

基于改进麻雀算法和主动限流的柔性直流配电网 双极短路故障定位方法

焦家俊, 董星星, 童晓阳

(西南交通大学电气工程学院, 四川省 成都市 611756)

A Bipolar Short-circuit Fault Localization Method for Flexible DC Distribution Networks Integrating an Enhanced Sparrow Search Algorithm With Active Current-limiting

JIAO Jiajun, DONG Xingxing, TONG Xiaoyang

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: To enhance the rapid and accurate fault location capability for fault current suppression in existing flexible DC Grid, this paper investigates a back-to-back bipolar flexible DC distribution network. It proposes a fault location method based on an improved Sparrow Search Algorithm (SSA) combined with active current limiting technology, consisting of three stages: pre-location, active fault current limiting, and precise location. In the precise location stage, the improved SSA is introduced to enhance the fault location accuracy and suppress ripple interference. A back-to-back flexible DC distribution network model is constructed in PSCAD/EMTDC. The simulation results show that the average fault location error is less than 0.3% and the maximum error is less than 0.55% under different transition resistances, noise interferences, and signal asynchronization, verifying the effectiveness of the proposed fault location method.

KEY WORDS: flexible DC grid; active current limiting; fault location; improved SSA

摘要: 为了提升现有的柔性直流配电网发生故障后迅速抑制故障电流的快速准确故障定位的能力, 该文以双端背靠背柔性直流配电网为研究对象, 提出一种基于改进麻雀算法和主动限流技术结合的柔性直流配电网双极短路故障定位法, 包括预定位、主动限流、精确定位 3 个阶段。在精确定位阶段引入改进麻雀算法提高故障定位精度, 抑制纹波的干扰。在 PSCAD/EMTDC 搭建双端背靠背柔性直流配电网模型, 仿真实验结果表明, 该故障定位方法在不同过渡电阻、噪声干扰、信号不同步情况下, 故障定位的平均误差小于 0.3%, 最大误差小于 0.5%, 验证了该故障定位方法的有效性。

关键词: 柔性直流配电网; 主动限流; 故障定位; 改进的麻雀算法

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2024.2004

0 引言

当前, 我国电力系统存在用电负荷快速上升、

远距离输电的电损耗大、输电效率低等问题, 柔性直流电网在大规模风光电的汇集、输送和并网中有很好的应用前景^[1-3], 模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)因具有交流侧低谐波、电能质量高等诸多优点成为构建未来新型直流电网的关键技术之一^[4-5]。当直流配电网中输电线路出现故障时在最短时间内对故障定位并采取有效的保护措施, 是保障电网健康运行的重要课题。传统的故障检测和定位方法在柔性直流输电系统中的应用效果并不理想, 存在着故障处理复杂、故障电流危害大、易造成全网大范围停电等问题。

柔性直流配电网故障定位方法由测量原理分为故障分析法、行波法、人工智能法。文献[6]提出利用单端测得的电压和电流, 计算故障位置的过渡电阻值, 用方差最小化原则定位故障, 但极大或极小的过渡电阻影响定位精度。文献[7]提出基于电容电压导数的故障定位法, 在低压直流配电网中定位精度高, 不受过渡电阻影响, 但仅适用于故障初期。文献[8]利用自适应 Volterra 滤波器辨识线路传输特性, 采用反卷积运算重构行波信号, 补偿长距离传输导致的波峰偏移和畸变, 提高了故障定位精度。文献[9]利用线路两端正负极电流故障分量的波形相似度, 实现故障识别和精确定位, 该方法高效, 但是受限于通信条件, 可能影响速动性。针对故障产生的故障电流易对输电系统造成危害的问题, 国内外学者提出不少限流措施, 文献[10]提出在故障发生后, 通过改变换流站的控制策略来限制故障电流, 注入高频反向正弦电流进行故障定位, 但对信号的频率和波形有较高的要求。随着智能优化算法的发展, 其在柔性直流配电网故障定位也有相

应用。文献[11]结合人工蜂群算法和黏菌算法两种智能算法,提高了故障定位的精度和效率,但是该方法存在计算复杂度高、提取信号时间过短的问题。

本文提出了一种基于改进麻雀算法和主动限流技术结合的柔性直流配电网双极短路故障定位法。无需外加限流器,利用全桥型模块化多电平换流器的可控性限制故障电流,建立故障定位方程,采用改进型麻雀算法优化故障定位结果,削弱纹波对定位的影响,提高了故障定位的精度。

1 直流配电网结构及其双极故障特性分析

1.1 典型直流配电网结构

直流配电网采用多类型电源供电,其系统结构和工程实现比交流配电网更加复杂。直流配电网的拓扑结构主要有放射状、环状和双端背靠背的拓扑结构^[12]。因为放射状拓扑结构面临的可靠性、稳定性低、环状拓扑结构发生故障时存在解环问题,双端背靠背拓扑结构不仅可提高电网的整体工作效率,还能减少因故障导致的抢修时间。因此,本文采用两端背靠背拓扑结构作为研究对象,如图1所示。

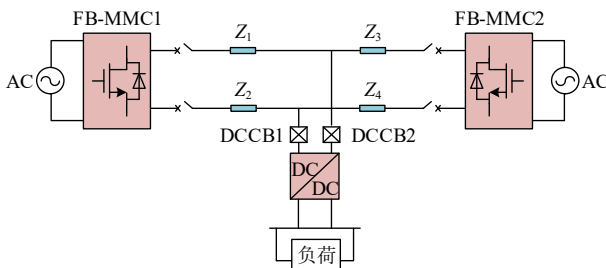


图1 双端背靠背直流配电网示意图

Fig. 1 Back-to-back DC power distribution network

图1中,换流站MMC1、MMC2子模块均采用全桥子模块(full-bridge sub-module, FBSM),接地方式采用直流侧经大电阻接地, Z_1 — Z_2 为输电线路阻抗值。正常工作时MMC1为电压站,为定直流电压和交流测无功控制;MMC2是功率站,定交流测有功功率控制和交流测无功功率控制。电能由FB-MMC1端换流站向FB-MMC2端换流站输送。

换流站端口断路器选择造价较低的机械式直流断路器,虽然它存在灭弧困难和使用寿命较短的问题^[13],但是配合FBSM故障穿越功能,可有效规避这些问题。为了模拟柔性直流配电系统中的负荷功率消耗,本模型在直流线路上配置了DC/DC转换器、负载断路器和直流负载,实现并网运行。

1.2 双极短路故障特性分析

柔性直流线路按故障特性可分为断线故障、

单极接地故障和双极故障。本文以分析双极故障为主。

双极故障的故障电流可分为两部分:子模块电容放电、交流侧电源馈流。电容放电是引发电流变化的核心因素,若发生双极故障时,各子模块仍按常规工作方式运行,每相的上下两个桥臂上都有 N 个子模块处于投入状态,而另外 N 个子模块处于切除状态(假设电平数为 $N+1$)。处于投入状态的子模块电容会向故障点放电,双极故障下MMC子模块闭锁前等效电路如图2所示。

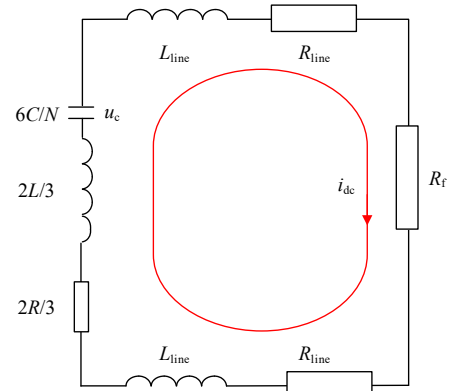


图2 双极短路等效电路图

Fig. 2 Bipolar short-circuit equivalent circuit diagram

双极短路故障由于其故障电流极大,成为最严重的故障类型。为保护换流站内的电力电子设备,在检测到双极故障后会闭锁子模块,导致全网停电。因此,限制故障电流显得尤为重要。本文研究的全桥子模块换流站具备故障电流主动控制能力,能够在故障发生后有效抑制故障电流。

2 基于主动限流的柔性直流配电网双极短路故障定位法

本节以双端对称式柔性直流配电网为研究对象,提出其双极短路故障定位方法。该方案分3个阶段,阶段I:预定位阶段,阶段II:主动限流阶段,阶段III:精确定位阶段。

2.1 阶段I预定位阶段

双极故障后会出现极间电压快速降低、受端换流站端口电流反向流动。阶段I首先根据此故障特性识别双极故障。本文以多点极间电压梯度检测为启动判据,多点极间电压梯度值 $\nabla u(k)$ 如下:

$$\nabla u(k) = \sum_{i=1}^3 u(k+i) - \sum_{j=1}^3 u(k-i) \quad (1)$$

式中: $u(k+i)$ 、 $u(k-i)$ 分别为采样时刻 k 的 i 个周期前后的线电压采样值。

建立启动判据:

$$|\nabla u(k)| > Z \quad (2)$$

式中: Z 为启动整定值。考虑一定的裕度取 5kV 。

当满足启动判据时, 直流断路器立刻跳开, 使故障点两侧 MMC 成为直流输电唯一的电流注入源。工程上直流负载断路器可在 3ms 内开断线路。此时的故障等效电路图如图 3 所示。

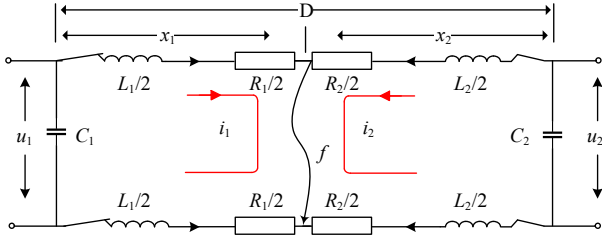


图3 故障等效电路图

Fig. 3 Fault diagram and fault equivalent circuit

图3中: $u_1(t)$ 、 $u_2(t)$ 分别为 MMC1 和 MMC2 端口电压; $i_1(t)$ 、 $i_2(t)$ 分别为 MMC1 和 MMC2 端口电流, f 为故障点。 r 、 l 分别为线路单位长度电阻、电感值, 单位长度电容 c 数值很小, 忽略不计。 x_1 和 x_2 分别为故障点到 MMC1 和 MMC2 端的距离, 有关系式: $L_1 = lx_1$ 、 $L_2 = lx_2$ 、 $R_1 = rx_1$ 、 $R_2 = rx_2$, 线路全长为 $D = x_1 + x_2$, 过渡电阻为 R_f 。电压方程如下:

$$u_1(t) = x_1[i_1(t)r + (di_1(t)/dt)l] + (i_1(t) + i_2(t))R_f \quad (3)$$

$$u_2(t) = x_2[i_2(t)r + (di_2(t)/dt)l] + (i_1(t) + i_2(t))R_f \quad (4)$$

将以上两式相减, 化简得到故障点距离 MMC1 的故障位置 x_1 :

$$x_1 = \frac{u_1(t) - u_2(t) + Dl di_1(t)/dt + Dri_2(t)}{l(di_1(t)/dt + di_2(t)/dt) + r(i_1(t) + i_2(t))} \quad (5)$$

对于式(5), 将电流的微分项替换为差分, 差分的时间间隔为两次采样时间间隔。由于该阶段线路的电流和极间电压变化极为迅速, 采用电流差分计算会导致求解精度下降, 影响定位的准确性。因此, 阶段I的预定位只能提供较粗略的故障定位。

2.2 阶段II主动限流阶段

2.2.1 主动限流控制策略

当进入阶段II, 换流站切换为主动限流模式, 故障电流经过一定时间的调节后, 跟随故障电流参考值 I_{dref} , 其控制框图如图 4 所示。

当进入主动限流模式, 外环控制系统保持不变, 电流环通过比对实时电流 I_{dc} 与故障电流参考值 I_{dref} 。PI 调节后, 与环流抑制器输出指令叠加, 生成最终调制信号 U_{dc} 。该信号经反变换分解为三相调制波, 输入子模块, 进入负投入模式, 实现限流。FBSM 的正常模式、负投入模式分别如附录 A 图

A1、A2 所示, 本阶段只需要主动限流限制故障电流到参考值即可, 故限流可在十几个毫秒内完成。

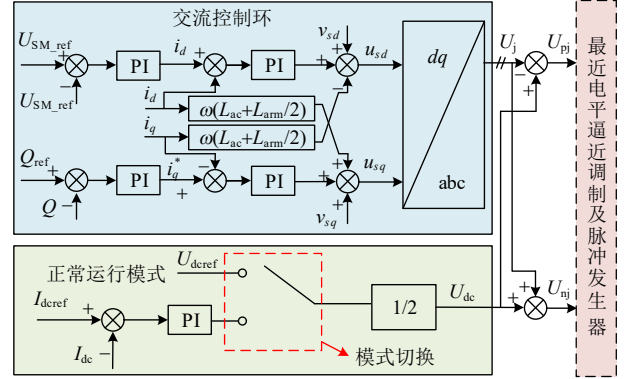


图4 含有主动限流功能的 FB-MMC 控制系统控制框图

Fig. 4 Control block diagram of FB-MMC control system with active current limiting function

2.2.2 故障电流参考值的设定

选取故障电流参考值, 需要考虑换流站电力电子器件的耐受能力、及故障电流和电压信号是否在测量元件的测量范围内^[14]。

为了满足上述需求, 需要对故障电流参考值 I_{dref} 进行限定。换流站关键设备的耐受电流能力仅为额定电流 I_n 的 2 倍左右。 I_{dref} 值不能超过 2 倍的额定电流 I_n 。考虑一定的裕度, 需满足:

$$I_{dref} < 1.75I_n \quad (6)$$

同时为保证电压测量准确, 必须使输电线路的实际电压大于测量元件所能测量的最小电压, 且小于出口处两极可承受的最大电压 U_{max} 和电压互感器的量程 U_{dcn} 。

设两级故障电压参考值 U_{dref} , 它需要满足:

$$\begin{cases} 0.1U_{dcn} < U_{dref} < \min(U_{dcn}, U_{max}) \\ I_{dref} = U_{dref} / (R_{line} + R_f) \end{cases} \quad (7)$$

式中: R_{line} 为线路始端到故障点的电阻, 由单位长度电阻与 x_1 相乘得到; R_f 是故障点的过渡电阻。

将阶段I求解的故障点距离 x_1 代入式(5), 得到过渡电阻 R_f 的计算公式, 如下:

$$R_f = \frac{u_1(t) - x_1[i_1(t)r + l(di_1(t)/dt)]}{i_1(t) + i_2(t)} \quad (8)$$

综合利用式(6)(7)对 I_{dref} 的限制, 取它们的中间值, 得到故障电流参考值 I_{dref} :

$$I_{dref} = \frac{0.1U_{dcn}}{R_f + R_{line}} + \min\left(\frac{U_{dcn}}{R_f + R_{line}}, \frac{U_{max}}{R_f + R_{line}}, 1.75I_n\right) \quad (9)$$

对于故障点距离换流站端口很近且 R_f 极小的情况, 可能会导致式(10)发生:

$$\frac{0.1U_{\text{dcn}}}{R_f + R_{\text{line}}} > \min\left(\frac{U_{\text{dcn}}}{R_f + R_{\text{line}}}, 1.75I_n, \frac{U_{\text{max}}}{R_f + R_{\text{line}}}\right) \quad (10)$$

此时, I_{dcref} 取 $1.75I_n$ 。

2.3 阶段Ⅲ精确定位阶段

当检测到故障电流实际值约等于故障电流参考值时, 阶段Ⅱ结束, 进入阶段Ⅲ, 开始精确定位。

由于达到稳态时注入线路的信号为直流信号, 在阶段Ⅲ故障定位时将式(5)中微分项 $di_1(t)/dt$ 、 $di_2(t)/dt$ 消去, 式(5)改写为

$$x_1 = \frac{u_1(t) - u_2(t) + Dri_2(t)}{r(i_1(t) + i_2(t))} \quad (11)$$

由于 MMC 中每个子模块独立运行, 能量在直流侧和交流侧之间的传输并不均匀, 容易导致子模块电容电压的二倍频和低频分量增大, 产生纹波, 进而使得直流网侧电流和电压出现高频振荡。

根据附录 B 表 B1 参数搭建图 1 所示的柔性直流配电网仿真模型, 获得电流和电压仿真波形, 如附录 A 图 A3、A4 所示, 对它放大, 可看到波形中存在纹波。由文献可知, 纹波会影响故障定位精度。虽然可依靠调整换流站控制策略、设计子模块等加以抑制, 但无法消除纹波。本文设置 1.5s 时距 MMC1 端口 5km 处发生双极故障, 1.55s 后开启限流模式, 根据式(11), 每个采样点计算故障位置, 发现某些时刻计算位置与实际距离 5km 有较大的偏差, 计算结果如附录 A 图 A5 所示, 它由纹波造成。

为削弱纹波的影响, 本文采用改进麻雀算法对定位结果优化。为寻找适应度最高的定位值, 即精确的故障位置, 将式(11)改写成适应度函数, 如下:

$$f(x_1) = u_1(t) - u_2(t) + r(D - x_1)i_2(t) - x_1r i_1(t) \quad (12)$$

当适应度函数值接近于 0 时, 得到的 x_1 越精确。本文采用最小化目标函数的平方值作为寻找最优解的函数值, 寻优问题变成如下:

$$\min f(x_1)^2 \quad (13)$$

最优解 $x_{1(\text{opt})}$ 就是目标函数式(13)对应的解。

当精确定位完成, I_{dcref} 值切换为 0, 当两侧换流站端口电流值均检测为 0 时, 机械开关断开线路。

故障定位方案的流程图如附录 A 图 A6 所示。

3 改进麻雀搜索算法的原理

3.1 传统麻雀搜索算法

为提高故障定位精度, 阶段Ⅲ研究改进麻雀算法优化。麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)是薛建凯在 2020 年提出的一种全新智能优化算法^[15-19], 模拟麻雀觅食过程, 基本步骤如下:

1) 初始化种群和适应度评估: 假设在一个 d 维空间内存在 n 只麻雀, 将其用一个 $n \times d$ 矩阵描述为 $\mathbf{X}_j = (x_{1,1}, x_{1,2}, \dots, x_{n,d})$, $\mathbf{X}_j$ 为第 j 只麻雀的位置, $j=1, 2, \dots, n$; d 为数组的维数。将各麻雀所在位置带入适应度函数, 计算每个麻雀个体的适应度, 并进行排序。

2) 发现者和加入者更新: 在计算适应度后, 将麻雀群体中高适应度个体作为发现者, 其余为加入者。发现者根据其适应度和其他发现者位置更新自身位置, 加入者根据群体最佳位置更新其位置。

发现者 i 第 t 轮的位置更新公式如下:

$$\mathbf{X}_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} \mathbf{X}_{i,j}^t \exp\left(-\frac{i}{an_{\text{itermax}}}\right), & R_2 < \tau \\ \mathbf{X}_{i,j}^t + QL, & R_2 \geq \tau \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\mathbf{X}_{i,j}^{t+1}$ 、 $\mathbf{X}_{i,j}^t$ 分别是发现者 i 在第 j 维第 $t+1$ 轮、第 t 轮的位置矩阵; a 为(0,1]的一个随机数; n_{itermax} 是最大迭代次数; R_2 为预警值; τ 为安全值^[18], R_2 、 τ 均为(0, 1)之间的随机数; Q 是正态分布的随机数; L 为内部元素均为 1 的 $1 \times d$ 的矩阵。

加入者 i 的位置更新公式如下:

$$\mathbf{X}_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} Q \exp\left(\frac{\mathbf{X}_{\text{worst}} - \mathbf{X}_{i,j}^t}{i^2}\right), & i > n/2 \\ \mathbf{X}_p^{t+1} + \left|\mathbf{X}_{i,j}^t - \mathbf{X}_p^{t+1}\right| \mathbf{A}^+ \mathbf{L}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\mathbf{X}_p$ 是目前发现者的最优位置; $\mathbf{X}_{\text{worst}}$ 是发现者当前全局最差的位置; $\mathbf{A}$ 是元素值为 1 或 -1 的矩阵, $\mathbf{A}^+ = \mathbf{A}^T(\mathbf{A}\mathbf{A}^T)^{-1}$ 。

当 $i > n/2$ 时, 表明适应度较低的麻雀没有寻找到食物, 需要前往它处觅食。

3) 警戒模式: 每次迭代时从种群中随机选取 10%~20% 麻雀担当警戒者, 一旦检测到威胁, 将调整其位置逃避捕食者的追捕, 警戒者位置更新公式:

$$\mathbf{X}_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} \mathbf{X}_{\text{best}}^t + \beta |\mathbf{X}_{i,j}^t - \mathbf{X}_{\text{best}}^t|, & f_i > f_g \\ \mathbf{X}_{i,j}^t + K \frac{|\mathbf{X}_{i,j}^t - \mathbf{X}_{\text{worst}}^t|}{f_i - f_w + \rho}, & f_i = f_g \end{cases} \quad (16)$$

式中: β 为标准正态分布随机数; K 是[-1,1]的随机数; f_i 为当前麻雀个体适应度值; f_g 为全局最优适应度值; f_w 为全局最差适应度值; $\mathbf{X}_{\text{best}}^t$ 为 t 次迭代下警戒者最优麻雀个体位置; $\mathbf{X}_{\text{worst}}^t$ 为 t 次迭代下警戒者最差麻雀个体位置; ρ 是一个极小值。

当 $f_i > f_g$ 时, 麻雀易受天敌攻击; 当 $f_i = f_g$, 麻雀意识到危险向其他麻雀靠近。

4) 更新和迭代: 在算法每一轮循环中, 不断重复评估当前适应度值, 在求解时利用式(13)(14)(15), 不断改变各麻雀的位置, 使其始终位于更接近最优解的区域。直到迭代次数达到预设的最大迭代次数, 算法运行停止输出最优解。

3.2 改进的麻雀搜索算法

3.2.1 正余弦调制映射初始化种群平均分布

麻雀算法采用随机方式生成初始种群, 可能导致种群分布不均, 影响多样性和收敛性。文献[15]采用 Circle 混沌映射进行初始化种群, 如下:

$$X_{n+1} = \text{mod}(X_n + 0.2 - \frac{0.5}{2\pi} \sin(2\pi X_n), 1) \quad (17)$$

式中: mod 为取模运算, 将第 1 项映射值映射到 [0,1]。

该方法的初始化种群分布图如附录 A 中图 A7 所示, 由图 A7 可看到仍存在映射不均匀的问题。

为此, 本文引入正余弦调制映射进行初始化种群, 正余弦调制函数如下:

$$X_{n+1} = \text{mod}(X_n - \alpha \sin(\beta X_n) + \varepsilon \cos(\eta X_n^2), 1) \quad (18)$$

式中: n 为种群个数; α 、 β 分别为正弦项的幅度、频率的控制参数; ε 、 η 分别为余弦项的幅度、频率的控制参数。

利用正弦函数和高次余弦函数作为非线性项, 产生混沌。在理论上较大的种群规模需要较小的扰动幅度和较低的频率, 以保持种群分布的平滑性; 较小的种群规模则相反。余弦项控制参数应与正弦控制参数保持一定的关联性, 共同增强种群分布的均匀性和多样性。各参数公式如下:

$$\alpha = \frac{b-a}{n}, \quad \beta = \frac{\pi}{b-a}, \quad \varepsilon = 0.5\alpha, \quad \eta = 2\beta \quad (19)$$

式中: $b-a$ 为搜索空间宽度。

本方法初始化种群的分布图如附录 A 图 A8 所示。将图 A7 和图 A8 进行对比, 发现正余弦调制初始化种群分布更均匀。采用此改进策略, 可增强种群的多样性, 进而增强算法的寻优能力。

3.2.2 动态调整安全值策略

算法中 τ 是随机阈值, 用于判断当前麻雀位置是否安全。为避免陷入局部最优, 提升全局搜索能力, 本文改进算法, 加入动态调整策略: 在每次迭代开始时, 根据上一次迭代的最佳适应度 X_{best}^{t-1} 与当前最佳适应度 X_{best}^t 的差值动态调整 τ 。差值 Δf :

$$\Delta f = X_{\text{best}}^{t-1} - X_{\text{best}}^t \quad (20)$$

根据 Δf 的正负调整 τ , 调整麻雀的搜索范围, 调整策略如下:

$$\tau = \begin{cases} \tau + \partial & , \quad \Delta f > 0 \\ \tau - \partial & , \quad \Delta f \leq 0 \end{cases} \quad (21)$$

式中: ∂ 为调节系数, $\partial = 1/t$, t 是当前的迭代次数。

如果适应度有所改善, 增加 τ ; 否则, 减少 τ 。通过增减安全阈值 τ 控制搜索的保守性或进取性。随着迭代次数增多, 调节系数 ∂ 逐渐减小, 使算法在后期更加稳定, 避免搜索过度集中。

同时, 为防止参数越界, τ 值需要满足在 [0,1]。

当 τ 等于 1 时, 即使适应度有所改善也不会增加 τ 值。当 τ 等于 0 时, 适应度没有改善或变差, 也不会增加 τ 值。

改进麻雀搜索算法流程图如附录 A 图 A9 所示。

4 仿真实验

4.1 故障定位验证

为验证本文所提出故障定位法的有效性, 采用 PSCAD/EMTDC 搭建如图 1 所示柔性直流电网的仿真模型。仿真系统具体参数详见附录 B 表 B1。

设系统 1.5s 时发生双极短路故障, 故障位置距 MMC1 端口 10km, 过渡电阻 50Ω。

当满足启动判据后, 提取故障电流与电压信号, 带入式(8), 粗略求解得到故障点的过渡电阻 R_f 为 48.9461Ω, 跳开直流断路器, 双端换流站成为故障信号唯一的注入源。考虑直流断路器的开断时间和裕度, 阶段 I 持续 5ms; 1.505s 时阶段 II 开始, 根据限制条件公式, 得到 MMC1 端 $I_{\text{dcref}1} = 1.1 I_{n1} = 0.82\text{kA}$, MMC2 端 $I_{\text{dcref}2} = 1.1 I_{n2} = 0.65\text{kA}$, 均不会损坏换流站器件和两极绝缘性能, 也在测量范围内。随后换流站切换为主动限流模式, 1.53s 时实际电流约等于故障电流参考值时, 阶段 II 结束, 阶段 III 开启, 1.575s 进行精确定位, 再采用麻雀算法进行优化。

故障定位完成后, 切换故障电流参考值为 0kA。当 1.585s 时, 两侧换流站端口电流值均检测为 0, 跳开机械开关, 进而断开线路, 完成故障隔离。

故障定位相对误差 $E\%$ 为

$$E\% = \frac{|x_1 - x_{\text{real}}|}{D} \times 100 \quad (22)$$

式中: x_1 为求解出的故障定位距离; x_{real} 是实际的故障位置; D 为输电线路全长。

端口电流和极间电压的仿真结果如图 5 和图 6 所示。由三阶段定位求得的故障位置 $x_1 = 10.0755\text{ km}$, 定位误差较小。

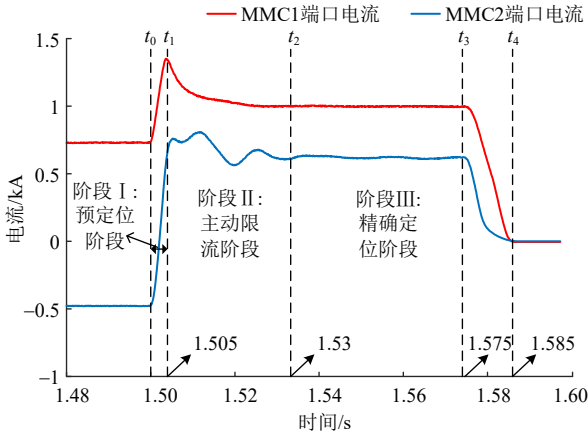


图5 故障电流仿真结果

Fig. 5 Fault current simulation results diagram

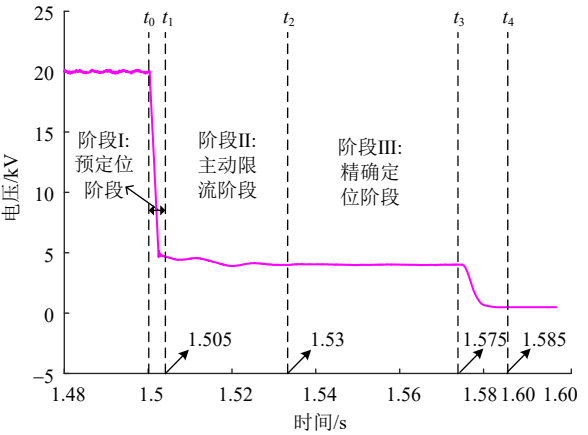


图6 故障电压仿真结果

Fig. 6 Fault voltage simulation results diagram

4.2 不同故障距离和过渡电阻的影响验证

在图1双端背靠背配电网柔性直流配电网模型中，分别在直流输电线路1、5、10、15、19km处设置双极短路故障进行实验。阶段II暂态阶段的定位结果如附录B表B2所示，阶段III的故障定位结果如表1所示。

表1 阶段III的故障定位结果				
Table 1 Results of fault location in stage III				
预设位置/km	过渡电阻/ Ω	求解距离/km	相对误差/%	误差精度/m
1	0.01	0.9876	0.062	12.4
	50	1.0567	0.2835	56.7
	100	1.0091	0.0455	9.1
5	0.01	5.0033	0.0165	3.3
	50	4.9798	0.101	20.2
	100	4.9863	0.0685	13.7
10	0.01	10.0461	0.2305	46.1
	50	10.0755	0.3775	75.5
	100	9.9894	0.063	12.6
15	0.01	14.9677	0.1615	32.3
	50	15.0207	0.1035	20.7
	100	15.0488	0.244	48.8
19	0.01	19.0874	0.437	87.4
	50	19.0046	0.023	4.6
	100	19.007	0.035	7.0

为了分析故障距离对定位精度的影响，本文采用相对误差、误差精度等作为评价指标。从表1可看到，由表1求得的平均定位误差为0.2387%，最大误差不超过0.5%，误差精度在3.3~80m之间。

由故障位置公式(5)，可看到在理论上故障位置的求解不含过渡电阻，即不受过渡电阻的影响。从表1看到，随着过渡电阻的增加，定位误差精度没有明显的变化，从而验证了本文的故障定位不受故障位置、过渡电阻的影响。

针对表1的实验数据，又统计多个定位指标，包括相对误差的平均值、标准差、方差、波动性(最大值-最小值)，如附录B表B3所示。由表B3可看到，故障定位相对误差平均值0.245%~0.256%，标准差为0.010%~0.013%，波动性为0.05%~0.06%。

表1和表B3的实验结果表明，不同故障距离下本算法的定位精度未呈现出显著变化，说明定位精度对故障距离的依赖性较弱，所提算法在不同故障距离、过渡电阻下的表现良好。

4.3 干扰信号与不同步的验证

给电流和电压信号叠加信噪比为25dB白噪声进行仿真验证。得到故障定位平均误差约为1.2%，最大误差约为1.5%。在加入噪声后，定位误差仍然在可接受范围内。验证了所提算法具有一定的抗噪声干扰能力。

现有直流配电网换流站之间一般采用光纤通信，只有极少数的复杂环网采用人造卫星的通信模式。单模光纤的传播延迟大约为几毫秒。为了验证本方法抗通信误差的能力，在仿真中设置送端换流站与受端换流站之间的信号延迟为5ms。得到故障定位平均误差为0.22%。最大误差为0.5030%。加入各类干扰前后的定位结果对比如表2所示。

表2 加入各类干扰前后的定位结果对比			
Table 2 Comparison of location results before and after various types of interferences			
误差	原信号	25dB 噪声	双端信息 5ms 延迟
最大误差	0.5030	1.5801	0.5899
平均误差	0.2387	1.2603	0.4231

从表2可看到本算法的故障定位误差总体上没有明显变化。由于本文选择的用于故障定位的信号为直流信号，即使信息不同步，由于直流信号本身变化不大，对定位结果没有明显的影响。

4.4 与其他定位方法对比

将本文所提方法与文献[20]的改进注入法、文献[21]的解析法、文献[11]的主动限流为正弦信号的定位方法进行对比，如表3所示。

表 3 与已有定位方法的对比
Table 3 Comparison of methods with other references

方法	最大误差	平均误差	定位时间/ms
正弦信号 ^[10]	0.578	0.2988	20
注入法 ^[20]	0.382	0.133	16
解析法 ^[21]	0.354	0.2213	5
本文方法	0.503	0.2387	75

从表 3 可看出,所提故障定位方法的定位误差与改进注入法和解析法相当。与改进注入法相比,本方法无需附加设备注入信号;与解析法相比,避免了对较高精度的采样频率和复杂微分处理的依赖;与文献[11]基于主动限流的故障定位方法相比,本文的故障定位精度更高,对主动限流过程中信号的频率和形状没有较高要求,控制策略相对简单。在实际应用中,本文故障电流主动控制方法在设备和操作限制方面比文献[11]的方法更易实现。从定位时间来看,文献[14]指出为防止故障危害,直流输电一般需要在数十毫秒内完成定位和保护动作。文献[22]的定位时间为 40ms。本文方法的定位时间长于文献[22]和表 3 的其他 3 种定位方法,因为本方法采用了限流措施,在故障发生后通过限制故障电流保护电力系统核心设备,适当延长了故障定位时间。经过仿真验证,本方法在 90ms 内完成精确定位,具有快速定位的能力,能够满足故障发生时及时定位的需求。

此外,将本文方法与文献[11]基于人工蜂群黏菌算法、文献[23]基于遗传算法的故障定位方法进行了对比分析,对比结果详见附录 B 表 B4。表 B4 的对比结果表明本方法的定位误差较小。

4.5 不同寻优算法的对比分析

为验证本文的改进麻雀算法(upgraded sparrow search algorithm, UP-SSA)的定位寻优优势,选择遗传退火(GA)算法、粒子群优化算法(PSO)、麻雀搜索算法(SSA)进行对比实验。统一设置最大迭代次数为 500 次,种群个体数量为 1000。不同优化算法定位结果对比如表 4 所示。

表 4 不同优化算法的定位结果对比
Table 4 Comparison of data positioning results processed by different algorithms

评价指标	最大误差/%	平均误差/%	平均误差精度/m
GA	0.978	0.7273	127.4
PSO	0.8659	0.6273	96
SSA	1.156	0.5578	86.5
UP-SSA	0.38	0.273	40.1

由表 4 可见,改进麻雀算法(UP-SSA)相比于未改进算法(SSA),平均误差由 0.5578%降低至 0.2730%,最大误差由 1.156%降低至 0.380%,误差

的波动性显著减小。同时,改进麻雀算法的平均误差精度为 40.1m,比改进前提升了 45.4m。不同优化算法收敛情况的对比如图 7 所示。

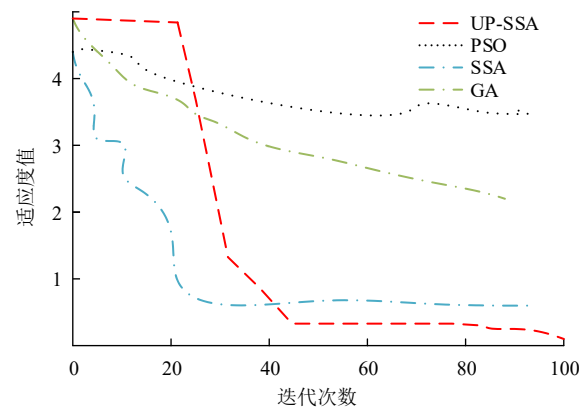


图 7 不同优化算法收敛情况的对比

Fig. 7 Comparison of the convergence performance of different algorithms.

由图 7 可见,PSO 和 GA 需要更多迭代次数逐渐接近最优解,其收敛速度较慢,不满足故障定位准确性要求。SSA 在迭代 20 次后目标函数适应度值迅速降低,然后保持这一水平,体现其快速收敛能力。虽然本文的 UP-SSA 的前期收敛能力不如 SSA,需要 40 次迭代才找到较优解,但是 UP-SSA 在收敛后得到的最优解的质量比 SSA 更高。

5 结论

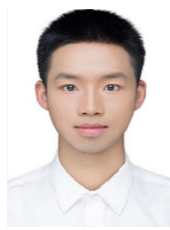
本文提出一种基于改进麻雀算法和主动限流技术结合的柔性直流配电网双极短路故障定位法。建立柔性直流配电网双极短路故障数学模型,确定故障定位方程。所提故障定位方法在抑制故障电流方面具有显著效果。采用改进麻雀算法优化定位结果,将故障定位问题转化为求取适应度函数最小值问题,能够提高确定故障定位精度,消除了纹波对定位的影响,具有较强的抗干扰能力。今后针对输电线路受到外部干扰而发生参数变化影响故障定位的情况,需要做进一步的研究。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

参考文献

- [1] 孙玉娇,周勤勇,申洪. 未来中国输电网发展模式的分析与展望[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1929-1935.
SUN Yujiao, ZHOU Qinyong, SHEN Hong. Analysis and prospect on development patterns of China's power transmission network in future[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1929-1935(in Chinese).
- [2] 汤广福,罗湘,魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17.
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC

- and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17(in Chinese).
- [3] 周勤勇. 亚洲电网互联模式探讨[J]. 电网技术, 2017, 41(5): 1491-1497.
ZHOU Qinyong. Discussion on interconnection mode of Asian power grids[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1491-1497(in Chinese).
- [4] 唐欣, 潘一彬, 岳雨霏, 等. MMC 直流侧故障有源限流策略[J]. 电网技术, 2024, 48(3): 1235-1243.
TANG Xin, PAN Yibin, YUE Yufei, et al. Active damping current-limiting strategy for DC faults of modular multilevel converters[J]. Power System Technology, 2024, 48(3): 1235-1243(in Chinese).
- [5] 兰迎春. 基于改进 SSA 优化 WNN 的 HVDC 输电线路故障测距研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2022.
- [6] 高淑萍, 索南加乐, 宋国兵, 等. 基于分布参数模型的直流输电线路故障测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 75-80.
GAO Shuping, SONAM Jiale, SONG Guobing, et al. Fault location method for HVDC transmission lines on the basis of the distributed parameter model[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 75-80(in Chinese).
- [7] JI Haoran, SUN Liangkai, YU Hong, et al. A new method for fault location considering primary/secondary disconnection[C]// Proceedings of the 2021 International Conference on Control Science and Electric Power Systems (CSEPS). Shanghai: IEEE, 2021, 257-261.
- [8] 郭宁明, 李冰, 许勇. 基于非线性系统辨识的长距离直流输电线路色散补偿及故障定位方法[J]. 电网技术, 2025, 49(5): 2147-2155.
GUO Ningming, LI Bing, XU Yong. Dispersion compensation and fault location of long distance HVDC transmission lines based on nonlinear system identification[J]. Power System Technology, 2025, 49(5): 2147-2155(in Chinese).
- [9] 王晓卫, 田影, 林德力, 等. 基于连续变分模态分解的多端柔性直流电网单端量保护方法[J]. 电网技术, 2025, 49(1): 353-365.
WANG Xiaowei, TIAN Ying, LIN Deli, et al. A single-end protection method for multi-terminal flexible DC network based on successive variational mode decomposition[J]. Power System Technology, 2025, 49(1): 353-365(in Chinese).
- [10] 梅军, 张丙天, 朱鹏飞, 等. 基于故障电流主动控制的柔性直流配电网故障定位方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(24): 133-141.
MEI Jun, ZHANG Bingtian, ZHU Pengfei, et al. Fault location method of flexible DC distribution network based on active control of fault current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(24): 133-141(in Chinese).
- [11] 徐岩, 王若琳, 胡紫琪, 等. 基于自适应人工蜂群黏菌算法的直流配电网故障定位的研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(12): 526-532.
XU Yan, WANG Ruolin, HU Ziqi, et al. Research on fault location of DC distribution network based on artificial bee colony slime mould algorithm[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2023, 44(12): 526-532(in Chinese).
- [12] 卢峰宇. 直流配电网故障特性与保护技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2023.
- [13] 程显, 余亚东, 葛国伟, 等. 混合式直流断路器状态感知技术与智慧框架体系探讨[J]. 电网技术, 2024, 48(7): 3033-3042.
CHENG Xian, YU Yadong, GE Guowei, et al. Hybrid DC circuit breaker states sensing technology and its intelligent framework system [J]. Power System Technology, 2024, 48(7): 3033-3042(in Chinese).
- [14] 张丙天. 柔性直流配电网故障定位关键技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2022.
- [15] 宋立钦, 陈文杰, 陈伟海, 等. 基于混合策略的麻雀搜索算法改进及应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(8): 2187-2199.
SONG Liqin, CHEN Wenjie, CHEN Weihai, et al. Improvement and application of hybrid strategy-based sparrow search algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(8): 2187-2199(in Chinese).
- [16] 尹德鑫, 张达敏, 蔡朋宸, 等. 改进的麻雀搜索优化算法及其应用[J]. 计算机工程与科学, 2022, 44(10): 1844-1851.
YIN Dexin, ZHANG Damin, CAI Pengchen, et al. An improved sparrow search optimization algorithm and its application[J]. Computer Engineering & Science, 2022, 44(10): 1844-1851(in Chinese).
- [17] 张琳, 汪廷华, 周慧颖. 一种多策略改进的麻雀搜索算法[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(11): 133-140.
ZHANG Lin, WANG Tinghua, ZHOU Huiying. Multi-Strategy improved sparrow search algorithm[J]. Computer Engineering & Applications, 2022, 58(11): 133-140(in Chinese).
- [18] 刘展程, 王爽, 唐波. 基于 SSA-BiGRU-Attention 模型的变压器油中溶解气体含量预测[J]. 高电压技术, 2022, 48(8): 2972-2981.
LIU Zhancheng, WANG Shuang, TANG Bo. Prediction of dissolved gas content in transformer oil based on SSA-BiGRU-Attention model [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 2972-2981(in Chinese).
- [19] 张亮. 基于多源遥感数据土壤湿度定量反演的研究[D]. 廊坊: 北华航天工业学院, 2023.
- [20] 李冬梅, 胡扬宇, 王利利, 等. 基于改进注入法的直流配电网双端测距故障定位方法[J]. 智慧电力, 2019, 47(12): 110-116.
LI Dongmei, HU Yangyu, WANG Lili, et al. Double-end distance measurement fault location method for DC distribution network based on improved injection method[J]. Smart Power, 2019, 47(12): 110-116(in Chinese).
- [21] 周嘉阳, 李凤婷, 刘渊, 等. 基于直流电抗电压的柔性直流配电网故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(19): 95-101.
ZHOU Jiayang, LI Fengting, LIU Yuan, et al. A fault location method for flexible DC distribution network based on DC reactor voltage[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19): 95-101(in Chinese).
- [22] 赵岩, 王梓毅, 徐天. 基于 BWO 优化 VMD 和 KELM 的柔性直流输电线路短路故障定位方法[J/OL]. 南方电网技术, 2024: 1-11[2024-12-17]<http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.TK.20241028.0855.004.html>.
ZHAO Yan, WANG Ziyi, XU Tian. MMC-HVDC transmission line short-circuit fault location method based on BWO optimized VMD and KELM[J/OL]. Southern Power System Technology, 2024: 1-11 [2024-12-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.TK.20241028.0855.004.html>(in Chinese).
- [23] 徐岩, 刘婧妍, 张诗杭, 等. 基于遗传算法的直流配电网线路故障定位方法[J]. 太阳能学报, 2020, 41(12): 1-8.
XU Yan, LIU Jingyan, ZHANG Shihang, et al. Fault location method based on genetic algorithm for DC distribution network[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2020, 41(12): 1-8(in Chinese).



焦家俊

在线出版日期: 2025-05-20.

收稿日期: 2024-11-13.

作者简介:

焦家俊(2002), 男, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流输电系统保护与控制, E-mail: witqqsy@163.com;

董星星(1992), 男, 博士研究生, 研究方向为输电线路和配电网故障定位和保护, E-mail: dxxwatson@my.swjtu.edu.cn;

童晓阳(1970), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为交直流保护、智能变电站、综合能源优化, E-mail: xytong@swjtu.cn.

(责任编辑 李健一)

附录 A

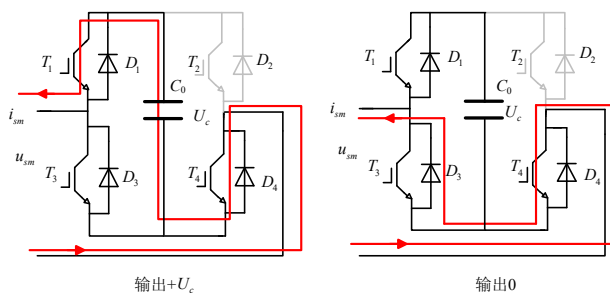


图 A1 FBSM 在配电网正常运行时的工作模式

Fig. A1 Operating mode of FBSM during normal operation of the distribution network

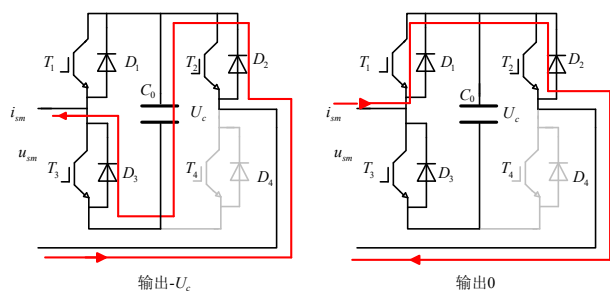


图 A2 故障时部分 FBSM 变换为负投入模式

Fig. A2 Operating Mode when Part of FBSMs Switch to Negative Insertion during Fault Conditions

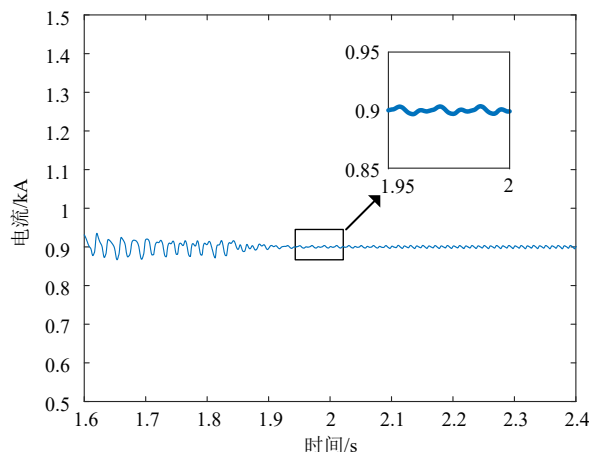


图 A3 MMC1 电流纹波细节展示图

Fig. A3 MMC1 current ripple detail display

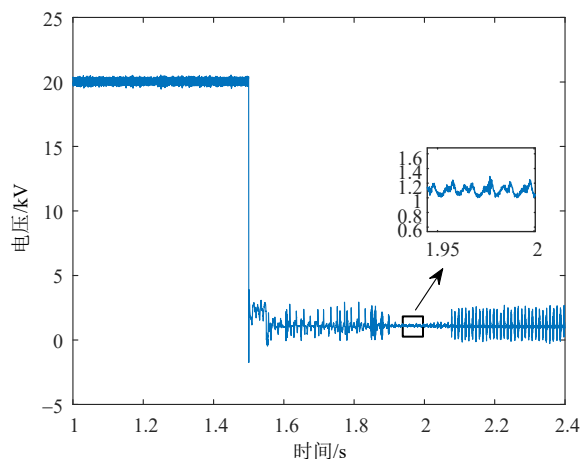


图 A4 极间电压纹波细节展示图

Fig. A4 Detailed diagram of inter-pole voltage ripple

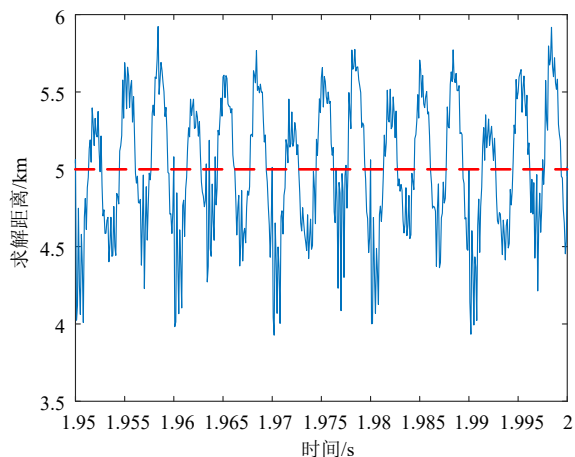


图 A5 未使用优化算法直接计算的故障位置曲线图

Fig. A5 The result plot calculated directly without using an optimization algorithm

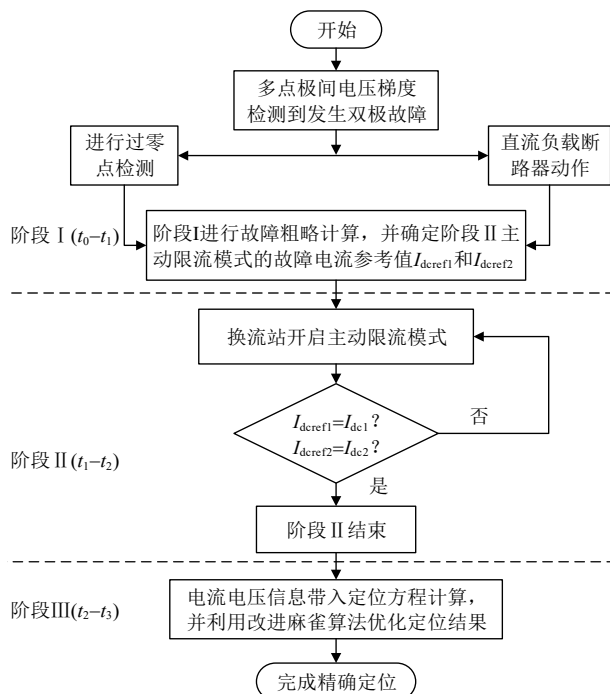


图 A6 故障定位流程图

Fig. A6 Fault location flowchart

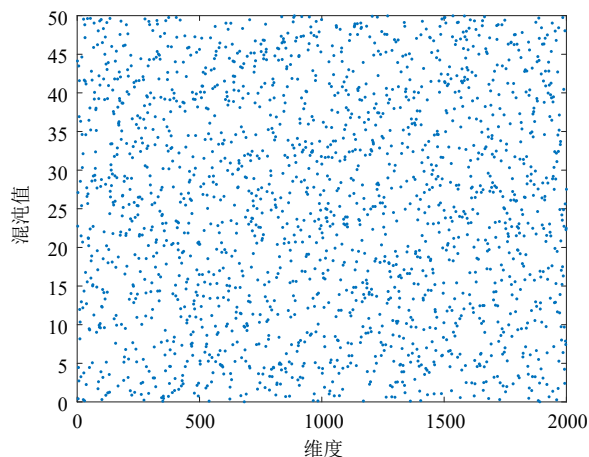


图 A7 未使用正余弦调制映射的初始化种群分布图

Fig. A7 Initial population distribution diagram without using sine-cosine modulation mapping

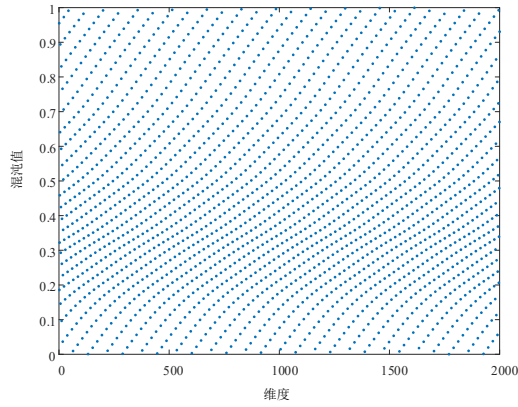


图 A8 使用正余弦调制映射的初始化种群分布图
Fig. A8 Initial population distribution diagram using sine-cosine modulation mapping

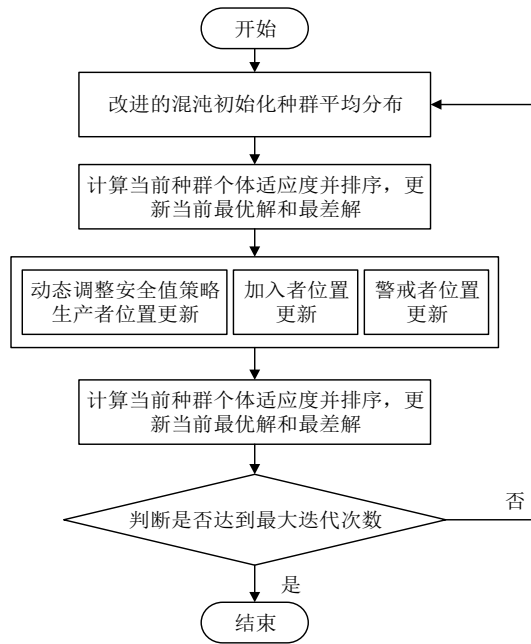


图 A9 改进麻雀算法流程图
Fig. A9 Improved Sparrow Search Algorithm Flowchart
附录 B

表 B1 仿真系统的参数

Table B1 Parameters of the simulated system	
类型	参数
直流电压/kV	±10
MMC1 额定功率/MW	15
MMC2 额定功率/MW	10
桥臂子模块数量	100
子模块电容/uF	2500
桥臂电感/mH	20
直流线路长度/kM	20
每公里等效电阻/ Ω	0.121
每公里等效电感/mH	0.74
每公里等效电容/uF	0.15
过渡电阻范围/ Ω	0~100
采样频率/kHz	10
桥臂上子模块数量	100
过渡电阻范围/ Ω	0~100
电压互感器一次侧量程/kV	35
换流站端口承受最大电压/kV	60

表 B2 阶段II暂态阶段的定位结果

Table B2 Location results of phase II. transient phase					
故障距离/km	过渡电阻/ Ω	求解距离(x_1)/km	误差/km	求解相对误差/%	过渡电阻求解值
1	0	1.4503	0.4503	2.2515	0.1356
	0.01	1.9876	0.9876	4.9380	0.2420
	50	1.7653	0.7653	3.8265	49.8432
	100	0.5661	0.4339	2.1695	91.9119
5	0	5.6953	0.6953	3.4765	0.2404
	0.01	4.3674	0.6326	3.1630	0.1794
	50	4.7183	0.2817	1.4085	50.0332
	100	5.8361	0.8361	4.1805	92.064
10	0	10.5237	0.5237	2.6185	0.1115
	0.01	11.1562	1.1562	5.7810	0.1256
	50	11.3340	1.334	6.6700	49.9402
	100	9.8103	0.1897	0.9485	97.2332
15	0	15.8889	0.8889	4.4445	0.1769
	0.01	13.9987	1.0013	5.0065	0.4222
	50	15.4463	0.4463	2.2315	45.8432
	100	16.0245	1.0245	5.1225	91.9119
19	0	18.4562	0.5438	2.7190	0.1608
	0.01	19.6874	0.6874	3.4370	0.1992
	50	19.3646	0.3646	1.8230	52.332
	100	17.2368	1.7632	8.8160	97.084

表 B3 不同故障位置下定位效果其他指标值

Table B3 The relevant indicators of positioning accuracy under different fault distances				
预设的故障位置/km	相对误差的平均值/%	相对误差的标准差/%	相对误差的方差/%	相对误差的波动性/%
1	0.245	0.010	0.0001	0.05
5	0.256	0.012	0.00014	0.06
10	0.249	0.011	0.00012	0.05
15	0.251	0.013	0.00017	0.06
19	0.253	0.011	0.00012	0.05

表 B4 与其他智能算法故障定位方法的对比

Table B4 Comparison with other intelligent algorithm-based fault location methods			
	人工蜂群黏菌算法	遗传算法	本文方法
平均定位相对误差/%	0.4526	0.2861	0.2387