 许多研究开始使用机器学习方法改进传统方法难以处理的电力系统难题, 并提出了完善的结果评价标准^[28-29]。机器学习领域中, 通常使用准确率 P 和召回率 R 来评价一个学习算法的性能。通常查准率和查全率是相互矛盾的。一个高的时候, 另一个往往会比较低。学习算法通常需要在两者进行综合权衡, 权衡的结果可以使用 F_1 度量表示为

$$F_1 = \frac{2 \cdot P \cdot R}{P + R} = \frac{2 \cdot TP}{N + TP - TN} \quad (3)$$

式中: N 为样例总数; F_1 为一个 0~1 范围内的数, 而且 F_1 越大, 则可以认为学习算法的性能越好。

本文通过匹配可信度阈值 $C_N=0.75$ 将自动连接结果分为可以直接使用(Directly Use)的结果和需要人工校验和重连(Reconnect)的结果。将自动连接结果和虚连接结果对比, 借鉴机器学习中的准确率和召回率的概念, 可以将对比结果划分为真直例(TD)、假直例(FD)、真重例(TR)和假重例(FR), 虚连接分类结果矩阵如表 2 所示。

表 2 虚端子自动连接分类结果矩阵

Table 2 Classification result matrix of virtual terminators automatic connection

真实情况	自动匹配结果	
	直例(D)	重例(R)
真(T)	真直例(TD)	真重例(TR)
假(F)	假直例(FD)	假重例(FR)

定义连对率 P_{vc} 和连全率 R_{vc} 分别如式(4)和式(5)所示。

$$P_{vc} = \frac{TD}{TD + FD} \quad (4)$$

$$R_{vc} = \frac{TD}{TD + TR + FD} \quad (5)$$

这里的连全率 R_{vc} 是指自动连接正确的结果占需要连接总数的比例, 显然 $R_{vc} \leq P_{vc}$ 。实际上, 如果将匹配可信度的阈值提高, 则 FD 会增加, 导致 R_{vc} 变小, P_{vc} 增大, 反之亦然。因此需要对连对率和连全率进行权衡。考虑到电力二次系统的安全性和稳定性, 自动连接的结果需要满足 $FD=0$ 。即 $P_{vc}=1$ 。从而得到虚端子自动连接结果的评价指标 E_1 如式(6)所示。

$$E_1 = \frac{2 \cdot P_{vc} \cdot R_{vc}}{P_{vc} + R_{vc}} = \frac{2 \cdot R_{vc}}{1 + R_{vc}} = \frac{2 \cdot TD}{2 \cdot TD + TR + FR} \quad (6)$$

2) 算例测试场景

前期变的电气主接线图如图 3 所示。电压等级

为 220 kV, 母线采用双母线接线方式。将前期变的主要 IED 划分为 220 kV 线路二次间隔、110 kV 线路二次间隔、220 kV 主变二次间隔、220 kV 母线二次间隔、110 kV 母线二次间隔和 220 kV 母联二次间隔。考虑到测控装置、智能终端和合并单元需要按照二次间隔进行分类, 而每个二次间隔内的虚端子连接相对独立。因此本文按照划分的二次间隔进行结果表示, 将间隔内所有 IED 虚端子自动连接的总和作为二次间隔的结果, 并采用 E_1 指标进行评估。

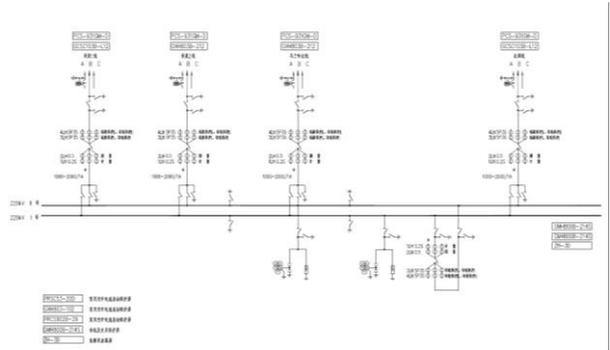


图 3 前旗变电气主接线图

Fig. 3 Electrical main wiring diagram of Qianqi smart substation

本文采用如图 4 所示的测试流程对前期变虚连接进行测试。

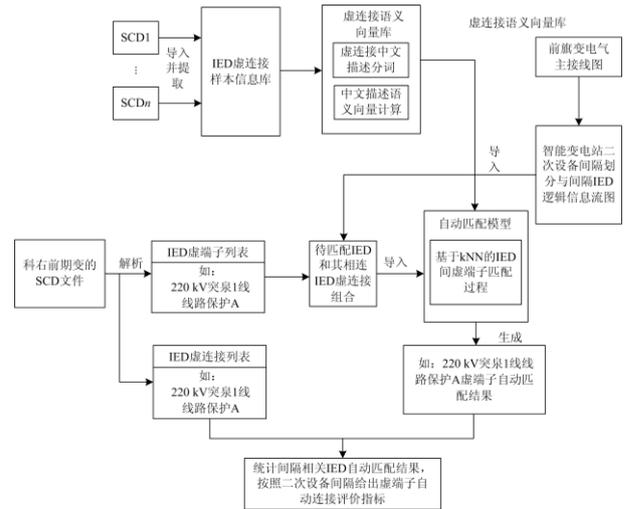


图 4 前旗 220 kV 智能变电站虚端子自动连接算例测试流程

Fig. 4 Test flow of virtual terminators automatic connection of Qianqi 220 kV smart substation

3) 算例结果与分析

将虚端子自动连接结果按照 220 kV 线路二次间隔、110 kV 线路二次间隔、220 kV 主变二次间隔、220 kV 母线二次间隔、110 kV 母线二次间

隔、220 kV 母联二次间隔和 110 kV 母联二次间隔分别表示如表 3—表 9。

表 3 220 kV 线路二次间隔虚端子自动连接结果

Table 3 Automatic connection result of virtual terminators related to 220 kV bus line secondary bay

真实情况	自动匹配结果		p_{vc}	R_{vc}	E_1
	直例(D)	重例(R)			
真(T)	2 406	102	1.0	0.954	0.976
假(F)	0	13			

表 4 110 kV 线路二次间隔自动连接结果

Table 4 Automatic connection result of virtual terminators related to 110 kV line secondary bay

真实情况	自动匹配结果		p_{vc}	R_{vc}	E_1
	直例(D)	重例(R)			
真(T)	1 046	69	1.0	0.931	0.964
假(F)	0	8			

表 5 220 kV 主变二次间隔相关虚端子自动连接结果

Table 5 Automatic connection result of virtual terminators related to 220 kV main transformer secondary bay

真实情况	自动匹配结果		p_{vc}	R_{vc}	E_1
	直例(D)	重例(R)			
真(T)	1 894	284	1.0	0.870	0.930
假(F)	0	0			

表 6 220 kV 母线二次间隔相关虚端子自动连接结果

Table 6 Automatic connection result of virtual terminators related to 220 kV bus secondary bay

真实情况	自动匹配结果		p_{vc}	R_{vc}	E_1
	直例(D)	重例(R)			
真(T)	474	106	1.0	0.80	0.889
假(F)	0	12			

表 7 110 kV 母线二次间隔虚端子自动连接结果

Table 7 Automatic connection result of virtual terminators related to 110 kV bus secondary bay

真实情况	自动匹配结果		p_{vc}	R_{vc}	E_1
	直例(D)	重例(R)			
真(T)	475	98	1.0	0.811	0.895
假(F)	0	13			

表 8 220 kV 母联二次间隔虚端子自动连接结果

Table 8 Automatic connection result of virtual terminators related to 220 kV bus coupler secondary bay

真实情况	自动匹配结果		p_{vc}	R_{vc}	E_1
	直例(D)	重例(R)			
真(T)	285	34	1.0	0.885	0.939
假(F)	0	3			

表 9 110 kV 母联二次间隔虚端子自动连接结果

Table 9 Automatic connection result of virtual terminators related to 110 kV bus coupler secondary bay

真实情况	自动匹配结果		p_{vc}	R_{vc}	E_1
	直例(D)	重例(R)			
真(T)	340	44	1.0	0.885	0.939
假(F)	0	0			

由表 3—表 9 可知，对于所有二次间隔，虚端子自动连接的结果都可以保证完全的连对率和较高的连全率，验证了本文提出的智能变电站虚端子自动连接方法的正确性和通用性。具体分析：

1) 通过 E_1 指标，可以发现本文提出的虚端子自动连接方法对于线路二次间隔的 IED 间的虚端子连接具有很好的性能，原因在于智能变电站中具有较多的线路间隔，可以获得大量的线路间隔内的 IED 虚连接样本，从而获得较好的学习效果。

2) 由表 5—表 7 可知，主变二次间隔和母线二次间隔的连全率相对较低，主要原因在于这些二次间隔内 IED 设备较多，相互间的信息交互复杂，不同虚端子组合的距离较小，导致采用 kNN 方法投票时，多个输出虚端子的票数较为接近，使得匹配结果的匹配可信度降低，进而导致连全率相对较低。

5 结论

1) 针对基本 IED 间的虚端子连接问题，使用自然语言处理方法，将中文文本形式的虚连接关系转换为可以用于数学建模的语义向量，利用语义相似度表示虚端子匹配结果和已有虚连接的相似程度，建立虚端子自动匹配的数学模型，实现 IED 间虚端子的自动匹配。

2) 针对智能变电站二次设备种类型号和数量较多、相互连接复杂的问题，将二次设备划分为线路二次间隔、主变二次间隔、母线二次间隔和母联二次间隔，通过间隔明确了二次设备的连接关系，将全站虚端子连接问题化简为若干个 IED 间虚端子的自动匹配。

3) 借鉴了机器学习中对于学习方法性能的评估方法，结合虚端子连接的实际情况，设计了用于测试虚端子自动连接方法的评价指标。针对实际运行的前旗 220 kV 智能变电站，使用提出的虚端子自动连接方法获得全站的虚连接，并将自动连接结果和该智能站的实际虚连接结果进行对比，对计算评价指标进行分析，验证了提出的智能变电站虚端子自动连接方法的工程实用价值。

参考文献

- [1] 陈德辉, 须雷, 赵希才. 智能变电站自动化与保护核心 IEC 标准的进展与分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(21): 229-239.
CHEN Dehui, XU Lei, ZHAO Xicai. Progress and analysis of intelligent substation automation and protection core IEC standards[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(21): 229-239.
- [2] 高翔, 张沛超. 数字化变电站的主要特征和关键技术[J]. 电网技术, 2006, 30(23): 67-71.
GAO Xiang, ZHANG Peichao. Main characteristics and key technologies of digital substation[J]. Power System Technology, 2006, 30(23): 67-71.
- [3] ZHENG Yuanping, LIANG Yongliang, NIU Lin. Research on key technology of smart substation with intelligent materials[J]. Advanced Materials Research, 2012(485).
- [4] 胡道徐, 沃建栋. 基于 IEC 61850 的智能变电站虚回路体系[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17): 78-82.
HU Daoxu, WO Jiandong. Intelligent substation virtual loop system based on IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 78-82.
- [5] 王利平, 庞晓艳, 朱雨, 等. 基于物联网和移动互联网的二次设备运维技术研究与应用[J]. 中国电力, 2019, 52(3): 177-184.
WANG Liping, PANG Xiaoyan, ZHU Yu, et al. Research and application of secondary equipment operation and maintenance technology based on Internet of Things and mobile Internet[J]. Electric Power, 2019, 52(3): 177-184.
- [6] 刘群. 智能变电站中的虚端子设计方法研究[J]. 电气开关, 2014, 52(6): 73-76.
LIU Qun. Research on design method of virtual terminal in intelligent substation[J]. Electric Switch, 2014, 52(6): 73-76.
- [7] 高亚栋, 朱炳铨, 李慧, 等. 数字化变电站的“虚端子”设计方法应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 124-127.
GAO Yadong, ZHU Bingquan, LI Hui, et al. Application research of "virtual terminal" design method in digital substation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 124-127.
- [8] 胡广林. 智能变电站系统配置器虚端子技术的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
HU Guanglin. Research on virtual terminal technology of intelligent substation system configurator[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [9] 宋杰, 高亮, 鲍伟, 等. 基于协同测试系统的智能变电站 GOOSE 虚端子关联检测研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 138-142.
SONG Jie, GAO Liang, BAO Wei, et al. Research on correlation detection of GOOSE virtual terminal in intelligent substation based on collaborative test system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 138-142.
- [10] 陈桥平, 纪陵, 李一泉, 等. 智能变电站二次设备自动关联技术研究与应用[J]. 广东电力, 2015, 28(12): 74-79.
CHEN Qiaoping, JI Ling, LI Yiquan, et al. Research and application of automatic correlation technology for secondary equipment in intelligent substation[J]. Guangdong Electric Power, 2015, 28(12): 74-79.
- [11] 王文琪, 胡炎, 赵娜, 等. 基于距离权重向量优化模型的虚端子自动连接方法[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 346-352.
WANG Wenqi, HU Yan, ZHAO Na, et al. Automatic connection method of virtual terminal based on distance weight vector optimization model[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 346-352.
- [12] 高磊, 刘鹏, 卜强生, 等. 基于 SED 文件的智能变电站改扩建二次系统配置文件自动重构技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 153-158.
GAO Lei, LIU Peng, BU Qiangsheng, et al. Research on automatic reconstruction technology of secondary system configuration file based on SED file for intelligent substation reconstruction and expansion[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 153-158.
- [13] 张驰, 谢民, 刘宏君, 等. 基于语义网的智能站继电保护隐性故障辨识诊断技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 95-101.
ZHANG Chi, XIE Min, LIU Hongjun, et al. Semantic network based intelligent station relay protection hidden fault recognition diagnosis technology[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 95-101.
- [14] 裴家欢. 中文词汇语义相似度计算研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
PEI Jiahuan. Research on semantic similarity calculation of Chinese vocabulary[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [15] ASADI M A, SAMET H, GHANBARI T. k-NN based fault detection and classification methods for power transmission systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(4): 359-369. DOI: 10.1186/s41601-017-0063-z.
- [16] LÜ X, CHENG X, TANG Y. Short-term power load forecasting based on balanced KNN[C] // IOP

- Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, 2018, 322(7).
- [17] LIU Pengyuan, YANG Chenye, WU Jiang, et al. Hybrid features based K-means clustering algorithm for use in electricity customer load pattern analysis[C] // 2018 37th Chinese Control Conference (CCC), July 25-27, 2018, Wuhan, China.
- [18] 姜宁, 高翔, 刘孝刚, 等. 基于 SCD 语义的保护二次回路辨识技术探讨[J]. 电气技术, 2018, 19(7): 97-102.
JIANG Ning, GAO Xiang, LIU Xiaogang, et al. Discussion on protection secondary loop recognition technology based on SCD semantics[J]. Electrical Technology, 2018, 19(7): 97-102.
- [19] 李超, 罗凌璐, 王德辉, 等. 智能变电站过程层网络监测与故障定位系统设计与实现[J]. 电力工程技术, 2019, 38(2): 117-122, 141.
LI Chao, LUO Linglu, WANG Dehui, et al. Design and implementation of process-level network monitoring and fault location system for smart substation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(2): 117-122, 141.
- [20] 吴标琪. 220 kV 秋山智能变电站继电保护系统设计[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
WU Biaoqi. Design of relay protection system for 220 kV Akiyama intelligent substation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [21] 何昕. 110 kV 智能变电站的设计与研究[D]. 沈阳: 东北农业大学, 2018.
HE Xin. Design and research of 110 kV intelligent substation[D]. Shenyang: Northeast Agricultural University, 2018.
- [22] 王平, 贾立莉, 李守学, 等. 110 kV 全户内智能变电站接地网优化设计[J]. 中国电力, 2018, 51(3): 42-48.
WANG Ping, JIA Lili, LI Shouxue, et al. Optimal design of 110 kV indoor intelligent substation grounding grid[J]. Electric Power, 2018, 51(3): 42-48.
- [23] 余群兵, 汤同峰, 金震, 等. 中低压保护控制异构双重化方案研究[J]. 电力工程技术, 2019, 38(1): 90-95.
YU Qunbing, TANG Tongfeng, JIN Zhen, et al. Research on the heterogeneous dualization scheme of medium and low voltage protection control[J]. Power Engineering Technology, 2019, 38(1): 90-95.
- [24] 陈娟. 35 kV 智能变电站的继电保护配置[J]. 信息记录材料, 2018, 19(12): 241-242.
CHEN Juan. Relay protection configuration of 35 kV intelligent substation[J]. Journal of Information Materials, 2018, 19(12): 241-242.
- [25] 叶远波, 谢民, 陈实, 等. 智能变电站二次系统公共信息模型拓展研究[J]. 自动化技术与应用, 2018, 37(7): 154-158.
YE Yuanbo, XIE Min, CHEN Shi, et al. Research on extension of public information model for secondary system of smart substation[J]. Automation Technology and Application, 2018, 37(7): 154-158.
- [26] 肖永立, 刘松, 见伟, 等. 智能变电站二次设备多源数据建模与存储方法研究[J]. 计算机应用与软件, 2019, 36(9): 6-11, 126.
XIAO Yongli, LIU Song, JIAN Wei, et al. Research on multi-source data modeling and storage method for secondary equipment of intelligent substation[J]. Computer Applications and Software, 2019, 36(9): 6-11, 126.
- [27] 尹相国, 何楷, 靳婷婷, 等. 智能变电站二次回路可视化的设计与实现[J]. 电气时代, 2018(11): 85-87.
YIN Xiangguo, HE Kai, JIN Tingting, et al. Design and implementation of secondary loop visualization in intelligent substation[J]. Electric Age, 2018(11): 85-87.
- [28] 杨洁. 基于机器学习的智能电网调度控制系统在线健康度评价研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
YANG Jie. Research on online health evaluation of smart grid dispatching control system based on machine learning[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [29] HU Zhuangli, HE Tong, ZENG Yihui, et al. Fast image recognition of transmission tower based on big data[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 149-158. DOI 10.1186/s41601-018-0088-y.

收稿日期: 2019-10-16; 修回日期: 2020-02-10

作者简介:

范卫东(1964—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为继电保护; E-mail: fanwd8@qq.com

冯晓伟(1983—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为继电保护; E-mail: fxw6550@163.com

董金星(1972—), 女, 本科, 高级工程师, 研究方向为继电保护。E-mail: dongjinxing@163.com

(编辑 葛艳娜)