

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

刘鹏程, 李新利

(华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206)

摘要: 构建了可动态适应多个分布式电源投切的开关函数, 同时针对遗传算法的早熟收敛问题, 引入多种群遗传算法, 提出基于多种群遗传算法的含分布式电源配电网故障区段定位方法。该算法在故障区段定位时规定以系统电源指向用户的方向为馈线正方向, 采用多个种群对解空间协同搜索, 避免算法陷入局部最优, 以最优个体保持代数作为收敛条件, 充分提高收敛效率, 适用于复杂的含分布式电源的配电网。通过算例对配电网的故障定位进行仿真, 结果表明算法能准确定位, 并具有一定的有效性和容错性。

关键词: 分布式电源; 配电网; 故障定位; 多种群遗传算法; 开关函数

Fault-section location of distribution network containing distributed generation based on the multiple-population genetic algorithm

LIU Pengcheng, LI Xinli

(School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: By building a new switching function which can dynamically adapt itself to the change caused by switching of distributed generation, the multiple-population genetic algorithm for fault-section location of distribution network containing distributed generation, which can avoid the premature convergence of standard genetic algorithm, is proposed. The proposed method is applicable to the complicated distribution network, and it determines the direction of the power of the system to the user as the positive direction when locates fault in distribution networks. Multiple-population collaboratively searches the solution space to avoid falling into local optimal, and the condition of convergence is the optimal individual keeping algebra, which improves convergence efficiency. The simulation results show that the proposed algorithm has the correctness of fault location, and is effective and fault tolerance.

Key words: distribution network; distributed generation; fault location; multiple-population genetic algorithm; switching function

中图分类号: TM76

文章编号: 1674-3415(2016)02-0036-06

0 引言

迅速地定位故障区段是配电网发生故障时及时隔离故障并恢复非故障区域供电的关键, 这对缩短客户停电时间、减少停电面积和提高供电可靠性有着重要的意义。然而, 传统的故障定位方法只适用于单电源的配电网。随着能源危机的持续加剧, 绿色环保的分布式发电技术得到快速的发展和广泛的应用。原来单电源辐射的配电网随着大量分布式电源的接入变为多电源辐射的复杂网络^[1-2]。这导致已有的故障区间定位方法产生误判, 需改进以适应

多电源复杂网络。

目前, 基于 FTU(Feeder Terminal Unit, FTU)采集的故障电流信息进行配电网故障定位的方法已经有了许多相关的研究, 主要的方法包括矩阵算法^[3-4]、蚁群算法^[5]、免疫算法^[6]、遗传算法^[7-8]等。矩阵算法要求故障信息的准确性很高, 容错性较差, 使其难以得到广泛应用。而其他智能算法, 如蚁群算法^[5]、免疫算法^[6]、遗传算法^[7-8]虽有充分的研究, 对故障信息的畸变有一定容错性, 但面对多电源配电网网络问题时, 通过定义各馈线电流正方向来实现故障定位, 这种方法只适用于简单配电网, 未考

考虑电源投切的情况, 针对不同故障需要多次规定正方向。此外如遗传算法等智能算法早熟收敛问题严重^[9-10]。针对一些算法早熟收敛的缺陷, 文献[11]采用粒子群和差分进化混合算法的含分布式电源的配电网故障定位, 提高了收敛性能, 适应于复杂配电网。但粒子群和差分进化算法为较新算法, 仍缺乏充分研究, 需设置较多参数, 且参数取值主要凭经验选取^[7], 不适宜推广应用, 收敛条件也较为简单, 未能充分发挥算法收敛优越性^[12]。

针对这些问题, 本文构建新的开关函数, 同时针对遗传算法稳定性好但存在早熟收敛的问题, 提出了基于改进多种群遗传算法的含分布式电源配电网故障区段定位方法, 算法参数设置简单, 多种群协同及收敛条件的设置充分提高了收敛效率, 在故障定位时确定以系统电源指向用户的方向为馈线正方向, 具有一定的实用性。

1 多种群遗传算法原理

借鉴生物界的进化规律(适者生存, 优胜劣汰的遗传机制), 遗传算法作为一种全局优化概率搜索算法产生并发展起来, 被广泛应用于机器学习、模式识别等领域。然而, 随着遗传算法的广泛应用及深入研究, 其问题和不足也逐渐暴露出来, 最典型的则是早熟收敛问题^[9-10]。针对标准遗传算法(Standard Genetic Algorithm, SGA)所存在的早熟收敛, 即群体中的所有个体都趋于同一状态而停止变化的问题, 多种群遗传算法(Multiple Population Genetic Algorithm, MPGA)被提出^[13]。MPGA在SGA的基础上, 采用了多种群并行进化的思想, 具体革新思路如下:

- 1) 引入不同控制参数的多个种群同时进行优化搜索, 实现不同的搜索目的。
- 2) 通过移民算子对各个种群之间进行联系, 实现多种群的协同进化。
- 3) 各种群进化代的最优个体由人工选择算子进行保存, 并将其作为判断算法收敛的依据。

MPGA兼顾了算法的全局搜索和局部搜索, 计算结果对遗传控制参数的敏感性大大降低, 收敛速度快, 对克服未成熟收敛有显著的效果, 适合复杂问题的优化^[14-16]。

2 基于多种群遗传算法的故障区间定位算法

2.1 故障电流编码、开关函数及适应度函数

在配电网发生故障后, 安装于线路上分段的各FTU可检测到故障过流, 超过预先整定的故障电流定值则会将故障报警信息上传至SCADA主站系

统。故障定位算法根据上传信息开始计算及定位故障区段。基于遗传算法的故障定位主要考虑故障电流编码和开关函数、适应度函数的构造的问题。

2.1.1 故障电流的编码

遗传算法通过二进制编码来表示问题和问题的解。考虑到接入分布式电源的配电网与单电源辐射状的馈线结构不同, 在分布式电源接入支路上的开关流过的故障电流可能会与接入前的方向相反, 故需考虑故障电流的方向问题。针对含分布式电源的配电网的故障电流编码方法, 假定以系统电源指向用户的方向为馈线正方向, 则故障电流 I_j 为^[17]

$$I_j = \begin{cases} 1 & \text{故障电流方向与正方向一致} \\ 0 & \text{没有故障电流} \\ -1 & \text{故障电流方向与正方向相反} \end{cases} \quad (1)$$

2.1.2 开关函数的构造

实现故障区段定位, 即根据配电网线路上FTU上传的各个分段开关的故障电流信息来确定具体的故障线路, 这就必须建立一个从开关故障电流越限情况到线路故障状态的转换。这种转换关系定义为开关函数, 它反映了各个分段开关与线路区段之间的关联关系。

对于单电源供电的网络, 开关函数由式(2)定义, 此时开关函数的值只有0和1两种情况^[18]。

$$I_j^* = \prod_{d=1}^{M_2} x_d \quad (2)$$

式中: I_j^* 是第 j 个分段开关的开关函数, 正常为0, 有故障电流为1; 配电网中开关至系统电源方向为上游, 与该方向相反的方向为下游, x_d 为开关 j 下游第 d 个馈线区段的状态值, 正常为0, 故障为1; M_2 为开关 j 下游馈线区段总数; “ \prod ”代表逻辑或运算。

对于含分布式电源的网络, 需对以上开关函数改进以适应多电源网络。文献[18]改进了开关函数, 但只适应于结构简单的配电网, 未考虑分布式电源投切在复杂配电网中会引起多段馈线的电流方向改变, 从而导致故障定位失效。针对此问题, 在适应多电源网络基础上, 引入分布式电源开关系数来表示电源投切, 并考虑在复杂配电网中的应用, 定义新的开关函数为

$$I_j^* = \prod_{d=1}^{M_2} x_d - \prod_{i=1}^W K_{DG_i} \cdot \prod_{u=1}^{M_1} x_u - (1 - \prod_{i=1}^W K_{DG_i}) \cdot \prod_{d=1}^{M_2} x_d \cdot \prod_{u=1}^{M_1} x_u \quad (3)$$

式中: I_j^* 是第 j 号分段开关的开关函数, 正常为0, 有故障电流且故障电流方向与正方向一致时为1,

有故障电流且故障电流方向与正方向相反时为-1; x_u 为开关 j 上游第 u 个馈线区段的状态值, 正常为 0, 故障为 1; M_1 为开关 j 上游馈线区段总数; x_d 为开关 j 下游第 d 个馈线区段的状态值, 正常为 0, 故障为 1; M_2 为开关 j 下游馈线区段总数; K_{DG_i} 为分布式电源开关系数, 分别用来表示第 j 号开关下半区的第 i 个分布式电源是否接入配电网, 若某分布式电源接入配网则对应的分布式电源系数取 1, 否则取 0; W 为分布式电源总数; “ \prod ” 代表逻辑或运算。

当配电网中不含分布式电源时, 即为单电源供电的网络, 则 $K_{DG_i}=0$, 式(3)则与式(2)相等, 符合此时配电网故障定位应用; 当所有分布式电源投入配电网运行时, 则 $K_{DG_i}=1$, 式(3)为 $I_j^* = \prod_{d=1}^{M_2} x_d - \prod_{i=1}^W K_{DG_i} \cdot \prod_{u=1}^{M_1} x_u$, 适应含分布式电源的配电网^[13]; 当配电网中有部分分布式电源切断退出运行时, 则对应 K_{DG_i} 变为 0, 式(3)第三项有效, 此时开关函数仍能有效判断此时故障电流情况, 可适应投切情况的发生。

2.1.3 适应度函数的构造

适应度函数对遗传算法能否得到最优解起着决定性作用。针对配电网故障区段定位问题, 利用式(1)和式(3)的定义完成适应度函数的构建, 适应度函数为

$$F(s) = 10 - (\sum_{j=1}^M |I_j - I_j^*| + \omega \cdot \sum_{i=1}^N |x_i|) \quad (4)$$

式中: I_j 由式(1)得出; I_j^* 由式(3)得出; x_i 为馈线区段的状态值; ω 为是权系数。

当 ω 在 $[0,1]$ 范围内取值时, 该适应度函数符合故障诊断理论中的“最小集”概念, 即在可能的故障诊断结果中选取故障线路数目最小的解, 可避免漏判和误判^[18]。当故障诊断结果选取故障线路数目最小的解时, 该适应度函数取得最大值。

2.2 MPGA 实现过程

MPGA 实现过程的各步骤功能及参数设定方法如下。

1) 种群初始化。设置种群数目、初始种群个体数目、个体长度, 初始种群 $P(t)$ 便根据设置随机产生, 同时根据信息交换模型, 展开划分为各个种群: $P(t) = \{P_1(t), P_2(t), \dots, P_n(t)\}$, 然后根据式(3)开关函数计算各种群 $P_i(t)$ ($i=1, 2, \dots, n$) 中个体的开关电流。根据 FTU 上传故障电流信息及适应度函数计

算各个体的适应度。

2) 控制参数的确定。取不同的控制参数来保证各种群的差异进化, 主要控制参数为交叉概率 P_c 和变异概率 P_m , 其值决定了算法全局搜索和局部搜索能力的均衡, 可按下式计算。

$$\begin{cases} P_c = P_{co} + c \cdot f_{rand}(G,1) \\ P_m = P_{mo} + m \cdot f_{rand}(G,1) \end{cases} \quad (5)$$

式中: P_{co} , P_{mo} 分别为初始交叉概率和变异概率; G 为种群数目; c , m 为交叉、变异操作的区间长度; f_{rand} 为产生随机数的函数。经过充分研究得出 P_c 一般在 $[0.7, 0.9]$ 区间内随机产生。 P_m 一般在 $[0.001, 0.05]$ 区间内随机产生^[14]。因此式(5)可具体由下式计算。

$$\begin{cases} P_c = 0.7 + (0.9 - 0.7) \cdot f_{rand}(G,1) \\ P_m = 0.01 + (0.05 - 0.01) \cdot f_{rand}(G,1) \end{cases} \quad (6)$$

3) 移民算子和人工选择算子。设置移民算子, 即以源种群中的最优个体代替目标种群中的最差个体, 达到多种群协同进化的目的。人工选择算子的功能是选出各种群中的最优个体, 并将其放入精华种群加以保存, 保证各种群产生的最优个体不被破坏和丢失。

4) 收敛条件。MPGA 依据精华种群来决定算法终止。本文算法终止的判据是精华种群中最优个体的最少保持代数, 即当最优个体保持代数超过所设置的值时, 判断算法收敛。这种判据充分利用了遗传算法在进化过程中的知识积累, 可适应复杂程度不同的配电网, 比最大遗传代数判据更为合理^[19], 提高收敛效率。MPGA 流程图如图 1 所示。

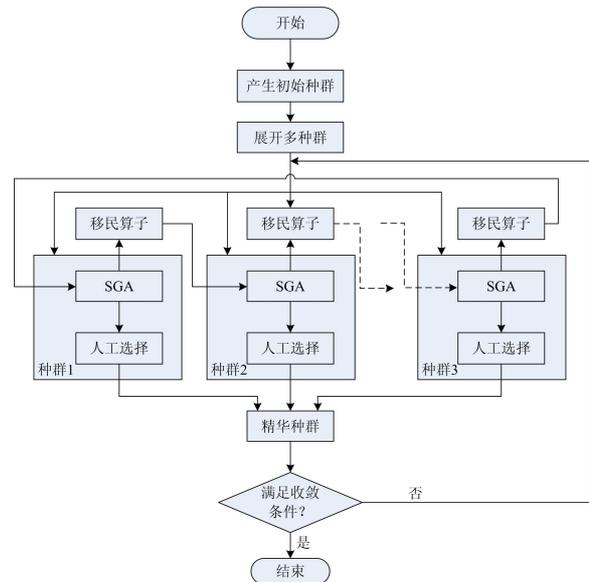


图 1 MPGA 流程图

Fig. 1 Flow chart of MPGA

3 故障定位算法实现及分析

本文以图 2 所示的配电网为例进行仿真分析。图中, S 为系统电源; 在此配电网中接入三个分布式电源, 分别是 DG1(Distributed Generation, DG)、DG2、DG3; K1、K2、K3 为对应 DG 的接入开关; 黑色圆点为分段开关, 由编号 1~23 表示; 两圆点之间的线段为馈线区段, 由编号(1)~(19)表示。

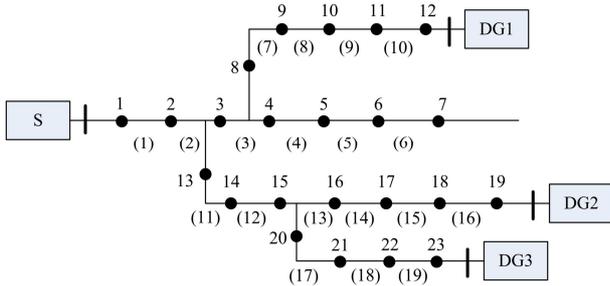


图 2 接入三个分布式电源的配电网
Fig. 2 Distribution network with 3 DG

根据本文所提出的故障区段定位方法, 相关算法参数设置如下: 种群数目为 6, 种群个体数目为 10, 根据配电网算例设置个体长度为 19, 交叉概率在 [0.7, 0.9] 区间内随机产生, 变异概率在 [0.001, 0.05] 区间内随机产生, 最优个体最少保持代数为 20; 式(4)中的 ω 取 0.5。

由于 FTU 在户外, 受到天气、环境的影响, 加之通信有可能出错, 上传的故障信息容易发生畸变和缺失^[20-21]。因此, 根据以上设置, 分别对分布式电源是否接入配电网、不同数目故障及信息畸变等情况做故障定位仿真, 来验证算法的有效性、准确性和容错性, 具体结果如表 1 所示。

由表 1 得知, 在不同情况下, 故障定位程序输出的故障区段都与预先设定的故障情况一致。由仿真得知, 算法可动态适应分布式电源投切, 有效性较好。同时, 算法对单重故障和多重故障都能准确判断, 而且当 FTU 上传信息发生畸变时, 程序依然能够得出正确的定位结果, 表明算法的准确性和有较好的容错性。

为了验证多种群遗传算法较标准遗传算法的优越性, 本文针对表 1 的第 6 种故障情况, 分别对两种算法做仿真对比。MPGA 运行 4 次的具体进化过程如图 3 所示, SGA 运行 4 次的具体进化过程如图 4 所示。

表 1 故障定位仿真结果

Table 1 Simulation results of fault location

故障类型	FTU 上传故障信息 [I ₁ , I ₂ , ..., I ₂₃]	开关状态 [K1, K2, K3]	程序输出 故障区段
不接入分布式电源单重故障	[1, 1, 1, 1, 1, 0]	[0, 0, 0]	5
接入分布式电源单重故障	[1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, -1, -1, -1, -1, -1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]	[1, 0, 0]	3
接入分布式电源单重故障	[1, 1, -1, 1, 1, 1, 1, 1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1]	[1, 1, 1]	2
不接入分布式电源多重故障	[1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]	[0, 0, 0]	8, 13
接入分布式电源多重故障	[1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, -1, -1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]	[1, 1, 0]	10, 13
接入分布式电源多重故障	[1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, -1, -1, -1, -1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]	[1, 1, 1]	5, 8, 15
不接入分布式电源故障、信息畸变(11, 17)	[1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 0, -1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]	[0, 0, 0]	6, 7
接入分布式电源故障、信息畸变(10)	[1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1, -1, 0, -1, -1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]	[1, 0, 0]	7, 14
接入分布式电源故障、信息畸变(7, 22)	[1, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]	[1, 1, 1]	4, 21

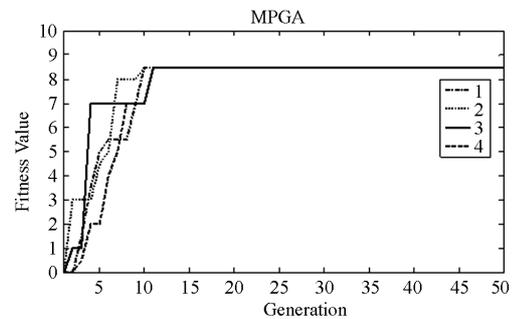


图 3 多种群遗传算法运行 4 次进化过程图

Fig. 3 Evolutionary process chart of MPGA running 4 times

由图 3 得知, 多种群遗传算法运行 4 次的结果完全一致, 且迭代次数较小, 平均在 13 次, 基本没有陷入局部最优, 说明 MPGA 算法稳定性好, 且收敛速度快, 适合用于含分布式电源配电网的多

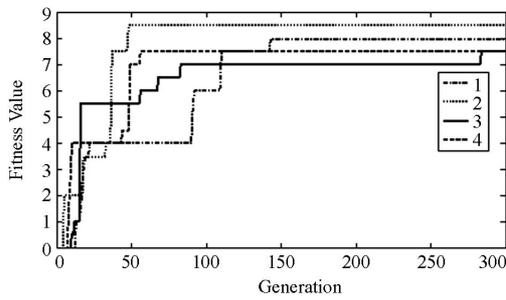


图4 标准遗传算法运行4次进化过程图

Fig. 4 Evolutionary process chart of SGA running 4 times

重故障定位。而从图4可以看出, 尽管迭代次数在300次时, 标准遗传算法运行4次得到的优化结果仍不完全相同, 说明最优解还有上升的可能, 且算法多次陷入局部最优, 说明SGA算法稳定性较差, 存在早熟收敛的情况, 难以适应含分布式电源配电网的多重故障定位。

4 结语

本文提出了一种基于多种群遗传算法的含分布式电源的配电网故障定位算法, 构建了新的开关函数, 使得只需对配电网规定一次正方向就可适应分布式电源动态投切的变化。同时多种群遗传算法采用了多个种群同时对解空间进行协同搜索, 兼顾了算法的全局搜索和局部搜索, 以最优个体保持代数作为收敛条件, 充分提高了收敛效率, 适合复杂配电网的故障定位问题。仿真结果表明, 该算法对含分布式电源的配电网故障定位问题具有一定的有效性、准确性和容错性。同时, 与标准遗传算法作仿真对比表明, 该算法能很好解决遗传算法中“早熟收敛”的问题。

参考文献

- [1] 沈鑫, 曹敏. 分布式电源并网对于配电网的影响研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊1): 346-351.
SHEN Xin, CAO Min. Research on the influence of distributed power grid for distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 346-351.
- [2] 许健, 赵春雷, 乔峰, 等. 针对多分布式电源的孤网继电保护[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(2): 78-82.
XU Jian, ZHAO Chunlei, QIAO Feng, et al. Solitary network relay protection for multi-distributed generation[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(2): 78-82.
- [3] 罗梅, 杨洪耕. 配电网故障定位的一种改进通用矩阵算法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 64-68.
LUO Mei, YANG Honggeng. An improved general matrix algorithm for fault locating in distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 64-68.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 陈国良, 王煦法, 庄镇泉, 等. 遗传算法及其应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1996.
- [10] 徐斌, 姚纓英. 自适应对偶种群遗传算法及其在电磁场优化设计中的应用[J]. 电工技术学报, 2014, 28(3): 183-187.
XU Bin, YAO Yingying. Adaptive dual-subpopulation genetic algorithm and its application for electromagnetic devices optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 28(3): 183-187.

- [11] 周淙, 郑柏林, 廖瑞金, 等. 基于粒子群和差分进化算法的含分布式电源配电网故障区段定位[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 33-37.
ZHOU Quan, ZHENG Bolin, LIAO Ruijin, et al. Fault-section location for distribution networks with DG based on a hybrid algorithm of particle swarm optimization and differential evolution[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 33-37.
- [12] 易文周. 粒子群与差分进化混合算法的研究[D]. 南宁: 广西师范大学, 2009.
YI Wenzhou. Study of hybrid algorithm of PSO and DE[D]. Nanning: Guangxi Normal University, 2009.
- [13] GONG D W, SUN X Y. Multi-population genetic algorithms with variational search areas[J]. Control Theory & Applications, 2006, 23(2): 256-260.
- [14] POTTS J C, GIDDENS T D, YADAV S B. The development and evaluation of an improved genetic algorithm based on migration and artificial selection[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1994, 24(1): 73-86.
- [15] ALSHRAIDEH M, MAHAFZAH B A, AL-SHARAEH S. A multiple-population genetic algorithm for branch coverage test data generation[J]. Software Quality Journal, 2011, 19(3): 489-513.
- [16] 叶满园, 周琪琦, 蔡鸿, 等. 基于多种群遗传算法的多电平逆变器多波段 SHEPWM 技术[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 111-119.
YE Manyuan, ZHOU Qiqi, CAI Hong, et al. Multiple population genetic algorithm based on multi-band SHEPWM control technology for multi-level inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 111-119.
- [17] 杨继革. 基于遗传算法的配电网故障定位的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
YANG Jige. Study of fault location of distribution network based on genetic algorithm[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.
- [18] 王进强. 含分布式电源的配电网故障定位的应用研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2011.
WANG Jinqiang. Application study of fault location for distribution network containing distributed generation[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2011.
- [19] 史锋, 王辉, 胡斐, 等. MATLAB 智能算法 30 个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011: 69-72.
- [20] 焦彦军, 杜松广, 王琪, 等. 基于信息矛盾原理的畸变信息修正及配电网故障区段定位[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 43-48.
JIAO Yanjun, DU Songguang, WANG Qi, et al. Information aberrance correction and fault-section location for distribution networks based on the information contradiction theory[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 43-48.
- [21] 郑涛, 潘玉美, 王英男, 等. 配电网具有容错性的快速故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(6): 63-68.
ZHENG Tao, PAN Yumei, WANG Yingnan, et al. Fast and robust fault location for distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(6): 63-68.

收稿日期: 2015-04-09; 修回日期: 2015-06-05

作者简介:

刘鹏程(1991-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为配网自动化、模式识别; E-mail: wocheng3@163.com

李新利(1973-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为模式识别、智能控制。

(编辑 葛艳娜)