

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.02.006

## 变频系统中交流电弧故障特性及检测技术

曾珂, 邢丽冬, 高杨, 王莉

(南京航空航天大学自动化学院, 南京, 211106)

**摘要:** 目前, 交流电弧故障特性分析基本上都是基于恒频系统, 先进飞机交流电源系统向变频电源方向发展, 频率变化范围为 360~800 Hz。交流电弧故障的特征量如电流变化率、平肩段比例、谐波分量等都会随着频率而变化, 因此恒频系统的电弧故障检测算法无法完全适用于变频系统中。基于此, 本文搭建了交流电弧故障实验平台, 在 115 V/360~800 Hz 条件下模拟了串行和并行电弧故障。在此基础上, 分析了不同频率条件下故障电流的变化规律, 从时域和频域角度研究了交流电弧故障电流的特征, 提取了电流有效值的标准差、奇次谐波功率和偶次谐波功率和作为变频系统电弧故障检测的特征量, 最后设计并验证了交流电弧故障检测算法的有效性和可行性。

**关键词:** 变频系统; 交流电弧故障; 时域特征; 频域特征; 检测算法

**中图分类号:** V37      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2020)02-0215-09

## AC Arc Fault Characteristics and Detection Technique in Variable Frequency System

ZENG Ke, XING Lidong, GAO Yang, WANG Li

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 211106, China)

**Abstract:** In recent research, AC arc fault characteristic analysis is basically based on constant frequency system. The AC power supply of aircraft is developing towards the direction of variable frequency power supply, and the frequency range is 360—800 Hz. The characteristics extracted from constant frequency system, such as current change rate, the ratio of flat shoulder and harmonic component will change with frequency, which cannot be applied in variable frequency system. Therefore, this paper designs the AC arc fault experiment platform, and the serial and parallel arc faults are simulated under the condition of 115 V/360—800 Hz. Based on this, the change rule of arc current under different frequencies is analyzed. The characteristics of AC arc fault are studied in time domain and frequency domain respectively, then the standard deviation, odd harmonic and even harmonic are extracted as the characteristics of arc fault detection in the variable frequency system. Finally the effectiveness and feasibility of AC arc fault detection algorithm is designed and verified through experiment.

**Key words:** variable frequency system; AC arc fault; time domain characteristic; frequency domain characteristic; detection algorithm

飞机的飞行环境恶劣, 振动、高温、水雾、辐射、强氧化等因素会导致接线松动、线缆老化, 甚至绝缘损坏。在接线松动的部位或者绝缘损坏的部位就可能产生电弧故障。电弧具有高温, 极有可能引

**基金项目:** 国家自然科学基金(51877102)资助项目。

**收稿日期:** 2018-05-10; **修订日期:** 2019-05-19

**通信作者:** 王莉, 女, 教授, 博士生导师, E-mail: liwang@nuaa.edu.cn。

**引用格式:** 曾珂, 邢丽冬, 高杨, 等. 变频系统中交流电弧故障特性及检测技术[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(2): 215-223. ZENG Ke, XING Lidong, GAO Yang, et al. AC arc fault characteristics and detection technique in variable frequency system[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(2): 215-223.

燃周围的易燃易爆物品,引发火灾,对安全造成极大威胁<sup>[1]</sup>。传统的保护方法无法对电弧故障进行保护,因此有必要开展交流系统中电弧故障特性及检测技术研究,保证电气系统的安全运行。

电弧故障检测方法主要通过检测电流、电压的变化以及这些物理量的派生变量来检测电弧故障。由于不能预先确定线路上电弧故障发生的位置,因此多采用检测电流信号来判断电弧故障。根据信号特征提取方法的不同,电弧故障特征可以分为时域特征和频域特征<sup>[2]</sup>。时域特征主要有电流变化率、有效值、峰峰值、平均值及平肩段比例等<sup>[3-7]</sup>。时域特征抗干扰性能差,系统正常的波动暂态过程会导致这些量的改变;电流变化率随着频率的增大而增大;平肩段的比例随着频率的增大而减小。频域特征主要有谐波分量、奇次谐波和、偶次谐波和等<sup>[8-11]</sup>。发生电弧故障时,电流波形发生畸变,引入了谐波。但波形的畸变程度随着频率的增大而减小。这些特征都是针对固定频率系统提取的,在变频系统中无法完全适用。

目前电弧故障检测技术可以分为时域方法<sup>[3-5]</sup>和频域方法<sup>[8-12]</sup>。文献[2]提取电流峰值,通过求取前4个周期与后4个周期峰值的差值进行电弧故障判定。文献[4]以电流数据周期均值变化率为交流电弧检测的判据进行电弧故障判定。文献[3]基于网络分形理论,提取电弧电流的电流变化率,通过检测电流突变点实现了电弧故障判定。时域方法简单,但是抗干扰性能差,系统中正常的波动暂态过程就会引起时域特征量的改变,对检测可靠性造成影响。文献[8]提取3次谐波和100~2000 Hz范围内谐波分量进行电弧故障判定。文献[12]提取电流信号的基波分量,然后比较相邻周期基波幅值大小进行电弧故障判定。频域方法也有一定的局限性,一些非线性负载回路正常工作状态下电流就含有丰富的谐波,容易造成误判。

以上这些方法实现了串行电弧的判定,但均采用单一特征进行检测,容易受电弧的随机性和不稳定性影响,使得提取的特征存在奇异性,对检测算法可靠性造成影响。

考虑到飞机电源系统为115 V/360~800 Hz,本文在115 V/360~800 Hz条件下模拟了串行和并行电弧故障,并采集分析了电流信号。分析了不同频率条件下故障电流的变化规律,提取并分析了在电源频率360~800 Hz条件下均适用的时域特征量和频域特征量。最后,结合时域特征量和频域特征量实现了串行和并行电弧故障检测,检测率达90%以上。

## 1 实验平台及数据分析

### 1.1 实验平台

电弧故障实验平台如图1所示,主要由电压源、故障模拟与注入模块、负载、线路监控模块、配电网监控与控制单元组成。

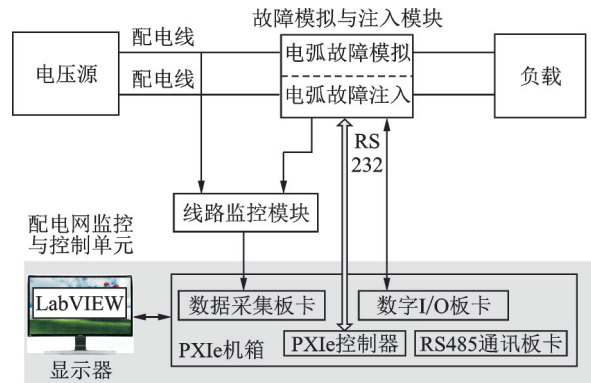


图1 电弧故障实验平台

Fig.1 Platform of AC arc test

故障模拟与注入模块原理图如图2所示。按照UL1699标准设计了电弧发生器(图3),在电弧故障模拟实验中,通过控制步进电机驱动电弧发生器的两个电极分离来模拟产生电弧故障。通过控制图2中的4个接触器主触点的闭合断开状态实现电弧故障的注入。其中电阻R用于在并行电弧故障实验时限制电源输出的电流,防止短路。

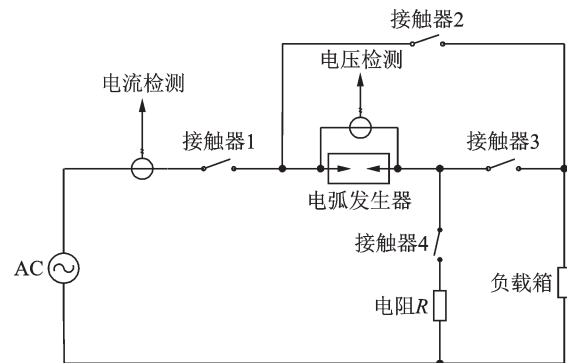


图2 故障模拟与注入原理图

Fig.2 Schematic diagram of fault simulation and injection

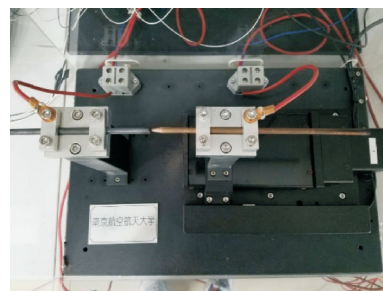


图3 电弧发生器

Fig.3 Arc generator

线路监控模块通过电压电流传感器采集电路信息,经电压电流检测调理电路调理得到数据采集板卡允许的输入信号,数据采集板卡对调理后的电压电流信号进行采集。

配电网监控与控制单元是整个平台的核心,通过232总线控制步进电机驱动的电弧发生器,实现电弧故障的模拟;通过数字I/O板卡控制中间继电器的开通与关断,从而驱动接触器的开通与关断,并检测接触器的状态;通过数据采集板卡实现电压、电流信号的采集。

## 1.2 实验数据分析

以115 V阻性负载条件下发生串行电弧故障为例,不同频率条件下电流波形如图4所示。由图4(a),(b)可以看出发生串行电弧故障时,电流幅值

减小,电流过零时出现了零休现象,电流波形发生畸变,偏离了正弦。图4(c—e)分别为400,600和800 Hz条件下发生电弧故障时电流波形。由图可以看出不同频率条件下发生串行电弧故障时,电流波形类似,电流幅值减小,电流波形发生畸变。电源频率360 Hz条件下零休区持续时间占整个周期的4%,400 Hz条件下零休区比例为3.9%,600 Hz条件下零休区比例为3.5%,800 Hz条件下零休区比例为3.2%,由此可得随着电源频率的增大,零休区的比例逐渐减小,畸变程度减小。这是由于随着电源频率的增高,弧隙热惯性的影响就更显著。由于电流下降时间的减少,弧柱温度变动就减少,温度接近于常数,从而点燃电压和熄弧电压都降低。

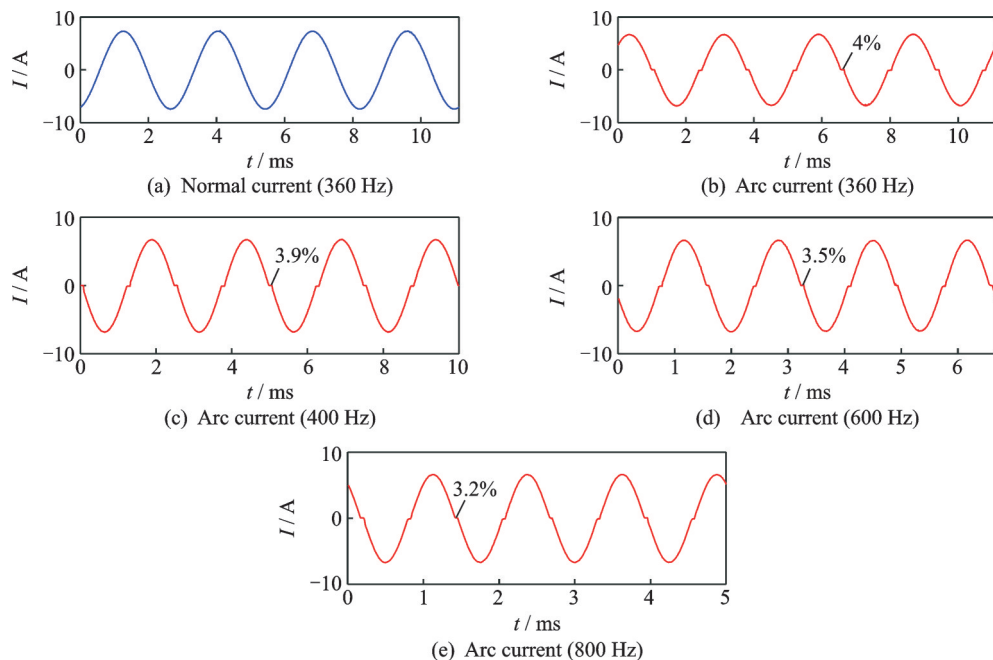


图4 不同频率条件下电流波形

Fig.4 Current waveforms of different frequencies

## 2 交流电弧故障特征分析

### 2.1 时域特征

由上一节分析可知,当发生电弧故障时,电流幅值改变,电流波形发生畸变,因此电流有效值将改变。对100 ms时间内采样的电流数据以电源周期为单位进行分组,然后提取每个周期数据的有效值。以115 V/400 Hz条件下发生串行和并行电弧故障为例,100 ms内各个周期电流有效值如图5所示。由图可以看出发生串行电弧故障时电流有效值减小,发生并行电弧故障时,电流有效值增大。正常情况下电流有效值基本不变,波动很小。由于电弧的随机性和不稳定性,发生电弧故障时电流有效值波动较大。

考虑到发生电弧故障时,电流有效值波动大,因此将统计学中标准差作为分析对象。有效值标准差的表达式为

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (I_i - \mu)^2} \quad (1)$$

式中: $\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i$ ;  $I_1, I_2, \dots, I_N$  为100 ms内各个周期电流有效值; $N$ 为100 ms时间内电流周期数。

在115 V不同负载类型(纯阻性、阻感性、阻容性、整流桥负载)、不同电源频率(360~800 Hz)、不同电流等级(5, 10 A)条件下正常电流有效值标准差和电弧电流有效值标准差对比箱线图如图6所示。箱线图是一种用作显示一组数据分散情况资

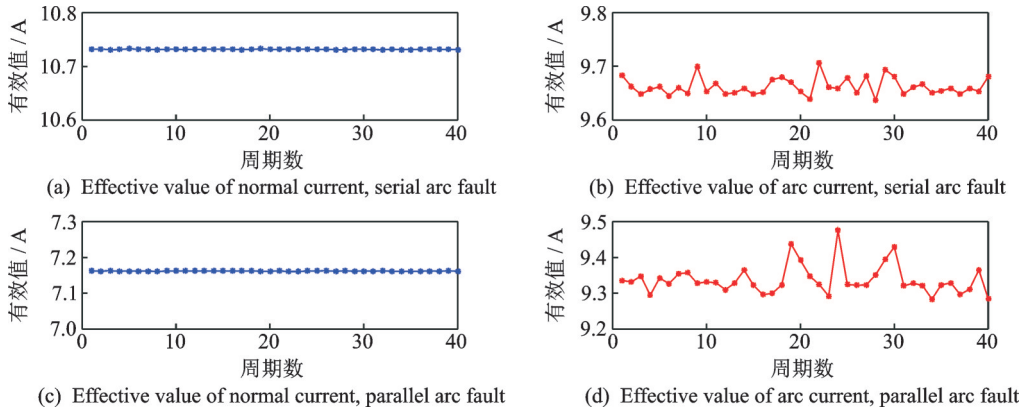


图5 电流有效值统计图

Fig.5 Statistical chart of current RMS value

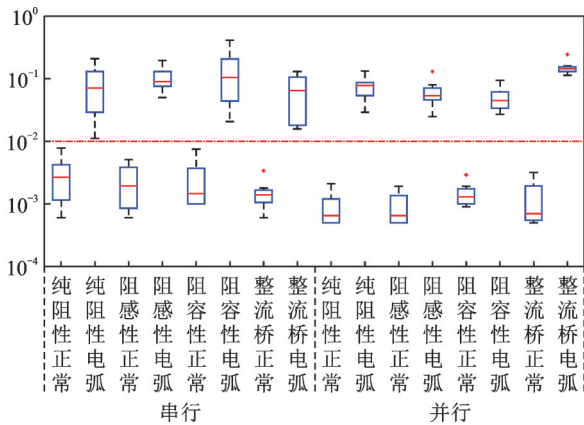


图6 有效值标准差对比图

Fig.6 Comparison chart of RMS standard deviation

料的统计图,主要用于反映原始数据分布的特征,还可以进行多组数据分布特征的比较。箱线图的绘制方法是:先找出一组数据的最大值、最小值、中位数和两个四分位数;然后,连接两个四分位数画出箱子;再将最大值和最小值与箱子相连接,中位数在箱子中间。以箱线图的形式可以直观地看出不同条件下电流有效值标准差的分布情况。从图中可以看出电弧电流有效值标准差的分布在正常电流有效值标准差之上,电流有效值的标准差可以作为电弧故障检测的时域特征量。

有效值标准差累积概率如图7所示,设正常情况有效值标准差为随机变量 $X$ ,则正常情况有效值标准差累积概率为 $F_X(x)=P(X \leq x)$ ,设电弧情况有效值标准差为随机变量 $Y$ ,则电弧情况有效值标准差累积概率为 $F_Y(y)=P(Y \leq y)$ 。

假设阈值为 $a$ ,虚警率指正常情况下误判为电弧的概率即 $P(X > a) = 1 - P(X \leq a) = 1 - F_X(a)$ 。

检测率指电弧情况下判断出电弧的概率即 $P(Y > a) = 1 - P(Y \leq a) = 1 - F_Y(a)$ 。

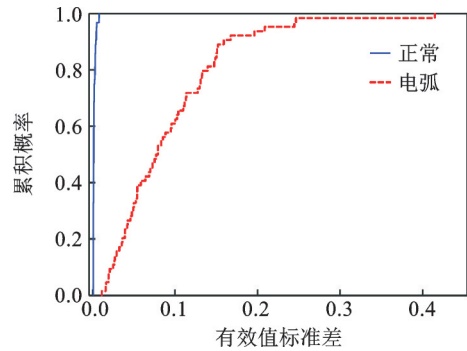


图7 有效值标准差累积概率

Fig.7 Cumulative probability of RMS standard deviation

虚警率和检测率统计图如图8所示,从图中可以看出随着阈值的增大虚警率和检测率呈下降趋势。当阈值大于0.007 8时,虚警率为0%;当阈值小于0.011 1时,检测率为100%。因此在区间0.007 8~0.011 1范围内选择阈值可以实现虚警率0%、检测率100%。

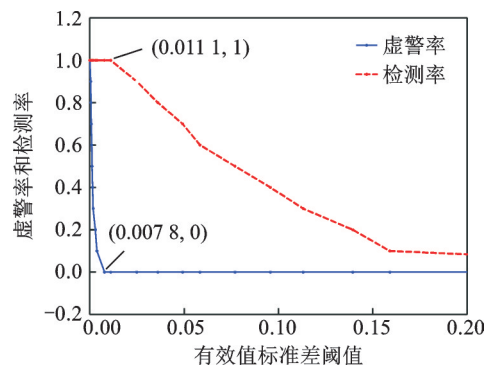


图8 虚警率和检测率随有效值标准差阈值变化统计图

Fig.8 Statistical chart of change of false alarm rate and detection rate with RMS standard deviation threshold

## 2.2 频域特征

由1.1节分析可知,当发生电弧故障时,电流波形发生畸变,从而导致了谐波的产生。本节将采用短时傅里叶变换(Fast Fourier transformation,

FFT)分析采集到的电流数据。通过比较各种情况下电弧电流与正常电流频谱的差异,提取能够识别交流电弧故障的频域特征量。

由 2.1 节分析可知,随着频率增大,电流波形畸变程度减小。因此本节以 800 Hz 条件下发生电弧故障为例,对电弧故障频域特征进行分析。电弧电流和正常电流频谱图如图 9 所示,其中位于上方的红色线条表示电弧电流频谱,位于下方的蓝色线条表示正常电流频谱。由图 9 可以看出电路正常工作时,电流谐波分量非常小,几乎趋近于零。当发生电弧故障时,电流频谱幅值整体增大,特别是在奇次谐波处出现了明显的尖峰。为了增大电弧状态和正常状态的区分度,下文将对奇次谐波、偶次谐波分别提取其谐波功率和。

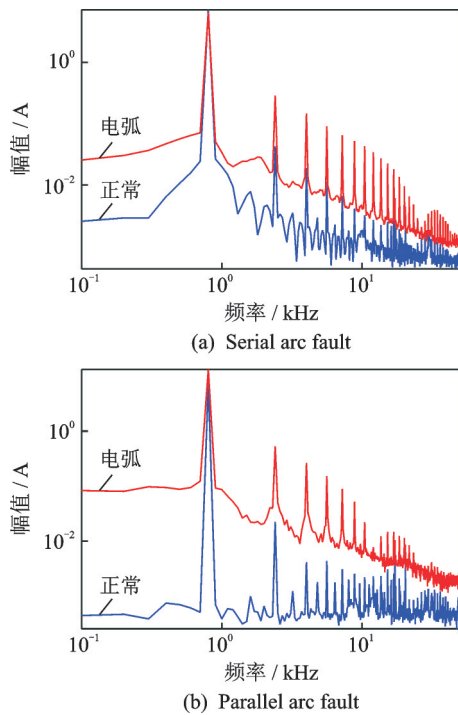


图 9 电流频谱图  
Fig.9 Current spectrums

在 115 V 不同负载类型(纯阻性、阻感性、阻容性)、不同电源频率(360~800 Hz)、不同电流等级(5, 10 A)条件下 3-21 次奇次谐波功率和对比如图 10 所示,从箱线图可以直观地看出电弧电流奇次谐波功率和分布在正常电流的奇次谐波功率和之上,奇次谐波功率和可以作为线性负载条件下电弧故障检测的频域特征量。

使用奇次谐波功率和作为特征量时,虚警率和检测率统计图如图 11 所示,从图中可以看出随着阈值的增大虚警率和检测率呈下降趋势。当阈值大于 0.020 8 时,虚警率为 0%;当阈值小于 0.042 5

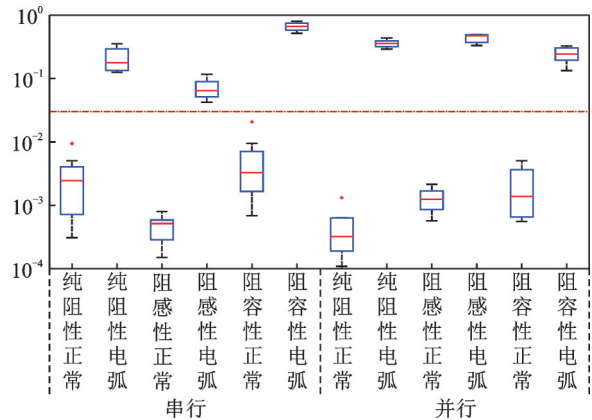


图 10 奇次谐波功率和对比(线性负载)  
Fig.10 Comparison chart of sum of odd harmonic power (linear load)

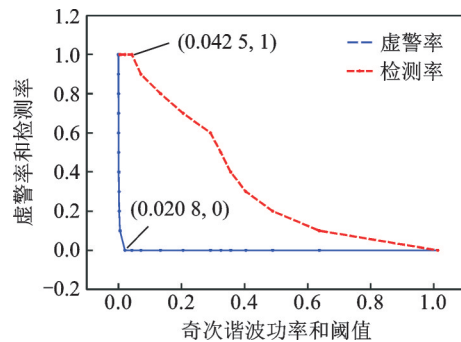


图 11 虚警率和检测率随奇次谐波功率和阈值变化统计图  
Fig.11 Statistical chart of change of false alarm rate and detection rate with threshold of odd harmonic power sum

时,检测率为 100%。因此在区间 0.020 8~0.042 5 范围内选择阈值可以实现虚警率 0%、检测率 100%。

在 115 V(整流桥负载)、不同电源频率(360~800 Hz)、不同电流等级(5, 10 A)条件下 3-21 次奇次谐波功率和对比如图 12 所示,从箱线图中可以

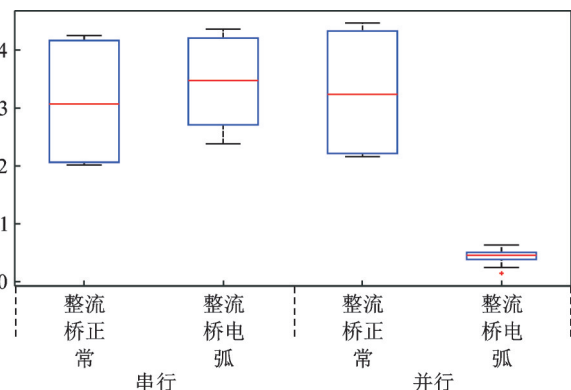


图 12 奇次谐波功率和对比(整流桥负载)  
Fig.12 Comparison chart of sum of odd harmonic power (rectifier load)

看出奇次谐波功率和无法作为整流桥负载条件下电弧的特征量。整流桥负载由于自身特性正常情况下就含有丰富的奇次谐波成分,并且远远大于线性负载条件下奇次谐波功率和。

在115 V不同负载类型(整流桥负载)、不同电源频率(360~800 Hz)、不同电流等级(5, 10 A)条件下2-20次偶次谐波功率和对比如图13所示,从图中可以看出在相同负载条件下电弧电流偶次谐波功率和分布均在正常电流偶次谐波功率和之上,但在不同负载条件下无法找到统一的阈值区分正常状态和电弧状态。

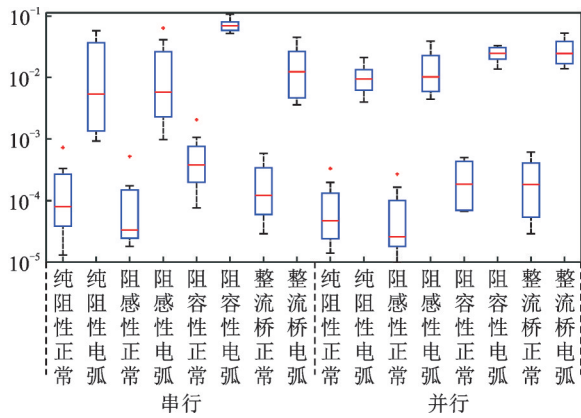


图13 偶次谐波功率和对比

Fig.13 Comparison chart of sum of even harmonic power

使用偶次谐波功率和作为电弧故障检测特征量时,虚警率和检测率统计图如图14所示,从图中可以看出当阈值大于 $206e-5$ 时,虚警率为0%;当阈值小于 $93e-5$ 时,检测率为100%。因为正常状态和电弧状态偶次谐波功率和分布范围存在交集部分,因此选定一个固定阈值后无法实现虚警率为0%、检测率为100%。

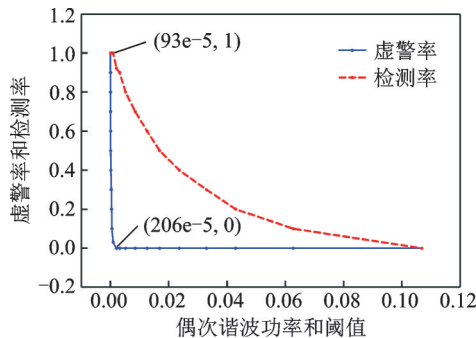


图14 虚警率和检测率随偶次谐波功率和阈值变化统计图

Fig.14 Statistical chart of change of false alarm rate and detection rate with threshold of even harmonic power sum

### 2.3 时频域特征融合

由上文分析可知使用有效值标准差作为电弧故障检测的特征量在不同实验条件下可以找到统一的阈值,但是有效值标准差抗干扰能力差,系统运行状态改变(如电源电压波动、加卸载、电源开关闭断)时会发生误判。使用奇次谐波功率和无法区分整流桥负载是否发生电弧故障,使用偶次谐波功率和在不同负载条件下无法找到统一的阈值,但使用奇次谐波功率和、偶次谐波功率和作为特征量时,系统运行状态改变不会发生误判。鉴于使用单一特征进行电弧故障检测均有一定的局限性,考虑将时频域特征进行融合。

本文采用3个特征量分别进行电弧故障判定,当3个特征量均判定为电弧故障时,则判定系统发生了电弧故障。特征量分布范围如表1所示,在区间 $0.0078\sim 0.0111$ 范围内选取有效值标准差阈值可以实现虚警率为0。

表1 特征量分布范围

Table 1 Range of characteristic distribution

特征量	正常	电弧
有效值标准差	0.000 5~0.007 8	0.011 1~0.415
奇次谐波功率和	线性负载 1.1e-4~0.020 8	0.042 5~1.01
整流桥负载	2.02~4.45	0.36~4.23
偶次谐波功率和	1e-5~0.020 6	9.3e-4~0.106

选择有效值标准差阈值0.01,在不同奇次谐波功率和阈值条件下(0.04,0.07,0.10),检测率随偶次谐波功率和阈值变化的统计图如图15所示,从图中可以看出随着偶次谐波功率和阈值的增大,检测率呈减小趋势。纵向比较可以看出在相同的偶次谐波功率和阈值条件下,检测率随着奇次谐波功率和阈值增大而减小。

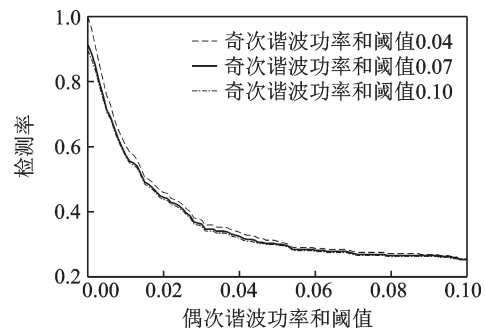


图15 不同奇次谐波功率和阈值下检测率统计图

Fig.15 Statistical chart of detection rate under different threshold of odd harmonic power sum

选择有效值标准差阈值 0.01,在不同偶次谐波功率和阈值条件下(0.001,0.002,0.003),检测率随奇次谐波功率和阈值变化的统计图如图 16 所示,从图中可以看出当奇次谐波功率和阈值小于 0.042 5 时检测率为一恒定值,不随着阈值的改变而改变。这是因为发生电弧故障时奇次谐波功率和均大于 0.042 5,当阈值小于 0.042 5 时,使用奇次谐波功率和作为特征量的检测率为 100%。当奇次谐波功率和阈值大于 0.042 5 时,随着奇次谐波功率和阈值的增大,检测率呈减小趋势。纵向比较可以看出在相同的奇次谐波功率和阈值条件下,检测率随着偶次谐波功率和阈值增大而减小。

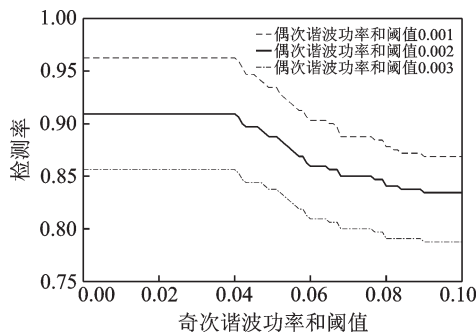


图 16 不同偶次谐波功率和阈值下检测率统计图

Fig.16 Statistical chart of detection rate under different threshold of even harmonic power sum

经统计当固定有效值标准差阈值为 0.01 时,奇次谐波功率和阈值小于 0.042 5 且偶次谐波功率和阈值小于 0.002 1,则时频域特征融合后的检测率能够达到 90% 以上。为了提高抗干扰性能阈值的选择应尽可能大,本文选择奇次谐波功率和阈值 0.04,偶次谐波功率和阈值 0.001 5。

### 3 交流电弧故障识别

#### 3.1 电弧故障检测算法

电弧故障检测算法开始时首先读取一个周期电流数据,然后求取有效值标准差、奇次谐波功率和、偶次谐波功率和。若 3 个特征量均超过阈值,则判定为一个电弧事件。SAE AS5692 标准规定任意 100 ms 时间窗内电弧半周期数大于等于 8,即电弧周期数大于等于 4,则交流电弧故障断路器应断开线路。电弧故障检测算法通过统计 100 ms 滑动窗口内电弧事件数量实现电弧故障的判定。

#### 3.2 测试结果

以 115 V/400 Hz 纯阻性负载条件下发生串行电弧故障为例,电弧故障检测结果如图 17 所示,图

中显示了 100 ms 时间内的电流数据,电弧故障标志位为电弧故障的指示信号,当电弧故障标志位为 0 时,表示系统正常工作;当电弧故障标志位为 1 时,表示系统发生电弧故障。图中  $T_1$  时刻发生电弧故障; $T_2$  时刻检测到电弧故障,电弧故障标志位置 1。电弧故障检测时间小于 100 ms,满足 AS5692 标准要求。以加载为例,抗干扰实验检测结果如图 18 所示,从图中可以看出当电路加载时,电弧故障标志位始终为 0,即未发生误判。

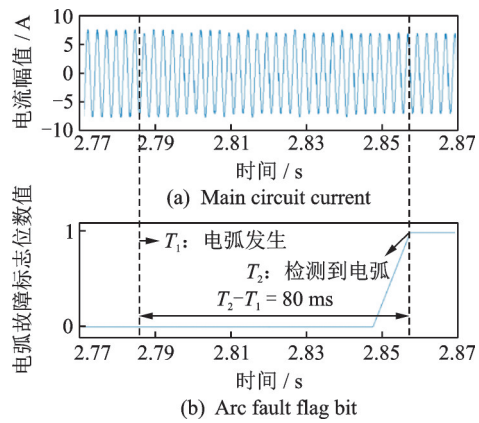


图 17 串行电弧故障检测结果

Fig.17 Detection result of serial arc fault test

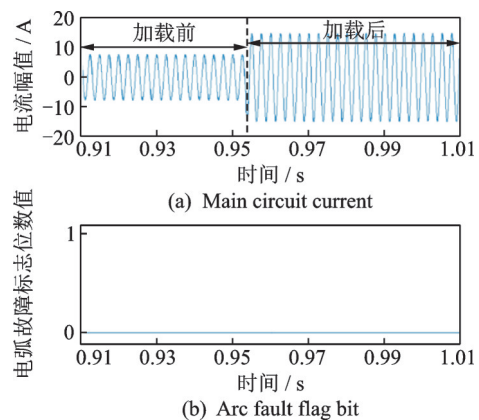


图 18 抗干扰实验检测结果

Fig.18 Detection results of immunity test

#### 3.3 实验结果分析

本文在不同负载类型(纯阻性、阻感性、阻容性、整流桥负载)、不同电源频率(360~800 Hz)、不同电流等级(5, 10 A)条件下进行了串行和并行电弧故障检测实验,实验统计表如表 2 所示,从表中可以看出本文设计的交流电弧故障检测算法在不同实验条件下检测率均达到了 90% 以上,并且检测时间符合 AS5692 标准要求。

SAE AS5692 标准中规定电源电压允许在 115 V±5 V 范围内波动,并且在加卸载和电源开

表2 电弧故障检测实验统计表

Table 2 Experimental statistical table of arc fault detection

负载类型	电源频率/Hz	电流/A	实验次数	检测次数	检测率/%	检测时间/ms
纯阻性	360~800	5, 10	50	50	100	35~81
阻感性	360~800	5, 10	50	46	92	38~72
阻容性	360~800	5, 10	50	49	98	43~80
整流桥	360~800	5, 10	50	48	96	31~55

通关断过程中电弧故障检测算法不能发生误判。本文使用可编程电源模拟了电源电压的波动,进行了电源电压波动实验。在电弧发生器两个电极接触的条件下,接触器1和3闭合,通过控制接触器4的开通关断实现了加卸载的模拟;通过控制接触器1的开通关断实现了电源开通关断的模拟(图2)。抗干扰实验统计表如表3所示,从表中可以看出电源电压波动、加卸载和电源开通关断不会引起电弧故障检测算法发生误判,说明了本文设计的交流电弧故障检测算法不受系统正常波动的影响具有一定的抗干扰性能。

表3 抗干扰实验统计表

Table 3 Experimental statistical table of immunity test

实验内容	负载类型	实验次数	误判次数	误判率/%
电源电压波动	纯阻性	20	0	0
加卸载	纯阻性	20	0	0
电源开通关断	纯阻性	20	0	0

## 4 结 论

本文搭建了交流电弧实验平台,开展了变频系统中交流电弧故障特性及检测技术研究。通过实验和分析得到如下结论:

(1)发生电弧故障时,电流过零时出现了零休现象,电流波形发生畸变;并且随着频率的增大,零休区的比例减小,电流波形畸变程度减小。

(2)发生串行电弧故障时,电流有效值减小;发生并行电弧故障时,电流有效值增大。发生电弧故障时,电流有效值波动明显。串行和并行电弧电流有效值标准差分布均在正常电流之上,可以作为电弧故障检测的时域特征量。

(3)发生串行和并行电弧故障时,电流频谱幅值增大,尤其是奇次谐波成分显著增大。奇次谐波功率和可以作为线性负载的频域特征量,但无法区分整流桥负载是否电弧故障。

(4)发生串行和并行电弧故障时,偶次谐波也增大,但在不同负载条件下无法找到统一的阈值。

(5)本文结合时域特征量和频域特征量设计的交流电弧故障检测算法能够有效地识别电弧故障,检测率高,具有较好的抗干扰性。

## 参考文献:

- [1] ZHEN Cao, LIU Xiaopeng, ZHANG Zhi, et al. Simple analysis of the measurement methods of arc fault [C]//Proceedings of International Conference on Intelligent Systems Design & Engineering Applications. [S.l.]: IEEE, 2014: 914-917.
- [2] 洪轩, 张志文, 章克强. 低压断路器交流短路电弧伏安特性的研究[J]. 电器与能效管理技术, 2016(24): 35-38.  
HONG Xuan, ZHANG Zhiwen, ZHANG Keqiang. Research on AC voltage short circuit arc volt-ampere characteristics of low-voltage circuit breaker[J]. Electric Power & Energy Management Technology, 2016 (24): 35-38.
- [3] 蔡小辰. 交流系统中电弧故障检测与保护技术的研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2013.  
CAI Xiaochen. Research on arc fault detection and protection in AC system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [4] 张冠英, 李长伟, 赵远, 等. 基于周期均值变化率的直流故障电弧检测[J]. 电气工程学报, 2016, 11(9): 44-47.  
ZHANG Guanying, LI Changwei, ZHAO Yuan, et al. DC fault arc detection based on periodic mean change rate[J]. Journal of Electrical Engineering, 2016, 11(9): 44-47.
- [5] SUN Peng, GAO Xiang. Series arc fault diagnosis technology research based on the analysis of current rate [C]//Proceedings of 2011 1st International Conference on Electric Power Equipment. Xi'an: [s.n.], 2011: 565-568.
- [6] 刘晓明, 徐叶飞, 刘婷, 等. 基于电流信号短时过零率的电弧故障检测[J]. 电工技术学报, 2015, 30(13): 125-133.  
LIU Xiaoming, XU Yefei, LIU Ting, et al. Arc fault detection based on short-time zero-crossing rate of cur-



- rent signals[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(13): 125-133.
- [7] 唐金城, 缪希仁, 张丽萍. 基于DSP的低压配电线路电弧故障检测系统[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(2): 72-75.
- TANG Jincheng, MIAO Xiren, ZHANG Liping. Arc fault detection system for low voltage distribution lines based on DSP[J]. New Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(2): 72-75.
- [8] MULLER P, TENBOHLEN S, MAIER R, et al. Characteristics of series and parallel low current arc faults in the time and frequency domain[C]// Proceedings of IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. [S.l.]: IEEE, 2010.
- [9] 王尧, 韦强强, 葛磊蛟, 等. 基于电弧电流高频分量的串联交流电弧故障检测方法[J]. 电力自动化设备, 2017(7): 191-197.
- WANG Yao, WEI Qiangqiang, GE Leijiao, et al. Fault detection method for series AC arc based on high-frequency components of arc current[J]. Power Automation Equipment, 2017(7): 191-197.
- [10] 丁鑫, 竺红卫, 殷浩楠, 等. 基于快速傅里叶变换(FFT)的交流电器电弧快速检测法[J]. 电器与能效管理技术, 2015(21): 8-12.
- DING Xin, ZHU Hongwei, YIN Haonan, et al. Fast detection of AC arc based on fast Fourier transform (FFT)[J]. Electric Power and Energy Efficiency Management, 2015(21): 8-12.
- [11] 郭凤仪, 张艳立, 王智勇, 等. 弓网电弧实验系统与辐射噪声实验研究[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(12): 49-53.
- GUO Fengyi, ZHANG Yanli, WANG Zhiyong, et al. Experimental study of arc-net experimental system and radiation noise[J]. New Technology of Electrical and Electronic Equipment, 2015, 34(12): 49-53.
- [12] KOJORI H A, YE Y. Method and apparatus for generalized AC and DC arc fault detection and protection: USA, Application EP20060784323[P]. 2009-08-07.

(编辑:孙静)