

多元信息协同的光伏直流电弧故障检测及定位^{*}

武晋明 王 玮 徐丙垠 邹国锋

(山东理工大学电气与工程学院 淄博 255049)

摘要:针对光伏阵列尤其是大型光伏系统中电弧故障的检测和定位问题,从构建不同场景下的电弧故障等值电路模型出发,分析了不同位置、不同类型电弧故障下的电压电流特征差异,根据组串和母线内故障的典型故障特征,分别针对组串侧故障检测构建了融合使用组串电流均差值、特征频段能量比的综合判据,针对母线侧故障检测则使用电压均值和均差值构建检测判据,融合使用组串电流与母线电压多元信息,据此提出基于物联网思想的光伏系统直流电弧故障检测和定位策略。所提方法在实现故障检测的同时,可准确辨识故障类型并确定故障区段,且具备良好的抗干扰能力,能够有效区分阴影遮挡等非故障工况。实验结果表明,该方法相较于传统单一特征量检测方法具有明显的优越性,是利用物联网技术开展电弧故障检测的新思路。

关键词: 直流电弧故障; 多元信息协同; 电压电流特征; 故障类型辨识; 故障检测及定位; 物联网

中图分类号: TM501.2; TN911.7 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.40

Detection and localization of photovoltaic DC arc faults based on multi-information collaboration

Wu Jinming Wang Wei Xu Bingyin Zou Guofeng

(School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: Aiming at the issue of arc fault detection and localization in photovoltaic arrays, particularly in large-scale photovoltaic systems, this study constructs equivalent circuit models of arc faults under diverse operational scenarios to analyze voltage and current characteristic differences induced by arc faults of distinct locations and varying types. Based on the typical fault characteristics observed in Photovoltaic string-side operations, this study establishes a detection criterion integrating characteristic frequency band energy ratios and differences between the mean values. Furthermore, leveraging the distinct fault signatures of busbar-side faults, a detection criterion combining voltage mean values and differences from the means is established. Finally, by synergistically utilizing multivariate information from both string currents and busbar voltages, an IoT-based strategy for direct current arc fault detection and localization in photovoltaic systems is proposed. The method proposed in this paper not only achieves fault detection but also accurately identifies fault types and determines the fault segments. This method exhibits good anti-interference capabilities, effectively distinguishing between non-fault conditions such as shadow occlusion. Experimental results demonstrate that this method significantly outperforms traditional single-feature detection methods. It represents a novel approach to implementing arc fault detection through Internet of Things technologies.

Keywords: direct current arc faults; multi-dimensional information cooperation; voltage-current characteristics; fault type identification; fault detection and localization; internet of things

0 引言

随着我国“双碳”战略目标的提出以及新型电力系统建设的快速推进,光伏发电已成为新型电力系统重要

组成部分。目前,我国累计光伏发电装机容量已经达到885.68 GW,光伏发电在有力支撑新型电力系统建设的同时,其电气安全问题也愈发突出。根据政府统计数据,我国每年发生的电气火灾超过十万起,其中80%由故障电弧引起^[1],而光伏电站火灾的40%以上则是由直

流(direct current, DC)电弧故障引起^[2]。由此可见,光伏直流侧电弧故障防护已成为一个亟需解决的问题^[3]。

光伏侧电弧故障多由线路绝缘层老化失效、连接点松动、动物啃咬等原因产生,容量 10 MW 的分布式电站中接触点的数量即可达到 80 000 个以上^[4],任何接触点松动在理论上均可发生直流电弧故障,由于直流电弧无过零点,故障一旦出现便会持续存在,其能量累积极易引发线路和光伏组件致火。根据电弧故障点与负荷的相对位置关系,可将光伏系统直流电弧故障分为串联型、并联型和接地型 3 类^[5]。其中,串联型多由线路连接点接触不良等原因引起,并联型在不同电势相邻导体间产生,接地型由导体对地绝缘破坏产生。从已有保护技术看,接地型电弧本质属于接地漏电,现有技术已具备相对成熟的措施^[6-7]。从电弧故障发生频率来看,串联电弧发生频次最高,统计达到 80%,并联电弧发生的可能性相对较小,但危害较大。由于直流电弧故障特征机理复杂,加之其受关注程度相对较晚,因此串联型和并联型电弧保护技术仍不成熟^[8]。对串联型故障来说,由于其故障后所在支路电流会减小,传统过流保护方式无法保护,不仅如此,由于直流电弧高频故障信息存在随光伏组串电压电流等级的增加而减弱的负阻性特点^[9],在大型光伏系统中传统单点故障检测方法面临难以感知故障信息的局面;对并联型故障来说,其故障后虽会引起电流幅值增大,但受伏安特性曲线限制,该幅值变化有限,传统过流保护方法仍难以对此类故障进行全面检测。不仅如此,由于电弧故障可发生于线路、组串内或组串间,其故障区段的定位也是亟需解决的问题,该问题在容量较大的光伏站中尤为突出^[10]。

随着光伏发电的逐渐普及,直流电弧保护技术近几年也受到了越来越多的关注。鉴于电弧故障点的高频特征属性,现有研究多通过提取监测点电流的高频特征开展故障检测。根据特征的表征方式,分为时域、频域、时频联合域等多种表征方法。文献[11-13]通过提取时域电流的变化率、标准差、样本熵、差均值等表征故障特征并建立时域检测判据进行故障检测;文献[14-15]分别利用傅里叶变换、离散傅里叶变换加滑动时间窗的方法提取 10~30 kHz 频段的频域能量以及 40、80、100 kHz 的特征频率点构建频域故障判据;文献[16-18]分别采用小波变换、集合经验模态分解、希尔伯特黄变换等手段提取第 5 层分解细节信号 d5、本征模函数(intrinsic mode function, IMF)IMF2 分量和 IMF1、IMF2、IMF3 瞬时幅值谐波能量之和作为故障特征量以构建时频联合域检测判据。

现有直流电弧故障检测方法以电流法为主^[19],而电弧故障点的负阻特性和故障特征频段的选择仍是检测方法所面临的主要困难,此外,从构建完整保护策略角度

看,故障区段的定位技术研究也处于相对欠缺的局面。目前,物联网(internet of things, IoT)技术已在配网经济运行控制、弱故障检测等领域得以应用^[20],且已逐步渗透到光伏故障识别及在线监测等应用中^[21-23],大量实践证明,配电物联网技术的多元信息协同处理能力是解决众多弱故障检测的有效途径^[24-25]。不仅如此,国标 GB/T 39750-2021^[26]也提出了将直流电弧故障保护开关装置分布安装于光伏组件输出端的建议。鉴于上述原因,本文从构建光伏侧直流电弧故障等值电路模型出发,从理论上对组串和线路侧不同类型电弧故障的典型电压电流特征进行了论证分析,进而提出了物联网技术下的电压电流多元信息协同的直流电弧故障检测与定位方法,由此为光伏直流电弧故障检测提供新的思路。

1 电弧故障电路建模及分析

为实现对不同场景下光伏直流侧电弧故障特征的定性分析,根据替代定理,可将故障点视作电弧故障电压源,根据电弧电压的频率成分特点,电弧电压 u_{arc} 计算公式如下:

$$u_{arc}(t) = U_{DC} + u_{sc}(t) \quad (1)$$

式中: $u_{arc}(t)$ 为故障点电弧电压; U_{DC} 为电弧电压稳定燃弧直流电压分量,对低压配电线路来说,该值为近阳极和近阴极压降之和,其数值一般为 18~25 V^[27]; $u_{sc}(t)$ 为故障点电弧电压的高频分量。

图 1 所示为直流电弧故障点稳定燃烧时的电弧电压波形。为分析不同位置、不同类型电弧故障时的电压电流特征,分别构建组串侧、母线侧 6 种不同电弧故障等值电路模型进行分析。

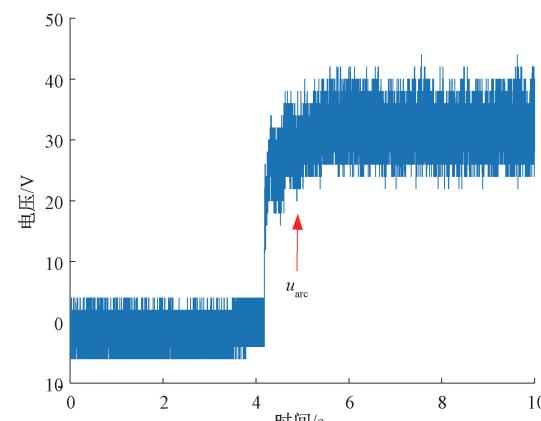


图 1 电弧电压波形

Fig. 1 Arc voltage waveform diagram

1.1 组串串联电弧故障过程及特征分析

如图 2 所示,当组串侧发生串联电弧故障时,故障串

1 中由于电弧电压 u_{arc} 出现导致 u_{AC} 产生约 20 V 瞬时压降, 由于组串 1、2 为并联关系, 且非故障串 2 电压 u_{BD} 不变, 因此非故障串电压 u_{BD} 将对 u_{AC} 产生电压钳制作用, 从而导致故障串中光伏板通过增大输出电压以减小 u_{arc} 带来的压降影响, 但并不能完全抵消, 因此 u_{BD} 会略微减小, 非故障串电流 i_2 有轻微波动。

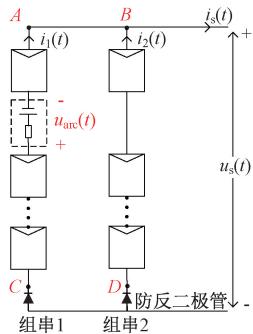


图 2 组串串联电弧故障等值电路

Fig. 2 Equivalent circuit for series arc faults within strings

伏安特性曲线如图 3 所示, 正常情况下, 光伏板工作于恒流区与恒压区交界位置①处, 故障后, 故障串光伏板输出电压增大, 此时光伏板工作点位于位置②处, 因此 i_1 有所减小, 而 i_2 基本保持不变。此外, 从电流频率成分看, u_{arc} 产生将导致 i_1 中出现电弧故障源引入的故障高频成分。图 4 所示为组串内发生串联电弧故障时的电压电流电气量暂稳态变化示意图。

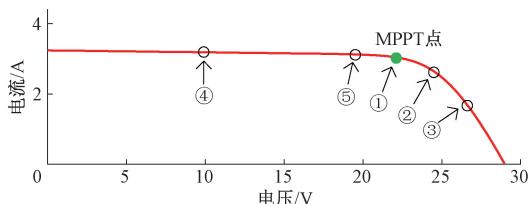


图 3 光伏伏安特性曲线

Fig. 3 Photovoltaic volt-ampere characteristic curve

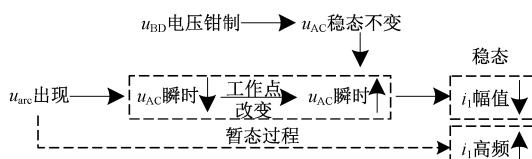


图 4 组串串联电弧故障时的电气量暂稳态过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the transient and steady state process of electrical quantities during series arc faults in strings

1.2 串内并联电弧故障过程及特征分析

如图 5 所示, 当组串侧发生串内并联电弧故障时, 故

障串 1 中部分光伏板与电弧电压源形成并联关系, 此时 $u_{EC} = u_{arc}$, u_{EC} 减小导致故障串电压 u_{AC} 产生一个较大瞬时压降, 但非故障串电压 u_{BD} 同样对 u_{AC} 产生电压钳制作用, 故障串中 u_{AE} 会产生较大幅值增长, 但 u_{AE} 增大并不能完全抵消 u_{arc} 出现带来的压降影响, 因此 u_{BD} 会轻微减小, 非故障串电流 i_2 有轻微波动。依据光伏伏安特性曲线, AE 间光伏板工作点将位于位置③处, 故障串电流 i_1 幅值大幅减小且出现电弧故障源引入的故障高频成分, 而 i_2 幅值基本保持不变, 此外 EC 间光伏板输出电压减小, 其工作点位于位置④处(该位置电压值与发生并联故障光伏板数量有关)。图 6 所示为发生串内并联电弧故障时的上述电压电流电气量暂稳态变化示意图。

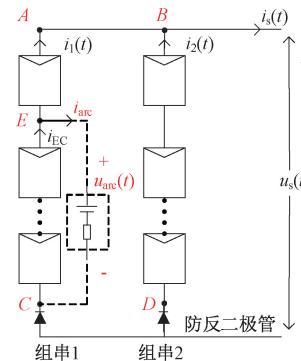


图 5 串内并联电弧故障等值电路

Fig. 5 Equivalent circuit for parallel arc faults within a string

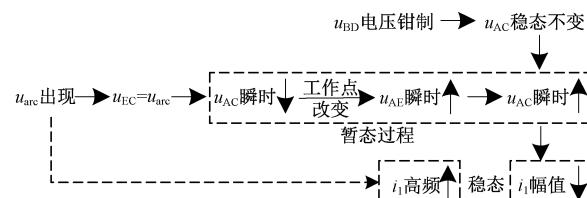


图 6 串内并联电弧故障时的电气量暂稳态过程示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the transient and steady state process of electrical quantities during an arc fault in parallel in strings

1.3 串间并联电弧故障过程及特征分析

如图 7 所示, 当组串侧发生串间并联电弧故障时, EF 之间电压减小为 u_{arc} , 此时 $u_{BF} = u_{AE} + u_{arc}$, 故障后电压 u_{BF} 与 u_{AE} 产生相互影响, 所以故障后 u_{BF} 的电压减小, 而 u_{AE} 的电压增加。同理, 故障后 $u_{EC} = u_{arc} + u_{FD}$, 所以 u_{EC} 减小, 而 u_{FD} 增加。根据光伏伏安特性曲线, AE 间光伏板工作点将位于位置③处, 此时故障串电流 i_1 幅值减小, BF 间光伏板工作点将位于位置⑤处, 此时组串电流 i_2 幅值轻微增加。由于故障发生于两组串之间, u_{arc} 的产生导致故障串电流 i_1 与 i_2 中均出现电弧故障源引入的故障

高频成分。图 8 所示为发生串间并联电弧故障时的上述电压电流电气量暂稳态变化示意图。

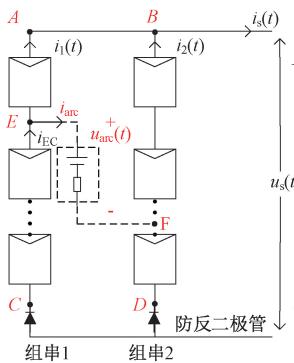


图 7 串间并联电弧故障等值电路

Fig. 7 Equivalent circuit for parallel arc faults between strings



图 8 串间并联电弧故障时的电气量暂稳态过程示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the transient and steady state process of electrical quantities during arc faults in parallel between strings

1.4 整串并联电弧故障过程及特征分析

如图 9 所示,组串侧发生整串并联电弧故障后,故障串 1 中光伏板与电弧电压源形成并联关系,同时电弧电压源也与负载端电阻 R 形成并联关系,此时 $u_{AC} = u_{arc} = u_s$ 。由于组串中防反二极管的存在,非故障串电流 i_2 不会倒流进入故障串中,所以 i_2 保持不变,此时可将故障等值电路简化为图 10 所示等效电路进行分析。由于电弧等效内阻 r_{arc} 很小而负载端电阻 R 阻值较大,因此 i_{arc} 远大于 i_1 ,此时 i_1 将近似为 0。依据光光伏安特性曲线,此时 AC 间光伏板工作点位于位置④处。图 11 所示为发生整串并联电弧故障时的电压电流电气量变化示意图。

1.5 母线串联电弧故障过程及特征分析

如图 12 所示,当母线侧发生串联电弧故障后,线路中串联接入电弧电压源,此时可将其看作电弧等效内阻 r_{arc} ,其阻值较小,因此线路电流 i_s 轻微减小,由于 $u_{BD} = i_s \times R$,所以负载端电压 u_{BD} 也轻微减小,而 $u_{AC} = u_{arc} + i_s \times Z + u_{BD}$ (Z 为线路阻抗),所以光伏输出电压 u_{AC} 有所增大。依据光光伏安特性曲线,此时光伏板工作点位于位置②处。 u_{arc} 的产生导致光伏输出电流 i_s 中出现电弧故障源引入的故障高频成分,但由于电弧故障的负阻特性,故障高频成分可能难以检测。

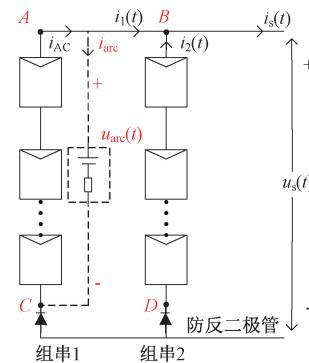


图 9 整串并联电弧故障等值电路

Fig. 9 Equivalent circuit for parallel arc faults in the whole string

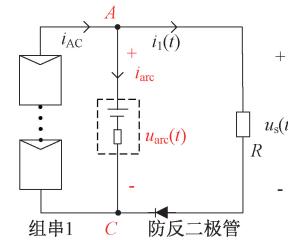


图 10 整串并联电弧故障等效电路

Fig. 10 Further equivalent circuit for parallel arc faults in the whole string

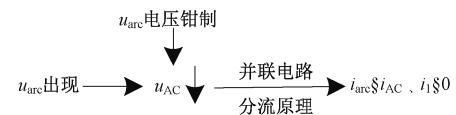


图 11 整串并联电弧故障时的电气量变化示意图
Fig. 11 Schematic diagram of the changes in electrical quantities of the parallel arc faults for the whole string

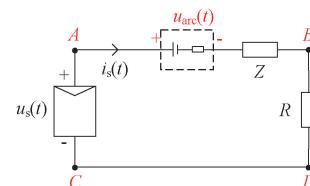


图 12 母线串联电弧故障等值电路

Fig. 12 Equivalent circuit for series arc faults at busbars

1.6 母线并联电弧故障过程及特征分析

如图 13 所示,母线侧发生并联电弧故障后,负载 R 和部分线路阻抗 Z_2 与电弧等效内阻 r_{arc} 形成并联关系,由于 r_{arc} 很小而 R 阻值较大,依据并联分流原理可知 i_{arc} 远大于 i_R ,此时 i_R 近似为 0,因此 $u_{BD} = u_{arc}$,而 $u_{AC} - u_{arc} = i_s \times Z_1$,若不考虑线路阻抗影响,则 $u_{AC} \approx u_{arc} \approx u_{BD}$ 。依

据光伏伏安特性曲线,此时光伏板工作点位于位置④处,光伏输出电流 $i_s(t)$ 略微增大。 u_{arc} 的产生导致光伏输出电流 i_s 中出现电弧故障源引入的故障高频成分,但电弧故障负阻特性仍会影响对故障高频成分的检测。

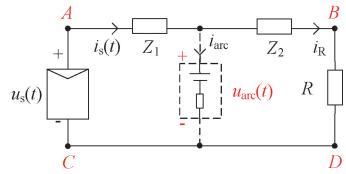


图 13 母线并联电弧故障等值电路

Fig. 13 Equivalent circuit for parallel arc faults at busbars

根据上述 6 种类型电弧故障电路建模及分析,总结得到不同类型故障下的电压电流信号输出特征如表 1 所示。当组串侧发生故障时,不同组串输出电流具有明显幅值差异且出现故障高频成分。当母线侧发生故障时,光伏输出电压与负载端电压会产生显著幅值变化,输出电流也存在微弱的幅值与高频成分变化。

表 1 不同场景下电弧的故障特征对比

Table 1 Comparison of arc fault characteristics in different scenarios

| 故障类型 | 输出电流 | 输出电压 | 高频成分 |
|--------|------------|--------------------------|--------------|
| 组串串联电弧 | i_1 减小 | 不变 | i_1 |
| | i_2 不变 | | |
| 串内并联电弧 | i_1 大幅减小 | 减小 | i_1 |
| | i_2 不变 | | |
| 串间并联电弧 | i_1 大幅减小 | 减小 | i_1, i_2 |
| | i_2 略微增加 | | |
| 整串并联电弧 | i_1 近似为零 | 减小 | 无 |
| | i_2 不变 | | |
| 母线串联电弧 | i_s 减小 | u_{AC} 增加 | i_s (不易检测) |
| | | u_{BD} 减小 | |
| 母线并联电弧 | i_s 略微增加 | $u_{AC} \approx u_{arc}$ | i_s (不易检测) |
| | | $u_{BD} \approx u_{arc}$ | |

2 光伏系统电弧故障实验平台

图 14 所示为光伏系统电弧故障实验平台,光伏阵列由 6 串 2 并结构的 12 块光伏板组成,单块光伏板主要参数如表 2 所示。母线使用长度 100 m、线径 10 mm² 的线缆,线路电感 119 μH、电阻 0.187 Ω、电容 2.224 nF。实验中使用带宽 5 MHz 的电压差分探头采集电压,使用带宽 2 MHz 的电流霍尔传感器采集电流。

实验依据国标 GB/T 39750-2021 在组串与母线上设置监测点,使用 Tek-MDO3014 示波器采集组串首端电流与母线上下游电压,采样频率 500 kHz,负载使用 16 Ω 大功率电阻。电弧发生器主要结构包括碳质固定电极、铜质移动电极与螺旋调节器,通过旋转调节器旋钮使移动

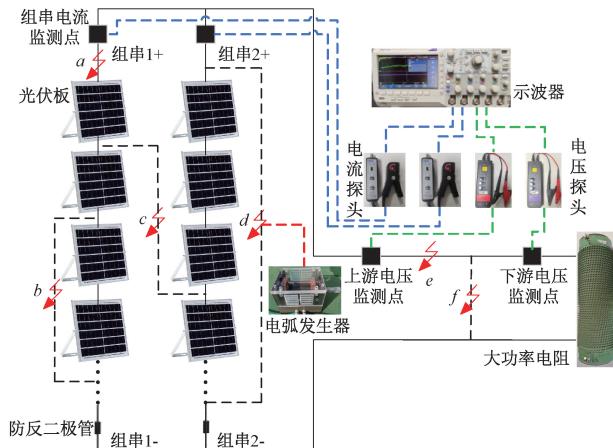


图 14 光伏系统电弧故障实验平台

Fig. 14 Experimental platform for arc faults in photovoltaic system

电极移动从而改变电极间隙来产生电弧,使用电弧发生器分别在图 14 中点 a~f 设置故障,各故障点类型编号如表 3 所示。其中,串联型电弧通过将电极闭合的电弧发生器串联接入系统,在电极分离时刻产生电弧;并联型电弧通过将电极分离的电弧发生器并联接入系统,避免短路故障发生,电弧在电极闭合时刻产生。

表 2 光伏板主要参数

Table 2 Main parameters of photovoltaic panels

| 参数 | 峰值功率/Hz | 峰值电压/V | 峰值电流/A | 开路电压/V | 短路电流/A |
|----|---------|--------|--------|--------|--------|
| 数值 | 50 | 17.2 | 2.91 | 21.1 | 3.14 |

表 3 故障类型与编号

Table 3 Fault types and numbers

| 编号 | a | b | c | d | e | f |
|------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 故障类型 | 组串串 联电弧 | 串内并 联电弧 | 串间并 联电弧 | 整串并 联电弧 | 母线串 联电弧 | 母线并 联电弧 |

3 电气量时频特性提取及分析

3.1 组串电流时域特征提取及分析

图 15 所示为组串内发生不同类型电弧故障时故障组串电流的实测波形,电弧故障在 0.5 s 产生。

观察图 15 可知,发生组串串联电弧故障时,故障串电流幅值轻微下降,高频成分增加;发生串内并联电弧故障时,故障串电流幅值大幅减小,高频成分增加;发生串间并联电弧故障时,故障串 1 电流幅值大幅减小,故障串 2 电流幅值轻微增加,故障串均出现高频成分;发生整串并联电弧故障时,故障串电流幅值减小为 0。此外,上述

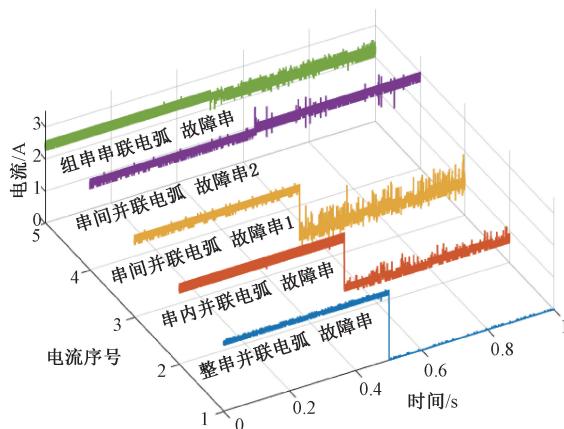


图 15 组串内发生不同类型电弧故障时电流波形

Fig. 15 Current waveforms for different types of arcing faults within a string

4 种组串侧发生故障时非故障串电流基本不变。图 15 结果与故障电路建模分析结果保持一致,验证了本文所构建组串侧故障等值电路模型的有效性。

对于上述 4 类组串侧电弧故障,由于故障后组串电流之间存在幅值与高频成分的电弧特征量差异,而正常工况下组串电流之间仅存在噪声信号差异,通过差分可反映组串电流之间的差异程度,从而得到明显的故障特征量。均差值是通过计算特定长度信号的均值再做差,可避免信号中某处数据过大或过小导致的计算结果偏大而造成误判。因此,本文考虑选用组串间电流均差值构建时域特征量。电流均差值计算公式如下:

$$I_0 = \left| \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N I_{1i} \right) - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N I_{2i} \right) \right| \quad (2)$$

式中:N 为一特定长度内数据点数; I_{1i} 与 I_{2i} 分别为一个特定长度内两组串电流各自在第 i 点的值。

组串侧电弧故障时对特定长度时间窗内电流均差值的计算结果如图 16 所示。当组串侧发生不同类型电弧故障时电流均差值会表现出不同特征,发生组串串联电弧故障时电流均差值小于 0.5 A,而发生串内并联电弧故障、串间并联电弧故障和整串并联电弧故障时的电流均差值均大于 1 A。此外,发生整串并联电弧故障时电流均差值等于非故障串电流均值。

3.2 组串电流频域特征提取及分析

对电弧故障频率分析而言,100 kHz 以上频率响应中故障电流或电压幅值很小,极易淹没在噪声之中,而低于 1 kHz 频率易受到光伏变异性的影响,此外,由于光伏逆变器开关频率大多在 1~100 kHz 之间,使用单一频率进行故障检测会受到其干扰。因此,本文考虑选用 1~100 kHz 频带作为故障特征频段进行故障检测。图 17 所示为组串侧发生不同类型电弧故障时正常运行组串、非

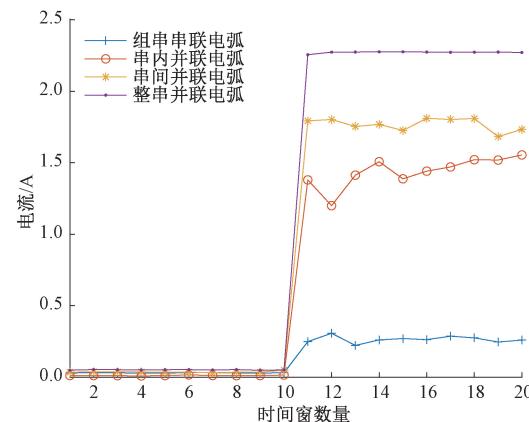


图 16 组串内发生不同类型电弧故障电流均差值

Fig. 16 Differences between the mean values in current when different types of arc faults occur within a string

故障串与非故障串电流频谱,电流进行快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)运算的处理时间窗口为 10 ms。

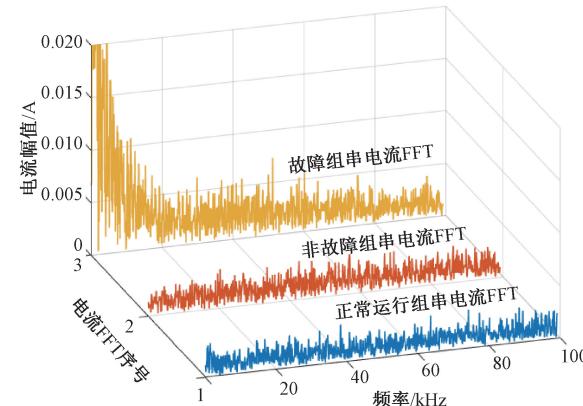


图 17 组串内发生不同类型电弧故障时的频谱

Fig. 17 Spectrum when different types of arc faults occur within a string

当组串中发生电弧故障时,非故障串与正常运行组串频谱基本一致,而故障串电流中包含大量故障高频成分,且随着频率增加故障高频信息逐渐减小,在频率 90~100 kHz 之间频域电流幅值基本与正常组串幅值大小一致,可将此特征用于电弧故障检测。需要注意的是,发生整串并联电弧故障时,故障串电流降为 0,其频谱不包含故障谐波分量,因此,仅依靠电流频域特征无法实现对组串侧多种类型电弧故障的检测。

频域能量通常用于分析信号在不同频率成分上的能量分布,其可以很好的突出故障后故障分量的变化,特征频段能量比的计算公式如下:

$$P_i = \frac{\sum |A_1(f_k)|^2}{\sum |A_2(f_k)|^2} \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

式中: $|A_1(f_k)|$ 、 $|A_2(f_k)|$ 分别表示 1~100 kHz 与 90~100 kHz 频段中各频率点处谐波分量的幅值, P_i 表示光伏阵列中第 i 个组串电流的频域特征量。

表 4 所示为不同类型电弧故障下对 10 ms 时间窗内电流频域特征量计算结果, 正常运行组串与故障后非故障串电流频域特征量约等于 10, 而故障后故障串电流频域特征量均大于 20。此外, 发生整串并联电弧时故障串电流为 0, 无需计算频域特征量。

表 4 不同情况下电流信号的频域特征量统计

Table 4 Frequency domain characteristic quantity statistics of current signals for different cases

| 运行工况 | 组串 | 特征频段能量比 |
|------------|-------|----------|
| 正常运行 | 正常组串 | 10.138 5 |
| 发生组串侧串并联电弧 | 非故障串 | 10.598 2 |
| 发生组串串联电弧 | 故障串 | 23.473 9 |
| 发生串内并联电弧 | 故障串 | 26.800 4 |
| 发生串间并联电弧 | 故障串 1 | 27.202 5 |
| | 故障串 2 | 26.621 1 |

3.3 母线电压时域特征提取及分析

当光伏阵列输出电流较小, 在发生电弧故障时母线输出电流中会包含较多故障高频信息, 当光伏阵列规模较大, 由于电弧负阻特性的存在, 母线输出电流中的故障高频信息会变得微弱从而导致难以检测。因此, 在母线侧电弧故障时使用电流信号进行检测只适用于小型光伏系统, 不具有普适性, 而母线电压特征则更具典型性。对于母线侧电弧故障, 本文考虑使用电压信息进行故障检测与辨识。

图 18 所示为母线侧发生串并联电弧故障时上下游电压监测点实测波形。当母线侧发生串联电弧故障时, 上游监测点电压增加, 下游监测点电压减小; 母线侧发生并联电弧故障时, 上下游监测点电压都大幅减小, 该结果与故障电路建模分析结果保持一致, 验证了所构建母线侧故障等值电路模型的有效性。

依据母线串并联电弧故障过程及特征分析, 母线串联电弧故障时, 上下游监测点电压差约等于电弧电压; 母线并联电弧故障时, 上下游监测点电压都约等于电弧电压。通过计算监测点电压均值与均差值特征量是否为电弧电压值即可检测母线电弧故障的发生, 同时还可避免信号中某处数据过大或过小导致的计算结果偏大从而造成误判。因此, 本文考虑采用上下游监测点电压均值与均差值作为电压时域特征量。电压均值与均差值计算公式如下:

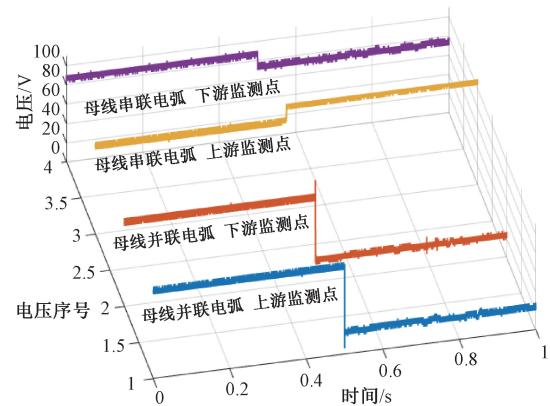


图 18 母线上发生不同类型电弧故障时电压波形

Fig. 18 Voltage waveforms for different types of arc faults on the busbar

$$\begin{cases} U_1 = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N U_{1i} \right) \\ U_2 = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N U_{2i} \right) \\ U_0 = \left| \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N U_{1i} \right) - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N U_{2i} \right) \right| \end{cases} \quad (4)$$

式中: N 为一个特定长度内数据总点数; U_{1i} 与 U_{2i} 分别为上下游监测点电压一个特定长度内第 i 点的值; U_1 与 U_2 分别为上下游监测点电压均值; U_0 为电压均差值。

图 19 所示为母线侧电弧故障时对特定长度时间窗内电压均值与均差值的计算结果。发生母线串联电弧故障时电压均差值约等于电弧电压值; 发生母线并联电弧时上下游监测点电压均值都约等于电弧电压值。考虑母线中存在一定幅值的线路压降, 通过设置故障时域电压检测阈值为电弧电压降与线路压降之和, 即检测范围为 20~40 即可检测与辨别母线串并联电弧故障。

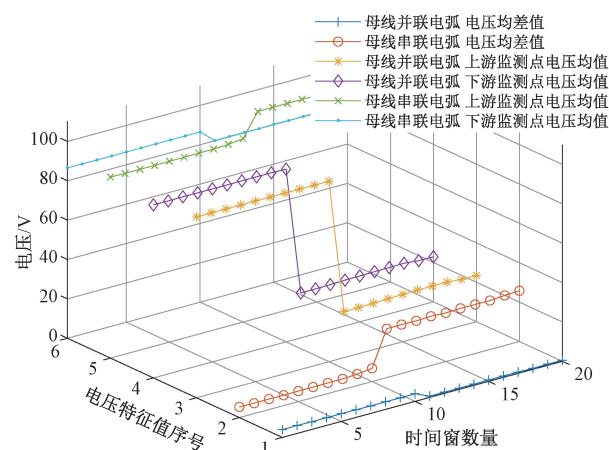


图 19 母线上发生不同类型电弧故障时电压特征值图

Fig. 19 Characteristic values of voltage during different types of arc faults on the busbar

3.4 阴影遮挡干扰分析

由于本文方法在特征提取时涉及差异与变化量等,而光伏系统输出电压电流受光照、温度等环境因素影响较大,例如阴影遮挡情况下也会产生一定的差异量,因此,通过数据分析以明确本文方法在阴影遮挡工况下的适用性。

图 20 所示为阴影遮挡下遮挡组串、非遮挡组串电流与母线输出电压实测波形,在 0.5 s 时刻光伏板被阴影部分遮挡,观察可知,在阴影遮挡时故障组串电流与母线输出电压幅值有所下降,而正常组串电流幅值保持不变。

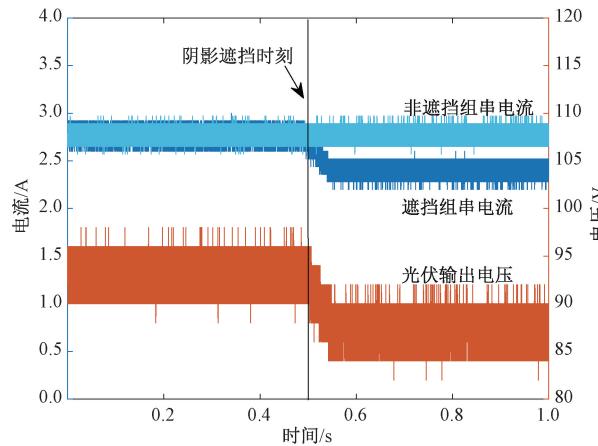


图 20 阴影遮挡干扰条件下电压电流波形

Fig. 20 Voltage and current waveforms during shadow masking

通过将阴影遮挡下监测点数据代入所提出特征量进行计算,阴影遮挡下电流均差值小于 0.5 A,电流频域特征量为 10.207 4,上下游监测点电压均值均大于 40 V 且均差值小于 10 V,因此文本所提出电压电流时频域特征量可以区分电弧故障与阴影遮挡干扰。

4 基于电压电流协同的检测及定位方法

4.1 检测及定位方法原理

通过对前文电路建模与实验结果分析可知,将电流均差值、电流特征频段能量比、电压均值与均差值作为特征量构建电弧故障检测判据,可实现光伏系统直流电弧故障的检测、辨识及区段定位。

电流时域特征量的电弧故障检测判据如下:

$$I = \begin{cases} 0, I_0 < 1 \\ 1, I_0 > 1 \& \min(I_1, I_2) > 1 \\ 2, I_0 > 1 \& \min(I_1, I_2) < 0.1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $I=0$ 表示系统可能处于正常状态、母线串并联电弧故障状态或组串串联电弧故障状态; $I=1$ 表示系统可能处于串内或串间并联电弧故障状态; $I=2$ 表示系统处于

整串并联电弧故障状态。

电流频域特征量的电弧故障检测判据如下:

$$P = \begin{cases} 0, \max(P_1, P_2) < 10 \\ 1, \min(P_1, P_2) < 10 \& \max(P_1, P_2) > 10 \\ 2, \min(P_1, P_2) > 10 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P=0$ 表示系统可能处于正常状态或整串并联电弧故障状态; $P=1$ 表示系统可能处于组串串联或串内并联电弧故障状态; $P=2$ 表示系统处于串间并联电弧故障状态。

电压特征量电弧故障检测判据如下:

$$U = \begin{cases} 0, U_0 < 10 \& \min(U_1, U_2) > 40 \\ 1, 20 \leq U_0 \leq 40 \\ 2, 20 \leq U_1 \leq 40 \& 20 \leq U_2 \leq 40 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $U=0$ 表示系统处于正常状态或组串侧电弧故障状态; $U=1$ 表示系统处于母线串联电弧故障状态; $U=2$ 表示系统处于母线并联电弧故障状态。

故障检测、辨识及定位综合判据如表 5 所示,依据特征量 I, P 的变化可监测到组串侧故障的发生,依据特征量 U 的变化可监测到母线侧故障的发生。本文所提的综合判据计算简洁方便,主要运算量为傅里叶变换,该算法成熟,在实际应用中实时性易满足。

表 5 电弧故障检测及定位综合判据表

Table 5 Comprehensive criteria table for arc fault detection and localization

| | $I=0$ | $I=0$ | $I=1$ | $I=1$ | $I=2$ | $I=0$ | $I=0$ |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 特征量 | $P=0$ | $P=1$ | $P=1$ | $P=2$ | $P=0$ | $U=1$ | $U=2$ |
| | $U=0$ | $U=0$ | $U=0$ | $U=0$ | $U=0$ | | |
| 系统状态 | 正常 | 组串串 | 串内并 | 串间并 | 整串并 | 母线串 | 母线并 |
| | 运行 | 联电弧 | 联电弧 | 联电弧 | 联电弧 | 联电弧 | 联电弧 |

4.2 检测方法对比

针对本文所提出检测方法的适用性及优缺点,表 6 与 7 分别为该方法与传统电弧检测方法针对组串侧与母线侧电弧故障检测的对比。

表 6 光伏系统组串侧电弧故障检测方法对比

Table 6 Comparison of arc fault detection methods on the string side of photovoltaic systems

| 检测方法 | 组串串联 电弧故障 | 串内并联 电弧故障 | 串间并联 电弧故障 | 整串并联 电弧故障 |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 本文方法 | √ | √ | √ | √ |
| 电流方差、 变化率 | √ | √ | √ | × |
| FFT | √ | √ | √ | × |
| 小波变换 ^[28] 、 经验模态分解 (EMD) ^[29] | √ | √ | √ | × |

表 7 光伏系统母线侧电弧故障检测方法对比

Table 7 Comparison of arc fault detection methods on the bus side of photovoltaic systems

| 检测方法 | 优缺点 | 适用范围 |
|----------|----------------------------------|----------|
| 本文方法 | 检测精度高,可以辨识故障类型,计算量小,具有一定抗扰性 | 各种等级光伏阵列 |
| 电流方差、变化率 | 计算量小,但难以检测到微弱电弧,抗扰性较差 | 小型光伏系统 |
| FFT | 计算量小,难以检测到微弱电弧,抗扰性差,缺乏时间尺度信息 | 小型光伏系统 |
| 小波变换、EMD | 检测精度高,抗扰性好,但存在基函数或特征模量等选取问题,计算量大 | 小型光伏系统 |

现有检测方法大多针对母线输出电流进行故障检测,而表 6 是对本文所提方法与使用组串电流信号检测的传统方法在故障类型检测适用性方面的对比。当系统发生整串并联电弧故障时,由于故障组串电流为 0,传统检测方法均出现漏检情况,且传统检测方法对故障类型难以辨识。

表 7 为使用母线电流信息提取故障特征的传统检测方法与使用电压信息提取故障特征的本文所提方法在优缺点以及适用系统范围的对比,受电弧负阻特性影响,大型光伏系统发生电弧故障时母线电流中所包含故障高频成分减少,检测灵敏度降低,因此传统方法大多只适用于小型光伏系统。

4.3 基于物联网技术的应用推广

本文提出的故障检测与定位方法不仅适用于图 14 所示测试系统,也可推广到大型光伏电站中。图 21 所示为光伏系统直流侧电弧故障监测原理,电流监测点安装于汇流箱进线处保证位于首端位置,监测点使用无线通信方式将($N+2$)组数据传输至智能网关实现对故障的实时监测。

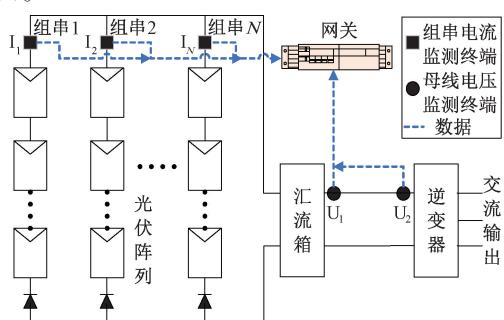


图 21 光伏系统直流侧电弧故障监测原理示意图

Fig. 21 Schematic diagram of direct current side arc fault monitoring principle of photovoltaic system

当光伏系统直流侧发生电弧故障时,智能网关首先通过对系统中不同监测点上传的组串侧电流与母线侧电压信号进行采集,之后计算本文所提 3 种特征量的取值,

最后依据综合判据表对比特征量计算结果即可判断系统是否发生直流侧电弧故障。若检测到系统发生电弧故障,智能网关即可依据特征量计算结果辨识故障类型与准确定位故障所发生组串位置或定位到直流母线处。

5 结 论

本文针对光伏系统直流侧发生不同类型电弧故障时的检测及定位方法进行了研究,根据理论分析及实验结果得出结论为:1)通过建立 6 种不同类型电弧故障下等值电路模型,发现当光伏系统组串侧发生电弧故障时,组串输出电流包含明显的幅值与故障高频信息;当母线侧发生电弧故障时,光伏输出电压与负载端电压包含明显的故障幅值信息。2)系统发生组串串联电弧故障与串内并联电弧故障时,故障支路电流幅值减小,高频成分增加;发生串间并联电弧故障时,两个故障支路电流幅值一个增大一个减小,高频成分均增加;发生整串并联电弧故障时,故障支路电流降为 0;发生母线串联电弧故障时,输出电压与负载电压之差为电弧电压;发生母线并联电弧故障时,输出电压与负载电压均为电弧电压。3)电流均差值特征可以检测系统组串侧并联型电弧故障;特征频段能量比特征可以检测到组串侧串联电弧、串内与串间并联电弧故障;电压均值与均差值特征可以检测到母线侧串并联电弧故障。4)本文所提出的融合组串电流与母线电压多元信息的直流侧电弧故障检测方法不仅可以检测到直流侧电弧故障的发生,同时还能辨识故障类型以及定位故障所在区段,并且该方法还可以区分阴影遮挡所造成的干扰。

参考文献

- [1] 龙禹,周扬,石晓龙,等.交流供电系统故障电弧隐患检测方法研究综述[J].电力需求侧管理,2023,25(3):74-79.
LONG Y, ZHOU Y, SHI X L, et al. Research review on the detection method of arc hidden trouble in AC electric system[J]. Power Demand Side Management, 2023, 25(3): 74-79.
- [2] 孙春来.光伏发电系统直流串联电弧故障检测方法研究及装置设计[D].秦皇岛:燕山大学,2019.
SUN CH L. Research on DC series arc fault detection method and detector design in photovoltaic system[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019.
- [3] LU S, SAHOO A, MA R, et al. DC series arc fault detection using machine learning in photovoltaic systems: Recent developments and challenges [C]. 2020 8th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD). IEEE, 2020: 416-421.

- [4] 刘璇. 光伏系统直流电弧动态模型及其故障检测算法研究[D]. 重庆:重庆大学, 2020.
LIU X. Study on DC arc dynamic model and fault detection algorithm in PV system [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.
- [5] 王桐, 史雯, 石浩渊, 等. 基于平稳小波变换的光伏直连串联电弧故障检测[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(12): 82-93.
WANG T, SHI W, SHI H Y, et al. Photovoltaic DC series arc fault detection based on stationary wavelet transform [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(12): 82-93.
- [6] 王玮, 徐丙垠, 邹国锋, 等. 基于电压特征能量的低压交流串联电弧故障检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(19): 81-93.
WANG W, XU B Y, ZOU G F, et al. Low-voltage AC series arc fault detection method based on voltage characteristic energy [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19): 81-93.
- [7] 田君杨, 沈梓正, 李海勇, 等. 灵活接地系统电弧接地故障建模与特征分析[J]. 供用电, 2024, 41(9): 90-97.
TIAN J Y, SHEN Z ZH, LI H Y, et al. Modeling and characteristics analysis of arc grounding fault in a flexible grounding system[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(9): 90-97.
- [8] 高飞. 低压直流系统短路及电弧故障的保护技术研究[D]. 天津:河北工业大学, 2022.
GAO F. Research on protection technology of short circuit and arc fault in low voltage DC system [D]. Tianjin:Hebei University of Technology, 2022.
- [9] 熊庆, 刘小军, 郭自清, 等. 基于电流频谱积分差值的光伏系统电弧故障检测和定位[J]. 高电压技术, 2021, 47(5): 1625-1633.
XIONG Q, LIU X J, GUO Z Q, et al. Arc fault detection and localization for photovoltaic system based on spectrum integration difference of currents [J]. High Voltage Technology, 2021, 47(5): 1625-1633.
- [10] 李松浓, 晏尧, 向菲, 等. 光伏直流系统故障电弧检测方法研究综述[J]. 电测与仪表, 2024, 61(2): 10-16.
LI S N, YAN Y, XIANG F, et al. A comprehensive review on detection method for DC fault arc in photovoltaic system [J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2024, 61(2): 10-16.
- [11] LU Q, YE Z, SU M, et al. A DC series arc fault detection method using line current and supply voltage[J]. IEEE Access, 2020, 8: 10134-10146.
- [12] 赵铁军, 孟菁, 宋岳奇, 等. 组串式光伏系统直流串联回路电弧故障检测与保护策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 74-82.
ZHAO T J, MENG J, SONG Y Q, et al. Series arc detection and protection on the DC side of string-type PVs[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 74-82.
- [13] 张冠英, 张艳娇, 赵远, 等. 基于高斯过程分类的串联回路电弧故障检测[J]. 高压电器, 2020, 56(4): 1-7, 14.
ZHANG G Y, ZHANG Y J, ZHAO Y, et al. Detection method of series DC arc fault based on gaussian process classification [J]. High Voltage Electrical Apparatus, 2020, 56(04): 1-7, 14.
- [14] 张冠英, 赵若姿, 王尧. 基于FCM算法的光伏系统电弧故障检测方法研究[J]. 高压电器, 2022, 58(5): 15-22.
ZHANG G Y, ZHAO R Z, WANG Y. Study on arc fault detection method of photovoltaic system based on FCM[J]. High Voltage Electrical Apparatus, 2022, 58 (5): 15-22.
- [15] 王尧, 李阳, 葛磊蛟, 等. 基于滑动离散傅里叶变换的串联回路电弧故障识别[J]. 电工技术学报, 2017, 32(19): 118-124.
WANG Y, LI Y, GE L J, et al. A series DC arcing fault recognition method based on sliding discrete Fourier transform [J]. Journal of Electrotechnology, 2017, 32(19): 118-124.
- [16] 张国军, 杨东建, 季淑洁, 等. 光伏系统直流串联回路电弧故障检测研究[J]. 电源学报, 2021, 19(1): 90-96.
ZHANG G J, YANG D J, JI SH J, et al. Research on photovoltaic system series DC arc fault detection [J]. Journal of Electric Sources, 2021, 19(1): 90-96.
- [17] 黄宵宵, 吴春华, 李智华, 等. 光伏系统直流电弧故障检测方法对比研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(8): 204-214.
HUANG X X, WU CH H, LI ZH H, et al. Comparison of DC arc fault detection methods for photovoltaic system[J]. Journal of Solar Energy, 2020, 41(8): 204-214.
- [18] 卢其威, 李亚松, 苏猛猛, 等. 基于改进HHT的直流串联回路电弧故障检测方法[J]. 电工电能新技术, 2022, 41(11): 70-81.
LU Q W, LI Y S, SU M M, et al. A DC series arc fault detection method based on improved HHT [J]. New Technology of Electric Energy, 2012, 41(11): 70-81.
- [19] 唐圣学, 刁旭东, 陈丽, 等. 光伏发电系统直流串联回路微弱故障电弧检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(3): 150-160.

- TANG SH X, DIAO X D, CHEN L, et al. Study on detection method of weak series DC fault arc in PV power generation systems [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(3) : 150-160.
- [20] 肖丁天. 基于dq变换的配电网弱故障检测方法研究[D]. 恩施: 湖北民族大学, 2023.
- XIAO D T. Research on weak fault detection method of distribution network based on dq transform [D]. Enshi: Hubei University for Nationalities, 2023.
- [21] LIN Y F, LIN P J, ZHOU H F, et al. On-line monitoring system of PV array based on internet of things technology [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, 93: 1-12.
- [22] DUPONT I M, CARVALHO P C M, JUCÁ S C S, et al. Novel methodology for detecting non-ideal operating conditions for grid-connected photovoltaic plants using internet of things architecture [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 200: 112078.
- [23] HAMIED A, BOUBIDI A, ROUIBAH N, et al. IoT-based smart photo-voltaic arrays for remote sensing and fault identification [C]. Smart Energy Empowerment in Smart and Resilient Cities: Renewable Energy for Smart and Sustainable Cities. Tipasa: Springer International Publishing, 2020: 478-486.
- [24] 李亚宁. 基于数据融合技术的电气火灾探测系统关键技术研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2022.
- LI Y N. Research on key technologies of electrical fire detection system based on data fusion technology [D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2022.
- [25] 王俊法, 胡伟, 王玮, 等. 电压电流能量信息融合的低压交流电弧故障检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(3) : 55-66.
- WANG J F, HU W, WANG W, et al. Low voltage AC arc fault detection based on energy information fusion of voltage and current [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38 (3) : 55-66.
- [26] GB/T 39750-2021 光伏发电系统直流电弧保护技术要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- GB/T 39750-2021 Technology requirements of DC arc-fault circuit protection for photovoltaic power system [S]. Beijing: China Standard Press, 2021.
- [27] 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 voltage method for arc fault detection in low voltage distribution networks [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(22) : 8674-8689.
- [28] 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, et al. Arc fault detection based on wavelet feature and deep learning [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(3) : 100-108.
- [29] 宿磊, 沈煜, 杨帆, 等. 融合CEEMDAN分解与敏感IMF精选的串联电弧故障检测 [J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(10) : 173-180.
- SU L, SHEN Y, YANG F, et al. Series arc fault detection combining CEEMDAN decomposition and sensitive IMF selection [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36 (10) : 173-180.

作者简介



武晋明, 2022 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: wujm2023@163.com



Wu Jiming received his B. Sc. degree from Shandong University of Technology in 2022. Now he is a M. Sc. Candidate at Shandong University of Technology. His main research interests include low voltage arc fault detection.

王玮(通信作者), 2007 年于山东大学获得硕士学位, 2024 年于山东理工大学获得博士学位, 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 (Corresponding author) received his M. Sc. degree from Shandong University in 2007, and Ph. D. degree from Shandong University of Technology in 2024. 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.