

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191474

组串式光伏系统直流串联电弧故障检测与保护策略

赵铁军¹, 孟菁¹, 宋岳奇², 谢小英¹, 张孟琛¹

(1. 国网冀北电力有限公司秦皇岛供电公司, 河北 秦皇岛 066004;

2. 燕山大学电力电子节能与传动控制河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 直流串联电弧是引发电压系统火灾事故的主要原因之一。针对直流电弧状态和故障问题, 提出一种基于逆变器实现的组串式光伏系统直流串联电弧故障检测与保护方法。依据电弧故障的高频特性, 以组串输入端滤波电容支路电流为量测获取串联电弧故障信号, 基于样本熵和标准差建立串联电弧检测算法并构建2级保护判据及重投方案, 保证故障处理的可靠性和灵敏性, 并满足逆变器对高频信号低采样率的制约。根据光伏并网逆变器的工作原理和结构组成, 提出实现电弧保护的逆变器硬件改造方案。搭建光伏系统电弧故障实验平台并开展实验研究。提出的方法能够实现可靠的检测与保护, 在多种情况下验证了所提方法的有效性。

关键词: 光伏系统; 直流电弧; 保护判据; 样本熵; 标准差

Series arc detection and protection on the DC side of string-type PVs

ZHAO Tiejun¹, MENG Jing¹, SONG Yueqi², XIE Xiaoying¹, ZHANG Mengchen¹

(1. Qinhuangdao Power Supply Company, State Grid Jibei Electric Power Company Limited, Qinhuangdao 066004, China;

2. Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei Province, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: A series arc occurring on the DC side of a PV is the preliminary indication of fire provoked from PVs. For DC arc status and fault problems, this paper contributes a DC series arc detection and protection scheme for string-type PVs implemented with a grid-connected inverter. The scheme employs a high frequency signal of the arc as the fault characteristic that is obtained from the filter capacitor in the PV string terminals of the inverter. The detecting algorithm is established according to the sample entropy and the standard deviation of the arc signal. 2-stage protection criteria and a reclosing strategy are proposed to improve reliability, and to satisfy the sample rate of the processor in the inverter. In line with the constitution of the circuit and operating principle of the inverters, a modification strategy is proposed to fulfill arc protection action. A platform is established for PV series arc testing. The proposed method can achieve reliable detection and protection, and the effectiveness of the method is verified for many cases.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51877186) and Science and Technology Project of State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd. (No. 5201041800N7).

Key words: PV generation; DC arc; protection criteria; sample entropy; standard deviation

0 引言

利用太阳能进行发电主要包括光热发电^[1-2]和光伏发电^[3-4]两种类型。近年来分布式光伏发电在配电网的渗透率显著提高, 其接入电网的运行管理^[5-6]、优化配置^[7-8]、保护^[9-10]及光伏逆变器的控制技术^[11-12]等均得到广泛关注。而针对光伏直流系统的关注则

很少, 文献[13-14]从光伏发电直流侧共模电压干扰及抑制问题开展研究; 文献[15]为提高逆变器运行效率和改善电能质量, 提出直流侧可变拓扑控制策略。分布式光伏电池组件通常散布在屋顶、山野、草场等地, 其直流线路分布杂乱且贴近易燃物, 如果发生电弧故障很容易引起火灾。光伏系统直流故障电弧主要由焊接点脱落、连接器松动和啮齿动物叮咬等情况引起^[16]。随着光伏安装规模的扩大, 由光伏系统直流故障电弧引起的火灾问题日益严重^[17-18]。为此, 美国国家电气规范(National Electrical Code,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51877186); 国网冀北电力有限公司科技项目(5201041800N7)

NEC)规定光伏系统需安装故障电弧断路器^[18]。

目前, 针对光伏系统直流电弧故障检测, 国内外学者进行了初步研究。文献[19]建立了光伏直流电弧模型。文献[20]基于多分辨率小波变换, 提取时频特征并制定混合判据。文献[21]利用小波包分析电弧特征并构建时频特征平面对光伏直流电弧进行检测。文献[22]采用 EEMD 分解和模糊熵相结合的方法对电弧故障特征进行提取, 最后利用 FCM 算法实现故障电弧检测。文献[13,23]也采用了基于小波变换的光伏直流电弧检测手段并应用支持向量机进行故障辨识。文献[24]进一步探讨了光伏直流电弧信号的微弱特征及其检测方法。

光伏直流系统可能发生并联电弧或串联电弧。串联电弧因与回路串联, 不会产生过电流, 保护断路器不易动作。串联电弧如不能及时检测和消除, 其持续存在很容易引发火灾事故。因此, 对光伏直流系统运行状态进行评估和预警^[25], 及时感知其可能存在的隐性故障, 对光伏系统的安全运行具有重要意义。上述文献主要通过小波变换或经验模态分解获取光伏直流电弧特征, 需要较复杂的信号处理算法和数百千赫的信号采样率, 对硬件要求高, 超出一般 DSP 的采样能力; 而且这些文献主要关注电弧检测的算法, 对保护策略的研究很少。本文提出一种基于并网逆变器的串联电弧检测方法和保护策略, 利用逆变器自身处理器的数据采集和分析处理能力, 通过检测逆变器组串端滤波电容支路的电流获取串联电弧故障信号, 采用样本熵和标准差表征故障信号的复杂程度和大小, 从而制定保护判据。实验验证了所提方法的有效性。

1 串联电弧故障下光伏并网系统特征分析

光伏并网系统典型电路如图 1 所示。一定数量的光伏电池板串联成组串接入并网逆变器, 并网逆变器包括 DC/DC 和 DC/AC 两个环节, 光伏输出功率经 DC/DC 和 DC/AC 接入交流电网。DC/DC 环节按 Boost 电路设计, 实现直流升压和最大功率跟踪 (MPPT); DC/AC 实现逆变和并网。 C 为直流母线电容; C_1 为光伏组串的滤波电容, 起平稳组串电压的作用, 通常取值为数百微法; L 为 Boost 升压电感, 在 20 kHz 开关频率下一般取值为 1~5 mH。控制电路通常以 DSP 为处理芯片, 检测和控制逆变器主电路实现光伏并网功能。控制电路按 MPPT 算法产生一定开关频率的脉宽信号, 控制 Boost 电路中 V 的通断, 从而将光伏组串可变的直流电压调制为恒定电压供给 DC/AC。

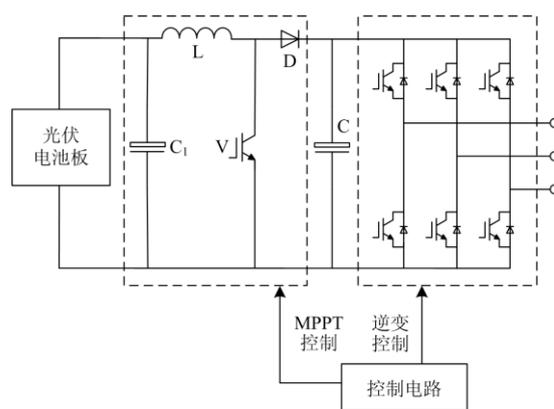


图 1 光伏并网逆变器的典型电路

Fig. 1 Typical circuit of PV grid-connected inverter

光伏系统正常运行时, 由于 Boost 电路的开关作用会在电感 L 上产生开关频率的纹波电流, 可用电流源特性等效, 纹波电流主要流经电容 C 。光伏直流侧发生串联电弧故障时, 根据文献[20]的实验分析, 直流电流中将伴随有大量高频成分。高频电弧电流也会经电容 C 形成回路, 对电容支路来说也相当于一个电流源。因而光伏直流侧发生串联电弧故障的高频等效电路可用图 2 表示, 其中 i_1 为电弧电流中的高频成分, i_2 为开关频率的纹波电流。

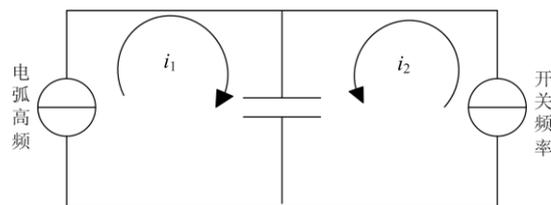


图 2 逆变器 PQ 控制框图

Fig. 2 Inverter PQ control block diagram

2 光伏串联电弧检测判据的构造

2.1 电弧检测方式

根据以上分析, 滤波电容在正常情况下仅流过纹波电流, 故障情况下则会叠加电弧高频电流。为了消除直流电流幅值变化对电弧检测的影响, 本文从滤波电容支路引出电流量测作为判别电弧故障的特征量。同时, 为不增加光伏并网系统的复杂性和成本, 本文方法兼用逆变器固有 DSP 承担电弧故障的检测和保护任务, 几乎不需额外增加硬件。DSP 实时采集滤波电容支路电流并按检测判据识别是否发生电弧故障, 当检测到电弧故障时, DSP 控制逆变器实施电弧保护操作, 及时切断电弧回路从而熄灭电弧。实施策略如图 3 所示。

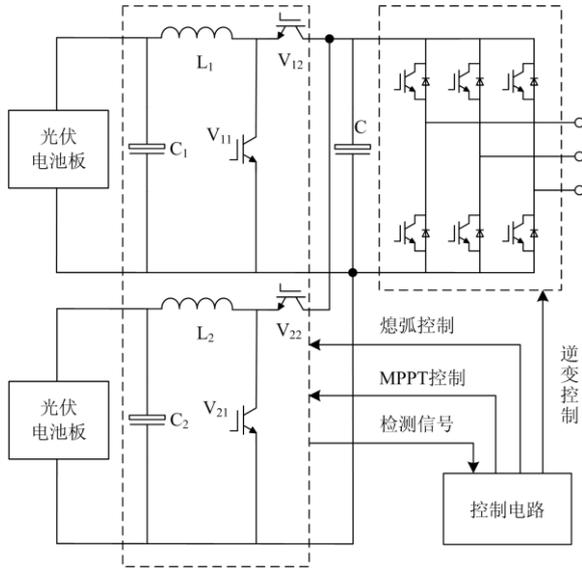


图3 基于逆变器的串联电弧检测和保护方案

Fig. 3 Inverter-based implementation of series arc detection and protection

电弧故障高频成分的典型频带为 50~100 kHz^[20], Boost 开关频率一般为 20 kHz。如对信号进行完全采样,需要很高的采样频率且数据分析计算量很大,逆变器 DSP 芯片难以满足需要。为实现逆变器低成本、实用化电弧检测,本文对高频故障信号波形进行低采样率抽样,并应用样本熵评价抽样序列的复杂程度,应用标准差反映抽样序列幅值大小,从而判断是否发生电弧故障。应用样本熵和标准差构造检测判据,不需要对信号进行复原,因而不需满足采样定理,采样率可大幅降低。

2.2 样本熵

信息熵^[26]是表征序列不确定性的度量概念,其值正比于信号复杂程度。样本熵作为信息熵的一种,是在近似熵基础上发展的一种新算法。由 N 个数据组成的时间序列 $\{x(n)\} = x(1), x(2), \dots, x(N)$, 其样本熵计算步骤如下^[27-28]:

(1) 按序号组成一组 m 维的向量序列, 这些向量代表从第 i 点开始的 m 个连续 x 值。

$$X_m(i) = \{x(i), x(i+1), \dots, x(i+m-1)\} \quad (1)$$

$$1 \leq i \leq N - m + 1$$

(2) 定义向量 $X_m(i)$ 与 $X_m(j)$ 之间的距离 d 为两者对应元素中最大差值的绝对值, 即

$$d[X_m(i), X_m(j)] = \max_{k=0, \dots, m-1} (|x(i+k) - x(j+k)|) \quad (2)$$

(3) 给定阈值 r , 统计 $X_m(i)$ 与 $X_m(j)$ 之间距离小于等于 r 的 j 数目, 并记作 B_i , 对于 $N - m \geq 1$, 定义

$$B_i^m(r) = \frac{1}{N - m - 1} B_i \quad (3)$$

(4) 定义 $B^{(m)}(r)$ 为

$$B^{(m)}(r) = \frac{1}{N - m} \sum_{i=1}^{N-m} B_i^m(r) \quad (4)$$

(5) 增加维数到 $m+1$, 重复步骤(1)到(4)。

$$B_i^{m+1}(r) = \frac{1}{N - m - 1} B_i \quad (5)$$

$$B_i^{m+1}(r) = \frac{1}{N - m} \sum_{i=1}^{N-m} B_i^{m+1}(r) \quad (6)$$

因而 $B^{(m)}(r)$ 是两个序列在相似容限 r 下匹配 m 个点的概率, $B^{(m+1)}(r)$ 是两个序列匹配 $m+1$ 个点的概率。当 N 为有限值时, 可以用式(7)计算样本熵。

$$SampEn(m, r, N) = -\ln \left[\frac{B^{m+1}(r)}{B^m(r)} \right] \quad (7)$$

样本熵的大小与参数 m 、 r 的取值有关, 文献表明取 $m=2$, $r=(0.1 \sim 0.25)SD$ 时, 样本熵对序列的依赖性最好, 具有合理的统计特性。其中 SD 为时间序列 $x(n)$ 的标准差。另外, 样本熵可以采用快速算法, 计算效率可极大提高^[29]。

2.3 电弧检测判据的构造

由样本熵算法可知, 样本熵反映序列中各数据相互分散程度。正常情况下电容支路主要流过开关纹波电流及光伏电池板的噪声信号, 纹波电流的频率为开关频率。如按开关频率的整数分频来选择信号抽样频率, 则会使纹波的抽样值近似相等, 则纹波信号的样本熵几乎为 0, 可极大削弱纹波的影响。另外, 熵值仅能反映序列的相互离散程度, 不能反映序列值的大小。因而本文用样本熵与抽样序列标准差的乘积反映串联故障电弧特征并称之为故障测度, 如式(8)所示。

$$C_r = SampEn_x * SD \quad (8)$$

构造的电弧故障检测判据为

$$C_r \geq \varepsilon \quad (9)$$

式中, ε 为整定阈值。

根据式(7), 计算样本熵的实质是用有限的样本数估计序列值的匹配概率。虽然样本熵的特性使其可用较短的序列得出较稳健的估计值, 但序列过短仍有不利。相反, 从电弧检测的时间局部性和计算量来说又不希望序列过长。本文结合常用 DSP 的性能, 按开关频率为 20 kHz 考虑, 选择信号抽样频率为 10 kHz, 序列长度 N 取 1 000 点, 对应时间为 0.1 s。样本熵中 r 的取值越小, 噪声对结果的影响越显著; r 取值越大, 时间序列的细节信息损失越多, 本文

取 $r = 0.2SD$ 。由于光伏组件在光照时半导体内部载流子浓度会有波动而产生白噪声, 为抑制白噪声影响, 还需对信号进行一定的阈值滤波。

检测判据式(9)的整定阈值应躲过逆变器启动及积云天气光照度快速变化, 引起组串电压变化而产生电容电流对电弧检测的影响。考虑到直流电弧在电流较大、燃弧稳定的情况下, 其高频成分反而会比较小。为提高电弧检测的灵敏度, 应降低判据的整定阈值; 但阈值过低又容易误判。为此, 本文对式(9)的判据设计 2 级整定阈值, 阈值 I 的整定低, 电弧检测灵敏度高; 阈值 II 的整定高, 检测灵敏度低但可防止误判。在保护策略中针对故障满足不同阈值条件采取了故障回路重投措施等, 详见下节。若电容 C 已知, 且通过实测或理论分析可得到受启动或照度影响组串电压的最大变化率, 可求得电容电流并可计算样本熵和标准差, 代入式(8), 其结果用 ε_0 表示。则判据的 2 级整定阈值分别按式(10)、式(11)生成。

$$\varepsilon_I = k_1 \varepsilon_0 \quad (10)$$

$$\varepsilon_{II} = k_2 \varepsilon_0 \quad (11)$$

式中, k_1 和 k_2 为可靠系数, 本文结合分析与实验数据, 取 $k_1 = 2.0$, $k_2 = 4.0$ 。

3 光伏直流串联电弧的逆变器保护策略

3.1 保护策略及功能实施

对串联电弧故障^[30-31]实施保护的有效手段是切断回路电流, 从而使电弧熄灭。根据图 1 所示光伏并网逆变器的工作原理, 对于具有单一直流组串的并网逆变器, 当检测到直流串联电弧故障时闭锁 DC/DC 和 DC/AC 触发脉冲, 即可切断光伏直流回路, 实现串联电弧故障保护。

考虑到组串式光伏并网逆变器直流母线通常有多组 Boost 电路共用一组 DC/AC, 如图 3 所示。这种情况下若仍采用闭锁逆变器交直流触发的方式实现保护, 会因一个光伏组串发生串联电弧故障而使整个逆变器停止工作, 影响其他组串的正常运行。因此对于具有多组串接入的光伏并网逆变器, 为缩小故障影响范围、实现组串间保护的独立性, 需对逆变器主电路进行改进。本文提出的改进策略是将图 1 中 Boost 电路的二级管 D 改为可控元件, 见图 3 中 V_{12} 和 V_{22} 。正常运行情况下 V_{12} 和 V_{22} 处于导通状态, 与二极管作用相同; 当检测到电弧故障时, 闭锁相应组串的 V_{11} 、 V_{12} 或 V_{21} 、 V_{22} 触发信号, 从而使故障组串回路关断、电弧熄灭, 其他组串的正常运行不受影响。

为实现逆变器的电弧检测与保护, 逆变器控制环节需在正常运行控制基础上, 增加电容电流采集、电弧检测、触发控制、闭锁控制、重投控制等功能^[32]。DSP 主控板实时采集各组串滤波电容支路的电流, 并依据式(9)一式(11)的检测判据判断是否发生电弧故障。无故障情况下触发控制模块按最大功率跟踪方式触发控制各组串的 Boost 电路。当主控板检测到某组串出现电弧故障时, 经闭锁控制模块发出闭锁信号阻断相应 Boost 单元, 从而切断组串回路的电流。

3.2 组串重投策略

为同时兼顾电弧检测的灵敏性和可靠性, 本文利用逆变器投退灵活的特点, 提出逆变器重投策略。

当判据满足式(11)所述的阈值 II 时, 则认为电弧故障确信发生, 控制器按上述策略闭锁故障组串并经声光、通信等给出告警。若判据仅满足式(10)所述的阈值 I, 则认为检测结果不足以可信, 需对组串实施重投以确认是否存在电弧故障。重投控制方案是在逆变器断开故障组串后, 延时 2~3 s 以保证电弧熄灭, 然后逆变器重新投入故障组串, 按启动条件检测组串电压是否达到启动的门槛电压。如组串电压未达到门槛电压, 表明组串回路确实存在断路故障点并且保护动作已将电弧熄灭。此情况下逆变器闭锁故障组串并给出告警。若组串电压可达到启动门槛电压, 则一种可能是系统出现误判; 另一种可能是回路存在虚接。此情况下由于组串电压能够达到门槛电压, 逆变器可重新启动该组串。为检测是否存在虚接, 可在重启组串后控制 Boost 电路使组串电流从 0 缓慢增大至最大功率跟踪状态。若回路存在虚接, 则电流缓慢增大过程中会逐渐形成放电电弧, 其中含有丰富的高频成分, 检测判据很容易满足阈值 II 的条件。因此在组串电流缓慢增大过程中可按阈值 II 的条件检测电弧, 若判据满足阈值 II 条件则确认组串存在虚接并导致电弧重燃, 则逆变器闭锁故障组串并给出告警; 若不满足阈值 II 条件则表明组串重投成功, 系统继续运行。保护与重投过程各环节的逻辑关系如图 4 所示。

由本文电弧检测原理可知, 组串重投过程中电流的缓慢增大在滤波电容上会产生一定干扰, 给检测算法带来附加误差。为消除这种误差, 可控制组串电流按阶梯规律递增, 并截取每个阶梯平稳阶段的数据序列用于检测算法, 如图 5 所示。如前述, 本文检测判据使用的数据长度为 0.1 s, 因而可取阶梯的持续时间为 0.15 s, 从而有效避开电容暂态阶段的影响。每个阶梯的电流增量可取 0.3 A 左右, 以控制组串的放电起弧电流, 提高检测效果。

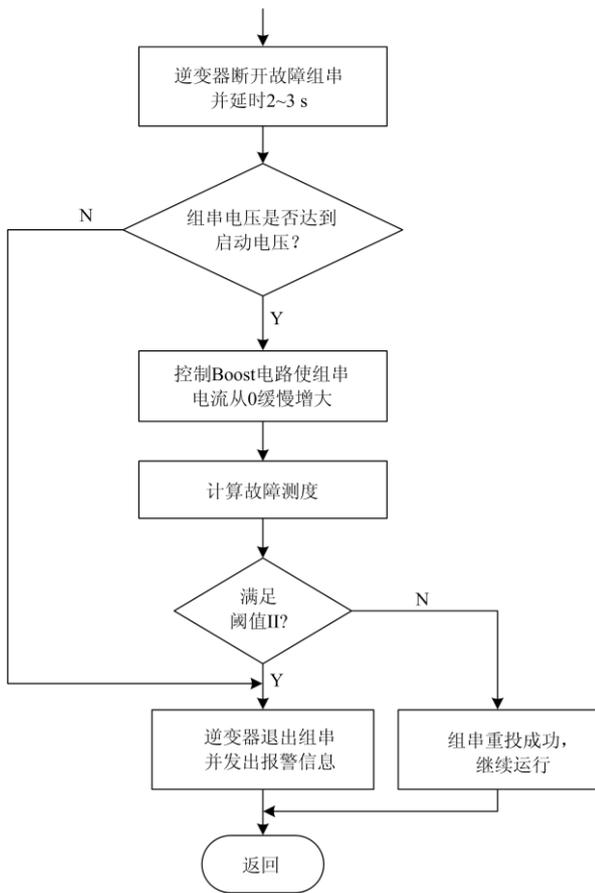


图4 保护重投过程的逻辑关系

Fig. 4 Logic of protection reclosing process

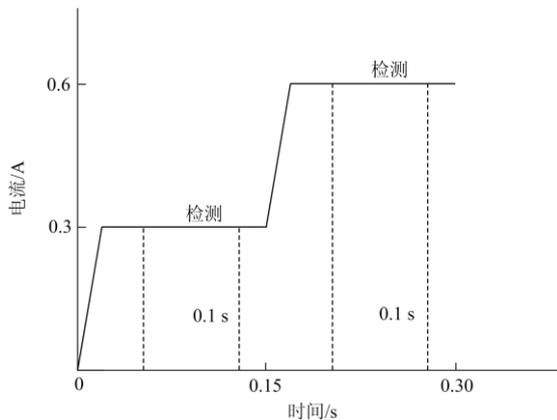


图5 组串重投中电流阶梯增量示意图

Fig. 5 Diagram of current increment during reclosing

3.3 检测与保护方法的实施步骤

综上所述,提出的串联电弧检测与保护方法具体实施步骤包括:

- (1) 按 10 kHz 的采样频率采集各组串滤波电容支路电流信号,连续采集 1 000 点作为分析数据。
- (2) 对分析信号计算样本熵和标准差,并按式(8)

得到相应的故障测度值。

(3) 判断故障测度是否满足阈值 I,若满足则进行步骤(4),不满足则返回步骤(1)继续采集数据并监测电弧故障。

(4) 判断是否满足阈值 II,若满足则逆变器退出组串并发出报警信息;不满足则进行步骤(5)。

(5) 延时 2~3 s 后判断组串接入端电压是否满足启动门槛电压,若不满足则发出报警信息;若满足则进行步骤(6)。

(6) 控制故障组串的 Boost 电路使故障组串重投并使组串电流阶梯增加,每增加一个阶梯均采集 1 000 点电流数据并计算故障测度,判断是否满足阈值 II,满足则退出组串并发出报警信息;不满足则继续增大电流并判断,直至达到 MPPT 状态,表明重投成功。

(7) 重复步骤(1)~(6),实时监视电弧故障。

提出的检测与保护方法实现流程如图 6 所示。

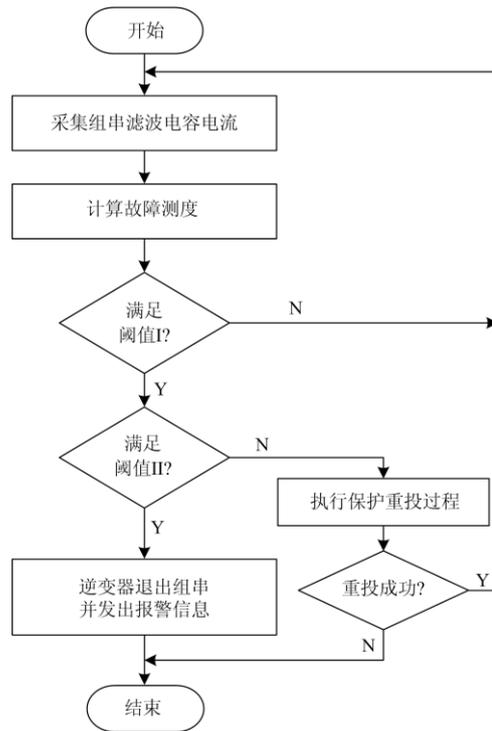


图6 串联电弧检测与保护策略流程图

Fig. 6 Flow chart of series arc detection and protection

4 实验平台搭建与实验数据分析

4.1 实验平台

基于实验室实际运行的 12 kW 光伏并网发电系统搭建了如图 7 所示的实验平台,由光伏电池板、并网逆变器、直流断路器、电弧发生器及数据采集设备组成。光伏电池板的参数如表 1 所示。

表 1 光伏组件主要参数

Table 1 Main parameters of PV modules

参数	数值	
	光伏组件 (多晶硅)	二个组串 (32 个组件)
峰值功率/W	255	8 160
峰值电压/V	30	480
峰值电流/A	8.49	16.98
开路电压/V	37.7	603.2
短路电流/A	9.014	18.028

实验中选用 2 个光伏组串并联接入逆变器同一个 DC/DC 单元, 每个组串包含 16 个光伏组件, 组串容量为 4 kW; 组串滤波电容 $C=470 \mu\text{F}$ 。将电弧发生器分别接入图 7 中 A 和 B 位置, 模拟光伏系统直流侧主支路或分支路串联电弧。电弧发生器包括固定端和滑动端, 两端各固定一根铜棒, 通过控制滑动端移动, 在两铜电极之间产生电弧。采用霍尔电流传感器测量电流。为了方便观察和对比, 将光伏组串直流回路及逆变器滤波电容端均安装霍尔电流传感器, 对直流侧和电容支路的电流均进行采集。本实验平台中并网逆变器采用工业产品, 由于其软硬件复杂, 本文的检测与保护算法尚未在逆变器中实现, 而是应用工控机和 PCI 数据采集卡对信号进行检测与分析。设置 PCI 数据采集卡的采样频率为 10 kHz。图 8 为实验平台实物图。

4.2 实验结果与数据分析

4.2.1 正常状态与电弧状态的信号分析

分别对正常情况和电弧故障情况进行实验。将电弧间隙调整为 1.5 cm, 测得正常与电弧情况下组串直流回路的电流分别为 9.3 A 和 6.1 A, 同时测得两种情况下电容支路的电流, 其波形如图 9 所示。

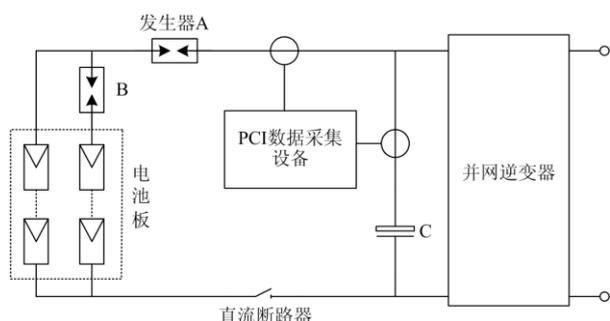


图 7 光伏系统直流电弧实验平台

Fig. 7 DC arc experiment platform for PVs



图 8 串联电弧检测与保护策略流程图

Fig. 8 Flow chart of series arc detection and protection

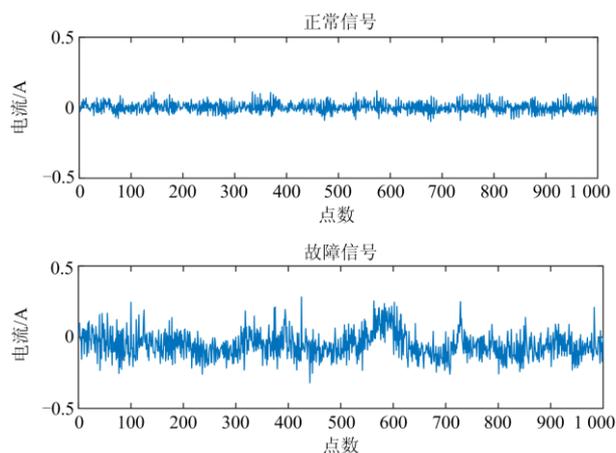


图 9 正常与电弧故障情况下电容电流波形

Fig. 9 Capacitor current waveform under normal and arc circumstances

为抑制光伏板噪声的影响, 取滤波阈值 $\delta=0.2$, 对信号进行阈值滤波并分别计算正常信号和电弧信号的样本熵、标准差及故障测度, 结果如表 2 所示。可见电弧信号的故障测度值远大于正常信号, 二者相差 2 个数量级, 本文检测方法可以有效检测电弧故障。

表 2 正常信号和电弧信号的分析结果

Table 2 Analysis of normal and arc signals

类别	数值		
	SD	SampEn	CR
正常状态	0.014	0.008	1.04×10^{-4}
故障状态	0.103	0.123	1.27×10^{-2}

设组串受启动或积云影响电压按 100 t 的最大速率变化, 则电容电流将会产生幅度为 0.047 A 的正负阶跃。以该信号为参考阈值, 可求得 $\varepsilon_0=9.30 \times 10^{-4}$ 。取 $k_1=2.0$, $k_2=4.0$, 根据式(10)、式(11), 有 $\varepsilon_1=1.86 \times 10^{-3}$, $\varepsilon_{II}=3.72 \times 10^{-3}$ 。

4.2.2 不同工况的实验结果

(1) 全天多时段实验

利用实验平台采集了晴转多云天气条件下全天不同时刻正常和电弧状态的电流信号, 分析计算两种状态下的故障测度。实验时间为 8:30—17:00, 天气为晴转多云, 气温为 20~29 °C, 每半小时采集一组正常和故障信号, 共 18 组数据。图 10 为不同时段正常及电弧状态的故障测度值。

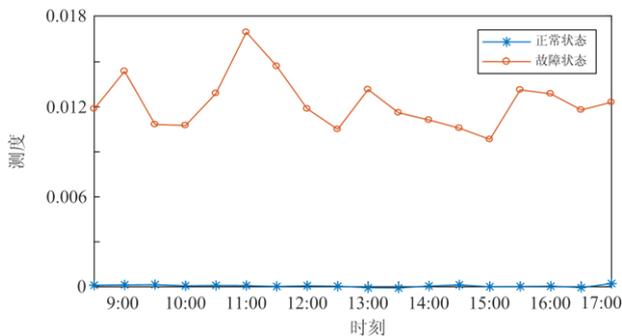


图 10 全天多时段光伏电弧故障测度值

Fig. 10 Fault measurements of arc in multi-time of a day

由图 10 可见各时段下正常状态与电弧状态的信号故障测度区分明显, 能够有效识别电弧故障, 所有电弧状态下的故障测度值均满足阈值 ε_{II} 。

(2) 其他影响因素的实验结果

进一步选择合适天气条件开展实验, 对积云快速变化、逆变器启动等信号进行捕捉, 并对分路组串发生电弧以及不同电弧间隙进行实验。各种情况的实验结果见表 3。

表 3 不同工况的实验结果

Table 3 Experimental results of different conditions

类型	数值		
	SD	SampEn	CR
积云快速变化	0.028	0.019	5.32×10^{-4}
逆变器启动	0.037	0.023	8.51×10^{-4}
支路组串发生电弧	0.102	0.093	9.49×10^{-3}
不同电弧间隙(0.5 cm)	0.091	0.076	6.92×10^{-3}

分析表中数据可知, 积云快速变化及逆变器启动过程对应的测度值均远低于阈值, 能够与电弧故障明显分开, 不会造成误判; 支路发生串联电弧情

况下故障测度值明显超过阈值, 能够实现有效检测; 电弧间隙变小使电弧稳定性提高, 故障测度降低, 但仍足以满足判据。故本文判据的准确性和可靠性均有保障。

4.2.3 组串重投策略的模拟测试

将实验系统中的电弧发生器置于可振动平台, 调节电弧发生器两触头使之刚好接触, 模拟组串回路出现虚接的情况。先将组串电流调至 10 A 附近, 然后振动电弧发生器使触点产生间隙微变, 采集滤波电容支路电流并按检测算法计算故障测度值。由于回路电流较大, 振动过程中间隙的微变引起电弧高频特征不明显。采集多组振动过程中的数据并计算得故障测度值在 $8.13 \times 10^{-4} \sim 2.84 \times 10^{-3}$ 范围, 因而会启动阈值 I 的动作但不能满足阈值 II。根据本文建立的保护策略, 逆变器应断开组串并进行重投控制。为模拟重投过程, 将组串电流调至 0.3 A, 并按类似的强度振动电弧发生器, 测得电流处于断续状态, 不能形成电弧, 电容电流微弱, 故障测度值非常小。进一步增大组串电流至 1 A 左右, 则在振动过程中电流呈现较明显的放电电弧, 其中高频特征明显。采集多组振动过程的电流数据并计算故障测度值在 $1.59 \times 10^{-3} \sim 1.03 \times 10^{-2}$ 范围, 可以启动阈值 II 的判据, 表明本文重投方案可行。

5 结论

本文针对组串式光伏直流串联电弧故障提出一种基于逆变器的实用检测判据与保护策略。通过检测逆变器组串输入端滤波电容支路电流获取串联电弧故障信号, 使之不受直流成分的影响, 突出体现了串联电弧特征, 有利于故障检测。结合光伏并网逆变器的构成特点, 提出基于逆变器的电弧保护策略及其硬件实现方案, 只需在原有逆变器基础上进行少量硬件调整即可实现串联电弧保护功能。提出一种基于样本熵和标准差电弧信号检测方法并构建了 2 级保护判据及重投方案, 可有效利用电弧高频特性实现可靠的检测与保护, 并可适应逆变器对高频信号的采样率制约。多种情况下的实验研究验证了本文方法的有效性。

参考文献

[1] 刘新元, 何彩虹, 程雪婷, 等. 考虑源荷协调的含储热光热电站与风电系统日前-日内调度策略[J/OL]. 中国电力: 1-13[2020-09-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20200921.1349.009.html>.
LIU Xinyuan, HE Caihong, CHENG Xueting, et al.

- Day-ahead and intra-day scheduling strategy of concentrated solar power station with thermal energy storage and wind farm considering coordination between generation and load[J/OL]. *Electric Power*: 1-13 [2020-09-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20200921.1349.009.html>.
- [2] 石硕, 庄晓如, 徐心海. 太阳能吸热器内超临界二氧化碳对流换热特性数值研究[J]. *热力发电*, 2020, 49(10): 87-92.
SHI Shuo, ZHUANG Xiaoru, XU Xinhai. Numerical simulation of convection heat transfer characteristics of supercritical carbon dioxide in a concentrating solar power receiver[J]. *Thermal Power Generation*, 2020, 49(10): 87-92.
- [3] 牛瑞杰, 郭俊文, 李晓博, 等. 风光储联合发电系统储能控制策略[J]. *热力发电*, 2020, 49(8): 150-155.
NIU Ruijie, GUO Junwen, LI Xiaobo, et al. Energy storage control strategy of wind-photovoltaic-storage hybrid system[J]. *Thermal Power Generation*, 2020, 49(8): 150-155.
- [4] 蒋璩, 许鸣珠, 周雅娣. 城市水光互补分布式能源的优化配置研究[J]. *华电技术*, 2020, 42(2): 58-62, 75.
JIANG Li, XU Mingzhu, ZHOU Yadi. Optimal configuration of hydro-solar complementary distributed power systems in cities[J]. *Huadian Technology*, 2020, 42(2): 58-62, 75.
- [5] 张金平, 汪宁渤, 黄蓉, 等. 高渗透率光伏参与电力系统调频研究综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(15): 179-186.
ZHANG Jinping, WANG Ningbo, HUANG Rong, et al. Review on high permeability photovoltaic (PV) participation in power system frequency modulation[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(15): 179-186.
- [6] 张举良, 高志强, 董全智, 等. 光伏发电直流侧共模电压干扰的抑制研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(14): 102-108.
ZHANG Juliang, GAO Zhiqiang, DONG Quanzhi, et al. Study on the suppression of common mode voltage interference in photovoltaic power generation[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(14): 102-108.
- [7] 陈沛华, 赵会茹, 李娜娜. 分布式光伏电源并网影响与应对措施[J]. *电气技术*, 2015(1): 125-127
CHEN Peihua, ZHAO Huiru, LI Nana. Influence and countermeasures of grid connection of distributed photovoltaic power supply[J]. *Electrical Engineering*, 2015(1): 125-127.
- [8] 孙旻, 余愿, 曾伟, 等. 考虑主动管理的配电网分布式光伏并行优化配置[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(3): 169-174, 181.
SUN Min, YU Yuan, ZENG Wei, et al. Parallel optimal configuration of distributed photovoltaic power distribution network under active management[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(3): 169-174, 181.
- [9] LIU Y, MELIPOULOS A P, SUN L, et al. Protection and control of microgrids using dynamic state estimation[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2018, 3(4): 340-352. DOI: 10.1186/s41601-018-0104-2.
- [10] 李文才, 彭程. 分布式光伏电源并入配电网的故障分析及保护研究[J]. *机电工程技术*, 2019, 48(6): 186-188.
LI Wencai, PENG Cheng. Study on fault analysis and protection of distributed photovoltaic power supply integrated into distribution network[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2019, 48(6): 186-188.
- [11] 高鹏程, 王蕾, 李立生, 等. 基于光伏逆变器调节的配电网电压控制策略[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(4): 190-196.
GAO Pengcheng, WANG Lei, LI Lisheng, et al. Voltage control strategy of distribution network based on PV inverter regulation[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(4): 190-196.
- [12] 唐巍, 蔡永翔, 李天锐, 等. 低压配电网消纳分布式光伏的控制策略及性能分析[J]. *分布式能源*, 2018, 3(6): 1-12.
TANG Wei, CAI Yongxiang, LI Tianrui, et al. Control strategy and performance analysis of DPV absorption in low voltage distribution network[J]. *Distributed Energy*, 2018, 3(6): 1-12.
- [13] WANG Z, BALOG R S. Arc fault and flash detection in DC photovoltaic arrays using wavelets[C] // 2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), June 16-21, 2013, Tampa, FL, USA: 1619-1624.
- [14] 刘艳丽, 郭凤仪, 王智勇, 等. 基于信息熵的串联型故障电弧频谱特征研究[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(12): 488-495.
LIU Yanli, GUO Fengyi, WANG Zhiyong, et al. Research on the spectral characteristics of series arc fault based on information entropy[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(12): 488-495.
- [15] 薛世伟, 贾清泉, 苏亚超, 等. 组串式光伏发电系统直流侧可变拓扑及多目标控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(7): 1968-1976.
XUE Shiwei, JIA Qingquan, SU Yachao, et al. Variable topology and multi-objective control strategy on DC side of group series photovoltaic power generation system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(7): 1968-1976.
- [16] STROBL C, MECKLER P. Arc faults in photovoltaic systems[C] // 2010 Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts (HOLM), 2010: 1-7.
- [17] 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] // 2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), June 8-13, 2014, Denver, CO, USA: 3188-3192.

[18] JOHNSON J, PAHL B, LUEBKE C, et al. Photovoltaic DC arc fault detector testing at Sandia national laboratories[C] // 2011 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, June 19-24, 2011, Seattle, WA, USA.

[19] WEERASEKARA M, VILATHGAMUWA M, MISHRA Y. Modelling of DC arcs for photovoltaic system faults[C] // 2016 IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference (SPEC), December 5-8, 2016, Auckland, New Zealand: 1-4.

[20] 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, 5405.
MU Longhua, WANG Yijian, JIANG Wei, et al. Study on DC arc fault characteristics and detection methods of photovoltaic system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5236-5244, 5405.

[21] 吴春华, 徐文新, 李智华, 等. 光伏系统直流侧故障电弧类型辨识及电路保护[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 5028-5036, 5222.
WU Chunhua, XU Wenxin, LI Zhihua, et al. Arc fault type identification and circuit protection in photovoltaic system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 5028-5036, 5222.

[22] 吴春华, 徐文新, 李智华, 等. 光伏系统直流电弧故障检测方法及其抗干扰研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(12): 3546-3555, 14.
WU Chunhua, XU Wenxin, LI Zhihua, et al. Study on detection method and its anti-interference of DC arc fault for photovoltaic system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(12): 3546-3555, 14.

[23] WANG Z, BALOG R S. Arc fault and flash detection in photovoltaic systems using wavelet transform and support vector machines[C] // 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), June 5-10, 2016, Portland, OR, USA: 3275-3280.

[24] 吴春华, 黄宵宵, 李智华, 等. 光伏系统直流微弱电弧信号检测研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(20): 6025-6033, 6183.
WU Chunhua, HUANG Xiaoxiao, LI Zhihua, et al. Study on dc weak arc signal detection in photovoltaic system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(20): 6025-6033, 6183.

[25] 胡杰, 唐静, 谢仕义, 等. 基于大数据技术的电厂设备状态评估和预警应用研究[J]. 华电技术, 2020, 42(2): 1-6, 11.
HU Jie, TANG Jing, XIE Shiyi, et al. State assessment and early warning application for power plant equipment based on big data technology[J]. Huadian Technology, 2020, 42(2): 1-6, 11.

[26] 翟峰, 冯云, 程凯, 等. 基于信息熵的多源电力物联终端设备信任度评价方法[J/OL]. 中国电力: 1-7[2020-09-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20200924.1908.004.html>.

ZHAI Feng, FENG Yun, CHENG Kai, et al. Information entropy-based multi-source power IoT terminal equipment trust degree evaluation method[J/OL]. Electric Power: 1-7[2020-09-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20200924.1908.004.html>.

[27] 刘艳丽, 郭凤仪, 李磊, 等. 一种串联型故障电弧数学模型[J]. 电工技术学报, 2019, 34(14): 2901-2912.
LIU Yanli, GUO Fengyi, LI Lei, et al. A series fault arc mathematical model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(14): 2901-2912.

[28] 陈云龙, 殷豪, 孟安波, 等. 基于模糊信息粒化的光伏出力区间预测[J]. 电测与仪表, 2018, 55(14): 63-68.
CHEN Yunlong, YIN Hao, MENG Anbo, et al. Photovoltaic output interval prediction based on fuzzy information granulation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(14): 63-68.

[29] 杨茂, 张罗宾. 基于数据驱动的超短期风电功率预测综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 171-186.
YANG Mao, ZHANG Luobin. Summary of super short term wind power prediction based on data drive[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 171-186.

[30] 王先发, 顾卫祥. 光伏系统直流侧故障电弧的检测与判别[J]. 电气技术, 2019, 20(5): 10-13.
WANG Xianfa, GU Weixiang. Detection and discrimination of DC fault arc in photovoltaic system[J]. Electrical Engineering, 2019, 20(5): 10-13.

[31] 张冠英, 张晓亮, 刘华, 等. 低压系统串联故障电弧在线检测方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(8): 109-115.
ZHANG Guanying, ZHANG Xiaoliang, LIU Hua, et al. Online detection method for series fault arc of low-voltage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(8): 109-115.

[32] 吴春华, 闫俊驰, 李智华. 光伏系统故障电弧检测技术综述[J]. 电源技术, 2014, 38(9): 1768-1770, 1776.
WU Chunhua, YAN Junchi, LI Zhihua. Summary of fault arc detection technology in photovoltaic system[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2014, 38(9): 1768-1770, 1776.

收稿日期: 2019-11-26; 修回日期: 2019-12-29

作者简介:

赵铁军(1976—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: qhdzhaotj@sina.com

孟菁(1989—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统及其自动化和新能源技术等; E-mail: qhdmengi@126.com

宋岳奇(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源配电网分析与控制。E-mail: 1099551323@qq.com

(编辑 张爱琴)