

# 具有校验功能的地区调度操作票专家系统的研制

王艳<sup>1</sup>, 杨以涵<sup>2</sup>

(1. 湖南省电力公司中心培训部, 湖南 长沙 410131; 2. 华北电力大学, 北京 102206)

**摘要:** 调度操作票描述的是一项综合性的系统工作, 其每一步操作都必须满足电力系统安全稳定运行的要求。针对目前大多数调度操作票专家系统出票的可行性仍需提高的现状, 提出了具有校验功能的地区调度操作票专家系统的研制方法。对电网拓扑知识表示进行了简化, 采用分类分层的思想描述操作规则, 并研究了在此基础上的推理机制, 在自动推理的过程中, 通过潮流计算与分析, 对操作步骤进行静态安全校验。实际运行表明, 系统出票的安全可行性、系统的通用性和用户可维护性都得到了较大提高。

**关键词:** 调度操作票; 安全校验; 专家系统

## Development on regional dispatching order-sheet expert system with self-check function

WANG Yan<sup>1</sup>, YANG Yi-han<sup>2</sup>

(1. Training Center of Hunan Electric Power Company, Changsha 410131, China;

2. North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Dispatching sheet is the description of integrated work, each operation must satisfy the requirement of safe and stable running. According to the status that the feasibility of most dispatching order-sheet expert system is needed to be improved, development on regional dispatching order-sheet expert system with self-check function is introduced. The description of topology structure of power grid is simplified, the operation rule is described based on idea of classification and lamination, and the inference machine is researched based on the topology structure of power grid and operation rule. The operation is checked by flow calculation during automatic reasoning. Practical application shows that the feasibility, versatility and maintainability of the system are improved.

**Key words:** dispatching order-sheet; safety-checking; expert system

中图分类号: TM734 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)21-0095-04

## 0 引言

自20世纪80年代以来, 国内外的科研人员开发了不少操作票专家系统, 从现场应用和发表的文献[1~7]来看, 这些系统在很大程度上提高了电网调度自动化水平, 减轻了调度人员的工作压力。但是, 这些开票系统大多只考虑了设备电气连接关系的约束, 而没有考虑电网的静态安全约束, 对于出票的安全可行性还主要依靠调度员的主观经验来判断<sup>[8]</sup>。在这种情况下, 随着电网规模的不断扩大, 电网结构日益复杂, 系统的运行方式变化多端, 操作某一设备时有可能导致其它设备过载, 甚至有可能对电力系统的安全稳定性产生威胁。由此可见, 开发一套具有校验功能的电网调度操作票专家系统具有十分重要的意义。

本文研制的系统把以潮流计算为基础的电网静态安全校验与操作票专家系统相结合, 对执行操

作票后可能对电网造成的影响预先进行计算分析, 判断其安全可行性, 为操作票的自动推理提供更可靠的理论分析依据。

## 1 系统总体结构

该系统主要由规则库模块、推理机模块、校验任务提取模块和电网静态安全校验模块等组成。推理机利用规则库的知识和来自于实时数据库的数据进行推理, 并且在推理的过程中对需要校验的操作

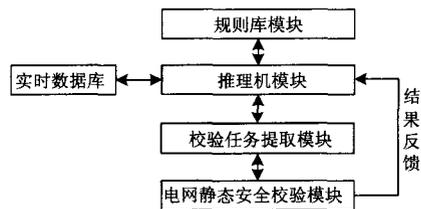


图1 系统总体结构

Fig.1 Overall structure of the system

步骤利用电网静态安全校验模块进行校验，最后生成操作票。系统总体结构如图 1 所示。

## 2 电网调度操作票专家系统的知识表示

### 2.1 电网拓扑知识表示

电网拓扑知识是操作票专家系统工作的基础，知识表示的优劣直接影响专家系统的工作效率和通用性。因此，有效的电网结构知识表示方法是一个专家系统开发成功的前提<sup>[9]</sup>。

由于要对自动推理出的票进行静态安全校验，而静态安全校验是以潮流计算为基础的，因此，电网拓扑知识应该能够方便地转换为潮流计算所需的拓扑知识。此外，由于电力系统的倒闸操作主要是开关和刀闸的相关操作，所以，操作票专家系统中的电网拓扑知识应能反映开关和刀闸的状态、连接关系等详细信息，这与潮流计算所需的电网拓扑知识不同。

基于以上分析，本文以节点表示母线，以支路表示发电机、变压器、线路、电抗器和电容器、PT 等非单端设备，形成电网的物理模型并对其进行简化。简化的基本思想如下：将开关及其两侧的刀闸看成一个整体，称之为开关刀闸组；将开关通过某一个刀闸与某一个设备相连称为一个开关支路，这样，一个开关刀闸组由一个开关和若干个开关支路构成。

#### (1) 开关支路的属性设置

- ①支路位置(0: 开关左侧, 1: 开关右侧);
- ②支路刀闸名称;
- ③支路所连设备编号;
- ④支路所连设备类型(1: 母线, 2: 线路, 等);
- ⑤支路状态 (0: 打开, 1: 闭合)。

#### (2) 开关刀闸组的状态设置

- ①运行: 开关处于闭合状态, 两侧各有 1 个刀闸处于闭合状态
- ②热备用: 开关处于断开状态, 两侧各有 1 个刀闸处于闭合状态;
- ③冷备用: 开关及其两侧刀闸均处于断开状态;
- ④检修: 在冷备用状态下, 开关的两侧各挂有一组接地线或各有一个处于闭合状态的地刀。

例如, 如图 2 所示, 201 开关分别通过 2011 刀闸、2012 刀闸、2016 刀闸与 220 kV I 母、II 母、东高线相连, 则三个开关支路的属性可分别表示为:

- a) 支路 1: 0, 2011, II 母编号, 1, 0;
- b) 支路 2: 0, 2012, I 母编号, 1, 0;
- c) 支路 3: 1, 2016, 东高线编号, 2, 0。

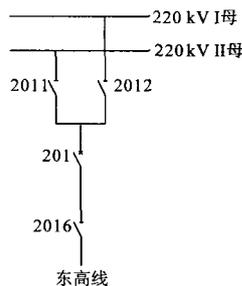


图 2 简化前的开关、刀闸

Fig.2 Unsimplified breaker and switch

简化后的开关刀闸组如图 3 所示, 此时开关刀闸组状态为冷备用。



图 3 简化后的开关刀闸组

Fig.3 Simplified breaker-switch group

自动推理过程中, 当推理具体倒闸操作步骤时, 即可搜索相应的开关刀闸组中的开关刀闸; 当对操作步骤进行静态安全校验时, 即可将其看成一个整体, 而不考虑开关刀闸组的内部详细信息。由此可见, 在简化了电网的物理模型的同时, 又保留了开关刀闸组内部拓扑结构的详细信息, 既能满足静态安全校验的需要, 又符合倒闸操作的要求。此外, 还可以利用开关刀闸组的状态对开关或刀闸的状态进行初步的校核, 其基本思想是: 在正常运行状态下, 开关刀闸组的状态即为如上所述的四种状态之一, 若不是则说明此开关刀闸组中的开关或刀闸的状态不合理。例如, 开关闭合而其两侧刀闸断开、两个连接母线的刀闸均为闭合状态、开关和地刀均为闭合状态等这些情况都是正常运行状态时不可能出现的。

对电网的物理模型简化后, 再根据开关刀闸组状态和状态估计后的数据确定所有支路的有功功率方向, 同时, 对于有物理连接关系但没有电气连接关系的设备之间用虚线连接起来, 形成全网倒闸操作模型。当推理设备停电操作时即可根据功率方向搜索其供电和受电设备, 当推理设备送电或转供操作时即可根据虚线所连设备搜索潜在供电路径。

### 2.2 操作规则的设计

操作规则是专家系统的核心, 它和推理机共同实现自动开票功能<sup>[10]</sup>。由于电网调度操作的综合性和多样性, 使得规则不能用精确的数学模型来描述, 这也是一直制约电网调度操作票专家系统推广使用

的主要因素<sup>[11]</sup>。因此,研究合理的调度操作规则表示方法是提高调度操作票专家系统的通用性和用户可维护性的关键。

电力系统倒闸操作是通过顺序倒换有关设备运行状态使电网从某一初始状态转换到符合电网运行方式的目标状态。由于要对自动推理出的票进行静态安全校验,在转换过程中要考虑电网静态安全约束问题。例如,为了保证供电可靠性,在投入备用电源、退出工作电源之前,应考虑静态安全约束,以防止投入备用电源后导致设备过载等。因此,操作规则应能体现设备之间的供电和受电关系。此外,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,线路停电时先停受电侧再停供电侧,而送电时顺序则相反。

基于以上特点,同时又考虑到电网拓扑结构具有层次性<sup>[12]</sup>,本文的操作规则采用分类分层的表示

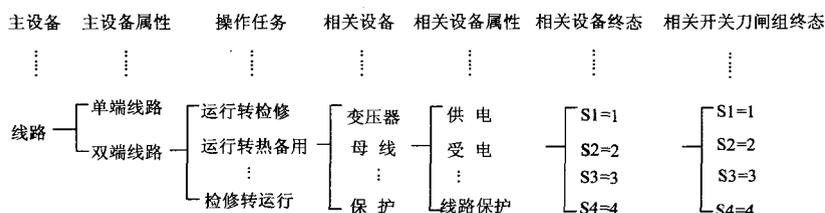


图4 线路类的操作规则

Fig.4 Operating rule of line

其中,主设备属性中的单端线路指的是馈线。相关设备表示操作主设备时需操作的其它设备。相关设备属性中的“供电”表示主设备是相关设备的电源,“受电”表示主设备是相关设备的负荷。当涉及到相关设备的操作时,即可匹配相应设备的规则进行推理,而设备状态的转换最终要通过切换开关刀闸的状态来实现,此时即可读取相应规则的相关开关刀闸组的终态来实现开关刀闸状态的切换。设备和开关刀闸的当前状态均由程序自动读取实时数据库获得,这样有利于避免规则的固化设计,能够灵活适应开票时设备的任意初态。

### 3 电网调度操作票专家系统的推理机制

推理过程是一个从“用户选择操作设备+操作任务→网络拓扑分析→匹配操作规则→推理控制→术语翻译→生成操作票”的匹配过程<sup>[11]</sup>。为了提高系统出票的安全可行性,本文在设计推理机制时引入电网静态安全约束,为推理提供更可靠的理论分析。例如,变压器停电时,为了保证供电可靠性需将其负荷转由其它设备供电,若搜索出负荷的转供路径,

方法,即根据操作对象的类型将规则分为母线、变压器、线路、发电机和开关刀闸五类,每类规则按主设备、主设备属性、操作任务、相关设备、相关设备属性、相关设备终态和相关开关刀闸组终态进一步划分。由于倒闸操作时二次设备是围绕着一一次设备进行的,因此,本文以“操作一个一次主设备时,二次设备应该具有什么样的条件和状态”为核心,将二次设备操作规则嵌入到一次设备操作规则中。

无论是单一操作任务,还是联合操作任务都可以按此结构添加规则。而且,当联合操作任务被分解为单一操作任务后,完全可以共享单一操作规则,这样既避免了规则的冗余,又提高了程序的通用性。此外,这种分类分层的表示方法也易于实现规则的修改和扩展,在一定程度上提高了调度操作票专家系统的通用性和用户可维护性。以线路类为例说明操作规则的表示形式,如图4所示。

则还需对其进行静态安全校验,若满足静态安全约束才能将负荷转供出去。由此可见,由于规则中体现了设备之间的供电和受电关系等,并将静态安全约束条件融入到规则中,因而能满足静态安全校验的要求。

#### 3.1 提取校验任务模块

由于有些倒闸操作例如二次设备的操作并不影响电网的静态安全性,因此也就没有必要对所有操作步骤都进行静态安全校验,而且对所有操作步骤进行校验也会影响推理的速度。基于以上原因,需要对用户选择的操作任务进行解析,提取出需要校验的操作步骤。本文设计的静态安全校验操作大体有以下几类:

- (1) 涉及合环或解环的母联开关的操作。
- (2) 可能会引起设备过载的转供负荷操作,如变压器开关的操作等。
- (3) 引起节点变化的母线停送电操作。
- (4) 引起支路变化的线路停送电操作,尤其是联络线路的停送电操作。

### 3.2 电网静态安全校验模块

由于电网潮流是电网操作的根本依据，因此，本文的电网静态安全校验模块以潮流计算为基础。针对提取出的校验任务，系统利用状态估计后的数据采用牛拉法进行全潮流计算，再根据潮流计算结果判断是否存在有功、无功或电流、电压越限，即是否满足电网静态安全约束。其中，潮流计算所需的电网拓扑知识是通过倒闸操作模型进行适当修改而得到的。即将倒闸操作的电网拓扑结构中的发电机和负荷线路支路改为相应节点的注入功率，并且，电网元件状态也跟随到相应校验任务操作结束后的状态。

下面以图 5 所示的合环操作说明电网静态安全校验模块的校验过程。图中实心方块表示开关刀闸组为运行状态，空心方块表示开关刀闸组为非运行状态图。其中，A 站为 220 kV 电源站。

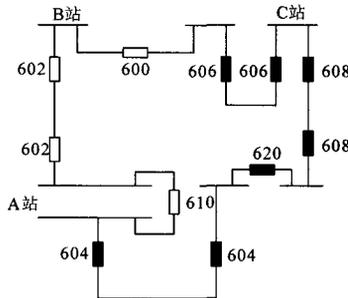


图 5 电气环网初始状态

Fig.5 Beginning state of electric ring network

假设图 5 所示状态为合环前初始状态，操作任务为 602 线路合环。推理机获取实时数据调用规则库中相关规则进行推理，调用校验任务提取模块提取校验任务，再由电网静态安全校验模块进行校验，通过潮流计算，判断是否满足静态安全约束，若不满足则弹出对话框进行提示，反之则得出操作步骤。

### 4 系统实现及应用

基于以上设计思想，采用 Visual C++6.0 面向对象编程技术和 Oracle9i 数据库开发了满足电网调度操作需要的电网调度操作票专家系统。该系统集成于电网调度决策支持系统，提供全图形开票环境，具有自动开票、点图开票、流程管理、模拟预演、系统维护和辅助培训等多种功能。本系统已成功应用于某地区电网。

### 5 结束语

本文在开发地区电网调度操作票专家系统的基础上，对规则描述及其推理机制进行了研究，将电

网静态安全约束引入推理过程中，对出票的安全性进行自动校验，提高了开票系统出票的安全性，此外，系统的通用性和用户的可维护性也得到了提高。

### 参考文献

- [1] 周明, 任建文, 李庚银, 等. 基于多智能体的电网调度操作票指导系统研究与实现[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 58-62.  
ZHOU Ming, REN Jian-wen, LI Geng-yin, et al. A Multi-agent Based Dispatching Operation Instructing System in Electric Power Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 58-62.
- [2] 李秋燕, 郭伟, 顾飞飞. 基于分层规则的市级调度操作票自动生成系统[J]. 继电器, 2006, 34(4): 61-65.  
LI Qiu-yan, GUO Wei, GU Fei-fei. Urban Dispatching Operation Instruction System Based on the Hierarchy Rules[J]. Relay, 2006, 2(4): 61-65.
- [3] 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): 14-18.  
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): 14-18.
- [4] 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 Substation[J]. Power System Technology, 2003, 27(4): 27-30.
- [5] Zhou M, Ren J W, Li G Y. ANN-based Approach for an Operating Order Sheet Automatic Formation and Management Expert System[A]. in: Proc of International Conference on Electrical Engineering 2001, ICEE'01[C]. Xi'an(China): 2001.104-108.
- [6] Nagata T, Nakayama H, Utatani M, et al. A Multi-agent Approach to Power System Normal State Operations[A]. in: Proceedings of IEEE PES Summer Meeting[C]. Piscataway(NJ). 2002: 1582-1586.
- [7] Sachdev M S, Dhakal P, Sidhu T S. A Computer-aided Technique for Generating Substation Interlocking Schemes[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(2): 538-544.
- [8] 刘强, 周明, 李庚银, 等. 具有计算分析功能的电网调度操作票系统[J]. 电网技术, 2005, 4(7).  
LIU Qiang, ZHOU Ming, LI Geng-yin, et al. Power System Dispatching Order Generating System with Calculation and Analysis Functions[J]. Power System Technology, 2005, 29(7): 71-76.

表8 预测输出表  
Tab.8 Outputs of forecasting

时间	实际值	点预测值	误差百分比 (PE)	95%置信区间 上限	95%置信区间 下限
4月13日	737.96	715.919 9	2.986 6	671.420 5	760.419 3
4月14日	740.72	759.047 6	-2.474 3	714.548 2	803.547 0
4月15日	755.74	724.946 6	4.074 6	680.447 2	769.446 0

从表 8 看出,预测的效果总体上是令人满意的,3 日内预测误差都小于 5%。

### 3 结论

论文应用 SPSS 研究了一些数理统计分析方法,可以得到如下结论:

- 1) 通过主成分分析降低了数据维数,去除了数据间的相关性,减少了噪音数据的影响;
- 2) 通过多元线性回归分析,能够找出负荷与何种气象因素整体相关程度;
- 3) 通过以聚类分析,可以找出历史相似日;
- 4) 季节性 ARIMA 方法可以对天气因素不敏感的负荷序列进行很好的预测。

### 参考文献

- [1] 余建英,何旭宏. 数据统计分析与 SPSS 应用(第一版)[M]. 北京:人民邮电出版社,2003.  
YU Jian-ying,HE Xu-hong. Analysis of Data Statistics and Application of SPSS(First Edition)[M]. Beijing: Posts & Telecom Press,2003.
- [2] 王志征,余岳峰,姚国平. 主成份分析法在电力负荷预测中的应用[J]. 电力需求侧管理,2003,24(3): 21-24.

WANG Zhi-zheng, YU Yue-feng, YAO Guo-ping. The Application of Principal Component Analysis in Load Forecasting[J]. Power Demand Side Management, 2003, 24(3): 21-24.

- [3] 王治华,杨晓梅,李扬. 气温与典型季节的电力负荷关系的研究[J]. 电力自动化设备,2002,22(3): 16-18.  
WANG Zhi-hua, YANG Xiao-mei, LI Yang. Study on Relationship between Temperature and Electrical Loads in Typical Seasons[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(3): 16-18.
- [4] Heinemann G T, Nordman D A, Plant E C. The Relationship Between Summer Weather and Summer Loads-a Regression Analysis[J]. IEEE Trans on PAS, 1996, 85(11):1144-1154.
- [5] 宇传华. SPSS 与统计分析(第一版)[M]. 北京:电子工业出版社,2007.  
YU Chuan-hua. SPSS and Statistical Analysis(First Edition)[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry,2007.
- [6] 于尔铿,刘广一,周京阳. 能量管理系统(第二版)[M]. 北京:科学出版社,1998.  
YU Er-keng, LIU Guang-yi, ZHOU Jing-yang. Energy Management System(Second Edition)[M]. Beijing: Science Press,1998.

收稿日期:2008-11-01; 修回日期:2008-12-06

作者简介:

徐东升(1981-),男,工程师,从事电力系统运行和电力市场方面研究; E-mail: weiyang1984@126.com

杨巍(1984-),男,硕士研究生,从事电力系统规划、可靠性和电力市场方面研究;

魏哲(1983-),男,硕士研究生,从事电力系统运行、电力系统规划和电力市场方面研究。

(上接第 98 页 continued from page 98)

- [9] 段振国,高曙,杨以涵. 电网结构知识表示方法研究与管理系统的开发[J]. 中国电力,1999,32(2): 34-37.  
DUANG Zhen-guo, GAO Shu, YANG Yi-han. Study of Power Network Structure Knowledge Representation and Development of Knowledge Management System[J]. Electric Power,1999,32(2):34-37.
- [10] 杨以涵,唐国庆,高曙. 专家系统及其在电力系统中的应用[M]. 北京:水利电力出版社,1995.  
YANG Yi-han, TANG Guo-qing, GAO Shu. Expert System and Its Application in Power System[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press,1995.
- [11] 周明,林静怀,杨桂钟,等. 新型智能电网调度操作票自动生成与管理系统的[J]. 电力系统及其自动化,2004,6(11): 71-74.  
ZHOU Ming, LIN Jing-huai, YANG Gui-zhong, et al. A New-type Intelligent Dispatching Operation Order

System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004,28(11):71-74.

- [12] 杨继涛,胡明,吴琼,等. 电网调度操作票专家系统的设计与开发[J]. 继电器,2004,8(15): 45-48.  
YANG Ji-tao, HU Ming, WU Qiong, et al. Design and Development of Dispatching Sheet Expert System for Power Network[J]. Relay,2004,32(15):45-47.

收稿日期:2008-11-12; 修回日期:2009-03-08

作者简介:

王艳(1982-),女,硕士,主要研究方向为电力系统调度自动化、电力系统分析与控制等; E-mail: ahwy8212@163.com

杨以涵(1927-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统运行、分析与控制,电力系统调度自动化,光学互感器等。