

低压交流故障电弧诊断综述

陈少雄,张蓬鹤,宋如楠,薛阳,陈敢超

(中国电力科学研究院有限公司,北京 100192)

摘要:电力安全是关乎能源可靠供应、人民生命财产安全的重要问题。近年来,我国电气火灾事故多发,低压交流故障电弧诊断尤其是串联故障电弧诊断技术难以适用于国内复杂的配用电系统,其准确性难以保证。因此,对国内外低压交流故障电弧的研究进展进行了总结,讨论了交流电弧模型和电弧高频特性的研究情况,进而分析了目前交流故障电弧诊断方法和串扰识别方法的适用条件及优缺点,涵盖利用电弧物理特征、电弧电压和电流信号的时频域特征阈值以及模式识别的诊断方法。最后分析了国内外部分电弧诊断装置的干路电弧诊断情况,指出低压交流故障电弧特性研究中的不足及故障诊断的难点,并展望了未来研究方向。

关键词:配用电系统;串联故障电弧;故障电弧特征;故障电弧诊断

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd26367

Review on Arc Diagnosis of Low Voltage AC Faults

CHEN Shaoxiong, ZHANG Penghe, SONG Runan, XUE Yang, CHEN Ganchao

(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Power safety is a critical issue related to the reliable supply of energy and the safety of people's lives and property. In recent years, electrical fire incidents have been frequent in China, and low-voltage AC fault arc diagnosis, especially for series fault arcs, is difficult to apply to the complex domestic power distribution systems, making its accuracy hard to guarantee. The research progress on low-voltage AC fault arcs both domestically and internationally was summarized, the studies on AC arc models and the high-frequency characteristics of arcs were discussed. The applicable conditions, advantages, and disadvantages of current AC fault arc diagnosis methods were further analyzed and crosstalk recognition techniques, diagnostic methods that utilize the physical characteristics of arcs, the time-frequency domain characteristics of arc voltage and current signals, and pattern recognition were covered. Finally, the arc diagnosis capabilities of some domestic and international arc diagnostic devices were analyzed, the shortcomings in the research on low-voltage AC fault arc characteristics and the difficulties in fault diagnosis were pointed out, and the future research directions was prospected.

Key words: power distribution system; series fault arcs; fault arc characteristic; fault arc diagnosis

低压电气安全技术对配用电系统稳定运行和保障用户安全用电具有重要意义,同电网运行息息相关且紧密相连。低压线路覆盖面广、点多、量大、拓扑结构复杂,极易引发因线路接触不良、老化破损导致的交流电弧故障。这些故障若未被及时诊断和处理,长时间的电弧燃烧不仅会对电路中的触点造成损害,还会因为伴随的能量释放而生成大量热能导致设备损坏甚至火灾事故,对系统的安全稳定运行构成威胁^[1]。

在配用电系统中,电弧故障主要包括并联、

接地和串联电弧故障。并联、接地电弧故障会导致线路电流显著增加,而串联电弧由于其阻抗作用反而可能会使电流下降,不触发继电保护装置动作。根据国家消防救援局的数据统计,电气火灾连续10年成为我国火灾事故的主因;2024年我国电气原因引发的火灾占比达到32.3%。作为导致电气火灾的主要因素之一,故障电弧在电气火灾中的占比超过70%^[2]。这种现象严重威胁着人民的生命和财产安全,也影响了电网的可靠性。在国外,分支线路上安装的故障电弧断路器

基金项目:国家电网有限公司科技项目(5700-202455276A-1-1-ZN)

作者简介:陈少雄(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向为故障电弧检测与分析技术研究,Email:c3202272090@163.com

已广泛应用。然而,目前我国电气火灾先进预警技术储备较为薄弱,串联故障电弧监测存在多维特征刻画难、抗干扰性差、无法实现干路诊断等问题。亟需加强我国的低压交流故障电弧诊断技术的自主创新。

国内外学者深入研究了低压交流故障电弧的模型、特性及其诊断技术,并取得了许多成果。本文回顾了有关低压交流电弧模型、高频特性及故障诊断技术的研究进展,分析了当前研究中存在的不足之处。这有利于推动低压交流系统未来的发展,增强其安全性和可靠性。

1 低压交流电弧特性

1.1 电弧数学-物理模型

交流电弧在交流电路中产生,其结构如图 1 所示,包括近阴极区、弧柱区及近阳极区。在电弧击穿过程中,大量自由电子会在阴极表面因热辐射和场辐射的作用释放到气隙中,从而产生电弧。热辐射的产生是由于接触点电流密度增加和温度升高,而场辐射则发生在两导体间距离较小且电场强度较高时。电弧过程中,表面凸起的蒸发和新场发射点的形成交替进行,这一过程使电弧得以持续存在^[3-5]。交流电弧电流会随着电源电压的周期性变化而周期性过零,并伴随电弧的熄灭与重燃,每半周期会出现“零休区域”。电弧电压与电流之间呈现非线性关系,表现为电阻的非线性特性。

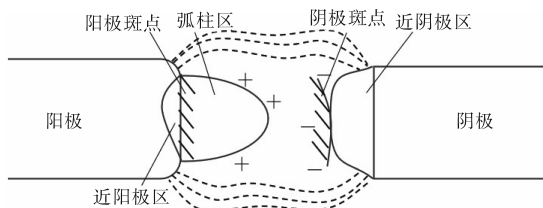


图 1 电弧构造

Fig.1 Arc structure

早期对电弧的研究主要依赖定性分析,由于计算能力和实验条件的限制,这些研究忽略了电弧复杂的动态运动过程。研究者在大量的假设下通过重复实验来探索电弧的宏观特性,并通过数值拟合方法建立了适用于不同实验标准的电弧数学经验模型。这些模型在处理大电流电弧时,具有较好的准确性和适配性。然而,这些模型在处理复杂低压环境下的小电流电弧时,表现出一定的局限性,不能提供同样的精确度。

国内外学者基于电弧特性进一步研究出了

各种电弧数学-物理模型。经典电弧动态模型有 Cassie 电弧模型和 Mayr 电弧模型^[6],前者假设电弧为一个直径随电流变化且截面温度分布均匀的圆柱形气体通道,能量散出主要由对流造成;而后者则将电弧假设为恒定直径的圆柱形通道,气体温度沿轴线逐渐降低,能量通过热传导和径向扩散以常数速率散出。两者都是将弧柱区等效为时变电阻而忽略电弧近极区效应,且仅考虑了电弧散热的单方面,分别基于不同的假设条件进行建模。然而实际情况下,电弧的能量散发是通过对流和径向传导的综合过程来完成的。学者们在 Cassie 和 Mayr 理论上提出了各种改进模型来更为精确地分析各工况下的电弧,包括 Schwarz, Schavemaker, Habedank 等电弧模型^[7-9],如表 1 所示。

表 1 常见的电弧数学-物理模型

Tab.1 Common mathematical and physical models of electric arcs

模型名称	电弧方程	参数
Cassie	$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u^2}{U_c^2} - 1 \right)$	电弧电压常量 U_c
Mayr	$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ui}{P} - 1 \right)$	散耗功率 P
Schwarz	$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau g^a} \left(\frac{ui}{P g^b} - 1 \right)$	a, b 分别为影响 τ, P 的参数
Schavemaker	$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left[\frac{ui}{\max(U_{arc}, i , P_0)} - 1 \right]$	U_{arc} 为大电流电弧电压
Habedank	$\frac{1}{g_c} \frac{dg_c}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left[\left(\frac{ug}{U_c g_c} \right)^2 - 1 \right]$	τ_c, τ_m 和 g_c, g_m 分
	$\frac{1}{g_m} \frac{dg_m}{dt} = \frac{1}{\tau_m} \left(\frac{u^2 g^2}{P_0 g_m} - 1 \right)$	别为 Cassie 和 Mayer 模型的时间常数电导
	$\frac{1}{g} = \frac{1}{g_c} + \frac{1}{g_m}$	

近年来,伴随配用电系统的复杂程度越来越高,研究者结合实际情况开展了各种串联电弧等效模型的研究。文献[10]考虑电弧电场及热场参数,构建了一个能够揭示交流电弧电热相互作用的时变电阻模型,分析表明故障电弧的能量释放强度与负载有功功率呈正相关。文献[11]提出一种基于神经网络的 Mayr-Schwarz 串联型故障电弧模型,对单相阻性/感性负载和三相异步电动机负载等多工况仿真,仿真波形在主要动态特征上与实验波形吻合,差异主要体现在谐波含量和局部尖峰值上,但误差均在合理范围内(<15%)。文献[12]考虑弧长对电弧动态伏安特性的影响,分析 220 V/50 Hz 交流工况下线路串联电弧在起弧、燃弧和将近熄弧三个阶段的伏安关系,建立

了碳-铜电极交流电弧模型。在多种线性、非线性负载下模型仿真计算与实验测量电流和电压波形的三、五、七次谐波及基波含量数值对比在20%以下(0~1 000 Hz),整体趋势变化一致,但仍存在轻微或剧烈的多样差异,反映出电弧的内在不稳定性或随机性,需要进一步研究;此外还需对其他电力电子类负载、多种负载下电弧进行仿真分析,提取共性特征。现有电弧模型无法完全提取不同负载条件下故障电弧的所有特性(固有随机性、高频特性等),存在参数经验依赖、场景泛化不足等问题。目前主要应用于理论研究和实验仿真分析,对于在不宜开展现场实验的供电系统开展串联型故障电弧诊断工作具有积极意义。

随着计算科学、电磁学和热力学的进步,电弧仿真研究已经从一维扩展到三维。学者们开始从电磁场、流体、等离子体等多个角度深入分析电弧的电-磁-热机理,进而构建了电弧的MHD数学模型^[13-14]。文献[15]通过热重试验初步建立了绝缘材料的热解动力学模型,并利用神经网络将其参数扩展到电弧的高升温速率条件,从而为电缆碳化路径的仿真提供了反应机理和参数基础。基于此,提出了一种电路-电弧-热解耦合模拟方法,建立了交流故障电弧下电缆碳化路径的三维数值模型,并计算了电弧热流耦合作用下电缆的碳化过程,分析了热解动力学参数及产气流速对电弧和电缆碳化的影响。这类模型聚焦于电弧动态特性的微观机制分析,难以直接适配系统级电路仿真需求。

1.2 交流电弧高频特性

交流电弧的高频特性主要包括电弧高频辐射及电弧故障线路中的高频电信号。相较于电弧高频辐射信号,电弧故障线路中的高频信号更易于获得、强度较强,是判定电弧故障的有效依据。学者们对交流电弧电流及电压的高频特性进行了广泛的探索。文献[16]通过设计的高频耦合电路采集电弧高频信号,分析发现,5种典型家用负载的高频特征明显频带在10 kHz~10 MHz之间,并设计了一种电弧故障高频信号补偿器,有效放大了电弧故障的高频信号幅值,扩展了信号频带。文献[17]对14种常见的家用负载进行了功率谱密度分析,大部分负载发生电弧故障时,功率突变在3 kHz以外。但电弧的高频特征也会受负载类型及工作状态的影响。需进一步探讨低压交流电弧产生高频电压和电流脉冲的机制。

目前关于分析低压交流电弧的电压电流高频特性的模型还不够精确,相关的文献中关于不同工况下高频电压电流特性变化及产生机制尚未被充分解析。文献[18]构建了一种改进的Mayer电弧模型,将稳定燃弧及零休期间的电弧分别等效为稳定电阻R及RLC串联电路,模型验证集中于阻性/阻感性负载的时域波形对比,但缺乏频域方面对比。仿真高频振荡集中表现为零休期间特征,而实际电弧的高频振荡在燃弧全阶段持续出现。在此基础上,文献[19]提出了一种基于RLC电路的电弧模型,用于模拟高频电弧电流的特性。该模型由电弧电阻、电弧电感及电容组成。在电弧稳定燃烧状态下,电弧表现为电阻和电感串联的低阻抗特性;而在熄弧和再点燃的过程中,电弧电阻则增大。仿真中,同时考虑了高频和低频路径,并在信号中加入了高斯白噪声,以更准确地模拟线路电流的实际情况。该模型在阻性/阻感性负载条件下仿真时域波形与实验波形相近,并在1 kHz~1 MHz频段内高频谐波幅值呈现一致性分布,但其仍需对高频段(>1 MHz)及更多非线性负载下做进一步分析,以便有利于提取不受负载特性影响的宽频带特征。

1.3 需要深入开展的研究工作

目前学者们对电弧等离子体的状态及其物理形成过程已有较为深入的了解,构建的各种经典电弧模型已被有效用于分析开关电弧等类型的电弧。然而,对于低压交流串联电弧,现有的电弧数学-物理模型不能很好反映不同负载影响下的电弧电流波形特征,无法复现电弧故障的固有随机性,还需进一步研究电弧的随机性和多样性。此外,低电压交流电弧产生高频电压和电流脉冲的机制尚未得到充分分析,相关文献报道较少。现有研究多是分析典型负载下电弧高频变化明显频带,通过各种算法和硬件电路来提取高频特征,或在典型模型基础上使用高斯噪声、模拟零休区间的LC振荡等方法模拟高频成分。还需深入探讨更多非线性负载下的交流电弧电压电流高频特性变化及产生物理机制,并明确其与电弧等离子体动态变化的关系,构建能较为精确反映不同负载影响下低压交流电弧高频特性动态变化的电弧模型。

2 低压交流故障电弧诊断

电弧诊断方法主要包括基于电弧物理特征、

基于电弧电压、电流时频域阈值和模式识别的方法^[20]。交流电弧的声、光、电磁波等物理特征及电压特性适用于诊断开关柜、配电柜等电弧发生位置比较确定的场景,而电流特性为低压配电线路串联故障电弧诊断的主要研究方向。

2.1 基于物理特征的方法

故障电弧诊断方法通常可分为三个阶段:信号提取、特征提取和故障分类^[21]。故障电弧的诊断方法如图2所示。

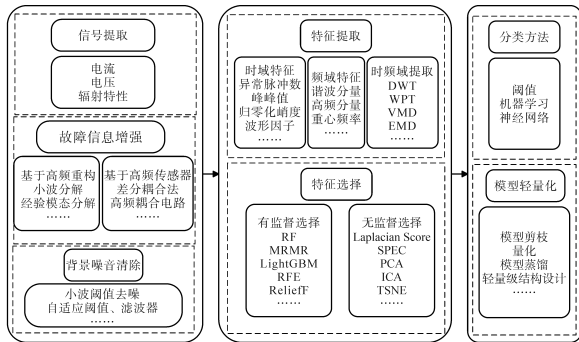


图2 故障电弧的诊断方法

Fig.2 Diagnostic method of arc fault

国内外学者研究了交流电弧发生时伴随的声、光、热和电磁辐射现象,利用传感器技术提取这些特性信号,当采集的辐射信号超过设定阈值,即可判断电弧故障发生。

电弧光信号通常应用于变电站、配电系统开关柜、大型厂矿供电系统等场景下检测故障电弧。ABB ARC Guard、弘毅 DPR 系列、VAMP 及 AFCI 等弧光保护系统通过弧光检测和电检测来识别特定区域内的故障电弧^[22]。弧声、电磁波等信号也常用于检测范围较固定的电弧。文献[23]分析发现通过环形天线接收的电弧辐射信号在不同电路电流、不同负载、不同电弧发生位置及发生时刻下的频率均分布在 13.6~14.2 MHz 之间,且振荡时间和特征频率均显著大于开关操作导致的信号,利用这两个特征来诊断故障电弧。但基于电弧物理特征的诊断方法不太适用于线路串联故障电弧诊断。一方面,电弧故障位置随机且不确定;另一方面,在复杂的用电环境中,空间噪声可能掩盖微弱的电弧辐射信号。此外,当声、光、热等明显的电弧信号出现时,通常意味着电弧已发展到较严重的阶段,而我们需要在电弧早期及时发现和预警。

2.2 基于电流和电压时频域阈值的方法

2.2.1 时域阈值法

时域阈值法是将电流、电压信号的时域特征

量与设定的阈值进行比较,以此来诊断交流电弧故障。当交流系统中发生串联故障电弧时,回路中的电流波形会出现毛刺、尖峰、平肩等畸变特征,而电弧电压会增大,波形类似矩形波。文献[24]提出了一种简单的电压能量阈值方法,通过计算电源处电压信号的瞬时左手(EL)能量、瞬时右手(ER)能量及对称能量来诊断串联故障电弧。文献[25]通过计算线路电流的代数导数来检测交流或直流系统中的串联电弧故障。该方法利用拉普拉斯空间中的泰勒麦克劳林级数计算导数,适用于不包括开关负载的交流电弧诊断。此外,还有利用零休息时间、方差、波峰因子、各种熵值、高阶累积量等电弧电流时域特征来诊断电弧^[26-27]。然而,对于由电流互感器提取的电弧电流信号,电弧特征在多负载情况下可能不明显,且电流波形易受负载类型影响。仅通过电流的时域特征不易精确判别是否发生电弧故障,抗干扰性差。因此大多数文献采用附加频域特征或采用各种算法、硬件电路增强电弧电流信号来诊断故障。

2.2.2 频域阈值法

频域阈值法是将电压、电流信号从时域转换到频域,通过比较设定阈值和频域特征来诊断交流故障电弧是否发生。常使用快速傅里叶变换(FFT)、离散傅里叶变换(DFT)、Chirp Zeta(CZT)变换等方法来分析故障电弧电流的频域特征。文献[28]采用了 CZT 变换对电弧电压、电流进行高分辨率低频频谱分析,这一方法相比 FFT 和 DFT 有效减轻了频谱泄漏现象。然而,实际诊断过程中,常受到负载复杂谐波信号的干扰。针对这一问题,文献[29]采用核主成分分析对电流信号中的负载噪声及高次谐波干扰进行有效分离,并提取信号的第 5、第 6 主分量的峰度和偏度作为电弧特征。尽管这些基于频域的分析方法为揭示电弧故障的瞬态特性提供了新的视角,有助于在特征选择中发现潜在的候选特征,但它们在抗噪性能方面的不足也制约了其在复杂环境下的应用潜力。

相较于时域和频域诊断方法,利用时频域法提取电弧电压、电流时频域特征可以实现更为精确的诊断。目前,提取电弧故障的时频特征主要采用小波变换(WT)、短时傅里叶变换(STFT)、经验模态分解(EMD)、Wigner-Ville 分布(WVD)及希尔伯特-黄变换(HHT)等方法^[30-31]。但时频域

分解算法的计算复杂度较高,这使得其效率成为一个缺陷。

2.3 基于电流和电压模式识别的方法

2.3.1 基于电流的模式识别方法

模式识别方法通过提取电压、电流信号时域、频域特征用来训练各种机器学习和神经网络算法,实现故障电弧诊断。实际情况中负载通常很复杂,本文参考文献[32-37]分析了线性负载、非线性负载、混合负载工况下故障电弧电流信号时、频域变化情况,故障前后特征如表2所示。在时频域阈值法中,阈值设置往往需要专家经验和大量的手动调整,负载波动(如电机启动、电磁炉

功率变化)会导致电流突变,与电弧故障特征相似,可能引发误判。然而,机器学习算法和神经网络算法能自适应地调整决策边界,提高了诊断系统的灵活性和鲁棒性,且在单一负载工况下故障电弧检测、功率调整对检测精度影响较小,这是因为故障特征主要与负载类型相关。混合负载工况下故障支路功率占比降低时,检测准确率可能会下降,因为故障信号被正常支路电流掩盖。例如文献[37]构建的基于邻波电流差与随机性的电弧故障诊断方法,在纯阻性负载发生电弧且故障支路与正常支路负载功率比为1:4时,识别准确率最低,为78.82%。

表2 不同负载下故障电弧电流特性

Tab.2 Fault arc current characteristics under different loads

负载类型		故障前后时域变化特征	故障前后频域变化特征
非线性负载	线性负载(电阻类)	电流有效值降低,出现零休区间,波形对称度、相似度下降。	频域波形上变化不明显,部分频段出现幅值尖峰,但整体与正常电流频域波形重叠。
	电机类(吸尘器、手持电钻、电容启动电机等)	故障零休现象明显,毛刺增多,半波消失,对称度和变化率显著波动。	低频段幅值略高,高频段与正常电流频域波形重叠。
	气体放电类(荧光灯、卤素灯等)	零休区间增大,高频谐波显著增加,电流波形对称度、相似度明显下降。	电弧电流频域幅值整体高于正常电流,部分频段尖峰更突出。
	电力电子类(调光灯、开关电源、电脑等)	波形不对称性加剧,相似度降低,畸变明显,正常状态有类弧“平肩”。	正常电流在部分频段幅值更高,与电弧频域波形存在大量重叠区域。
混合负载		正常与故障支路电流叠加,导致电弧的“零休”、幅值尖峰等时域特征被稀释,波形畸变程度降低,正常负载的高次谐波会掩盖故障电弧的高频特征,频域区分度降低。	

对于机器学习算法方面,学者们运用了支持向量机(SVM)、随机森林(RF)、K最近邻(KNN)、轻量级梯度提升机(LightGBM)等算法来实现电弧的诊断^[32]。文献[33]通过T检验和方差贡献率改进CEEMD方法来分解重构获得电流高频分量,并选用决策树方法筛选时频域特征,最后通过RF实现电弧诊断。此外,RF,LightGBM,PCA等方法也常被用来进行特征选择^[34],提高电弧故障诊断的准确性。

对于神经网络算法方面,学者们运用卷积神经网络(CNN)、Transformer神经网络(TNN)、概率神经网络(PNN)等算法来诊断故障电弧。文献[35]构建了一种基于CNN的电弧检测模型ArcNet并在Raspberry Pi 3B中进行了验证,将10 kHz采样频率下电流信号输入,电弧检测精度最高为99.47%。进一步的,文献[36]对网络进行了轻量化处理,构建Efficient-ArcNet来诊断电弧,准确率为99.36%。目前针对单负载工况下的电弧,文献[32-36]提出的方法具有较好的诊断效果,但对于多负载下电弧诊断效果还有待验证。考虑到我

国复杂的用电环境和电弧保护装置的易推广性,如果每个分支电路都安装了AFCI或AFDD,不可避免地会带来配电系统复杂、成本较高等问题,所以有必要实现干路电弧的精确诊断^[37-50]。针对家用多负载工况下的串联电弧,近年来一些文献提出的低压交流故障电弧诊断方法、采样率、准确率等情况如表3所示。

可以看出,对于多类型非线性负载下的故障电弧,通过有效提取故障电弧电流的高频特征并结合轻量化诊断方法更有利于实现电弧的精确诊断并应用到实际中。目前在提取方法方面主要分为两种,一是利用小波分解、离散小波分解、经验模态分解等算法来分解提取故障高频信息或加权重构放大故障信息^[38-40]。二是采用陷波滤波器、高频耦合滤波电路、高频电流传感器等硬件方法来有效提取电弧电流高频信号。文献[43]构建了一种陷波滤波器来提取高频分量,该滤波器以零频率为中心滤除直流分量,抑制低频分量。文献[44-45]构建了一种高频耦合滤波电路来有效提取串联电弧高频信号,该电路由高频耦

表 3 电弧故障诊断方法的比较
Tab.3 Comparison of arc fault detection methods

文献	诊断方法	负载数	f_s/kHz	准确率/%	实测测试
[34]	基于 LightGBM 和 FPS-FC 的特征选择方法筛选时频域特征,结合 KNN 和 DT 诊断	8 以上	—	98	1
[37]	利用电流信号邻波电流差确定故障的启动周期,并结合 1DCNN 诊断	6	100	90.97	0
[38]	小波分解(小波包基 sym4)重构放大信号,利用 Xgboost 诊断	6	10	99.95	0
[39]	EWT(阶数 6)分解信号,提取第五模态复合熵值并 PCA 降维,利用 PNN 诊断	6	100	98	0
[40]	采用 Wiener filtering 与 Arc-1DCNN 模型,并集成了高频特征注意模块	5	100	99.94	0
[41]	基于轻量化的 1DCNN 诊断电弧及故障选线	6	50	98.05	1
[42]	采用顺序浮动前向分别对三种负载类别提取特征,利用 KNN 诊断	14	10	99	0
[43]	采用陷波滤波抑制信号低频分量并提取特征,利用 AlexNet 诊断	10	5	98.50	0
[44]	高频耦合滤波电路提取高频分量,生成半波灰度图像结合 CNN 诊断	7	1 000	97.70	1
[50]	根据谱特征、期望裕度对差分耦合提取的信号进行自适应分解和重构	9	250	99.20	1

合传感器和带通滤波电路组成,可有效滤除电源低频分量。文献[46-49]通过差分耦合法捕获电流高频信号,即让零火线同时穿过高频电流互感器,其铁心磁通分布将不均匀,输出信号主要包含高频成分,且在单负载电路和多负载电路下的信号波形相似。但对于调光灯负载,通过这种方法提取的信号存在正常信号和电弧信号相混淆的问题。为此,文献[50]提出了一种基于谱特征的时间序列重构方法来滤除规则的正常脉冲,再利用切比雪夫距离(CM)和高阶中心矩(CD)来诊断故障电弧。结果表明,该方法具有良好的泛化性能和任意电路下的识别精度。但考虑到还有一些负载(例如有刷手电钻)正常工作产生的小电弧、旁路串扰等干扰会对这种通过提取电弧电流高频信号的诊断方法造成较大影响,且传输线对高频信号会造成一定的衰减。在之后的研究中,还需进一步研究负载正常工作的小电弧、旁路电弧信息在本路干路电流中变化情况(低频、高频)或结合电压信号来有效地排除干扰。

此外,民用领域所使用的电源、负载类型、环境条件等与工业领域有一定的区别。因此,针对家用多类型负载所提出的电弧方法可能难以直接应用于工业领域。针对航空电缆中短间隙电弧故障特性不明显的问题,文献[51]分析了基于差分耦合法提取高频信号的诊断方法的效果,发现在短间隙电弧识别中振动电弧故障伴有非脉冲信号,脉冲因子分析难以达到与家用负载电弧故障相同的识别效果。为此,该文献先通过经验模态分解(EMD)分解电流信号,利用相关系数和峰度指数选择最优固有模式函数(IMF),对信号进行加权重构并提取时域、频域和样本熵特征,再采用主成分分析降维来识别故障。文献[52]通

过广义 S 变换分析信号并对变化明显的 2 kHz 分量提取均方根值和能量,输入训练好的 PSO-SVM 进行诊断。文献[53]构建了一种基于 TNN 的故障电弧诊断模型,模型参数数量为 2 266,通过公开的电弧故障数据集证实了该模型在电弧故障诊断中的高准确率和低误报率。针对带变频器负载三相电机的串联电弧故障诊断问题。文献[54]构建了一种基于 CNN 的电弧故障诊断模型,通过瓶颈构建块、深度可分离卷积及屋顶线模型实现模型轻量化设计。采样频率为 2.5 kHz 时,精度高于 99.44%,运行时间小于 26.48 ms。

2.3.2 基于电压的模式识别方法

由于串联电弧故障发生时,故障点电弧电压信号变化明显且受负荷类型影响较小,一些学者通过分析电压信号来诊断并定位串联故障电弧。文献[55]分析电弧电压特性发现低频段电源和线路阻抗远小于负荷阻抗,而在高频段则接近,使得电压故障分量在低频和高频段分别集中在故障点下游负荷侧和故障点上游侧,从而提出了一种基于电压特征能量幅值和相位映射分布距离的电弧诊断方法。文献[56]提出了一种电压电流谐波幅值协同的双端测距方法,建立故障距离与分量幅度比在特征频率下的映射关系,实现了有效的故障诊断和定位。

但目前利用电压信号诊断住宅内的交流串联电弧故障也面临着很多挑战。电弧位置的不确定性使得电压数据的收集变得困难。在我国复杂的用电环境中,合理经济地布置上下游监测点以确保区域内电弧能被及时检测也是一个难点。未来,随着通信技术和智能家电的发展,可以将电弧诊断功能与用户信息、电力运行数据及内部智能设备采集的数据结合起来,从而更好地

挖掘用户的安全用电及电弧故障特征,提高故障电弧诊断的准确率,降低误报率。

2.4 串扰识别方法

在低压配电网中,所有的用户都是通过公共连接点接入电网,不同用户间存在一定程度的串扰问题。当周围旁路发生故障电弧时,电弧信号富含的高频成分很容易会被本路的检测装置识别到,从而检测装置的误脱扣操作。而传统故障电弧检测设备还无法较好地区分电弧与串扰信号,频繁的误脱扣动作使得检测设备难以大面积应用推广。目前的串扰识别方法:1)利用电压信号进行区分,需要较多传感器,若要在实际中应用,还有待于进一步研究;2)设计合适的采样电路使本路和旁路的电流信号产生变化,文献[57]提出了一种新的Y型取样电路方案(如图3所示),获取两个取样电阻两端电压信号 U_1 和 U_2 ,通过矢量分析计算,提取二者的幅值比与相位差特征来识别旁路串扰信号。文献[58]对采样电路稍作改进(去掉 R_3),实时采集高频电流信号并分段进行移位处理及累加,将最大移位累加和对应的所述高频电流分段信号进行移位后的点数作为所述特征量,设定动态阈值来识别串扰信号。但这两种方法在线路上串接了电感且对采样频率要求较高,采样频率都在5 MHz以上,对硬件要求较高,还需进一步研究更经济有效的采样电路。若还是考虑利用原有的高频电流互感器采样到的电流信号来诊断本路串联电弧,并排除旁路的串扰干扰,还应该进一步研究电弧发生时本路与旁路电流信号的高频、低频变化情况。

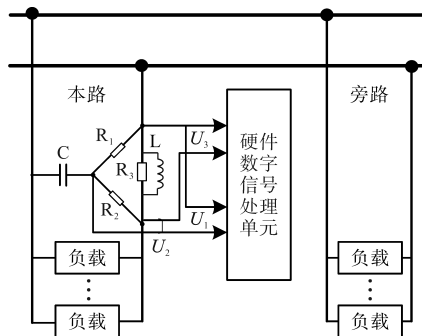


图3 Y型取样电路

Fig.3 Y-type sampling circuit

2.5 需要深入开展的研究工作

在故障诊断方面,现有的基于物理特征的方法难以区分不同类型的电弧故障,且易受环境干扰,更适用于小范围、封闭空间的故障电弧诊断。由于电流信号在工程上很容易获得且能够反映

整个电路的工作状态,因此现有的方法大多通过分析电流信号来诊断串联故障电弧。基于电流时频域阈值的诊断方法有一定的局限性,易受到工况的干扰,且不同系统中设定的阈值不同,需要选取有效的共性电弧特征。

基于电流模式识别的诊断方法可利用机器学习、神经网络可融合多维特征量并自适应设置阈值,突破了阈值诊断方法的局限。但存在着算法复杂和计算量大的问题,不易于硬件实现。为此学者们提出通过采用小波变换、高频耦合电路、差分耦合法等软硬件方法来有效地提取电弧电流高频信号,并结合轻量化的电弧诊断模型实现电弧诊断,但还需要在复杂用电环境中进一步对模型效果进行验证。未来交流电弧诊断待解决的问题:

1)随着电力系统向新型结构的转变,非线性负载的增加和回路结构的复杂化导致了故障电弧的诊断更加困难,特别是在多维特征刻画和抗干扰能力方面。针对我国复杂的用电环境,现有的轻量化电弧诊断方法需进一步部署到嵌入式设备中,测试识别性能,进一步开发适合主干线路的具备普适性、灵敏性、轻量化的故障电弧诊断方法。

2)需要研究低压交流电弧发生时电压、电流高频信号的传播与衰减情况,分析旁路发生电弧时本路检测到的电弧信号低频、高频信息变化情况,设计合适的采样装置或构建非侵入式串扰识别方法,合理经济地解决串扰问题,提高现有诊断方法的抗干扰能力。

3 低压故障电弧诊断装置

目前国内外几十余家生产企业相继推出了低压电弧诊断装置,但现有的故障电弧诊断技术准确率并不高。本文对国内外部分交流故障电弧诊断装置进行了测试,对比结果如表4所示,最小监测电流及监测距离分别为3 A和100 m。实验表明,基于干路检测的低压故障电弧诊断装置漏报率可达25%以上,误报率甚至可达70%以上。当识别支路增加、负载类型超过5种时,准确率更是大幅降低。国际标准IEC 62606中规定了输出电压220 V、输出电流3~63 A的电弧诊断要求,但也仅考虑了3 A以上电流负载、分支线路(终端),未考虑3 A以下小电流负载、汇集支路及干扰负载等因素,等同采用的国标GB/T 31143仅

作为国内相关产品检测使用,未能指导低压电弧诊断装置成熟应用,无论是最小监测电流、漏报率、误报率、监测距离还是覆盖场景类型,均无法满足电气火灾预警可靠应用需求,还有待于进一步研究。

表 4 国内外部分故障电弧诊断装置对比
Tab.4 Comparison of some fault arc diagnostic devices at home and abroad

型号	1	2	3	4	5	6
输入电压/V	230	230	240	230	220	230
工作电流/A	20	40	32	32	45	32
最大动作时间/s	3.5	5.7	6.2	1.3	2.5	1.8
干路漏报率/%	56.9	30.3	48.2	3.5	25.0	58.9
干路误报率/%	0.0	0.0	41.6	75.0	33.3	0.0
监测频率/MHz	15 以内	15 以内	15 以内	100 以内	1 以内	15 以内

此外,在当前的电弧故障诊断系统中,信号采集依赖于前端电路和板级处理器来完成数据计算和处理,这导致系统便携性不足且成本较高。因此,需要进一步开发和完善电弧芯片以解决这些问题。目前已有一定的成果,例如 2022 年国内企业鼎信通讯开发的由 TC8501 芯片构成的电弧故障保护器已正式进入应用阶段,芯片内置超高速采样率的模数转换器及智能神经网络算法,可进行串联、并联及接地电弧检测。

4 结论

低压交流串联故障电弧中由于具有随机性且易受线路负载干扰而难以诊断,影响配用电系统稳定运行。国内外学者已对低压交流故障电弧的特性及其诊断技术进行了深入研究,部分电弧诊断方法已经开始了应用。为提高故障电弧诊断方法的准确性,更好地应用于配用电系统中诊断故障电弧,未来可能要在以下方面开展深入研究:

1) 低压交流电弧模型方面,需要进一步研究多负载影响下的电弧伏安特性,深挖交流电弧随机性的内在机理和宏观可量化特征。还需对低压交流电弧高频电压和电流脉冲的产生原因做进一步分析,对交流电弧电压电流的高频特性进一步解释,有利于解决电弧诊断及定位问题。

2) 低压交流电弧诊断方面,进一步深入分析宽频带电弧的时频域特征,以提高在各种非线性负载和环境耦合情况下的故障诊断精度及抗干扰能力,设计出轻量化、高准确度、高可靠性、可

解释性的主干线路故障电弧诊断方法。

3) 电弧故障诊断系统方面,需要进一步开发完善电弧高频信号提取电路及诊断芯片,构建低成本、高集成度的电弧故障诊断系统。

参考文献

- [1] 周锐,刘江虹,丛北华. 串联故障电弧检测技术研究现状及展望[J/OL]. 电测与仪表, (2024-09-14) [2024-12-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20240913.1734.002.html>.
ZHOU Rui, LIU Jianghong, CONG Beihua. The current research progress and prospect of series arc fault detection technology[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation, (2024-09-14) [2024-12-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20240913.1734.002.html>.
- [2] 秦译为,张蓬鹤,宋如楠,等. 新型电力系统下电弧故障诊断技术及发展趋势[J]. 电测与仪表, 2024, 61(2): 1-9.
QIN Yiwei, ZHANG Penghe, SONG Runan, et al. Arc fault diagnosis technology and trends of development in new power system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(2): 1-9.
- [3] SHEA J, CARRODUS J B. RF current produced from electrical arcing[C]//2011 IEEE 57th Holm Conference on Electrical Contacts (Holm), 2011.
- [4] SHEA J J, ZHOU X. RF currents produced from AC arcs with asymmetrical electrodes[C]//2010 Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 2010: 1-11.
- [5] 聂义民. 低压短间隙电弧故障建模与仿真[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
NIE Yimin. Modeling and simulation of low voltage short gap arc fault[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [6] 刘艳丽. 矿井供电系统串联型故障电弧数学模型及诊断方法研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2017.
LIU Yanli. Research on mathematical model and diagnosis methods of series arc fault in mine power supply system[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2017.
- [7] WANG Y, LIU Z, MU X, et al. An extended habedank's equation-based EMTP model of pantograph arcing considering pantograph-catenary interactions and train speeds[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3): 1186-1194.
- [8] 高杨,王莉,张瑶佳,等. 简化的 Schavemaker 交流电弧模型参数的计算方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 96-105.
GAO Yang, WANG Li, ZHANG Yaojia, et al. Research on the calculation method for the parameters of the simplified Schavemaker AC arc model[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 96-105.
- [9] 李玮祯,曲娜,张帅,等. 基于小波分析和 Schwarz 模型的串联电弧故障仿真研究[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(9):

- 1260-1263.
- LI Weizhen, QU Na, ZHANG Shuai, et al. Research on arc fault simulation based on Schwarz model and wavelet analysis [J]. Fire Science and Technology, 2020, 39(9): 1260-1263.
- [10] 郑梦笛, 吴细秀, 闫格. 基于新型故障电弧模型的电弧能量特性分析[J]. 中国电力, 2015, 48(11): 49-53.
- ZHENG Mengdi, WU Xixiu, YAN Ge. Investigation on fault arc energy under different load based on the new time varying resistance fault arc model[J]. Electric Power, 2015, 48(11): 49-53.
- [11] 郭凤仪, 王鑫, 刘艳丽. 基于Mayr模型改进的适用于串联故障电弧的新模型[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(2): 67-71.
- GUO Fengyi, WANG Xin, LIU Yanli. New improved model for series arc fault based on Mayr model[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(2): 67-71.
- [12] 汪洋堃. 低压交流电弧的动态特性与故障检测方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- WANG Yangkun. Research on dynamic characteristics and fault detection methods of low-voltage AC arcs[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.
- [13] ZHANG Z, NIE Y, LEE W J. Approach of voltage characteristics modeling for medium-low-voltage arc fault in short gaps[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(3): 2281-2289.
- [14] 李兴文, 贾申利, 张博雅. 气体开关电弧物性参数计算及特性仿真研究与应用[J]. 高电压技术, 2020, 46(3): 757-771.
- LI Xingwen, JIA Shenli, ZHANG Boya. Research and application on physical parameters calculation and behavior simulation of gas switching arc[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3): 757-771.
- [15] 唐昭晖, 许志红, 叶骁勇. 交流故障电弧作用下电缆碳化的实验与仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(23): 9496-9506.
- TANG Zhaohui, XU Zhihong, YE Xiaoyong. Experimental and numerical investigation of cable carbonization under AC fault arc[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(23): 9496-9506.
- [16] 毛忠安. 电弧故障高频信号在双导线中传输衰减及补偿研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2019.
- MAO Zhong'an. Research on high-frequency signal attenuation and compensation of arc fault based on double conductor transmission line[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2019.
- [17] ZHANG P, QIN Y. Series arc-fault diagnosis using convolutional neural network via generalized S-transform and power spectral density[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2024, 18(19): 3029-3041.
- [18] 江润, 方艳东, 鲍光海, 等. 适用于低压串联故障电弧的Mayr改进模型[J]. 电器与能效管理技术, 2019(21): 14-18.
- JIANG Run, FANG Yandong, BAO Guanghai, et al. An improved Mayr model applicable to low voltage series arc faults[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2019(21): 14-18.
- [19] 高小庆, 陈晓军, 鲍光海. 考虑故障电弧电流高频特征的阻抗电弧模型[J]. 电器与能效管理技术, 2021(3): 6-12.
- GAO Xiaoqing, CHEN Xiaojun, BAO Guanghai. Impedance arc model considering high-frequency characteristics of fault arc current[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2021(3): 6-12.
- [20] 熊庆, 陈维江, 汲胜昌, 等. 低压直流系统故障电弧特性、检测和定位方法研究进展综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 6015-6026.
- XIONG Q, CHEN W J, JI S C, et al. Review of research progress on characteristics, detection and localization approaches of fault arc in low voltage DC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 6015-6026.
- [21] RIBA J R, MORENO-EGUILAZ M, ORTEGA J A. Arc fault protections for aeronautic applications: a review identifying the effects, detection methods, current progress, limitations, future challenges, and research needs[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-14.
- [22] 周林, 曹天怡. 电弧光保护作为母线主保护在中低压开关柜的应用和讨论[J]. 供用电, 2016, 33(12): 47-53, 57.
- ZHOU Lin, CAO Tianyi. Applications and discussions of arc flash protection relay as a main busbar protection in MV/LV switchboards[J]. Distribution & Utilization, 2016, 33(12): 47-53, 57.
- [23] KE Y, ZHANG W, SUO C, et al. Research on low-voltage AC series arc-fault detection method based on electromagnetic radiation characteristics[J]. Energies, 2022, 15(5): 1-17.
- [24] KIM J C, NEACȘU D O, BALL R, et al. Clearing series AC arc faults and avoiding false alarms using only voltage waveforms[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(2): 946-956.
- [25] TISSERAND E, LEZAMA J, SCHWEITZER P, et al. Series arcing detection by algebraic derivative of the current[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 119: 91-99.
- [26] 刘金鹏. 基于双特征模糊融合的低压交流串联故障电弧检测方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2022.
- LIU Jinpeng. Research on low voltage AC series arc fault detection method based on dual-feature fuzzy fusion[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022.
- [27] 金翠, 刘洋, 李琦, 等. 基于CatBoost的常用电器负载电弧故障识别方法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(7): 193-200.
- JIN Cui, LIU Yang, LI Qi, et al. CatBoost-based AC arc fault identification method for common electrical loads[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(7): 193-200.
- [28] ARTALE G, CATALIOTTI A, COSENTINO V, et al. Arc fault detection method based on CZT low-frequency harmonic current analysis[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(5): 888-896.
- [29] HAN C, WANG Z, TANG A, et al. Recognition method of AC series arc fault characteristics under complicated harmonic conditions[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-9.
- [30] ZHANG Z, REN J, TANG X, et al. Novel approach for arc fault identification with transient and steady state based time-frequency

- quency analysis[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(4): 4359-4369.
- [31] 邱婷婷, 曹文平, 刘孝宇, 等. 多时间尺度小波变换和 LSTM 自编码器电弧故障检测方法[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(4): 139-148.
- QIU T T, CAO W P, LIU X Y, et al. Multi time scale wavelet transform and LSTM autoencoder arc fault detection method[J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(4): 139-148.
- [32] 杨帆, 宿磊, 杨志淳, 等. 基于改进 CEEMDAN 分解与时空特征的低压供电线路串联故障电弧检测[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(12): 72-81.
- YANG Fan, SU Lei, YANG Zhichun, et al. Series fault arc detection in low voltage power supply line based on improved CEEMDAN decomposition and spatial-temporal features[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(12): 72-81.
- [33] 江永鑫, 陈丽安, 郭梦倩, 等. 基于改进 CEEMD 和 RF 的低压串联故障电弧识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(1): 97-108.
- JIANG Yongxin, CHEN Li'an, GUO Mengqian, et al. Identification method of low voltage series fault arc based on improved CEEMD decomposition and RF[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(1): 97-108.
- [34] DU L, XU Z, CHEN H, et al. Feature selection-based low-voltage AC arc fault diagnosis method[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 1-12.
- [35] WANG Y, HOU L, PAUL K C, et al. ArcNet: series AC arc fault detection based on raw current and convolutional neural network[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(1): 77-86.
- [36] PAUL K C, ZHAO T, CHEN C, et al. Efficient-ArcNet: series AC arc fault detection using lightweight convolutional neural network[C]// IEEE Energy Conversion and Congress Exposition (ECCE), 2021: 1327-1333.
- [37] 丁锐, 陈羽, 孙伶俐, 等. 基于邻波电流差与随机性的交流串联电弧故障识别[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(8): 169-178.
- DING Rui, CHEN Yu, SUN Lingyan, et al. Series arc fault detection in low-voltage AC power lines based on absolute difference of the neighboring waveform of the current and randomness[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(8): 169-178.
- [38] 罗晨, 喻锐, 曾祥君, 等. 基于高频重构信号与 Bayes-XGBoost 的低压电弧故障辨识方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(13): 91-101.
- LUO Chen, YU Kun, ZENG Xiangjun, et al. Low voltage arc fault identification method based on high frequency reconstructed signal and Bayes-XGBoost[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(13): 91-101.
- [39] 王毅, 刘黎明, 李松浓, 等. 基于经验小波变换复合熵值与特征融合的故障电弧检测[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1912-1919.
- WANG Yi, LIU Liming, LI Songnong, et al. Arc fault detection based on empirical wavelet transform composite entropy and feature fusion[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1912-1919.
- [40] LIU H, LI J, WANG W, et al. Arc-1DCNN: an enhanced model for series arc fault detection[J]. Measurement, 2024, 234: 114814.
- [41] TANG A, WANG Z, TIAN S, et al. Series arc fault identification method based on lightweight convolutional neural network[J]. Network Daily News, 2024, 29: 35-35.
- [42] ZHANG Y, CHEN H C, LI Z, et al. Lightweight AC arc fault detection method by integration of event-based load classification[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(4): 4130-4140.
- [43] 巩泉役, 彭克, 陈羽, 等. 基于电弧随机性和卷积网络的交流串联电弧故障识别方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(24): 162-169.
- GONG Quanyi, PENG Ke, CHEN Yu, et al. Identification method of AC series arc fault based on randomness of arc and convolutional network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(24): 162-169.
- [44] CHU R, SCHWEITZER P, ZHANG R. Series AC arc fault detection method based on high-frequency coupling sensor and convolution neural network[J]. Sensors, 2020, 20(17): 4910.
- [45] 褚若波, 张认成, 杨凯, 等. 基于多层卷积神经网络的串联电弧故障检测方法[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4792-4798.
- CHU Ruobo, ZHANG Rencheng, YANG Kai, et al. A series arc fault detection method based on multi-layer convolutional neural network[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4792-4798.
- [46] 鲍光海, 江润. 基于磁通不对称分布的串联电弧故障检测研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(3): 54-61.
- BAO Guanghai, JIANG Run. Research on series arc fault detection based on asymmetrical distribution of magnetic flux[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(3): 54-61.
- [47] BAO G, GAO X, JIANG R, et al. A novel differential high-frequency current transformer sensor for series arc fault detection[J]. Sensors, 2019, 19(17): 3649.
- [48] BAO G, JIANG R, GAO X. Novel series arc fault detector using high-frequency coupling analysis and multi-indicator algorithm[J]. IEEE Access, 2019, 7: 92161-92170.
- [49] BAO G, JIANG R, LIU D. Research on series arc fault detection based on higher-order cumulants[J]. IEEE Access, 2019, 7: 4586-4597.
- [50] JIANG R, ZHENG Y. Series arc fault detection using regular signals and time-series reconstruction[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(2): 2026-2036.
- [51] JING T, HUANG D, MI Z, et al. An intelligent recognition method of a short-gap arc in aviation cables based on feature weight enhancement[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(4): 3825-3836.
- [52] 崔芮华, 佟德栓, 李泽. 基于广义 S 变换的航空串联电弧故

(下转第 96 页)

- 2014, 44(6):793-804.
- [10] ZHOU Peng, DU Liang, LI Xuejun, et al. Unsupervised feature selection with adaptive multiple graph learning[J]. Pattern Recognition: The Journal of the Pattern Recognition Society, 2020, 105:107375.
- [11] 杨东旭. 煤矿提升机智能监控及故障诊断技术的研究[J]. 自动化应用, 2023, 64(21):101-103.
- YANG Dongxu. Research on intelligent monitoring and fault diagnosis technology of coal mine hoist[J]. Automation Application, 2023, 64(21):101-103.
- [12] 郭代华. 基于改进多尺度散布熵与自适应支持向量机的滚动轴承故障诊断[J]. 轴承, 2022(11):76-82.
- GUO Daihua. Fault diagnosis for rolling bearings based on improved multiscale dispersion entropy and adaptive support vector machine[J]. Bearing, 2022(11):76-82.
- [13] MIKHAIL Belkin, PARTHA Niyogi. Laplacian eigenmaps for dimensionality reduction and data representation[J]. Neural Computation, 2003, 15(6):1373-1396.
- [14] ZHU Ying, ZHANG Li, FAN Jin, et al. Neural basis of cultural influence on self-representation[J]. Neuroimage, 2007, 34(3):1310-1316.
- [15] YAN Xiaolan, JIA Minping. Intelligent fault diagnosis of rotating machinery using improved multiscale dispersion entropy and mRMR feature selection[J]. Knowledge-Based Systems, 2019, 163:450-471.
- [16] 李强, 车文龙. 基于改进粒子群优化神经网络的电机故障诊断[J]. 电气传动, 2020, 50(1):103-108.
- LI Qiang, CHE Wenlong. Motor fault diagnosis based on improved particle swarm optimization neural network[J]. Electric Drive, 2020, 50(1):103-108.
- [17] 杨柳, 白朝元, 范平志. 一种压缩感知测量矩阵的联合优化算法[J/OL]. 西南交通大学学报: (2023-05-06)[2024-07-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20230506.0935.004.html>.
- YANG Liu, BAI Chaoyuan, FAN Zhiping. A cooptimization algorithm for measurement matrix of compressive sensing[J/OL]. Journal of Southwest JiaoTong University: (2023-05-06)[2024-07-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20230506.0935.004.html>.
- [18] 邓文博, 刘帅, 刘福才, 等. 基于压缩感知和 DNA 编码的图像加密算法[J]. 计算机工程与科学, 2022, 44(9):1574-1582.
- DENG Wenbo, LIU Shuai, LIU Fucui, et al. An image encryption algorithm based on compressed sensing and DNA coding[J]. Computer Engineering and Science, 2022, 44(9):1574-1582.
- [19] HUANG Pei, KONG Zhaoming, XIE Mengying, et al. Robust unsupervised feature selection via data relationship learning[J]. Pattern Recognition, 2023, 142:109676.
- [20] FISHER R A. The use of multiple measurement in taxonomic problems[J]. Annals of Eugenics, 1936, 7(2):179-188.

收稿日期:2024-07-11

修改稿日期:2024-09-11

(上接第12页)

- 障检测[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(23):8241-8249.
- CUI Ruihua, TONG Deshuan, LI Ze. Aviation arc fault detection based on generalized S transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(23):8241-8249.
- [53] CHABERT A, BAKKAY M C, SCHWEITZER P, et al. A transformer neural network for AC series arc-fault detection[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 125:106651.
- [54] WANG Z, TIAN S, GAO H, et al. An on-line detection method and device of series arc fault based on lightweight CNN[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, 19(10):9991-10003.
- [55] WANG W, XU B, ZOU G, et al. Arc fault detection method based on voltage characteristic energy amplitude and phase mapping distribution distances[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 225:109866.
- [56] 曹俊腾, 王玮, 贾明娜, 等. 电压电流谐波幅值协同的串联电弧故障测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(24):9909-9922.
- CAO Junteng, WANG Wei, JIA Mingna, et al. A series arc fault location method based on voltage and current harmonic amplitude coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(24):9909-9922.
- [57] 马越, 王建华, 刘振, 等. 一种基于矢量分析计算的电弧串扰信号识别方法: 中国, CN202011638482.5[P]. 2022-06-21.
- MA Yue, WANG Jianhua, LIU Zhen, et al. Vector analysis calculation-based arc crosstalk signal identification method: China, CN202011638482.5[P]. 2022-06-21.
- [58] 刘庆鑫, 王建华, 赵利波, 等. 动态阈值判别串扰电弧的装置、方法、系统、设备及介质: 中国, CN202310152490.6[P]. 2023-04-28.
- LIU Qingxin, WANG Jianhua, ZHAO Libo, et al. Device, method, system, equipment and medium for discriminating crosstalk arc by dynamic threshold: China, CN202310152490.6[P]. 2023-04-28.

收稿日期:2024-12-17

修改稿日期:2025-04-14