

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.06.012

中压电缆早期故障多物理场仿真及时频特征分析

赵景涛¹, 王毅松^{2,3}, 秦卉¹, 黄焯志¹, 张军¹, 石超群^{2,3}, 徐阳^{2,3}

(1. 国电南瑞科技股份有限公司, 南京 211161; 2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049;
3. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

摘要: 电缆的早期故障通常伴随着间歇性电弧产生, 在电流过零点附近自主熄弧, 表现为故障自清除, 该过程的物理变化尚不明确。由于间歇性电弧放电持续时间极短, 传统继电保护设备难以识别到早期故障, 需要提取合适的特征对早期故障信号进行辨识。文中基于磁流体动力学理论(magneto hydro dynamics, MHD)开展了中压电缆的多物理场仿真研究, 分析了1/4周波间歇性电弧电流密度、磁场强度与温度分布的变化, 并对仿真波形作短时傅里叶变换(short-time Fourier transform, STFT), 得到早期故障的频域特征。结果表明, 电缆早期故障时出现高频分量, 在Hanning窗处理的5 kHz频率下与正常运行时差异明显, 振幅差距可达85 dB。而Hamming窗的处理效果较差, 需要考虑选取或结合适当的特征进行识别。

关键词: 自恢复故障; 间歇性电弧; 磁流体动力学; 时频变换; 故障识别

Multi-physical Field Simulation and Time-frequency Characteristic Analysis of Incipient Fault in Medium Voltage Cables

ZHAO Jingtao¹, WANG Yisong^{2,3}, QIN Hui¹, HUANG Xizhi¹, ZHANG Jun¹,
SHI Chaoqun^{2,3}, XU Yang^{2,3}

(1. Nari Technology Co., Ltd., Nanjing 211161, China; 2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Incipient faults in cables are often accompanied by intermittent arcing, with self-extinguishing of the arc occurring near the current zero-crossing point, manifesting as self-fault clearance. However, the physical changes during this process are still not well understood. Due to the very short duration of intermittent arc discharge, it is difficult for traditional relay protection equipment to identify incipient faults and appropriate features need to be extracted to identify incipient fault signals. In this paper, based on the magneto hydro dynamics theory (MHD), the multi-physical field simulation of medium voltage cables is performed to analyze the variation of current density, magnetic field intensity and temperature distribution during a quarter cycle of intermittent arcing. Short-time Fourier transform (STFT) is performed on the simulation waveform so to obtain the frequency domain characteristics of the incipient fault. The results show that in case of incipient fault in cables there is a high frequency component, which is obviously different from the normal operation under the 5 kHz frequency treated by Hanning window, and the amplitude difference can be up to 85 dB. While, the Hamming window has a weak processing effect, so it is necessary to select or combine appropriate features for identification.

Key words: self-fault clearance; intermittent arc; MHD; time-frequency transformation; fault identification

收稿日期:2025-11-10; 修回日期:2026-01-21

基金项目:南瑞集团有限公司科技项目(SGNRGF00XAJ2301698)。

Project Supported by Science and Technology Project of NARI Group Corporation(SGNRGF00XAJ2301698).

0 引言

随着现代电力系统的发展与建设,电缆线路的规模日益增大,对电缆的状态监测与故障预警提出了更高的要求。近年来,中压电缆早期故障得到了广泛重视,并被认为是电缆故障预警的重要依据^[1]。

电缆的早期故障最早由佛罗里达电力公司发现,录波数据显示,电缆电压波形突然在峰值附近下降,持续1/4周期,随即自行恢复正常。该现象出现的频率越来越高,直至演变为永久性故障^[2]。随着相关研究的开展,对电缆早期故障的认知不断深入。李露露等人通过开展实验,认为电缆早期故障存在多种间歇性电弧形态^[3]。Simon M. Rowland等人对中压油纸绝缘电缆的早期故障开展实验研究,通过盐水溶液浸泡并加热处理,监测到了从局部放电至早期故障再到永久性故障的一系列信号^[4]。André Hamel等人研究了不同接地方式以及潮湿或干燥环境下的电缆故障特征^[5]。研究表明,电缆早期故障普遍具有以下特征^[6]:①出现间歇性电弧放电;②放电时间极短,传统继保设备无法识别;③通常在过零点附近恢复正常。

由于电缆早期故障与间歇性电弧放电密切相关,因此对电弧的建模分析尤为重要。当前主流的电弧仿真模型可分为两大类,即黑盒模型与磁流体动力学模型。黑盒模型包括Cassie模型、Mayr模型及Kizilcay模型等,能够对电弧的外特性进行计算,求解速度快,缺点在于无法对电弧内部的物理过程进行研究^[7-9]。磁流体动力学模型则依靠有限元方法,对电弧进行网格划分并通过多物理场耦合关系进行求解,得到电弧内部的物理分布特性^[10-12]。

目前在电缆早期故障的研究中,由于真实电缆线路早期故障的录波数据有限,因此一般基于黑盒模型仿真获取信号波形,再对信号进行分析,忽略故障的物理变化过程。主流的早期故障信号识别方法有两类,其中一类是对信号进行时频特征提取,利用得到的特征参量构建阈值判据,区分出其他过流扰动信号,实现电缆早期故障的辨识^[6,13-14],另一方法是基于神经网络模型对信号直接进行识别^[15-17]。Teymoor Ghanbari对电缆单端信号进行测量,并构建了基于卡尔曼滤波的早期故障识别方法^[18]。Amir Farughian等人通过负序电流与零序电流的谐波分析,仅需电流信号即可实现辨识^[19]。Saurabh Kulkarni等人通过小波变换与特征分析,对电缆早期故障与架空线其他故障进行区分^[20]。唐辰旭等人则利用蝗虫优化算法及k-means算法实现配网的早

期故障识别^[21]。瞿科等人基于波形衰减因子表征电缆接头的早期故障发展阶段,并采用Prony算法监测电缆的运行状态^[22]。谢卓越对故障样本进行特征挖掘,并构建基于卷积神经网络及残差网络的故障分类模型,用于早期故障的辨识^[23]。熊思衡等人通过将早期故障波形分为不同的基元,利用分层概率学习方法实现小样本条件下的早期故障辨识^[24]。Mohsen Jannati等人采用CU-SUM算法对暂态扰动信号进行检测,然后利用ADALINE神经网络算法实现对扰动信号的识别^[25]。

电缆早期故障的定位一般是通过信号与距离的相关特征计算实现的。Wenhai Zhang等人认为电缆早期故障的谐波畸变率随故障距离而变化^[26]。Saurabh Kulkarni等人通过计算线路阻抗估计故障点距离^[27]。刘欣桐利用随机森林算法进行故障分类识别,用最小二乘法估算电缆阻抗,得到故障位置信息^[28]。A.R. Herrera-Orozco等人通过时域系统模型与参数估计策略进行电缆早期故障的定位^[29]。张姝等人基于双层阻抗模型推导早期故障的回路方程,并通过电缆首端监测波形结合最小二乘回归法确定故障位置^[30]。

在上述研究中,电缆早期故障的波形获取、识别与定位已经积累了较多的工作,重点集中在故障的波形特征上,但是故障发生时电缆内部物理变化尚不明晰,波形特征与物理变化之间的联系还不透彻,需要进一步研究。目前,电缆早期故障的识别与定位研究均依赖于仿真获取的信号及其时频特征,基于磁流体动力学理论进行间歇性电弧的多物理场仿真,有利于精确化描述早期故障的物理过程。相较于以往研究采用的小波变换、谐波分析与神经网络等信号分析方法,短时傅里叶变换算法复杂度较低且能够反映出故障期间短时内的频谱信息,为信号特征、故障识别提供支撑。通过对信号的时频变换分析,为早期故障识别的特征选取提供了依据。

1 中压电缆早期故障的仿真模型构建

1.1 几何结构

典型的10 kV中压电缆截面见图1。内部为三芯结构,分别承载相位差为120°的正弦电压,外部为内护套、金属护套与外护套。

以YJV22-8.7/10-3×400 mm²电缆为例,其几何尺寸与材料见表1。中压电缆早期故障的间歇性电弧发生在放电通道内部,导体与金属屏蔽构成一对电极。考虑到导体屏蔽与绝缘屏蔽较薄,可将其合

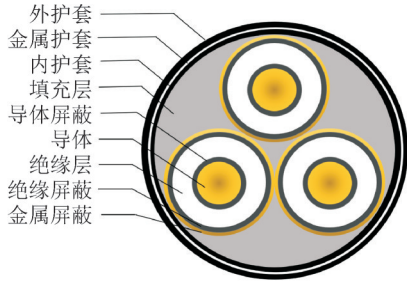


图1 10 kV中压电缆典型截面图

Fig. 1 10 kV medium voltage cable typical section

并至绝缘层,在不影响放电通道长度的前提下,降低网格划分与求解的难度。

表1 10 kV电缆的尺寸与材料

Table 1 Dimension and materials of 10 kV cable

结构	材料	外径/mm
导体	铜	23.8
导体屏蔽	聚烯烃	25.4
绝缘层	交联聚乙烯	34.4
绝缘屏蔽	聚烯烃	36.0
金属屏蔽	铜	36.2
填充层	聚丙烯	76.8
内护套	聚氯乙烯	84.8
金属护套	铝	86.4
外护套	聚氯乙烯	94.4

在电缆上方一相的绝缘层内部构造直径为0.5 mm的缝隙,模拟早期故障的放电通道,见图2。早期故障发生时,放电通道内部引发燃弧,表现为电弧性接地,熄弧后则又恢复正常运行。

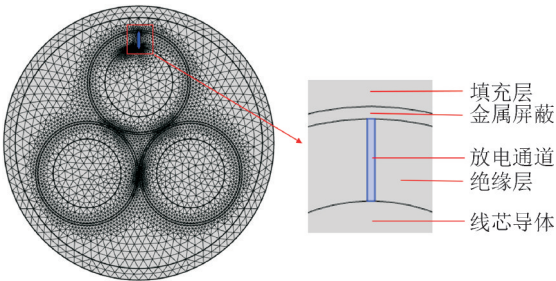


图2 放电通道示意图

Fig. 2 Discharge channel diagram

1.2 数学模型

电弧的内部物理过程复杂,涉及到多物理场之间的耦合作用。基于磁流体动力学理论,对中压电缆早期故障的间歇性电弧进行仿真分析,模型由以下控制方程构成。

质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

式(1)中: ρ 为流体密度; t 为时间; \mathbf{v} 为流体运动的速度矢量。

动量守恒方程:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = \nabla \cdot \left\{ -p \mathbf{I} + \mu \left[\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T \right] - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{v}) \mathbf{I} \right\} + \mathbf{F} \quad (2)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (3)$$

式(2)、(3)中: p 为流体受到的压力; μ 为流体的动力黏度; \mathbf{I} 为单位矩阵; \mathbf{F} 为流体受到的外力,即洛伦兹力; \mathbf{J} 为电流密度矢量; \mathbf{B} 为磁通密度矢量。

能量守恒方程:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{v} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_H \quad (4)$$

$$S_H = \frac{1}{\sigma} \mathbf{J}^2 - Q_{\text{rad}} + S_\phi \quad (5)$$

$$S_\phi = \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{5K_B T}{2q} \right) (\nabla T \cdot \mathbf{J}) \quad (6)$$

式(4)-(6)中: T 为等离子体温度; C_p 为恒压比热容; λ 为热导率; S_H 为等离子体热源; σ 为电导率; Q_{rad} 为总体积辐射; S_ϕ 为無传递项; K_B 为玻尔兹曼常数; q 为电子的电荷量。

气体状态方程

$$p = \rho r T \quad (7)$$

式(7)中, r 为理想气体常数。

电磁场方程组

$$\begin{cases} \nabla \cdot (-\sigma \nabla \varphi) = 0 \\ \mathbf{E} = -\nabla \varphi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \\ \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \\ \nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{B} \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中: φ 为电势; \mathbf{E} 为电场强度矢量; \mathbf{A} 为磁矢势矢量。

1.3 仿真参数

设置仿真时长为60 ms,即3个工频周波。当时时间为15 ms与45 ms时引发燃弧,因此本仿真中出现两次早期故障,分别起始于第1周波负半周期峰值与第3周波正半周期峰值,持续1/4周期,在后续第1个过零点附近熄弧,电缆的电压、电流波形随之恢复正常。仿真过程中电缆的状态见图3。

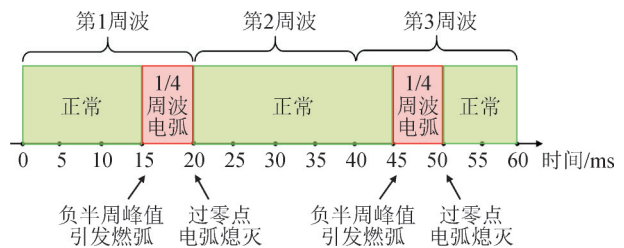


图3 仿真时序图

Fig. 3 Simulation sequence diagram

仿真电路的设置见图4,在电缆的三相导体上施加额定电压,每一相为5.8 kV,相位差为120°,并将金属屏蔽层接地。设置电缆运行时电流为200 A,

因此负载电阻为 $29\ \Omega$ 。

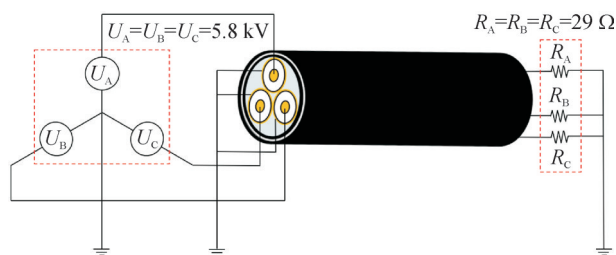


图4 电路示意图

Fig. 4 Schematic circuit diagram

2 间歇性电弧特性分析

2.1 电压、电流波形

仿真得到的电缆监测波形见图5,由电压与电流波形构成。从图中可看出,电缆的监测波形出现两次扰动,分别位于 $15\sim 20\text{ ms}$ 与 $45\sim 50\text{ ms}$,即 $1/4$ 周波电弧发生期间,其余时间则处于正常状态,符合仿真参数设置时预估的现象。

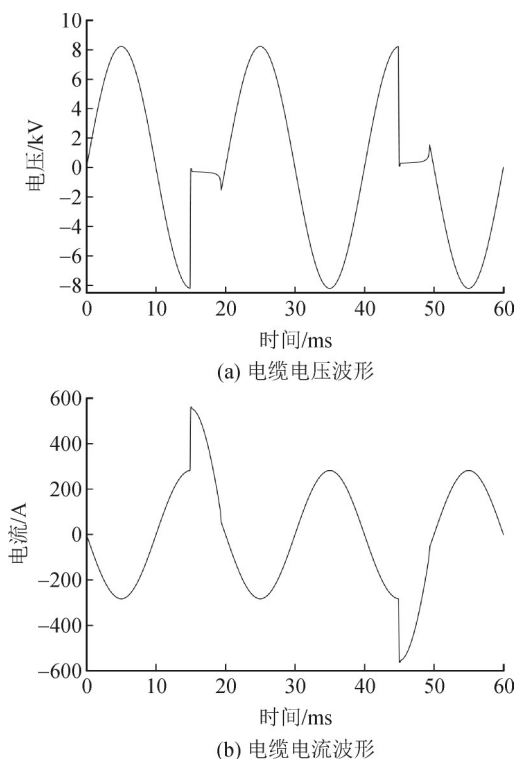


图5 电缆信号波形

Fig. 5 Cable signal waveform

结合电压与电流的波形,对电缆早期故障时域特征进行分析。两次早期故障波形在数值大小上几乎一致,仅发生的起始时间不同。当 $1/4$ 周波电弧发生时,由于电缆线芯导体经电弧接地,电压从峰值处骤降至 284 V ,电流在峰值基础上激增至约 563 A 。此后电压缓慢增加,电流呈现为正弦波形,与正常运行时仅有数值上的差异。在接近过零点时,电压突然迅速变大,随后又快速下降,形成一个

尖峰,且电流波形在该尖峰处恢复正常。其原因是过零点附近电流快速减小,电弧的输入功率不足以维持燃烧,弧柱温度迅速降低,等离子体的电导率降低,使得电压快速上升。当达到电压尖峰时,电弧彻底熄灭,此后电流与电压恢复正常波形且迅速下降,经过过零点。

因此,电缆早期故障的时域波形特征为:电压在峰值处骤降,且在过零点前形成尖峰,电流在峰值处激增,两者均在尖峰处恢复正常。

2.2 电磁分布特性

两次放电的电流密度变化趋势大致相同,呈现为细长柱状分布,且电流密度较高区域位于弧柱的中央与两端。由于弧柱上端的金属屏蔽层电极半径较大,形成了平板状的高电流密度区域,见图6。线芯导体的半径较小,因此弧柱下端的高电流密度区域为点状。弧柱中央的高电流密度区域则为长条状。

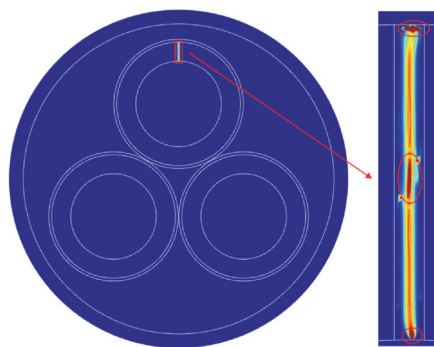


图6 电流密度分布特点

Fig. 6 Current density distribution characteristic

电流密度分布见图7,在 16 ms 与 46 ms 时,弧柱中央电流密度模的大小可达到 $2.3 \times 10^6\text{ A/m}^2$,弧柱整体则大致为 $1.5 \times 10^6\text{ A/m}^2$ 。随着电弧电流逐渐减小,当时间为 19 ms 与 49 ms 时,弧柱中央及整体的电流密度模分别降低至约 $7.4 \times 10^5\text{ A/m}^2$ 与 $5.6 \times 10^5\text{ A/m}^2$ 水平。弧柱上下两端在整个放电时长内均处于较高电流密度,量级可达 10^7 A/m^2 。

缝隙内的磁场强度分布见图8。当电流经过电弧时,由于电流的磁效应,产生以弧柱为中心,环绕着弧柱分布的磁场。在 16 ms 与 46 ms 时,磁场强度模可达 130 A/m ,此后随着电流降低而逐渐减小。在 19 ms 与 49 ms 时,磁场强度模约为 34 A/m 。弧柱内部的磁场强度保持在极低水平,基本接近于零。

2.3 温度分布特性

缝隙内的温度分布见图9。弧柱的两端均出现局部高温区域,这与电流密度模的分布相符。在 16 ms 与 46 ms ,电弧的局部最高温度可达 $1.0 \times 10^4\text{ K}$,弧柱的整体温度约为 $5.5 \times 10^3\text{ K}$ 。在 19 ms 与 49 ms ,

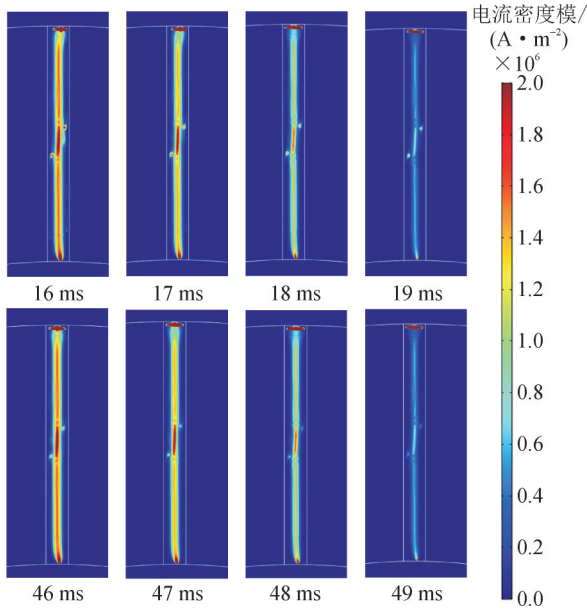


图7 电流密度分布

Fig. 7 Current density distribution

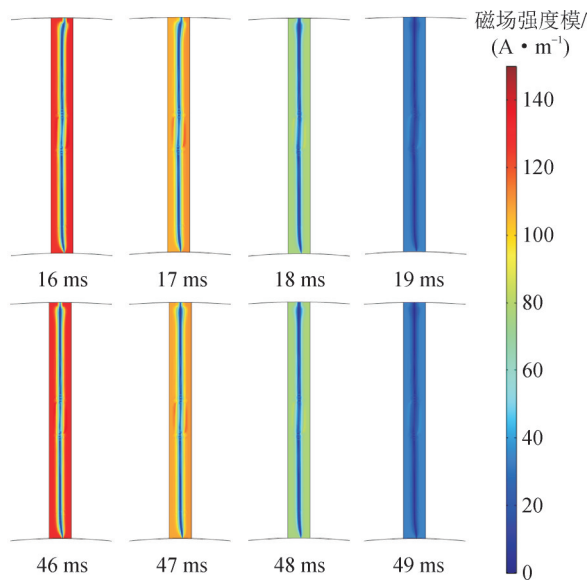


图8 磁场强度分布

Fig. 8 Magnetic field intensity distribution

局部高温点降低至 7.5×10^3 K, 弧柱整体温度约为 4.5×10^3 K。由于放电时间极短, 电弧的高温对绝缘层产生的影响较小, 因此中压电缆早期故障会持续多次电弧放电, 并且形成损伤积累, 最终造成电弧引燃后无法自熄, 导致永久性故障。

2.4 物理参量与故障波形的关联性分析

从故障的电压、电流波形可获得电弧的电导率随时间变化曲线, 并取弧柱内部中心点的电流密度模、温度值与电导率变化曲线进行对比, 见图 10。可见电流密度、温度与电导三者之间呈现出相同的趋势, 均在早期故障引发的瞬间突增, 然后逐渐下降。从多物理场变化过程来看, 缺陷因电场畸变发

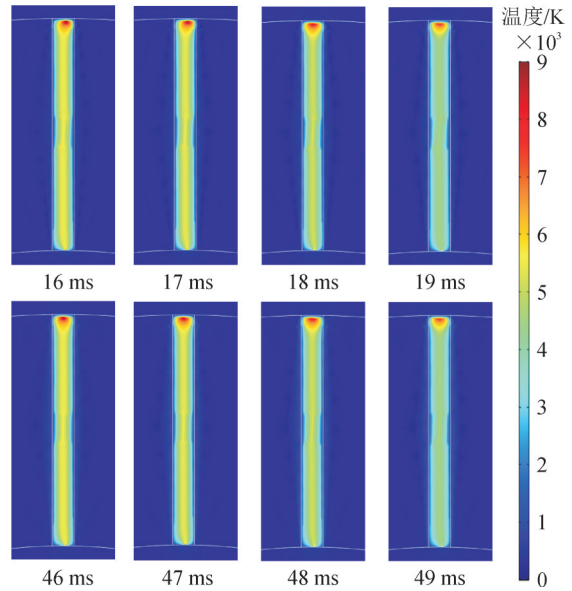


图9 温度场分布

Fig. 9 Temperature field distribution

生击穿并形成电弧时, 电流密度增加导致温度升高, 引起电弧电导升高, 使得电流密度进一步提升, 互相促进形成陡增。随后由于电压经过峰值, 开始逐渐下降, 电流、温度与电导也随之下降, 在过零点附近时, 电导降低至一定水平, 电弧熄灭。

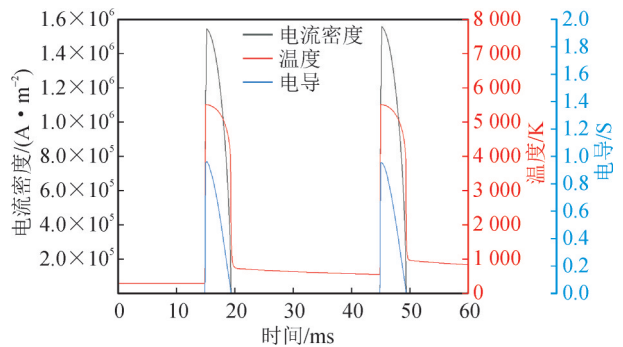


图10 不同参量随时间变化曲线

Fig. 10 Curve of different parameters with time

因此, 早期故障的变化在物理过程中以电流为主导, 通过温度影响电导, 从而影响电压波形的变化。在磁流体动力学理论中, 磁场主要通过洛伦兹力影响电弧的形态, 主要为各物理场的空间分布, 对电压、电流曲线在数值上的影响较小。

3 中压电缆早期故障的时频特征

3.1 STFT算法

由于电缆的早期故障信号在时域中容易与其他扰动混淆, 例如电机启动、变压器涌流与电容投切均可能导致电流激增。若单一以时域特征作为早期故障的识别依据, 则有可能引发误判, 降低识别的准确率。因此, 有必要对信号进行时频变换处

理,在频域提取故障信号的特征,形成时频参量复合判据,有利于实现对早期故障的精准识别。

短时傅里叶变换通过滑动有限窗函数对离散信号进行处理,避免造成频谱泄露,并进行时频变换得到实时信号中局部有限长度的频域信息。分别利用Hanning窗函数与Hamming窗函数对电压信号进行处理。

Hanning窗函数的表达式为

$$w(n) = \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(2\pi \frac{n}{N}\right) \right] \quad 0 \leq n \leq N \quad (9)$$

Hamming窗函数的表达式为

$$w(n) = 0.54 - 0.46 \cos\left(2\pi \frac{n}{N}\right) \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (10)$$

以1/4工频周期作为滑动窗口长度,对仿真的电压信号加窗处理,设置交叠长度为1/8工频周期,进行STFT分析。不同频率下振幅计算公式为

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} w(n) \cdot x(n) e^{-i\frac{2\pi}{N}nk} \quad k=0,1,2,\dots,N-1 \quad (11)$$

求得的频谱图具有时间、频率与振幅3个维度,可对单一时刻、不同频率或不同时刻、单一频率的振幅进行分析,得到随频率或时间变化的特征。

3.2 频域特征分析

对仿真获取的电压波形进行短时傅里叶变换,加Hanning窗与加Hamming窗的电缆电压信号频谱分别见图11、12,电缆早期故障发生时,电压出现骤降,短时傅里叶变换后的频谱则出现高频分量。

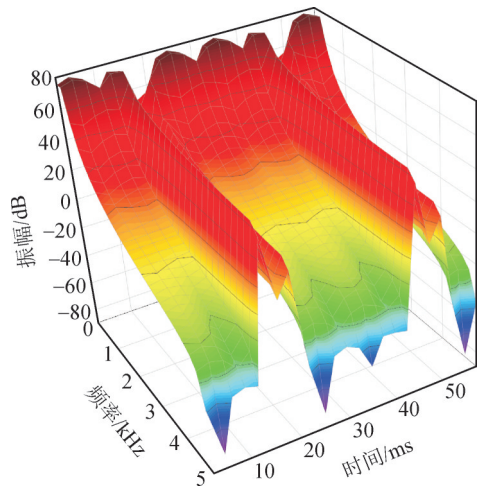


图11 加Hanning窗的频谱图

Fig. 11 Spectrum diagram with Hanning window

加Hanning窗的频谱图在电缆正常运行的区间内较为平滑,随时间变化较小。直流分量的振幅约75 dB,随着频率升高,振幅呈现下降趋势,在5 kHz下均低于-40 dB。在电缆出现早期故障的时间区间内,电压波形包含了连续的高频信号,频谱图出现两个尖峰,第一个尖峰从直流分量至5 kHz分量均

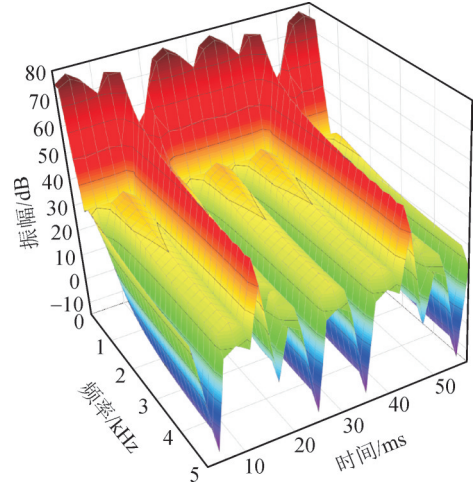


图12 加Hamming窗的频谱图

Fig. 12 Spectrum diagram with Hamming window

保持在40 dB以上,第二个尖峰的工频分量相较于正常运行时更低,约为66 dB随频率升高逐渐下降,在5 kHz下接近20 dB。

加Hamming窗的频谱图在电缆正常运行的时间区间内出现波动。振幅在电压正负半周期峰值附近快速下降形成向下的尖峰,在5 kHz频率下振幅低至-11 dB。在过零点附近则较为平缓,基本处于25~40 dB之间。在电缆发生早期故障的时间区间内,出现一个向上的尖峰与一个向下的尖峰。向上的尖峰出现连续高频成分,同样从0至5 kHz几乎均保持在50 dB以上。向下的尖峰相较于正常运行时正负半周期峰值时的小,在0~0.2 kHz内约为50 dB,在0.4 kHz以上则从34 dB下降至6 dB。

施加两种窗函数后不同频率下的振幅随时间变化曲线分别见图13、14。

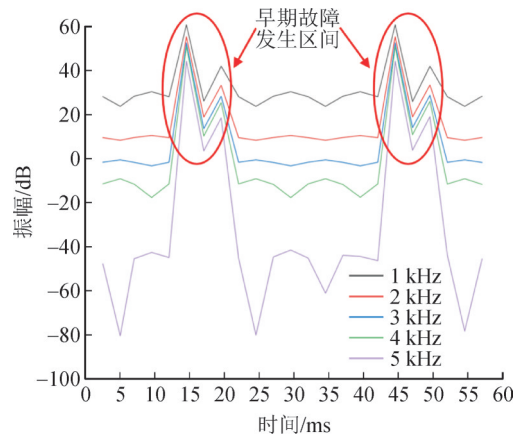


图13 加Hanning窗后不同频率的振幅曲线

Fig. 13 Amplitude curves at different frequencies with Hanning window

加Hanning窗处理的振幅曲线在不同频率下差异较明显,尤其在5 kHz频率,电缆正常运行时振幅最高为-41 dB,最低为-80 dB,早期故障发生时可达

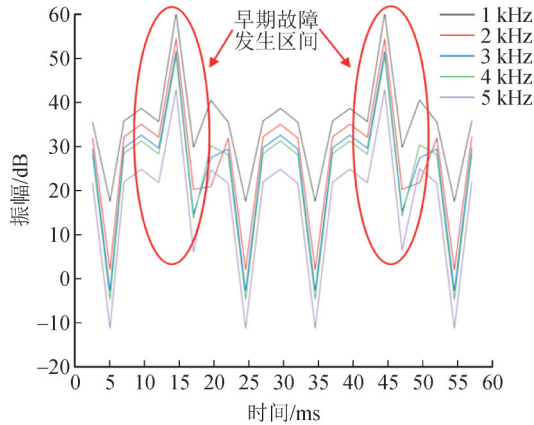


图14 加Hamming窗后不同频率的振幅曲线

Fig. 14 Amplitude curves at different frequencies with Hamming window

44 dB,数值上差异最小也达到了85 dB,因此可用电压信号加Hanning窗作STFT后的5 kHz分量振幅大小作为早期故障识别的特征参量之一。

加Hamming窗处理的振幅曲线在正常运行区间的振幅较高,且在多个频率下均与早期故障时的向上尖峰差异较小,基本在20 dB左右。此外,由于正常运行时会出现向下尖峰,若以此为特征进行早期故障的识别,则可能对故障发生区间内的向下尖峰造成误判。因此,单独采用Hamming窗对电压信号的处理效果较差,需要考虑选取或结合其他适当的特征,提高识别的准确率。

通过不同频率下的分量随时间变化与早期故障期间的电气波形、物理参量对比,可知早期故障时由于电缆故障点内部的电弧高温作用,引起电导与电流骤增,导致电压出现突降,通过短时傅里叶变换对该突变点进行捕捉,能够在早期故障发生的时间区间内出现振幅尖峰,体现了从物理过程到故障波形再到频谱分布的变化。

4 结论

文中基于磁流体动力学理论对电缆的早期故障进行多物理场建模仿真,获取电缆运行时电压、电流的时域信号,并分析间歇性电弧的物理过程。采用STFT对电压信号进行时频变换,得到不同频率与不同时间下的振幅,并对分析Hanning窗函数与Hamming窗函数的处理效果。最终得到结论如下:

1)电缆发生早期故障时,在正负半周波峰值引发间歇性电弧,其电流密度与温度分布均呈现为弧柱两端更高的特点,磁场则环绕弧柱分布。以上物理量均随着电流的减小降低,最终于过零点附近熄灭。

2)经Hanning窗处理后,在同一频率下,发生早

期故障时振幅出现两个向上尖峰,而正常运行时振幅较小。当频率为5 kHz时,两者之间的差异可达85 dB。可依据此特点,将5 kHz分量的振幅大小作为早期故障识别的特征参量之一。

3)加Hamming窗处理的效果较差,正常运行与发生早期故障时的振幅差异仅约为20 dB,因此需要考虑选取或结合适当的特征,提高识别准确率。

参考文献:

- [1] 任广振,王云鹤,曹俊平,等. 电力电缆初期绝缘故障检测方法综述[J]. 重庆大学学报,2023,46(11):1-12.
REN Guangzhen, WANG Yunhe, CAO Junping, et al. Review of incipient insulation fault detection methods for power cables[J]. Journal of Chongqing University, 2023, 46(11): 1-12.
- [2] KOJOVIC L A, WILLIAMS C W. Sub-cycle detection of incipient cable splice faults to prevent cable damage[C]/2000 Power Engineering Society Summer Meeting(Cat. No.00CH37134). USA: IEEE, 2000: 1175-1180.
- [3] 李露露,李永培,周新月,等. 10 kV交联聚乙烯电缆内部多形态间歇性电弧故障建模[J]. 电工技术学报,2022,37(23):6104-6115.
LI Lulu, LI Yongpei, ZHOU Xinyue, et al. Modeling of internal multiform intermittent arc fault for 10 kV XLPE cable[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(23): 6104-6115.
- [4] ROWLAND S M, WANG Miao. Fault development in wet, low voltage, oil - impregnated paper insulated cables[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(2): 484-491.
- [5] HAMEL A, GAUDREAU A, COTE M. Intermittent arcing fault on underground low - voltage cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(4): 1862-1868.
- [6] SAMET H, KHALEGHIAN S, TAJDINIAN M, et al. A similarity-based framework for incipient fault detection in underground power cables[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021(133): 107309.
- [7] MAYR O. Beiträge zur theorie des statischen und des dynamischen lichtbogens[J]. Archiv Fur Elektrotechnik, 1943, 12(37): 588-608.
- [8] 贾 科,李昱霖,毕天姝,等. 基于早期故障判别的直流并网系统主动保护[J]. 电工技术学报,2025,40(5):1427-1439.
JIA Ke, LI Yulin, BI Tianshu, et al. Incipient fault identification based active protection of DC collection line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(5): 1427-1439.
- [9] KIZILCAY M, PNIOK T. Digital simulation of fault arcs in power systems[J]. European Transactions on Electrical Power, 1991, 1(1): 55-60.
- [10] KARETTA F, LINDMAYER M. Simulation of the gasdynamic and electromagnetic processes in low voltage switching arcs[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part A, 1998, 21(1): 96-103.
- [11] 吴祺嵘,徐婧涵,张国钢,等. 基于真型试验和磁流体仿真的电缆

- 单相接地故障电弧场路耦合模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2026, 54(4): 25-37.
- WU Qirong, XU Jinghan, ZHANG Guogang, et al. Arc field-circuit coupling modelling of cable single-phase-to-ground faults based on full-scale tests and magnetohydrodynamic simulations[J]. Power System Protection and Control, 2026, 54(4): 25-37.
- [12] 李兴文, 陈德桂. 空气开关电弧的磁流体动力学建模及特性仿真[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(21): 31-37.
- LI Xingwen, CHEN Degui. Magnetohydrodynamics modeling and characteristics simulation of air switching arc[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(21): 31-37.
- [13] DON RUSSELL B, BENNER C, WISCHKAEMPER J, et al. Incipient electric circuit failure detection and outage prevention using advanced electrical waveform monitoring: Field experience[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2023, 29(3): 36-45.
- [14] 王晓卫, 魏春燕, 王毅钊, 等. 基于护层接地线电流和分段TKEO的电缆早期故障检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(13): 47-58.
- WANG Xiaowei, WEI Chunyan, WANG Yizhao, et al. Early fault detection method for cables based on sheath grounding current and segmented TKEO[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(13): 47-58.
- [15] 徐子弘. 基于降噪自编码器和优化卷积神经网络的地下电缆早期故障检测和识别方法[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
- XU Zihong. Detection and identification of underground cable incipient faults based on denoising autoencoder and optimized convolutional neural network[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.
- [16] 斯捷, 陈植, 赵建, 等. 基于阻抗谱的电力电缆绝缘缺陷诊断函数故障定位与状态评估方法研究[J]. 电测与仪表, 2025, 62(7): 217-224.
- SI Jie, CHEN Zhi, ZHAO Jian, et al. Research on fault location and state evaluation method of diagnostic function for power cable insulation defects based on the impedancespectrum[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(7): 217-224.
- [17] 周正雄, 夏向阳, 朱鹏, 等. 高压电缆早期间歇性电弧接地故障识别方法[J]. 中国电力, 2020, 53(12): 167-176.
- ZHOU Zhengxiong, XIA Xiangyang, ZHU Peng, et al. Identification method for incipient intermittent arc ground fault of high-voltage cables[J]. Electric Power, 2020, 53(12): 167-176.
- [18] GHANBARI T. Kalman filter based incipient fault detection method for underground cables[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2015, 9(14): 1988-1997.
- [19] FARUGHIAN A, KUMPULAINEN L, KAUHANIEMI K, et al. Intermittent earth fault passage indication in compensated distribution networks[J]. IEEE Access, 2021(9): 45356-45366.
- [20] KULKARNI S, ALLEN A J, CHOPRA S, et al. Waveform characteristics of underground cable failures[C]//IEEE PES General Meeting. USA: IEEE, 2010: 1-8.
- [21] 唐辰旭, 吉畅. 基于GOA-kmeans的电缆早期故障诊断技术研究[J]. 四川水力发电, 2022, 41(5): 92-96.
- TANG Chenxu, JI Chang. Research on cable early fault diagnosis technology based on GOA-kmeans[J]. Sichuan Water Power, 2022, 41(5): 92-96.
- [22] 瞿科, 张文海, 肖先勇, 等. 基于波形衰减因子的电缆接头绝缘早期故障状态监测[J]. 高电压技术, 2022, 48(1): 318-327.
- QU Ke, ZHANG Wenhai, XIAO Xianyong, et al. Condition monitoring for incipient faults of cable joint insulation based on waveform attenuation factor[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 318-327.
- [23] 谢卓越. 基于残差网络的电缆早期故障辨识技术研究[D]. 南宁: 广西大学, 2022.
- XIE Zhuoyue. Research on incipient cable failures identification technology based on residual network[D]. Nanning: Guangxi University, 2022.
- [24] 熊思衡, 刘亚东, 方健, 等. 配电线路早期故障辨识方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(11): 3970-3976.
- XIONG Siheng, LIU Yadong, FANG Jian, et al. Detection method of incipient faults of power distribution lines[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 3970-3976.
- [25] JANNATI M, VAHIDI B, HOSSEINIAN S H. Incipient faults monitoring in underground medium voltage cables of distribution systems based on a two-step strategy[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(4): 1647-1655.
- [26] ZHANG Wenhai, XIAO Xianyong, ZHOU Kai, et al. Multicycle incipient fault detection and location for medium voltage underground cable[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1450-1459.
- [27] KULKARNI S, SANTOSO S, SHORT T A. Incipient fault location algorithm for underground cables[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(3): 1165-1174.
- [28] 刘欣桐. 基于单端信号的10 kV地下电缆早期故障识别与定位[D]. 镇江: 江苏大学, 2022.
- LIU Xintong. Incipient fault identification and location of 10 kV underground cable based on single-ended signal[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022.
- [29] HERRERA-OROZCO A R, BRETAS A S, OROZCO-HENAO C, et al. Incipient fault location formulation: A time-domain system model and parameter estimation approach[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017(90): 112-123.
- [30] 张姝, 林圣, 唐进, 等. 基于双层阻抗模型的三相单芯电缆自恢复故障定位[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 1-10.
- ZHANG Shu, LIN Sheng, TANG Jin, et al. Fault location of self-clearing fault in three phase single core cables based on double impedance model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 1-10.
- 赵景涛(1978—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为分布式电源、配电网自动化等领域的研究(通信作者)(E-mail: zhaojingtao@sgepri.sgcc.com.cn)。