

DOI: 10.7667/PSPC161971

# 基于免疫算法的含分布式电源配电网的故障定位

陈奎<sup>1</sup>, 张云<sup>1</sup>, 王洪寅<sup>2</sup>, 万新强<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学电气与动力工程学院, 江苏 徐州 221008; 2. 江苏省宿迁供电公司, 江苏 宿迁 223800)

**摘要:** 分布式电源(DG)的接入, 使传统配电网拓扑结构从单电源辐射状网络变成复杂的多电源网络。在这种情况下, 传统的故障定位算法已不再适用。针对这一问题, 提出了一种新的基于故障电流的故障定位算法——免疫算法。首先, 针对含 DG 的配电网, 构建了适应多个分布式电源的故障电流编码方式和适应多个分布式电源的开关函数。其次, 相比传统的遗传算法, 免疫算法通过计算抗体的匹配程度和浓度对个体进行评价, 并且增加了记忆单元保证了算法进化过程中抗体的多样性从而避免了遗传算法中的‘早熟’收敛问题。最后, 通过 Matlab 建模仿真, 验证了该算法适用于含分布式电源(DG)配电网的故障定位, 并具有一定的快速性和容错性。

**关键词:** 分布式电源; 配电网; 故障定位; 免疫算法; 故障电流编码; 开关函数

## Fault-section location of distribution network containing distributed generation based on immune algorithm

CHEN Kui<sup>1</sup>, ZHANG Yun<sup>1</sup>, WANG Hongyin<sup>2</sup>, WAN Xinqiang<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Power Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China;

2. Suqian Power Supply Company of Jiangsu Province, Suqian 223800, China)

**Abstract:** The connection of DG makes distribution network topology be changed from single-power radial network to complicated network with multi-power. Under such condition, traditional fault location algorithm is no longer applicable. To solve this problem, this paper proposes a new fault location algorithm based on fault current —— immune algorithm. First, according to the distribution network with DG, the fault current coding mode adapting to multiple distributed power supply and the switching function of multiple distributed power supply are constructed. Secondly, compared with the traditional genetic algorithm, the immune algorithm evaluates the individuals by calculating the affinity and concentration of the individual and increases the memory unit to ensure the diversity of the antibody during the evolution of the algorithm, thus avoiding the 'premature' convergence problem. Finally, through the Matlab modeling and simulation, it is proved that the algorithm is suitable for fault location of distribution network with distributed generation (DG), and has a certain speediness and fault tolerance.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51407183).

**Key words:** distributed generation; distribution network; fault location; immune algorithm; fault current encoding; switching function

## 0 引言

随着太阳能、风电等分布式电源的不断接入<sup>[1]</sup>, 传统配电网拓扑结构从单电源辐射状网络变成复杂的多电源网络, 对传统配电网的潮流分布产生很大的影响<sup>[2]</sup>。因此, 基于单电源辐射状网络的故障定位算法已经不再适用。在大量分布式电源不断接入

的情况下, 为提高供电可靠性, 同时增加分布式电源的利用率, 对配电网的故障定位技术提出了更高的要求<sup>[3-4]</sup>。

随着智能电网的不断发展, 配电网中配备了馈线终端单元(Feeder Terminal Unit, FTU)和数据采集与监视控制系统(Supervisory Control And Data Acquisition, SCADA)<sup>[5]</sup>。配电网故障区段定位的主要方法就是利用馈线终端单元(FTU)上传到控制中心的故障信息对故障区段进行定位。由于配电网被

各个分段开关分成不同的区段，并且在分段开关处加装了 FTU，当 FTU 监测到电流大于整定值时，则认为电网出现了故障。FTU 就会将故障信息上传给数据采集监控系统(SCADA)，然后通过有效的算法对电网进行故障定位<sup>[6-11]</sup>。目前，研究的方法主要是矩阵算法、遗传算法等，但是这些传统的故障定位算法只适用于单电源配电网，并没有考虑在系统发生故障时含分布式电源配电网，短路电流的多向性。同时由于矩阵算法的容错性较差<sup>[12-14]</sup>，而遗传算法虽有较强的搜索能力，但其本身容易陷入局部搜索，从而使搜索速度变慢，故障定位效率降低<sup>[15-17]</sup>。这些不足阻碍了以上算法在含分布式电源的复杂配电网故障定位中的应用。

免疫算法是一种类似于遗传算法的全局寻优算法，其利用装在配电网各分段开关处的 FTU 上传到控制中心的故障信息来对故障区段进行定位。文献[18]只是针对单电源辐射状网络配电网利用免疫算法进行故障定位，但是其不能有效地对含分布式电源的多电源配电网进行故障定位。本文针对分布式发电系统的多电源供电特殊性，通过重新定义故障电流编码方式和评价函数，设计了一种适用于含分布式电源配电网故障定位的免疫算法。

## 1 免疫算法的数学模型

### 1.1 故障电流编码

当免疫算法用于传统的辐射型配电网的故障定位时，假定以系统电源指向用户的方向为馈线正方向。如果 FTU 监测点检测到过流且过电流的方向与定义的正方向相同，则规定此时的故障状态编码等于‘1’，即  $I_j=1$ ；在没有监测到过电流的情况下，故障状态编码为‘0’， $I_j=0$ 。然而这种编码方式并不适用于含分布式电源的多电源配电网。因此将重新定义  $I_j$ 。

在含分布式电源的多电源配电网系统，对于一个开关，首先规定距离开关最近的电源为其上游电源，而其他电源为其下游电源。本文规定从其上游电源到下游电源为开关的正方向。当 FTU 检测到的故障过流方向与假定的正方向开关一致，开关状态值  $I_j=1$ 。如果过电流方向与假定的正方向相反，则  $I_j=-1$ 。如果 FTU 没有监测到过电流，则  $I_j=0$ 。

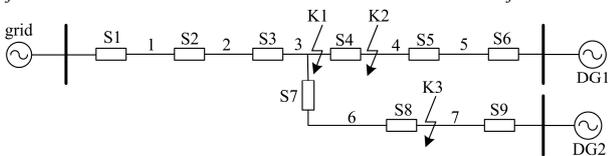


图 1 含 DG 的配电网的简化图

Fig. 1 Simplified distribution network containing DG

图 1 为配电网结构图，对于开关 S1、S2 和 S3，其上游电源为电网电源，其下游电源为 DG1 和 DG2。同样，对于开关 S4、S5 和 S6，其上游电源为 DG1，下游电源为电网电源和 DG2。对于开关 S7、S8 和 S9，其上游电源为 DG2，下游电源为电网电源和 DG1。

以 S4 为例，对于 S4 其正方向是从其上游电源 DG1 到下游电源电网电源和 DG2。当 K1 处发生短路故障，流过 S4 的故障电流由分布式电源 DG1 提供并且故障电流的方向与假定的正方向一致，故 S4 的故障状态为‘1’。当 K2 处发生故障，流过 S4 的故障电流由电网电源和分布式电源 DG2 提供并且故障电流的方向与假定的正方向相反，故此时 S4 的故障状态为‘-1’。其他开关的状态值确定方法与 S4 类似。

### 1.2 开关函数

当配电网发生故障时，安装在分段开关和联络开关上的 FTU 检测到故障电流并将其上传到主控制器。在主控制器利用免疫算法通过各开关处 FTU 上传的故障信息对故障线路进行定位时，就需要建立一个故障状态之间的转换，这种转变可以通过一个函数来实现，即开关函数，它反映了线和开关之间的关联关系<sup>[19]</sup>。

对于某一个开关来说，定义开关和上游电源之间的线路为该开关的上游线。同理，其下游线路为该开关与其下游电源之间的馈线。不同于传统的单电源辐射性供电系统，在分布式发电系统中，通过开关的电流与每一个供电电源都有关系。因此，本文定义了一个新的开关功能，如式(1)所示。

$$I_j^*(S) = \left( \prod_{i=1}^N K_{DG_i} \right) \times \left[ 0 - \left( \prod_{u=1}^{M_1} s_{ju} \right) \right] + \left( \prod_{d=1}^{M_2} s_{jd} \right) \quad (1)$$

式中： $I_j^*$  是第  $j$  个分段开关的开关函数； $S_{ju}$  是  $j$  号开关上游馈线的状态； $S_{jd}$  是  $j$  号开关下游馈线的状态，当线路发生故障值为 1，正常运行值为 0；

$\prod_{u=1}^{M_1} s_{ju}$  是开关  $j$  的上游线路故障状态逻辑或运算；

$\prod_{d=1}^{M_2} s_{jd}$  是开关  $j$  的下游线路故障状态逻辑或运算；

$K_{DG_i}$  表示着分布式电源(DG)是否并网运行，当 DG 并网运行，其状态代码为‘1’，如果没有，代码为‘0’。

当没有 DG 并入配电网系统中  $\prod_{i=1}^N K_{DG_i} = 0$ ，此时

$I_j^*(S)$  和传统单电源辐射性配电网系统的开关函数一样。因此，新的开关函数能够适应网络拓扑结构的改变。

### 1.3 抗体评价

免疫算法与遗传算法之间的不同主要是对个体的评价、选择以及产生的方式等。遗传算法对个体的评价是通过个体适应度, 而免疫算法则是通过抗体与抗原之间的匹配程度以及抗体之间的相似程度对个体进行选择。

#### 1.3.1 抗体与抗原的匹配度

故障定位的精度由评价函数决定, 因此适当的适应函数是使用免疫算法进行故障定位的关键。应用免疫算法进行故障定位应在解空间中找到一个或几个可能的故障线路, 使得这些线路能够最好地解释来自 FTU 的开关的故障电流关断信号。本文采用的评价函数如式(2)所示。

$$F(S) = \sum_{j=1}^k |I_j - I_j^*(S)| \quad (2)$$

式中:  $K$  为配电网中开关的总数;  $S$  为单个抗体; 即所有馈线区段状态组成的解向量;  $I_j$  为配电网中馈线的故障电流编码;  $I_j^*(S)$  是由式(1)确定的开关函数。

抗体和抗原之间的匹配程度如式(3)所示。

$$A_v = 1/F(S) \quad (3)$$

式中:  $F(S)$  为式(2)求得的评价函数;  $A_v$  用来表示抗体与抗原之间的匹配程度, 即评价函数值越小, 说明抗体与抗原之间的匹配程度越高。

#### 1.3.2 抗体之间的相似度

为了保持个体之间的多样性, 应该尽量保证个体在进化迭代过程中存在差异, 这样可以加快算法故障定位的速度, 避免类似于遗传算法的局部寻优。此处借鉴参考文献[20], 计算抗体与抗体之间的相似度。抗体相同位置之间若存在超过  $X$  位编码相同, 则表示两种抗体相似。抗体群中相似抗体所占的比例用抗体浓度  $C_v$  表示, 计算公式

$$C_v = \frac{\sum_{v,s \in N} H_{v,s}}{N} \quad (4)$$

$$H_{v,s} = \begin{cases} 1, & S_{v,s} > e \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $e$  为抗体相似度评价参数;  $S_{v,s}$  为抗体  $v$  与抗体  $s$  之间的相似度;  $H_{v,s}$  为两个抗体是否相似, 是, 取 1, 否, 取 0;  $N$  为抗体总数。

#### 1.3.3 抗体的期望繁殖度

在抗体群中, 每个抗体的期望繁殖概率由抗体与抗原之间的匹配度和抗体之间的浓度两部分共同决定, 保持了抗体的多样性, 增加算法优化能力, 期望繁殖度可表示为

$$P_v = \alpha \frac{A_v}{\sum A_v} + (1-\alpha) \frac{C_v}{\sum C_v} \quad (6)$$

式中,  $C_v$  为抗体浓度。用期望繁殖率  $P_v$  表示被选择作为交叉、变异个体的可能性概率, 这样既有利于相似度高的抗体被选择, 又确保了抗体之间的多样性<sup>[21]</sup>。

## 2 免疫算法的实现

在免疫算法中, 抗体对应着馈线的故障状态, 抗原对应着适应度函数。当配电网线路发生故障时, 所有开关的 FTU 将立即上传开关的故障电流越界信号, 然后根据免疫算法可以直接找到故障线路。基于免疫算法的故障定位流程图如图 2 所示。

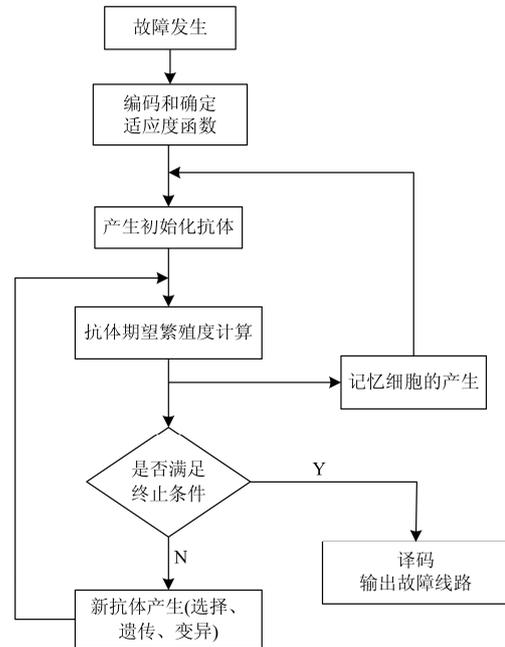


图 2 免疫算法流程图

Fig. 2 Flow chart of immune algorithm

在流程图中,  $I_j$  的值是由 FTU 反馈到 SCADA 控制中心的故障电流信息。为了产生初始抗体, 该代码应包括网络拓扑的分析, 以确定开关以及其对应的上游和下游线的数量。由于实际故障几乎是单点故障, 初始种群的产生可以完全使用初始化单一的故障点, 这将有助于减少遗传算法的搜索次数<sup>[22-23]</sup>, 提高算法的效率。例如, 抗体的表现形式为  $[0\ 1\ 0\ 0 \cdots 0]$ 。

## 3 算例分析

本文以图 3 所示的配电网为例进行免疫算法仿真分析。图中 grid 为系统电源; DG1、DG2 为接入配电网的两个分布式电源; S1~S13 为分段开关; 编号 1~11 为馈线区段; 根据免疫算法原理, 设置相

关算法参数如下：种群个体数目为 24；记忆库容量为 6；根据配电网拓扑结构设置个体长度为 11；交叉概率为 0.8；变异概率为 0.1；式(5)中抗体相似度评价参数  $e=0.9$ ；式(6)中的多样性评估参数  $\alpha=0.95$ 。

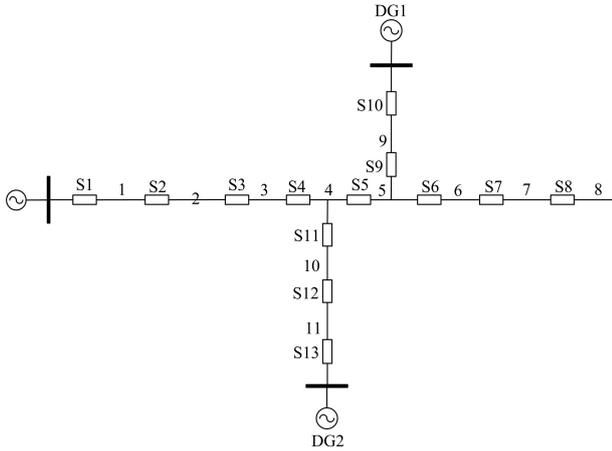


图 3 含分布式电源的配电网

Fig. 3 Distribution network containing DG

### 3.1 配电网发生单重故障

当 3 号馈线发生短路故障，根据 2.1 节知，此时 FTU 上传的故障电流编码为 [1 1 1 -1 1 0 0 0 1 1 1 1 1]。利用免疫算法对含分布式电源的配电网进行故障定位，结果如图 4 所示。分析图 4 可知，在算法进化到第 9 代时，种群中出现最适解，且其输出的最优解为 [0 0 1 0 0 0 0 0 0 0]。由此可知，当含分布式电源的配电网发生单重故障时，免疫算法能够快速、准确地进化出最优解，找到发生故障的馈线。

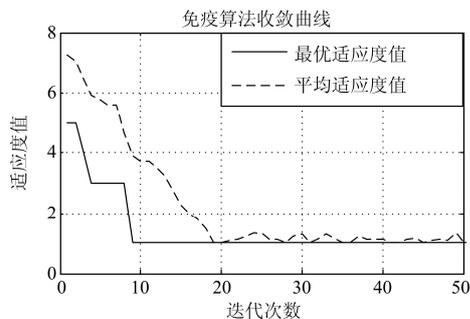


图 4 单重故障免疫算法收敛过程

Fig. 4 Convergence process of immune algorithm at single fault

### 3.2 配电网发生多重故障

图 3 所示的含分布式电源的配电网的 3 号和 9 号馈线同时发生故障，根据 2.1 节分析可知，此时 FTU 上传的故障电流编码为 [1 1 -1 -1 -1 0 0 0 -1 1 1 1 1]。利用免疫算法对多重故障定位，结果如图 5 所示。分析图 5 可知，在算法进化到第 13 代时，种

群中出现最适解，且其输出的最优解为 [0 0 1 0 0 0 0 0 1 0 0]。由此可证，当含分布式电源的配电网发生多重故障时，免疫算法仍然能够实现故障定位，找到发生故障的馈线。

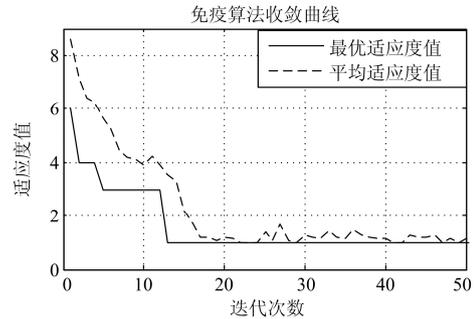


图 5 多重故障免疫算法进化过程

Fig. 5 Convergence process of immune algorithm at multiple faults

### 3.3 配电网发生故障而 FTU 上传信息发生畸变

图 3 所示的含分布式电源的配电网的 3 号和 9 号馈线发生故障，根据 2.1 节分析可知，此时 FTU 上传的故障电流编码应该为 [1 1 -1 -1 -1 0 0 0 -1 1 1 1 1]。假如由于信号干扰或者通信故障，FTU 上传的故障电流编码为 [1 1 -1 -1 -1 0 1 0 -1 1 1 1 1]。利用免疫算法对上述情况进行故障定位，结果如图 6 所示。分析图 6 可知，在算法进化到第 42 代时，种群中出现最适解，且其输出的最优解为 [0 0 1 0 0 0 0 0 1 0 0]。由此可知，当含分布式电源的配电网发生多重故障且 FTU 上传信息发生畸变，免疫算法仍然能够实现故障定位，找到发生故障的馈线，这也同时证明了免疫算法的容错性。

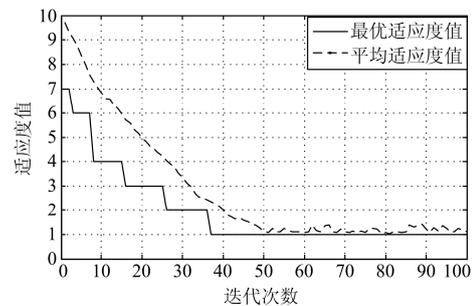


图 6 多重故障且信息畸变的免疫算法进化过程

Fig. 6 Convergence process of immune algorithm at multiple fault and information distortion

### 3.4 对比免疫算法和遗传算法

假设图 3 所示的含分布式电源的配电网的 3 号和 9 号馈线发生故障，且 FTU 上传故障电流信息畸变。利用遗传算法对以上情况进行故障定位，结果如图 7 所示。对比图 6 可知，在同样的情况下，遗传算法不但没有免疫算法收敛得快，而且在进化到

100代依然得到的是次优解,这和遗传算法的早熟收敛和局部搜索能力不足有关。

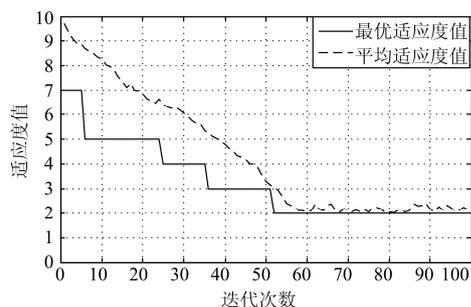


图7 多重故障且信息畸变的遗传算法进化过程  
Fig. 7 Convergence process of genetic algorithm at multiple fault and information distortion

#### 4 总结

到目前为止,研究含分布式电源的配电网故障定位算法仍处于摸索阶段。本文创造性地将免疫算法应用于含分布式电源的配电网故障定位中。由于含分布式电源配电网的多电源供电特性,本文首先提出了每一个开关都有自己的正方向。其次,在确定了每个开关的正方向后,详细介绍了在故障定位中基于免疫算法的开关函数和适应度函数,并且通过计算抗体与抗原之间的亲和力以及抗体与抗体之间的相似度,保证了进化过程中抗体的多样性,避免了在进化过程中的早熟收敛问题。最后,在 Matlab 软件上建立了基于免疫算法的含分布式电源的配电网故障定位模型,通过对实验结果的分析,证明了本文所设计的免疫算法适用于含分布式电源配电网的故障定位,并且与遗传算法进行了对比,同时也证明了免疫算法在故障定位的快速性和有效性。

#### 参考文献

- [1] 刘新宇,姚致清,陈铁军. 变速恒频双馈风力发电机结构分散化并网控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 97-104.  
LIU Xinyu, YAO Zhiqing, CHEN Tiejun. Cutting-in control of the doubly-fed variable speed and pitch wind-power generator based on structure decentralized control[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 97-104.
- [2] 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.
- [3] 李小腾,宁联辉,锁军,等. 陕北新能源电厂大规模接入对陕西电网安全稳定影响的研究[J]. 陕西电力, 2015, 43(9): 20-24.  
LI Xiaoteng, NING Lianhui, SUO Jun, et al. Research on effect of security and stability with largescale renewable energy sources integration on shaanxi Power Grid[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(9): 20-24.
- [4] 徐海波,李天宇,宋晓芳,等. 大规模风电接入对稳定控制系统中跳闸判据和实时决策的影响[J]. 陕西电力, 2015, 43(7): 11-16.  
XU Haibo, LI Tianyu, SONG Xiaofang, et al. Impacts of large-scale wind power integration on the tripping criteria and real-time decision-making in stability control systems[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(7): 11-16.
- [5] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian, et al. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 14pp.  
DOI 10.1186/s41601-016-0025-x
- [6] 陈艳丽,周群,滕欢. 配电网故障定位容错算法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(13): 91-95.  
CHEN Yanli, ZHOU Qun, TENG Huan. Fault-tolerance algorithm for fault location of distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(13): 91-95.
- [7] 翁蓝天,刘开培,刘晓莉,等. 复杂配电网故障定位的链表法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 190-196.  
WENG Lantian, LIU Kaipei, LIU Xiaoli, et al. Chain table algorithm for fault location of complicated distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 190-196.
- [8] 汪春峰,蒋妍. 基于蜂群算法和遗传算法的贝叶斯网络结构混合学习方法[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2015, 43(4): 16-20.  
WANG Chunfeng, JIANG Yan. Ahybrid algorithm for learning Bayeisan network structure based on artificial bee colony and genetic algorithm[J]. Journal of Henan Normal University (Naturca Science Edition), 2015, 43(4): 16-20.
- [9] 程蒙,周玲,胡传胜,等. 基于免疫粒子群算的分布式电源多目标规划[J]. 陕西电力, 2015, 43(6): 5-9.  
CHENG Meng, ZHOU Ling, HU Chuansheng, et al. Multi-objective optimal planning of distributed generation based on immune particle swarm optimization algorithm[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(6): 5-9.
- [10] 付家才,陆青松. 基于蝙蝠算法的配电网故障区间定位[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 101-105.  
FU Jiakai, LU Qingsong. Fault sections location of

- distribution network based on bat algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 101-105.
- [11] 殷豪, 李德强, 孟安波, 等. 纵横交叉算法在配电网故障定位中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 109-114.  
YIN Hao, LI Deqiang, MENG Anbo, et al. Fault location for distribution network based on crisscross optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 109-114.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 武娜, 焦彦军. 基于模拟植物生长算法的配电网故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(4): 23-28.  
WU Na, JIAO Yanjun. Fault location of distribution network based on plant growth simulation algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(4): 23-28.
- [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] 郭壮志, 陈波, 刘灿萍, 等. 基于遗传算法的配电网故障定位[J]. 电网技术, 2007, 31(11): 88-92.  
GUO Zhuangzhi, CHEN Bo, LIU Canping, et al. Fault location of distribution network based on genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2007, 31(11): 88-92.
- [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] 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): 78-83.  
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): 78-83.
- [19] 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.
- [20] 罗小平. 人工免疫遗传学习算法及其工程应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.  
LUO Xiaoping. The research on artificial immune genetic learning algorithm and its application in engineering[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.
- [21] 史峰, 王辉, 郁磊, 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.
- [22] 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.
- [23] 刘健, 董新洲, 陈星莺, 等. 配电网容错故障处理关键技术研究[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 253-257.  
LIU Jian, DONG Xinzhou, CHEN Xingying, et al. Robust fault isolation and restoration for distribution systems[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 253-257.

收稿日期: 2016-11-27; 修回日期: 2017-03-16

作者简介:

陈奎(1973—), 男, 博士, 副教授, 从事电力系统自动化和继电保护领域的教学、研究工作; E-mail: 894654081@qq.com

张云(1991—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为分布式发电系统的继电保护。E-mail: 894654081@qq.com

(编辑 姜新丽)