

DOI: 10.7667/PSPC161926

基于 Petri 网理论的智能签票系统防误算法的设计与实现

孙月琴¹, 胡晓飞¹, 王海港¹, 谢民¹, 张楠², 王占欣²

(1. 国网安徽省电力有限公司, 安徽 合肥 230022; 2. 北京中恒博瑞数字电力科技有限公司, 北京 100085)

摘要: 针对电网继电保护方式安排可靠性与智能性仍需提高的现状, 提出了基于 Petri 网理论的智能签票系统防误算法。通过对电网基础数据进行网络拓扑分析, 采用分层分类的方法描述操作规则。根据签票语料拓扑结构和防误专家知识库建立 Petri 网理论模型, 实现智能化的签票系统防误功能。实际运行表明, 基于 Petri 网理论的继电保护智能签票系统的防误算法能够对保护方式安排提供准确丰富的校验结果, 保障电网保护方式安排操作的准确性与安全性。

关键词: 继电保护; 方式安排; 智能签票系统; 防误校核; Petri 网理论

Design and implementation of protection scheme intelligent anti-misoperation algorithm based on Petri net theory

SUN Yueqin¹, HU Xiaofei¹, WANG Haigang¹, XIE Min¹, ZHANG Nan², WANG Zhanxin²

(1. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd, Hefei 230022, China;

2. Beijing Join Bright Digital Power Technology Company, Beijing 100085, China)

Abstract: Aiming at the status that the reliability and intelligence of power protection alteration scheme design needs to be improved, an intelligent anti-misoperation algorithm based on Petri net theory is put forward to verify a power protection alteration scheme automatically. The first step is to implement topological analysis for grid basic data, then the operating regulation is described based on methods of stratification and classification. The anti-misoperation method of power protection alteration schemes is built by the Petri net theory model which is based on the corpus topology and experts knowledge base. The practical operating shows that the anti-misoperation algorithm for power protection alteration scheme based on Petri net theory has the ability to provide accurate and abundant verification results, which therefore ensure the accuracy and security of the power protection alteration scheme.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5212001500LB).

Key words: relay protection; protection alteration scheme; intelligent dispatching operation-tickets system; anti-misoperation check; Petri net theory

0 引言

电力调度中心是电力生产运行的指挥机构, 随着电网规模的日益扩大, 建立智能电网已成为电力行业发展的共同目标。在网络信息和可视化技术迅猛发展的当下, 电力调度各项工作不断地向智能化与信息化方向发展^[1-4]。电力操作票制度在电力生产运行管理中能够有效地防止误调度、误操作事件的发生, 基于人工智能技术的智能操作票系统在电力系统管理中得到广泛应用^[4-6]。

变电站二次设备包括对一次设备进行控制、测量、保护以及对一、二次设备的正常、异常或事故等工况提供信号显示或报警的设备^[7]。在电网实际运行中, 根据电网结构变化执行任务时(检修、送电等), 为保证此过程中各设备及运行电网的安全, 二次设备需要针对一次设备状态的改变按一定规则进行保护装置的投退或整定值的更改。这种调整过程就是二次方式安排的主要内容。二次运行方式安排是调度操作票的前端流程, 其正确性直接影响到调度操作的安全性。目前, 二次方式安排仍旧依靠运行人员的经验手工签票, 计算机防误能力低, 影响电网二次设备状态签票信息的正确性, 给电网安全稳定运行带来

风险^[8-10]。另一方面, 随着电网结构日渐复杂, 运行方式变化多端, 传统签票方式的稳定性与安全性不能满足要求, 基于此研发二次方式安排智能签票系统的防误校核功能具有重大的意义。

本文基于实时数据库同步基础模型数据, 生成电网拓扑关系表, 建立防误知识专家库, 提出了基于 Petri 网理论的签票语料拓扑模型, 并研究了智能签票防误校核的实现方法。与传统的签票方式相比, 二次方式安排智能签票不仅可以减少调度人员的工作量, 提高工作效率, 而且还改善了电网运行管理系统智能化水平低的现状, 提高了签票的准确性与安全性, 保障了电网操作的安全性。

1 系统总体设计

该系统主要由专家库模块、推理模块和防误校核模块构成。系统从调度自动化实时数据库获取基础模型数据并识别二次设备的相应配置信息, 将其作为本系统数据库及网络拓扑数据的输入。综合考虑一、二次设备的类型、状态、定值、定值单编号等信息, 对任务类型进行筛选, 加载符合当前情况的任务类型。系统利用专家库的知识对该任务类型进行推理, 生成相应的术语表达, 并对推理结果进行防误校验, 完成签票工作。系统的总体结构如图 1 所示。

1.1 网络拓扑分析方法

网络拓扑分析是专家知识库工作的基础, 有效的电网结构分析方法是实现系统功能的前提^[11-12]。为了保证系统智能签票的准确性, 应建立正确的电网拓扑关系来描述电网设备间的连接关系以及运行状态。本文通过图形建模将二次设备附加到相关一次设备的开关刀闸组^[13]上, 通过对开关刀闸组的开合操作确认系统的实时运行状态, 建立开关刀闸组、变压器、母线、线路等设备间的关系表, 各表间通过关联字段实现双向搜索, 生成网络拓扑关系表。

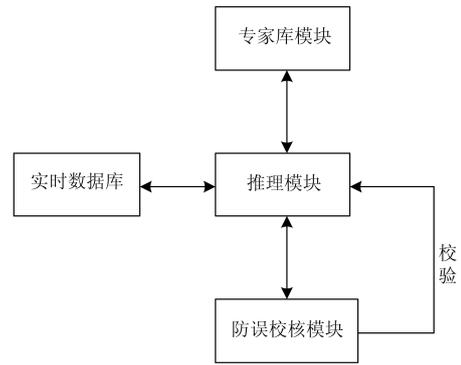


图 1 系统的总体结构图

Fig. 1 Overall structure of the system

开关刀闸组的状态设置:

- 1) 运行, 开关闭合+两侧刀闸闭合状态;
- 2) 热备用, 开关断开+两侧刀闸闭合状态;
- 3) 冷备用, 开关断开+两侧刀闸断开状态;
- 4) 检修, 冷备用+两侧有接地线或闭合的接地刀闸。

刀闸。

1.2 智能防误推理

专家库的防误推理是对该领域专家总结的知识进行分析归纳形成规则库, 为保证规则库的通用性, 对于特殊操作的规则也可形成规则库作为专家库的补充。二次规则库主要操作对象为继电保护装置的投退以及整定值的更改, 为保障电网的安全运行与供电的稳定性, 操作规则应能体现设备间的供电与受电关系以及严格的动作顺序。在基于开关刀闸组的网络拓扑结构上, 操作规则采取分层分类的表示方法, 将操作对象分为线路、母线、发电机和变压器四种任务类型。为加强针对性和提高可维护性, 扩大智能签票系统的可应用范围, 进一步将二次规则库按照设备类型、总任务、子任务、相关设备、相关设备操作术语划分。下面以“线路”任务类型为例说明操作规则的表示方式, 如图 2 所示。

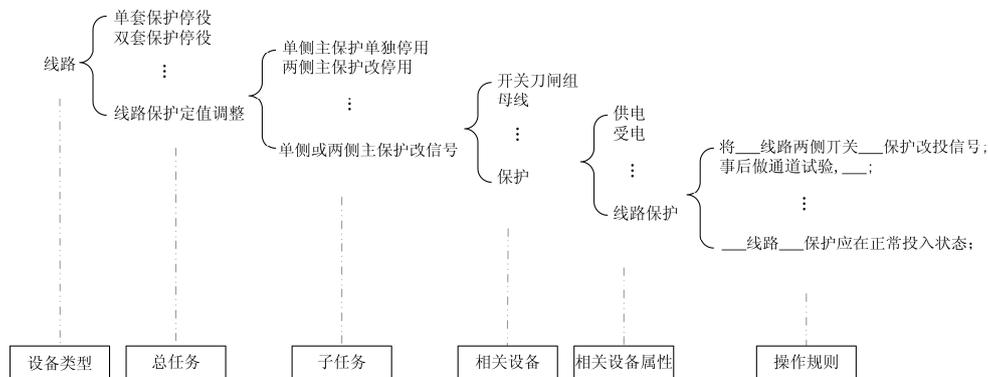


图 2 线路的操作规则

Fig. 2 Operating regulations of circuit

其中，“相关设备”表示确定操作任务后系统通过网络拓扑表搜索到的可操作设备，“相关设备属性”中的“供电”与“受电”属性表示为电源侧与负荷侧，通过对相关设备属性的多维度描述和操作规则的约束条件保证智能签票的准确性。智能签票过程是一个从“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→防误校核→生成签票”的过程^[14]。为了提高系统签票的准确性与可行性，本文在设计专家库时根据操作任务将操作任务流程化，签票内容固定化，智能生成签票内容。例如，XXX 线路启动送电方式安排可分为启动送电前，启动送电期间，启动送电后三个操作流程，每个流程签票内容固化结构如图 3 所示。

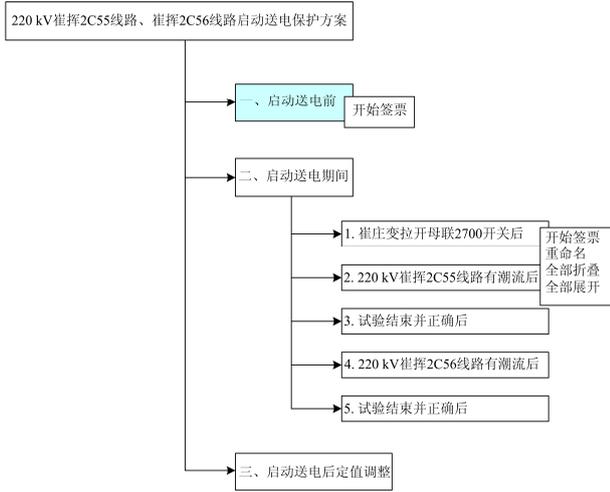


图 3 线路送电任务固化结构

Fig. 3 Solidified structure of transmission line project

2 防误算法分析

Petri 网是 1962 年 Carl Adam Petri 博士提出的一种可以用网状图形表示的组合数学模型，以描述系统中各元件之间的关系为基础，用网络来表示系统中同时、次序或循环发生的各种活动^[15]。

Petri 网的网络结构是静态的，网络的动态性质可通过变迁的触发点火及库所中托肯的转移所体现。若满足一个变迁的触发条件，变迁点火可造成托肯按照有向弧的方向从该变迁的输入库所转移到输出库所中。Petri 网的结构及变迁的使能与激发可用矩阵运算描述和分析，根据 Petri 网络模型形成基本矩阵，利用如下状态方程描述 Petri 网络的动态行为过程，从而使系统的状态标识 M 发生变化。

$$M_{n+1} = M_n + CU_{n+1} \quad (1)$$

式中： M_{n+1} 、 M_n 分别为 $n+1$ 、 n 时刻的状态向量，表示库所中托肯标识情况； C 为关联矩阵，用于描

述 Petri 网的拓扑结构； U_{n+1} 为 $n+1$ 时刻的点火序列向量，表示各变迁的点火情况。

对于一个签票任务，根据保护设备动作二次规则库不同将其分为线路 Petri 网模型和母线 Petri 网模型，电网中的发电机与变压器在建模时可视为线路元件或母线元件。本节以 XXX 线路启动送电任务中“__线路两侧开关__保护改投信号”模板为例，阐述操作规则的 Petri 网防误模型及其推理出票过程。

对“将__线路两侧开关__保护改投信号”模板进行校验，首先要根据专家库中的线路操作规则生成线路规则拓扑网络，见图 4 所示。

根据图 4 中拓扑网络查询到与模板相关的总任务与子任务，形成 Petri 网操作规则模型，见图 5 所示。在图 5 中，假设系统收到的反馈信号为“线路单套保护停役”，按照上述描述规则，将操作规则及相关任务按照顺序定义为库所 P_1, P_2, \dots, P_8 ，其中库所 P_7 代表“线路单套保护停役”存在托肯，得到初始分布 Petri 网络图，见图 6 所示。

其中，操作规则与相关任务定义为库所节点，用圆圈表示；有向弧汇合点称为变迁节点，用竖线表示；系统收到的信号成为托肯，用黑点表示。系统自动签票后，首先根据实际现场情况确定托肯初始分布。托肯初始分布完成后，满足条件的变迁将被触发电火。经过满足条件的变迁的一系列点火后，托肯在 Petri 网模型中重新分布，直至没有变迁能被触发电火，从而使网络达到最终稳定状态，通过得到的稳定的 Petri 网可直接判定系统自动签票资料模板是否正确。

由 Petri 网防误模型，得到其关联矩阵为

$$C = \begin{matrix} & \begin{matrix} t_1 & t_2 & t_3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \\ P_7 \\ P_8 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

相应的初始向量为 $M_0 = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0]^T$ 。

此时变迁 t_2 满足触发条件点火，使其输入库所中的托肯按有向弧的方向转移至输出库所中，这一点火过程为 Petri 网第一次点火，状态方程式表示为 $M_1 = M_0 + CU_1$ ，其中 $U_1 = [0, 1, 0]^T$ 。

经运算得到式(2)。

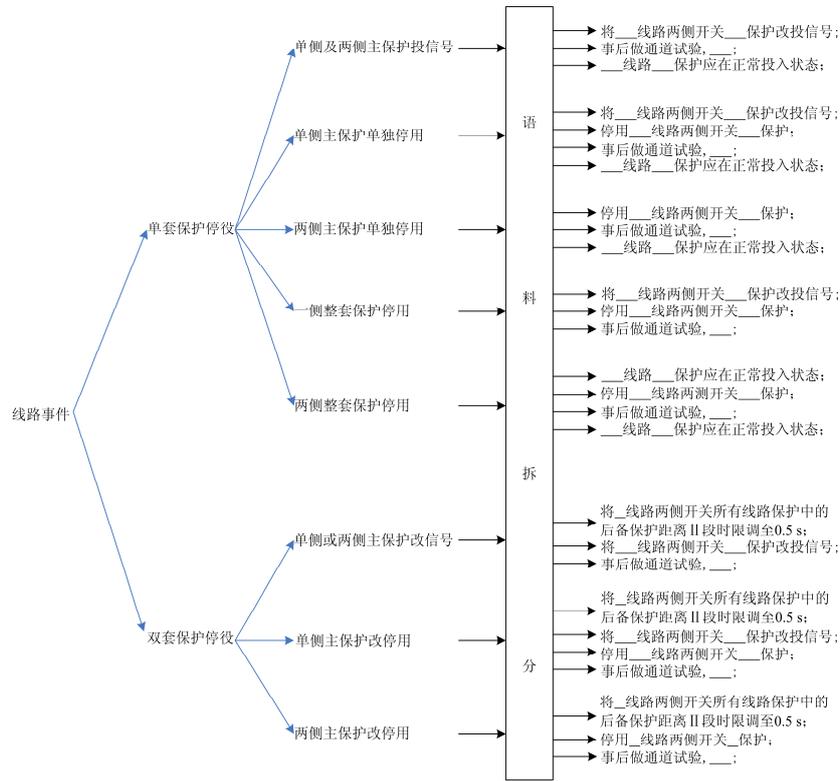


图 4 线路操作规则拓扑网络

Fig. 4 Topology network of transmission line

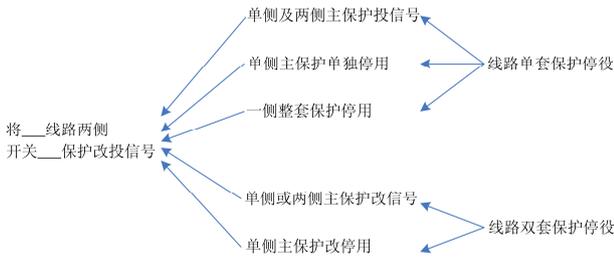


图 5 线路操作规则 Petri 网模型

Fig. 5 Petri net model of transmission line

$$M_1 = M_0 + CU_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

第一次点火完成后 Petri 网如图 7 所示。托肯由 P_7 转移到 P_2 、 P_3 、 P_4 中。

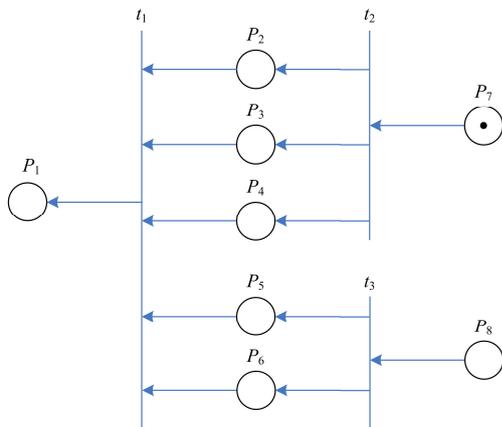


图 6 线路事件初始 Petri 网

Fig. 6 Initial Petri net model of transmission line

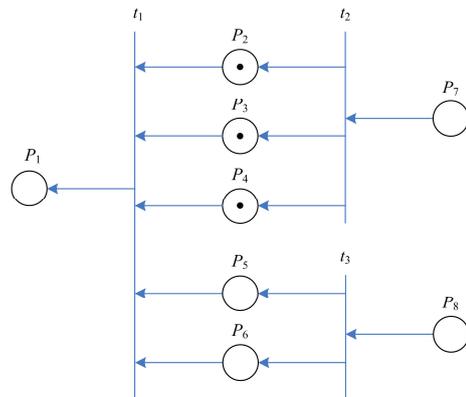


图 7 第一次点火后 Petri 网模型

Fig. 7 Petri net model of transmission line for finished first fire

第一次点火完成后, Petri 网中有且只有 t_1 满足点火条件, 因此变迁 t_1 点火, 完成第二次点火, 状态方程为 $M_2 = M_1 + CU_2$, 其中 $U_2 = [1, 0, 0]^T$ 。

经运算得到式(3)。

$$M_2 = M_1 + CU_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

此事件经 2 次变迁的点火及托肯的转移后, 该 Petri 网没有能满足点火条件的托肯, 故该 Petri 网进入稳定状态, 如图 8 所示。经矩阵运算可得稳态 Petri 网的标识向量 $M_2 = [1, 0, 0, 0, -1, -1, 0, 0]^T$ 。其中向量 M_2 中 P_1 的分量为 1, P_5 、 P_6 分量为 -1, 这意味着托肯转移到 P_1 中, 根据判定规则可判定该签票模板正确, 并且在第一次点火后托肯可靠存在于 P_2 、 P_3 、 P_4 中, 进一步验证第一次点火的正确性。

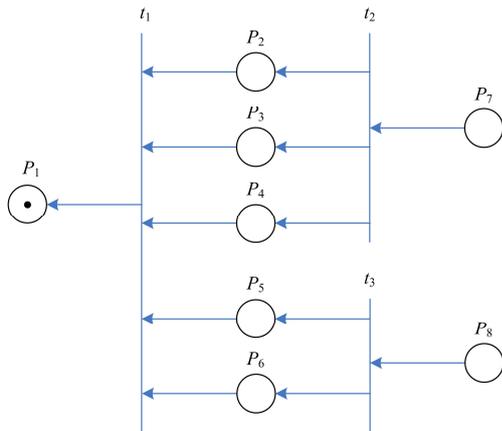


图 8 线路事件稳定 Petri 网模型

Fig. 8 Steady Petri net model of the transmission line

母线 Petri 网模型的防误方案推理过程与线路模型类似, 此处不再赘述。

以上所述的 Petri 网模型具有通用性, 在实际应用中只需增减相应的库所单元数即可。由于继电保护二次方式安排签票模板均有相应的 Petri 网防误方案模型, 系统自动签票后根据实际情况标识所有模板 Petri 网模型的托肯初始分布状态, 进而可同时完成所有签票模板的防误方案分析, 实现正确的二次方式安排签票流程。

3 算法实现

基于以上设计思路, 采用 Visual Studio 2012 和 SQL Server 数据库开发了满足电网调度操作需要的具有防误校核功能的智能签票系统。该系统利用 Petri 网防误算法实现了对系统智能签票二次方式安排的防误校核, 提高了签票的安全性与准确性, 对专家库采用分层分类的设计思想使系统具有通用性和推广性。目前, 该系统已在某地区电网公司试运行, 图 9 为 XXX 线路签票结果的页面显示, 结果表明, 系统出票率及正确率达到 99.99% 以上, 很大程度地减少了操作人员的工作量, 提升了工作效率, 切实地提高了电网运行的管理水平。



图 9 签票结果显示图

Fig. 9 Display diagram of operation-ticket results

4 结论

本文提出了用于继电保护二次运行方式安排的防误校核的 Petri 网模型, 该模型对于二次方式安排签票的防误判定清晰直观, 可直接由稳态的 Petri 网的托肯分布得出防误结论, 提高了电网二次方式安排智能签票操作的准确性与安全性。本文提出的 Petri 网防误算法已应用于某省电网公司调度机构, 现场实践证明, 二次方式安排智能签票 Petri 网防误模型正确有效, 能自动快速地提供可靠的校验结果和防误信息, 在二次方式安排智能签票系统中得到了广泛的应用。

参考文献

[1] 林榕, 王永红, 张会贤. 智能调控一体化系统在河北南网的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 151-155.
LIN Rong, WANG Yonghong, ZHANG Huixian. Application of integrated system of intelligent dispatch and centralized control in Hebei southern power grid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 151-155.
[2] 李功新, 黄文英, 任晓辉, 等. 调控一体化系统防误校核研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 97-102.

- LI Gongxin, HUANG Wenying, REN Xiaohui, et al. Research on anti-misoperation check in integrated dispatching and control system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 97-102.
- [3] 畅广辉, 镐俊杰, 刘宝江, 等. 电网调控信息智能分级采集系统的研究与开发[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 115-120.
- CHANG Guanghui, HAO Junjie, LIU Baojiang, et al. Research and development of intelligent and classified collection system for electric power dispatching and control information[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 115-120.
- [4] 辛耀中, 石俊杰, 周京阳, 等. 智能电网调度控制系统现状与技术展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 2-8.
- XIN Yaozhong, SHI Junjie, ZHOU Jingyang, et al. Technology development trends of smart grid dispatching and control systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 2-8.
- [5] 黄嵩, 张沛超, 李灿. 基于本体映射与规则推理的智能电网信息集成技术[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 150-155.
- HUANG Song, ZHANG Peichao, LI Can. Smart grid information integration technology based on ontology mapping and rule reasoning[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 150-155.
- [6] 钱凌, 郭锋. 基于 EMS 和 DTS 系统的智能操作票系统设计及实现[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(32): 100-103.
- QIAN Ling, GUO Feng. Design and implementation of intelligent dispatching operation order system based on EMS and DTS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(32): 100-103.
- [7] 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.
- [8] 王海港, 胡晓飞, 曹凯丽, 等. 电网新设备启动方案风险评估评价法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 66-71.
- WANG Haigang, HU Xiaofei, CAO Kaili, et al. Risk assessment method of schemes for equipping new devices for services in electric power grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 66-71.
- [9] 郭创新, 陆海波, 俞斌, 等. 电力二次系统安全风险评估研究综述[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 112-118.
- GUO Chuangxin, LU Haibo, YU Bin, et al. A survey of research on security risk assessment of secondary system[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 112-118.
- [10] 李永刚, 刘艳, 王鑫明, 等. 基于 MAS 的电网新设备启动方案智能编制系统的设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 119-124.
- LI Yonggang, LIU Yan, WANG Xinming, et al. Design and realization of a MAS based intelligent compilation system in power grid new equipment start-up scheme[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 119-124.
- [11] 吴庆华, 黄道姗. 设备安全防误与电网安全校核智能操作票管理系统的研究[J]. 福建电力与电工, 2010, 30(4): 19-21.
- WU Qinghua, HUANG Daoshan. Study for intelligent operation order management system for anti-misoperation of facilities and security check of power network[J]. Fujian Electric Power and Electrical Engineering, 2010, 30(4): 19-21.
- [12] 周鹏飞, 梁锋, 许祖锋. 基于三态拓扑计算的变电站防误操作研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(18): 145-149.
- ZHOU Yefei, LIANG Feng, XU Zufeng. Research on the mal-operation prevention in substation based on the three-states topological algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(18): 145-149.
- [13] 王艳, 杨以涵. 具有校验功能的地区调度操作票专家系统的研制[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(21): 95-98.
- WANG Yan, YANG Yihan. Development on regional dispatching order-sheet expert system with self-check function[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(21): 95-98.
- [14] 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]. 电力系统自动化, 2004, 28(11): 71-74.
- ZHOU Ming, LIN Jinghuai, YANG Guizhong, et al. A new-type intelligent dispatching operation order system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(11): 71-74.
- [15] 毕天姝, 杨春发, 黄少锋, 等. 基于改进 Petri 网模型的电网故障诊断方法[J]. 电网技术, 2005, 29(21): 52-56.
- BI Tianshu, YANG Chunfa, HUANG Shaofeng, et al. Improved Petri net models based fault diagnosis approach for power networks[J]. Power System Technology, 2005, 29(21): 52-56.

收稿日期: 2016-11-20; 修回日期: 2017-01-30

作者简介:

孙月琴(1964—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为继电保护运行管理; E-mail: sunyq2015@ah.sgcc.com.cn

胡晓飞(1962—), 男, 高级工程师, 研究方向为调度运行管理;

王海港(1977—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: wanghg03@126.com

(编辑 姜新丽)