

500 kV 避雷器受潮条件下内部热点 温度反演方法

彭劲樟¹, 张再华¹, 吴凤亮¹, 刘波^{2,3}, 沈越⁴, 黎鹏⁴, 吴田⁴

(1. 国网湖北省电力有限公司黄石供电公司, 湖北 黄石 435000; 2. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 江苏 南京 211106;
3. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 湖北 武汉 430074; 4. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 准确预测避雷器内部热点温度, 可有效提升避雷器受潮故障的检查效果。为此, 提出基于表面温度和 SVM 的 500 kV 氧化锌避雷器内部热点温度反演检测方法, 以避雷器表面温度和风速作为输入量, 实现避雷器内部热点温度的反演。为提高模型预测的准确性, 比较网格搜索 (GS) 和粒子群 (PSO) 参数寻优算法对反演精度的影响。结果表明: GS-SVM 模型的反演性能较好, 反演得到的内部热点温度与实际值的最大和最小误差分别为 4.00、0.01 °C, 可以证明反演模型的有效性。

关键词: 氧化锌避雷器; 热点温度; 受潮; 温度反演; 支持向量机

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.04.021 中图分类号: TM863 文章编号: 1673-9140(2023)04-0198-07

Internal hot spot temperature inversion method of 500 kV arrester under damp condition

PENG Jingzhang¹, ZHANG Zaihua¹, WU Fengliang¹, LIU Bo^{2,3}, SHEN Yue⁴, LI Peng⁴, WU Tian⁴

(1. Huangshi Power Supply Company, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Huangshi 435000, China; 2. NARI Group Co., Ltd. (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China; 3. Wuhan NARI Co., Ltd., State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China; 4. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Accurately predicting the internal hot spot temperature can improve the damp fault inspection effect of arrester effectively. An inversion detection method of hot spot temperature inside 500 kV arrester based on surface temperature and SVM (support vector machine) is proposed. Taking the surface temperature of arrester and wind speed as inputs, the inversion of hot spot temperature inside arrester is realized. In order to improve the prediction accuracy of the proposed model, the influences of the grid search (GS) and particle swarm optimization (PSO) algorithms on inversion accuracy are compared. The results show that the GS-SVM model is of good inversion performance. The maximum and minimum errors between the internal hot spot temperature obtained by the inversion method and the actual values are 4.00 °C and 0.01 °C respectively, which proves the effectiveness of the inversion model.

Key words: MOA; hot spot temperature; damp; temperature inversion; SVM

氧化锌避雷器 (metal zinc-oxide arrester, MOA) 具有结构简单、动作响应快、容量大以及耐污秽能

力好等优点, 被广泛应用于电力系统中^[1-4]。当运行中的避雷器出现受潮故障时, 会导致泄漏电流增

收稿日期: 2022-06-15; 修回日期: 2022-11-07

基金项目: 国家自然科学基金(51807110); 国网湖北省电力有限公司科技项目(B715B02100B7)

通信作者: 黎鹏(1989—), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力设备故障检测、电工装备多物理场分析等研究; E-mail: lipeng_ctgu@163.com

大、阀片有功损耗增加,从而引起内部温度不断升高,严重时甚至发生爆炸事故,极易威胁系统的安全稳定运行^[5-6]。据统计,避雷器因受潮引起的故障约占 60% 以上^[7],因此,提出避雷器受潮故障在线检测方法,对确保其正常稳定工作具有重要的实际意义。

基于红外热像(表面温升)的避雷器受潮故障检测已得到了较多应用。文献[8]通过有限元计算分析了受潮情况下 500 kVMOA 温升变化规律,其可为避雷器受潮故障的红外诊断提供理论依据;文献[9]通过试验测量了特高压 MOA 受潮情况下的温度分布,发现红外测温法可有效判断 MOA 受潮缺陷;文献[10-12]通过红外检测发现避雷器表面温度异常,经停电检测、现场解体试验判断避雷器内部严重受潮,避免了重大事故的发生;文献[13]指出,在巡检中结合红外测温可及时诊断避雷器内部的缺陷。目前,在利用红外图像检测避雷器内部受潮故障时,主要是通过避雷器的表面温度进行判断,但表面温度易受风速、日照等环境因素干扰,而内部阀片热点温度受环境因素的影响相对较小,因此,若能根据避雷器表面温度反演出内部热点温度,将有效地提升避雷器受潮故障的检测精度。

为此,本文提出基于支持向量机(support vector machine, SVM)和表面特征温度的 MOA 内部热点温度反演方法,以正常和受潮状态下 500 kV MOA 为研究对象,通过拟水平法构建训练样本集,利用网格搜索(grid search, GS)算法和粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)对参数进行寻优,通过 SVM 模型对避雷器内部热点温度进行反演预测,并验证热点温度反演方法的准确性,研究可为避雷器受潮故障的红外检测提供新思路。

1 MOA 温度计算及热点反演理论

1.1 避雷器温度计算方法

1.1.1 计算模型及参数

本文以 Y20W-444/1106 500 kV 站用 MOA 为研究对象,模型如图 1(a)所示。MOA 主要组成部分包括:阀片、环氧管、瓷套、法兰(A、B、C、D)、均压环等。为了实现通过 MOA 外表面温度对内部热点温度进行预测,如图 1(b)所示,避雷器表面温度特

征点按路径 2 进行选择,其选择数量可根据需要调整。

为了考虑不同受潮程度对热点温度的影响,将受潮程度分为轻度和重度 2 种。当避雷器轻度受潮时,由于阀片表面釉层和电镀层具有憎水性,水分会以水滴形式凝结在表面。而重度受潮条件下可认为阀片本身的电导率增加,导致 MOA 泄漏电流中的阻性分量增大,从而引起局部发热、温度升高。因此,参考文献[14-15],在阀片表面附着一层圆形水膜(电导率为 $1\ 000\ \Omega \cdot m$)模拟轻度受潮故障,而将阀片电阻减小 99% 模拟重度受潮故障情况。

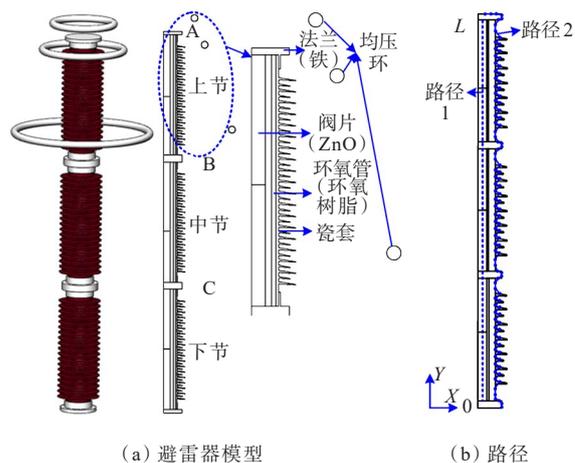


图 1 500 kV MOA 计算模型

Figure 1 Calculation model of 500 kV MOA

1.1.2 基于电-热耦合的温度计算

基于电-热耦合的 MOA 温度场计算流程^[7-8]如图 2 所示。首先,通过时谐场计算获得额定电压条件下 MOA 阀片的热功率;然后,以阀片热功率为热载荷并设置相应边界条件,进行温度场计算,从而获得避雷器温度分布特性。

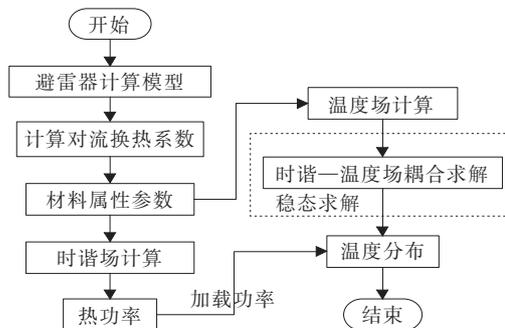


图 2 温度计算方法

Figure 2 Temperature calculation method

考虑MOA额定工作电压频率较低,时谐场计算时可视为电准静态场,其控制方程可表示为

$$\begin{cases} \nabla \times E = 0 \\ \nabla \times H = J_c + j\omega D \\ \nabla \cdot J_c = -j\omega \rho \end{cases} \quad (1)$$

式中, E 、 H 分别为电场、磁场强度矢量; J_c 、 D 分别为传导电流密度、电位移矢量; ρ 为电荷密度; ω 为角频率; j 为虚数单位。

阀片热功率 P 作为温升计算的热源,可通过下式计算,即

$$P = \int (J_c^2 / \sigma) dV \quad (2)$$

式中, σ 为电导率。

温度场计算中需考虑MOA热传导和热对流2种传热过程,对于稳态传热,其控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + P_0 = 0 \quad (3)$$

式中, λ 为导热系数; P_0 为单位体积的发热功率。

MOA表面与环境之间通过热对流方式进行热量交换,表面热流密度 q_w 可描述为

$$q_w = h(T - T_0) \quad (4)$$

式中, h 为对流换热系数; T 、 T_0 分别为MOA表面温度、环境温度。

基于上述电-热耦合计算方法,以MOA上节重度受潮为例进行分析,计算得到环境风速分别为0、2和4 m/s时MOA的温度分布,如图3所示。

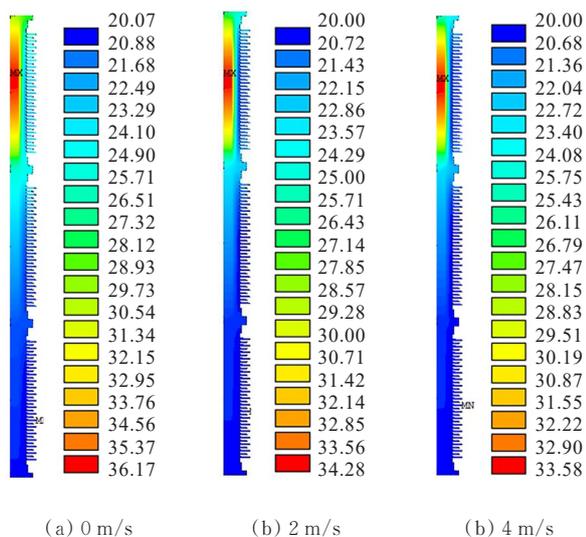


图3 不同风速下MOA温度分布

Figure 3 Temperature distribution of MOA under different wind speed

由图3可知,MOA受潮后受潮节的温度明显升高,且呈现中间高两端低的特点,即受潮部分存在局部过热现象,与实际情况一致。当风速为0时,MOA内部阀片和表面的最大温升分别约为15.9、10.1 °C,MOA表面的最大温升与文献[11]现场红外测量获得的结果基本一致,且温度分布特征也完全一致,可见,本文提出的电-热耦合计算方法可较好地模拟受潮条件下MOA的温度分布特性。

进一步分析图3可知,施加风速后MOA的整体温度分布特征并无改变,仅内、外最高温度的数值发生了变化;当风速由0增加为2 m/s后,MOA内部阀片的热点温度仅下降了1.89 °C,而其表面最高温度下降了3.57 °C,可见,内部阀片热点温度受环境因素的影响相对较小。因此,通过MOA表面温度反演获得内部热点温度后再根据热点温度判断其故障情况,可提高检测精度。

1.2 SVM基本理论及参数优化方法

1.2.1 SVM基本原理

SVM是一种通过核函数映射到更高维度空间使特征点分开的方法,可有效解决特征点维度低、不可分割的问题^[16-17]。但对数量较少的统计样本有较强的泛化能力,且不受维度的限制,因此,被广泛应用于数据分类问题中。以二分类问题为例,存在集合 (x_i, y_i) , $i=1, 2, \dots, m$, x_i 和 m 分别为样本标签和样本数量,令 $y_i=1$ 或 -1 ,则分类超平面方程^[18]为

$$w^T x + b = 0 \quad (5)$$

式中, w 为超平面法向量; b 为偏置量。

可将寻找SVM的最佳分类超平面问题转化为寻找最大间隔的分类问题:

$$\min \frac{1}{2} w^T w + C \sum_{i=1}^m \xi_i \quad (6)$$

式中, C 为惩罚系数,用于控制不同样本之间的权重; ξ_i 为松弛项。

若转化为对偶问题,则求解最大值,具体如下:

$$Q(\alpha) = \sum_{i=1}^m \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^m \alpha_i \alpha_j y_i y_j (x_i, x_j) \quad (7)$$

式中, α_i 为拉格朗日乘子。

通过求解对偶问题可得最优分类函数:

$$f(x) = \text{sgn} \left(\sum_{i=1}^m \alpha_i y_i K(x_i, x_j) + b \right) \quad (8)$$

式中, $K(x_i, x_j)$ 为核函数, 本文采用被广泛使用的径向基核函数(radial basis function, RBF):

$$K(x_i, x_j) = \exp\left(-\gamma \|x_i - x_j\|^2\right) \quad (9)$$

SVM 识别的精度取决于惩罚系数 C 和核函数参数 γ 。本文基于改进的 GS 和 PSO 算法对参数进行寻优, 并采用 K 折交叉验证法确定搜索参数。

1.2.2 误差分析方法

采用误差指标对预测效果进行评价^[19], 如表 1 所示, A_i 、 P_i 分别为第 i 个预测样本的实际值和预测值, N 为样本数。

表 1 误差指标
Table 1 Error indicators

误差指标	公式
误差平方和	$e_{SSE} = \sum_{i=1}^N (A_i - P_i)^2$
平均绝对偏差	$e_{MAD} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i - P_i $
平均绝对百分比误差	$e_{MAPE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left \frac{A_i - P_i}{A_i} \right $
均方百分比误差	$e_{MSPE} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{A_i - P_i}{A_i} \right)^2}$
均方根误差	$e_{MSE} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (A_i - P_i)^2}$

1.3 MOA 内部热点温度反演方法

本文提出基于 SVM 的 MOA 内部热点温度反演方法, 其具体实现流程如图 4 所示。

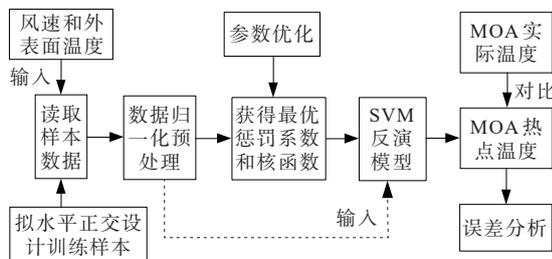


图 4 避雷器热点温度反演流程

Figure 4 Inversion process of arrester hot spot temperature

1) 采用拟水平正交设计样本, 通过数值模拟获得样本集, 并对其进行归一化预处理。通过分析 MOA 内外表面的温度分布特征, 选择表面温升明显的位置作为特征点, 选取风速和特征点温度形成特征集, 作为 SVM 模型训练样本的输入。

2) 基于训练样本, 利用 GS 和 PSO 算法对 SVM 模型的参数进行寻优, 获得最优参数 C 和 γ , 从而建立基于最优参数的 SVM 模型。

3) 将测试样本的风速和表面特征点温度依次输入 SVM 模型中, 得到测试样本的热点温度。

4) 采用 e_{SSE} 、 e_{MAD} 、 e_{MAPE} 和 e_{MSPE} 这 4 个误差指标用于评价模型的反演效果, 误差指标 e_{MSE} 用于评价 SVM 模型的学习能力。 e_{MSE} 越小说明 SVM 模型的学习能力越好, e_{SSE} 、 e_{MAD} 、 e_{MAPE} 和 e_{MSPE} 越小, 说明模型的反演效果越好。

2 MOA 内部热点温度反演模型构建

2.1 训练样本

本文综合考虑风速、受潮位置和受潮程度对避雷器热点温度的影响, 选取 4 因素 3 水平进行样本训练, 并采用正交实验法来合理选择训练样本, 如表 2 所示。参考 DL/664—2008 中的规定, 风速因子的最大值取 4 m/s。

表 2 因素及水平

Table 2 Factors and levels

单节位置	两节位置	风速 m/s	故障程度
上节	上、中节	0	轻度
中节	上、下节	2	重度
下节	中、下节	4	—

根据表 2 中影响因素和水平构建训练样本, 利用拟水平法建立 4 因素 3 水平的正交试验表, 去掉虚拟的水平组合, 构建的训练样本如表 3 所示。

表 3 训练样本

Table 3 Training samples

编号	受潮位置	风速/ (m/s)	受潮程度	编号	受潮位置	风速/ (m/s)	受潮程度
1	上节	0	轻度	7	上节	2	重度
2	上、中节	0	轻度	8	上、下节	2	重度
3	中节	0	重度	9	中节	4	轻度
4	中、下节	0	重度	10	上、下节	4	轻度
5	下节	2	轻度	11	下节	4	重度
6	中、下节	2	轻度	12	上、中节	4	重度

2.2 测试样本

为了验证反演模型的有效性, 选取的测试样本

如表4所示。

表4 测试样本

Table 4 Test samples

编号	受潮位置	风速/(m/s)	受潮程度	编号	受潮位置	风速/(m/s)	受潮程度
1	上、下节	0.5	轻度	5	上节	3.0	轻度
2	下节	0.5	重度	6	中节	3.0	重度
3	中、下节	1.0	轻度	7	中、下节	3.0	重度
4	上、下节	1.0	重度				

2.3 MOA表面温度特征点选取方法

为了准确反演MOA内部热点温度,需合理选择MOA表面的温度特征点,本文按照路径2(图1(b))从法兰、伞裙和伞裙壁面选择特征点;采用的5种选取方案如图5所示,并对比不同方案下MOA内部热点温度的反演效果。

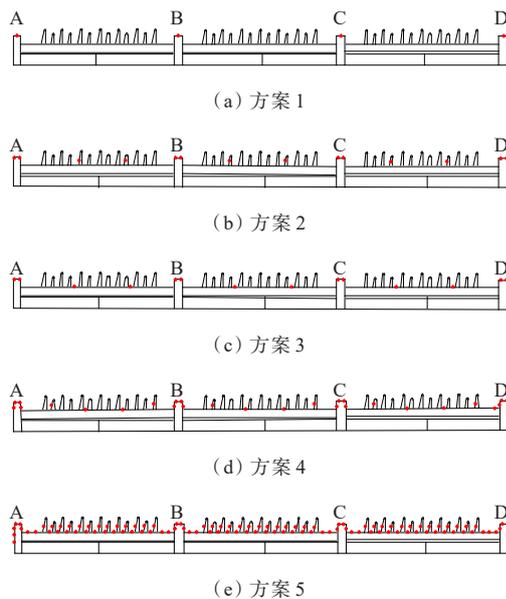


图5 特征点选取方案

Figure 5 Selection scheme of the feature points

方案1 仅从4个法兰(A、B、C、D)表面分别取一个特征点;

方案2 每个法兰(A、B、C、D)表面取2个特征点,特征点的位置及间距保持一致;同时,在上、中、下节伞裙表面分别等间距取2个特征点;

方案3 每个法兰(A、B、C、D)表面取2个特征点,同时,在上、中、下节伞裙壁面等间距取2个特征点;

方案4 每个法兰(A、B、C、D)表面分别取4个特征点,同时,在上、中、下节伞裙表面和壁面分别

等间距取4个特征点;

方案5 在路径2等间距取特征点,然后将位于法兰(A、B、C、D)和上、中、下节伞裙(包括伞裙壁和表面)的特征点分别取平均值,组成新的7个特征量作为预测模型的输入。

按照上述方案提取MOA的表面温度特征点,将表面温度特征点和风速作为模型输入,进行阀片热点温度反演,采用误差指标和适应度值 e_{MSE} 对模型反演效果和性能进行评价,结果如表5所示。

表5 温度反演误差对比

Table 5 Temperature inversion error comparison

方案	e_{SSE}	e_{MAD}	e_{MAPE}	e_{MSPE}	e_{MSE}
1	180.21	3.39	0.117	0.039 5	15.02
2	179.44	3.36	0.116	0.039 4	14.95
3	179.78	3.36	0.116	0.039 5	14.98
4	175.25	3.32	0.115	0.039 1	14.60
5	142.54	3.03	0.109	0.037 6	11.88

由表5可知,方案5的误差指标较小,且其适应度值 e_{MSE} 也最小,因此,本文拟选择方案5作为MOA表面特征点温度的提取方法。

3 MOA内部热点温度反演结果分析

3.1 参数优化方法

在实际应用中,SVM参数的选取直接影响热点温度反演的精度,因此,选取合适的惩罚系数 C 和核函数 γ 至关重要。将表3中12组数据作为输入对SVM反演模型进行训练,并利用GS和PSO算法对参数进行寻优^[20],设置惩罚系数 C 、核函数 γ 的取值范围分别为 $[2^3, 2^{10}]$ 、 $[2^{-10}, 2^{-5}]$ 。利用GS和PSO算法反演得到的结果如图6所示,GS和PSO算法的反演误差分别为5.44、5.95 $^{\circ}\text{C}$,GS算法的优化效果比PSO算法好。

通过对比误差指标,分析2种算法的反演效果,如表6所示,采用GS算法得到的 e_{SSE} 、 e_{MAD} 、 e_{MAPE} 和 e_{MSPE} 均小于PSO算法。表明GS-SVM模型的反演性能更佳,获得系数 C 、 γ 的最优参数分别为445.721 9、0.031 25。

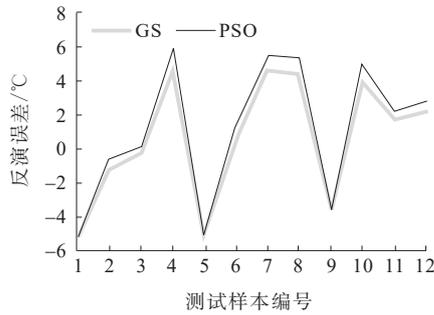


图6 反演误差对比

Figure 6 Inversion error comparison

表6 优化算法误差对比

Table 6 Error comparison of optimization algorithms

优化算法	ϵ_{SSE}	ϵ_{MAD}	ϵ_{MAPE}	ϵ_{MSPE}
GS-SVM	169.280	3.280	0.114	0.039
PSO-SVM	198.080	3.550	0.122	0.041

3.2 热点温度反演

基于上述获得的最优参数GS-SVM模型,对表4中测试样本进行MOA内部热点温度反演,如表7所示,热点温度反演值与实际值的最大、最小误差分别为4.00、0.01℃,且误差百分比最大为11%,基本都低于10%,可见整体误差较小,证明了本文反演模型的有效性。在反演获得MOA内部热点温度后,可以根据内部热点温度与环境温度之间的差值 ΔT 来进一步判断受潮程度情况, ΔT 越大,说明受潮越严重。

表7 热点温度的反演结果

Table 7 Inversion results of hot spot temperature / °C

样本号	热点温度		误差
	计算值	反演值	
1	28.82	29.78	0.96
2	27.19	27.20	0.01
3	29.39	28.55	-0.84
4	35.48	31.48	-4.00
5	23.31	25.89	2.58
6	29.51	27.42	-2.09
7	30.32	27.83	-2.49

4 结语

本文以500 kV站用MOA为研究对象,计算获得了不同风速和不同受潮程度下MOA的温度数

据,建立了基于SVM和表面特征温度的MOA内部热点温度反演模型,分别比较了GS和PSO算法对SVM模型反演效果的影响,发现GS算法优于PSO算法,并获得了惩罚因子 C 和核函数 γ 的最优参数,避免依据经验确定参数带来的不准确性。反演结果表明,反演获得的热点温度与实际值基本吻合,整体误差较小,说明提出的方法对避雷器内部热点温度反演检测具有较好的普适性,研究为避雷器运行状态的红外检测提供了参考。

参考文献:

- [1] ANDRADE A F,COSTA E G,FERNANDES J M B,et al. Thermal behaviour analysis in a porcelain-housed ZnO surge arrester by computer simulations and thermography [J].High Voltage,2019,4(3):173-177.
- [2] 王小君,毕成杰,金程,等.电气化铁路不停电过分相电磁暂态及抑制措施研究[J].电工技术学报,2021,36(1):191-202.
WANG Xiaojun,BI Chengjie,JIN Cheng,et al.Research on electromagnetic transient and suppression measures for passing neutral section without power interruption of electrified railway[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2021,36(1):191-202.
- [3] 段长君,闫军,霍峰,等.500 kV金属氧化物避雷器的运行状态带电诊断[J].电力科学与技术学报,2014,29(4):106-110.
DUAN Changjun,YAN Jun,HUO Feng,et al.Charged state diagnostic for 500 kV metal oxide arrester[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2014, 29(4): 106-110.
- [4] 夏永强,冯海超,郑智勇.10 kV绝缘导线防断线用避雷器串联羊角间隙的距离确定方法[J].电力科学与技术学报,2019,34(1):136-141.
XIA Yongqiang,FENG Haichao,ZHENG Zhiyong. Study on the distance determination method of angle gap in series with an anti-break lightning arrester for 10 kV insulated wires[J].Journal of Electric Power Science and Technology,2019,34(1):136-141.
- [5] 周松霖,段佳奇,齐伟强.基于模糊评判的变电设备评估[J].电力科学与技术学报,2021,36(3):174-179.
ZHOU Songlin, DUAN Jiaqi, QI Weiqiang. Substation equipment state evaluation method based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2021,36(3):174-179.

- [6] 陈晓春,周仲康,王康,等.复合绝缘子多因素环境老化性能分析[J].电力科学与技术学报,2017,32(4):90-95.
CHEN Xiaochun, ZHOU Zhongkang, WANG Kang, et al. Shed properties analysis of composite insulators under multi-factor aging test[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(4): 90-95.
- [7] 刘尉,肖集雄,金硕,等.基于场路耦合的500 kV氧化锌避雷器受潮缺陷分析[J].电瓷避雷器,2022(1):118-125.
LIU Wei, XIAO Jixiong, JIN Shuo, et al. Analysis on damp defect of 500 kV zinc oxide arrester based on field-circuit coupling[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(1): 118-125.
- [8] 黎鹏,屈莹莹,方蓓贝,等.不同故障条件下500 kV金属氧化锌避雷器温度分布特性[J].科学技术与工程,2021, 21(9):3649-3655.
LI Peng, QU Yingying, FANG Beibei, et al. Calculation of temperature distribution characteristics of 500 kV metal zinc oxide arrester under different fault conditions[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(9): 3649-3655.
- [9] 史志强,段涛,李占峰,等.特高压氧化锌避雷器受潮缺陷试验分析[J].电瓷避雷器,2020(6):117-121.
SHI Zhiqiang, DUAN Tao, LI Zhanfeng, et al. Experimental analysis on dampness defect of UHV zinc oxide arrester[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(6): 117-121.
- [10] 范敏,谢佳,姜方财,等.基于带电检测技术的金属氧化物避雷器缺陷分析[J].电瓷避雷器,2017(2):64-68.
FAN Min, XIE Jia, JIANG Fangcai, et al. The defect analysis of MOA on the basic of live detection technology [J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(2): 64-68.
- [11] 任大江,叶海鹏,李建萍,等.一起500 kV金属氧化锌避雷器故障原因分析[J].电瓷避雷器,2020(3):127-132.
REN Dajiang, YE Haipeng, LI Jianping, et al. Analysis of the causes of a 500 kV metal zinc oxide arrester fault[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(3): 127-132.
- [12] 王宏刚,纪鑫,武同心,等.基于预训练语言模型的电力领域设备缺陷检测[J].电测与仪表,2022,59(5):180-186.
WANG Honggang, JI Xin, WU Tongxin, et al. Device defect detection in power field based on pre-trained language model[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(5): 180-186.
- [13] 段建家,何智强,范敏.一起500 kV金属氧化物避雷器事故分析[J].电瓷避雷器,2014(3):79-83.
DUAN Jianjia, HE Zhiqiang, FAN Min. Analysis on a 500 kV metal oxide arrester accident[J]. Insulators and Surge Arresters, 2014(3): 79-83.
- [14] ZHANG P P, SHI W, WANG H. Simulation of potential distribution and leakage current of 800 kV DC arrester under different degree of degradation[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 486(1): 1-6.
- [15] 沈越,彭劲樟,张再华,等.500 kV避雷器受潮情况下温升计算及影响因素分析[J].水电能源科学,2023,41(6): 211-215.
SHEN Yue, PENG Jinzhang, ZHANG Zaihua, et al. Calculation of temperature rise of 500 kV arrester under damp condition and analysis of influencing factors[J]. Water Resources and Power, 2023, 41(6): 211-215.
- [16] GAO X, HOU J. An improved SVM integrated GS-PCA fault diagnosis approach of tennessee eastman process[J]. Neurocomputing, 2016, 174: 906-911.
- [17] 何邦乐,黄勇,叶頔,等.基于PSO-LSSVM的高压电力电缆接头温度预测[J].电力工程技术,2019,38(1):31-35.
HE Bangle, HUANG Yong, YE Ting, et al. Temperature prediction of power cable joint based on PSO-LSSVM predict model[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(1): 31-35.
- [18] 甘锡淞,傅成华,余洋.基于模糊环境AMPSO-SVM氧化锌避雷器故障诊断研究[J].电瓷避雷器,2017(5):41-46.
GAN Xisong, FU Chenghua, YU Yang. Study on fault diagnosis for zinc oxide arrester based on hybridfuzzy environment AMPSO-SVM[J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(5): 41-46.
- [19] 邱志斌,阮江军,黄道春,等.直流导线和阀厅金具的电晕起始电压预测[J].电工技术学报,2016,38(8):80-89.
QIU Zhibin, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Prediction on corona onset voltage of dc conductors and valve hall fittings[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 38(8): 80-89.
- [20] 黎鹏,刘畅,吴泳聪,等.基于NSGA-II算法的高压开关柜泄压通道优化设计[J].高电压技术,2020,46(6):2013-2020.
LI Peng, LIU Chang, WU Yongcong, et al. Optimization design of pressure relief channel for HV switchgear based on NSGA-II [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 2013-2020.