

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.04.035

# 基于 WOA 优化 SVM 的多电平换流器桥臂故障分类研究

邹洪森<sup>1,3</sup>, 孙璐<sup>1</sup>, 柴斌<sup>2</sup>, 刘虹<sup>2</sup>

(1. 国网宁夏电力有限公司超高压公司, 宁夏 银川 750011;

2. 中电普瑞电力工程有限公司, 北京 102200;

3. 西安电子科技大学 通信工程学院, 陕西 西安 710126)

**摘要:**模块化多电平换流器作为电力设备中不可或缺的机电设备之一,其系统桥臂故障概率会对输出特性造成影响。设计一种基于 WOA 优化 SVM 的多电平换流器桥臂故障分类研究方法。测试确定桥臂故障条件下系统输出特征,并进行桥臂故障分类研究。研究表明:采用 WOA 优化 SVM 算法具有稳定的故障分类,60 次迭代后达到最佳适应值,实现对多电平变换器桥臂故障快速辨识,具备良好稳定性。无论何种数据集下,WOA 优化 SVM 算法的准确率均高于 99.5%,BP 网络与 SVM 都具备更高准确率,均可以获得理想效果,能够有效提高多电平换流器的运行稳定性。

**关键词:**多电平换流器;故障识别;鲸鱼优化算法;支持向量机

**中图分类号:**TM46      **文献标志码:**A      **文章编号:**1671-5276(2026)04-0178-04

## Research on Fault Classification of Multilevel Converter Bridge Arms Based on WOA-Optimized SVM

Zou Hongsen<sup>1,3</sup>, Sun Lu<sup>1</sup>, Chai Bin<sup>2</sup>, Liu Hong<sup>2</sup>

(1. Ultra-high Voltage Company, Ningxia Electric Power Co., Ltd., State Grid, Yinchuan 750011, China;

2. CLP Power Engineering Co., Ltd., Beijing 102200, China;

3. School of Communication Engineering, Xidian University, Xi'an 710126, China)

**Abstract:** As one of the indispensable electromechanical devices in power equipment, the fault probability of the bridge arms in a modular multilevel converter (MMC) system can affect its output characteristics. A research method for fault classification of MMC bridge arms based on WOA-optimized SVM is designed. Tests determine the system output characteristics under bridge arm fault conditions, and fault classification research is conducted. The results show that the WOA-optimized SVM algorithm achieves stable fault classification, reaching the optimal fitness value after 60 iterations, enabling rapid identification of MMC bridge arm faults with good stability. Regardless of the dataset used, the accuracy of the WOA-optimized SVM algorithm exceeds 99.5%, and BP network and SVM have higher accuracy, achieving ideal results and effectively improving the operational stability of multilevel converters.

**Keywords:** multilevel converter; fault identification; whale optimization algorithm; support vector machine

## 0 引言

为了实现在电网系统接入柔性分散能源与多种微型电源,微电网(MG)正逐步得到推广应用<sup>[1-3]</sup>。微电网分为 3 种基本形式,即直流微电网、交流微电网和上述两种组合结构的混合微电网<sup>[4]</sup>。还有学者根据以上电网结构提出了一种基于多台逆变电源并联形式的新型电力系统。

目前,基于数学解析模型、数据分析和机器学习等手段进行控制的方式已成为微电网故障监测的一个重要研究方向。但也需注意,模块化多电

平换流器(modular multilevel converter, MMC)本身结构比较复杂,仅通过理论建模和数值计算的方式很难对其内部故障进行准确判定。以机器学习理论对故障进行监控则具备优异的故障诊断性能。武鸿等<sup>[5]</sup>提出适用于不同运行功率电平调制的 MMC 开路故障诊断策略,所提策略适用于多个子模块(SM)发生故障的情形。王江等<sup>[6]</sup>提出基于桥臂输出电压误差的绝缘栅晶体管开路故障诊断方法,基于误差数据四分位数定位故障位置,所提方法在 20 ms 内准确定位开路故障,具有很好的鲁棒性。刘泽浩等<sup>[7]</sup>在分析 MMC 结构及开路

**基金项目:**国网宁夏电力有限公司科技项目(5229CG22000B)

**第一作者简介:**邹洪森(1982—),男,湖北宜昌人,高级工程师,硕士,研究方向为特高压换流站换流阀专业技术, zouhongsen112585@163.com。

故障特征的基础上,总结不同类型故障诊断方法的优点和不足,指出基于人工智能的诊断方案能够有效提高故障诊断准确率。王鋈鑫等<sup>[8]</sup>提出适用于混合型MMC在不平衡网压下二次谐波电流注入策略,揭示子模块电容电压和桥臂功率波动关系,仿真表明所提策略能够有效地抑制不平衡网压下的电容电压纹波。

本研究建立的桥臂式拓扑系统进行并网控制时均由半桥变换器(HC)导通和关断状态来实现,容易造成系统运行故障。本文重点研究了电网的拓扑结构并通过试验确定了该系统的输出控制性能。针对各个数据集的参数利用本次构建的模型进行故障监测试验,同时将其与其它方法进行比较。

## 1 桥臂故障分类模型

### 1.1 鲸鱼优化算法

鲸鱼优化算法(whale optimization algorithm, WOA)是一种基于单个鲸类捕食行为进行仿真测试的方法,能够获得理想的搜索效果<sup>[9]</sup>。以WOA进行数据处理时,每个解分别对应一个鲸鱼样本,将不同解分别设置为若干鲸鱼个体,根据位置更新后确定满意位置,将其余鲸鱼个体位置表示为 $X(l)$ 。寻优个体位置函数为

$$\begin{cases} X(l+1) = X^*(l) - A_1 |B_1 X^*(l) - X(l)| \\ A_1 = 2\alpha \cdot \lambda - \alpha; B_1 = 2\lambda; \alpha = 2(1 - l/l_{\max}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $l$ 为迭代次数; $l_{\max}$ 为最大迭代总次数; $X(l)$ 为鲸鱼最佳位置向量; $X^*(l)$ 第 $l$ 次迭代种群中适应度最优鲸鱼个体的位置向量; $A_1$ 为收敛控制系数向量; $B_1$ 为权重随机系数向量; $\alpha$ 为线性衰减收敛因子; $\lambda$ 为区间 $[0, 1]$ 内均匀分布的随机数,增加寻优随机性。

进行寻优计算时,为获得最优位置参数,座头鲸同时完成收缩环绕和螺旋过程,模型表达式为

$$X(l+1) = \begin{cases} X^*(l) - A_1 |B_1 X^*(l) - X(l)|, p_1 < 0.5 \\ X^*(l) + C_1 \cdot e^{B_1 q} \cdot \cos(2\pi l), p_1 \geq 0.5 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $p_1$ 为环绕和螺旋移动的概率; $C_1$ 为当前位置相对最优点的间距; $q$ 为在 $[-1, 1]$ 区间中的一个随机值, $e$ 为自然常数。

结合式(2),将 $A_1$ 取值区间设定在 $[-1, 1]$ 。部分鲸鱼个体则并不完全逼近最优位置,而是通过随机形式到达最佳点

$$X(l+1) = X_R(l) - A_1 |B_1 X_R(l) - X(l)| \quad (3)$$

式中 $X_R(l)$ 为随机位置向量。

上述测试结果表明,当 $A_1 > 1$ 时,可通过式(3)随机搜索鲸鱼个体;当 $A_1 \leq 1$ 时,通过 $p_1$ 参数实现鲸鱼个体的螺旋和环绕状态切换,并最终确定最佳坐标点。

### 1.2 优化SVM

为实现支持向量机(support vector machint, SVM)最大分类软间隔,搜寻指定要求的最优超平面,将软间隔SVM分类模型设置为最大目标函数<sup>[10]</sup>。

建立目标函数

$$\begin{cases} \min f(w) = \frac{1}{2} w^T w + c_1 \cdot \sum_{j=1}^m \varepsilon_j; & j = 1, 2, \dots, m \\ \text{s.t. } c_1 \geq 0; & k_j(w^T z_j + b_1) \geq 1 - \varepsilon_j; \quad \varepsilon_j \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $w$ 为超平面法向量; $c_1$ 为SVM惩罚系数,平衡分类间隔大小与分类误差容忍度; $\varepsilon_j$ 为第 $j$ 个样本对应的松弛变量,表征样本偏离理想分类面的误差程度; $k_j$ 为第 $j$ 个样本的类别标签; $z$ 为第 $j$ 个输入样本的特征向量; $b_1$ 为分类超平面的偏置项; $\varepsilon_j$ 为第 $j$ 个样本对应的松弛变量,表征样本偏离理想分类面的误差程度。

计算模型最优值时,设置拉格朗日乘子 $\beta, \mu$ ,并建立 $L$ 算式

$$L(w, b_1, \varepsilon, \beta, \mu) = - \sum_{j=1}^m \beta_j [k_j(w^T z_j + b_1) - 1 + \varepsilon_j] - \sum_{j=1}^m \mu_j \varepsilon_j + \frac{1}{2} w^T w + c_1 \cdot \sum_{j=1}^m \varepsilon_j \quad (5)$$

式中 $\beta_j$ 和 $\mu_j$ 为引入的拉格朗日乘子。

对式(5)中 $w, b$ 进行偏导求解得

$$\begin{cases} c_1 = \beta_j + \mu_j \\ w = \sum_{j=1}^m \beta_j k_j z_j; \quad \sum_{j=1}^m \beta_j k_j = 0 \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5),再根据对偶结构,构建式(7)的约束算式为

$$\begin{cases} \max q(\beta_j) = \max \left[ \sum_{j=1}^m \beta_j - \frac{1}{2} \sum_{j_1=1}^m \sum_{j_2=1}^m \beta_{j_1} k_{j_1} K(z_{j_1}^T z_{j_2}) \right] \\ \text{s.t. } c_1 - \beta_j - \mu_j = 0; \quad \mu_j \geq 0 \\ \text{s.t. } c_1 \geq \beta_j \geq 0; \quad \sum_{j=1}^m \beta_j k_j = 0; \quad j = 1, 2, \dots, m \\ K(z_{j_1}^T \cdot z_{j_2}) = \exp(-\|z_{j_1} - z_{j_2}\|^2 / g^2) \end{cases} \quad (7)$$

### 1.3 故障桥臂诊断

为了实现准确分类,本研究设计了五重杂交

试验方案来确定最优适应度,并利用鲸鱼优化算法对惩罚参数因子  $c_1$  及核指标  $g$  进行修正。具体流程如图1所示。

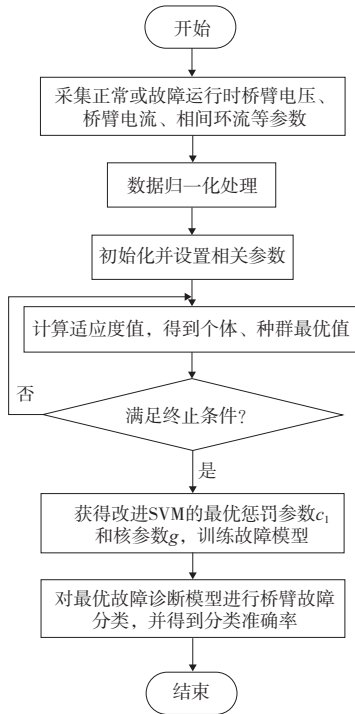


图1 基于WOA优化SVM的桥臂故障分类流程

根据下列步骤开展训练:

1) 测试桥臂电流、电压和三相电流,由此获取故障特征参数。

2) 为了防止受特征数量级影响而不能精确辨识桥臂故障的问题,根据式(8)对原始数据进行线性变换,使其计算结果满足目标范围,由此实现归一化。

$$h^* = \frac{h_j - h_{\min}}{h_{\max} - h_{\min}} \quad (8)$$

式中:  $h_{\min}$ 、 $h_{\max}$  依次对应故障特征属性的上下限;  $h_j$  与  $h^*$  分别为初始参数和归一化计算结果。

3) 初始化模型参数。

4) 获取并确保最优解满足最大个体适应度。

5) 更新  $c$ 、 $g$  后再判断是否达到终止条件;当满足精度要求后则确定最优结果,否则返回步骤4)。

6) 迭代获得最优  $c_1$  和  $g$ ,并计算权重  $w$  和位移项  $b_1$

$$\begin{cases} w = \sum_{j=1}^m \beta_j k_j z_j \\ k_j (w^T \cdot z_j + b_1) - 1 = 0 \end{cases} \quad (9)$$

以  $c_1$ 、 $g$ 、 $w$ 、 $b_1$  参数构建 WOA 优化 SVM 最优故障桥臂诊断模型。

## 2 仿真结果分析

### 2.1 方案设置

本次共采集了一类正常样本和两类故障样本。再根据本研究确定的3类典型采样结果构建数据集,之后利用此数据集对故障桥臂诊断模型进行训练和测试。将训练和测试样本的数量比设定在  $7:3$  [11]。

设定以下参数:  $l_{\max}=100$ ;种群规模 20;  $g$  和  $c_1$  取值区间都是  $[10^{-5}, 1000]$ 。对比特征属性和故障桥臂运行参数 [12],构建样本集  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ 。存在桥臂故障时,将会引起相间环流的大幅变化,此时各组数据集都会形成相间环流。分别为各数据集设置元素类型,形成了数据集  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ ,之后利用  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  数据集测试改进 SVM 模型的处理性能。

### 2.2 运算效果分析

图2为采用 WOA 优化 SVM 算法对数据集  $D_1$  的故障分类结果。对图2进行分析可以发现,故障桥臂分类均未产生错误类别。但由于不具备 C 相桥臂代表性特征,导致有些样品在故障桥臂分类3中被判定为故障桥臂分类1,导致故障桥臂分类1和3的识别率有些不稳定。

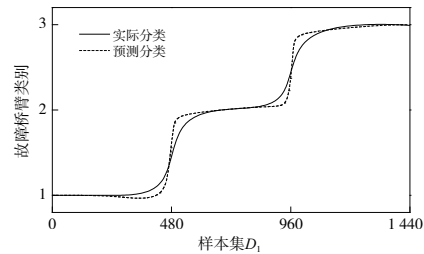


图2 采用WOA优化SVM算法的故障分类( $D_1$ )

图3显示了适应度函数的分布数据。从图3可以看出,经过60次迭代计算后,  $c_1$  值为748.53,核参数  $g_2$  为106.22,此时达到了最佳适应值。以上测试结果显示,采用本文控制策略能够实现对多电平变换器桥臂故障的快速准确辨识,具备良好的稳定性。

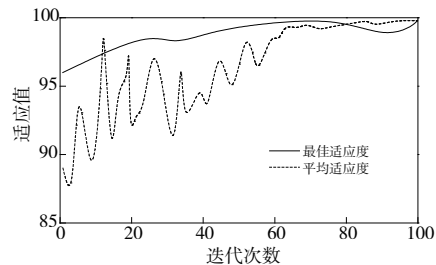


图3 适应度函数分布

### 2.3 对比分析

图4为桥臂故障分类结果,表1为故障分类准确率的统计数据。根据图4与表1可知,采用BP网络和SVM算法分类桥臂故障时准确率分别为90.25%和93.46%,其中,故障桥臂分类1和3产生了错误分类结果。无论何种数据集下,WOA优化SVM算法的准确率均高于99.5%。对 $D_3$ 测试时,WOA优化SVM算法比BP网络与SVM都具备更高准确率。由此表明采用该方法可以获得理想效果。

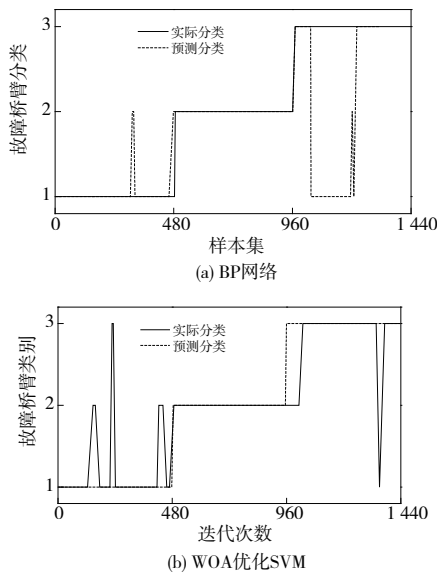


图4 不同算法的桥臂故障分类图

表1 故障分类准确率对比

| 算法         | 数据集   | 准确率/% |
|------------|-------|-------|
| WOA 优化 SVM | $D_1$ | 99.76 |
|            | $D_2$ | 99.91 |
|            | $D_3$ | 99.88 |
| SVM        | $D_3$ | 93.46 |
| BP 网络      | $D_3$ | 90.25 |

### 3 结语

本文开展基于WOA优化SVM的多电平换流器桥臂故障分类研究,取得如下有益结果:

1)采用WOA优化SVM算法具有稳定的故障

分类,60次迭代后达到了最佳适应值,实现对多电平变换器桥臂故障快速辨识,具备良好稳定性。

2)无论何种数据集下,WOA优化SVM算法的准确率均高于99.5%,较BP网络与SVM都具备更高准确率,表明采用该方法可以获得理想效果。

### 参考文献:

- [1] 吴鸣,张楠春,刘海涛,等. 微电网技术标准分析及体系架构研究[J]. 电网技术,2026,50(1):422-433.
- [2] 程启明,程尹曼,张磊,等. 基于干扰观测器的MMC-PET交直流混合微电网并网/离网切换控制策略[J]. 高电压技术,2024,50(3):1196-1204.
- [3] 朱金凤. 微电网:能源未来的隐形冠军[J]. 电气时代,2025(10):1.
- [4] 赖锦木,尹越,尹昕,等. 基于混合变压器互联的交直流微电网多模态协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2025,53(21):15-27.
- [5] 武鸿,王跃,薛英林,等. 适用多功率的最近电平调制下MMC子模块开路故障诊断策略[J]. 电工技术学报,2024,39(1):233-245,302.
- [6] 王江,杨兴武,李颖,等. 基于四分位数的MMC子模块开路故障诊断方法[J]. 电力电子技术,2023,57(9):120-122,132.
- [7] 刘泽浩,肖岚. 模块化多电平变流器IGBT开路故障诊断与定位方法综述[J]. 中国电机工程学报,2024,44(4):1501-1517.
- [8] 王鋈鑫,汪晋安,许建中. 不平衡网压下混合模块化多电平换流器子模块电容过压抑制策略[J]. 现代电力,2023,40(5):853-862.
- [9] 蔡赛男,宋卫星,班利明,等. 基于鲸鱼算法优化LSSVM的滚动轴承故障诊断[J]. 控制与决策,2022,37(1):230-236.
- [10] 王海亮,王兴贵,李锦键,等. 基于改进支持向量机的MMC-MG系统桥臂故障诊断[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(7):1-13.
- [11] 朱雯清,赵西贝,赵成勇. 一种嵌套型MMC拓扑及其直流故障穿越策略[J]. 中国电机工程学报,2023,43(21):8434-8444.
- [12] 赵文强,侍乔明,王永平,等. MMC桥臂电抗器穿墙套管故障特性及保护策略[J]. 电力工程技术,2022,41(4):205-212.

收稿日期:2023-12-20