

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230215

基于电压特征能量的低压交流串联电弧故障检测方法

王 玮¹, 徐丙垠¹, 邹国锋¹, 孙中玉², 梁 栋¹

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049; 2. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250100)

摘要: 串联电弧故障电流波形受负荷类型影响较大, 利用电流特征构建通用故障判据难度较大。为识别故障点电弧电压, 提出了一种基于电压特征能量的串联电弧故障检测方法。首先, 通过分析故障点电弧电压及监测点故障电压特征规律, 对故障信息的特征频带选择进行了论证。然后, 以不同负荷下的电弧电压波形特征归类为依据, 提出了基于电压特征频带全域能量幅值和敏感相位域能量相位信息的故障检测方法。最后, 利用全域总能量幅值和敏感域能量相位映射统计比实现了综合故障检测策略的构建。试验结果表明, 所提方法在不同线路参数和测试负荷下的故障检测准确率超过了98%且无误检发生, 验证了其有效性。

关键词: 串联电弧故障; 电弧电压; 特征频带能量; 特征能量相位; 特征能量相位映射

Low-voltage AC series arc fault detection method based on voltage characteristic energy

WANG Wei¹, XU Bingyin¹, ZOU Guofeng¹, SUN Zhongyu², LIANG Dong¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;

2. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China)

Abstract: The current waveform of a series arc fault is greatly affected by the types of load, making it difficult to construct a universal criterion for fault detection using current characteristics. To identify the arc voltage at the fault point, a series arc fault detection method based on voltage characteristic energy is proposed. First, the selection of characteristic frequency bands for fault information is demonstrated by analyzing the characteristics of arc voltage at the fault point and fault voltage at the monitoring point. Then, based on the classification of arc voltage waveform characteristics under different loads, a fault detection method is proposed based on the whole domain energy amplitude and sensitive phase domain energy phase information of the voltage characteristic frequency band. Finally, the construction of a comprehensive fault detection strategy is achieved through the total energy amplitude of the whole domain and the statistical ratio of phase mapping of the sensitive domain. The experimental results show that the fault detection accuracy of the method exceeds 98% with different line parameters and test loads, and with no misdetections, verifying the effectiveness of the method.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52077221).

Key words: series arc fault; arc voltage; characteristic band energy; phase of characteristic energy; phase mapping of characteristic energy

0 引言

电弧故障是低压配电系统电气火灾的重要诱因^[1-2]。各类电弧故障中, 由线路间绝缘受损引发的并联电弧故障由于故障电流较大, 通常可利用过流措施进行保护; 发生于相线与大地间的接地电弧故障可利用剩余电流保护技术进行保护^[3]。相比而言, 由

配电线路中的端子松脱、绝缘破损及导体损伤引发的串联电弧故障是目前最难检测的线路故障之一^[4-5]。

利用电气量的电弧故障检测主要分为利用电流故障特征和电压故障特征两类方法。电流检测方法中, 故障特征选取主要集中在利用故障电流的高频含量^[6-8]、谐波含量^[9-10]、零休点奇异性^[11-12]以及故障电流间的随机性^[13-14]等特征上, 其中, 高频、谐波含量特征在应用中存在与部分非线性负荷电流区分困难的不足; 零休特征由电弧起弧阶段的高电弧

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52077221)

阻抗产生, 该特征易受到负荷中感性成分的影响而被弱化; 随机性特征来源于电弧起弧和燃弧过程中的高频成分差异, 该特征虽能克服负荷电流波形多样性的影响, 但相较于整体电流, 由于随机性特征占比较小且其本身具有不可控特点, 因此该方法的灵敏度不够理想。近几年, 以机器学习为代表的多特征融合方法研究较多, 这类方法通过提取多种类型负荷故障前后的电流或特征数据进行训练以构建故障检测的黑盒模型^[15-17], 该类方法的实际效果取决于训练所用负荷的类型和数量, 其对未知负荷、组合负荷及不同线路参数下的泛化能力仍值得研究, 此外, 特征之间的冗余性以及最优特征的选择也是值得研究的问题^[18]。

电压检测方法的本质是通过识别故障点电弧电压在监测点的故障分量实现检测, 由于负荷阻抗占据了回路阻抗的绝大部分, 因此在故障点下游的负荷侧进行检测具有较高的检测灵敏度^[19]。文献[20-21]通过对负荷端电压小波分解以提取故障电弧特征, 文献[22]利用经验模态分解提取负荷端故障特征, 文献[23]利用小波能谱熵克服了负荷端故障特征频带难以确定的问题。上述方法本质上均是利用了故障点电弧电压起弧断相角对负荷端电压造成的波形畸变进行故障检测。此类方法在应用中需要在所有负荷侧均设置监测点, 且监测点检测到故障后需与入户配电箱内的开关进行通信以切除故障, 因此其应用成本较高, 限制了其应用。

串联电弧故障检测的难点在于高可靠性和多负荷类型适用性的检测判据选择^[24]。就电流检测方法而言, 由于故障分量相比负荷分量占比很小, 因此电流检测方法在故障特征选择上难以保证故障特征的典型性。相较而言, 当电弧故障发生时, 故障点电弧电压波形受负荷类型影响较小, 其波形的频率分布相对统一, 因此, 以识别故障点电弧电压存在为目的的检测是一种更为直接的检测思路。

对电压故障特征来说, 低频时, 由于负荷阻抗远大于线路阻抗, 因此电压故障分量主要作用于故障点后的负荷侧; 高频时, 受到电源和线路电感存在的影响, 电源和线路阻抗可达到与负荷阻抗比拟的程度, 由此为故障分量在监测点的显著表征创造了条件。鉴于该原因, 本文提出了一种利用电压特征频带能量的串联电弧故障检测方法, 该方法以故障点电弧电压波形特征为归类依据, 将负荷分为开关电源和非开关电源两大类。以识别故障点电弧电压为目的, 提出了基于全域电压特征能量幅值和敏感域电压特征能量相位映射比的故障检测方法, 在

所提故障检测方法基础上构建综合故障检测策略以满足多类型负荷下的故障检测。

1 电弧电压波形特征分析

电弧电压各阶段与电弧的起弧、燃弧和熄弧各阶段相对应。其中, 起弧和熄弧过程发生在电流过零附近, 电弧电压的变化速率因此取决于负荷的阻抗特性; 燃弧阶段对应电流过零之外区域, 当电流幅值足够维持电弧稳定燃烧时, 燃弧电压近似为常数, 其数值大小近似等于近阳极和近阴极压降之和^[25]。对绝大多数类型负荷来说, 不论其负荷电流波形如何, 只要电流过零后电流具有一定幅值大小, 其燃弧电压均近似为常数。对开关电源类负荷来说, 受到断相角存在的影响, 其电流在过零后存在较长时间的断相区, 由于该阶段电流幅值很小, 电弧无法稳定燃烧, 该阶段的燃弧电压表现出高频振荡特征。

图 1 为开关电源与非开关电源两类负荷电流下的故障点电弧电压波形, 其中, 低次奇次谐波构成了波形的轮廓, 高频成分则主要存在于电弧电压的特定相位区域。对开关电源类负荷来说, 电弧电压高频成分产生于电流断相期间, 非开关电源类负荷高频成分则主要存在于熄弧至起弧以及起弧尖峰至燃弧的变化阶段。

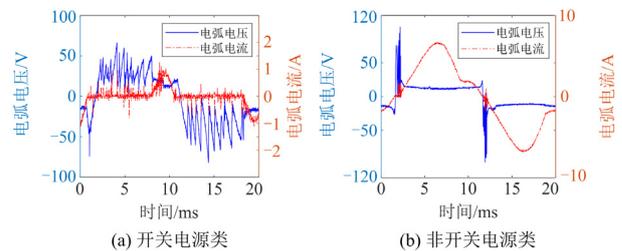


图 1 典型电弧电压波形

Fig. 1 Typical waveform of arc voltage

利用连续小波变换对图 1 波形进行时频联合分析(采样率为 100 kHz)。如图 2 所示, 从相位看, 开关电源类负荷的高频成分对应燃弧电压振荡区域; 非开关电源类负荷电弧电压高频成分在电弧电压的熄弧-起弧变化沿附近最为明显, 燃弧阶段虽存在高频毛刺, 但受到该信号振幅较小的限制, 其频率分布、幅值与熄弧-起弧变化沿特征差异明显。从频率构成看, 开关电源类负荷的时域振荡和非开关电源类负荷的时域上升/下降沿涵盖了低频至 40 kHz 的宽频带范围, 但若同时考虑信号的时域分辨定位能力, 上述波形成分以 1~40 kHz 频带范围最为明显。

从电弧电压的高频信号产生机理看, 开关电源类负荷高频信号来源于电流断相期间的电弧不稳定

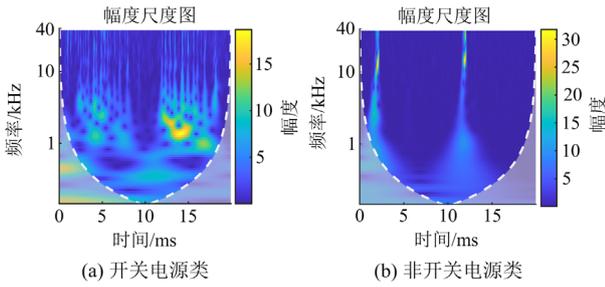


图 2 电弧电压波形的小波变换相平面图

Fig. 2 Wavelet transform spectrum of arc voltage waveforms

燃烧。非开关电源类负荷高频信号则主要来源于电弧电压熄弧-起弧以及起弧-燃弧阶段的快速电压变化,对熄弧-起弧阶段来说,由于电弧阻抗远大于负荷阻抗,因此该阶段电压波形主要取决于电弧阻抗,当发生电弧现象时,电弧电极碳化、温度、电磁力以及微小的弧隙改变均可导致电弧阻抗改变,进而导致电弧电极出现速率较高的燃弧尖峰,致使电弧电压出现高频成分。对于起弧-燃弧过渡阶段而言,由于燃弧电压较低(一般小于 20 V),燃弧尖峰电压远大于燃弧电压,该起弧至燃弧阶段的快速电压跃变也可导致高频成分出现。

2 监测点故障特征分析

当线路中发生串联电弧故障时,等效于在故障点串入电弧电压源 $u_{\text{arc}}(t)$,其故障等效电路如图 3 所示。

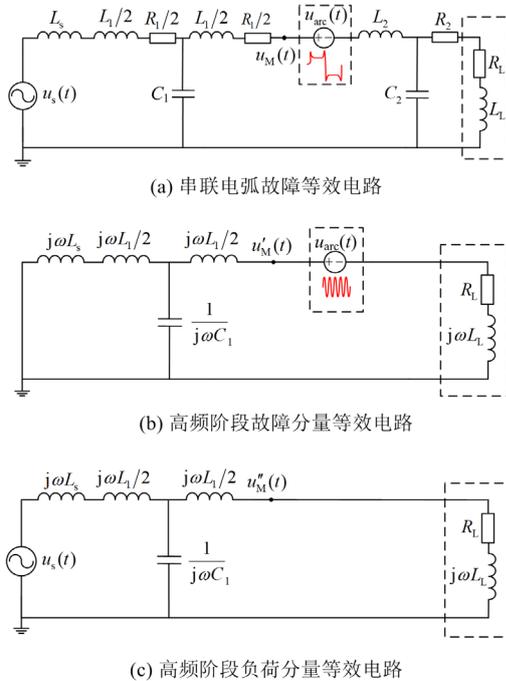


图 3 串联电弧故障等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of series arc fault

图 3(a)中, $u_s(t)$ 为电源电压, $u_M(t)$ 为监测点电压, L_s 为变压器绕组电感, L_1 、 R_1 为监测点至电源侧的线路阻抗, L_2 、 R_2 为监测点至负荷侧的线路阻抗; C_1 、 C_2 为线路间耦合电容; R_L 、 L_L 为负荷等效参数。

实际中,由于故障发生位置无法预知,因此仅能利用监测点信息进行故障检测。对监测点 M 来说,其电压为故障分量 $u'_M(t)$ 和负荷分量 $u''_M(t)$ 的叠加。对故障分量中的低频成分而言,由于电源和线路的低频阻抗远小于负荷侧低频等效阻抗,且 $u_{\text{arc}}(t)$ 有效值不到 20 V,因此低频故障分量在监测点特征微弱,难以用其进行检测。对故障分量中的高频成分来说,由于电源和线路阻抗将随频率增加而显著增大,因此 $u_{\text{arc}}(t)$ 的高频成分可以被检测到。高频时,可忽略线路电阻的影响,此外,考虑到监测点后用户侧线路一般很短,可忽略 C_2 、 L_2 影响以简化分析,其故障分量等效电路如图 3(b)所示。对故障分量 $u'_M(t)$ 来说,其传递函数如式(1)所示。

$$H(j\omega) = \frac{U_M(j\omega)}{U_{\text{arc}}(j\omega)} = |H(j\omega)| \angle \varphi(\omega) = \frac{AC + jAB}{B^2 + C^2} \quad (1)$$

$$|H(j\omega)| = \frac{A\sqrt{B^2 + C^2}}{B^2 + C^2} \quad (2)$$

$$\varphi(\omega) = \arctan \frac{B}{C} \quad (3)$$

式中: $U_M(j\omega)$ 、 $U_{\text{arc}}(j\omega)$ 分别为 $u'_M(t)$ 和 $u_{\text{arc}}(t)$ 的频谱函数; ω 为信号角频率; $|H(j\omega)|$ 表示 $H(j\omega)$ 的幅度传递特性; $\varphi(\omega)$ 表示 $H(j\omega)$ 的相位传递特性; $A = 2\omega L' + \omega L_1 - \omega^3 L_1 L' C_1$, $L' = L_s + L_1/2$, $B = 2R_L - 2\omega^2 R_L L' C_1$, $C = \omega(2L' + L_1 + 2L_L) - \omega^3(L_1 L' C_1 + 2L_L L' C_1)$ 。

低压配电网中,单位长度电感受线径影响较小^[26],因此 L_1 大小基本正比于线路长度,一般来说,单位长度电感在 $1 \mu\text{H}/\text{m}$ 左右,单位长度电容在 $50 \text{ pF}/\text{m}$ 左右。在 L_s 为 $120 \mu\text{H}$ 、线路长度为 300 m 、负荷功率因数不低于 0.85 的条件下进行分析,根据式(2)、式(3)画出不同故障信号频率和负荷功率因数下的 $|H(j\omega)|$ 和 $\varphi(\omega)$ 关系如图 4 所示。

图 4 为 R_L 为 20Ω 时故障分量传递网络的频率特性。从图 4(a)看出,故障分量频率越高、负荷功率因数越大,故障分量的幅度衰减越小。从图 4(b)看出,故障分量频率越低、负荷功率因数越高,故障分量经传输网络的相移越小;在负荷功率因数较高和故障分量频率较低的较大范围内,故障分量相移均近似为 0。此外,观察 R_L 为 4Ω 和 40Ω 时的

故障分量传递特性(见附录 A), 当故障分量频率和负荷功率因数相同时, 负荷阻抗越小, 故障分量幅度衰减越小, 相移也越小。

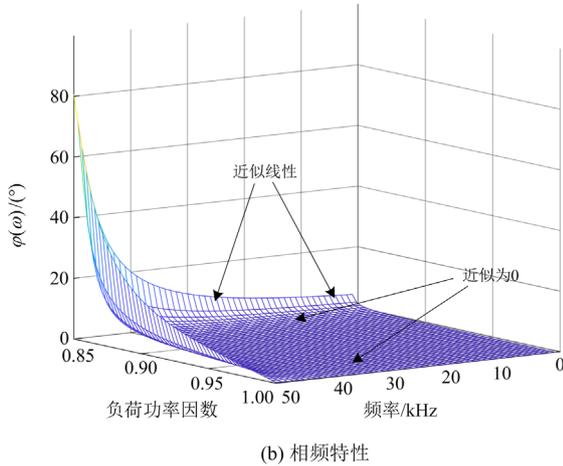
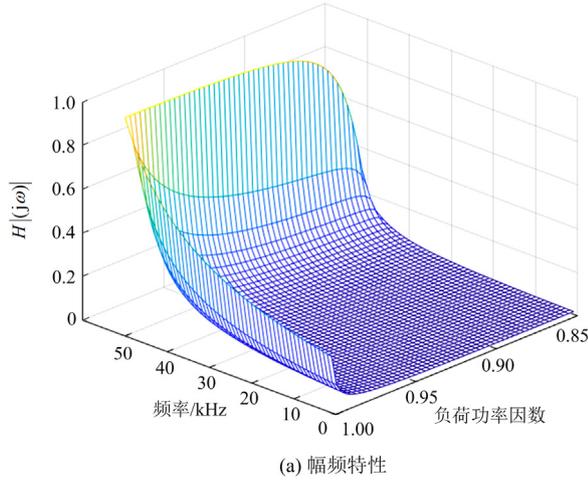


图 4 故障分量传递网络频率特性($R_L = 20 \Omega$)

Fig. 4 Frequency characteristics of fault component transmission network ($R_L = 20 \Omega$)

此外, 观察图 4(b)可知, 当负荷功率因数较低时, 虽然此时故障分量各不同频信号的相移不可忽略, 但在特定频带范围内, 故障分量各频率信号的频率-相移关系近似为相位无失真系统的线性相移关系。对图 1 中的 $u_{arc}(t)$ 故障源来说, 经传递网络后, 用以构成时域尖锐脉冲的各不同频故障分量信号仅幅度大小受到影响, 其相对相位关系则保持不变, 由此避免了各不同频信号相位发散造成的时域故障信号特征弱化, 因此, $u_{arc}(t)$ 的高频脉冲信号经一定衰减后依然能被检测到。

对负荷分量 $u_M''(t)$ 来说, 由于实际电源中的谐波一般在 40 次以内^[27], 其高频成分幅值很小, 因此 $u_M''(t)$ 中的高频含量很低, 为 $u_{arc}(t)$ 高频故障分量的识别提供了理论依据。

基于上述分析, 以实现故障分量和负荷分量的特征频带区分为前提, 综合考虑负荷功率和负荷功率因数, 3~40 kHz 频带信号具有 10%以上的幅频增益以及较好的线性相移特性, 可将该频带范围信号作为描述电弧故障电压源存在的特征频带信号。

3 基于电压特征能量的故障检测方法

根据上述分析, 当电弧故障时, 故障上游监测点能够感受到故障点电弧电压特征频带信号的存在; 同时, 由于该特征频带信号在电源谐波中的含量很低, 因此可通过识别故障点特征频带电压来表征电弧故障的存在。根据开关电源类负荷和非开关电源类负荷的电弧电压特征能量分布规律, 采用以下不同检测方法。

3.1 基于全域电压特征能量幅值的故障检测

对开关电源负荷来说, 受到负荷电流断相期间电流幅值过低的影响, 其电弧电压呈现出连续高频振荡特征, 该高频振荡特征能量可反映于监测点, 可以此为依据实现故障检测。

为突出故障分量幅值, 同时考虑高频信号极性的随机性, 可使用特征频带能量表征电弧电压特征频带信号的存在。以半波为单位, 定义监测点电压的半波全域电压特征能量, 如式(4)所示。

$$E_{\text{half}}^{(i)} = \sum_{n=1}^{N/2} [u_M^{(i)\text{filter}}(n)]^2 \quad (4)$$

式中: i 为半波波形序号, $i = 1, 2, \dots, 100$; N 为每周波采样点数; $u_M^{(i)\text{filter}}(n)$ 为监测点采样电压 $u_M^{(i)}(n)$ 带通滤波后的第 n 个采样值。构建故障检测判据如式(5)所示。

$$\begin{cases} E_{\text{half}}^{(i)} \geq E_{\text{SET1}} \\ \text{num}[E_{\text{half}}^{(i)} \geq E_{\text{SET1}}]_{1s} > \alpha \end{cases} \quad (5)$$

式中: E_{SET1} 为全域电压特征能量幅值的检测设定阈值; α 为用以确认电弧故障出现的故障半波数量检测设定阈值; $\text{num}[\cdot]_{1s}$ 表示对 1 s 内满足要求的半波计数, 当 1 s 内故障半波数量超过阈值时, 认为发生了电弧故障。

3.2 基于敏感域电压特征能量相位映射比的故障检测

对非开关电源类负荷来说, 虽然其负荷电流波形具有多样性, 但其故障点电弧电压波形均表现为类似图 1(b)所示具有高频变化沿的近似方波形状。根据前述分析, 非开关电源类负荷的特征频带信号理论上发生于电弧电压的上升/下降沿处。故障点的电弧电压波形相位受制于负荷电流, 因此电弧电压的上升/下降沿位置对应电弧电流的过零点。考虑到负荷功

率因数 $\cos\varphi$ 的差异影响, 监测点的特征频带信号将反映于 $u_M(t)$ 的 $[0, \varphi]$ 和 $[\pi, \pi + \varphi]$ 相位区间; 考虑到故障传递网络对低功率因数负荷特征频带信号引入的相移 $\Delta\varphi$, 实际可将 $[0, \varphi + \Delta\varphi]$ 和 $[\pi, \pi + \varphi + \Delta\varphi]$ 作为非开关电源类负荷的故障检测敏感区域。

如图 5 所示, 若将监测点的检测区间接按相位进行等间隔划分, 则由电弧电压上升/下降沿产生的故障特征能量信号以具有相对较高的幅值且映射于 A_{sen1} 和 A_{sen2} 相位域为典型特征; 负荷分量中可能存在的故障特征能量干扰信号则以幅值较低且理论上可出现于图中 A_{sen1} 、 A_{sen2} 、 A_1 、 A_2 、 \dots 、 A_{K-2} 的任意相位域为典型特征。

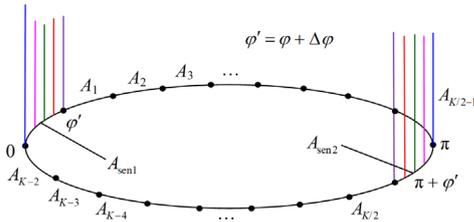


图 5 特征信号瞬时能量相谱图

Fig. 5 Instantaneous energy phase spectrum of characteristic signal

尽管如此, 实际电弧故障中, 受到电弧燃烧随机性以及不同类型负荷阻抗特征差异影响, 不同类型负荷之间、同负荷下不同周波之间的电弧电压特征能量大小差异较大, 难以利用幅值特征设置公共检测阈值。然而, 由于电弧故障发生时, 电弧电压特征能量信号理论上以幅值相对最大、相位相对固定的特点出现, 因此, 可从最大瞬时特征能量信号的相位分布出发, 通过构建统计特征判据进行故障检测。基于上述分析, 构建故障检测步骤如下。

首先, 以半波为单位, 计算 1 s 内带通滤波后的各点瞬时能量 $E_{\text{ins}}^{(i)}(n)$, 如式(6)所示。

$$E_{\text{ins}}^{(i)}(n) = [u_M^{(i)\text{filter}}(n)]^2 \quad n = 1, 2, \dots, N/2 \quad (6)$$

以半波为单位, 计算 1 s 内 $E_{\text{ins}}^{(i)}(n)$ 的瞬时能量最大值 $E_{\text{ins}}^{(i)\text{max}}$, 如式(7)所示。

$$E_{\text{ins}}^{(i)\text{max}} = \max[E_{\text{ins}}^{(i)}(n)] \quad (7)$$

式中, $\max[\]$ 表示对数组进行求最大值运算。

计算 1 s 内 $E_{\text{ins}}^{(i)\text{max}}$ 的对应相位 $P_{\text{ins}}^{(i)\text{max}}$, 如式(8)所示。

$$P_{\text{ins}}^{(i)\text{max}} = \text{mod}\left[\theta + (P-1) \frac{2\pi}{N}\right]_{2\pi} \quad (8)$$

式中: θ 为对采样信号 $u_M^{(i)}(n)$ 进行 FFT 运算得到的本周波信号工频初相角; P 为最大瞬时能量 $E_{\text{ins}}^{(i)\text{max}}$ 对应的采样点序号; $\text{mod}[\]_{2\pi}$ 表示对运算结果以 2π 为

周期进行取模运算。

分别计算映射于 A_{sen1} 和 A_{sen2} 相位域的 $P_{\text{ins}}^{(i)\text{max}}$ 的占比 R_{sen1} 和 R_{sen2} , 如式(9)所示。

$$\begin{cases} R_{\text{sen1}} = \frac{\text{num}[P_{\text{ins}}^{(i)\text{max}} \in A_{\text{sen1}}]_{1s}}{100} \\ R_{\text{sen2}} = \frac{\text{num}[P_{\text{ins}}^{(i)\text{max}} \in A_{\text{sen2}}]_{1s}}{100} \end{cases} \quad (9)$$

构建故障判据如式(10)所示。

$$R_{\text{sen1}} + R_{\text{sen2}} > \delta \quad (10)$$

式中, δ 为故障确认的设定阈值。

3.3 检测方法总流程

如图 6 所示, 综合考虑开关电源和非开关电源类负荷的故障检测原理, 构建本文方法的检测流程。以半波总特征能量 $E_{\text{half}}^{(i)}$ 越限作为第一判据的启动条件, 以 1 s 内特征总能量超过阈值的半波数量达到数量设定阈值作为电弧故障的确认条件, 实现对开关电源类负荷的故障检测。以半波内瞬时特征能量 $E_{\text{ins}}^{(i)\text{max}}$ 越限作为第二判据的启动条件, 根据 1 s 内最大瞬时特征能量的相位映射比实现对非开关电源类负荷的故障检测。

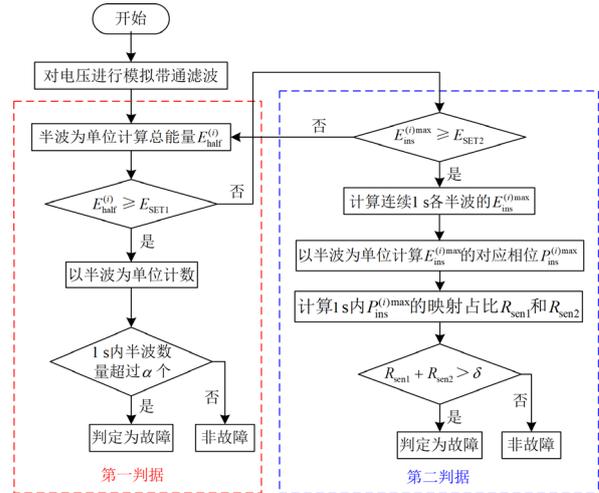


图 6 检测方法流程图

Fig. 6 Flow chart of detection method

4 试验验证

4.1 试验环境搭建

图 7 为本文所提方法的测试原理图, 系统电源为容量 400 kVA、绕组电感 120 μH 的配电变压器。使用不同线径和长度的 PVC 线缆和多种类型单相负荷验证线路参数和负荷类型对检测方法的影响。电弧故障发生器根据 UL1699 标准制作, 使用直径为 10.0 mm 的铜电极作为动触头, 直径为 8.0 mm 的石墨电极作为参考静触头, 通过控制电极间隙产

生电弧，用于模拟用配电线路接线端子松动、导线意外扯断等原因引起的串联故障电弧。其中，监测点和故障点电压均使用电压差分探头采集得到，电压采样频率为 100 kHz，实验平台实拍图见附录 B 图 B1。

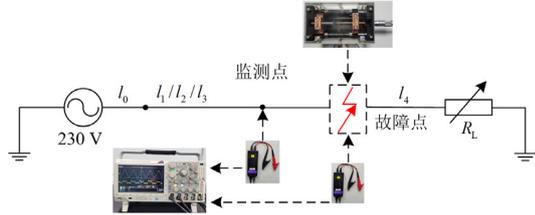


图 7 系统测试原理图

Fig. 7 System test schematic diagram

图 7 中， l_0 代表变压器母排至二级配电箱的固定三相线路，由 $4 \times 120 \text{ mm}^2 + 1 \times 70 \text{ mm}^2$ 线路组成，总长度约 50 m； l_1 、 l_2 、 l_3 为不同长度和线径的单相线路，其中性线回路使用与相线同规格线缆，模拟二级配电箱至用户侧的不同线路情况，线缆参数如表 1 所示。

表 1 试验线缆主要参数

Table 1 Main parameters of the cable used in the test

线路	线径/ mm^2	长度/m	电阻/ Ω	电感/ μH
l_0	120	50	0.01	45
l_1	10	100	0.12	105
l_2	10	50	0.07	50
l_3	4	50	0.27	55
l_4	4	20	0.1	25

以家用负荷为主要测试对象，考虑负荷类型和功率因数差异，对表 2 所列单相及组合负荷进行测试。

表 2 负荷主要参数

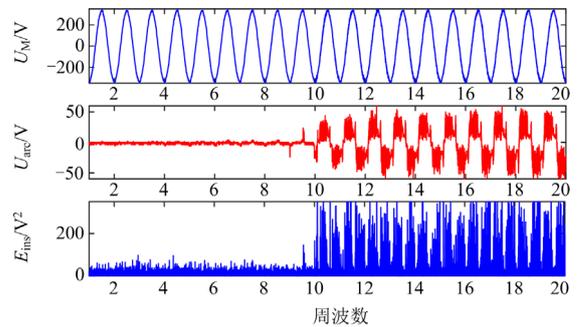
Table 2 Main parameters of loads

负荷	类型	功率/W	功率因数
计算机	开关电源	200	0.92
电暖气	阻性	1000	1
电磁炉	阻感性	1800	0.95
微波炉	非线性(磁控管)	1500	0.85
吸尘器	非线性(串激电机)	1300	0.87

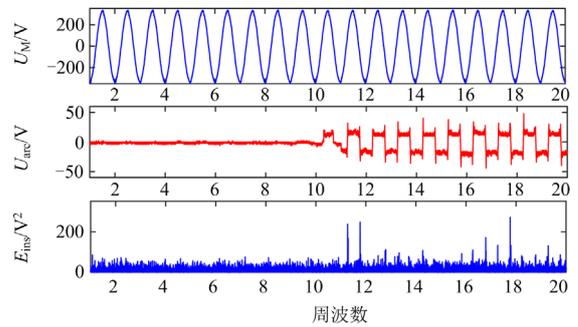
4.2 全相位域电压特征能量幅值测试

对图 7 所示 $l_0 + l_1$ 线路搭配不同类型负荷测试故障前后的监测点电压 U_M 、故障点电压 U_{arc} 以及监测点电压瞬时特征能量 E_{ins} 。图 8 中，1~10 周波为无故障周波，11~20 周波为故障周波。观察监测点电压 U_M 波形，除计算机负荷故障后相较故障前有明显高频成分增加，其他负荷故障前后波形差异不明显，原因是故障后的特征频带信号在 U_M 中的占比比较低。对 U_M 进行带通选频滤波后，各波形故障前

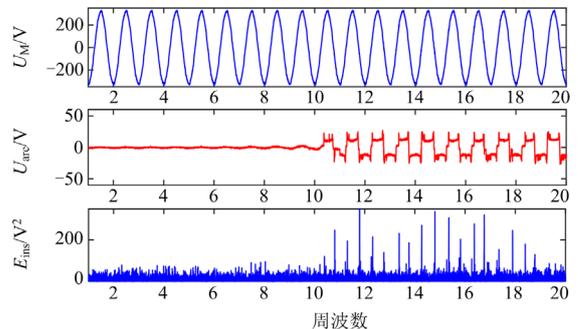
后的特征能量差异明显，其中，受电弧故障源高频成分较多的影响，计算机负荷故障后特征能量分布密集，且故障后特征能量幅值明显高于故障前；对其他 8 类负荷来说，故障后，对应电弧电压上升/下降沿相位的特征能量相较故障前幅值增加最为明显，且不同周期间呈现周期“梳状”分布特点。从图 8(b)~图 8(i)几种非开关电源类负荷故障前后的特征能量幅值来看，故障后最大瞬时特征能量相比故障前呈整体增大，但同时也存在大量最大瞬时特征能量幅值与故障前相仿甚至小于故障前的情况，仅利用幅值特征极易出现漏判以至影响最终判定结果，需融合特征能量幅值、相位信息构建综合检测策略以提高检测可靠性。



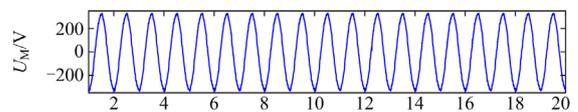
(a) 计算机



(b) 电暖气



(c) 电磁炉



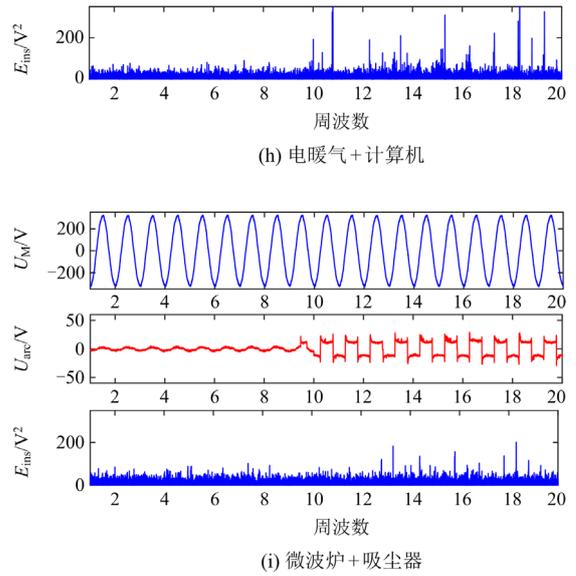
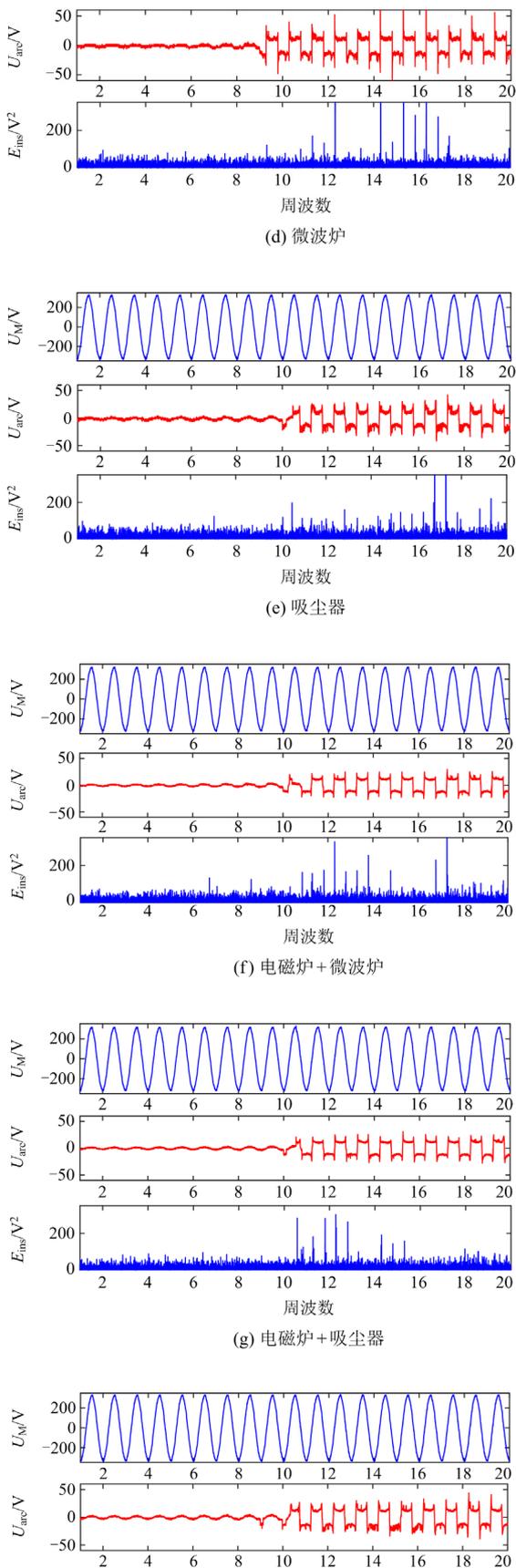
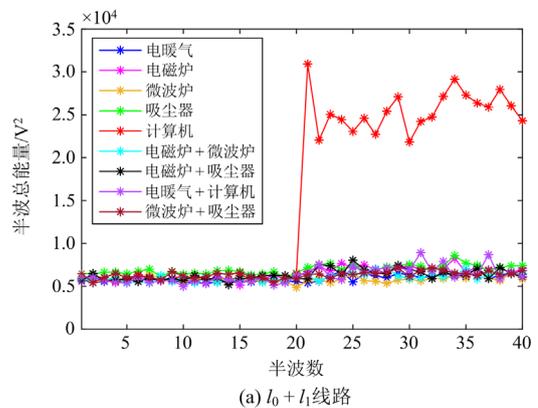


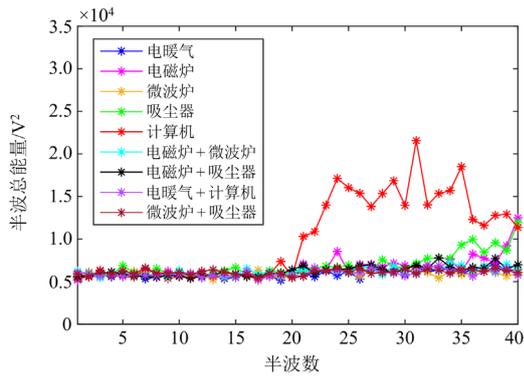
图 8 不同负荷故障前后特征能量对比

Fig. 8 Characteristic energy comparison before and after fault of different loads

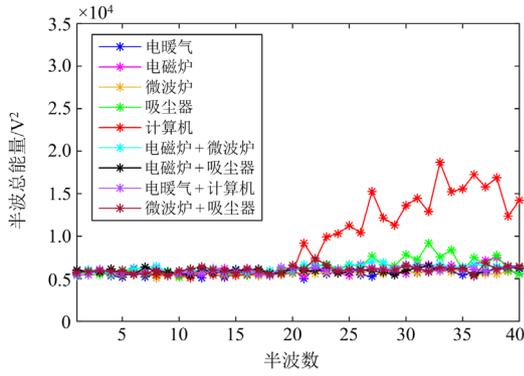
以半波为单位, 计算图 8 所列 9 种负荷在不同线路参数下的半波特征总能量, 如图 9 所示。从半波特征总能量角度看, 计算机负荷故障后较故障前的半波特征总能量增加最为明显; 其他负荷则由于受到高特征能量谱线数量有限的影响, 故障后能量相较故障前虽略有增加, 但难以利用该特征设定故障检测阈值。对比图 9(a) — 图 9(c) 可知, 监测点特征能量主要受线路长度影响, 且随线路长度增加而增大, 相比而言, 线径参数主要影响耦合电容大小, 低压配电线路辐射半径有限, 因此线径参数对故障特征影响较小。由此可见, 对开关电源这类特殊负荷可通过设置半波特征总能量阈值实现故障检测。综合考虑故障检测灵敏度和可靠性, 可将半波特征总能量超过 $12\ 000\ \text{V}^2$ 、1 s 内故障半波数量超过 14 个作为开关电源类负荷的故障确认依据。



(a) $I_0 + I_1$ 线路



(b) $l_0 + l_2$ 线路



(c) $l_0 + l_3$ 线路

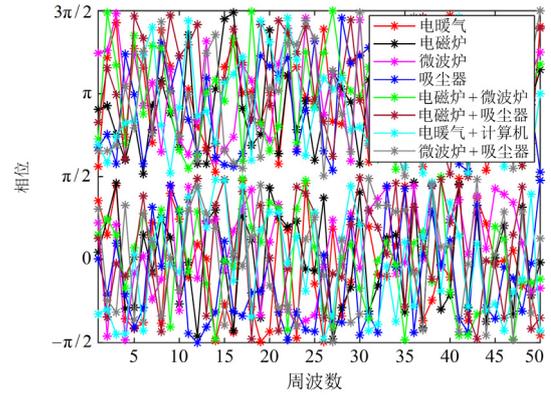
图 9 故障前后全相位域电压特征总能量幅值对比

Fig. 9 Comparison of the total energy amplitude of voltage characteristics in all phase domain before and after fault

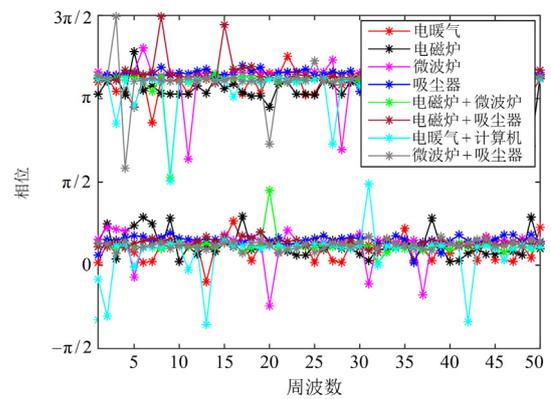
4.3 敏感域电压特征能量相位映射测试

综合考虑故障检测灵敏度和算法的启动频率，以 100 V^2 作为第二检测方法的启动条件，对图 7 所示 $l_0 + l_2$ 线路搭配不同负荷测试其故障前后的最大瞬时特征能量相位(实际中，非故障周波的最大瞬时特征能量可能小于 100 V^2 ，此处仅用于验证对比)。观察图 10，故障前，各负荷的半波最大瞬时特征能量信号相位呈随机分布；故障后，除少数相位异常点，绝大多数最大瞬时特征能量相位在 0 和 π 相位附近表现出近似直线的“平稳”相位特征，该现象是由于各周波的最大瞬时特征能量一般发生于电弧电压的上升/下降沿位置且电弧发生时具有连续性特点所致。

以负荷功率因数 $\cos\varphi \in [0.85, 1]$ 考虑，则非开关电源类负荷的故障检测敏感区对应 $[0, \pi/6]$ 和 $[\pi, 7\pi/6]$ 区间，考虑到故障传递网络对低功率因数负荷引入的相位偏移，实际可将 $[0, \pi/5]$ 和 $[\pi, 6\pi/5]$ 作为故障检测的敏感区。图 11 为上述 8 种非开关电源类负荷在不同线路参数下故障前后 1 s 内最大瞬时特征能量相位的映射比。



(a) 故障前



(b) 故障后

图 10 最大瞬时特征能量相位

Fig. 10 Phase of maximum instantaneous characteristic energy

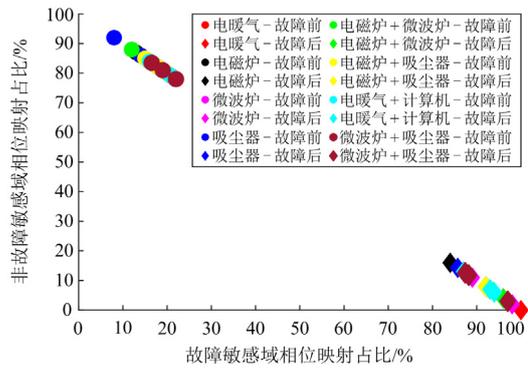


图 11 最大瞬时能量相位映射统计分布

Fig. 11 Statistical distribution of maximum instantaneous energy phase mapping

故障前，由于无故障电压源激励，各半波最大瞬时特征能量相位在各相位域理论上呈均匀映射，由于故障敏感域宽度为 $2\pi/5$ ，因此故障前的最大瞬时特征能量信号相位在故障敏感域的理论映射占比应为 20%；故障后，最大瞬时特征能量信号相位在故障敏感域的理论映射占比应为 100%。观察图 11

实测结果, 受统计样本数量有限和故障后少数异常干扰信号的影响, 各负荷的非故障信号相位在故障敏感域的实际占比在 10%~30%之间, 而各故障信号相位在故障敏感域的占比则在 85%~100%之间, 故障前后的实测占比与理论值接近。实际应用中, 可将相位映射于故障敏感域占比不低于 80%作为故障发生的判定阈值。

4.4 方法对比

图 12 是计算机、微波炉与吸尘器组合负载在本文方法、负荷端电压小波分解^[20]方法以及电流邻波差分^[14]方法下的检测效果(故障发生起始时刻在 1 s 附近)。从图 12(a)看, 3 种方法故障前后均具有明显的特征差异, 对文献[14]的电流邻波差分法来说, 其故障前特征量幅值达到了 1.5 V^2 。从图 12(b)看, 受到抑制性负荷吸尘器存在的影响, 电流邻波差分法

故障后特征值虽高于故障前, 但其故障后特征量幅值仍小于 1.5 V^2 , 因此, 电流邻波差分法在公共检测阈值设定上存在难度。对文献[20]的 d4 小波分量法来说, 两种负荷故障前后不仅特征差异明显, 且容易设置公共检测阈值, 该现象是由于无故障时负荷端电压受负荷类型影响很小而故障时的故障点电弧电压主要作用于负荷端, 该方法的不足是需在所有负荷侧均放置监测点。观察本文方法的特征量提取结果, 其故障前后的特征区分度达到了与文献[20]方法接近的效果, 由于本方法的监测点位于故障点前, 因此有效克服了文献[20]在应用中的不足。

4.5 负荷插拔和开关通断测试

对负荷插入插排前后、负荷拔出插排前后、开关闭合前后、开关断开前后引入的正常电弧进行测试。上述各种操作下的监测点电压曲线见附录 C 图 C1, 其特征能量曲线见图 13。观察附录图 C1 各时域波形曲线知, 负荷插拔、开关通断引入的正常电弧在时域波形上呈脉冲或无明显脉冲形态。其中, 图 C1(a)负荷插入和图 C1(c)开关闭合操作产生的电弧表现为时域波形中的脉冲信号, 该信号在图 13 中表征更为明显, 由于负荷插入和开关闭合时刻取决于人工操作时刻, 因此该时域脉冲可出现于任意相位而非故障电弧特有的 0 和 π 相位附近(对非开关电源类负荷来说); 负荷拔出插排时实际产生了微弱电弧, 图 C1(b)的时域波形虽无明显脉冲, 其特征能量波形却能够检测到脉冲信号, 这也从侧面反

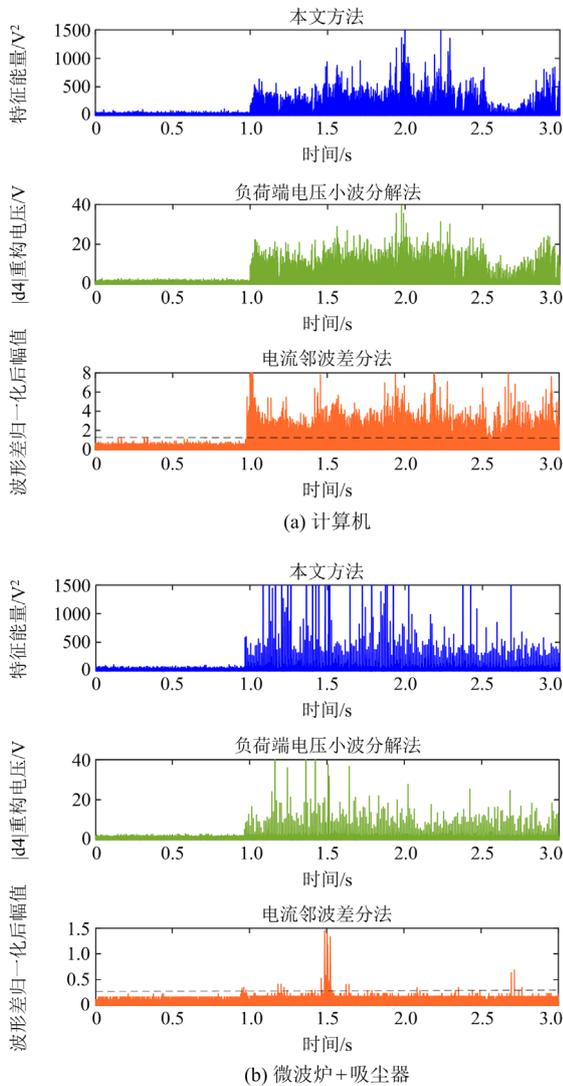
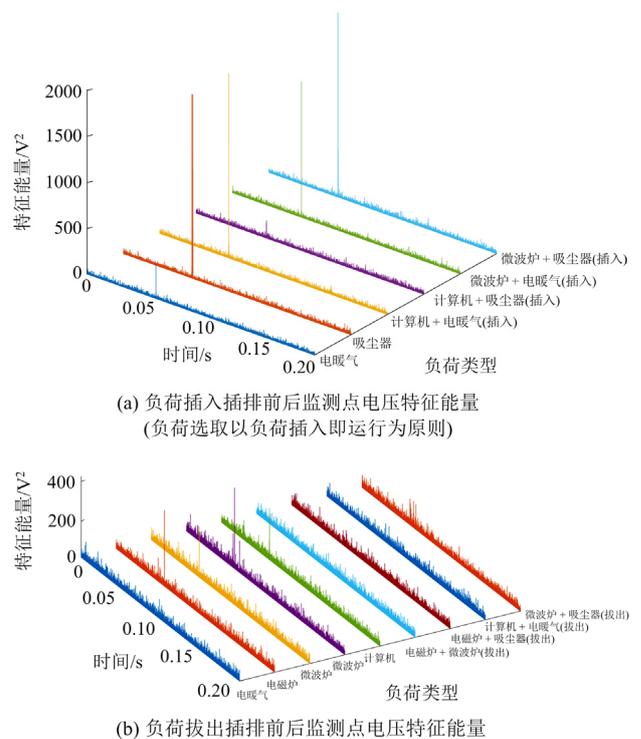


图 12 不同方法检测效果

Fig. 12 Detection effects of different methods



(a) 负荷插入插排前后监测点电压特征能量
(负荷选取以负荷插入即运行为原则)

(b) 负荷拔出插排前后监测点电压特征能量

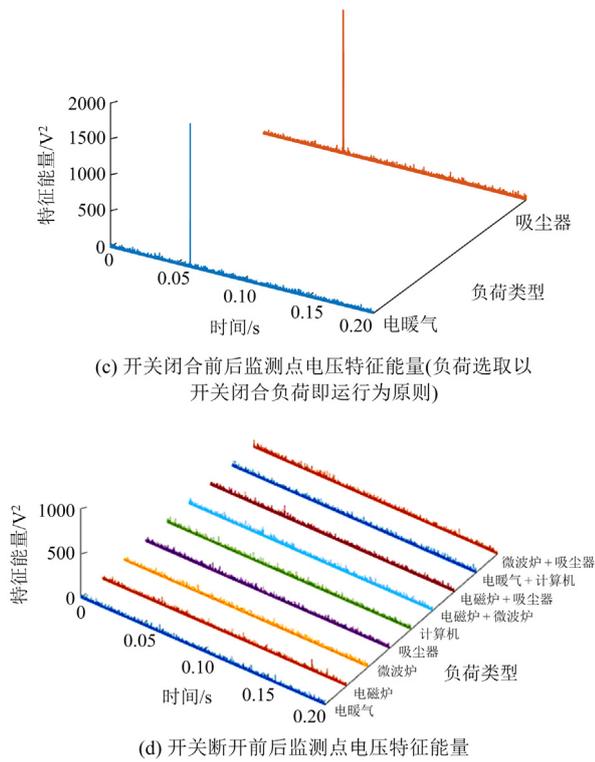


图 13 负荷插拔和开关通断下的特征能量测试
Fig. 13 Characteristic energy test of load plugging and switch on/off

映出本文方法对特征信号检测的灵敏性；图 C1(d)反映了开关断开操作时无电弧现象发生的情景，其时域和特征能量波形均无特征脉冲出现。

对图 7 所示 $l_0 + l_1 / l_2 / l_3$ 的不同线路参数，对文中所列 9 种负荷工作下的故障检测准确率进行测试。对每种负荷分别在 $l_0 + l_1 / l_2 / l_3$ 线路下的无故障状态、故障状态分别测试 15 次；对负荷插拔、开关通断下的正常操作电弧也分别测试 15 次，各参数阈值如 4.2 节和 4.3 节所述，测试结果见表 3。

表 3 电弧故障检测结果

Table 3 Detection results of arc faults

负荷	漏检次数			误检次数	检测准确率/%	正常操作电弧误检次数
	l_1	l_2	l_3			
电暖气	0	0	0	0	100	0
电磁炉	0	0	0	0	100	0
微波炉	0	1	0	0	98.9	0
吸尘器	0	0	1	0	98.9	0
计算机	0	0	0	0	100	0
电磁炉+微波炉	0	0	0	0	100	0
电磁炉+吸尘器	0	0	0	0	100	0
电暖气+计算机	0	1	0	0	98.9	0
微波炉+吸尘器	0	0	0	0	100	0

如表 3 所示，试验中未发生误检情况；此外，负荷插拔、开关通断产生的正常工作电弧也未发生误检，其原因是上述操作虽可能产生电弧且被检测到，但其仅会在半个周内持续几毫秒且不会连续发生，现有标准对故障电弧的判定均以连续多个周期或以 1 s 为单位设置故障判据，本文方法以 1 s 检测时间内的特征量构建故障判据，因此，负荷插拔和开关通断引入的电弧不会使本文方法发生误检。

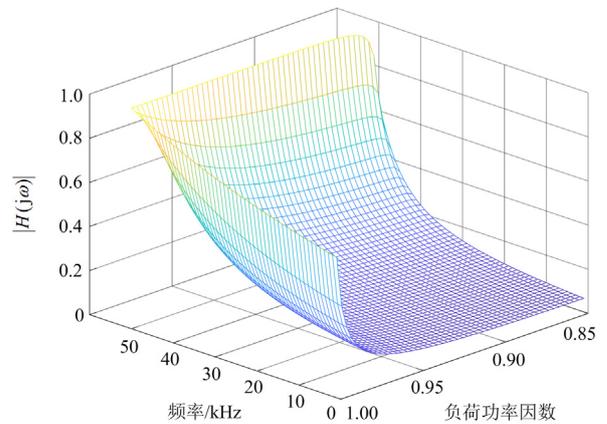
5 结论

以突出故障特征、抑制电源谐波干扰为原则，本文对监测点电压所用特征频带的选择依据进行了论证。监测点电压的特征频带能量是故障点电弧电压特征频带信号的直接反映，利用电压特征能量的故障检测具有故障特征物理意义明确、受负荷类型影响小、易构建统一判据的优点。

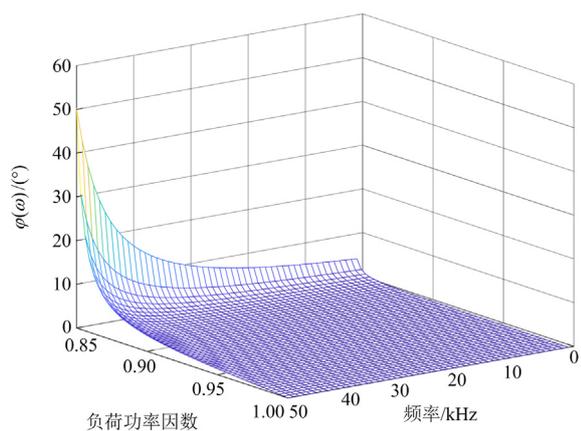
基于开关电源和非开关电源两大类负荷工作下的故障点电弧电压各自波形特点，文中分别提出了利用电压特征频带全域能量幅值和最大瞬时特征能量敏感相位域映射统计比的检测方法，通过构建综合判据满足不同类型负荷下的故障检测。其中，敏感相位域能量相位映射统计比的检测方法融合了特征能量幅值和相位特征，将故障判据由常规的幅值判据转化为最大瞬时特征能量的相位分布判据，避免了实际应用中由于电弧燃烧随机性、负荷阻抗差异导致的幅值判据阈值设置困难的不足。

监测点位于故障点上游的电压检测方法在工程上易于实施；本文方法中的监测点电压可使用电阻分压方式获取、特征频带信号可使用模拟带通滤波器获取，因此具有低成本特点。现有串联电弧故障检测多利用电流特征实现，利用电压特征能量的检测方法是电弧故障检测的一种新思路。

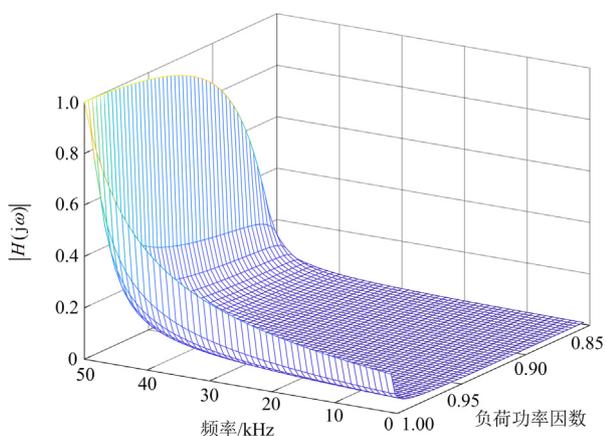
附录 A



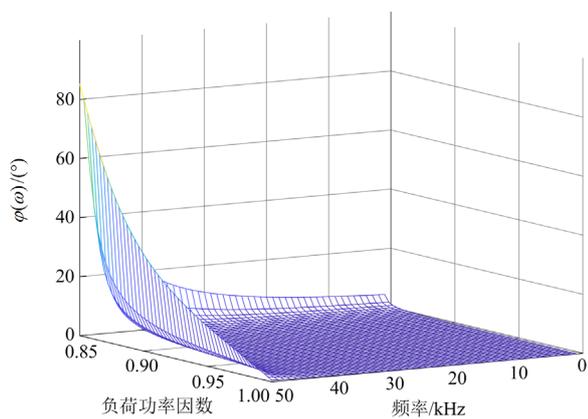
(a) 幅频特性($R_L = 4 \Omega$)



(b) 相频特性($R_L = 4 \Omega$)



(c) 幅频特性($R_L = 40 \Omega$)



(d) 相频特性($R_L = 40 \Omega$)

图 A1 不同功率负荷的故障分量传递网络频率特性
Fig. A1 Frequency characteristics of fault component transmission networks with different power loads

附录 B

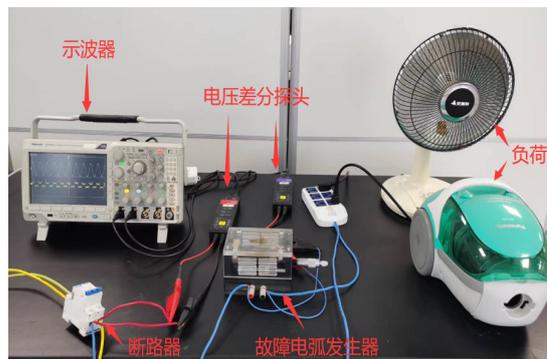
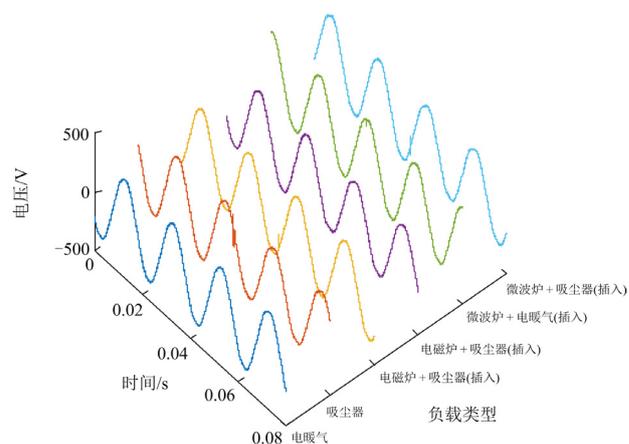


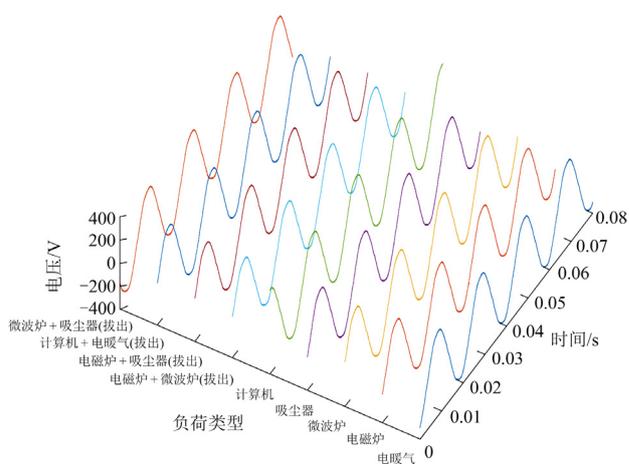
图 B1 实验平台实拍图

Fig. B1 Actual photo of the experimental platform

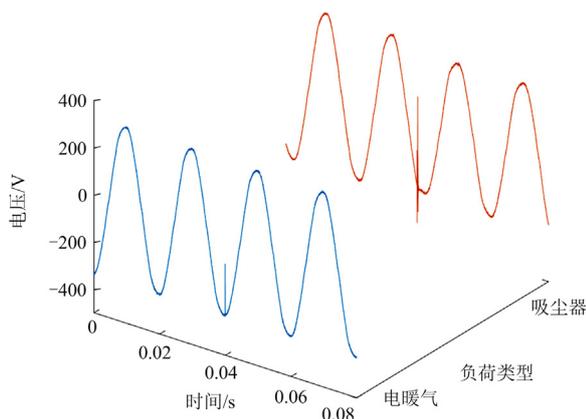
附录 C



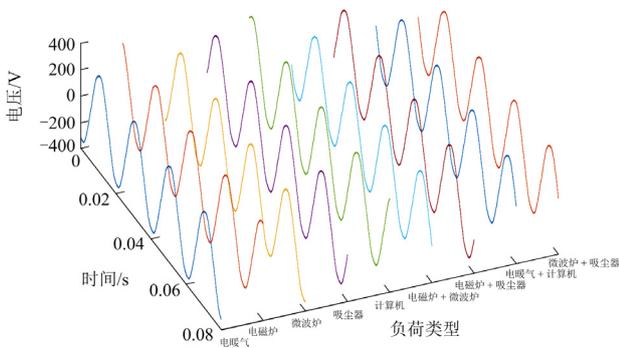
(a) 负荷插入插排前后监测点电压波形曲线
(负荷选取以负荷插入即运行为原则)



(b) 负荷拔出插排前后监测点电压波形曲线



(c) 开关闭合前后监测点电压波形曲线(负荷选取以开关闭合负荷即运行为原则)



(d) 开关断开前后监测点电压波形曲线

图 C1 负荷插拔和开关通断下的监测点曲线
Fig. C1 Monitoring point curves of load plugging and switch on/off

参考文献

[1] 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.

[2] 张冠英, 赵若姿, 王尧. 基于 FCM 算法的光伏系统电弧故障检测方法研究[J]. 高压电器, 2022, 58(5): 15-22.
ZHANG Guanying, ZHAO Ruozi, WANG Yao. Study on arc fault detection method of photovoltaic system based on FCM[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(5): 15-22.

[3] 蔺华, 王子龙, 郭振华, 等. 考虑弧长动态变化的配电网电弧接地故障建模及辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 31-39.
LIN Hua, WANG Zilong, GUO Zhenhua, et al. Modeling and identification of a distribution network arc grounding fault considering arc length dynamic variation[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 31-39.

[4] 熊庆, 陈维江, 汲胜昌, 等. 低压直流系统故障电弧特征、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 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): 6015-6026.

[5] 孟羽, 李兴文, 吴子豪, 等. 光伏系统直流故障电弧时频域特性及其复合模型研究[J]. 高压电器, 2022, 58(5): 23-30, 40.
MENG Yu, LI Xingwen, WU Zihao, et al. Research on time-frequency characteristics and composite models of DC arc faults in photovoltaic system[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(5): 23-30, 40.

[6] 赵铁军, 孟菁, 宋岳奇, 等. 组串式光伏系统直流串联电弧故障检测与保护策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 74-82.
ZHAO Tiejun, MENG Jing, SONG Yueqi, et al. Series arc detection and protection on the DC side of string-type PVs[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 74-82.

[7] 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.

[8] 王尧, 田明, 谢振华, 等. 基于电流相似度与高频能量的串联故障电弧检测方法[J]. 电测与仪表, 2022, 59(6): 158-165.
WANG Yao, TIAN Ming, XIE Zhenhua, et al. Series arc fault diagnosis method based on current similarity and high-frequency energy[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(6): 158-165.

[9] 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.

[10] HUMBERT J B, SCHWEITZER P, WEBER S. Serial-arc detection by use of spectral dispersion index (SDI) analysis in a low-voltage network (270V HVDC)[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 196: 1-12.

[11] PAN Q, SLAVISA J, JINMI L, et al. Discrete wavelet

- transform optimal parameters estimation for arc fault detection in low-voltage residential power networks[J]. *Electric Power Systems Research*, 2017, 143: 130-139.
- [12] 白辉, 许志红. 基于小波包变换和高阶累积量的电弧故障识别方法[J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(11): 195-202. BAI Hui, XU Zhihong. Arc fault identification method based on wavelet packet transform and high-order cumulant[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(11): 195-202.
- [13] WANG Yangkun, ZHANG Feng, ZHANG Shiwen. A new methodology for identifying arc fault by sparse representation and neural network[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2018, 67(11): 2526-2537.
- [14] 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.
- [15] LI Zongbo, JIAO Zaibin, HE Anyang, et al. A denoising-classification neural network for power transformer protection[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*. 2022, 7(4): 814-827.
- [16] WANG Yangkun, ZHANG Feng, ZHANG Xueheng, et al. Series AC arc fault detection method based on hybrid time and frequency analysis and fully-connected neural network[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2019, 15(12): 6210-6219.
- [17] 崔朴奕, 李国丽, 张倩, 等. 基于VMD-CNN的小电流接地系统故障电弧检测方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(23): 18-25. CUI Puyi, LI Guoli, ZHANG Qian, et al. A fault arc detection method of a small current grounding system based on VMD-CNN[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(23): 18-25.
- [18] VU H D, CALDERON D, SCHWEITZER P, et al. Multi criteria series arc fault detection based on supervised feature selection[J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2019, 113: 23-34.
- [19] 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.
- [20] 缪希仁, 郭银婷, 唐金城, 等. 负载端电弧故障电压检测与形态小波辨识[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(3): 237-244. MIAO Xiren, GUO Yinting, TANG Jincheng, et al. Load side arc fault voltage detection and identification with morphological wavelet[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(3): 237-244.
- [21] 李晓波, 陈义刚, 陈文斌, 等. 基于小波和深度学习的配电网单相接地故障辨识[J]. *电测与仪表*, 2021, 58(4): 115-120. LI Xiaobo, CHEN Yigang, CHEN Wenbin, et al. Identification of single-phase grounding fault in distribution network based on wavelet and deep learning[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2021, 58(4): 115-120.
- [22] 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, MIU 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.
- [23] 高海洋, 王玮, 尚同同, 等. 基于小波能谱熵的串联型故障电弧检测方法[J]. *电工电能新技术*, 2022, 41(12): 63-71. GAO Haiyang, WANG Wei, SHANG Tongtong, et al. Series fault arc detection method based on wavelet energy spectrum entropy[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2022, 41(12): 63-71.
- [24] 屈建宇, 马龙涛, 陈思磊, 等. 光伏系统直流串联故障电弧检测方法[J]. *电网与清洁能源*, 2021, 37(3): 125-130. QU Jianyu, MA Longtao, CHEN Silei, et al. Detection methods of DC series arc faults in the photovoltaic system[J]. *Power System and Clean Energy*, 2021, 37(3): 125-130.
- [25] 许志红. 电器理论基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- [26] 徐丙垠. 配电网继电保护与自动化[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [27] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2020.

收稿日期: 2023-03-04; 修回日期: 2023-05-16

作者简介:

王 玮(1983—), 男, 博士研究生, 副教授, 主要从事电力物联网、配电网故障检测方面的研究工作; E-mail: wwsdut@163.com

徐丙垠(1961—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力线路故障监测、配电自动化技术方面的研究工作. E-mail: xuby@vip.163.com

(编辑 张 颖)