

考虑保护重要度计算环网方向保护配合最小断点集

江登笠¹ 李运坤¹ 周文越²

(1. 德阳电业局检修公司(检修试验) 四川 德阳 618000;

2. 四川大学电气信息学院 四川 成都 610065)

摘要:在对复杂环网方向保护进行整定计算时,确定其最优配合顺序的核心步骤就是求解最小断点集(MBPS)。根据保护主后备的依赖关系,建立了计算MBPS的数学模型,将整定过程用一系列矩阵运算表示,并加入到约束条件。将保护重要度引入到目标函数中,利用人工蜂群算法对模型进行求解,得到最优MBPS。通过算例验证算法及模型的有效性。

关键词:整定计算; 最小断点集; 配合依赖关系; 保护重要度; 人工蜂群算法

Abstract: Determination of minimum break point set (MBPS) is the first step during setting and calculation of direction protection in a complex multi-loop network. A new model for directly obtaining MBPS is established through the coordination dependency relationship of primary and backup relay. The setting process is expressed through a series of matrix operation which becomes the constraint. The relay protection importance is introduced into the objective function and artificial bee colony algorithm is used for solving the model and obtaining the optimal MBPS. At last, it verifies the validity of the proposed algorithm and model by an example.

Key words: setting calculation; minimum break point set (MBPS); coordination dependency relationship; relay protection importance; artificial bee colony algorithm

中图分类号: TM773 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)04-0071-04

0 引言

计算最小断点集(minimum break point set, MBPS)是复杂环网方向保护整定计算第一个步骤。因为,只有找到最小断点集,并在断点对应的保护安装处断开断点,使环网变为辐射型网络后,才可以顺利地对整个环网进行整定计算。

近年来,计算MBPS的方法主要是基于图论的方法^[1-4]和基于保护配合依赖关系的方法^[5-7]。上述文献提出的算法虽然可得到基数最小的多组MBPS,但无法确定最优的那组MBPS。文献[8]首次提出了多组同基MBPS的选取方法,首先采用文献[6]提出的算法得到网络的多组MBPS,再考虑保护重要度选取最优的一组MBPS,需要两次计算,较为复杂,而且文献[6]的算法无法得到所有的MBPS,因此所选取的MBPS并非是最优的MBPS。

首先参照文献[7]提出的方法,根据保护主后备的依赖关系,将整定过程用一系列矩阵运算表示,

并作为约束条件引入MBPS的计算模型,然后通过计算节点和线路电气参数得到保护重要度,并加入目标函数中,通过人工蜂群算法对模型进行求解,最后得到最优MBPS。

1 MBPS 求解模型

1.1 形成保护有向图的节点邻接矩阵

图1(b)所示的有向图表示图1(a)所示的电网的方向保护的配合依赖关系。图1(b)中的节点表示相应编号的保护,有向边表示各个保护之间的配合关系。例如,与节点6相邻的两条边指向节点4和2,则表示保护6需要与保护4和2配合,即保护6是保护4和2的后备保护。

图1所示的保护配合关系可以用有向图的节点邻接矩阵表示 $A = (a_{ij})$ 。其中 A 为 n 阶方阵, n 为保护的个数。如果保护 i 是保护 j 的后备保护,则 $a_{ij} = 1$,否则为0。这样一来,就可求出图1的节点邻接矩阵 A 。

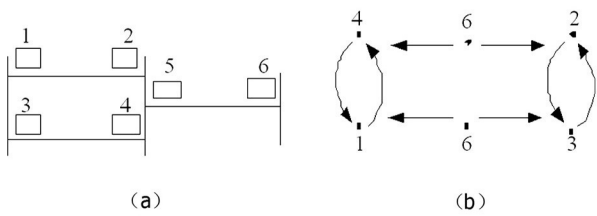


图1 有向图表示保护配合关系

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

1.2 利用保护配合关系判断断点集

在确定了电网的断点集后,在断点处将环网解开,环网就变成一个辐射网络。对于一个辐射网络,其整定顺序是以终端线路保护作为保护整定起点,然后根据保护配合关系,逐级往上整定,直到所有保护都被整定。现用 n 维向量表示断点集, n 为电网中保护的个数, $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$, 若保护 j 属于断点集, 则 x_j 等于 0, 否则为 1。MBPS 即为使 X 中所有元素之和最大的断点集。

可以用以下方法表示全网保护的整定过程^[7], 并通过这个过程判断 n 维向量 X 是否表示了电网的一种断点集。

步骤 1: 构造 n 维 0-1 向量 $X^0 = [x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0]$ 并根据保护主后备依赖关系确定保护配合有向图的节点邻接矩阵 A 。

步骤 2: 如果向量 $X^0 = [x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0]$ 中 $x_j^0 = 0$, 则将 A 中的第 j 行置零。

步骤 3: 按式(1)计算 X^{i+1} 。

$$X^{i+1} = (A \times (X^i)^T)^T \quad (1)$$

式中 i 初始值为 0。在得到后 X^{i+1} , 对 X^{i+1} 中大于 1 的元素置 1。

步骤 4: 若在 $X^{i+1} = [x_1^{i+1}, x_2^{i+1}, \dots, x_n^{i+1}]$ 中 $x_j^{i+1} = 0$, 则将 A 的第 j 行置 0。

步骤 5: 若 $X^{i+1} \neq 0$, 则返回步骤 3 继续计算, 否则结束。

对于任何一个 n 维向量 X , 如果可以通过以上步骤进行计算后, 所有的元素变为 0, 则表示这个向量所表示的集合代表了一种断点集。将上述计算过程用一个函数 $f(X, A)$ 表示。对于一个含 n 个方向保护的电网 A 为它的保护有向图的节点邻接矩阵,

若对一个 n 维 0-1 向量 $X, f(X, A) = 0$, 则 X 所表示的集合为该电网的断点集。

1.3 保护重要度

综合考虑文献 [9]、[10]、[11] 提出的线路电气介数和节点电气介数来判断保护的重要度。

1.3.1 线路电气介数

$$B(m, n) = \sum_{i \in G, j \in L} |I_{ij}(m, n)| \quad (2)$$

式中 $B(m, n)$ 为线路 (m, n) 的电气介数; $I_{ij}(m, n)$ 为在发电机-负荷节点 (i, j) 上加单位电流源后, 在线路 (m, n) 引起的电流; G, L 分别为发电机节点和负荷节点的集合。

1.3.2 节点电气介数

$$B(n) = \sum_{i \in G, j \in L} B_{ij}(n) \quad (3)$$

式中 $B(n)$ 为节点电气介数; $B_{ij}(n)$ 为发电机-负荷节点对 n 节点的电气介数。

$$B_{ij}(n) = \begin{cases} \frac{1}{2} \sum_m |I_{ij}(m, n)|, & n \neq i, j \\ 1, & n = i, j \end{cases} \quad (4)$$

式中 m 为所有与节点 n 直接相连的节点。

1.3.3 节点电气介数

定义保护重要度为与该保护相关的线路电气介数与节点电气介数之和。

$$\lambda(j) = B(m, n) + B(n) \quad (5)$$

式中 $\lambda(j)$ 为保护 j 的重要度。

由于断点保护的整定不与其他保护配合, 因此断点保护不能完全保证其动作的选择性。为降低保护误动、拒动的概率, 在计算 MBPS 时应优先考虑保护重要度之和较小的。

1.3 建立求解 MBPS 的数学模型

通过 1.1 所陈述的算法可以判断一个 n 维向量 X 所表示的集合是否是该电网的断点集。因此这种判断可作为求解 MBPS 数学模型的约束条件。将保护重要度引入目标函数中, 若某断点集所有保护的重要度之和较大, 则其被选中的概率小, 反之被选中的概率大。式(6)为求解 MBPS 的数学模型。

$$\begin{cases} \max(\beta_1 \sum_{j=1}^n x_j + \frac{\beta_2}{1 + \sum_{j=1}^n \lambda(j) |x_j - 1|}) \\ st. f(X, A) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中 $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ 表示电网的某一断点集; n 为电网中保护的个数, 若保护 j 属于断点集, 则 x_j 等于 0, 否则为 1; β_1, β_2 为权重因子, 应合理选取 $\beta_1,$

β_2 使目标函数中的第一项始终大于第二项, 以使得最终所得断点集的基数最小, 但不能相差太大, 否则第二项在优化中将不起作用。

2 人工蜂群算法计算 MBPS

2.1 算法基本原理

2005年, D. Karaboga 成功地将蜜蜂觅食原理运用于数值优化问题上, 提出了人工蜂群算法^[12]。作为一种典型的群居生物, 单个蜜蜂的智慧是有限的, 但是当一群蜜蜂聚在一起时, 就会表现出惊人的智慧。不管在什么环境下, 蜜蜂总是可以在蜂巢周围找到食物最丰富的食物源。

在人工蜂群算法中, 每个食物源对应优化问题的一个可行解, 食物源的丰富程度对应可行解的适应度值。在算法开始阶段, 所有的蜜蜂皆为侦察蜂, 在蜂巢附近寻找食物源, 之后, 引领蜂会对食物源领域进行搜索, 并比较搜索前后食物源的丰富程度, 选择较丰富的食物源作为采集目标。当引领蜂完成搜索后, 它们会回到蜂巢, 并在舞蹈区将自己掌握的食物源信息与其他蜜蜂分享, 跟随蜂会根据食物源的丰富程度以一定概率选择引领蜂进行跟随。当然, 食物源越丰富, 被选择的概率也就越大。

在人工蜂群算法中, 蜂群的觅食行为与优化问题之间存在如表1所示的关系。

表1 蜂群的觅食行为与优化问题对应关系

蜂群觅食行为	优化问题
蜜源	可行解
蜜源的收益度	可行解的适应度大小
觅食速度	优化速度
收益度最大的蜜源	最优解

2.3 求解 MBPS 的具体步骤

步骤1: 计算电网中各个保护的重要度。

步骤2: 根据电网的保护配合依赖关系有向图形成表示保护主后备关系的节点邻接矩阵 A , 随机产生 M 个初始 n 维 $0-1$ 向量 $X_j = [x_j^1, x_j^2, \dots, x_j^n]$, $x_j^i = 0$ 或 $1, j=1, 2, 3, \dots, M$, 即 M 个初始解。对每一个向量, 判断是否满足约束条件 $f(X_j, A) = 0$, 对不满足的向量, 舍去并重新产生一个代替, 直到 M 个初始向量都满足为止。

步骤3: 用式(7)计算每个初始解的适应度 C_j 。

对每一个初始解进行领域搜索。其方法是: 随机选中 X_j 中的一个元素, 若该元素为 0 , 则将其置 1 ; 若该元素为 1 , 则将其置 0 。判断搜索后的解是否满足约束条件, 若不满足则舍去。计算搜索后的解的适应度, 并与初始解的适应度比较, 选择适应度较大的解, 淘汰适应度较小的解。

$$C_j = \beta_1 \sum_{j=1}^n x_j^i + \frac{\beta_2}{1 + \sum_{j=1}^n \lambda(j) |x_j^i - 1|} \quad x_j^i \in X_j \quad (7)$$

步骤4: 按适应度的大小, 从大到小将每个解排序, 按轮盘赌的方式进行选择。对每一个被选中的解, 进行领域搜索, 判断搜索后的解是否满足约束条件, 若不满足则舍去。计算搜索后的解的适应度, 并与搜索前解的适应度比较, 选择适应度较大的解, 淘汰适应度较小的解。

步骤5: 判断每个解被搜索的次数, 将超过 N (这里设 N 为 10) 次搜索而没有更优的解淘汰, 产生新解代替。若该解为种群最优解则不淘汰。

步骤6: 判断是否达到最大迭代次数, 若没达到, 则转步骤2继续计算。若达到最大迭代次数, 则结束算法。

3 算例分析

采用图2所示算例^[8]。

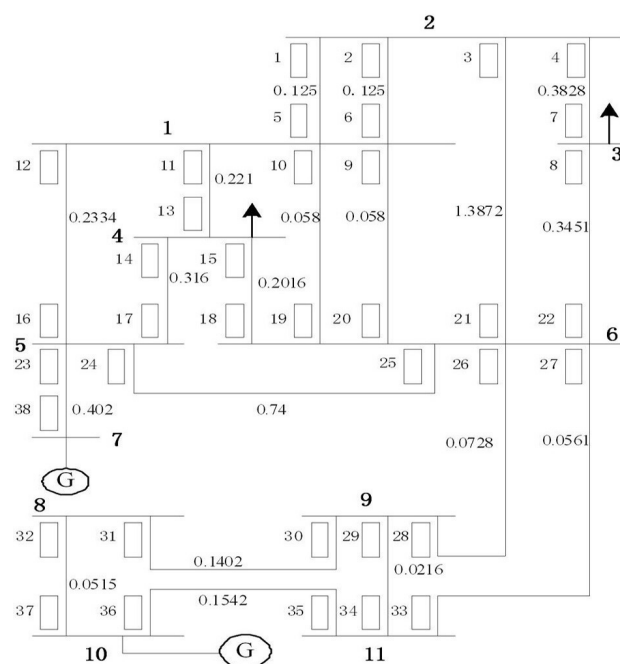


图2 电网接线图

计算每个保护的重要度如表2所示。

表2 保护重要度

保护编号	重要度	保护编号	重要度	保护编号	重要度
1	1.323 6	14	3.738 2	27	3.994 5
2	1.323 6	15	3.352 3	28	1.765 4
3	1.087 4	16	3.002 6	29	0.910 2
4	1.798 8	17	3.122 0	30	1.783 4
5	2.689 7	18	3.453 3	31	1.780 3
6	2.689 7	19	3.085 1	32	1.774 4
7	2.883 7	20	3.085 1	33	2.260 2
8	3.155 7	21	2.970 5	34	1.152 0
9	2.117 3	22	4.003 9	35	2.556 0
10	2.435 4	23	4.183 4	36	3.122 1
11	2.389 1	24	2.424 8	37	2.885 8
12	2.731 3	25	3.109 3	38	4.000 0
13	3.276 6	26	3.741 5		

形成保护配合有向图节点邻接矩阵 A 由于矩阵维数过大 这里就不列出。

算例中的保护 23 为末端线路首端保护。需要在计算完成后加入断点集。

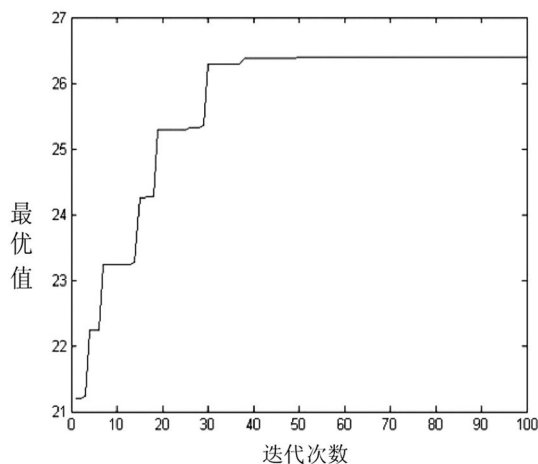


图3 人工蜂群算法进化过程

β_1 、 β_2 分别取 1 和 10。人工蜂群算法参数设置如下: 引领蜂与跟随蜂数量相等, 为 300 个, 侦察蜂 1 个, 计算迭代次数为 100 次。图 3 为人工蜂群算法的进化曲线。算法结束后, 加入保护 23, 得到最优 MBPS 为 {1, 2, 3, 8, 9, 10, 11, 17, 24, 28, 29, 32, 23}。该 MBPS 基数为 13, 与文献 [6] 一致。

4 结 论

利用环网方向保护的主后备依赖关系, 将整定过程用一系列矩阵运算表示, 并将其作为求解 MBPS

数学模型的约束条件。综合考虑节点和线路电气参数, 计算出保护重要度, 加入到目标函数中, 采用人工蜂群算法对模型进行求解, 得到最优的 MBPS。现有算法只是单方面考虑基数最小计算 MBPS, 或在不完整的多组同基 MBPS 中选取最优的一组。所提出的算法弥补了这些不足, 具有一定的实用性。

参考文献

- [1] Damborg M J, Ramaswami R, Venkata S S et al. Computer-aided Transmission Protection System Design, Part I: Algorithms [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1984, 103(1): 104-114.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Bapeswara Rao V V, Sankara Rao K. Computer-aided Coordination of Directional Relays: Determination of Break Points [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 3(2): 545-548.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 吕飞鹏, 刘丹. 基于蚁群算法计算环网保护配合最小断点集的新方法 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, 42(4): 142-147.
- [8] 李运坤, 吕飞鹏, 陈新, 等. 基于节点重要度估计的多组同基最小断点集选取方法 [J]. 电力系统自动化, 2010, 12(34): 58-60.
- [9] 陈晓刚, 孙可, 曹一家. 基于复杂网络理论的大电网结构脆弱性分析 [J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 138-144.
- [10] 徐林, 王秀丽, 王锡凡. 基于电气介数的电网连锁故障传播机制与积极防御 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 61-68.
- [11] 徐林, 王秀丽, 王锡凡. 电气介数及其在电力系统关键线路识别中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 33-39.
- [12] Karaboga D. An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization [R]. Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Department 2005.

作者简介:

李运坤(1987), 男, 硕士, 从事变电检修工作;

江登莹(1985), 男, 本科, 从事变电检修工作;

周文越(1989), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。
(收稿日期: 2013-04-26)