

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.02.025

基于温度概率密度的柔直换流阀功率模块故障 热红外图像识别方法

盛宇军, 孙杰, 李国强, 解晓东, 周凯, 张笑迪

(国网北京市电力公司检修分公司, 北京 100073)

摘要: 为了准确识别柔直换流阀功率模块故障, 保证高压直流输电安全、稳定地运转, 提出基于温度概率密度的柔直换流阀功率模块故障热红外图像识别方法。通过热红外图像中目标约束区域和背景采样区域的核密度估计, 提取柔直换流阀功率模块热红外图像目标区域; 基于核密度估计提取温度概率密度, 将其作为区分热红外图像目标区域中正常运行区域和故障区域的特征, 结合热红外图像中目标区域内阈值, 初步划分故障区域, 将初步划分结果作为 K-means 聚类算法的先验知识, 通过不断聚类故障区域簇类, 达到识别故障的目的。实验验证: 所提方法通过集成灰度、空间关系和局部标准差的核密度估计可更精准提取热红外图像目标, 准确地识别到柔直换流阀功率模块的故障位置。

关键词: 概率密度; 柔直换流阀; 功率模块; 热红外图像; 核密度估计; K-means 聚类算法

Thermal Infrared Image Recognition Method of Power Module Fault of VSC-HVDC Converter Valve Based on Temperature Probability Density

SHENG Yujun, SUN Jie, LI Guoqiang, XIE Xiaodong, ZHOU Kai, ZHANG Xiaodi

(State Grid Beijing Electric Power Company Maintenance Branch Company, Beijing 100073, China)

Abstract: For accurately identifying the fault of power module of VSC-HVDC converter valve and ensuring safe and stable operation of HVDC transmission, a thermal infrared image recognition method of power module of VSC-HVDC converter valve based on the temperature probability density is proposed. The target region of the thermal infrared image of the power module of the VSC-HVDC converter valve is extracted by estimating the kernel density of the target constraint region and the background sampling region in the thermal infrared image. The temperature probability density is extracted based on the kernel density estimation and is used as the feature to distinguish the normal operation area and the fault area in the target area of the thermal infrared image. The fault area is preliminarily divided according to the threshold value in the target area of the thermal infrared image, and the preliminary division result is used as the prior knowledge of the K-means clustering algorithm. The purpose of fault identification is achieved by continuously clustering the fault area clusters. Experimental results show that the proposed method can accurately extract thermal infrared image targets by integrating the kernel density estimation of gray scale, spatial relationship and local standard deviation, and can accurately identify the fault location of the power module of the VSC-HVDC converter valve.

Key words: probability density; VSC-HVDC converter valve; power module; thermal infrared image; nuclear density estimation; K-means clustering algorithm

0 引言

柔直换流阀功率模块内若发生故障将影响柔

直换流阀功率模块乃至整个柔直系统、电力系统的安全稳定^[1-7]。因此, 当柔直换流阀功率模块中出现故障时, 如何对其快速准确地识别, 将对整个柔直

收稿日期: 2025-07-18; 修回日期: 2025-10-15

基金项目: 国网北京市电力公司项目(520233220003)。

Project Supported by Technology Project of State Grid Beijing Electric Power Company(520233220003).

系统起着重要的作用。

众多学者对柔直换流阀功率模块故障的识别提出了多种多样的方法,例如:卢堃等学者通过组建柔直换流阀功率模块的人机交互系统,通过故障特征的分析提取,识别换流阀故障^[8],但该方法需要定值计算来完成,所以无法兼顾直流线路故障和换流阀的故障。焦石等学者提出了一种包含柔直换流阀功率模块核心数据采集和处理的检测方法,通过采集功率模块内的主要数据,进行工作状态判别,实现故障、异常的检出和预警^[9]。但该方法并未详细剖析数据采集的方法,不准确数据严重影响故障检测结果。

为此,文中提出了基于温度概率密度的柔直换流阀功率模块故障热红外图像识别方法,利用热红外图像内的温度概率密度分布,达到识别柔直换流阀功率模块故障的目的。

1 柔直换流阀功率模块故障热红外图像识别方法

1.1 基于核密度估计的热红外图像目标区域获取

1.1.1 热红外图像中目标约束区域核密度估计

柔直换流阀功率模块热红外图像中设备正常运转的区域,即目标区域的温度远远高于背景区域。因此,可以将目标区域和背景区域区分开来^[10-11]。即柔直换流阀功率模块热红外图像集成灰度和空间位置关系的核密度估计^[12-14],首先确定级联核表达的柔直换流阀功率模块热红外图像中灰度信息。

$$K_{hshw}(x) = Dk_s \left[\left\| x^s / h_s \right\|^2 \right] k_w \left[\left\| x^w / h_w \right\|^2 \right] / h_s^2 h_w^p \quad (1)$$

式(1)中: k_s 、 k_w 均为核外形,由柔直换流阀功率模块热红外图像内各组件的空间方向和灰度特征关系产生的; x^s 、 x^w 分别为柔直换流阀功率模块特征的内在联系; h_s 、 h_w 为热红外图像核带宽; p 为柔直换流阀功率模块热红外图像的空间维数(若为灰度图像,则 $p=1$); D 为有量纲常数。根据式(1)推导柔直换流阀功率模块热红外图像集成灰度和空间关系的核密度估计,公式为

$$q_u = D / h_s^2 h_w^p \sum_{i=1}^n k_s \left[\left\| x_i^s - d / h_s \right\|^2 \right] k_w \left[\left\| x_i^w - v / h_w \right\|^2 \right] \delta[b(x_i)] \quad (2)$$

式(2)中: v 、 d 为柔直换流阀功率模块热红外图像相应的核外形中心; $\delta(\cdot)$ 为克罗内克函数^[15-16]; $b(x_i)$ 为柔直换流阀功率模块热红外图像像素点 x_i 位置的灰度特征量化值。式(2)不仅可以描述热红

外图像中灰度量化特征的信息,更可以描述处于某一空间位置上的灰度信息^[17-18],即柔直换流阀功率模块热红外图像集成灰度和各组件空间关系的核密度估计。

分析目标区域中的局部标准差信息^[19],公式为

$$S(x_i) = 2 \times \left\{ \frac{1}{|\beta| - 1} \sum_{x \in \beta} [I(x_i) - I(X)]^2 \right\}^{-2} \quad (3)$$

式(3)中: $|\beta|$ 为柔直换流阀功率模块热红外图像样本 β 中的像素数量; $I(x_i)$ 为 x_i 位置像素的灰度值; $I(X)$ 为柔直换流阀功率模块热红外图像样本 β 中的某一像素的灰度值。柔直换流阀功率模块热红外图像的核外形中心以及核带宽均是核密度估计的核心参数,目标约束区域通过 $rows \times cols$ 展示。

$$\beta_{\text{零}} = \sum_{i=1}^{rows} \sum_{j=1}^{cols} S(i,j) \quad (4)$$

式(4)中: $\beta_{\text{零}}$ 为上述区域的零阶矩; $S(i,j)$ 为柔直换流阀功率模块热红外图像 (i,j) 点处的局部标准差值。

目标约束区域的一阶矩公式为

$$\begin{cases} \beta_+ = \sum_{i=1}^{rows} \sum_{j=1}^{cols} i S(i,j) \\ \beta_- = \sum_{i=1}^{rows} \sum_{j=1}^{cols} j S(i,j) \end{cases} \quad (5)$$

通过式(5)可以推导出

$$\begin{cases} d_x = \beta_+ / \beta_{\text{零}} \\ d_y = \beta_- / \beta_{\text{零}} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中: d_x 、 d_y 为柔直换流阀功率模块热红外图像核外形 $k_s(\cdot)$ 的中心 d 在 x,y 方向上的矢量分量;柔直换流阀功率模块热红外图像核外 $k_w(x)$ 中心 v 则是灰度量化特征的均值。柔直换流阀功率模块热红外图像核窗宽大小受到局部标准零阶矩的制约^[20],局部标准差的最大值为 δ_{max} ,则核带宽 $h_s = h_r = (h_x, h_y)$ 为

$$\begin{cases} h_x = \min \left[\frac{\alpha \times \sqrt{\beta_{\text{零}} / \delta_{\text{max}}^{-1}}, rows}{2} \right] \\ h_y = \min \left[\frac{\alpha \times \sqrt{\beta_{\text{零}} / \delta_{\text{max}}^{-1}}, cols}{2} \right] \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中, α 代表柔直换流阀功率模块热红外图像的加权参数,由先验知识决定。

1.1.2 热红外图像背景采样区域核密度估计

倘若柔直换流阀功率模块热红外图像存在 n' 个背景采样区域的点集合 $\{x_i\}(i=1,2,\dots,n')$,且

$\{o_u\}(u=1,2,\dots,m)$ 代表离散值,由柔直换流阀功率模块热红外图像背景核密度估计得到^[21-22],在量化特征 u 位置,核密度的分量值为

$$o_u = D \sum_{i=1}^{n'} k_s \left[\left\| x_i^s - d/h_s \right\|^2 \right] k_w \left[\left\| x_i^w - v/h_w \right\|^2 \right] \delta [b(x_i) - u] / h_s^2 h_w^p \quad (8)$$

式(8)中,柔直换流阀功率模块热红外图像中目标约束区域的核密度估计是核窗宽和核中心,可以使目标区域作为一个中心呈对称分布。

1.1.3 柔直换流阀功率模块热红外图像目标区域提取

基于核密度估计方法,结合上述分析,得到柔直换流阀功率模块热红外图像目标区域提取结果: q_u, o_u 为核密度估计分量,分别由柔直换流阀功率模块热红外图像中目标约束区域和背景采样区域的特征 $u(u=1,2,\dots,m)$ 位置得到^[23],则目标区域提取公式为

$$\hat{f}(i,j) = \begin{cases} 255 & q_u > o_u e^\sigma \\ 0 & q_u \leq o_u e^\sigma \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中: $\hat{f}(i,j)$ 为在柔直换流阀功率模块热红外图像 (i,j) 位置的灰度值; σ 为确定的阈值,通常情况下阈值选择数值0; e 为函数底数。

综上所述,利用核密度估计方法完成热红外图像中目标区域和背景采样区域的划分,最终得到柔直换流阀功率模块热红外图像中目标区域。

1.2 基于核密度估计的温度概率密度提取

温度概率密度的分布具有随机的特性^[24],因此运用核密度估计法可以全面地计算温度概率密度。在热红外图像中, Q 个像素点内含有温度 $\chi_1, \chi_2, \chi_3, \dots, \chi_Q$,这些温度的取值范围为

$$\{\chi_1, \chi_2, \chi_3, \dots, \chi_Q\} \in [\chi_{\min}, \chi_{\max}] \quad (10)$$

式(10)中, χ_{\min} 、 χ_{\max} 分别为温度最小值和最大值。

设温度区域为 R ,利用温度概率密度 $f(z)$ 的积分运算获取所需数据在 R 中出现的概率 P ,积分运算过程

$$P = \int_R f(z) dz = \int_{\chi_{R,\min}}^{\chi_{R,\max}} f(z) dz \quad (11)$$

式(11)中, dz 为 z 变化无限小的量,如果 R 的宽度 a 无限小,则不考虑 $f(z)$ 发生的改变,此时运算过程公式为

$$P = \int_R f(z) dz \approx f(z) \int_R dz = f(z)a \quad (12)$$

倘若存在 N 个样本,有 c 个样本在 R 中,那么

在 R 中出现柔直换流阀功率模块热红外图像温度概率密度

$$P = 1 \times (c/N)^{-1} \quad (13)$$

式(12)、(13)结合,得到柔直换流阀功率模块热红外图像温度概率密度的函数

$$f(z) = c/Na \quad (14)$$

在热红外图像温度区域 R 中每个样本数据都可以通过核函数 $Y(z)$ 进行描述,各异的核函数将展示的波形各不相同,利用标准正态分布核函数可以使柔直换流阀功率模块热红外图像温度概率密度曲线具有平滑性^[25],将随机一点 x_j 的温度分布概率进行靠近,核函数公式为

$$Y_x - Y_{x_j}/a = \frac{1}{\sqrt{2r}} \exp \left[-\left(\frac{x - x_j}{a} \right)^2 / 2 \right] \quad (15)$$

式(15)中, r 为柔直换流阀功率模块热红外图像温度概率密度曲线的半径。热红外图像全部样本在 R 内的样本数量的公式为

$$c = \sum_{j=1}^N (Y_x - Y_{x_j}/a) \quad (16)$$

将式(14)代入式(16)中,获取经核函数估计后的柔直换流阀功率模块热红外图像温度概率密度函数 $f(z)$

$$f(z) = \sum_{j=1}^N Y \left(\frac{x - x_j}{a} \right) / Na \quad (17)$$

式(17)中,柔直换流阀功率模块热红外图像温度区域的窗宽是 a ,窗宽制约核函数的估计结果^[26],为了避免核函数估计的函数波动过大,需要选取最佳窗宽。

$$a = (4/3N)^{\frac{1}{5}} \varphi \quad (18)$$

式(18)中: φ 为标准差;柔直换流阀功率模块热红外图像温度概率密度的极值和其特征点,可以通过极值点温度 θ_1 、 θ_0 计算对应温度概率密度分布,确定温度阈值 ρ_{th} ,将特征一致的归为一类,达到柔直换流阀功率模块热红外图像温度概率密度的归类

$$\rho_{th} > (1 - \theta_1/\theta_0) \times 100\% \quad (19)$$

综上所述,根据柔直换流阀功率模块热红外图像目标区域中正常运行区域和故障区域的温度概率密度的特性得到的温度分布,为后续的通过聚类完成故障热红外图像识别提供先验知识。

1.3 基于K-means聚类的热红外图像故障识别

K-means 聚类算法首先将柔直换流阀功率模块故障热红外图像中的 n 个温度数据作为初始聚类

中心^[27-28];而对于未做选择的其他温度数据,求解 n 个温度数据与其他温度数据的欧式距离,若与 n 个温度数据相似,则归为一类;再次计算新类的聚类中心,并再次聚类,循环往复此过程直到柔直换流阀功率模块热红外图像的故障区域标准测度函数开始收敛为止^[29]。单波段的热红外图像,其数据维数为 1,再结合聚类算法的误差平方和函数,令 $o=(o_1, o_2)$,代表柔直换流阀功率模块空间坐标; $g(o)$ 代表柔直换流阀功率模块热红外图像特征值,柔直换流阀功率模块的故障区域的最小值为

$$E = \sum_{i=1}^K \sum_{o \in A_i^{(i)}} g(o)^2 \sum_{o \in A_i^{(i)}} \mu_j^{(i+1)^2} \quad (20)$$

式(20)中: $A_i^{(i)}$ 为柔直换流阀功率模块热红外图像特征点的集合; μ_j 为柔直换流阀功率模块热红外图像第 j 类的平均值。具体 K-means 聚类方法步骤如下。

第 1 步:选择柔直换流阀功率模块热红外图像故障区域中 K 个初始均值 $\mu_1^{(1)}, \mu_2^{(1)}, \dots, \mu_K^{(1)}$ 。

第 2 步:在柔直换流阀功率模块热红外图像故障区域内的数据进行第 i 次迭代时,特征点可以得到 K 类之一 ($j=1, 2, \dots, K; l=1, 2, \dots, K; j \neq l$), $o \in A_l^{(i)}$ 。

$$\|g(o) - \mu_l^{(i)}\| \times 1 < \|g(o) - \mu_j^{(i)}\| \times 1 \quad (21)$$

第 3 步:对于 $j=1, 2, \dots, K$,更新均值 $\mu_j^{(i+1)}$

$$\mu_j^{(i+1)} = \sum_{o \in A_j^{(i)}} g(o) / N_j \quad (22)$$

第 4 步:当 $j=1, 2, \dots, K; \mu_j^{(i+1)} = \mu_j^{(i)}$ 时,代表 K-means 聚类算法收敛,否则返回第 1 步再次迭代。计算得到式(22)的最小值,即为柔直换流阀功率模块热红外图像的故障区域^[30]。

综上所述,基于不同区域间温度概率密度的差异,采用 K-means 聚类将故障热红外图像划分成不同温度区域,温度最高区域对应的区域即为柔直换流阀功率模块发生故障的区域。

2 实验分析

文中以某市电网异步联网工程 BT 换流站柔性直流单元的柔直换流阀功率模块作为实验对象,该功率模块内包含 IGBT3 套、反并联二极管 3 套等,各个参数见表 1,柔直换流阀功率模块实物图见图 1。

2.1 热红外图像目标提取

为验证文中方法在进行热红外图像目标提取

表 1 柔直换流阀功率模块参数

Table 1 Power module parameters and physical diagram of VSC-HVDC converter valve

参数	数值
额定电压/V	2 300
模块电容/mF	21
桥臂电抗/mH	6
额定直流电压/kV	±12
交流系统电压/kV	12.5
系统容量/MW	63



图 1 柔直换流阀功率模块实物图

Fig. 1 Physical picture of the power module of the VSC-HVDC converter valve

时集成灰度、空间关系和局部标准差进行核密度估计的优势,分别统计仅考虑灰度,以及考虑集成灰度、空间关系和局部标准差时,核密度估计下的柔直换流阀功率模块热红外图像的目标约束区域和背景采样区域曲线,结果见图 2、3。

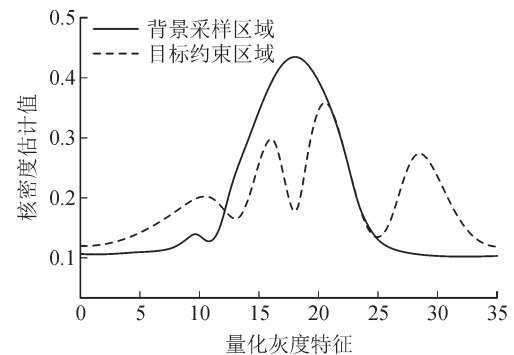


图 2 仅考虑灰度信息的核密度估计曲线

Fig. 2 Curve of kernel density estimation considering only gray information

分析图 2 可知,柔直换流阀功率模块热红外图像的目标约束区域和背景采样区域的两条曲线在量化灰度特征 u 为 12 级至 25 级之间有一部分是包含在一起的,说明这一部分曲线所代表的像素在热

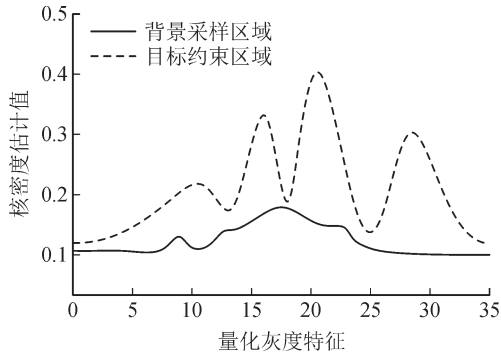


图3 集成灰度、空间关系和局部标准差核密度估计曲线

Fig. 3 Kernel density estimation curve integrating grayscale, spatial relationship and local standard deviation

红外图像当中是重叠的,表达了仅凭借灰度的核密度估计方法无法对柔直换流阀功率模块热红外图像中目标约束区域直接识别,即背景区域和目标区域在量化灰度特征 u 为 12 级至 25 级之间的这一部分是无法识别的。

分析图3可知,图3较图2的曲线展示出了无重叠部分,说明在核密度估计方法中引入空间关系、局部标准差信息,使得柔直换流阀功率模块热红外图像内的目标约束区域和背景采样区域可以清晰地区分,柔直换流阀功率模块热红外图像中的目标约束区域非常容易即可识别。

综上所述,文中方法集成灰度、空间关系和局部标准差的核密度估计可更精准提取热红外图像目标。

2.2 柔直换流阀功率模块故障热红外图像识别

运用文中方法最终识别到柔直换流阀功率模块热红外图像中故障区域的放大图见图4,其参数见表2。

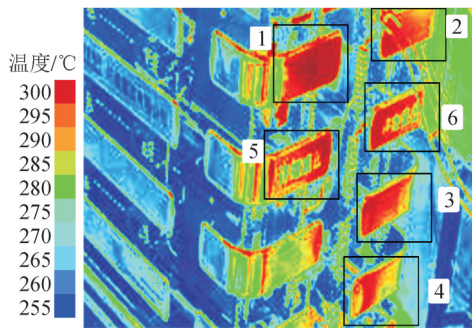


图4 柔直换流阀功率模块热红外图像中故障区域

Fig. 4 Fault area in the thermal infrared image of the power module of the VSC-HVDC converter valve

由图4、表2可知,柔直换流阀功率模块在正常运转时的温度在 280 °C,功率模块在启动初期的温度是 255 °C,当发生故障时,柔直换流阀功率模块的温度就飙升到了 300 °C,图4中共有6处故障区域,故障区域和其他区域分隔明显,识别清晰,充分说

表2 柔直换流阀功率模块热红外图像故障参数

Table 2 Thermal infrared image fault parameters of the power module of the VSC-HVDC converter valve

故障区域	区域工况	区域温度/°C
蓝色区域	柔直换流阀功率模块开始运行阶段,持续时间 20 min	255~265
绿色区域	柔直换流阀功率模块正常运转阶段,持续时间约为 3 h	280
故障区域 1	极端工况、故障工况	300
故障区域 2	极端工况、故障工况	300
故障区域 3	极端工况、故障工况	290~300
故障区域 4	极端工况、故障工况	290~300
故障区域 5	极端工况、故障工况	290~300
故障区域 6	极端工况、故障工况	290~300

明了文中方法可以准确识别柔直换流阀功率模块的故障所在。

3 结语

文中利用集成灰度、空间关系和局部标准差的核密度估计方法区分柔直换流阀功率模块热红外图像中目标约束区域和背景采样区域,根据目标约束区域中的温度概率密度分布细化出故障区域,利用 K-means 聚类对故障区域进行聚类,最终识别出柔直换流阀功率模块的故障位置,并通过实验验证了文中方法目标提取以及故障识别的效果。

参考文献:

- [1] 邹常跃, 韦嵘晖, 冯俊杰, 等. 柔性直流输电发展现状及应用前景[J]. 南方电网技术, 2022, 16(3): 1-7.
ZOU Changyue, WEI Ronghui, FENG Junjie, et al. Development status and application prospect of VSC-HVDC[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(3): 1-7.
- [2] 杨岳峰, 王晓晗, 王 玮, 等. 柔性直流换流阀监视系统关键技术及工程化应用[J]. 中国电力, 2021, 54(4): 168-174.
YANG Yuefeng, WANG Xiaohan, WANG Wei, et al. Key technologies and engineering application of converter valve monitoring system for flexible HVDC[J]. Electric Power, 2021, 54(4): 168-174.
- [3] 陈 名, 涂小刚, 徐 鸿, 等. 柔直阀段测试平台谐波电流分析及调制方法影响研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(3): 78-87.
CHEN Ming, TU Xiaogang, XU Hong, et al. Harmonic current analysis and modulation method influence for test platform of modular multilevel converter[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(3): 78-87.
- [4] 王敬龙, 尹纯亚, 李笑竹, 等. 混合串联直流输电换流阀拓扑结构及控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(24): 153-164.
WANG Jinglong, YIN Chunya, LI Xiaozhu, et al. Hybrid series HVDC converter valve topology and control strategy[J]. Power

- System Protection and Control, 2025, 53(24): 153-164.
- [5] 李凯, 廖卉莲, 汪涛, 等. 特高压直流输电换流阀晶闸管温度分布预测方法研究[J]. 电测与仪表, 2025, 62(11): 216-224.
LI Kai, LIAO Huilian, WANG Tao, et al. Research on prediction method of temperature distribution in thyristor of UHVDC converter valve[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(11): 216-224.
- [6] 刘海洋, 孙天甲, 杜焱鑫, 等. 新型可控换相换流阀特征建模与短路特性[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(10): 76-83.
LIU Haiyang, SUN Tianjia, DU Zhaoxin, et al. The characteristic modeling and short-circuit characteristics of the novel controllable line commutation valve[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(10): 76-83.
- [7] 杨家豪, 刘文泽, 张俊杰, 等. 换流阀整体免解线的直流输电晶闸管管级元件参数测量方法[J]. 电测与仪表, 2025, 62(8): 160-169.
YANG Jiahao, LIU Wenzhe, ZHANG Junjie, et al. Parameter measurement method for DC transmission thyristor-level components without removing connection wires for the entire converter valve[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(8): 160-169.
- [8] 卢堃, 周世威. 特高压柔性直流换流阀启停过程阀控自检功能缺陷及优化方法[J]. 电工技术, 2022(24): 146-150.
LU Kun, ZHOU Shiwei. Defects and optimization methods of valve control self-checking function in the start-stop process of UHV flexible DC converter valves[J]. Electric Engineering, 2022(24): 146-150.
- [9] 焦石, 严治勇, 张健成, 等. 柔性直流输电功率模块的现场智能化检测[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(9): 59-69.
JIAO Shi, YAN Zhiyong, ZHANG Jiancheng, et al. Field intelligent test of flexible HVDC power module[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2021, 37(9): 59-69.
- [10] 姬煜轲, 侯婷, 何智鹏, 等. 一种柔直换流阀用压接型IGBT功率子模块加速老化试验方法[J]. 南方电网技术, 2021, 15(5): 1-11.
JI Yuke, HOU Ting, HE Zhipeng, et al. An accelerated aging test method of press-pack IGBTs based power submodules for VSC-HVDC converter valve[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(5): 1-11.
- [11] 马志荣, 姜彦涛, 孙小平, 等. 海上柔直换流阀塔运行期间的振动性能研究[J]. 高压电器, 2022, 58(3): 140-147.
MA Zhirong, LOU Yantao, SUN Xiaoping, et al. Study on vibration performance of offshore flexible direct current converter valve tower during operation[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(3): 140-147.
- [12] 严明辉, 谢雄, 李维劫, 等. 基于高斯核密度估计的典型负荷曲线形态聚类算法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(2): 37-44.
YAN Minghui, XIE Xiong, LI Weijie, et al. A typical load curve shape clustering algorithm based on gaussian kernel[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(2): 37-44.
- [13] 倪泽行, 王琇峰, 徐波, 等. 自适应带宽核密度估计在旋转机械劣质监测数据识别中的应用[J]. 中国机械工程, 2022, 33(20): 2476-2482.
NI Zeheng, WANG Xiufeng, XU Bo, et al. Applications of adaptive bandwidth kernel density estimation in recognition of poor quality monitoring data of rotating machinery[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(20): 2476-2482.
- [14] 严明辉, 潘舒宸, 吴滇宁, 等. 基于非参数核密度估计的电力市场用户电量异常数据辨识与修正方法[J]. 现代电力, 2022, 39(1): 80-87.
YAN Minghui, PAN Shuchen, WU Dianning, et al. An identification and correction method of abnormal data of electricity market consumers based on nonparametric kernel density estimation[J]. Modern Electric Power, 2022, 39(1): 80-87.
- [15] 张学友, 董翔宇, 葛健, 等. 基于模拟退火算法的特高压直流VDCOL控制环节优化方法[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(4): 53-60.
ZHANG Xueyou, DONG Xiangyu, GE Jian, et al. Optimization for VDCOL of high voltage DC transmission system based on simulated annealing algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(4): 53-60.
- [16] 程利芳. 矩阵的几类常见乘积及其应用[J]. 郑州航空工业管理学院学报, 2022, 40(4): 108-112.
CHENG Lifang. Several kinds of products of matrices and their applications[J]. Journal of Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, 2022, 40(4): 108-112.
- [17] 杨文莉, 黄忠亿. 基于Huber正则化的红外与可见光图像融合[J]. 计算数学, 2022, 44(3): 305-323.
YANG Wenli, HUANG Zhongyi. Infrared and visible image fusion based on huber regularization[J]. Mathematica Numerica Sinica, 2022, 44(3): 305-323.
- [18] 杜永生, 蒿琳, 石秦峰. 低质量红外偏振图像热像特征提取方法[J]. 激光杂志, 2022, 43(11): 159-163.
DU Yongsheng, HAO Lin, SHI Qinfeng. Thermal image feature extraction method of low-quality infrared polarization image[J]. Laser Journal, 2022, 43(11): 159-163.
- [19] 兰天, 蓝元良, 盛财旺, 等. 基于无线传感网络的换流阀温度传感器节点温差取能建模仿真[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3601-3608.
LAN Tian, LAN Yuanliang, SHENG Caiwang, et al. Modeling of thermoelectric generator for powering wireless temperature sensor node employed in condition monitoring system of HVDC converter[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3601-3608.
- [20] 闻宇, 陈艳霞, 李菁, 等. 一种基于ICAFNN的多模型高压网络保护设备异常状态风险预警方法[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(4): 78-83.
WEN Yu, CHEN Yanxia, LI Jing, et al. An ICAFNN based multimodel early warning approach for the abnormal state risks in highvoltage network protection devices[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(4): 78-83.
- [21] 肖懿, 罗丹, 蒋沁知, 等. 基于温度概率密度的变电站高压设备故障热红外图像识别方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(1): 307-317.
XIAO Yi, LUO Dan, JIANG Qinzi, et al. Thermal infrared image recognition method for high voltage equipment failure in substation based on temperature probability density[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 307-317.
- [22] 王晶晶, 杨俊杰. 改进Canny算法在绝缘子串红外图像边缘检测

- 中的应用[J]. 电瓷避雷器, 2022(3):179-185.
- WANG Jingjing, YANG Junjie. Application of improved Canny algorithm in edge detection of high voltage insulator string[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(3):179-185.
- [23] 王立平, 叶超. 基于柔直换流阀的交流电压定量调节方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(6):44-49.
- WANG Liping, YE Chao. Quantitative regulation method of AC voltage based on flexible DC converter valve[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(6):44-49.
- [24] 卢正飞, 文明浩, 周瑜, 等. 逆变型分布式电源接入变电站高压线路距离保护新方法[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(2):59-67.
- LU Zhengfei, WEN Minghao, ZHOU Yu, et al. A novel distance protection method for highvoltage line in substation with integration of inverter interfaced distributed generator[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(2):59-67.
- [25] 蒋冠前, 吴红艳, 王帅卿, 等. 柔性直流输电换流阀塔电场分布与结构设计研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(17):178-186.
- JIANG Guanqian, WU Hongyan, WANG Shuaiqing, et al. Electric field distribution and structural design of a converter valve tower in a VSC-HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(17):178-186.
- [26] 何亚文, 李友才, 李奇艳, 等. 防爆型高压电缆接头的泄能孔形状设计[J]. 电力科学与技术学报, 2025(4):313-322.
- HE Yawen, LI Youcai, LI Qiyan, et al. Shape design of energy leakage hole of explosion-proof high voltage cable joint[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025(4):313-322.
- [27] 李玉, 甄畅, 石雪, 等. 基于波段影像统计信息量加权K-means聚类的高光谱影像分类[J]. 控制与决策, 2021, 36(5):1119-1126.
- LI Yu, ZHEN Chang, SHI Xue, et al. Algorithm based on band statistical information weighted K-means for hyperspectral image classification[J]. Control and Decision, 2021, 36(5):1119-1126.
- [28] 刘丰硕, 刘然, 董子慧. 基于k-means聚类的智能电表异常动态数据检测方法[J]. 电子设计工程, 2023, 31(5):84-88.
- LIU Fengshuo, LIU Ran, DONG Zihui. Abnormal dynamic data detection method for smart meters based on k-means clustering[J]. Electronic Design Engineering, 2023, 31(5):84-88.
- [29] 刘文丽, 张涛, 杨晓雷, 等. 计及负荷随机性含风电电力系统TCSC多目标优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5):58-69.
- LIU Wenli, ZHANG Tao, YANG Xiaolei, et al. Multi-objective optimal allocation of TCSC for a power system for wind power and load randomness[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5):58-69.
- [30] 赵慧, 赵洪峰, 李梅, 等. 特高压直流输电系统换流阀故障谐波特性研究[J]. 计算机仿真, 2021, 38(12):79-84.
- ZHAO Hui, ZHAO Hongfeng, LI Mei, et al. Study on harmonic characteristics of converter valve fault in UHVDC transmission system[J]. Computer Simulation, 2021, 38(12):79-84.
- 盛宇军(1972—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为输变电设备运行检修技术, 发电车及柔性直流输电技术, 数字化智能运检及在线监测技术等(通信作者)(E-mail:tongkan7979555@163.com)。
- 孙杰(1976—), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为输变电设备运行检修技术, 柔性直流输电技术, 数字化智能运检及在线监测技术等。
- 李国强(1976—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为输变电设备运行检修技术, 柔性直流输电技术和数字化智能运检及在线监测技术等。
- 解晓东(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为输变电设备运行检修技术, 发电车及柔性直流输电技术, 数字化智能运检及在线监测技术等。
- 周凯(1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为以柔性直流、调相机工程应用为主的新型电力系统建设生产管理, 以及设备数字化转型和智能化升级运检技术的研究应用。
- 张笑迪(1988—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为以柔性直流、调相机工程应用为主的新型电力系统建设生产管理, 以及设备数字化转型和智能化升级运检技术的研究应用。