

Analysis and prevention of DC arc pulling of rooftop photovoltaic power station

Xuejin Ke

Guangdong Liansu Banhao Engineering Technology Co., Ltd., Foshan, Guangdong, 528012, China

Abstract

According to the relevant professional analysis and explanation in the industry: DC arc pulling is essentially a gas discharge phenomenon, refers to the medium around the charged body from the insulation state to the conductive state, so that the electric energy through the phenomenon. Ararc phenomenon may occur at the extremes of the two ends connecting the conductive parts. Although the extreme contacts have been separated, the current continues to circulate through the arc between the contacts, which to some extent can be understood as bridging conduction. Because there is no current in the DC circuit, the relative AC circuit exceeds zero, so it is difficult to extinguish the arc after it is generated. Only when the two extreme contacts are separated to enough distance can the arc automatically disappear.

Keywords

DC arc pulling; system design optimization; Arc fault analyzer (AFCI)

屋顶光伏电站的直流拉弧的分析及其预防

柯学进

广东联塑班皓工程科技有限公司，中国 · 广东 佛山 528012

摘 要

根据行业内相关的专业分析解释：直流拉弧实质是一种气体放电现象，是指带电体周围介质从绝缘状态变为导通状态，使电能通过的现象。分开两端连接导电部位间的极端就可能会出现电弧现象。此时极端触头虽已分开，但是电流通过触头间的电弧继续流通，在某种程度上也可理解为桥接导通现象。直流回路中相对交流回路因为没有电流过零点，因此电弧产生后很难熄灭，唯有通过外部强制介入使两个极端触头分开到足够的距离，电弧才能自动消失。

关键词

直流拉弧；系统设计优化；电弧故障分析器(AFCI)

1 引言

近年来，随着光伏发电设备（特别是光伏组件）的造价成本快速下降以及国内工商业用电量稳步增涨，更多商业建筑及生产房屋面开始装设光伏电站；根据统计数据显示屋顶分布式光伏电站中，超过 70% 的光伏组件是直接铺设在彩钢瓦屋面上，铺设方式为沿彩钢瓦大面积平铺，密集紧凑。分布式光伏电站日常运行过程中，光伏组件至逆变器之间的直流输电系统会发生电缆老化、组件接头制作工艺不达标等导致的短路故障等，会引发直流拉弧现象。

2 直流拉弧的实验原因分析

在相关的直流拉弧试验中，当拉开光伏电缆时，电弧随即产生，仪表显示的电压达到 10V 时，电弧光以肉眼可见，

并随着直流电压的升高，电弧光逐渐强烈，导体表面温度急剧升温，可达 4200℃，并随着高温碳化周围器件，电压越高其燃烧碳化速度越快。

如下图 1 所示：AB 两个连接点之间的电压：1）当 AB 之间正常连接，AB 间电压与串电流和接触电阻相关，即 $U=I \cdot R$ ；2）当 AB 之间断开时，此时 AB 间电压为 0V；如逆变器输入端开关导通，AB 间电压为组串电压；3）当 AB 为半接触不良，或者虽分开但之间的距离较小，就会发生拉弧现象，此时 AB 为中心的温度会快速上升，并沿电缆两侧扩散，直到把 AB 两点的距离烧断到足够大时才会熄灭^[1]。

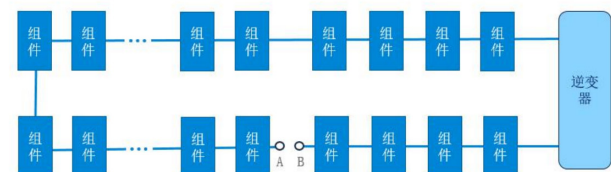


图 1、光伏组串连接图

【作者简介】柯学进（1985-），男，中国广东湛江人，本科，高级工程师，从事光伏发电及其储能电力系统研究。

故得出结论：只要接触不良或者半连接状态中的直流电路中电压大于 10-20V，电流大于 80-100mA 时，同等材料及同等环境下，发生直流拉弧的概率是相同；但是燃弧的强烈程度和弧光长度与组串电压成正比。对设备和材料的破坏速度与电压同样成正比。

直流电弧长度可参照的计算公式 $L = \frac{u}{\sqrt{3}} - 0.55 \times I \times 10^{-3} - 30$ (mm) 进度测算。其中 U: 输出电压，单位 V；I: 输出电流，单位 A。

而伴随光伏技术的飞速进步，光伏产品的功率等级

和电流电压又不断提高，光伏系统从最初的 600V 提高至 1000V，目前已突破到电压 1500V，越高的电压等级引发的危害程度也越大。

3 直流拉弧运维数据的跟踪

随着屋面光伏电站快速发展，更多光伏电站已投入使用，对近 5 年多个光伏电站发生超过 20 起起火的原因进行查找和分析，得出结论为：超过 90% 的直接原因为直流拉弧，剩下约 10% 的原因为接地电弧、热斑效应、雷击等原因造成。对其因素收集及统计如下表 1。

表 1、光伏电站起火灾事故调查统计表

序号	因素	次数	占比	破坏损失程度	危害等级
1	MC4 接插头松动及压接不实	10	50%	接插头烧熔变形、连接组件烧穿、整台逆变器烧毁、屋顶彩钢瓦烧穿、多组回路组串光伏电缆烧毁等	1 级
2	汇流箱处接线螺丝松动	4	20%	单回路电缆及靠近的多组电缆、汇流箱整台烧毁	1 级
3	光伏电线材料破损断裂	1	5%	单回路电缆及靠近的多组电缆烧毁	2 级
4	施工拉线折断	1	5%	单回路电缆及靠近的多组电缆烧毁等	2 级
5	接头部位进水腐蚀断开	1	5%	单回路电缆及靠近的多组电缆、连接设备烧毁	2 级
6	中间部位动物破坏咬断	1	5%	单回路电缆及靠近的多组电缆烧毁等	2 级
7	焊带点虚焊	1	5%	方阵内组件烧穿、屋顶彩钢瓦烧穿	2 级
8	其他连接固定不良	1	5%	单回路电缆及靠近的多组电缆烧毁等	3 级
9	总计	20	100%		

根据上述实际运维的数据分析：直流拉弧主要原因集中在接插头和两端连接部位，出现接触不良或者压接不实时才会出现直流拉弧，占 70% 比例；而带来破坏程度和直接经济损失也为最严重的。

为此基于该因素，认为在系统设计、材料选用、专业施工等途径，可以有效减少直流拉弧出现的概率。

4 直流拉弧设预防措施

4.1 光伏系统主要设备选型

目前屋顶光伏电站直流侧的设备主要为为组件与组串式逆变器。

1) 主要单晶硅组件为主，目前市场上主流组件分成 210 和 182 两种系列组件，其中 210 组件主要集中在 640-680W 范围，为低电压、大电流；而 182 组件则是主要集中在 540-560W 范围，为高电压，小电流。

考虑彩钢瓦屋面的面积相对较大，安装较为集中，可在相同的安装面积或者系统装机容量下，相比低功率组件而言，采用 640W+ 高功率组件可以大幅减少光伏组件块数。因组件数量减少，会直接导致组件间互联点（MC4 接插头）数量可以减少约 24%。

2) 对安装场所为彩钢瓦屋顶的，尽量选用上具有电弧故障分析器 (AFCI) 的组串逆变器，并在逆变器配置一套干式灭火装置。

3) 目前国内市场上 100KW 以及的大功率逆变器不具备电弧故障检测功能，可考虑在组件与逆变器之间单独外置一

套直流电弧检装置^[2]。其工作原理为：光伏组串直通过直流电弧检测装置，在内部穿过电弧监测装置后，再分别接入逆变器各支路中；电弧监测装置实时监测各个光伏组串，计算其电弧强度，当电弧强度达到监测装置设定的阈值时，监测装置直接向逆变器发送指令，将逆变器停机断开直流回路，避免火灾发生。正极侧，各支路进入电弧检测器，直通过电弧传感器，再接入逆变器；负极侧，选择单一支路接入电弧装置中取电，所有支路直接连接逆变器，如原理如图 2 所示。

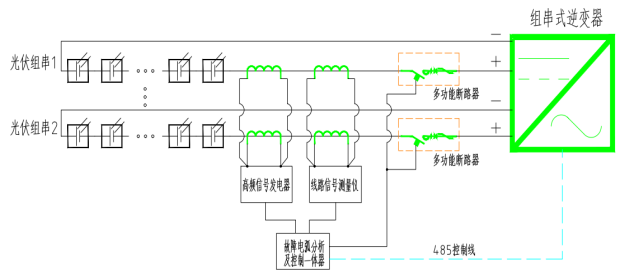


图 2、直流电弧检原理系统图

4.2 发电单元设计及优化

光伏发电系统的优化主要包括 6 个方面：

1) 组串跳线数量的优化，在一些大面积连片的区域，尽量设计成“1xN”一字形成排的方阵，充分利用组件原装 MC4 接头，从而可以减少外配接头的数量约 10%-20%。在一些非重要的区域可以设计成“2xN”的方阵，以缩短光伏

引出电缆的长度。

2) 从组件-逆变器的光伏电缆采用金属桥架敷设,并在引出口或者每隔 50-100m 处设置防火封堵措施。直流侧与交流侧应设置在不同桥架敷设,不得敷设同一根桥架内。

3) 尽量将逆变器放置在方阵的中间位置,减少组件-逆变器的段的电缆长度,较短的线缆长度则更有利于避免并行电弧的发生;同时平衡接入同一台逆变器中组件串的电压差也有利于减少因电缆绝缘破损出现的并行电弧的概率。

4) 对于组件之间接插头应设计专用保护措施,如要求配置专用的“挂线夹”,将接插头固定在组件底部的金属边框上,避免与下方金属彩钢瓦表面接触。或者是耐燃套管敷设,并与瓦面隔离。

5) 逆变器直流接线端子排的设计采用金属材料做成封闭式保护罩(不得影响通风散热)加以物理隔离保护,从而有效避免老鼠等小动物对其电缆破坏。

6) 针对逆变器必要时可配置一套专用的火灾报警视频监控系統。

4.3 施工安装时的把控

1) 选择质量可靠的光伏组件产品及光伏线缆、连接器等零部件;材料选用可靠的连接器,如采用双保险的压接工艺方式 MC4 接插头。

2) 不同型号的接插头不得在同一组串内混装使用,安装时注意一定要把连接器对插到位;

3) 使用专用的压接和安装工具进行连接器装配,严格控制项目地光伏连接器压接和装配质量,有条件的情况下建议直接采购工厂组装好的转接线、延长线;

4) 在光伏系统施工和维护时,还应做好连接器和线缆的防尘、防水以及防止动物咬伤保护等工作。

4.4 设置快速关断装置

目前国内尚未有强制性的直流拉弧相关标准,但参考北京市市场监督管理局发布《分布式光伏发电系统电气安全技术规范》的定义要求:系统宜具备快速判断功能,快速关断装置启动后 30S 内,以光伏阵列边缘外延 305mm 为边界,边界范围内的电压应降低到 120V,边界范围外应降低到 30V 以下^[3]。

然后国内针对 1000V 及以上的光伏发电单元尚未有成熟性价比较高的光伏快速关断装置,但是随着屋顶光伏电站的数量不断增加,直流拉弧引发的火灾事件增加,行业内也是越来越重视该装置的投入研究与可靠产品的量产。

光伏快速关断装置的工作原理主要是通过远程或手动触发,迅速断开光伏组件之间的连接,从而消除系统中的直流高压。具体来说,当紧急情况发生时,可以通过启动快速关断装置,使得光伏组件之间的电压在短时间内(通常为 30 秒内)降低到 120 伏以下安全水平。

这样可以降低触电风险,确保消防人员的安全,同时也有助于防止因高压直流电弧引起的火灾。这种装置通常会与光伏系统的逆变器或其他控制设备集成在一起,能够实时监测系统的运行状态,并在必要时自动触发关断功能,其原理如图 3 所示:

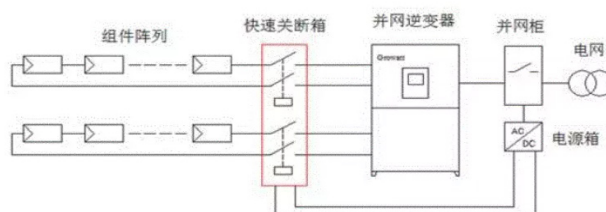


图 3、光伏快速关断原理图

4.5 建立完善的运维管理模式

目前国内 1500V 的光伏发电单元基本上不具备电弧故障分析功能,运维人员需要对每一台逆变器中各个组串发电单元建立系统数据库,并建立一套对比分析机制,例如“2-3 制”,即以把逆变器中同一性质(如同一朝向同一倾角)中相邻的方阵按 2-3 组做成单元,定期对发电量、电压、电流的数据对比差异分析,对有异常的组串采用停机检测及带电分析,也是一种被动的有效方式。

5 结论

国内屋面光伏电站因直流拉弧引发的事故现象频发,为此从溯源角度考虑,通过在设备和材料的选型、系统设计优化、施工把关主要 3 大源头方面重视,可以将拉弧发生的概率降低超过 80%。同时对发生直流拉弧事后,配置快速关断装置则有助及时故障切除,将损失降低到 50% 以上。

参考文献

- [1] 天合光能《600W+超高功率组件分布式应用白皮书》
- [2] 国家标准 GB/T 39750-2021《光伏发电系统直流电弧保护技术要求》,国家市场监督管理总局发布
- [3] DB11/T 2036-2022《分布式光伏发电系统电气安全技术规范》,北京市市场监督管理局发布