

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201701002



采用小波变换的光伏串联 电弧故障检测

赵尚程, 张认成, 杜建华, 杨凯, 潘冷

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 建立光伏系统电弧故障实验平台,利用光伏模拟器仿真不同天气环境下的光伏阵列,对光伏系统中串联电弧故障信号进行检测和分析.采用小波变换的方法对串联电弧故障信号进行特征频带提取,并利用移动时间窗方法统计信号在小波分解后的高频系数的能量值,用其表征电弧故障信号的杂乱度和混沌度.研究表明:该检测方法为快速准确地诊断串联电弧故障提供有效判据.

关键词: 光伏系统;小波变换;故障诊断;串联电弧;能量特征

中图分类号: TM 501.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2017)01-0007-06

Photovoltaic Series Arc Fault Detection Utilizing Wavelet Transform

ZHAO Shangcheng, ZHANG Rencheng, DU Jianhua,
YANG Kai, PAN Leng

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: To detect and analyze the series arc faults in photovoltaic (PV) systems, an experimental platform was established to study the PV systems within the arcing fault, and to simulate different weather conditions by using PV simulator module. A wavelet transform analysis technique was utilized for extracting features of series arc faults in a certain frequency band. Meanwhile, a method of moving time window was applied to calculate the energy values of high-frequency coefficients derived from wavelet decomposition, which can be used to represent the chaotic and disordered degree of the arc fault signals. Experimental results showed the detection method can provide an effective criterion to distinguish series arc fault in PV system.

Keywords: photovoltaic systems; wavelet transform; fault diagnosis; series arc; energy feature

直流电弧故障是光伏系统电气火灾的重要元凶. 2011 年实施的美国电气法规^[1]要求在所有工作电压超过 80 V 的光伏直流系统中安装电弧故障断路器(AFCI),或其他提供同等保护功能的系统组件. 高电压的光伏直流电弧故障比交流电弧故障更危险,因为直流电弧故障没有电流过零点^[2]. 电弧故障依据线路中故障电流路径分为两类:串联电弧故障和并联电弧故障. 相对并联电弧故障,串联电弧故障更加危险,其检测成为光伏系统安全相关研究的重要课题. 光伏系统电弧故障导致住宅建筑、商业设施和公共设施发生多起火灾^[3]. 为解决光伏系统中电弧故障的困扰,国内提出的相关检测方法有统计故障频率

收稿日期: 2015-11-29

通信作者: 张认成(1961-),男,教授,博士,主要从事机电系统安全检测技术及仪器方向的研究. E-mail: phzzrc@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省产学研合作科技重大项目(2012H6013);福建省科技计划重点项目(2013H0028)

段的离散频率点信息^[4]、比较时域上电流值^[5]和时频域联合检测^[6](即分析时域上电流平均值)、电流变化率及特征频段上的交流成分等多个判据. 文献[7-10]对适用航空、汽车等直流供电系统的电弧特性和检测方法进行初步研究. 国外检测方法主要有计算电流或电压的变化率^[11],检测电流的峰值变化^[12],分析特定频带的噪声特征等^[13]. 目前,国内外直流电弧故障检测方法主要归纳为时域上进行的模式识别,或者频域上通过傅里叶变换后的幅值判别^[14]. 但由于电弧故障信号的信噪比低且不稳定,伴随着尖峰脉冲和电流突变等非平稳成分,统计时域上波形变化和傅里叶变换的方法诊断电弧故障经常会出现漏判、误判. 因此,本文采用小波变换的方法为电弧故障检测提供时域和频域上的多角度分析.

1 实验平台的建立

光伏系统电弧故障实验平台和现场设备布局,如图 1 所示. 图 1(a)中:平台主要由光伏模拟器、光伏并网逆变器、电弧发生器,信号采集分析系统等部分组成. 图 1(b)中:A 为模拟器控制平台;B 为光伏模拟器;C 为电弧发生器;D 为光伏并网逆变器;E 为公共电网;F 为电流互感器;G 为示波器.



图 1 实验平台结构
Fig. 1 Structure of experiment platform

实验中所选的光伏模拟器为 Ametek 公司的 ETS1000X10. 光伏并网逆变器为安徽合肥阳光电源有限公司的 SG30KTL-M. 信号采集分析系统通过互感器耦合的方式检测直流电弧故障,主要由电流互感器、示波器和计算机组成,其中,电流互感器采用的是 Pulse 公司的 PA3655 NL,带宽为 50~500 kHz;示波器为泰克公司的 DPO4104B-L,采样率设置为 $1\text{ MSA} \cdot \text{s}^{-1}$. 依据 UL1699B 标准设计电弧发生器,其中,电弧故障器采用棒棒间隙铜电极,铜电极横截面直径为 6.35 mm.

光伏模拟器根据不同天气的辐照度温度曲线(阴天、多云、晴天)仿真光伏系统在真实天气环境下的工作状况,每种天气选取 8:00,9:00,10:00,⋯,17:00 共 10 个均匀分布的时刻进行试验. 光伏系统最大的输出电流为 10 A,最大的输出电压为 1 000 V. 从早到晚,光伏模拟器的辐照度幅值和温度幅值会随着时间变化,辐照度和温度影响光伏系统 I-V 输出特性曲线.

2 电弧故障信号采集与分析

电弧故障实验中电弧发生器一端电极固定,另一电极由步进电机以恒定速度驱动,使两电极间产生一定的间隙,此过程为拉弧过程. 拉弧时,两电极分离瞬间,电流会发生突变,并伴随强烈的尖峰电流脉冲,每次拉弧的电极间隙为 3 mm. 为保证电弧故障实验的准确性,信号采集系统以 $1\text{ MSA} \cdot \text{s}^{-1}$ 的采样率获取电流互感器输出的交流电流信号.

晴天天气在 12:00 时刻发生的拉弧实验,其时域图如图 2 所示. 图 2 中:信号包括 1.0×10^6 个数据. 利用快速傅里叶变换(FFT),对不同天气不同时刻的故障信号和正常噪声信号进行初步的分析处理,根据时域上信号绘制出双对数坐标系下的频谱图.

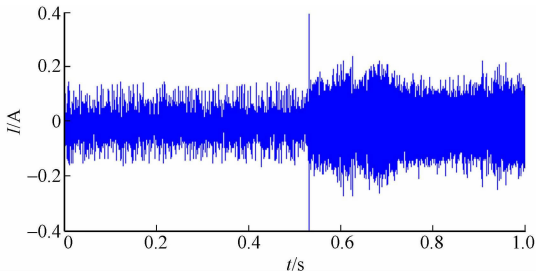


图 2 晴天 12:00 拉弧过程时域图
Fig. 2 Arcing time-domain waveform at 12:00 a.m. in sunny day

光伏系统在不同天气下不同时刻时正常情况和电弧故障的频谱图,如图 3 所示. 图 3(a),(c),(e)为光伏系统工作正常时对应信号频谱图;图 3(b),(d),(f)为光伏系统发生电弧故障时对应信号频谱图.

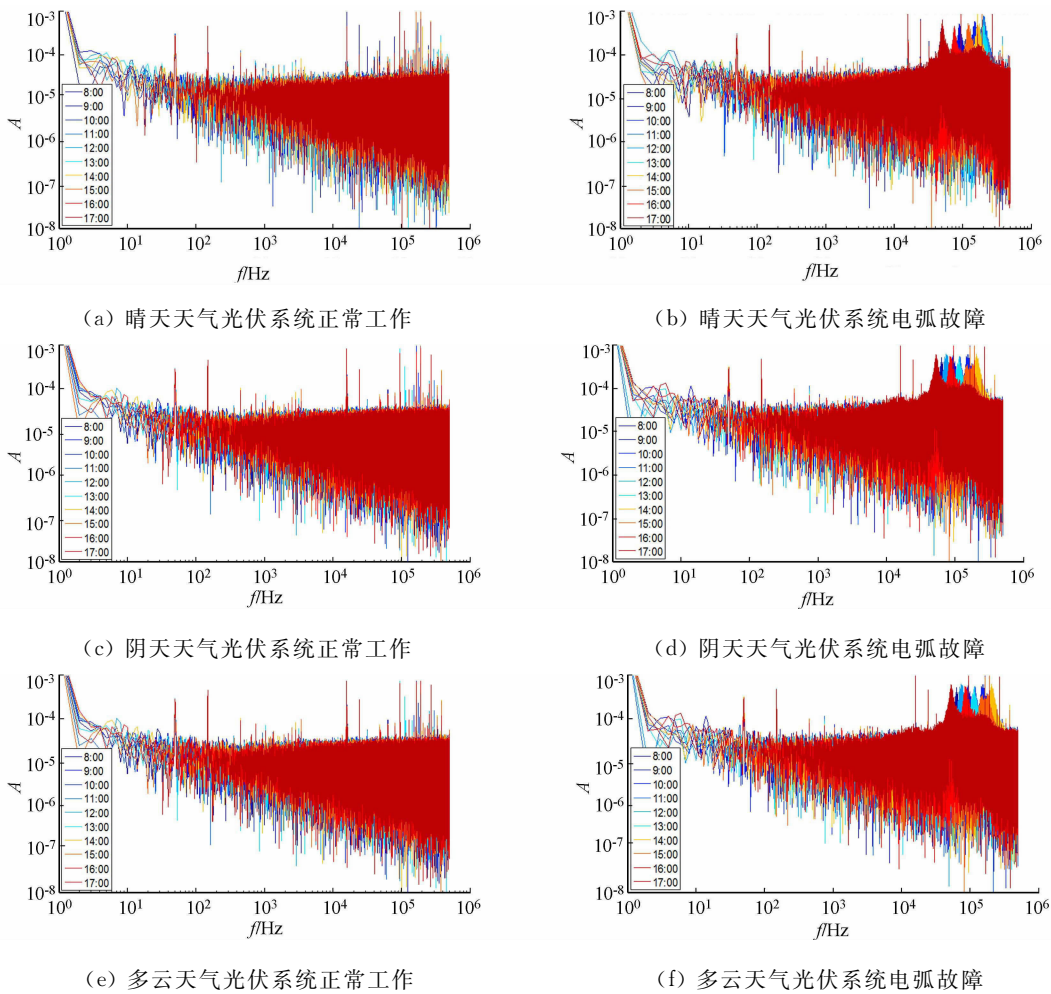


图 3 正常情况和电弧故障的频谱

Fig. 3 Frequency spectrum of normal and arc fault

在不同天气下正常工作时,噪声主要来自逆变器交流侧反射的 50 Hz 工频噪声和逆变器三相 H 桥结构产生的 150 Hz 噪声. 逆变器的开关噪声频带主要在 10~100 kHz;正常情况下,不同天气产生噪声区别主要分布在 10~200 kHz. 不同天气下,电弧故障信号频带基本分布在 50~250 kHz 之间.

通过信号分析,电弧故障信号具有信噪比低、故障特征频带较稳定的特点. 因此,采用多分辨率小波分析对电弧故障等非平稳信号进行时频域局部化特性分析,主要作用是信号去噪用于提高信噪比;大幅度压缩数据,便于故障信号的特征提取.

3 光伏直流电弧故障的小波变换

小波变换是一种窗口(面积)大小固定,但时间窗和频率窗范围大小可以调整的时频局域分析方法,并且对信号分辨率具有良好的自适应能力,可以有效提取电弧故障特征,准确判断电弧故障的发生. 因此,在光伏直流电弧故障检测方面,小波分析越来越得到重视.

3.1 小波变换理论

采用多分辨率分析的小波变换是利用正交小波基将信号分解为不同尺度下的 2 个分量,具体过程相当于多次使用一组高通和低通滤波器对时间序列信号进行逐层分解,高通滤波器产生信号的高频细节分量,低通滤波器产生信号的低频近似分量. 滤波器得到的 2 个分量各占被分解信号频带宽度一半. 每次分解后,将信号的采样频率降低为原来一半,下一步对低频分量重复以上分解过程,得到下一层的高频分量和低频分量.

多分辨率分解公式为

$$a_j(k) = \sum h(m-2k)c_{j,l,m}, \tag{1}$$

$$d_j(k) = \sum g(m-2k)c_{j,l,m}. \tag{2}$$

式(1),(2)中: $h(n)=\langle \psi_{j0}(k), \varphi_{j,l,n}(k) \rangle$ 等效为一组低通滤波器,得到的对应低频系数为 $a_j(k)$; $g(n)=\langle \psi_{j0}(k), \varphi_{j,l,n}(k) \rangle$,等效为一组高通滤波器,分解得到的高频系数为 $d_j(k)$; φ 和 ψ 为分别对应的尺度函数和小波函数.

信号 $x(n)$ 经过以上变换后,通过单支重构得出信号分量 $a_j(k), d_j(k)$,其所包含的信号频带范围为

$$\left. \begin{aligned} d_j(k) &: [2^{-(j+1)}F_s, 2^{-j}F_s], \quad j=1, 2, \cdots, m, \\ a_j(k) &: [0, 22^{-(j+1)}F_s], \quad j=1, 2, \cdots, m. \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

式(3)中: F_s 为信号采样频率,则原始信号 $x(n)$ 可表示其各分量和,即

$$x(n) = d_1(n) + a_1(n) = d_1(n) + d_2(n) + a_2(n) = \sum_{j=1}^m d_j(n) + a_j(n) = \sum_{j=1}^{m+1} d_j(n). \tag{4}$$

式(4)中: $d_{m+1}(n)$ 代替 $a_j(n)$; $d_j(n)$ 表示信号 $x(n)$ 在 j 尺度上的重构信号.

3.2 小波变换信号频带的选取

Daubechies 系列小波具有紧支撑、正交性好、对不规则信号敏感等特点. 通过试验,选用 db4 和 db5 进行电弧故障特征提取的实验结果并无非常大的差别^[15-16]. 选用 db4 小波进行故障特征提取效果明显,光伏系统发生电弧故障时,特征频带内的剧烈程度比其他频带的信号波形更加强烈. 然而,特征频带通过有限样本粗略划分确定,虽然特征频带 50~250 kHz 并不被 $[F_s/8, F_s/4]$,即 $[125\text{ kHz}, 250\text{ kHz}]$ 所包含,但从整体算法的复杂度角度出发, d_2 小波系数用来检测电弧故障是合理的,并且 d_2 所在频率范围 125~250 kHz 依然是电弧故障较为剧烈的频带. 因此,小波的分解层选择 2 层小波分解即可精确、快速分析电弧故障信号.

二层小波分解,如图 4 所示,经过 db4 小波两层分解后(图 4(b)),重构的小波高频分量 d_2 表征光伏系统发生电弧故障的信息. d_2 小波系数波形说明多分辨率小波分析不仅能够大幅度抑制正常噪声,有利于信号的去噪,更增强电弧故障特征,体现小波分析在电弧故障信号处理方面的优越性.

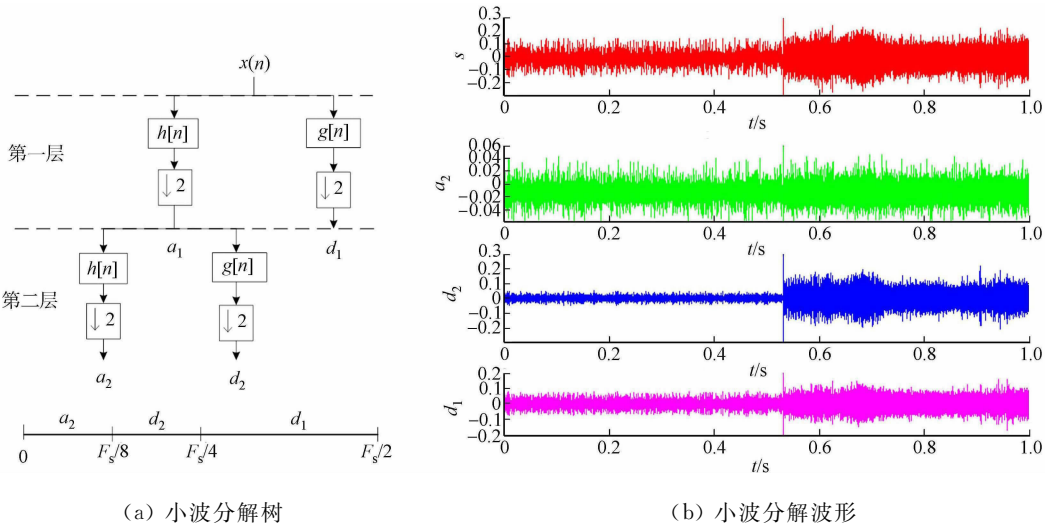


图 4 二层小波分解
Fig. 4 Two-level wavelet decomposition

3.3 基于小波的电弧故障能量特征提取

电弧故障信号经过两层小波分解后的高频分量 d_2 的能量和原始信号的能量之间存在等价关系,所以在多尺度的小波变换中,选取高频分量 d_2 的小波系数的平方和作为光伏系统串联电弧故障能量的标志,即

$$E = \sum_{k=1}^N | D(k) |^2.$$

上式中: N 为小波系数个数; $D(k)$ 为小波系数.

为避免外部冲击信号的干扰和短暂的电弧信号的遗漏造成的误判和漏判, 需增加电弧故障能量在时域上分辨率. 因此, 将时间长度为 t 的待分析信号划分为 n 个时间窗, 窗长度为 t/n , 则得到第 i 个时间窗的局部能量 E_i 为

$$E_i = \sum_{k=1}^n |D_i(k)|^2.$$

上式中: n 为第 i 个时间窗内小波系数个数; $D_i(k)$ 为时间窗内的小波系数.

串联电弧故障实验中信号采样率为 $1 \text{ MSA} \cdot \text{s}^{-1}$; 单次采集的数据为 1×10^6 个; 采样时间为 1 s ; 经两层小波分解高频分量系数个数为 2.5×10^5 ; 时间窗个数设置为 250 (从等分采样时间高频系数两方面考虑); 窗长度为 4 ms ; 单个时间窗内小波系数个数 n 为 1 000 (能够保证合适的时间分辨率). 采用小波分解提取电弧故障信号的特征频带对应的小波系数, 计算 250 个时间窗的局部能量 E_i .

晴天天气在 12:00 时刻发生拉弧过程的信号, 如图 5 所示. 图 5 中: 波形图包括正常情况和电弧起始阶段的信号. 由图 5 可知: 一般情况下, 电弧起始阶段较电弧稳定燃烧时更加剧烈.

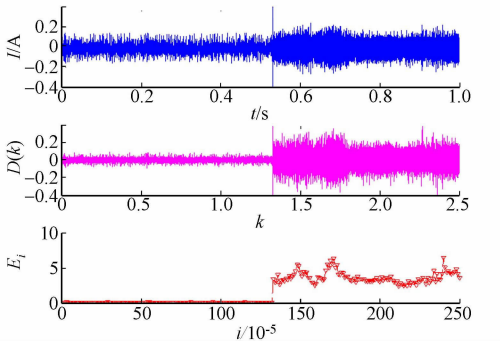


图 5 能量特征波形图
Fig. 5 Waveforms of energy feature

串联电弧故障实验包括不同天气不同时刻下的正常情况和电弧故障共 60 组实验, 统计不同工况下信号提取的 250 个时间窗局部能量的取值范围, 如表 1 所示. 表 1 中: 电弧故障均为电弧稳定燃烧阶段, 在相同工况下, 相对电弧起始阶段 (拉弧过程) 的能量范围较小.

表 1 时间窗内小波系数能量 E_i 取值范围统计

Tab. 1 Statistics of wavelet coefficients' energy E_i in time window

时刻	E_i (晴天)		E_i (阴天)		E_i (多云)	
	正常情况	电弧故障	正常情况	电弧故障	正常情况	电弧故障
8:00	[0.076,0.109]	[0.610,1.374]	[0.079,0.116]	[0.512,0.969]	[0.079,0.116]	[0.380,1.015]
9:00	[0.112,0.151]	[0.606,1.253]	[0.094,0.135]	[1.960,6.173]	[0.086,0.121]	[0.582,1.896]
10:00	[0.169,0.258]	[2.598,5.702]	[0.171,0.240]	[0.650,3.579]	[0.143,0.206]	[2.963,8.720]
11:00	[0.112,0.160]	[3.377,14.991]	[0.120,0.173]	[2.213,5.863]	[0.088,0.135]	[1.144,3.301]
12:00	[0.090,0.137]	[1.447,5.734]	[0.102,0.148]	[1.202,5.256]	[0.087,0.120]	[0.493,1.332]
13:00	[0.092,0.141]	[2.549,3.855]	[0.165,0.210]	[0.613,1.922]	[0.085,0.124]	[0.543,4.424]
14:00	[0.165,0.227]	[2.184,6.870]	[0.087,0.126]	[1.320,4.840]	[0.094,0.140]	[2.630,14.316]
15:00	[0.143,0.193]	[1.005,3.550]	[0.098,0.185]	[2.128,6.953]	[0.098,0.145]	[1.973,6.518]
16:00	[0.093,0.129]	[0.464,0.864]	[0.096,0.145]	[0.455,0.853]	[0.085,0.132]	[0.589,1.460]
17:00	[0.097,0.133]	[0.615,2.364]	[0.096,0.155]	[2.014,7.326]	[0.076,0.112]	[0.561,1.122]

3.4 实验结果分析

在不同天气不同时刻下, 电弧故障信号时间窗的局部能量 E_i 取值范围为 $[0.379 \ 9, 14.345 \ 6]$; 正常情况下, 时间窗的局部能量 E_i 取值范围为 $[0.076 \ 4, 0.257 \ 6]$. 由统计结果可知, 时间窗局部能量 E_i 正常情况下最大值为 0.257 6 和电弧故障时最小值为 0.379 9 之间有明显的区分度.

经过光伏系统输出电流为 10 A 以下的大量试验数据表明: 当局部能量阈值 (E_i) 为 0.340 0 时, 可以较好地区分正常噪声信号和电弧故障事件. 1) 当光伏系统输出电流为 10 A 以下, $E_i > 0.340 \ 0$ 即为电弧故障事件; 而 $E_i \leq 0.340 \ 0$ 则为正常噪声信号. 2) 当单个时间窗的局部能量超过阈值时, 可以认定为一次电弧故障事件.

当 250 个时间窗内累计达到一定的电弧故障事件个数时, 发出预警信号, 可以避免信号干扰引起误动作, 同时, 在时域和频域上对电弧故障进行识别. 电弧故障事件个数的确定取决于检测的灵敏度和准确度的要求.

4 结束语

从光伏系统串联电弧故障检测角度分析,判别正常噪声信号和串联电弧故障信号具有相当重要的意义.通过在小波变换多分辨率分析的基础上,选取两层小波变换后高频分量系数,统计时间窗内局部能量构成电弧故障事件作为判据,通过电弧故障事件个数的累计,可以快速准确地检测出光伏系统在不同天气不同时刻的串联电弧故障.目前文中的检测方法为算法研究,未来工作是将其移植到硬件上,实现光伏串联电弧故障检测,缓解并消除光伏火灾隐患.

参考文献:

- [1] National Fire Protection Association. National electrical code[S]. Quincy:NFPA,2011:628.
- [2] HAEBERLIN H,REAL M. Arc detector for remote detection of dangerous arcs on the dc side of PV plants[C]//22nd European Photovoltaic Solar Energy Confence. [S. l.]:IEEE Press,2007:1-6.
- [3] HAEBERLIN H. Arc Detector as an external accessory device for PV inverters for remote detection of dangerous arcs on the DC side of PV plants[C]//25th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Valencia:IEEE Press,2010:1-6.
- [4] 俞雁飞,倪华,赵为,等. 光伏系统直流电弧检测方法、装置、系统: 中国,CN104092440[P]. 2014-10-08.
- [5] 孙耀杰,高源,林燕丹,等. 一种使用多重判据的光伏系统直流故障电弧检测方法: 中国,CN103245897[P]. 2013-08-14.
- [6] 姚华文,孟庆远,宋美恩. 一种用于光伏发电系统的直流电弧检测及保护方法和电路: 中国,CN203456856[P]. 2014-02-26.
- [7] 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.
- [8] 姚秀,汲胜昌,HERRERA L,等. 串流直流电弧特性及其故障诊断中的应用[J]. 高压电器,2012,48(5):6-10.
- [9] YAO Xiu,HERRERA L,HUANG Yi,*et al.* The detection of DC arc fault: Experimental study and fault recognition [C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition. Orlando:IEEE Press,2012:1720-1727.
- [10] YAO Xiu,HERRERA L,WANG Jin. A series DC arc fault detection method and hardware implementaion[C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition. Orlando:IEEE Press,2013:2444-2449.
- [11] BANKE B,PETERSEN H. Method and sevice for the detection of fault current arcing in electric circuits: USA, US2006- 0109009 A1[P]. 2006-05-25.
- [12] ENGEL J C,ENGELBERT H,PARKER K L,*et al.* Arc fault detector and method for locating an arc fault: USA, US7253640 B2[P]. 2007-08-07.
- [13] HAEBERLIN H,REAL M. Method of protecting electrical equipment, inparticular direct current equipment, e. g. photovolt aic equipment, and a detection unit for said equipment: USA, WO1995025374 A1[P]. 1995-09-21.
- [14] STROBL C,MECKLER P. Arc faults in photovoltaic systems[C]//56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Charleston:IEEE Press,2010:1-7.
- [15] 孙鹏,董荣刚,郑志成. 基于小波分析信号特征频段能量变比的故障电弧诊断技术研究[J]. 高压电器,2010,46(7):46-50.
- [16] 唐金城,缪希仁,张丽萍,等. 电流型串联电弧故障检测[J]. 福州大学学报(自然科学版),2013,10(5):869-874.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 崔长彩)