

调控一体化系统防误校核研究

李功新¹, 黄文英¹, 任晓辉¹, 林静怀¹, 李泽科¹, 江修波²

(1. 国网福建电力有限公司, 福建 福州 350000; 2. 福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350116)

摘要: 为提高电网智能防误校核结果的准确性和全面性, 针对调控一体化运行模式, 提出了智能防误拓扑计算的开关单元模型及环路拓扑搜索算法。基于电网拓扑模型和防误专家知识库, 采用与/或树推理和拓扑防误计算方法, 实现包括电磁合环、设备过载等调度操作防误规则以及二次防误规则等的防误功能。采用该方法建立某区域电网的拓扑防误模型, 并结合防误规则专家库实现了应用。现场实践证明, 基于电网开关单元防误模型和防误专家知识库的调控一体化防误校核方法能够对防止误调度、误遥控、误操作提供准确丰富的校验结果, 从而保障电网调控操作的安全性。

关键词: 调控一体化; 开关单元模型; 拓扑防误; 与/或树; 无向环路搜索

Research on anti-misoperation check in integrated dispatching and control system

LI Gongxin¹, HUANG Wenying¹, REN Xiaohui¹, LIN Jinghui¹, LI Zeke¹, JIANG Xiubo²

(1. State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350000, China; 2. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: In order to improve the accuracy and comprehensiveness of the power grid intelligent anti-misoperation result, this paper proposes switch unit model and loop topology search algorithm for intelligent topological anti-misoperation computing under the operating mode of integrated dispatching and control system. Basing on topological model and knowledge base of anti-misoperation rules, the system uses and/or tree reasoning and topological anti-misoperation computing method, and achieves the functions such as electromagnetic loop closing and equipment overload. This paper establishes the topological anti-misoperation model of a regional grid with this method, and implements the application based on anti-misoperation rules expert database. Site operation shows that, integrated anti-misoperation checking methods based on switch unit anti-misoperation model and anti-misoperation rules expert database can provide accurate verification results for preventing scheduling mistake, remote control by mistake and misoperation, and thus can ensure the safety of the power grid operation.

Key words: integrated dispatching and control system; switch unit model; topological anti-misoperation; and/or tree; undirected loop search

中图分类号: TM727 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)07-0097-06

0 引言

智能调度是现代电力系统发展的必然趋势^[1-2]。在智能电网“大运行”、“大检修”模式下, 为杜绝各类误调度、误遥控、误操作事件的发生, 及时准确地识别和处理故障, 提高调控一体模式下的智能化水平, 使调度、监控工作更为安全、高效, 需要研究调控一体化模式下智能操作支撑系统, 为实现集中监控、检修申请、智能拟票、调度下令、防误校核、遥控操作全过程的管理提供智能化的技术支

持手段^[3]。调控一体化防误应用需要建立全网的数据模型, 采用拓扑防误计算方法, 提供包括电磁合环、设备过载等调度操作防误规则以及二次设备防误规则在内的防误功能^[4]。在调控一体化系统中, 防误应用基于电网公共信息 CIM 模型^[5-6], 建立电网的拓扑连接关系, 智能识别各类接线模式以及自动分析设备的综合运行状态, 并对设备工作状态转换过程中存在的危险点进行分析。由于电网接线模式的复杂性以及防误规则的多样性, 调控一体化防误校核方法需要适应不同地区各个电网的运行规

程, 满足模型可修改、规则可扩充的要求。因此, 研究调控系统拓扑防误的基本模型、分析防误规则的实现方法, 对防误校核功能的实用化具有重要的意义。

人工智能技术研究领域包括专家系统、神经网络、模式识别、自然语言理解以及常见的智能优化算法如遗传算法、粒子群算法等。其中专家系统主要基于人工智能的知识表示和问题求解技术, 一般包含知识库、推理引擎、专家知识获取工具以及人机交互接口四个部分。人工智能技术在电力系统中的应用也比较广泛如基于改进遗传算法的微网能量管理模型^[7]、基于 RBF 网络的风电机组变桨距滑模控制^[8]、基于 RIMER 专家系统和 DGA 的变压器故障诊断^[9]、集成研发系统固有缺陷对策研究^[10]、智能电网信息集成^[11], 文献[10-11]都是在基于专家系统的基础进行相应的扩展以及应用。

目前, 国内对调控防误应用已经做了一些研究^[12-13], 这些研究主要集中于调控与防误系统的一体化图模共享以及防误校核相关的具体规则, 缺少对拓扑防误模型的研究以及对防误规则实现方法的分析。鉴于此, 本文提出了调控一体化系统下防误校核的拓扑模型, 研究了基于专家知识库的防误推理方法, 并结合工程实践分析了防误校核实现中的主要算法。

1 防误拓扑模型

调控一体化系统防误应用面向电网调度操作, 为调控操作全过程提供智能化的防误规则判断。防误应用对不同接线模型下各类设备(断路器、线路、变压器等)的综合状态(运行、热备用、冷备用、检修)转换过程进行智能拓扑防误分析^[14]。例如: 当线路检修转运行时, 需要对是否会带接地送电、是否会电磁合环等危险点进行判断。为智能分析不同的接线模式和识别设备的综合状态, 防误系统采用开关单元模型对电网一次设备建模, 定义以下三种电气设备类型:

- 1) 通断性设备
- 2) 导电性设备
- 3) 汇流性设备

通断性电气设备指断路器、隔离开关、接地刀闸、熔断器、手车、电流互感器这几类具有接通、断开性质或直通性质的电气设备; 导电性设备指变压器、线路、电压互感器、电容器、电抗器等具有阻抗传输性质的电气设备; 汇流性电气设备指母线、发电机、负荷、(外网)注入源、接地设备(接地点)等具有电能汇集或输出功能的设备或装置^[4]。所有

的电网一次元件均可以按照上述三个类别来划分。

由通断性设备经导电连接连接而成, 以导电性设备或和汇流性设备为边界点的电气设备组合, 称为开关性电气单元。

在调控一体化系统中, 利用电网 CIM 模型和拓扑计算方法, 建立网络的拓扑连接关系。在此基础上, 按照以下方法识别开关单元:

1) 以任意开关性设备的一个端子所在的连结点为起点, 以开关性支路为可达路径(即不经过导电性设备支路), 使用深度优先算法遍历搜索。其结果是一个节点和支路的集合。

2) 对该集合中的每一个节点(对应 CIM 的连结点), 根据连结点上各个端子的类型, 标记出节点(结点)类型。节点可分为内部节点和终结点(外部结点)两类, 终结点类型有接地型和设备型两种。

式(1)表示一个包含 m 个节点和 n 条支路的开关单元:

$$K = \{N_0, N_1, \dots, N_m; B_0, B_1, \dots, B_n\} \quad (1)$$

在研究开关单元与外部网络连接的问题中, 可以排除掉内部节点和接地型终结点, 使用拓扑路径搜索算法, 计算非接地型终结点的两两之间的最短路径集合:

$$R = \{R_{pq}\} \quad (2)$$

其中 R_{pq} 表示终结点 p 与终结点 q 之间的最短路径(支路列表), 称为通达路径。即:

$R_{pq} = B_{j_0}, B_{j_1}, \dots, B_{j_n}$; 其中的 B_{j_n} 来自于集合 K 中的 B_n 元素。从节点 p 逐步经过支路 $B_{j_0}, B_{j_1}, \dots, B_{j_n}$ 可到达节点 q 且为最短路径。

在实际电网模型中, 单个开关单元的非接地型(即连接有线路、变压器等导电设备)的终结点通常只有 2、3 个。单母带旁路接线中有三个开关单元, 如图 1 所示。

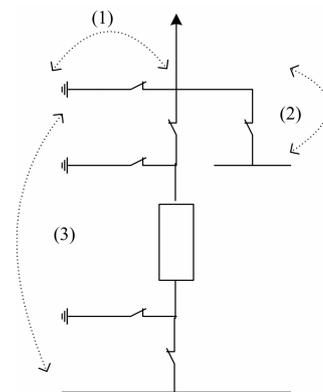


图 1 单母带旁路

Fig. 1 Single-bus with auxiliary bus configuration

图 1 中第一个开关单元为接地型, 称为 J 型开关单元; 第二个为纯隔离型(无断路器), 称为 I0 型; 第三个开关单元中断路器两侧均连有隔离开关, 称为 I2 型。

图 2 所示的局部接线图中, 存在一个开关单元(称为 T 型), 其中的手车当做两个隔离性开关来建模。

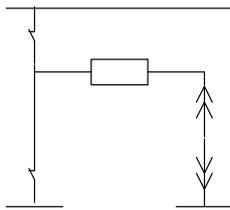


图 2 单母分段兼旁路

Fig. 2 Single-bus section with main wiring on bypass

此外, 开关单元类型还有 Y 型、U 型、三角形等。

开关单元一般有以下四种状态: 连通、断路、隔离、接地。

根据与开关单元直接相连设备的 CIM 对象类型, 可以自动识别开关单元的功能类型, 例如线路开关、变压器开关、分段开关、母联开关等, 并可以进一步自动识别接线模式(单母、分段、双母、分段带旁、3/2 接线等); 根据设备以及与其直接相连的开关单元工作状态, 可以进一步识别设备的综合状态, 例变压器热备用状态、线路检修状态等^[4]。

2 基于专家知识库的防误推理

基于专家系统的操作票生成以及防误校验是对电力领域内大量知识和经验推理的应用过程。智能防误专家系统的基本思想是对领域专家提供的全部知识进行研究、提炼并归纳成规则形成规则库, 并基于专家知识库进行防误逻辑推理。

在基于开关单元的拓扑防误模型的基础上, 根据设备类型以及设备的初始状态和目标状态, 可以定义操作类型。

防误应用采用(设备类型: 初始状态 \rightarrow 目标状态)表达式定义对设备的操作。例如(断路器: 合 \rightarrow 分)表示操作某个断路器使其由合状态转为分状态, (变压器: 运行 \rightarrow 检修)则表示操作某个变压器使之由运行状态转为检修状态。

防误应用的主要功能是为调控一体化操作过程提供各种防误规则的逻辑判断。调控一体化智能防误研究设备在当前工作状态下, 可以进行哪些操作, 以及这些操作是否存在安全隐患。防误应用使用形

如(设备类型, 初始状态, 操作类型, 防误规则)的四元组定义相应的防误规则。例如, 500 kV 线路转为运行时, 线路并联电抗器须投入运行; 变压器组低压侧并列时, 高压侧须已并列。为适应不同的防误规则, 防误条件应该能够自由配置。

本文研究的防误应用使用专家知识库来定义和存储各类防误规则, 并按问题求解的产生式系统模型进行推理实现。在目标驱动的专家系统中, 目标表达式开始是存放在工作存储器中; 系统要匹配规则的结论和目标, 选出一条或多条匹配的规则且将其前提条件放在工作寄存器中。这对应将问题的目标分解成若干简单的子目标。系统由原目标反向工作直到工作寄存器中所有子目标都已为真, 说明假设已被验证。

专家系统的规则定义通常采用人工智能表示语言的谓词演算。谓词演算使用的连接符有: \neg (“非”)、 \vee (析取符)、 \wedge (合取符)、 \rightarrow (蕴含符)、 \equiv (等价符)、 \square (全称量词)、 \exists (存在量词)。

规则定义的过程即为将知识经验以命题演算的方法和语义表达出来的过程。

例如, 在防误专家规则库中, 对断路器 k 的合操作存在的危险点判定有以下的规则:

规则一: 若断路器所在的开关单元非连通, 则隐患是隔刀未合使得开关空合

规则二: 若 k 是线路开关且线路对侧开关单元是接地状态, 则错误是检修未结束禁止送电

规则三: 若 k 是线路开关且本侧开关单元非带电, 则提醒送电顺序错误

规则四: 若 k 是变压器开关且高压侧未投运, 则警告变压器各侧送电顺序错误

规则五: 若 k 是分段开关或母联开关且存在站间跨电压等级环路, 则提醒电磁合环。

使用人工智能的谓词演算方法, 可将以上规则表示如下:

Problem: AntiClose(k)

R1: \neg Routed(k) \rightarrow WarningLevel(2, disconnector, “隔刀未合使得开关空合”

R2: LineBreaker(k) \wedge Grounded(OppositeUnit(k)) \rightarrow WarningLevel(-1, ground, “检修未结束禁止送电”

R3: LineBreaker(k) \wedge \neg Powered(k) \rightarrow WarningLevel(3, NoPower, “送电顺序错误(操作后未受电)”

R4: TransformerBreaker(k) \wedge \neg OnRun(HighWindingOf(k)) \rightarrow WarningLevel(1, NotRun, “变压器高压侧未投运(反向充电)”

$R5: (\text{SegmentBreaker}(k) \vee \text{BusBreaker}(k)) \wedge (\square p)\text{Circle}(k)$

$\rightarrow \text{WarningLevel}(2, \text{Circle}, \text{“电磁合环”})$

$R6: (\square r)\text{ConnecedUnit}(k,r) \rightarrow \text{Routed}(k)$

在上述各逻辑表达式中，可以使用开关单元模型结合拓扑计算子程序实现 $\text{LineBreaker}(k)$ 、 $\text{OppositeUnit}(k)$ 、 $\text{OnRun}(w)$ 等外部判断过程。 WarningLevel 是推导结论，用于结果输出，描述操作危险点的错误等级(-1 表示最高错误等级)、错误类型以及文字消息。在 $R6$ 中， $(\square r)\text{ConnecedUnit}(k,r)$ 表示存在某条路径满足连通 k 所在开关单元的条件，可以推导出 $R1$ 所需的条件。

该推理过程形成的与/或树如图 3 所示。

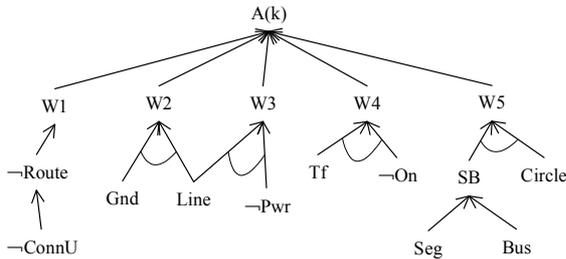


图 3 与或树推理图

Fig. 3 Scheme of and/or tree reasoning

防误专家知识库使用上述的谓词演算表达式定义了各种类型的防误判断规则，结合基于开关单元模型的拓扑分析以及状态识别子程序，用于求解对某一个具体的设备操作所面临的危险点，并以人机交互方式展现出来。

3 防误校核的拓扑算法分析

在防误推理过程中，与/或树上的每个节点对应一个(组)条件判断，采用开关单元模型的识别结果结合拓扑搜索算法实现。拓扑防误应用中较多地使用路径搜索算法来实现各类防误判断规则。如当双母线线路开关由 I 母运行转至 II 母运行时，应判断 II 母隔离开关两侧是否等电位；当合上分段(或母联)开关时，应判断是否会形成电磁合环；当并列运行的其中一台变压器停电时，应判断另一台变压器是否会过载等等。

拓扑防误使用的典型算法有设备支路的最短路径搜索算法以及环路搜索算法，其中后者是重点。以双母线线路开关倒母操作为例，可以将该问题转换成 I 母隔离刀闸与 II 母隔离刀闸之间是否存在无阻抗环路来判断。

本文提出的简单无向图环路搜索算法能计算出

经过给定顶点的所有环路，并且效率较高。该算法使用以下四个数组： visited 表示访问过的节点； passed 表示已访问过的边； path 中存储当前路径上的节点序列， next 中存储当前路径上每个节点的下一条邻接支路(使用 P 表示)^[15]。具体实现流程如图 4 所示。

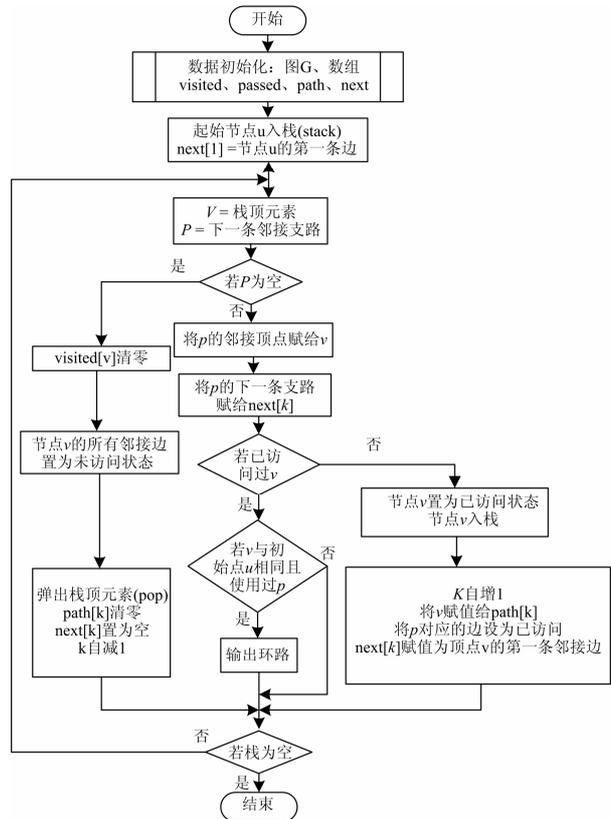


图 4 拓扑环路搜索

Fig. 4 Loop topology search

例如，在图 5 所示的电网运行方式下，当线路从 I 母倒到 II 母运行时，先合上母联开关，形成等电位后，合上 II 母隔离开关，然后断开 I 母隔离开关，最后再将母联开关断开。该过程中，合上母联开关 K 以及 II 母隔离开关后会形成两个环路。

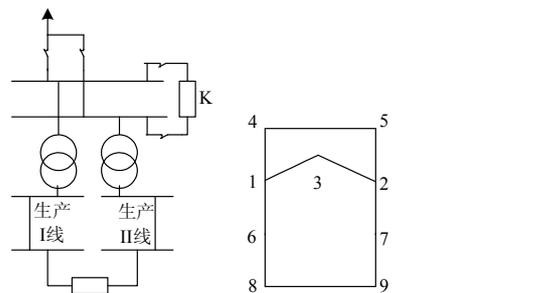


图 5 电网运行方式及其拓扑模型

Fig. 5 Power grid operation mode and topological model

在系统中, 防误服务程序可给出图 4 中 1 个电磁合环和 1 个开关合环。电磁环路经由两个变电站的变压器及联络线、跨越两个电压等级形成环路。搜索结果如表 1 所示。

表 1 电磁合环及开关合环

Table 1 Electromagnetic loop and closed loop line	
电磁合环 1	1-3-2-7-9-8-6-1
电磁合环 2	1-4-5-2-7-9-8-6-1
开关合环	1-3-2-5-4-1

4 结论

在调控一体化系统建设中, 防误应用基于电网拓扑模型和防误规则专家库, 采用智能推理实现方法, 能够对各类接线模式下设备操作及综合状态转换过程中存在的危险点给出智能化的校验结果。本文提出的防误校核实现方法已应用于福建电网智能一体化调控操作支持系统, 保障了调控远方操作至冷备用模式下电网的安全运行。现场实践证明, 该方法为防止误调度、误遥控、误操作提供了准确的校验结果和丰富的防误信息, 在调控一体化建设中得到了很好的应用。

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] 王大亮, 邓健, 鲁海威, 等. 基于可视化技术的地区电网智能调度预警系统设计应用[J]. 电网清洁与能源, 2014, 30(11):81-86.
- WANG Daliang, DENG Jian, LU Haiwei, et al. Design and application of the intelligent dispatch and early warning system based on the visualization technology[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(11):81-86.
- [3] 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): 143-155.

- 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): 143-155.
- [4] 谷文旗, 莫杰, 贺燕英. 集控型防误操作系统方案设计[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(7): 129-130.
- GU Wenqi, MO Jie, HE Yanying. Design of anti-misoperation system for centralized control station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(7): 129-130.
- [5] 罗建, 朱伯通, 蔡明, 等. 基于CIM XML的CIM和SOL模型互操作研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17): 134-138.
- LUO Jian, ZHU Botong, CAI Ming, et al. Interoperability of CIM and SCL model based on CIM XML[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 134-138.
- [6] 陶顺, 周双亚, 肖湘宁, 等. 基于IEC61970公共信息模型的电压凹陷域分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 40-46.
- TAO Shun, ZHOU Shuangya, XIAO Xiangning, et al. Analysis of area of vulnerability based on common information model in IEC61970[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 40-46.
- [7] 陈昌松, 段善旭, 蔡涛, 等. 基于改进遗传算法的电网能量管理模型[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 196-201.
- CHEN Changsong, DUAN Shanxu, CAI Tao, et al. Microgrid energy management model based on improved genetic arithmetic[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 196-201.
- [8] 秦斌, 周浩, 杜康, 等. 基于RBF网络的风电机组变桨距滑模控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 37-41.
- QIN Bin, ZHOU Hao, DU Kang, et al. Sliding model control of pitch angle based on RBF neural-network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 37-41.
- [9] 陈金强. 基于RIMER专家系统和DGA的变压器故障诊断[J]. 高压电器, 2013, 49(11): 76-81.
- CHEN Jinqiang. Diagnosing transformer fault based

- on RIMER expert system and DGA[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(11): 76-81.
- [10] 高培先, 符永鹏, 张延练. 基于规则专家系统的集成研发系统固有缺陷对策研究[J]. 计算机测量与控制, 2011, 19(7): 1711-1714.
GAO Peixian, FU Yongpeng, ZHANG Yanlian. Expert system theory based study of solution to inherent defects of integrated R & D system[J]. Computer Measurement & Control, 2011, 19(7): 1711-1714.
- [11] 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.
- [12] 马韬韬, 郭创新, 曹一家, 等. 电网智能调度自动化系统研究现状及发展趋势[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(9): 7-11.
MA Taotao, GUO Chuangxin, CAO Yijia, et al. Current status and development trend of intelligent dispatching automation system of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(9): 7-11.
- [13] 赵家庆, 季侃, 孙大雁, 等. 电网调度省地一体化试点工程关键技术方案[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(23): 120-125.
ZHAO Jiaqing, JI Kan, SUN Dayan, et al. A key technology scheme of pilot projects for provincial and local integrated power grid dispatch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(23): 120-125.
- [14] 周邛飞, 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): 145-148.
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): 145-148.
- [15] CORMEN T H, LEISERSON C E, RIVEST R L, et al. Introduction to algorithms[M]. Third Edition. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2009: 603-610.

收稿日期: 2014-06-23; 修回日期: 2014-08-06

作者简介:

李功新(1964-), 男, 工学博士, 高级工程师, 副教授, 主要研究方向为电力系统运行分析与控制、电力设备在线监测、设备绝缘诊断等;

黄文英(1970-), 女, 工学硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统运行分析与控制;

任晓辉(1965-), 男, 工学学士, 高级工程师, 主要研究方向为电网调度与运行, 系统运行、电力变压器老化测试等。E-mail: 1102517160@qq.com

(编辑 张爱琴)