

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191002

# 计及不确定性的含分布式发电并网的配电网 故障区段定位方法

贾伯岩<sup>1</sup>, 马天祥<sup>1</sup>, 张智远<sup>2</sup>, 沈宏亮<sup>2</sup>, 景皓<sup>1</sup>, 王卓然<sup>1</sup>

(1. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021;

2. 国网河北省电力有限公司, 河北 石家庄 050021)

**摘要:** 主动配电网作为分布式发电的高效集成和管理平台, 其故障区段定位是一门重要课题。针对含分布式发电并网的主动配电网故障区段定位问题, 计及分布式发电出力的不确定性, 基于随机机会约束规划建立配电网故障区段定位模型。所建立的模型以概率形式的评价函数为目标函数, 计及控制变量定义域约束, 故障类型限值约束等约束条件构建。通过对基本帝国竞争算法进行改进得到二进制帝国竞争算法, 并采用改进帝国竞争算法设计模型求解流程。仿真算例表明, 所建立的模型适用于含分布式发电并网的主动配电网故障区段定位求解, 并计及分布式发电出力不确定性对定位结果的影响, 改进帝国竞争算法在模型的求解中性能较优。

**关键词:** 主动配电网; 分布式发电; 故障区段定位; 随机机会约束规划; 帝国竞争算法

## Fault section location method for distribution networks with distributed generation and grid connection considering uncertainty

JIA Boyan<sup>1</sup>, MA Tianxiang<sup>1</sup>, ZHANG Zhiyuan<sup>2</sup>, SHEN Hongliang<sup>2</sup>, JING Hao<sup>1</sup>, WANG Zhuoran<sup>1</sup>

(1. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China;

2. State Grid Hebei Electric Power Corporation, Shijiazhuang 050021, China)

**Abstract:** As an efficient integration and management platform for distributed generation, fault section location on an active distribution network is an important issue. Considering the uncertainty of distributed generation output, a fault location model of a distribution network is established based on stochastic chance-constrained programming. The objective function of the model is the evaluation function in the form of probability. This takes into account the constraints of control variable definition domain and fault type limit. A basic imperial competition algorithm is improved to get the binary imperial competition algorithm, and this algorithm is used to design the model problem solving process. The simulation results show that the proposed model is suitable for fault location on an active distribution network with distributed generation and that is grid-connected. The effect of the uncertainty of distributed generation output on location results is taken into account. The improved imperial competition algorithm has better performance in solving the model problem.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61873225), National Key Research Development Program of Hebei Province (No. 20314301D) and Project of State Grid Hebei Electric Power Company Project (No. kj2019-068).

**Key words:** active distribution network; distributed generation; fault section location; stochastic chance constrained programming; imperial competition algorithms

## 0 引言

随着分布式发电技术的快速发展, 将分布式电

源 (Distributed Generation, DG) 接入主动配电网 (Active Distribution Networks, ADN) 是一种高效便捷的管理方式。主动配电网是由分布式发电、储能设备、保护与监控装置、负荷等模块集成的小型发、配、用电系统, 能实现自我控制管理, 可灵活地运行在离网或并网状态下, 在降低系统运行成本、提高供电可靠性等方面具有较大的优势<sup>[1-4]</sup>。故障区段

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助 (61873225); 河北省重点研发计划项目资助 (20314301D); 国网河北省电力有限公司项目资助 (kj2019-068)

定位模型的主要任务是根据检测到的配电网状态信息制定故障定位的数理逻辑模型。

针对传统配电网的故障区段定位问题，目前已有较多文献提出了模型，比如文献[5]为了提高故障区段定位的精度，采用基于阻抗的故障测距实验实现对线路故障的定位。文献[6-7]构建了描述配电网中各区段故障状态与各开关故障过流信息间关系的基于逻辑运算关系的开关函数，该函数是故障区段定位模型的基础。文献[8]主要针对故障区段定位模型中信息误传送的问题建立模型，提高了模型的容错率。

然而主动配电网在进行故障区段定位时，与传统配电网存在较大不同，分布式发电的并网使得模型需要计及DG从多个方向对故障区段提供故障电流，使得判断难度增加。目前已有一些文献针对主动配电网故障区段定位提出了方法，比如文献[9]提出了含分布式电源配电网故障区段定位的线性规划模型和求解方法，具有较好的定位效果，但是没有计及分布式电源出力的不确定性对定位的影响；文献[10]计及了分布式电源接入配电网引起的故障电流的多向性，对开关函数进行了改进，但没有将DG的并网状态统一进模型中。此外，在模型求解上，目前的文献主要采用的智能算法包括矩阵算法<sup>[11-12]</sup>、蚁群算法<sup>[13]</sup>、免疫算法<sup>[14]</sup>、遗传算法<sup>[15-16]</sup>等，目前还很少有文献对帝国竞争算法进行改进并应用于故障区段定位模型的求解中。

以上文献在制定含分布式发电配电网故障区段定位模型时，都没有计及到分布式发电的并网情形和出力不确定性情况。分布式发电的出力存在间歇性和波动性并符合一定的随机分布，当其出力较低时，将无法向故障点提供灵敏度足够的故障电流，这时如果模型中仍将分布式发电看作故障电流提供点，将导致故障区段定位的误判。此外，以上模型都只考虑了配电网单重故障情形，所建立的模型不一定适用于多重故障情形。配电网由于区域范围较小，因此存在较多的同杆架设或者同电缆通道的情况，而这导致配电网多重故障成为一种并非十分罕见的故障。

本文采用随机机会约束规划模型建立计及不确定性的含分布式发电配电网故障区段定位模型。所建立的模型针对主动配电网中各种短路故障进行故障区段定位，系统中性点不接地运行。所建立的模型计及了分布式发电并网情况以及功率出力的随机分布对故障区段定位结果的影响。对传统帝国竞争算法引入自适应参数进行改进，并采用改进帝国竞

争算法对所建立的模型进行求解。最后通过一个算例验证了本文方法的有效性。

## 1 故障区段定位模型

### 1.1 分布式发电不确定性对开关函数的影响

当配电网馈线发生故障时，装设在各条馈线支路的馈线终端单元(Feeder Terminal Unit, FTU)将检测到的馈线过流信息即开关状态汇总到故障区段定位系统，系统通过对故障支路进行优化求解使得该故障下的开关状态最接近于检测到的开关状态，从而实现对该故障区段的定位。开关函数作为开关状态与故障支路位置关系的函数，是整个故障区段定位模型的基础。开关函数的物理意义为：当假设配电网中发生某个馈线区段故障时，所有的馈线终端单元应该检测到的过流信息向量。馈线过流信息是由开关检测的，因此这样的函数一般也称为开关函数，也就是过流信息向量对馈线故障状态的函数<sup>[17]</sup>。馈线终端实际检测到的过流信息传输到故障区段定位中心之后，故障区段定位中心的目标就是搜寻某一种故障方式，使得对应的开关函数最接近实际检测到的过流信息，在本文建模框架内，目标函数寻找的则是在给定置信度下，能够使得该过流信息差距的乐观值达到最小的故障状态。

当主动配电网中并网接入分布式发电时，分布式发电出力的随机性和间歇性将导致开关函数的变化，因此使得开关函数实际上成为一个不确定的随机函数，而该随机函数也将导致故障区段定位模型中的目标函数成为一个随机变量。然而传统故障区段定位方法并没有计及分布式电源出力情况对开关函数的影响，只是单纯把分布式发电电视作电源点，导致误判。

以如图 1 所示的简单主动配电网为例，其中 S 为上级配电网或者输电网，DG1 和 DG2 为并网运行状态的分布式发电，S 为开关，L 为馈线区段。当区段 L2 发生故障时，依据传统的方法，开关函数值为[1, 1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1]；但是如果考虑到分布式发电出力可能低于可提供故障电流的灵敏度，那么开关函数实际上可能是三种情形，一种是[1, 1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1]，一种是[1, 1, -1, -1, -1, -1, 0, 0, 0]，还有一种是[1, 1, -1, 0, 0, 0, -1, -1, -1]。开关函数的不确定性将传递到目标函数的不确定性，因此只有计及该不确定性并采取合适的理论建模才能较好地解决该问题。

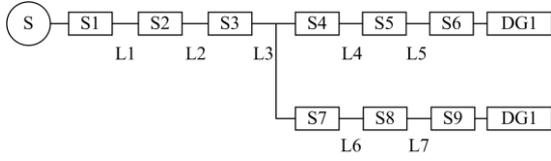


图1 含分布式发电并网的简单主动配电网  
Fig. 1 Simple active distribution network with distributed generation connection

## 1.2 分布式发电不确定性模型

主动配电网运行中的不确定性主要来源于分布式光伏发电和分布式风力发电, 分布式风电的出力水平  $P_{\text{wind}}$  与风速  $v$  存在着如式(1)和式(2)所示的函数关系。

$$P_{\text{wind}} = \begin{cases} 0, & v \leq v_{\text{ci}} \\ a + bv, & v_{\text{ci}} \leq v \leq v_{\text{r}} \\ P_{\text{r}}, & v_{\text{r}} < v \leq v_{\text{co}} \\ 0, & v > v_{\text{co}} \end{cases} \quad (1)$$

$$a = P_{\text{r}} v_{\text{ci}} / (v_{\text{ci}} - v_{\text{r}}), b = P_{\text{r}} / (v_{\text{r}} - v_{\text{ci}}) \quad (2)$$

式中:  $v_{\text{ci}}$  为切入风速;  $v_{\text{r}}$  为额定风速;  $v_{\text{co}}$  为切出风速;  $P_{\text{r}}$  为风电额定功率;  $a$  与  $b$  为由风电机组特性决定的系数。而风速一般采用双参数威尔分布模型, 具体表达式如式(3)所示<sup>[18]</sup>。

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (3)$$

式中,  $k$  和  $c$  为系数。根据以上公式可以推导得出  $P_{\text{wind}}$  的概率密度分布如式(4)所示。

$$f(P_{\text{wind}}) = \frac{k}{bc} \left(\frac{P_{\text{wind}} - a}{bc}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{P_{\text{wind}} - a}{bc}\right)^k\right] \quad (4)$$

分布式光伏的出力功率  $P_{\text{pv}}$  由光照强度  $I$ 、光伏组件面积  $S$  以及光电转换效率  $\eta$  决定, 有  $P_{\text{pv}} = IS\eta$ 。而  $I$  可以认为服从  $\beta$  分布, 则有  $P_{\text{pv}}$  的概率密度函数如式(5)所示<sup>[19]</sup>。

$$f(P_{\text{pv}}) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{P_{\text{pv,max}} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \left(\frac{P_{\text{pv}}}{P_{\text{pv,max}}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{P_{\text{pv}}}{P_{\text{pv,max}}}\right)^{\beta-1} \quad (5)$$

式中:  $P_{\text{pv,max}}$  为分布式光伏的额定功率;  $\alpha$  和  $\beta$  为  $I$  的形状参数。

## 1.3 随机机会约束规划

以 min-min 形式的随机机会约束规划为例, 该理论的数学模型如式(6)所示<sup>[20]</sup>。

$$\begin{cases} \min_x \min_{\xi} \bar{f} \\ \text{s.t.} \quad \Pr\{f(x, \xi) \leq \bar{f}\} \geq \alpha \\ \Pr\{g_j(x, \xi) \leq 0, j=1, 2, \dots, p\} \geq \beta_j \\ h_i(x) \leq 0, i=1, 2, \dots, q \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $x$  为模型的控制变量;  $\Pr\{\cdot\}$  表示事件概率;  $f(x, \xi)$  为目标函数, 其中的  $\xi$  为模型中的不确定变量;  $\alpha$  为目标函数大于  $\bar{f}$  的置信水平;  $\beta_j$  为第  $j$  个约束条件的置信水平, 共有  $p$  个含随机变量的约束条件;  $\bar{f}$  为  $f(x, \xi)$  在概率水平至少为  $\beta$  时所取的最大值(即  $\beta$  乐观值); 此外模型还包含  $q$  个不含随机变量的常规约束。

## 1.4 主动配电网开关函数

根据1.1小节分析, 开关函数的定义为馈线过流信息对馈线故障状态的函数, 其中馈线过流信息即开关状态, 该状态由系统中所有馈线上开关的过流状态组成, 过流状态为二进制变量, 其中1表示发生过流, 0表示未发生过流。

定义当配电网以公共耦合点(Point of Common Coupling, PCC)为电源时处于开关  $i$  上游的分布式电源为反方向, 处于开关  $i$  下游的分布式电源为正方向。当不计及故障重数时, 本文建立的开关函数  $I_i(S)$  如式(7)所示, 该开关函数针对的是第  $i$  个开关。

$$I_i(S) = g_{\text{grid}} \sum_{d=1}^{D_i} \otimes s_{i,d} - \sum_{j=1}^J g_j \varepsilon(P_{\text{DG},j} - P_{\text{DG,min}}) \sum_{d=1}^{D_{i,j}} \otimes s_{j,i,d} + \sum_{j=1}^M k_j \varepsilon(P_{\text{DG},j} - P_{\text{DG,min}}) \sum_{d=1}^{F_{i,j}} \otimes s_{j,i,d} \quad (7)$$

式中:  $g_{\text{grid}}$  为配电网运行系数,  $g_{\text{grid}} = 1$  表示运行在并网模式,  $g_{\text{grid}} = 0$  表示运行在离网模式;  $S$  为支路故障状态集;  $D_i$  为以公共耦合点为电源时开关  $i$  下游的支路数目;  $s_{i,d}$  为开关  $i$  下游第  $d$  条支路的故障状态, 当  $s_{i,d} = 1$  时表示发生了故障, 当  $s_{i,d} = 0$  时表示未发生故障;  $J$  为开关  $i$  正方向分布式电源数目,  $M$  为开关  $i$  反方向分布式电源数目;  $g_j$  为正方向第  $j$  个 DG 的并网系数,  $g_j = 1$  时表示该 DG 并网,  $g_j = 0$  时表示该 DG 未并网;  $k_j$  为反方向 DG 的并网系数, 其含义与  $g_j$  相同;  $D_{i,j}$  和  $F_{i,j}$  分别为正方向和反方向第  $j$  个分布式电源的下游支路数目;  $s_{j,i,d}$  为第  $j$  个分布式电源下游第  $d$  条支路的故障状态, 其含义与  $s_{i,d}$  相同;  $\varepsilon(\cdot)$  为单位阶跃函数;  $P_{\text{DG},j}$  为第  $j$  个 DG 在发生故障时的功率出力;  $P_{\text{DG,min}}$  为具备向故障点提供灵敏度足够故障电流的最小 DG 出力;  $\sum_{\otimes}$  为逻辑或计算。

在调度自动化系统中, 分布式发电并网开关的遥信状态均上传至调控中心进行监测, 在开发故障区段定位模块时, 只需要将该遥信节点作为并网系

数上送至程序模块即可。

在开关函数的定义中,  $I_i^*(S)$  应该存在三种取值, 分别为 1、-1、0。当  $I_i^*(S)=1$  时表示配电网故障发生在开关  $i$  正方向, 当  $I_i^*(S)=-1$  时表示配电网故障发生在开关  $i$  反方向, 当  $I_i^*(S)=0$  时表示配电网未发生故障或者开关  $i$  同时在正方向和反方向同时发生了多重故障。若以式(1)进行开关函数计算, 则会出现  $I_i^*(S)$  取值超出这三个值的情况, 因此对式(1)进行修正得到如式(8)所示的形式, 确保了  $I_i^*(S)$  取值正确。

$$I_i^*(S) = \varepsilon[I_i(S)] - \varepsilon[-I_i(S)] \quad (8)$$

在开关函数中, 本文采用广度优先搜索法对 PCC 或者第  $j$  个分布式电源下针对开关  $i$  的上下游支路进行判定, 具体步骤如下:

- (1) 从 PCC 或者第  $j$  个分布式电源节点  $n_0$  出发, 访问并记录;
- (2) 逐个访问与  $n_0$  相邻的所有未被访问的节点, 并将被访问的节点进行记录;
- (3) 若访问过程遇到开关  $i$  所在的支路, 则该支路暂停访问;
- (4) 分别从这些邻接节点出发, 依次访问与这些节点相邻的未被访问的节点, 直到所有的能访问的节点都被访问过为止。

由于目前配电网基本上采用闭环建设、开环运行的策略, 因此在进行故障区段定位时配电网处于辐射状拓扑状态, 本文暂不考虑环状配电网。

### 1.5 故障区段定位目标函数

根据定义的开关函数, 构建配电网故障区段定位模型的评价函数作为目标函数, 如式(9)所示。

$$\min F(S) = \sum_{i=1}^N |I_i - I_i^*(S)| + \omega \left[ \varepsilon \left( \sum_{i=1}^L |s_i| - 2 \right) + \varepsilon \left( - \sum_{i=1}^L |s_i| \right) \right] \quad (9)$$

式中:  $N$  为配电网开关数目;  $L$  为配电网馈线支路数目;  $I_i$  为 RTU 检测到的第  $i$  个开关的开关状态;  $\omega$  为权重系数, 一般取为 [0,1]; 式中第一项为实际开关状态和假想故障情况下开关状态下的偏差, 式中第二项的作用是将故障支路数限制在二重以内, 以防止模型进行误判。

从式(7)中可见, 目标函数中的  $I_i^*(S)$  中包含了随机变量  $P_{DG,j}$ , 因此该目标函数也为不确定变量, 采用 min-min 形式的随机机会约束规划将目标函数整理为如式(10)所示的形式。

$$\min \min \bar{F}(S) \quad (10)$$

式中:  $\bar{F}$  为目标函数在给置信度之下的乐观值;  $S$  为随机机会约束规划模型的控制变量。

### 1.6 故障区段定位约束条件

(1) 目标函数的机会约束

基于随机机会约束规划理论建立的故障区段定位模型首先要满足如式(11)所示的机会约束关系。

$$\Pr \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^N |I_i - I_i^*(S)| + \\ \xi \left[ \varepsilon \left( \sum_{i=1}^L |s_i| - 2 \right) + \varepsilon \left( - \sum_{i=1}^L |s_i| \right) \right] \leq \bar{F} \end{array} \right\} \geq \alpha \quad (11)$$

式中:  $\Pr\{\cdot\}$  表示事件的概率测度;  $\alpha$  为置信度。式(4)和式(5)的含义为: 通过制定合理的  $S$ , 最小化  $\bar{F}$  的值, 使得在分布式发电随机分布出力的情况下, 目标函数值小于  $\bar{F}$  的概率要大于置信度  $\alpha$ 。

(2) 控制变量定义域约束

配电网故障区段定位模型的控制变量  $S = [s_1, s_2, \dots, s_N]$ , 其中任意  $s_i$  满足  $s_i \in [0,1]$  且为整数。

(3) 故障类型限制约束

本文建立的模型适用于单重故障以及多重故障的求解, 然而如果不对故障类型进行限值, 将影响模型求解效率, 而三重故障较为罕见, 因此暂不考虑三重及以上故障, 只考虑单重和双重故障, 该约束如式(12)所示。

$$0 \leq \sum_{i=1}^L |s_i| \leq 2 \quad (12)$$

## 2 算法与模型求解流程

### 2.1 不确定函数模拟

不确定函数模拟实际上即为蒙特卡洛模拟, 该方法通过对随机变量进行取样模拟从而计算目标函数或者约束条件成立的概率。本文采用不确定函数模拟对概率约束形式的目标函数进行计算, 其数学形式如式(13)所示。

$$U: (x, y) \rightarrow \min \{ \bar{F} | \Pr \{ f(S, \xi) \leq \bar{F} \} \geq \alpha \} \quad (13)$$

式中:  $\xi$  是概率空间  $(\Omega, A, \Pr)$  上的随机变量;  $f$  是实值连续函数;  $f(S, \xi)$  也是一个随机变量, 从  $\Omega$  中随机抽取样本点  $\omega_s$ ,  $s=1, 2, \dots, N_s$ , 得  $N_s$  个  $f(S, \xi(\omega_s))$ , 则可以通过以下步骤对  $\bar{F}$  的值进行测算。

(1) 按照概率测度  $\Pr$  从  $\Omega$  中随机产生  $\omega_s$ ,  $s=1, 2, \dots, N_s$ 。

(2) 计算函数  $h_s = f(S, \xi(\omega_s))$ ,  $s=1, 2, \dots, N_s$  的值, 并从小到大进行排序。

(3) 置  $N'$  为  $\alpha N_s$  的整数部分。

(4) 输出  $\{h_1, h_2, L, h_{N_s}\}$  中第  $N'$  个最小值即为所求的  $\bar{F}$  值。

本文对分布式风电和光伏出力进行随机模拟, 针对每一种模拟情形, 计算故障区段定位模型的目标函数, 最后将所有情形汇总, 基于排序法得到给定置信度下的目标函数乐观值。

## 2.2 基于二进制帝国竞争算法的模型求解流程

帝国竞争算法作为一种高效的智能搜索算法, 具备寻优效率高、不易陷入局部最优等优势<sup>[21-22]</sup>。然而传统帝国竞争算法只适用于连续规划, 而不适用于整数规划。本文对帝国竞争算法中国家移动引入二进制原理进行改进并设计模型, 求解流程如下:

(1) 初始化国家种群

以  $S$  为二进制的帝国位置变量随机生成  $N_{\text{pop}}$  个国家, 针对每个国家调用不确定函数模拟过程得到目标函数, 依据目标函数定义国家势力。将势力最强的  $N_{\text{imp}}$  个国家定义为帝国, 剩余  $N_{\text{col}}$  个国家为殖民地, 定义第  $n$  个国家的相对势力  $F_n$  为

$$F_n = \left| f_n - \max_{i \in J_{\text{imp}}} \{f_i\} \right| \left/ \left| \sum_{j=1}^{N_{\text{imp}}} (f_j - \max_{i \in J_{\text{imp}}} \{f_i\}) \right| \right| \quad (14)$$

式中:  $J_{\text{imp}}$  为帝国集合; 所有帝国相对势力之和为 1; 第  $n$  个帝国分配到的殖民地数量  $N_n^{\text{col}}$  为  $\text{round}\{N_{\text{col}} F_n\}$ 。

(2) 殖民地同化

针对每一个帝国, 当一个殖民地属于某个帝国时, 其位置更新公式如式(15)所示<sup>[23-24]</sup>。

$$U_{i,d}^s = \begin{cases} 1 & r < \text{Sigmoid}(v_{i,d}^s) \\ 0 & r > \text{Sigmoid}(v_{i,d}^s) \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $U_{i,d}^s$  为该帝国第  $i$  个殖民地第  $d$  维在第  $s$  次迭代时的位置变量;  $r$  为生成的随机数, 位于区间  $[0,1]$  上;  $v_{i,d}^s$  为第  $i$  个殖民地第  $d$  维在第  $s$  次迭代时的速度变量。Sigmoid 函数如式(16)所示<sup>[25]</sup>。

$$\text{Sigmoid}(v_{i,d}^s) = \begin{cases} \frac{2}{1 + e^{-v_{i,d}^s}} & v_{i,d}^s > 0 \\ 1 - \frac{2}{1 + e^{-v_{i,d}^s}} & v_{i,d}^s < 0 \end{cases} \quad (16)$$

同时在迭代中, 引入殖民地变革率  $\delta$ , 表现为殖民地有  $\delta$  的概率在每一维上随机切换位置变量。

(3) 帝国与殖民地交换位置

在迭代过程中, 如果殖民地的势力大于所属帝国的势力, 此时将该殖民地与帝国进行身份交换。

(4) 殖民竞争

首先定义帝国集团  $n$  的势力  $E_n$ , 如式(17)所示。

$$E_n = F_n + \xi \sum_{i \in J_n} F_i / N_n^{\text{col}} \quad (17)$$

式中:  $\xi$  为殖民地势力构成系数, 一般取为 0.1 至 0.5 可满足大部分条件;  $J_n$  为帝国  $n$  的殖民地集合;  $F_i$  为殖民地  $i$  的势力。

殖民竞争发生在不同帝国之间, 表现为争夺殖民地, 在每一次竞争中, 假设最弱帝国集团为  $q$ , 则被帝国集团  $n$  占有的概率如式(18)所示, 可以采用轮盘赌方法实现。

$$P_n = E_n / \sum_{i \in J_{\text{imp}}, i \neq q} E_i \quad (18)$$

(5) 帝国消亡

某个帝国失去所有殖民地时则消亡。当算法迭代到仅存在一个帝国并且收敛到要求的精度时, 则该帝国位置即为所求配电网故障区段定位模型的解。

## 3 故障区段定位算例分析

以如图 2 所示的主动配电网为例进行故障区段定位方法验证。所研究的主动配电网基于馈线终端单元对配电网运行状态以及开关过流状态进行上送。主动配电网中包含三个分布式电源并网在节点 8、10 和 22, 系统通过 PCC 与外网联接, 既可以运行在离网模式也可以运行在并网模式, 在正常情况下一般不考虑离网运行模式, 因此本文模型中假设系统一直运行在并网模式。随机机会约束规划模型中置信度取为 0.9。改进帝国竞争算法中, 初始国家数设为 100, 初始帝国数设为 10, 最大迭代次数为 150 代。仿真算例设置的配电网故障类型为单相接地短路故障, 所研究的配网属于低压配电网, 系统中性点采用不接地方式, 以提高运行可靠性。

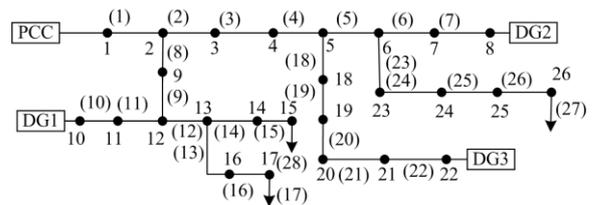


图 2 含分布式发电并网的主动配电网网架结构图  
Fig. 2 Structural chart of active distribution network with distributed generation connection

### 3.1 单重故障情形

首先针对单重故障情形, 设置如表 1 所示的几种故障方式, 其中 DG 类型和并网系数依次指的是 DG1、DG2、DG3。

表 1 单重故障情形下故障方式设置

Table 1 Fault section setting in the case of single fault

故障方式	方式一	方式二	方式三	方式四
DG 类型	WT,WT,PV	WT,WT,PV	PV,PV,WT	PV,PV,WT
故障区段	支路(3)	支路(5)	支路(14)	支路(24)
并网系数	1,1,1	1,1,1	1,1,1	1,1,1
信息畸变	无	开关 3 缺失	开关 11 缺失	开关 20 缺失

运行本文模型，可以得到如表 2 所示的在大部分情况下的模型求解结果，其中缺失的开关状态检测信息用 X 表示，开关检测到过流信息为 1，未检测到为 0。

表 2 单重故障情形下故障区段定位模型求解结果

Table 2 Solution of fault section location model under single fault

故障方式	开关状态检测	求解得到开关函数	定位结果	准确率/%
方式一	1111111111100000 111110000	1111111111100000 111110000	支路(3)	87
方式二	11X1111111111000 0111110000	1111111111110 0000111110000	支路(5)	82
方式三	1111111111X1000 00111110000	1111111111110 000111110000	支路(14)	94
方式四	1111111111100000 11X1111000	11111111111100 000111111000	支路(24)	93

事实上，由于分布式发电出力的不确定性对故障区段定位的影响，模型可能会对故障区段发生误判断。在以上置信度取为 0.9 的情况下，四种故障方式下的故障区段定位准确率分别为 87%、83%、94% 和 93%。为了验证模型置信度参数对故障区段定位准确率的影响，选取不同置信度，分别在四种故障方式下运行模型，得到故障区段定位准确率与置信度的关系如图 3 所示。

从图 3 中可以看出，故障区段定位准确率随着置信度的变化而变化，随机机会约束规划模型中置信度的选取对于故障区段定位准确率至关重要。当置信度参数较低时，模型对分布式发电不确定性考虑的保守程度较低，因此分布式发电出力的随机性容易影响定位结果，所以故障区段定位准确率较低。当置信度参数较高时，模型对分布式发电不确定性的考虑较为严格，而这也容易导致模型出现无解的情形，因此故障区段定位准确率较低。

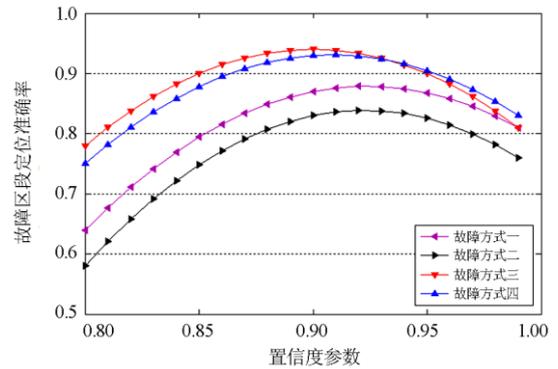


图 3 单重故障情形下故障区段定位准确率与置信度关系

Fig. 3 Relationship between fault location accuracy and confidence in single fault

### 3.2 二重故障情形

在模型能够适用于单重故障的基础上，针对二重故障情形，设置如表 3 所示的几种故障方式。

表 3 二重故障情形下故障方式设置

Table 3 Fault mode setting in case of double faults

故障方式	方式一	方式二	方式三	方式四
DG 类型	WT,WT,PV	WT,WT,PV	PV,PV,WT	PV,PV,WT
故障区段	支路(3) 支路(5)	支路(3) 支路(14)	支路(5) 支路(24)	支路(14) 支路(24)
并网系数	1,1,1	1,1,1	1,1,1	1,1,1
信息畸变	无	开关 3 缺失	开关 11 缺失	开关 20 缺失

运行本文模型，可以得到如表 4 所示的在大部分情况下的模型求解结果。

表 4 二重故障情形下故障区段定位模型求解结果

Table 4 Solution results of fault section location model in the case of double faults

故障方式	开关状态检测	求解得到开关函数	定位结果	准确率/%
方式一	11111111111000 00111110000	1111111111100000 0111110000	支路(3) 支路(5)	82
方式二	11X111111111100 00111110000	1111111111110000 0111110000	支路(3) 支路(14)	86
方式三	1111111111X1100 00011111000	1111111111110000 0011111000	支路(5) 支路(24)	84
方式四	11111111111100 0011X111000	1111111111110000 0111111000	支路(14) 支路(24)	92

同样为了验证模型置信度参数对二重故障情形下故障区段定位准确率的影响，选取不同置信度，分别在四种故障方式下运行模型，得到故障区段定位准确率与置信度的关系如图 4 所示。从图中可以看出，在二重故障情形下，故障区段定位准确率与置信度之间的关系与单重故障情形下相似。

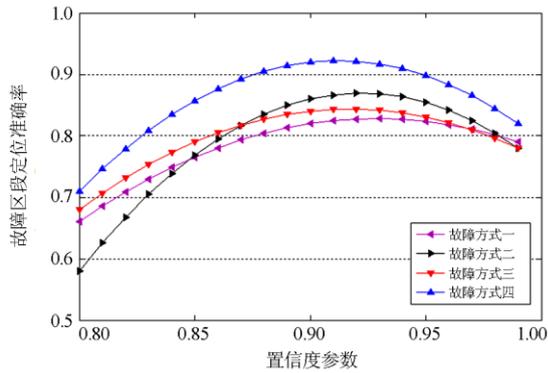


图4 二重故障情形下故障区段定位准确率与置信度关系  
Fig. 4 Relationship between the accuracy and confidence of fault section location in the case of double faults

为了验证本文改进帝国竞争算法(Improved Imperial Competition Algorithm, IICA)在主动配电网故障区段定位模型求解的效果,针对同样的算例和模型,采用常用的二进制粒子群算法(Binary Particle Swarm Optimization, BPSO)进行求解,得到与本文改进帝国竞争算法求解指标对比如表5所示。

表5 二进制粒子群算法与改进帝国竞争算法求解指标对比  
Table 5 Comparisons between binary particle swarm optimization and improved imperial competition algorithms for solving indicators

单重故障情形				
故障方式	BPSO	IICA	BPSO	IICA
	准确率/%	准确率/%	求解时间/s	求解时间/s
方式一	84	87	5.69	5.23
方式二	78	82	6.21	5.86
方式三	89	94	5.31	5.04
方式四	90	93	5.36	4.93
二重故障情形				
故障方式	BPSO	IICA	BPSO	IICA
	准确率/%	准确率/%	求解时间/s	求解时间/s
方式一	79	82	6.23	5.94
方式二	83	86	6.71	6.28
方式三	78	84	5.79	5.64
方式四	86	92	5.82	5.62

从表5中可以看出,本文采用IICA算法对所建立的主动配电网故障区段定位模型进行求解,相比于传统BPSO算法,无论是在定位准确率上还是求解时间上性能均要更优。

## 4 结论

(1) 本文针对含分布式发电并网的主动配电网故障区段定位问题,计及系统中分布式发电出力随机性对定位的影响,采用随机机会约束规划建立故障区段定位模型。

(2) 仿真算例表明,本文建立的故障区段定位模型适用于含分布式发电并网的主动配电网故障区段定位,在计及系统不确定下有着较好的准确率。

(3) 帝国竞争算法作为一种高效的智能算法,有较好的求解效果,对其引入二进制迭代机制后形成的改进帝国竞争算法相比于传统二进制粒子群算法,在主动配电网故障区段定位模型的求解中具备更优的性能。

## 参考文献

- [1] 马钊, 梁惠施, 苏剑. 主动配电系统规划和运行中的重要问题[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1499-1503. MA Zhao, LIANG Huishi, SU Jian. Important issues in planning and operation of active distribution system[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1499-1503.
- [2] 张维, 宋国兵, 豆敏娜, 等. 基于自适应重合闸的配电网快速故障定位与隔离方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 60-67. ZHANG Wei, SONG Guobing, DOU Minna, et al. A quick fault location and isolation method in distribution network based on adaptive reclosure[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 60-67.
- [3] 张建华, 曾博, 张玉莹, 等. 主动配电网规划关键问题与研究展望[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 13-23. ZHANG Jianhua, ZENG Bo, ZHANG Yuying, et al. Key issues and research prospects of active distribution network planning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 13-23.
- [4] DOOSTIZADEH M, GHASEMI H. Day-ahead scheduling of an active distribution network considering energy and reserve markets[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2013, 23(7): 930-945.
- [5] ROOSTAEI S, THOMAS M S, MEHFUZ S. Experimental studies on impedance based fault location for long transmission lines[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 169-177. DOI: 10.1186/s41601-017-0048-y.
- [6] 杜红卫, 孙雅明, 刘弘靖, 等. 基于遗传算法的配电网故障定位和隔离[J]. 电网技术, 2000, 24(5): 52-55. DU Hongwei, SUN Yaming, LIU Hongjing, et al. Fault section diagnosis and isolation of distribution networks based on genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2000, 24(5): 52-55.
- [7] 卫志农, 何桦, 郑玉平. 配电网故障区间定位的高级遗传算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 127-130. WEI Zhinong, HE Hua, ZHENG Yuping. A refined genetic algorithm for the fault sections location[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 127-130.
- [8] 郭壮志, 徐其兴, 洪俊杰, 等. 配电网快速高容错性故障定位的线性整数规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(3): 786-794. GUO Zhuangzhi, XU Qixing, HONG Junjie, et al. Integer linear programming based fault section diagnosis method

- with high fault-tolerance and fast performance for distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(3): 786-794.
- [9] 何瑞江, 胡志坚, 李燕, 等. 含分布式电源配电网故障区段定位的线性整数规划方法[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3684-3690.  
HE Ruijiang, HU Zhijian, LI Yan, et al. Fault section location method for DG-DNs based on integer linear programming[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3684-3690.
- [10] 刘鹏程, 李新利. 基于多种群遗传算法的含分布式电源的配电网故障区段定位算法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 36-41.  
LIU Pengcheng, LI Xinli. Fault-section location of distribution network containing distributed generation based on the multiple population genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 36-41.
- [11] LUO Meiju, WANG Yayi, LIU Hongling. Convergence results of a matrix splitting algorithm for solving weakly nonlinear complementarity problems[J]. Journal of Inequalities and Applications, 2016, 203: 1-9.
- [12] WANG Cheng, JIANG Binyan. An efficient ADMM algorithm for high dimensional precision matrix estimation via penalized quadratic loss[J]. Computational Statistics and Data Analysis, 2020, 142: 68-73.
- [13] 张颖, 周韧, 钟凯. 改进蚁群算法在复杂配电网故障区段定位中的应用[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 224-228.  
ZHANG Ying, ZHOU Ren, ZHONG Kai. Application of improved ant colony algorithm in fault-section location of complex distribution network[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 224-228.
- [14] YUAN Jiaxin, PAN Jianbing, FEI Wenli. An immune-algorithm-based space-vector PWM control strategy in a three-phase inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(5): 2084-2093.
- [15] 杜红卫, 孙雅明, 刘弘靖, 等. 基于遗传算法的配电网故障定位和隔离[J]. 电网技术, 2000, 24(5): 52-55.  
DU Hongwei, SUN Yaming, LIU Hongjing, et al. Fault section diagnosis and isolation of distribution networks based on genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2000, 24(5): 52-55.
- [16] 卫志农, 何桦, 郑玉平. 配电网故障区间定位的高级遗传算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 127-130.  
WEI Zhinong, HE Hua, ZHENG Yuping. A refined genetic algorithm for the fault sections location[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 127-130.
- [17] BRAHMA S M. Fault location in power distribution system with penetration of distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(3): 1545-1553.
- [18] 王成山, 郑海峰, 谢莹华, 等. 计及分布式发电的配电系统随机潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 39-44.  
WANG Chengshan, ZHENG Haifeng, XIE Yinghua, et al. Probabilistic power flow containing distributed generation in distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24): 39-44.
- [19] KARAKI S H, CHEDID R B, RAMADAN R. Probabilistic performance assessment of autonomous solar-wind energy conversion systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(2): 766-772.
- [20] 陈程, 陈星莺, 张健钊, 等. 考虑分时电价的地源热泵系统随机运行优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 57-64.  
CHEN Cheng, CHEN Xingying, ZHANG Jianzhao, et al. Stochastic operational optimal strategy for ground source heat pump system under TOU price[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 57-64.
- [21] 张金环, 安海霞, 王永春. 基于改进小生境帝国竞争算法的多目标电力系统无功优化[J]. 华北电力大学学报: 自然科学版, 2014, 41(4): 41-47.  
ZHANG Jinhuan, AN Haixia, WANG Yongchun. Multi-objective reactive power optimization based on improved empire competition algorithm[J]. Journal of North China Electric Power University, 2014, 41(4): 41-47.
- [22] 翟云峰, 易国伟, 王亦, 等. 基于改进帝国竞争算法的微电网动态经济调度[J]. 电力科学与工程, 2015, 31(5): 34-41.  
ZHAI Yunfeng, YI Guowei, WANG Yi, et al. Dynamic economic dispatch in microgrid based on improved empire competition algorithm[J]. Electric Power Science and Engineering, 2015, 31(5): 34-41.
- [23] LIU X. Economic load dispatch constrained by wind power availability: a here-and-now approach[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2010, 1(1): 2-9.
- [24] MOHAMED F A, KOIVO H N. System modeling and online optimal management of microgrid[C]//Proceeding of 6th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power and Transmission Networks for Offshore Wind Farms, 2006, Delft, Netherlands: 470-478.
- [25] 马天祥, 王春英, 贾静然, 等. 基于二进制粒子群算法的交直流混合配电网故障恢复方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 112-119.  
MA Tianxiang, WANG Chunying, JIA Jingran, et al. Fault Recovery method for AC/DC hybrid distribution network based on binary particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 112-119.

收稿日期: 2019-08-20; 修回日期: 2020-03-11

作者简介:

贾伯岩(1978—), 男, 硕士研究生, 正高级工程师, 主要从事输配电系统运行分析与管理、输配电线路关键技术研究;

马天祥(1986—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事配电系统运行与控制、配网设备关键技术研究工作; E-mail: matianxiang1986@126.com

张智远(1977—), 男, 硕士研究生, 主要从事配电网运行分析与管理、配电自动化技术研究。

(编辑 魏小丽)