

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306836

电压电流能量信息融合的低压交流电弧故障检测*

王俊法¹ 胡伟² 王伟¹ 徐丙垠¹ 邹国锋¹

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院 淄博 255049; 2. 湖北省电力公司电力科学研究院 武汉 430077)

摘要:针对串联电弧故障检测判据选择难、阈值设置难的问题,本文在传统基于电流检测方法的基础上融合使用电压信息,提出了一种电压电流能量信息融合的交流电弧故障检测方法。以分析开关电源和非开关电源类负荷下的各自故障特征为基础,提出了利用电压半波总能量的开关电源类电弧故障直接判定方法,并融合使用电压电流特征能量波形相关性实现故障线路的选择;提出了基于敏感域电压电流最大瞬时特征能量相位匹配的适用于非开关电源类负荷下的故障检测方法,以特征能量相位信息构建判据,克服了传统检测方法的阈值设定困难问题。本文检测方法判据虽利用了负荷分类思想,但由于开关电源类负荷下的故障检测可利用电压半波总能量幅值实现故障直接判定,因此实际应用中无需辨识负荷类型。相较传统利用电流特征的检测方法,本文方法具有判据简单、易于阈值设定的优势。试验结果表明,本文方法可有效用于多种类型负荷的电弧故障检测,检测时间满足相关标准规定。

关键词: 串联电弧故障; 特征频带; 特征能量; 波形匹配; 相位匹配

中图分类号: TM501.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Low voltage AC arc fault detection based on energy information fusion of voltage and current

Wang Junfa¹ Hu Wei² Wang Wei¹ Xu Bingyin¹ Zou Guofeng¹

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

2. Electric Power Research Institute of State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077, China)

Abstract: Aiming at the problems of difficult selection of criteria and threshold setting for series arc fault detection, this paper proposes a voltage and current energy information fusion method for AC arc fault detection based on the traditional current detection method by integrating the use of voltage information. Based on the analysis of the respective fault characteristics of switching power supply and non-switching power supply loads, a direct determination method of Arc fault of switching power supply using the total voltage half-wave energy is proposed, and the fault line is selected based on the correlation of voltage and current characteristic energy waveform. A fault detection method suitable for non-switching power supply loads is proposed based on the phase matching of maximum instantaneous characteristic energy of voltage and current in the sensitive domain. The criterion is constructed with characteristic energy phase information, and the difficulty of threshold setting in traditional detection methods is overcome. Although the detection method in this paper uses the idea of load classification, it is not necessary to identify the type of load in practical application because the fault detection under switching power supply loads can be directly determined by using the total energy amplitude of the voltage half-wave to determine the fault directly. Compared to traditional detection methods based on current characteristics, this method has the advantages of simple criteria and easy threshold setting. Experimental results confirm the effectiveness of the proposed method in detecting arc faults in various load types, with detection time meeting industry standards.

Keywords: series arc fault; characteristic band; characteristic energy; waveform matching; phase matching

0 引言

根据统计数据,我国电气火灾数量占每年火灾总数的 30%以上,占据各类火灾的首位^[1-2],其中由电气线路引发的火灾占据了电气火灾总数的 50%以上^[3]。线路故障中,由于并联电弧故障一般可触发过流保护,接地电弧故障可利用剩余电流检测技术实施保护;相较而言,串联电弧故障难以使用上述方法进行保护,从波形特征看,由于串联电弧故障电流波形特征受负荷类型影响很大,其特征选择和阈值设定成为限制其检测效果的一大难题^[4]。

现有串联电弧故障检测方法主要以识别电流或电压中的故障特征实现检测^[5]。其中,电流检测方法由于仅需在入户母线处安装单监测点即能实现对其下游线路的故障监测,其工程上易于实施的优势使其成为电弧故障检测技术的研究热点^[6]。从电流特征看,现有检测方法多利用电流的零休点奇异性^[7]、波形相似性^[8]、谐波含量^[9]、高频含量^[10]以及上升率^[11]等特征构建故障判据;受到非线性负荷的影响,利用单一特征通常难以满足故障检测时负荷的多类型要求,因此基于机器学习和深度学习技术的多特征融合技术近几年受到了众多学者的关注^[12],此类方法通过训练不同负荷下的负荷电流与故障电流的样本数据以构建故障检测的黑盒模型实现故障检测^[13],实际应用中,此类方法对未知负荷的适用性^[14]、最优特征的选择^[15]以及实时性仍是值得研究的问题^[16]。

电弧故障发生时,故障点的电弧故障电压源会在监测点得以体现,其中,由于负荷阻抗占据了回路阻抗的绝大部分,因此电弧故障源的低频成分主要作用于负荷侧,文献[17-18]即利用故障点电弧电压的起弧断相角对负荷侧电压造成的畸变进行电弧故障检测。在负荷侧进行电弧故障检测虽具有很高的检测灵敏度,但此类方法需对每个负荷分别设置监测点且监测点需具备与入户开关的通信功能,因此其离实际工程应用较远。

电弧故障发生时,受到电源绕组和线路电感存在的影响,电弧故障源的高频成分会在故障点上游监测点得以体现,监测点在感受到故障电压特征的同时会同时感受到故障电流特征。文献[19]提出了利用故障电流高频随机特征的检测方法,文献[20]提出了利用电流低频相似性和高频能量的检测方法,文献[21]通过分析电弧熄灭重燃时高频剩余磁通的耦合信号,利用高阶统计量工具计算出耦合信号的峭度值用于电弧故障检测。尽管上述方法分别从不同角度利用了故障电流的高频特性开展检测,但实际应用中,受到负荷阻抗特征差异、不同应用场景下的线路参数差异和电弧故障源随机性的影响,电流检测方法的阈值设定依然是困扰电弧故障检测的

难题^[22]。

基于上述原因,本文提出了一种电压电流能量信息融合的电弧故障检测方法,从分析不同负荷的故障点电弧电压源特征差异出发,针对非开关电源和开关电源类负荷下监测点的电压电流特征差异,分别提出了基于电压电流特征能量敏感相位协同、电压特征总能量和电压电流特征能量波形匹配的电弧故障检测方法。使用电压电流特征能量相位判据可避免传统检测方法的幅值判据在阈值设定上的不足,实现对非开关电源类负荷下的故障检测;用电压特征总能量实现开关电源类负荷下的故障检测,并用电压电流特征能量波形匹配度保证故障检测的选择性。相比传统利用电流特征的检测,电压电流特征协同的检测具有判据简单且易于阈值设定的优势。

1 电压及电流故障特征分析

1.1 时频域特征联合分析

电弧电压发生过程分为起弧、燃弧和熄弧 3 个阶段^[23]。其中,起弧和熄弧阶段发生在电流过零期间,其变化情况受负荷阻抗和电弧电阻影响;燃弧阶段电弧电压则取决于电弧的动态伏安特性,对低压电弧来说,电弧稳定燃烧时,燃弧电压近似等于近阳极和近阴极压降之和^[24]。电弧发生时,其能否稳定燃烧取决于燃弧阶段的负荷电流大小,以此为原则,将负荷分为开关电源与非开关电源两大类。对开关电源类负荷来说,其断相期间由于电流很小或接近于 0 而无法维持电弧稳定燃烧,致使该过程的电弧电压表现出高频震荡特征;对非开关电源类负荷来说,其燃弧阶段电压近似为直流^[25],其高频特征则出现在电弧电压的熄弧-起弧以及起弧-燃弧过渡阶段。

对图 1 中两类负荷的电弧电压及电流进行短时傅里叶变换,如图 2 所示。从相位看,对开关电源类负荷来说,其高频特征主要分布在电弧电压燃弧阶段的振荡区域与电流断相的整个区域;对非开关电源类负荷来说,其高频特征主要分布在电流过零附近与电弧电压起弧-燃弧和熄弧-起弧阶段的特定区域。从频率构成看,无论开关电源类负荷还是非开关电源类负荷,其电弧电压和电流对应的时域波形特定区域内具有涵盖 0 ~ 50 kHz 宽频带范围的频率幅值变化。

从图 2 中可以看出,电弧电压和电流对应的特定区域具有从低频到 50 kHz 相同的频率变化范围,为了保留更多的故障特性信息应选择尽量宽的特征频带。实际电源中的谐波次数一般在 40 次以内,考虑到滤波器阻带的过渡效应,最低频率选择 3 kHz;考虑到频率很高时幅值很小,且与噪声存在重叠部分,最高频率选择 40 kHz。因此为抑制低频谐波且降低噪声干扰,保证信号的信噪比,

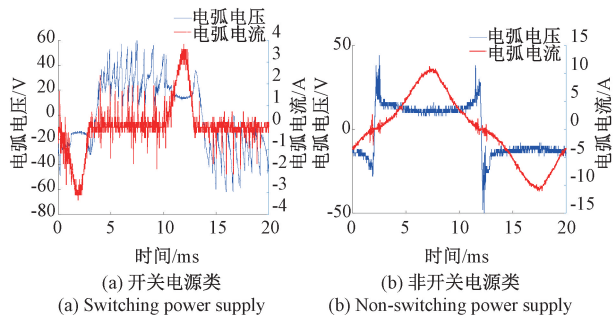


图1 两类负荷的电弧电压及电流波形

Fig. 1 Arc voltage and current waveforms of two types of loads

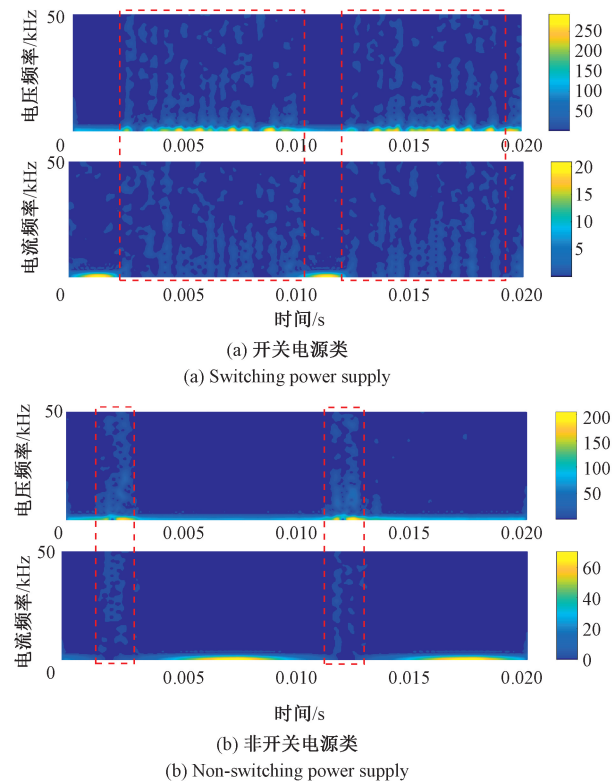


图2 两类负荷下的故障点电弧电压及电流短时傅里叶变换谱图

Fig. 2 Short-time Fourier spectra of arc voltage and current at fault point under two kinds of loads

选取 3~40 kHz 频段作为电压和电流的特征频带。

线路发生串联故障电弧时,相当于在故障点串入一个故障电弧电压源 u_{arc} [26],其等效电路如图 3(a)所示,图 3(b)为其故障分量等效电路,实际中监测点下游的用户侧线路较短,可忽略 L_2 、 C_2 的影响,且在高频阶段,可忽略线路电阻的影响,因此高频阶段的等效电路如图 3(c)所示。

图 3 中 L_s 为变压器绕组电感, L_1 、 R_1 为监测点至电源侧线路阻抗, L_2 、 R_2 为监测点至负荷侧线路阻抗, L_L 、

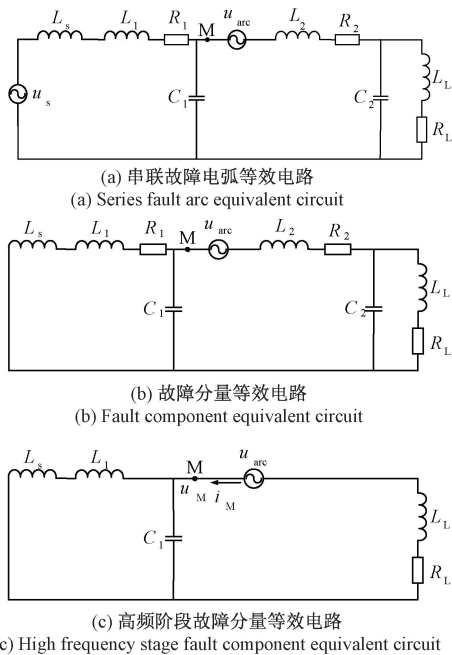


图3 串联故障电弧等效电路分析

Fig. 3 Analysis of equivalent circuit of series fault arc

R_L 为负荷等效阻抗, C_1 、 C_2 为线间电容。

在图 3(c)所示故障分量的高频阶段等效电路中, i_M 是由故障源在线路中对负荷等效阻抗和线路阻抗产生激励的结果, u_M 可视作故障源对回路阻抗的分压。监测点 M 处故障分量受电源和线路阻抗以及负荷等效阻抗的影响,在低频范围内,因电阻对故障分量的影响较大,负荷等效阻抗远大于电源和线路阻抗,且由于电弧电压有效值较低,因此低频故障分量在监测点 M 处难以被检测到;在高频范围内,电感和电容占主要地位,线路阻抗随线路长度的增加而增大,且电源和线路阻抗随频率增大而增大,因此高频故障分量在监测点 M 处显著增大。

1.2 特征能量分析

监测点 M 处的高频故障分量可用特征频带下的特征能量进行表征。利用带通滤波器获取故障前后特征频带下的电压电流幅值,经计算得到电压电流特征能量如图 4 所示,其中 1~30 周波为正常状态,31~60 周波为故障状态。

电流特征是电压特征的间接表现,其理论上应与电压特征变化一致。从图 4 中可以看出,不同负荷的故障后特征能量幅值较故障前显著增加,某种特定负荷其自身能够区分正常状态与故障状态;受负荷阻抗差异、电弧随机性的影响,特征能量出现随机性差异,部分波形故障时的特征能量幅值与正常状态相仿。因此,不同负荷的特征能量难以具有相同的幅值变化,特征能量幅值作为绝对特征难以设置统一阈值。

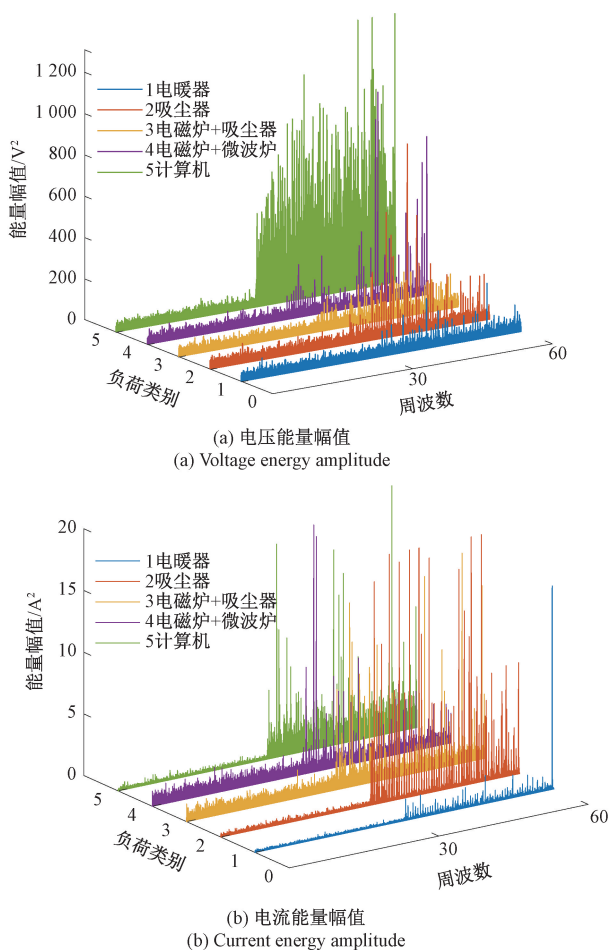


图 4 不同负荷下电压电流故障前后能量幅值对比
 Fig. 4 Comparison of energy amplitude before and after voltage and current fault under different loads

受到负荷等效阻抗差异的影响, 电流特征能量分布与电压特征能量分布存在一定差异。如图 4(b) 中的组合负荷故障前电流特征能量与其他负荷有较大幅值差异, 电暖器故障后的大多数周波电流特征能量与组合负荷故障前的电流特征能量幅值甚至相仿。对计算机来说, 其故障后电压特征能量分布密集, 其幅值显著大于自身故障前及其他负荷故障后状态, 其故障后电流特征能量虽分布密集, 但其总体幅值仍不如大多数负荷。因此, 对开关电源类负荷来说, 可直接使用电压半波特征总能量作为其故障检测的特征量, 考虑到电压特征不具备故障线路的选择能力, 可利用电压电流特征协同来进行电弧故障检测。

1.3 相位特征分析

根据前文分析, 对非开关电源类负荷来说, 监测点故障特征能量信号出现于电弧电压沿的上升与下降区域, 电弧电压波形相位受制于负荷电流, 因此两者相位一致, 该区域也即对应于电流的零休区域。

线路阻抗和线间电容对监测点及故障点电压相位偏移影响很小, 实际中影响电压相位偏移的影响因素主要是负荷功率因数。家用电器负荷功率因数多在 0.9 以上, 鉴于该原因, 对非开关电源类负荷下的故障检测来说, 实际故障特征能量的选取可在 0 和 π 附件增加一定的相位偏移。非开关电源类负荷的特征能量信号理论上以较高幅值出现在监测点, 如图 5 所示, 其相位对应于图 6(a) 中的 A_{pha1} 和 A_{pha2} 相位域, 因此, 将 $[-\varphi, \varphi]$ 和 $[\pi-\varphi, \pi+\varphi]$ 区域作为非开关电源类负荷的故障检测敏感区域。因此选取敏感区域的电压电流能量相位特征作为相对特征用于非开关电源类负荷检测。

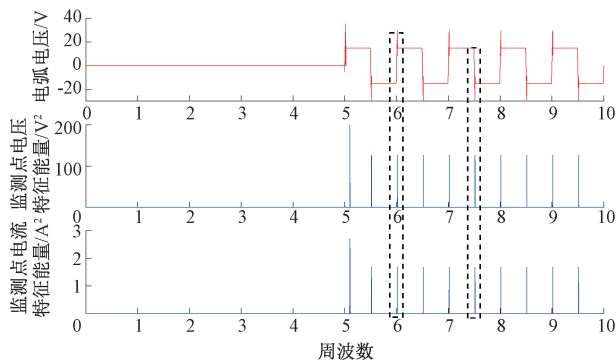


图 5 非开关电源类负荷故障前后电压电流特征能量分布
 Fig. 5 Voltage and current characteristic energy distribution before and after non-switching power supply load fault

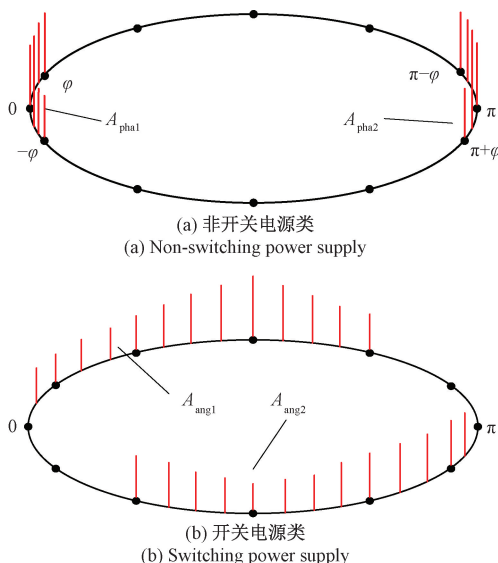


图 6 特征频带信号最大瞬时能量相位分布
 Fig. 6 Phase of maximum instantaneous energy of characteristic frequency band signal

开关电源类负荷特征能量信号理论上则以较高幅值出现在其整个电流断相区域, 对应于图 6(b) 中的 A_{ang1} 和

$A_{\text{ang}2}$ 相位域,该相位域范围较大,其电压电流相位信息不明显。

1.4 波形特征分析

对监测点来说,其监测到的电压、电流信息是负荷特征的直接反映。高频信号下,由于负荷的伏安特性近似为线性,因此上述电压特征能量与电流特征能量在波形上也将表现出相似性。

对图7所示电暖器负荷来说,其阻性特性使其每个周波下的电压特征能量与电流特征能量均呈现很高的相似性。尽管如此,对非线性负荷来说,受到各周波电弧故障电压源频率成分差异的影响,仅利用单周波电压与电流特征能量难以保证电压与电流特征能量波形的相似性。实际应用中,由于负荷类型未知,可通过多个电压与电流特征能量波形叠加增强的方式提高电压与电流的相似匹配度。

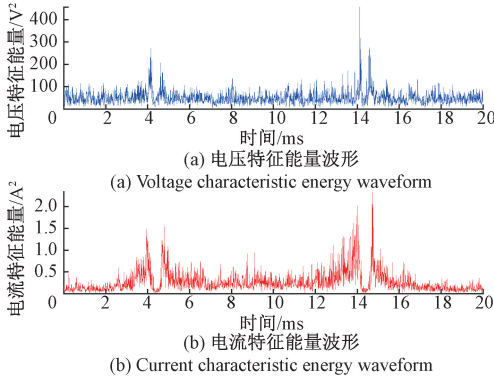


图7 电暖器负荷下电压电流特征能量波形对比

Fig.7 Comparison of voltage and current characteristic energy waveform under electric heater load

电压与电流特征能量的波形相似性可用于弥补仅利用电压特征构建故障判据时的故障线路选择问题,对文中方法来说,波形相似性仅用于开关电源类负荷下的故障检测。

2 电压电流能量信息协同的故障检测方法

根据上述分析,电弧故障时,故障点上游监测点能够检测到电压及电流的故障特征能量,因此,选取半波特征总能量、特征能量波形相似性以及特征能量相位等协同信息实现对开关电源类和非开关电源类负荷下的电弧故障检测。

2.1 融合电压半波总能量和电压电流能量波形相似度的开关电源类检测

1) 对开关电源类负荷来说,电弧电压振荡区域存在故障特征频带,以电压半波特征总能量作为故障特征量。以半波为单位,设电压特征总能量为 $E_h^{(i)}$:

$$E_h^{(i)} = \sum_{n=1}^{N/2} [u_{\text{sf}}^{(i)}(n)]^2 \quad (1)$$

式中: i 为半波序号; N 为每个周波的采样点数; $u_{\text{sf}}^{(i)}(n)$ 为 $u_s^{(i)}(n)$ 带通滤波后的序列。

构建故障判据如下:

$$\begin{cases} E_h^{(i)} \geq E_{\text{th}} \\ \text{num}[E_h^{(i)} \geq E_{\text{th}}] > C_h^{\text{th}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: E_{th} 为电压半波总能量的检测设定阈值; $\text{num}[\]$ 表示对达到条件的半波计数; C_h^{th} 为用以确定电弧故障的半波数量阈值。当出现的故障半波数量 C_h 累加达到或超过该阈值时,判定电弧故障发生。

2) 由于仅利用电压特征无法保证对故障线路的选择性,可利用电压电流的特征能量波形匹配进行弥补。考虑到单周期电压和电流特征能量波形相似性可能较低,因此利用多个相邻周期的电压和电流特征能量波形进行叠加增强以提高波形相似度。

$$E_{\text{add}}(n) = \sum_{j=1}^D [E_c^{(j)}(n)] \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

式中: j 为周波序号; N 为每个周波的采样点数; D 为叠加的周波数; $E_c^{(j)}(n)$ 为周波瞬时特征能量。

由于波形相似性反映了两个波形低频轮廓的相似程度,因此在相似度计算之前需对叠加后的电压电流特征能量波形进行平滑滤波处理。

$$E_s = \text{smooth}[E_{\text{add}}(n)] \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

式中: $\text{smooth}[\]$ 为对数组进行平滑滤波计算。

平滑滤波的方法为移动平均法:将某一数据段内的数据取平均值,得到平均数,然后将该平均数作为这个数据段的预测值。其公式为:

$$F_t = \frac{f_{t-1} + f_{t-2} + \dots + f_{t-n}}{m} \quad (5)$$

式中: t 为数据点数; F_t 为移动平均值; f_t 为采样数据; m 为移动平均的窗口长度。

使用斯皮尔曼相关系数衡量两个变量序列的相关程度,斯皮尔曼相关系数 r_s 计算公式为:

$$r_s = \frac{\sum_{k=1}^W (x_k - \bar{x})(y_k - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{k=1}^W (x_k - \bar{x})^2 \sum_{k=1}^W (y_k - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

式中: x_k 为变量序列 X 中第 k 个数据的等级数; \bar{x} 为变量序列 X 的平均数; y_k 为变量序列 Y 中第 k 个数据的等级数; \bar{y} 为变量序列 Y 的平均数; W 为序列中数据的个数。斯皮尔曼相关系数 r_s 的值介于 $-1 \sim 1$, 其绝对值越接近 1, 两变量之间的相关性越强。

以周波为单位,计算带通滤波后各点电压瞬时特征能量 $E_{\text{uc}}^{(j)}(n)$ 和电流瞬时特征能量 $E_{\text{ic}}^{(j)}(n)$:

$$\begin{cases} E_{uc}^{(j)}(n) = [u_{sf}^{(j)}(n)]^2 \\ E_{ic}^{(j)}(n) = [i_f^{(j)}(n)]^2 \end{cases} \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

式中: $u_{sf}^{(j)}(n)$ 为 $u_s^{(j)}(n)$ 带通滤波后的序列; $i_f^{(j)}(n)$ 为 $i^{(j)}(n)$ 带通滤波后的序列。

利用特征增强得到叠加后的周波各点特征能量 $E_{uadd}(n)$ 和 $E_{iadd}(n)$, 对其进行平滑处理得到电压特征能量波形 E_{us} 和电流特征能量波形 E_{is} 。

利用斯皮尔曼相关系数计算电压特征能量波形 E_{us} 和电流特征能量波形 E_{is} 的相关系数:

$$\begin{cases} |r_s(E_{us}, E_{is})| \geq \rho, & 1 \\ |r_s(E_{us}, E_{is})| < \rho, & 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: ρ 为相关系数阈值, 当判断结果为 1 时电压和电流的特征能量波形相匹配, 该线路为开关电源类负荷所在故障线路。

2.2 融合能量幅值和相位信息的非开关电源类检测

利用敏感域电压电流的相位信息可实现非开关电源类负荷下的电弧故障检测。选取敏感域特征频带下电压电流瞬时特征能量的最大值, 并结合最大瞬时特征能量相位信息以构建判据。

以半波为单位, 计算带通滤波后各点电压瞬时特征能量 $E_u^{(i)}(n)$ 和电流瞬时特征能量 $E_i^{(i)}(n)$:

$$\begin{cases} E_u^{(i)}(n) = [u_{sf}^{(i)}(n)]^2 \\ E_i^{(i)}(n) = [i_f^{(i)}(n)]^2 \end{cases} \quad n = 1, 2, \dots, N/2 \quad (9)$$

式中: i 为半波序号; N 为每个周波的采样点数; $u_{sf}^{(i)}(n)$ 为 $u_s^{(i)}(n)$ 带通滤波后的序列; $i_f^{(i)}(n)$ 为 $i^{(i)}(n)$ 带通滤波后的序列。

计算 $E_u^{(i)}(n)$ 和 $E_i^{(i)}(n)$ 中的瞬时特征能量最大值 $E_{umax}^{(i)}$ 和 $E_{imax}^{(i)}$:

$$\begin{cases} E_{umax}^{(i)} = \max[E_u^{(i)}(n)] \\ E_{imax}^{(i)} = \max[E_i^{(i)}(n)] \end{cases} \quad n = 1, 2, \dots, N/2 \quad (10)$$

式中: $\max[\]$ 为计算数组的最大值。

计算各瞬时特征能量最大值 $E_{umax}^{(i)}$ 和 $E_{imax}^{(i)}$ 对应的相位 $\theta_u^{(i)}$ 和 $\theta_i^{(i)}$:

$$\begin{cases} \theta_u^{(i)} = \text{bmod}\left[\alpha + (G - 1) \frac{2\pi}{N}\right]_{2\pi} \\ \theta_i^{(i)} = \text{bmod}\left[\beta + (H - 1) \frac{2\pi}{N}\right]_{2\pi} \end{cases} \quad (11)$$

式中: α 为对信号 $u_s(n)$ 进行快速傅里叶变换得到的本周波的工频初相角; β 为对信号 $i(n)$ 进行快速傅里叶变换得到的本周波的工频初相角; G 为最大瞬时特征能量 $E_{umax}^{(i)}$ 对应的采样点序号; H 为最大瞬时特征能量 $E_{imax}^{(i)}$ 对应的采样点序号; $\text{bmod}[\]_{2\pi}$ 为对运算结果以 2π 为周期进行取模计算。

理论上, 对应于 A_{pha1} 和 A_{pha2} 相位域的 $\theta_u^{(i)}$ 和 $\theta_i^{(i)}$ 相

位差值应在一定范围内, 构建故障判据为:

$$\begin{cases} \theta_u^{(i)} \in A_{pha1}, A_{pha2} \\ \theta_i^{(i)} \in A_{pha1}, A_{pha2} \\ |\theta_u^{(i)} - \theta_i^{(i)}| \leq \delta \\ \text{num}[\ |\theta_u^{(i)} - \theta_i^{(i)}| \leq \delta] \geq C_A^{th} \end{cases} \quad (12)$$

式中: δ 为映射于 A_{pha1} 和 A_{pha2} 相位域的 $\theta_u^{(i)}$ 和 $\theta_i^{(i)}$ 的相位差绝对值阈值; $\text{num}[\]$ 表示达到条件的半波数量; C_A^{th} 为确认发生故障时符合相位差条件的半波数量阈值。当发生的故障半波数量 C_A 累加达到或超过 C_A^{th} 时, 则判定发生电弧故障。

2.3 检测方法总流程

基于前述分析, 构建本文方法的总流程如图 8 所示。

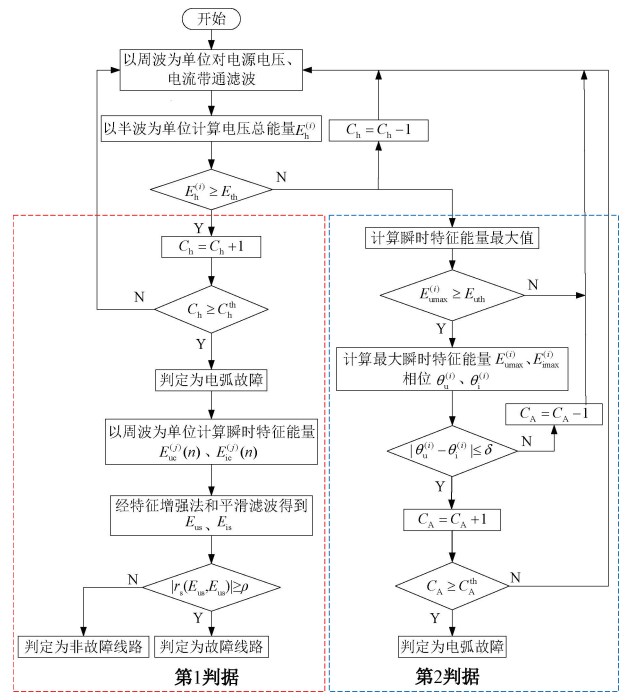


图 8 检测方法总流程

Fig. 8 General flow chart of detection method

检测方法以电压半波总能量 $E_h^{(i)}$ 是否越限作为进入第 1 判据或第 2 判据的选择条件, 在电弧故障发生时, 若电压半波总能量超过阈值, 那么一定是开关电源类负荷发生电弧故障, 算法直接进行第 1 判据的电弧故障的数量判定和故障选线; 若电压半波总能量没有超过阈值, 那么开关电源类负荷无故障发生, 而非开关电源类负荷有可能发生电弧故障, 此时算法进入第 2 判据进行故障检测。因此, 检测方法中的第 1 判据与第 2 判据并列运行, 相互补充。

在第 1 判据中, 电压半波总能量作为故障检测的特征量, 当电压半波总能量 $E_h^{(i)}$ 大于等于设定阈值时, 开始累加满足条件的半波数 C_h , 以累加的半波数量 C_h 超过

设定阈值 C_h^{th} 作为故障判据,并以电压电流特征能量波形的匹配度实现故障线路的选择,实现对开关电源类负荷下的故障检测。为了避免干扰的影响,若电压半波总能量 $E_h^{(i)}$ 达不到设定阈值时,半波数量 C_h 自动减1,直至为0。

第2判据以电压最大瞬时特征能量 $E_{imax}^{(i)}$ 越限作为启动条件,当电压电流最大瞬时特征能量相位差绝对值满足设定阈值时,开始累加满足要求的半波数量 C_A ,以累加的半波数量 C_A 达到设定阈值 C_h^{th} 作为故障确认依据,实现对非开关电源类负荷下的故障检测。当电压电流最大瞬时特征能量相位差绝对值不满足设定阈值时,半波数量 C_A 同样设置自动递减,可有效避免干扰。在第2判据中利用电压电流最大瞬时特征能量相位差作为特征量,同时具备选择性,因此无需再增加用于故障选线的特征量。

3 实验验证

3.1 实验环境搭建

搭建实验平台如图9所示,实验平台主要由系统电源、线路、电弧发生装置、实验负荷以及实验采集装置构成。

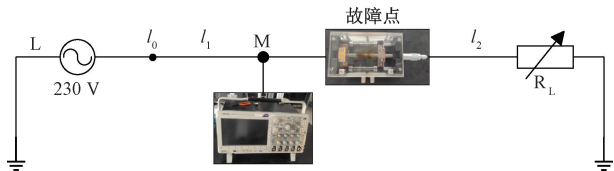


图9 实验原理

Fig. 9 Schematic diagram of experiment

系统电源为容量400 kVA、绕组电感120 μ H的配电变压器; I_0 为变压器母排至二级配电箱的固定三相线路,长度约为50 m, I_1 为长度100 m的单相线路, I_2 为长度20 m的单相线路。电弧发生装置根据UL 1699标准制作,通过控制电极间隙产生电弧模拟串联故障电弧的发生。利用示波器在监测点采集电压与电流信号,采样频率为100 kHz。串联故障电弧多发生于住宅及办公场所^[27],因此实验负荷以常见家用电器为主。表1为实验用负荷主要参数。

对于开关电源类负荷与其他负荷的组合,如计算机与电暖器组合,两种负荷一起工作时,因电暖器对线路电压和电流的影响大于计算机的影响,因此该组合负荷的电压和电流主要体现电暖器的特性,按负荷分类依据属于非开关电源类。因此,在本文所用负荷中,计算机负荷为开关电源类,其他所用负荷均为非开关电源类。

表1 实验负荷主要参数

Table 1 Main parameters of experimental load

序号	负荷	功率/W	类型
1	电暖器	1 000	阻性
2	电磁炉	1 800	阻感性
3	微波炉	1 500	磁控管
4	吸尘器	1 300	串激电机
5	计算机(5台)	300	开关电源
6	电磁炉+微波炉	3 300	组合负荷
7	电磁炉+吸尘器	3 100	组合负荷
8	电暖器+计算机	1 300	组合负荷
9	电暖器+微波炉	2 500	组合负荷
10	微波炉+吸尘器	2 800	组合负荷

3.2 电压半波总能量及电压电流能量波形匹配测试

1)以半波为单位计算各负荷故障前后电压瞬时特征能量的总值,得到电压半波总能量的变化情况如图10所示,其中1~10半波为正常状态,11~50半波为故障状态。

观察图10知,计算机负荷故障前后电压半波总能量变化显著,其他负荷故障前后电压半波总能量无明显变化,且故障后计算机负荷电压半波总能量与其他负荷存在明显差距,因此电压半波总能量可作为故障特征量实现开关电源类负荷下的电弧故障检测。综合考虑检测方法的灵敏度和可靠性,可考虑将电压半波总能量15 000 V^2 作为第1判据的启动判据。

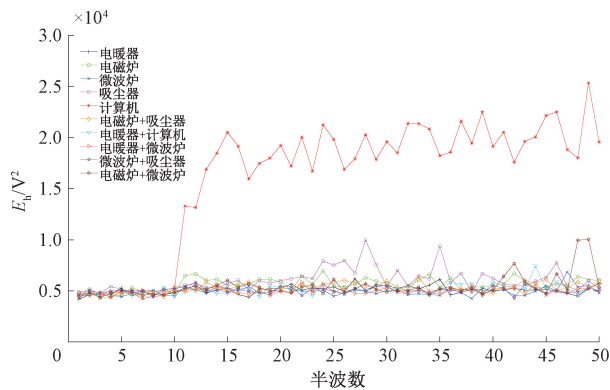


图10 不同负荷故障前后电压半波总能量对比

Fig. 10 Comparison of total energy of half-wave voltage before and after fault with different loads

2)确认电弧故障后,利用电压电流特征能量波形相似性实现开关电源类负荷检测的线路选择性识别。

图11中第1排波形为利用特征叠加增强后的电压电流特征能量波形,第2排波形为平滑滤波处理后波形,观察可知,经特征增强及平滑滤波后的电压电流特征能量波形相似度很高,其相关系数从0.3提高到了0.8。实

际中,特征增强叠加所用周波数量及平滑窗口大小均会影响波形相关系数大小,为选择最佳参数,使用不同的平滑窗口参数对不同周波数叠加的特征能量波形进行处理,其结果如图 12 所示,其中不同线型曲线代表不同的平滑窗口参数。

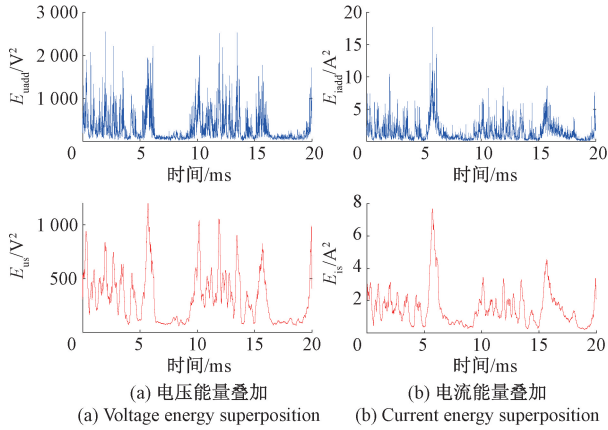


图 11 电压电流特征增强能量波形滤波前后对比

Fig. 11 Voltage and current characteristic enhanced energy waveform before and after filtering

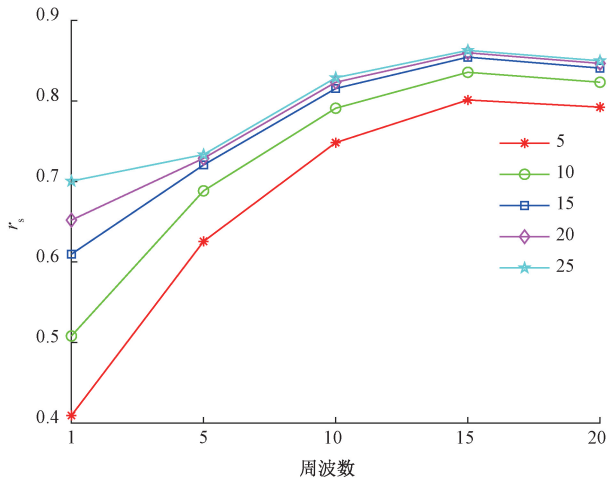


图 12 不同参数下的特征能量相似性对比

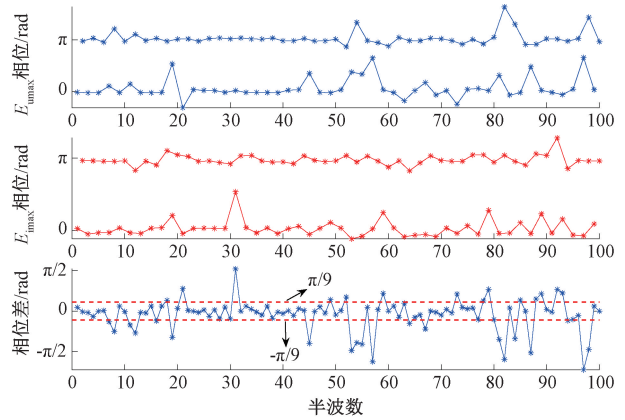
Fig. 12 Characteristic energy similarity comparison under different parameters

从图 12 中可知,叠加周波数过少或过多都会使得波形相似度降低,平滑窗口参数越大波形相似度越高。综合考虑波形相似度影响参数,以 15 个周波为单位进行特征能量增强,平滑窗口参数设置为 20,以相关系数 0.75 为判据,当电压电流特征能量波形匹配度在 0.75 及以上时,认为该线路为开关电源类负荷所在故障线路。

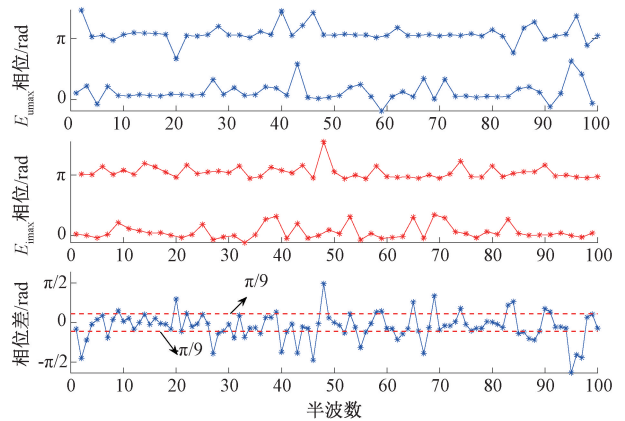
3.3 非开关电源类负荷的电压电流相位协同测试

以半波为单位,追踪串联电弧故障发生后连续 50 个整周波的电压电流瞬时特征能量最大值对应的相位,并

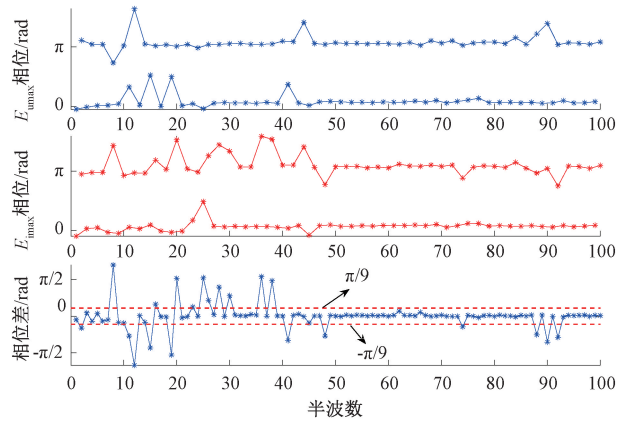
计算其相位差,结果如图 13 所示,其中为了更直观的凸显电压(电流)最大瞬时特征能量相位集中分布的特点,将前、后半波的最大瞬时特征能量相位分别进行了连接以便观察。从图 13 中可以看出各电压电流故障周波的前、后半波最大瞬时特征能量相位基本分布在 0 和 π 附近,除少数相位异常点外,整体呈现为趋于“平稳”的近似直线,各负荷电压电流最大瞬时特征能量相位差主要集中在 $[-\pi/9, \pi/9]$ 范围内,少数出现在该范围之外。



(a) 电暖器
(a) Electric heater



(b) 吸尘器
(b) Dust collector



(c) 电磁炉+吸尘器
(c) Induction cooker + dust collector

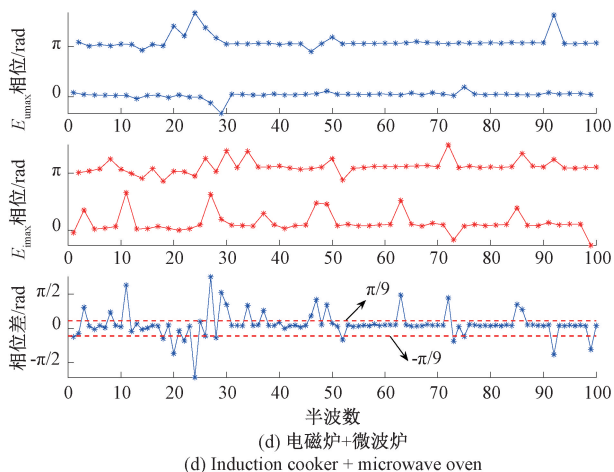


图 13 不同负荷电压电流最大瞬时特征能量相位分布

Fig. 13 Maximum instantaneous characteristic energy phase distribution of different load voltages and currents

对监测点来说,其故障后电压、电流最大瞬时特征能量相位基本在电流零休附近,实际低压电弧电流零休时间一般小于 1 ms,其电压电流瞬时特征能量最大值理论映射相位为 $[-\pi/18, \pi/18]$ 和 $[17\pi/18, 19\pi/18]$,考虑负荷功率因数的影响,增加 $2\pi/18$ 的相位偏移量,实际以 $[\pi/9, \pi/9]$ 和 $[8\pi/9, 10\pi/9]$ 相位域为非开关电源类负荷电弧故障检测的敏感区域。

综合考虑实检测方法的有效性与准确性,可考虑将电压最大瞬时特征能量 100 V^2 作为第 2 判据的启动判据,以 $\pi/9$ 作为电压电流最大瞬时特征能量相位差的绝对值阈值。

3.4 电弧故障检测方法测试

根据 GB 14287.4《电气火灾监控系统(第四部分:故障电弧探测器)》的要求,即在 1 s 内发生 14 个及其以上半周期的故障电弧时,故障电弧探测器应在 30 s 内发出报警信号;当在 1 s 内发生 9 个及其以下半周期的故障电弧时,故障电弧探测器不进行报警,但可采用其他方式的提示^[28]。因电弧燃烧的随机性,在发生电弧故障时会出现故障特征量的缺失情况,而在算法设计中,设置了故障特征量达不到设定阈值时半波数量会自动递减,该设置也会因故障特征量的缺失情况延长检测时间,确保了故障检测的准确性。因此,对两类负荷来说,当检测到电弧故障半波数量达到或者超过 14 个时确认为线路发生电弧故障。

图 14 为不同负荷下的各故障半波确认结果及最终检测结果展示,电弧故障从第 41 个半波开始产生。当达到启动条件开始故障确认过程,当满足条件的半波数量超过设定阈值时认为发生了电弧故障。

开关电源类负荷检测利用电压半波总能量作为启动

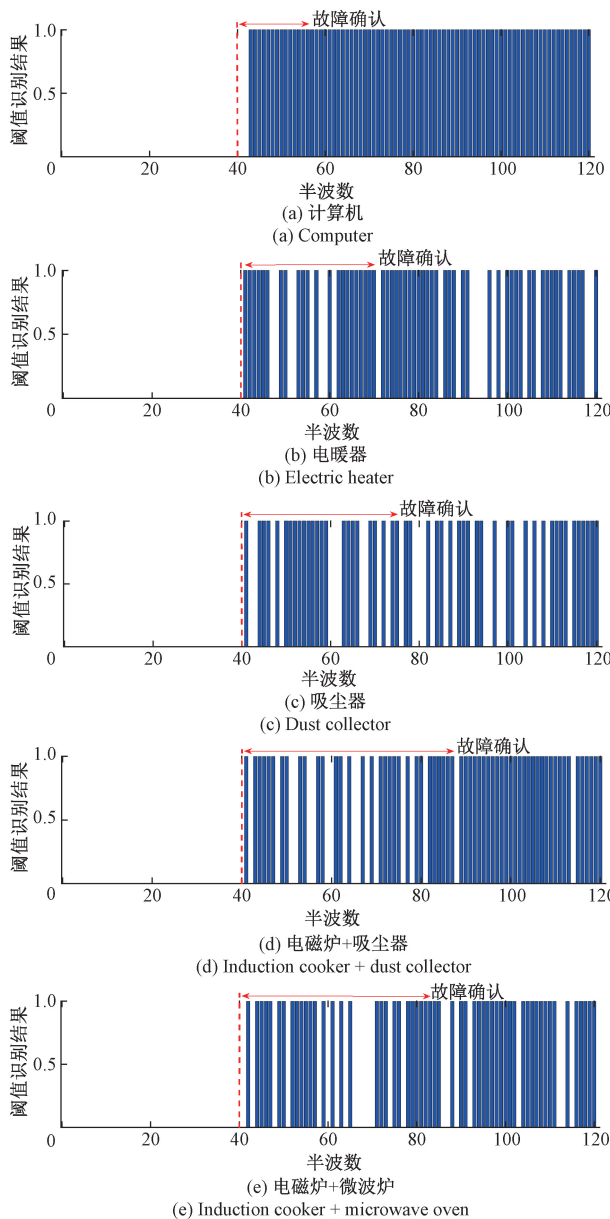


图 14 不同负荷下的电弧故障确认结果

Fig. 14 Arc fault confirmation results under different loads

判据,因此,无故障时负荷投切或系统干扰产生的少量幅值较大的电压瞬时特征能量脉冲不会造成该判据的误启动,故不会发生误检。非开关电源类负荷检测使用电压最大瞬时特征能量越限作为启动判据,此时无故障时的负荷投切或系统干扰产生的幅值较大的电压瞬时特征能量可能会导致该判据的误启动。对正常状态下的非开关电源类负荷的电压和电流最大瞬时特征能量相位来说,其理论上分布为均匀分布,存在电压和电流最大瞬时特征能量相位差绝对值满足设定阈值的情况,如图 15 所示,在第 11 个周波发生负荷投切。

观察图 15 可知,对非开关电源类负荷来说,正常时

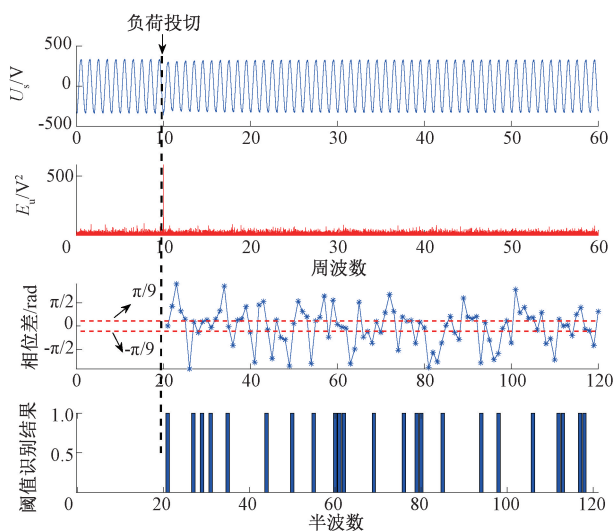


图 15 无故障时非开关电源类负荷电压电流最大瞬时特征能量相位匹配结果

Fig. 15 Phase matching results of maximum instantaneous characteristic energy of voltage and current of class load of non-switching power supply without fault

负荷投切或系统干扰产生的电压瞬时特征能量幅值会超过设定阈值导致第 2 判据误启动,不过出现超过设定阈值的电压瞬时特征能量数量很少,仅在发生负荷投切或系统干扰的几个周波或一个周波内。从图 15 中还可以看出,正常时相位映射满足检测设定区域的半波数量相比故障时更加稀疏,算法中设定的半波数量递减机制,可保证无故障时在规定的检测时间内累加的半波数量及时清零达不到故障判定所设定的阈值。因此,即使第 2 判据误启动,可通过半波数量递减机制避免误判。

为验证检测方法的有效性,以实验所用负荷及其组合进行测试,每种负荷进行 20 次测试,记录最小及最大故障确认时间,并验证是否会发生误检,结果如表 2 所示,由此可见,本文方法对实验用负荷所用检测时间均满足相关标准的规定,且无误检发生。

表 2 不同负荷的电弧故障检测结果

Table 2 Arc fault detection results of different loads

负荷	功率/W	检测时间/s	误检
计算机(5 台)	300	0.16~0.22	否
电暖器	1 000	0.28~0.57	否
电磁炉	1 800	0.26~0.50	否
微波炉	1 500	0.27~0.63	否
吸尘器	1 300	0.26~0.58	否
电磁炉+吸尘器	3 100	0.27~0.55	否
电暖器+计算机	1 300	0.28~0.55	否
电暖器+微波炉	2 500	0.29~0.58	否
微波炉+吸尘器	2 800	0.27~0.48	否
电磁炉+微波炉	3 300	0.28~0.49	否

4 结 论

本文提出了一种电压电流能量信息融合的电弧故障检测方法,综合利用电压半波总能量、电压电流特征能量波形相关性、敏感域电压电流最大瞬时特征能量相位信息实现了满足多类型负荷下的故障判据构建。

传统串联电弧故障检测方法均是仅利用电流信息,而本文方法则创新性的提出了同时使用电压和电流信息的检测思路。对开关电源类负荷下的故障检测来说,其监测点电压总能量幅值特征使其易于直接进行故障判定,利用电压电流特征能量的叠加增强的波形相似性识别方法则有效实现了故障线路的选择。对非开关电源类负荷来说,通过使用敏感域电压电流最大瞬时特征能量相位构建判据,避免了传统基于幅值特征检测存在的阈值设定难的问题。

本文将负荷类型主要分为开关电源类与非开关电源类,对于开关电源类负荷与其他负荷的组合类型,因其他负荷对电压与电流的影响较大属于非开关电源类。相比于传统仅利用电流特征的电弧故障检测,本文方法融合使用电压特征和电流特性,具有物理意义明确,判据简单、易于实施的优点。

参考文献

[1] 王英杰. 浅谈电气火灾监控系统的应用研究[C]. 中国消防协会学术工作委员会, 中国人民警察大学防火工程学院. 中国消防协会学术工作委员会消防科技论文集(2022). 中国石化出版社, 2022: 407-410.
WANG Y J. Discussion on the application research of electrical fire monitoring system[C]. Academic Working Committee of China Fire Protection Association, School of Fire Protection Engineering, People's Police University of China. Fire Science and Technology Proceedings of Academic Working Committee of China Fire Protection Association (2022). China Petrochemical Press, 2022: 407-410.

[2] 王尧,田明,牛峰,等. 低压交流电弧故障检测方法研究综述[J]. 电器与能效管理技术, 2018(10): 8-13,44.
WANG Y, TIAN M, NIU F, et al. Review of low voltage AC arc fault detection methods[J]. Electrical Appliances and Energy Efficiency Management Technology, 2018(10): 8-13,44.

[3] 王伟丽,郭歌. 建筑物电气火灾一体化智慧消防系统设计[J]. 消防科学与技术, 2019,38(11): 1570-1572.
WANG W L, GUO G. Design of integrated intelligent fire fighting system for building electrical fire[J]. Fire Science and Technology, 2019, 38(11): 1570-1572.

- [4] 王毅,陈进,李松浓,等. 基于时频域分析和随机森林的故障电弧检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(5):62-68.
WANG Y, CHEN J, LI S N, et al. Fault arc detection based on time-frequency domain analysis and random Forest [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(5):62-68.
- [5] GU J C, LAI D S, WANG J M, et al. Design of a DC series arc fault detector for photovoltaic system protection[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(3): 2464-2471.
- [6] 余琼芳,胡亚倩,杨艺. 基于小波特征及深度学习的故障电弧检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(3): 100-108.
YU Q F, HU Y Q, YANG Y. Fault arc detection based on baud sign and deep learning[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(3): 100-108.
- [7] 郑昕,单潇洁. 低压交流电弧电流零区电压波形特征分析与应用[J]. 电工技术学报, 2020, 35(22): 4717-4725.
ZHENG X, SHAN X J. Analysis and application of zero region voltage waveform of low voltage AC arc current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(22): 4717-4725.
- [8] 吴春阳,倪良华,汤智谦,等. 基于动态模式匹配距离的配电网单相接地故障选线研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(2):1-9.
WU CH Y, NI L H, TANG ZH Q, et al. Research on single-phase grounding fault line selection in distribution network based on dynamic mode matching distance[J]. Power Grids and Clean Energy, 2022, 38(2): 1-9.
- [9] 崔芮华,佟德栓,李泽,等. 航空交流电弧故障和串扰问题的频域分析及特征量提取[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(6):18-26.
CUI R H, TONG D H, LI Z, et al. Aviation AC arc fault and the crosstalk problem of frequency domain analysis and characteristic extraction [J]. Journal of Motor and Control, 2021, 25(6): 18-26.
- [10] 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.
- [11] 苏晶晶,许志红. 基于EMD和PNN的故障电弧多变量判据诊断方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(4): 106-113.
SU J J, XU ZH H. Fault arc multi-variable criterion diagnosis method based on EMD and PNN[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4): 106-113.
- [12] 杨洋,黄罗杰,李平,等. 基于多维度特征提取的电弧故障检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(10): 107-115.
YANG Y, HUANG L J, LI P et al. Arc fault detection method based on multi-dimension feature extraction [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 201, 35(10): 107-115.
- [13] 张婷,张认成,杨凯. 基于非对称卷积神经网络的电弧故障检测系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(11): 116-125.
ZHANG T, ZHANG R CH, YANG K. Arc fault detection system based on asymmetric convolutional neural network [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(11): 116-125.
- [14] 卢静雅,翟术然,张兆杰,等. 基于电流模式分解的非入户式故障电弧识别[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(6):206-211.
LU J Y, ZHAI SH R, ZHANG ZH J, et al. Non-indoor fault arc identification based on current mode decomposition[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(6): 206-211.
- [15] LI J J, ZOU G F, WANG W, et al. Low-voltage series arc fault detection based on ECMC and VB-SCN [J]. Electric Power Systems Research, 2023:218.
- [16] 王毅,朱敏杰,沈红伟,等. 基于CNN与特征周期变化率的故障电弧检测嵌入式系统实现研究[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(6):147-155.
WANG Y, ZHU M J, SHEN H W, et al. Research on embedded fault arc detection system based on CNN and characteristic period change rate [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(6): 147-155.
- [17] 高洪鑫,郭凤仪,唐爱霞,等. 采用负载端电压预测串联故障电弧[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2019, 38(4):359-365.
GAO H X, GUO F Y, TANG AI X, et al. Prediction of series fault arc by load terminal voltage[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2019, 38(4): 359-365.
- [18] 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 X R, GUO Y T, TANG J CH, et al. Fault voltage detection and morphological wavelet identification of arc at load end [J]. Journal of Electrotechnics, 2014, 29(3): 237-244.
- [19] 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 Q Y, PENG K, CHEN Y, et al. AC series arc fault identification method based on arc randomness and convolutional network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(24): 162-169.
- [20] 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 Y, TIAN M, XIE ZH H, et al. Based on the current similarity and series arc fault detection method of high frequency energy [J]. Electric Measurement and Instrument, 2022, 59(6): 158-165.
- [21] 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 G H, JIANG R. Research on series arc fault detection based on asymmetric flux distribution [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(3): 54-61.
- [22] 张婷,王海淇,张认成,等. 基于自归一化神经网络的电弧故障检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(3): 141-149.
- ZHANG T, WANG H Q, ZHANG R CH, et al. Arc fault detection method based on self-normalization neural network [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(3): 141-149.
- [23] 姜姗,周浩,魏颖. 电器学[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2021.
- JIANG SH, ZHOU H, WEI Y. Appliances[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2021.
- [24] 卢其威. 故障电弧检测技术与应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2020.
- LU Q W. Fault Arc Detection Technology and Application [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2020.
- [25] 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 H Y, WANG W, SHANG T T, et al. Series fault arc detection method based on wavelet energy spectrum entropy[J]. New Technology of Electroengineering and Electric Energy, 2022, 41(12): 63-71.
- [26] 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): 8674-8689.
- WANG W, XU B Y, SUN ZH Y, et al. Differential detection method of arc fault voltage in low voltage distribution network [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(22): 8674-8689.
- [27] National Electrical Code[S]. NFPA 70, 2017.
- [28] 中国国家标准化管理委员会. 电气火灾监控系统第 4 部分故障电弧探测器:GB 14287.4—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- Standardization Administration of China. Electrical fire monitoring systems - Part 4-Fault arc detectors: GB 14287.4-2014 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.

作者简介



王俊法, 2021 年于山东理工大学获得学士学位, 现为山东理工大学电气工程硕士研究生, 主要研究方向为低压电弧故障检测。

E-mail: qw117201@163.com

Wang Junfa received his B. Sc. degree from Shandong University of Technology in 2021. Now he is a M. Sc. Candidate at Shandong University of Technology. His main research interest includes low voltage arc fault detection.



王玮(通信作者), 2007 年于山东大学获得硕士学位, 现为山东理工大学电气与电子工程学院副教授, 主要研究方向为电力物联网和配电网故障检测。

E-mail: wwsdut@163.com

Wang Wei received his M. Sc. degree from Shandong University in 2007. Now he is an associate professor in School of Electrical and Electronic Engineering of Shandong University of Technology. His main research interests include power IoT and distribution network fault detection.