

基于深度学习融合证据理论的电缆接头故障检测方法研究

王晓康, 丁 雷, 何嘉斌, 马学灵, 张童瑞, 梁 睿

(国网宁夏电力有限公司吴忠供电公司, 宁夏 吴忠 751199)

摘 要:为了解决目前电力电缆监测手段相对单一、缺少多参量综合监测判断的问题,本文集成电缆接头的各类局放信号,提出基于深度学习融合证据理论的电缆接头故障监测方法,对电缆接头无缺陷、内部绝缘缺陷、接头受潮三类情况进行了故障识别研究。根据卷积神经网络算法模型,分别对各类局放信号图谱进行训练和测试,再通过 D-S 证据理论进行数据融合,实现故障类型识别。结果表明:对于内部绝缘缺陷、接头受潮情况,单一信息源识别效果最好的为高频局部放电,其平均识别率能达到 85.6%,超声法识别率最低,其平均识别率为 78.7%,而本文提出的识别方法平均识别率达到 95.7%;当多维信息源中某一信息源的识别结果出现误判时,通过 D-S 证据理论融合能够排除错误信息源的干扰,准确识别放电类型。

关键词: 电缆接头;深度学习;信息融合;故障诊断

Research on cable joint fault detecting method based on deep learning fusion evidence theory

WANG Xiaokang, DING Lei, HE Jiabin, MA Xueling, ZHANG Tongrui, LIANG Rui

(Wuzhong Power Supply Company of State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Wuzhong 751199, China)

Abstract: To solve the current problem that the monitoring methods of power cable are relatively simple and lack of multi-parameter comprehensive monitoring and judgment, this paper integrated various partial discharge signals of cable joints, and proposed a cable joint fault monitoring method based on deep learning fusion evidence theory. Then fault identification research was conducted for three situations, including no defects, internal insulation defects, and joint moisture in cable joints. According to convolutional neural network algorithm model, the partial discharge signal graphs were trained and tested separately, and data fusion was carried out by D-S evidence theory to realize fault type identification. The results show that for the situation of internal insulation defects and joint moisture, the best recognition effect of single information source is high frequency partial discharge, and its average recognition rate can reach 85.6%, and the average recognition rate of ultrasonic method is the lowest, which is 78.7%, while the average recognition rate of the identify method proposed by this paper can reach 95.7%. When there is a misjudgment in the recognition result of one of the multi-dimensional information sources, D-S evidence theory fusion can eliminate the interference of the wrong information source, accurately identify the discharge type.

Key words: cable joints; deep learning; information fusion; fault diagnosis

0 引言

交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)电缆以绝缘性能良好、所占空间小、可靠性高、敷设简单等优势,逐渐取代架空线路和油-纸绝缘电缆^[1-4]。但 XLPE 电缆中接头几何结构繁杂,存在大量复合界面,其电场分布情况比电缆本体更为复杂。此外,电缆中接头的生产制造以及现场施工过程中,其内部产生杂质、气泡、凸起等随机缺陷的

可能性较大,从而成为电缆系统运行过程中故障率较高的薄弱环节^[5-8]。

因此,电缆接头的缺陷检测受到越来越多学者的关注^[9-15]。文献[9]介绍了使用现成的射频传感器进行电缆接头非侵入性局部放电检测的方法,并用于测量含有人工缺陷的 35 kV XLPE 电缆接头,结果表明,该方法可以同时检测局部放电感应电场和磁场,可以作为电缆接头缺陷的检测手段。文献[10]进行了基于压力波的电缆接头缺陷局部放电检测技术研究,通过与高频电流信号对比,结果表明

基金项目:国家电网有限公司科技项目(5229WZ230003)。

压力信号能够准确地反映局部放电现象。文献[11]进行了基于线性阻抗谱的配电电缆接头受潮缺陷检测研究,通过现场试验验证了线性阻抗谱技术在配电电缆接头受潮缺陷检测与定位方面的有效性。文献[13]介绍了一种基于内置差分电容的局放检测技术,通过试验证明了该技术与实验室局部放电系统检测的放电相位及响应趋势完全一致,可以精确测量电缆局部放电。文献[16]通过现场应用验证 HFCT 传感器适用于现场局部放电的带电检测,该传感器具有检测信号灵敏度高、使用方便的特点;但也提出对于电缆局放缺陷,应根据电缆预防性试验数据、家族缺陷等进行综合分析,以此判断信号产生源头。

从上述研究发现,目前的电缆接头故障检测通常是基于单一的传感器与信号源,或者通过两类信号源进行综合分析判断;同时,由于人工巡检的手段单一,加之现场环境的制约,极大提升了人员巡检难度。目前,高频局放、暂态地电压、超声信号均被认为是局放的有效检测手段^[17-21]。因此,本文集成高频局放、暂态地电压、超声信号,提出基于深度学习融合证据理论的电缆接头故障监测方法,对电缆接头无缺陷、内部绝缘缺陷、接头受潮三类情况进行故障识别研究,以应对并解决单一参量检测不全、准确性低的问题,达到对电缆接头故障的准确诊断。

1 高压电缆接头局部放电行为

1.1 试验方法

为了模拟实际结构,局部放电(partial discharge, PD)试验中使用 10 kV 定制电缆接头,通过内部预埋缺陷、浸泡试验模拟电缆接头无缺陷、内部绝缘缺陷、接头受潮三类情况。针对内部绝缘缺陷、接头受潮,可分别通过控制预埋缺陷的长度与浸泡时间模拟现场中的轻度和重度缺陷。根据调研结果及运行经验,缺陷长度在 1 cm 及以下的为轻度缺陷(1类),大于 1 cm 的为重度缺陷(2类);浸泡时间在 48 h 及以内的为 1 类受潮缺陷,浸泡时间大于 48 h 以上的为 2 类受潮缺陷。

将样本放入图 1 所示的测试电路中进行 PD 测试,该试验电路根据 IEC 60270:2015 搭建。电源采用无局部放电的可调交流电源,最大输出电压可达 50 kV。测试过程中的局部放电检测通过高频局放天线、暂态地电压和非接触式超声传感器实现,频

率分别为 300~1 500 MHz、3~100 MHz 和 40 kHz,同时检测阻抗内的分压电容器可获得工频相位参考信息。测量过程中,设置采样时间为 15 s。为了与实际运行环境一致,长期试验时设置的施加电压为 10 kV。

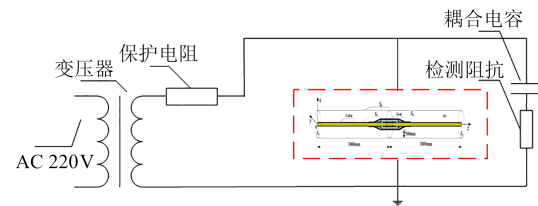


图1 局部放电测试电路

Fig.1 Partial discharge testing circuit

1.2 多维信息局部放电测量图谱

随着局部放电的发展,在加压过程中采集暂态地电压、高频局放和超声波信号,暂态地电压信号以时域波形展示,高频局放和超声波信号以相分辨局部放电(phase resolved partial discharge, PRPD)图谱形式展示,以内部预埋绝缘缺陷为例,测试结果如图 2~4 所示。

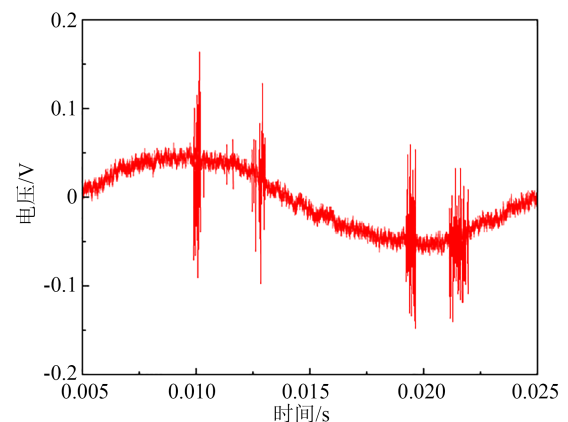


图2 局部放电暂态地电压特征图谱

Fig.2 Transient ground voltage characteristic map of partial discharge

从图 2~4 可以看出,内部预埋绝缘缺陷情况下,暂态地电压、高频局放和超声信号特征图谱均展示出丰富的放电信息。从图 2 可以看出,在交流电流正半波峰值和负半波峰值处,出现了明显的放电电流脉冲,正、负半周的放电脉冲幅值和数量基本相同,若转化为相位图谱,则放电脉冲基本分布在相位 90° 和 270° 附近。

从图 3 和图 4 可以看出,高频局放和超声波信号的 PRPD 图谱展示的放电相位点基本也分布在相位 90° 和 270° 附近,但是不同信号的 PRPD 图谱特

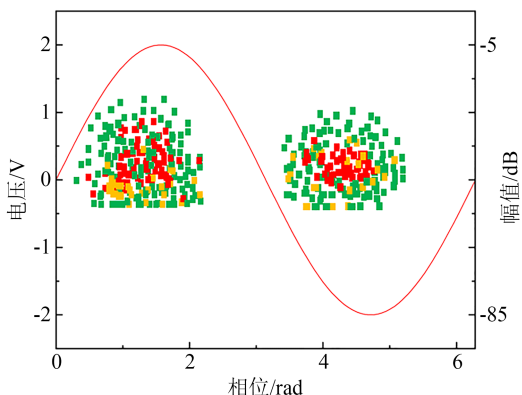


图3 高频局放信号特征图谱

Fig.3 Characteristic map of high-frequency partial discharge signals

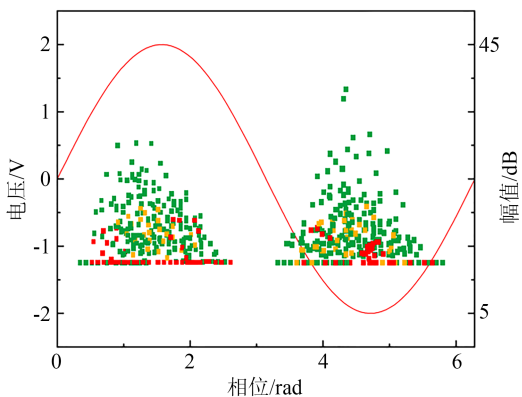


图4 局部放电超声信号特征图谱

Fig.4 Characteristic map of partial discharge ultrasound signal

征不同,例如高频局放信号特征图谱相位分布近似为圆形,且最大幅值在-40 dB左右,而局部放电超声信号特征图谱整体呈现三角形,且最大幅值在40 dB左右。

从上述分析可以发现,暂态地电压、高频局放和超声波信号的局放图谱特征明显,因此通过局放图谱识别高压电缆接头故障放电过程是一种可行的方法,而不同信号图谱蕴含的不同特征可以作为故障识别信息的相互补充。

2 基于深度学习融合证据理论的电缆接头故障识别

2.1 基于卷积神经网络的电缆接头故障识别方法

卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)是通过模拟大脑分层处理事务的方式来处理大量信息的深度学习方法,能够逐层提取输入图像的特征,建立含有丰富信息的结构模型,进而获得

底层特征,更好地进行分类识别。CNN非常适合用来提取本文PRPD图谱的图像特征。利用CNN方法对电缆接头局部放电过程进行识别的流程如图5所示。

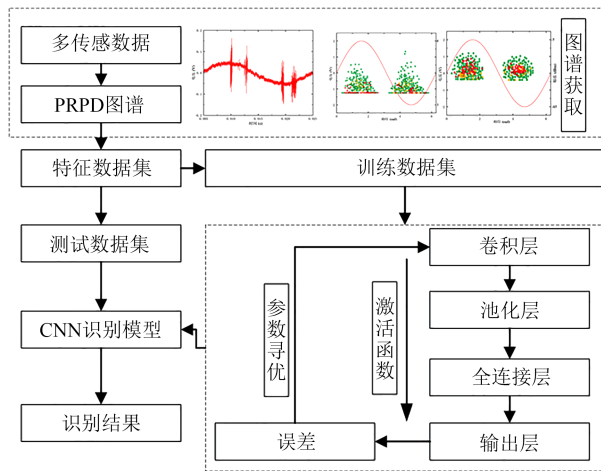


图5 电缆接头局部放电识别过程

Fig.5 Identification process of partial discharge at cable joint

首先通过高频局放天线、暂态地电压和非接触式超声传感器采集电缆接头无缺陷、内部绝缘缺陷、接头受潮三类情况的局放数据,然后得到PRPD图谱,对图谱进行收集得到特征数据集。特征数据集分为训练数据集和测试数据集。最后将训练数据集通过CNN方法进行模型的训练,测试数据集用于检验模型的准确度。其中,测试数据集占比为20%,训练数据集占比为80%。

其中,为了准确识别局放类型,本文在检验模型准确度时设计了8层用于局放类型识别的基本网络结构,如图6所示,包括输入层、卷积层、池化层、全连接层和输出层。

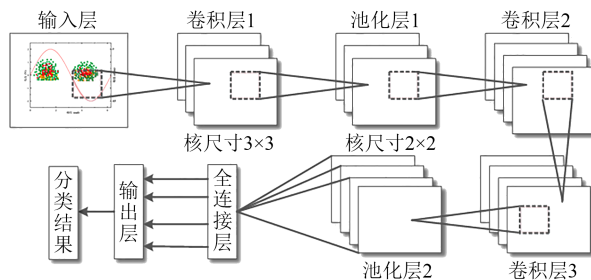


图6 电缆接头故障识别网络结构

Fig.6 Network structure for identifying the cable joint faults

①输入层:CNN的输入通常为一张图像,由三维像素矩阵构成,本文为高频局放天线、暂态地电压、非接触式超声传感器采集得到的局部放电图

谱;②卷积层:低层的局部区域信息可以通过卷积层中的卷积核激发到更高的层次,提取图像特征则由局部感知完成;③池化层:对特征图的实际大小实现有效的控制,达成数据的降维处理,可依靠相应的池化层聚合统计来完成;④全连接层:利用卷积层和池化层提取的特征进行最后的预测和分类;⑤输出层:当前样本分类的概率分布情况通过输出层得到,通常在分类问题中才使用。

2.2 D-S 证据理论数据融合

D-S 证据理论是一种处理不确定性问题的方法,其本质是将不同信息源的证据信息进行融合,在融合之前需要运用识别框架、基本概率分配函数、信任函数以及似然函数来表征问题的不确定性。

识别框架 θ 为包含 n 个元素的集合, $\theta = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ 。基本概率分配函数 m (即 mass 函数) 的函数值反映 θ 集合中元素的支持程度, mass 函数满足式(1)。

$$\begin{cases} m(\emptyset) = 0 \\ \sum_{A \subseteq \theta} m(A) = 1 \end{cases} \quad (1)$$

由 mass 函数得出信任函数 B 和似然函数 P , 如式(2)和式(3)所示。

$$\begin{cases} B(\emptyset) = 0 \\ B(\theta) = 1 \\ B\left(\bigcup_{i=1}^n A_i\right) \geq \sum_{I \subseteq \{1,2,\dots,n\}, I \neq \emptyset} (-1)^{|I|+1} B\left(\bigcap_{i \in I} A_i\right) \end{cases} \quad (2)$$

$$P(A) = 1 - B(\bar{A}) \quad (3)$$

式(2)~(3)中: $|I|$ 为 I 中元素的个数; \bar{A} 为 A 的补集。

本文的 θ 由 3 种放电模型构成的子集组成, 其对应的 mass 函数分别为 m_1, m_2, m_3 , 子集的元素为放电类型的评估召回率, 任意两种类型子集的元素分别为 A_1, A_2, A_3 和 B_1, B_2, B_3 , 经 D-S 证据理论融合后的结果如式(4)和式(5)所示。

$$m(A) = \begin{cases} \frac{1}{1-k} \sum_{A_i \cap B_j = A} m_1(A_i) m_2(B_j), A \subseteq \theta, A \neq \emptyset \\ 0, A = \emptyset \end{cases} \quad (4)$$

$$k = \sum_{A_i \cap B_j = \emptyset} m_1(A_i) m_2(B_j) \quad (5)$$

式(4)~(5)中: $m(A)$ 为融合后的 mass 函数; k 为冲突系数, 表示证据之间的冲突程度, k 值越大, 冲突越大。

最终利用得到的各证据的 mass 函数, 即基本概

率分配函数(basic probability assignment, BPA)进行融合计算, 输出各类证据的共同辨识结论。

结合前文所述基于卷积神经网络的局部放电过程识别方法以及 D-S 证据理论对高频局放天线、暂态地电压、非接触式超声传感器采集的电缆接头局放数据进行融合, 融合流程图如图 7 所示。

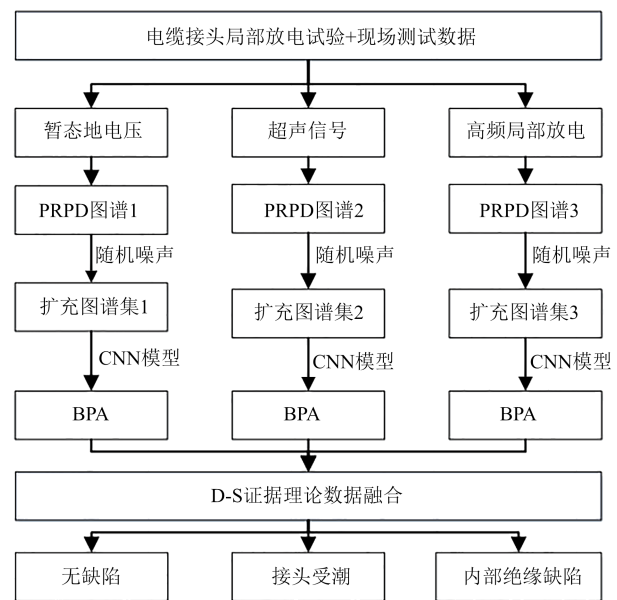


图 7 基于 D-S 证据理论信息融合的故障识别框架

Fig.7 Fault recognition framework for information fusion based on D-S evidence theory

2.3 多源数据融合的电缆接头故障识别

根据前文所述的基于卷积神经网络的电缆接头故障识别方法和 D-S 证据理论数据融合方法, 多源数据融合的电缆接头故障识别过程分为 3 个主要过程: ①基于高频局放、暂态地电压、非接触式超声的数据库进行采集; ②分别进行高频局放、暂态地电压、非接触式超声的数据库 CNN 模型训练; ③基于 D-S 证据理论进行高频局放、暂态地电压、非接触式超声的数据融合, 实现故障分类识别。

采集数据集时, 由于同一缺陷下的图谱在簇形状上仍各有不同, 为避免训练过程中数据集过少而造成过拟合, 本研究通过改变图像亮度、图像模糊程度以及加入随机噪声等将数据集扩大 10 倍进行训练(不同缺陷的高频局放、暂态地电压、非接触式超声的数据库样本数分别由 300 个扩充至 3 000 个)。

对数据集进行模型训练时, 基于卷积神经网络的电缆接头故障识别流程如图 5 所示, 卷积神经网

络参数及其取值如表1所示。

表1 卷积神经网络参数

参数	参数值/函数
损失函数	交叉熵
激活函数	ReLU
寻优策略	随机梯度下降
池化方式	最大
卷积尺寸	3×3
池化尺寸	2×2
学习率	1%
衰减率	0.000 1%

基于D-S证据理论进行高频局放、暂态地电压、非接触式超声的数据融合,在故障分类识别的过程中,使用高频局放图谱进行电缆接头故障识别作为证据体1,使用暂态地电压图谱进行电缆接头故障识别作为证据体2,使用非接触式超声图谱进行电缆接头故障识别作为证据体3。将PRPD图谱试验结果进行处理,并统计上述3个识别方法的正确率以及融合之后的结果(仅针对故障类别进行统计),如表2和图8所示。

表2 电缆接头故障识别准确率

	D-S融合	暂态地电压	超声	高频局放
预埋缺陷1	97.0%	85.5%	79.3%	89.2%
预埋缺陷2	95.8%	80.3%	84.1%	84.2%
内部受潮1	95.9%	85.8%	75.8%	86.7%
内部受潮2	94.1%	89.4%	75.7%	82.4%
平均识别率	95.7%	85.3%	78.7%	85.6%

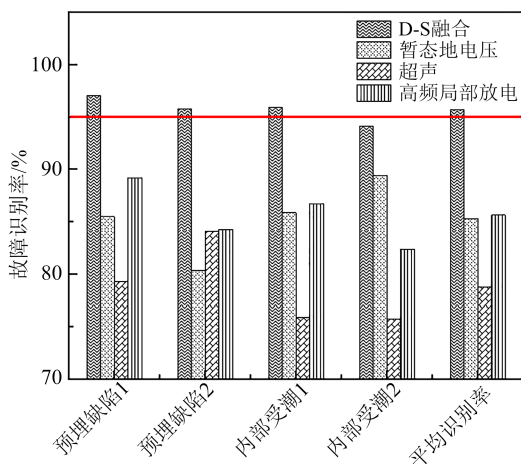


图8 电缆接头故障识别准确率

Fig.8 Accuracy of cable joint fault identification

从表2和图8可以看出,预埋缺陷1与预埋缺陷2、内部受潮1与内部受潮2,在相同识别方法下其电缆接头故障识别准确率稍有差别,这是因为不同缺陷程度下的局放信号本身是不稳定也不完全相同的,样本库的采集也存在一定的随机性,导致同一类缺陷下不同缺陷程度的识别准确率有所差别。根据电缆接头故障识别结果可以看出,通过D-S证据理论进行高频局放、暂态地电压、非接触式超声的数据融合对不同缺陷的识别准确率均最高,准确率基本位于95%的水平线上,相比单一的高频局放、暂态地电压、非接触式超声识别效果具有较为明显的优势和可靠性。

此外,若不考虑数据融合,高频局放、暂态地电压、非接触式超声中对电缆内部绝缘缺陷、受潮缺陷识别效果较好的是暂态地电压和高频局放,其中总体上高频局放识别效果最好,平均识别率能达到85.6%;超声的识别效果相对较差,平均识别率仅有78.7%;采用CNN+D-S证据理论的三维信息源融合识别方法平均识别率达到95.7%,这是因为当多维信息源中某一信息源的识别结果出现误判时,通过D-S融合能够排除错误信息源的干扰,准确识别故障类型。

3 结论

(1)基于单一信息源(高频局放、暂态地电压、非接触式超声)对内部绝缘缺陷、接头受潮进行识别时,高频局放识别效果最好,平均识别率达到85.6%,而超声法平均识别率仅有78.7%。

(2)采用CNN+D-S证据理论的多维信息源融合识别方法比单一信息源模式的识别准确率高,对不同缺陷的平均识别率达到95.7%,识别效果最好。

(3)D-S融合能够排除错误信息源的干扰,准确识别故障类型,适用于通过多维局放信号进行电缆接头故障识别。

参考文献 References

[1] 赵明伟,马天祥,李丹,等.硅橡胶绝缘材料温度及场强依赖特性对XLPE绝缘直流电缆预制接头内电场分布的影响[J].绝缘材料,2024,57(1):74-79.
ZHAO Mingwei, MA Tianxiang, LI Dan, et al. Effects of temperature and field strength dependence characteristics of silicone rubber insulating material on electric field distribution in prefabricated joints of XLPE insulated DC cables[J]. Insulating Materials, 2024,57(1):74-79.

[2] 范在乾,咸日常,冷学冰,等.35kV XLPE 电力电缆终端结构参数

- 优化[J]. 绝缘材料,2023,56(11):73-79.
- FAN Zaiqian, XIAN Richang, LENG Xuebing, et al. Optimization on structural parameters of 35kV XLPE power cable terminal [J]. *Insulating Materials*,2023,56(11):73-79.
- [3] 王毅,曲烽瑞,李跃,等. 交联副产物对交联聚乙烯电缆绝缘材料介电性能影响研究[J]. 合成材料老化与应用,2024,53(1):59-62.
- WANG Yi, QU Fengrui, LI Yue, et al. Effect of crosslinked byproducts on dielectric properties of crosslinked polyethylene cable insulation materials[J]. *Synthetic Materials Aging and Application*,2024,53(1):59-62.
- [4] 罗海静,柳赞. 10kV XLPE 电缆中局部放电声衰减规律研究 [J]. 电力科学与技术学报,2023,38(2):186-195.
- LUO Haijing, LIU Yun. Study on the acoustic wave attenuation of partial discharge in 10kV XLPE cable[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*,2023,38(2):186-195.
- [5] ITO S, APARICIO L E, ATAKE Y, et al. Initial study on press welding with indium applied to high-temperature superconducting DC feeder cables[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*,2023,33(5):4800-405.
- [6] SHIOHARA K, SUGANE H, SATO M, et al. Demonstration of a triaxial superconducting cable in a private chemical plant[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2021, 31(5): 4801804.
- [7] YANG S C, DU Q, HU X. Transfer functions for RF partial discharge signals in power cable joints[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*,2023,38(3):1649-1655.
- [8] ZOU Z C, YAO J. Fault protection of urban distribution network using a superconducting cable joint[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*,2021,31(8):1-5.
- [9] HU X, YANG S C, DU Q, et al. Radio-frequency detection of partial discharge in power cable joints[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*,2024,39(1):317-324.
- [10] 龚馨. 基于压力波的电缆接头缺陷局部放电检测技术研究[D]. 重庆:重庆大学,2022.
- GONG Xin. Research on partial discharge detection technology of cable joint defects based on pressure wave[D]. Chongqing: Chongqing University,2022.
- [11] 黄晨曦,田欣雨. 基于线性阻抗谱的配电网接头受潮缺陷检测[J]. 电工技术,2021(23):123-125.
- HUANG Chenxi, TIAN Xinyu. Detection of damp defects of distribution power cable joints based on linear impedance spectrum[J]. *Electric Engineering*,2021(23):123-125.
- [12] 王若丞,康洪玮,贺云逸,等. 电缆接头硅橡胶材料内部缺陷的超声检测研究[J]. 绝缘材料,2021,54(4):102-108.
- WANG Ruocheng, KANG Hongwei, HE Yunyi, et al. Research on ultrasonic testing of internal defects in silicone rubber materials for cable joints[J]. *Insulating materials*,2021,54(4):102-108.
- [13] 徐明忠,夏荣,欧阳本红,等. 基于内置差分电容的电缆接头局放检测技术研究[J]. 智慧电力,2022,50(7):37-44.
- XU Mingzhong, XIA Rong, OUYANG Benhong, et al. Cable joint partial discharge detection based on built-in differential capacitance[J]. *Smart Power*,2022,50(7):37-44.
- [14] 李国倡,梁箫剑,魏艳慧,等. 配电网附件复合绝缘界面缺陷类型和位置对电场分布的影响研究[J]. 电工技术学报,2022,37(11):2707-2715.
- LI Guochang, LIANG Xiaojian, WEI Yanhui, et al. Influence of composite insulation interface defect types and position on electric field distribution of distribution cable accessories[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(11): 2707-2715.
- [15] 王雅妮,孙远远,张帅,等. 基于分子链位移的HVDC 电缆接头界面区域空间电荷分布研究[J]. 中国电机工程学报,2022,42(10):3854-3864.
- WANG Yani, SUN Yuanyuan, ZHANG Shuai, et al. Study on interface region space charge distribution of HVDC cable joints based on molecular chain dynamics[J]. *Proceedings of the CSEE*,2022,42(10):3854-3864.
- [16] 屈靖江,崔宾,陈帅,等. 基于HFCT 传感器的高压XLPE 电缆局部放电带电检测方法和结果分析[J]. 电力大数据,2022,25(11): 69-76.
- QU Jingjiang, CUI Bin, CHEN Shuai, et al. Research of partial discharge in high voltage XLPE cables online detection method based on HFCT sensor and analysis of the results[J]. *Power Systems and Big Data*,2022,25(11):69-76.
- [17] 邓稼屹,王星华,聂一雄. 用于电缆接头在线监测的高频电流传感器设计[J]. 电力电子技术,2023,57(5):33-36.
- DENG Jiayi, WANG Xinghua, NIE Yixiong. Design of high frequency current transducer for online monitoring of cable joint [J]. *Power Electronics*,2023,57(5):33-36.
- [18] 左文启,谢励耘,张黎琳. 大型地下变电站GIS 现场绝缘试验方法[J]. 电力科学与技术学报,2010,25(2):32-36.
- ZUO Wenqi, XIE Liyun, ZHANG Lilin. Research on GIS insulation test method for large scale underground substation[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*,2010,25(2):32-36.
- [19] 刘云鹏,李岩松,黄世龙,等. 基于光纤传输的气体绝缘开关设备局部放电超声波检测系统[J]. 高电压技术,2016,42(11): 186-191.
- LIU Yunpeng, LI Yansong, HUANG Shilong, et al. Ultrasonic detection system for gas insulated switchgear partial discharge based on optical fiber transmission[J]. *High Voltage Engineering*,2016,42(11):186-191.
- [20] 余昌佳,郑建勇,何嘉弘,等. 时差筛选和ABC 二次寻优的变压器局放超声定位方法[J]. 高电压技术,2021,47(8):2820-2827.
- SHE Changjia, ZHENG Jianyong, HE Jiahong, et al. Ultrasonic localization method of transformer partial discharge by time difference screening and ABC secondary optimization[J]. *High Voltage Engineering*,2021,47(8):2820-2827.
- [21] 叶海峰,钱勇,王红斌,等. 开关柜表面暂态地电压信号频谱特征[J]. 高电压技术,2015,41(11):3849-3857.
- YE Haifeng, QIAN Yong, WANG Hongbin, et al. Spectrum characteristics of transient earth voltages aroused by partial discharge in switchgear[J]. *High Voltage Engineering*,2015,41(11): 3849-3857.

收稿日期:2024-05-14;修回日期:2024-06-12。

作者简介:

王晓康(1986—),男(汉族),高级工程师,主要从事高电压和电网设备带电检测的研究。