

光伏系统电弧保护 (AFCI) 解决方案白皮书





前 言

在全球范围内，能源危机、气候变化与碳中和目标的紧迫感推动了新一轮能源革命。各国依托“3060目标”（2030年碳达峰，2060年碳中和）制定了新能源战略，光伏发电作为清洁、高效、易于部署且技术成熟的能源形式迅速崛起，成为新能源发展的主力。根据国际能源署（IEA）的预测，到2050年，全球75%的能源消耗将来自清洁能源，而光伏发电占比将超过30%。

光伏行业的快速发展无疑加速了能源转型的步伐，但同时也对光伏系统的安全性提出了新挑战。其中，光伏系统的直流电弧问题成为影响系统稳定运行的关键技术难题



针对直流电弧问题的复杂性和紧迫性,本白皮书的编制旨在全面梳理并介绍光伏直流电弧检测与保护技术的现状、发展趋势以及实践解决方案,其目标在于推动行业广泛认知,促进技术进步,为光伏产业的高质量发展提供专业支撑。

本白皮书还进一步阐述了直流电弧检测与保护技术在实现光伏电站长期可靠运行和保障系统整体安全性中的重要作用,并助力推动行业标准体系的建立,为未来光伏产业的可持续和规范化发展提供支持。在“双碳”目标下,这不仅是提高光伏发电系统技术水准的必然要求,也是支撑全球绿色能源发展的一项基础性保障。白皮书的发布将为全行业的光伏开发和安全运行提供指导,同时为实现安全、可靠、高效的清洁能源发展奠定技术基础,对中国乃至全球能源绿色转型具有重要意义。

目 录

01

第一章 04

光伏发电行业现状与趋势

- 1.1 能源危机，光伏渗透率趋高，直流高压危险与电弧危害
- 1.2 不同光伏发电场景下的直流电弧风险剖析
- 1.3 不同国家和地区法规对光伏直流电弧故障保护和快速关断的要求综述

02

第二章 09

光伏直流电弧检测保护技术原理与丰郅解决方案

- 2.1 光伏直流电弧检测和保护技术原理
- 2.2 传统光伏直流电弧故障保护解决方案
- 2.3 丰郅解决方案和技术优势

03

第三章 13

不同关断和光伏直流电弧故障保护方案的适用性和经济性

- 3.1 老旧电站改造场景
- 3.2 常规新建光伏电站场景
- 3.3 高安全要求的光伏电站场景

04

第四章 17

丰郅光伏直流电弧故障保护解决方案技术验证

- 4.1 方案1 电弧检测模块AFD方案与实证，TÜV莱茵全程见证
- 4.2 方案2 外挂式组串光伏直流电弧故障保护方案与实证，TÜV莱茵全程见证
- 4.3 方案3 组件级别光伏直流电弧故障保护方案与实证，TÜV莱茵全程见证

05

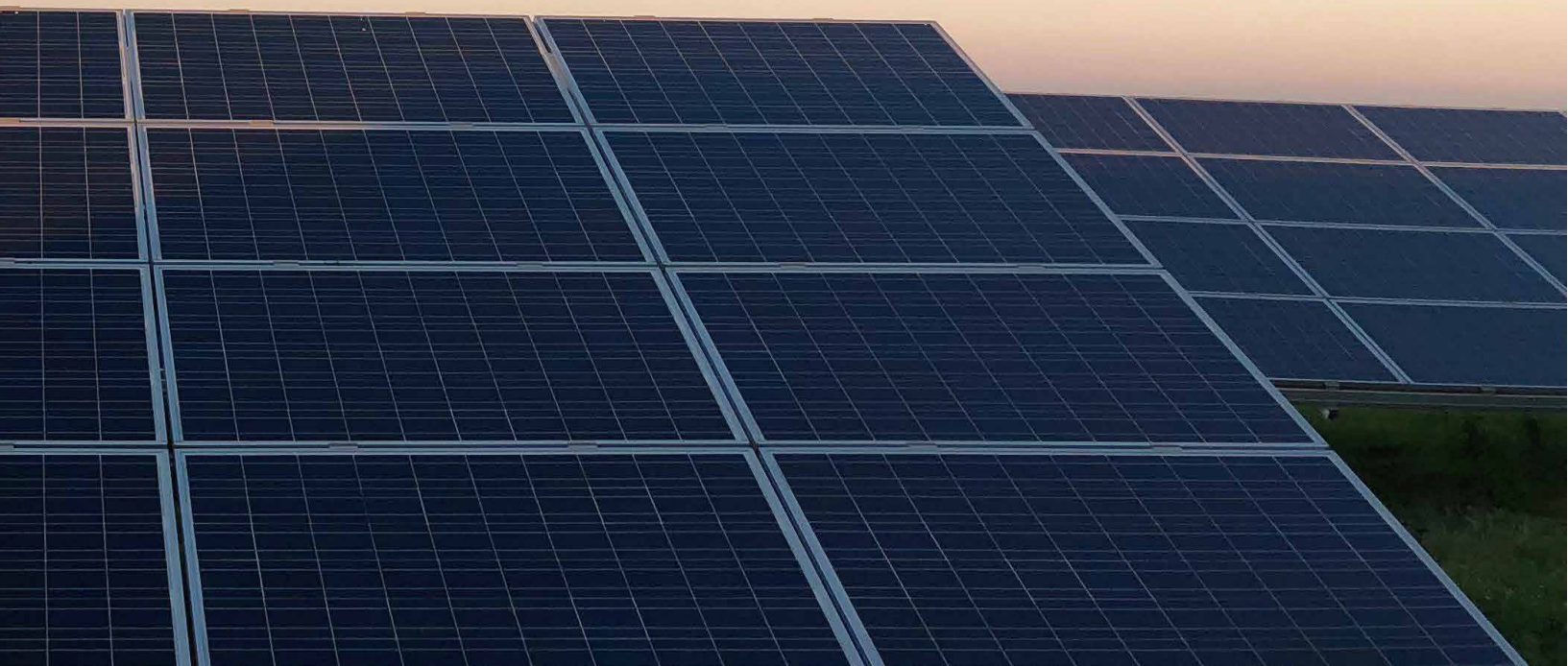
第五章 22

总结与展望

01

光伏发电行业现状与趋势

—



1.1 能源危机, 光伏渗透率趋高, 直流高压危险与电弧危害

在“双碳”目标的有力驱动下, 全球能源结构向低碳转型的进程持续加速, 光伏发电作为清洁能源的中流砥柱, 正迎来前所未有的爆发式增长。近年来, 全球光伏装机容量呈现出稳步攀升的态势。据统计, 2024 年全球光伏市场新增装机容量高达 495GW, 同比增长 14%, 且在未来五年内, 全球光伏新增装机容量的年均增长率预计将继续保持在 20% 以上。在地区分布上, 欧盟在 2024 年新增光伏装机容量 66GW, 成为当地发电量增长最为迅猛的能源领域, 较 2023 年增长了 22%。而中国作为全球光伏产业链的领军者, 其光伏产业的发展更是势不可挡, 不仅在生产端占据主导地位, 在应用端同样遥遥领先。2024 年, 中国新增光伏装机容量约 277GW, 占全球新增装机总量的半数以上, 集中式和分布式光伏齐头并进, 共同推动着中国光伏产业的蓬勃发展。

然而, 光伏装机规模的快速扩张也带来了一系列安全挑战, 尤其是直流电弧问题, 正日益突出。与交流系统不同, 光伏直流系统因采用高压直流结构, 具备非零穿越特性, 即电弧一旦形成, 难以自然熄灭。在接线松动、设备老化、施工不当或绝缘故障等情况下, 直流电弧故障极易发生。一旦电弧故障出现, 可能引发持续局部高温, 严重时甚至导致火灾。更为棘手的是, 直流电弧往往隐蔽性强, 传统的保险装置难以及时检测与阻断, 给光伏系统的能效提升和运维安全带来了巨大的挑战。

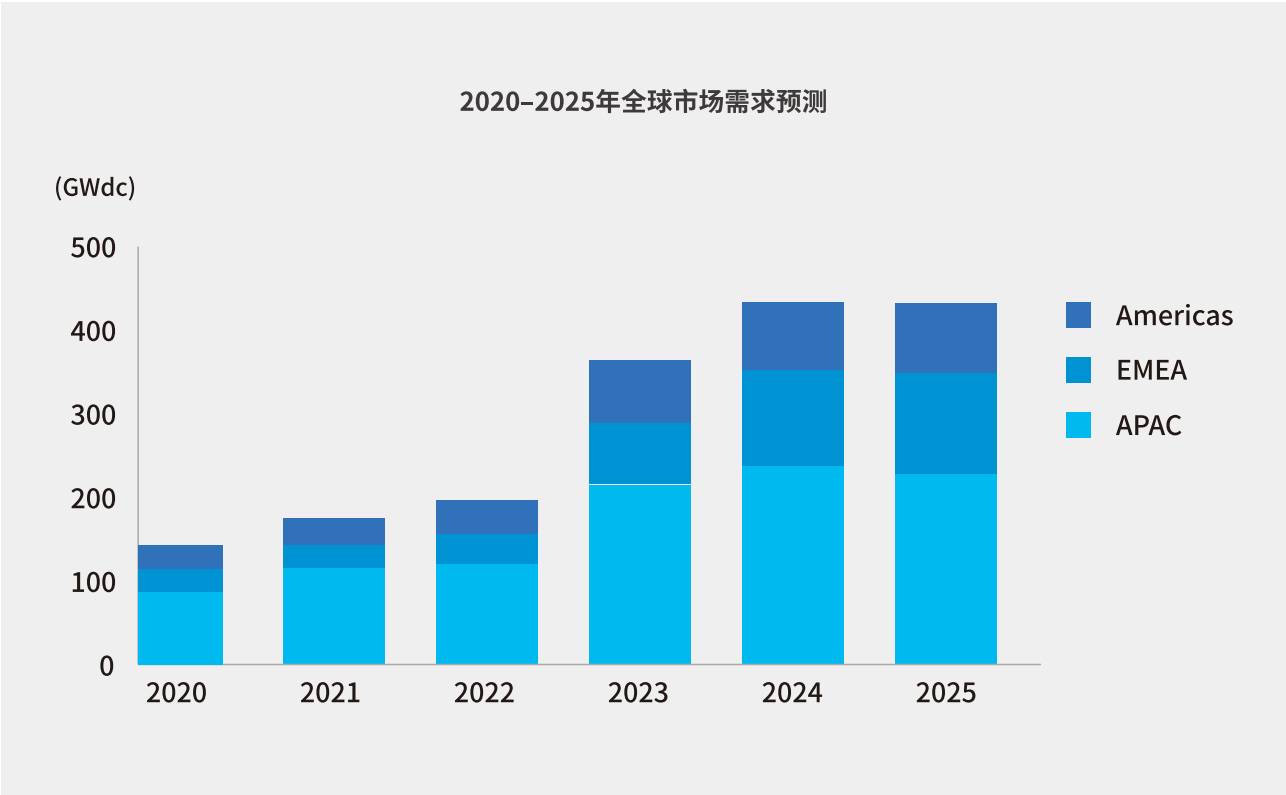


图1:2020-2025年全球市场需求预测 图表来源:Wood Mackenzie

1.2 不同光伏发电场景下的直流电弧风险剖析

光伏电站的应用场景丰富多样,不同类型的光伏系统在安装形式、环境条件和运行规模上存在差异,这使得它们在直流电弧检测与保护方面面临着各自独特的挑战。

在户用光伏场景中,系统容量相对较小,但设备节点分散,布线隐蔽,且通常安装在靠近建筑物或可燃材料的屋顶位置,因此电弧引发火灾的风险更为突出。2022 年,中国国内某省发生了一起户用光伏系统因连接器老化导致接触不良,最终引发电弧并造成屋顶火灾的典型事故,现场损失惨重。此类事件无疑为行业敲响了警钟,凸显了户用光伏系统对相关技术保护的迫切需求。

组串式逆变器的 DC 侧由光伏方阵、桥架和逆变器组成。串联电弧可在回路的任意位置发生,而并联电弧则主要出现在桥架内。一旦并联电弧发生,因其难以熄灭的特性,往往需要额外的保护设备来应对。



图2:光伏火灾现场实景照片

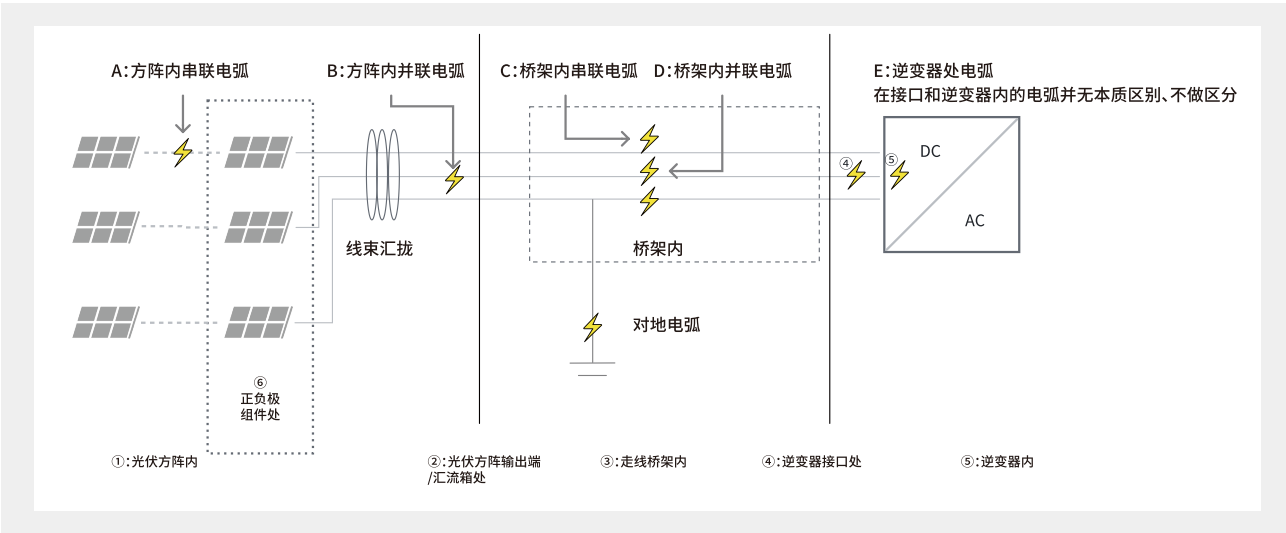


图3:组串式逆变器应用场景

工商业光伏场景则因其装机规模更大、机组数量更多，直流侧布线复杂，且通常集中铺设在厂房屋顶等区域，用电波动大、线缆长距离敷设，使得电弧隐患更为突出。例如，某工业光伏电站在运行过程中，因输电线路故障发生电弧扩展并波及其他系统，导致当地生产中断数小时，经济损失难以估量。

大型地面电站则因其系统规模巨大，单回路直流电缆长度可达数十公里，接线复杂，运行环境恶劣，对电弧检测和快速响应能力的要求更为苛刻。在偏远的高寒或高温地区，长期的环境应力作用下，关键器件的绝缘性能更容易下降，从而诱发电弧。例如，某西部地区大型光伏电站在运行初期，因终端组件尾线故障产生电弧，最终导致线路中断长达 8 小时，对整体发电量造成了严重的不利影响。

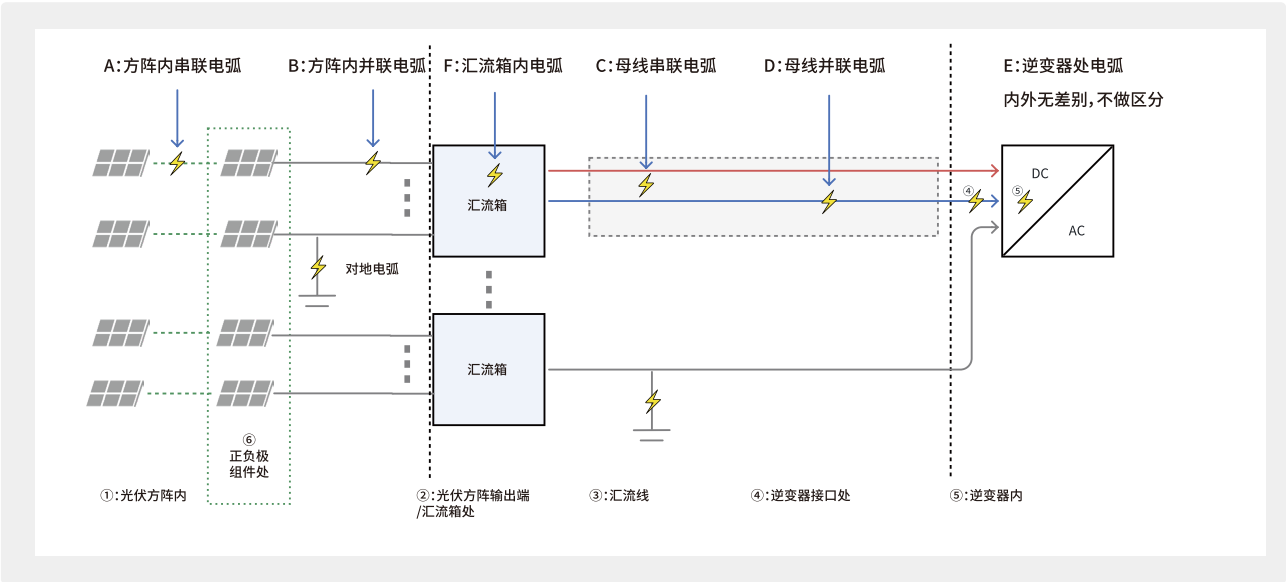


图4:集中式逆变器应用场景

集中式逆变器的 DC 侧包括光伏方阵、汇流箱、汇流后母线和逆变器。在大电流场景下，汇流前后电流差异较大，这对电弧检测提出了更高的要求，建议采用分开检测的方式。

通过对上述不同场景的分析，我们可以清晰地看到，直流电弧问题是户用、工商业以及集中式光伏应用场景共同面临的重大风险。然而，其具体表现形式和引发的后果在不同场景中呈现出显著的差异化特征。因此，为每一类光伏场景量身定制更具针对性的技术方案，已成为当前行业攻克这一难题的关键所在

1.3 不同国家和地区法规对光伏直流电弧故障保护和快速关断的要求综述

伴随着全球光伏发电项目规模化推进，直流电弧问题不再只是行业关注，更成为光伏设计、运行和监管中的强制规范内容。国际上，先进国家和地区已陆续出台多项法规和标准，对光伏系统安全性提出了明确要求。

美国是对光伏直流电弧故障保护应用的先行者。根据美国国家电气规范 (NEC 2023, Article 690.11), 依附于建筑上或建筑内的所有超过80V直流的光伏发电系统必须安装光伏直流电弧故障保护设备, 要求其能够可靠检测和切断直流电弧。美国UL 1699B标准为光伏直流电弧故障保护性能制定了具体技术指标, 要求在2.5秒内, 750焦耳能量之内前端电弧。

690.11 Arc-Fault Circuit Protection (dc). Photovoltaic systems with PV system dc circuits operating at 80 volts dc or greater between any two conductors shall be protected by a listed PV arc-fault circuit interrupter or other system components listed to provide equivalent protection. The system shall detect and interrupt arcing faults resulting from a failure in the intended continuity of a conductor, connection, module, or other system component in the PV system dc circuits.	Exception: PV system dc circuits that utilize metal-clad cables, are installed in metal raceways or enclosed metal cable trays, or are under ground shall be permitted without arc-fault circuit protection if the installation complies with at least one of the following: (1) The PV system dc circuits are not installed in or on buildings. (2) The PV system dc circuits are located in or on detached structures whose sole purpose is to support or contain PV system equipment.
---	---

图5 来源:国家电气规范 (NEC 2023, 第690.11条

29.1.2 An arc-fault circuit-interrupter shall be capable of detecting or interrupting arcing as described in the following : a) Region A: For all tests, disrupt arcing event in less than 2.5 seconds, and limit energy not to exceed 200 J; b) Region B: For all tests, disrupt arcing event in less than 2.5 seconds, and limit energy not to exceed 750 J; and c) Region C: For any test, arcing time equal to or greater than 2.5 seconds, or energy greater than 750 J, the device is considered non-compliant with the standard.	9.2.7 Arc energy and response time measurement The voltage across the arc gap, the arc duration, and the current through the arc shall be measured and recorded. These measurements are then used to calculate the total energy generated by the arc prior to detection or interruption. For arc duration measurements, (1) The arc period for AFPEs begins when the arc voltage reaches 10 V and ends when the arc current falls below 250 mA. (2) The arc period for AFDs begins when the arc voltage reaches 10 V and ends at the indication of an arc event.
--	---

图6 来源:UL1699B 标准

图7 来源:IEC 63027:2023 标准

欧洲方面, 国际电工委员会 (IEC) 在光伏直流电弧检测与保护方面的布局相对稍晚。在最新版IEC 63027中, 对光伏弧故障检测系统制定了全球统一的性能规范, 其性能指标要求与UL 1699B类似。而多个欧盟成员国还对企业、家庭安装光伏系统补贴的前提中, 加入了强制性安全检测功能。

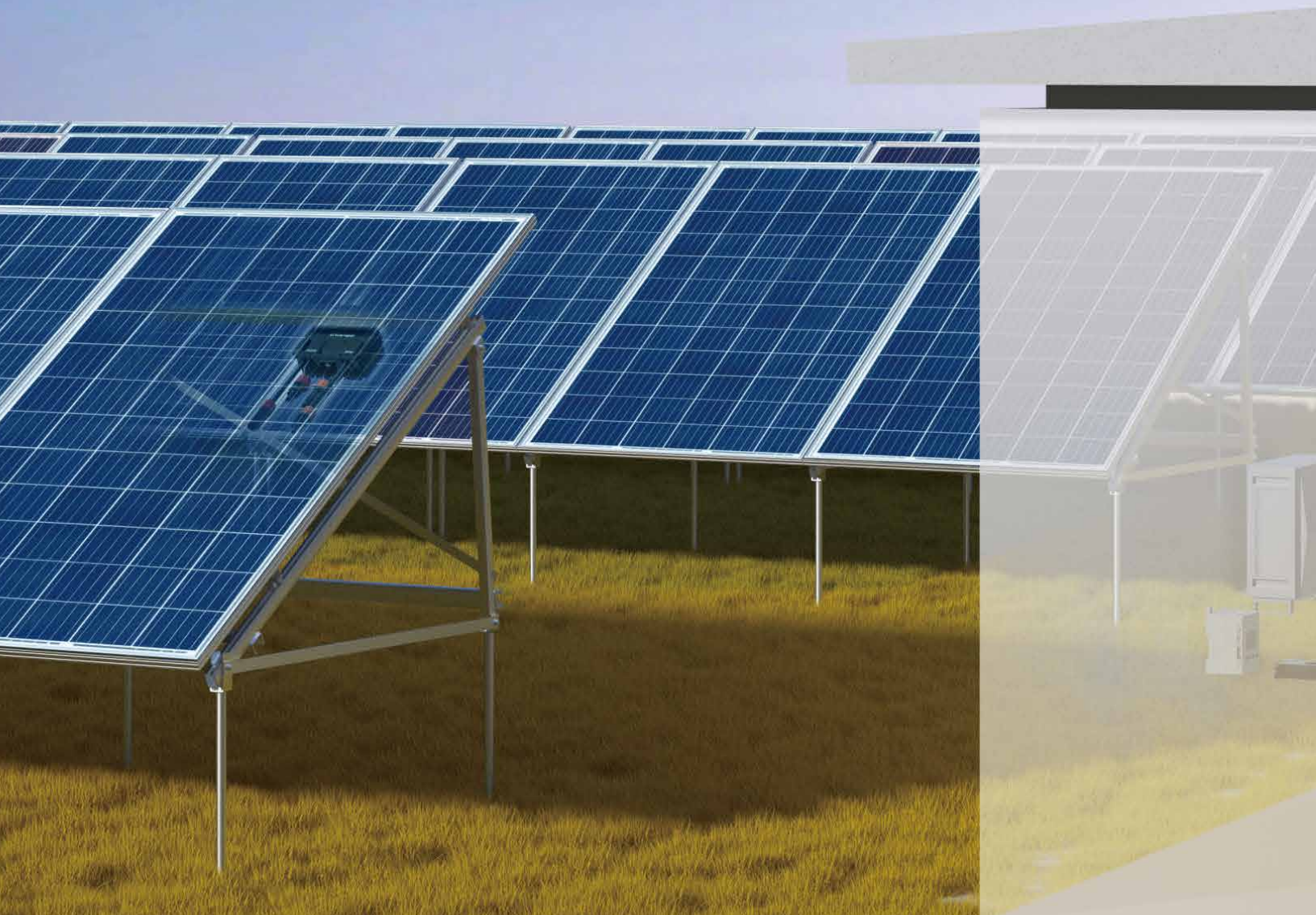
中国近年来的光伏发展速度全球领先, 对应的技术法规也在逐步完善。国家能源局及相关机构陆续发布了直流电弧故障保护技术要求, 并逐渐推动与国际标准的接轨。例如已实施的光伏系统防火、安全运行相关政策中, 对光伏组件及电缆的安装质量、安全检测与保护功能提出了规范性框架。

目前来看, 不同地区对直流电弧故障保护的普遍要求在不断强化, 这为对光伏直流电弧故障保护技术与解决方案的应用提供了广阔的市场空间。

02

光伏直流电弧检测保护技术原理与丰郅解决方案

—



2.1 光伏直流电弧检测和保护技术原理

光伏直流电弧检测和保护装置是一种用于检测和处理电弧故障的专业电气保护设备。其核心原理是通过监测和分析电路中的电流与电压信号，结合电弧产生的特征信号进行精准识别。当电弧信号被检测到时，装置会立即发出保护指令，迅速切断电弧周期，从而有效防止故障的进一步恶化。

电弧信号的特征主要体现在高频振荡、电流不稳定性以及频谱异常等方面。因此，光伏直流电弧故障保护的检测依据主要集中在电流波形变化和电弧特征频率信号分析等关键指标上。

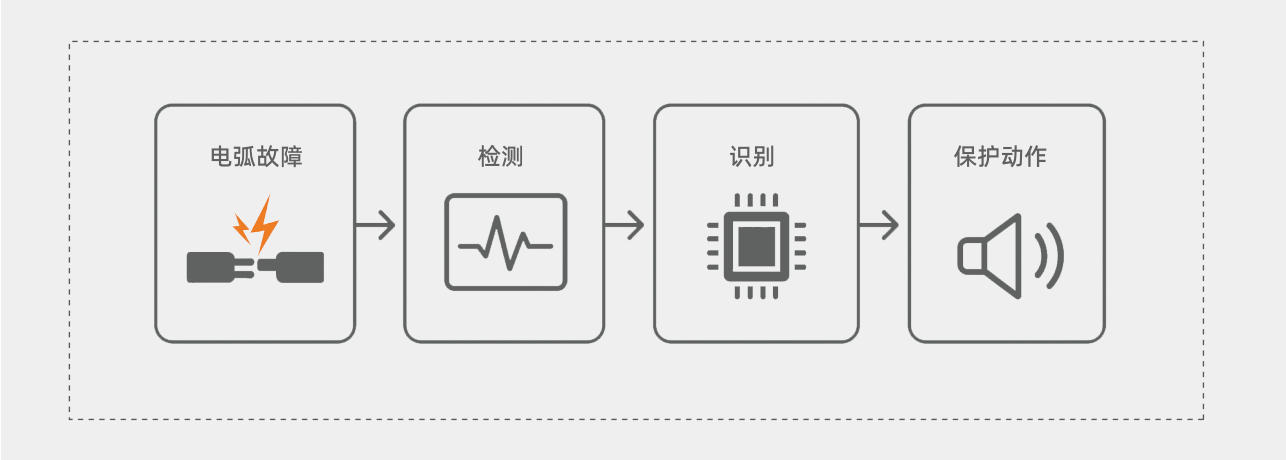


图8:电弧故障事件

2.2 传统光伏直流电弧故障保护解决方案

传统光伏直流电弧故障保护技术主要依赖简单的波形和频率检测，在直流电路的小规模应用中尚能取得一定效果。然而，这类传统方案在实际应用中面临着诸多挑战，如检测灵敏度不足、误报警率偏高以及难以适配复杂场景等问题。例如，逆变器启动时产生的高频干扰电流，常常被误判为电弧信号，而在大型光伏电站中，长电缆的干扰更是使得传统光伏直流电弧故障保护难以实现精准识别。此外，传统光伏直流电弧故障保护主要集中在光伏逆变器中，检测位置相对单一，缺乏全面的解决方案。

2.3 丰郅解决方案和技术优势

针对传统方案的局限性，丰郅推出了一套基于全面、专业生态的光伏直流电弧故障保护解决方案，在技术原理和性能上实现了重大突破。该方案采用高精度信号分析技术，能够从高频谐波特性中精准提取电弧的真正特征，显著提升了检测的精准度和可靠性。此外，丰郅的方案具有广泛的系统适配性，无论是户用、工商业还是地面电站，都能有效应对复杂的电弧隐患挑战。

丰郅方案的优势不仅体现在单一指标的改进上，更通过技术集成实现了全面化的系统解决能力。例如，该方案可与其他关断设备、监控平台实现高效联动，形成综合安全保护体系，其整体效能远超各部分功能的简单叠加。

2.3.1 逆变器/汇流箱内集成AFCI方案

逆变器/汇流箱电弧保护方案通常将电弧检测模块与逆变器、汇流箱等设备集成在一起，有助于提高设备集成度和空间利用效率，同时降低成本。然而，这类方案主要针对串联电弧提供防护，对于并联电弧的防护效果有限。此外，当检测距离较长时，通常超过 400 米，其检测效果会受到明显影响，这在很大程度上限制了其在大规模复杂光伏系统中的应用。

对于安全要求相对较低、系统规模较小且运行环境较为简单的光伏系统，电弧检测模块集成方案可以满足法规的基本要求，提供基本的电弧保护功能。但在复杂场景和高安全要求的现场，由于其在并联电弧防护和长距离检测方面的局限性，无法全面保障系统的安全稳定运行。

对于需要集成电弧保护功能的逆变器/汇流箱厂家，丰郅AFD可以帮助其快速集成，实现电弧保护功能。此类设备通过内置丰郅AFD，可以实现精准检测电弧所在组串，高效灭弧。

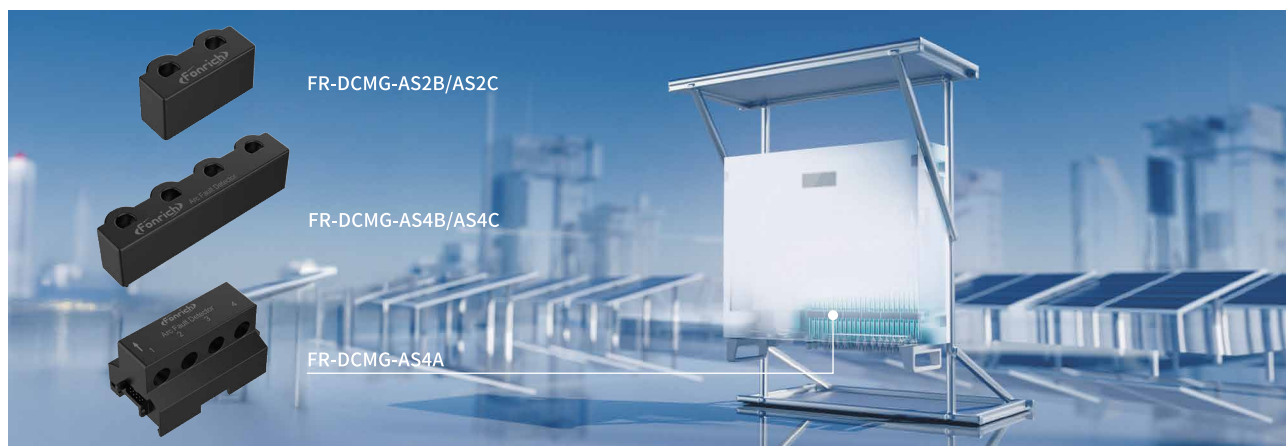


图9:组串式逆变器应用场景

2.3.2 独立的AFCI保护箱方案

伏方阵内,在特定条件下,即使未安装 RSD 设备,也能满足 UL1741 法规要求。这是因为当回路的线束未汇聚时,并不会产生并联电弧,在线束汇拢前切断回路即可抑制并联电弧。这种设计使得电弧保护箱方案在抑制并联电弧方面表现出色。丰郅电弧保护箱作为外挂安装设备,通常安装在光伏方阵输出端口或逆变器接口处,能直接检测和保护回路内的串联电弧,且与主流逆变器广泛兼容,具备安装、操作、维护简便的优势。其采用的光伏 DC 弧灭绝专利技术,在保护电弧的同时不影响正常发电。

然而,电弧保护箱方案也存在一定的局限性。一方面,它主要保护电弧保护箱到逆变器之间的并联电弧,无法对其他位置的并联电弧进行完全防护;另一方面,保护的路数受箱体型号限制,灵活性不足,在不同现场的适应性相对较弱。

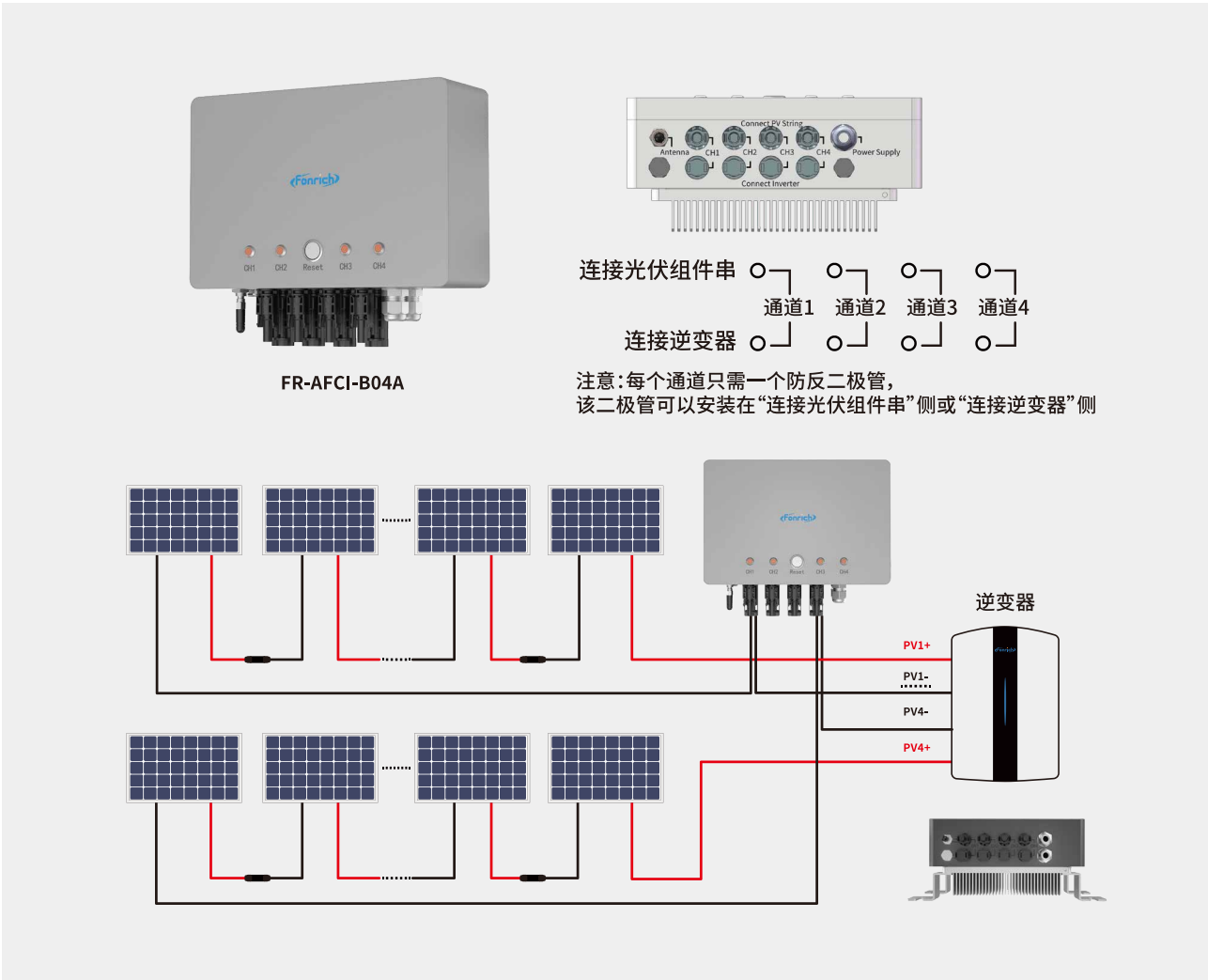


图10:独立式AFCI保护箱系统连接图及接线端子标识

2.3.3 光伏组串内安装的电弧保护器方案

相比电弧保护箱方案，光伏组串内安装电弧保护器（下文简称组串式电弧保护器）在多个方面更具优势，更值得推荐。组串式电弧保护器需安装在光伏组串的首或尾组件上，具备即插即用的便捷性，可大幅简化安装流程，节省安装时间与人力成本。同时，它不仅能有效保护串联电弧，还能对并联电弧进行精准防护，为光伏系统提供更全面的电弧保护，保障系统安全稳定运行，安装后也可以满足UL1741的相关法规要求。此外，组串式电弧保护器可选配控制单元，通过 PLC 通讯实时监控其工作状态，以便及时掌握设备运行情况，提前预知潜在故障，增强系统维护的及时性和有效性，进一步提升光伏系统的可靠性和安全性。

在实际应用中，组串式电弧保护器方案的灵活性和适应性也更为出色。它不受箱体型号的限制，可根据不同现场的需求进行灵活配置，无论是小型分布式光伏系统还是大型集中式光伏电站，都能轻松适配，为其提供可靠的电弧保护。而在成本方面，组串式电弧保护器也展现出了较高的性价比，其合理的价格设置使得广大用户能够在保障光伏系统安全的基础上，有效控制成本投入，实现经济效益与安全效益的双赢。



图11:组串电弧故障保护器

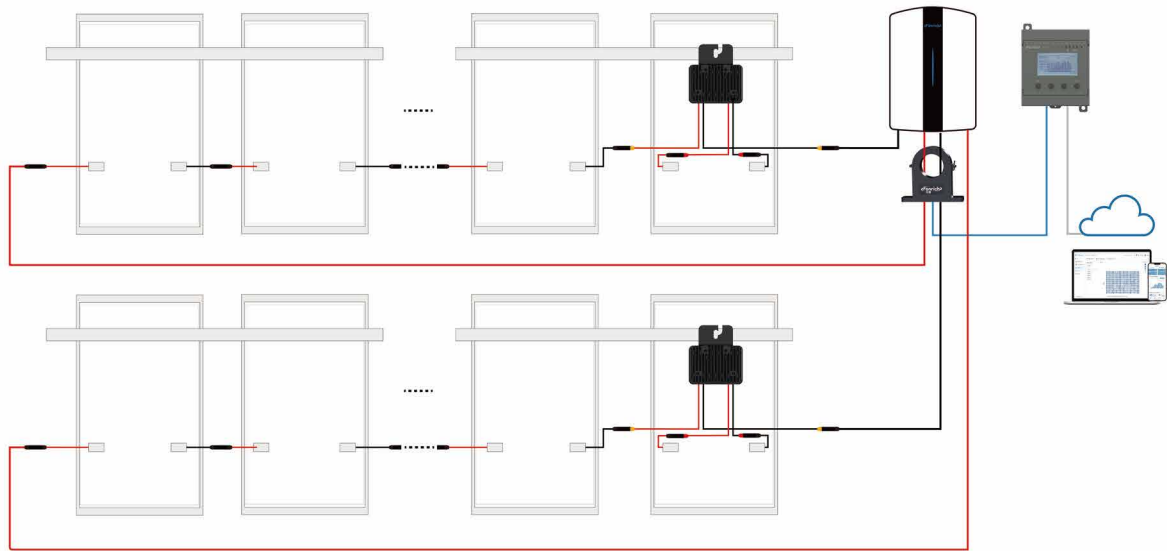


图12:电弧熄灭器系统接线图

2.3.4 组件级关断器/优化器集成AFCI方案

随着组件级RSD（下文简称RSD，本文所提到的所有RSD快速关断设备都是组件级）相关法规的推广与实施，各国对电站安全标准的提升已成为大势所趋。在此背景下，丰郅凭借其技术优势，将 RSD 与 AFCI 技术深度融合，推出了一款具备电弧保护功能的快速关断解决方案。该方案不仅有效抑制了电弧引发的火灾风险，更为电站安全运行提供了一道坚固的防护屏障。

在电弧引发的火灾事故中，串联电弧的发生频率相对较高，然而，并联电弧一旦形成，其危险程度则更为严重。在未配备 RSD 的电站现场，逆变器或汇流箱往往难以实现有效灭弧。此时，并联电弧所形成的短路回路将持续燃烧，对电站设备乃至整个电站的安全运行构成严重威胁。而 RSD 集成电弧保护方案恰好能够填补这一保护空白，显著降低悲剧发生的概率。

RSD 集成电弧保护方案在实际应用中展现出诸多显著优势。首先，该方案实现了组件级的电弧检测与保护，每个 RSD 均可独立进行电弧检测，从而构建起多重保护机制，极大地增强了电弧检测的稳定性和可靠性。其次，由于检测设备直接集成于光伏方阵内部，更接近电弧发生的常规位置，因此能够更迅速地响应电弧故障，有效缩短故障处理时间，降低故障损失。此外，这种检测方式完全不受逆变器安装位置的限制，确保了电弧保护的全面性和有效性。

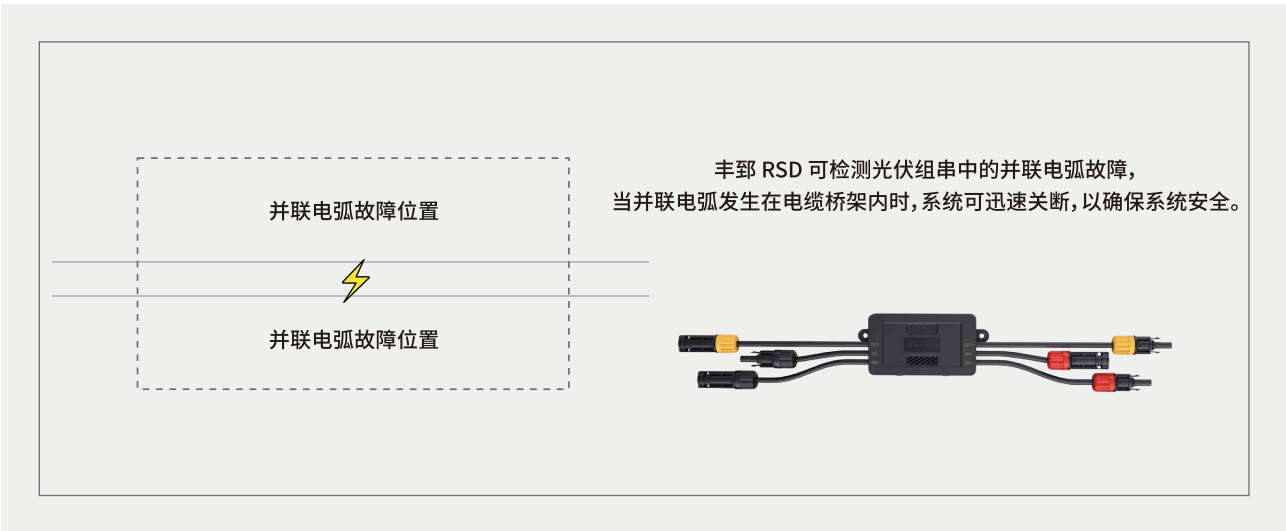


图13:并联电弧火灾示意图

对于有 RSD 要求的场景，增加电弧保护功能所涉及的成本增幅极小，然而其带来的安全效益却是显著的，能够实现电站安全保障水平的质的飞跃。或许有读者会提出疑问：是否可以直接通过逆变器检测并控制 RSD 动作，以替代当前的 RSD 集成电弧保护方案？然而，需要明确的是，这两种方案在实际效果上存在本质区别。在联动方案中，报警设备与保护动作设备之间需要依赖额外的通讯手段，而这种通讯通常为 PLC 无线通讯，其稳定性难以得到有效保证。这就导致联动方案最终只能达到逆变器集成电弧保护的效果，与组件级电弧保护方案存在本质差异。关于这一差异的更深入剖析，将在第四章进行详细阐述。

2.3.5 各种方案的保护效果对比

在对不同电弧保护方案进行对比时,可以明显看出各方案在保护效果上的差异。直流串联电弧的保护相对较为简单,只需要在回路的任意位置进行切断,即可实现灭弧,因此大多数电弧保护方案都能有效地保护串联电弧。然而,并联电弧的保护则复杂得多,对灭弧的要求也更为苛刻。在没有其他组串并联的简单情况下,为了有效灭弧,必须在靠近光伏组件的一侧切断回路。而在存在并联组串的复杂情况下,并联电弧的灭弧需要同时切断电弧两端的回路,即不仅要切断靠近光伏组件的一侧,还要切断靠近逆变器的一侧的回路,这样才能彻底熄灭并联电弧。

这种差异使得并联电弧的保护成为评估电弧保护方案的关键指标。不同的电弧保护方案在并联电弧保护方面的能力各异,从部分保护到完全保护不等。因此,在选择电弧保护方案时,必须充分考虑其对并联电弧的保护效果,以确保最终的安全性能。通过对比不同方案的保护效果,可以更科学、更合理地选择最适合特定光伏系统的电弧保护方案,从而最大限度地提高系统的安全性和可靠性。

保护方案	可保护电弧类型 串联电弧	并联电弧		
		光伏方阵内	组串电缆桥架内	逆变器/汇流箱处
Type-1:逆变器/汇流箱内集成AFCI	✓	×	×	×
Type-2:独立的AFCI保护箱	✓	×	依赖安装位置 ^①	✓
Type-3:光伏组串内安装电弧保护器	✓	✓	✓	✓
Type-4:Type1与组件级关断器/优化器联动	✓	× ^②	× ^②	× ^②
Type-5:组件级关断器/优化器集成AFCI	✓	✓	✓	✓

备注①：安装在光伏方阵侧可以保护该项，安装在逆变器/汇流线处则不能保护该项。
备注②：逆变器不能保障检测到并联电弧，并且电弧发生时，不能保证关断指令的完整下发。

03

不同关断和光伏直流电弧故障
保护方案的适用性和经济性



在探讨了不同电弧保护方案的技术原理和性能表现后,我们进一步聚焦于这些方案在实际应用中的适用性和经济性。选择合适的电弧保护方案不仅关乎技术层面的考量,更涉及经济成本与场景需求的平衡。以下将深入分析不同场景下推荐的保护方案,并探讨其适用性和经济性,以帮助项目决策者在满足安全要求的同时,实现成本效益的最大化。

在选择光伏直流电弧故障保护方案时,需要综合考虑场景需求、保护效果和经济成本。以下是不同场景下推荐的保护方案:

场景需求	推荐方案
满足法规要求即可	Type-1:逆变器/汇流箱内集成AFCI
老电站改造, 增加电弧保护功能	Type-2:独立的AFCI保护箱or Type-3:光伏组串内安装电弧保护器
全类型电弧防护	Type-3:光伏组串内安装电弧保护器
本身已经有RSD安装需求	Type-5:组件级关断器/优化器集成AFCI

图14:按需求分类的电弧故障解决方案推荐

对于仅需满足法规要求的场景,逆变器或汇流箱集成电弧保护功能是一种经济实用的选择,能够在降低成本的同时满足基本的法规要求。在老电站改造项目中,外挂式电弧保护装置因其安装方便、对现有系统改动小而成为理想选择。而对于那些愿意在一定成本范围内追求更高安全性能的项目,组串式电弧保护器则是一个平衡经济性和安全性的优质选择。最后,对于安全要求较高且追求更多功能的项目,RSD或优化器集成电弧方案能够提供更全面的保护和功能扩展。

下文将列举几个常见电弧需求常见,逐个分析适用的电弧保护方案。

3.1 老旧电站改造场景

对于已建成但不具备电弧故障保护功能的光伏电站,随着时间推移,设备老化,电弧故障风险日益增加。对这类电站进行电弧故障保护改造是一个亟待解决的问题。然而,增加组件级保护设备的施工复杂程度高、工作量大,而更换原有逆变器等设备也面临硬件成本高、施工难度大的困境,这使得许多业主在改造时面临两难选择。针对这种应用场景,丰源推荐采用独立外挂式光伏直流电弧故障保护设备,串联安装在直流电路中。该方案具有施工难度低、成本可控、改造周期短等优势,能够快速高效地为电站增添光伏直流电弧故障保护功能,显著提升电站的安全性能。

- RSD 集成方案:在光伏方阵内检测更及时,检测后即时动作保护,可保证电弧发生后 2.5 秒内 RSD 关断。
- 逆变器联动方案:长回路检测效果会打折扣,检测后依赖无线通讯下发关断指令,只能保证电弧发生后 2.5 秒内逆变器执行保护动作。

3.2 常规新建光伏电站场景

在新装电站中,如果想要在尽量不额外增加成本的前提下满足法规要求,可直接选择集成了 AFD 功能的逆变器或汇流箱。

- 户用或工商业场景:直接选用集成了光伏直流电弧故障保护功能的逆变器即可满足相关法规要求,且不破坏传统的电站设计架构,几乎无需增加额外成本。逆变器的直流电弧故障保护功能可选择自研或选配丰源电弧检测模块。选配丰源电弧检测模块的方案能极大缩短产品研发周期,加快产品投放市场时间,助力产品抢占市场先机。
- 地面电站场景:可选用集成了光伏直流电弧故障保护功能的汇流箱,其检测范围覆盖面积大,成本可控,无需修改传统电站设计方案。地面电站在新安装初期由于虚接等问题引发的火灾较多,通过这种方式可以有效保护电站财产。同样,如果汇流箱直接选配丰源电弧检测模块,可避免自研导致的研发难度提升和研发周期拉长,有效提升产品竞争力。
- 若现场希望在一定成本内实现串并联电弧的保护,可选择组串式电弧保护器。其成本增加接近于每一串增加一片快速关断设备的成本,总体成本增加可控,但电弧防护效果却实现了质的飞跃,能够有效防护更恶劣的并联电弧。



3.3 高安全要求的光伏电站场景

对于电弧故障保护要求极高或寻求组件级数据检测等高级功能的电站,适用集成电弧的 RSD (或优化器)。

RSD集成光伏直流电弧故障保护功能后,可以实现组件级别关断,保护更彻底,多余火灾抑制效果更好,在粮仓、加油站等安全要求非常高的场景推荐使用。另外高配置RSD可以实现组件级监控,对于科研项目、精细化运维等寻求多功能的电站推荐使用该方案,丰郅RSD可以检测功率、电压、电流、温度、发电量、电弧故障等关键数据,通过数字化电站给用户带来更多附加价值。

RSD 集成光伏直流电弧故障保护功能后,可实现组件级别的高效关断,保护更为彻底,火灾抑制效果更佳。在粮仓、加油站等安全要求极为严格的场景中,推荐使用该方案。此外,高配置的 RSD 还能实现组件级监控,适用于科研项目、精细化运维等多功能需求的电站,可带来更多的附加价值。

特别需要注意的是,逆变器自带 AFCI 电弧检测然后联动 RSD 实现关断的方案与 RSD 集成 AFCI 方案存在本质差异:

- RSD 集成方案:在光伏方阵内检测更及时,检测后即时动作保护,可保证电弧发生后 2.5 秒内 RSD 关断。
- 逆变器联动方案:长回路检测效果会打折扣,检测后依赖无线通讯下发关断指令,只能保证电弧发生后 2.5 秒内逆变器执行保护动作。

RSD集成电弧保护方案	逆变器检测电弧联动RSD关断方案
在光伏方阵内检测更及时	长回路检测效果会打折扣
检测后即时动作保护	检测后依赖无线通讯下发关断指令
可以保证电弧发生后2.5s内rsd关断	只能保证电弧发生后2.5s内逆变器动作
并联电弧检测精准	并联电弧检测不能保证

RSD 集成电弧保护方案不仅能提供更及时、更可靠的保护,还能避免因通讯干扰导致的关断延迟,确保在电弧故障发生时迅速切断电源,有效降低火灾风险,保障光伏电站的安全运行。

04

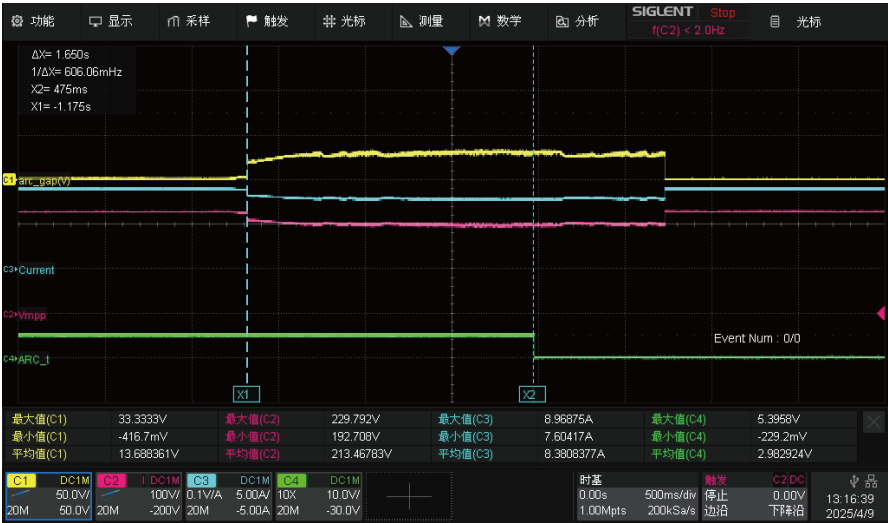
丰邳光伏直流电弧故障 保护解决方案技术验证



光伏直流电弧故障保护设备通常包括用于电弧故障检测的电弧故障检测装置 (AFD)，以及既能检测电弧又能切断电弧的电弧故障保护装置 (AFPE)。丰邳针对不同类型的光伏发电系统量身定制了合适的直流电弧故障保护解决方案。为验证丰邳光伏直流电弧故障保护解决方案的功能性和有效性，德国莱茵TÜV全程参与实证测试方案制定与现场目击，验证真实场景下的产品表现。这样的测试比实验室中的测试更接近实际场景，也更具有代表性。

4.1 方案1 电弧检测模块AFD方案与实证, TÜV莱茵全程见证

光伏电弧故障 保护设备	丰邳电弧检测模块AFD
实证目的	光伏方阵内各处发生电弧故障，AFD模块都可以正常检出并发出报警信号。
实证方法	光伏方阵内各处发生电弧故障，AFD模块都可以正常检出并发出报警信号。
实证过程	步骤一：在组串正极靠近逆变器处制造一处电弧故障，模拟实际运行中因组件老化、绝缘破损等原因引发的电弧。 步骤二：检测AFD模块在电弧发生时的报警信号，同时同步记录电弧的电压电流信息。检查AFD模块是否能够在及时检出电弧信号并正确发出报警信号。 步骤三：将电弧故障位置更改为组串负极和组串中间位置，重复步骤一、步骤二。
实证结果与分析	AFD检测模块：能够及时检测到光伏方阵内的电弧故障，并迅速发出报警信号通知相关设备执行保护动作，可以实现有效熄灭电弧，保护光伏组件和线路免受进一步损坏。



AS4A 电弧故障 - 信号定义

- ▲ X: 电弧保护响应时间
- X1: 电弧起始时间
- X2: 电弧持续时间
- C4: 告警信号
- C3: 组串电流
- C2: 系统电压
- C1: 电弧电压

4.2 方案2 外挂式组串光伏直流电弧故障保护方案与实证, TÜV莱茵全程见证

光伏电弧故障保护设备	分别测试两种外挂式电弧保护器：电弧保护箱和组串式电弧保护器
实证目的	当光伏方阵内各处发生电弧故障，丰郅电弧保护箱和组串式电弧保护器都可以正常检出电弧并切断回路熄灭电弧。
实证方法	搭建典型光伏组串架构，在光伏方阵内人为制造串联电弧故障，确保故障点处于方阵内部线路中。
实证过程	步骤一：在组串正极靠近逆变器处制造一处电弧故障，模拟实际运行中因组件老化、绝缘破损等原因引发的电弧。 步骤二：观察并记录电弧保护箱/组串电弧保护器的保护动作，记录电弧的电压电流数据用以判断电弧是否被熄灭，保护是否生效。 步骤三：将电弧故障位置更改为组串负极和组串中间位置，重复步骤一、步骤二。

实证结果与分析	电弧保护箱/组串电弧保护器在检测到光伏直流侧的电弧后，能够及时动作保护电弧发生的组串，切断故障回路，有效防止电弧的进一步蔓延，保护整个光伏系统的安全。
---------	---

丰郅 AFPE 电弧故障保护

▲ X: 电弧保护响应时间

X1: 电弧起始时间

X2: 电弧持续时间

C3: 组串电流

C2: 电弧电压

C1: 系统电压

丰郅 AFPE 电弧故障保护

▲ X: 电弧保护响应时间

X1: 电弧起始时间

X2: 电弧持续时间

C3: 组串电流

C2: 电弧电压

C1: 系统电压

最大值(C1)	219.583V	平均值(C1)	197.83052V	最小值(C1)	186.667V	标准差(C1)	1.06873V
最大值(C2)	232.813V	平均值(C2)	62.37022V	最小值(C2)	-4.167V	标准差(C2)	77.55121V
最大值(C3)	11.38542A	平均值(C3)	7.3762495A	最小值(C3)	-343.75mA	标准差(C3)	5.0152528A

C1: 系统电压

C2: 电弧电压

C3: 组串电流

X1: 电弧起始时间

X2: 电弧持续时间

Event Num : 0/0

时基: 1.71s, 500ms/div, 1.00Mpts

触发: 停止, 边沿

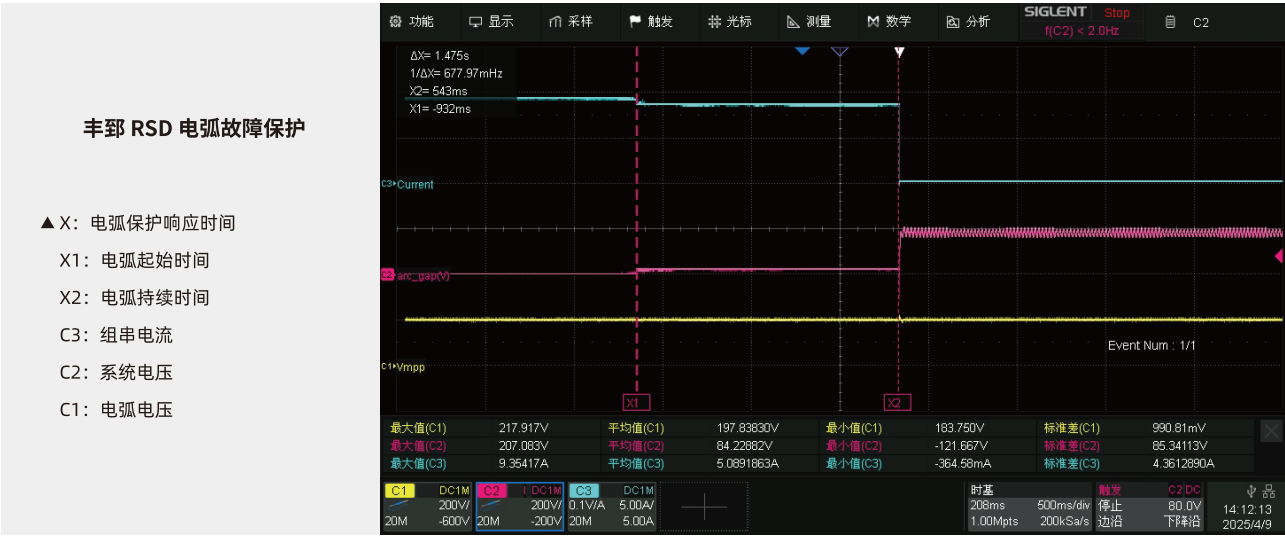
C2 DC: 80.0V, 下降沿

12:20:56, 2025/4/8

4.3 方案3 组件级别光伏直流电弧故障保护方案与实证, TÜV莱茵全程见证

光伏电弧故障保护设备	丰郅RSD集成电弧保护功能版本（以下简称丰郅RSD）
实证目的	当光伏方阵内各处发生电弧故障，丰郅RSD可以正常检出电弧并切断回路熄灭电弧。
实证方法	搭建典型光伏组串架构，方阵内每片组件都安装一只RSD设备，在光伏方阵内人为制造串联电弧故障，确保故障点处于方阵内部线路中。

实证过程	步骤一：在组串正极靠近逆变器处制造一处电弧故障，模拟实际运行中因组件老化、绝缘破损等原因引发的电弧。 步骤二：观察并记录组件级别光伏直流电弧故障保护设备的保护动作，记录电弧的电压电流数据用以判断电弧是否被熄灭，保护是否生效。 步骤三：将电弧故障位置更改为组串负极和组串中间位置，重复步骤一、步骤二。
实证结果与分析	在电弧故障发生时，丰郅RSD能够快速响应，立即切断故障回路中的电流，成功熄灭电弧。



05

总结与展望

随着全球“双碳”目标的推进，光伏发电已成为能源转型的主力军。然而，伴随光伏装机容量的持续增长，直流电弧引发的安全问题逐渐成为行业关注的重点。直流电弧具有隐蔽性强、危害性大且难以检测等特点，这对光伏系统的长期安全性提出了严峻挑战。因此，在提升光伏系统发电效率的同时，构建高效可靠的电弧检测与保护机制已成为光伏行业可持续发展的关键任务。

通过对当前技术的分析与实践案例的验证可以看出，光伏直流电弧故障保护（弧故障电路保护器）技术已成为解决光伏直流电弧问题的核心手段。针对不同应用场景下的复杂风险，行业已逐步涌现出一系列高效的解决方案。然而，传统的光伏直流电弧故障保护技术在检测精度、响应速度以及系统适配性方面仍有提升空间，结合先进信号处理算法、多层保护机制以及紧急关断功能的创新型解决方案，将成为未来的最佳实践方向。未来的光伏直流电弧故障保护系统不仅需要关键场景中做到精准检测，还需实现稳定性与经济性的平衡，以便更大范围地推广应用。



另一方面，各国法规和标准化要求的不断完善也为光伏电弧故障保护技术的发展提供了有力支撑。光伏系统的安全性标准正在向更加系统化和国际化迈进，这要求企业在技术研发和应用实践中持续创新，主动推动标准对接并参与国际化合作。同时，第三方认证机构的深度介入，也将进一步推动直流电弧检测与保护方案的规模化落地与优化。

展望未来，光伏行业的高质量发展不仅仅依赖于装机容量的扩张，更需要全方位保障系统的安全性、可靠性与可持续性。通过技术与规范的共同驱动，直流电弧检测与保护技术将在“护航光伏安全”的使命中发挥更重要的作用，为全球能源绿色转型提供坚实支撑。TÜV莱茵将持续与行业伙伴携手，为光伏安全创新保驾护航，共同助力“双碳”目标早日实现，开启能源可持续发展新篇章。





丰郅（上海）新能源科技有限公司
地址：上海市闵行区联航路1588号科创楼2号楼1层

传真：+86-21-60717306
电话：+86-21-60717303

官网：www.fonrich.com
邮箱：info@fonrich.com

