第 36 卷 第 19 期 中	þ	玉	电	机	Т	程	学	报	Vol.36 No.19	Oct. 5, 2016	
5236 2016 年 10 月 5 日		Pro	ceed	dings	of th	e CS	EE		2016 Chin.Soc	.for Elec.Eng.	
DOI: 10.13334/i.0258-8013.pcsee.152104	7	文 章	编号	: 02	258-8	013	2016) 19-5236-09	中图分类号:	TM 771	

光伏系统直流电弧故障特征及检测方法研究

牟龙华,王伊健,蒋伟,张凡

(同济大学电子与信息工程学院,上海市 嘉定区 201804)

Study on Characteristics and Detection Method of DC Arc Fault for Photovoltaic System MU Longhua, WANG Yijian, JIANG Wei, ZHANG Fan

(School of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Jiading District, Shanghai 201804, China)

ABSTRACT: This paper mainly studied the seriously harmful series arc fault of photovoltaic systems. First of all, PV system arc-fault test platform was established to collect normal and fault working current, and a test database was built. After that, fast Fourier transformation (FFT) was employed to determine the characteristic band of arc-fault, and the optimal wavelet function was chosen based on the characteristic band. By analyzing the maximal value of the arc fault signal and the variance and modulus maxima of the wavelet detail coefficients d1, this paper proposes three time and frequency domain criterions to detect the arc fault and finds out that different load current, voltage and power have no effect on the three criterions. Finally, a new mixed criterion is presented, which has higher reliability and lays an important foundation for the photovoltaic system DC arc detection.

KEY WORDS: photovoltaic systems; fault; series arc-fault; wavelet transform; mixed criterion

摘要:该文主要针对光伏系统直流侧常见且危害较大的串联 电弧故障问题展开研究。 首先,搭建了光伏系统电弧故障实 验平台,并利用该平台采集了正常状态及电弧故障状态下工 作电流的数据,建立了试验数据库。 随后,利用快速傅里叶 老化引起的直流电弧故障问题日益突出。根据电弧 发生的位置,直流电弧故障类型主要分为串联电弧 故障和并联电弧故障,如图 1所示。



图 1 光伏系统直流电弧故障示意图

Fig. 1 Diagram of PV system DC arc fault

图 1 为光伏系统直流侧电弧故障示意图 , 其中 , 串联电弧故障 F₁ 更为常见 , 通常由光伏板芯片与芯 片间、芯片与导架间、接线与接线盒间以及断裂的 连接线间的不良接触等原因造成 ^[1]。串联电弧的能 量大 , 对线路和设备危害极大 , 且易引发火灾事故 ; 但目前的低压断路器、熔断器等装置仅能对过流、 短路等故障进行检测和保护 , 不能对电弧故障起作 用^[2]。图 1 中的并联电弧故障 F₂ , 主要由线路破损

空换对故障电弧的频率成分进行分析, 确定了故障电弧的特 征频带,并利用该特征频带选定了适用于串联电弧故障检测 的最优小波函数。通过分析故障电弧信号最大值及小波细节 系数 d₁的方差、模极大值,提出了 3种能有效检测出电弧 故障状态的时频域判据, 并发现不同负载电流、 不同电压及 不同功率对这 3种故障判据并无影响, 最后提出一种基于时 域与频域的电弧故障混合判据, 该判据较单一判据具有更高 的可靠性,为光伏系统直流电弧检测奠定了理论基础。

关键词:光伏系统;故障;串联电弧;小波变换;混合判据

0 引言

近年来,随着光伏产业的不断发展,光伏系统

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51407128)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51407128).

引起的正负极性导体短接而造成。并联电弧故障发
生时,故障电流幅值通常会超过低压断路器的动作
值,故能被保护装置检测到 ^[3] 。
由于串联电弧故障电流较小,难以被保护装置
检测到 , 所以需设置额外的故障电弧检测装置。本
文主要针对串联电弧故障的检测问题展开研究。目
前,在一些领域针对电弧故障检测方案的研究已比
较深入 ,如飞机、 电动汽车、 直流低压配电柜等 ^[4-5] 。
但是,现有理论及方法不能很好地适用于光伏系统
电弧故障的检测 , 原因在于光伏系统的直流输出特
性与上述系统存在本质区别:光伏系统的输出特性
受日照强度和温度变化影响很大 ^[6] , 且与光伏阵列
局部阴影有关 [7]。
目前,国内外对于光伏系统直流串联电弧故障

检测问题的研究尚处于起步阶段,并未形成完备的 保护方案。 2011 年,美国圣地亚国家实验室 「四率先 对该问题展开研究,并深入研究了光伏系统串联电 弧和并联电弧的相关特征,并确证两种故障电弧的 噪声信号基本相同 ^[9]。目前对于光伏系统直流侧电 弧故障检测的方法主要有两种。一种是基于电流电 压波形变化的检测方法 ^[10]。在电弧故障发生时,电 弧两端的电流会瞬间下降,而两端的电压会瞬间提 高。该方法的优点是检测方法较为简单,但由于光 伏系统受光照和温度的影响较大,故输出电流和电 压的幅值不稳定,因此很难区分是由环境原因造成 的电压电流变化还是由电弧故障引起的变化。第二 种方法是基于频率特性的检测方法。电弧故障发生 时,常伴随有某一特定的高频信号,在正常工作情 况下该高频信号并不出现,一旦该信号出现,则表 明存在电弧故障。文献 [11] 利用基于频率特性的方 法检测光伏系统的电弧故障,有效区分了正常工作 状态及电弧故障状态。通过频率特性的检测方法一 般较为精确,但是容易受到逆变器或其他装置噪 声^[12]的干扰,此外由于检测装置可能距离故障位置 较远,电弧故障信号特别是频率信号在传输过程中 [13] 可能会有衰减而引起检测装置误动

本文利用小波变换的方法,研究光伏系统直流 串联电弧故障的频率特性,通过研究代表电弧故障 特征频带的小波细节系数 d₁,提出 3 种区分正常及 电弧故障状态的频域判据和时域判据,并结合时域 判据信号最大值提出一种基于时域与频域的混合 故障判据,该判据经实验检验具有较高的可靠性。 光伏阵列
图 2 电弧故障试验平台结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of arc-fault test platform

电弧发生器

断路器

电子 负载

表 1 光伏阵列参数

Tab. 1 Parameter of PV array

模块型号	最大运行	最大运行	短路电流 /	最大功率 /
	电压/V	电流 /A	А	W
STP190S-24/Ad+	36.6 5.2	5.62		190

也有学者提出利用步进电机控制电极的移动速度 与加速度,以消除随机因素对电弧频域特性的影 响^[14]。数据采集设备由霍尔电流传感器及示波器构 成,利用示波器边沿触发功能采集正常工作及故障 电弧状态下的电流信号。实验时,确认安全后闭合 断路器,其后手动缓慢调节杠杆拉开电极,产生电 弧,同时利用示波器采集霍尔元件输出的电流信 号,然后断开断路器以熄灭电弧。正常工作情况下 电流信号常伴随有低频交流噪声干扰,将采集记录 的实验数据导入到 Matlab 中,通过高通滤波器滤除 直流及低频噪声信号,单独考虑高频成分,最后将 工作电流信号以 Excel 表格的形式保存,得到试验 数据库,用以制定故障判据及故障判据可靠性的检 验。图 4 分别为起弧时的电弧、电弧电流实验波形



1 直流串联电弧特征分析

1.1 电弧故障实验平台

针对光伏系统中典型的电弧故障类型,本文参 考 UL1699B(UL standard for safety for arc-fault circuit-interrupters)标准搭建了电弧故障实验平台, 其结构示意图如图 2所示。为了能够真实地模拟光 伏系统直流侧的电弧故障,实验平台直接利用课题 组已经投运的微网实验平台中的光伏阵列直流输 出电压作为试验用电源。

该实验平台由光伏阵列、 电弧发生器、 断路器、 电子负载及数据采集设备组成,光伏阵列的参数如 表 1 所示。其中,电弧发生器参考 UL1699B 标准 而搭建,其结构如图 3 所示。该电弧发生器通过人 工调节杠杆,在两铜电极间产生间隙而产生电弧;

图 3 电弧发生器结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of arc generator



及滤波后的信号波形。

1.2 电弧故障特征频带

调用试验数据库中的采样频率为 1MHz 的正常
及电弧故障时的实验数据,由奈奎斯特采样定律可
知,其能真实反映的原始信号最大频带范围为
0~500kHz,该频带范围较为宽泛,将其分为 10 个
较小的频带,即 F1、F2、???F10,其中,F1 代表
0~50kHz,F2代表 50~100kHz,以此类推。将原始
信号进行快速傅里叶变换,分别计算各个频段范围
的能量,将故障电弧的各频段的能量 E_{ig}(i = 1,2,???)
10)与正常情况的各频段的能量 E_{im}(i = 1,2,???0)作
比,其数学表达式为

$$_{i} = \frac{E_{ig}}{E_{im}}, \quad i = 1, 2, ", 10 (1)$$

由式 (1) 得到的能量比 ;最大的频带即为故障 电弧的特征频带。根据实验得出的能量比如表 2 所 示,可知 50~100kHz 频带的能量比最大, 因此故障 电弧特征频带可确定为 50~100kHz。

表 2 电弧故障状态与正常状态能量及能量比

Tab. 2	Arc-fault state and	normal	state	energy	and
--------	---------------------	--------	-------	--------	-----

energy ratio

_	频带	频率范围 /kHz	故障状态 Eig	正常状态 E _{im}	能量比 ;
	F ₁ 0~	·50	11.3131 0.60	032 18.7551	
	F ₂ 50	~100	13.2786	0.2884	46.0423
	F₃ 10	0~150	1.2563	0.2267	5.5416
	F ₄ 15	0~200	0.0162	0.1336	0.1212
	F₅ 20	0~250	4.8713×10 ⁻⁴	0.1494 3.2606	×10 ⁻³
	F ₆ 25	0~300	3.7763×10 ⁻⁴	0.1147 3.2923	×10 ⁻³
	F ₇ 30	0~350	2.9962 ×10 ⁻⁴	0.1298 2.3083	×10 ⁻³
	F ₈ 35	0~400	4.5572 x 10 ⁻⁴	0.1122 4.0616	×10 ₃

$$D_{2^{j}} = 2^{-j} R_{R} f(t) (2^{-j}t - k) dt (4)$$

根据多分辨率分析理论及 Mallat 算法,若二进 离散小波函数簇构成 $L^2(R)$ 中的标准正交基,则可 将小波变换视为对信号的低通及高通滤波,即将信 号 f(t)分解为不同尺度下的各个分量 ^[15],原始信号 依次通过小波分解得到不同尺度下的低频分量系 数 a_j 和高频分量系数 d_j ,该分解过程如图 5所示。



图 5 小波分解示意图

Fig. 5 Sketch map of wavelet decomposition

每次分解得到的低频分量 A(k)(即近似部分)和 高频分量 D(k)(即细节部分)所包含的频带范围为

$$\begin{array}{l} ? D(k) : [2^{-(j+1)} f_{s}, 2^{-j} f_{s}] \\ ? \\ ? A(k) : [0, 2^{-(j+1)} f_{s}] \end{array} (5)$$

式中:j = 1,2,??m;fs为信号采样频率;低频和高频 分量分别对应低频系数 aj及高频系数 dj。

小波变换用于奇异值检测原理描述如下。

设 (t)为一光滑函数,且满足容许性条件:

$$C = \frac{|?()|^2}{d} < (6)$$

定义 s(t)为

$$s(t) = \frac{1}{s} \quad (\frac{t}{s}) \quad (7)$$

定义小波函数为

F ₉ 400~450	0.0011	0.0961	0.0114
F ₁₀ 450~500	3.8056 ×10 ⁻⁴	0.1061 3.5868	×10 ⁻³

1.3 最优小波基选择

任意信号 f(t)的连续小波函数定义为

 $C_{a,b} = \int f(t)?_{a,b}(t)dt$ (2)

式中?_{a,b}(t)为小波函数 ?a,b(t)的共轭, 旦:

$$?_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}}?(\frac{t-b}{a})$$
 (3)

式中:a 为尺度因子; b 为平移因子。在实际应用中, 常将连续小波离散化,即将尺度因子及平移因子离 散化,一般令 a=a^j, b=ka^jbo,为方便起见,常令 a=2,b=1,构成二进正交小波变换,其定义为

$$(t) = \frac{d(t)}{dt} (8)$$

则:

$$_{s}(t) = \frac{1}{s} \quad (\frac{t}{s}) = s \frac{d_{s}(t)}{dt}$$
(9)

信号 f(t)对应的小波变换定义为

$$W_{s} f(t) = f(t)^{*}_{s}(x) = s \frac{d}{dx} (f(t)^{*}_{s}(x))$$
 (10)

小波变换 $W_{s}f(t)则可以表示成信号 f(t)在尺度 s 被 s(t)平滑后的一阶导数。故 <math>W_{s}f(t)的幅值极大点 对应于 f(t)的突变点。因此,可以选择小波为光滑 函数的一阶导数,利用小波变换 <math>W_{s}f(t)的幅值极大 点检测 f(t)的突变点。$

小波变换中所用的小波基没有唯一性,选用小 波基的方法一是直接分析小波基的数学特性,该法。 并无工程实用性,因此常采用比较几种特定的小波。 基的方法选用最优小波基。在故障电弧检测领域常 用的小波基有: bior1.5、db10、db4 小波^[16-18]。从 试验数据库中调用采样频率为 200kHz 的故障电弧 及正常工作状态数据, 分别利用 bior1.5、db10、db4 对信号进行 4 层小波分解 , 由式 (5)可知 , 小波细节 系数 d₁的频带范围恰为 50~100kHz ,小波细节系数 包含的频率范围如表 3 所示。利用能量比的方法 , 电弧故障与正常状态下小波细节系数。 d₁ 的能量比 最大的小波即是最优小波,能量比如表 4 所示,其 中 db4 小波细节系数 d1 的能量比最大 , 则 db4 小波 即为最优小波。

表 3 小波系数频率范围

Tab. 3Wavelet coefficients frequency range

小波系数 频带范围 /kHz	小波系数 频带范围 /kHz
a₄ 0~6.25	d₃ 12.5~25
d₁ 50~100	d₄ 6.25~12.5
d₂ 25~50 —	_

表 4 正常状态及电弧故障状态小波系数 d1 能量及能量比

Tab. 4Normal state and arc-fault state wavelet

coefficients	d1 energy and energy ratio
--------------	----------------------------

故障状态	正常状态	能量比
	0.4593	39.4611
	0.8225	26.9967
0.9295 24.6776		
	故障状态 0.9295 24.6776	故障状态 正常状态 0.4593 0.8225 0.9295 24.6776

2 直流串联电弧故障判据

且数值较小,该实验中正常状态下方差的最大值仅 为 2.76 ×10⁻⁴,而当电弧故障发生时, d₁的方差值 显著提升,但各有不同,呈现出随机性规律,这是 由于电弧状态的随机性造成的,但整体上都大于正 常状态时的方差,是正常状态下方差最大值的 4.4~27 倍。故可利用小波细节系数 d₁的方差值来区 分电弧故障及正常状态,将其命名为方差判据。方 差判据的动作门槛值 f可由式 (12)制定:

 $_{f} = k_{f} D_{max}$ (12)

式中: D_{max} 为正常工作状态方差的最大值,可参照 表 5 数据选取; k_f 为可靠系数。为使该判据具有较 低的误判率,根据大量实验数据可取 k_f = 2。

表 5 正常状态及电弧故障状态小波细节系数 d1的方差值

Tab. 5 Variance of normal state and arc-fault state wavelet coefficients d1

序号	电压/V	正常状态 /10 ⁻⁴	故障状态	故障/正常
1 337.5	52	2.48	0.0011	4.435
2 338.5	60	2.27	0.0025	11.013
3 338.7	7	2.47	0.0024	9.717
4 340.0	5	2.28	0.0020	8.772
5 340.0	06	2.43	0.0020	8.230
6 340.1	9	2.34	0.0044	18.803
7 339.4	4	2.15	0.0058	26.977
8 339.8	32	2.19	0.0019	9.091
9 339.1	5	2.76	0.0046	16.667
10 340.	70	2.31	0.0027	11.688

参照表 5 中数据 , 方差判据的动作门槛值为 $f = 2.76 \times 10^{-4} \times 2 = 5.52 \times 10^{-4}$ 。

2.2 基于小波细节系数 d₁ 模极大值的频域判据

正常工作时的电流信号,该实验数据的工况为电压 在 340V 左右,负载电阻为 100 ,对其进行 4 层小 波变换,得到对应的小波细节系数 d₁。 2.1 基于小波细节系数 d₁方差的频域判据 在电弧故障检测过程中,方差主要衡量工作线 电流与平均电流的偏离程度。方差计算式为

$$D(d_1) = \frac{1}{N} \prod_{i=1}^{N} (d_1(i) - \overline{d_1})^2 (11)$$

式中: N 为小波细节系数 d_1 中数据个数; d_1 为小波 细节系数 d_1 的平均值。

在实验数据库中随机抽取 10组实验数据,其 小波细节系数 d1的方差值如表 5所示。由表 5可知, 正常工作状态小波细节系数 d1的方差值比较稳定,

模极大值是故障检测的有效方法 ^[19],所谓模极 大值,即将信号进行小波变换之后所得第 N 尺度细 节系数 d_N的最大值。根据表 5 中的 10 组实验数据, 计算得到的小波细节系数 d₁的模极大值如表 6 所 示,可知电弧故障及正常工作状态下小波细节系数 d₁的模极大值也呈现很好的区分性,故可用模极大 值加以区分,命名为模极大值判据。模极大值判据 的动作门槛值 m 可由式 (13)制定:

 $_{m} = k_{m} M_{max}$ (13)

式中: M_{max} 为正常工作状态模极大值的最大值, 可 参照表 6 数据选取; k_m 为可靠系数,可取 k_m=2。 参照表 6 中数据,模极大值判据的动作门槛值 为 m=0.1582 x2=0.3164。

t

正常状态及电弧故障状态小波细节系数 d₁的 表 6 模极大值

Modulus maxima of normal state and arc-fault Tab. 6

state wavelet coefficients d1

序号	电压/V	正常状态	故障状态	故障/正常
1	337.52 0.0	0946 0.2897		3.062
2	338.50 0.0	0645 0.7472 11.	584	
3 338.77		0.1190	0.7605	6.391
4	340.05 0.0	0646 0.5904		9.139
5 340.06		0.1125	0.8288	7.367
6 340.19		0.1137	0.7284	6.406
7	339.44 0.0	0707 1.8367 25.	979	
8	339.82 0.0	0924 0.5047		5.462
9	339.15 0.7	1582 0.3795		2.399
10	340.70 0.0	0881 0.4429		5.027

2.3 基于高频信号最大值的时域判据

在光伏直流系统中,电弧故障的产生会给工作 线电流带来高频成分,同时在电弧故障发生时刻, 工作线电流会发生突变,将会使得线电流的幅值发 生改变,通过观察原始信号高通滤波后频带范围在 10~100kHz 的高频成分的极值,能够得出故障电弧 的时域判据。表 5 中 10 组数据的电弧故障及正常 工作状态的电流高频信号最大值如表 7 所示。由表 可 7 知, 电弧故障及正常工作状态下信号最大值也 呈现很好的区分性,故可利用信号最大值加以区 分,命名为最大值判据。最大值判据动作门槛值 可由式 (14)制定:

$t_{t} = k_{t}T_{max}$ (14)

式中: T_{max} 为正常工作状态信号最大值; kt 为可靠 系数,根据大量实验数据可取 $k_{t} = 1.1_{o}$

表 7 正常状态及电弧故障状态高频成分信号最大值

- 3 考虑不同工况对故障判据的影响
- 3.1 考虑不同负载电流对故障判据的影响

光伏阵列可视为一个随环境因素变化的直流 电源,本节将其工作电压稳定在 340V,改变负载 阻值分别为 100、150、200、250、300 ,其实质 是改变负载电流。每个阻值采集 10 组数据,取其 平均值代表该阻值时的情况 , 得到不同负载下方 差、模极大值、工作电流高频信号最大值曲线,分 别如图 6—8所示。由图 6—8可知,故障状态下小 波细节系数 d1的方差、模极大值及信号最大值与正 常状态下区分明显,且正常状态下的值皆比较稳 定,因此不同负载对该 3个判据并无影响。



图 6 不同负载电流下的方差





Signal maximum of normal state and Tab. 7

arc-fault state

序号	电压/V	正常状态	故障状态	故障/正常
1	337.52 0.7	1376 0.5824		4.233
2 338.50		0.1018	0.5119	5.028
3	338.77 0.2	1286 1.7250 13.4	413	
4	340.05 0.2	2095 0.5579		2.663
5	340.06 0.1	1225 1.1415		9.318
6	340.19 0.1	1727 1.0024		5.804
7 339.44		0.1194	2.8092	23.528
8	339.82 0.7	1467 0.6318		4.307
9	339.15 0.1	1768 0.5280		2.986
10 340.70		0.1077	0.3711	3.446

参照表 7 中数据,最大值判据的动作门槛值为

 $t = 0.2095 \times 1.1 = 0.23_{\circ}$

150 100 电阻值 /

图 7 不同负载电流下的模极大值

Modulus maxima of different load currents Fig. 7





3.2 考虑环境因素对故障判据的影响

光伏系统发电出力情况主要取决于日照强度 ^[20],并没 及环境温度,而日照强度受气象因素影响 有确定的变化规律,很难用常规方法进行计算。但 无论是日照强度还是环境温度,其最终影响的还是 光伏系统直流侧的电压及电流。图 9为2015年5 月 12 日在实验室采集的单日光伏系统不同时刻电 压所绘成曲线,当天的气象条件为晴转多云,气温 为 17~27 , 实验时间为 06:00—18:00, 每一刻钟 采集一次实验数据,期间天气由晴转变为多云,至 17:00 时天已见黑。从图 10 中可以得知,环境因素 对于光伏阵列的直流电压存在很大影响,理论上电 压范围从零变化至额定电压。因此,有必要研究不 同电压对电弧故障判据的影响,试验数据库中采集 了电压从 90~350V 不等的共计 46 组数据,用以考 察不同电压的影响。



图 9 单日光伏阵列电压曲线









Fig. 11 Modulus maxima at different voltages



图 12 不同电压下的信号最大值 Fig. 12 Signal maximum at different voltages 状态,随着控制算法的不同^[21],光伏系统的输出功 率也会随之改变,因此有必要研究不同功率情况对 电弧故障判据的影响。不同输出功率下 3 种判据的 计算结果分别如图 13—15 所示,故障状态下小波 细节系数 d1的方差、模极大值及高频信号最大值与 正常状态下区分明显,且正常状态下的值皆比较稳





图 10 不同电压下的方差

Fig. 10 Variance at different voltages 不同电压下正常状态及电弧状态的方差、模极 大值及电流高频信号最大值曲线分别如图 10—12 所示。从图 10—12 中可知,故障状态下小波细节 系数 d1的方差、模极大值及信号最大值与正常状态 下区分明显,且正常状态下的值皆比较稳定,因此 环境因素对该 3 个判据并无影响。 3.3 考虑不同功率对故障判据的影响

由于光伏系统并网方式的不同,光伏系统直流 侧可能处在小电流高电压,或低电压大电流的工作

- 163.61 361.61 476.68 794.305 功率 /W
 - 图 13 不同功率下的方差
- Fig. 13 Variance at different power







图 15 不同功率下的信号最大值

Fig. 15 Signal maximum at different power

定,因此不同功率对该 3个判据并无影响。

3.4 混合判据的制定

调用试验数据库数据,对上述 3种判据进行可靠性检验,得出的可靠性指标如表 8示。

表 8 3 种判据可靠性测试指标

۲ab. १	8	Reliability	indicators	of three	kinds of criterion	
--------	---	-------------	------------	----------	--------------------	--

判据	误动率 /%	拒动率 /%
最大值判据 8.14		0.00
方差判据 0.00		9.30
模极大值判据 0.00		8.14

由表 8可知,时域判据具有较高的误动率而拒 动率为 0,时域判据则恰恰相反,这是由于可靠系 数取值不同造成的,可靠系数越高误动率越低,可 靠系数越低拒动率越低。显然,利用单一判据作为 判断标准其可靠性不高,而由于时域及频域判据的 优势互补,因此提出一种基于时域及频域的混合判 据,命名为故障特征得分 S,其计算式为

?0,
$$S_{t} = 0$$

 $S = \frac{?}{?} |[F_{t} \quad F_{f} \quad F_{m}] \frac{?S_{t}}{?S_{f}} \frac{?}{?}|, S_{t} = 1$ (15)

式中 [F_t F_f F_m]为故障特征分数矩阵,本判据中 分数矩阵定为 [50 25 25],之所以如此制定是考 虑到时域判据的拒动率较低,而频域判据的误动率 较低,频域判据的分数之和等于时域判据的分数, 这就能使得时域判据和频域判据的优势得到互补, 使拒动率和误动率都处在较低水平。

表 9 不同组合下的故障特征得分 S

Tab. 9 Failure characteristics scores S under different combinations

S	S _f	Sm	S
0 —		—	0
100			50
101			75
110			75
111			100

由表 9 可知,当不符合时域判据时,则故障特 征得分 S=0,因此时域判据可作为保护的启动判 据。当符合时域判据但不符合频域判据时 S=50; 符合一个频域判据时 S=75;符合两个频域判据时 S=100。本文定义光伏系统工作状态标志为 P,P=0 时表示为正常状态, P=1时表示为电弧故障状态, 则混合判据表达式为

$$P = \frac{?0}{?1}, \quad S < 75 \\ ?1, \quad S \quad 75 \quad (19)$$

调用试验型数据库数据对该混合判据进行可 靠性检验,其结果如表 10 所示。可知,较之单一 判据,其拒动率及误动率皆有下降,之所以不等于 0 是由于试验数据采样过程中的误差造成的,因此 该混合判据可靠性较高。

5242

S

? ?[>]™? 式中 S_t为最大值判据结果,正常工作时为 0,电弧 故障时为 1,其计算式为

S_f 为方差判据结果,正常工作时为 0,故障时 为 1,其计算公式为

S_m为模极大值判据结果,正常工作时为 0,故 障时为 1,其计算式为

表 10 混合判据可靠性测试

Tab. 10 Reliability indicators of mixed criterion

判据	误动率 /%	拒动率 /%	
混合判据 0.55		1.1	
本文所提的混合	含判据比较简单,3	主要运算量为	
小波变换 , 该算法转	较为成熟 , 当配行	合高速 A/D 及数	
字信号处理器	数字信号处	理 (digital signal	
processor, DSP),	在实际应用中判据	的实时性较易	
满足。由于在搭建电	且弧故障试验平台即	村已尽可能的	
接近实际光伏系统运	【行情况,并考虑】	了不同工况即	
不同负载、环境因素	長及不同功率的影响	洵 , 因此与实	
际情况较为接近。故	ス表 8、10 中的	误动率、拒动率	

虽然是根据实验数据得到的,但这些数据及判据仍 具有较高的参考价值。当然,由于实际光伏系统结 构及运行工况的复杂性,在实际运用时需要将相关 参数进行微调,以更符合实际运行情况。

结论 4

本文针对光伏系统直流侧常见的且危害较大 的串联电弧故障问题,搭建了光伏系统故障电弧实 验平台 , 建立了故障电弧的试验型数据库 , 利用小 波变换的方法将电弧问题转化为数值分析的问题, 利用数据库数据提出了 3种有效的时频域判据,并 提出一种结合时频域判据优势的混合判据,该判据 具有较高的可靠性,为光伏系统直流电弧故障检测 装置的研制奠定了理论基础。

参考文献

- [1] Moon W S, Kim J C, Jo A, et al. Ignition characteristics of residential series arc fault in 220V HIV wire[J] . IEEE Transactions on Industry Applications , 2014, 51(3): 1-5.
- [2] Kim SW, Lee ED, Je DH, et al. A physical and logical security framework for multilevel AFCI systems in smart grid[J] . IEEE Transactions on Smart Grid , 2011 , 2(3) : 496-506.
- [3] Gregory G D , Wong K , Dvorak R . More about arc-fault circuit interrupters[C]//Industry Applications Conference 2003. 38th IAS Annual Meeting . Salt Lake City: IEEE, 2003: 1306-1313.
- [4] Yaramasu A, Cao Y, Liu G, et al. Aircraft electric system intermittent arc fault detection and location[J] . IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2015, 51(1): 40-51.
- [5] Naidu M, Schoepf TJ, Gopalakrishnan S. Arc fault

39-46(in Chinese) .

- [8] Johnson J, Pahl B, Luebke C, et al. Photovoltaic DC arc fault detector testing at Sandia National Laboratories[C]// IEEE Photovoltaic Specialists Conference .Seattle : IEEE , 2011:003614-003619.
- [9] Johnson J , Mccalmont S , Montoya M , et al . Differentiating Series and Parallel Photovoltaic Arc-Faults [C]//IEEE Photovoltaic Specialists Conference . Texas : IEEE , 2012 : 720-726 .
- [10] Yao X , Herrera L , Ji S , et al . Characteristic study and time-domain discrete-wavelet-transform based hybrid detection of series DC arc faults[J] . IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(6): 3103-3115.
- [11] Luebke C, Pier T, Pahl B, et al. Field test results of DC arc fault detection on residential and utility scale PV arrays[C]//IEEE Photovoltaic Specialists Conference Seattle : IEEE , 2011 : 001832-001836 .
- [12] 王宾 , 耿建昭 , 董新洲 . 配网高阻接地故障伏安特性分 析及检测 [J] . 中国电机工程学报, 2014 , 34(22) : 3815-3823 .

Wang Bin, Geng Jianzhao, Dong Xinzhou. Analysis and detection of volt-ampere characteristics for high impedance faults in distribution systems[J] . Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3815-3823(in Chinese).

- [13] Johnson J, Kuszmaul S, Bower W, et al. Using PV module and line frequency response data to create robust arc fault detectors[C]//European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition . Hamburg : Eu Pvsee , 2011 : 2328-2332 .
- [14] Gao Y, Zhang J, Lin Y, et al. An innovative photovoltaic DC arc fault detection method through multiple criteria algorithm based on a new arc initiation method[C]// Photovoltaic Specialist Conference . Denver : IEEE , 2014 : 3188-3192 .
- [15] 曾德良,刘继伟,刘吉臻,等.小波多尺度分析方法在 磨辊磨损检测中的应用 [J].中国电机工程学报, 2012, 32(23) : 126-131 .

detection scheme for 42-V automotive DC networks using current shunt[J] . IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(3): 633-639.

[6] 黄伟,张田,韩湘荣,等.影响光伏发电的日照强度时 [J] . 电网技术, 间函数和气象因素 2014 , 38(10) : 2789-2793.

Huang Wei, Zhang Tian, Han Xiangrong, et al. Sunlight intensity time function and weather factors influencing photovoltaic generation[J] . Power System Technology, 2014, 38(10): 2789-2793(in Chinese).

[7] 张永革,石季英,张文,等.复杂遮阴条件下光伏系统 MPPT 控制改进 SPO 算法仿真研究 [J]. 中国电机工程 学报, 2014,34(11):39-46.

Zhang Yongge, Shi Jiying, Zhang Wen, et al. Improved SPO algorithm of MPPT control under complex

shadow[J] . Proceedings of the CSEE , 2014 , 34(11) :

Zeng Deliang, Liu Jiwei, Liu Jizhen, et al. Application of wavelet multi-scale analysis for wear characteristics[J] . Proceeding of the CSEE , 2012 , 32(23) : 126-131(in Chinese).

- [16] Costa F B, Sobrinho A H P, Ansaldi M, et al. The effects of the mother wavelet for transmission line fault detection and classification[C]//Energetics(IYCE) , Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on . Leiria : IEEE , 2011 : 1-6 .
- [17] Li W J , Li Y C .Fault detection of gearing system based on multiwavelet packets[C]//International Conference on Machine Learning and Cybernetics . Shanghai: IEEE, 2004: 1565-1570.

第36卷

- [18] Yang Y , Yu Q , Dong A , et al . Study on the fault arc on-line detecting based on wavelet singularity detection principle[C]//Wase International Conference on Information Engineering .Taiyuan :IEEE ,2009 :151-154 .
- [19] 侯国莲,张怡,张建华.基于形态学 小波的传感器故 障诊断 [J].中国电机工程学报, 2009,29(14):93-98.
 Hou Guolian, Zhang Yi, Zhang Jianhua. Fault diagnosis for sensors based on morphology-wavelet[J]. Proceedings of the CSEE, 2009,29(14):93-98(in Chinese).
- [20] 代倩,段善旭.基于天气类型聚类识别的光伏系统短期
 无辐射发电预测模型研究 [J].中国电机工程学报,2011, 31(34):28-35.

Dai Qian ,Duan Shanxu .Short-term PV generation system forecasting model without irradiation based on weather type clustering[J] . Proceedings of the CSEE , 2011 , 31(34) : 28-35(in Chinese) .

[21] 郑颖楠,王俊平,张霞.基于动态等效阻抗匹配的光伏 发电最大功率点跟踪控制 [J].中国电机工程学报,2011,31(2):111-118.

Zheng Yingnan, Wang Junping, Zhang Xia. Maximum power point tracking control in the photovoltaic power

generation based on dynamic equivalent impedance matching theory[J] . Proceedings of the CSEE , 2011 , 31(2) : 111-118(in Chinese) .



收稿日期: 2016-01-19。 作者简介: 牟龙华 (1963),男,博士,教授,博士 生导师,主要研究方向为电力系统继电保 护、分布式发电与微电网、电能质量, Ihmu@tongji.edu.cn; 王伊健 (1993),男,硕士研究生,研究

牟龙华

王伊健(1993),男,硕士研究生, 研究 方向为微电网保护与控制, 787762667@ qq.com;

蒋伟 (1990),男,硕士研究生,研究方
向为微电网电能质量,jw6089@163.com;
张凡 (1991),男,博士研究生,研究方向
为主动配电网保护与控制, 1246425305@
qq.com。

(编辑 李蕊)