

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241709

## 边界主动构建式低压交流串联电弧故障检测方法

宋国兵, 陈锐, 常仲学, 闫吉飞

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 准确、经济、可靠地检测串联电弧故障是预防电气火灾的重要途径之一。针对低压交流配电系统单端量串联电弧检测中故障位置难以判别、暂态分量难以提取的问题, 提出一种能够隔离故障区间同时降低故障特征提取难度的边界主动构建式串联电弧故障检测方法。首先, 分析了串联电弧故障产生的高频分量特征, 指出仅靠线路的自然衰减作用无法保证故障判别的绝对选择性。然后, 分析了在线路边界处设置铁氧体磁环对串联电弧高频分量特征的影响规律。最后, 利用线路附加磁环边界后的特征, 构建了反映磁环边界内外侧邻波压差的串联电弧故障检测方法。研究发现, 所提边界元件能够显著衰减高频分量的传输, 实现故障区间高频分量的隔离, 且基于边界处高频电压的检测方法降低了对高精度电流传感器设备的依赖。实验结果表明, 该方法能有效避免区外故障干扰, 实现了低压配电系统串联电弧故障的可靠检测。

**关键词:** 低压交流系统; 串联电弧; 铁氧体磁环; 边界作用; 高频分量

### Boundary-active construction method for low-voltage AC series arc fault detection

SONG Guobing, CHEN Rui, CHANG Zhongxue, YAN Jifei

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Accurate, economical, and reliable detection of series arc faults is one of the key approaches to preventing electrical fires. To address the challenges in single-ended series arc detection in low-voltage AC distribution systems, specifically, the difficulty in identifying the fault location and extracting transient components, a boundary-active series arc fault detection method is proposed, which can isolate the fault zone while reducing the complexity of fault feature extraction. First, the characteristics of the high-frequency components generated by series arc faults are analyzed, revealing that relying solely on the natural attenuation of the line cannot ensure absolute selectivity in fault identification. Then, the influence of ferrite magnetic ring boundary on the high-frequency characteristics of series arc faults is analyzed. Finally, based on the characteristics introduced by the added magnetic ring boundary, a detection method is developed that identifies series arc faults by analyzing the differential voltage of adjacent waves on both sides of the magnetic boundary. It is found that the proposed boundary element can significantly attenuate the propagation of high-frequency components, effectively isolating the fault zone's high-frequency signals. Moreover, the boundary-based high-frequency voltage detection method eliminates the need for high-precision current sensors. Experimental results show that the proposed method can effectively avoid the interference from external faults and achieve reliable detection of series arc faults in low-voltage distribution systems.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52107123).

**Key words:** low-voltage AC system; series arc; ferrite magnetic ring; boundary effect; high-frequency component

## 0 引言

电气火灾对人民的生命与财产安全带来了极大的威胁, 大量研究数据表明, 低压配电线路的故障电弧是引起电气火灾的最主要原因<sup>[1-2]</sup>。串联电弧故障相较于其他类型的电弧故障而言, 具有电流小、隐蔽性强、故障特征不明显的特点, 低压配电系统

中广泛安装的保护装置难以检测<sup>[3-6]</sup>。串联电弧故障检测方法的研究以及检测装置的研制迫在眉睫。国内外学者针对电弧故障检测开展了广泛的研究, 具体研究方法大致归为两类: 一是检测伴随电弧现象出现的非电量特征, 如弧声、弧光; 二是检测故障电弧的电气量特征, 如电压、电流。

电弧燃烧时常伴有弧声、弧光等现象, 为电弧非电量特征检测提供了支撑。弧声检测通过分析早期弧声信号频谱, 监测特征频带能量变化, 实现对

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52107123)

故障电弧发生的预测<sup>[7]</sup>。文献[8]提出了弧光保护的关键技术,指出电弧光的能量多集中于紫外光波段,利用紫外光电弧光传感器可检测电弧故障。上述检测方法的可靠性主要取决于检测设备的精度。这意味着此类方法成本高昂且要求故障位置集中,因此多用于开关柜、箱式变电站等对供电可靠性要求较高的场景。

基于电弧电压特征的检测方法灵敏度较高,但需要在源侧、负荷侧设置监测点并配备通信设施,经济性较差。低压配电网中电弧电压形似方波,可造成负荷侧电压的波形畸变<sup>[9]</sup>。文献[10]基于负荷侧电弧故障电压的信号奇异性波形特征,建立了电弧故障识别模型。文献[11-12]以不同负荷下的电弧电压波形特征归类为依据,提出基于电压特征能量的检测方法。文献[13]分析电弧故障上下游监测点的电压特征,提出了基于差分电压奇次谐波相似性测度的识别方法。文献[14-16]针对输电线路中的单相经电弧接地故障问题,对一次、二次电弧的非线性特征进行研究,利用故障相端电压特征可靠识别电弧的熄弧时刻。

基于电弧电流特征的检测方法仅利用单端信息即可完成故障判别,实用性及经济性较高,但易受干扰。受负载类型等多方面因素的影响,电弧电流波形表现出多样性的特点<sup>[17]</sup>。为解决此问题,学者从探寻电弧电流基本特征的角度出发,提出高频含量<sup>[18-19]</sup>、谐波组成<sup>[20]</sup>等特征,将负荷予以分类<sup>[21]</sup>,并结合人工智能实现串联电弧故障判别<sup>[22-24]</sup>,但此类方法需要大规模样本进行训练。电弧产生的高频分量能够克服因负载类型不同导致的电流波形多样性的影响<sup>[25]</sup>。但高频分量弱、提取难,需要采用高精度电流传感器,成本高昂<sup>[26]</sup>。若解决此问题,基于高频分量的串联电弧检测具有广阔的应用前景。当前,关于串联电弧单端检测的方法少有考虑区外电弧对结果的影响。单端检测不具方向性,可能造成区外故障误判,如何解决误判问题成为研究重点之一。

针对低压配电网中串联电弧单端检测不具有方向性、高频特征难以提取的问题,本文提出一种边界主动构建式的低压交流串联电弧检测方法。理论分析发现,线路边界对高频分量的传输具有显著的衰减作用,从而实现故障区间高频分量的隔离,保证串联电弧故障位置判别的可选择性。同时,基于边界处内外侧邻波压差的串联电弧故障检测方法能够有效降低暂态分量提取难度,无需装设高精度电流传感器。实验结果表明,本文所提方法适用于各种常见工况,能够有效避免区外故障及负载快速插拔的干扰,可靠实现串联电弧故障检测。本文聚焦

于高频分量这一电弧共性特征,可延伸至低压直流配电网系统的串联电弧故障分析,为其检测方法提供研究思路。

## 1 低压配电网串联电弧故障特征分析

### 1.1 串联电弧数学模型

图1所示为实验测得的典型低压交流串联电弧波形。从波形特征来看,电弧电压表现出非线性特征和高频特征,因此考虑从这两方面对串联电弧的数学模型进行描述。

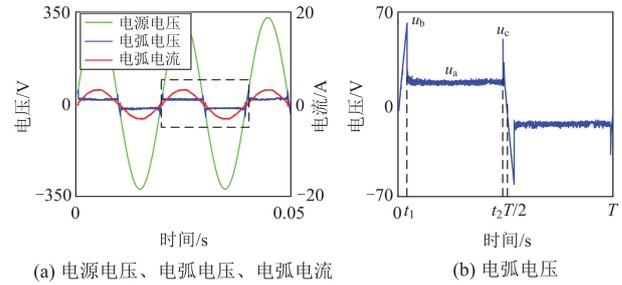


图1 低压交流串联电弧波形

Fig. 1 Waveforms of low voltage AC series arc

电弧的非线性特征表现在起弧、熄弧、燃弧阶段的阻抗值不断变化。①起弧阶段  $0 \sim t_1$ , 电弧极间电压未达到击穿电压,此时的电弧可视作开路,电弧阻抗近似处理为阻值极大且不变的电阻  $R_h$ 。当电弧电压升至击穿电压  $u_b$  时,对应的时刻为  $t_1$ ,电弧燃烧进入燃弧阶段。②燃弧阶段  $t_1 \sim t_2$ , 电弧极间形成稳定的导电通道,电弧电阻显著小于外电路的等效电阻。受负载类型多样性的影响,电弧电阻的大小无法精准衡量。而电弧电压处在一个“平台”,电压数值近似不变,记为  $u_a$ ,其数值大小仅与放电间隙两端材料有关,与负载类型无关<sup>[27]</sup>。③熄弧阶段  $t_2 \sim T/2$ , 外部电源电压下降至熄弧电压  $u_c$ ,对应的时刻为  $t_2$ ,此时电弧熄灭,电弧极间再次开路,将此时的电弧阻抗再次处理为  $R_h$ 。当负载类型发生改变时,无论是阻性负载、阻感性负载、容性负载、电力电子设备,其阻抗总能在系统中用  $Z_L$  表示。因此在电弧电压特性不变的前提下,可建立电弧非线性特征电压  $u_{arc\_NL}$  与电流  $i_{arc\_NL}$  的关系如式(1)所示。

$$\begin{cases} u_{arc\_NL} = \begin{cases} i_{arc\_NL} R_h & 0 < t \leq t_1 \\ u_a & t_1 < t \leq t_2 \\ i_{arc\_NL} R_h & t_2 < t \leq T/2 \end{cases} \\ i_{arc\_NL} = \frac{u_s - u_{arc\_NL}}{Z_L} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $u_s$  为系统电压;  $t_1$ 、 $t_2$  分别对应电弧电压起弧峰值时刻、熄弧峰值时刻;  $T$  为一个工频周期;  $Z_L$  为负载阻抗。电弧负半周期与正半周期变化规律相同。

电弧的高频特征表现在燃弧阶段的电压一直处于波动状态, 整个燃烧阶段分布有随机的高频分量。将电弧燃烧过程中的高频分量等效为电弧高频源  $u_{arc\_high}$ , 其造成的电弧电流波动记为  $i_{arc\_high}$ 。

得到电弧的数学模型如式(2)所示。

$$\begin{cases} u_{arc} = u_{arc\_NL} + u_{arc\_high} \\ i_{arc} = i_{arc\_NL} + i_{arc\_high} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $u_{arc}$  和  $i_{arc}$  分别为电弧电压和电弧电流。

## 1.2 串联电弧故障特征分析

### 1.2.1 低压配电系统故障分析模型

图 2 给出了低压配电系统电气线路连接方式, 测点 M1、M2 用以测量用户侧的主干线路电流。

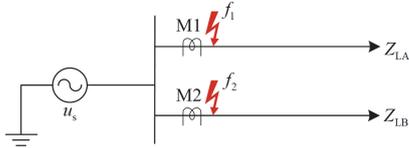


图 2 低压配电系统及故障位置示意图

Fig. 2 Diagram of low-voltage distribution system and fault location

以 M1 线路作为本线进行研究, 若要实现串联电弧故障的选择性判别, 需要分析区内外串联电弧故障下本线参考测点 M1 处的电气量特征。

1)  $f_1$  故障, 本线故障, 该工况需要尽快告警并切除串联电弧。

2)  $f_2$  故障, 它线故障, 该工况应由它线保护装置 M2 告警并切除串联电弧故障。

### 1.2.2 高频分量特征分析

当串联电弧故障分别发生在本线区间入口处  $f_1$ 、它线区间入口处  $f_2$  时, 测点 M1 处的电流及电流幅频特性如图 3 所示, 此时两侧负载  $Z_{LA}$ 、 $Z_{LB}$  阻抗大小均设置为  $75 \Omega$ 。

电气量特征差异是实现故障识别的前提, 因此需要对  $f_1$ 、 $f_2$  处的串联电弧故障特征进行分析。

从图 3 可以看出, 串联电弧发生于  $f_1$ 、 $f_2$  处时, 工频幅值大小分别为  $4.08 \text{ A}$ 、 $4.14 \text{ A}$ 。区内测点测得的工频电流幅值略小于区外故障, 这是因为串联电弧故障相当于线路中串联一个非线性电阻, 系统等效阻抗增大。测点 M1 处的电流波形均出现一定的畸变, 在  $70\sim 80 \text{ kHz}$  频带上, 两类串联电弧故障电流都可测得高频分量。也就是说高频分量是串联电弧故障的基本特性, 可用于串联电弧故障识别。

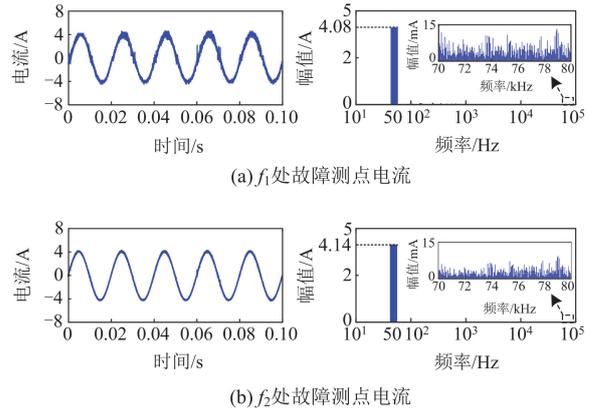


图 3 不同位置故障下的测点电流及其幅频特性

Fig. 3 Measuring point currents and their spectra under faults of different positions

但是,  $f_1$ 、 $f_2$  处故障的高频分量幅值接近, 这说明当区间入口附近发生串联电弧故障时, 监测点测得的区内外故障高频分量无明显差异。由于故障发生位置、信号强度等不确定性因素的影响, 仅利用线路对高频分量的自然衰减特性不足以保证故障判别的绝对选择性, 区外电弧可能造成误判。

## 2 磁环组合边界构造

主动构造线路边界, 是阻滞高频分量传输的途径之一, 基于铁氧体磁环设计的边界元件易于工程实现<sup>[28-29]</sup>。阻抗分析仪测得的某铁氧体磁环阻抗频率特性如图 4 所示。根据磁环的阻抗频率特性, 频率低于  $10 \text{ kHz}$  时, 磁环阻抗值较小, 对系统正常运行无影响; 频率高于  $10 \text{ kHz}$  时, 磁环阻抗值增大, 对高频分量的传输具有一定的衰减作用。当发生串联电弧故障时, 磁环在高频带阻抗值较大, 可有效将高频特征隔离在故障区间, 保护装置仅能监测到保护范围内的故障信息, 避免造成误判。串联电弧故障的故障特征频带处于  $1\sim 100 \text{ kHz}$ 。综合考虑磁环的阻抗频率特性及串联电弧的故障特征频带范围, 选取  $70\sim 80 \text{ kHz}$  为研究频带。

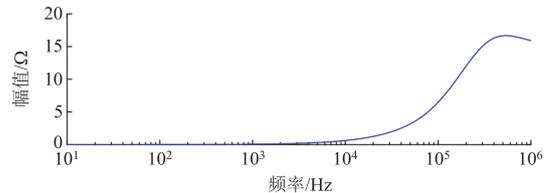


图 4 磁环阻抗频率特性

Fig. 4 Magnetic ring impedance-frequency characteristics

尽管磁环在高频下具有一定的阻抗, 但已有研究表明, 在多磁环作用下, 高频分量才会有较

为明显的衰减，便捷性和经济性较差。而在低压系统中，增添电容是简单易行的，因此本文参考 LCL 滤波器结构，构造如图 5(a)所示的磁环、电容组合边界。 $Z_{MR1}$  为边界内侧磁环阻抗，位于负荷侧； $Z_{MR2}$  为边界外侧磁环阻抗，位于电源侧。电容支路  $C$  为系统提供额外高频通路，增强了边界对电流高频分量的衰减能力。此外，“磁环 + 电容 + 磁环”的对称结构设计便于安装。为避免边界对系统正常运行造成影响，组合边界选取  $1 \mu\text{F}$  电容，其在工频下运行时，阻抗值大小为  $3183 \Omega$ 。为避免漏电流影响，组合边界应装设在漏电保护装置外侧。边界安装位置如图 5(b)所示。

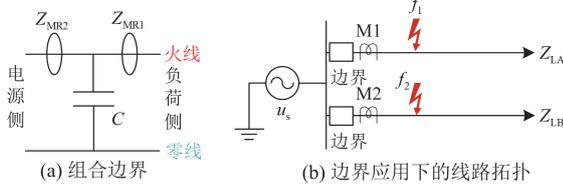


图 5 组合边界结构及应用

Fig. 5 Combinatorial boundary structure and its application

### 3 含磁环边界的串联电弧故障特征分析

#### 3.1 不同故障位置下的串联电弧高频特性

为了判断线路边界应用后，高频分量是否具有区分区内外串联电弧故障的能力，以区内串联电弧故障为例，分析不同故障距离下，测点电流及流出电流的高频特性。故障高频等效电路如图 6 所示，由于频率较高，线路电阻进行忽略。

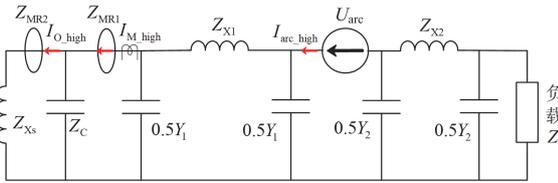


图 6 边界应用下的故障高频等效电路

Fig. 6 High-frequency equivalent circuit with boundary

区内测点  $M$  处的高频电流  $I_{M\_high}$  与电弧高频电流  $I_{arc\_high}$  满足式(3)关系。

$$H_1(j\omega) = \frac{I_{M\_high}}{I_{arc\_high}} = \frac{1}{(1 + 0.5Y_1 Z_A)(1 + 0.5Y_1 Z_T)} \quad (3)$$

区外流出高频电流  $I_{O\_high}$  与电弧高频电流  $I_{arc\_high}$  满足式(4)关系。

$$H_2(j\omega) = \frac{I_{O\_high}}{I_{arc\_high}} = \frac{Z_C / (Z_C + Z_{MR} + Z_{Xs})}{(1 + 0.5Y_1 Z_A)(1 + 0.5Y_1 Z_T)} \quad (4)$$

式中： $Z_A = Z_C(Z_{MR} + Z_{Xs}) / (Z_C + Z_{MR} + Z_{Xs}) + Z_{MR}$ ；

$Z_T = Z_A / (1 + 0.5Y_1 Z_A) + Z_{X1}$ ； $Z_C$  为边界的电容阻抗，其数值随频率发生变化； $H_1(j\omega)$ 、 $H_2(j\omega)$  分别为  $I_{M\_high}$ 、 $I_{O\_high}$  高频分量传递函数； $Z_{Xs}$  为系统电源等效电抗； $Z_{X1}$ 、 $Y_1$  分别为测点  $M$  至故障点的线路电抗、线路电纳，其大小与线路长度、频率有关；为简化分析，负荷侧磁环阻抗  $Z_{MR1}$ 、电源侧磁环阻抗  $Z_{MR2}$  均为  $Z_{MR}$ 。传递函数幅值  $|H_1(j\omega)|$ 、 $|H_2(j\omega)|$  与线路长度、频率的关系如图 7 所示。

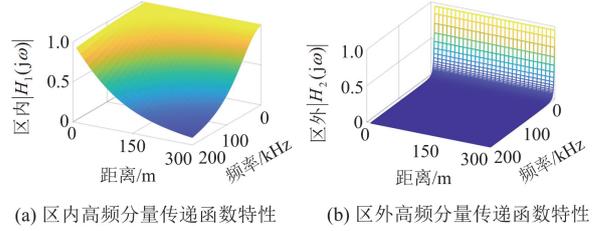


图 7 区内外高频分量传递函数频率特性

Fig. 7 Transfer function frequency characteristics of internal and external high-frequency component

由图 7 可知，区内、外的电弧高频分量传递特性存在显著差异。频率范围大于  $10 \text{ kHz}$  时，区内测点仍能检测到高频分量；区外测点的高频传递函数模值趋近于  $0$ 。在短距离下，区内测点各个频率下的信号信息保持完整，只是幅值略有降低；区外测点仅能检测到低频分量。由此可以证明该线路边界对高频分量的传输有较强的衰减作用，高频分量集中于故障区间，区内外高频故障特征差异更加明显。

#### 3.2 高频分量特征分析

同样，对 1.2 节图 5(b)所示的  $f_1$ 、 $f_2$  处的两类区间入口串联电弧故障进行分析。图 8 给出了区内干线故障  $f_1$  和区外故障  $f_2$  情况下的测点  $M1$  处电流及电流幅频特性。

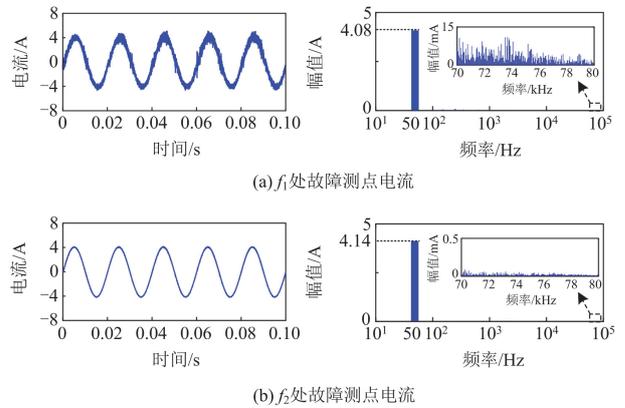


图 8 边界应用后的测点电流及其幅频特性

Fig. 8 Measuring point currents and their amplitude-frequency characteristics with boundary

对比增添线路边界前后, 测点 M1 处的电流波形(图 3 和图 8)。添加边界后, 区内  $f_1$  故障的测点电流波形基本没有变化; 区外  $f_2$  故障的测点电流波形更平滑, 波形畸变明显减少。观察幅频特性, 添加边界后, 电流的工频幅值没有变化, 仍为 4.08 A、4.14 A; 在 70~80 kHz 频带上, 区内故障高频分量幅值略有降低, 区外  $f_2$  故障的高频分量幅值大幅下降, 近似为 0。这说明线路边界不影响工频分量的传输, 但对高频分量的传输有巨大的衰减作用。添加边界后, 区内外串联电弧故障下的测点电流高频分量存在显著差异, 利用此差异可识别串联电弧的故障位置。

### 3.3 边界参数对检测性能的影响

由串联电弧故障高频分量分布特性可知, 随着故障距离的增大, 测点处的故障高频分量逐渐减弱。因此为了保证区内故障不拒动, 区外故障不误动, 需要使得图 9 所示的区内末端故障  $f_1$  的故障特征量大于区外端口故障  $f_2$  的故障特征量。设定区内故障点与测点之间的距离为  $l_1 = 300\text{ m}$ , 区外故障点与测点之间的距离为  $l_2 = 0\text{ m}$ , 两侧负载阻抗均为  $75\ \Omega$ , 故障时刻设置在第 4 个半波。分析单一磁环边界、组合边界两种结构对检测性能的影响。

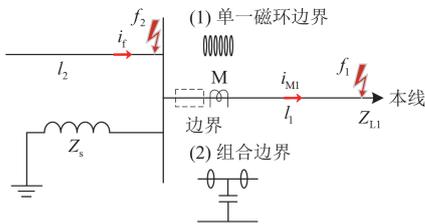


图 9 不同边界作用下的低压交流系统

Fig. 9 Low-voltage AC system under different boundaries

选取特征频带电流的半波能量作为故障特征量。其中, 半波能量的定义为单个半波内所有采样点的瞬时特征能量之和。本线测点电流的第  $m$  个半波能量表达式为

$$W_{M1}^{(m)} = \sum_{n=1}^N [i_{M1(\text{filter})}^{(m)}(n)]^2 \quad (5)$$

式中:  $W_{M1}^{(m)}$  为特征频带电流半波能量;  $i_{M1(\text{filter})}^{(m)}$  为滤波后的本线测点电流;  $N$  为单个半波内采样点的个数。对图 9 所示的两种故障进行分析, 两种边界作用下的结果分别如图 10 和图 11 所示。

图 10 和图 11 中, 蓝色曲线对应区内末端故障  $f_1$  的故障特征量, 橙色曲线对应不同边界下区外端口故障  $f_2$  的故障特征量。

在设置单一磁环边界的情况下, 图 10 中橙色曲线自上而下对应的磁环数目  $k$  依次是 1、2、5、

10、20、50。随着磁环数目  $k$  的增多, 区外端口故障的电流半波能量呈现出单调减少的特征。磁环数目越多, 区外端口故障的电流半波能量下降的越显著。磁环数目达到 50 个时, 区外端口故障的电流半波能量明显小于本线末端的电流半波能量, 满足选择性。但考虑到实际工程应用, 磁环的数目不宜过大, 因此继续考虑使用改进的“磁环+电容”组合边界。

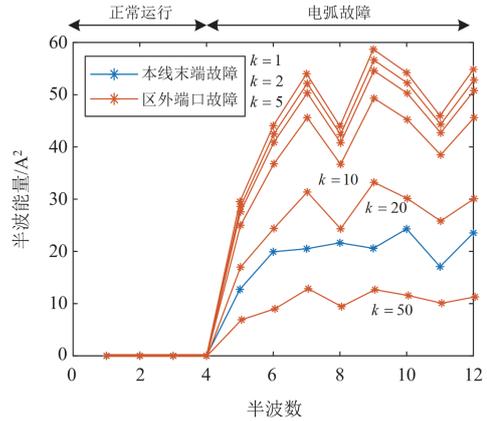


图 10 不同数目磁环边界作用下的结果

Fig. 10 Results under boundary with different numbers of magnetic rings

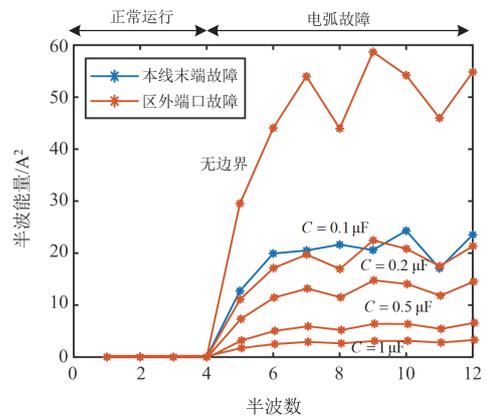


图 11 不同电容组合边界作用下的结果

Fig. 11 Results under different capacitance combination boundaries

在设置“磁环+电容”组合边界的情况下, 根据单一磁环边界的分析, 磁环数目选定在 20 个的情况下, 磁环边界对区外端口故障的高频分量衰减效果已经较为良好。因此“磁环+电容”组合边界中的磁环数目选定为 20, 改变电容的规格, 观察区外端口故障、本线末端故障半波能量的大小关系。图 11 中, 橙色曲线自上而下对应的电容规格依次是 0、0.1  $\mu\text{F}$ 、0.2  $\mu\text{F}$ 、0.5  $\mu\text{F}$ 、1  $\mu\text{F}$ 。随着电容规格的增大, 区外端口故障的电流半波能量显著降低。尤其

是电容大小在 0.5~1 μF 范围时，区外端口故障传输进入本线测点的电流半波能量近似为 0。

综合以上分析，若想保证检测性能良好，使用“磁环+电容”组合边界最佳。组合边界的具体设置为：磁环个数以 10~30 个为宜，电容大小以 0.5~1 μF 为宜。

#### 4 基于磁环压降特征的串联电弧故障检测

##### 4.1 组合边界附加特性

组合边界可实现区内高频分量隔离，但电弧电流高频分量微弱，需要装设高精度的电流传感器，暂态特征提取较难。利用组合边界自身附加的特性可解决此问题。当故障电弧电流流经磁环时，在频域下有

$$U_{MR1}(s) = I_{arc}(s) \cdot Z_{MR1}(s) \quad (6)$$

式中： $U_{MR1}(s)$  为内侧磁环压降的频域形式； $Z_{MR1}(s)$  为内侧磁环阻抗的频域形式； $I_{arc}(s)$  为故障电弧电流的频域形式。

利用矢量匹配法对磁环的阻抗频率曲线(图 4)进行拟合，得出如式(7)所示的磁环阻抗频域表达式<sup>[29]</sup>。

$$Z_{MR}(s) = \sum_{i=1}^{N_0} \frac{r_i}{s - p_i} \quad (7)$$

式中： $N_0$  为矢量匹配法拟合的阶数；留数  $r_i$ 、极点  $p_i$  为矢量匹配法计算的结果。

将式(7)代入式(6)，并对其进行卷积运算<sup>[30]</sup>，可得到磁环压降的时域表达式为

$$u_{MR1}(t) = \int_0^t z_{MR1}(\tau) i_{arc}(t - \tau) d\tau \quad (8)$$

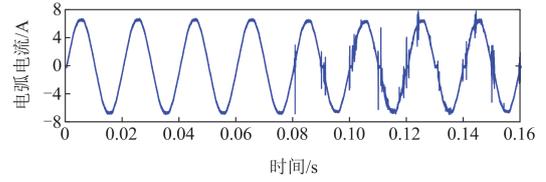
式中： $u_{MR1}(t)$  为内侧磁环压降的时域形式； $t$  为积分所求时刻； $\tau$  为积分时间变量； $z_{MR1}(t)$  为内侧磁环阻抗的时域形式。

以某次区内串联电弧故障为例，串联电弧故障发生于 0.08 s，电弧电流波形如图 12(a)所示，卷积运算后求得磁环压降波形，如图 12(b)所示。

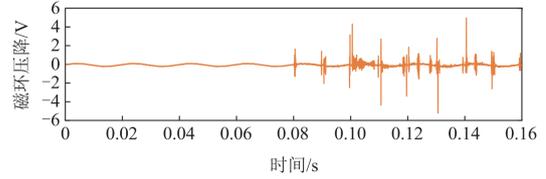
观察发现，磁环压降相较于原来的串联电弧电流信号，故障高频特征更加明显，因此可利用磁环压降特征代替电流特征，进而解决暂态特征提取难的问题，无需装设高精度电流传感器。

同时，内外侧电流信号高频分量的差异会导致边界内外侧磁环压降大小不同。当负荷侧发生串联电弧故障后，故障等效电路如图 13 所示。电弧电流从负荷侧流向电源侧。

当电弧电流  $i_{arc}$  流经线路边界时，内侧磁环  $Z_{MR1}$  的电流与电弧电流大小相同。把流经外侧磁环  $Z_{MR2}$  的电流记为  $i_1$ ，流经电容  $C$  的电流记为  $i_2$ 。通



(a) 串联电弧故障电流



(b) 磁环压降

图 12 故障电流及磁环压降

Fig. 12 Fault current and magnetic ring voltage drop

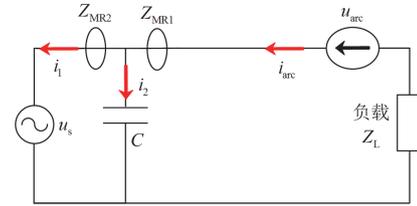


图 13 区内串联电弧故障等效电路

Fig. 13 Equivalent circuit of internal series arc fault

过对串联电弧特性分析可知，串联电弧可看成非线性信号源  $u_{arc\_NL}$  和高频信号源  $u_{arc\_high}$  的组合。电弧的非线性特征在一定程度上呈周期性变化，且与电源电压变化保持同步，因此可将故障等效电路中的低频响应归结为电源与电弧非线性源的共同作用，高频响应则归结为电弧高频信号源的单独作用。

对于流经边界的电弧电流  $i_{arc}$ ，在频率较低时，电容阻抗值远大于磁环阻抗，电流从外侧磁环  $Z_{MR2}$  支路流出；在频率较高时，电容阻抗值远小于磁环阻抗，高频电流从电容支路流出。计算求得出口电流  $i_1$  与边界电容支路电流  $i_2$  的大小。

$$\begin{cases} i_1 \approx \frac{u_{arc\_NL} - u_s}{Z_L} \\ i_2 \approx i_{arc\_high} \end{cases} \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)，可得边界两侧磁环的电压表达式为

$$\begin{cases} u_{MR1}(t) = \int_0^t z_{MR}(t - \tau) \frac{u_{arc\_NL}(\tau) - u_s(\tau)}{Z_L} d\tau + \int_0^t z_{MR}(t - \tau) i_{arc\_high}(\tau) d\tau \\ u_{MR2}(t) = \int_0^t z_{MR}(t - \tau) \frac{u_{arc\_NL}(\tau) - u_s(\tau)}{Z_L} d\tau \end{cases} \quad (10)$$



因数、阻抗值可调。

原理接线图中的  $l_0$  代表变压器至用户配电箱的距离。  $l_1$ 、  $l_2$ 、  $l_3$  为不同长度和类型的线路，其代表串联电弧故障处距离配电箱端口测点的距离。由于受实验条件限制，本文所使用的测试线缆为  $10 \text{ mm}^2$  线径电线与专用测试电缆。同时，故障距离选用线路首端(10 m)和末端(300 m)两处典型位置。各线路的长度、类型、电阻、电感的具体情况如表 1 所示。

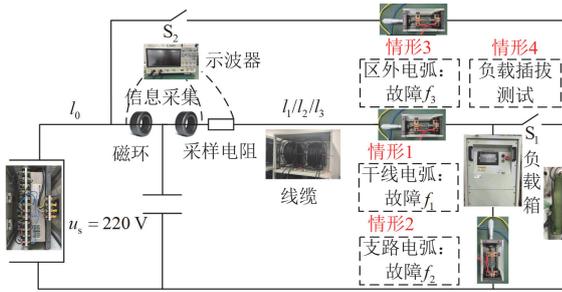


图 15 串联电弧实验平台原理接线图

Fig. 15 Principle wiring of series arc experimental platform

表 1 实验线缆主要参数

Table 1 Main parameters of experimental cables

线路	长度/m	线路类型	电阻/ $\Omega$	电感/ $\mu\text{H}$
$l_0$	20	$10 \text{ mm}^2$ 线径	0.03	20
$l_1$	10	$10 \text{ mm}^2$ 线径	0.02	9
$l_2$	10	测试电缆	0.07	6
$l_3$	300	测试电缆	2.1	170

同时，通过控制开关的通断，可以模拟以下 4 种常见工况。

1) 干线支路发生串联电弧故障，如故障情形 1 所示，此时开关  $S_1$  断开、 $S_2$  断开。利用负载箱调节阻抗值及功率因数模拟各类负载的故障情况。

2) 干线分支路发生串联电弧故障，如故障情形 2 所示，此时开关  $S_1$  闭合、 $S_2$  断开。添加屏蔽负载  $Z_1$ ，运行功率为 1500 W。

3) 区外支路发生串联电弧故障，如故障情形 3 所示，此时开关  $S_1$  断开、 $S_2$  闭合。故障位置为区外线路首端，将负载  $Z_1$  作为区外支路负载，大小可调。

4) 负载插拔引起的干扰，如情形 4 所示，此类情况并非故障，此时  $S_2$  断开，负载  $Z_1$  作为测试负载，控制开关  $S_1$  的快速通断模拟负载的快速插拔。

## 5.2 原理验证

为了验证边界对于串联电弧故障高频分量的衰减作用，给出了未安装边界、安装磁环边界、安装组合边界 3 种情况下的区内外端口故障测点电流波形，结果如图 16 所示。

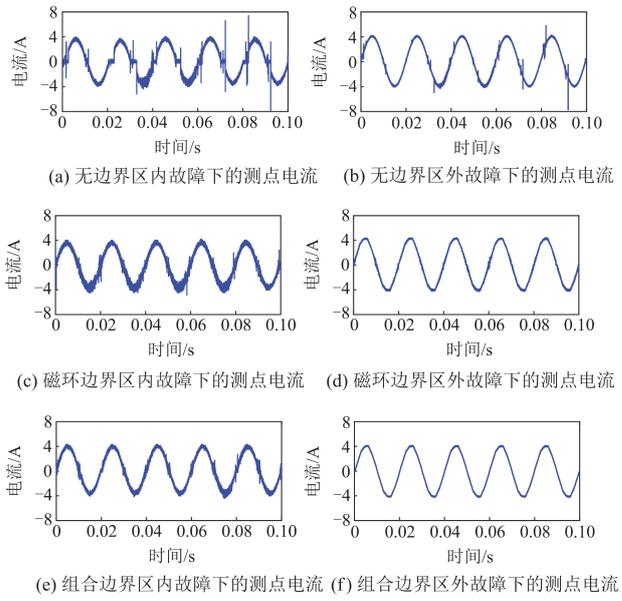


图 16 不同边界下的实验测量波形

Fig. 16 Experimental measurement waveforms under different boundaries

由图 16 可知，在安装边界之后，由于系统整体阻抗有所增加，测点电流的高频分量略有下降，但高频特征依旧明显。区外故障情况下，相较于未安装边界，边界作用下的本线测点电流波形畸变明显减少，测点电流的高频分量大幅下降，其中组合边界的效果更佳，区外电弧高频分量近似为 0。区内外串联电弧故障下，测点电流高频分量的显著差异证明了边界能够实现故障区间高频分量的隔离。

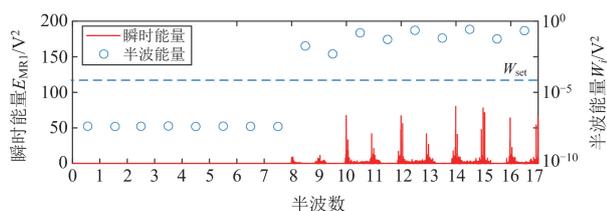
## 5.3 检测方法验证

设置线路长度为  $l_0 + l_1$  组合，对图 15 所示 4 种故障情形进行实验测试。

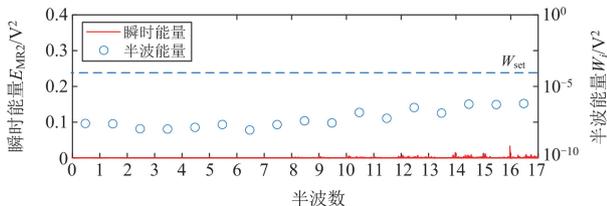
针对图 15 情形 1：区内干线支路故障，图 17 给出了负载阻抗值为  $75 \Omega$ ，功率因数为 0.75 的内外侧磁环的测量结果。

由图 17 可知，串联电弧故障发生于第 8 个半波初始，内侧磁环的瞬时能量大于外侧磁环的瞬时能量，外侧磁环的瞬时能量近似为 0，满足第 4 节的理论分析。根据式(15)的判据可准确识别出故障半波。

针对图 15 情形 2：区内分支路故障，图 18 给出了故障支路负载功率因数依旧为 0.75 的内外侧磁环瞬时能量、半波能量；相较于图 17，测得的内侧磁环的瞬时能量与半波能量有所下降，这说明正常负载支路电流对故障支路电流的高频分量存在一定的衰减作用，但两侧磁环的半波能量大小关系仍满足式(15)的故障判据。



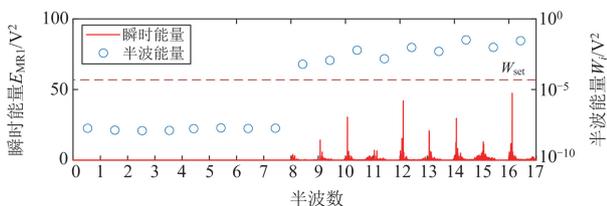
(a) 功率因数为0.75下的内侧磁环瞬时能量、半波能量



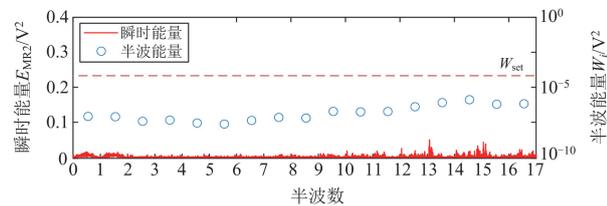
(b) 功率因数为0.75下的外侧磁环瞬时能量、半波能量

图 17 干线故障实验测试结果

Fig. 17 Experimental test results of trunk fault



(a) 功率因数为0.75下的内侧磁环瞬时能量、半波能量



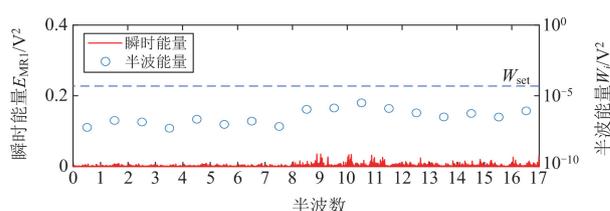
(b) 功率因数为0.75下的外侧磁环瞬时能量、半波能量

图 18 支路故障实验测试结果

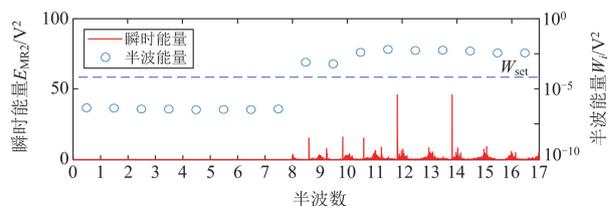
Fig. 18 Experimental test results of branch fault

针对图 15 情形 3: 区外故障, 实验测试结果如图 19 所示。设置区外线路负载大小为 500 W。区外串联电弧故障发生后, 内侧磁环的瞬时能量、半波能量相较于外侧磁环数值较小, 不满足故障半波的故障判据。

针对图 15 情形 4: 负载快速插拔, 实验结果如图 20 所示。图 20 给出了负载在经历一次快速接入、拔出后, 内外侧磁环的瞬时能量、半波能量。在负载插入和拔出瞬间, 内侧磁环压降出现较大的高频分量, 但在 3 个半波时间内系统恢复至稳定运行的状态。由于线路边界仅对高频分量有衰减作用, 对于工频信号传输基本无影响, 仅有插入或拔出动作时刻对应的半波满足故障判别条件。



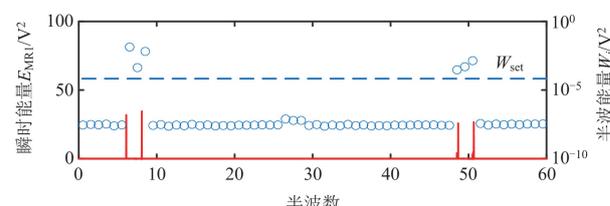
(a) 区外故障下的内侧磁环瞬时能量、半波能量



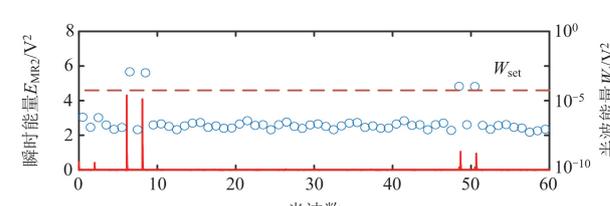
(b) 区外故障下的外侧磁环瞬时能量、半波能量

图 19 区外故障实验测试结果

Fig. 19 Experimental test results of external fault



(a) 内侧磁环瞬时能量、半波能量



(b) 外侧磁环瞬时能量、半波能量

图 20 插拔实验测试结果

Fig. 20 Experimental test results of load access and disconnection

实验室条件下, 一次快速插拔动作经历的时间在 0.3~0.5 s, 实际生活中此类情况发生时间只会更长。在 1 s 的检测时间中, 负载插拔仅能进行有限次, 不影响检测结果。

对不同故障位置 and 不同线路类型下的多种负载进行测试, 测试结果如表 2 所示。

在不同线路长度和线路类型下, 测试结果均为正确动作。因此本文提出的检测方法基本不受系统参数的影响, 能够可靠识别串联电弧故障。

#### 5.4 方法对比

现有的单端串联电弧检测方法存在方向性问题, 区外电弧可能会对检测结果造成影响。根据文献[26]提出的电流邻波差分法、文献[11]提出的电压

特征能量法和本文提出的检测方法,对图2所构建的低压配电系统及区内外串联电弧故障 $f_1$ 、 $f_2$ 进行测试,结果如图21所示。

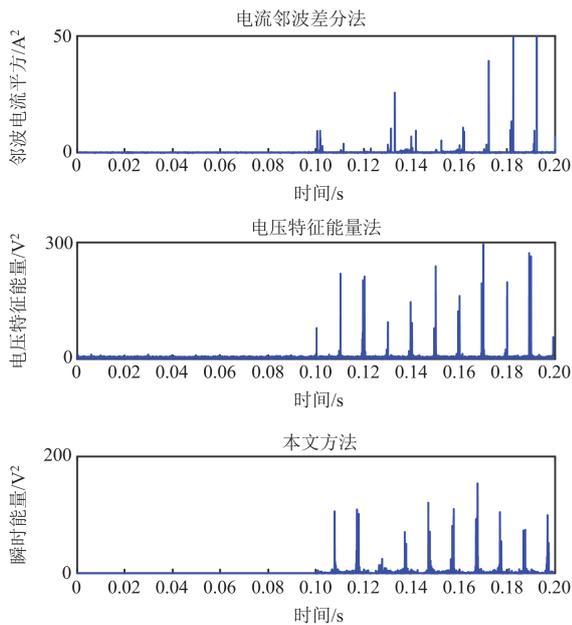
由图21(a)可知,发生区内故障时,3种方法均能精准识别串联电弧故障。电流邻波差分法需精准采集故障邻波电流峰值,这对电流传感器的精度要求较高;本文方法和电压特征能量法以能量特征作为判据,利用了更多的故障采样点,因此测量精度也更高。检测时间方面,3种方法均选择有限时间内故障半波的个数达到阈值作为故障判据,因此检测时间并无明显差异。

由图21(b)可知,发生区外故障时,电流邻波差分法、电压特征能量法的故障特征依旧明显,可能造成误判,此时区内串联电弧保护装置可能误动作。本文方法的故障特征量基本为0,能够可靠不动作,解决了现有单端串联电弧故障检测方法不具方向性的问题。

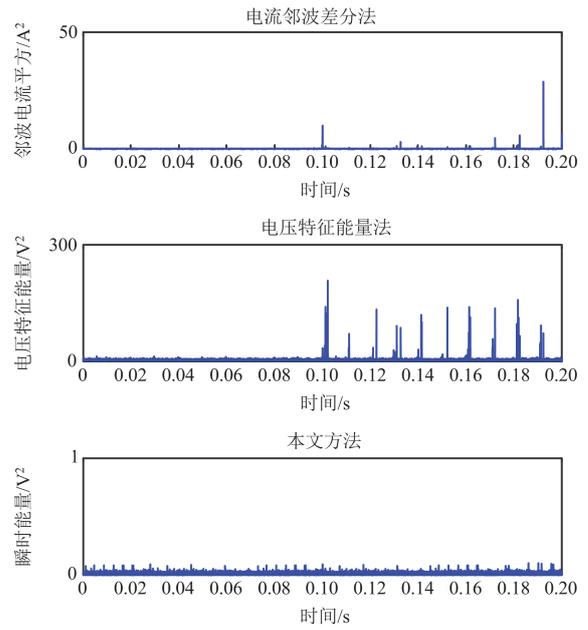
表2 不同线路参数下的测量结果

Table 2 Measurement results under different line parameters

故障类型	故障位置	负载类型	测试结果
区内故障	$l_0 + l_1$	阻性负载	正确动作
	$l_0 + l_2$	阻性负载	正确动作
	$l_0 + l_3$	阻性负载	正确动作
	$l_0 + l_1$	阻感性负载	正确动作
	$l_0 + l_2$	阻感性负载	正确动作
	$l_0 + l_3$	阻感性负载	正确动作
区外故障	$l_0 + l_1$	阻性负载	不动作
	$l_0 + l_2$	阻感性负载	不动作



(a) 区内故障情况下3种方法检测结果



(b) 区外故障情况下3种方法检测结果

图21 不同方法检测效果

Fig. 21 Detection effect of different methods

## 6 结论

本文提出一种基于构建边界实现低压交流配电网串联电弧故障检测的方法,结论如下:

1) 低压交流配电网串联电弧故障的高频分量可用于故障检测,但线路自然衰减特性不足以保证故障检测的绝对选择性。

2) 基于铁氧体磁环设计的组合边界对高频分量具有显著的衰减作用,利用边界附加的高频电压特征进行故障检测,解决了传统高频分量检测方法不具有方向性的问题,且无需装设高精度电流传感器。

3) 基于边界内外侧压降特征,提出了邻波压差故障检测方法,适用于多种工况,且不受负载快速插拔和系统参数的影响。

## 参考文献

- [1] 张玉涛, 马婷, 林姣, 等. 2007—2016年全国重特大火灾事故分析及时空分布规律[J]. 西安科技大学学报, 2017, 37(6): 829-836.  
ZHANG Yutao, MA Ting, LIN Jiao, et al. Analysis of fire incidents and characteristics of spatio-temporal distributions for serious fires from 2007 to 2016 in China[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2017, 37(6): 829-836.
- [2] 刘义祥, 汤昊, 金静, 等. 基于原因分析的典型城市火灾统计[J]. 消防科学与技术, 2017, 36(8): 1135-1138.  
LIU Yixiang, TANG Hao, JIN Jing, et al. Statistical

- analysis of fire causes in typical first tier cities[J]. Fire Science and Technology, 2017, 36(8): 1135-1138.
- [3] 汪倩, 陈思磊, 孟羽, 等. 低压直流系统故障电弧检测技术研究综述[J]. 高压电器, 2023, 59(5): 93-103.  
WANG Qian, CHEN Silei, MENG Yu, et al. Review of research on DC arc fault detection technology in low voltage DC system[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(5): 93-103.
- [4] 康乐, 田云博, 杨骥, 等. 串联故障电弧电流时频域特性的仿真与实验研究[J]. 高压电器, 2023, 59(2): 104-112, 119.  
KANG Le, TIAN Yunbo, YANG Kun, et al. Simulation and experimental research on time-frequency domain characteristics of series arc-fault current[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(2): 104-112, 119.
- [5] 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): 6015-6027.  
XIONG Qing, CHEN Weijiang, JI Shengchang, 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): 6015-6027.
- [6] 徐扬. 居民用电安全监测诊断技术研究与应用[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.  
XU Yang. Research on safety monitoring and diagnosis technology of residential electricity consumption application[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021.
- [7] 蓝会立, 张认成. 基于小波分析的故障电弧伴生弧声特征提取[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(4): 57-62.  
LAN Huili, ZHANG Rencheng. Study on the feature extraction of fault arc sound signal based on wavelet analysis[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2008, 20(4): 57-62.
- [8] 张喜玲, 杨慧霞, 蒋冠前. 弧光保护关键技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 130-135.  
ZHANG Xiling, YANG Huixia, JIANG Guanqian. Study on key technologies of electric arc protection[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 130-135.
- [9] WANG Wei, XU Bingyin, YANG Fan, et al. Arc fault detection on load-side based on sensitive features tracking[J]. Frontiers in Energy Research, 2023, 1: 1-16.
- [10] 张丽萍, 缪希仁, 石敦义. 基于EMD和ELM的低压电弧故障识别方法的研究[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(9): 54-60.  
ZHANG Liping, MIAO Xiren, SHI Dunyi. Research on low voltage arc fault recognition method based on EMD and ELM[J]. Electric Machines and Control, 2016, 20(9): 54-60.
- [11] 王玮, 徐丙垠, 邹国锋, 等. 基于电压特征能量的低压交流串联电弧故障检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(19): 81-93.  
WANG Wei, XU Bingyin, ZOU Guofeng, et al. Low-voltage AC series arc fault detection method based on voltage characteristic energy[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19): 81-93.
- [12] 王俊法, 胡伟, 王玮, 等. 电压电流能量信息融合的低压交流电弧故障检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(3): 55-66.  
WANG Junfa, HU Wei, WANG Wei, et al. Low voltage AC arc fault detection based on energy information fusion of voltage and current[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(3): 55-66.
- [13] 王玮, 徐丙垠, 孙中玉, 等. 低压配电网电弧故障电压差分检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(22): 8674-8688.  
WANG Wei, XU Bingyin, SUN Zhongyu, et al. Differential detection method of arc fault voltage in low voltage distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(22): 8674-8688.
- [14] 范李平, 袁兆强, 张凯. 基于小波变换的单相接地故障电弧模型及其PSCAD/EMTDC仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 51-56.  
FAN Liping, YUAN Zhaoqiang, ZHANG Kai. Simulation on arc model of single phase earth fault and PSCAD/EMTDC based on wavelet transformation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 51-56.
- [15] 宁家兴, 和敬涵, 李猛, 等. 真双极柔性直流系统单极接地故障熄弧时刻识别策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(13): 121-129.  
NING Jiaying, HE Jinghan, LI Meng, et al. Identification strategy for arc extinction time of single-pole grounding fault in true bipolar flexible DC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(13): 121-129.
- [16] 何柏娜, 宁家兴, 黄桂春, 等. 基于积分比分布的单相接地故障熄弧时刻识别策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(4): 178-184.  
HE Baina, NING Jiaying, HUANG Guichun, et al. Identification strategy of arc extinguishing time of single-phase grounding fault based on integral ratio distribution[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(4): 178-184.
- [17] 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 characteristic and

- fault diagnostic method for low voltage AC arcing[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.
- [18] 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.
- [19] 王桐, 史雯, 石浩渊, 等. 基于平稳小波变换的光伏直流串联电弧故障检测[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(12): 82-93.  
WANG Tong, SHI Wen, SHI Haoyuan, et al. Photovoltaic DC series arc fault detection based on stationary wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(12): 82-93.
- [20] 王晓远, 高淼, 赵玉双. 阻性负载下低压故障电弧特性分析[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5): 106-110.  
WANG Xiaoyuan, GAO Miao, ZHAO Yushuang. Characteristic analysis of low-voltage arc fault in resistive load conditions[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 106-110.
- [21] ZHANG Yang, CHEN Hongcai, LI Zhe, 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.
- [22] JIANG Run, BAO Guanghai, HONG Qiteng, et al. Machine learning approach to detect arc faults based on regular coupling features[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, 19(3): 2761-2771.
- [23] 罗晨, 喻锟, 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 张冠英, 张晓亮, 刘华, 等. 低压系统串联故障电弧在线检测方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(8): 109-115.  
ZHANG Guanying, ZHANG Xiaoliang, LIU Hua, et al. Online detection method for series arcing fault in low voltage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(8): 109-115.
- [27] 许志红. 电器理论基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- [28] 常仲学, 闫吉飞, 张志华, 等. 利用磁环构造配电线路边界的单端量全线速动保护(2): 基于电压行波峰值时间的保护原理[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1865-1875.  
CHANG Zhongxue, YAN Jifei, ZHANG Zhihua, et al. Single-ended whole-line high-speed protection by using magnetic ring as distribution line boundary (2): protection principle based on peak time of voltage travelling wave[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1865-1875.
- [29] 常仲学, 闫吉飞, 张志华, 等. 利用磁环构造配电线路边界的单端量全线速动保护(1): 磁环边界特性及模型[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1855-1864.  
CHANG Zhongxue, YAN Jifei, ZHANG Zhihua, et al. Single-ended whole-line high-speed protection by using magnetic ring as distribution line boundary (1): boundary characteristics of magnetic ring and its modeling[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1855-1864.
- [30] 何金良. 时频电磁暂态分析理论与方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.

收稿日期: 2024-12-21; 修回日期: 2025-07-23

作者简介:

宋国兵(1972—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: song.gb@mail.xjtu.edu.cn

陈锐(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为低压串联电弧检测技术; E-mail: brilliance@stu.xjtu.edu.cn

常仲学(1991—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为配电网故障处理。E-mail: changzhx@xjtu.edu.cn

(编辑 魏小丽)