

DOI: 10.7667/PSPC171145

基于二进制莱维风驱动算法的船舶岸电系统并网故障诊断方法研究

朱祥兵^{1,2}, 李垣江^{1,3}, 王建华¹

(1. 江苏科技大学电子信息学院, 江苏 镇江 212003; 2. 江苏耐维思通科技股份有限公司, 江苏 张家港 215600;
3. 江苏奥畋工程科技有限公司, 江苏 镇江 212050)

摘要: 针对船舶岸电无缝并网过程中出现的过流和继电保护误动作等问题, 提出了一种基于改进二进制风驱动算法的船舶岸电并网故障诊断方法。分析船舶岸电系统的继电保护方案, 在继电器、断路器拒动/误动条件下研究多种继电保护之间的状态关系及其对岸电电力系统的综合影响。选取适合船舶岸电电力系统故障诊断的数学模型, 并利用改进的二进制风驱动算法对模型进行求解。最终, 通过故障算例验证了该模型的合理性和改进算法的可靠性。

关键词: 二进制; 风驱动算法; 故障诊断; 船舶岸电

Fault diagnosis system about grid connection of shore power based on the improved binary levy wind driven algorithm

ZHU Xiangbing^{1,2}, LI Yuanjiang^{1,3}, WANG Jianhua¹

(1. School of Electronics and Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China;
2. Jiangsu Navston Technology Co., Ltd, Zhangjiagang 215600, China; 3. Jiangsu Ao Tian Engineering Technology Co., Ltd, Zhenjiang 212050, China)

Abstract: Aiming at the problems of over-current and maloperation of relay protection in the process of seamless operation of ship shore power, a fault diagnosis method based on the improved binary wind driving algorithm for ship shore is proposed. The relay protection scheme of ship shore power system is analyzed, the state relation among various relay protection under the condition of refuse operation/unwanted operation in relays and circuit breakers and its comprehensive influence on shore power system for ships are studied. The suitable mathematical model of fault diagnosis about shore power system for ships is selected and then solved by improved binary wind driven algorithm. Finally, the model is verified by two fault examples, and the rationality of the fault model and the reliability of the algorithm are fully proved.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61771225).

Key words: binary; wind driven algorithm; fault diagnosis; shore power

0 引言

岸电是指船舶在停泊码头期间停止使用辅机, 改用岸上变频电源供电, 为泵组、照明等设备提供可靠电力供应、降低污染气体排放的关键技术^[1]。然而, 现代船舶负载容量日益增大、电站结构日趋

复杂, 同时多种特殊设备(保鲜保活设备、舰载武器等)具有不断电的需求, 因此岸/船的“无缝并网”必将取代“先停船舶发电机, 再并岸电”的传统供电方式^[2-3]。与陆上多电源并网不同^[4], 我国港口采用“岸基变频电源+船用变压器”的组合岸电系统为船舶提供靠港供电服务。“无缝并网”技术需要同时调节岸基变频电源和船用辅机, 因此岸/船电力系统的安全连锁至关重要。

岸/船并网不同于传统的多台柴油机联网控制。船舶柴油发电机转子具有惯性, 同时具备一定的

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61771225); 江苏省重点研发计划社会发展项目资助(BE2016723); 江苏省高校自然科学研究项目资助(15KJB510008)

“逆功”承受能力。而岸基变频电源的核心器件是大功率 IGBT，船舶电站电流、电压、频率的微小扰动就会威胁变频电源和船舶发电机的稳定性，严重情况下会造成岸/船电力设备的损毁。文献[5]分析了传统岸与船并网原理及方法，提出了新的无缝并网技术，即运用负载转移技术来关闭船用发电机，使船用设备在不停电的状态下实现与岸上电源并网。文献[6]提出了一种基于改进下垂控制的岸/船并网策略，使码头电源逆变器在具有下垂特性的同时，具有类似于船舶同步柴油发电机转子的惯性。在这种模型下，岸上电源使用并网预同步控制的方法与船舶电力系统并网，将不会引起过大的电流冲击。文献[7]提出了一种基于虚拟同步发电机模型的岸电电源电力电子逆变器控制策略，初步验证了该控制策略的可行性。

当岸电系统失电区域保护装置发生拒动或误动时，现有的控制策略无法满足系统安全稳定的需求。文献[8]运用自组织特征映射网络(SOM)对岸电系统监测数据进行分析，证明了 SOM 网络在系统绝缘故障监测的可行性。文献[9]从岸电供电网络架构、电网接地方式出发，对岸电系统接地故障进行仿真分析，得出通过在码头设置多个隔离变压器，并在隔离变压器副边中性点连接高电阻接地装置，可抑制岸电电缆产生对地拉弧故障。文献[10]为解决港口岸电系统中出现的安全问题，对港口岸电中的安全联锁系统进行研究，得出初步的安全联锁规范。文献[11]提出了一种根据保护和断路器动作规则构建完全解析的电网诊断模型，在提高算法模型的抗干扰能力和鲁棒性的同时，降低了误诊概率。文献[12]提出了一种改进的解析模型即通过告警信息漏报率与误报率，并结合保护与断路器自身的误动率和拒动率，给出相应的权值，提高了诊断的可靠性。

本文在深入分析岸/船电力系统之间的保护配置差异性的基础上，参考电网诊断解析模型^[13-14]，建立继电器/断路器误动、拒动的条件下的船舶电力系统故障诊断的数学模型。当岸/船并网发生故障时，考虑主保护与后备保护之间的状态关系，对电力系统进行拓扑分析以划分发生故障的区块，确定需要纳入故障诊断的元器件数量，并统一编码形成故障诊断目标函数，最终利用二进制风驱动算法对模型进行求解，以定位故障。

1 船舶岸电电力系统分析

船舶岸电系统的系统模型如图 1 所示。

岸电系统主要由岸电电源组成。船舶各配电系统根据主配电板以环形联结，各个主配电板上都

安装设置了隔离开关，各个发电机都可以独立供电^[15]。配电网络的结构为辐射式，主要的负载直接与主配电板相接，次要负载由区域配电板供电。其中 G 表示发电机，GB 表示岸电电源，T 表示变压器，TB 表示船载变电站，L 表示母线，CB 表示开关(断路器)。

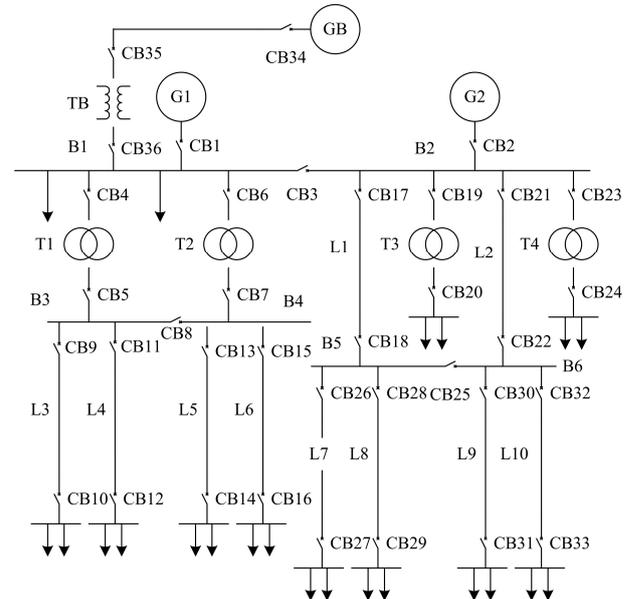


图 1 船舶岸电系统示意图

Fig. 1 Ship shore system diagram

整个岸/船电网以母线为依托将岸基电源和船舶电力系统划分为相对独立的辐射状配电块，当元件发生故障时，主保护或第一后备保护动作，使对应的断路器跳闸来切除故障源，一旦上述保护未能及时动作，则由电源一端的关联元件保护作为第二后备保护动作，相关断路器将跳闸来切断故障源与电路的连接。

2 船舶岸电电力系统故障诊断模型

基于优化技术的船舶电网故障诊断原理是利用反向逆推的方法来找出最优解释故障报警信息的假说。当故障发生后，都会经由相关的保护和断路器动作造成区域性失电，之后进行故障发生前后的元件状态对比得到故障网络，当然故障元件必然也在故障网络之中。首先根据元件、保护和断路器之间的逻辑关系引入目标函数模型。故障模型如式(1)所示^[16]。

$$E(S) = \sum_{i=1}^C |C_i - C_i^*(S, R)| + \sum_{i=1}^R |R_i - R_i^*(S)| \quad (1)$$

式中：S 表示电力系统设备元件的未知状态；C_i 和 C_i^{*} 分别表示第 i 个断路器的实际状态和期望状态；

R_i 和 R_i^* 分别表示第 i 个保护的实际情况和期望状态; C 和 R 分别代表断路器和各个保护的数量。

保护 R 和断路器 C 的动作解析得到的对应期望状态为: 当元件 S 故障, 其主保护 r_i 的期望响应=元件 s 状态; 如果 r_i 拒动, 则第一后备保护 r_j 期望 f_{rj} 的响应=元件 s 状态 \times (1-主保护 r_i 状态); 当 r_i 和 r_j 都拒动时, 则第二后备保护 r_k 期望 f_{rk} 的响应=(1-关联路径断路器 1 的状态) \times (1-关联路径断路器 2 的状态); 断路器的期望响应 = $\max\{f_{R'} * R'\}$, R' 表示所有与待断路器相关的保护状态。因此可以推断出各个保护和断路器对应的拒动和误动情况为

$$\begin{cases} m_r = r(1-f_r) & \text{保护误动} \\ d_r = (1-r)f_r & \text{保护拒动} \\ m_c = c(1-f_c) & \text{断路器误动} \\ d_r = (1-c)f_c & \text{断路器拒动} \end{cases} \quad (2)$$

结合保护和断路器不确定事件发生概率的差异性和舰船特有的断路器不带保护特性, 本文采用如式(3)所示解析模型。

$$\begin{aligned} E(Z) = & \sum_{i=1}^O |r_i - r_i'| + \sum_{i=1}^p |c_i - c_i'| + \omega_{11} \sum_{i=1}^{o_1} |m_{r_i}| + \omega_{12} \sum_{i=1}^{o_2} |m_{r_i}| + \\ & \omega_{13} \sum_{i=1}^{o_3} |m_{r_i}| + \omega_{21} \sum_{i=1}^{o_1} |d_{r_i}| + \omega_{22} \sum_{i=1}^{o_2} |d_{r_i}| + \omega_{23} \sum_{i=1}^{o_3} |d_{r_i}| \end{aligned} \quad (3)$$

式中: Z 为 $\{S, R, C\}$ 变量的集合 $O=o_1+o_2+o_3$, o_1 、 o_2 、 o_3 分别代表了母线、变压器和线路各自保护的数量; p 表示断路器的数量; 等式右边第一和第二项表示保护和断路器告警信息的漏报、误报情况; 第三项到第八项分别表示母线、变压器和线路的误动、拒动情况; ω_{11} 、 ω_{12} 、 ω_{13} 、 ω_{21} 、 ω_{22} 、 ω_{23} 分别对应表 1 中的母线、变压器和线路保护的误动、拒动权值。保护应该动作时 r_i' 为 1, 反之为 0, 断路器应该跳闸时 c_i' 为 1, 反之为 0。

表 1 船舶电力系统继电保护不正确情况

Table 1 Incorrect protection of ship power system

保护类型	拒动/%	误动/%
变压器保护	0.76	3.32
母线保护	0.5	2.59
线路保护	0.96	3.26

参照 2013 年国家电网继电保护设备运行情况, 对误动和拒动的权值进行更新^[17]。船舶电网与陆基电网在电制、电网拓扑结构及用电设备功率因数等方面具有显著不同, 因此岸电系统自动化、信息化程度偏低, 多以手动/半自动化保护装置为主。此外, 船舶环境恶劣、电网谐波严重使得岸电系统继电保

护设备的误动与拒动远超陆上电网。根据连云港港口集团提供的 2011 年至 2017 年的岸电故障数据显示, 继电保护装置的各种保护不正确率远大于陆基电网的平均值, 其比例在 50~100 倍左右。因此, 重新计算的拒动、误动率权值, 如表 1 所示。

3 基于二进制 Levy 飞行风驱动算法的船舶岸电并网故障诊断原理

3.1 二进制风驱动算法

风驱动优化算法是以地球大气中的任一空气质点为研究对象^[18]。为了解决二进制的优化问题, 借鉴二进制粒子群算法思想, 空气质点的位置信息值是通过速度信息的映射值进行归一化处理并与随机变量 $rand \in [0, 1]$ 比较后得到。位置和速度的信息通过式(4)和式(5)来更新。

$$x = \begin{cases} 0 & rand \geq \text{sig}(u) \\ 1 & rand < \text{sig}(u) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} u_i^{k(t+1)} = & (1-a)u_i^{kt} + \left[RT \left| \frac{1}{j} - 1 \right| (x_{\text{gbest}} - x_i^{kt}) \right] - \\ & gx_i^{kt} + \frac{cu_{i\text{otherline}}^t}{j} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: u_i^{kt} 代表了在第 t 次迭代中 k 维度上第 i 个空气质点的速度信息; g 是重力加速度的常量系数; a 指的是相对摩擦系数; x_{gbest} 表示整个种群 M 在目前迭代次数内搜索到的全局最优位置; RT 、 c 代表的是常量系数, $u_{i\text{otherline}}^t$ 为第 t 次迭代中去除了第 k 维度之后第 i 个质点另外 $N-1$ 维的速度信息; j 表示全部质点根据压力值大小的一个升序排列。sig() 函数的对应公式为

$$\text{sig}(u_i^{k(t+1)}) = 1 / (1 + \exp(-u_i^{k(t+1)})) \quad (6)$$

然而文献[19]指出上述映射公式提高了质点的全局多样性, 牺牲了其收敛性, 并提出了文献[19]公式的映射方法。

$$\text{sig}(u_i^{k(t+1)}) = \begin{cases} 1 - 2 / (1 + \exp(-u_i^{k(t+1)})) & u_i^{k(t+1)} \leq 0 \\ 2 / (1 + \exp(-u_i^{k(t+1)})) - 1 & u_i^{k(t+1)} > 0 \end{cases} \quad (7)$$

当 $u_i^{k(t+1)} > 0$ 时

$$x_i^{k(t+1)} = \begin{cases} 1 & rand \leq \text{sig}(u_i^{k(t+1)}) \\ x_i^{kt} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

当 $u_i^{k(t+1)} \leq 0$ 时

$$x_i^{k(t+1)} = \begin{cases} 0 & rand \leq \text{sig}(u_i^{k(t+1)}) \\ x_i^{kt} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

3.2 Levy 飞行策略及数据集验证

Levy 飞行是一种短距离试探漫步与长距离跳跃相结合的一种搜索策略, 它可以提高算法的全局搜索能力, 使算法及时跳出局部最优值^[20-21]。根据 Levy 飞行策略得到的位置更新方程为

$$x_i^{k(t+1)} = x_i^{kt} + \mathcal{G} \oplus Levy(\beta) \quad i=1, 2, \dots, M \quad (10)$$

式中: \mathcal{G} 代表步长控制量, 本文取 0.01; \oplus 表示点对点乘法; $Levy(\beta)$ 代表莱维随机搜索路径且满足式(11)。

$$Levy \sim u = t - \beta \quad 1 < \beta < 3 \quad (11)$$

但是其算法编码复杂, 难以实现。所以采用 Mantegna 算法来模拟出 Levy 飞行路径的步长计算公式^[22]为

$$S = \frac{\mu}{|v|^{1/\beta}} \quad (12)$$

式中: β 通常取 $[0, 2]$, 本文取 1.5; μ 、 v 是服从式(13)的正态分布随机数。

$$\mu \sim N(0, \sigma_\mu^2); \quad v \sim N(0, \sigma_v^2) \quad (13)$$

$$\begin{cases} \sigma_\mu = \left\{ \frac{\Gamma(1+\beta)\sin(\pi\beta/2)}{\Gamma[(1+\beta)/2]2^{(\beta-1)/2}\beta} \right\}^{1/\beta} \\ \sigma_v = 1 \end{cases} \quad (14)$$

将 Levy 飞行策略引入风驱动算法需要将速度的信息变换成飞行路径的值, 依次代入式(4)、式(8)和式(9)中求得位置信息。

为了验证在风驱动算法中加入 Levy 策略的可靠性, 采用数据集标准测试函数 Schwefel 和 Rastrigrin 来验证。其中: Schwefel 是单峰函数, 它的最优值状态为 0, 常用来测试算法的运算和寻优性能; Rastrigrin 是多峰函数, 最优值状态为 0, 主要用来判断算法是否能够快速地跳出局部最优值。

分别用粒子群算法、遗传算法、风驱动算法、加入 Levy 飞行策略的风驱动算法这四种算法来优化上述两个测试函数^[23-27], 各个算法的初始速度和位置信息相同, 取独立运行 20 次后的最优适应度值, 并对其取平均值, 画出相应的平均最优适应度图。

根据函数测试结果可知: 对比图 2 发现, 加入 Levy 策略风驱动算法比其他算法有着更好的寻优性能和精度, 高于其他算法至少 5 个精度级。由图 3 可以看出, 对于 Rastrigrin 多峰函数来说, 遗传算法、粒子群算法和风驱动算法都易陷入局部最优值, 而加入 Levy 策略的风驱动算法可以更好地跳出局

部极值。故而证明在风驱动算法中加入 Levy 策略是可行的。

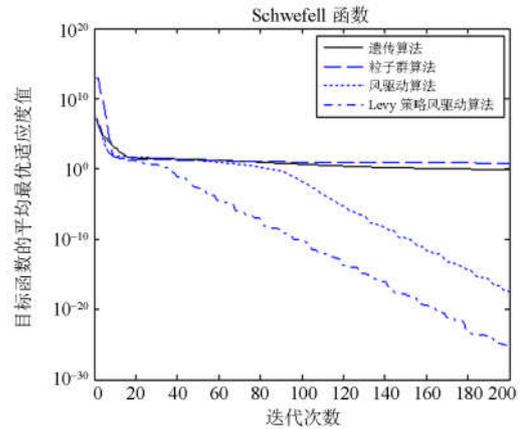


图 2 Schwefel 函数的平均最优适应度值变化曲线

Fig. 2 Average optimal fitness value change curve of Schwefel function

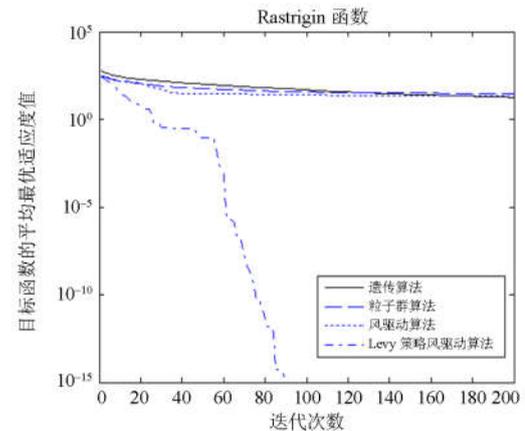


图 3 Rastrigrin 函数的平均最优适应度值变化曲线

Fig. 2 Average optimal fitness value change curve of Rastrigrin function

3.3 基于二进制 Levy 飞行风驱动算法的故障诊断步骤

在船舶岸电电网的故障诊断中, 空气质点的位置等价于元件的状态, 质点的维度就是元件的数量。将二进制风驱动算法与 Levy 飞行实现混合轮番迭代, 得到基于二进制的 Levy 风驱动算法。该算法的故障诊断步骤如下。

1) 输入获得的岸电系统传来的报警信号, 主要有开关断路器跳闸信息, 保护动作信息、设备线路信息, 并形成式(2)模型的评价函数^[27]。

2) 随机初始化各个质点的初始信息(位置和速度), 计算初始的保护和断路器期望和压力值并根据压力值的大小升序排列。

参考文献

- [1] 张国桥, 穆鑫. 探索岸电技术, 建设绿色港口——连云港港船舶靠港接用岸电项目调查[J]. 港口经济, 2011(1): 36-38.
ZHANG Guoqiao, MU Xin. Exploring shore power technology and building a green port — investigation of marine berthing and landing power projects in Lianyungang port[J]. Port Economy, 2011(1): 36-38.
- [2] 彭传圣. 靠港船舶使用岸电技术的推广应用[J]. 港口装卸, 2012(6): 1-5.
PENG Chuansheng. Application of shore power technology for berthing ships[J]. Port Handling, 2012(6): 1-5.
- [3] 吴振飞, 叶小松, 邢鸣. 浅谈船舶岸电关键技术[J]. 电气应用, 2013, 32(6): 22-26.
WU Zhenfei, YE Xiaosong, XING Ming. Key technologies of ship shore power[J]. Electrical Applications, 2013, 32(6): 22-26.
- [4] 田鑫, 杨柳, 才志远, 等. 船用岸电技术国内外发展综述[J]. 智能电网, 2014, 2(11): 9-14.
TIAN Xin, YANG Liu, CAI Zhiyuan, et al. Development of ship shore power technology at home and abroad[J]. Intelligent Power Grid, 2014, 2(11): 9-14.
- [5] 谢圣昌, 肖乐明. 一种港口岸电与船电自动并网的控制系统[J]. 港口科技, 2016(6): 26-28.
XIE Shengchang, XIAO Leming. A control system for automatic integration of shore power and ship power[J]. Port Technology, 2016(6): 26-28.
- [6] 侯珏. 船舶与岸电并网控制策略研究[J]. 船舶工程, 2017, 39(1): 86-88.
HOU Jue. Study on the control strategy of ship to shore power grid[J]. Ship Engineering, 2017, 39(1): 86-88.
- [7] 郜克存, 戴瑜兴, 李加升. 一种新型电子静止式岸电电源[J]. 电力电子技术, 2011, 45(2): 86-88.
GAO Kecun, DAI Yuxing, LI Jiasheng. A new electronic static shore power supply[J]. Power Electronics Technology, 2011, 45(2): 86-88.
- [8] 石朝泓, 徐晔, 吕强, 等. 基于聚类网络的 IT 系统绝缘故障检测研究[J]. 电工电气, 2014(3): 48-51.
SHI Chaohong, XU Ye, LÜ Qiang, et al. Study on insulation fault detection of IT system based on clustering network[J]. Electrical Engineering and Electrical Engineering, 2014(3): 48-51.
- [9] 袁立军, 罗宁昭, 刘佳, 等. 舰船中压电力系统岸电供电系统接地方式研究[J]. 船电技术, 2013, 33(1): 58-60.
YUAN Lijun, LUO Ningzhao, LIU Jia, et al. Research on grounding of shore-to-ship power supply system[J]. Ship Electric Power Technology, 2013, 33(1): 58-60.
- [10] 李晓光, 卜佩征, 王冀星, 等. 港口岸电安全联锁系统研究[J]. 港口科技, 2015(4): 17-19.
LI Xiaoguang, BU Peizheng, WANG Jixing, et al. Study on the safety interlock system of port shore power[J]. Port Science and Technology, 2015(4): 17-19.
- [11] 王家林, 夏立, 吴正国, 等. 采用量子遗传算法的船舶电网故障诊断方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(3): 35-39.
WANG Jialin, XIA Li, WU Zhengguo, et al. A method of fault diagnosis for ship power grid using quantum genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(3): 35-39.
- [12] 刘道兵, 顾雪平, 梁海平, 等. 电网故障诊断完全解析模型的解集评价与最优解求取[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5668-5676.
LIU Daobing, GU Xueping, LIANG Haiping, et al. Solution set evaluation and optimal solution of power grid fault diagnosis complete resolution[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5668-5676.
- [13] 王大志, 江雪晨, 宁一, 等. 一种改进的电网故障诊断解析模型[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(8): 1065-1069.
WANG Dazhi, JIANG Xuechen, NING Yi, et al. An improved analytic model for power grid fault diagnosis[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science Edition), 2016, 37(8): 1065-1069.
- [14] 刘科学, 宣文华, 魏少鹏, 等. 一种基于高级 Petri 网的微电网故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 106-111.
LIU Kexue, XUAN Wenhua, WEI Shaopeng, et al. A method of micro grid fault diagnosis based on high-level Petri net[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 106-111.
- [15] 张威, 施伟锋, 胡红钱. 船舶区域配电系统全智能体重构及其优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 9-15.
ZHANG Wei, SHI Weifeng, HU Hongqian. Research on agent based reconfiguration and its optimization for shipboard zonal power systems[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 9-15.
- [16] 文福拴, 韩祯祥, 田磊, 等. 基于遗传算法的电力系统故障诊断的解析模型与方法——第一部分: 模型与方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 1998, 11(3): 8-14.
WEN Fushuan, HAN Zhenxiang, TIAN Lei, et al. Analytic model and method of power system fault diagnosis based on genetic algorithm part 1: model and method[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 1998, 11(3): 8-14.

- [17] 张烈, 吕鹏飞, 申华, 等. 2013 年国家电网公司 220 kV 及以上电压等级交流系统继电保护设备及其运行情况分析[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 1153-1159.
ZHANG Lie, LÜ Pengfei, SHEN Hua, et al. Analysis on protective relaying and its operation conditions of SGCC in 220 kV and above voltage AC systems in 2013[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 1153-1159.
- [18] 刘式适, 刘式达. 大气动力学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2011.
- [19] 刘建华. 粒子群算法的基本理论及其改进研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
LIU Jianhua. Research on the basic theory and improvement of particle swarm optimization[D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [20] 薛浩然, 张珂珩, 李斌, 等. 基于布谷鸟算法和支持向量机的变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 8-13.
XUE Haoran, ZHANG Keheng, LI Bin, et al. Fault diagnosis of transformer based on the cuckoo search and support vector machine[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 8-13.
- [21] 王庆喜, 郭晓波. 基于莱维飞行的粒子群优化算法[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(9): 136-141.
WANG Qingxi, GUO Xiaobo. Particle swarm optimization algorithm based on Levy flight[J]. Application Research of Computers, 2016, 33(9): 136-141.
- [22] MANTEGNA R N. Fast, accurate algorithm for numerical simulation of Lévy stable stochastic processes[J]. Physical Review E Statistical Physics Plasmas Fluids & Related Interdisciplinary Topics, 1994, 49(5): 4677-4683.
- [23] 何怡刚, 祝文姬, 周炎涛, 等. 基于粒子群算法的模拟电路故障诊断方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(6): 163-171.
HE Yigang, ZHU Wenji, ZHOU Yantao, et al. Analog circuit fault diagnosis method based on particle swarm optimization[J]. Acta Electrotechnical Sinica, 2010, 25(6): 163-171.
- [24] 关万琳, 谭阳红, 卢鸣凯, 等. 基于量子粒子群算法的非线性模拟电路屏蔽故障诊断[J]. 电工技术学报, 2013, 28(增刊 1): 68-74.
GUAN Wanlin, TAN Yanghong, LU Mingkai, et al. Shielding fault diagnosis of nonlinear analog circuits based on quantum particle swarm optimization (QPSO)[J]. Electrotechnical journal, 2013, 28(S1): 68-74.
- [25] 朱前进. 改进粒子群优化算法的图像匹配[D]. 新乡: 河南师范大学, 2017.
ZHU Jinjin. Improved particle swarm optimization algorithm for image matching[D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2017.
- [25] 史旭栋, 高岳林, 韩俊茹. 基于模糊推理的粒子群优化算法[J]. 河南师范大学学报(自然版), 2017, 45(2): 108-118.
SHI Xudong, GAO Yuelin, HAN Junru. Particle swarm optimization algorithm based on fuzzy reasoning [J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science), 2017, 45(2): 108-118.
- [27] 熊国江, 石东源. 电网故障诊断改进解析模型及其自适应生物地理学优化方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 205-211.
XIONG Guojiang, SHI Dongyuan. Improved analytical model of power grid fault diagnosis and adaptive biogeography optimization method[J]. Acta Electrotechnical Sinica, 2014, 29(4): 205-211.
- [28] 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.

收稿日期: 2017-07-30; 修回日期: 2017-10-23

作者简介:

朱祥兵(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为优化算法、故障诊断; E-mail: 274294232@qq.com

李垣江(1981—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为故障诊断、图像处理;

王建华(1960—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 主要研究方向为故障诊断、神经网络。

(编辑 周金梅)