

数字化变电站中闭锁逻辑自动生成专家系统

郑维明¹, 张沛超¹, 王锡生²

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 2. 无锡供电公司, 江苏 无锡 214000)

摘要: IEC 61850 中提出的变电站配置语言 SCL 是变电站专用描述语言, 变电站配置文件 SCD 实现了对变电站一次系统拓扑、功能拓扑和通信拓扑的完整描述。提出了一种适用于数字化变电站的闭锁逻辑自动生成专家系统, 以 SCD 文件为输入并从中获取变电站一次拓扑信息, 基于专家系统开发工具 CLIPS 实现逻辑推理, 采用面向对象的知识表示方法。系统中知识库独立于推理机, 并实现了领域规则和控制规则的分离, 这些使得本专家系统具有良好适应性并易于维护。通过大量典型变电站主接线的验证, 证明了本专家系统的正确性和可行性。

关键词: 闭锁逻辑; 专家系统; IEC 61850; 变电站配置语言; CLIPS

An expert system of automatic interlocking schemes generation for digital substations

ZHENG Wei-ming¹, ZHANG Pei-chao¹, WANG Xi-sheng²

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Wuxi Power Supply Company, Wuxi 214000, China)

Abstract: The substation configuration language defined in the IEC 61850 is used to describe the primary system topology, function topology as well as communication topology of the overall substation. An expert system of automatic interlocking schemes generation for digital substations is proposed. The expert system takes the SCD file as its input, and extracts the primary system topology from the file. The expert system development platform—CLIPS, is used as the inference engine. The object-oriented knowledge paradigm is adopted in the system. The knowledge base is independent of the inference engine, and the control rules are independent of the domain rules as well, which make the expert system more adaptive and simple to maintain. The tests using many typical primary system topologies demonstrate the correctness and feasibility of the proposed expert system.

Key words: interlocking schemes; expert system; IEC 61850; substation configuration description language; CLIPS

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)17-0125-05

0 引言

变电站闭锁逻辑的编制是一项要求很高、费时费力的工作。在目前变电站防误操作系统中, 它需经历以下环节才能生效: (1) 变电站设计部门根据接线方式提出闭锁逻辑; (2) 变电站管理部门审核、认定设计部门提出的闭锁逻辑; (3) 应用系统维护人员将经认定的闭锁逻辑输入防误系统; (4) 变电站运行人员最后验证确认; (5) 如果变电站运行过程中一次回路改变, 还需要重复上述过程。这个过程环节较多, 工作量大、重复性高, 容易发生错误。通过对变电站闭锁逻辑的分析可以发现, 它与变电站接线方式存在一种相对确定的、稳定的关系。

IEC 61850标准的颁布及相关技术的成熟催生了数字化变电站^[1]。在IEC 61850中, 利用变电站配置描

述文件SCD (Substation Configuration Description)^[2]实现了对变电站一次系统拓扑、功能拓扑和通信拓扑的完整描述。围绕SCD文件进行数字化变电站的工程配置和高级应用开发体现了“一次配置, 多处使用”, 这不但可以提高工程配置的效率和标准化程度, 而且可以保证配置的完整性与一致性。具体到变电站闭锁逻辑生成这个应用, 如能以SCD为输入自动生成全站闭锁逻辑, 则有如下突出优点: (1) 标准化。由于SCD基于变电站配置描述语言SCL (Substation Configuration description Language)^[2], 使得闭锁逻辑生成系统可建立在标准化的拓扑描述模型之上, 使其具有通用性; (2) 自动化。利用SCD不但可以生成全站闭锁逻辑, 而且可以自动将闭锁逻辑下载至相应测控装置中。当涉及到跨间隔联闭锁时, 还能自动订阅其他间隔的开关位置。

基于上述分析，本文以变电站配置描述文件 SCD 为输入，利用专家系统开发工具 CLIPS 实现了一套适用于数字化变电站系统的闭锁逻辑自动生成专家系统。本专家系统采用面向对象的知识表示方法，从而可以将 SCD 中定义的对象自然地映射到专家系统中；由于采用知识库与推理机完全分离的结构，易于实现对知识库的修改和完善，从而提高系统的适应性。

1 数字化变电站拓扑描述方法

SCD 文件基于可扩展标记语言 XML，由系统配置器 (System Configuration Tool) [2] 生成和维护。SCD 的基本对象模型如图 1 所示。概括起来，SCD 文件描述了如下拓扑信息：

(1) 一次系统拓扑。包括变电站中断路器 (CBR)、隔离开关 (DIS) 等一次设备及其拓扑关系。一次系统拓扑提供了生成全站闭锁逻辑所需的知识。

(2) 功能拓扑。包括以逻辑节点 (LN) 形式表述的功能及其与物理装置 (IED) 的关系，以及逻辑节点与一次设备的关联关系。功能拓扑提供了如何将全站闭锁逻辑分解后下载至相应测控装置中的知识。

(3) 通信拓扑。包括访问点 (AccessPoint)、子网 (Subnetwork) 等，以及与物理装置的连接关系。当闭锁规则中需要其他间隔的开关位置时，通信拓扑可为装置提供订阅其他间隔 GOOSE 信息的知识。

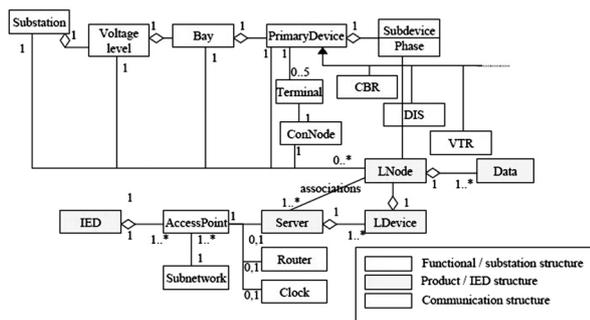


图 1 SCD 的对象模型

Fig.1 The object model of SCD

本文重点讨论一次系统拓扑。在 SCL 中，与一次系统拓扑相关的对象模型如图 2 所示。类似于公共信息模块 CIM，SCL 利用 Terminal 表示一次设备本身的电气连接点，用 ConnectivityNode 表示连接不同一次设备的连接节点对象，从而构成完整的一次系统拓扑。

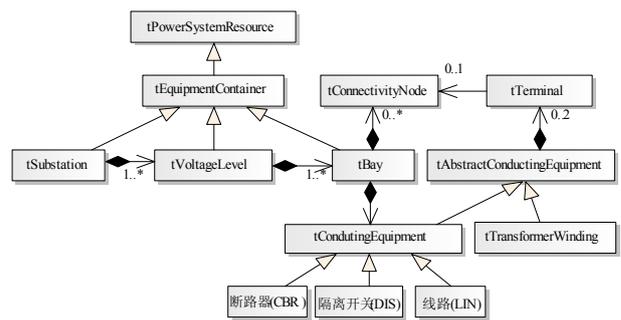


图 2 一次系统拓扑相关对象模型

Fig.2 The primary system topology related object model

2 基于 CLIPS 的变电站拓扑描述

2.1 CLIPS 专家系统简介

CLIPS (C Language Integrated Production System) 最初由美国国家航空航天局开发 [3]。CLIPS 采用正向推理机制，支持面向对象和产生式规则的混合知识表示方法。CLIPS 采用高效的 RETE [3] 模式匹配算法，极大地提高了专家系统的推理速度。CLIPS 还具有优秀的外部集成能力，可以将用户自定义函数嵌入到规则库中以扩充其功能。

2.2 面向对象的拓扑知识表示

变电站闭锁逻辑主要针对断路器、隔离开关和接地装置 (地刀、接地线)。图 2 为通用的一次系统拓扑模型，闭锁逻辑专家系统尚需对其进行变换，以分别生成节点 (Node) 对象表和开关 (Switch) 对象表。变换规则如下：

Rule_Init 1: 节点对象表生成规则。

Rule_Init 1.1: 将图 2 中 ConnectivityNode、线路 (LIN)、变压器绕组 (PTR) 等变换为 Node 对象。

Rule_Init 1.2: 利用母线识别规则，将识别为母线的 Node 对象实例化为 Bus 对象。

Rule_Init 2: 开关对象表生成规则。

Rule_Init 2.1: 将图 2 中的断路器 (CBR)、隔离开关 (DIS) 分别变换为 CB (Circuit Breaker)、IS (Isolating Switch) 对象。

由于 SCD 文件中不区分地刀和隔离开关，故在图 2 中没有地刀模型。但 SCD 定义了一个特殊电气连接节点: grounded，如果隔离开关的一个端点与 grounded 相连，则判为地刀 GS (Grounding Switch)。故增加如下规则：

Rule_Init 2.2: 如果某 DIS 对象与 grounded 相连，则将其实例化为 GS 对象。

图 3 为一次系统拓扑的面向对象知识表示模

型。采用面向对象的知识表示方法具有很多优点:

(1) 从知识表示的角度, 可以将 IEC 61850 中定义的一次设备及其拓扑关系自然地映射到知识库中;

(2) 从规则推理的角度, 由于支持继承以及知识的结构化表示, 易于以更简洁的规则表达更复杂的模式匹配关系。下面以开关为例, 给出开关及其子类的面向对象知识表示:

```
(defclass Switch (is-a USER) //定义开关类
  (slot switchid (type INTEGER)) //开关编号
  (slot T1 (type SYMBOL)) //端点 1
  (slot T2 (type SYMBOL)) //端点 2
  (slot OpenRule (type String)) //分闸逻辑
  (slot CloseRule (type String)) //合闸逻辑
  以下依次定义了断路器、隔离开关和地刀类,
```

它们继承了开关类的属性和方法:

```
(defclass CB (is-a Switch)) //定义断路器类
(defclass IS (is-a Switch)) //定义隔离开关类
(defclass GS (is-a Switch)) //定义地刀类
```

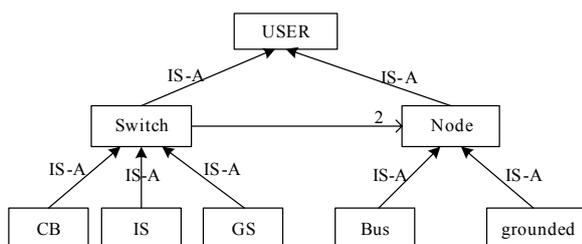


图 3 一次系统拓扑的知识表示模型

Fig.3 Knowledge representation schema for the primary system topology

3 规则库

3.1 闭锁逻辑生成规则

闭锁逻辑就是为断路器、隔离开关和接地装置设定操作条件, 以便满足“五防”^[4]要求: (1) 防止误分、误合断路器; (2) 防止带负荷合、分隔离开关; (3) 防止误入带电间隔; (4) 防止带电挂接地线或者合接地闸刀; (5) 防止带接地线或者接地闸刀合闸。

出于运行灵活性的需要, 不宜对断路器操作施加过多的限制, 因此本文主要考虑断路器合闸的闭锁逻辑; 隔离开关的闭锁逻辑主要考虑防止带负荷操作隔离开关和防止带接地装置合隔离开关; 接地装置主要考虑的是防止带电合接地装置。鉴于已有论文讨论闭锁逻辑中所需考虑的操作条件^[4-10], 本文对此不再展开。作为示例, 下面给出一个地刀合闸闭锁逻辑生成规则:

```
(defrule GS-Close-Rule
  //如果匹配到一个编号为?gs-id 的地刀对象,
  //其当前合闸逻辑表达式为?CurrentRule
  ?gs<- (object (is-a GS)
    (switchid ?gs-id)(CloseRule ?CurrentRule))
  //并且隔离开关?is-id 与该地刀相连
  ?relation<- (RelationGSandIS (CurrentGS ?gs-id)
    (LinkedIS ?is-id))
```

=>

```
//则在条件后增加地刀需位于分位的闭锁条件
(retract ?relation)
(bind ?string1 (str-cat ?gs-id "=0,")
  (bind ?NewRule (str-cat ?CurrentRule ?string1))
  (modify-instance ?gs (CloseRule ?NewRule))
```

3.2 规则库结构

本规则库具有较为复杂的时空结构。从空间上, 包括断路器、隔离开关、接地装置等子库。从执行的时间顺序上, 则包括如下子库: (1) 初始化。解析 SCD 文件、创建节点和开关等拓扑对象, 初始化专家系统的事实库。(2) 拓扑分析。对拓扑事实库进行分析, 建立开关支路之间的拓扑连接关系。(3) 闭锁逻辑生成。为各开关设备生成分、合闸闭锁逻辑。(4) 闭锁逻辑校验。对闭锁逻辑做进一步的校验, 防止出错。(5) 输出模块。对闭锁逻辑的输出格式、顺序进行调整, 以适应用户习惯。

专家系统中的知识可分为领域规则、控制规则两大类。以上讨论的皆为领域规则。而控制规则是控制领域规则执行顺序的规则。控制规则通常的实现手段是, 为每条领域规则指定一个优先级 (salience), 从而控制其执行顺序。但过多使用优先级会严重降低规则库的可维护性。

本文利用自定义模块 (defmodule) 技术, 将各子规则库封装到不同的模块中。各个模块拥有独立的 agenda。Agenda 为 CLIPS 中用于维护待触发规则列表的堆栈结构。在任意时刻, 只有一个模块的 agenda 处于激活状态。这样, 就可以在 CLIPS 默认的 MAIN 模块中编写规则实现另外一个堆栈结构, 该栈中按执行顺序压入各个自定义的模块, 位于栈顶的模块首先被执行。该规则如下:

```
//定义各个模块
```

```
(defmodule Init) //初始化
```

```
(defmodule Topology) //拓扑分析
```

```
(defmodule GenInterlockRules) //闭锁逻辑生成
```

```
(defmodule ValInterlockRules) //闭锁逻辑校验
```

```
(defmodule OptInterlockRules) //闭锁逻辑输出
```

```
//定义执行顺序堆栈
```


表1 闭锁逻辑表达式中符号的含义

Tab.1 Meaning of the symbols in the interlocking expressions

符号	含义
H	合闸操作
L	拉闸操作
=0	设备在分位
=1	设备在合位
+	逻辑或
,	逻辑与
()	逻辑表达式的优先级

5 结论

以标准的变电站配置描述文件作为输入, 应用面向对象的知识表示方法, 采用推理机与知识库完全分离的架构, 本文实现了一个适应于数字化变电站的闭锁逻辑自动生成专家系统。

在数字化变电站中, 变电站配置描述文件实现了工程设计、调试、系统运行维护以及大量高级应用的配置信息同源性, 保证了变电站工程化过程中信息的标准性、完整性和一致性。基于变电站配置描述文件可开发大量高级应用, 以提高数字化变电站设计、运行的自动化程度。本文以变电站闭锁逻辑生成这一典型应用为例, 阐述了上述想法的可行性。

参考文献

- [1] 高翔, 张沛超. 数字化变电站主要技术特征和关键技术[J]. 电网技术, 2006, 30 (24): 67-71.
GAO Xiang, ZHANG Pei-chao. The main features and key technologies of digital substation[J]. Power System Technology, 2006, 30 (24): 67-71.
- [2] IEC 61850-6 communication networks and systems in substations-configuration description language for communication in electrical substations related to IEDs[S]. IEC International Standard, 2002.
- [3] 张沛超, 胡炎, 郁惟镛. 继电保护专家系统中知识的面向对象表示法[J]. 继电器, 2001, 29 (2): 16-19.
ZHANG Pei-chao, HU Yan, YU Wei-yong. The object-oriented knowledge representation paradigm in protection expert system[J]. Relay, 2001, 29 (2): 16-19.
- [4] 许先锋, 龚成明, 杜红卫, 等. EMS 中系统拓扑五防的设计和实现[J]. 电网技术, 2006, 30(增刊): 76-79.

- XUN Xian-feng, GONG Cheng-ming, DU Hong-wei, et al. Plan and realization of mis-operation prevention based on topology in energy management system[J]. Power System Technology, 2006, 30 (S): 76-79.
- [5] 顾拥军, 皮卫华, 杨承胜, 等. 变电站防误闭锁应用分析[J]. 继电器, 2005, 33 (2): 66-70.
GU Yong-jun, PI Wei-hua, YANG Cheng-sheng, et al. Application analysis of anti-mistake defense system in substation[J]. Relay, 2005, 33 (2): 66-70.
- [6] 陈志军, 李剑刚, 高宏伟. 500 kV 综合自动化变电站的防误闭锁应用[J]. 继电器, 2006, 34 (18): 69-71.
CHEN Zhi-jun, LI Jian-gang, GAO Hong-wei. Application of mistake proof and lock installation in 500 kV comprehensive automatic substation[J]. Relay, 2006, 34 (18): 69-71.
- [7] 周敬嵩, 周敬尧. 一种新型变电站防误系统的设计[J]. 继电器, 2005, 33 (22): 72-74.
ZHOU Jing-song, ZHOU Jing-yao. A new design of substation preventing wrong operation system[J]. Relay, 2005, 33 (22): 72-74.
- [8] 罗钦, 段斌, 肖红光, 等. 基于 IEC 61850 控制模型的变电站防误操作分析与设计[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (22): 61-65.
LUO Qin, DUAN Bin, XIAO Hong-guang, et al. Analysis and design of anti-maloperation for substation based on control model in IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (22): 61-65.
- [9] Dhakal P, Sachdev M S. A computer-based substation switching scheme, WESCANEX 95[J]. Communications, Power, and Computing Conference Proceedings IEEE, 1995, 1(1): 30-35.
- [10] Kopainsky J, Wimmer W, Brand K P. Topology-based interlocking of electrical substations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1986, 1 (3) : 118-126.

收稿日期: 2009-09-28

作者简介:

郑维明 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为专家系统在电力系统中的应用;

张沛超 (1970-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为继电保护, 电网调度自动化以及人工智能; E-mail: pczhang@sjtu.edu.cn

王锡生 (1952-), 男, 双师职称, 长期从事变电站运行和管理工作。