

Research on Fault Location of Distribution Network with DG Based on HHO

Yan Xin*, Liu Ruichen, Tu Naiwei, Xing Jiaqi

School of Electrical and Control Engineering, Liaoning University of Engineering and Technology, Huludao, China

Email address:

yanxin781204@126.com (Yan Xin), 851567221@qq.com (Liu Ruichen), tunaiwei@126.com (Tu Naiwei),
1241212500@qq.com (Xing Jiaqi)

*Corresponding author

To cite this article:

Yan Xin, Liu Ruichen, Tu Naiwei, Xing Jiaqi. Research on Fault Location of Distribution Network with DG Based on HHO. Science Discovery. Vol. 10, No. 5, 2022, pp. 332-339. doi: 10.11648/j.sd.20221005.19

Received: September 20, 2022; Accepted: October 18, 2022; Published: October 24, 2022

Abstract: Power generation, transmission, transformation, distribution and use are several important links in the power system, of which the distribution link is the most important. Since the 18th National Congress of the CPC, with the acceleration of carbon peaking and carbon neutrality process, clean energy such as solar power generation, wind power generation and fuel cells has developed rapidly, and the energy utilization mode has become complex and diversified. The access of these distributed power sources has put forward higher requirements for the safe and stable operation of the power system. Therefore, the research on fault location has become an indispensable part of the research on the stability of distribution network. In order to enhance the accuracy and speed of fault location, a distributed power distribution network fault location method based on Harris Eagle algorithm was proposed. The specific process is: when a fault occurs in the power grid, FA (feeder automation) will first monitor the error message and upload it to FTU (feeder terminal unit), and FTU will interpret the error message according to HHO algorithm and accurately locate it to the fault section. However, the traditional HHO is not suitable for the discreteness problem, so it is first converted into a binary BHHO, based on this, new fault location coding mode, switching function and evaluation function suitable for binary system are constructed. BHHO is applied to the IEEE33 bus distribution network model with DG, and compared with GA and PSO under the conditions of single point fault, multi-point fault and information distortion fault. The simulation results show that the accuracy and speed of BHHO are better than those of GA and PSO under various fault conditions. The results prove that HHO can better enhance the accuracy and stability of fault location in distribution network.

Keywords: Harris Eagle Algorithm, Power Distribution Network, Fault Location, Distributed Generation

基于HHO的含DG配电网故障定位研究

阎馨*, 刘瑞晨, 屠乃威, 邢佳琦

辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 葫芦岛, 中国

邮箱

yanxin781204@126.com (阎馨), 851567221@qq.com (刘瑞晨), tunaiwei@126.com (屠乃威), 1241212500@qq.com (邢佳琦)

摘要: 发、输、变、配、用是电力系统的几个重要环节, 其中配电环节更是重中之重。十八大以来随着碳达峰碳中和进程的加快, 太阳能发电、风力发电、燃料电池等清洁型能源飞速发展, 能源利用方式变得复杂多元, 这些分布式电源的接入为电力系统的安全稳定运行提出了更高的要求。因此故障定位方面的研究成为配电网稳定性研究中不可或缺的一环。为了加强故障定位的精准和速度, 提出一种基于HHO(哈里斯鹰算法)的故障定位方法。具体流程为: 电网中发生故障时首先会由FA(馈线自动化)监测到报错信息并上传给FTU(馈线终端装置), FTU会依据HHO算法将报

错信息解读并精确定位至故障区段。但传统HHO并不适用于离散性问题，因此先将其转化为二进制BHHO，以此构造出新的适用于二进制的故障定位编码模式、开关函数以及评价函数。并将BHHO应用于含DG的IEEE33节点配电网模型，与GA和PSO在单点故障、多点故障和信息畸变故障的情况下做对比实验，仿真结果显示在各种故障情况下BHHO的精确度和速度均好于GA和PSO，结果证明了HHO可以更好的增强配电网故障定位的精确和稳定性。

关键词：哈里斯鹰算法，配电网，故障区段定位，分布式电源

1. 引言

配电网配电环节是电力系统几个环节中的重中之重。研究发现配电网发生故障是造成大部分停电故障和影响用户用电的主要原因[1]。所以对于配电网故障定位的研究是配电网研究内容中的关键，而定位是根据FA（馈线自动化）上分段开关的状态来确定的。FA是通过以控制设备来达到配电线路自动化监控的一种技术，是配电网故障定位依赖的关键[2]。其工作方式为先将配电网用分段开关划分为几个区域，当某一区段发生故障时，监测开关会将报错数据上传至FTU（馈线终端装置），FTU会极快的响应定位到故障区段并断开分段开关[3]，同时要保证相邻区段的供电正常运行，努力将故障带来的影响降至最低。馈电自动化技术可以对配电网故障区域进行快速诊断和隔离，并会快速恢复供电，整个过程只需要几毫秒，提高了供电过程的安全性、可靠性并且降低了日常的运营维护和人力资源成本。

随着群智能算法愈发成熟，配电网故障定位的精确度和效率也在不断增高。文献[4-6]提出将GA与故障定位相结合，一定程度上提高了容错性和准确性但参数复杂、存在随机性、精确定位较差。文献[7]用改进二进制PSO对故障定位进行优化，强化了抗局部最优能力、收敛速度更快、能适用于多电源网络但精度仍有待完善。文献[8]利用模拟退火法加强了烟花算法的抗局部最优性，得到了很好的适应度值但收敛速度较慢。文献[9]首次将鲸鱼算法应用于配电网故障定位，在最优解的值和求解速度上都得到了改善但易于陷入局部最优。文献[10]提出了人工鱼群算法与故障定位的结合，增强了精确性与稳定性，但遇到故障时会产生误报。

随着全球分布式发电技术的飞速发展，近年来大量DG（分布式电源）接入到配电网之中，它是指直接布置在配电网或分布在负荷附近的非常规或可再生能源发电系统[11]，如：风力发电、太阳能发电、燃料电池、甚至是新能源汽车的充电桩。这些分布式电源多分布于城市内，能源燃料多为天然气或柴油，具有经济环保、安全可靠等优点。但其出现也改变了常规的电网潮流模式，使传统配电网的结构变得更为复杂，因此潮流方向不单一的含DG的有源配电网故障定位研究变得格外重要。

本文在前人对配电网故障定位研究的基础上，提出一种基于HHO的故障定位方法，将初始HHO转化为二进制BHHO，以此构造出新的适用于二进制的故障定位编码模式、开关函数以及评价函数。并将BHHO应用于含DG的IEEE33节点配电网模型，与GA和PSO在单点故障、多点故障和信息畸变故障的情况下做对比实验，得到的结果证

明了HHO可以更好的增强配电网故障定位的精确和稳定性。

2. 哈里斯鹰算法

哈里斯鹰算法（HHO）[12]是由Heidari、Mirjalili等人于2019年提出的一种元启发式算法，具有较强的全局搜索能力并且调节参数少的有点。其灵感来自于美国亚利桑那州南部的一种名为哈里斯鹰的猛禽。它们起源于南得克萨斯，喜欢以兔子、鼠类和蛇蜥为食[13]。它们的特殊之处在于不同于其他猛禽的群居习性，捕猎策略是以家庭为单位的合作围剿，一旦鹰群发现猎物，就会从四面八方发动围剿，即使猎物侥幸逃脱也会有家族里最强成员对其进行追捕，直到猎物筋疲力尽被捕获[14]。这种群体的合作捕食行为非常适合用来构建群智能优化算法。

目前HHO已经被应用于多种研究领域[15-17]，并取得了不错的成效，综上所述将以HHO来对故障定位的寻优过程、评价函数的结果进行优化，以达到对故障定位精确性、快速性的优化。算法的过程分为：全局搜寻阶段、局部围猎阶段和攻击阶段。

2.1. 全局搜寻阶段

哈里斯鹰在捕食过程中会先观察周围的情况，这个寻找并追踪猎物的过程在广袤的沙漠中并不简单，所以哈里斯鹰群体会先分散开来各自寻找信息且分散度很高。这个高度分散的初始化过程又分为两种状态，当 $r \geq 0.5$ 时在活动范围内随机寻找位置，当 $r \leq 0.5$ 时根据猎物和其他成员的位置来调整自己的位置。

$$\bar{X}(t+1) = \begin{cases} X_{rand}(t) - r_1 | X_{rand}(t) - 2r_2 X(t) |, & r \geq 0.5 \\ (X_{rabbit}(t) - X_{hawk}(t)) - r_3(lb + r_4(ub - lb)), & r < 0.5 \end{cases} \quad (1)$$

式中 $X_{rand}(t)$ 为种群内随机选择一个体的位置， r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 为[0,1]间的随机数， $X_{rabbit}(t)$ 为猎物位置， $X_{hawk}(t)$ 为种群当前的平均位置，ub、lb分别为搜索空间的上下限。

2.2. 局部围猎阶段

确定好猎物的位置后哈里斯鹰会开始对猎物展开围捕，这个阶段的转换是根据猎物的逃逸能量因子E的大小来决定的，当 $|E| > 1$ 时对应全局搜寻阶段，当 $|E| \leq 1$ 时转变为局部围猎阶段，其表达式如下：

$$E = 2E_0(1 - t / t_{max}) \quad (2)$$

E_0 为[-1,1]之间的随机数, 猎物的种类不同其逃逸能量也不同, t 为当前迭代次数, t_{\max} 为最大迭代次数。

2.3. 攻击阶段

俗话说一技之长不足傍身, 单一的攻击方式并不总会奏效, 根据猎物的能量因子和逃脱概率, 哈里斯鹰将对已锁定的猎物用四种方式展开攻击。

2.3.1. 柔和围攻

当 $|E| \geq 0.5$ 且 $r \geq 0.5$ 时, 此时猎物的能量很充足, 发现被追捕后会受到惊吓以随机路线逃跑但无法逃离包围圈, 这时哈里斯鹰并不会直接发起进攻而是会围着猎物盘旋消耗猎物的体力, 公式表示为:

$$X(t+1) = \Delta X(t) - E |JX_{rabbit}(t) - X(t)| \quad (3)$$

其中 $\Delta X(t)$ 表示第 t 次迭代时哈里斯鹰与猎物的位置差, J 为[0,2]区间内随机值表示猎物跳跃距离系数。

2.3.2. 猛烈围攻

当 $|E| \leq 0.5$ 且 $r \geq 0.5$ 时, 此时猎物已经筋疲力竭没有机会从哈里斯鹰手下逃脱, 哈里斯鹰会抓住机会对猎物发起猛烈的进攻, 公式表示为:

$$X(t+1) = X_{rabbit}(t) - E |X_{rabbit}(t) - X(t)| \quad (4)$$

2.3.3. 渐进式快速俯冲柔和围攻

当 $|E| \geq 0.5$ 且 $r < 0.5$ 时, 此时猎物还有充沛的能量且有机会冲出包围圈, 哈里斯鹰会形成一个软包围圈并根据两种方案进行攻击, 若是方案一失效则采取方案二, 公式表示为:

$$P_1 = X_{rabbit}(t) - E |JX_{rabbit}(t) - X(t)| \quad (5)$$

$$P_2 = P_1 + S \times LF(D) \quad (6)$$

D 为目标函数的空间维度, S 是一个 $1 \times D$ 的随机向量, LF 为Levy飞行函数, 总体方案为:

$$X(t+1) = \begin{cases} P_1 & LF(P_1) < LF(X(t)) \\ P_2 & LF(P_2) < LF(X(t)) \end{cases} \quad (7)$$

2.3.4. 渐进式快速俯冲猛烈围攻

当 $|E| < 0.5$ 且 $r < 0.5$ 时, 此时猎物有可能会逃脱但体力不足, 哈里斯鹰不会再给猎物机会, 会在攻击时设定一个强硬的包围圈来缩小与猎物间的平均距离[11], 公式表示为:

$$P_1 = X_{rabbit}(t) - E |JX_{rabbit}(t) - X_{hawk}(t)| \quad (8)$$

$$P_2 = P_1 + S \times LF(D) \quad (9)$$

$$X(t+1) = \begin{cases} P_1 & LF(P_1) < LF(X(t)) \\ P_2 & LF(P_2) < LF(X(t)) \end{cases} \quad (10)$$

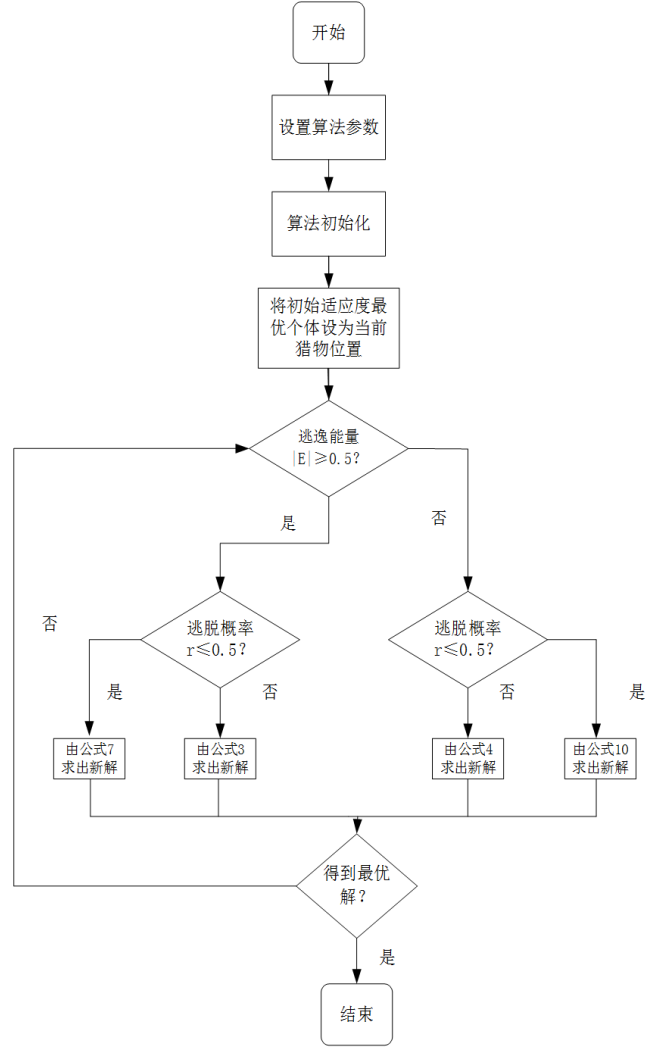


图1 HHO算法流程。

3. 故障定位建模

3.1. 故障状态编码

故障状态编码分为故障区段编码和节点电流状态编码。配电网故障定位的流程就是依靠节点采集并上传的故障信息, 通过设定的智能算法寻优, 最终找到故障发生区段的过程[18]。其中故障区段的状态用 L_i 来表示, $L_i=1$ 表示该区段存在故障, $L_i=0$ 表示该区段不存在故障。节点状态用 S_j 来表示, $S_j=1$ 表示有故障电流, $S_j=0$ 表示无故障电流, 但此依据只适用于传统配电网, 在DG并网后新增了故障电流的反向性, 使得传统的判断方式不再适用于新配电网模型。

以图2为例, 若 L_1 区段发生故障, 则开关 S_2 会同时收到系统电源 S 给出的正向故障电流和DG通过 L_5 和 L_2 区段给出的反向故障电流, 会造成信息畸变影响故障定位的判断。所以针对有源配电网模型, 节点电流的状态编码表示为: $S_j=1$ 有正向故障电流、 $S_j=0$ 无故障电流、 $S_j=-1$ 有反方向故障电流。

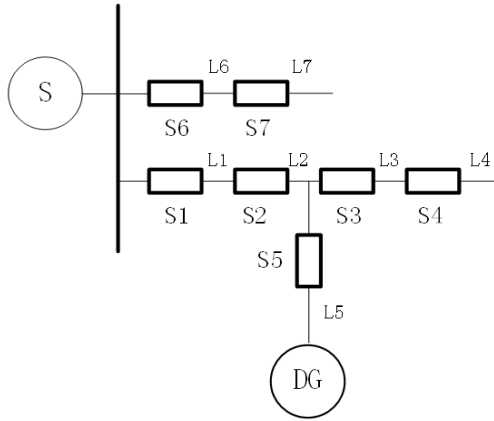


图2 含DG的有源配电网模型。

3.2. 开关函数模型

运用智能算法进行故障定位需要将各区段的状态编码通过开关函数转化为FTU监测并上传的节点状态编码[19]。

传统配电网的开关函数模型为：

$$I_j(s) = \prod S_i \quad (11)$$

将第j个开关的开关函数设定为 $I_j(s)$ ，其状态由第j个开关和下游所有区段的开关状态共同决定。

以图3为例，假设区段 L_3 发生故障，则当时的区段状态表示为：

$$S = [0010000] \quad (12)$$

$$I_j(s) = K_u \times (1 - \prod_i^u S_{ju}) \times \prod_i^d S_{jd} - K_d (1 - \prod_j^d S_{jd}) \times \prod_j^u S_{ju} \quad (16)$$

其中u、d分别代表以开关j为界的线路的上、下游。 K_u 、 K_d 代表上、下游线路电源的接入情况，接入置1反之置0。 S_{ju} 、 S_{jd} 分别表示上下游线路的区段状态，故障置1反之置0。以此开关函数再次求解期望值，还是假设区段 L_3 发生故障：

$$I_1^* = 1 \times (1 - 0) \times (S_1|S_2|S_3|S_4|S_5) - 1 \times (1 - S_1|S_2|S_3|S_4) \times 0 = 1$$

$$I_2^* = 1 \times (1 - S_1) \times (S_2|S_3|S_4|S_5) - 1 \times (1 - S_2|S_3|S_4) \times S_1 = 1$$

$$I_3^* = 1 \times (1 - S_1|S_2) \times (S_3|S_4) - 0 \times (1 - S_3|S_4) \times (S_1|S_2) = 1$$

$$I_4^* = 1 \times (1 - S_1|S_2|S_3) \times S_4 - 0 \times (1 - S_4) \times (S_1|S_2|S_3) = 0$$

$$I_5^* = 1 \times (1 - S_1|S_2|S_3|S_4) \times S_5 - 1 \times (1 - S_5) \times (S_1|S_2|S_3|S_4) = -1$$

$$I_6^* = 1 \times (1 - 0) \times (S_6|S_7) - 0 \times (1 - S_6|S_7) \times 0 = 0$$

$$I_7^* = 1 \times (1 - S_6) \times S_7 - 0 \times (1 - S_7) \times S_6 = 0$$

用新开关函数算出期望节点状态为：

$$I^* = [1110-100] \quad (17)$$

与真实节点状态一致，适用于含DG的有源配电网。

真实节点状态为：

$$I = [1110000] \quad (13)$$

将区段状态带入开关函数得到节点状态的期望值为：

$$I^* = [1110000] \quad (14)$$

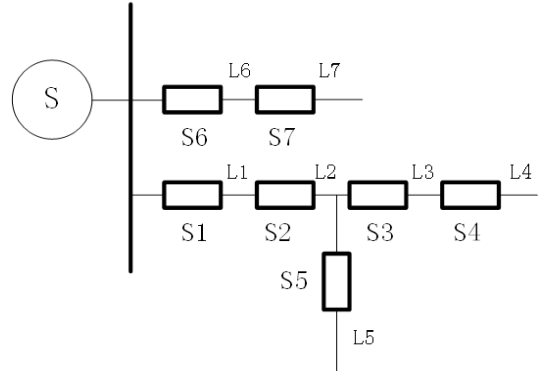


图3 传统配电网模型。

期望值与真实节点状态一致。若以图2的有源配电网模型为例，依然是区段 L_3 发生故障，此时区段表示状态为不变，节点状态期望值不变，但由于DG的接入会给 L_5 区段反向故障电流，此时的真实节点状态为：

$$I = [1110-100] \quad (15)$$

可以发现真实节点状态与期望值不符，需要采用针对有源配电网的开关函数进行研究如下：

3.3. 评价函数

FTU监测到的故障信息与节点状态期望值的差值为评价函数即适应度函数。评价函数的值反映了二者的相似程度

也代表了整个算法的精确度、故障定位的精确度,是智能算法定位配电网故障的核心[9],其公式依据开关函数构造如下:

$$F_{\min}(s) = \omega \sum_{j=1}^M |S_i| + \sum_{j=1}^M |I_j - I_j^*| \quad (18)$$

其中 $F_{\min}(s)$ 代表最优解, ω 是一个范围在[0,1]间的权重系数, M 为配电网中开关节点总数, S_i 为第 i 段线路的分布式电源接入情况, I_j 为真实节点状态, I_j^* 为期望节点状态。“最小集”思想是整个过程的基础理论,即在故障定位的过程中,如果相似程度不同的不同解,总是选择故障设备数量最少情况[20]。

4. 配电网故障定位HHO

HHO是一种针对连续问题而提出的优化算法,而配电网故障定位是二进制的离散问题,因此需要将原始HHO转化为BHHO才可以应用于故障定位的问题研究中。

4.1. 算法初始化

由于个体变化为二进制表示,规定 $ub=1$, $lb=0$,初始化种群得到个体表示为 $X_i(0)=[x_{i1}(0), x_{i2}(0), \dots, x_{in}(0)] \in \{0,1\}^n$, $1 \leq i \leq N$ 。

$$x_{ij}(0) = \begin{cases} 0 & \text{if } r < 0.5 \\ 1 & \text{else} \end{cases} \quad (19)$$

N 为种群个体数, r 为[0,1]间随机实数在得到新的个体后计算其适应度以找到当前最优个体。

4.2. 探索阶段

仍分为全局搜索和局部围猎两种状态,其状态取决于猎物逃逸能量 E 的取值,当 $|E| \geq 1$ 且 $r < 0.5$ 时,将由当前个体位置分量 $x_{ij}(t)$ 与种群中随机选取的个体分量 $x_R(t)$ 共同决定。

$$x_{ij}(t+1) = \begin{cases} x_{ij}(t) \bullet x_{R1}(t) & r < 0.5 \\ x_{R2}(t) \bullet x_{R3}(t) & \text{else} \end{cases} \quad (20)$$

4.3. 开发阶段

开发阶段与前文攻击阶段的流程一致,具体的运行流程为:

当 $|E| \geq 0.5$ 且 $r \geq 0.5$ 时,采用柔和围攻,其表达式为:

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) \oplus x_{Rj}(t) \quad (21)$$

当 $|E| \leq 0.5$ 且 $r \geq 0.5$ 时,采用猛烈围攻,其表达式为:

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) \oplus x_{Bj}(t) \quad (22)$$

其中 $x_{Bj}(t)$ 为种群随机选取个体分量汇中的最优值。

当 $|E| \geq 0.5$ 且 $r < 0.5$ 时,采用渐进式快速俯冲柔和围攻,其表达式为:

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + x_{Rj}(t) \quad (23)$$

当 $|E| < 0.5$ 且 $r < 0.5$ 时,采用渐进式快速俯冲猛烈围攻,其表达式为:

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + x_{Bj}(t) \quad (24)$$

5. 算例仿真

为了验证应用哈里斯鹰算法能更好的提高故障定位的精确性和稳定性,将遗传算法、粒子群算法和哈里斯鹰算法同时应用于含DG的IEEE-33节点配电网。在MATLAB2021a的操作环境下进行实验,

计算机处理器系统为Intel(R)Core(TM)i5-6300HQ, CPU2.30 GHz, 内存8.00G, Windows10操作系统,其中S1~S33为装有FTU的监测节点, L1~L33为馈线区间段, DG1~DG3为分布式电源, 种群数: 50, 最大迭代数: 50, ω 取0.5仿真结果如表1:

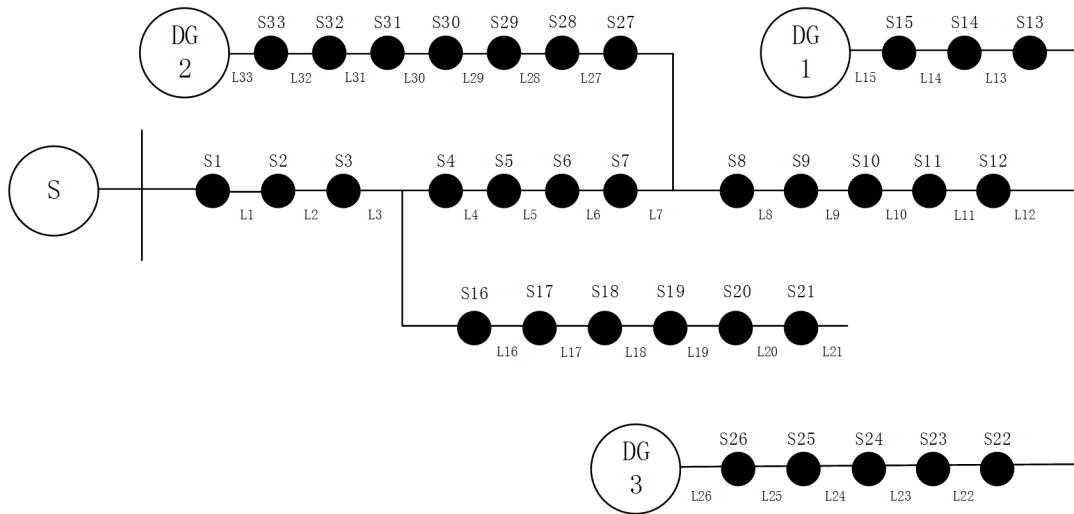


图4 含多DG的IEEE-33节点配电网拓扑图。

运行算法得到的结果为 [0000000100000000000000100000000000]，可以精确无误的定位到故障区段为 L_8 、 L_{23} ，再运行GA和PSO算法得到曲线对比如图8所示，可以看出在复杂情况下3种算法都陷入最优麻烦，但BHHO在14代时最先找到了最优解。通过仿真对比实验我们可以看出HHO的计算能力和速度比较优秀。

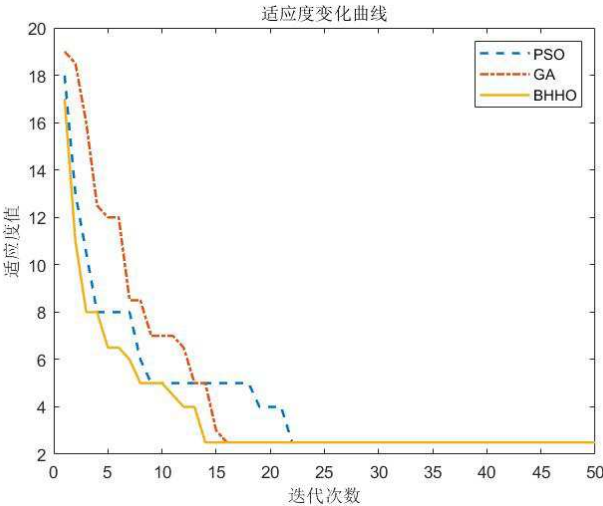


图8 多点有信息畸变故障曲线对比。

6. 结论

电能与人类的生活息息相关、不可或缺，配电网安全问题则是保障民生、发展经济的一座大闸。通过应用HHO算法对含DG的IEEE-33节点配电网在多种不同情况下进行仿真模拟和实验分析，最终得出了HHO算法比传统的GA、HSO算法在故障定位方面抗扰性强且速度更快的结论。可以为实际解决含源配电网的故障定位问题提供参考与思路。同时文本的研究还存在着可以继续深入探究的方面，本文所建立的配电网模型是在一个无扰动的理想化环境中，若是直接应用于实际电网中肯定会存在误差；故障定位是依据分段开关上的监测装置来进行的，如何在即满足精确性、快速性的同时又可以具有较高的经济性；BHHO在面对多点信息畸变时虽然表现仍强于传统算法，但仍多次陷入局部最优，这也正是哈里斯鹰算法的一个不足，仍具有改进空间。

致谢

本文为国家自然科学基金一般项目（61601212，71771111）；辽宁省教育厅辽宁省高等学校基本科研项目（LJ2017QL012）；辽宁工程技术大学博士启动基金项目（14-1102）。

参考文献

[1] 张朝平. 馈线自动化模式的研究与实现 [D]. 湖南大学. 2005. (Zhang Chaoping. Research and implementation of feeder automation mode [D] Hunan University, 2005.)

[2] 刘健, 林涛, 赵江河, 等. 面向供电可靠性的配电自动化系统规划研究 [J]. 电力系统保护与控制. 2014. 42 (11): 52-60. (Liu Jian, Lin Tao, Zhao Jianghe, et al. Research on distribution automation system planning for power supply reliability [J] Power system protection and control 2014. 42 (11): 52-60.)

[3] Hart DG, et al. Automated Solutions for Distribution Feeders [J]. IEEE Computer Applications in Power. 200 0. 13 (4): 25-30.

[4] 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 (05): 52-55. (Du Hongwei, Sun Yaming, Liu Hongjing, et al. Distribution network fault location and isolation based on genetic algorithm [J] Power grid technology, 2000 (05): 52-55.)

[5] 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 (04): 128-131. (Wei Zhinong, He Hua, Zheng Yuping. Advanced genetic algorithm for fault location in distribution network [J] Chinese Journal of electrical engineering, 2002 (04): 128-131.)

[6] 张钊. 配网故障诊断及供电恢复算法研究 [D]. 东南大学, 2005. (Zhang Zhao. Research on distribution network fault diagnosis and power supply restoration algorithm [D] Southeast University, 2005.)

[7] 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 (07): 35-39. (Li Chaowen, He Zhengyou, Zhang Haiping, et al. Fault location of radial distribution network based on binary particle swarm optimization [J] Power system protection and control, 2009, 37 (07): 35-39.)

[8] 裘德玺, 宋哲, 冷磊磊, 等. 基于改进烟花算法的配电网集中式馈线自动化故障定位研究 [J]. 浙江电力, 2021, 40 (09): 99-104. (Qiu Dexi, Song Zhe, Leng Leilei, et al. Research on centralized feeder automation fault location of distribution network based on improved fireworks algorithm [J] Zhejiang electric power, 2021, 40 (09): 99-104.)

[9] 张荣升, 刘丽桑, 宋天文, 等. 基于鲸鱼优化算法的配电网故障区段定位 [J]. 福建工程学院学报, 2021, 19 (04): 378-384. (Zhang Rongsheng, Liu Lisang, Song Tianwen, et al. Distribution network fault section location based on whale optimization algorithm [J] Journal of Fujian Institute of engineering, 2021, 19 (04): 378-384.)

[10] 陈磊, 詹跃东, 田庆生. 基于人工鱼群算法的配电网故障定位 [J]. 电子测量技术, 2018, 41 (23): 1-5. (Chen Lei, Zhan Yuedong, Tian Qingsheng. Distribution network fault location based on artificial fish swarm algorithm [J] Electronic measurement technology, 2018, 41 (23): 1-5.)

[11] 梁有伟, 胡志坚, 陈允平. 分布式发电及其在电力系统中的应用研究综述 [J]. 电网技术, 2003, 27 (12): 71-75. (Liang Youwei, Hu Zhijian, Chen Yunping. Overview of research on distributed generation and its application in power system [J]. power grid technology, 2003, 27 (12): 71-75.)

[12] Ali Asghar Heidari, Seyedali Mirjalili, Hossam Faris, Ibrahim Aljarah, et al. Harris hawks optimization: Algorithm and applications [J]. Future Generation Computer Systems, 2019, 97.

- [13] Bednarz J C. Cooperative hunting in harris'hawks (p arabuteo unicinctus) [J]. Science, 1998, 239 (4847): 1525-1 527.
- [14] 刘骏鹏. 哈里斯鹰算法的改进及应用研究 [D]. 浙江大学, 2021. (Liu Junpeng. Research on improvement and application of Harris Eagle algorithm [D]. Zhejiang University, 2021.)
- [15] 郭雨鑫, 刘升, 高文欣, 等. 多策略改进哈里斯鹰优化算法 [J]. 微电子学与计算机, 2021, 38 (07): 18-24. (Guo Yuxin, Liu Sheng, Gao Wenxin, et al. Multi strategy improved Harris Eagle optimization algorithm [J]. Microelectronics and computer, 2021, 38 (07): 18-24.)
- [16] 王归新, 田中天. 基于分层混合灰狼-哈里斯鹰算法的水火电调度优化 [J]. 电工材料, 2021 (03): 58-62. (Wang Guixin, Tian Zhongtian. Hydro thermal power dispatching optimization based on hierarchical hybrid gray wolf Harris Eagle algorithm [J] Electrical materials, 2021 (03): 58-62.)
- [17] 贾鹤鸣, 康立飞, 孙康健, 等. 哈里斯鹰算法优化脉冲耦合神经网络的图像自动分割 [J]. 应用科技, 2019, 46 (04): 16-20. (Jia Heming, Kang Lifei, Sun Kangjian, et al. Harris Eagle algorithm optimizes pulse coupled neural network for automatic image segmentation [J] Applied science and technology, 2019, 46 (04): 16-20.)
- [18] 吴丁杰, 温立书. 一种基于哈里斯鹰算法改进的BP神经网络 [J]. 网络安全技术与应用, 2022 (01): 38-40. (Wu Dingjie, Wen Lishu. An improved BP neural network based on Harris Eagle algorithm [J] Network security technology and application, 2022 (01): 38-40.)
- [19] 刘迎. 含分布式电源的配电网故障定位研究 [D]. 中国矿业大学, 2017. (Liu Ying. Research on fault location of distribution network with distributed generation [D] China University of mining and technology, 2017.)
- [20] 孙飞洋, 龚涛. 改进免疫网络及其算法在配电网故障定位中的应用 [J]. 现代计算机, 2021, 27 (23): 67-72. (Sun Feiyang, Gong Tao. Application of improved immune network and its algorithm in distribution network fault location [J] Modern computer, 2021, 27 (23): 67-72.)