



光伏电站 场内及并网安全技术 白皮书



版权所有 © 华为数字能源技术有限公司2024。保留一切权利。

非经本公司书面许可，任何单位和个人不得擅自摘抄、复制本文档内容的部分或全部，并不得以任何形式传播。

商标声明

 和其它华为商标均为华为技术有限公司的商标。
本文档提及的其它所有商标或注册商标，由各自的所有人拥有。

注意

您购买的产品、服务或特性等应受华为公司商业合同和条款的约束，
本文档中描述的全部或部分产品、服务或特性可能不在您的购买或使用范围之内。除非合同另有约定，华为公司对本文档内容不做任何明示或默示的声明或保证。

由于产品版本升级或其他原因，本文档内容会不定期进行更新。除非另有约定，本文档仅作为使用指导，本文档中的所有陈述、信息和建议不构成任何明示或暗示的担保。

目录

背景 02

光伏电站安全问题及典型案例分析 04

01 场内设备侧典型故障.....	06
接地故障	06
直流线缆反接故障	06
端子接触故障.....	06
交流侧喷弧故障	07
交流绝缘故障.....	07
02 电网侧典型故障.....	08
电网高电压穿越故障引发设备安全问题	08
电网低电压穿越故障引发设备安全问题	08
低 SCR 下谐波控制差引发的设备安全问题	08
宽频振荡导致的设备安全问题	10

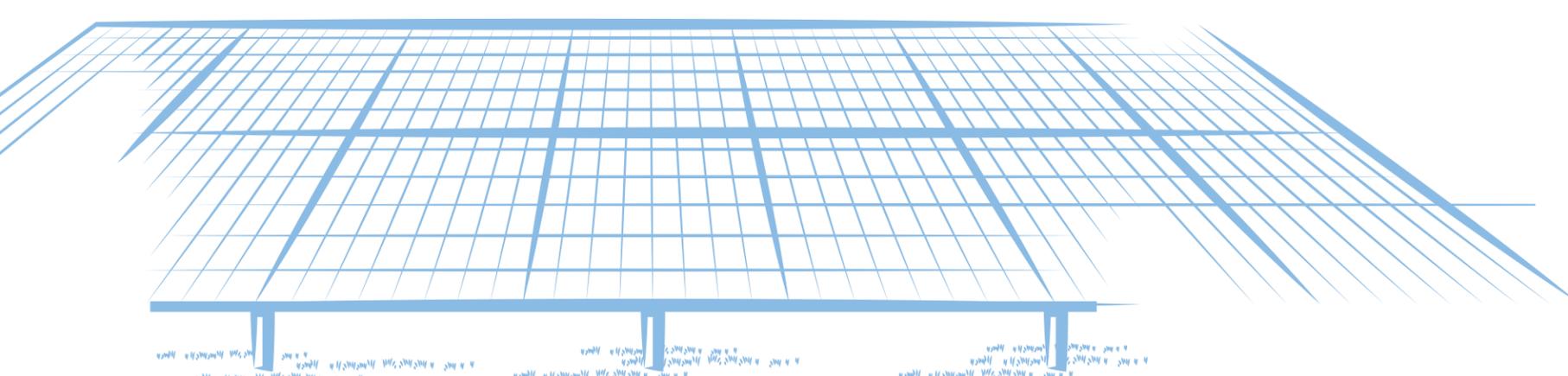
电站场内设备和并网安全设计 11

01 安全设计理念	12
02 光伏电站电气安全设计框架及技术	12
电站场内设备安全	13
电站并网安全技术要求与设计	19

安全应用 & 实践 23

01 场内设备安全应用 & 实践.....	24
智能组串分断实践——流域高原场景.....	24
绝缘监测与定位技术实践——海光 / 水光场景	25
端子温度监测实践——沙戈荒场	26
交流安全应用实践	27
02 并网安全应用 & 实践	28
并网支撑实践.....	28
构网支撑实践.....	29

结语 30





背景

2023年，新能源按下加速键。习总书记在22年提出新能源高质量发展的要求后，又在去年底提出了大力发展“新质生产力”。在光伏领域，一系列支持政策陆续落地，光伏未来的增长空间是确定的。2023年政策、商业、技术驱动光伏行业快速增长。流域高原、沙戈荒、农光、水光、海光等场景空间倍增，加速光伏成为主力能源。根据 BloombergNEF 的最新预测，预计在2025年~2030年，年平均装机容量将超过700GW；到2030年，全球累计光伏装机容量将达到6.7TW。

在新能源快速增长可见的同时，我们看到现在清洁能源大基地的设计、建设与运营也进入了深水区，挑战与日俱增。且具体的挑战内容也随着产业发展而不断变化：由早期追求极致的度电成本，转向对并网消纳、供电安全、设备安全、生产安全、用地、质量、运维等多维度多层次的挑战。

海量的新能源设备，从建设到运维，安全永远是光伏电站稳定运行的基石。2023年，华为联合鉴衡发布《光伏电站智能安全技术白皮书》，全面深入地分析了光伏电站电气安全问题及事故案例，系统地介绍了光伏电站安全防护领域的最新技术与实践；助力了光伏电站智能安全防护技术的应用，在业界形成很好的反响，引领行业向智能组串分断、智能端子检测等技术演进发展，同时相关安全特性也被 GB/T 43056-2023《沙漠光伏电站技术要求》等标准收录，形成行业的统一要求。

今年，华为经过一年的研究和思考，针对安全特性进行了细化；同时，也在光伏电站现场进行了实证、对比和GW级大规模的应用。我们认为，仅从设备本体维度的静态安全还不能保障整个系统的电气安全，还需要考虑设备运行并网后，对电网侧故障的安全防护，来达到动态的运行安全和支撑电网安全。从而做到在电站的整个生命周期都能安全稳定并网。

本白皮书通过对安全特性进行具体指标的分层分级，旨在帮助光伏电站安全建立统一评价标准，促进光伏产业健康稳定发展。

2025年~2030年
年平均装机容量将超过



700GW

全球累计
光伏装机容量将达到



6.7TW



光伏电站安全问题及典型案例分析

随着 N 型组件技术、IGBT 等半导体器件的持续发展，如组件、逆变器等光伏电站核心设备的功率密度逐渐提高；由此而带来的安全问题更易产生，可能造成的后果也愈加恶劣。同时，由于地面电站的应用场景由传统单一的平地，逐渐往沙戈壁、山地、海光、流域高原等复杂场景演变，多变的环境特征也使得安全问题愈加突出。



农光场景

特殊的地质条件等因素可能导致结构形变、引起端子松脱，继而使得端子两侧的电压击穿空气后产生持续的放电效应，也就是所谓的拉弧；直流拉弧的温度可瞬间高达 3000℃，并且会持续燃烧，极易烧坏端子，甚至可能造成更恶劣的后果。下图是由于大风、土地沉降等因素长期影响导致接触劣化的案例。

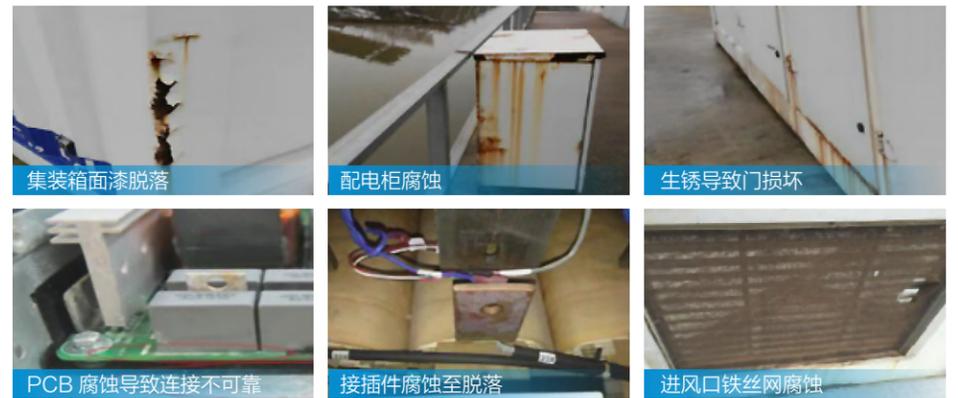


土地沉降导致端子接触不良



海光或盐碱滩涂等场景

高湿高盐雾的环境下，绝缘故障是主要的安全风险之一。绝缘失效大多是由于电场、热、化学等因素综合作用下，绝缘材料的绝缘性能降低，导致绝缘性能破坏。绝缘失效的主要表现形式为绝缘击穿，当施加于电介质的电场强度高于临界值或者在一定电场强度下，电介质由于环境等影响，绝缘电阻值低于临界值，通过电介质的电流会突然猛增，使绝缘材料的绝缘性能被破坏，丧失绝缘能力，这种现象通常也称为电介质击穿，最终导致火灾等严重后果。近海场景，直流线缆、接线盒、交流线缆、接线端子等容易被腐蚀，难以避免会影响绝缘性能，如降低爬电距离等，从而可能导致逆变器单板 / 模块绝缘失效 / 过热，进而引发打火，造成整体逆变器烧毁。



海光场景导致的设备腐蚀问题

安全问题除了按照以上场景分类，也可以根据发生的位置，分为设备侧、电网侧等几大类。

01 场内设备侧典型故障

| 接地故障

接地故障是目前电站安全问题里发生概率最高，也最突出的一类。根据第三方机构统计，超过一半的光伏电站火灾是由接地故障引起。在光伏电站中，光伏组件 - 汇流箱（如有） - 逆变器 - 箱变之间的线缆大多为直接埋地铺设，而光伏组件、接线盒、直流电缆、汇流箱、逆变器、交流电缆、接线端子等各环节易出现绝缘层破损并与地面接触，引起输电导线对地绝缘下降。一旦形成漏电回路，将会造成局部发热或者电火花，严重时甚至会引发火灾等严重后果。

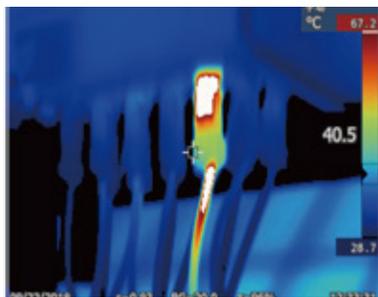
| 直流线缆反接故障

在电站前期施工接线时，由于线缆多且长，端子公母头容易接反，从而出现直流反接问题。传统多路并联方案中采用熔丝进行过流保护，如果出现一路组串直流反接，故障回路电压可能会达到组串电压的两倍，现有的 1500V 熔丝可能无法可靠分断，出现爆裂和起火。

| 端子接触故障

光伏电站中存在大量的端子连接，端子接触不良引发的故障也是常见的电站安全问题。以一个 100MW 电站为例，电站共有 7000 多个组串，需要 14000 多个直流端子连接。导致端子接触故障的原因包括，在端子生产过程中因加工不到位会导致金属芯压接不良，在电站施工阶段因操作不规范会导致端子插接不到位，在电站运营阶段由于外力导致端子接触点之间产生应力从而造成端子虚接。

端子接触不良带来的直接影响即端子过温，但是由于逆变器直流端子通常无法进行温度检测，这种故障非常容易从一个小故障扩散到大故障，引起直流拉弧 / 过热起火等现象。



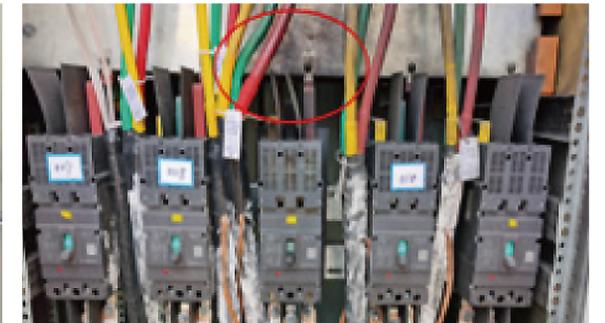
› 端子故障过温



› 端子过温导致的起火事故

| 交流侧喷弧故障

光伏电站交流侧防护相对成熟、相关标准也相对完善，但当系统发生短路故障时，断路器分断故障电流可能会引起电弧。电弧是离子化的高温气体流，在电弧被引燃的初期，空气急剧爆燃产生的冲击波和随后的高温气流会对人体和设备带来极大危害。



› 箱变喷弧引发的安全事故

| 交流绝缘故障

新能源电站存在大量埋地电缆，在电缆敷设过程中以及后期运维过程中，都有可能引起电缆绝缘破损、老化等问题，导致对地绝缘下降，甚至引起接地故障。新能源电站低压侧一般采用中性点不接地系统，对系统对地的绝缘电阻进行监测是保证运维人身安全的重要手段。



高压击穿



现场安装或连接不良



湿度、灰尘或污染引起的腐蚀

› 箱变中压故障图

02 电网侧典型故障

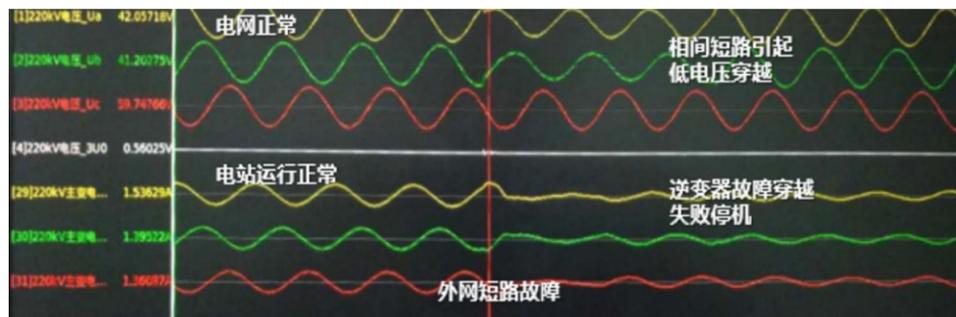
高比例新能源渗透率下，高比例电力电子设备控制和对电网支撑能力不足，不仅影响电力系统的稳定性，同样带来很多电气设备损坏和电气安全问题；多地曾经出现过逆变器硬件设计能力不足、逆变器高低穿或谐波控制不足，导致设备故障或引发上层系统保护等问题。

| 电网高电压穿越故障引发设备安全问题

当电网发生高电压穿越故障时，电网电压的升高会导致逆变器交流侧电压的抬升，一般最高会到 1.3 倍的额定电压。对于直流转交流的一级电路，在没有第二级直流转直流的稳压电路作用时，当电网交流电压升高，直流侧电压也会随之升高，从而偏离组件的最大功率点，使得输出功率下降，影响稳定运行；直流侧电压若不抬升，则会出现交流电压高于直流电压，可能会产生反灌等风险。

| 电网低电压穿越故障引发设备安全问题

2020 年东北地区某电站，就出现过弱电网下部分逆变器低电压穿越失败，导致设备损坏的事故。事故起源于电网发生的相间短路故障，导致 AB 相电压发生畸变，场站内的逆变器低电压故障穿越失败发生停机，同时因其自身的控制原因，发生逆功率导致设备发生损坏。电站 40 个子阵中约 35 个子阵发生类似问题，导致了为期两周的停机事故，损失发电量约 3%。



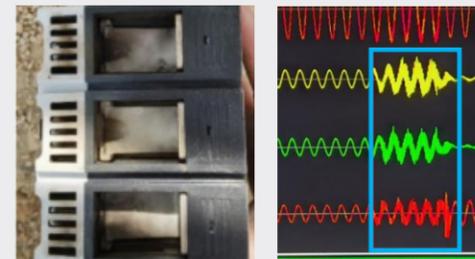
› 低电压穿越故障波形

| 低 SCR 下谐波控制差引发的设备安全问题

国内出现多例谐波大导致线路跳闸 / 设备损坏等故障问题，特别是分布式电站项目，由于本地负载多，谐波问题更加突出；

案例 Case

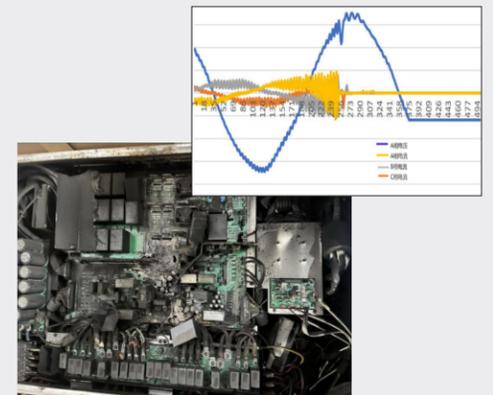
华南某项目，上午发现集电线下某厂家逆变器出现约 100 台告警且存在箱体盖板鼓起现象，集电线箱变低压侧塑壳断路器大多数均跳开，查看箱变低压侧塑壳断路器发现有拉弧痕迹；排查发现 35kV 电网上有高次谐波和尖峰电压产生。



› 华南某光伏项目故障现场图

案例 Case

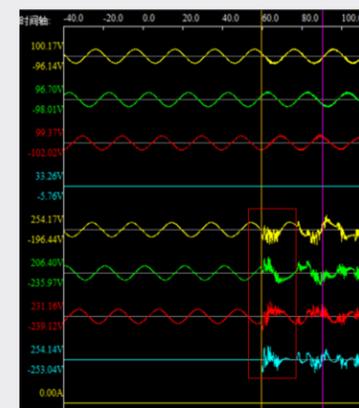
浙江某分布式电站项目，逆变器并网谐波大，尖峰电压高，逆变器 AC 防雷的器件批量损坏，并引起上层箱变跳闸，设备损坏。



› 浙江某项目设备并网谐波大，设备损坏

案例 Case

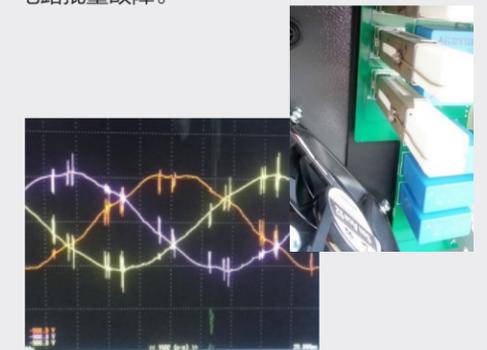
西北某光伏项目，引起 35kV 侧谐波振荡，导致电站部分电压互感器等设备损坏，线路跳闸。



› 西北某光伏项目故障波形图

案例 Case

江苏某分布式电站项目，电网有一定背景谐波，逆变器控制和谐波耐受能力差，内部 LC 滤波电路批量故障。

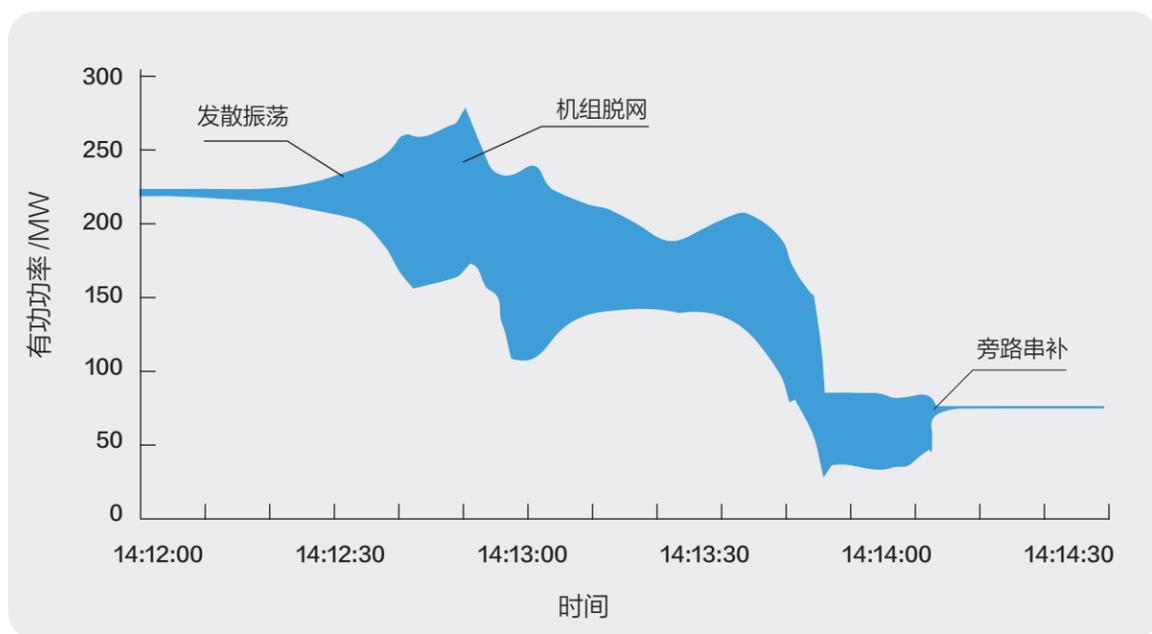


› 江苏某项目谐波耐受能力差，内部 LC 滤波电路批量故障

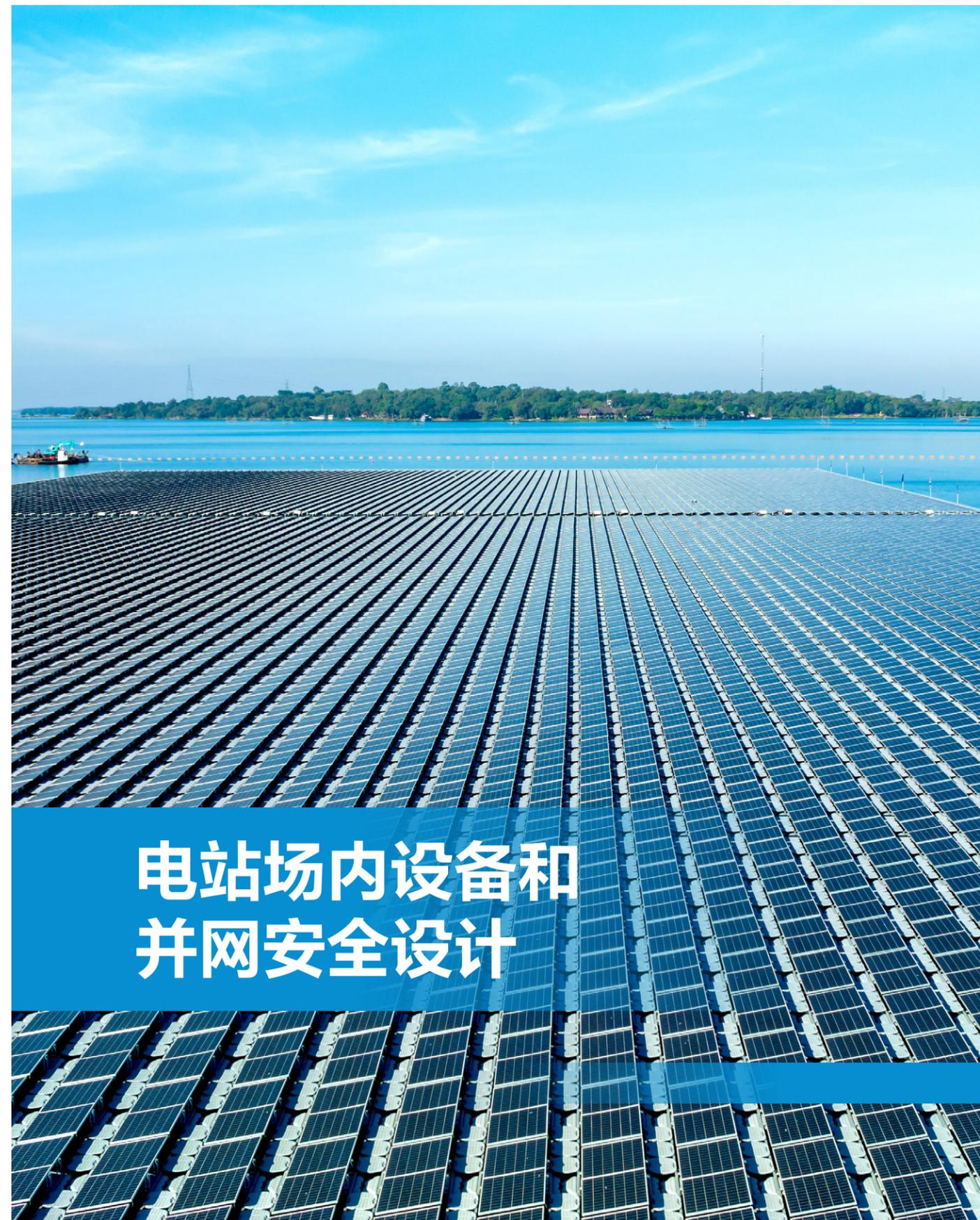
逆变器并网设备、SVG 设备控制谐波能力不足，引起设备关机、其他系统振荡问题也多次发生，这对于光伏并网设备在不同电网工况下的谐波耐受能力，谐波抑制能力提出较高的要求。

宽频振荡导致的设备安全问题

随着新能源比例的不断提高，电力电子设备之间及其与电网之间由于多种功率调节设备的共同作用，可能在更宽的频带上产生弱阻尼甚至负阻尼现象，引发电气量随时间周期产生波动，从而导致宽频振荡问题。大规模新能源并网后，由于电力电子设备存在多种控制模式，系统振荡问题将更加复杂。



河北沽源某风电场功率振荡



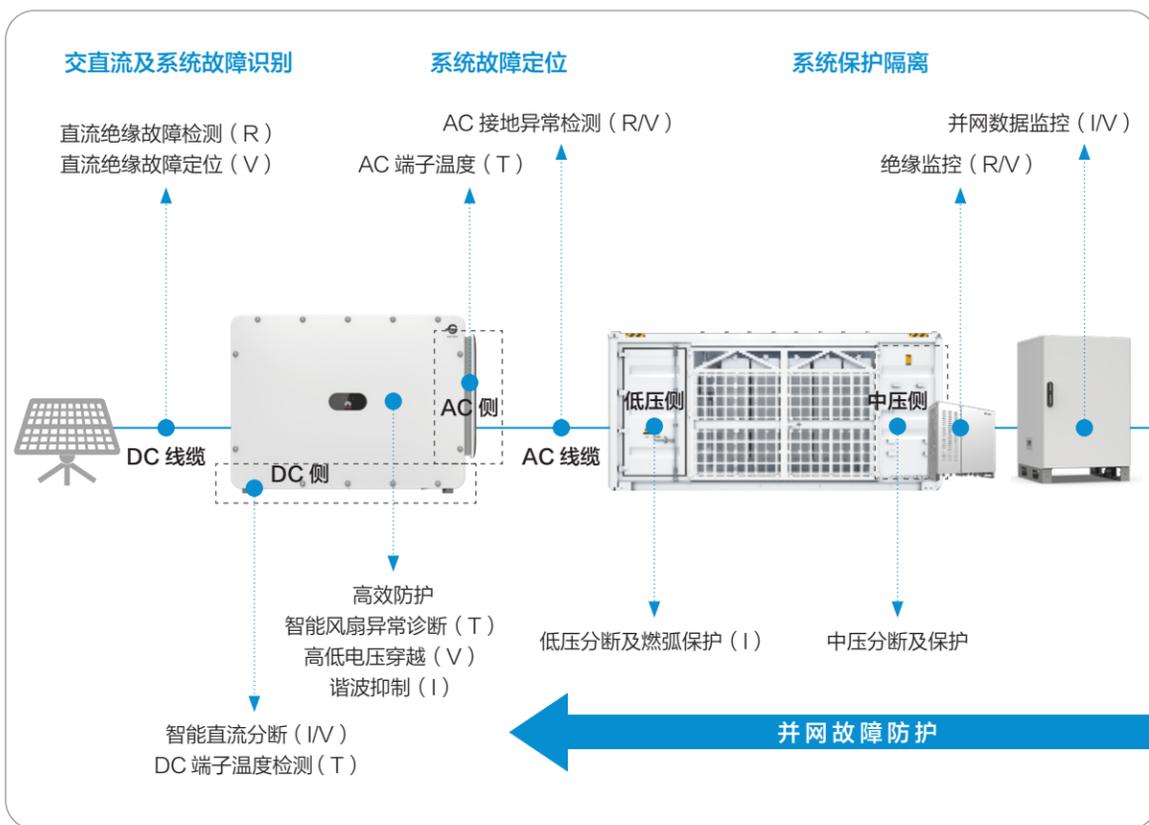
电站场内设备和 并网安全设计

01 安全设计理念

光伏电站电气故障具有形式多样、原因复杂的特点，发生电气安全事故的原因也不仅存在于设备本体，还需要考虑设备并网运行后，来自电网的故障扩散。从系统角度，做到安全规划、设计安全、设备安全、建设安全，并网运行安全，杜绝安全事故的发生。

02 光伏电站电气安全设计框架及技术

在 2023 年通过数字化、智能化手段提升系统安全的基础上，2024 年进一步延伸安全特性，增加了智能绝缘监测防护、和面对电网故障而维持自身设备安全的防护功能，从而保证对内对外均可以实现光伏电站的安全稳定运行。



基于电流、电压、阻抗、温度 (IV/R/T) 等数据做全面安全诊断

电站场内设备安全

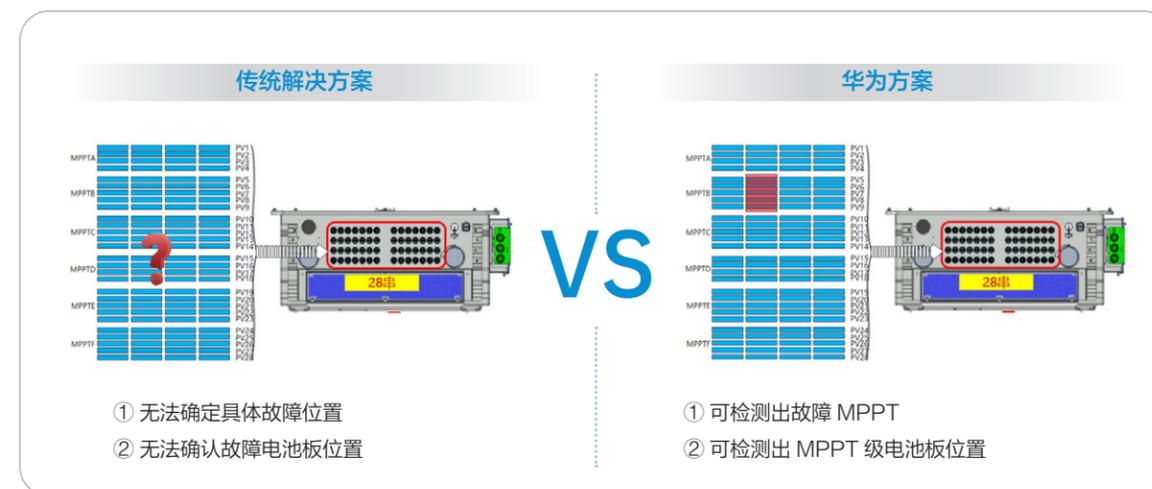
绝缘监测与定位技术

绝缘失效是光伏电站中十分常见的故障，尤其在海光、水光、山地及南方高温高湿场景下绝缘问题更加突出。

根据 NB 32004 规范的 7.10.1 条方阵绝缘阻抗检测要求，与不接地光伏方阵连接的逆变器在系统启动前测量光伏方阵输入端与地之间的绝缘电阻，如果阻抗小于 $U_{maxpv}/30mA$ (U_{maxpv} 是光伏方阵最大输出电压)，逆变器必须上报告警。此外，如果是非电气隔离的逆变器还要求限制接入电网。

光伏逆变器在系统启动前均会按照该要求进行一次对地绝缘检测，当出现绝缘故障时，对应的逆变器会上报告警，绝缘故障可以定位到对应的逆变器。但由于逆变器不能进一步判断出具体的故障位置，因此，故障点查找需要人工完成，不但要考虑运维检修人员的安全，随着光伏逆变器功率增大、组串数量增加，故障排查和定位的难度和时间也成倍上升。

华为通过数字化、智能化手段，采用绝缘监测与定位技术，在逆变器检测到对地绝缘阻抗低时，自动启动绝缘定位功能，通过智能感知电压的变化，自动定位识别到故障点所在的 MPPT 和故障点在组串中的位置，大大缩短了故障定位时间，在有效保护业主资产和人身安全的前提下，指导现场运维人员，通过点对点的二次鉴定故障、消除故障，有效解决光伏场地大、设备多、故障查找难，消除故障更难的痛点。



绝缘监测方案对比

北京鉴衡认证中心协同华为及相关企业已将该特性写成规范和认证。绝缘定位分级按检测定位范围分为子阵级、逆变器级、MPPT 级、组件级。

等级	标准	定位精度 %	成功率
L1	子阵级：定位到子阵	100	100%
L2	逆变器级：定位到逆变器	100	100%
L3	MPPT 级：自动定位到 MPPT	100	100%
L4	组件级：自动定位到故障 MPPT 和故障点	± 2 片组件	100%
L5	预留	预留	预留

绝缘监测与定位技术分级标准



2024 年华为获得北京鉴衡认证中心颁发的首张绝缘阻抗检测及定位性能最高 L4 等级认证证书

注：设备本体功能结合现场操作，实现组件级结果

智能端子检测技术

传统方案中，逆变器的直流端子固定在逆变器外结构件上，端子尾部通过线束走线，经直流开关连接到 PCB 板上。传统方案在设计、制造上相对简单，需要直流端子逐一穿孔、定位、紧固，绝缘件固定后人工插入 PIN 针，生产效率低，且容易出现插入不到位的问题；一旦端子处产生虚接、损坏等，将在连接异常处发热，直到异常发热损坏绝缘或导体热熔产生电弧造成事故扩大，这时逆变器才会检测到异常信号，但此时为时已晚，不但会造成设备本体损坏，可能导致连接线缆烧坏，甚至引起火灾，造成设备不可估量的损失。

为了解决直流端子插接不到位、压接不良、基础不均匀沉降或腐蚀等因素导致的接触不良，产生的异常温升烧坏设备等事故，华为创新性地采用端子上板设计，使用定制的 PCB 电路板，将端子插入其中，通过波峰焊焊接固定，免除人工插 PIN 针和穿线，规避人工穿线不到位导致的直流端子插接不牢的风险，并减少电流引接环节，从设计、生产、制造上保障高可靠性。端子上板后，可实现在端子通流点附近增加 NTC 传感器，就有了将数字化、智能化融入端子检测的基础——数据采集，继而通过 PCB 板上的信号链路进行数据传输，最后经由芯片进行信号检测、

数据计算与处理，实现智能端子温度检测。智能端子温度检测可实时检测端子温度，当遇到端子插接不到位、金属芯压接不良、外力导致交流端子、直流端子温度出现异常时，逆变器通过判断并启动保护，避免故障进一步恶化和扩散，从而保护电站设备和财产安全。

智能端子温度检测现已形成规范，按其保护范围和精度，规范将其总共分成 4 级，分级如下。

项目	等级	L1	L2	L3	L4	L5
检测范围	检测类型	直流输入端子	直流输入端子	直流输入端子和交流输出端子	直流输入端子和交流输出端子	
	采样点数	60% 端子数	80% 端子数	80% 端子数	100% 端子数	
	电压范围 ¹	全电压范围	全电压范围	全电压范围	全电压范围	
	电流范围 ²	全电流范围	全电流范围	全电流范围	全电流范围	
	温度范围 ³	全工作温度范围	全工作温度范围	全工作温度范围	全工作温度范围	
温度输出分辨率		MPPT 级	MPPT 级	MPPT 级	MPPT 级	预留
测量温度误差		± 5℃	± 4℃	± 3℃	± 2℃	
保护情况	保护温度精度	± 5%/ ± 5℃	± 5%/ ± 5℃	± 2%/ ± 2℃	± 2%/ ± 2℃	
	保护温度一致性	95%	96%	97%	98%	
	保护时间精度 ⁴	± 5%/ ± 5s	± 5%/ ± 5s	± 2%/ ± 2s	± 2%/ ± 2s	
	保护时间一致性 ⁵	95%	96%	97%	98%	
	准确率	100%	100%	100%	100%	

注 1：电压范围，指功率转换设备的直流输入电压范围，交流输出电压范围；

注 2：电流范围，指功率转换设备的直流输入电流范围（0~最大输入电流），交流输出电流范围（0~最大输出电流）；

注 3：温度范围，指功率转换设备的工作温度范围；

注 4：精度 = (实测保护值 - 预期保护值) / 预期保护值 * 100%；

注 5：一致性 = STDEV【(精度 1 - 平均值) / 平均值；(精度 N - 平均值) / 平均值】。

端子检测综合等级评定表



2024 年华为获得北京鉴衡认证中心颁发的首张智能端子温度保护性能最高 L4 等级认证证书

智能组串分断技术

华为智能组串分断 (SSLD-TECH) 可实现直流侧的主动分断与精准的组串级保护。该技术由逆变器检测与逻辑判断系统、脱扣控制系统、可脱扣直流开关系统三部分构成，可脱扣直流开关系统是在传统开关基础上，增加了储能模块、控制指令接口、状态反馈接口、复位按钮装置，创新地采用“电子式脱扣器”（一般过流保护使用的是电磁脱扣器、热脱扣器）。该技术可精准捕捉电流、电压等参数的细微变化，基于一整套逻辑及算法，可有效判断并保护组串反接、电流反灌、母线短路故障。

2021 年华为获得由北京鉴衡认证中心颁发的首张智能组串分断功能最高等级 (I 级) 认证证书。

等级	I 级	II 级
电流	设定值 ±2%	设定值 ±5%
时间	设定值 ±2%	设定值 ±5%

分断精度等级划分标准

2023 年华为智能组串分断 (SSLD) 分别获得 Intertek 天祥和 DEKRA 德凯颁发的全球首个智能组串分断符合性申明 CB 证书和全球首个符合断路器规范的智能组串分断证书。两家机构认证华为智能组串分断符合 IEC 60947-2 国际标准。

箱式变电站电弧防护技术

光伏电站交流侧防护相对成熟、相关标准也相对完善，但当某一塑壳断路器 (MCCB) 下级出现短路故障分断时，由于喷弧而影响到其它低压支路或者低压母线，有可能造成事故扩散或加重。

基于上述问题，华为箱式变电站对低压柜系统设计做了以下几点优化：

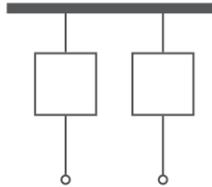
▶ 塑壳断路器增加带消游离格栅的灭弧罩，通过降低电弧温度实现灭弧，并减少喷出塑壳断路器本体外的导电粒子的数量，实现故障分断零飞弧扩散；




STIEE 检测报告			
检测项目及检测要求		测量或观察结果	判定
产品名称: 塑料外壳式断路器		#01	合格
型号: 3200			
规格: 4P 1E: AC300V In: 400A			
额定极限短路分断能力			
试验电压(有效值): 1.05×800 ^{TMV}	872		
试验电流(有效值/峰值): 50105 ^{TMKA}	50.4/106		
功率因数: 0.25 _{cos}	0.25		
操作顺序: 0-t-co (t≥3 min)	0-t-co (t=3 min)		
飞弧落距: φ0.80 mm	φ0.80		
飞弧距离: 上下: 0.0 mm	0.0		
左右: 0.0 mm	0.0		
前后: 0.0 mm	0.0		
预期电流示波图编号			
"o" 试验示波图编号			
"co" 试验示波图编号			
"co2" 试验示波图编号			
断路器不应有过分损坏的迹象，也不应危及操作人员，而且不应产生持续燃弧。各极间或极对框架的网路、飞弧故障、检测电路中的熔断器不熔断。			
		符合要求	

带消游离格栅的灭弧罩

▶ 低压柜按照 GB 7251-12-2013 (IEC 61439-1) 《低压成套开关设备和控制设备第 2 部分: 成套电力开关和控制设备》要求实现 Form2b 及以上的内部隔离: 功能单元和进线端子与主母线隔离, 或者对主母排及分支排进行必要的绝缘包裹防护;

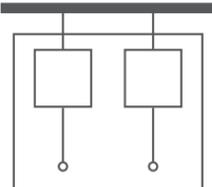


Form 1 内部无分隔



某电站现场事故照片

VS



Form 2b 母线与功能单元隔离



华为箱变低压柜短路分断试验后照片

低压燃弧防护方案对比

华为箱式变电站通过了 IEC 61641 IAC-C 级燃弧防护，做到 MCCB 故障分断零飞弧扩散，不影响低压柜其它支路正常运行，提升箱变整体可用度。

传统箱式变电站采用中压向下泄弧方案，该方案需要现场中压室下部电缆沟封堵，实现中压向下泄弧，增加现场施工难度和成本。如果封堵不良，会导致向外喷弧，引发人员安全风险。华为智能箱式变电站首创中压向上泄弧设计，并通过 IEC 62271-202 IAC-A 级试验，提升中压系统和人员安全，并实现泄弧通道完全与地基解耦，系统 BOS 节省约 0.91 分 / W (给定条件下) 。



传统中压向下泄弧与地基强耦合

VS



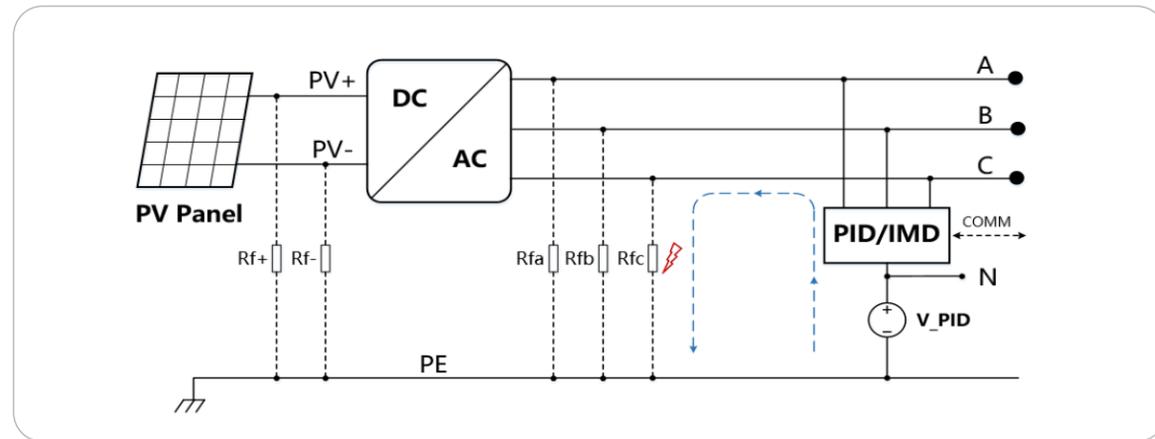
华为中压向上泄弧，完全与地基解耦

泄弧通道方案对比

箱式变电站智能监测技术

与 TN/TT 系统不同，在 IT 系统中有源导线与地绝缘。对系统绝缘电阻的监测，可以有效反映系统、设备运行状态，进行早期预警或跳闸，以有效保护设备和人身安全。

华为自研抗电势诱导衰减（PID）模块兼容绝缘监测装置（IMD）功能，实现光伏系统在线智能绝缘监测功能，交直流侧发生绝缘故障时可以可靠预警或告警，具备绝缘阻抗告警联动对应箱变绕组的 ACB 功能。避免了 IMD 设备与 PID 设备运行之间的干扰以及运行协调问题，实现了最佳的系统集成及简化。



› PID+IMD 系统框图

同时，为了应对绝缘故障引发的温度升高，华为智能箱式变电站实时监测中压电缆终端温度，进行早期预警，保障中压连接安全。



› 中压电缆温度检测示意图

电站并网安全技术要求与设计

新能源随着渗透率的提升，接入过程中遇到了多种发展挑战，逆变器的并网安全技术要求也在逐步提高。

华为逆变器在每代产品开发之初就对并网特性进行全场景定义，确定要达成的电网适应边界条件和要求：包括极弱电网 SCR=1.05 适应能力、特高压交流串补 0.7 输电适用能力、特高压直流输电高穿有功不降额支撑能力。这要求逆变器测得准和控得稳。

华为将通讯行业积累多年的软件算法、弱电网运行经验引入光伏行业，建立了精准的不同类型的并网场景、电站设计、电网运行工作点的数学模型，利用大数据训练最优并网控制算法，从而在各种恶劣的电网波形下能保证逆变器持续并网发电、不脱网。借助创新算法和海思自研芯片技术，利用智能控制器的高速处理能力、高采样和控制频率、控制算法等优势，采用先进的谐波抑制等算法主动响应电网的变化，使光伏电站接入电网的总谐波更优。

在逆变器测得准上，我们提供快速锁相技术、电网态势感知技术、谐波主动分析技术；在控得稳上，从阻抗重塑算法、串补适应算法支撑系统功率稳定，从振荡抑制算法、电压尖峰抑制算法有效支撑可靠高低穿控制，从虚拟 APF 技术、自适应补偿技术优化谐波控制和多机并联谐波抑制；从双级架构拓扑设计上，支撑高穿有功不降额。



› 智能并网算法

电站并网安全技术要求变化 – 并网支撑

新国标主动适应

华为持续跟踪和参与光伏场站、逆变器并网技术要求，第一时间进行电网要求响应和支撑。GB/T 19964 标准 2005 年首次被提出，历经 20 年的发展，随着新能源渗透率的提升，电网对于新能源接入并网提出更高的要求。

2014 年由中国电科院与青海电科院合作实施，华为通过了兆瓦级电站现场零电压穿越试验、低电压穿越测试、频率扰动试验和电能品质测试，成为全球第一家通过 GB/T 19964-2012 电站现场零电压穿越认证的逆变器品牌。

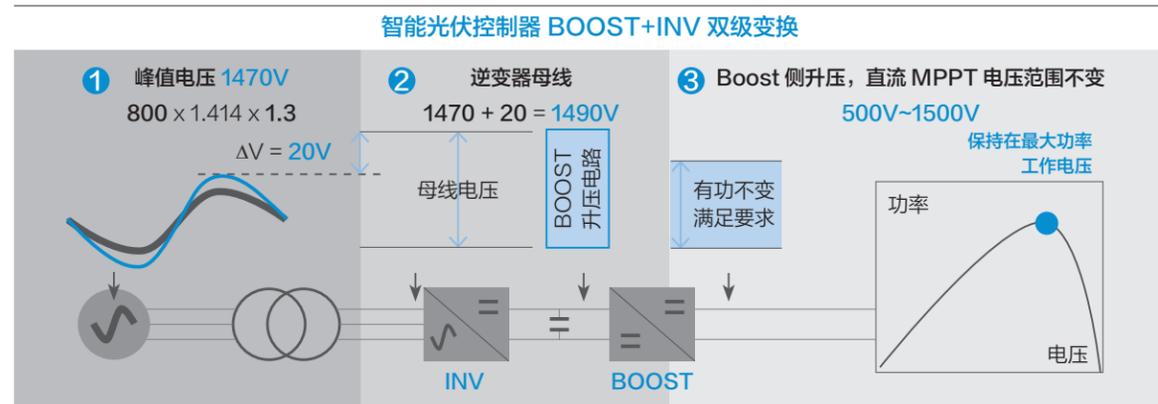
2020 年华为获中国电科院颁发的首个 GB/T 37408-2019 新国标报告证书，华为逆变器成为行业内首款通过新国标考核的产品；同年，携手中国电科院，在业界率先推出光伏逆变器弱电网适应性特性，保障光伏电站在极弱电网情况下的稳态暂态稳定性，避免连锁故障，提高新能源消纳裕度。

2024 年 GB/T 19964《光伏电站接入电力系统技术规定》第三版正式发布执行。基于多年技术积累和储备，华为快速执行新标准切换工作，主力 SUN2000-300KTL-H0 机型已经完成电科院相关测试，是首个完成新国标切换的 300kW+ 大功率组串式逆变器。



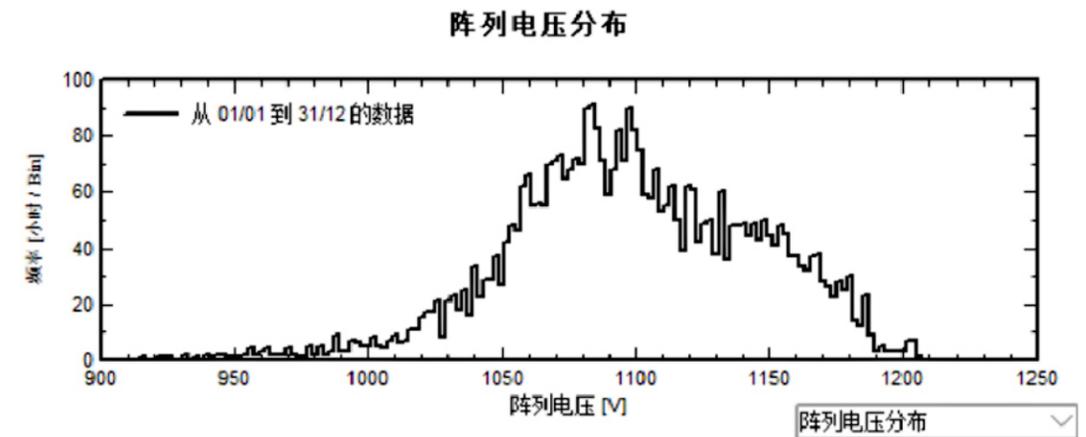
光伏并网标准（电网码）修订历史回顾

针对新国标高电压穿越，连续高低电压穿越，提高运行适应性等技术要求，华为智能光伏组串式逆变器的双级变化架构，可以在电网高穿时保障母线电压与 PV 电压隔离，保障即使在早晚/夏季低 MPPT 电压时，全 MPPT 范围的高电压穿越支撑，有效防止高电压穿越过程中直流侧有功降额/电网反灌问题。



智能光伏控制器双级架构，高穿有功不降额

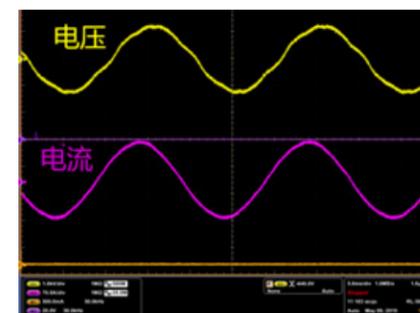
光伏方阵典型 PV MPPT 输入电压分布，从下图可以看出光伏组件全年 MPPT 典型电压范围在 950V~1200V 左右，有较宽的输入电压范围。



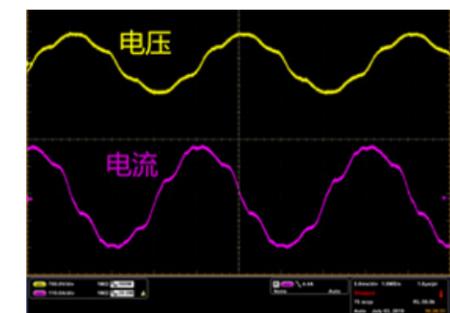
青海共和某电站仿真结果（26 块组件 / 串，72 片电池 / 组件）

主动谐波抑制技术

华为逆变器采用智能谐波优化算法实时监测电网谐波状态，构建逆变器对电网大数据的镜像掌握；采用轻量级智能融合技术和微嵌入式智能算法，能快速训练逆变器电流控制算法结构和参数，保障并网控制最优解；基于学习参数，通过宽频谐波控制器，最大限度抑制输出电流的谐波含量。华为逆变器在良好电网下的输出电流 THDi 小于 0.5%，在恶劣电网下的输出电流 THDi 小于 1%，明显优于普通逆变器的谐波水平。



华为逆变器 (THDi<1%)



普通逆变器 (THDi<3%)

智能稳定性算法，基于大量电网正常运行数据和各种异常状态下电网的数据，建立数学模型，融合智能自学习算法，通过大数据分析、训练智能并网算法，特别的针对弱电网场景下，增加了阻抗重塑技术，大幅提升控制算法的鲁棒性，保障逆变器在弱电网、串补、HVDC 等复杂并网环境下的稳定性。华为逆变器可以在 SCR ≥ 1.05 的弱电网下满载稳定运行。

	华为逆变器	业界水平
弱电网支持最小短路容量比（满载）	1.05	1.5
SCR=10 电网条件下电流谐波 THDi	≤ 0.5%	≤ 1%
SCR=1.5 电网条件下满载电流谐波 THDi	≤ 1%	≤ 3%
SCR=1.2 电网条件下满载电流谐波 THDi	≤ 1%	无法开机

谐波能力对比

华为逆变器采用智能并网算法，包括智能谐波优化算法、智能稳定性算法和智能故障穿越算法，大幅提升逆变器的并网性能，更好地满足电能质量要求，更好地适应复杂并网环境，更好地满足故障穿越和中长期电网适应要求，支撑高比例新能源。

宽频振荡抑制技术

宽频振荡按照频率段，分为 0.1~2.5Hz 的低频振荡和 2.5Hz 以上的次 / 超同步振荡。

针对低频振荡问题，同步机组一般在励磁系统中加入电力系统稳定器（PSS），形成附加阻尼控制以提高系统阻尼，从而抑制低频振荡。华为方案借鉴这一原理，通过在智能电站控制器（SPPC）中引入低频振荡 POD 功率抑制技术，使系统具备类同步机组 PSS 功能，输出附加阻尼控制功率，从而达到抑制 0.1 ~ 2.5Hz 低频振荡的效果。

针对次 / 超同步振荡问题，华为智能光储解决方案采用自适应虚拟阻抗技术，通过自学习动态地调整电站本身的电气特性来匹配电网特性，使逆变器和 PCS 主动调节自身阻抗，改变输出阻抗的幅频相频特性，提高稳定性，避免在次 / 超同步频段出现阻尼不足的问题引发功率振荡。

电站并网安全技术设计 - 构网支撑

为有效应对电网挑战，华为基于其在光伏与储能领域，尤其是并网友好性技术上的长期研究与深入实践，推出了智能组串式构网型储能解决方案，并带来了一系列技术创新，在业界具有开创性意义。具体内容可以参考《智能光储发电机白皮书》，这里不做赘述。



安全应用 & 实践

01 场内设备安全应用 & 实践

智能组串分断技术实践——流域高原场景

流域高原场景，具有高寒、高海拔、低气压的特征，且因为地势的崎岖导致子阵的分布较为分散。高海拔中空气稀薄的环境会导致电气设备的绝缘强度降低，同时低温和低气压也会使设备的可靠性降低，子阵分散叠加环境恶劣，使得故障出现后的抢修和维护变得更加困难，这就对站内设备的主动安全能力提出了更高要求。

中国西南流域某水光互补电站，该电站海拔约 4600m，总容量 1GW，全部采用华为逆变器，且具备智能组串分断的功能。该项目自 2023 年 6 月顺利并网后持续稳定运行。据统计，2024 年第一季度期间共计帮助客户发现 5893 次电流反灌告警或分断，规避了多起可能引发安全事故的问题，充分保障整个电站的直流侧电气安全。



› 某水光互补电站

绝缘监测与定位技术实践——海光 / 水光场景

绝缘问题在海光 / 水光这种高湿高盐雾的场景下尤为突出，空气湿度过高以及高盐雾带来的腐蚀都会导致线缆绝缘性能下降，进而引发逆变器告警无法启机，给电站的收益和运维都带来了很大的挑战。山东某漂浮电站位于沿海滩涂，共计 1600 台逆变器，在建运行初期，因为腐蚀和线缆破损等问题多次触发逆变器绝缘阻抗低等故障报警，单月报警数最高达 17685 次，平均每天约 1/3 的逆变器触发告警。根据告警信息，运维人员要乘船到逆变器所在位置，对比组串线缆进行逐一排查，这给现场的运维人员带来了极大的困难和挑战。



› 漂浮电站场景

传统运维过程中故障排查需检查超过 28 个组串，超过 56 根线缆；华为通过首创的绝缘监测与定位技术，精确定位绝缘异常，只需要排查 4 到 5 个组串，小于 10 根线缆，提升 6 倍的故障定位精度，降低发电量损失，提升运维效率。

修复建议

1. 检查光伏阵列输出对保护地阻抗，如果出现短路或绝缘不足请整改故障点。
2. 检查设备的保护地线是否正确连接。
3. 如果确认在阴雨天环境下该阻抗确实低于设定保护点，请设置“绝缘阻抗保护点”参数。

定位状态:成功。当前绝缘阻抗值:0.017MΩ，可能故障组串:MPPT3，可能短路位置:92.8%。请参照用户手册将故障组串逐个接入逆变器进行排查。



› 精准定位到 MPPT 的故障点位置

› 高温高盐雾测试

智能端子检测技术实践——沙戈荒场景

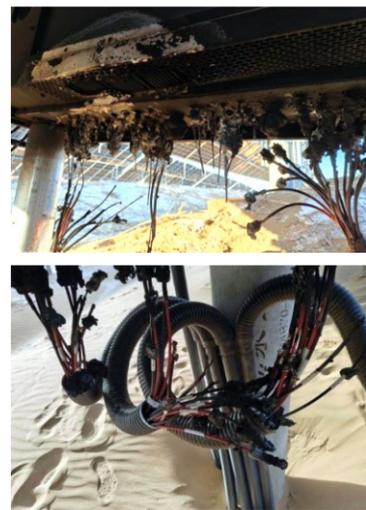
端子起火是沙戈荒场景下常见的问题之一，也是影响电站安全运行的重要因素之一。在内蒙古库布奇沙漠中某电站充分印证了端子温度检测的重要性，该电站内装有华为 SUN2000-300KTL-H0 逆变器与行业内某厂家 300kW+ 逆变器，由于该厂家的设备不具备端子温度检测功能，在建设及运行阶段发生多起事故。例如：

▶ **逆变器端子烧毁：**逆变器内部一切正常，线缆过热烧毁。经现场技术专家与运维人员分析，因为端子压接不良，接触阻抗过大，发热导致烧毁。为避免这种事故再次发生，客户需要对站内施工情况进行重点排查，查看是否有压接不良、虚接等情况，如发现，第一时间整改。

▶ **逆变器直流侧烧毁，内部炸机：**多台逆变器出现线缆与端子严重烧毁，逆变器内部炸机的情况。现场人员分析原因为，外部端子过温起火烧毁，导电粉尘进入内部，引起短路炸机。



› 端子烧毁



› 逆变器端子过温起火引发炸机



在同一电站内的华为 SUN2000-300KTL-H0 逆变器，因为具备端子温度检测的功能，在同时段的运行过程中避免了很多类似问题的发生。根据站内人员反馈，自 2024 年一月到五月期间，共计拦截交流端子异常 64 条，拦截直流端子温度异常 119 条，通过智能化手段保障逆变器的安全运行。

交流安全应用实践

交流侧的安全同样至关重要，华为依托于电弧防护与绝缘监测技术，全范围保障电站交流安全与运维安全，并在多个项目上进行应用实践。例如：

墨西哥某 144MW 光伏电站，西班牙某 26MW 光伏电站，越南某 100MW 光伏电站等均采用华为智能箱变，得益于全方位的电弧防护技术，在故障分断时实现零飞弧扩散，自并网以来未出现任何安全事故；并且通过预集成、预测试，无需现场内部接线和配置信号点，实现快速交付。



› 墨西哥 144MW 沙漠光伏项目



› 西班牙 26MW 光伏项目



› 越南 50MW 光伏项目

为进一步加强客户电站安全，华为智能绝缘监测（SmartIMD）功能通过软件 license 的形式加载于 PID 模块，实现 24 小时不间断的对地绝缘阻抗监测功能，同时不影响 PID 功能的正常使用。新加坡某储能项目配备华为智能箱变，因为 SmartIMD 功能的存在，多次通过告警或者停机来避免因绝缘阻抗低导致的对地短路风险，一方面充分保障了电站交流侧的设备安全，另一方面帮助客户节省了绝缘监测设备的硬件成本。

02 并网安全应用 & 实践

| 并网支撑实践

随着电网的稳定性逐步走低，反馈到各并网节点的 SCR 值也在持续下降，这就要求逆变器需要在面对弱电网时，依然能够保持很好的适应性。华为逆变器在并网支撑方面充分地考虑了弱电网场景，从故障穿越到谐波、振荡抑制等能力上，均有很好的表现。在前述 2.2.2 节的光伏电站案例中，区别于其他家逆变器在弱电网下故障穿越失败，造成大范围的切机甚至损坏，华为的组串式逆变器在相间短路过程中，因为更优异的弱电网适应性，顺利完成故障穿越，持续稳定运行。

| 构网支撑实践

华为智能光储解决方案在电网稳定技术上又一次突破，从并网支撑走向了构网支撑。沙特红海项目就是该方案最靓的一张名片，沙特红海项目是“沙特阿拉伯 2030 愿景”策划的重点基础设施项目，其由 400MW 光伏与 1.3GWh 储能配合构成电网，备用少量燃气机组，该系统对光储构网与维持电网稳定有极高要求。华为提供解决方案，并于 2023 年 7 月份完成交付。

红海作为一个光储协同构建的电网，整体运行逻辑以及电网的性能指标等都需要进行详细设计与仿真。华为凭借自身在设计、仿真以及实验平台的能力，利用近两年时间，帮助完成客户完成相关工作，包括但不限于光储协同构网，电网 SCR 设计，能量分发逻辑，电网控制的稳态设计，暂态设计，一二次调频调压，PV/BESS/SVG 动态调压，减载后的电网频率、电压控制，1000+PCS 同步黑启动、电网内多开关协同，同步与异步设计等，并在实际环境中验证，达成稳定运行目标。



› 沙特红海新城



结语

目前，光伏发电在电力装机中的占比仅次于火电，已成为排名第二的次主力电源。同时，光伏和风电高比例接入及“超速”发展积留的问题也开始显现，制约产业发展的矛盾和问题趋于纵深、多样。光伏发电具有间歇、波动、受控程度低等方面的劣势，此类电源的高比例接入势必对电网的供电安全构成威胁，提高光伏发电电网友好性是行业需要优先解决的问题；另外，近些年，光伏发电电气和结构安全事故时有发生，已成为产业健康发展的“拌脚石”，提升电站主动安全能力和本质安全度已迫在眉睫。

过去近二十年，依靠科技进步，光伏发电实现了平价和低价上网，未来，更需要依靠技术进步，特别是数智化手段，破解制约产业发展的矛盾和问题。近几年，华为率先、序列化地推出了旨在提高电网友好性和电站主动安全能力的技术，取得了较好的应用效果并得到了行业的认可。

总体看，产业超大规模发展的基础还需要进一步夯实，某些方面的技术有待填补或提升。下一步，需要产业协同，按照新质生产力的发展要求，一是做好产业发展的顶层设计；二是做好底层支撑技术的开发和应用，为产业的高质量发展打好基础。

参考资料

- 1 辛保安，《新型电力系统与新型能源体系》，2023.
- 2 华为技术有限公司，《智能光储发电机白皮书》，2023.
- 3 国家能源风能太阳能仿真与检测认证技术重点实验室、北京鉴衡认证中心、华为技术有限公司联合发布，《光伏方阵逆变器电气安全设计 - 智能组串分断技术白皮书》，2021.
- 4 北京鉴衡认证中心、华为技术有限公司联合发布，《光伏电站智能安全技术白皮书》，2023.