

DOI: 10.7667/PSPC162031

## 基于语义网的智能变电站运维专家系统可扩展建模与应用

宋杰<sup>1</sup>, 徐洁<sup>1</sup>, 周德生<sup>1</sup>, 鲍伟<sup>1</sup>, 黄文焘<sup>2</sup>, 高翔<sup>3</sup>

(1. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200437; 2. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240;  
3. 上海毅昊自动化有限公司, 上海 201204)

**摘要:** 针对智能变电站运维专家系统存在知识内容变更困难与扩展性差的难题, 提出了一种基于语义网的智能变电站专家系统知识库建模方法。首先, 分析语义网的基本概念与功能, 建立基于语义网变电站运维专家系统建模的技术基础。其次, 从智能变电站设备配置、IED 配置和通信配置三个层面建立可扩展性模型, 并分析可扩展模型优点。以天目湖智能变电站为对象, 对建模过程、模型及可扩展性进行说明, 并基于 CLIPS(C Language Integrated Production System)平台对相关模型进行验证。建模及仿真验证表明, 语义网使知识库的构造更加体系化, 提高了知识库不同概念之间的逻辑性和统一性, 从而达到提高专家系统知识库扩展性和规则库规则复用性。

**关键词:** 语义网; 运维专家系统; 可扩展模型; 智能变电站; CLIPS

### Modeling and application of expert system for scalable smart substation based on semantic web

SONG Jie<sup>1</sup>, XU Jie<sup>1</sup>, ZHOU Desheng<sup>1</sup>, BAO Wei<sup>1</sup>, HUANG Wentao<sup>2</sup>, GAO Xiang<sup>3</sup>

(1. State Grid Shanghai Electric Power Research Institute, Shanghai 200437, China;  
2. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;  
3. Shanghai Yihao Automation Co., Ltd., Shanghai 201204, China)

**Abstract:** Nowadays, there exist problems in smart substation operation and maintenance expert system, such as difficulties of knowledge content change and poor scalability. Therefore, a new knowledge structure modeling method of smart substation expert knowledge database based on the conception of semantic network is proposed. Firstly, the basic conception and functions of semantic web are analyzed so as to build technological base for smart substation expert knowledge database modelling. Secondly, a scalable model is established from three aspects including smart substation equipment configuration, IED configuration, and communication configuration. Thirdly, Tianmuhu smart substation model is chosen as an example to clarify the expert system modelling process and its expansibility. In addition, the C Language Integrated Production System (CLIPS) platform is used to verify the models. Through modeling and simulation, it is shown that the structure of semantic-network-based knowledge base is more systematic. The logic and uniformity among different concepts in knowledge base are improved, so that the goals of improving the expansibility of expert system knowledge base and the reuse rate of the rule base can be achieved.

This work is supported by Science & Technology Project of Shanghai Electric Power Company of SGCC: Research on Image Simulation Technology of Secondary System of Intelligent Substation Based on SCD (No. 520940150013).

**Key words:** semantic network; operation and maintenance expert system; expansible model; smart substation; CLIPS

## 0 引言

随着国家电网公司智能电网战略的推进, 截止 2015 年底已有约 5182 座智能变电站投入运行<sup>[1]</sup>。

基金项目: 国家电网上海市电力公司科技项目 (520940150013)  
“基于 SCD 的智能变电站二次系统镜像仿真技术研究”

智能变电站的二次系统全部被封装在配置描述文件 (Substation Configuration Description, SCD) 中, 因此给变电站的运行维护带来了很大的困难。早在 2011 年和 2012 年就有学者提出使用专家系统的方法对智能变电站的运维工作进行辅助, 指导和帮助运行人员针对事故和异常快速做出准确判断, 从而提高变电站运行管理水平和可靠性<sup>[2-3]</sup>。与传统变电站不

同, 智能变电站的系统架构发生了重大变革。站内设备更加多样, 保护功能的实现依赖于多个设备共同作用<sup>[4]</sup>。尤其对于高电压等级的变电站, 保护采用双重配置, 更增加了设备种类。作为对高压一次设备进行保护的二次设备, 如果发生故障将使一次设备失去保护和控制, 继而对接入系统的安全稳定运行产生威胁<sup>[5]</sup>, 这对变电站运维辅助决策专家系统提出了巨大的需求和挑战。

文献[6]根据智能变电站目前的技术情况, 提出了基于人工神经网络的变电站故障信息专家系统, 为故障分析决策提供支撑技术。文献[7]以国电南瑞信息一体化平台为基础, 研究了基于变电站告警信息的变电站智能告警专家系统。文献[5]设计了变电站二次设备智能评估专家系统, 采用产生式和框架式知识表示方法, 基于规划推理机制实现智能变电站的信息处理。文献[8]在 IEC 61850 规约的基础上, 设计出继电保护的在线监测和专家系统。上述针对智能变电站运维辅助决策的专家系统均采用一般建模方法对每种设备进行单独建模。这种方式往往会造成知识库结构繁琐, 设备间关联程度低; 同时缺乏在已有的基础上对知识库进行扩充的能力。

近十年来, 人工智能技术在知识表达方面的发展, 特别是本体理论及语义网技术的进步<sup>[9]</sup>, 为智能变电站辅助决策专家系统知识库的建模提供了新的思路。智能语义网, 最早应用于网络搜索问题, 用于对网络中纷繁复杂的语言描述进行合理的模型构造, 从而便于机器理解和搜索。也有学者提出, 将语义网应用于智能电网广义数据管理模型中, 以解决广义数据类型多和结构复杂的问题, 兼具良好的拓展性<sup>[10]</sup>。智能变电站的设备信息同样具备设备数量大和关联关系复杂的问题, 且对模型的可扩展性具有较高要求。

本文借鉴本体和语义网的相关概念和思路对智能变电站辅助决策专家系统知识库进行建模, 建立一次设备、二次设备和通信设备间的基本结构和逻辑框架。结合 IEC 61850 标准和语义网特性, 设计合理的专家系统知识库模型, 使得各类设备间可以最大限度地实现机器对知识的认知能力, 提高设备间的知识共享和规则共享能力, 提高模型的可扩展性。并通过一个案例, 对知识库建模的扩展性进行说明。

## 1 变电站专家系统语义网建模基础

### 1.1 语义网基本概念与组成

语义网的目标是提供一个通用的语义框架, 实现数据在不同应用之间的共享和集成<sup>[11-12]</sup>。语义网是对现有建模增加了语义支持, 其目标是帮助机器

在一定程度上理解建模信息的含义, 使得高效的信息共享和机器智能协同成为可能。语义网将会为用户提供动态、主动的服务, 从而更便于机器和机器、人和机器之间的对话及协同工作。

Berners-Lee 提出了最初的语义网体系结构<sup>[13]</sup>, 随着人们对语义网的深入研究, 语义网的体系结构也在不断地发展演变。图 1 给出了语义网的体系结构, 各层的功能自下而上逐渐增强。语义网的结构包括 7 层, 自下而上分别为基础层、句法层、资源描述框架、本体层、逻辑层、验证层与信任层。本体(ontology)作为语义网的基础, 是对专家系统领域知识概念化和模型化的一种途径, 可以被用来描述数据的语义信息<sup>[14]</sup>。关于本体的概念还没有统一的定义, 本文采用 Studer 在 1998 年提出的: “本体是共享概念模型的明确的形式化的规范说明”<sup>[11, 15]</sup>。

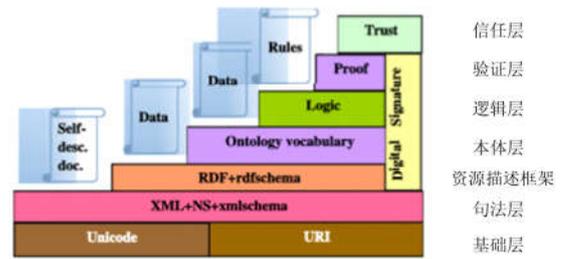


图 1 语义网的体系结构

Fig. 1 Architecture of semantic web

实现语义网需要三大技术的支持, 即 XML、RDF 和 Ontology。其中 XML 层作为句法层, RDF 层作为数据层, Ontology 层作为语义层, 也是建模的核心内容。借鉴本体的概念对智能变电站运维专家系统的知识库进行建模, 主要具备以下两个优势:

- 1) 本体的分析使得领域知识间的结构清晰、概念明确, 从而为知识的运用打好基础;
- 2) 统一的结构更便于计算机对相关概念的理解, 为后续专家系统在概念和规模上的扩展提供便利。

现实中, 智能变电站的站内设备种类繁多, 数量庞大。若运用对各类设备直接建模的方式, 难免造成知识库知识结构混乱、相似设备类型间相似性不明确; 规则库各规则只针对特定种类设备, 通用性不强、过于繁杂等问题。若借鉴语义网的相关概念, 结合 IEC 61850-6 的 SCL 中关于对象建模的相关规定对智能变电站设备进行建模。语义网中一个极为重要的概念就是本体的概念, 总的来说本体的目标是捕获相关领域的知识, 提供对该领域知识的通用表达<sup>[16]</sup>。

### 1.2 语义网建模特点

领域知识和领域规则是专家系统的两个重要组

成部分, 在智能变电站运维专家系统中, 领域知识与变电站结构、一二次设备以及通信系统紧密相关; 而领域规则涉及故障处理措施等相关内容。在智能变电站专家系统的开发和应用过程中, 领域知识的建模是核心技术问题, 也是本文重点研究的内容。

在智能变电站的知识库建模问题中, 虽然不存在对语义信息进行建模的问题, 但变电站中大量的设备信息、连接信息和网络信息也存在复杂、难以理解的问题。通过借鉴语义网的相关概念和方法对智能变电站站内信息进行建模, 能够使站内信息的概念更加清晰。若相关的智能变电站语义网建模方式能够得到较多认可甚至上升为行业标准, 将会为日后的智能变电站运维工作带来极大的便利。

### 1.3 基于 IEC 61850 的语义网建模对象

借鉴语义网本体概念中关于类的继承和关系继承的概念, 结合 IEC 61850-6 标准中 SCL 对对象模型的要求, 构建完备的本体模型。

对象模型应具备的三个基本方面包括:

1) 变电站一次设备部分。该部分应包括 IEC 61346 中提到的涉及功能的变电设备(动作设备)以及它们在线路层次上的连接关系(拓扑关系), 以及设备和功能的说明。

2) 变电站二次描述部分。该部分应包括所有二次相关对象类型, 如 IED 和逻辑节点的实现。

3) 通信部分。该部分应包含与通信相关的对象类型, 如子网和通信接入点, 并以逻辑节点和服务器之间的连接关系为基础, 描述 LED 间的连接关系<sup>[16-17]</sup>。

图 2 为 IEC 61850-6 中给出的 SCL 对象模型。根据图 2 可以看出, 变电站一次设备部分和二次设备部分均采用层次结构, 容易与语义网中类的继承概念相联系。同时, 变电站设备在功能上的隶属关系也同样可以借鉴语义网中关系继承的概念进行表达。

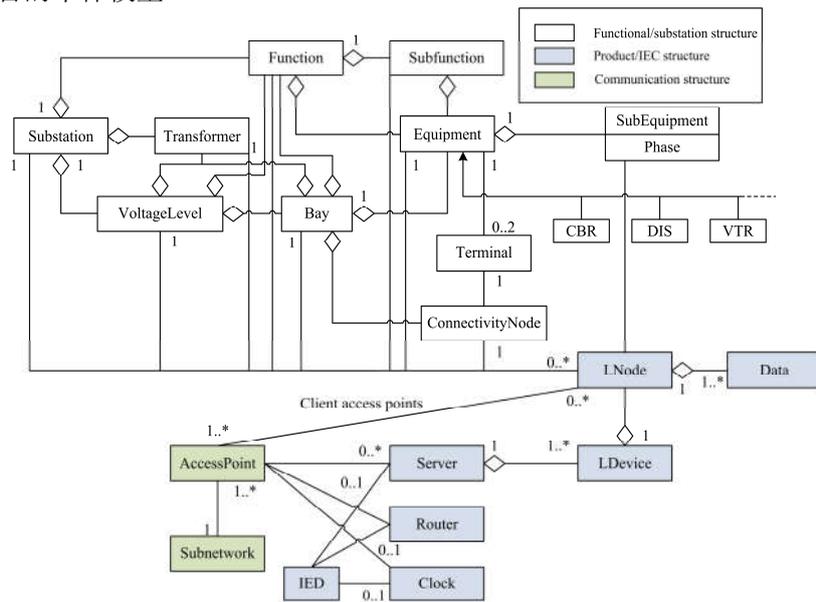


图 2 IEC61850-6 SCL 对象模型

Fig. 2 IEC61850-6 SCL object model

## 2 运维辅助专家系统可扩展模型

基于 IEC 61850-6 标准中定义了变电站配置描述语言(Substation Configuration Description Language, SCL), 该语言用来进行 IED 和通信系统的配置<sup>[18]</sup>。SCL 对于智能电子设备实现互操作性具有重要的作用, 它的出现, 使得通信系统配置数据可以在不同的制造商提供的智能电子设备和系统配置工具之间互相交换。在 IEC 61850 中, 通用的方法是将所有的应用功能分解为最小实体, 并将这些实体合理地分配到专用设备, 即 IED, 这些实体称为逻辑节点。

逻辑节点包含带有专用数据属性的数据, 通过专用服务, 交换由数据和数据属性所代表的信息。

结合 IEC 61850 中的要求, 配置模块包括变电站配置模块、IED 配置模块和通信配置模块等。本文主要讨论这三个模块的建模问题。借鉴语义网中关于类继承和属性继承的相关概念对变电站相关设备分三部分进行建模。从本体命名中可以看出, 语义网模型搭建过程与 IEC 61850 标准紧密结合, 限于篇幅不再对本体进行解释。值得注意的是, 语义网模型中大量运用的两种表示本体连接关系的属性是 AUnderWhichB 和 AAndB, 其中 UnderWhich 表

征的是对象模型中的继承概念, 即 SCD 文件中的层级嵌套关系; And 表征的是一次设备之间的拓扑连接关系以及一二次设备间的从属关系。

### 2.1 变电站配置模型

变电站配置模块建模过程中尽量提高一次设备公共属性的复用率, 尽量将一次设备的公共属性置

于基类 SubstationEquipment 类别中。同时模型应具备很强的表达一次设备拓扑连接关系的能力。本文所提出的建模方法充分考虑专家系统推理需求, 利用 SCD 文件的信息, 利用连接点(ConnectivityNode)将设备端点(Terminal)连接起来, 形成变电站一次设备的网络拓扑结构, 如图 3 所示。

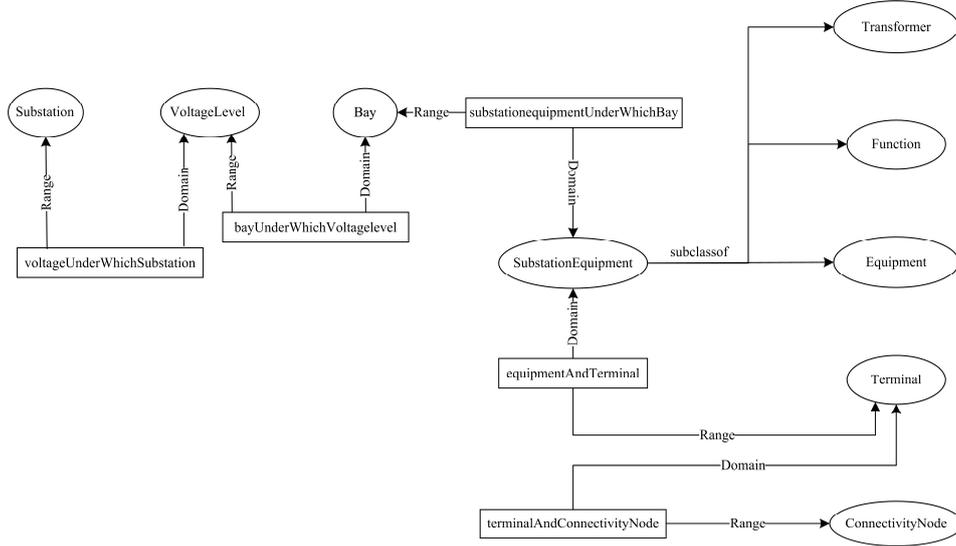


图 3 变电站配置模块模型示意

Fig. 3 Substation configuration module model

### 2.2 IED 配置模型

IED 设备作为二次设备, 一方面需要与一次设备紧密连接, 另一方面, 二次系统信号的传递依赖于通信网络<sup>[19]</sup>。所以在建模过程中应突出一、二次设备连接关系以及二次系统与通信系统的连接关系。由于这些关联关系, 在后续专家系统的推理过

程中, 要经常被使用到, 因此也应注意相应部分的表达尽量简洁, 以提高专家系统整体的效率。另外, 由于逻辑节点(LNode)与变电站设备之间的关系种类较多, 为了遵循共用属性复用原则, 逻辑节点与一次设备之间的关系也采用继承方法进行实现, 如图 4 所示。

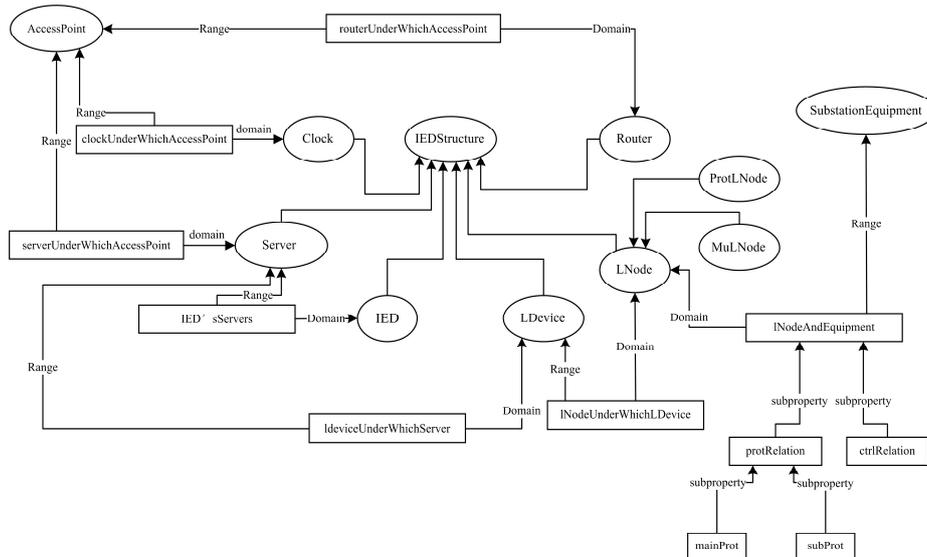


图 4 IED 配置模块模型示意

Fig. 4 IED configuration module model

### 2.3 通信配置模型

相较变电站配置模块和 IED 配置模块，通信配置模块较为简单，包含接入点(Accesspoint)和子网(Subnetwork)两个部分，如图 5 所示。其中，接入点是通信模块与二次系统紧密关联的重要部分。

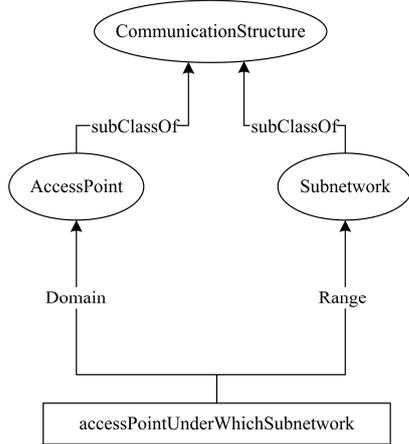


图 5 通信配置模块模型示意

Fig. 5 Communication configuration module model

变电站运维辅助专家系统可扩展模型主要包括三类设备，即一次设备、二次设备与通信设备。除主变和母线等核心设备外，变电站内的扩展设备如补偿设备、视频设备及其辅助设备，也可参照设备的拓扑与从属关系建立扩展设备的配置模型、IED 配置模型与通信配置模型。

智能变电站设备类型与数量繁多，运维任务复

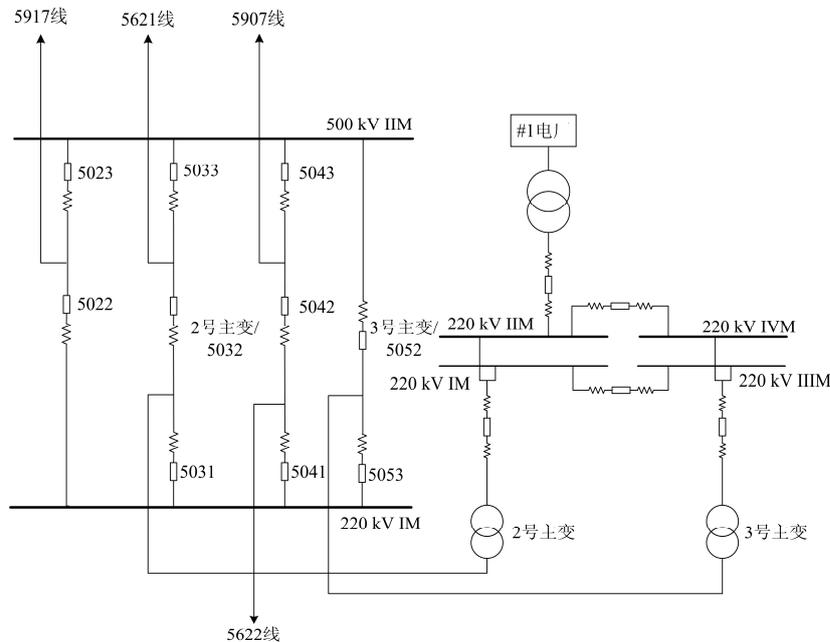


图 6 天目湖站主接线图

Fig. 6 Main wiring graph of substation Tianmuhu

杂且工作量大，辅助决策专家系统已成为提高工作效率的关键技术。目前，变电站运维使用的专家系统主要从三个角度进行设计，包括逻辑型、规则型和框架型。基于逻辑的专家系统均是对每种设备进行单独建模，知识库结构繁琐，设备间关联程度相对较低；更为重要的是，模型通用性不强限制了其可扩展性，不利于智能变电站的升级和扩建。基于规则型专家系统的建模方法有较好的可扩展性，但实时性较差，缺乏分层的知识表达，无法自主修改知识库。基于框架型专家系统在框架层次不多的场合，其模型可以化简为单层数据结构，可在同一条规则中同时处理“与”和“或”的关系，因而使规则数量大大减少；但智能变电站的数据结构复杂，上述处理方式下推理机将变得极为复杂且效率低下。本文提出的基于语义网并结合 IEC 61850-6 的可扩展建模方式，可自主捕获相关领域的知识，提供对该领域知识的通用表，专家系统知识库不同概念之间的逻辑更加清晰和统一，且规则库规则的复用率显著提高。

### 3 应用与验证

#### 3.1 应用案例建模

为描述基于语义网智能变电站运维专家系统可扩展模型的应用，以如图 6 所示的 500 kV 天目湖智能变电站为实际案例，对建模过程、模型及其可扩展性进行说明，并基于 CLIPS 平台对相关模型进行验证。

以实际变电站的二次设备异常的部分隔离原则对语义网模型的扩展性进行说明。着重从智能开关单元异常和电压合并单元的角度进行说明。对于通用性广、同时适用于智能开关单元和电压合并单元的规则, 应尽可能与近基类相关联。在图 7 所示的算例中, 运行隔离措施、检修隔离措施、Rule1: 开关智能单元、电压合并单元异常将导致相关联的母线保护、线路保护、主变保护和开关保测装置采样异常, 应停用相关联保护。同时适用于智能开关单元和电压合并单元。所以, Rule1 被置于开关智能单元和电压合并单元的合并类层级。除此之外, 电压合并单元也有自身特殊的规则。Rule2: 电压合并单元需停用相关保护后方可重启。至此, 对于电压等级低于 220 kV 的变电站而言, 其开关智能单元和电压合并单元的二次设备异常隔离原则就已经基本完备。但若涉及变电站的更高的电压等级, 测控装置存在冗余、互备问题。故当关联开关智能单元出现故障时, 应停用相应的测控装置, 切换备用测控装置。因此在 500 kV 等级的开关智能单元层级应增添 Rule3: 智能开关异常将导致相关联开关保测装置采样异常, 切换测控。

与专家系统所处平台一致, 语义网建模的相关

工作也在 CLIPS 平台进行实现。运用 CLIPS 面向对象方法, 达到语义网模型中类和属性继承的效果。上述变电站实际问题, 在 CLIPS 中的具体实现如图 8 所示。限于篇幅, 本文只给出简略版的实现表述。

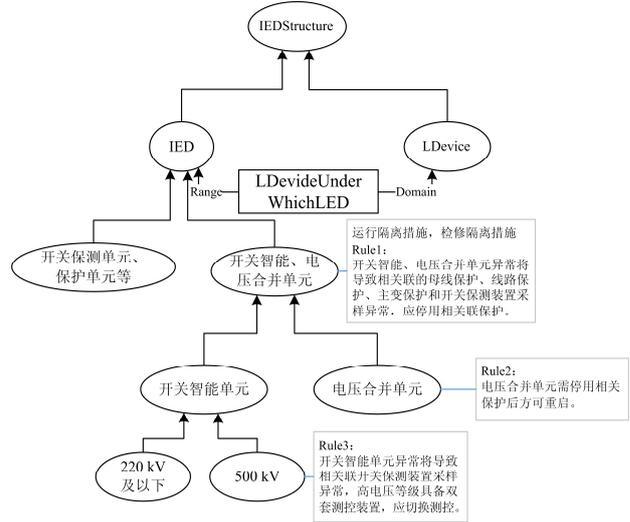


图 7 基于语义网模型的专家系统实现示例(框架)

Fig. 7 An example of expert system implementation based on semantic web model (framework)

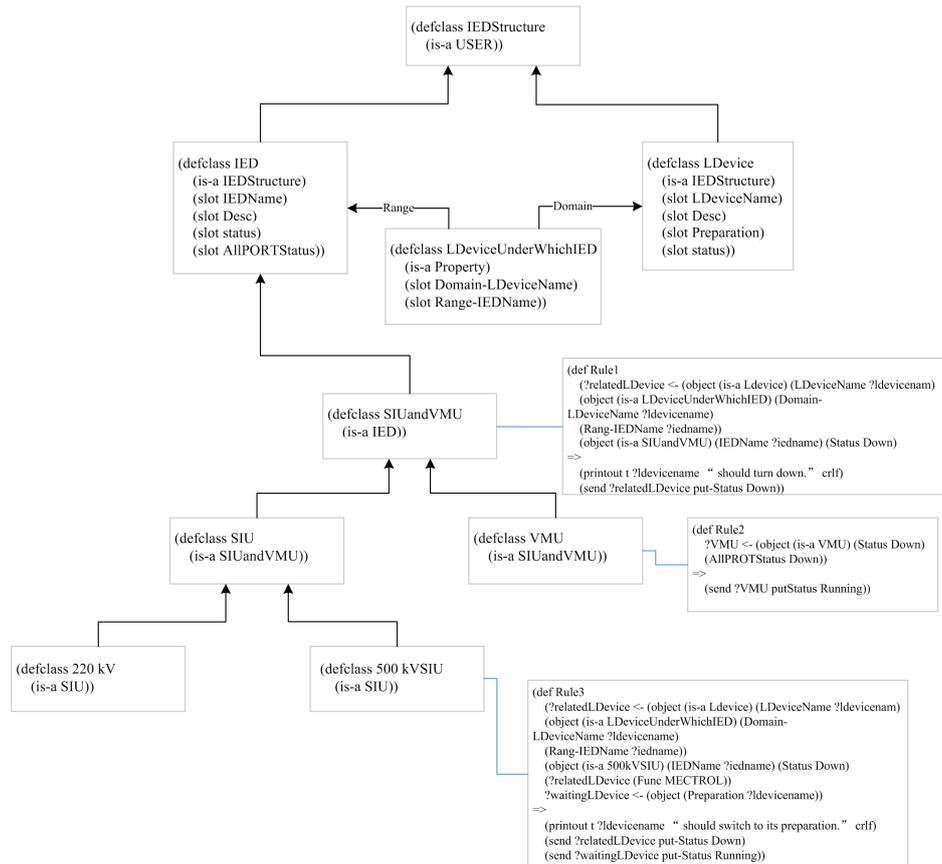


图 8 基于语义网模型的专家系统实现示例(实现)

Fig. 8 An example of expert system implementation based on semantic web model (implementation)

### 3.2 可扩展模型验证

在上述模型和规则的基础上，实例化部分变电站真实设备，基于 CLIPS 建立仿真测试系统，对模型的有效性进行测试，测试系统界面如图 9 所示。本文给出两个具体实例的测试结果，如表 1 所示。

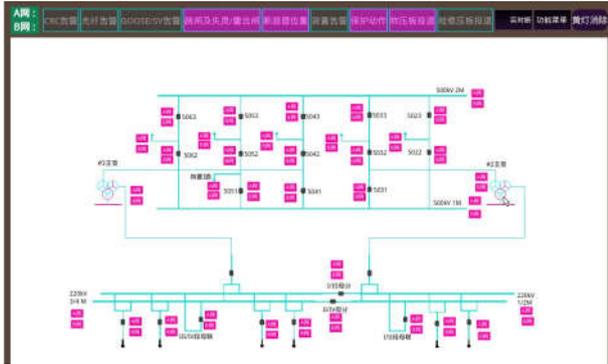


图 9 仿真测试系统

Fig. 9 Simulation system for testing

实例 1: 天目湖变电站 2 号主变 220 kV 侧开关第一套智能单元, 该开关连接 2 号主变与 220 kV I/II

号母线, 2 号主变连接站内 3 个电压等级 500 kV、220 kV、35 kV。

实例 2: 天目湖变电站 5022 开关第一套智能单元, 5022 开关为介于 500 kV 母线 I 与出线涂目 5917 线之间的断路器。

表 1 中得到的隔离措施与预期相符, 专家系统推理结果准确、有效。同时由于采用的基于语义网的知识库建模方式, 使得专家系统知识库的扩充变得容易。要扩充的内容只要能够被准确地放置在知识结构中, 那么被扩充的知识能够自然继承父类相应的规则, 只需要将被扩充类的自有规则加以补充即能完成专家系统扩充的全部工作, 有效提高了专家系统的扩充性。同时表 1 的例子也可以对此系统的可拓展性进行说明。若原变电站由最高电压等级 220 kV 升级为 500 kV 电压等级的变电站, 则仅需在 SIU(开关智能单元)的基础上分支出 220 kV SIU 和 500 kV SIU 并赋予 500 kV SIU 其特殊的测控单元切换规则 Rule3, 即可完成二次异常隔离部分的扩充工作。因 220 kV 及以下电压等级的开关智能单元不具备双套测控单元配置, 无需切换。

表 1 智能变电站 220 kV、500 kV 二次设备异常隔离案例

Table 1 An example of abnormal isolation of 220 kV and 500 kV secondary equipment in smart substation

异常设备	设备名称	功能	隔离措施
2 号主变 220 kV 侧开关第一套智能单元	2 号主变第一套差动	电流采样、跳闸	停用 2 号主变第一套差动
	220 kV 1/2 母线第一套	电流采样、跳闸	停用 220 kV 1/2 母线第一套母差
	2 号主变 220 kV 侧测控	测控	
5022 开关第一套智能单元	500 kV I 母线第一套母差	电流采样、跳闸	停用 220 kV 1/2 母线第一套母差
	5917 线第一套分相电流差动	电流采样、跳闸	停用 5917 线第一套分相电流差动
	5022 开关第一套失灵、重合闸	电流采样、跳闸、测控	停用 5022 开关第一套失灵、重合闸, 测控切换为 5022 开关第二套失灵、重合闸
2 号主变 220 kV 侧第二套电压合并单元	5023 开关第一套失灵、重合闸	失灵跳 5022 开关	无需停用 5023 开关第一套失灵、重合闸
	2 号主变第一套差动	电压采样	无需停用 2 号主变第一套差动
	2 号主变 220 kV 侧测控	主变电压遥测	

## 4 结论

本文提出了一种基于语义网的智能变电站专家系统知识库建模方法及其应用。结合语义网的相关概念, 在专家系统 CLIPS 平台进行实现。对变电站配置模块、IED 配置模块和通信配置模块的建模依据和整体框架进行了详细说明, 并在此建模基础上实现专家系统。以天目湖智能变电站为例, 对基于语义网的智能变电站专家系统进行测试, 并对其可扩充性进行说明。经分析对比, 基于语义网的专家系统知识库概念之间逻辑更加清晰和统一, 专家系统知识库可扩展性和规则库规则复用率显著提高。

## 参考文献

- [1] 2016-2020 年中国智能变电站行业现状分析与发展前景研究报告[R]. 北京: 中国产业调研网, 2016. Research report of China smart substation industry status analysis and development prospects during 2016-2020[R]. Beijing: China Industry Research Network, 2016.
- [2] 蔡骥然, 郑永康, 周振宇, 等. 智能变电站二次设备状态监测研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 148-154. CAI Jiran, ZHENG Yongkang, ZHOU Zhenyu, et al. A survey of research on secondary device condition monitoring in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 148-154.

- [3] 王冬青, 李刚, 曹楠. 智能变电站保护功能自动校验研究[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 7-11.  
WANG Dongqing, LI Gang, CAO Nan. Research on automatic checking of protection functions for smart substation[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 7-11.
- [4] 徐长宝, 庄晨, 蒋宏图. 智能变电站二次设备状态监测技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 127-131.  
XU Changbao, ZHUANG Chen, JIANG Hongtu. Technical research of secondary equipments' state monitoring in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 127-131.
- [5] 马博. 750 kV 变电站二次设备智能评估专家系统设计研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.  
MA Bo. Research on automatic checking of protection functions for smart substation[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2014.
- [6] 王保民. 智能变电站故障信息综合分析决策系统的研究与应用[D]. 保定: 华北电力大学, 2012.  
WANG Baomin. Research and application on smart substation fault information comprehensive analysis and decision system[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2012.
- [7] 姬书军, 朱学科, 李淮海. 变电站智能告警专家系统研究[J]. 华东电力, 2011, 39(5): 773-775.  
JI Shujun, ZHU Xueke, LI Huaihai. Research on the intelligent alarm expert system of substation[J]. East China Electric Power, 2011, 39(5): 773-775.
- [8] 李跃军. 智能变电站二次设备状态评估模型及其应用的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.  
LI Yuejun. Research on condition-based evaluation model and application of secondary equipment in smart substation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [9] 王晔. 面向电网运行知识本体建模方法的研究与应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.  
WANG Ye. Research on methods of ontology modeling and its application for power grid operation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [10] 黄彦浩, 周孝信. 基于本体理论的智能电网广义数据管理模型[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 114-118.  
HUANG Yanhao, ZHOU Xiaoxin. Generalized data management model of smart grid based on ontology theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 114-118.
- [11] 李洁, 丁颖. 语义网关键技术概述[J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(8): 1831-1833, 1836.  
LI Jie, DING Ying. Survey of semantic web key techniques[J]. Computer Engineering and Design, 2007, 28(8): 1831-1833, 1836.
- [12] 陈谷川, 陈豫. 语义网知识组织系统的研究与构架[J]. 现代图书情报技术, 2006, 1(4): 24-28.  
CHEN Guchuan, CHEN Yu. Research and architecture of semantic web knowledge organization system[J]. New Technology of Library and Information Service, 2006, 1(4): 24-28.
- [13] Berners-Lee. Semanticweb-XML2000[EB/OL]. [2014-01-20]. <http://www.w3.org/2000/Talks/1206-xml2k-tbl/Overview.html>.
- [14] 翟裕忠, 胡伟, 郑东栋, 等. 关系数据库模式和本体间映射的研究综述[J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(2): 300-309.  
QU Yuzhong, HU Wei, ZHENG Dongdong, et al. Mapping between relation database schemas and ontologies: the state of the art[J]. Journal of Computer Research and Development, 2008, 45(2): 300-309.
- [15] STUDER R, BENJAMINS V R, FENSEL D. Knowledge engineering: principles and methods[J]. Data & Knowledge Engineering, 1998, 25: 161-197.
- [16] 朱林, 王鹏远, 石东源. 智能变电站通信网络状态监测信息模型及配置描述[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 87-92.  
ZHU Lin, WANG Pengyuan, SHI Dongyuan. Status monitoring information model and configuration description of communication network in smart substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 87-92.
- [17] 梅德冬, 樊瑞, 周斌. IEC 61850 模型信息的规则表达与校验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 131-136.  
MEI Dedong, FAN Rui, ZHOU Bin. Research on regular expressions and check of IEC 61850 model information[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 131-136.
- [18] 杨紫苓. 基于本体的IEC61850语义信息模型一致性校验[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.  
YANG Ziling. Consistency validation for IEC61850 information model based on ontology[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [19] 胡凤凯, 黄琦, 井实, 等. 面向 IED 的变电站通信软件设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 132-137.  
HU Fengkai, HUANG Qi, JING Shi, et al. Design and implementation of substation communication software for IED[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 132-137.

收稿日期: 2016-12-11; 修回日期: 2017-02-14

作者简介:

宋杰(1984—), 男, 通信作者, 工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护和智能变电站工程应用技术等。

E-mail: songjie@sh.sgcc.com.cn

(编辑 魏小丽)