

DOI: 10.7667/PSPC151214

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

李永刚¹, 刘艳¹, 王鑫明², 翟万生²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003; 2. 河北电力调度控制中心, 河北 石家庄 050021)

摘要: 电网的快速发展使得新设备投运工作量日益增大。现有运行方式人员手工编制启动方案的模式效率低, 安全风险难以管控, 无法满足电网运维精益化的要求。通过分析新设备投运操作的技术特点和启动方案编制流程的实际需要, 建立了基于多智能体技术的电网新设备启动方案编制模型。该模型强调了数据源端免维护、启动方案编制的智能性、通用性、易维护和界面友好等特点, 突出了模型中人机交互 Agent 的功能和各个智能体间的协调控制策略。最后以 D5000 平台为数据源, 结合 B/S 模式, 采用 VC# 语言开发出基于该模型的实际系统, 充分提高新设备启动方案编制的智能化水平, 满足多部门流转会签的使用需求, 实现对新设备投运工作风险的管控。

关键词: 新设备投运; 启动方案编制; 多智能体; 人机交互; B/S 模式

Design and realization of a MAS based intelligent compilation system in power grid new equipment start-up scheme

LI Yonggang¹, LIU Yan¹, WANG Xinming², ZHAI Wansheng²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Hebei Electric Power Dispatching and Communication Center, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: The rapid development of the grid creates the conditions that put lots of new equipment into operation. The mode of compiling the new equipment start-up scheme by hand is inefficient. The risk of this mode can not be managed and controlled. The requirements of operation and maintenance in power grid can not be satisfied. According to the operational features and the practical needs of putting new equipment into operation, the MAS based compilation model in power grid new equipment start-up scheme is established combined with the technology of MAS. The data source maintenance, intelligence, easy maintenance, friend interface interaction of this model, the function of human-computer interaction Agent and the coordinated control strategy between the various agents in the model are highlighted. Finally, taking the D5000 platform as the data source, the developed practical system using VC # language based on B/S mode can fully enhance the intelligent level of compiling the new equipment start-up scheme and meet the demand of multi-sectoral circulation sign, to realize the control of the risk in putting new equipment into operation.

Key words: new equipment put into operation; start-up scheme compiling; multi-agent; human-computer interaction; B/S mode

0 引言

新设备投运工作是电网调度运行管理的重要内容之一, 新设备的安全、规范投运是整个电力系统安全稳定运行的重要保障。随着电网建设步伐的加快, 新设备启动方案编制的任务量显著增加, 但其编制过程仍主要依赖方式部门编制人员的经验, 缺

少对方案安全性和可行性的必要校核。同时, 经验丰富的编制人员通过长期摸索所构建的方案编制的规则和知识体系无法共享或复用, 甚至随着人员的流动而流失, 这无疑增大了新设备投运的潜在安全风险。经方式部门人员编制完成的新设备投运方案通常还需调度、计划和保护等相关部门流转会签, 但由于缺少模拟演示的平台或工具, 相关人员无法

直观了解新设备的投运过程，增加了熟悉和掌握相关投运方案的难度。因此，当前新设备投运工作规范化、标准化和智能化的水平亟待提高。

目前，相关学者对电网新设备投运进行的研究主要集中在具体的技术问题上。文献[1]对新设备投运时相应的继电保护运行方式进行了研究；文献[2]对新设备投运时不同的核相方法及可能遇到的典型问题进行了深入的分析；文献[3]对电网操作和新设备投运等多种过渡方式下继电保护的效能和特殊问题进行了研究。文献[4]对电网新设备启动方案的风险评价方法进行了研究。上述研究并没有考虑新设备启动方案的智能化编制问题。

随着人工智能技术在电力系统应用研究的日益深入，人们对智能调度操作票系统^[5]，调度系统的可视化实现^[6-7]，调控一体化系统中的防误校核、安全控制与可靠性评估等方面^[8-10]进行了一定的研究，尤其是多智能体技术已被应用于诸多研究领域^[11-16]。多智能体技术能够充分协调调度多个智能体解决大规模复杂问题，具有很强的鲁棒性、可靠性和较高的问题求解效率。考虑到新设备启动方案编制涉及的元件范围广，需要考虑的约束多，操作过程复杂，受方案编制人员的影响大等特点，采用多智能体技术可以很好地解决新设备启动方案编制这样的复杂问题。因此本文建立了以人机交互模块为核心的基于多智能体的新设备启动方案编制模型。整个模型围绕人机交互展开，通过各个智能体的信息共享与协调合作，针对操作人员不同的操作，给出不同的操作规则和校核规则，在用户和模型双向交互的情况下编制出安全合理的新设备启动方案。最后采用基于 WWW 服务的浏览器/服务器架构的编程体系，运用 ASP.NET 技术构建新设备启动方案编制的智能化系统从而实现对新设备投运工作风险的管控。

1 新设备投运技术特点

根据《国家电网调度管理规程》规定，在将元件接入电网运行的过程中，凡是涉及到尚未投运的全新的设备，或是因为改造而改变了相关参数和二次接线的设备，均需要编制启动方案。新设备启动方案是调控机构在新设备投运过程中对所辖设备进行调控管理的方案，是值班调度员指挥投运操作的依据。

新设备投运过程中对设备及电网进行的操作，既有属于常规的倒闸操作，也有一些非常规操作，

相应的技术方法也有自己的特点。对于常规操作，例如断路器的正常开合、线路的正常停送电等，只需按照“五防”规则的约束正常操作即可；对于非常规操作，例如对新设备进行充电试验操作，则必须打破原有的“五防”规则体系，建立适用于新设备投运的专有规则库，方能保证待投运设备及原有电网的安全稳定运行，确保整个投运过程的顺利进行。

2 基于 MAS 的电网新设备启动方案智能化生成模型

2.1 新设备启动方案多智能体模型结构

在由多个智能体通过柔性系统结构构建的多智能体系统中，每个智能体既能自主完成所属领域内任务，又能够通过智能体间的协调、配合，共同完成类似与新设备启动方案编制的复杂任务。基于 MAS 的电网新设备启动方案编制模型的总体结构如图 1 所示。

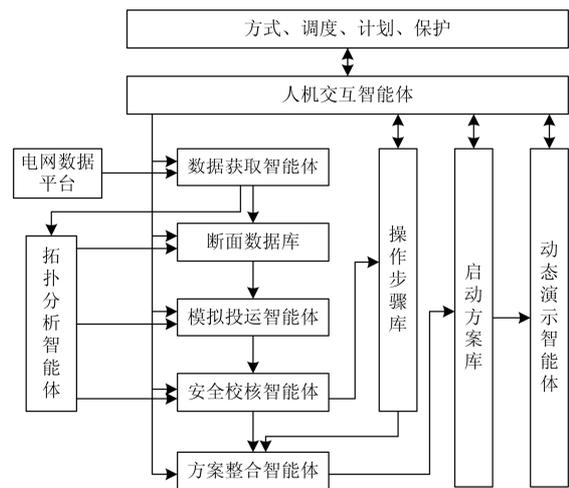


图 1 基于 MAS 的电网新设备启动方案编制模型结构图

Fig. 1 A model structure of preparing the start-up scheme of new equipment in grid based on MAS

(1) 人机交互智能体。该智能体是整个系统的核心，实现了用户同系统间的双向交互。用户既可以在一定程度上按照自己的意愿行事，同时又要受到系统既定的规则的制约。

(2) 数据获取智能体。系统每次运行时，通过该智能体获取新设备投运时所需的电网模型数据、图形数据和实时运行数据，将所有数据更新到投运操作时的最新状态并存入断面数据库，保证了投运操作时电网状态与实际状态一致性，实现了系统数据源的免维护，为启动方案的编制提供基础。

(3) 拓扑分析智能体。数据获取智能体解析得到新设备投运时的启动区域电网断面数据后, 拓扑分析智能体对其进行拓扑分析, 为模拟投运智能体、安全校核智能体提供支持。拓扑分析主要包括厂站内和厂站间的拓扑分析。在厂站内主要进行基于开关、刀闸、母线、线路、变压器的物理节点、拓扑节点的分析; 在厂站间主要进行基于线路与变压器的拓扑节点的分析。整个拓扑分析采用基于广度与深度优先的混合搜索策略进行。

(4) 模拟投运智能体。在完成数据获取, 拓扑分析, 断面数据库更新的基础上, 以内含的操作规则库为核心, 由现场的方式人员按照新设备投运工作的基本流程, 在模拟投运平台上, 通过鼠标点击完成各个开关、刀闸的开断和设备保护的投退等操作。根据方式人员的操作, 智能体给出完成新设备投运的操作序列。

(5) 安全校核智能体。以安全校核智能体所包含的校核规则库为基础, 对模拟投运智能体给出的操作序列进行安全校核, 如果通过校核, 则将该操作序列单独存入操作步骤库, 构成启动方案中核心的方式准备及启动步骤部分。如果在校核中发现问题, 则给出警告和建议, 并返回到模拟投运智能体进行重新修改。

(6) 方案整合智能体。经过安全校核智能体校核完毕存入操作步骤库的只是在新设备投运过程中对一、二次设备实际操作的顺序步骤, 构成一个完整的启动方案还需要工程概况及主要新设备技术参数、启动范围及时间、设备所属调度权限等内容。方案整合智能体根据预先设定好的启动方案标准格式, 完成启动方案最后的生成工作, 并将最终的方案存入启动方案库。

(7) 动态演示智能体。对启动方案库中的启动方案采用语音及图形的形式动态呈现给用户, 方便用户对方案的流转会签和对投运过程的熟练掌握。

2.2 人机交互 Agent 在 MAS 中的功能与实现

过去的多智能体模型在电力系统中的应用主要涉及电网操作票的自动生成, 电网的安全、经济性的评估, 故障诊断和稳定性评估等方面。对于这些问题, 只需要用户给出操作任务, 系统便能够自动给出问题的解决方案。而对于新设备启动方案编制的问题, 首先, 在问题的复杂程度上, 完成新设备启动方案的编制, 需要明确投运时间、本次投运的设备、设备的调度范围划分、投运的准备工作、投

运前的运行方式和实际的投运操作步骤等内容。这些问题单纯依靠智能系统本身很难解决。其次, 不同的人员编制的同一设备的启动方案可能不同, 而且不同阶段同样操作的校核规则也不同。如图 2 所示某站接线图。

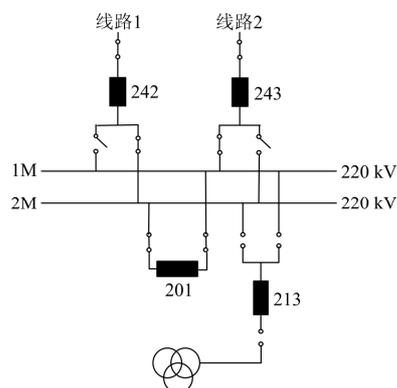


图 2 某站 220 kV 接线图

Fig. 2 220 kV wiring diagram in some transformer substation

在投运该站的线路 1 时, 需要对该线路进行充电, 此时既可以采用 242 开关对线路进行充电, 也可以采用 201 开关对线路进行充电, 选择不同的开关进行充电操作直接影响到后续的校核进行。因此, 对于新设备启动方案编制智能化, 需要考虑更多的人机交互的影响。本文通过建立人机交互 Agent, 来解决这一问题。它将用户输入的投运任务和用户在系统中的操作与多智能体系统的校核与演示协调配合起来, 共同编制出安全合理的新设备启动方案。

如图 3 所示, 在用户端, 该模块将整个投运过程分成两个部分, 第一部分是投运信息输入部分, 第二部分是投运操作部分。第一部分主要进行投运时间、设备、调度权限等信息的录入工作, 由用户通过系统提供的界面人工录入; 第二部分由用户在系统提供的接线图上模拟进行新设备投运操作, 主要包括开关、刀闸的开合操作和保护设置、定核相等操作。

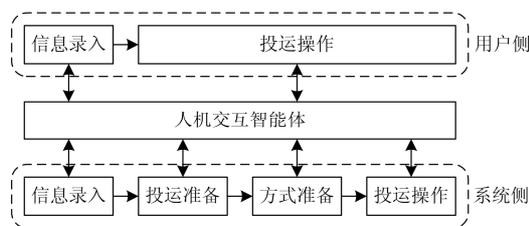


图 3 人机交互智能体功能与实现

Fig. 3 Function and implement of human interaction agent

在系统端，该模块将用户端的操作分为信息录入、投运准备、方式准备、投运操作四部分，它们之间有着严格的先后顺序和制约关系，用户在用户端的操作根据系统给出的对应阶段的操作提示进行并接受该阶段的校核与约束。

人机交互 Agent 的结构属性为

$$P=\{A, E, S, N, M\}$$

式中：A 表示系统针对操作人员给出的操作阶段提示，比如投运刚开始，系统会提示用户进行投运信息录入，信息录入完成后提示用户进行投运准备等；E 记录用户实际进行的操作阶段；S 表示用户的操作同系统提示阶段的匹配情况；N 负责依据系统提示的阶段对应的校核规则对用户的操作进行校核；M 表示了系统的任务完成情况。

2.3 多智能体间的协调控制策略

本文采用混合控制策略来实现多智能体系统中智能体间的协调控制，智能体之间既存在相互依赖的纵向控制又存在横向上各自独立的协调配合。

横向协调控制用于等地位 Agent 之间的联系与交互，它需要各个 Agent 之间实现整个系统的信息共享，从而保证各个 Agent 所做出的决策对系统的总体目标有意义。本文所建模型中，方案整合智能体同动态演示智能体均包含新设备投运所需完整信息，二者通过横向协调控制策略在系统中发挥各自的作用。

在本文所建模型中，大部分涉及方案编制部分的智能体均采用纵向控制策略来进行协调、交互，例如模拟投运 Agent、安全校核 Agent 等。在新设备启动方案编制的过程中，一个智能体功能的实现，依赖于上游智能体的功能实现并受到上游智能体的制约。

3 基于 D5000 的新设备启动方案智能编制系统的设计与实现

3.1 系统的总体结构

依据新设备启动方案编制特点，首先由方式人员按照要求设定投运时间，待投运设备范围和所属调度权限情况，然后依据系统提示进行新设备投运的操作，主要进行开关、刀闸的开合操作，后备保护的修改，定核相等的操作并接受系统的校核与约束。方式人员编制的方案通过系统的校核后放进方案库，调度、计划和保护人员通过网络从新设备投运方案库中提取方案，进行方案演示并再次校核，同时直观感受并熟悉整个投运操作过程，提高对

投运工作的掌控能力。系统的总体结构如图 4 所示。

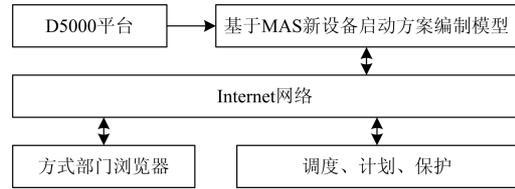


图 4 系统总体结构

Fig. 4 Overall architecture of the system

3.2 系统的软件结构设计

在新设备投运工作中，主要由方式人员进行新设备启动方案的编制，方案编制完成后，要经过调度、计划和保护部门的流转会签，即每个部门依据自身职责确认方案合理可行并签字后，方案才能作为最终的启动方案。

考虑到上述需求，本系统采用当前在程序开发领域中主要的基于 WWW 服务的浏览器/服务器 (B/S) 架构体系，进行开发。B/S 架构体系由客户机、应用服务器和数据库服务器三部分组成。B/S 应用程序不需要在客户机上安装专门的客户端软件，用户在使用程序时仅需通过安装在客户机上的浏览器访问相应的网页即可。在系统的维护与升级方面，只需要管理服务器，而无需对客户端进行任何维护，无论用户的规模有多大，都不会增加任何维护升级的工作量。

利用 B/S 架构体系的上述特点，系统将过去的各个部门之间纸质媒介的流转会签变为依托互联网的电子形式的流转会签，更好地满足了各部门使用需求。整个系统基于 D5000 电网数据平台，在 Visual Studio 开发环境下采用 VC# 作为开发语言进行系统开发。

3.3 系统模拟与演示的可视化实现

随着计算机网络技术的发展，可缩放矢量图形 (SVG) 技术的出现为电力系统可视化图形数据的 Web 发布提供了一种开放性的解决方案。SVG 技术支持无级缩放、精确定位、图层管理、动画、交互、动态生成、参数查询等高级功能，适用于对格式规范性和交互性有较高要求的可视化场合。

采用拓扑动态着色技术，基于电网拓扑结构分析，在 SVG 图上由系统给出提示并允许方式人员进行新设备投运的模拟操作。调度、计划和保护部门人员从投运方案库中逐条提取启动方案，将电网模型中相关图元进行动态着色，预见网络带电状态的变化，同时伴随有语音朗读。提升并强化用户对于新设备投运过程的真实和直观感受。

系统新设备启动方案编制与模拟校核的流程图

分别如图 5 和图 6 所示。

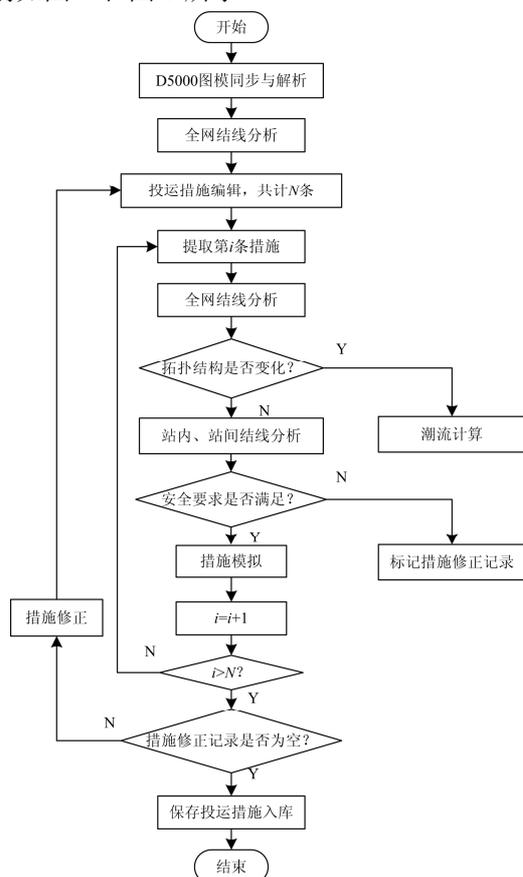


图 5 方式部门启动方案编制流程图

Fig. 5 Flow chart of preparing the start-up scheme of new equipment in mode department

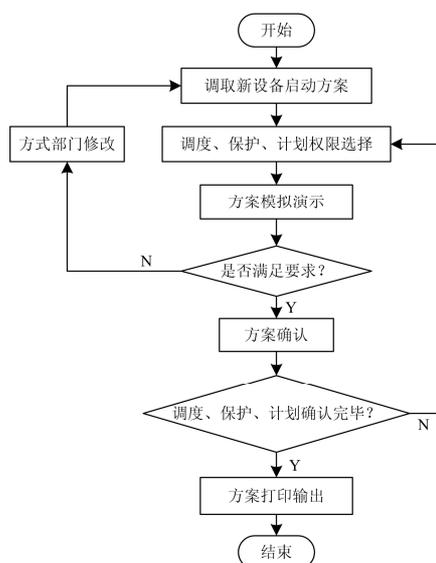


图 6 调度、计划、保护部门启动方案审核流程图

Fig. 6 Flow chart of examining the start-up scheme of new equipment in dispatch/relay protection/plan department

4 结论

本文提出了一种智能化的新设备启动方案的编制方法, 并采用 ASP.NET 技术进行了开发。为了减小智能化编制启动方案系统的复杂程度和完全自动生成新设备启动方案的难度, 同时考虑到当前新设备启动方案编制的智能化水平, 该方法强调了人工交互 Agent 在整个 MAS 系统中的作用。通过用户与系统的相互影响和相互制约, 所提方法可以开出安全、合理的新设备启动方案。通过可视化的操作环境、可共享的通信平台和充分的安全性校验, 该系统在有效减轻现场方式人员编制启动方案负担的同时, 增强了各个部门人员对于新设备投运操作的直观感受, 进而实现对新设备投运工作风险的管控。

参考文献

- [1] 常风然, 张洪, 高艳萍. 新设备投运与继电保护运行方式[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(21): 89-91.
CHANG Fengran, ZHANG Hong, GAO Yanping. New equipment put into operation and relay protection operation mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(21): 89-91.
- [2] 魏丽芳, 黄亚非. 新设备启动试运中采用不同核相方法必要性的探讨[J]. 华中电力, 2009, 22(4): 30-32.
WEI Lifang, HUANG Yafei. Discussion for the necessity of using different phase checking methods when starting and trial operating the new equipment[J]. Central China Electric Power, 2009, 22(4): 30-32.
- [3] 曹树江, 张兵海. 电网操作和设备投运等过渡方式下的继电保护分析[J]. 河北电力技术, 2003, 22(6): 3-6.
CAO Shujiang, ZHANG Binghai. Analysis on relay protection of power network in interim state when switching or putting equipment in service[J]. Hebei Electric Power, 2003, 22(6): 3-6.
- [4] 王海港, 胡晓飞, 曹凯丽, 等. 电网新设备启动方案风险评价方法[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 service in electric power grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 66-71.
- [5] 林晓庆, 任建文, 张丙合, 等. 基于网络重构的电网智能调度操作票系统开发研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 143-147, 155.
LIN Xiaoqing, REN Jianwen, ZHANG Binghe, et al. An intelligent dispatching operation-tickets system in electric power system based on network reconfiguration[J]. Power

- System Protection and Control, 2012, 40(7): 143-147, 155.
- [6] 沈国辉, 孙丽卿, 游大宁, 等. 智能调度系统信息综合可视化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 129-134.
SHEN Guohui, SUN Liqing, YOU Daning, et al. Intelligent dispatch system information comprehensive visualization method[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 129-134.
- [7] 王冬霞, 施广德, 刘文彪. 变电站远程浏览与源端维护中的图形转换方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18): 89-93.
WANG Dongxia, SHI Guangde, LIU Wenbiao. Graphic conversion method for remote browser and source maintenance of smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(18): 89-93.
- [8] 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 Wenyong, 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.
- [9] 陈春, 汪泓, 刘蓓, 等. 一种智能配电网完全运行控制方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 357-366.
CHEN Chun, WANG Feng, LIU Bei, et al. A method of safe operation control of smart distribution system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 357-366.
- [10] 徐小宁. 变电站主接线方式可靠性评估与方案优选[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 441-446.
XU Xiaoning. Reliability assessment and optimization of main electrical connection of substation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 441-446.
- [11] 黎静华, 栗然. 基于多 Agent 的倒闸操作票生成系统[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(6): 17-21.
LI Jinghua, LI Ran. System of making switching operation sheet based on multi-agent system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2005, 17(6): 17-21.
- [12] 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, 209.
ZHOU Ming, REN Jianwen, LI Gengyin, et al. A multi-agent based dispatching operation instructing system in electric power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 58-62, 209.
- [13] 晁进, 刘文颖. 基于多智能体和专家系统的电网智能报警系统研究[J]. 现代电力, 2010, 27(5): 1-5.
CHAO Jin, LIU Wenyong. Research on intelligent alarm system of power grid based on multi-agent and expert system[J]. Modern Electric Power, 2010, 27(5): 1-5.
- [14] 郭创新, 朱传柏, 曹一家, 等. 基于多智能体的全面防误策略及智能操作票生成系统[J]. 电网技术, 2006, 30(4): 50-54.
GUO Chuangxin, ZHU Chuanbai, CAO Yijia, et al. An overall anti-maloperation strategy based on multi-agent system and implementation of intelligent switching order generation system[J]. Power System Technology, 2006, 30(4): 50-54.
- [15] 王怀智, 余涛, 唐捷. 基于多智能体相关均衡算法的自动发电控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 620-627.
WANG Huaizhi, YU Tao, TANG Jie. Automatic generation control for interconnected power grids based on multi-agent correlated equilibrium learning system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 620-627.
- [16] 窦春霞, 李娜, 徐晓龙. 基于多智能体系统的微电网分散协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(7): 125-134.
DOU Chunxia, LI Na, XU Xiaolong. Multi-agent system based decentralized coordinated control strategy for micro-grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(7): 125-134.

收稿日期: 2015-07-14; 修回日期: 2015-12-03

作者简介:

李永刚(1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能技术在电力系统中的应用; E-mail: 995547754@qq.com

刘艳(1973-), 女, 博士, 教授, 研究方向为电力系统安全防御与恢复技术, 智能技术在电力系统中的应用, 状态检修等. E-mail: bd_ly@263.net

(编辑 周金梅)