

基于蝙蝠算法的配电网故障区间定位

付家才, 陆青松

(黑龙江科技大学研究生学院, 黑龙江 哈尔滨 150022)

摘要: 蝙蝠算法是受自然界中的微蝙蝠回声定位行为启发而演变出的一种新颖的智能优化算法。在分析基本算法的仿生原理和配电网结构特点的基础上, 提出将蝙蝠算法应用到解决配电网故障定位的问题上。利用元胞自动机原理, 按照定义的邻居规则在元胞周围产生可能的解, 进一步提高该算法的局部寻优能力。通过建立合适的仿真模型, 模拟简单配电网和复杂配电网发生单点和多点故障, 从上传的故障信息无畸变和畸变两方面分别验证该算法进行定位的可行性。最后将蝙蝠算法与其他算法比较, 表明其具有较好的收敛性。

关键词: 配电网; 故障定位; 蝙蝠算法; 元胞自动机; 馈线终端装置

Fault sections location of distribution network based on bat algorithm

FU Jiakai, LU Qingsong

(School of Graduate Studies, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China)

Abstract: Inspired by the behavior of microbats' echolocation in nature, bat algorithm is a novel optimization algorithm. Based on the analysis of bionic principles of the algorithm and the structure of the distribution networks, it is proposed that the algorithm is applied to solve the fault location problem. In order to improve the global searching ability of the algorithm, the cellular automata theory is used. A fault section location model of distribution network is built to simulate distribution networks with single fault or multiple faults. Then the feasibility of the algorithm is verified with and without distortion of the uploaded fault information respectively. Finally compared the bat algorithm with other algorithms, it indicates that the bat algorithm has better convergence.

Key words: distribution network; fault location; bat algorithm; cellular automation; feeder terminal unit

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)16-0100-06

0 引言

配电网在电网中起着分配电能的作用, 多采用辐射型结构, 它与用户的利益密切相关。随着经济快速发展, 用电需求不断增加, 导致配电网的规模越来越大, 拓扑结构越复杂, 发生故障的概率变高。这就要求系统能够及时有效地发现故障段, 进而排除故障, 缩小因为电网故障带来的经济损失。配电网的智能化^[1-2]为故障检测提供了方便, 如安装在各断路器、分段开关和联络开关的馈线终端装置将检测到的故障信息上传给主站, 这为后续的故障定位^[3]分析提供了数据。

目前, 国内外已有很多关于配电网故障定位的方法^[4-7], 大致可分为两类: 基于图论算法和基于人工智能算法。矩阵法^[8-9]是图论算法中最具有代表性的一个, 其原理简单、计算速度快, 适用于具备馈线

终端单元且分支较少、范围不太大的简单配电网, 但是当馈线终端单元上传的信息受干扰或丢失时, 计算的结果不准确。早期, 人工智能算法包括神经网络法^[10]、遗传算法^[11]、粗糙集理论^[12]、Petri网^[13]等, 以这些算法为基础的配电网故障定位方法能准确识别故障区段且具有一定的容错性, 但是在实际计算过程中模型构建较复杂, 定位效率不高。近年来, 智能仿生算法得到较大发展, 出现诸如模拟粒子群算法^[14-15]、蚁群算法^[16]、和声算法^[17]、免疫算法^[18]。这些算法容错性高, 应用到配电网中能实现对多重故障的准确、快速定位, 但是在求解大规模优化问题时要求初始种群数目大, 易陷入局部最优, 定位效率一般。

蝙蝠算法(Bat algorithm, BA)^[19]是 Yang 在 2010 年提出的一种元启发式优化算法, 国内外很多学者对该算法进行了研究, 其结果表明: 相对于遗传算

法、神经网络算法等智能算法, 该算法顾及求解问题的局部和全局, 搜索过程中两者可以相互转化, 较好地避免陷入局部最优解, 具有更好的收敛性。本文提出将蝙蝠算法应用到配电网故障定位中, 为配电网故障定位提供了一种新的解决方法。

1 BA 算法的基本原理

在大自然中, 多数蝙蝠是采用回声定位方法捕食猎物的, 它每秒可发出几十个音强达 110 dB 的超声波脉冲, 当蝙蝠靠近猎物时, 脉冲音强变小, 频度增加。蝙蝠发出的声波频率通常较高, 频带较宽, 这样有利于在复杂环境中搜寻猎物。如果将蝙蝠模拟为搜索空间中的智能体, 该智能体所处位置的优劣由构造的目标函数衡量, 蝙蝠寻找猎物的过程类比在可能解的空间内搜索最优解的过程, 则蝙蝠利用超声波定位捕食猎物的行为可用下述方程来描述。假设蝙蝠的种群为 n , 在一个 d 维空间里, 蝙蝠 i 的速度和位置分别按照式(2)和式(3)更新。

$$f_i = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min})\beta \quad (1)$$

$$v_i' = v_i^{t-1} + (x_i^{t-1} - x_*)f_i \quad (2)$$

$$x_i' = x_i^{t-1} + v_i' \quad (3)$$

其中: β 是在[0,1]之间的一个随机数; x_* 是在当前全局搜索中使目标函数最优时蝙蝠所处的位置; f_{\min} 和 f_{\max} 分别是蝙蝠发出声波的频率最小值和最大值。算法在初始化过程中要给每只蝙蝠随机分配一个频率, 但是频率取值要在设定的范围之内。

在局部搜索过程中, 如果从最优解集中选中了一个解, 则该蝙蝠的位置要按新的公式更新。

$$x_{\text{new}} = x_{\text{old}} + \varepsilon A' \quad (4)$$

其中: ε 为[-1,1]之间的一个随机数; A' 是所有蝙蝠在时刻为 t 时的平均响度; x_{old} 表示从最优解集中随机选出的一个解。

蝙蝠在搜寻猎物过程中, 其发出的脉冲响度 A_i 和频度 R_i 会不断变化。例如设置 $A_{\min} = 0$ 表示此时蝙蝠已经发现猎物, 暂停发出超声波; $A_{\max} = 10$ 表示蝙蝠为了搜寻猎物, 尽可能增大脉冲响度, 以获得更多的信息。脉冲响度和脉冲频度可按式更新。

$$A_i^{t+1} = \alpha A_i' \quad (5)$$

$$R_i^{t+1} = R_i^0 [1 - e^{-\gamma t}] \quad (6)$$

其中, 脉冲响度增加系数 α 和脉冲频度衰减系数 γ 取值要根据实验对象进行选取, α 范围在[0,1]之间, γ 是一个大于零的数。在 BA 算法中, 最优解类比蝙蝠的猎物, 脉冲响度和频度的变化在一定程度上表明与最优解的靠近程度。

为了更好地解释 BA 算法的实现步骤, 用伪代码进行描述。

定义目标函数 F 。

对蝙蝠数目 n , 蝙蝠 i 的位置 x_i 、速度 v_i 、脉冲频率范围 $[f_{\min}, f_{\max}]$ 、脉冲频度 R_i 和脉冲响度 A_i 进行初始化。

求出所有蝙蝠对应的目标函数, 形成最优解集合。

while 循环, 判断是否符合结束条件。

更新蝙蝠 i 的速度和位置。

If (rand > R_i)

从最优解集中随机选出一个解。

按式(4)对该解进行随机扰动。

End if

根据已更新的蝙蝠位置, 求目标函数 F_{new} 。

If (rand < A_i && $F_{\text{new}} < F_i$)

接受新解。

减小响度 A_i 和增大 R_i 。

End if

按蝙蝠位置优劣重新对各蝙蝠进行排列, 更新最优解集合。

End while

为了增强算法搜索的多样性, 提高算法寻优的速率, 可以利用元胞邻居的定义规则扩大蝙蝠搜索的范围^[20]。元胞自动机是一类模型的总称或一个方法的框架, 由元胞、元胞空间、邻居和规则四部分组成^[21]。空间内的各元胞通过定义的邻居规则相互联系, 元胞 k 在 $t+1$ 时刻的状态不仅由处在 t 时刻的距离其半径在 r 范围内的邻居元胞状态决定, 而且还跟自身在 t 时刻的状态有关。通常定义的邻居规则有三种形式: Von-Neumann 型、Moore 型和扩展的 Moore 型。扩展 Moore 型是将元胞的邻居半径 r 定义为一个变量, 可根据解决的实际问题取大于 2 的数。数学定义可以表示为

$$N_{\text{Moore}} = \left\{ v_i = (v_{ix}, v_{iy}) \mid |v_{ix} - v_{ox}| + |v_{iy} - v_{oy}| \leq r, (v_{ix}, v_{iy}) \in Z^2 \right\} \quad (7)$$

其中: v_{ix} v_{iy} 和 v_{ox} v_{oy} 分别是邻居元胞和中心元胞在 Z 空间内的坐标值。在 BA 算法中, 蝙蝠 i 所处位置相当于元胞自动机的元胞, 局部搜索过程中蝙蝠 i 的位置更新按照元胞自动机的扩展 Moore 型邻居方式, 此时 Z 为 d 维空间。

2 BA 算法在简单配电网中的应用

2.1 目标函数的构造

对于安装有馈线终端单元(Feeder terminal unit, FTU)的配电网, 当网络中有故障发生, FTU 会监测

到安装处的电流变化, 通过与系统已设定的电流整定值比较, 得出由 0 和 1 构成的离散数据, 形成故障信息数组 A 。0 表示该处状态正常, 1 表示该处检测到故障电流, 馈线有故障发生。为了找出一个假设能解释数组 A 的信息, 即诊断出发生故障的设备, 可构造目标函数^[17]:

$$F = \sum_{j=1}^N |A(j) - B(j)| + \omega \sum_{j=1}^N |C(j)| \quad (8)$$

该目标函数值的大小反映期望的故障情况与配电网馈线真实情况偏离程度, 其依据安装在各开关点的馈线终端装置上传给主站的状态值和由假设故障情况得出的各区段的期望状态值。式中: N 为网络中馈线终端装置的数量; $A(j)$ 为故障信息数组 A 的第 j 个元素, 表示测控点 j 的实际状态值; $B(j)$ 为数组 B 的第 j 个元素, 表示测控点 j 的期望状态值。 B 中各元素取值规则以图 1 单电源供电型配电网为例进行说明, 其结果见表 1。为了避免出现误诊断, 式(8)加入了一项 $\omega \sum_{j=1}^N |C(j)|$, 其中 ω 为权系数, 根据要解决的实际问题取值, 范围在 $[0,1]$ 之间; $\sum_{j=1}^N |C(j)|$ 表示故障设备总数。

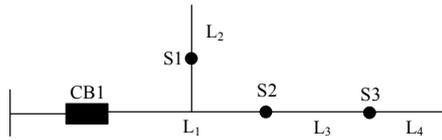


图 1 单电源供电型配电网

Fig. 1 Single-power-supply distribution network

表 1 $B(j)$ 形成规则

$B(j)$	形成规则
$B(1)$	$L_1 L_2 L_3 L_4$
$B(2)$	L_2
$B(3)$	$L_3 L_4$
$B(4)$	L_4

2.2 BA 算法定位配电网故障区间流程

实现对配电网的故障区间定位就是诊断出各馈线区段的实际状态, 将该过程转化到 BA 算法中就是对 d 维空间内的蝙蝠种群优化求解。蝙蝠的位置表示网络中各馈线区段的期望状态, 算法每次迭代过程中都通过目标函数评价各蝙蝠位置的优劣, 然后更新蝙蝠的速度和位置, 直到满足结束条件为止, 此时得到的蝙蝠位置是最接近配电网馈线区段的真实状态。具体的算法流程如下。

(1) 初始化参数, 包括馈线区段数量 d , 搜索脉冲频率的范围 $[f_{\min}, f_{\max}]$, 蝙蝠的种群大小 n , 蝙蝠

i 的位置和速度, 脉冲频率 R_i 和脉冲响度 A_i , 最大迭代次数 $N\text{-gen}$ 和目标函数最小值连续重复出现的次数 count 。该文将蝙蝠脉冲响度和频率设为定值, 所以不用对频率衰减系数和响度增加系数初始化。其中蝙蝠 i 位置初始化为随机生成的一行 d 列数组, 每个元素 x_i^j 取 0 或 1。

(2) 计算初始种群的目标函数 F , 并找出使 F 值为最小的蝙蝠位置。

(3) 判断 while 循环是否达到算法设置的最大迭代次数或同一 F_{\min} 达到规定的次数 count 。如果满足上述条件之一, 循环终止并输出最优解, 否则, 转到下一步骤。

(4) 蝙蝠的速度根据式(1)、式(2)进行更新, 位置按式(9)更新。

$$x_i^j \text{ new} = \begin{cases} 1 & v_i^j > 4 \text{ 或 } \text{rand} < e^{v_i^j} \\ 0 & v_i^j < -4 \text{ 或 } \text{rand} \geq e^{v_i^j} \end{cases} \quad (9)$$

其中: $j=1,2,\dots,d$; $i=1,2,\dots,n$ 。

(5) 给定一随机数 rand , 判断是否大于 R_i , 如果大于, 则按照元胞自动机原理, 在局部范围内搜寻使目标函数最小的解(蝙蝠位置), 将该位置作为蝙蝠 i 新的位置; 否则, 跳过该步骤。其中 rand 范围在 $[0,1]$ 。

(6) 根据步骤(4)或步骤(5)得出的蝙蝠最新位置, 计算其对应的目标函数值 F_{new} 。判断 $F_{\text{new}} < F_i$ 和随机数 $\text{rand} < A_i$ 是否同时成立。如果成立, 则接受新解; 否则, 转到步骤(3)。

3 BA 算法在多电源复杂情况下的应用

对于环网开环运行的配电网在构造数学模型时, 一般以网络中的各个联络点开关为界, 将配电网划分为多个独立区域, 每个区域以进线断路器为标志, 这样环网开环运行配电网故障定位问题就可以转化为单电源供电型配电网故障定位问题。如图 2 所示为三电源供电复杂配电网的拓扑结构图, 其中标号 S_{11} 、 S_{19} 和 S_{21} 代表进线断路器。以联络开关 S_{26} 为界, 将原网络拆分为区域 1 和区域 2 两部分, 区域 1 内的网络为闭环运行的配电网, 区域 2 为单电源供电型, 若区域 2 内各馈线区段有故障发生, 可以直接利用第 2 节提出的算法流程定位故障。

而对于闭环运行的配电网, 目标函数的构造将不同于简单配电网的情况。假如图 2 中的 L_{15} 处有故障发生, 则不仅故障点和电源 a 之间的所有测控点检测到故障电流, 而且故障点和电源 b 之间的测控点同样检测到故障电流。若仍按第 2 节介绍的方法去构造目标函数, 通过 BA 算法给出的测控点期

望值将无法准确说明配电网各馈线设备实际的状态。如果在目标函数中考虑故障电流的方向, 就可以处理闭环运行的配电网故障定位问题^[22]。假定由一端电源对全网进行供电, 网络中功率流出方向为馈线的正方向, 测控点检测到有故障电流流过且电流方向与正方向相同则状态值为 1, 其他情况时值为 0, 这样闭环运行的配电网的故障定位问题就转化简单配电网故障定位问题。

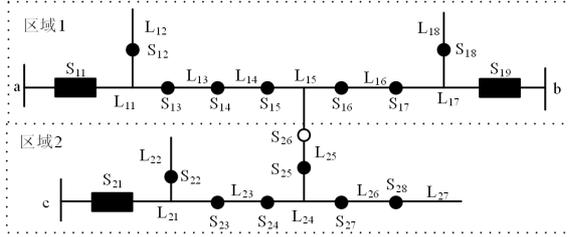


图 2 复杂配电网

Fig. 2 A complex distribution network

根据以上对多电源供电复杂配电网的处理方法, 建立统一的适应度函数为

$$F = k_1 \cdot (F_{1(a \rightarrow b)} + F_{1(b \rightarrow a)}) + k_2 \cdot F_2 \quad (10)$$

式中: $F_{1(a \rightarrow b)}$ 表示区域 1 的配电网由 a 端单独供电且网络正方向为 a 到 b 时的目标函数; 同样 $F_{1(b \rightarrow a)}$ 为区域 1 的配电网由 b 端单独供电且网络正方向为 b 到 a 时的目标函数; F_2 表示区域 2 的目标函数; 当区域 1 内网络节点检测到有故障发生, k_1 为 1, 无故障发生时为 0, k_2 取值情况类似。

4 算例分析

以图 2 所示的多电源供电型复杂配电网为例进行分析, 应用 BA 算法定位故障区间之前首先对图中各断路器、开关和馈线区段编号。仿真的具体参数设置为: 区域 1 搜索空间维数为 8, 区域 2 搜索空间维数为 7, 蝙蝠种群规模 30, 蝙蝠脉冲频率 R_i 和响度 A_i 取定值 0.5, 声波频率范围 [0,2], 算法的终止条件为 F_{\min} 的值连续重复出现的次数 *count* 不得小于 20 或计算达到最大迭代次数 200。实验所用硬件为 Core™ i5-4200u cpu 1.6 Hz, 内存为 1.93 GB, 软件为 Matlab。

4.1 配电网单点故障仿真

分别假设区域 1 的馈线区段 L_{14} 和区域 2 的馈线区段 L_{23} 有故障发生, 测试该算法在故障信息无畸变和畸变情况下的定位效果。由于算法的初始种群是随机赋值的, 所以每次仿真过程迭代次数不同, 为检验算法的收敛性, 连续仿真 15 次, 仿真结果见表 2 和表 3 所示。

表 2 单点故障无信息畸变仿真结果

		A	最优解	故障区间
区域 1	a→b	101100000	00010000	L_{14}
	b→a	101110000	00001000	
区域 2		1010000	0010000	L_{23}

表 3 单点故障信息畸变仿真结果

		A	最优解	故障区间
区域 1	a→b	101100001	00010000	L_{14}
	b→a	101110001	00001000	
区域 2		1010010	0010000	L_{23}

表中 A 的数据是配电网中各馈线终端装置上传的故障信息; 最优解是通过 BA 算法多次迭代计算得出的, 1 表示该馈线区间有故障发生, 0 表示没有发生故障。对于区域 1, 在规定网络正方向为 a 到 b 和规定正方向为 b 到 a 时, 计算得出的最优解都说明区间 L_{14} 发生故障; 对于区域 2, 最优解的第三位为 1, 表示网络第三区段 L_{23} 发生故障。从表 3 仿真结果可看出, 当区域 1 上传的故障信息 A 的最后一位数和区域 2 上传的故障信息的第六位数发生畸变时, 应用 BA 算法进行求解, 仍能准确定位。

4.2 配电网多点故障仿真

假设馈线区段 L_{14} 、 L_{16} 、 L_{22} 和 L_{23} 同时发生故障。测试该算法在故障信息无畸变和有畸变(节点 S_{17} 和 S_{28} 上传的信息发生畸变)时的定位效果。

对于区域 1, 在规定正方向为 a 到 b 时, 通过算法计算得出的最优解是 [00010000], 表明区段 L_{14} 发生故障, 在规定正方向为 b 到 a 时, 计算得出的最优解为 [00100000], 表明区段 L_{16} 发生故障。对于区域 2 的配电网, 最优解的第二、三位都为 1, 即区段 L_{22} 和 L_{23} 有故障发生。见表 4、表 5。根据表 5

表 4 多点故障无信息畸变仿真结果

		A	最优解	故障区间
区域 1	a→b	101100000	00010000	L_{14} L_{16}
	b→a	101000000	00100000	
区域 2		1110000	0110000	L_{22} L_{23}

表 5 多点故障信息畸变仿真结果

		A	最优解	故障区间
区域 1	a→b	101100100	00010000	L_{14} L_{16}
	b→a	101000000	00100000	
区域 2		1110001	0110000	L_{22} L_{23}

的仿真结果可知：当区域 1 设定的网络正方向为 a 到 b，节点 S_{17} 和区域 2 的节点 S_{28} 上传的信息畸变时，不影响算法的故障定位效果。

4.3 与其他算法比较

BA 算法通过频率调谐和改变脉冲发生频率的大小来控制蝙蝠的行为，并且用随机数与脉冲发射速率进行比较，解决了一些智能算法在全局搜索和局部搜索方面无法平衡的问题。基本的遗传算法 (Genetic algorithm, GA) 和粒子群算法 (Particle swarm optimization, PSO) 与 BA 算法相比：遗传算法的运算有选择、交叉和变异等过程，状态更新较复杂，而 BA 算法只需根据式(2)、式(9)更新蝙蝠状态，初始化参数相对较少，编程也较容易；在某种程度上，蝙蝠算法可看作是基本粒子群算法的改进，在局部搜索中，BA 算法引入响度和脉冲频率概念，使迭代过程更容易收敛。以第 4 节配电网发生多点故障信息无畸变情况为例，分别用 BA、PSO、GA 进行故障定位，仿真 25 次得到结果都正确，但平均用时分别为 4.361 s、4.724 s 和 5.023 s，所以 BA 算法较 PSO、GA 算法收敛速度更快。

5 结论

该文成功地将 BA 算法应用到配电网故障区段定位问题上，算法简单，编程容易，迭代次数少，收敛性好。不仅适用于简单辐射型配电网故障定位情况，而且在多电源复杂情况下定位故障区段也能获得较好的效果。最后算例仿真结果表明：当配电网发生单点故障和多点故障时，应用该算法都能准确定位，甚至在馈线终端单元上传给主站的信息发生畸变时也不影响对故障区段的定位。

参考文献

- [1] 王静丽, 武可, 金光耀, 等. 智能电网监控装置取能方法研究[J]. 高压电器, 2014, 50(9): 94-99.
WANG Jingli, WU Ke, JIN Guangyao, et al. Power supply methods research on the smart grid monitoring device[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(9): 94-99.
- [2] 吴思谋, 蔡秀雯, 王海亮. 面向供电可靠性的配电网规划方法与实践应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(6): 70-75.
WU Simou, CAI Xiuwen, Wang Hailiang. Planning method and its application of distribution network based on power supply reliability[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(6): 70-75.
- [3] 芦兴, 王瑞闯. 配电网故障定位方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(7): 26-30.
LU Xing, WANG Ruichuang. Research on fault location methods of distribution network[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2013, 29(7): 26-30.
- [4] 唐金锐, 尹项根, 张哲, 等. 零模检测波速度的迭代提取及其在配电网单相接地故障定位中的应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 202-211.
TANG Jinrui, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Iterative extraction of detected zero-mode wave velocity and its application in single phase-to-ground fault location in distribution networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 202-211.
- [5] 付贵宾, 李永丽, 陈晓龙, 等. 基于电流突变量的微电网故障区域判定方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(3): 7-13.
FU Guibin, LI Yongli, CHEN Xiaolong, et al. Fault zone determination method for micro-grid based on current fault component[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(3): 7-13.
- [6] 齐郑, 张惠汐, 饶志, 等. 基于极限学习机的多信息融合区段定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 74-80.
QI Zheng, ZHANG Huixi, RAO Zhi, et al. Multi-information fusion fault location based on extreme learning machine[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 74-80.
- [7] 冉伊, 周步祥, 杨植雅. 一种估算对侧信息的配电网单端故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18): 25-31.
RAN Yi, ZHOU Buxiang, YANG Zhiya, et al. A method of single ended fault location for distribution network based on estimated contralateral information[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(18): 25-31.
- [8] 黄佳乐, 杨冠鲁. 配电网故障区间定位的改进矩阵算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 41-45.
HUANG Jiale, YANG Guanlu. Modified matrix algorithm for fault section location of distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 41-45.
- [9] 李开文, 袁荣湘, 邓翔天, 等. 含分布式电源的环网故障定位的改进矩阵算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(12): 62-68.
LI Kaiwen, YUAN Rongxiang, DENG Xiangtian, et al. Improved matrix algorithm for fault location in ring distribution system with distribution generations[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(12): 62-68.
- [10] 刘文轩, 严凤, 田霖, 等. 基于 LVQ 神经网络的配

- 网故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 90-95.
- LIU Wenxuan, YAN Feng, TIAN Lin, et al. LVQ neural network approach for fault location of distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 90-95.
- [11] 齐郑, 乔丰, 黄哲洙, 等. 基于暂态分量遗传算法的小电流接地故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 34-39.
- QI Zheng, QIAO Feng, HUANG Zhezhu, et al. Genetic algorithm fault based on transient component for neutral point non-effective grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 34-39.
- [12] 王希平, 许童羽, 赵青松. 基于 WEBGIS 的粗糙集配电网故障定位方法[J]. 自动化与仪表, 2006, 21(6): 4-7.
- WANG Xiping, XU Tongyu, ZHAO Qingsong. Study of fault location by rough sets based on WEBGIS for distribution network[J]. Automation & Instrumentation, 2006, 21(6): 4-7.
- [13] 孙雅明, 吕航. Petri 网和冗余纠错技术结合的配电网故障区段定位新方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 61-67.
- SUN Yaming, LÜ Hang. A new approach of the fault section location for distribution systems based on Petri nets in combination with redundant correcting technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 61-67.
- [14] 李超文, 何正友, 张海平, 等. 基于二进制粒子群算法的辐射状配电网故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(7): 35-39.
- LI Chaowen, HE Zhengyou, ZHANG Haiping, et al. Fault location for radialized distribution networks based on BPSO[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(7): 35-39.
- [15] 姜志鹏, 文习山, 蓝磊, 等. 粒子群算法应用于避雷器均压环配置优化[J]. 高压电器, 2014, 50(1): 102-106.
- JIANG Zhipeng, WEN Xishan, LAN Lei, et al. Application of particle swarm optimization algorithm to configuration optimization of grading rings for arrester[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(1): 102-106.
- [16] 陈歆技, 丁同奎, 张钊. 蚁群算法在配电网故障定位中的应用[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(5): 74-77.
- CHEN Xinji, DING Tongkui, ZHANG Zhao. Ant colony algorithm for solving fault location in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(5): 74-77.
- [17] 刘蓓, 汪飒, 陈春, 等. 和声算法在含 DG 配电网故障定位中的应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 280-286.
- LIU Bei, WANG Feng, CHEN Chun, et al. Harmony search algorithm for solving fault location in distribution networks with DG[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 280-286.
- [18] 郑涛, 潘玉美, 郭昆亚, 等. 基于免疫算法的配电网故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 77-83.
- ZHENG Tao, PAN Yumei, GUO Kunya, et al. Fault location of distribution network based on immune algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 77-83.
- [19] YANG Xinshe. A new metaheuristic bat-inspired algorithm[M] // GONZALEZ J R, PELTA D A, CRUZ C, et al. Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization. Berlin: Springer, 2010: 65-74.
- [20] 李枝勇, 马良, 张惠珍. 0-1 规划问题的元胞蝙蝠算法[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(10): 2903-2906.
- LI Zhiyong, MA Liang, ZHANG Huizhen. Cellular bat algorithm for 0-1 programming problem[J]. Application Research of Computers, 2013, 30(10): 2903-2906.
- [21] 宇仁德, 石鹏, 刘芳. 交通元胞自动机计算机模拟模型的研究[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(29): 220-222.
- YU Rende, SHI Peng, LIU Fang. Research of simulation model on traffic cellular automation[J]. Computer Engineering and Application, 2008, 44(29): 220-222.
- [22] 卫志龙, 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 Zhilong, HE Hua, ZHENG Yuping. A refined genetic algorithm for the fault sections location[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 127-130.

收稿日期: 2014-10-27; 修回日期: 2015-03-19

作者简介:

付家才(1954-), 男, 教授, 硕士生导师, 从事电力电子、电力传动等方面的研究工作;

陆青松(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力传动与控制。E-mail: LQS199111@163.com

(编辑 姜新丽)