

# 基于事例的地区电网操作票专家系统的推理和预演防误研究

张旭明<sup>1</sup>, 张焰<sup>1</sup>, 侯凤岭<sup>2</sup>, 王洪波<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学, 上海 200240; 2. 安徽省电力公司合肥供电公司, 安徽 合肥 230022)

**摘要:** 针对地区电网运行操作特点, 将事例推理的方法应用于地区电网操作票专家系统。该系统克服了传统的基于规则推理的专家系统编程复杂、知识库扩展困难等缺点, 可以通过添加新事例来方便地完成对知识库的扩展, 适应电网发展变化的需要。在采用分层计算电网相似度和各变电站相似度的策略搜寻相似事例时, 由于其中考虑了电网拓扑结构的变化, 因此提高了出票的准确性。还用基于事例推理的方式设计了操作票综合调度命令的预演和防误功能, 实现了模块化预演和防误。该系统适应地区电网特点, 减轻了运行人员的工作负担。

**关键词:** 地区电网; 操作票; 事例推理; 对象图

## Application of the case-based reasoning method on the expert system on dispatching operation order of the region grid

ZHANG Xu-ming<sup>1</sup>, ZHANG Yan<sup>1</sup>, HOU Feng-ling<sup>2</sup>, WANG Hong-bo<sup>2</sup>

(1. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 2. Anhui Electric Power Company, Hefei 230022, China)

**Abstract:** According to the characteristics of the region grid, this paper applies the CBR (case-based reasoning) methods on the expert system of dispatching operation order, which can overcome the disadvantages of the traditional RBR (rule-based reasoning) system, such as complicated programming and difficulty to extend the knowledge base. The system can adapt the development of the region grid much better. This paper uses a strategy that calculates the similarity in two steps: first calculating the net similarity and then the substation similarity. Because the structure of the grid is considered, the accuracy of the system gets raised. CBR method is also adopted to design the preview of the order and the error prevention which realizes the modularization preview. The system can adapt the characteristics of the region grid which can lighten the operators' burden.

**Key words:** region grid; dispatching operation order; case-based reasoning; object-graph

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)24-0026-05

## 0 引言

传统上, 基于规则推理的电网操作票推理过程是利用推理机对数据库和规则库进行搜索、查询及匹配<sup>[1]</sup>。但是, 由于综合调令的每一条命令都可能包含许多需要下级变电站去具体完成的命令任务, 致使采用基于规则推理形成的操作票其逻辑关系不是十分明确。同时, 由于地区电网涉及的负荷转移情况比较复杂, 仅用基于规则的推理方法难以穷尽所有情况。这是因为通过设备层次性关系和设备分类进行拓扑关系的描述对变电站操作票的生成来说是足够的<sup>[2,3]</sup>但对于电网操作票无法提供足够的支持。另外, 对于电网运行, 考虑电网的拓扑信息也是必要的<sup>[4,5]</sup>。

在电网的实际运行中, 电力系统专家们的思考方式是非常简洁实用的, 除必要的规则推理外, 他

们更多地是利用已熟知的典型方案与待解决的实际问题相配, 然后再加以适当修改和调整, 从而得到符合实际问题的解决方案。这种思维方式恰好和智能界近来兴起的基于事例推理 CBR (Case-Based Reasoning) 的方法相吻合。实质上, 事例是一组带有相关值的特征, 这些特征描述了一个问题及其结论<sup>[6]</sup>。该方法目前已于包括电力系统故障诊断<sup>[7]</sup>智能设计<sup>[8]</sup>, 负荷预测<sup>[9]</sup>等领域都得到了应用。

相较于规则推理, 事例推理具有如下优点: 第一, CBR 具有自学习功能, 这是 RBR 所不具有的, 而且, CBR 可以“零事例启动”。第二, CBR 更接近于人类的决策过程。第三, CBR 使得将新知识结合到以存在知识库中去的过程能够自动化。第四, 创建 CASE 库通常比创建知识库快的多。第五, 运行 CBR 系统的速度要比基于规则的系统快。第六, CBR 提供了更好的解释和决策机制。第七, CBR 可用于

那些不易理解的领域中的问题。

地区电网操作票开票系统组成结构如图:

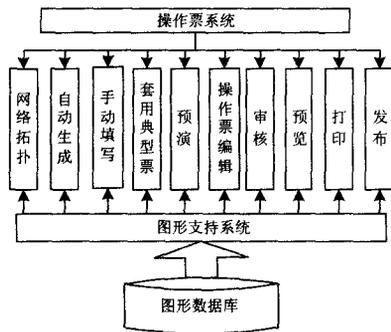


图1 开票系统功能

Fig.1 Function of the order system

本文在自动生成操作票和操作票预演防误两个部分采用了事例推理技术。

### 1 事例推理关键技术

事例推理 CBR 的关键技术包括事例表示、事例索引、事例检索和事例修正。一般的 CBR 专家系统的结构如图 2 所示。

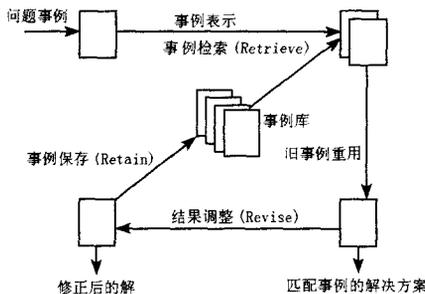


图2 CBR系统结构图

Fig.2 Structure of the CBR system

#### 1.1 事例表示

事例表示方法可分为两大类:结构化表示和非结构化表示。事例的结构化表示法,是指该表示法不但可以表示事物和概念,而且可以方便、直观地表示事物和概念之间的联系(如关联、包含、继承、依赖等)。操作票系统要求事例能完整描述电网拓扑结构,使用非结构化事例表示繁琐且不直观。本文用结构化的对象图<sup>[10]</sup>表示事例,事例内容除包括操作票内容外,包括了变电站的拓扑信息以及网络拓扑等信息,这些属性用来计算事例的相似度。

本文根据典型操作对照表,选取一组事例存入事例库中。除此之外还由运行人员提供了历年历史票,从中选取具备典型特征的如事故恢复,新站启

动等操作票存入事例库。但是需要指出,电网操作十分复杂,如何使所选取的事例涵盖各类事例是一个很难解决的问题,但是由于事例推理自身的优势,随着系统的运行,事例不断的被加入到事例库中,系统解决问题的能力也将不断提高。

#### 1.2 事例索引

事例检索和事例存储都需要利用事例索引。事例索引对提高整个系统的推理和学习效率非常关键。在一些简单的系统中,往往选择所有问题特征作为索引。本文采用如下的事例索引方式:

表1 事例索引

Tab.1 Case indexes

索引字段	可能取值(可多选)
操作对象	变压器, 线路, 母线, 开关……
电压等级	220, 500, 110, 35
操作任务	检修, 运行, 冷备用, 旁路带运行

#### 1.3 事例检索

给定问题描述后, CBR 将根据一种事例检索算法, 通过事例索引, 从事例库中检索出与该问题描述最为接近的一个事例。这个过程可以进一步划分为三个子过程:

- 识别问题特征: 从问题描述中识别主要特征, 消除噪声, 形成评价函数;
- 初始匹配: 利用快速算法, 从事例库中检索出一组较为相似的事例;
- 最终确定: 利用更为复杂的算法, 从上组事例中最终确定最为相似的一个事例。

对于地区电网综合调度指令, 可以考虑首先利用操作任务和操作对象等条件进行初步的完全匹配, 然后再采用综合网络结构, 设备参数等条件的相似度函数进行更高级的模糊匹配。

#### 1.4 事例改写

事例改写一般有结构化改写和非结构化改写两种, 本文考虑以结构化改写完成对操作票参数的自动修改, 而以人工改写完成对操作票内容及操作步骤的调整。

## 2 相似度计算

### 2.1 计算方法

本文分两层计算相似度, 首先计算该变电站所在的电网网络拓扑图相似度, 这里指包含与该变电站直接相连的其他变电站在内所组成的拓扑图; 计算电网相似度只考察变电站之间的连接方式和各变电站内母线主接线是否一致。并根据相似度确定新的操作票涉及的变电站与事例库内已有的事例所涉及变电站的映射方式。计算电站相似度要全面考

考虑设备状态, 设备连接方式等信息。将变电站拓扑抽象成对象图, 根据文献[10]提供的算法计算各变电站相似度。然后将这些变电站相似度根据在事例操作票中该变电站的操作所占的条目数多少为各个变电站分配权重, 并计算得到最终相似度。

假设事例操作票内的总的操作条目数为 $\alpha$ , 涉及到的各变电站的操作条目为 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ , 那么显然 $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n$ , 则我们定义各变电站在计算最终相似度时的权重为:  $\alpha_1/\alpha, \alpha_2/\alpha, \dots, \alpha_n/\alpha$ 。充分考虑了事例所隐含的操作信息。

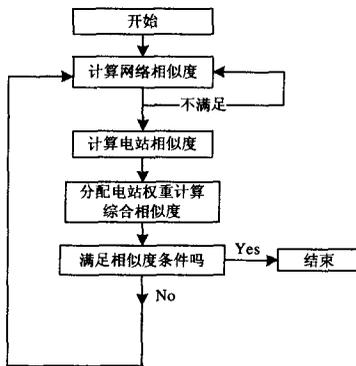


图3 相似度计算流程图

Fig.3 Flow chart of the similarity calculation

对于各属性的相似度, 我们采用如下的计算方法:

$$MC^K = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \text{sim}(f_i^I, f_i^R)}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (1)$$

式中:  $\omega_i$  是第  $i$  个问题特征的权重,  $f_i^I$  和  $f_i^R$  分别是输入事例和输出事例的第  $i$  个问题特征的值,  $\text{sim}(f_i^I, f_i^R)$  是输入事例与输出事例之间的属性相似度,  $MC^K$  是考虑到权重后的综合相似度。在这里  $\text{sim}(f_i^I, f_i^R)$  选用以下算法:

$$\text{sim}(f_i^I, f_i^R) = \begin{cases} 1 (f_i^I, f_i^R \text{ 完全相等}) \\ a (a < 1, f_i^I, f_i^R \text{ 不完全相等}) \end{cases} \quad (2)$$

$a$  具体算法视具体应用而定。例如, 对于  $f_i^I, f_i^R$  为字符型属性, 如电压等级, 可采用:

$$a = 0 \quad (3)$$

而对于数值属性, 则可采用:

$$a = \frac{|f_i^I - f_i^R|}{f_{i \max} - f_{i \min}} \quad (4)$$

式中:  $f_{i \max}, f_{i \min}$  分别为第  $i$  个属性最大值和最小值。本文中所涉及的属性多为字符型。

在计算网络相似度的时候, 本文同样将网络抽象为对象图, 但是将变电站抽象为图的节点, 计算节点相似度时, 选取的属性只是各变电站主接线形式和变压器, 而不考虑具体的内部设备的状态和连接方式。这是因为具体的变电站相似度将另外计算。

### 2.2 实际应用

以图4、图5所示的变电站和网络接线图为例。

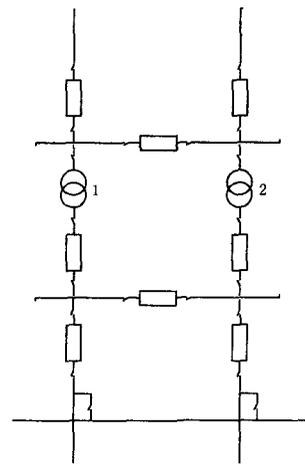


图4 变电站接线图

Fig.4 Connecting diagram of the substation

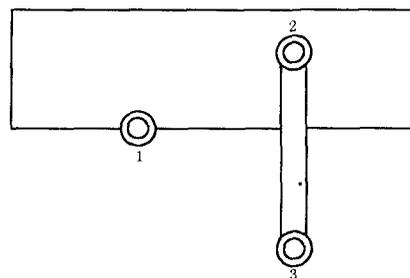


图5 网络接线图

Fig.5 Connecting diagram of the net

如图4为一变电站接线, 图5表示的是该变电站与其它变电站的连接情况, 该图的特殊之处在于包含地区电网常见的T接形式。

要完成的操作任务是“将 1 变电站#1 变压器由运行转检修, 110 kV 运行方式调整”。这个操作任务中包含如下含义: #1 变压器转检修, #2 变压器转运行, 在不中断供电的情况下#2 变压器带#1 变压器的负荷运行。为了完成此操作, 与两变压器相连的线路必然改变状态, 从而处于变电站 2 和 3 的出线开关及线路也需要进行操作。因此, 这是一个既包括变电站内部操作又包含网络操作的任务。在事例库中, 根据事例索引, 按照操作对象、电压等级、操作任务搜索到两个事例, 分别计算它们与待操作变电站及其网络图的相似度, 得到表 2。

表 2 相似度计算

Tab.2 Computation of the similarity

索引字段	网络图相似度	变电站综合相似度
事例 1	0.94	0.96
事例 2	0.83	0.77

在本例中, 事例 1 的相似度更高, 因此我们调出事例 1, 发现只要针对变压器操作做少量修改(在本例中, 变电站 1 的变压器接地方式与事例 1 中变压器接线方式不同, 因此仅做相应修改即可), 就可以生成一张可以使用的新票。

### 3 操作票预演防误

综合调令的预演也是令调度人员头痛的一件事, 因为在每次开票之后, 必须进行预先的演示以判断操作票开列的是否准确, 并判断系统的最终状态是否能够满足要求。通常这个过程是由运行人员人工的反复进行校对, 对于复杂的电网操作票, 这一过程可能持续几天, 所以以计算机为基础的预演防误机制的研究就十分的必要。

#### 3.1 预演

传统的针对变电站操作票的预演系统执行的是逐项调令, 每一步的操作是固定的, 将这样固定化的操作语句通过程序识别而转换成图形化的单步执行是比较容易的。但是综合调令的开票人员并不关心综合调令单步执行的顺序(这个过程由下一级的操作人员把关完成), 只要知道每一个块操作的结束状态即可。比如“将某开关由运行转检修”就是一个综合调令语句, 这个语句的实际操作可能是由四个独立的操作完成的(拉开断路器, 拉开 1 号闸刀, 拉开 2 号闸刀, 挂地线), 要求电网调度人员将这四步逐一地在系统接线图上进行预演是很麻烦的, 这实际上超出了他们的工作范围。这就提出了两个难题:

- A) 模块化命令如何转变为图形操作。
- B) 如何判断模块化操作之间的防误关系。

第一个问题, 我们根据综合调度命令对照表,

总结出 20 余个大的类别的综合调令的操作, 将这些操作固定成典型操作。进入预演模式后, 当调度命令出现这些语句的时候程序将自动将其转变为图形化操作, 体现在接线图上。例如如下的旁路带运行操作执行以后所对应的状态: “旁路开关 (1), 出线开关 (0), 旁路开关闸刀 4 (1), 出线闸刀 3 (0), 出线开关接地闸刀 (1), 出线开关闸刀 4 (1)。”(括号中的数字 1 表示设备是闭合的, 0 表示设备是拉开的) 系统自动将以上六项操作全部完成, 减轻了调度人员的工作量。

如果出现超出了 20 余种固定操作的情况, 我们依旧采用事例学习的思想。系统会提示运行人员手动进行操作, 系统记录下该操作的最终状态并添加到操作表中, 这样下次遇到同样的操作, 系统就可以调用已经固化的典型操作。

#### 3.2 防误

第二个问题, 通常防误操作是在预演时完成的, 传统的单步操作的主要防误机制是根据“五防”操作原则, 在电力系统的操作中, 传统意义上的五防包括: ①误拉/合断路器②带负荷拉/合隔离开关; ③带电挂地线(或带电合接地刀闸); ④带地线合闸; ⑤误入带电间隔防误校核, 五防操作的程序实现见文献。“五防”的内容主要是针对带电操作的, 但是综合调度命令基本上将五防操作交由下一级处理, 虽然在需要特别强调某项操作的重要性时也会出现单步操作, 但可以肯定的是仅仅依靠五防是不能完成综合调令预演的防误的, 或者说这种防误的层次是很低的。因此除了考虑五防操作以外, 我们还需要全面分析块操作之间的操作顺序问题, 即建立系统的多层全面防误规则。

综合起来考虑, 任何复杂的操作都可以由四类操作所组成, 分别是变压器操作, 母线操作, 开关操作, 线路操作。通常线路操作是作为较为独立的部分出现的, 很少与变电站内部操作共同出现。这里我们的全面防误策略分为两个层次, 首先是各类操作的防误机制。其次是各类操作组合在一起时, 各操作之间的防误机制。经过分析, 这部分主要包括以下三个方面, 即母线操作与变压器操作之间的防误以及母线操作与开关操作之间的防误机制以及变压器操作与开关操作之间的防误机制, 见图 6。

将这些防误的机制抽象为产生式规则, 并存储于知识库中。实际上防误是在预演时完成的, 也就是说系统不会直接分析语句来完成防误功能, 而是根据图形支持系统上各图元状态的改变, 通过与图中其它设备状态的比较, 判断每一步操作是否有违反知识库内规则的情况出现。本系统将不同操作的

防误规则分别存储于不同的知识库模块中, 这样在预演时, 不需要遍历整个知识库, 而只需要在与操作相关的知识库模块中搜寻即可。

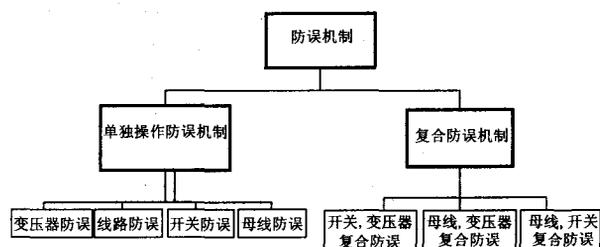


图 6 防误机制

Fig.6 Mechanism of error prevention

## 4 结论

目前该系统已经在某地区电网试运行。该地区电网由 7 个 220 kV 变电站(代管)以及 18 个 110 kV 变电站和 3 个 35 kV 变电站构成。其原有的操作票系统只提供图形化操作界面, 并不支持智能生成操作票。本文的研究成果应用于该地区电网的操作票系统后, 大大提高了出票的效率和准确率。在该系统试运行过程中, 一个新的 220 kV 变电站投入运行, 原电网结构有所调整, 但是操作票系统仍能正确运行, 显示其能够适应电网发展的需要。

基于事例推理的操作票系统具有以下优点:

- 1) 可以零事例启动。
- 2) 方便完成对知识库的完善, 只要将认为具有代表性的新事例加入事例库就可以。使得知识学习变得简便, 且不需要复杂的编程。
- 3) 符合实际的操作习惯, 即先考虑已有的操作票, 再按照实际情况进行修改。
- 4) 知识表达更加直观, 由于引入了对象图概念, 使得推理结果更容易理解。
- 5) 能够适应电网发展的需要, 应用周期长。

## 参考文献

- [1] 钟继凤, 李晓明. 多站倒闸操作票自动生成系统[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(11): 48-50.  
ZHONG Ji-feng, LI Xiao-ming. An Automatic Operation Order Generation System for Multi-Substations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(11): 48-50.
- [2] 苏盛, Li K K, 曾祥君, 等. 通用变电站操作票生成方法的研究[J]. 电网技术, 2004, 28(14): 15-22.  
SU Sheng, Li K K, ZENG Xiang-jun, et al. Research on Versatile Generation Method of Switching Orders for Substations[J]. Power System Technology, 2004, 28(14): 15-22.

- [3] 朱永利, 张健, 杨子强, 等. 面向对象的农网变电站工作票与操作票通用专家系统[J]. 电网技术, 2003, 27(4): 27-30.  
ZHU Yong-li, ZHANG Jian, YANG Zi-qiang, et al. An Object-oriented Versatile Expert System for Work Orders and Switching Orders of Rural Substations[J]. Power System Technology, 2003, 27(4): 27-30.
- [4] 邓岳辉, 张伯明, 童庆芳, 等. 500 kV 双龙变电所操作票自动生成系统[J]. 电网技术, 2001, 25(5): 30-34.  
DENG Yue-hui, ZHANG Bo-ming, TONG Qing-fang, et al. An Approach to Automatically Generate Switching Sequences for 500 kV Shuanglong Substation[J]. Power System Technology, 2001, 25(5): 30-34.
- [5] 陈允平, 周理. 计算机生成操作票的理论与实践[J]. 电网技术, 1996, 20(2): 39-42.  
CHEN Yun-ping, ZHOU Li. The Theory and Practice of the Operation Order Generated by Computer[J]. Power System Technology, 1996, 20(2): 39-42.
- [6] Barletta B. An Introduction to Case-Based Reasoning [J]. AI Expert, 1991, 8(1): 43-49.
- [7] 杜一, 张沛超, 郁惟镛. 基于事例和规则混合推理的变电站故障诊断系统[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 34-37.  
DU Yi, ZHANG Pei-chao, YU Wei-yong. A Substation Fault Diagnosis System Based on Case-based Reasoning and Rule-based Reasoning[J]. Power System Technology 2004, 28(1): 34-37.
- [8] 刘立丰, 杨贵吉, 武高峰 WuGaofeng. 基于事例推理方法的电力工程智能设计研究[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(17): 51-53.  
LIU Li-feng, YANG Gui-ji. Application of Case-based Reasoning Approach in Intelligent Design for Electric Power Engineering[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(17): 51-53.
- [9] 赵登福, 吴鹏, 刘昱, 等. 基于事例推理的短期负荷预测[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(6): 608-611.  
ZHAO Deng-fu, WU Juan, LIU Yu, et al. Case-Based Reasoning for Short Term Load Forecasting[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(6): 608-611.
- [10] 张沛超, 王文君, 郁惟镛. 基于对象图的事例表示方法及其相似度计算[J]. 中国电机工程学报, 2003, 12(23): 59-63.  
ZHANG Pei-chao, WANG Wen-jun, YU Wei-yong. The Object-graph Based Case Representation Paradigm and Its Similarity Metrics[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 12(23): 59-63.

收稿日期: 2007-01-17;

修回日期: 2007-04-17

作者简介:

张旭明(1981-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统调度运行自动化; E-mail: bbn1981@sjtu.edu.cn

张焰(1958-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统规划、电力系统可靠性、电力系统分析等;

侯凤岭(1954-), 男, 高级工程师, 从事变压器技术管理、电力系统调度工作。