

基于加权差分电流的直流故障电弧检测方法

邸振国¹, 熊庆¹, 张琛¹, 李瑞², 汲胜昌¹

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 陕西师范大学物理学与信息技术学院, 710119, 西安)

摘要: 为了解决低压直流系统中传统电弧故障检测方法精确度不足及对不同系统通用性较差的问题,本文提出一种新的基于加权差分电流的直流电弧故障检测方法。首先搭建直流源实验平台,开展串联直流电弧高频特性实验,利用快速傅里叶变换提取电弧电流的特征频段为 20~30 kHz、40~50 kHz 和 55~65 kHz。然后,研究电极材料和负载类型对电弧特征频率的影响,实验结果表明直流电弧的特征频段不随电极材料和负载类型改变。将 3 个特征频段内幅值的最大值 $I_{\max}$ 、幅值之和 I_{sum} 以及幅值的标准差 I_{std} 作为特征参量。基于对电弧电流特征频段和特征参量的双重加权差分,利用差分结果是否大于阈值 0.5 作为直流故障电弧检测判据。最后,在低压直流系统和光伏系统中验证所提出检测方法的有效性。检测方法能够准确区分开关动作与负载突变等系统正常操作。该方法克服了传统单一频段单一指标检测方法的不稳定性,能够有效检测直流电弧故障,提高检测的准确性,并在光伏系统中验证了检测方法的通用性。检测方法对保障低压直流系统的安全稳定运行具有重要的应用价值。

关键词: 低压直流系统;光伏系统;故障电弧;电弧检测;加权差分电流

中图分类号: TM501.2 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202205014 **文章编号:** 0253-987X(2022)05-0141-08



OSID 码

DC Arc Fault Detection Method Based on Weighted Differential Current

DI Zhenguo¹, XIONG Qing¹, ZHANG Chen¹, LI Rui², JI Shengchang¹

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation of Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: To solve the problems of low accuracy and poor universality of traditional arc fault detection methods in the LV DC system, a new DC arc fault detection method based on weighted differential current is proposed in this paper. Firstly, a DC experimental platform was set up for the high frequency characteristic tests of serial DC arc fault. And its characteristic frequency bands were extracted as 20—30 kHz, 40—50 kHz and 55—65 kHz by fast Fourier transform. The influence of electrode materials and load types on arc characteristic frequency was studied, which show it does not change with electrode material and load type. Then the maximum amplitude, $I_{\max}$, sum of amplitude, I_{sum} and standard deviation of amplitude, I_{std} in the three characteristic frequency bands were taken as characteristic parameters. Based on the double weighted difference of characteristic frequency bands and characteristic parameters of the arc current, the criterion of DC arc fault detection is whether the difference result is greater than the threshold value 0.5. Finally, the validity of the proposed method was verified in the LV DC

system and photovoltaic system. The results show that the proposed method can accurately distinguish the normal operation of the system, such as switch action and sudden load change, overcome the instability of traditional single frequency-band and single index detection methods, effectively detect DC arc faults, and improve the detection accuracy. Its universality is verified in photovoltaic systems. Moreover, it can play a crucial role in ensuring safe and stable operation of LV DC systems.

Keywords: low voltage DC system; photovoltaic system; arc fault; arc detection; weighted differential current

近几年来,由于低压直流用电设备迅速增加以及分布式能源增多,直流供电在配电网中的应用日益广泛^[1-2]。直流供电相较于交流供电具有能量损耗小、供电效率高、线路造价低等优势,广泛应用于大型数据中心、电动汽车、航天飞机、电气化船舶等领域^[3-5]。然而,在直流配电网中,由于其导线截面较小、机械强度较低、线路绝缘水平较低等原因,极易在系统运行过程中出现绝缘损坏、线路老化和导线断裂,进而导致直流电弧的产生^[6-7]。直流电弧没有电流过零点,无法自行熄灭,故障电弧持续燃烧可能会引发火灾、爆炸事故,对设备和系统的稳定运行和操作人员的人身安全构成威胁^[8]。因此,研究直流电弧故障特性及其检测方法对低压直流设备和系统的安全稳定运行至关重要。

国内外学者针对低压直流系统中的电弧故障检测方法进行了大量研究^[9-12]。Wang 等利用高频正弦信号的主动注入直流母线来检测直流电弧,但是主动注入谐波可能会对系统的正常运行造成影响^[13]。Wilkinson 使用基于霍尔效应的环形电流传感器来检测电路中潜在的电弧故障,可以实现电弧的准确检测^[14]。Park 等利用光伏系统自带的差分功率处理结构检测直流电弧,该方法不需要额外的传感器^[15]。研究人员通过对直流电弧电信号数据的研究和处理,提取出不同的电弧特征参量^[16-17]。Li 等将线路电流和供电电压作为电弧故障的特征参量检测直流电弧^[18]。Ahmadi 等利用电压、电流等可测量量的协方差矩阵的特征向量作为检测算法的特征参量^[19],将提取到的电弧特征参量作为检测算法的输入,通过算法可以对直流系统中的电弧故障进行检测,检测算法随故障特征的不同而不同^[20-21]。Miao 等使用支持向量机算法对改进模型经验分解技术提取到电弧特征进行电弧故障检测^[22]。Gajula 等通过估算线路导纳提出了一种基于卡尔曼滤波的串联电弧检测算法^[23],该方法可以对故障电弧进行快速隔断并重新配置。Amiri 等利

用非线性动力学知识,提出了一种基于递归图的确定的直流电弧检测算法^[24],该算法可以对 700 多种实验条件准确检测。

然而,目前针对直流电弧的检测方法仍存在着一些不足。基于传感器及其测量量的检测方法主要依赖于对回路电压和电流信号的采集,受环境因素的影响较大,且检测指标单一、精度较低。基于特征参量的提取只针对单一系统,在不同的低压直流源系统和光伏系统中,检测方法不具备普适性。

本文针对以上问题,分析低压直流系统故障电弧的特性,研究电极材料和负载类型对电弧电流的影响,提取特征判据并提出直流故障电弧的检测方法。

1 实验平台的搭建

搭建直流电弧实验平台,包括直流电源、电弧发生装置、示波器、差分探头、电流探头,以及电阻负载。电弧发生装置由步进电机和两个铜电极构成,其中一个铜电极固定在绝缘支座上,由步进电机控制另一个铜电极的移动来产生电弧。电弧发生装置如图 1 所示,具体的仪器型号及参数如表 1 所示。

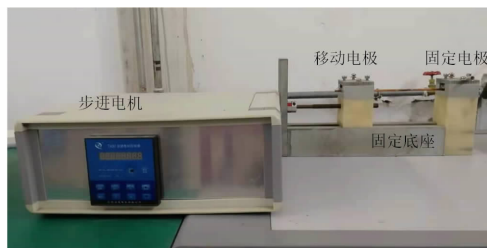


图1 电弧发生装置

Fig. 1 Diagram of arc generator

实验电路如图 2 所示,将电弧发生装置串联接入回路中。负载为纯电阻,保持电源电压 240 V 不变,铜电极每次拉开的距离(1.6 mm)不变,通过改变负载电阻阻值(112、60.8、30.8、20.5、15.2、13.5 Ω)来改变回路电流幅值,利用差分探头测量电弧电

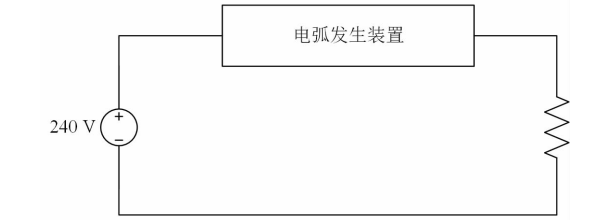


图 2 直流源实验电路图

Fig. 2 Circuit diagram of DC source experiment

压,电流探头测量回路电流。示波器记录电弧的电压及电流波形,示波器的采样率为 200 kHz,采样时间为 5 s,每组实验重复 5 次。在室温、常压的条件下采集实验数据,每次实验之前,用砂纸将电极的表面打磨光滑,以消除上一次实验中电弧烧蚀对实验结果的影响。在本研究中,阳极电极被固定,而阴极电极被步进电机分开。

表 1 直流电弧实验仪器参数表

Table 1 Parameters of DC arc experimental instruments

实验仪器	型号	参数	数值
示波器	BJ-03251	带宽/GHz	2
		最高采样率/GHz	10
步进电机	S-150-24	输入电压/V	220
		输出电压/V	24
		输出电流/A	6
铜电极		直径/mm	5
差分探头	P5200A	带宽/MHz	5
		最大输出电压/V	2.6
		输入阻抗/MΩ	1
电流探头	E3N	带宽/kHz	100
		交流输入电流/A	70
		直流输入电流/A	100
		测量精度/(mV·A ⁻¹)	100

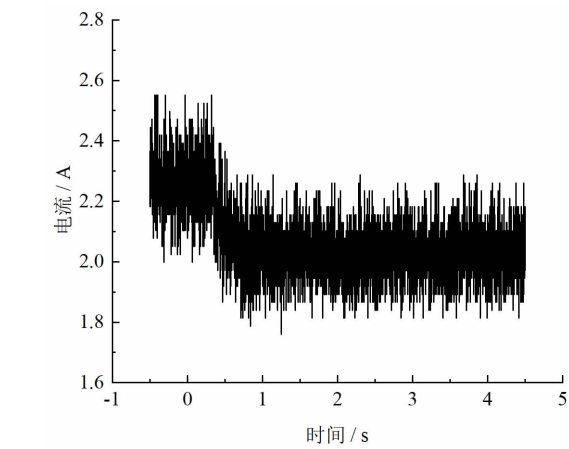
2 直流电弧高频特性

2.1 电弧特征参量提取

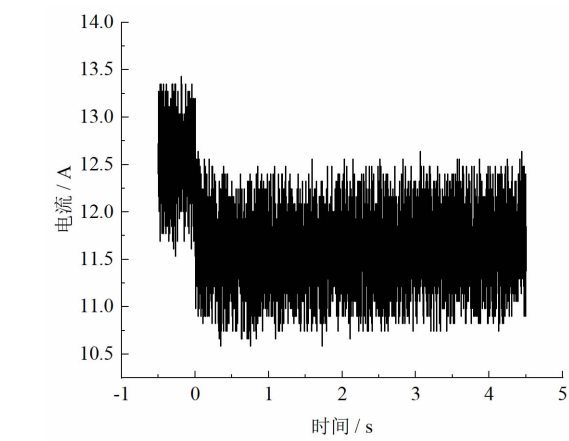
直流电弧的电压和电流中存在高频脉冲,利用快速傅里叶变换(FFT)对电弧的电压和电流信号进行频谱分析,以提取直流电弧的特征频率。

电源电压 240 V,负载电阻分别为 120 Ω 和 20 Ω 时的电弧电流波形如图 3 所示,对上述两电弧产生前后各 1 s 的波形进行 FFT 频谱分析,得到 0~100 kHz 的频谱图如图 4 所示。由于直流电压源通过桥式整流产生直流电压,所以在电弧产生前的回路电流中存在特定频率的谐波。当电弧产生后,回

路电流中的高频分量是由电弧引起的。



(a) 2 A 电弧电流波形图



(b) 12 A 电弧电流波形图

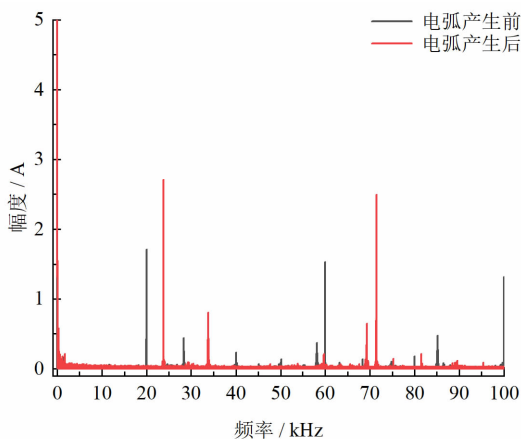
图 3 不同幅值电弧电流波形图

Fig. 3 Arc current waveform of different amplitudes

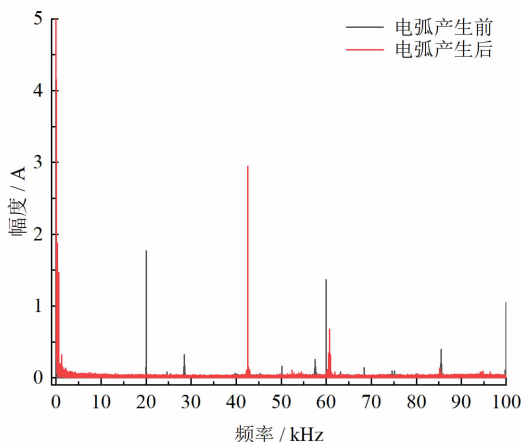
由图 4 可知,当回路电流幅值为 2 A 时,特征频率集中在 20~30 kHz 内和 70 kHz。回路电流为 12 A 时,直流故障电弧的特征频率集中在 40~50 kHz 和 55~65 kHz 两个频段内。将不同幅值电弧电流的特征频率绘制成如图 5 所示的散点图,可以直观地看出,电流幅值逐步增大,电流中的高频成分衰减,电弧特征频率主要集中在 40~50 kHz 以及 55~65 kHz 两个频段内,且 40~50 kHz 内的幅值更高。综合考虑 2~20 A 电流作用下电弧的频率特征,选择 20~30 kHz、40~50 kHz 和 55~65 kHz 3 个频段作为串联型直流电弧的特征频带。

电弧在本质上是一个高温等离子体放电通道。当电极刚分离时,强场发射和热电发射所产生大量等离子体,在电场作用下移向阳极。电子和离子在此后运动过程中,产生碰撞使弧道中的气体游离,进而产生电弧。由于等离子体的碰撞游离是随机的,

但可能服从一定的概率分布,因此电弧电流中的高频分量可能具有特征频带^[25]。



(a) 2 A 电弧电流频谱图



(b) 12 A 电弧电流频谱图

图4 不同幅值电弧电流频谱图

Fig. 4 Spectrum diagram of arc current with different amplitudes

2.2 电极材料和负载类型对电弧电流高频特性的影响

为了研究电极材料对电弧特征频率的影响,改变实验中的电极材料组合,分别为正负均为铜电极、正负均为铝电极、正极铜电极负极铝电极和正极铝电极负极铜电极。电源电压 240 V,负载电阻为 60 Ω ,其余实验条件同上,将记录的电弧电流进行 FFT 分析,结果表明改变电极材料的组合,电弧电流的频谱随之改变,但直流电弧的特征频率同样集中在 20 ~ 30 kHz、40 ~ 50 kHz 和 55 ~ 60 kHz 内。

保证其他实验条件不变,在负载电阻侧并联一个 121 μF 的电容或串联一个 60 μH 的电感,实验结果表明,尽管电弧电流的频域幅值减小,特征频率仍分布在 40 ~ 50 kHz 和 55 ~ 65 kHz 范围内。

综上,改变回路电流幅值、电极材料以及负载类型均对电弧高频特性产生一定影响,但直流电弧的特征频率仍集中在 20 ~ 30 kHz、40 ~ 50 kHz 和 55 ~ 65 kHz 内。

3 直流故障电弧检测方法

3.1 检测方法

利用电流探头采集电弧电流,分别对电弧产生前后的回路电流进行 FFT,得到回路电流的频谱,将 20 ~ 30 kHz、40 ~ 50 kHz 和 55 ~ 65 kHz 3 个特征频段内幅值的最大值 $I_{\max}$ 、幅值之和 I_{sum} 以及幅值的标准差 I_{std} 作为特征参量。根据实验结果,认为幅值最大值在特征参量中占据比重较幅值之和以及幅值标准差更高,故取 3 个特征参量的权重分别为 0.4、0.3 和 0.3,定义某一频段内 k 值的计算公式为

$$k = 0.4I_{\max} + 0.3I_{\text{sum}} + 0.3I_{\text{std}} \quad (1)$$

计算电弧产生前在 20 ~ 30 kHz、40 ~ 50 kHz 和 55 ~ 65 kHz 3 个特征频段内的 k 值 k_1 、 k_2 、 k_3 ;同理,计算电弧产生后 3 个频段内的 k 值 k'_1 、 k'_2 、 k'_3 。根据 3 个特征频段内 $I_{\max}$ 的大小,选取 3 个频段的权重分别为 0.2、0.5 和 0.3。最终,幅频特征值为

$$R_e = 0.2k_1 + 0.5k_2 + 0.3k_3 \quad (2)$$

将电弧产生前即正常状态的特征值记为 R_{e1} ,并将其作为检测基准值。计算有电弧故障产生时的特征值记为 R_{e2} ,将两个特征值进行差分处理,利用式(3)与初始阈值进行比较

$$s = \frac{R_{e2} - R_{e1}}{R_{e1}} \quad (3)$$

若 s 大于设定的阈值,则表明回路中产生了直流电弧;反之,则没有直流电弧产生。

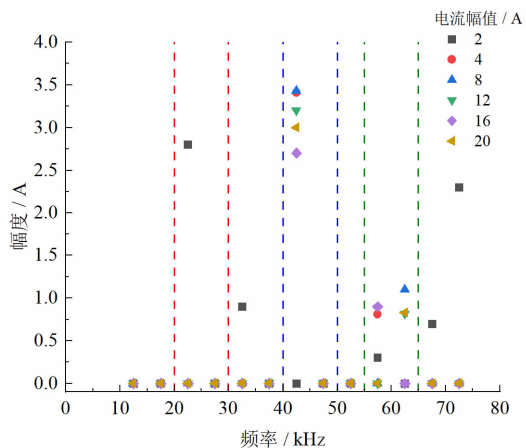


图5 不同幅值电弧特征频率分布散点图

Fig. 5 Scatter plot of arc characteristic frequency distribution with different amplitudes

若电路的工况发生变化,如更换负载或电极材料,只需重新计算正常状态的 R_{e1} 值,将其作为基准值代入检测方法,仍可使用式(2)和式(3)检测是否产生直流电弧。检测方法的流程图如图 6 所示。

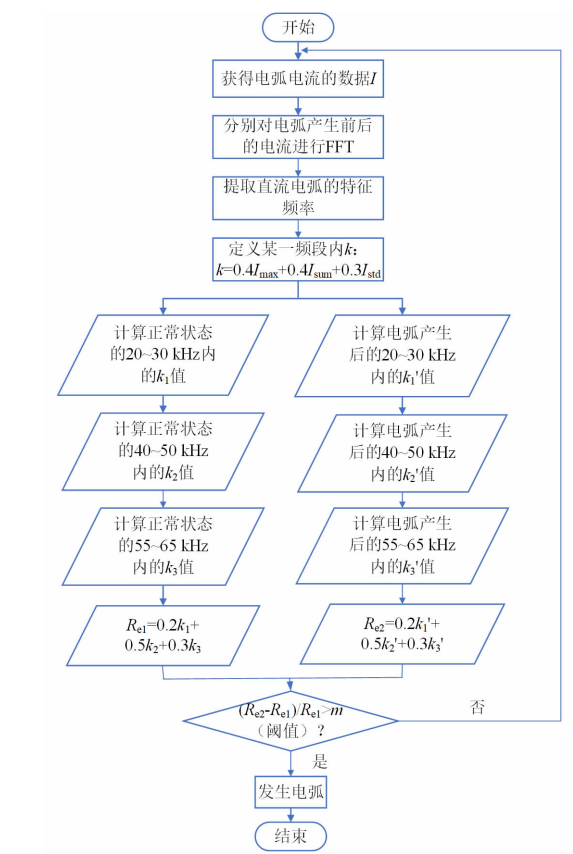


图 6 检测方法流程图
Fig. 6 Flow chart of detection method

3.2 实验验证

(1)不同回路电流条件。利用该检测方法对负载为纯电阻的回路进检测,当回路电流幅值从 2 A 增大至 20 A 时,检测结果如表 2 所示, s 均大于设定的阈值。改变电极材料和负载类型,分别利用该检测方法对电弧故障进行检测,检测结果均远大于初始阈值,检测成功率为 100%,验证了检测方法的正确性。

表 2 不同负载电流幅值下的检测结果
Table 2 Test results under different load current amplitudes

参数	检测结果					
	2 A	4 A	8 A	12 A	16 A	20 A
R_{e1}	40 652	35 070	40 265	21 606	22 987	21 325
R_{e2}	63 037	90 171	76 942	49 639	67 801	70 223
s	0.551	1.571	0.911	1.298	1.950	2.293

(2)光伏系统验证。5 kW 光伏系统电路连接

示意图如图 7 所示。该光伏系统由两路最大功率点跟踪(MPPT)分别控制,通过逆变器接入电网,具体参数如表 3 所示。光伏系统的直流电弧通常发生在不同位置的两块光伏板之间。在 2、3 号光伏板之间产生串联直流电弧,保护电阻为 60 Ω 。电弧电流及频谱图如图 8 所示。电弧特性与低压直流源相似,提取电弧的特征频段为 0~10 kHz 和 65~75 kHz。

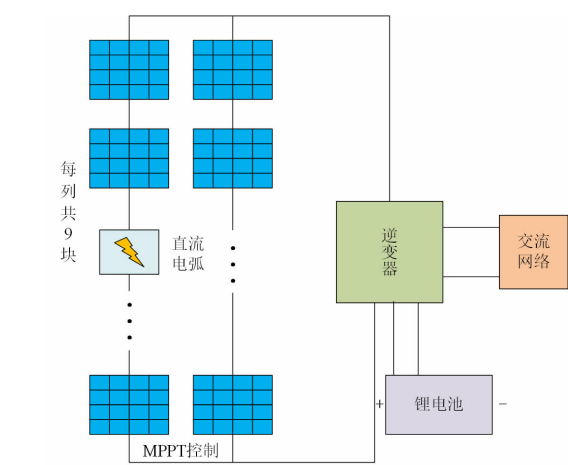


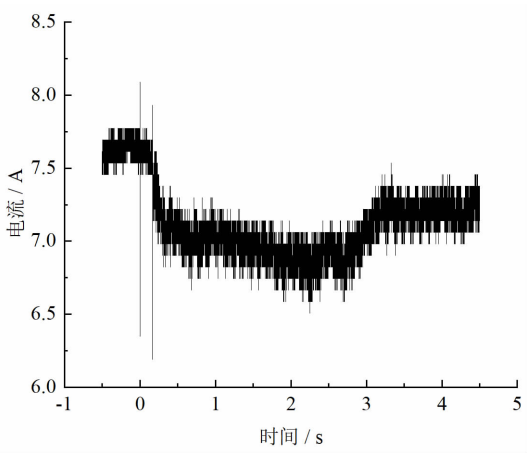
图 7 光伏系统电弧实验电路示意图
Fig. 7 Photovoltaic system experiment circuit

表 3 5 kW 光伏系统参数
Table 3 Parameters of 5 kW photovoltaic system

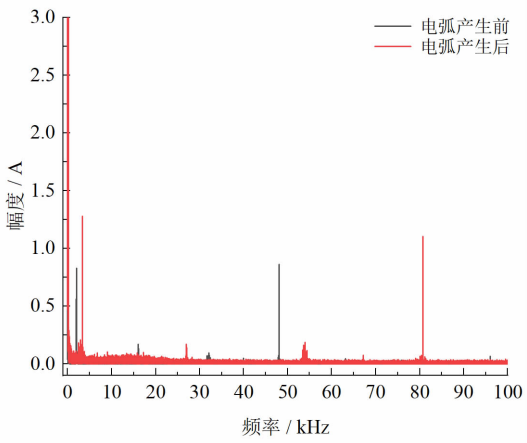
项目	参数	数值
光伏板	额定最大功率/W	305
	最大功率点电压/V	33
	最大功率点电流/A	9.24
	开路电压/V	40.2
	短路电流/A	9.94
	光伏最大输入电压/V	600
逆变器	光伏最大输入电流/A	2×11
	额定交流输出电压/V	23
	额定输出频率/Hz	50
	最大输出电流/A	21.7
	最大输出功率/W	4 990
示波器	采样率/kHz	200
	采样时间/s	5

利用本文提出的检测方法对 5 kW 光伏系统不同位置电弧故障进行检测。改变串联电弧在光伏板之间的位置,每个位置重复检测 10 次,检测结果如图 9 所示。检测方法可以准确区分正常状态与电弧故障,准确率为 100%,因此该方法对光伏系统的故障电弧检测同样有效。

(3)负载突变和开关动作。在系统正常运行时,



(a) 光伏系统电弧电流图



(b) 光伏系统电弧电流频谱图

图 8 光伏系统电弧电流及其频谱图

Fig. 8 Arc current and its spectrum of PV system

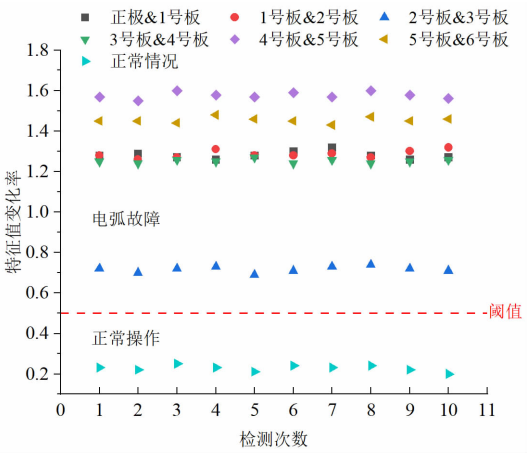


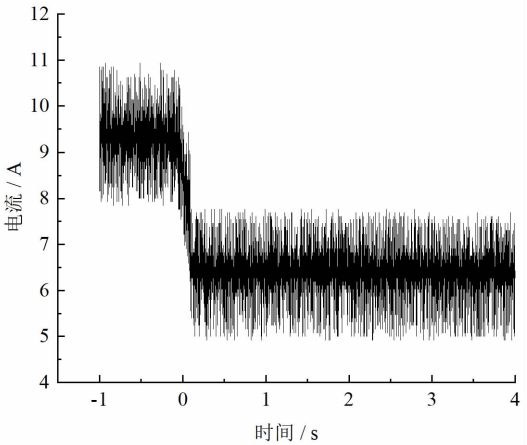
图 9 检测方法重复检测结果图

Fig. 9 Repeated results of detection methods

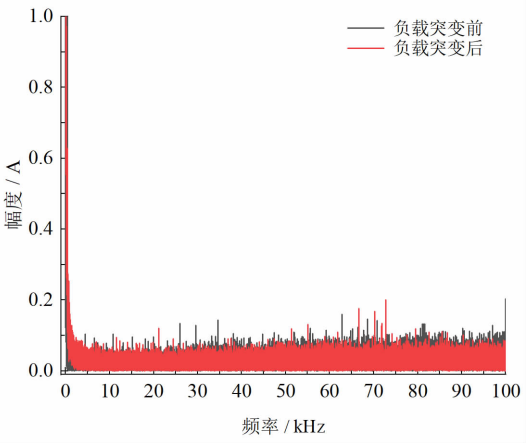
可能会发生负载突变或开关动作引起回路电流突变,检测方法应能够区分上述情况与电弧故障。

将并联在回路中的 $10\ \Omega$ 电阻短路,使负载从 $27\ \Omega$ 突变至 $40\ \Omega$ 。回路电流及频谱图如图 10 所示

示。利用该检测方法对负载突变情况下的电流进行检测,结果可得 $s=0.135<0.5$,不能将其判断为电弧故障。开关动作同样会造成回路电流产生类似电弧的波动。在实验回路开关断开的瞬间,回路电流及频谱图如图 11 所示,利用该检测方法进行检测,



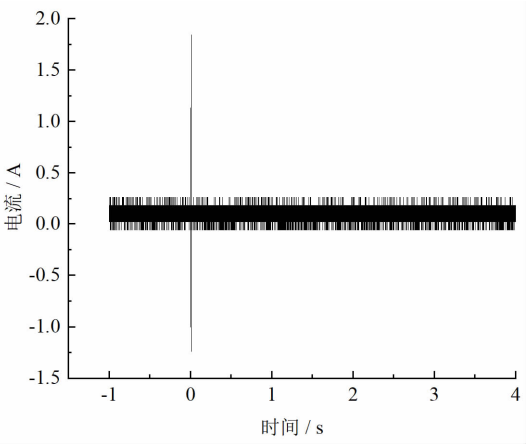
(a) 负载突变电流图



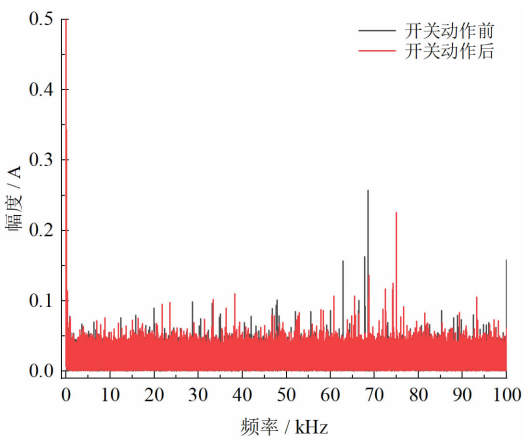
(b) 负载突变频谱图

图 10 负载突变电流及其频谱图

Fig. 10 Load sudden change current and its spectrum



(a) 开关动作电流图



(b)开关动作频谱图

图 11 开关动作电流及其频谱图

Fig. 11 Switching action current and its spectrum

得 $s=0.18<0.5$ 。因此,该方法可以实现区分系统内的正常操作与电弧故障。

4 结 论

本文通过对直流电弧高频特性的分析,提出一种基于加权差分电流的直流电弧故障检测方法,通过实验对该方法进行了验证,得出以下结论。

(1)通过对不同回路电流下产生直流电弧的电流频谱进行 FFT 分析,得到直流电弧的特征频率为 20~30 kHz、40~50 kHz 和 55~65 kHz 3 个频段,且特征频率不随回路电流幅值、电极材料和负载类型改变。

(2)提出了基于对电流幅频谱特征频段特征参量加权差分的直流电弧的检测方法,分别将各特征频段内特征参量加权平均,再将特征频段加权差分,所得结果超过设定阈值 0.5 即产生直流电弧。检测方法能够区分直流电弧与负载突变等系统正常操作,克服了以往单一频段单一指标检测方法的不稳定性,提高了检测的准确性。

(3)所提出的检测方法在光伏系统中进行验证,能够准确检测光伏系统中直流电弧故障,验证了检测方法的通用性。

参考文献:

[1] 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): 6015-6026.
XIONG Qing, CHEN Weijiang, JI Shengchang, et al. Review of research progress on characteristics, detection and localization approaches of fault arc in low volt-

age DC system [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 6015-6026.
[2] YAO Xiu, WANG Jin, SCHWEICKART D L. Review and recent developments in DC arc fault detection [C]// 2016 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC). Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2016: 467-472.
[3] 牟龙华,王伊健,蒋伟,等. 光伏系统直流电弧故障特征及检测方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5236-5244.
MOU Longhua, WANG Yijian, JIANG Wei, et al. Study on characteristics and detection method of DC arc fault for photovoltaic system [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5236-5244.
[4] 易洋,骆雅姿,张子瑜,等. 集中式光伏电站汇集系统故障分析与保护方案 [J]. 电力工程技术, 2021, 40(2): 1-10.
YI Yang, LUO Yazi, ZHANG Ziyu, et al. Failure analysis and protection scheme of centralized photovoltaic power station convergence system [J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 1-10.
[5] 吴盛军,王益鑫,李强,等. 低压直流供电技术研究综述 [J]. 电力工程技术, 2018, 37(4): 1-8.
WU Shengjun, WANG Yixin, LI Qiang, et al. Review of low voltage DC power supply technology [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(4): 1-8.
[6] 苑吉河,张曦,黄虎,等. 基于电流序分量的多源配电网故障定位方法 [J]. 电力工程技术, 2020, 39(5): 204-210.
YUAN Jihe, ZHANG Xi, HUANG Hu, et al. Multi-source distribution network fault location method based on current sequence component [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(5): 204-210.
[7] RIZA ALVY SYAFI' I M H, PRASETYONO E, KHAFIDLI M K, et al. Real time series DC arc fault detection based on fast Fourier transform [C]// 2018 International Electronics Symposium on Engineering Technology and Applications (IES-ETA). Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2018: 25-30.
[8] 刘源,汲胜昌,祝令瑜,等. 直流电源系统中直流电弧特性及其检测方法研究 [J]. 高压电器, 2015, 51(2): 24-29.
LIU Yuan, JI Shengchang, ZHU Lingyu, et al. Characteristics and detection of DC arc in DC power system [J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(2): 24-29.
[9] YANG Jun, WANG Yukai. Identification and detec-

- tion of DC arc fault in photovoltaic power generation system [C]//2020 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2020: 440-444.
- [10] FITRIANTO M I, WAHJONO E, ANGGRIAWAN D O, et al. Identification and protection of series DC arc fault for photovoltaic systems based on fast Fourier transform [C]//2019 International Electronics Symposium (IES). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2019: 159-163.
- [11] LU Shibo, PHUNG B T, ZHANG Daming. A comprehensive review on DC arc faults and their diagnosis methods in photovoltaic systems [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 89: 88-98.
- [12] HAN Zhengqian, LUO Liwen, YAO Wei, et al. Research on detection methods of arc fault in photovoltaic DC systems [C]//2020 8th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2020: 58-61.
- [13] WANG Zekun, WANG Zhixin, SHEN Jiangming, et al. An active method for detecting a DC arc fault in photovoltaic systems [C]//2020 5th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2020: 306-310.
- [14] WILKINSON D P. Potential arc fault detection and suppression: US 9190836 [P]. 2014-10-11.
- [15] PARK H P, KIM M, JUNG J H, et al. Series DC arc fault detection method for PV systems employing differential power processing structure [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(9): 9787-9795.
- [16] SHEKHAR A, RAMÍREZ-ELIZONDO L, BANDYOPADHYAY S, et al. Detection of series arcs using load side voltage drop for protection of low voltage DC systems [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(6): 6288-6297.
- [17] SEO G S, KIM K A, LEE K C, et al. A new DC arc fault detection method using DC system component modeling and analysis in low frequency range [C]//2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 2438-2444.
- [18] LU Qiwei, YE Zeyu, SU Mengmeng, et al. A DC series arc fault detection method using line current and supply voltage [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 10134-10146.
- [19] AHMADI M, SAMET H, GHANBARI T. A new method for detecting series arc fault in photovoltaic systems based on the blind-source separation [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(6): 5041-5049.
- [20] KAVI M, MISHRA Y, VILATHGAMUWA M. DC arc fault detection for grid-connected large-scale photovoltaic systems [J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2020, 10(5): 1489-1502.
- [21] PARK H P, CHAE S. DC series arc fault detection algorithm for distributed energy resources using arc fault impedance modeling [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 179039-179046.
- [22] MIAO Wenchao, XU Qi, LAM K H, et al. DC arc-fault detection based on empirical mode decomposition of arc signatures and support vector machine [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(5): 7024-7033.
- [23] GAJULA K, HERRERA L. Detection and localization of series arc faults in DC microgrids using Kalman filter [J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, 9(3): 2589-2596.
- [24] AMIRI A, SAMET H, GHANBARI T. Recurrence plots based method for detecting series arc faults in photovoltaic systems [J/OL]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021 [2021-10-20]. <https://doi.org/10.1109/TIE.2021.3095819>.
- [25] FLICKER J, JOHNSON J. Photovoltaic ground fault detection recommendations for array safety and operation [J]. *Solar Energy*, 2016, 140: 34-50.

(编辑 荆树蓉 亢列梅)