

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181527

# 基于人工智能的输电线路故障快速诊断方法研究

颜肃<sup>1</sup>, 张玮亚<sup>1</sup>, 李宏仲<sup>2</sup>, 王磊<sup>3</sup>

(1. 国网南京供电公司, 江苏 南京 210019; 2. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090;  
3. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106)

**摘要:** 针对电力系统发生故障后未经处理的多源告警信息可能导致故障处理时间增加的问题, 提出一种基于人工智能的输电线路故障诊断方法。对输电线路故障诊断 Petri 网模型进行改进, 在建立的模糊 Petri 网模型中预设变迁阈值, 采用逆向搜索策略, 对模糊 Petri 网进行约简, 减小推理规模, 提高故障诊断效率。所提方法可以对故障信息进行快速分析、分类处理, 大大减少调度员处理信息的工作量, 提高输电线路自动化水平, 确保电力系统安全稳定运行。通过算例验证了所提方法的有效性。

**关键词:** 人工智能; 模糊 Petri 网; 输电线路; 故障诊断

## Research on fast fault diagnosis of transmission line based on artificial intelligence

YAN Su<sup>1</sup>, ZHANG Weiya<sup>1</sup>, LI Hongzhong<sup>2</sup>, WANG Lei<sup>3</sup>

(1. State Grid Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210019, China; 2. College of Electrical Engineering, Shanghai Electric Power University, Shanghai 200090, China; 3. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the unprocessed multi-source alarm information may cause the fault processing time to increase after the failure of the power system, an artificial intelligence-based fault diagnosis method for the transmission line is proposed. It improves the Petri net model of transmission line fault diagnosis, presets the transition threshold in the established fuzzy Petri net model, and uses the reverse search strategy to reduce the fuzzy Petri net, decrease the inference scale and improve the fault diagnosis efficiency. The proposed method can quickly analyze and classify fault information, greatly reduce the workload of dispatchers processing information, improve the automation level of transmission lines, and ensure the safe and stable operation of power systems. The effectiveness of the proposed method is verified by an example.

This work is supported by National Natural Youth Science Foundation of China (No. 51407113).

**Key words:** artificial intelligence; Petri net improvement; transmission line; fault diagnosis

## 0 引言

输电线路故障诊断的主要目的是快速识别故障元件或开关, 为调度员提供可靠依据, 快速实现输电线路故障恢复。受天气、人为等因素的影响, 输电线路故障在所难免, 同时可能会引发其他故障<sup>[1-3]</sup>, 快速准确的故障定位是确保输电线路安全、稳定运行的关键。目前, 电网调度中心主要使用能量管理系统 EMS 和数据采集系统 SCADA 进行输电线路信息采集, 在电网发生故障后, 未经处理的多源告警信息不能保证故障信息出现的准确性和可能性, 需要调度员进行一一核查, 从而延长了故障处理时间<sup>[4-6]</sup>。

因此, 电力系统急需一套完备的故障诊断体系, 对故障信息进行快速分析、分类处理, 可大大减少调度员处理信息的工作量, 提高输电线路自动化水平<sup>[7-10]</sup>。

鉴于此, 本文深入研究了模糊 Petri 网及其推理方法, 基于改进的模糊 Petri 网建立了一套完善的输电线路故障诊断系统, 并通过算例验证了所提方法的有效性。

## 1 基于人工智能的输电线路故障诊断

输电线路故障诊断一般是基于故障发生时装置或设备的数字和状态量<sup>[11-13]</sup>, 并以故障诊断系统的网络拓扑结构为基础, 结合系统结构和潮流变化判断。但这种计算方法的缺陷是耗时较长, 影响诊断

速度。并且, 系统正常运行时, 线路潮流值接近于零, 其值太小, 影响故障判断的准确性, 传统的输电线路故障诊断难以达到理想效果。

采用单一数学模型难以诊断所有故障问题, 人工智能可以提高故障诊断的精确性。近年来, 人工智能用于输电线路故障诊断的研究已经取得了巨大成功<sup>[14-15]</sup>。目前, 基于人工智能的输电线路故障诊断方法主要有: 专家系统(Expert System)、人工神经网络(Artificial Neural Network)、Petri 网(Petri Net)、粗糙集理论(Rough Set)、模糊理论(Fuzzy Theory)、贝叶斯网络(Bayesian Networks)、优化方法(Optimization Method)、数据挖掘(Data Mining)、信息理论(Information Theory)及基于故障滤波器信息等, 其中, 应用较早的有专家系统、人工神经网络、模糊理论、Petri 网、优化方法。而近几年出现的主要方法有: 粗糙集理论、贝叶斯理论、信息理论、数据挖掘, 对这些人工智能方法的研究成为输电线路故障诊断的新热点<sup>[16-20]</sup>。

输电线路故障诊断系统是由离散事件构成的一个动态系统, 其主要特点是定性、定量分析同时发生、次序发生以及循环发生的故障演化过程<sup>[21-25]</sup>, 基于 Petri 网的输电线路故障诊断是解决此类问题的有效方法。

## 2 模糊 Petri 网及其模型

Petri 网(PetriNet, PN)是 1962 年德国的科学家 Carl. A. Petri 在他的博士论文中首次提出的, 作为描述计算机系统事件之间的关系。Petri 网主要有以下几个特点:

- 1) Petri 网只描述由自然规律产生的依赖关系, 而不针对其本身。
- 2) Petri 网描述离散事件之间的逻辑关系时以网络理论为基础。
- 3) Petri 网的演绎依靠矩阵运算实现, 可以演绎系统中同时或次序发生的事件, 可用于静态结构分析和动态行为分析。
- 4) Petri 网本质上是一种可用网状图形表示的系统模型, 可以作为高效的建模和分析工具, 用于描述具有并发或并行行为的系统。

### 2.1 Petri 网基本原理

Petri 网是一种含有网状信息流的有向图, 它包括含有条件节点和事件节点的信息流, 通过添加 token 来表达信息状态, 揭示系统动态运行过程。

一个完整的 Petri 网应包括 Petri 网结构(Petri Net Structure, PNS)和触发规则, 表征系统结构特性和系统动态过程。

表 1 Petri 网相关概念

Table 1 Petri net related concepts

Petri 相关概念	释义
资源	系统变化所涉及的因素, 如原料、产品、人员、工具、设备、数据、信息及部件等
库所(状态元素)	存放资源的场所, 状态元素又称为 P 元素。
变迁(跃迁)	资源的消耗、使用及引起状态元素的变化, 变迁又称 T 元素
token(令牌)	库所中所拥有的资源数目。
条件	若一个库所只有有 token 和无 token 两种状态, 则该库所称为条件。
事件	涉及条件的变迁。
容量	库所贮存资源数量的最大数目为库所的容量

### 2.2 Petri 网的推理过程

对于 Petri 网来说, 其结构本身是静态的, 它的动态特性是以节点中 token 数的变化以及变迁来体现的。Petri 网中的 token 数由输入函数来确定, 如果变迁满足条件, 则被激活, 那么 token 就根据加权弧的条件由输入位置转移至输出位置, 这个过程就是 Petri 网的状态变化。如果网络中变迁均不能够激活, 说明 Petri 网已经进入了稳定的状态。

在 Petri 网中, 初始状态用 token 表示, 网络动态特性用 token 数目的变化和变迁来描述。变迁激活(点火), 又称变迁使能, 其基本条件是: 当某个变迁相连结点位置中 token 数量大于或等于相连有向弧的权值, 在变迁使能的情况下, 如果又满足特

定的评价函数, 则变迁就被激活, 又称变迁点火。如果不存在与此相关的评价函数, 那么只要变迁满足基本条件便能够实现点火。

在点火过程中, Petri 网的 token 从输入位置节点移动到变迁对应的输出节点。当网络中再没有可以激活的变迁时, 网络即进入最终稳定状态。通过对所有变迁节点激活过程的跟踪, 便能得到所求问题的解答。在电力系统的运行过程中, 如果元件发生了故障, 那么可以按照如下步骤消除故障:

- 1) 电力系统中的线路或母线等原件出现故障, 产生较大的短路电流;
- 2) 保护装置检测到短路电流, 判断短路电流值是否超过整定值;

3) 符合动作条件则保护装置动作, 跳开相应的开关元件;

4) 故障元件被退出。

不难看出, 这几个步骤是时序顺次发生的, 所以 Petri 网的顺次触发机制能够实现此过程。

### 2.3 模糊 Petri 网推理方法

模糊 Petri 网(Fuzzy Petri Net, FPN)是在基本 Petri 网基础上模糊化, 其库所对应的区间[0, 1]的数值作为其 token 值, 每个变迁对应一个确定因子(Certain Factor, CF), 还规定了输入输出矩阵。

模糊 Petri 网是由 Petri 网的三元组扩展而来, 包括库所、变迁、置信度、阈值及权值五个模块。

基于模糊 Petri 网的模糊推理算法有以下几种:

1) 把模糊 Petri 网和矩阵运算结合起来, 在模糊推理过程中实现形式化的推理算法; 2) 基于模糊产生式规则的推理算法, 推理过程中运用最大代数相关基础理论; 3) 在模糊 Petri 网的推理过程中, 采用基于查询的原理; 4) 运用反向推理方法。

通常来说, 在故障诊断模型的建立过程中, 依托模糊 Petri 网推理算法推断故障原因, 可用正向或反向模糊推理算法实现。正向推理算法的推理过程为: 首先建立发生故障的库所集, 判断变迁是否使能。如果变迁使能, 判断变迁是否能够被点燃, 然后点燃所有可点燃的变迁, 把结果放入相应的结果库中。反向推理算法旨在为正向推理算法做准备, 它可以抽取与结果命题有关联的、涵盖整个知识系统的规则。本论文着重讨论基于矩阵运算的反向推理算法。

1) 假设在模糊 Petri 网中存在九个库所和  $m$  个变迁, 根据此已知条件建立关联矩阵IV:

$$h_{ij} = \begin{cases} 1 & p \in I(t_i) \\ -1 & p \in O(t_j) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

2) 列出已有库所向量  $A = (a_0, a_1, a_2, \dots, a_n)^T$ , 变迁向量  $B = (b_0, b_1, b_2, \dots, b_n)^T$ , 其中

$$a_i = \begin{cases} 1 & p \text{ 是结果库所或相关的输入库所, } p_i \in P \\ -1 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$$b_i = \begin{cases} 1 & t_i \text{ 是与结果库所相关的变迁, } t_i \in T \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

### 3 改进的模糊 Petri 网故障诊断系统算例

根据约简规则, 对模糊 Petri 网进行约简, 获得改进的模糊 Petri 网模型, 该模型性质不会发生改变。基于模糊 Petri 网的故障诊断系统, 如图 1 所示, 从初始标识  $M(p)$ 、变迁阈值  $\gamma(t)$  以及流关系上的权值  $\gamma$  来体现约简结果。根据模糊 Petri 网的推理原则以及上文的约简规则对图 1 所示的模糊 Petri 网进行约简。

图 1 所示库所  $p_5$  和  $p_8$  之间属于变迁并联型, 可以进行约简, 由于变迁  $t_4$  发生得到的  $M(p_8)$  大于变迁  $t_5$  发生得到的  $M(p_8)$ , 所以, 该部分可以约简成图 2 所示的约简结果。变迁  $t_9$  和  $t_{14}$  之间也可根据约

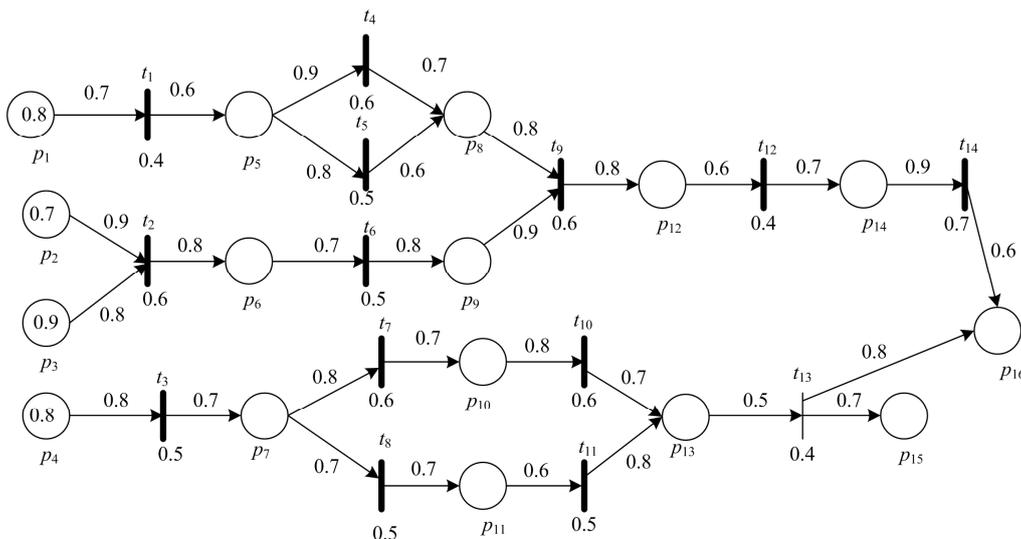


图 1 约简前模糊 Petri 网

Fig. 1 Fuzzy Petri nets before reduction

简规则进行约简, 其约简结果如图 3 所示。

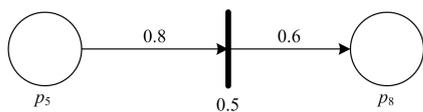


图 2 模糊 Petri 网初步约简结果 1

Fig. 2 Preliminary reduction results of fuzzy Petri nets 1

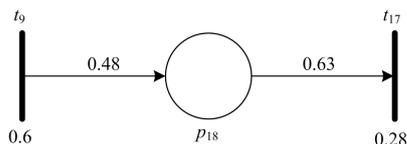


图 3 模糊 Petri 网初步约简结果 2

Fig. 3 Preliminary reduction results of fuzzy Petri nets 2

图 1 所示库所  $p_7$  和  $p_{13}$  之间也可进行约简, 初步约简结果如图 4 所示。图 4 所示为变迁并联型, 根据约简规则, 可以进一步约简, 结果如图 5 所示。

由此, 图 1 所示的模糊 petri 网的初步约简结果如图 6 所示。

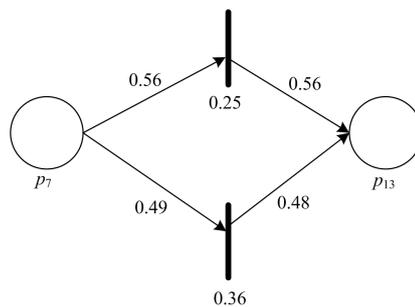


图 4 模糊 Petri 网初步约简结果 3

Fig. 4 Preliminary reduction results of fuzzy Petri nets 3

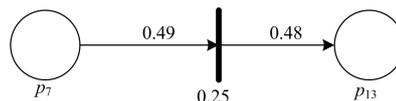


图 5 模糊 Petri 网初步约简结果 4

Fig. 5 Preliminary reduction results of fuzzy Petri nets 4

图 6 所示初步约简后的模糊 Petri 网中, 库所  $p_1$  和  $p_8$ 、 $p_4$  和  $p_{18}$  之间可以根据约简规则进一步约简, 其最终约简结果如图 7 所示。

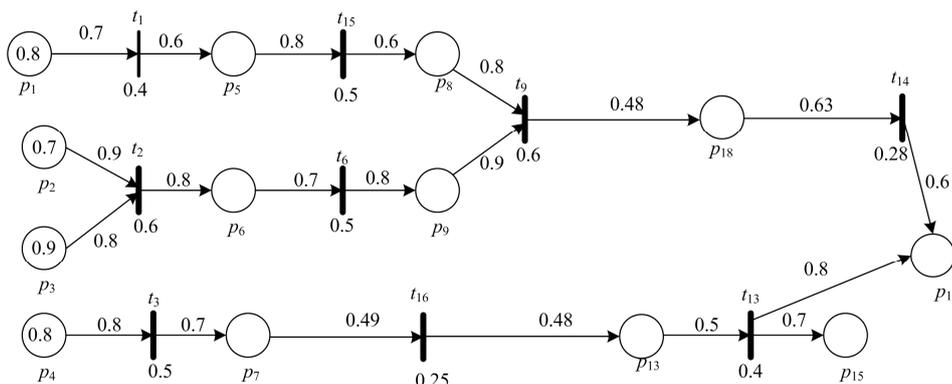


图 6 模糊 Petri 网初步约简结果

Fig. 6 Preliminary reduction results of fuzzy Petri nets

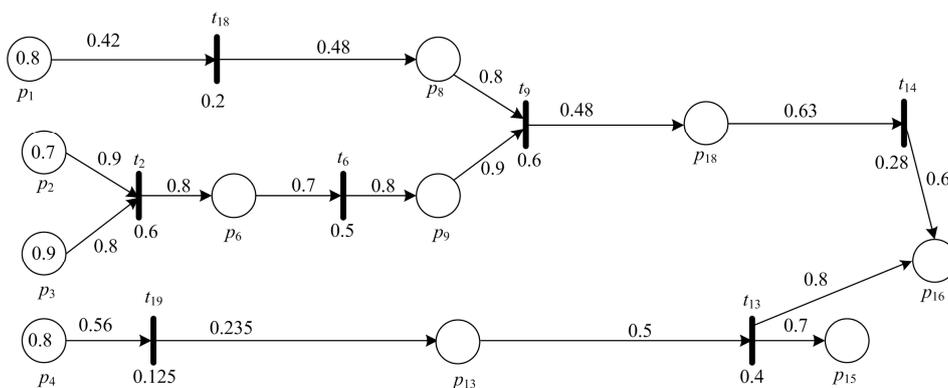


图 7 模糊 Petri 网模型约简结果

Fig. 7 Reduction result of fuzzy Petri net model

通过模糊 Petri 网模型约简算例可知,利用模糊 Petri 网几种约简规则对复杂模糊 Petri 网进行约简,最终化为最简形式,不会改变模糊 Petri 网的特性。

#### 4 结论

本文提出一种基于人工智能的输电线路故障诊断方法,通过对输电线路故障诊断 Petri 网模型的改进,在建立的模糊 Petri 网模型中依据预设的变迁阈值,采用逆向搜索策略,对模糊 Petri 网进行约简,减小推理规模,提高故障诊断效率,并通过算例验证了所提方法的有效性。

#### 参考文献

- [1] 朱祥兵,李垣江,王建华.基于二进制莱维风驱动算法的船舶岸电系统并网故障诊断方法研究[J].电力系统保护与控制,2018,46(16):89-96.  
ZHU Xiangbing, LI Yuanjiang, WANG Jianhua. Fault diagnosis system about grid connection of shore power based on the improved binary levy wind driven algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 89-96.
- [2] 任惠,米增强,赵洪山.基于编码 PETRI 网的电力系统故障诊断模型研究[J].中国电机工程学报,2005,25(20):44-49.  
REN Hui, MI Zengqiang, ZHAO Hongshan. Power system fault diagnosis modeling techniques based on encoded PETRI nets[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(20): 44-49.
- [3] 杨健维,何正友.基于时序模糊 Petri 网的电力系统故障诊断[J].电力系统自动化,2011,35(15):46-51.  
YANG Jianwei, HE Zhengyou. Power system fault diagnosis approach based on time sequence fuzzy Petri net[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(15): 46-51.
- [4] 郭创新,彭明伟,刘毅.多数据源信息融合的电网故障诊断新方法[J].中国电机工程学报,2009,29(31):1-7.  
GUO Chuangxin, PENG Mingwei, LIU Yi. A new method of fault diagnosis based on multi-source information fusion[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(31): 1-7.
- [5] 刘毅,高振兴,郭创新,等.一种考虑多层信息融合的电网故障诊断辅助决策方法[J].电力系统保护与控制,2010,38(24):14-18.  
LIU Yi, GAO Zhenxing, GUO Chuangxin, et al. An auxiliary decision method for power network fault diagnosis considering multilayer information fusion[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 14-18.
- [6] 马骞,杨以涵,刘文颖,等.基于对象 Petri 网技术的电力系统故障恢复方法[J].电网技术,2005,29(3):23-28.  
MA Qian, YANG Yihan, LIU Wenyong, et al. Method of power system restoration based on object-oriented Petri-net technique[J]. Power System Technology, 2005, 29(3): 23-28.
- [7] 曹一家,刘毅,高振兴,等.一种大规模电网故障诊断的多智能体信息融合模型与方法[J].电力自动化设备,2010,30(7):14-18.  
CAO Yijia, LIU Yi, GAO Zhenxing, et al. Model and method of large scale grid fault diagnosis based on multi-agent system and information fusion technology[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(7): 14-18.
- [8] 赵熙临,周建中,付波,等.基于信息融合技术的电网故障诊断方法[J].华中科技大学学报(自然科学版),2009,37(3):98-101.  
ZHAO Xilin, ZHOU Jianzhong, FU Bo, et al. Diagnostic of faults in grids using data fusion[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science), 2009, 37(3): 98-101.
- [9] 任晓辉.电网调控自动化系统运行状态在线监视与智能诊断研究及应用[J].电力系统保护与控制,2018,46(11):156-161.  
REN Xiaohui. Research and application of operating states of grid dispatching and control system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(11): 156-161.
- [10] 邓武,杨鑫华,赵慧敏,等.粗糙集、神经网络和专家系统模型用于电力系统故障诊断[J].高电压技术,2009,35(7):1624-1628.  
DENG Wu, YANG Xinhua, ZHAO Huimin, et al. Application of rough sets, neural network and expert system to power system fault diagnosis[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(7): 1624-1628.
- [11] 王建元,纪延超.Petri 网络在变压器故障诊断中的应用[J].电网技术,2002,26(8):21-24.  
WANG Jianyuan, JI Yanchao. Application of Petri nets in transformer fault diagnosis[J]. Power System Technology, 2002, 26(8): 21-24.
- [12] 占才亮.人工智能技术在电力系统故障诊断中的应用[J].广东电力,2011,24(9):87-92.  
ZHAN Cailiang. Application of AI technology in fault diagnosis of power system[J]. Guangdong Electric Power, 2011, 24(9): 87-92.
- [13] 吴文可,文福拴,薛禹胜,等.基于多源信息的延时约束加权模糊 Petri 网故障诊断模型[J].电力系统自动化,2013,37(24):43-53.  
WU Wenke, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. A weighted fuzzy Petri net based model with time-delay constraints for power system fault diagnosis employing

- information from multiple sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(24): 43-53.
- [14] 周东华, 史建涛, 何潇. 动态系统间歇故障诊断技术综述[J]. 自动化学报, 2014, 40(2): 161-171.  
ZHOU Donghua, SHI Jiantao, HE Xiao. An overview of intermittent fault diagnosis techniques for dynamic systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(2): 161-171.
- [15] 刘妹琴, 王毅星. 基于 Petri 网与 DS 证据理论的电力系统故障诊断[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(10): 88-92.  
LIU Meiqin, WANG Yixing. Power system fault diagnosis based on Petri net and DS evidence theory[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science), 2014, 42(10): 88-92.
- [16] 熊国江, 石东源. 电网故障诊断改进解析模型及其自适应生物地理学优化方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 205-211.  
XIONG Guojiang, SHI Dongyuan. Improved analytical model for power network fault diagnosis and its adaptive biogeographic optimization method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 205-211.
- [17] 吴文可. 电力系统故障诊断模型与事故处理辅助决策方法[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.  
WU Wenke. Power system fault diagnosis model and accident treatment auxiliary decision method[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [18] 钟锦源, 张岩, 文福拴, 等. 利用电气量和时序信息的改进 Petri 网故障诊断模型[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 152-159.  
ZHONG Jinyuan, ZHANG Yan, WEN Fushuan, et al. An improved Petri net model for power system fault diagnosis employing electrical data and temporal constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 152-159.
- [19] 程学珍, 陈强, 于永进, 等. 基于最大似然译码字的 Petri 网电网故障诊断方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(15): 46-52.  
CHENG Xuezhen, CHEN Qiang, YU Yongjin, et al. Fault diagnosis method of Petri network based on maximum likelihood decoding word[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(15): 46-52.
- [20] 甘锡淞, 李云, 傅成华, 等. 基于信息融合和 CS-SVM 的变压器绕组变形故障诊断方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 156-161.  
GAN Xisong, LI Yun, FU Chenghua, et al. Information fusion and CS-SVM based research on diagnosis method for transformer winding deformation fault[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 156-161.
- [21] 胡琛临, 刘亚东, 刘宗杰, 等. 输电线路故障电流行波波形反演方法研究[J]. 陕西电力, 2017, 45(1): 37-40.  
HU Chenlin, LIU Yadong, LIU Zongjie, et al. Research on inversion method of fault current travelling wave in transmission line[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(1): 37-40.
- [22] 黄建业, 陈敏维, 张功林, 等. 基于突变逻辑阵的配网小电流接地故障判定方法[J]. 智慧电力, 2017, 45(8): 45-50, 57.  
HUANG Jianye, CHEN Minwei, ZHANG Gonglin, et al. Non-solidly earthed fault judgement method based on mutation logic matrix[J]. Smart Power, 2017, 45(8): 45-50, 57.
- [23] 张伟, 吕睿博, 阎有朋. 基于不平衡电容注入的配电网小电流接地故障定位方法[J]. 智慧电力, 2017, 45(10): 66-71.  
ZHANG Wei, LÜ Ruibo, YAN Youpeng. Small current earth fault location method for distribution network based on unbalanced capacitance injection[J]. Smart Power, 2017, 45(10): 66-71.
- [24] 杨超平, 马志远, 沈沉, 等. 基于脆弱线路辨识的电网连锁故障严重路径快速搜索[J]. 中国电力, 2017, 50(9): 66-71.  
YANG Chaoping, MA Zhiyuan, SHEN Chen, et al. Rapid search of cascading failure serious paths in power systems based on vulnerable line identification results[J]. Electric Power, 2017, 50(9): 66-71.
- [25] 据永安, 刘聪, 单汝涛, 等. 消弧线圈接地系统单相断线故障的辨识与定位[J]. 中国电力, 2017, 50(8): 113-117.  
JU Yongan, LIU Cong, SHAN Rutao, et al. Identification and location of single-phase line-broken fault of arc-suppression coil grounding system[J]. Electric Power, 2017, 50(8): 113-117.

收稿日期: 2018-12-06; 修回日期: 2019-02-05

作者简介:

颜 肃(1973—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为智能配用电技术; E-mail: 13851891588@139.com

张玮亚(1988—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为分布式能源、智能配电网保护与控制技术; E-mail: zhangweiya@126.com

李宏仲(1977—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为智能配用电技术。

(编辑 张爱琴)