

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190621

# 一种配电网基于模型诊断的最小碰集改进算法

林梅芬<sup>1,3</sup>, 陈婷<sup>2,3</sup>, 王秋杰<sup>2</sup>, 朱文强<sup>3</sup>

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 210098; 2. 福州大学电气工程及自动化学院, 福建 福州 350116;  
3. 福建水利电力职业技术学院, 福建 永安 366000)

**摘要:** 在配电网故障的基于模型诊断方法中, 最小碰集计算对整个诊断过程具有较大影响。为了进一步提高基于模型诊断的效率和准确率, 提出一种适合配电网拓扑结构的最小碰集改进算法。利用新的适应度函数保证粒子直接朝着最小碰集迭代, 提高对了解空间的搜索效率。利用“特征学习”搜索策略减少对无解空间的搜索。在分析配电网各元件解析冗余关系之间联系的基础上, 提出算法分层的理论依据和实现方法。算例表明, 改进后最小碰集算法具有更短的求解时间和更高的准确率。将改进后的最小碰集算法应用到基于模型诊断中, 故障诊断的效率和准确率得到一定提高。

**关键词:** 配电网; 基于模型诊断; 最小碰集计算; 拓扑结构; 特征学习

## An improved minimum set algorithm for model-based diagnosis of a distribution network

LIN Meifen<sup>1,3</sup>, CHEN Ting<sup>2,3</sup>, WANG Qiujie<sup>2</sup>, ZHU Wenqiang<sup>3</sup>

(1. School of Energy and Electricity, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China; 3. Fujian Vocational and Technical College of Water Conservancy and Electricity, Yong'an 366000, China)

**Abstract:** In the model-based diagnosis method of distribution network faults, the minimum hitting set calculation has a great impact on the whole diagnostic process. A new minimum hitting set algorithm suitable for the distribution network topology is proposed to improve the efficiency and accuracy rate of model-based diagnosis. The new fitness function in the algorithm allows the particle iterating towards the minimum hitting set directly. As a result, the search efficiency for the solution space is improved correspondingly. A search strategy of "feature learning" is used to reduce the search for unsolved space. Analyzing the relation between analytic redundancy relations of distribution network components, the theoretical basis and implementation method of algorithm stratification are put forward. The example shows that the improved minimum hitting set algorithm has shorter solution time and higher accuracy. Applying the improved minimum hitting set algorithm to model-based diagnosis, the efficiency and accuracy of fault diagnosis are improved.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377047).

**Key words:** distribution network; model-based diagnosis; minimum hit set calculation; topology structure; feature learning

## 0 引言

配电网故障元件识别是电力系统安全、稳定运行的重要保障。在当下, 基于人工智能的配电网故障元件识别方法成为研究的热点<sup>[1-2]</sup>。基于模型诊断

(Model-Based Diagnosis, MBD)作为人工智能的一个重要研究方向, 由于其克服了基于专家系统的故障元件识别方法中知识不容易获取、对专家经验依赖性强等缺陷, 在配电网故障元件识别中引起了广泛关注<sup>[3]</sup>。

MBD 是一个自适应的故障元件识别方法, 其不需要对故障类型进行预判, 直接利用配电网拓扑信息和故障下的电流和电压信息就能准确地诊断出

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51377047); 福建省中青年教师教育科研项目资助(JZ180466)

故障元件<sup>[4]</sup>。MBD 的诊断过程一般可以分为：冲突识别和候选产生。冲突识别的目的是得到系统诊断的最小冲突集(Minimum Conflict Set, MCS)族, 候选产生则是利用某种算法在最小冲突集中找出最小碰集(Minimum Hitting Set, MHS)也就是诊断候选集。由于最小碰集求解算法的性能会很大程度上影响 MBD 的故障诊断效果<sup>[5]</sup>, 故提高最小碰集算法的计算性能具有重要意义。

计算最小碰集的算法大致可以分为完备求解方法和非完全求解方法两类。完备求解方法包括基于树形搜索法<sup>[6-7]</sup>和布尔代数算法<sup>[8]</sup>。非完全求解方法包括遗传算法<sup>[9]</sup>、二进制粒子群<sup>[10]</sup>、差分算法<sup>[11]</sup>等智能群体算法。在分析配电网故障特点的基础上, 这些方法被引入到配电网的故障诊断当中, 并取得了一定成果。文献[12-13]将 MBD 的方法应用到配电网故障诊断当中, 并采用群体智能算法来计算最小碰集。文献[14-15]将计算最小碰集问题转化为 0-1 表示的二值空间问题, 将优化的二进制粒子群算法用于求解冲突集的最小碰集, 取得了很好的效果。文献[16-17]对最小冲突集簇每个元件进行二进制编码, 基于逻辑“或”运算, 利用穷举法进行自底向上的搜索, 保证了最小碰集的准确率。

综上所述, 这些最小碰集算法能够满足 MBD 的故障诊断要求, 但是存在一定的改进空间。1) 构建的适应度函数没有考虑配电网拓扑结构特点, 对有解空间搜索的效率较低。2) 在无解空间浪费了较多的搜索时间。3) 除了较多的单重故障(单相到三相故障)外, 当配电网发生单相高阻弧光接地故障时, 若未能及时切除故障, 系统产生的过电压可能使其他绝缘薄弱点发生接地故障, 进而导致两点或多点同时发生单相接地故障或者转化为相间故障<sup>[18]</sup>。此时, 如何利用配电网的拓扑结构去降低多重故障下的寻优粒子维度, 也是一个重要的改进方向。

为了进一步提高最小碰集算法的求解速度和准确率, 提出一种适用于配电网的改进最小碰集分层算法。首先考虑配电网的拓扑结构特点, 提出一种新的适应度函数, 保证了粒子不断地朝着碰集迭代。提出一种“特征学习”的搜索策略, 减少了对无解空间的搜索。在分析配电网各元件解析冗余关系后, 提出了算法分层的理论依据和实现方法。通过算法分层, 可以有效降低多重故障下的寻优粒子维度。其次结合配电网的 MBD 特点, 给出了改进最小碰集算法的计算流程。最后通过 14 节点配电网, 阐述了所提算法的计算流程。通过设置不同的冲突集族, 测试了所提算法在寻优性能上的优势, 与已有的最小碰集算法对比, 验证了改进最小碰集

算法在求解速度和准确率上的优势。

## 1 MBD 基本理论

在诊断的逻辑表示中, 系统可以用一个三元组( $J_{SD}, J_{OBS}, J_{COMP}$ )来表示, 其中  $J_{SD}$  为系统的模型描述一阶语句,  $J_{OBS}$  为系统的观测值一阶语句,  $J_{COMP}$  为组成系统的元件集合。MBD 领域中的常用基本概念介绍如下所述。

1) 冲突集(Conflict Set, CS)。系统的一个冲突集, 需要满足以下条件。

$$\begin{cases} \{c_1, c_2, \dots, c_k\} \subseteq J_{COMP} \\ J_{SD} \cup J_{OBS} \cup \{\neg F(c_1), \dots, \neg F(c_n)\} \text{不可满足} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $F(c_i)$  表示存在故障; “ $\neg$ ”表示“否定”。在配电网中, 若某个元件(馈线区段或母线)集合存在故障, 则该元件集合即为冲突集。

2) 最小冲突集。若冲突集的任意真子集都不是冲突集, 那么它是一个极小冲突集。

在配电网中, 若某个元件集合的每个元件都真实存在故障且所有的故障元件都在该集合中, 则该元件集合就是最小冲突集。

3) 碰集(Hitting Set, HS)。设  $S$  是一个冲突集,  $C$  是冲突集簇, 集合  $H$  为系统的一个碰集, 需要满足以下条件。

$$\begin{cases} H \subseteq \cup S (S \in C) \\ \forall S \in C, H \cap S \neq \emptyset \end{cases} \quad (2)$$

在配电网中, 每个故障元件集合拿出一个或多个故障元件共同组成的集合就是碰集。

4) 最小碰集。若碰集的任意真子集都不是碰集, 那么它是一个最小碰集。

在配电网中, 每个故障元件集合只拿出一个故障元件共同组成的集合就是最小碰集。

5) 精英集(Elite Set, ES)。在算法迭代过程中, 产生最小碰集都装入一个集合中, 这个集合就是精英集。

根据上述理论, 基于 MBD 的配电网故障诊断步骤如下所述。

### 1) 选择测量观测

选择配电线路断路器、分段开关、联络开关的位置为测量观测点, 利用现有的配网自动化装置(Feeder Terminal Unit, FTU)采集相关电气量。

### 2) 建立元件模型

通过描述这些独立元件的约束关系即解析冗余关系(A analytical Redundancy Relation, ARR), 建立整个配电网的诊断模型。

### 3) 搜索最小冲突集候选(Minimum Conflict Set Candidate, MCSC)

利用已知的约束关系所隐含的信息, 离线地搜索出系统中所有的最小冲突集候选。

### 4) 确定最小冲突集

采集故障发生后、断路器动作前的电气信息, 将一组电气信息及元件参数代入对应的约束关系, 计算各约束关系的相对残差。如果相对残差大于设置的门槛值, 那么这个解析冗余关系所对应的最小冲突集候选就是最小冲突集。

### 5) 搜索最小碰集

通过最小碰集算法得到最小冲突集的最小碰集, 并将该集作为故障诊断候选。

### 6) 故障识别

依据元件的先验故障概率, 采用贝叶斯方法计算所得的候选诊断的后验故障概率, 并进行故障概率排序, 优先选择故障概率值较大的候选诊断作为故障点。

## 2 MHS 的适应度函数和特性学习策略

### 2.1 适应度函数

在文献[13]中, 配电网故障诊断的最小碰集算法采用式(3)作为适应度函数。

$$F(\mathbf{X}) = \frac{h_{\text{num}} + h}{2P} \quad (3)$$

式中:  $P$  为粒子群  $\mathbf{X}$  的规模;  $h_{\text{num}}$  为粒子群  $\mathbf{X}$  中与冲突集簇的每个冲突集都有交集的粒子个数;  $h$  为粒子群  $\mathbf{X}$  中包含的不同个体的数目。该适应度函数通过  $h_{\text{num}}$  保证粒子群  $\mathbf{X}$  中碰集的数量随着迭代的进行而不断增加, 通过  $h$  保证粒子更新时尽量减少相同个体的出现。但是由于种群  $P$  的参与, 导致适应度值容易受到种群规模的影响。

与此同时, 由于配电网拓扑结构是辐射型的, 上游元件和下游元件即只有“分支”没有“合支”, 在配电网故障的最小冲突集簇中, 各最小冲突集之间没有交集, 从而搜索到的每个最小碰集的长度都等于最小冲突集簇中的集合数。

基于现有适应度函数的不足和配电网最小碰集的特点, 提出一种新的适应度函数<sup>[17]</sup>。

$$F_{\text{new}}(\mathbf{X}) = \frac{N_{\text{cx}}}{N_c} + (1 - \omega |L_x - N_c|) \quad (4)$$

式中:  $N_{\text{cx}}$  表示在最小冲突集合簇中与当前粒子有交的集合数量;  $N_c$  表示最小冲突集合簇中的集合数;  $\omega$  为权重;  $L_x$  表示粒子  $x$  的长度, 即粒子中含“1”的个数。 $N_{\text{cx}} / N_c$  保证了粒子向碰集方向迭代,

$1 - \omega |L_x - N_c|$  应保证粒子在碰集的基础上继续向最小碰集迭代, 故权重  $\omega$  应置小数, 此处选择  $\omega = 0.01$ 。此适应度函数避免了每个粒子的适应度值受种群规模  $P$  的影响, 不仅能够保证粒子不断地朝着碰集迭代, 而且能够保证粒子朝着最小碰集迭代, 有效提高了对有解空间的搜索。

### 2.2 特征学习策略

为了减少对无解空间的搜索迭代, 提出一种“特征学习”的搜索策略<sup>[18-19]</sup>。具体: 在整个迭代搜索过程中, 当  $N_{\text{cx}} / N_c = 1$  时, 则对应的粒子为碰集, 将该粒子装入一个集合, 成为精英集候选。 $p_{\text{min}}$  和  $p_{\text{max}}$  分别表示这个集合的最小长度和最大长度, 碰集长度是指碰集中含“1”的个数。在更新粒子位置后, 若该粒子不是碰集且长度不在  $[p_{\text{min}}, p_{\text{max}}]$ , 则直接进入下一轮循环; 若该粒子不是碰集但长度在  $[p_{\text{min}}, p_{\text{max}}]$  内, 更新个体最优  $g_{\text{best}}$  和全局  $z_{\text{best}}$  后, 进入下一轮循环; 若该粒子是碰集但长度不在  $[p_{\text{min}}, p_{\text{max}}]$  内, 则更新  $[p_{\text{min}}, p_{\text{max}}]$ , 接着更新个体最优  $g_{\text{best}}$  和全局最优  $z_{\text{best}}$  后, 进入下一轮循环; 若该粒子是碰集且长度在  $[p_{\text{min}}, p_{\text{max}}]$  内, 则计算适应度值  $F_{\text{new}}(\mathbf{X})$ , 若  $F_{\text{new}}(\mathbf{X}) = 2$ , 则表示该粒子为最小碰集, 放入精英集; 若  $F_{\text{new}}(\mathbf{X}) \neq 2$ , 则进入最小碰集保证策略<sup>[13]</sup>, 去掉超集, 并将得到的最小碰集装入精英集。

将改进适应度函数和特征学习策略融入到 PSO 求解最小碰集算法中, 命名为 EDPSO, 其流程如图 1 所示。

## 3 MHS 的分层策略

### 3.1 分层可行性分析

多分支节点(三个及三个以上)是配电网拓扑结构的重要组成部分, 决定着配电网拓扑结构的复杂程度<sup>[20-21]</sup>。若能将多分支节点之间区域的元件进行等效, 将大大简化配电网拓扑的结构, 同时为算法分层提供了理论可行性。以两个三分支节点构成的配电网为例, 如图 2 所示, 分析算法分层的理论可行性。

在图 2 中,  $L_{ij}$  表示馈线区段  $i$  的  $j$  相, 对应的阻抗为  $Z_{ij}$ ;  $M_i$  为测量观测点, 测量该点的电压  $U_{ij}$ 、电流  $I_{ij}$ ,  $i \in [1, \dots, 6]$ ,  $j \in [A, B, C]$ 。 $B_{hk}$  表示母线  $h$  的  $k$  相,  $h \in [1, \dots, 4]$ ,  $k \in [A, B, C]$ 。

在系统正常时, 根据基尔霍夫电压定律, 写出馈线区段  $L_{1A}$ 、 $L_{2A}$ 、 $L_{3A}$  的解析冗余关系为

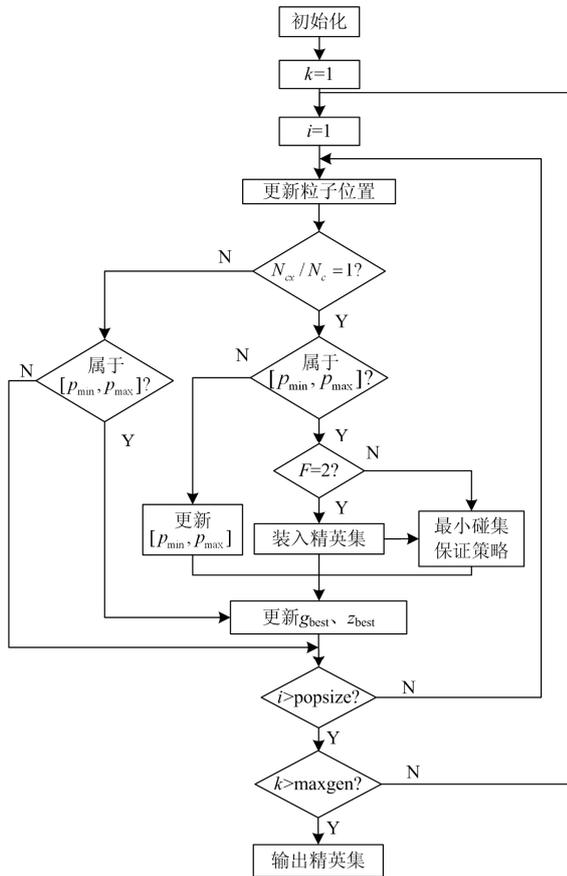


图 1 EDPSO 流程图

Fig. 1 Flow chart of enhanced discrete particle swarm optimization

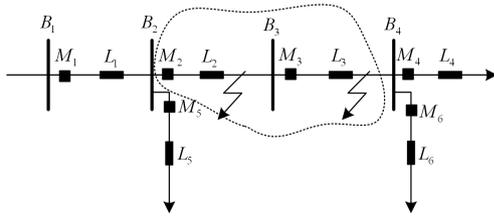


图 2 典型配电网拓扑结构

Fig. 2 Typical topology structure of distribution network

$$U_{2A} - U_{1A} + Z_{1A} I_{1A} = 0 \quad (5)$$

$$U_{3A} - U_{2A} + Z_{2A} I_{2A} = 0 \quad (6)$$

$$U_{4A} - U_{3A} + Z_{3A} I_{3A} = 0 \quad (7)$$

根据基尔霍夫电流定律, 得出各母线  $B_{2A}$ 、 $B_{3A}$ 、 $B_{4A}$  的解析冗余关系为

$$-I_{1A} + I_{2A} + I_{5A} = 0 \quad (8)$$

$$-I_{2A} + I_{3A} = 0 \quad (9)$$

$$-I_{3A} + I_{4A} + I_{6A} = 0 \quad (10)$$

将式(9)与式(10)相加, 得到式(11); 将式(9)代入式(7)消除  $I_3$  后与式(6)相加, 得到式(12)。

$$-I_{2A} + I_{4A} + I_{6A} = 0 \quad (11)$$

$$U_{4A} - U_{2A} + (Z_{2A} + Z_{3A}) I_{2A} = 0 \quad (12)$$

从式(11)、式(12)可以发现: 馈线区段  $L_{2A}$ 、 $L_{3A}$ 、母线  $B_{3A}$ 、 $B_{4A}$  四个基本元件(包含在图 2 中红色虚线区域内)可以合成一个等效元件  $R_A$ , 该元件对应的解析冗余关系就是式(11)、式(12)。

同理, 馈线区段  $L_{2B}$ 、 $L_{3B}$  和母线  $B_{3B}$ 、 $B_{4B}$  可以合成一个等效元件  $R_B$ , 该元件对应的解析冗余关系为式(13)、式(14)。

$$U_{4B} - U_{2B} + (Z_{2B} + Z_{3B}) I_{2B} = 0 \quad (13)$$

$$-I_{2B} + I_{4B} + I_{6B} = 0 \quad (14)$$

同理, 馈线区段  $L_{2C}$ 、 $L_{3C}$  和母线  $B_{3C}$ 、 $B_{4C}$  可以合成一个等效元件  $R_C$ , 该元件对应的解析冗余关系为式(15)、式(16)。

$$U_{4C} - U_{2C} + (Z_{2C} + Z_{3C}) I_{2C} = 0 \quad (15)$$

$$-I_{2C} + I_{4C} + I_{6C} = 0 \quad (16)$$

由于每个测量点通常是将采集的三相电流电压信息一起上传系统, 为了提高故障诊断容错能力, 作出以下定义。

$$U_i = \max [U_{iA}, U_{iB}, U_{iC}] \quad (17)$$

$$I_j = \max [I_{jA}, I_{jB}, I_{jC}] \quad (18)$$

同时由于三相对称,  $Z_{iA} = Z_{iB} = Z_{iC} = Z_i$ , 因此, 式(11)、式(13)、式(15)可以用式(19)表示, 式(12)、式(14)、式(16)可以用式(20)表示。

$$U_4 - U_2 + (Z_2 + Z_3) I_2 = 0 \quad (19)$$

$$-I_2 + I_4 + I_6 = 0 \quad (20)$$

据此,  $R_A$ 、 $R_B$ 、 $R_C$  合成一个等效大元件  $R$ ,  $U_i$ 、 $I_i$  即为等效大元件的观测量, 式(19)、式(20)为等效大元件对应的解析冗余关系。

按此方法, 将整个配电网等效成若干个大元件, 这些等效大元件构成计算最小碰集的第一层对象, 每个等效大元件内部含有的若干个小元件(馈线区段和母线)构成计算最小碰集的第二层对象。这种配电网分层结构为最小碰集算法的分层提供了理论可行性。

### 3.2 分层实现基础

分层 MHS 计算的实现, 需要建立配套的 MBD 的分层诊断模型, 其过程见图 3。因此, 此处对分层 MBD 进行相关介绍。

1) 分层建立 MBD 诊断模型, 即按等效大元件和小元件分别建立解析冗余关系式  $ARRs(R_j)$  和  $ARRs(L_i, B_i)$ 。

2) 利用  $ARRs(R_j)$ 和  $ARRs(L_i, B_i)$ 离线地搜索出各层的  $MCSCs(R_j)$ 和  $MCSCs(L_i, B_i)$ 。

3) 将关于大元件的故障电气信息及等效大元件参数代入  $ARRs(R_j)$ , 计算相对残差, 并根据设定的阈值确定第一层  $MCSs(R_j)$ 。

4) 根据第一层  $MCSs(R_j)$ 求第一层  $MHS(R_j)$ 。由于等效大元件的最小冲突集都是单元件集合, 且每个等效大元件内部所包含的小元件各不相同, 根据  $MHS$  的定义, 得出各个最小冲突集的并集即为较大元件的最小碰集。取并集后, 得到的最小碰集(故障诊断候选)只有一个集合, 根据元件识别的方法可以确定该最小碰集也是故障集。

5) 根据第一层  $MHS(R_j)$ 的结果, 读取故障大元件内部所有故障电气信息及小元件参数代入大元件内部的  $ARRs(L_i, B_i)$ , 计算相对残差, 并根据设定的阈值确定第二层  $MCSs(L_i, B_i)$ 。

6) 基于第二层  $MCSs(L_i, B_i)$ , 利用 EDPSO 算法求解第二层  $MHSs(L_i, B_i)$ 。

7) 依据小元件的先验故障概率计算  $MHSs(L_i, B_i)$ 故障概率, 选择故障概率值较大的  $MHSs(L_i, B_i)$ 作为故障点。

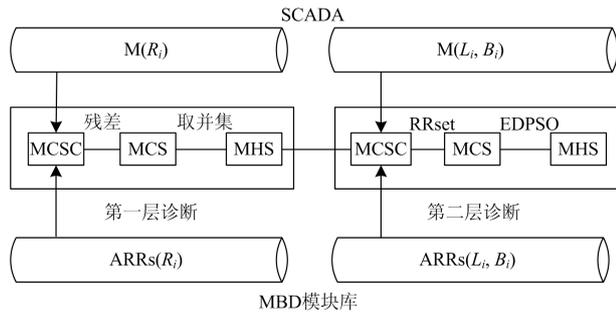


图3 分层 MBD 诊断过程

Fig. 3 Diagnosis process of hierarchical MBD

## 4 MHS 计算流程

根据前文分析, 得出  $MHS$  分层算法的计算流程。

1) 计算第一层最小碰集。读取第一层等效大元件的最小冲突集族  $MCSs(R_j)$ 并对其求并集。

2) 计算第二层最小碰集。根据第一层的计算结果, 读取第一层故障集中各等效大元件内部关于小元件的最小冲突集族  $MCSs(L_i, B_i)$ , 利用 EDPSO 算法依次搜索出关于小元件的最小碰集。

为了与其他算法加以区别, 将这种最小碰集分层算法命名为 HDPSO。HDPSO 的计算流程如图 4 所示。

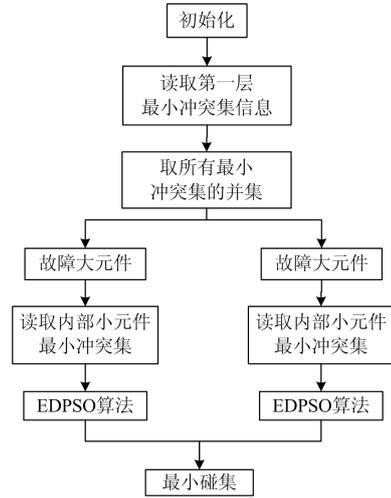


图4 HDPSO 流程图

Fig. 4 Flow chart of hierarchical discrete particle swarm optimization

## 5 算例仿真

### 5.1 最小碰集分层算法流程分析

在 PSCAD 中搭建 14 节点配电网模型进行仿真验证, 如图 5 所示。该模型包含母线  $B_1—B_{14}$ , 馈线区段  $L_{01}—L_{14}$ , 每个区段的阻抗用  $Z_{01}—Z_{14}$  表示, 信息测量点用  $M_1—M_{18}$  表示。该配电网采用架空线和电缆混合线路, 具体参见表 1。

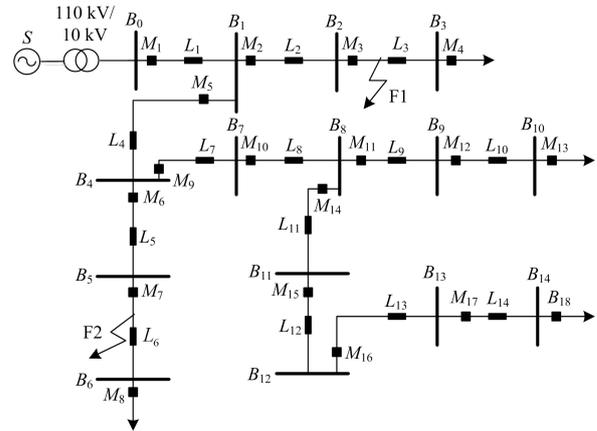


图5 配电网案例分析图

Fig. 5 Case analysis diagram of distribution network

表1 单位长度线路参数

Table 1 Line parameter of unit length				
线路类型	相序	电阻/( $\Omega$ /km)	电感/(mH/km)	电容/( $\mu$ F/km)
架空线	正序	0.170 0	1.210 0	0.009 7
	零序	0.230 0	5.480 0	0.006 0
电缆线	正序	0.193 0	0.422 0	0.143 0
	零序	1.930 0	1.477 0	0.143 0

## 1) 构建分层诊断模型。

根据前面的等效原则, 将整个配电网等效成 7 个等效大元件  $R_1$ — $R_7$ , 每个等效大元件包含的小元件如表 2 所示。

表 2 等效大元件包含的小元件

Table 2 Number of nodes contained in the zone

等效大元件	小元件
$R_1$	$[L_{1A} B_{1A}] [L_{1B} B_{1B}] [L_{1C} B_{1C}]$
$R_2$	$[L_{2A} B_{2A}] [L_{2B} B_{2B}] [L_{2C} B_{2C}]$
$R_3$	$[L_{3A} B_{3A}] [L_{3B} B_{3B}] [L_{3C} B_{3C}]$
$R_4$	$[L_{4A} B_{4A}] [L_{4B} B_{4B}] [L_{4C} B_{4C}]$
$R_5$	$[L_{5A} B_{5A}] [L_{5B} B_{5B}] [L_{5C} B_{5C}]$
$R_6$	$[L_{6A} B_{6A}] [L_{6B} B_{6B}] [L_{6C} B_{6C}]$
$R_7$	$[L_{7A} B_{7A}] [L_{7B} B_{7B}] [L_{7C} B_{7C}]$
	$[L_{8A} B_{8A}] [L_{8B} B_{8B}] [L_{8C} B_{8C}]$
	$[L_{9A} B_{9A}] [L_{9B} B_{9B}] [L_{9C} B_{9C}]$
	$[L_{10A} B_{10A}] [L_{10B} B_{10B}] [L_{10C} B_{10C}]$
	$[L_{11A} B_{11A}] [L_{11B} B_{11B}] [L_{11C} B_{11C}]$
	$[L_{12A} B_{12A}] [L_{12B} B_{12B}] [L_{12C} B_{12C}]$
	$[L_{13A} B_{13A}] [L_{13B} B_{13B}] [L_{13C} B_{13C}]$
	$[L_{14A} B_{14A}] [L_{14B} B_{14B}] [L_{14C} B_{14C}]$

## 第一层解析冗余关系为

$$A_{FL} = \{A_{FL1} - A_{FL7}\} = \left\{ \begin{array}{l} U_2 - U_1 + I_1 Z_1 = 0 \\ U_4 - U_2 + I_2 (Z_2 + Z_3) = 0 \\ U_6 - U_5 + I_5 Z_4 = 0 \\ U_8 - U_6 + I_6 (Z_5 + Z_6) = 0 \\ U_{11} - U_9 + I_9 (Z_7 + Z_8) = 0 \\ U_{13} - U_{11} + I_{11} (Z_9 + Z_{10}) = 0 \\ U_{18} - U_{14} + I_{14} (Z_{11} + Z_{12} + Z_{13} + Z_{14}) = 0 \end{array} \right.$$

## 第二层解析冗余关系为

$$A_{SL1} = \{A_{SL1-1} - A_{SL1-3}\} = \left\{ \begin{array}{l} U_{2A} - U_{1A} + I_{1A} Z_{1A} = 0, U_{1B} - U_{1B} + I_{1B} Z_{1B} = 0 \\ U_{2C} - U_{1C} + I_{1C} Z_{1C} = 0 \end{array} \right.$$

$$A_{SL2} = \{A_{SL2-1} - A_{SL2-6}\} = \left\{ \begin{array}{l} U_{3A} - U_{2A} + I_{2A} Z_{2A} = 0, U_{3B} - U_{2B} + I_{2B} Z_{2B} = 0 \\ U_{3C} - U_{2C} + I_{2C} Z_{2C} = 0, U_{4A} - U_{3A} + I_{3A} Z_{3A} = 0 \\ U_{4B} - U_{3B} + I_{3B} Z_{3B} = 0, U_{4C} - U_{3C} + I_{3C} Z_{3C} = 0 \end{array} \right.$$

$$A_{SL3} = \{A_{SL3-1} - A_{SL3-3}\} = \left\{ \begin{array}{l} U_{6A} - U_{5A} + I_{5A} Z_{4A} = 0, U_{6B} - U_{5B} + I_{5B} Z_{4B} = 0 \\ U_{6C} - U_{5C} + I_{5C} Z_{4C} = 0 \end{array} \right.$$

$$A_{SL4} = \{A_{SL4-1} - A_{SL4-6}\} = \left\{ \begin{array}{l} U_{7A} - U_{6A} + I_{6A} Z_{5A} = 0, U_{7B} - U_{6B} + I_{6B} Z_{5B} = 0 \\ U_{7C} - U_{6C} + I_{6C} Z_{5C} = 0, U_{8A} - U_{7A} + I_{7A} Z_{6A} = 0 \\ U_{8B} - U_{7B} + I_{7B} Z_{6B} = 0, U_{8C} - U_{7C} + I_{7C} Z_{6C} = 0 \end{array} \right.$$

$$A_{SL5} = \{A_{SL5-1} - A_{SL5-6}\} = \left\{ \begin{array}{l} U_{10A} - U_{9A} + I_{9A} Z_{7A} = 0, U_{10B} - U_{9B} + I_{9B} Z_{7B} = 0 \\ U_{10C} - U_{9C} + I_{9C} Z_{7C} = 0, U_{11A} - U_{10A} + I_{10A} Z_{8A} = 0 \\ U_{11B} - U_{10B} + I_{10B} Z_{8B} = 0, U_{11C} - U_{10C} + I_{10C} Z_{8C} = 0 \end{array} \right.$$

$$A_{SL6} = \{A_{SL6-1} - A_{SL6-6}\} = \left\{ \begin{array}{l} U_{12A} - U_{11A} + I_{11A} Z_{9A} = 0, U_{12B} - U_{11B} + I_{11B} Z_{9B} = 0 \\ U_{12C} - U_{11C} + I_{11C} Z_{9C} = 0, U_{13A} - U_{12A} + I_{12A} Z_{10A} = 0 \\ U_{13B} - U_{12B} + I_{12B} Z_{10B} = 0, U_{13C} - U_{12C} + I_{12C} Z_{10C} = 0 \end{array} \right.$$

$$A_{SL7} = \{A_{SL7-1} - A_{SL7-12}\} = \left\{ \begin{array}{l} U_{15A} - U_{14A} + I_{14A} Z_{11A} = 0, U_{15B} - U_{14B} + I_{14B} Z_{11B} = 0 \\ U_{15C} - U_{14C} + I_{14C} Z_{11C} = 0, U_{16A} - U_{15A} + I_{15A} Z_{12A} = 0 \\ U_{16B} - U_{15B} + I_{15B} Z_{12B} = 0, U_{16C} - U_{15C} + I_{15C} Z_{12C} = 0 \\ U_{17A} - U_{16A} + I_{16A} Z_{13A} = 0, U_{17B} - U_{16B} + I_{16B} Z_{13B} = 0 \\ U_{17C} - U_{16C} + I_{16C} Z_{13C} = 0, U_{18A} - U_{17A} + I_{17A} Z_{14A} = 0 \\ U_{18B} - U_{17B} + I_{17B} Z_{14B} = 0, U_{18C} - U_{17C} + I_{17C} Z_{14C} = 0 \end{array} \right.$$

## 2) 确定最小冲突集。

利用上述各层解析冗余关系所隐含的信息, 离线地搜索出系统中所有的最小冲突集候选。设置馈线  $L_6$  处发生单重三相短路故障, 采集的故障电气信息如表 3 所示。

表 3 故障电压和故障电流

Table 3 Fault voltage and fault current

测量点	电压		电流	
	幅值/V	相角/(°)	幅值/A	相角/(°)
$M_{1A}$	8 062.11	-1.58	619.44	-62.71
$M_{1B}$	8 062.11	-121.58	619.44	177.29
$M_{1C}$	8 062.11	-118.42	619.44	57.29
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$M_{9A}$	5 594.25	-3.15	73.13	-33.61
$M_{9B}$	5 594.25	-123.15	73.13	-153.61
$M_{9C}$	5 594.25	116.85	73.13	86.39
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$M_{18A}$	4 884.96	-8.71	36.92	-34.94
$M_{18B}$	4 884.96	-128.71	36.92	-154.94
$M_{18C}$	4 884.96	111.29	36.92	85.06

将采集的关于大元件的测量点  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_4$ 、 $M_5$ 、 $M_6$ 、 $M_8$ 、 $M_9$ 、 $M_{11}$ 、 $M_{13}$ 、 $M_{14}$ 、 $M_{18}$  的故障信息及元件参数代入对应的解析冗余关系, 计算各层约束关系的相对残差, 结果如表 4 所示。

表 4 第一层相对残差

Table 4 Relative residual of first layer

解析冗余关系	残差	最大值	相对残差
$A_{FL1}$	0.245	8 062.11	3.038e-5
$A_{FL2}$	0.124	7 034.39	1.762e-5
$A_{FL3}$	0.345	7 034.39	4.904e-5
$A_{FL4}$	5 524.34	5 594.25	0.987 5
$A_{FL5}$	1.98	5 542.86	3.521e-4
$A_{FL6}$	0.945	5 221.21	1.809e-4
$A_{FL7}$	0.474	5 221.21	9.078e-5

设置残差阈值为 0.2<sup>[14]</sup>。根据表 4 可以确定最小冲突集为  $\{R_4\}$ 。此时最小碰集和故障集都是  $\{R_4\}$ 。

读取  $R_4$  内部测量点  $M_6$ 、 $M_7$ 、 $M_8$  的故障信息, 连同线路参数代入  $A_{SL4-1}$ — $A_{SL4-6}$ , 计算相对残差, 如表 5 所示。

表 5 第二层相对残差

Table 5 Relative residual of second layer

解析冗余关系	残差	最大值	相对残差
$A_{SL4-1}$	2.014	5 594.25	3.6002e-4
$A_{SL4-2}$	1.481	5 594.25	2.6528e-4
$A_{SL4-3}$	0.445	5 594.25	8.133e-5
$A_{SL4-4}$	2 841.42	2 797.51	1.015 4
$A_{SL4-5}$	2 924.15	2 797.51	1.045 1
$A_{SL4-6}$	2 712.58	2 797.51	0.969 8

根据设定的阈值 0.2, 得出第二层最小冲突集族为  $\{[L_{6A}, B_{6A}], [L_{6B}, B_{6B}], [L_{6C}, B_{6C}]\}$ 。

### 3) 求解最小碰集。

设定 HDPSO 的惯性权重为 0.9~0.4, 自学习因子在  $[5, 0.1]$  线性递减, 社会学习因子在  $[0.5, 0.1]$  线性递减, 种群和最大迭代次数都设为 2。依据 HDPSO 算法, 得出最小碰集为

$$H_{SL2} = \left\{ \begin{array}{l} [L_{6A} L_{6B} L_{6C}], [L_{6A} L_{6B} B_{6C}] \\ [L_{6A} B_{6B} L_{6C}], [L_{6A} B_{6B} B_{6C}] \\ [B_{6A} L_{6B} L_{6C}], [B_{6A} L_{6B} B_{6C}] \\ [B_{6A} B_{6B} L_{6C}], [B_{6A} B_{6B} B_{6C}] \end{array} \right\}$$

## 5.2 EDPSO 性能测试

为了验证新的适应度函数和“特征学习”搜索策略的效果, 将所提 EDPSO 与文献[13]中的改进离散粒子群算法 (IDPSO) 进行对比。以集合  $\{[1, \dots, k], \dots, [n, \dots, k+n-1]\}$  为最小冲突集, 求解最小碰集, 其中问题规模  $(k+n-1)$  分别取 5、15、25、...、65。两种算法运行 30 次, 分别统计求解时间、求解准确率, 仿真结果如图 6 和图 7 所示。

从图 6 可以得出, 在相同问题规模下, EDPSO 算法在搜索时间上明显低于 IDPSO, 从而验证了新的适应度函数和“特征学习”搜索策略对提高搜索

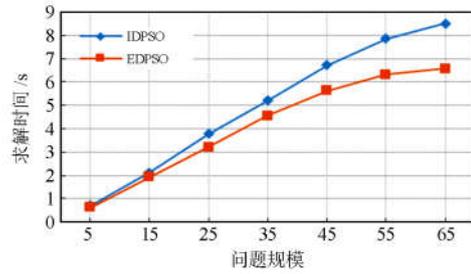


图 6 求解时间对比图

Fig. 6 Contrast diagram of solving time

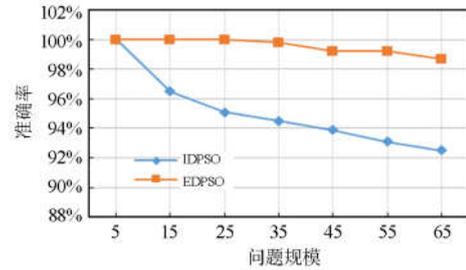


图 7 求解准确率对比图

Fig. 7 Contrast diagram of solving accuracy rate

效率的作用。从图 7 可以得出, 随着问题规模的不断增大, IDPSO 的准确率下降较快, 而 EDPSO 的准确率下降较为缓慢, 据此验证了新的适应度函数和“特征学习”搜索策略对提高搜索准确率的作用。

## 5.3 在 MBD 中的应用对比

为了验证所提最小碰集分层算法(HDPSO)在配电网故障诊断中搜索效率和搜索准确性上的优势, 在  $L_3$  设置单重单相、单重两相、单重三相故障,  $L_3$ 、 $L_6$  设置两重单相故障, 在  $L_3$ 、 $L_6$ 、 $L_{14}$  设置三重单相故障, 并与文献[13]的 IDPSO 进行对比。各运行 30 次, 分别统计粒子维度、最小碰集个数、求解时间、求解准确率, 统计结果如表 6 所示。

表 6 在 MBD 中的性能对比

Table 6 Performance comparison in MBD

对比指标		故障类型				
		单重单相	单重两相	单重三相	两重单相	三重单相
粒子维度	IDPSO	2	4	6	4	6
	HDPSO	2	4	6	2	2
最小碰集个数	IDPSO	2	4	8	4	8
	HDPSO	2	4	6	4	6
求解时间/s	IDPSO	0.104	0.148	0.284	0.154	0.264
	HDPSO	0.102	0.128	0.214	0.109	0.113
求解准确率/%	IDPSO	100	100	99.31	100	99.25
	HDPSO	100	100	100	100	100

在表 6 中, 从粒子维度和最小碰集个数可以看出, 模型分层并不会对单重故障(单重单相到单重三相)造成很大的影响, 但是, 当配电网发生多重故障(两重单相和三重单相)时, 其优势才会显现。

在求解时间和求解准确率上, 可以看出: 所提算法具有更短的求解时间和更高的求解准确率, 并且多重故障下的优势更加明显。在单重故障下, 所提算法之所以具有更短的求解时间, 主要归功于新的适应度函数和“特征学习”搜索策略。在多重故障下, 所提算法在求解时间上的优势相比单重故障更大, 归功于此时模型分层的作用开始突显。

#### 5.4 分析与讨论

最小冲突集搜索直接影响着最小碰集算法的性能。针对配电网内测量观测点位置不变的特征, 将最小冲突集搜索分为离线搜索最小候选冲突集和在线识别最小冲突集两步。当给定一组系统观测信息后, 最小冲突集可由不满足解析冗余关系的最小候选冲突集产生, 这种策略明显减小了在线搜索最小冲突集的范围, 使得故障诊断具有较好的实时性。

在获得最小冲突集的过程中, 最为关键的是确定所获得的观测信息是否有价值以及是否在同一时间断面上。在信息的价值方面, 可以通过增加量测量产生的实时性、相关量测量的信息获取与传输算法的实时性等手段来确保所获得的观测信息是有价值的。在同一时间断面上, 可以采用同步相量测量单元(Phasor Measurement Unit, PMU)和故障录波装置来实现。由于配电网发生故障后, 监控中心收到的故障告警信息不仅反映了保护及断路器装置的动作状态, 更反映了装置是在何时动作, 且由于继电保护的整定配合机制, 告警信息间存在严格的时序约束<sup>[22-23]</sup>。PMU 和故障录波装置安装为利用这种时序约束提供了可能。

传统的配电网故障诊断是在保护和断路器都动作的前提下进行的, 而所提的 MBD 方法是在保护动作后、断路器动作前进行的, 即根据故障发生后保护还未发生动作时的量测量, 识别出可能的故障元件, 具有一定的预警功能。

## 6 结论

在提高 MBD 诊断效率和准确率上, 所提的改进最小碰集算法具有更强的适用性, 具体表现如下。

1) 最小碰集分层算法利用加权适应度函数, 保证了粒子不断地朝着最小碰集迭代, 提高了对有解空间的搜索效率。

2) 利用“特征学习”的搜索策略, 减少了对无解空间的搜索。

3) 当配电网的单重单相故障扩大成多重单相故障时, 模型的分层使得最小碰集计算的优势更加明显。

模型的分层虽然增加了算法的复杂性, 但是由于分层的建模只在离线过程进行, 并且第一层的碰集计算只需要对所有冲突集取并集, 并不占用过多的时间, 所以模型分层并不会给算法带来多大的困扰。相反, 模型分层大幅提高多重故障下的求解时间, 同时在一定程度上还可以提高算法的准确率和容错能力。因此总体来说, 新的适应度函数和特征学习策略有效提高了单重故障下的求解性能。当概率比较小的多重故障发生时, 模型分层也有效保障了其计算优势。

#### 参考文献

- [1] 孙顺祥, 李晓明, 刘振盛, 等. 计及电压稳定性评估的配电网 DG 选址定容的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 88-94.  
SUN Shunxiang, LI Xiaoming, LIU Zhensheng, et al. Research on locating and sizing of DG in the distribution network considering voltage stability assessment[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 88-94.
- [2] 王志涛, 武志刚, 高厚磊, 等. 重合闸与低电压穿越相配合的有源配电网故障恢复方案[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 81-87.  
WANG Zhitao, WU Zhigang, GAO Houlei, et al. A fault recovery scheme cooperating with reclosing and LVRT for active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 81-87.
- [3] WANG Qiuji, JIN Tao, MOHAMED M A. An innovative minimum hitting set algorithm for model-based fault diagnosis in power distribution network[J]. IEEE Access, 2019, 5: 1-10.
- [4] ZHOU G, FENG W, JIANG B, et al. Computing minimal hitting set based on immune genetic algorithm[J]. International Journal of Modelling, Identification and Control, 2014, 21(1): 93-100.
- [5] HU K, LIU Z, HUANG K, et al. Improved differential evolution algorithm of model-based diagnosis in traction substation fault diagnosis of high-speed railway[J]. IET Electrical Systems in Transportation, 2016, 6(3): 163-169.
- [6] WOTAWA F. A variant of reiter's hitting set algorithm[J]. Information Processing Letters, 2001, 79(1): 45-51.
- [7] DARWICHE A. Model-based diagnosis using structured system descriptions[J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 1998, 8(4): 165-222.
- [8] 姜云飞, 林笠. 用布尔代数计算最小碰集[J]. 计算机学报, 2003, 26(8): 920-924.  
JIANG Yunfei, LIN Li. The computation of hitting sets with Boolean formulas[J]. Chinese Journal of Computers, 2003, 26(8): 920-924.

- [9] 张楠, 孙吉贵, 赵祥福, 等. 求最小碰集的遗传算法[J]. 广西师范大学学报, 2006, 24(4): 62-65.  
ZHANG Nan, SUN Jigui, ZHAO Xiangfu, et al. Computing minimal hitting sets with genetic algorithm[J]. Journal of Guangxi Normal University, 2006, 24(4): 62-65.
- [10] 蒋荣华, 天书林, 龙兵. 基于 DPSO 最小碰集算法的掩盖故障识别[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(4): 997-1001.  
JIANG Ronghua, TIAN Shulin, LONG Bing. Minimal hitting sets algorithm of identifying masking false failure sets based on DPSO[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(4): 997-1001.
- [11] 石宇, 王岩, 刘扬, 等. 基于改进离散差分进化算法的多故障最小碰集生成技术[J]. 电子测量技术, 2016, 39(8): 16-23.  
SHI Yu, WANG Yan, LIU Yang, et al. Generation of minimal hitting set for multiple fault diagnosis based on enhanced discrete differential evolution algorithm[J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(8): 16-23.
- [12] 戴晨曦, 刘志刚, 胡柯挺, 等. 基于模型与模糊 Petri 网融合的高铁牵引变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 26-32.  
DAI Chenxi, LIU Zhigang, HU Keting, et al. Fault diagnosis for traction transformer of high speed railway on the integration of model-based diagnosis and fuzzy Petri nets[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 26-32.
- [13] 刘志刚, 钟炜, 邓云川, 等. 牵引变电站故障的基于模型诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(34): 36-41.  
LIU Zhigang, ZHONG Wei, DENG Yunchuan, et al. Electric railway substation diagnosis with model based method[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(34): 36-41.
- [14] 关龙, 刘志刚, 何士玉, 等. 离散二进制粒子群算法在基于模型配电网故障诊断中的应用[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(9): 89-92.  
GUAN Long, LIU Zhigang, HE Shiyu, et al. Application of BPSO algorithm in model based fault diagnosis of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(9): 89-92.
- [15] 关龙, 刘志刚, 徐建芳, 等. 基于模型的配电网故障诊断关键问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(20): 145-150.  
GUAN Long, LIU Zhigang, XU Jianfang, et al. Key issues with model based diagnosis in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(20): 145-150.
- [16] 胡非, 刘志刚, 范福强, 等. 配电网线路故障的基于模型诊断方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10): 56-60.  
HU Fei, LIU Zhigang, FAN Fuqiang, et al. Distribution network line fault diagnosis with model based method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(10): 56-60.
- [17] LIU Zhigang, HU Keting. A model-based diagnosis system for traction power supply system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(6): 2834-2843.
- [18] 邵翔, 郭谋发, 游林旭. 基于改进 DTW 的接地故障波形互相关度聚类选线方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11): 63-71, 78.  
SHAO Xiang, GUO Moufa, YOU Linxu. Faulty line selection method using mutual correlation cluster of grounding fault waveforms based on improved DTW method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 63-71, 78.
- [19] 刘娟, 欧阳丹彤, 王艺源, 等. 结合特征学习的粒子群求解最小碰集方法[J]. 电子学报, 2015, 43(5): 841-845.  
LIU Juan, OUYANG Dantong, WANG Yiyuan, et al. Computing minimal hitting sets with particle swarm optimization combined characteristics learning[J]. Acta Electronics Sinica, 2015, 43(5): 841-845.
- [20] 肖伟栋, 夏明超, 唐念. 考虑多 DG 接入的配电网区域保护新方案[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 34(9): 103-109.  
XIAO Weidong, XIA Mingchao, TANG Nian. A new regional protection scheme for distribution network considering the introduction of multi-DGs[J]. Power System Protection and Control, 2014, 34(9): 103-109.
- [21] 杨磊, 杨晓辉, 吴越, 等. 基于改进猫群算法的分布式电源优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 95-100.  
YANG Lei, YANG Xiaohui, WU Yue, et al. Research on optimized distributed generations locating based on modified cat swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 95-100.
- [22] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 有限广域继电保护系统的分区原则与实现方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(19): 48-52.  
LI Zhenxing, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Zone division and implementation on limited wide area protection system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 48-52.
- [23] 张岩, 张勇, 文福拴, 等. 容纳时序约束的改进模糊 Petri 网故障诊断模型[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(5): 66-72.  
ZHANG Yan, ZHANG Yong, WEN Fushuan, et al. Power system fault diagnosis with an enhanced fuzzy Petri net accommodating temporal constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(5): 66-72.

收稿日期: 2019-05-30; 修回日期: 2019-09-24

作者简介:

林梅芬(1975—), 女, 硕士, 副教授, 研究方向为电力系统稳定控制与故障诊断; E-mail: 63790528@qq.com

陈婷(1986—), 女, 通信作者, 硕士, 副教授, 研究方向为配电系统故障诊断和电力人工智能。E-mail: 313233745@qq.com

(编辑 许威)