

# 考虑脆弱性的复杂环网最小断点集计算新方法

张向亮<sup>1</sup> 徐文<sup>1</sup> 张向军<sup>2</sup> 吕飞鹏<sup>3</sup>

(1. 景德镇供电公司, 江西 景德镇 333000; 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102;  
3. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 分析了断点脆弱性的两个表现形式, 并以线路电气介数衡量断点的脆弱程度。将断点脆弱性作为断点选取的判据之一, 基于该指标和0-1状态的人工鱼群算法, 给出了一种多组同基最小断点集的选取方法。为了降低搜索时间的复杂度, 引入了禁忌表。最后通过算例系统验证了算法的可行性和正确性。

**关键词:** 最小断点集; 断点脆弱性; 线路电气介数; 人工鱼群算法; 禁忌表

**Abstract:** Two forms of break point vulnerability are analyzed and the electric betweenness in the lines is taken to measure the vulnerability. Break point vulnerability is used as one criterion of choosing break point. A method for selecting the optimum minimum break point set (MBPS) from multi-MBPS with the same cardinal number is presented based on this indicator and 0-1 state artificial fish swarm algorithm. In order to reduce the complexity of searching time, the tabu list is introduced. Finally, the feasibility and correctness are proved with the examples of simulation.

**Key words:** minimum break point set (MBPS); vulnerability of break point; electric betweenness in line; artificial fish swarm algorithm; tabu list

中图分类号: TM772 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)03-0061-06

现代电网逐渐形成为大规模多环复杂网络, 这给电力系统的安全稳定运行提出了严峻的考验和挑战。研究表明, 很多大面积停电事故与继电保护的不正确动作密切相关<sup>[1-2]</sup>。保护误动引发系统连锁故障继而导致大停电事故, 这会严重影响系统运行的安全与稳定。不同保护装置误动造成的影响程度与波及范围有差异, 处于关键位置的保护误动后果更严重, 影响更大。断点(break point, BP)保护通常不与其他保护配合整定, 使得系统故障时断点保护动作的选择性无法得到保证, 可能会出现越级误动, 使断点成为整个电网的一个脆弱环节。断点的脆弱性易引起保护越级误动, 导致断点保护所在的线路断开, 造成潮流转移和重新分布, 可能会引起过载跳闸事故, 给电网埋下了重大的安全隐患<sup>[3]</sup>。处于关键位置的断点保护装置发生越级误动会给电力系统、国民经济、人民生活水平带来更为负面的影响, 造成更严重的后果。为了降低断点保护误动的影响程度及提高系统运行的可靠性、安全性、经济性, 在保护配置方式及整定计算、系统运行方式及网络结构变化较大时应优先考虑和监护最脆弱的断点保护。有鉴于此, 需要提出一种行之有效的断点保护脆弱性的评估方法。

在大型复杂环网中, 满足微机保护装置的“四性”要求较为不易。为使保护装置定值更合理、更准确, 需要对整定计算方法进行更加深入的研究。整定计算过程包含4个重要步骤, 即寻找网络中所有有向基本回路、寻找相关顺序矩阵、求解主/后备保护对和计算最小断点集(minimum break point set, MBPS), 其中MBPS求取至关重要。如果选择了不恰当的整定计算起点, 可能会延长整个电网整定配合的收敛速度, 甚至不收敛, 也可能对系统的安全性和稳定性造成严重的破坏。目前相关文献和有关整定计算程序一般能求解出多组MBPS<sup>[4-6]</sup>, 优解和劣解均混于其中, 如何从中选取最优MBPS或在MBPS算法中直接求出最优MBPS用于整定计算的问题亟待解决。基于此, 提出了一种基于线路电气介数的断点脆弱性的分析方法, 并基于断点脆弱性和改进的人工鱼群算法(artificial fish swarm algorithm, AFSA)<sup>[7]</sup>选取最优MBPS, 以全新的视角研究多组同基MBPS最优选取问题。

## 1 断点脆弱性

由于断点保护自身的整定特点, 使其成为电网

中的一个脆弱元件,为减小断点脆弱性对系统的负面影响,需对断点脆弱性的形成原因和脆弱程度进行深入的分析研究。

### 1.1 断点脆弱性分析

断点保护的整定原则具有特殊性,不与相邻其他线路保护进行配合整定,可能因保护定值按灵敏性进行整定而无法满动作选择性的要求,继而发生越级误动现象,扩大了停电范围;也可能因保护定值按动作选择性进行整定而无法符合保护定值灵敏度的要求,继而发生拒动,造成设备的损坏或系统稳定的破坏。保护越级误动和拒动均会给电力系统带来巨大的影响和损失。可见,断点脆弱性的表现形式体现为无法满足动作选择性而越级误动和不符合保护定值灵敏性而拒动。下面以距离保护为例对断点脆弱性的两个表现形式予以说明。

#### (1) 按保护灵敏性整定

保护装置的灵敏性是指在其保护范围内出现故障或不正常状态时的反应能力<sup>[8]</sup>。

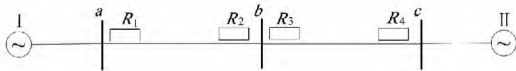


图 1 简单网络

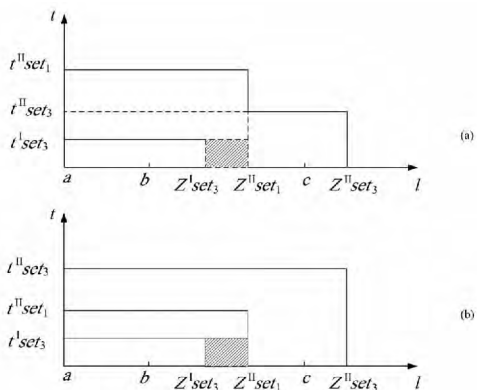


图 2 第 1 种定值配合

在图 1 所示的简单网络中,分析断点保护按保护灵敏性进行整定而无法满动作选择性之后发生越级误动的过程。以  $R_1$  的距离 II 段保护定值按与  $R_3$  的距离 II 段保护定值配合为例。保护  $R_1$  不为断点和为断点的定值配合如图 2 所示。

在保护  $R_1$  不为断点的情况下,  $R_1$  与  $R_3$  的定值配合关系如图 2(a) 所示。  $R_1$  的距离 II 段保护动作值与动作时限均按照与  $R_3$  的距离 II 段保护动作值与动作时限配合整定,如式(1)所示。

$$\begin{aligned} Z_{set1}^{II} &= K_{rel}^{II} Z_{set3}^{II} \\ t_{set1}^{II} &= t_{set3}^{II} + \Delta t \end{aligned} \quad (1)$$

在图 2(a) 中,若在线路(b,c)的阴影区域内发生故障,由于保护  $R_1$  与  $R_3$  的动作时限按配合整定,此时  $t_{set1}^{II} > t_{set3}^{II}$ ,  $R_3$  的距离 I 段不动作,其距离 II 段动作经过  $t_{set3}^{II}$  切除故障,保护  $R_1$  的距离保护 II 段不动作,保证了其动作的选择性。此外,  $R_1$  的距离保护 II 段的灵敏系数  $K_{sen} \geq 1.25$ 。

在  $R_1$  为断点的情况下,  $R_1$  与  $R_3$  的定值配合关系如图 2(b) 所示。若  $R_1$  的距离 II 段定值按照保护灵敏性进行整定,其动作定值与其不为断点情况下的距离 II 段动作定值相等,均为  $Z_{set1}^{II}$ ,灵敏系数  $K_{sen} \geq 1.25$  符合灵敏性要求。另一方面,  $R_1$  的距离 II 段动作时限与  $R_3$  的距离 II 段动作时限不满足选择性要求,有  $t_{set1}^{II} < t_{set3}^{II}$ 。在图 1(b) 中,若在线路(b,c)的阴影区域内发生故障,则  $R_4$  的主保护(距离 I 段)先瞬时动作跳闸,再经过  $t_{set1}^{II}$  之后,  $R_1$  的距离 II 段保护发生误动,越级跳闸断开了线路(b,c)切除故障,扩大了停电范围,造成了不必要的损失。

#### (2) 按保护选择性整定

保护动作选择性是指其发生动作时,只把故障部分从电力系统中切除,尽可能缩小停电面积,用于确保系统中非故障元件仍可以安全稳定运行<sup>[8]</sup>。

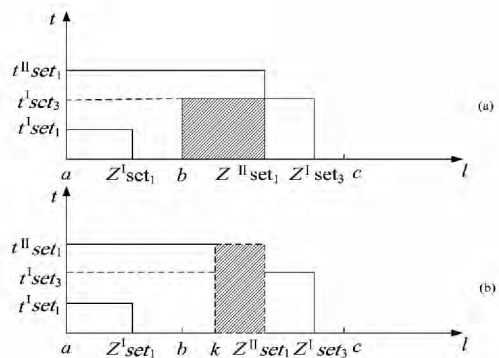


图 3 第 2 种定值配合

在图 1 中分析断点按保护选择性进行整定而无法满保护的灵敏性要求之后发生拒动的过程。以  $R_1$  的距离 II 段保护定值按与  $R_3$  的距离 I 段保护定值配合为例。  $R_1$  不为断点和为断点的定值配合如图 3 所示。

在  $R_1$  不为断点的情况下,  $R_1$  与  $R_3$  的定值配合关系如图 3(a) 所示。  $R_1$  的距离 II 段保护动作值与动作时限均按照与  $R_3$  的距离 I 段保护动作值与动作时限配合整定,如式(2)所示。

$$\begin{aligned} Z_{set1}^{II} &= K_{rel}^{II} Z_{set3}^I \\ t_{set1}^{II} &= t_{set3}^I + \Delta t \end{aligned} \quad (2)$$

在图 3(a) 中,若在线路( $b, c$ )的阴影区域内发生故障,由于  $R_1$  与  $R_3$  的动作时限按配合整定,此时  $t_{set3}^I < t_{set1}^II$ ,  $R_3$  的距离 I 段保护经过  $t_{set3}^I$  动作切除故障,而  $R_1$  的距离 II 段保护不动作,保证了  $R_1$  动作的选择性。此外,  $R_1$  的距离保护 II 段的灵敏系数  $K_{sen} \geq 1.25$ , 满足了其灵敏性要求。

在保护  $R_1$  为断点的情况下,  $R_1$  与  $R_3$  的定值配合关系如图 3(b) 所示。若  $R_1$  的距离 II 段定值按照保护选择性要求进行整定,其动作时限与其不为断点情况下的距离 II 段动作时限相等,均为  $t_{set1}^II$ ,从  $R_1$  不为断点的情况下分析可知,这样保证了保护动作的选择性。图 3(b) 中的  $k$  是此时  $R_1$  的距离 II 段保护的定值,该值无法满足灵敏性要求,有  $K_{sen} < 1.25, k < Z_{set1}^II$ 。在图 3(b) 中,若在线路( $b, c$ )的阴影区域内发生故障且  $R_3$  的主保护(距离 I 段)及近后备保护拒动时,  $R_1$  的距离 II 段保护作为  $R_3$  的远后备保护,因其灵敏度不够导致自身拒动,使故障越级,扩大停电范围,造成更多设备的损坏,严重破坏了系统的安全稳定运行。

在实际的整定计算中,断点保护定值通常按照保护灵敏性进行整定,如此,其动作选择性无法得到保证。当系统发生故障时,极有可能发生越级误动现象,断开断点所在线路,可能会引起线路相继过载,形成连锁过载跳闸事故,甚至造成大规模停电事故,其脆弱性给系统埋下了重大的安全隐患。断点的脆弱性与断点保护越级误动切除所在线路造成的后果密切相关,故可将断点脆弱性评估转化为断点所在线路的脆弱性评估。

### 1.2 断点脆弱性评估

潮流是衡量电网安全稳定运行水平的重要指标之一,其本质上是一种电气介数。在电网中,通常是按照欧姆定律和基尔霍夫定律在线路上传输功率。在复杂网络理论的有权电网模型上,没有假设潮流是沿着最短路径传播,如此,物理意义明确,更符合电力系统的实际情况。

目前,有较多文献以线路介数作为判据用于评估线路在系统中的重要程度,但是该判据仍然存在某些问题,如以其评估线路重要性时短线路容易具有更大的介数,但是在实际电网中,并非短线路具有更重要的地位,相反在多数情况下其重要性更低<sup>[9]</sup>。

结合上述两点,采用新的线路脆弱性指标,定义线路( $m, n$ )的电气介数计算公式为

$$B(m, n) = \sum_{i \in G, j \in L} |I^{ij}(m, n)| \quad (3)$$

式中  $I^{ij}(m, n)$  是在发电-负荷节点对( $i, j$ )之间加上单位注入电流源后,在线路( $m, n$ )上引起的分布电流; $G$ 和 $L$ 分别为发电机节点集合和负荷节点集合。

线路电气介数  $B(m, n)$  反映了发电-负荷节点对之间注入单位电流源后分布电流对线路的利用情况和量化了线路对分布电流传播的贡献。若  $B(m, n)$  越大,表明线路( $m, n$ )的作用越大,重要程度和脆弱性也越大。越重要越脆弱的线路断开将引起潮流大范围转移,可能因其他线路相继过载跳闸造成大停电事故,说明在此线路上的断点保护就越脆弱。断点脆弱性可作为多组同基 MBPS 的最优选取问题的判据之一。

## 2 基于人工鱼群算法的 MBPS 最优选取方法

将断点脆弱性指标引入人工鱼群算法,改进该算法,利用人工鱼群算法优良的全局寻优能力<sup>[10]</sup>求解 MBPS 计算的数学模型<sup>[11-15]</sup>,获取最优 MBPS,在此过程中,构造了鱼群 4 种寻优行为的 0-1 状态计算公式。为了获取最优 MBPS,需在计算过程中基于一种选优指标进行选取,这里以断点脆弱性作为选优指标,以人工鱼群算法求解 MBPS 数学模型,为了将断点脆弱性合理地融入鱼群算法中,将断点脆弱性定义为鱼群对食物的喜爱程度,选优的优先级次于食物浓度。基于上述两点,以改进的人工鱼群算法求取最优 MBPS。下面对鱼群算法中各寻优行为的 0-1 状态公式、食物浓度、食物喜爱度、禁忌表分别予以说明。

### 2.1 食物浓度和食物喜爱度

鱼当前状态的食物浓度及自身在感知域内搜寻到其他位置的食物浓度是引领和指导其作出决策判断的依据。只有食物浓度高的地方才会吸引更多鱼前来扑食。在基础的人工鱼群算法中,定义目标函数  $Y=f(X)$  为食物浓度,而本章的目标函数是求极小值,为了能与鱼扑食依据相一致,即寻找食物浓度最高的位置,在此定义食物浓度  $Y$  为本章目标函数的倒数,如式(4)所示。

$$Y = \frac{1}{\min_{j=1}^N X_j} \quad (4)$$

本章约定食物浓度为鱼寻优依据的第一指标,

即优先级最高。

鱼对不同食物的喜爱程度有差异,若鱼群在寻优过程中,在公告板上记录最高的食物浓度时对应了多组最优状态,各组状态的食物通常对鱼的吸引力是有区别的,为了在上述情况下区分这种差异,找出鱼最愿意最可能去的位置,本章定义了鱼的食物喜爱度  $Y_{love}$ ,基于该指标进行最优解的选择,其计算如式(5)所示。

$$Y_{love} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N (X_i \cdot Vul(r_i))} \quad (5)$$

式中,  $Vul(r_i)$  表示保护  $r_i$  的断点脆弱性。

本章约定食物喜爱度为鱼寻找优解依据的第二指标,即优先级别次于食物浓度。

目标函数的约束条件不变,如文献[11-15]所示。

### 2.2 觅食行为的0-1状态公式

假定人工鱼  $i$  的当前状态向量为  $X_i = \{X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iN}\}$ , 如果在其感知域内随机选择一个状态向量  $X_j = \{X_{j1}, X_{j2}, \dots, X_{jN}\}$ , 若此时食物浓度大于当前位置的食物浓度,鱼  $i$  向  $X_j$  方向移动一步,其新状态向量  $X_{i+1} = \{X_{(i+1)1}, X_{(i+1)2}, \dots, X_{(i+1)N}\}$  中各元素的计算公式如式(6)所示;相反,人工鱼  $i$  再重新随机选择其他鱼的状态,判断是否满足行进条件,反复试探  $Try\_number$  次后,若仍然不满足行进条件,则鱼  $i$  随机移动一步,即是鱼的随机行为,其新状态向量的计算公式亦如式(6)所示。

$$X_{(i+1)k} = \begin{cases} X_{ik} & X_{ik} = X_{jk} \\ \max(0, X_{ik} - 1) & X_{ik} \neq X_{jk} \end{cases} \quad (6)$$

### 2.3 聚群行为的0-1状态公式

设人工鱼当前状态向量为  $X_i = \{X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iN}\}$ , 搜寻到其感知域内的伙伴个数为  $n_f$  及中心位置状态  $X_c = \{X_{c1}, X_{c2}, \dots, X_{cN}\}$ , 其中的元素计算公式如式(7)所示。若人工鱼所在位置的食物浓度  $Y_i$  与中心位置的食物浓度  $Y_c$  满足公式(8)所示关系,表明中心位置的食物丰富且不太拥挤,可向中心位置方向行进一步,其新状态向量中各元素的计算公式如(9)所示;若两者不满足公式(8)所示关系,则进行觅食行为。

$$\begin{cases} A = \frac{1}{n_f} \sum_{j=1}^{n_f} X_{jk} \\ X_{ck} = \begin{cases} 1 & A \geq 0.5 \\ 0 & A < 0.5 \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

$$\frac{Y_c}{n_f \cdot \delta} > Y_i \quad (8)$$

$$X_{(i+1)k} = \begin{cases} X_{ik} & X_{ik} = X_{ck} \\ \max(0, X_{ik} - 1) & X_{ik} \neq X_{ck} \end{cases} \quad (9)$$

### 2.4 追尾行为的0-1状态公式

设当前人工鱼  $i$  的状态向量为  $X_i = \{X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iN}\}$ , 搜索到其感知域内食物浓度最高为  $Y_j$ , 对应的人工鱼为  $j$ , 其状态向量为  $X_j = \{X_{j1}, X_{j2}, \dots, X_{jN}\}$ 。若两者所在位置食物浓度满足公式(10)所示关系,表明人工鱼  $j$  所在位置的食物丰富且不太拥挤,可向  $X_j$  方向行进一步,人工鱼  $i$  的新状态向量中各元素的计算公式如式(11)所示;若两者不满足公式(10)所示关系,则进行觅食行为。

$$\frac{Y_j}{n_f \cdot \delta} > Y_i \quad (10)$$

$$X_{(i+1)k} = \begin{cases} X_{ik} & X_{ik} = X_{\max k} \\ \max(0, X_{ik} - 1) & X_{ik} \neq X_{\max k} \end{cases} \quad (11)$$

### 2.5 禁忌表的引入

MBPS 计算是带有约束条件的0-1整数规划问题,为此,在人工鱼搜索到较优状态时,其新状态不一定能满足求解模型中的约束条件,需重新搜索以至于其自身新状态符合约束条件为止。在该情况下,为能有效地避免重复搜索不符合条件的状态,降低搜索时间的复杂度,可引入禁忌表  $Tabu()$ 。在人工鱼一次迭代结束后,禁忌表  $Tabu()$  中的各状态被清空,为下次迭代的禁忌搜索做准备。在 MBPS 算法程序的觅食函数  $gmjprey()$  中,觅食行为和随机行为用到了禁忌表  $Tabu()$ 。人工鱼的觅食行为随机选择其他鱼的状态,然后判断是否满足行进条件,反复试探  $Try\_number$  次直至满足条件为止,在此过程中,把不满足约束条件的新状态对应的行进方向的指引状态放入禁忌表  $Tabu()$  中。若觅食行为没找到合适状态,则跳出觅食循环后执行随机行为,在此过程中,如同觅食行为,将不符合约束条件的状态对应的行进方向的指引状态放入禁忌表  $Tabu()$  中,直至找出合适的新状态。若随机行为也找不到合适的新状态,只能通过函数  $InitOneProperState()$  随机产生一个合格的状态。

### 2.6 利用人工鱼群算法对模型求解

人工鱼群算法的核心是:通过对鱼群各寻优行为的评价,选择当前最优行为予以执行,最终到达食物浓度最丰富的地方。将其应用于 MBPS 计算问题,可

描述为:通过对觅食行为、聚群行为、追尾行为的评估选择执行 经过多次迭代后 找到最大 Y 值对应的状态 将该状态下元素“1”对应的保护选为断点。

设人工鱼  $i$  的当前状态为  $X_i = \{X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iN}\}$  搜寻到其感知域内的伙伴个数为  $n_f$  及中心位置状态  $X_c = \{X_{c1}, X_{c2}, \dots, X_{cN}\}$  通过聚群行为寻优,以公式(9)计算其新状态向量  $X_{i \text{ next}1} = X_{i1 \text{ next}1}, X_{i2 \text{ next}1}, \dots, X_{iN \text{ next}1}$ , 而该状态下的食物浓度以式(4)计算,记为  $Y_{i \text{ next}1}$ 。人工鱼  $i$  搜索到其感知域内食物浓度最高为  $Y_j$ , 对应的人工鱼为  $j$  状态向量为  $X_j = \{X_{j1}, X_{j2}, \dots, X_{jN}\}$ , 通过追尾行为寻优,以公式(11)计算其新状态向量  $X_{i \text{ next}2} = \{X_{i1 \text{ next}2}, X_{i2 \text{ next}2}, \dots, X_{iN \text{ next}2}\}$ , 而该状态下的食物浓度以式(4)计算,记为  $Y_{i \text{ next}2}$ 。此时,若  $Y_{i \text{ next}1} > Y_{i \text{ next}2}$ , 表明人工鱼  $i$  通过聚群行为寻优效果优于追尾行为寻优效果,其新状态向量  $X_{i \text{ next}} = X_{i \text{ next}1}$ , 所在位置的食物浓度  $Y_{i \text{ next}} = Y_{i \text{ next}1}$ ; 若  $Y_{i \text{ next}1} \leq Y_{i \text{ next}2}$ , 表明人工鱼  $i$  通过聚群行为寻优效果更好,其新状态向量  $X_{i \text{ next}} = X_{i \text{ next}2}$ , 所在位置的食物浓度  $Y_{i \text{ next}} = Y_{i \text{ next}2}$ 。人工鱼  $i$  一次寻优完成后,将其新状态所在位置的食物浓度  $Y_{i \text{ next}}$  与公告板上的食物浓度  $Y_{\text{max}}$  相比较,若  $Y_{i \text{ next}} > Y_{\text{max}}$ , 则将公告板上的食物浓度和状态更新为  $Y_{i \text{ next}}$  和  $X_{i \text{ next}}$ ; 若  $Y_{i \text{ next}} < Y_{\text{max}}$ , 则不更新公告板; 若  $Y_{i \text{ next}} = Y_{\text{max}}$  则需要以公式(5)分别计算状态  $X_{i \text{ next}}$  和  $X_{\text{max}}$  的食物喜爱度  $Y_{(i \text{ next}) \text{ love}}$  和  $Y_{(\text{max}) \text{ love}}$ , 若  $Y_{(i \text{ next}) \text{ love}} > Y_{(\text{max}) \text{ love}}$ , 则将公告板上的食物浓度和状态更新为  $Y_{i \text{ next}}$  和  $X_{i \text{ next}}$ ; 若  $Y_{(i \text{ next}) \text{ love}} < Y_{(\text{max}) \text{ love}}$  则在公告板上增加食物浓度和状态  $Y_{i \text{ next}}$  和  $X_{i \text{ next}}$ ; 否则,不必更新公告板。上述关系可如式(12)所示,如此,等待其他鱼的一次迭代结束后准备下次迭代。当算法结束之后,公告板上状态向量的“1”元素对应保护组成的集合即是要找的最优 MBPS。

$$[X_{\text{max}}, Y_{\text{max}}] = \begin{cases} [X_{i \text{ next}}, Y_{i \text{ next}}] & Y_{i \text{ next}} = Y_{\text{max}} \text{ 且 } Y_{(i \text{ next}) \text{ love}} > Y_{(\text{max}) \text{ love}} \\ \text{增加 } [X_{i \text{ next}}, Y_{i \text{ next}}] & Y_{i \text{ next}} = Y_{\text{max}} \text{ 且 } Y_{(i \text{ next}) \text{ love}} = Y_{(\text{max}) \text{ love}} \\ \text{不更新} & Y_{i \text{ next}} = Y_{\text{max}} \text{ 且 } Y_{(i \text{ next}) \text{ love}} < Y_{(\text{max}) \text{ love}} \\ \text{不更新} & Y_{i \text{ next}} < Y_{\text{max}} \\ [X_{i \text{ next}}, Y_{i \text{ next}}] & Y_{i \text{ next}} > Y_{\text{max}} \end{cases} \quad (12)$$

### 3 算法步骤

人工鱼群算法的主要步骤如下所示。

步骤 1: 设置人工鱼群个体数  $N$ , 一次移动的最大试探次数 Try\_number, 迭代次数为 number, 感知距离为 Visual, 拥挤度因子为  $\delta$ ;

步骤 2: 随机生成  $N$  个符合约束条件的人工鱼个体状态, 形成初始鱼群, 即  $N$  组  $\{X_{ik}\}$  (其中  $i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, n$ );

步骤 3: 算出初始各人工鱼当前状态所在位置的食物浓度, 将浓度最大值和此时的状态赋予公告板;

步骤 4: 所有人工鱼分别模拟聚群行为和追尾行为, 比较两种情况下鱼新状态所在位置的浓度, 选择食物浓度值最大的寻优行为予以执行, 两者的缺省行为是觅食行为;

步骤 5: 每条人工鱼一次迭代结束后, 计算自身状态的食物浓度和食物喜爱度, 并按照公式(12)决定是否更新公告板;

步骤 6: 当迭代次数不大于最大迭代次数时, 算法流程转向步骤 4; 否则, 终止迭代, 算法结束, 输出计算结果。

### 4 算例分析

在图 4 中, 包含 5 个节点、7 条线路和 14 个保护, 给出了线路电抗标么值, 选节点 5 为参考节点, 以线路电气参数计算各保护可能被选为断点的潜在脆弱性, 结果如表 1 所示, 建立起有向基本回路矩阵  $L$ 。

设置人工鱼群算法基本参数, 人工鱼群总数  $N = 50$ , Try\_number = 50, number = 10, Visual = 6,  $\delta = 0.618$ 。

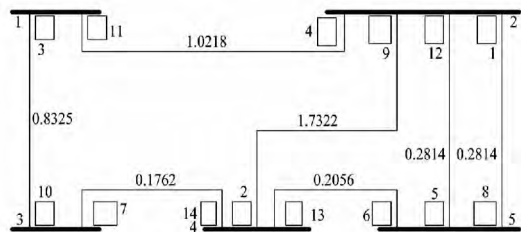


图 4 电力系统接线图

表 1 断点脆弱性

编号	断点脆弱性	编号	断点脆弱性	编号	断点脆弱性	编号	断点脆弱性
1	0.333 3	5	0.333 3	9	0.133 3	13	0.666 4
2	0.133 3	6	0.666 4	10	0.200 5	14	0.799 7
3	0.200 5	7	0.799 7	11	0.200 4		
4	0.200 4	8	0.333 3	12	0.333 3		

$$L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

若不考虑食物喜爱度选优判据,50 只鱼经过 5 次迭代后,公告板上存在 5 组最优状态,即:  $\{2, 5, 8, 10\}$ ,  $\{2, 5, 8, 11\}$ ,  $\{2, 5, 8, 14\}$ ,  $\{1, 4, 9, 12\}$ ,  $\{1, 7, 9, 12\}$ , 而迭代 6 次后,公告板上存在 6 组最优状态,即:  $\{2, 5, 8, 10\}$ ,  $\{2, 5, 8, 11\}$ ,  $\{2, 5, 8, 14\}$ ,  $\{1, 4, 9, 12\}$ ,  $\{1, 7, 9, 12\}$ ,  $\{1, 3, 9, 12\}$ , 之后不管迭代几次,均不会增加最优状态的个数,即只存在 6 组最优解,与文献[11]所求解相同。各组解的食物喜爱度大小如表 2 所示。若将食物喜爱度考虑进去,经过 6 次迭代后,公告板上存在 2 组最优状态,即:  $\{2, 5, 8, 11\}$ ,  $\{1, 4, 9, 12\}$ , 整定工作者可任选一组作为整定计算的起点。通过断点脆弱性分析,此组 MBPS 给电力系统安全稳定运行带来的潜在危害相对较小。

表 2 6 组解的食物喜爱度

最优解	食物喜爱度	最优解	食物喜爱度
$\{2, 5, 8, 10\}$	1.000 4	$\{1, 4, 9, 12\}$	1.000 3
$\{2, 5, 8, 11\}$	1.000 3	$\{1, 7, 9, 12\}$	1.599 6
$\{2, 5, 8, 14\}$	1.599 6	$\{1, 3, 9, 12\}$	1.000 4

## 5 结 论

针对断点脆弱性会给电力系统带来潜在的安全隐患,提出了一种基于线路电气介数的断点脆弱性的分析方法,并基于断点脆弱性和 0-1 状态的改进人工鱼群算法选取最优 MBPS,可获得一组或多组最优解,有效地降低了 MBPS 对电力系统安全稳定性潜在危害,避免了整定工作者在劣解和优解中盲目选取 MBPS,对预防保护误动导致的大规模停电事故具有指导意义。

## 参考文献

- [1] Thorp J S, Phadke A G, Horowitz S H, et al. Anatomy of Power System Disturbances Importance Sampling [J]. Journal of Electric Power and Energy Systems, 1998, 20(2): 147 - 152.
- [2] S. H. Horowitz, A. G. Phadke. Third Zone Revisted [J]. IEEE Trans. Power Delivery, 2006, 21(21): 23 - 29.
- [3] 王立永, 张保会, 王克球, 等. 考虑安全约束的输电断面经济传输容量及其计算 [J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(10): 1125 - 1128.
- [4] 刘丹, 吕飞鹏. 基于网络化简和配合关系的最小断点集计算方法 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(16): 24 - 27.
- [5] 刘丹, 吕飞鹏. 基于蚁群算法的环网方向保护配合最小断点集计算 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(21): 27 - 31.
- [6] 吕飞鹏. 基于配合关系计算复杂环网保护最优配合顺序的新方法 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 65 - 69.
- [7] 李春梅, 马良. 非线性 0-1 规划问题的人工鱼群算法 [J]. 计算机应用研究, 2011, 28(7): 2449 - 2450.
- [8] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理(增订版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [9] 张向亮, 吕飞鹏, 李运坤, 等. 基于保护重要度的多组同基最小断点集选取方法 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10): 90 - 93.
- [10] 江铭炎, 袁东风. 人工鱼群算法及其应用 [M]. 科学出版社, 2012.
- [11] 陈绩, 吕飞鹏, 黄妹雅. 确定复杂环网方向保护最小断点集的改进离散粒子群优化算法 [J]. 电网技术, 2008, 32(12): 90 - 94.
- [12] 吕飞鹏, 米麟书, 姜可薰. 环网方向保护配合最小断点集的神经计算方法 [J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(3): 184 - 189.
- [13] 乐全明, 顾永朋, 吕飞鹏. 基于 GA 的环网方向保护配合最小断点集的计算 [J]. 继电器, 2002, 8(30): 23 - 26.
- [14] 周文越, 吕飞鹏, 廖小君. 基于人工蜂群算法的环网方向保护配合最小断点集计算 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 77 - 81.
- [15] 卢志刚, 谢晓伟, 李学平, 等. 一种求解复杂环网保护配合最优断点集的新方法 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 86 - 91.

作者简介:

张向亮(1987), 硕士, 主要研究方向为电力系统继电保护;  
张向军(1980), 硕士, 主要研究方向为电力系统继电保护;  
吕飞鹏(1968), 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统继电保护和故障信息处理智能系统。

(收稿日期: 2014-01-01)