

# 一种配电网基于模型诊断的专属最小碰集算法

陈 婷<sup>1,2</sup>, 朱文强<sup>2</sup>, 林梅芬<sup>2</sup>, 王秋杰<sup>1</sup>

(1. 福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350116;  
2. 福建水利电力职业技术学院, 福建 永安 366000)

**摘要:** 现有配电网故障诊断的最小碰集算法由于没有考虑配电网的拓扑结构特点,导致其求解速度和准确率不高,对此,提出了一种仅适用于配电网故障的改进最小碰集算法。该算法首先分析了现有各适应度函数的特点,通过加权融合的方式构建出一种新适应度函数。其次,通过分析配电网的拓扑结构,得出配电网故障的最小冲突集之间没有交集的特点,并利用该特点,提出了最小碰集判据。最后,算例分析结果表明,所提最小碰集算法在求解速度上都有较大提高,在求解准确率上略微上升,且更加适合配电网故障的基于模型诊断。

**关键词:** 配电网; 故障诊断; 基于模型诊断; 最小碰集算法; 加权组合; 配电网拓扑结构

**DOI:** 10.12067/ATEEE1906008      **文章编号:** 1003-3076(2020)07-0072-09      **中图分类号:** TM315

## 1 引言

配电网是电力系统的重要组成部分,若其发生故障,将严重影响供电可靠性和人们的正常生活,因此,配电网故障诊断具有重大意义<sup>[1,2]</sup>。在现有的故障诊断方法中,基于模型诊断(Model-Based Diagnosis, MBD)具有智能性,不依赖专家经验,已成为一种重要的诊断方法<sup>[3,4]</sup>。

基于模型诊断主要有以下几个步骤:离线建立系统元件集合、找出最小冲突集合的候选,在线识别最小冲突集、计算最小碰集、故障模式识别。其中,在线计算最小碰集最为复杂、实耗最长,是影响整个基于模型诊断实时性的关键。因此,许多学者对最小碰集算法进行了研究。

人工智能领域专家 Reiter 在 1987 年首次给出计算碰集的算法 HS-TREE<sup>[5]</sup>。后来, BHS-TREE<sup>[6]</sup>、Boolean<sup>[7]</sup>等方法相继被提出。但是,由于以上方法大都基于树或图,数据结构复杂且计算量大,不适合求解大规模的碰集问题。于是基于智能优化算法的最小碰集算法成为发展趋势,这些方法主要包括 GA<sup>[8]</sup>、BPSO<sup>[9]</sup>、DE<sup>[10]</sup>、IGA<sup>[11]</sup>等。虽然这些智能算

法已经应用到很多实际问题当中<sup>[12,13]</sup>,在配电系统中的应用也很多<sup>[14-17]</sup>,但是这些方法都是普适性的,都只是单纯地将普适性的最小碰集算法应用到各个故障诊断中,并没有考虑实际问题的具体特点。因此,极大限制了求解速度和准确率的提高。

若能将每个实际问题的特性考虑进去,形成每个问题所特有的最小碰集算法,求解速度和准确率将得到较大提高。本文正是基于此思想,在最小碰集算法中考虑配电网拓扑结构特点,提出了一种只适用于配电网故障诊断的最小碰集算法。该算法首先分析了现有三类适应度函数的特点,通过加权融合,使构建的新适应度函数集中了三类适应度函数的优点,即粒子直接朝着最小碰集迭代并且不受非碰集粒子的影响。在此基础上,通过分析配电网的拓扑结构,得出配电网故障的最小冲突集族的特点:最小冲突集之间没有交集。根据此特点,提出了最小碰集判据。利用新的适应度函数和最小碰集判据,可直接选出最小碰集粒子,不再需要最小碰集保证策略的参与。因此,最小碰集的求解速度大幅提高,准确率略微上升。

收稿日期: 2019-06-04  
基金项目: 国家自然科学基金项目(61304260)  
作者简介: 陈 婷(1985-),女,福建籍,讲师,硕士,研究方向为配电网故障诊断及人工智能算法等;  
王秋杰(1988-),男,湖北籍,博士研究生,研究方向为电力人工智能、配电网故障诊断。

## 2 MBD 相关基本理论

### 2.1 MBD 基于一致性推理理论

在 MBD 系统中,三元组(SD, OBS, COMP)描述了整个诊断的模型建立过程,其中 SD 表示系统描述, OBS 表示系统的观测量值,一阶语句, COMP 表示系统元件集合。此外 MBD 还涉及到一些基本概念:

(1) 冲突集(Conflict Set, CS)。表示元件集合中与观测量相冲突的元件集合。一个集合  $C$  为一个冲突集的条件如下:

$$\begin{cases} C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\} \subseteq COMPS \\ \{SD \cup OBS \cup \{\sim AB(c_1), \dots, \sim AB(c_n)\}\} inconformity \end{cases}$$

其中,若冲突集  $C$  的任意真子集都不是冲突集,那么该冲突集就是最小冲突集(Minimum Conflict Set, MCS)。

(2) 碰集(Hitting Set, HS)。碰集表示与每个冲突集之间都有共同元素的集合,其需要满足条件如下:

$$\begin{cases} H \subseteq \cup C_i \quad i = 1, 2, \dots, n \\ \forall C_i \in MCSs, H \cap C_i \neq \emptyset \end{cases}$$

其中,若碰集  $H$  的任意真子集都不是碰集,那么它是一个最小碰集(Minimum Hitting Set, MHS)。

### 2.2 基于 MBD 的配电网故障诊断步骤

基于 2.1 节的理论,得出配电网故障诊断步骤<sup>[18]</sup>如图 1 所示。具体如下:

#### (1) 系统划分

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,利用现有的配电网自动化装置 FTU(Feeder Terminal Units)采集相关电气量。根据测量点位置,将配电网划分为多个子系统。

#### (2) 建立系统模型

通过描述各个子系统中独立元件的约束关系即解析冗余关系,建立整个配电网的诊断模型。

#### (3) 搜索最小冲突集候选

利用已知约束关系所隐含的信息,离线地搜索出各个子系统的最小冲突集候选。

#### (4) 识别最小冲突集

采集故障发生后、断路器动作前的电气信息,并将采集的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,并得到最小冲突集。

#### (5) 计算最小碰集

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) 最小碰集故障概率排序

根据元件的故障概率计算所有最小碰集的故障概率并排序。根据最小碰集的故障概率的顺序依次对各个最小碰集进行故障辨识。

#### (7) 故障模式辨识

建立不同故障类型(接地、断线)下的解析冗余关系,得到故障下的配电网模型,基于溯因诊断判别故障类型。

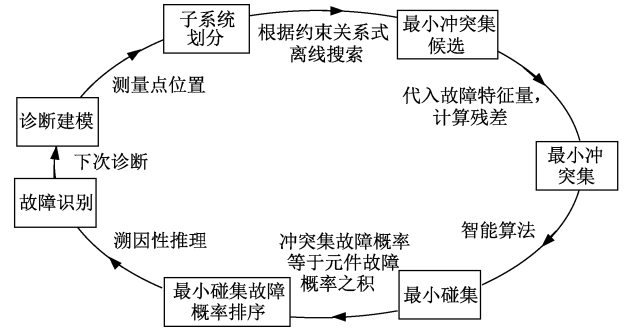


图 1 基于 MBD 的配电网故障诊断步骤

Fig.1 Fault diagnosis steps of distribution network based on MBD

## 3 最小碰集算法分析

### 3.1 配电网最小冲突集特点分析

根据基于 MBD 的配电网故障诊断步骤可知,获得配电网故障下的最小冲突集是计算最小碰集的前提,而最小冲突集与配电网的拓扑结构息息相关,因此,以两个三分支节点构成的配电网为例,如图 2 所示,分析配电网最小冲突集的特点。

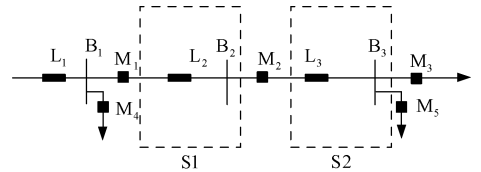


图 2 典型配电网拓扑结构

Fig.2 Typical topology structure of distribution network

图 2 中,  $L_i$  表示区段线路,对应的阻抗为  $Z_i$ ;  $B_i$  表示区段母线;  $M_i$  表示测量点,主要采集该点的电压  $U_i$  和电流  $I_i$ 。

根据 MBD 的基本原理,相邻的测量点之间可以划分为一个独立的子系统,那么图 2 可以划分为两

个子系统 S1、S2。

在系统正常时,根据基尔霍夫定律,写出子系统 S1 和 S2 的 A 相解析冗余关系为:

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

$$U_{3A} - U_{2A} + Z_{3A}(I_{3A} + I_{5A}) = 0 \quad (2)$$

式(1)、式(2)支持环境为  $[L_{2A}, B_{2A}]$ ,  $[L_{3A}, B_{3A}]$ , 舍弃任何一个元件都会导致两式不成立。于是,  $L_{2A}$ 、 $B_{2A}$ 、 $L_{3A}$ 、 $B_{3A}$  四个元件都为基本元件, 所以  $[L_{2A}, B_{2A}]$ ,  $[L_{3A}, B_{3A}]$  为最小支持环境, 即最小冲突集候选<sup>[3]</sup>。当子系统 S1、S2 的 A 相发生故障时, 根据式(1)、式(2)计算相对残差<sup>[14]</sup>, 得出两子系统的 A 相最小冲突集:  $[L_{2A}, B_{2A}]$ ,  $[L_{3A}, B_{3A}]$ 。

同理, 写出子系统 S1、S2 的 B 相解析冗余关系为:

$$U_{2B} - U_{1B} + Z_{2B}I_{2B} = 0 \quad (3)$$

$$U_{3B} - U_{2B} + Z_{3B}(I_{3B} + I_{5B}) = 0 \quad (4)$$

当子系统 S1、S2 的 B 相发生故障时, 得到 B 相的最小冲突集为:  $[L_{2B}, B_{2B}]$ ,  $[L_{3B}, B_{3B}]$ 。

同理, 写出系统 S1、S2 的 C 相解析冗余关系为:

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

$$U_{3C} - U_{2C} + Z_{3C}(I_{3C} + I_{5C}) = 0 \quad (6)$$

当子系统 S1、S2 的 C 相发生故障时, 得到 C 相的最小冲突集为:  $[L_{2C}, B_{2C}]$ ,  $[L_{3C}, B_{3C}]$ 。

于是, 当子系统 S1 和子系统 S2 的三相都发生故障时, 得到的最小冲突集族为:  $\{[L_{2A}, B_{2A}][L_{3A}, B_{3A}][L_{2B}, B_{2B}][L_{3B}, B_{3B}][L_{2C}, B_{2C}][L_{3C}, B_{3C}]\}$ , 很明显各最小冲突集之间没有交集。

由于配电网的辐射型结构, 导致划分的各子系统之间没有相同的元件, 那么各子系统得到的各最小冲突集族之间也不可能没有交集。

综上所述, 可以得出以下结论: 配电网故障下获得的所有最小冲突集之间没有交集。

### 3.2 适应度函数

在文献[9]中, 最小碰集算法采用的适应度函数为:

$$\max Fit1(X) = \frac{N_{CX}}{N_C} \quad (7)$$

式中,  $N_{CX}$  表示在最小冲突集族  $C$  中, 与当前粒子  $X$  有交集的冲突集数量;  $N_C$  表示最小冲突集族  $C$  中的冲突集数量。

在文献[10]中, 最小碰集算法采用的适应度函数为:

$$\min Fit2(X) = 1 - \frac{N_{CX}}{N_C} \quad (8)$$

以上两种适应度函数在本质上一样, 都具有以下特点: ①  $N_{CX}/N_C$  能够使粒子稳定地朝着碰集迭代, 但是, 却不能使粒子朝着最小碰集迭代; ②能有效避免非碰集粒子的影响。

在文献[11]中, 最小碰集算法采用的适应度函数为:

$$\max Fit3(X) = \frac{N_{CX}}{L_X} \quad (9)$$

式中,  $L_X$  表示粒子  $X$  的长度, 即粒子中含“1”的个数。该适应度函数具有以下特点: ①  $N_{CX}/L_X$  不仅可以使粒子朝着碰集迭代, 而且还可以使粒子朝着最小碰集迭代; ②不能避免非碰集粒子影响。

为了使粒子直接朝着最小碰集迭代且不受种群和非碰集粒子的影响, 通过加权的方式将三类适应度函数的优点集合在一起, 同时弥补适应度函数的不足, 构建出一种新的适应度函数:

$$\min Fit(X) = (1 - \frac{N_{CX}}{N_C}) + \omega_0 L_X \quad (10)$$

式中,  $\omega_0$  为权重系数。从该适应度函数的结构来看,  $1 - N_{CX}/N_C$  能够保证粒子向碰集方向迭代, 在其后面加上  $\omega_0 L_X$  是为了使粒子在碰集的基础上继续向最小碰集迭代, 因此, 权重  $\omega_0$  要比  $1 - N_{CX}/N_C$  小一个数量级; 由于  $L_X$  容易受非碰集粒子的影响, 为了使  $\omega_0 L_X$  不受非碰集粒子的影响, 权重  $\omega_0$  也要比  $1 - N_{CX}/N_C$  小一个数量级。

由于配电网中最复杂的故障为三重三相故障, 则最小冲突集族的集合个数最大为 9 个, 因此  $1 - N_{CX}/N_C$  的最小间隔  $1/N_C$  为  $1/9 \approx 0.1$ , 因此, 权重  $\omega_0$  应设置为 0.01<sup>[19,20]</sup>。

为了更好地理解以上三类适应度函数的特点, 根据配电网的最小冲突集的特点, 假设配电网故障下获得的最小冲突集族  $C$  为:

$$C = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

由于最小冲突集的维度为 4, 于是设置智能算法中寻优迭代的粒子为  $X = [x_1, \dots, x_4]$ , 所有可能的粒子为:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \\ X_7 \\ X_8 \\ X_9 \\ X_{10} \\ X_{11} \\ X_{12} \\ X_{13} \\ X_{14} \\ X_{15} \\ X_{16} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

根据最小碰集的定义可知,粒子  $X_1 \sim X_7$  为非碰集粒子,粒子  $X_8 \sim X_{12}$  为碰集,  $X_{13} \sim X_{16}$  为最小碰集。分别利用适应度函数  $Fit1(\mathbf{X})$ 、 $Fit2(\mathbf{X})$ 、 $Fit3(\mathbf{X})$ 、 $Fit(\mathbf{X})$  计算各粒子的适应度值,其结果如表 1 所示。

表 1 适应度值对比

Tab.1 Fitness value comparison

粒子类型	粒子	$Fit1$	$Fit2$	$Fit3$	$Fit$
Non-HS	$X_1$	0	1	—	1.01
	$X_2$	0.5	0.5	1	0.51
	$X_3$	0.5	0.5	1	0.51
	$X_4$	0.5	0.5	1	0.51
	$X_5$	0.5	0.5	1	0.51
	$X_6$	0.5	0.5	0.5	0.52
	$X_7$	0.5	0.5	0.5	0.52
HS	$X_8$	1	0	0.667	0.03
	$X_9$	1	0	0.667	0.03
	$X_{10}$	1	0	0.667	0.03
	$X_{11}$	1	0	0.667	0.03
	$X_{12}$	1	0	0.5	0.04
MHS	$X_{13}$	1	0	1	0.02
	$X_{14}$	1	0	1	0.02
	$X_{15}$	1	0	1	0.02
	$X_{16}$	1	0	1	0.02

从表 1 可以看出,适应度函数  $Fit1(\mathbf{X})$  和  $Fit2(\mathbf{X})$  无法从适应度值上区分碰集粒子和最小碰集粒子;  $Fit3(\mathbf{X})$  能够区分碰集粒子和最小碰集粒子,但是容易受非碰集粒子  $X_2 \sim X_5$  的影响。本文

所提的适应度函数  $Fit(\mathbf{X})$  不仅能够在适应度值上区分碰集和最小碰集粒子,而且不受非碰集粒子的影响。

3.3 最小碰集判据

基于配电网故障下最小冲突集之间没有交集的特点,可以发现得到的每个最小碰集具有以下特点:

$$L_{MHS} = N_c \quad (13)$$

式中,  $L_{MHS}$  为最小碰集的长度,即最小碰集中“1”的数量。

根据式(10)可以得出,非碰集与碰集(包括最小碰集)的适应度值不在同一个数量级上,因此,很容易在适应度值上分辨出非碰集和碰集(包括最小碰集)。在粒子是碰集的情况下,式(10)中的  $1 - N_{CX}/N_c = 0$ , 于是碰集和最小碰集之间的界限就是  $\omega_0 L_X$ 。

在粒子是碰集的情况下,根据碰集和最小碰集的定义,可以得出:

$$\begin{cases} L_X > L_{MHS} \Rightarrow \text{HS} \\ L_X = L_{MHS} \Rightarrow \text{MHS} \end{cases} \quad (14)$$

根据式(13)、式(14),并结合适应度函数式(10),得出  $Fit(\mathbf{X})$  最小碰集的判据:

$$\begin{cases} Fit(\mathbf{X}) > \omega_0 N_c \Rightarrow \text{non-MHS} \\ Fit(\mathbf{X}) = \omega_0 N_c \Rightarrow \text{MHS} \end{cases} \quad (15)$$

从式(15)中可以得出  $N_c = 2$ , 则  $\omega_0 N_c = 0.02$ , 如表 1 所示,  $\omega_0 N_c$  可以在适应度值上直接判别出 MHS 粒子。

4 最小碰集算法流程

本文采用粒子群算法 BPSO 进行寻优迭代<sup>[14]</sup>, 其中采用式(10)为适应度函数,式(15)为最小碰集判据。将所提算法命名为 EBPSO。具体最小碰集算法的流程如下:

- (1) 读取最小冲突集族  $\mathbf{C}$ 。
- (2) 参数初始化。BPSO 参数初始化包括:最大迭代次数  $G_{\max}$ 、种群规模  $popsiz$ e、惯性权重  $\omega$ , 学习因子  $c_1$  和  $c_2$ ; 根据  $\mathbf{C}$  确定粒子维度  $D$ ; 随机赋值种群  $\mathbf{X}$ , 并计算每个粒子的适应度值,得到初始个体最优  $p_{\text{best},d}^k$  和初始全局最优  $g_{\text{best},d}^k$ 。
- (3) 更新式(16)~式(18)粒子群的速度和位置:

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 \xi_1 (p_{\text{best},d}^k - x_{id}^k) + c_2 \xi_2 (g_{\text{best},d}^k - x_{id}^k) \quad (16)$$



$$x_{id}^{k+1} = \begin{cases} 1 & r_{id}^{k+1} < \text{sigmoid}(v_{id}^{k+1}) \\ 0 & r_{id}^{k+1} \geq \text{sigmoid}(v_{id}^{k+1}) \end{cases} \quad (17)$$

$$\text{sigmoid}(v_{id}^{k+1}) = \begin{cases} 0.98 & v_{id}^{k+1} > 4 \\ 1/(1 + e^{-v_{id}^{k+1}}) & -4 \leq v_{id}^{k+1} \leq 4 \\ -0.98 & v_{id}^{k+1} < -4 \end{cases} \quad (18)$$

- (4)根据式(10)计算其适应度值;其中根据冲突集族  $C$  确定参数  $N_C$ 。
- (5)根据式(15)判定最小碰集。若全局最优的适应度值  $Fit(x_{gbest}) = \omega N_C$ , 则将最小碰集的粒子添加到精英集;若  $Fit(x_{gbest}) \neq \omega N_C$ , 则进入步骤(6)。
- (6)更新个体最优和粒子群的全局最优。
- (7)若达到最大迭代次数,算法终止,并将精英集输出。具体流程如图 3 所示。

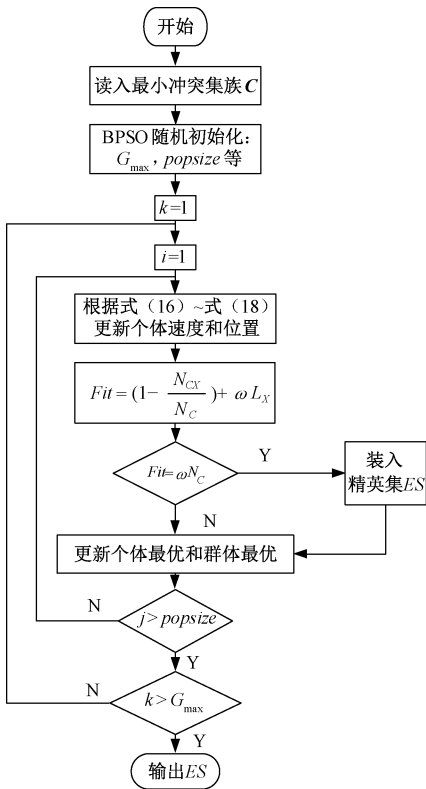


图 3 最小碰集算法的流程图

Fig.3 Flow chart of minimum hitting sets algorithm

5 算法性能测试

为了测试新适应度函数和最小碰集判据对 MHS 算法的性能影响,将 GA<sup>[8]</sup>、BPSO<sup>[9]</sup>、DE<sup>[10]</sup>、IGA<sup>[11]</sup> 四种方法采用新适应度函数和最小碰集判据,并命名为:IGA(improved GA)、IBPSO(improved BPSO)、IDE(improved DE)、IIGA(improved IGA)。

将改进后的四种方法与文献[8-11]中的四种方法进行对比。在对比中,考虑到配电网故障的最小冲突集之间没有交集的特点,将测试最小冲突集族设置为[1, 2, ..., m], [m+1, m+2, ..., 2m], ..., [nm+1, nm+2, ..., (n+1)m]。令 n=4, m=1, 2, ..., 5, 分别统计新旧四种方法的求解时间和计算准确率(实际获得 MHS 数/理论 MHS 数)结果如图 4 和表 2 所示。

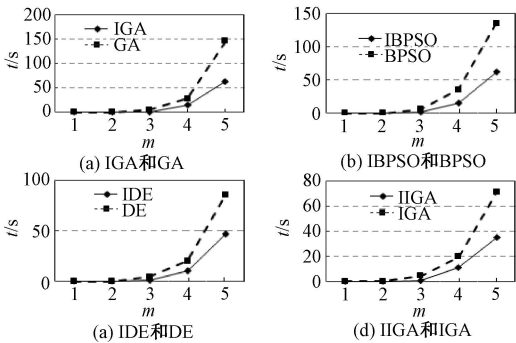


图 4 求解时间对比图

Fig.4 Contrast diagram of solving time

表 2 准确率对比

Tab.2 Comparison of accuracy rate  
(单位:(%))

m	1	2	3	4	5
GA	100	100	95.4	93.4	91.2
IGA	100	100	96.3	95.01	94.3
BPSO	100	100	94.1	92.1	90.1
IBPSO	100	100	95.2	94.2	93.4
DE	100	100	95.5	93.4	92.2
IDE	100	100	94.2	94.1	93.8
IGA	100	100	95.4	93.4	90.1
IIGA	100	100	96.8	94.2	93.4

从图 4 和表 2 可以看出,采用新适应度函数和最小碰集判据的 IGA、IBPSO、IDE、IIGA 无论在求解时间上还是在准确率上都比 GA、BPSO、DE、IGA 更好。

求解时间更短的原因在于,四种改进的方法采用的都是新的适应度函数和新的最小碰集判据,其可以直接得到最小碰集,而不再需要最小碰集保证策略;而四种原有方法没有采用新的适应度函数和最小碰集判据,因此,只能先找出碰集,然后通过最小碰集保证策略在碰集中找出最小碰集,所以整个过程必须有最小碰集保证策略的参与。由于最小碰集保证策略采用的是遍历法,因此,最小碰集保证策略非常耗时。同时问题规模越大,其耗时时间越长,

这点可以从图 4 中反映出来。

求解准确率上升的原因在于:相同问题规模下,改进后的四种方法需要寻找的对象是理论最小碰集数,原有的四种方法需要寻找的对象是理论碰集数。理论最小碰集数比理论碰集数要小很多,如表 3 所示。故改进后的四种方法寻优对象减少,更容易找出全部对象。此外,问题规模越大,准确率提升的幅度也就越大,这点可以从表 2 中反映出来。

表 3 最小碰集与碰集数量对比

Tab.3 Comparison of the number of HS and MHS			
<i>m</i>	问题规模	MHS 数量	HS 数量
1	5	15	15
2	10	25	35
3	15	35	75
4	20	45	155
5	25	55	315

6 配电网算例分析

为了验证本文所提算法比其他算法更加适合配电网故障的基于模型诊断,将本文所提方法应用到配电网故障诊断中,并与其他方法进行比较。在 PSCAD 中搭建 14 节点配电网模型,如图 5 所示。对最小碰集算法进行仿真验证。该模型包含区段母线  $B_1 \sim B_{14}$ ,区段线路  $L_1 \sim L_{14}$ ,每个区段线路的阻抗用  $Z_1 \sim Z_{14}$  表示。信息测量点有 21 个,分别通过 FTU 采集各开关处的电流和电压信息,其中测量点  $M_1、M_{19}、M_{20}、M_{21}$  处设备为断路器, $M_4、M_{13}$  处设备为联络开关,其余测量点为分段开关。

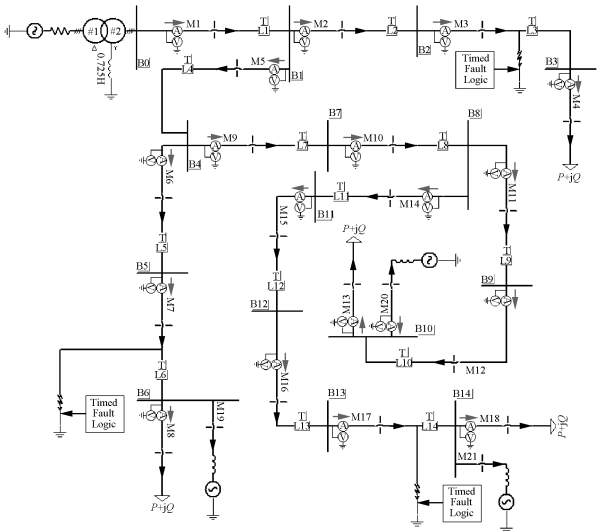


图 5 配电网算例分析图

Fig.5 Case analysis diagram of distribution network

在故障发生前,根据 18 个测量点将配电网划分为 14 个子系统,得出每个子系统的解析冗余关系,并搜索出各子系统的<sub>最小冲突集候选</sub>,如表 4 所示。

表 4 各子系统最小冲突集候选

Tab.4 Minimum conflict set candidate of subsystems		
子系统	解析冗余关系	<i>MCSC</i>
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
S3	$U_{4A}-U_{3A}+Z_{3A}I_{4A}=0$	$[L_{3A},B_{3A}]$
	$U_{4B}-U_{3B}+Z_{3B}I_{4B}=0$	$[L_{3B},B_{3B}]$
	$U_{4C}-U_{3C}+Z_{3C}I_{4C}=0$	$[L_{3C},B_{3C}]$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
S6	$U_{8A}-U_{7A}+Z_{6A}(I_{8A}-I_{19A})=0$	$[L_{6A},B_{6A}]$
	$U_{8B}-U_{7B}+Z_{6B}(I_{8B}-I_{19B})=0$	$[L_{6B},B_{6B}]$
	$U_{8C}-U_{7C}+Z_{6C}(I_{8C}-I_{19C})=0$	$[L_{6C},B_{6C}]$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
S14	$U_{18A}-U_{17A}+Z_{14A}(I_{18A}-I_{21A})=0$	$[L_{14A},B_{14A}]$
	$U_{18B}-U_{17B}+Z_{14B}(I_{18B}-I_{21B})=0$	$[L_{14B},B_{14B}]$
	$U_{18C}-U_{17C}+Z_{14C}(I_{18C}-I_{21C})=0$	$[L_{14C},B_{14C}]$

在  $L_3、L_6、L_{14}$  分别设置单相、两相、三相短路故障,采集故障电压、电流信息并代入对应的解析冗余关系计算相对残差<sup>[16]</sup>。设定残差的<sub>阈值</sub>为 0.4,若相对残差大于<sub>阈值</sub>,则对应的<sub>最小冲突集候选</sub>即为<sub>最小冲突集</sub><sup>[17]</sup>。表 5 为  $L_3$  发生三相短路故障时的残差数据,从表 5 中可以判定出  $MCSC=\{[L_{3A},B_{3A}][L_{3B},B_{3B}][L_{3C},B_{3C}]\}$ 。其他故障类型的残差求解与此类似,本文不再论述。

表 5 单重三相故障时解析冗余关系残差

Tab.5 Residuals of analytic redundancy relationship in single-three-phase faults			
最小冲突集 候选	残差	最大值	相对残差
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$[L_{3A},B_{3A}]$	533.27	531.25	1.004
$[L_{3B},B_{3B}]$	520.87	522.42	0.997
$[L_{3C},B_{3C}]$	519.12	524.31	0.990
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$[L_{6A},B_{6A}]$	1.342	5 464.42	0.000 24
$[L_{6B},B_{6B}]$	1.453	5 457.25	0.000 26
$[L_{6C},B_{6C}]$	2.374	5 459.37	0.000 43
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$[L_{14A},B_{14A}]$	1.389	5457.24	0.000 25
$[L_{14B},B_{14B}]$	0.946	5 461.78	0.000 17
$[L_{14C},B_{14C}]$	1.914	5 460.82	0.000 35

求出各种故障类型下的<sub>最小冲突集族</sub>并对其进行二进制编码,其结果如表 6 所示。

表 6 最小冲突集族及其二进制编码

Tab.6 MCSC and corresponding binary form		
故障类型	最小冲突集族	二进制编码
单重单相	$[L_{3A}, B_{3A}]$	[11]
单重两相	$[L_{3A}, B_{3A}]$	[1100]
	$[L_{3B}, B_{3B}]$	[0011]
单重三相	$[L_{3A}, B_{3A}]$	[110000]
	$[L_{3B}, B_{3B}]$	[001100]
	$[L_{3C}, B_{3C}]$	[000011]
两重单相	$[L_{3A}, B_{3A}]$	[1100]
	$[L_{6A}, B_{6A}]$	[0011]
两重两相	$[L_{3A}, B_{3A}]$	[11000000]
	$[L_{3B}, B_{3B}]$	[00110000]
	$[L_{6A}, B_{6A}]$	[00001100]
	$[L_{6B}, B_{6B}]$	[00000011]
两重三相	$[L_{3A}, B_{3A}]$	[110000000000]
	$[L_{3B}, B_{3B}]$	[001100000000]
	$[L_{3C}, B_{3C}]$	[000011000000]
	$[L_{6A}, B_{6A}]$	[000000110000]
	$[L_{6B}, B_{6B}]$	[000000001100]
	$[L_{6C}, B_{6C}]$	[00000000011]
三重单相	$[L_{3A}, B_{3A}]$	[110000]
	$[L_{6A}, B_{6A}]$	[001100]
	$[L_{14A}, B_{14A}]$	[000011]
三重两相	$[L_{3A}, B_{3A}]$	[11000000000000]
	$[L_{3B}, B_{3B}]$	[00110000000000]
	$[L_{6A}, B_{6A}]$	[00001100000000]
	$[L_{6B}, B_{6B}]$	[00000011000000]
	$[L_{14A}, B_{14A}]$	[00000000110000]
	$[L_{14B}, B_{14B}]$	[00000000011000]
三重三相	$[L_{3A}, B_{3A}]$	[110000000000000000]
	$[L_{3B}, B_{3B}]$	[001100000000000000]
	$[L_{3C}, B_{3C}]$	[000011000000000000]
	$[L_{6A}, B_{6A}]$	[000000110000000000]
	$[L_{6B}, B_{6B}]$	[000000001100000000]
	$[L_{6C}, B_{6C}]$	[000000000011000000]
	$[L_{14A}, B_{14A}]$	[000000000000110000]
	$[L_{14B}, B_{14B}]$	[000000000000001100]
	$[L_{14C}, B_{14C}]$	[000000000000000011]

对上述不同故障下的最小冲突集族,分别采用文献[17]的BHS-TREE(方法一)、文献[14]的BP-SO算法(方法二)、本文所提EBPSO算法(方法三)计算最小碰集。三种方法各运行30次,分别统计求解时间和准确率,统计结果如图6和表7所示。

从图6中可以看出,无论在何种故障下,方法三的求解时间都小于方法二。这主要归功于方法三采用了新的适应度函数和MHS判据。

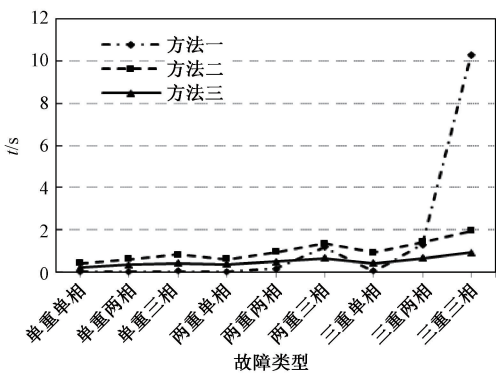


图 6 求解时间对比图

Fig.6 Contrast diagram of solving time

表 7 准确率对比

Tab.7 Comparison of accuracy rate			
(单位:(%))			
故障类型	方法一	方法二	方法三
单重单相故障	100	100	100
单重两相故障	100	100	100
单重三相故障	100	100	100
两重单相故障	100	100	100
两重两相故障	100	100	100
两重三相故障	100	100	100
三重单相故障	100	100	100
三重两相故障	100	92.36	96.45
三重三相故障	100	91.35	91.85

方法一的求解时间与故障重数和相数成指数增加,当问题规模小于等于8时,方法一的求解时间比方法三短;而当问题规模超过8时,方法一的求解时间比方法三的大,并且故障重数和相数越大,方法三的优势越明显。其主要原因在于方法一在不切枝的情况下,其实质是穷举法,计算规模超过一定水平时,其计算劣势开始突显。总之,在求解时间上,方法三更加适合配电网故障诊断。

从表7中可以看出,方法一始终保持100%的准确率,造成这种现象的原因在于,经典算法方法一在不切枝的情况下,其实质就是穷举法,因此其始终能够保持100%的准确率。

方法三的准确率较方法二略微上升,这还是主要归功于方法三采用了新的适应度函数和MHS判据。

虽然方法二、三较经典方法一的准确率降低,但是从MBD在配电网故障中的诊断步骤来看,其最终结果往往是最小碰集故障概率排名靠前的几个最小碰集<sup>[14]</sup>,而方法二、三的求解准确率已经达到90%

以上,因此,方法二、三的准确率对 MBD 来说一般都不会造成限制。其次,MHS 计算对 MBD 在配电网中的应用造成的最大限制是其计算速度<sup>[10]</sup>,因此,相比较计算速度而言,MHS 的求解准确率对 MBD 来说影响不大。

综上,结合求解速度和准确率两个指标来看,所提算法相比现有的方法而言,能更好地适用于 MBD 在配电网故障诊断中的应用。

## 7 结论

在最小碰集算法中,利用配电网的拓扑结构特点,能够有效降低算法复杂程度,提高算法的计算速度和准确率。其具体表现在以下几个方面:

(1)根据测量点位置对配电网进行子系统划分后,在配电网故障下获得的所有最小冲突集之间没有交集。

(2)分析现有适应度函数的优点和不足,通过加权组合的方式构建出新的适应度函数,其能够保证粒子直接朝着最小碰集迭代,同时避免迭代过程中非碰集粒子的影响。

(3)利用该特点找到最小碰集判据的动态边界值,利用该边界值可以准确、直接地判别出最小碰集粒子,不再需要最小碰集保证策略的参与。

最小碰集算法的求解速率和准确率的提高,使配电网故障诊断的 MBD 方法更加实用、可行。但是,识别最小冲突集的过程都是以故障特征量能够提取为前提的,而目前我国配电网多为中性点非有效接地方式,单相接地后故障特征并不明显;在配电网上游、下游同时故障时,故障特征量很难全部提取;故障特征量在通信过程中发生漏报和误报,也会对最小碰集造成影响。因此,故障特征量对最小碰集算法的性能具有重要影响,考虑故障特征量对算法的影响是下一步的研究内容。

## 参考文献 (References):

[1] 何森,林舜江,李广凯 (He Sen, Lin Shunjiang, Li Guangkai). 含光伏的低压配电网分布式储能多目标优化配置与运行 (Multi-objective optimal allocation and operation of distributed energy storage in low-voltage distribution network with photovoltaic integration) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (3): 18-27.

[2] 余修勇,肖立业 (Yu Xiuyong, Xiao Liye). 直流配电网故障识别和定位技术研究综述 (An overview of fault

identification and location technology for DC distribution networks) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (4): 56-66.

[3] 方敏,茹继锋,王峻 (Fang Min, Ru Jifeng, Wang Jun). 基于第一原理的实用故障诊断算法 (A practical algorithm of diagnosis from first principles) [J]. 东南大学学报 (Journal of Southeast University), 1999, 29 (3): 83-88.

[4] Metodi A, Stern R, Kalech M, et al. A novel SAT-based approach to model based diagnosis [J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 2014, 51 (1): 377-411.

[5] Wotawa F. A variant of reiter's hitting set algorithm [J]. Information Processing Letters, 2001, 79 (1): 45-51.

[6] Darwiche A. Model-based diagnosis using structured system description [J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 1998, 8 (4): 165-172.

[7] 姜云飞,林笠 (Jiang Yunfei, Lin Li). 用布尔代数计算最小碰集 (The computation of hitting sets with boolean formulas) [J]. 计算机学报 (Chinese Journal of Computers), 2003, 26 (8): 920-924.

[8] Lin L, Jiang Y. Computing minimal hitting sets with genetic algorithm [J]. Algorithmica, 2002, 31 (2): 95-106.

[9] 刘娟,欧阳丹彤,王艺源,等 (Liu Juan, Ouyang Dantong, Wang Yiyuan, et al.). 结合特征学习的粒子群求解最小碰集方法 (Computing minimal hitting sets with particle swarm optimization combined characteristics learning) [J]. 电子学报 (Acta Electronics Sinica), 2015, 43 (5): 841-845.

[10] Hu Keting, Liu Zhigang, Huang Ke, et al. Improved differential evolution algorithm of model based diagnosis in traction substation fault diagnosis of high-speed rail way [J]. IET Electrical Systems in Transportation, 2016, 6 (3): 163-169.

[11] Gao Song, Liu Zhigang, Dai Chenxi, et al. Application of BPSO with GA in model-based fault diagnosis of traction substation [J]. IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2014, 6 (11): 2063-2068.

[12] 戴晨曦,刘志刚,胡柯挺,等 (Dai Chenxi, Liu Zhigang, Hu Keting, et al.). 基于模型与模糊 Petri 网融合的高铁牵引变压器故障诊断 (Fault diagnosis for traction transformer of high speed railway on the integration of model-based diagnosis and fuzzy Petri nets) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2016, 44 (11): 26-32.

[13] 刘志刚,钟炜,邓云川,等 (Liu Zhigang, Zhong Wei, Deng Yunchuan, et al.). 牵引变电站故障的基于模型



- 诊断方法 (Electric railway substation diagnosis with model based method) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2010, 30 (34): 36-41.
- [14] 关龙, 刘志刚, 何士玉, 等 (Guan Long, Liu Zhigang, He Shiyu, et al.). 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 (Application of BPSO algorithm in model based fault diagnosis of distribution network) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2013, 33 (9): 89-92.
- [15] 关龙, 刘志刚, 徐建芳, 等 (Guan Long, Liu Zhigang, Xu Jianfang, et al.). 基于模型的配电网故障诊断关键问题研究 (Key issues with model based diagnosis in distribution network) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2012, 40 (20): 145-150.
- [16] 胡非, 刘志刚, 范福强, 等 (Hu Fei, Liu Zhigang, Fan Fuqiang, et al.). 配电网线路故障的基于模型诊断方法 (Distribution network line fault diagnosis with model based method) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2012, 36 (10): 56-60.
- [17] 胡非, 刘志刚, 何士玉, 等 (Hu Fei, Liu Zhigang, He Shiyu, et al.). 一种基于模型的配电网故障诊断搜索算法 (Model based search algorithm of fault diagnosis for distribution system) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2013, 33 (1): 81-90.
- [18] Liu Zhigang, Hu Keting. A model-based diagnosis system for a traction power supply system [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13 (6): 2834-2843.
- [19] 赵冬梅, 张旭, 魏娟, 等 (Zhao Dongmei, Zhang Xu, Wei Juan, et al.). 以重现故障过程为目的的电网故障诊断 (Power grid fault diagnosis aiming at reproducing the fault process) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2014, 34 (13): 2116-2123.
- [20] 江雪晨, 王大志, 张翠玲 (Jiang Xuechen, Wang Dazhi, Zhang Cuiling). 利用模型诊断降维的电网故障诊断完全解析方法 (A complete analytic method for fault diagnosis of power systems based on model based diagnosis for dimensionality reduction) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2016, 36 (24): 6371-6378.

## A minimum hitting set algorithm for fault diagnosis of distribution network

CHEN Ting<sup>1,2</sup>, ZHU Wen-qiang<sup>2</sup>, LIN Mei-fen<sup>2</sup>, WANG Qiu-jie<sup>1</sup>

- (1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;  
2. Fujian Vocational and Technical College of Water Conservancy and Electricity, Yong'an 366000, China)

**Abstract:** The existing minimum hitting set algorithm for fault diagnosis of distribution network does not consider the topology characteristics of the distribution network, which results in low speed and accuracy. Therefore, an improved minimum hitting set algorithm is proposed for the fault of the distribution network. Firstly, the algorithm analyzes the characteristics of existing fitness functions, and constructs a new adaptive function through weighted combination. Secondly, the characteristic that there is no intersect set between the minimum conflict sets of distribution network faults is obtained by analyzing the topology of the distribution network. Then, the minimum collision criterion is proposed by using this characteristic. Finally, the results of the example analysis show that the proposed minimum hitting algorithm has a large improvement in the speed of the solution, a slight increase in the accuracy of the solution, and is more suitable for model-based diagnosis of distribution network faults.

**Key words:** distribution network; fault diagnosis; model-based diagnosis; minimum hitting algorithm; weighted combination; topology of power distribution