

智能光伏十大趋势

光储融合，全面智能

加速光伏成为主力能源，让绿色电力惠及千行百业、千家万户



2022年12月



前言

自2016年《巴黎协定》正式进入实施阶段以来，能源清洁化转型方兴未艾，尤其是近两年，碳中和已成为全球共识，超过140个国家和地区提出承诺，将引发新一轮的能源革命，加速能源清洁、低碳化转型。落实“两个替代”（能源生产清洁替代和能源消费电能替代）将成为实现碳中和的重要举措。

发电侧清洁替代：

根据2022年英国独立气候智库Ember发布的报告显示，为实现全球温控1.5℃的目标，到2030年，风能和太阳能发电量需保持每年20%的增长速度。2021年，全球风光发电量占比首次突破10%，未来仍然有很大的发展空间。因此，全球主要区域都提出了未来清洁能源发展规划。今年5、6月，中国和欧洲分别颁布了《“十四五”可再生能源规划》与《Repower EU》，提出了更加明确的新能源发展规划。正如IRENA 2022对未来的预测，预计2030年光伏装机将达到5200GW，2050年达到14000GW，成为绝对的主力能源。

消费侧电能替代：

根据IRENA预测，2050年电力在全球能源消费占比将超过50%，替代传统化石能源，成为消费主力。以电代煤、以电代油、以电代气，电气化比重将大幅提升。另外，随着光伏发电走进千行百业、千家万户，向着光储充用全场景融合发展，也加速了电力在消费侧的比重。未来，零碳工厂、零碳建筑、零碳园区甚至零碳城市也将成为现实。

然而，在光伏产业高速发展的同时，依然存在很多的挑战要去解决，最终让光伏成为最经济，最可靠的主力能源：

第一，应持续降低光储系统的度电成本

光伏产业的高速发展，离不开度电成本的持续降低，如何通过技术创新持续优化度电成本，让光储系统的部署在更多的地区与场景实现商业闭环？

第二，要持续提升运营与运维效率

随着大型地面电站的规模越建越大，且一般多处于高海拔的戈壁、荒漠，甚至近海区域，给运维工作带来了较大困难；而分布式场景中，则面临点多量散、安全要求高的挑战。

第三，要让高比例光伏实现稳定并网与消纳

随着新能源占比的不断提升，给电网的稳定性带来了冲击。诸如澳洲、英国等多个新能源占比较高的国家和地区，都出现过由于新能源脱网导致的大规模停电事故。因此，如何在提升电网对于新能源消纳能力的同时，保持电网的稳定性，是需要业界共同面对的难题。

第四，安全发展是产业的基石

近年来，光伏与储能电站的安全事故时有发生，尤其随着光储设备功率越做越大，以及光伏上屋顶、储能进园区/家庭成为趋势，如何端到端地实现整个系统层面安全防护成为亟需关注的要点。

我们正置身于能源清洁化转型的大浪潮中，针对上述挑战，光伏的发展未来将走向何方，让我们共同探讨。



目录



趋势一	光储发电机	01
趋势二	高密高可靠	04
趋势三	组件级电力电子器件	06
趋势四	组串式储能	10
趋势五	电芯级精细管理	12
趋势六	“光储网”融合	14
趋势七	重构极致安全	17
趋势八	安全可信	25
趋势九	全面数字化	28
趋势十	AI增效	31

趋势一 光储发电机



► 背景

随着能源清洁化转型的发展，未来以光伏为代表的新能源将替代传统火力发电成为主力能源。

根据IEA预测，2022-2027年间，全球可再生能源装机容量将增长2400GW，其中，光伏将占有所有可再生能源新增量的60%，新增接近1500GW。2025年初，光伏发电将超越煤炭，成为全球最主要的电力来源。传统以同步发电机为主体的电力系统，将向高比例新能源、高比例电力电子装备的“双高”新型电力系统转变。然而，新能源的稳定并网与消纳却成为限制新型电力系统发展的主要瓶颈。

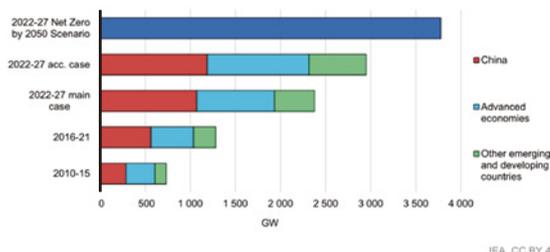
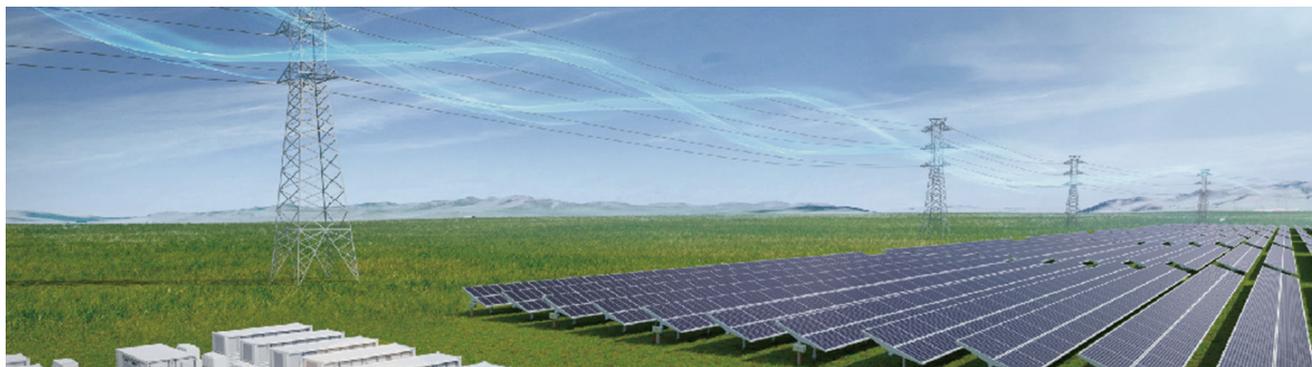


图1: Renewables2022
(来源: IEA Analysis and forecast to 2027)



当前电力系统通过涡轮机、同步发电机与多时间尺度储能，构建了以机械+电磁为基础的电力网络，具有一次能源可储、二次能源可控的特性。然而，随着新型电力系统向全面半导体化发展，将面临系统稳定性、功率平衡以及电能质量等多种复杂技术问题，全球高比例新能源区域已出现电网事故。

澳大利亚:

2016年9月28日下午，新能源渗透率达50%的南澳州发生强台风、暴雨，引起电网累计6次电压跌落，造成风电机组大规模脱网，导致全州长达50h的大停电事故。这是世界上第一起由极端天气诱发新能源大规模脱网导致的局部电网大停电事件，也成为澳洲电网不断加严并网标准的“导火索”，对澳洲发展新能源带来了一定的影响。

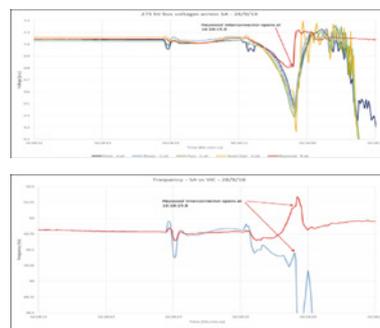


图2: 故障时频率崩溃与电压崩溃波形
(来源: 中国电科院, 可再生能源发电装备与电网的融合、互动与控制)

英国:

2019年8月9日下午5点左右，英国发生因风电脱网导致大规模停电事故。大停电起源于英格兰的中东部地区及东北部海域，最终造成英格兰与威尔士大部分地区停电，约有100万人受到停电影响。

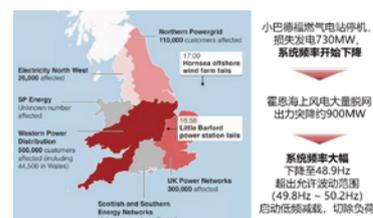


图3: 英国大停电事故分析
(来源: PSD 电力系统研究所)

中国:

截至2021年底，青海省风电装机896万千瓦、光伏装机1632万千瓦，占比分别为21.8%、39.7%，新能源总装机占比达61.5%，全国最高，但本省最高负荷仅1051万千瓦，电力外送需求强烈。其中，以100%输送新能源的青豫直流最具代表性。然而，因高比例新能源在直流双极闭锁后电压快速变化期间出现的无功反调问题，导致新能源场站暂态过电压超过1.3倍，成为制约青豫直流送出的主要因素。

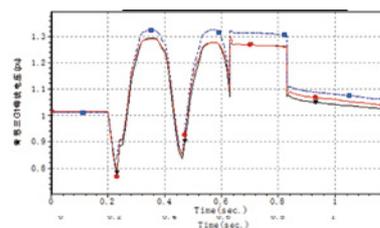


图4: 青豫直流近区暂态过电压问题

趋势

从全球新能源发展历程来看，不同渗透率阶段新能源接入面临的消纳瓶颈和关键技术挑战各异：

- 01 新能源渗透率 < 30%时，为保证系统供需实时平衡，并网地区的调峰调频灵活性资源需求急剧增加，由于可再生能源是在局部集中接入，灵活性资源不足带来的问题主要体现为局部地区的弃风弃光。

- 02/ 新能源渗透率30~50%之间时，电力系统运行场景更加多样化，新能源功率的波动性使得传统发电机组不得不快速调整出力适应平衡的需要，对大型煤电、热电联产等火电机组的调频调峰能力提出了进一步要求，同时电力资源需要通过在全系统内进行资源协调配置。
- 03/ 新能源渗透率水平50%~60%时，由于大型火电比例降低，系统强度不断下降，同步电网的惯性将大幅度下降，有功功率控制和无功功率控制的难度不断加大，造成系统频率和电压波动幅度增大，暂态稳定性问题突出，提高新能源电网友好性与配置一定比例的储能是提高新能源并网的重要措施。
- 04/ 新能源渗透率超过60%时，如大型新能源基地+特高压送出模式，受政策限制与成本因素，无法新建火电厂或高比例配置同步调相机，系统少同步甚至无同步电源支撑，传统新能源的控制逻辑已无法稳定并网。

因此，改变新能源控制模式，提高有功和无功控制与响应能力，主动缓解频率和电压波动，让光伏发电从Grid Following走向Grid Forming，将成为解决光伏并网消纳的重要举措。通过光储融合+Grid Forming技术，打造智能光储发电机，将新能源的控制逻辑，从电流源型控制转为电压源型控制，并具备强惯量支撑、瞬时稳压与故障穿越能力，让光伏发电从适应电网走向支撑电网，加速光伏成为主力能源。

► 应用探索

2021年，国网青海电力公司联合中国电科院、清华大学、浙江大学、华为技术有限公司成立专业研究团队，历时四个多月，开展《大规模储能支撑高比例可再生能源电力系统安全稳定运行研究》，全面系统地分析了电流型、电压支撑型等不同性能电化学储能支持复杂高比例交直流电网的机理特性和适应性，提出了电压主动支撑型储能（Grid Forming）优化功率分配和控制的策略，为释放新能源发电和直流输电能力提供了新的技术手段。

2022年，ACWA POWER、山东电建三公司、华为携手建设了全球最大的光储微网项目——沙特红海新城项目。作为全球首个100%使用新能源供电的城市，也是沙特王国2030碳中和愿景规划的重点项目。该项目规划建设400MW光伏、1.3GWh储能，完全由光储系统支撑电网，替代传统油机，为100万人口提供清洁稳定电力，助力沙特王国打造全球清洁能源和绿色经济中心，也成为面向未来，全球实现100%光储清洁供电的重要实践。

趋势二 高密高可靠

02

► 背景

近年来，传统化石能源的度电成本随着其资源枯竭和碳税的应用不断升高，而新能源经济前景却令人瞩目。根据IRENA分析，过去10年光伏的度电成本下降近10倍，已低于传统化石能源度电成本，而正是因为不断涌现的创新技术的驱动，加速了这一趋势的到来。

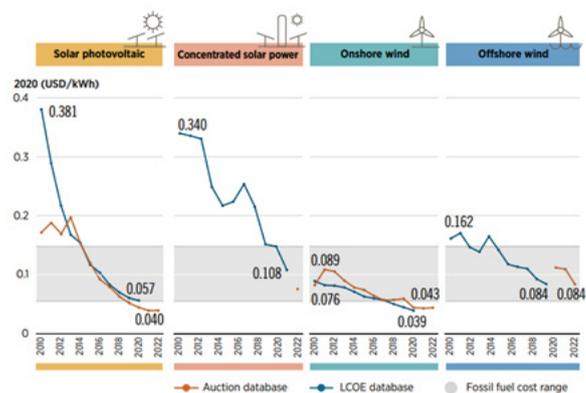
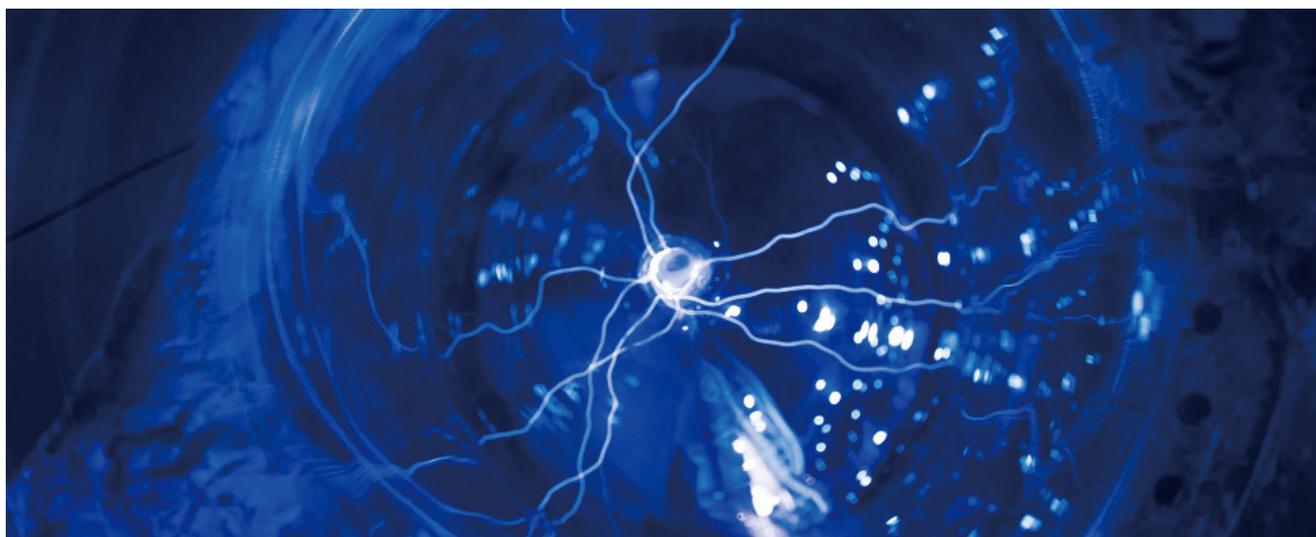


图5：部分新能源度电成本变化趋势

(来源：IRENA WORLD ENERGY TRANSITIONS OUTLOOK 2022)



► 趋势

高功率密度：光伏的度电成本的快速下降，很大程度依赖于设备的功率密度的提升。

01 / 子阵功率由1MW以下提升到3MW以上；

02 / 组件的功率密度从200W提升到500W+；

03 / 逆变器直流电压由1100V提升到1500V。同时高密度碳化硅、氮化镓等材料科学的兴起，预计未来5年，逆变器的功率密度将再提升~50%。

高可靠保障：提升功率密度的同时让设备的高可靠性变得比以往更加重要。通过磁集成技术、配电单板集成技术、风道散热布局优化、模块化设计和独立分腔设计可有效提升设备的可靠性。同时，需在极其严酷环境的验证可靠性设计，如高盐雾、高温、高湿、台风、沙尘等环境等。

华为历经4年研发、测试与验证，将智能光伏控制器的功率由200kW功率段提升到300kW功率以上，在提升功率密度的同时保障了更高的可靠性。

► 应用探索

2020年9月30日，国家电投黄河水电携手华为打造全球单体规模最大的光伏电站——青海省海南州2.2GW特高压光伏电站正式并网发电。截至2022年，9216台华为智能光伏控制器仍稳定运行在海拔3100米的环境中，每年将50亿kWh清洁电力通过青豫直流送至远在1500多公里外的河南驻马店，智能光伏控制器的总可用时长超过2千万小时，可用度高达99.999%。



图6：青海海南州2.2GW特高压项目
(逆变器可用度调查)

趋势三 组件级电力电子 (MLPE)

03

► 背景

分布式光伏在产业政策和技術发展的驱动下近年来迎来蓬勃发展。据HIS的统计数据，2016年-2021年，全球分布式光伏年新增装机量占比从24%快速增长到47%，但随着装机总量的快速增长，大面积适装光伏的屋顶资源变得越来越少。面对有遮挡或者多朝向屋顶的场景，如何在保障发电量的同时充分利用屋顶资源成为需要解决的要点问题。另外，分布式光伏多以屋顶为载体，直流侧高压带来安全防护问题需要引起重视，且分布式电站点多面广，只依靠人工难以实现精细化的运维管理。因此，如何进一步提分布式光伏的发电和运维效率，保障用电安全，实现精细化管理与运维运营成为关键。

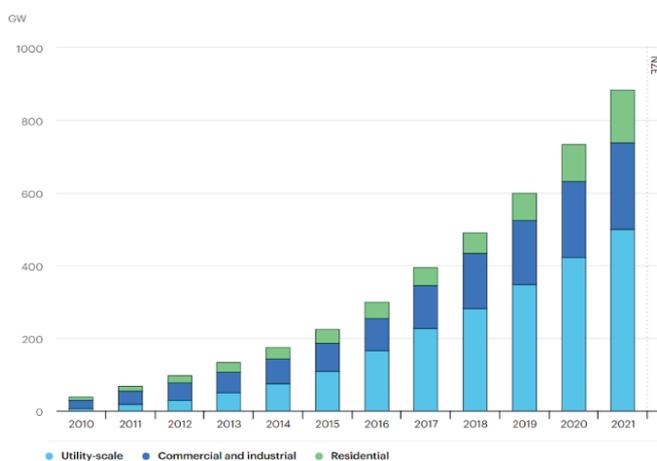


图7：分布式光伏装机增长趋势

► 趋势

组件级电力电子器件 (Module-Level Power Electronics, MLPE) 在光伏系统中指能对单个或几个光伏组件进行精细化控制的电力电子设备，包括微型逆变器、功率优化器和关断器，**组件级发电、监控和安全关断是其独特价值**。随着更多客户对于安全、高发电量等特性的重视，MLPE的市场价值得到进一步发掘，市场接受度和份额快速提升。以功率优化器为例，根据IHS统计数据显示，2021年全球优化器年出货量为8.2GW，占分布式光伏当年装机量的7.47%。预计到2027年，全球优化器年出货量将增长到77GW，优化器的渗透率将达到20%~30%。回顾光伏电力电子设备的发展历程可以发现，从集中式逆变器到组串式逆变器的迭代发展，实现了从系统级MPPT到组串级MPPT的升级，系统发电量提升3%以上。而从组串式逆变器到以微型逆变器为代表的MLPE解决方案的演进，通过实现光伏系统的组件级优化发电和监控，将会让系统发电量和安全性得到进一步提升。光伏系统的发电“粒度”呈不断细化的趋势，而系统“粒度”的细化转化为更智能的发电和更高的安全特性。

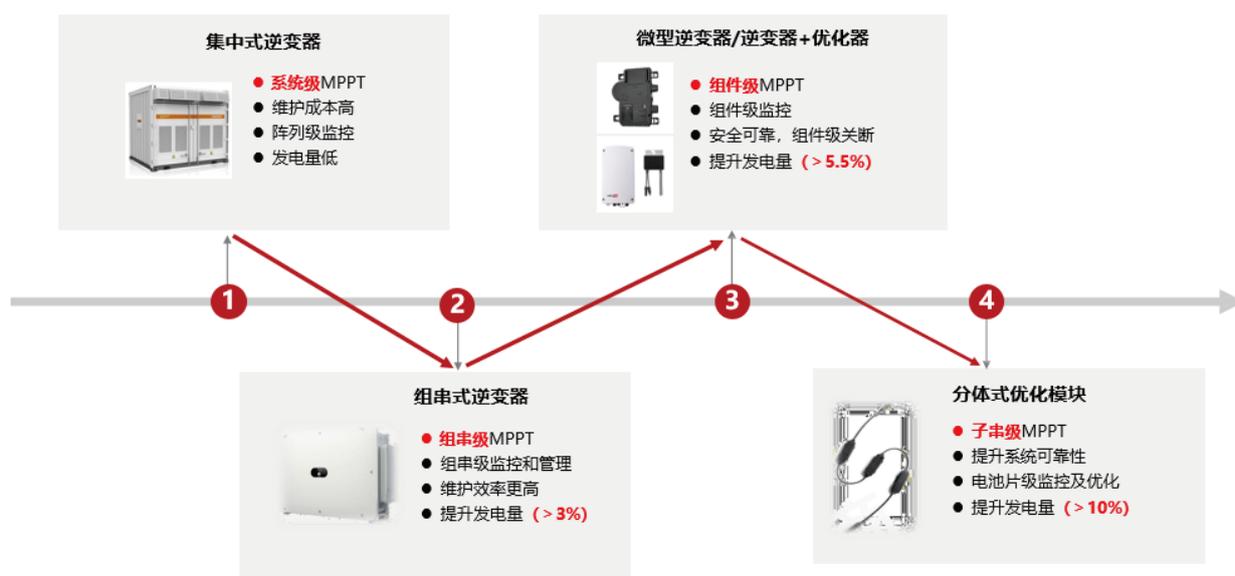


图 8: 光伏电力电子设备演进趋势

组件级发电

组串式逆变器在组串级别执行最大功率点追踪时，受失配影响的组件工作点会随电流减小而发生偏移，从而导致整条组串的输出功率降低。基于MLPE技术，可以独立追踪每一块组件的最大功率点，从而消除各种组件级失配导致的发电量损失，相对于传统光伏方案带来可观的发电量提升和更高收益。

安全关断

在屋顶光伏项目中，直流侧组件串联电压通常可达600V到1100V，当出现例如火灾等紧急事故时，由于光伏阵列携带高压，无法进行直接灭火，造成更多的人身财产损失。近年来，各国光伏RSD（Rapid Shutdown快速关断）标准逐步出台落地，美国UL1699B规定在检测到拉弧发生的情况下2秒内关断系统，欧洲VDE-AR-E2100-712安全标准已强制执行，澳洲AS5033:2020、泰国EIT Standard等正计划执行。MLPE可以提供组件级的快速关断，从而消除直流高压带来的安全隐患，并实时检测线缆端子温度，提前识别线缆短接、破损等常见故障，真正实现主动安全防护。



图9：全球快速关断标准颁布情况

组件级监控

MLPE方案还可以在性能监控和故障诊断方面提供更细的管理粒度。通过管理系统直观显示组件空间位置、组件发电功率、优化器输入输出电流电压等信息，实现智能化组件级监控与可视化管理。同时，通过电站组件排布实景显示，能更准确地体现设备在真实环境中的安装位置信息；通过设备数据实时上传，状态实时反馈，帮助用户精准定位问题及故障设备的具体位置。

► 应用探索

结合乡村振兴战略的发展，在许昌市襄城县300MW整县推进分布式光伏建设项目中，库庄中学整套光伏系统采用全配优化器方案，具备以下特点：

- 满足NEC2020安全关断标准，实现用电、安装、运维全方位安全功能。

- 高效智能发电，较传统方案可提升**25.9%**装机容量，大幅提高光伏屋顶空

间利用率和美观性。同时，加装优化器系统可以有效减少串并联失配损失，首年提高发电量**6.65%**，全生命周期提高发电量**9.7%**。

在安全性实践方面，武汉建成中石油第一座“高安全加油站”，系统设计采用全配优化器方案，可实现屋顶电压快速关断至0V，紧急情况下关闭组件输出，让消防员及时救援成为可能，完全满足加油站对安全的苛刻要求。



图10：库庄中学屋顶光伏装机量对比



图11：武汉中石油加油站分布式光伏

趋势四 组串式储能



► 背景

正如过去，逆变器从集中式向组串式发展，实现了组串级的精细化管理一样，由2000+电芯组成的储能系统更需要应用精细化、智能化的管理模式，提高可用容量与安全标准。当前，大部分集中式储能系统由电芯直接串并联而成，无法实现精细化的充放电与温度管理，受电芯间串并联失配与温度差异的影响，发展增添了一抹灰色。

► 趋势

“电芯不等于储能系统”——智能组串式储能融合了数字技术、电力电子技术与储能技术，采用组串式、智能化与模块化的设计的理念，从而实现电芯的精细化、智能化管理，提升生命周期充放电容量与系统安全。

组串式：通过电池包优化器，实现每一个电池包的满充满放；通过电池簇控制器，充放电过程中均衡电池簇容量，避免簇间环流，提升储能系统的可用容量。分布式智能温控，降低电芯间温度差异，延长系统寿命。

智能化：应用数字化、云、AI等数字技术，搭建预测模型，识别电芯健康度，预估电芯寿命，降低初始电池配置；根据电池充放电曲线、温度、内阻与电压等电芯参数的对比，可提前识别电芯内短路故障，及时预警电池火灾隐患。另外，配合电池包优化器与电池簇控制器，在日常充放电过程中，即可实现电池包级主动SOC标定，免人工上站。

模块化：采用全模块化设计，单个电池包故障，通过优化器隔离故障模组，不影响簇内其它正常模组工作，备件即插即用，免人工SOC均衡。单台PCS故障时，可继续工作，多台PCS故障时，系统仍可保持运行。

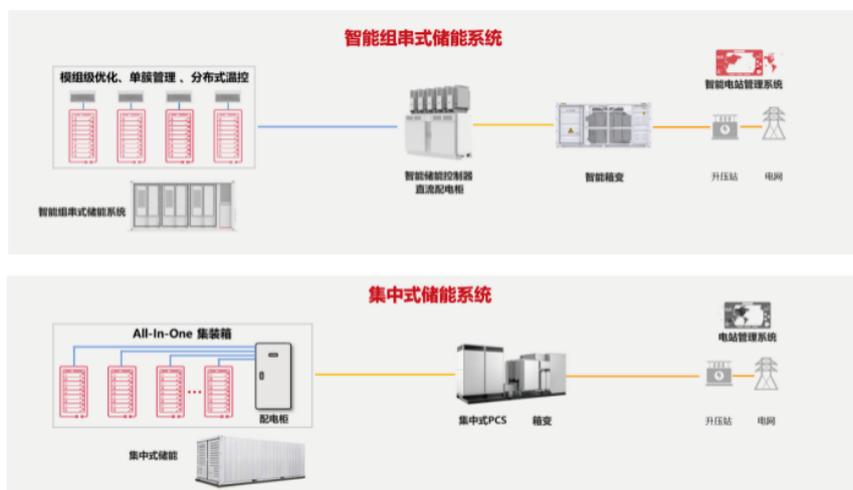


图12：组串式储能系统对比集中式储能系统

► 应用探索

在东南亚地区最大的储能电站项目——新加坡200MW/200MWh项目中，针对客户电网调频和旋转备用的应用场景，智能组串式储能通过充放电精细化管理，实现更长时间的恒功率输出，保障调频收益。同时，通过电池包级自动SOC标定功能，节省人力开支，大幅提升运维效率。



在全球首个100%新能源供电的GWh级离网项目——沙特红海新城1.3GWh项目中，智能组串式储能解决方案通过Grid Forming特性建立稳定的电网；通过分布式温控保障高温场景下系统的可靠运行；支持带板运输，现场无需内部安装与接线，节省施工时间3个月。

趋势五 电芯级精细管理

05

► 背景

锂电池储能系统中，生命周期综合能效和系统安全无疑是最关键的要点。而随着电力电子技术、电化学技术、热管理技术与数字技术在储能领域的融合加深，储能系统的管理颗粒度也从最初针对集中式系统的粗放式管理，发展到电池簇级、电池包级的精细化管理。即便如此，锂电池储能系统在追求更高能效和更加安全的方向上仍有很长的路要走。

近两年，**储能安全事故时有发生**，而由于电芯析锂等原因造成的内部短路，进而引发热失控，在早期更是不易察觉，如何能有效做到储能系统安全隐患的提前发现、提前预警是整个业界亟需解决的难题。

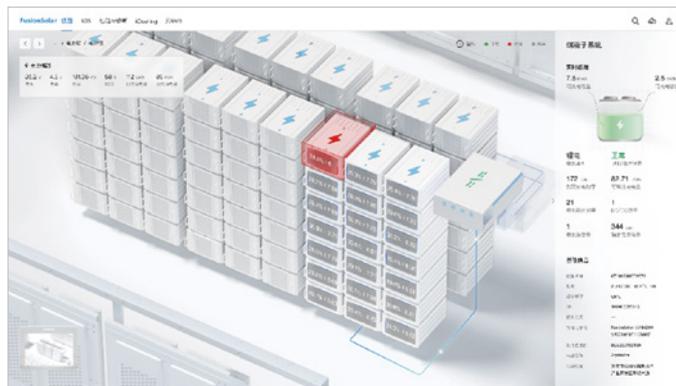


图13: 电芯级精细化管理

► 趋势

正如光伏系统向组件级电力电子（MLPE）发展一样，锂电池储能系统也一定会朝着更小的管理颗粒度进发。只有针对电芯开展精细化管理，才能更有效地应对上述效能与安全问题。当前，传统端侧BMS只能将有限的数据进行汇总和简单分析，几乎不可能做到故障的早期发现与预警。因此，需要让BMS（Battery Management System）“更敏感”、“更智能”，甚至要“预知未来”，这有赖于大量数据的采集与运算处理，并结合AI技术找到最优点、对趋势做出预判。

► 应用探索

应用云BMS解决方案，通过部署在储能系统中数量众多的电压、电流与温度传感，将海量数据进行采集与上云，结合AI算法与模型，能有效监控电芯状态、并预知态势发展。在电芯针刺试验中，通过直径1mm的钢针，模拟衍生型内短路，通过云BMS实现小时级电芯热失控预警，将险情控制在萌芽阶段，避免造成更大的损失。云BMS技术已在数据量更大、时效性要求更高的电动汽车中得到可靠验证。

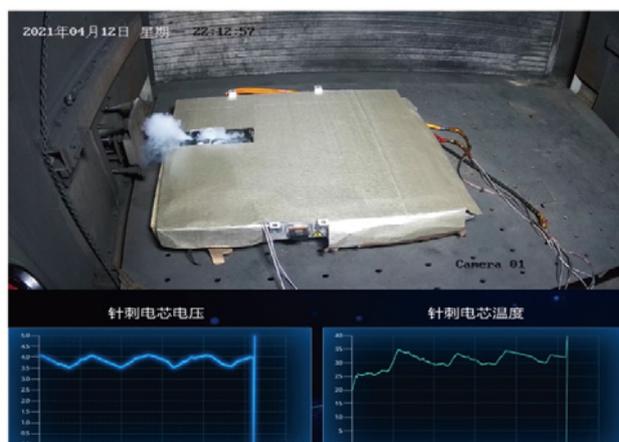
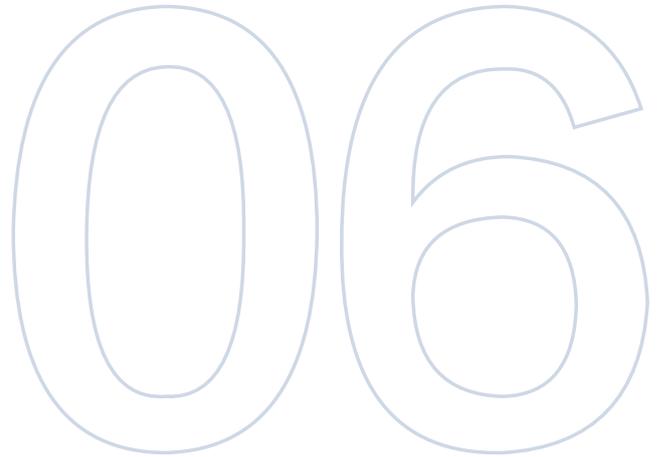


图14：磷酸铁锂电芯针刺试验

趋势六 “光储网”融合



► 背景

未来三十年，能源清洁化转型已成为必然的发展趋势。根据2022年英国独立气候智库Ember发布的报告显示，为实现全球温控1.5℃的目标，到2030年，风能和太阳能发电量需保持每年20%的增长速度。2021年，全球风光发电量占比首次突破10%，未来仍然有很大的发展空间。因此，全球主要区域都提出了未来清洁能源的发展规划。

2022年6月，中国颁布了《“十四五”可再生能源规划》，提出到2025年可再生能源发电量从2020年的2.2亿千瓦时提升到3.3亿千瓦时，其中风电、光伏发电量实现翻番。在发电侧，集中建设“九大”清洁能源基地，利用特高压输电送至负荷中心，总装机量在2025年预计超过500GW；在用电侧，推进新建厂房和公共建筑开展光伏建筑一体化开发，实施“千家万户沐光行动”，成为落实上述目标的重要举措。

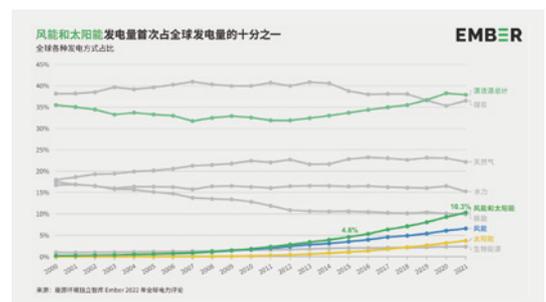


图 15: 2022年全球电力评论
(来源: 英国独立气候智库 Ember)

在欧洲，为解决能源安全的问题，欧盟于今年5月颁布《Repower EU》，将2030年可再生能源装机目标从1069GW提高至1236GW（511GW @2011），其中光伏装机在2030年达到600GW，到2027年抵消90亿立方米的天然气消费量，落实以“光”代“气”。为了实现上述目标，在发电侧，英国将在北非摩洛哥建设10.5GW光伏、5GW/20GWh储能，通过3800km特高压输电线路，每年将26TWh清洁电力送至英国，满足本国7.5%的用电需求。在用电侧，欧委会也提出一项具有法律约束力的欧洲光伏屋顶计划（European Solar Rooftops Initiative），到2026年，欧盟所有屋顶面积大于250平方米的新建公共建筑和商业楼，必须强制安装屋顶光伏；到2027年，所有满足条件的现存建筑屋顶必须强制安装光伏；到2029年，所有新建的住宅楼必须安装屋顶光伏。

► 趋势

发电侧，在光照资源富集区域建设光储清洁能源基地，利用特高压送至负荷中心，在全球范围内展开试点，也将加速区域之间特高压电网建设，实现更灵活的时空互济与互联互通。清洁能源基地依托传统能源格局规划，具有“多（多种能源结构）、高（高比例新能源、高比例电力电子装备）、大（占地面积大）、荒（地处偏远）”的特征，需通过技术解决光伏稳定并网、多种能源协同调度与智能化运维。

用电侧，把分布式光伏、储能及可控负荷相结合，将分散的发电单元、储电单元灵活调度，实现用户侧可调节资源参与市场交易、负荷侧响应，实现电网削峰填谷，成为一种全新的商业模式。

因此，构建“光储网”融合的稳定能源系统，支撑光伏送出与消纳，将成为解决能源安全与能源独立的关键举措。通过融合数字技术、电力电子技术与储能技术，落实多种能源的智能化调度，从发用平衡，走向发储用平衡，实现多能互补、协调互济；建设智能化运维平台，实现GW级清洁能源基地“无人值守、少人值班”。应用5G、AI、云技术，将海量分布式光储系统进行智能化管理、运营与电力交易，构建VPP虚拟电厂，为用户侧可调节资源参与市场交易、负荷侧响应，实现电网削峰填谷提供坚强的技术保障。

► 应用探索

2022年，雅砻江水电携手华为建设的全球装机规模最大、海拔最高的水光互补电站——柯拉1GW光伏发电项目，正式进入施工阶段，预计在2023年并网发电。未来五年，规划光伏装机容量达3.2GW，成为雅砻江流域清洁能源基地中的一颗闪亮的明珠。



图16：砻江水光互补基地建成效果图

多能协同—平抑光伏出力波动，实现水光互补：

该项目通过水电站机组负荷增减和水库库容调节，可以弥补光伏电站负荷的波动，平抑光能的波动性，实现水、光互补，协调互济，将原本不稳定的光伏电源，调整为均衡、优质、安全，更加友好的平滑稳定电源。

依托水电站送出通道，消纳无忧，提升送出利用率：

利用水电送出通道（四川锦屏—江苏苏州±800千伏特高压直流通道，和雅中—江西±800千伏特高压直流通道），无需新建特高压交/直流线路，同时提升原有水电送出通道的利用率，极大地提高经济效益。华为全工况电网适应能力以及优良的电能质量，有效支撑整个新能源场站的送出。

在欧洲，VPP已相对成熟，以德国某知名VPP运营商为例，其主要盈利模式是将风电和光伏发电等电力资源直接参与电力交易，获取利润分成，并根据每15分钟一次、每天96次的电力市场价格波动，调节分布式能源出力，实现低谷用电，高峰售电，获取最大利润。2022年，该VPP运营商已管理超1万个分布式发电系统，包括水电站、风光电站等，总体管理负荷规模超过10 GW。

趋势七 重构极致安全

07

► 背景

光储安全是产业发展的基石，这要求我们站在全场景、全链路的角度系统考量，并充分融合电力电子技术、电化学技术、热管理技术与数字技术，重构系统极致安全。



一、重构光伏电站直流安全

► 趋势

随着光伏组件、逆变器功率的不断提升，当前主流组件功率超过500W，组串式逆变器功率也提升至300kW以上，因此光伏直流侧安全变得至关重要。根据权威机构分析，光伏电站直流侧引发的故障可占到所有故障的70%以上，且因光伏组件受辐照和自身特性的影响，传统的断路器与熔丝无法可靠地分断保护，严重威胁着电站的运行安全。

在光伏电站重点防控的各类安全风险中，电气安全具有风险源（点）形态多样、点多面广、隐性交织等特点，事故发生频次也最高。在光伏发电可能发生的各类电气故障中，接地、拉弧、短路是常见的故障形式。

近些年，国内已发生多起由于电气故障导致的较大火灾事故。以下为两起由于多重原因导致接地、短路、拉弧交织、梯次发生，进而引发火灾事故的典型案例。

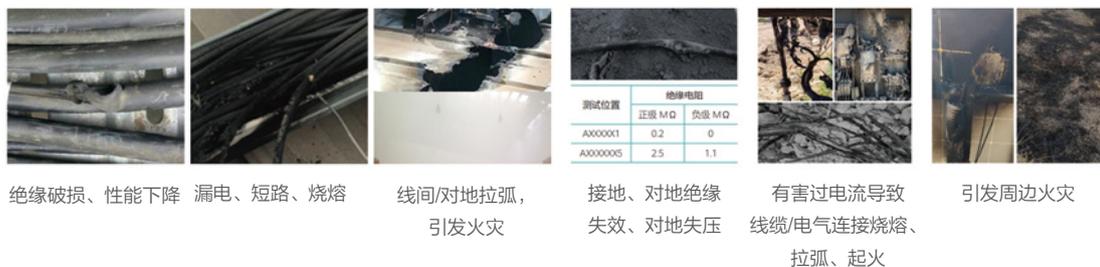


图 17：由于电气安全事故引发的火灾

目前，光伏发电直流侧的电气安全防控尚有盲点和不足，包括标准、电气安全设计、安全保护装置的选配等。对光伏直流过流保护，从系统角度，以IEC62548《光伏方阵设计要求》为主要依据，标准层面尚存在不足；工程应用中，在设计、过流保护装置的选配、熔断体和断路器的质量控制等环节也存在一定问题。



图 18: 案例1 直流断路器未及时分断

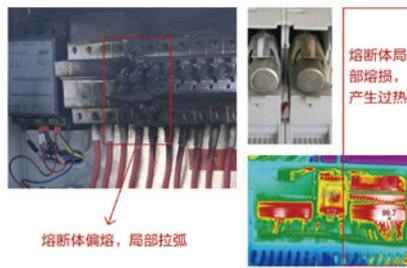


图 19: 案例2 直流熔断器拉弧



图 20: 案例3 直流端子虚接过热烧毁

因此，需要应用智能化直流保护技术，实现对组串反接、电流反灌、母线短路等故障形成有效的保护。在发生异常时，**光伏逆变器需要在毫秒级的极短时间分断直流故障**。此外，逆变器端子温度异常通常是故障发生的早期表征，在超过一定阈值时同样需要自动关断机制，**需要具备智能端子温度检测功能**。

► 应用探索

智能组串分断 (SSLD-TECH: Smart String-Level Disconnect) :

2021年，华为首创智能组串分断技术 (SSLD-TECH)，可靠分断直流侧常见的直流系统故障，并获得了北京鉴衡认证中心 I 级认证。

同年，鉴衡认证中心联合华为在河北某400MW电站项目中完成现场实证测试，该测试严格按照《CGC/GF 192: 2021A 智能组串分断评价技术规范》与《CGC-R 49064: 2021 智能组串分断技术评价认证实施规则 (光伏逆变器)》标准进行了测试。结果表明，智能组串分断功能，能够可靠分断组件直流侧及逆变器内部短路故障，保障了电站的直流系统安全。



图21: 智能组串分断功能等级证书



图22：河北电站测试现场及波形

智能端子检测（SCLD-TECH, Smart Connector-level Detection）：

传统方案中，逆变器的直流端子固定在外结构件上，端子尾部通过线束走线，经直流开关再到PCB板上。该方案在设计上相对简单，但是一方面，直流端子需逐一穿孔、定位、紧固，绝缘件固定后需人工插入PIN针，生产效率低，且容易出现插入不到位的问题；另一方面，一旦端子处因为虚接、损坏等外部因素导致异常处温度上升，只有在温度升高到已经烧毁线缆，以至于电信号受到影响时，逆变器才会检测到该电信号、察觉到异常，但往往已为时已晚，且由于需要接线的线缆数量多，失效时更容易故障扩散。

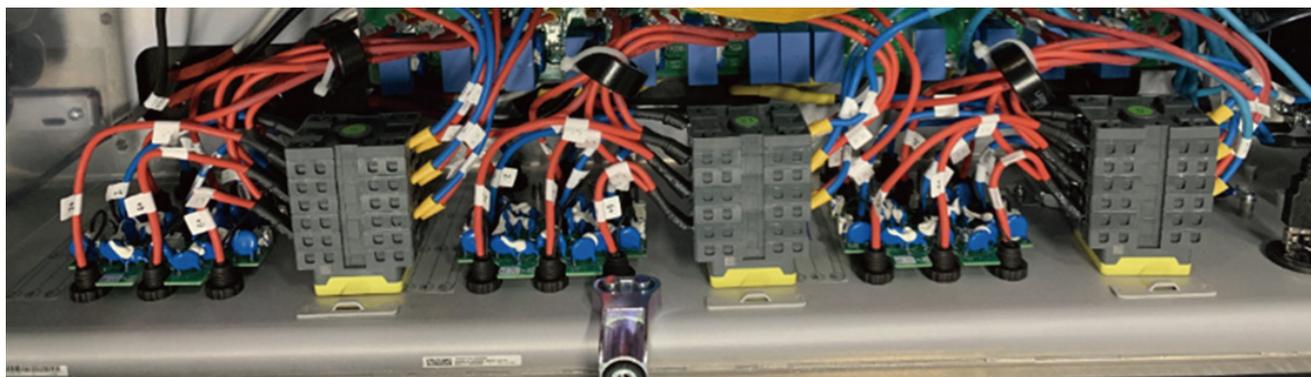


图 23：传统方案逆变器的直流端子接线方式

为了规避这一类问题，华为创新性地采用端子在板设计，定制的板载端子可直接上PCB波峰焊接，免人工插PIN针和穿线，可降低穿线不到位导致的直流端子插接不牢的风险，从生产上保障高可靠性。同时端子上板后，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

测和数据计算，完成智能端子检测。尤其是当遇到端子插接不到位、金属芯压接不良、外力导致端子接触不良、化学物质污染时，如直流端子处温度出现异常，可实时快速上报并启动保护，避免故障进一步恶化和扩散，保障系统直流侧安全可靠。



图 24：华为逆变器端子在板设计

二、重构分布式光伏屋顶安全

► 趋势

电弧故障自动断路功能（Arc Fault Circuit Breaker, AFCI）：

在分布式光伏场景中，由于电站容量小，站址分散，应用场景复杂，且大多处于工业或居民区，建筑物及人身安全成为普遍关注点，主动安全防护变得越来越重要。目前，80% 以上的光伏火灾都是由于直流拉弧产生。光伏组件一旦出现接点松脱、电线受潮、绝缘材料破损等情况，就会产生高压电弧。

要求 / 等级	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
电弧故障点定位	不可定位	不可定位	不可定位	可定位
可检测线缆长度	61m	80m	80m(单相) 200m(三相)	80m(单相) 200m(三相)
可适配最大电流	0.9 I _{max}	0.9 I _{max}	0.9 I _{max}	I _{max}
电弧产生能量	750J	600J	600J	500J
关断时间	2.5s	1.5s	1.5s	0.5s
检测准确率	100%	100%	100%	100%
技术要求	组串检测	支持优化器系统 +1% 高精度独立CT	> 200DMIPS 高性能CPU+0.5% 独立CT	> 200DMIPS 高性能CPU+0.5% 独立CT

图 25：北京鉴衡认证中心AFCI L1-L4级标准

由于电弧信号与线路长度、电流大小等很多因素都有关，并且设备现场运行环境复杂多变，所以给电弧的精准检测带来了挑战。目前，参照北京鉴衡认证中心CGC/GF 175：2020《电弧检测及快速关断性能等级评价技术规范》，通常将AFCI依据性能的不同，划分为L1~L4四个等级：

组件级快速关断:

由于直流侧的光伏组件串联，在被阳光照射到的情况下，组串也会产生600~1000V的高压，对屋顶运维人员的人身安全带来一定威胁；在光伏发生火灾时，组串的高压还会影响消防员的灭火搜救工作。因此，利用电子电子技术实现组件级的快速关断功能成为必须。

► 应用探索

对于光伏直流侧安全，全球已有越来越多的国家颁布了相关规定，并且要求趋严：例如美国国家电气规范NEC 2017 sec.690.11以及加拿大电气安装法规Canadian Electrical Code 2021均规定，任何80V以上的光伏系统，必须要具备AFCI能力；德国标准 VDE-AR-E 2100-712要求，在光伏系统中如果逆变器关闭或者电网出现故障时，需要使直流电压小于120V；泰国国家电气规范（Thai Electrical Code:Solar Rooftop Power Supply Installations2022）中4.3.13章节也明确要求，屋顶的光伏电站必须具备组件快速关断的能力。

在实际应用中，中石油、中石化分别在武汉和内蒙的部分加油站，使用了华为智能光伏解决方案，具备AFCI以及组件快速关断能力，满足严苛的安全标准。荷兰某化工物资密集的彩绘场，也将这两项技术用到了其2.54MW的光伏电站当中，大幅提升了安全防护的标准。



图 26：中石油、中石化及荷兰案例

三、重构储能安全

► 趋势

作为新型电力系统的重要组成部分，锂电池储能迎来了爆发式增长与应用。但储能系统频发的安全事故也逐渐进入大众视野，成为不可忽视的行业之痛。仅2022年，全球范围就发生了近20起储能电站起火爆炸事故，造成了严重的人身安全与经济损失，为整个行业敲响警钟。要实现产业健康、持续的发展，安全问题亟待解决。与此同时，行业内相关法规和标准也在不断完善。2022年4月，中国国家能源局印发《关于加强电化学储能电站安全管理的通知》，提出五方面14条措施，要求各电力企业以高度的责任感和使命感加强电化学储能电站安全管理工作，注重储能安全设计，提升储能准入门槛。

储能系统的安全设计核心在于对电池直流侧的保护。众多电池串并联在一起，给系统的监测、控制及消防保护都带来较大难度。储能安全的源头在于系统整体的安全设计，通过融合先进的电力电子技术与云、AI等数字技术，对储能产品从电芯到系统进行精准可靠的监控与管理至为关键，从传统以被动响应及物理隔离为主的防护方式转变为主动的自动防护、甚至提前预测告警，实现从硬件到软件、从结构到算法的多维安全设计。



► 应用探索

2022年，在新加坡本土首个百兆瓦级储能项目中，在客户最关心的安全方面，项目采用具备四级主动关断功能的智能组串式储能系统，端到端实施全面防护，保障系统安全可靠运行。此外，常规储能接口在安装过程中带电，对安装人员造成了一定风险，并且容易引发短路造成电池损坏。智能组串式储能电池包优化器可关断电池包端口电压至0V，避免在安装过程中触电，造成不必要的伤害。针对结构与消防安全，智能组串式储能满足严苛的当地标准CoC防火认证，并遵循国际标准EN ISO 1182和EN ISO 1716，满足材料本体阻燃性及耐火墙测试。

趋势八 安全可信

08

► 背景

光伏系统在为业主带来收益的同时，也蕴含着各种安全隐患，包括设备安全与信息安全。在设备安全方面，由于光伏系统所处的外部环境往往复杂多变，系统设备的环境耐受性降低容易导致设备故障，影响系统运行，造成经济损失；在信息安全方面，电站管理系统在对电站进行统一管理的同时也面临着外部网络攻击的风险，极端情况下可能导致电站瘫痪，电站信息/个人隐私数据被非法获取或篡改等。无论是设备故障，还是外部攻击，均对光伏系统的安全带来了巨大的挑战。



► 趋势

设备安全从可靠性走向可用性：

为避免设备故障导致停机造成经济损失，需要高可靠性的电站设备来保证系统安全。通过器件选型、严苛测试和可靠生产提高设备的环境耐受性，降低失效率，保障光伏设备的长使用寿命，比如华为等企业所引导的逆变器25年设计使用寿命。不过，以上措施仅依靠设备本身的可靠性，无法实现对故障的主动预警与防护，仍需进一步提升电站设备的可用性，比如业界正在蓬勃发展的故障诊断与组件级监控，当设备出现故障时能够提前预警并快速定位故障位置、判断故障类型，在对故障进行隔离，减少故障影响范围的同时对故障设备进行维护，保证其快速恢复。同时，对于关键器件的自主可控能够保障设备供应的连续，进一步提升电站系统的可用性。

信息安全从安全性走向韧性：

对于外部的恶意攻击，电站系统首先要做到防止未经授权访问而获取系统信息，保障个人隐私或敏感数据不泄露，并确保信息不被非法授权修改和破坏，相应的措施如安全启动、数字签名以及对证书的集中管理等。然而，这种被动的信息防护难以应对当今复杂多变的网络环境，需从被动安全走向主动安全，提高电站系统的安全韧性。比如实时调整系统入侵检测策略，使电站系统具备自主的入侵检测能力；在检测到网络安全事件或隐患后，能及时响应并采取相应措施，使因网络安全事件受损的功能/服务得以快速恢复，保障业务的连续性。另外，通过将管理系统的组网协议模块化，可最小化外部网络攻击对电站系统产生的影响，最大程度降低经济损失。

无害性与隐私性：

光伏电站系统对外还应注重对人身、环境的无害性以及数据隐私性的保护。在无害性方面，可通过智能电弧防护（AFCL）、组件级关断（RSD）、智能分断开关（SSLD）以及良好的电磁兼容性来保障人身和环境安全。在隐私性方面，应保证隐私数据的使用合法、正当且对数据主体透明，如华为通过面向最终用户的授权许可来保证个人隐私数据的安全。另外，数据应基于具体、明确、合法的目的进行收集，在使用时也应尽可能地对个人数据进行匿名/化名以确保个人隐私不会非法泄露。

► 应用探索

CC认证(Common Criteria):

华为商用逆变器通过了行业首个CC EAL3+认证，引领了光伏行业的安全认证。

工业网络安全标准IEC 62443:

华为的网络管理系统、SmartLogger3000以及LUNA2000B（工商业储能）和LUNA2000C（电站储能）获得了IEC 62443-4-2 SL2认证；产品开发流程获得了光伏行业最高水平的IEC 62443-4-1 ML3认证。

信息安全管理标准（ISO27001）:

华为的信息安全管理获得了ISO27001系列的认证。

通过技术、行业 and 全社会的共同努力，将助力光伏行业构建数字信任，实现持续健康发展。

趋势九 全面数字化



► 背景

数字化转型有助于推动生产力和经济的发展。为了迎接未来智能世界，全球170多个国家已经基于自身情况制定了数字战略，千行百业正面临数字化转型。从历史发展看，人类社会的每一次进步，都必将伴随着一次能源革命。近几年“碳中和”在全球范围内获得广泛关注，建设以新能源为主体的新型电力系统已成为确定性趋势。当发电侧光伏、风机等新型能源逐步替代传统化石能源，同时负荷侧以电动汽车、电泵、电取暖为代表的诸多新用能形式大规模涌现，源荷两侧的变化导致系统呈现出高不确定性，电网稳定受到威胁。这种变化还带来海量的广泛分布传感器接入系统，对电力系统的动态监控与平衡能力提出更高要求。

为了应对以上挑战，能源行业的数字化转型迫在眉睫。只有实现“发-输-储-配-用”全链路的可视、可管、可控，才能推动以绿色、可持续、互惠共赢为基准的能源系统的快速发展，最终走向整个电力系统的自动驾驶。



► 趋势

创新融合电力电子技术与先进的数字技术。电力电子技术是实现电能高效生产、转换、存储和消费的关键技术，与5G、AI、云计算、大数据、物联网等数字技术融合后可以达到用“比特”管理“瓦特”的目的。随着数字化技术的快速演进，预计至2027年全球将有95%以上的电站实现全面数字化。

早期的新能源设备如集中式逆变器和集中式储能，**缺乏信息收集与上报通道，整体的运行状态很难得知，实现精细化管理更是难上加难。**数字化技术可以把设备内模糊的、无法测量的信息变得可见、可衡量，让“黑盒”透明化。这些被数字化技术改造的设备往往集电力变换、数据采集、远程控制、在线分析、自适应等功能于一体，并将管理的触手伸到组件、电芯等更深层面。另外，使用PLC（电力线载波）通讯替代RS485传输设备数据，可以在减少网络铺设的同时提升传输速度，使“哑”设备不仅可以“说话”，也能擅长“说话”。

打破电站孤岛，实现多能协同也是电站全面数字化的重要一环。作为“十四五”清洁能源发展的重点，包括风光储、风光水火储等在内的九大基地规划建设正在加快推进。大基地项目通常“占地大”，且存在“多能互补”。这两个主要特点使得它面临设备数据量多、人员上站难、安全和协同性要求高等挑战。为此，必须建设一套集大数据、AI、IoT、GIS和视频监控等技术于一体的数字化平台，对资产管理、运行管理、运维管理、多能互补以及智慧安防等方面进行支撑，推动电站向智能营维、系统融合、多能协同和高效发电迈进，实现电站内与电站间的互联互通。

对于电网而言，为保障稳定供电，传统人工巡视需要跋山涉水，工作强度大，且存在登高、野外作业等多项风险。利用先进的数字化技术，特别是利用5G大带宽、低时延的特性，结合红外探测等技术手段，遥控指挥无人机巡检，可大幅提高供电可靠性。

▶ 应用探索

华能东方智能光伏电站综合利用华能东方电厂灰场土地资源，使用灰场240亩建设12MW光伏发电系统，平均每年发电量超过1200万千瓦时。该电站在行业内实现多项创新。传统光伏电站内通信以前主要采用RS485+光纤环网通讯方式，该项目则采用PLC通信+宽带无线通信。此方案不仅施工简单，安装方便，且可以为客户提供易部署、高带宽、高安全性的网络环境，可应用于生产、安防和移动巡检等多种业务，端到端支撑智能光伏电站的生产和营维。在资产管理方面，为解决电站资产调配困难与重复采购等问题，该项目建立了光伏电站资产信息库，可将资产的位置信息、编码信息等自动扫描入库。此外，电站还采用了智能云管理系统，使用手机APP即可实现对电站生产运营的随时随地在线监控。

福建平和整县推进屋顶分布式光伏项目从2022年开始建设，工程区域屋顶总面积计划为46万平方米。据测算，一期光伏工程并网投产后每年可以产出8918万度绿电，25年预计可生产超22亿度绿电。该项目通过多方综合优势及各种数字化技术实现光伏资源网格化、建设标准化、运维智能化、管理一体化。通过智能光伏云管理系统，规划全县一朵云，融合能量流和信息流，实现全场景全智能联接，保障光伏电站上电即上云，从而实现智能化、高品质、免维护、低成本的电站状态监控和智能运维服务。通过构建以新能源为主体的新型电力系统，见证平和乡村由暗变明、由明变靓的历史性变革。



图 27：海南华能东方电站



图 28：福建平和西坑村村委

趋势十 AI增效

10

► 背景

近年来人工智能（AI）技术飞速发展，对人类社会的经济发展以及生产生活方式的变革产生重大影响。AI技术已在金融、医疗、制造、教育、安防及能源等多个领域实现技术落地，应用场景日益丰富，正全方位进入商业化进程。人工智能的广泛应用及商业化，加快推动了企业的数字化、产业链结构的优化以及信息利用效率的提升。全球范围内美国、欧盟、英国、日本、中国等国家和地区均大力支持人工智能产业发展，相关新兴应用不断落地。而随着电站数字化进程的不断深入，设备产生的数据量呈现爆炸式增长，这为人工智能的广泛应用提供了良好基础，其正迅速成为创新的基石。同时，人工智能与云计算、大数据等支撑技术的融合不断深入，围绕着数据处理、模型训练、部署运营和安全监测等各环节的工具链不断丰富。在新能源领域，人工智能也将与电力电子、互联网技术一样，带动整个产业的深刻变革。



► 趋势

AI技术将普遍应用到强波动、高不确定性的新能源领域，**在制造、建设、运维、优化、运营等光伏电站的全生命周期内发挥不可替代的作用。**

在生产制造方面，组件生产时利用AI图像识别可以对生产全过程中百余项质量检测数据进行智能分析和判定，提升质检效率，某光伏组件厂产线生产效率提升超10%，单产线日产量由900左右提升至1000+。在电站设计和建设阶段，AI可以参与到现场勘探工作中，从卫星勘站、屋顶建模、组件自动排布和电气自动连接等，不断提升设计效率和设计精准度。



图 29: AI技术将普遍应用到新能源领域

在系统优化方面，利用电站产生的海量数据可以重构跟踪支架算法，来弥补传统天文算法在遮挡和阴雨情况下的缺陷，寻找最优角度，显著提升光伏发电效率。另外还可以利用AI对MPPT跟踪算法进行优化，同样可以提升发电量。

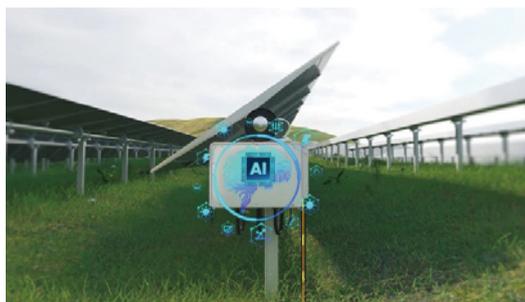


图 30: AI使能跟踪支架提升发电

在检测诊断方面，智能IV诊断功能与无人机CV巡检功能相结合，在对组串电流电压曲线分析基础之上，辅助以红外、可见光检测结果，提升组件故障定位与定性效率。对储能而言，使用了AI技术的BMS系统通过对电芯的数据进行分析可以进行热失控风险预测和寿命预测，也可以对充放电策略进行优化进而起到电池延寿的作用。



图 31: 智能IV诊断与无人机巡检结合

功率预测主要依赖于辐照和温度，由于太阳辐照和温度受到多种气象特征影响，不确定因素数量多。使用了深度学习等AI技术的预测技术在准确性、易用性和灵活性上相比传统方式优势明显。

在能量调度方面，光储充用协同正逐步成为趋势。家庭和工商业能源管理中，AI技术使得电力的生产和存储更匹配负荷曲线，帮助用户提升自发自用率，降低整体运营成本和碳排放水平。对电网而言，得益于新能源尤其是分布式光储的快速发展，海量异源异构数据得以积累，通过人工智能技术对数据的进一步处理，有助于实现配电网智能化，为电力系统控制与决策提供支撑。

能源行业已经逐步迈向数据驱动的时代，更好地将数据收集、利用并且最大化地挖掘数据背后的价值已成为产业共识。AI作为智能化最典型的技术之一将在其中扮演重要角色。

► 应用探索

蒙圩200MW光伏电站地处广西玉柴，项目采用平单轴跟踪支架。由于玉柴气候潮湿多雨，发电量受到阴雨天影响时间较长，而传统跟踪支架在阴雨天发电提升效果不明显。智能跟踪支架控制算法（SDS）利用AI技术对跟踪支架的角度进行优化，有效避免阴雨天发电量损失问题，使用该算法一年后，发电量平均提升了1.66%。



ASIA MERANTI公司的30MW光伏发电项目位于马来西亚霹靂州内，分散在三个县。受限于场站跨度大及工作人员不足等，场站运维工作主要集中在两类：通过人工上站发现的碎裂组件，以及通过SCADA系统发现的掉串问题。为了更有效地开展运维工作，找出问题组串，提升发电效率，该电站于2019年底开始使用智能



图 33: 马来西亚30MW光伏电站

IV诊断技术。通过远程下发扫描任务代替人工上站查找，利用AI算法分析I-V特征曲线，实现对故障组串的快速定位与定性，一年可为该场站节约人工工时超2000小时。

对于分布式发电而言，利用AI技术进行光储充用的能量调度与协同正在进入大众视野，并且在一些欧洲国家已开始相关的应用。该技术根据电站发电预测、负载用电预测等数据，采用AI算法预测储能系统的最优充放电曲线，实现光储系统功率最优控制，使用户经济效益最大化，预计提升业主综合收益率超过8%。

结语

立足当下，放眼未来，5G、云、AI的融合应用正在塑造一个万物感知、万物互联、万物智能的世界，它比我们想象中更快地到来。华为展望光伏行业发展十大趋势，勾勒和阐述了一个可触碰的绿色智能世界，希望能给业界同仁及所有关心绿色可持续发展的组织与个人带来一些启发，让我们携起手来，共同推动早日达成双碳目标，共建绿色美好未来！







版权所有© 华为技术有限公司2023。保留一切权利。

非经华为技术有限公司书面同意，任何单位和个人不得擅自摘抄、复制本手册内容的部分或全部，并不得以任何形式传播。

商标声明

 HUAWEI、华为、 是华为技术有限公司的商标或者注册商标。

在本手册中以及本手册描述的产品中，出现的其他商标、产品名称、服务名称以及公司名称，由其各自的所有人拥有。

免责声明

本文档可能含有预测信息，包括但不限于有关未来的财务、运营、产品系列、新技术等信息。由于实践中存在很多不确定因素，可能导致实际结果与预测信息有很大的差别。因此，本文档信息仅供参考，不构成任何要约或承诺。华为可能不经通知修改上述信息，恕不另行通知。

华为数字能源技术有限公司

深圳市福田区华为数字能源

安托山基地

邮编: 518043

solar.huawei.com

