

# 基于分层规则的市级调度操作票自动生成系统

李秋燕<sup>1</sup>, 郭伟<sup>1</sup>, 顾飞飞<sup>2</sup>

(1. 东南大学电气工程系, 江苏 南京 210096; 2. 东大金智电气自动化公司, 江苏 南京 210036)

**摘要:** 电网调度操作涉及到的厂站之间、设备之间的配合协调具有复杂的逻辑关系, 在开发智能操作票自动生成系统时, 描述这种关系的操作规则表示是开发的难点和重点。针对电网拓扑结构具有层次性和调度操作具有严格操作顺序等特点, 采用分层结构的思想对操作规则进行描述, 并研究了在此基础上的推理机制, 能够适应电网结构的复杂性、操作任务的多样性和电力系统运行方式的灵活性, 显示出较好的智能性和良好的自适应性, 以此思想开发的操作票自动生成系统已成功应用于某市级调度管理中。

**关键词:** 操作票; 专家系统; 分层规则

**中图分类号:** TM76      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-4897 (2006) 04-0061-05

## 0 引言

电网调度操作票是在充分考虑系统运行方式、继电保护和自动装置配合以及调度操作规程等要求下, 为变更电力系统设备状态而制定的严格操作步骤, 是电力系统运行管理中防止误操作的一项有效安全措施。目前电网日趋庞大, 运行方式更加复杂多变, 对调度自动化水平的要求程度也逐步提高, 在这一趋势下, 利用计算机进行操作票的生成和管理成为必然。并且作为人工智能技术之一的专家系统在许多专业领域的应用越来越广泛, 技术日臻完善, 这些也为计算机自动生成操作票提供了强大的技术支持。

自 80 年代以来, 许多高校和专业软件公司利用专家系统技术开发了不同的操作票自动生成系统, 这些系统吸取了调度员丰富的运行经验, 总结各种操作规则, 能够准确、清晰、迅速开列符合调度要求的操作票, 从现场应用来看, 取得了较好的应用效果, 但也存在着一些不足, 具体体现在:

1) 智能性方面。大多数调度操作票系统能够对一些典型的操作任务进行推理而自动生成, 但是对于复杂的操作任务和设备任意的当前状态进行开列操作票时, 需要“以机代笔”对历史票或者典型票进行修改。

2) 扩展性方面。调度操作规则具有多样性和易变性的特点, 而一些系统的设计缺乏扩展性的考虑, 当电网结构或者运行方式改变时, 由于规则固化而使得系统的应用受到制约。

由上可见, 关于调度操作规则的学习、描述仍然

是调度操作票自动生成系统的一个重要课题。本文以开发某市调操作票自动生成系统为契机, 重点对调度操作规则的描述, 即规则的知识表示进行了研究, 采用了扩充的“规则架+规则体”<sup>[1,2]</sup>这种分层结构的设计思想, 并研究了在此基础上的推理机制, 使得系统具有较高的智能性和良好的可扩展性。

## 1 专家系统基本结构

调度运行人员日常操作要成功拟票, 必须熟悉电力系统的运行方式和电网的拓扑结构, 掌握调度操作规程。操作票自动生成系统要模拟这一操作, 就必须具备调度员的这些知识和丰富运行经验。对这些知识和经验的描述难以采用建立数学模型和数值分析的方法来解决, 而专家系统正适用于分析解决经验性、逻辑性较强的问题。为某市调开发的操作票自动生成系统就利用了专家系统的技术, 专家系统结构如图 1 所示。

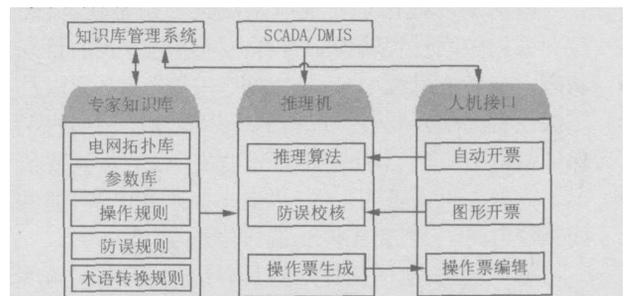


图 1 专家系统结构图

Fig 1 Structure pattern of ES

在专家系统中将调度员的知识分为三大类: 网络拓扑知识、操作规则知识和防误规则知识。网络

拓扑知识存放电网的拓扑结构、设备连接关系等事实性知识;操作规则知识则是从调度运行规程、操作规定和调度员运行经验中总结、归纳和提炼出来的;防误规则知识类似于倒闸操作中的“五防”,由于调度操作属于对设备的间接操作,除过考虑“五防”外,还要考虑运行方式闭锁等方面的约束。

专家知识是专家能力的关键,一个专家系统的优劣很大程度上取决于它所具有的专家知识的多少与水平<sup>[3]</sup>,而专家知识的获取和表示往往是专家系统开发的瓶颈。在操作票自动生成系统中,操作规则的知识表示是开发过程中的重点和难点。下面几部分就对操作规则设计过程中的概念化阶段、形式化阶段和实现阶段进行展开讨论。

## 2 操作规则的设计与实现

### 2.1 操作规则设计的依据

专家系统的一般开发过程要经历认识阶段、概念化阶段、形式化阶段、实现阶段和测试阶段,在前两阶段中,需要了解所表述问题的特征和知识的结构,确定问题之间的关系以及求解流程和约束条件,是知识表示的依据。调度操作中的操作规则不仅隐性地体现了电网的拓扑结构,还体现了调度操作的顺序性,两者是操作规则采用合理的表示形式,即操作规则设计的依据。

电网拓扑结构可以分为三层<sup>[4]</sup>,电网主网架是由发电厂和变电站通过不同电压等级的线路联络而成,即第一层为网络层;第二层为发电厂和变电站内部的设备构成的厂站层;第三层为各设备之间的关系构成的设备层,比如开关及其两侧刀闸具有依赖关系、二次设备对一次设备的服从关系等。可见,电网拓扑结构具有层次性。

电网调度操作是实现电网从某一初始状态,经过一系列中间过程转换到符合电网运行方式的目标状态。在转换过程中,厂站之间、一次设备之间以及二次设备的配合要遵循严格的先后顺序。例如为了保证供电可靠性,满足“不停电思想”,在大多数情况下需要先投入备用电源,再退出原工作电源;馈供线路停电时,一般要先停受端再停送端等。

综上所述,电网拓扑结构具有层次性,电网调度操作具有严格操作顺序,这两个特点是规则设计的依据。

### 2.2 分层结构的操作规则设计

操作规则是专家系统的核心,它和推理机共同完成自动开票功能。从现有文献和现场实际应用来

看,有的采用句法识别<sup>[5,6]</sup>和认知模型<sup>[7]</sup>来实现操作规则的描述,但研究合理的操作规则表示方法仍是影响操作票推理、智能性和扩展性的关键问题。

根据上面分析所得出的结论:电网拓扑结构具有层次性和电网调度操作具有严格操作顺序,即有序性这两个特点,并且考虑到调度员开票过程的思维是从概括到具体,不断细化的一个过程,本文对熊范纶最先提出的“规则架+规则体”进行扩充,采用“规则架+规则体+子规则体”这样一个不断细分的层次结构进行操作规则的描述。“规则架+规则体”可以视为是对经典规则表示的一种实质性改进,其基本思想可描述为:规则架用以描述推理网络中各节点之间的层次关系,规则体用以描述节点的具体推理规则或者计算规则。本文采用规则架来描述不同的操作任务所对应的各个节点之间的配合关系,反映调度操作的有序性,并且给出了该节点应该达到的目标状态;规则体则根据目标状态,并考虑接线形式等因素来描述每个节点对应的具体操作任务;子规则体用来描述该节点为了完成具体任务所需要动作的相关设备。一个规则架可能由于节点不同的初始状态或者节点不同的接线方式等因素而对应多个规则体,每个规则体对应一个子规则体,而子规则体还将对应下一级子规则体,直到细化为具体动作的设备为止。将一组规则架连同相对应的规则体及子规则体一起称之为一个规则组,一个规则组对应一个独立的操作规则单元。操作规则单元的组织模型如图2所示。

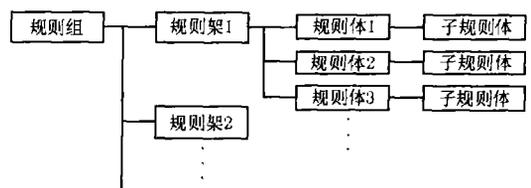


图2 操作知识单元组织模型

Fig 2 Model of operation rule unit

操作规则单元按照调度操作任务可以分为单线操作、两线一变操作、合解环操作、母线操作、主变操作以及旁路代操作六大类。复杂的操作任务是由简单的任务复合而成,所以这种分层次的设计思想可以共享规则体及子规则体。

### 2.3 系统智能性和扩展性的实现

在设计每个规则单元时,由规则架给出了节点的目标状态,规则体根据不同的接线形式和不同的运行方式而自动生成该节点的具体操作任务,这样保证了在任意的当前状态下或者电网拓扑结构改变

时,规则仍具有弹性机制。以单线操作时线路转检修为例对这两方面进行阐释,规则组表示如图 3 所示。

其中第一组规则架对应的规则体是根据设备当前状态自动生成,避免了固化的规则设计,能够灵活适应开票时设备的任意初始状态;第 3 组和第 5 组规则架是否操作,则要根据相应的接线形式来判断,如果线路转检修后,母线需要停役,则自动生成完成此任务的相应规则体,反之,跳过执行下一组规则架,这样的设计思想,一方面能够保证操作顺序的正确性,另一方面使得这个知识单元具有较高的智能性,当拓扑结构变化或者运行状态改变时具有自适

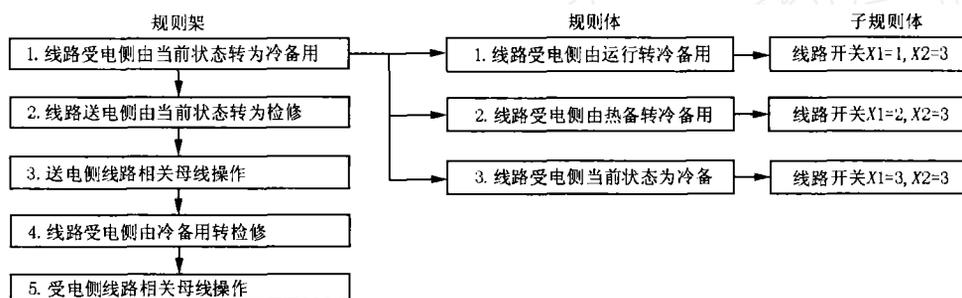


图 3 单线操作的部分规则表示

Fig 3 Part rule description of single line operation

综上所述,这种层次结构的规则描述直观易懂,它首先理出问题的层次结构,然后再逐步确定各级子问题,为知识获取提供了一个自然的、易于计算机交互实现的表达工具;另一方面在推理过程中,可以用规则架做索引,当规则架可用后再调入规则体,可以提高知识库的匹配效率;再者,由于规则体的自动生成,对电网拓扑结构改变具有自适应性,并且当有新的操作规则出现时,直接添加到对应的知识单元中,而不用修改源程序。

### 3 基于分层规则的推理过程

开发的调度操作票自动生成系统为用户提供了图形和表格两种形式来设置操作任务,即指定操作对象和操作目的,推理机自动获取 SCADA 实时数据进行电网拓扑分析,调入该操作任务相对应的操作规则单元,利用数据驱动的前向推理机制,匹配规则库。

下面以该地区某个 110 kV 电气环网(图 4)的合解环操作为例来说明基于分层规则的推理过程。

假设操作目的为 715 线合环和 719 线解环,前者目标状态为运行,后者目标状态为热备用。110 kV 环网中线路和母联开关及刀闸的初始状态如图

应性。当有新的操作规则出现时,直接添加到对应的知识单元中,相当于在树状的分层结构中添加一支新树枝,而不用修改源程序,并且不会对原有的规则造成影响,易于扩展。

这样进行规则描述还有一个特点,简单操作的规则体所对应的操作任务基本上是不可分的,具有原子性,所以当一些复杂的操作被分解后,如果对应的操作任务与具有原子性的规则体一致,完全可以共享此规则体及其子规则体,这样提高了程序的通用性,避免代码冗余,例如主变停役时,如果需要将母线停役、线路停电,则单线操作中的规则体可以为其所用。

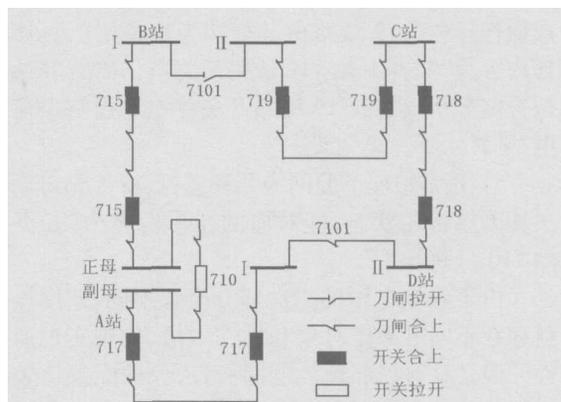


图 4 110 kV 电气环网初始状态

Fig 4 Primary state of 110 kV electric ring network

4 所示,其中 A 站为 220 kV 电源站,推理机获取 SCADA 实时数据和潮流走向信息,调入合解环操作的规则组,它的设计需要满足“先合环后解环”以及配网开环运行的思想,具体为:

- 1) 合环点在热备用或者检修状态 and 解环点在运行状态。
- 2) 电气环网闭环运行。
- 3) 合环点转为目标状态。
- 4) 解环点转为目标状态。

### 5) 电气环网开环运行。

依据每个规则架进行拓扑分析,自动生成具体操作任务,进一步生成操作术语,这些规则架对应的术语集合就是操作指令集。下面按照每个规则架依次进行分析:

1) 715线路当前状态为运行,根据规则架给出的“合环点在热备用或者检修状态”,按照线路状态依次由运行转热备用、冷备用、检修这样的状态转换顺序,生成操作任务为“715线路由运行转热备用”,根据线路操作规则生成具体的操作内容为“拉开B站715线路开关”;接着对B站进行失电分析,得出具体的操作内容为“合上B站母联7101刀闸”;719线路为运行状态,所以默认跳过,转入下一规则架。

2) 进行环路分析,A站的母联开关是热备用状态,根据规则架中“电气环网闭环运行”生成操作任务“A站的710母联开关由热备用转为运行”,对应的操作内容为“合上A站710母联开关”,匹配完毕转入下一规则架。

3) 根据715线路当前状态和目标状态要求,生成操作任务为“715线路由热备用转运行”,即操作内容为“合上B站715线路开关”。

4) 根据BC线路当前状态和目标状态要求,生成操作任务“719线路由运行转为热备用”,具体操作内容为“拉开B站719线路开关”;仍需对B站进行失电分析,得出719线路开关停电不影响负荷供电,则转入下一规则架。

5) 正常情况下配网为开环运行,将A站母联开关转为热备用状态,即对应的操作内容为“拉开A站710母联开关”。

由于各级电网的二次部分配置不同,调度操作就存在不同的操作对象和操作术语,较难实现通用性。但是针对局部地区电网而言,保护配置比较统一规范,例如图4所示地区110kV电网线路保护多为距离、方向零序等保护。根据“二次设备依附于一次设备”的原则,从具体操作中抽象出共性的二次操作规则,以一次设备动作的事实为前提建立二次设备操作规则库,例如:当线路由热备用转运行时,需停用备用电源自投装置。

在上述的合解环操作中,涉及到备自投、重合闸和保护之间的配合。规则架匹配结束后,根据已经产生的一次设备动作事实来匹配二次设备操作规则,并确定二次设备的动作发生在事实产生之前还是之后,将其添加到一次设备操作序列中,最后将所有的操作内容经过术语翻译,生成符合现场要求的

操作票。

## 4 系统的实现及应用

以分层规则和相应的推理机制开发的操作票自动生成系统应用于现场时,是由多台服务器和工作站支持的。它的逻辑结构如图5所示。

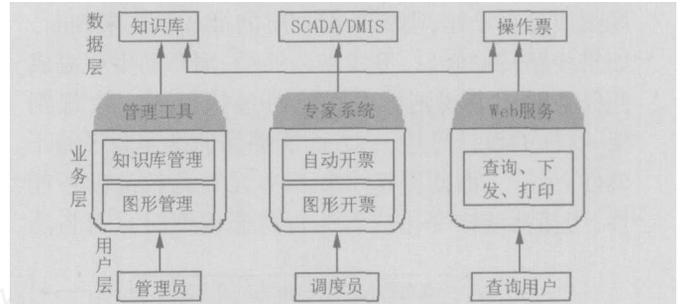


图5 系统逻辑结构图

Fig 5 Logical framework of dispatching operation order automation system

服务器用于系统数据信息和图形信息的存储,工作站有管理员工作站和调度员工作站以及用户查询工作站,分别用于系统建模和系统的管理维护;调度人员的拟票、审核等需要;以及通过浏览器查询系统服务器。系统采用B/S和C/S混合的软件体系结构设计,使得外部用户不直接访问数据库服务器,保证数据相对安全;内部用户交互性强,数据查询和修改的响应速度较快。采用Visual C++ 6.0、Delphi 6.0和DB2数据库开发实现,接收SCADA系统的实时数据,为开票提供真实的数据基础,并且为用户提供了真实反映电网结构的全图形化开票环境,集自动开票、模拟操作开票和培训演示系统于一体,具有操作票网络化流转和规范化管理,已成功应用在江苏省某市调电网。

## 5 结束语

本文在开发某市调操作票自动生成系统的基础上,对规则描述及其推理机制进行了研究,提出了“规则架+规则体+子规则体”这种分层次规则设计思想,使得以此为核心建立的专家系统能够适应电网操作任务的多样性和电网结构的复杂性和运行方式的灵活性,并且分层结构的规则描述可以方便地修改和完善,提高专家系统的适应性,从而保证操作票自动生成系统的生命力。

## 参考文献:

- [1] 吴信东. 专家系统设计 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社,

1990.  
WU Xin-dong Design of Expert System [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1990.
- [2] 许琦,王磊,许青山. 基于实时信息的县级调度操作票系统[J]. 继电器, 2004, 32(20): 36-39.  
XU Qi, WANG Lei, XU Qing-shan Operation Ticket Expert System Based on Real-time Information of Rural Power Network [J]. Relay, 2004, 32(20): 36-39.
- [3] 何新贵. 知识处理与专家系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1990.  
HE Xin-gui Knowledge Process and Expert System [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1990.
- [4] 杨继涛,胡明,杨以涵. 电网调度操作票专家系统的设计与开发[J]. 继电器, 2004, 32(15): 45-47.  
YANG Ji-tao, HU Ming, YANG Yi-han Design of Development of Dispatching Sheet Expert System for Power Network [J]. Relay, 2004, 32(15): 45-47.
- [5] 宋宏坤. 电网调度管理专家系统及其应用 [J]. 电力系统及其自动化, 1999, 23(19): 58-59.  
SONG Hong-kun Expert System for Electric Power Network Operation Order Management [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(19): 58-59.
- [6] 吴岷,张晓莉,杨光正. 基于句法识别的电网调度命令专家系统 [J]. 电力系统及其自动化, 1998, 22(4): 36-39.  
WU Min, ZHANG Xiao-li, YANG Guang-zheng Power Network Dispatching Command Expert System Based on the Syntactic Pattern Recognition Method [J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(4): 36-39.
- [7] 汤磊,张伯明,孙宏斌. 电网操作票专家系统中的通用认知模型 [J]. 电力系统及其自动化, 2001, 25(22): 6-8.  
TANG Lei, ZHANG Bo-ming, SUN Hong-bin General Cognitive Model of Power Network in Operation of Electric System [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(22): 6-8.

收稿日期: 2005-06-23; 修回日期: 2005-08-24

作者简介:

李秋燕 (1981 - ), 女, 硕士研究生, 从事人工智能在电力系统中的应用方面的研究; E-mail: hnky2003@163.com

郭伟 (1970 - ), 男, 副教授, 主要从事电力系统调度自动化、人工智能在电力系统中的应用等领域的教学、科研工作。

### Urban dispatching operation instruction system based on the hierarchy rules

LI Qiu-yan<sup>1</sup>, GUO Wei<sup>1</sup>, GU Fei-fei<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. W iscom Electrical Co., Ltd, Nanjing 210036, China)

**Abstract:** The sequences between the substations and the devices has the complex logical relationship. The rule description is important which is to describe the relations during the development of intelligent dispatching operation instruction system. The topology of network is hierarchical, and the dispatching operation has rigid sequence. With these features, this paper uses hierarchical structure to describe the operation rules and researches the corresponding inference machine, which can adapt to complexity of the net-topology, the diversity of the operation task and the flexibility of operation mode. The dispatching operation instruction system based on this scheme is intelligent and self-adaptive, which has been successfully used in the urban dispatching management.

**Key words:** dispatching operation instruction; expert system; hierarchical rule

(上接第 48 页 continued from page 48)

(College of Hydraulic Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Short-term generation schedule of cascaded hydropower plants under power market is studied. A second-degree moving model has been developed to forecast the bidding price, based on which another new model and its related nonlinear restrictions are presented to obtain the maximum profits of the cascaded hydropower plants. Progressive optimality algorithm provides a basis for hydropower companies to declare the interval bidding price and capacities of the next day scientifically on the day ahead of marketing. Finally, the case shows that the model is feasible and profitable in a competitive electricity market.

**Key words:** hydropower plants; optimal operation; power market; generation schedule