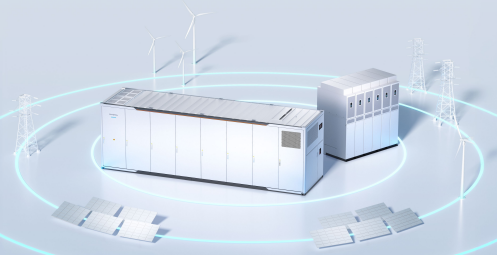
干细胞构网技术2.0
Stem-Cell Grid-Forming Tech 2.0

因网制宜 守护电网安全稳定
Grid-Specific Security and Stability Solutions



TÜVRheinland®
Precisely Right.

SUNGROW
Clean power for all

前言

全球能源转型背景下，以光伏、风力发电为主的可再生能源渗透率持续攀升，电力系统迎来高比例可再生能源＆电力电子设备接入、高比例特高压直流输电的阶段。可再生能源发电存在不稳定性，综合区域电力基础设施差异、应用环境和需求不同等因素，对电网的电压稳定、频率稳定、功角稳定、宽频振荡抑制等技术提出了更高的要求。

在白皮书中，阳光电源将从光储系统应用的视角，探讨构网型控制技术如何助力新型电力系统平稳运行，系统化阐述相应的技术方案和应用场景，供行业参考。

目录

C1 新型电力系统特征 1

1.1 风、光等可再生能源装机量持续提升
1.2 电力系统呈现低惯量、低短路比、弱阻尼特征

C2 新型电力系统面临的挑战 3

2.1 功角稳定性挑战
2.2 电压稳定性挑战
2.3 频率稳定性挑战
2.4 宽频振荡
2.5 因网制宜解决差异化电网需求

C3 千细胞构网技术2.0 8

3.1 交流侧多维电网支撑
3.2 直流侧动态能量优化
3.3 场站侧自主协同控制
3.4 全链路仿真能力

C4 技术验证 30

4.1 TÜV Rheinland验证及结果

C5 因网制宜的项目案例 33

5.1 西藏乃东才能20MW/80MWh构网型储能项目
5.2 四川阿坝州红原安曲50MW/100MWh构网型储能项目
5.3 四川甘孜色达县40MW/80MWh县域微网项目

C6 总结与展望 37

01

新型电力系统特征

1.1

风、光等可再生能源装机量持续提升

全球能源结构转型进入加速阶段，据彭博新能源财经最新数据显示（见图1），自 2020 年以来，全球可再生能源装机容量显著增长，2024 年风光发电累计装机量达 3326GW，预计 2030 年累计装机量达 8946GW。

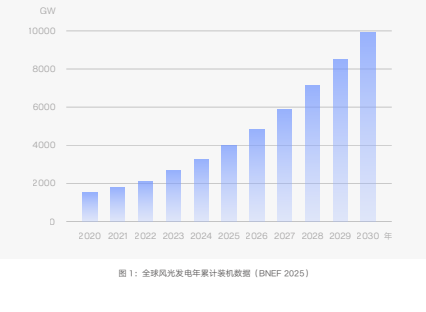


图 1：全球风光发电年累计装机数据（BNEF 2025）

1.2

电力系统呈现低惯量、低短路比、弱阻尼特征

新能源发电具备天然的间歇性、波动性特征，且发电设备大多通过电力电子设备并网，缺乏传统发电机的旋转惯量和阻尼特性，导致系统整体惯量和阻尼水平下降。

“低惯量、低短路比、弱阻尼”的特征，使电力系统易受功率波动和故障冲击，引发频率波动、电压失稳等问题，严重时可能导致大面积停电。例如，风光发电出力突然下降时，系统缺乏足够的惯量缓冲频率变化，导致频率快速下降，触发低频减载装置动作，造成停电事故发生。

02

新型电力系统面临的挑战

2.1

功角稳定性挑战

传统电力系统中，同步发电机通过机电耦合保持同步运行，维持功角稳定。高比例新能源接入后，电力电子设备大量取代同步发电机，导致系统惯量降低，同步能力减弱，当系统受到扰动时，如负荷突变电网故障，缺乏惯量的新能源机组无法提供足够的同步功率支撑，容易导致发电机之间功角差扩大，引发失步，严重时甚至造成系统解列。

2021 年 1 月 8 日，克罗地亚 Ernestinovo 400kV 变电站母联断路器因潮流持续增大而过载跳闸，引发西北部、东南部电网间其他线路在 20s 内相继跳闸的连锁反应。众多线路的跳闸使得电网结构发生巨大变化，发电机之间无法保持同步运行，最终导致欧洲大陆电网解列为西北部与东南部两部分，产生了约 5.8GW 不平衡功率，频率也大幅波动，出现了功角失稳的现象。如图所示，事件 #1 为 Ernestinovo 站母联断路器跳闸，事件 #2 为塞尔维亚输电线路跳闸。图 2 中集成的相量测量单元（PMU）录波数据清晰展现了电网解列过程：前三个变电站（蓝色标识）位于西部区域，后三个变电站（红 / 橙 / 黄色标识）归属东部区域。功角失稳引起的电力事故还有 2021 年 7 月 24 日欧洲大陆电网解列事故。

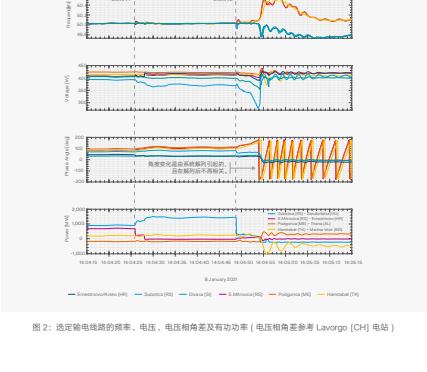


图 2：选定输电线路的频率、电压、电压相角差及有功功率（电压相角差参考 Lavorgo [CH] 电站）

2.2

电压稳定性挑战

电力电子化电力系统的电压稳定性面临新的挑战。一方面，柔性直流输电换相失败导致电压连续高低变化，光伏发电在夜间出力骤降时，若缺乏足够的无功补偿，可能引发电压失稳；另一方面，在电网故障情况下，传统同步发电机能够提供数倍额定电流的无功电流，对电压进行支撑，而新能源发电装置提供无功电流能力不足，较传统发电机的电压调节能力差。

2016 年 9 月 28 日，台风和暴雨等极端天气袭击澳大利亚南部地区电网，6 次线路故障造成多次电压跌落，最终导致风机大规模脱网，Heywood 联络线跳开，系统成为孤网后崩溃，全南澳大利亚州大停电，50 小时后才恢复供电。图 3 展示了南澳大利亚州电网多个关键 275kV 节点电压监测数据，同时包含维多利亚州 Heywood 节点的 275kV 电压记录，时间断面选取 Heywood 联络线跳闸前即刻时段。图 3 显示：在 Davenport-Mt Lock 275kV 线路最终跳闸后，南澳电网全域电压发生急剧崩溃。类似电力事故还有 2023 年 5 月 23 日的巴西里约热内卢国际机场断电事故、2021 年 2 月的美国得克萨斯州大面积停电事故。

图 3：2016 年 9 月 28 日南澳大利亚州电网解列前 275kV 电压骤降过程

2.3

频率稳定性挑战

新型电力系统的系统惯量不断降低，有功功率支撑能力弱，频率稳定问题日益突出。2019 年 8 月 9 日，英国伦敦北部的一段输电回路上遭遇了雷击，Hornsea 1 号风电场机组掉线。随即贝德福德郡的小巴福德电站的蒸汽机组自动停机。上述情况数使 1 秒内发电功率累计损失超 1130MW，系统频率变化率超 0.125Hz/s，触发了分布式发电跳闸。最终频率降至 48.8Hz，触发了低频减载措施，英国诸多地区出现停电。图 4 展示了 2019 年 8 月 9 日事故带注释的系统频率轨迹，图 4 中标注了关键事件时间节点与频率骤降速率。类似的，2023 年 12 月 23 日，由于英国和法国之间的一个高压传输线路突然跳闸，英国电网在瞬间损失了 1GW 的电力，系统频率从 50Hz 骤降至 49.3Hz。

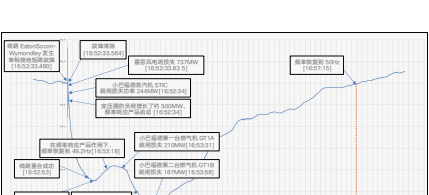


图 4：2019 年 8 月 9 日英国大停电事故中的频率跟踪记录

2.4

宽频振荡

可再生能源通过变流器与电网连接，引入了复杂的控制动态和快速的响应特性，导致系统在较宽的频率范围内出现振荡风险。此外，新型电力系统的低阻尼特性使得宽频振荡更容易发生并难以抑制，对电网安全稳定运行构成挑战。

2015 年 7 月 1 日，中国西北地区风电场发生次同步振荡，导致 300 多公里外火电机组的转轴扭振保护动作，引起火电机组停运，这是典型的由于次同步振荡分量在多级电网中传播而引起的电网功率振荡事件。近年来，该地区风电基地因发生次/超同步振荡，切除风电达 100 余次。图 5 为 2016 年上半年该地区系统侧次同步振荡事件统计数据。

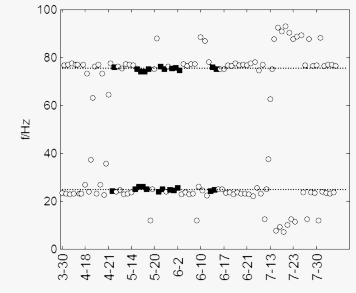


图 5：2016 年上半年哈密地区次同步振荡频率统计

2.5

因网制宜解决差异化电网需求

综合上述电网事故分析，在高比例新能源接入背景下，电网安全事故可能耦合多种因素。例如，新能源出力波动可能导致频率失稳，而电压支撑不足可能进一步加剧功角失稳，最终引发连锁反应，造成大面积停电。

为助力新型电力系统的稳定运行，构网型控制技术成为关键。但不同地区的电网结构、负荷特性、新能源渗透率、应用场景等差异显著，将单一变流器（PCS）构网性能衡量场站级构网能力，且忽略直流侧能量对构网技术的影响，无法满足不同网况下的稳定性需求，为新能源电站构网技术规模化应用带来隐患。

因此，光储构网技术需要根据各地区电网的具体特征，综合考虑新能源接入比例、负荷特性、应用需求等因素，从系统的角度定制“因网制宜”的解决方案。

03

干细胞构网技术2.0

阳光电源以交流侧稳定的能量调度需求为导向，突破单一储能 PCS & 逆变器设备控制的局限，系统性地将直流侧电池管理与交流侧构网控制深度协同，并依托 GW/GWh 级全链路电气、热、噪音仿真平台，首创“电池 - 变流器 - 场站”三级协同架构，创新推出干细胞构网技术 2.0，为新能源电站植入系统级稳定能力（见图 6）。

如同干细胞对不同类型、不同状态人体组织的修复净化，造血再生等功能，干细胞构网技术 2.0 确保在不同环境、不同应用需求、不同网况下，直流侧电池安全高效的充放电，为交流侧提供稳定的能量支撑，实现更快速稳定的调频调压、更安全便捷的黑启供电，最大化新能源电站效益。

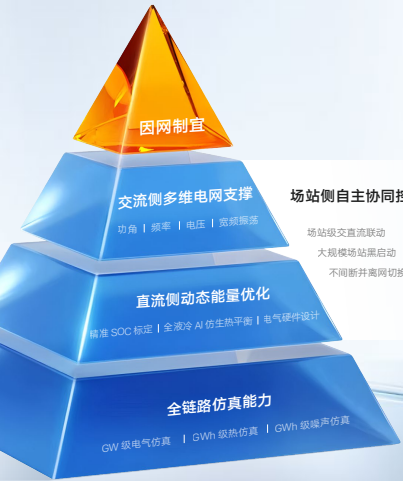


图 6：千细胞构网技术 2.0 架构图

3.1
交流侧多维电网支撑

A 助力功角稳定

不对称 & 宽相角跳变穿越技术

① 背景

电力系统中短路故障的发生和切除都会导致外部网络拓扑结构发生相应改变，造成并网点电压相位跳变，这一变化对虚拟功角稳定将造成较大影响。与同步发电机类似，在电网相位跳变时，构网型储能 PCS 自发提供有功相跳功率。宽范围相位跳变时，PCS 有功相跳功率将超限，若不及时采取相应措施，将会导致 PCS 跳闸，失去对电网支撑作用，甚至扩大故障。

② 技术方案

如图 7 所示，阳光电源提出自适应相角跳变穿越技术，通过提前感知状态变量所含的电网相位信息，在宽范围相角跳变发生时，利用前馈控制快速调节内电势频率，加速虚拟转子摆动过程，实现了 PCS 内电势相角的快速变化，保障了功角稳定性。通过自适应机制调节，小范围相位跳变时逐步削弱该功能，使 PCS 能充分发挥频率支撑能力。

当电网发生不对称相角跳变时，根据故障程度生成一定量的负序电压，从而支撑故障相电压，实现了从被动适应不平衡电网到主动支撑电网电压的转变。

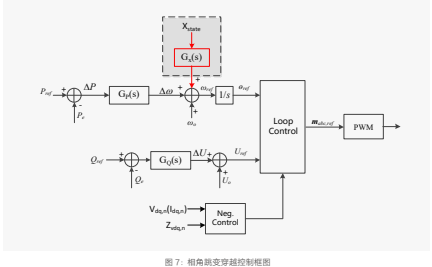


图 7：相角跳变穿越控制框图

③ 技术效果

图 8~ 图 9 展示了三相电网电压发生 90°相角跳变时，PCS 的电流、有功功率的波形变化；图 10~ 图 11 展示了两相电网电压发生 90°相角跳变时，PCS 的电流、有功功率的波形变化。未采取优化技术时，电流峰值较高，超过过流阈值，调节过程长（200ms）；采取阳光电源技术方案后，过渡时间缩短至 50ms。

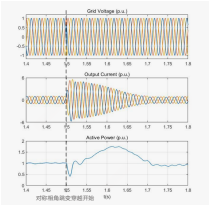


图 8：对称相角跳变穿越波形图
（90°，未采取优化技术）

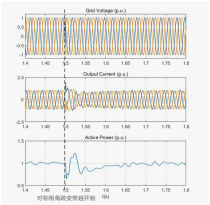


图 9：对称相角跳变穿越波形图
（90°，采取优化技术）

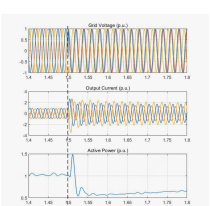


图 10：不对称相角跳变穿越波形图
（90°，未采取优化技术）

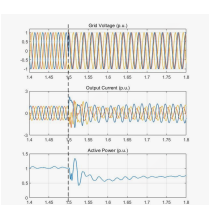


图 11：不对称相角跳变穿越波形图
（90°，采取优化技术）

2. 助力电压稳定

A 宽 SCR 瞬时跳变适应技术

① 背景

规模化新能源电站通常位于远离负荷中心的偏远地区，电力需经过长距离输电线路、多级变压器甚至串补设备输送，导致场站公共耦合点的电网阻抗特性复杂。故障导致的电网网架变化、新能源发电的随机性和波动性使并网功率和变流器数量频繁变化，进一步导致电网阻抗大幅波动，导致电网强度的跳变。

② 技术方案

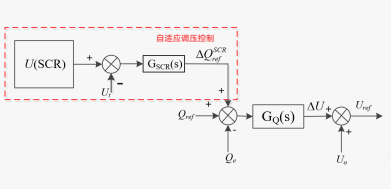


图 12：自适应调压控制策略

在虚拟同步机（VSG）控制中，将构网型储能 PCS 端电压自适应调节后加入无功功率控制回路（见图 12），使 PCS 能够在电网强度跳变瞬间调节无功功率。VSG 的无功 - 电压控制模拟同步发电机的励磁调节过程，用于表征无功 - 电压下垂特性。将端电压进行实时闭环控制，在电网强度发生变化时，输出无功功率支撑端电压。

③ 技术效果

如图 13 所示，当电网强度发生突变时，短路比 SCR 从 40 骤降至 1，PCS 迅速调节功率输出，补偿电网强度变化带来的功率不平衡，且能有效抑制电压波动，一个周波内便系统电压重新恢复稳定。

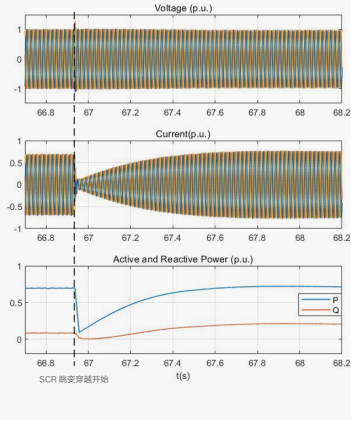


图 13：电网侧 SCR 从 40 到 1 时的 PCS 响应

B 电压源增强型连续高低电压穿越技术

① 背景

基于晶闸管的换相高压直流输电 (LCC-HVDC) 在远距离、大容量输电等方面广泛应用，然而高压直流输电换相失败会引发交流母线电压骤降，随后因无功过剩可能导致电压骤升，形成连续波动。电力经过长距离输电线路需要串补设备，串补电容与线路电感谐振引发暂态过电压，加剧电压振荡。另外，弱网下传统跟网型控制的设备在电压恢复时也会由于无功退出滞后引起暂态过电压。因此，储能 PCS 需要具备应对长时间、多频次、大范围电压故障的连续穿越能力。

② 技术方案

如图 14 所示，阳光电源通过深入研究同步发电机在电压大扰动下动态演化机理，根据同步电机励磁系统和暂态电抗在电网故障中的作用，创新快速电压调控技术和增量式虚拟阻抗技术，通过调节内电势幅值和虚拟阻抗，电网电压跌落或升高期间，在 PCS 耐受范围内，快速自发地向电网注入更多无功电流，无功响应时间缩短至 20ms 以内，助力接入点（point of connection，POC）电压恢复。

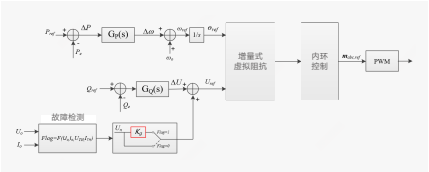


图 14：高低电压故障穿越期间的控制框图

③ 技术效果

为了验证构网型 PCS 的连续高低穿电压穿越能力，电网电压首先跌落到 0.05 倍额定电压并持续 1.5 秒，随后抬升至 1.3 倍 Un 并持续 500 毫秒，在电网连续 6 次无间隔的电压跌落 - 抬升交替过程中，PCS 始终保持与电网的连接，通过快速、精准的无功功率调节，在电压跌落时快速注入无功支撑电压恢复，在电压抬升时及时吸收过剩无功抑制过电压，有效缓解了电压波动对电网的冲击（见图15）。在低电压穿越过程中，能够承受短时过载（3 倍额定电流），确保在故障期间持续稳定运行、从而支撑电网稳定性。

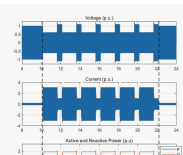


图 15：连续六次电网电压跌落 - 抬升故障穿越波形图

3. 助力频率稳定

A 柔性频率控制技术

① 背景

以电力电子主导的低惯量电力系统中，系统频率稳定性严重依赖 PCS 控制策略的动态特性。传统的虚拟惯量控制通常采用固定惯量参数，难以同时满足不同运行场景下对快速响应与频率抑制的双重要求。当系统受到扰动（如负荷突变或分布式电源波动）时，固定大惯量虽然能够减小频率偏差，但会引入响应迟缓和功率振荡风险，甚至延迟频率恢复过程; 而固定小惯量虽然具备良好的动态响应能力，但在系统扰动剧烈时将导致频率偏差超限，影响系统安全。

② 技术方案

如图 16 所示，阳光电源采用柔性频率控制技术，通过实时监测频率变化率（RoCoF）来感知电网扰动强度。在频率快速下滑的初始阶段（即频率刚开始下降的时期），RoCoF 达到峰值，系统相应提高虚拟惯量系数，以增强对频率骤降的抑制能力，提供更强的初期惯量支撑。随后，随着频率进入回升阶段，系统逐步降低虚拟惯量系数，加快频率恢复速度，防止引发功率振荡。该策略实现了在扰动强时自动增加虚拟惯量，扰动很时自动减小虚拟惯量的动态调节机制，从而显著提升了 PCS 对频率扰动的快速响应能力与稳定支撑水平。

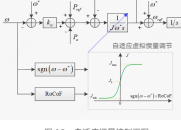


图 16：自适应惯量控制框图

③ 技术效果

为验证柔性频率构网控制策略在频率支撑方面的效果，PCS 分别采用小固定惯量（J_1=0.1）、大固定惯量（J_2=2）及柔性频率控制策略（J_N），考察功率阶跃时的频率及功率响应。如图 17 所示，在 2s 时刻有功功率由 0 突变为 1p.u. 工况下，小固定惯量策略下，系统呈现过阻尼特性，频率暂降Δf=0.1Hz，有功功率响应无超调；大固定惯量策略下，系统呈现欠阻尼特性，频率暂降Δf=0.05Hz，有功功率超调量达 10%；柔性频率控制策略下，系统处于临界阻尼状态，频率暂降Δf=0.07Hz，有功功率响应无超调。

上述实验表明，固定惯量策略无法兼顾频率稳定与功率响应特性，而柔性频率控制策略能取得频率和功率响应最优结果。该策略能够有效抑制初始频率扰动所引发的冲击，显著提升了系统的动态响应速度，暂态稳定性和经济运行裕度。

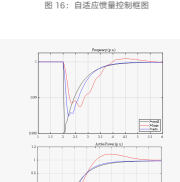


图 17：并网模式下不同惯量值的有功功率阶跃

B 光储直流耦合构网控制技术

① 背景

传统光伏系统正常工作在最大功率点，因受光照能量波动性的限制，其直流侧无有功备用，直流母线电压暂态稳定性不足，无法在构网模式下提供可靠的有功支撑，若工作在预留功率模式则会影响光伏电站的发电收益，且工作点的功率预留难以准确实时预估，从而限制了光伏构网技术的应用。

② 技术方案

如图 18 所示，通过 Block 级的光伏逆变器和储能电池控制流信息的融合，基于实时母线电压控制权竞争的控制策略，虚拟实现光伏、储能直流耦合一体机。解耦光伏输出功率 MPPT 控制、储能单元 SOC 管理及逆变器功率调度和构网控制需求。

- 光伏侧：

  根据采样的光伏阵列电压和电流数据，做 MPPT 跟踪计算，计算结果作为控制信息与系统进行交互。

- 储能侧：

  根据本地电池 SOC 管理策略，获取系统光伏 MPPT 跟踪需求的控制信息，DC/DC 变换器基于直流耦合点母线电压控制权竞争算法。完成光伏 MPPT 跟踪实现，同时维持系统直流耦合点的电压稳定。

- 逆变器侧：

  根据系统电池组 SOC 管理策略和电网调度需求信息，融合 MPPT 控制 ,构网控制算法 , 可实现 MPPT- 构网运行，调度 - 构网运行等多种应用场景覆盖。既达到光伏最大化发电输出，也可以实时构网响应电网电压、频率的暂稳态辅助调节。

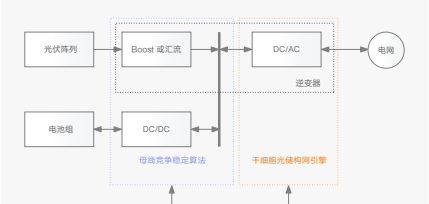


图 18：光储直流耦合整体框图

③ **技术效果**

为验证技术可靠性，对光储直流耦合构网型逆变器进行频率波动时的测试。据图 19 可知，光储直流耦合构网型逆变器可以工作在构网模式，当频率降低时，能够基于母线竞争稳定算法，储能功率瞬时支撑母线电压稳定，从而可靠保证逆变器交流侧有功输出功率提升，维持电网频率稳定。

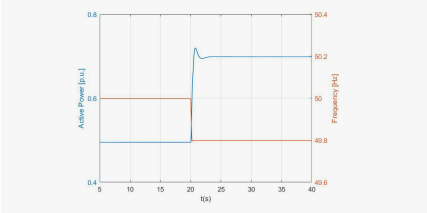


图 19：光储直流耦合构网型逆变器频率波动时的有功功率波形图

4. 宽频振荡抑制

A 功率振荡阻尼技术

① **背景**

电力系统中的低频功率振荡主要由发电机转子间的相对摇摆引起。这种振荡可能由系统扰动、负荷波动等触发，若不加抑制，将导致系统失稳甚至大面积停电。随着可再生能源比例增加和电网互联程度提高，系统阻尼特性减弱，低频振荡问题更加突出。

② **技术方案**

如图 20 所示，阳光电源创新功率振荡阻尼（Power Oscillation Damping，POD）控制器，由低通滤波器、高通滤波器、超前 / 滞后补偿器、增益调整以及饱和参数组合而成，不仅滤除频率中的直流分量和高频噪声，还确保了对 0.1~10Hz 低频振荡的阻尼能力。

图 20：功率振荡阻尼控制框图

③ **技术效果**

低频振荡抑制功能的效果如图 21 所示：通过在系统频率中注入频率为 1Hz 的振荡分量，可以观察到有功功率也有相应的振荡分量，有功功率与频率振荡分量相位相反，PCS 提供正阻尼。该结果表明，当电网频率振荡幅度大于设定值时，PCS 能通过调节有功功率来抑制电网频率振荡幅值。

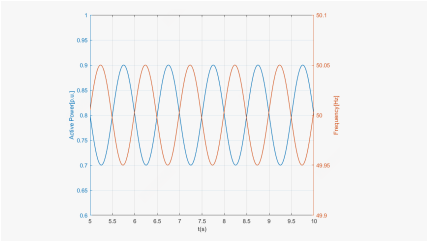


图 21：1Hz 振荡抑制效果图

B 多频段振荡抑制技术

① **背景**

在新型电力系统内，新能源机组、柔性交直流设备及其多样化电力电子控制通过复杂电网耦合交互作用，使得频率覆盖次同步、超同步、中高频以及高频的多频段振荡问题逐渐凸显。

② **技术方案**

针对上述多频段振荡问题，基于实时动态响应数据，通过多维度宽频振荡的智能感知技术，提取关键特征信息以准确识别振荡模式。进一步利用虚拟同步发电机构网技术，动态重塑并网阻抗特性，通过优化控制器或在 PCS 的控制环路中引入虚拟阻抗，改变 PCS 输出阻抗的幅频和相频特性，使得系统能够在次同步、超同步、中高频以及高频范围内（<2.4kHz）保持稳定，避免振荡。

3.2

直流侧动态能量优化

1. 精准 SOC 标定技术

① 背景

构网模式下的储能 PCS 主动响应电网辅助服务（如一次调频、惯量等），导致此部分功率不受 LC（本地控制器）或 EMS（能量管理系统）控制，具有随机性且充电与放电方向不明确性。此不受控的有功功率易导致电池系统 SOC 均衡问题、电池亏电或过充等问题。

② 技术方案及效果

如图 22 所示，阳光电源基于 AC 存储系统架构，通过簇级管理精细化自优化充放电过程中电池 SOC 不一致、过充 / 亏电的问题：

- SOC 均衡：

LC 通过实时获取 PCS 辅助服务的不可控功率，叠加簇间功率均衡算法，分配给组串 PCS 不同的充放电功率，解决 SOC 均衡问题，可提升 8% 的充放电量；

- 防电池亏电或过充：

当单体电池出现过欠压二级告警时，LC 与组串 PCS 实时联动控制，可达到单簇电池禁充或禁放的效果，以防止电池亏电或过充，在充分发挥构网辅助服务的同时，将电池风险降到最低；

- 自动补电：

当电池出现亏电时 ,LC 可在系统待机时段，自动小功率补电，实现在线智能运维的效果，免去传统储能系统补电运维工作，提高电站经济性。

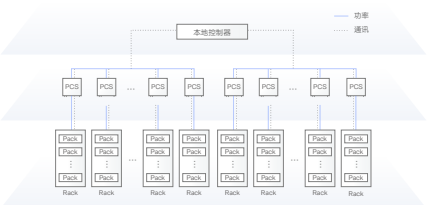


图 22：AC 存储 - 簇级管理拓扑图

2. 全液冷 AI 仿生热平衡技术

① 背景

构网型储能系统具备充放电频率高、功率变化快、瞬时高倍过载的特征。极端工况下输出电流可在毫秒级从 0 到 3*In，系统热负荷波动大，导致电池和功率器件产生大量热量，若遵循传统储能系统的散热设计，系统辅助功耗高，且可能引发局部器件过热，影响系统性能和寿命。

② 技术方案及效果

阳光电源创新全液冷 AI 仿生热平衡技术（见图 23），采用导热性能强、均温性好的液冷散热，使电池和 PCS 在构网工况下保持合理的温度区间；叠加 AI 仿生算法对未来一天内的充放电行为进行预测，并结合电池与环境温度变化趋势，设计动态热管理控制策略，最大程度保证电池和功率电子器件温度稳定性，降低 20% 系统辅助功耗，提升系统经济性。

图 23：全液冷 AI 仿生热平衡技术控制逻辑

3. 构网型电气硬件设计

① 背景

构网工况提供频率调节、电压支撑、惯量响应等，功率变化快，短时高倍过载等特性，对于储能系统电气硬件的耐受能力带来考验。构网工况下短时最大电流会达到额定工况电流的 3In，对电气硬件系统产生负荷耐受冲击。传统储能系统的电气硬件选型设计，器件的耐负荷冲击能力存在风险，影响系统的性能和安全。

② 技术方案及效果

- 系统耐受设计：

针对构网应力耐受和电气硬件性能，提升主回路熔断器、接触器、断路器、连接器等器件的短时耐受性能参数余量，采用智能化状态检测和智能控制并结合全液冷 AI 仿生热平衡技术，实现多维硬件保护设计。

- 高低穿设计：

为应对构网场景常有的短时欠压，以及电气硬件的各功能模块能耐受短时的电源降低，甚至中断，而基础功能不受影响等的要求，构建了智能 / 可靠的故障穿越设计，使储能系统顺利通过电网振荡。

- 辅助系统设计：

在需要提供构网支撑的不稳定电网场景中，储能系统的各硬件连接环节都有可能因为电网的振荡导致电气参数变化，或者高频振荡的传递。传统的低阻抗回路可能因为振荡频率的叠加而导致阻抗提高，最终影响整体的电气连通性。电气硬件针对这些场景对储能系统的各环节如站级、Block 级、箱级的电气连通性进行了针对性优化，保障在各场景中电气连通性的可靠。

3.3

场站侧自主协同控制

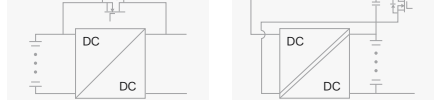
1. 场站级交直流联动技术

① 背景

随着可再生能源渗透率持续提升，电网对储能越来越高的调度需求直接映射到直流侧的电池。如电网高穿要求全 SOC 段保交流侧有功的能力，以及交流侧谐波电流与直流侧纹波电流的协同抑制等，将进一步加速交直流侧充分联动。在构网方面，采用简单的通过直流侧超配或降额使用满足系统 3 倍有功需求，增加了初始投资，降低了电站的经济性。

② 技术方案及效果

阳光电源在电站管理系统采用主动感知、主动储备、主动协调的交直一体化管理技术。以电网高穿要求全 SOC 段保交流侧有功的能力为例：传统全功率簇级动态调压两级架构（见图 24a），可解决单级储能高穿保有功问题，但成本高、效率低。部分功率簇级动态调压成本低、效率高（见图 24b），兼具多簇并联下的簇均衡功能，解决簇间环流问题。



a) 传统：全功率簇级动态调压　　b) 阳光电源：部分功率簇级动态调压

图 24：簇级动态调压

2. 大规模场站黑启动技术

① 背景

同步发电机在异常停机的情况下，需要构建一定容量的电压源，辅助主同步发电单元重新启动。传统黑启动通过柴油机给同步发电机、变压器等建立励磁，长期备用污染大、运维成本高，尤其在末端电网区域，因地处偏远，结构薄弱，面临供电孤岛化、灾害易发及电力恢复困难等挑战。与此同时，可再生能源接入比例越来越高，分布式电源愈发普及，对黑启动的功能需求迫切，对黑启动的规模要求逐渐增大。

② 技术方案

阳光电源光伏逆变器 / 储能系统黑启动技术（见图 25），无需额外添加设备，即可使用现场光伏 / 储能系统建立电网电压，并且提供了子阵级、集电线路级、场站级的多种黑启动模式。

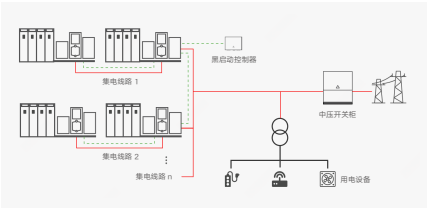


图 25：光伏 / 储能黑启动应用

阳光电源通过双同步技术和动态下垂控制，实现低环流高带载的 GW 级别黑启动。在接收到黑启动指令后，通过发波和相位的双同步技术，保证大规模电站能够在电压建立初期快速抑制环流实现相角同步，最大程度提高黑启动带载能力。动态下垂控制通过实时监测设备自身功率输出与电压，动态快速调节下垂系数，平滑调整黑启动设备间的输出功率，避免个别设备过载，提高黑启动供电可靠性。

③ 技术效果

图 26 呈现了黑启动过程的动态特性。在电压爬启阶段，多组变流器单元实现稳定协同运行，系统未检测到异常环流。待电压稳定建立后，系统成功投入额定负载，暂态过程中电压无超调和振荡，展现出优异的动态性能。

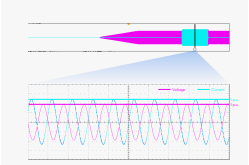


图 26：黑启动过程

3. 不间断并离网切换技术

① 背景

构网型储能 PCS 在并网模式下与主电网同步运行，实现功率双向流动。离网模式下，PCS 独立运行成为局部负载供电，自主调节电压和频率。随着分布式能源的快速发展，储能系统需要在并网和离网模式间无缝切换，以确保供电可靠性和电能质量。并离网的切换策略不当会导致公共连接点产生严重的电气量瞬变，造成对电力系统的干扰和对微电网内敏感设备的损坏。

② 技术方案

在并离网切换时，利用 VSG 的惯性和阻尼作用，平滑地调整输出功率和电压，抑制电压的波动，提高系统的稳定性和可靠性。由离网切换到并网模式时，采取预同步控制方法将 VSG 电压幅值及其相角调节至与电网趋于一致，再实时并网合闸操作以减小冲击，如图 27 所示。

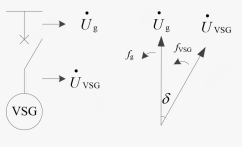


图 27：VSG 并网示意图

③ 技术效果

如图 28 所示，系统由并网模式切换至离网模式的过程中电压和电流波形平稳，功率输出连续，未出现明显的冲击。这一表现证明了该系统具备无缝并离网切换能力，确保了供电的连续性和稳定性。

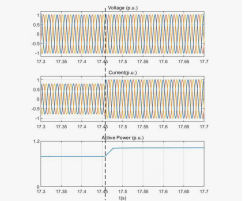


图 28：并网转离网的无缝切换图

- 技术现场测试：

阳光电源顺利完成广西水电科学研究院对 220kV 冬田储能站（75.9MW/151.8MWh）黑启动能力及同期并网功能测试试验，实现大合闸角同期并网（见图 29）。

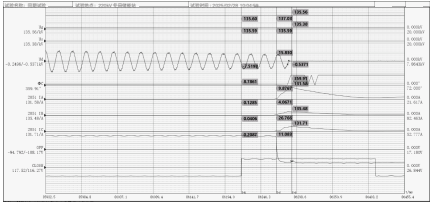


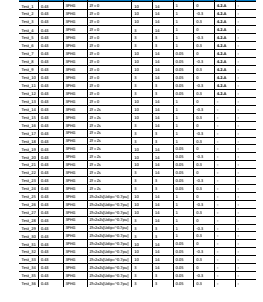
图 29：冬田储能站同期并网试验

3.4

全链路仿真能力

1. GW 级电气仿真

阳光电源拥有全球最大规模的仿真平台，通过 100 多人的电气仿真团队、PSCAD/PSSE/DigSILENT/DSATool 等仿真软件、多个 HIL 实验室、含 RT-Lab/RTDS 等二十余套半实物仿真平台，可面向全球区域进行构网等先进技术产品的仿真测试，最大仿真规模达 GW 级。针对澳洲特殊的电网规范，阳光成功通过澳洲 GPS 认证，针对模型的 DMAT 测试共计通过 1000 余项模型测试（见图 30）。



SUNGROW PPC DMAT ASSESSMENT REPORT

4.2 Balanced fault

Table 4.2-1: Balanced fault tests WSG discharging

Test ID#	Plant Active Power	Fault type	Fault Impedance (Ohms)	POC kV	Post-dip kV	Voltage at POC in pu	Plant Reactive Power	RECOG Time	Meets Limit
Test_1	0.05	3PHG	R = 0	33	33	0	0	0.2 s	
Test_2	0.05	3PHG	R = 0	33	33	0	-0.5	0.2 s	
Test_3	0.05	3PHG	R = 0	33	33	0	0.5	0.2 s	
Test_4	0.05	3PHG	R = 3	3	33	0	0	0.2 s	
Test_5	0.05	3PHG	R = 3	3	33	0	-0.5	0.2 s	
Test_6	0.05	3PHG	R = 3	3	33	0	0.5	0.2 s	
Test_7	0.05	3PHG	R = 3	33	33	0.05	0	0.2 s	
Test_8	0.05	3PHG	R = 3	33	33	0.05	-0.5	0.2 s	
Test_9	0.05	3PHG	R = 3	33	33	0.05	0.5	0.2 s	
Test_10	0.05	3PHG	R = 3	3	33	0.05	0	0.2 s	
Test_11	0.05	3PHG	R = 3	3	33	0.05	-0.5	0.2 s	
Test_12	0.05	3PHG	R = 3	3	33	0.05	0.5	0.2 s	
Test_13	0.05	3PHG	R = 3	33	33	0	0	-	
Test_14	0.05	3PHG	R = 3	33	33	0	-0.5	-	
Test_15	0.05	3PHG	R = 3	33	33	0	0.5	-	
Test_16	0.05	3PHG	R = 3	3	33	0	0	-	
Test_17	0.05	3PHG	R = 3	3	33	0	-0.5	-	
Test_18	0.05	3PHG	R = 3	3	33	0	0.5	-	
Test_19	0.05	3PHG	R = 3	33	33	0.05	0	-	
Test_20	0.05	3PHG	R = 3	33	33	0.05	-0.5	-	
Test_21	0.05	3PHG	R = 3	33	33	0.05	0.5	-	
Test_22	0.05	3PHG	R = 3	3	33	0.05	0	-	
Test_23	0.05	3PHG	R = 3	3	33	0.05	-0.5	-	
Test_24	0.05	3PHG	R = 3	3	33	0.05	0.5	-	
Test_25	0.05	3PHG	Pt-2x3x2@4ps-*0.5pu	33	33	0	0	-	
Test_26	0.05	3PHG	Pt-2x3x2@4ps-*0.5pu	33	33	0	0.2	-	
Test_27	0.05	3PHG	Pt-2x3x2@4ps-*0.5pu	33	33	0	0.5	-	
Test_28	0.05	3PHG	Pt-2x3x2@4ps-*0.5pu	3	33	0	0	-	
Test_29	0.05	3PHG	Pt-2x3x2@4ps-*0.5pu	3	33	0	0.2	-	
Test_30	0.05	3PHG	Pt-2x3x2@4ps-*0.5pu	3	33	0	0.5	-	
Test_31	0.05	3PHG	Pt-2x3x2@4ps-*0.5pu	33	33	0.05	0	-	
Test_32	0.05	3PHG	Pt-2x3x2@4ps-*0.5pu	33	33	0.05	-0.5	-	
Test_33	0.05	3PHG	Pt-2x3x2@4ps-*0.5pu	33	33	0.05	0.5	-	
Test_34	0.05	3PHG	Pt-2x3x2@4ps-*0.5pu	3	33	0.05	0	-	
Test_35	0.05	3PHG	Pt-2x3x2@4ps-*0.5pu	3	33	0.05	-0.5	-	
Test_36	0.05	3PHG	Pt-2x3x2@4ps-*0.5pu	3	33	0.05	0.5	-	

Page

图 30：阳光电源 DMAT 仿真报告 (PSCAD/PSSE)

在澳洲 P 构网型项目中，对 303MW/672MWh 储能系统进行整站仿真，确保场站在并网点背景电网参数下可稳定运行并满足并网性能指标要求：

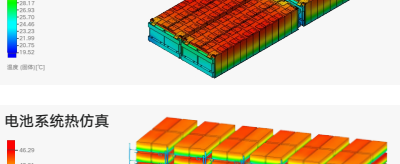
① 通过电磁、机电仿真模型及半实物的比对，确保建模仿真的准确性和一致性；

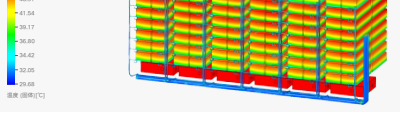
② 通过场站级大电网仿真，综合评估构网型电站对并网点电网环境的影响和贡献；

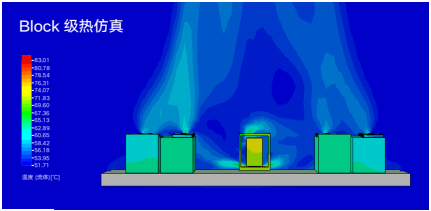
③ 通过精确建模场站参数，及 1000 余项的动态仿真测试，确保电站满足澳洲 National Electricity Rules (NER) 对新能源发电机的技术指标要求；

2. GWh 级热仿真

阳光电源热仿真实验室凭借先进的硬件设施和专业的团队支持，覆盖全球多样化仿真需求。其计算能力依托千核级 CPU+GPU 异构计算集群，可处理亿级网格单元，速度较传统热仿真工作站提升 2 倍以上，集成 Fluent、Icepak、Floefd 等主流热仿真软件，可完成从建模到结果分析的全流程仿真。热仿真覆盖构网型器件、单机、一体机及场站级，支持稳态 / 瞬态 / 多物理场耦合，适应温度、湿度、海拔等多种工况，能解决风冷、液冷、相变等混合散热问题。目前，已成功验证过 20GWh 级电站和 1 亿 + 网格单元的复杂场景，助力大规模新能源场站热管理的长期稳定：







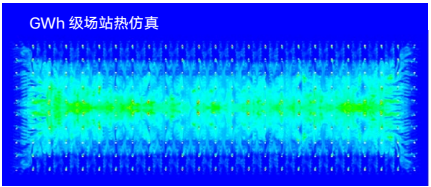


图 31：从器件到场站的热仿真实例

① **优化系统能效，降低运营成本**

通过热仿真优化散热和温控设计，降低冷却系统能耗，对于构网型项目，能效提升可显著降低长期运营成本。比如储能电池组通过热仿真确保电池工作在最佳温度区间，延长寿命并提高系统整体能效。

② **识别复杂工况风险，增加设计鲁棒性**

构网型项目通常面临多变的运行环境和负载条件，热仿真可模拟瞬时过载等条件下的热性能，确保设备在全生命周期内的可靠性。

③ **实现智能化热管理，提升系统性能**

通过仿真数据构建数字化模型，优化冷却系统运行策略，动态调整风量和冷量分配，实现智能化热管理，可提升系统性能和运维效率。

3. GWh 级噪声仿真

阳光电源噪声仿真实验室拥有 cadnaA/soundplan/simcenter 3D 等仿真软件，可覆盖全球新能源场站级的噪声仿真需求，其噪声仿真分析符合 ISO 9613《国际通用声学户外声传播衰减标准》、HJ 2.4《环境影响评价技术导则声环境》国际通用标准。

针对全球环境的差异性，以构网型产品为例，阳光电源噪声仿真满足在不同环温（25℃、35℃、55℃…）、不同运行功率（100%、80%、50%…）、不同的电站布局、不同地理位置等多因素耦合场景下的应用需求，最大仿真规模达 20GWh 以上，为新能源场站选址建设起到关键作用：

① 评估电站辐射噪音是否满足当地噪音环保要求；

② 设计降噪方案并做噪音优化仿真评估；

③ 推荐符合噪音要求的合适的电站离居民区选址要求。

以图 32 为例，展示了某 GWh 级电站的辐射声压级云图，直观量化电站周边噪声分布，为是否满足环保要求、选址评估和降噪设计提供可视化依据。

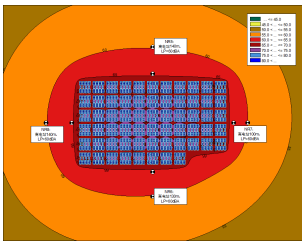


图 32：某 GWh 级电站附近辐射声压级云图

04

技术验证

4.1 TÜV Rheinland 验证及结果

TÜVRheinland®

本报告旨在评估阳光电源储能变流器的构网性能。
评估流程如下：

识别挑战：通过收集市场、客户及电网运营商的反馈，剖析高比例新能源接入为电网管理带来的问题与挑战。

提出解决方案：与阳光电源进行深入技术交流，认为构网技术可作为上述问题的解决方案。

确定技术框架：将解决方案细化为可实施的技术框架，明确构网技术的具体要求。

制定测试计划：为验证产品是否符合技术框架要求，制定详细测试计划，指导测试流程。测试方式包括 HIL 仿真和现场实物测试。

完成验证：按测试计划完成各项测量，评估产品输出特性是否满足技术框架要求。

结果认定：对评估流程、技术框架及验证结果进行最终审查，判定产品是否具备构网能力，是否有助于提升电网稳定性。

测试结果显示，阳光电源储能变流器 SC2500UD-P3 / SC1250UD-FM / SC2500UD-US-P3 / SC210HX-US-FM / SC210HX-FM / SC125HX-FM 在构网性能方面表现优异，具备以下能力：抗相跳、电压 / 频率振荡阻尼、抗励磁涌流、宽 SCR 运行、电压故障穿越（VFRT）、一次调频控制、黑启动和短时过载能力等。

TÜV Rheinland LGA Products GmbH
电网规范合规性服务

测试项	内容	结果
1 电压相位跳变的响应	±0.2Pn，±90°单相 / 两相相角跳变，运行 15S	通过
2 电压干扰阻尼	±0.2Pn，频率扰动幅值 0.05Hz，扰动频率 0.1Hz、1Hz、2.5Hz、10Hz； ±0.8Pn，频率扰动幅值 0.05Hz，扰动频率 0.1Hz、1Hz、2.5Hz、10Hz	通过
	±0.2Pn，电压扰动幅值 5%Un，扰动频率 0.1Hz、1Hz、2.5Hz、10Hz ±0.8Pn，电压扰动幅值 5%Un，扰动频率 0.1Hz、1Hz、2.5Hz、10Hz	通过
3 高频阻抗	零功率，1Hz~400Hz 正负序阻抗扫描，步长 1Hz； ±0.5Pn，1Hz~400Hz 正负序阻抗扫描，步长 1Hz； ±1Pn，1Hz~400Hz 正负序阻抗扫描，步长 1Hz	通过
	零功率，410Hz~2400Hz 正负序阻抗扫描，步长 1Hz； ±0.5Pn，410Hz~2400Hz 正负序阻抗扫描，步长 1Hz； ±1Pn，410Hz~2400Hz 正负序阻抗扫描，步长 1Hz；	通过
4 抗励磁涌流	PCS 建立电压后，突然投入与 PCS 容量一样的变压器	通过
5 SCR 耐快速变化	±0.25Pn，SCR：10->1->10。 ±0.7Pn，SCR：10->1->10。 ±0.25Pn，SCR：40->1->10。 ±0.7Pn，SCR：40->1->10。	通过
6 极低 SCR 适应性	SCR=1，±0.7Pn，电压跌落至 0Un，持续 10S	通过
7 跟 / 构网模式切换	±0.2Pn，±0.8Pn，构网模式与跟网模式切换	通过
8 电压故障穿越	低电压穿越：±0.2Pn，三相 / 两相电压 0.05Un、0.2Un、0.4Un、0.6Un、0.8Un 低电压穿越：±0.8Pn，三相 / 两相电压 0.05Un、0.2Un、0.4Un、0.6Un、0.8Un	通过
	高电压穿越：±0.2Pn，三相 / 两相电压 1.13Un、1.17Un、1.23Un、1.3Un 高电压穿越：±0.8Pn，三相 / 两相电压 1.13Un、1.17Un、1.23Un、1.3Un	通过
	连续低穿：±0.2Pn，三相跌落至 0.05Un，间隔 2S 连续低穿：±0.8Pn，三相跌落至 0.05Un，间隔 2S	通过
	连续低高穿：±0.2Pn，三相 0.05Un-1.3Un，连续 6 次 连续低高穿：±0.8Pn，三相 0.05Un-1.3Un，连续 6 次	通过
9 同步调相机	4 台构网变流器并联运行于调相机模式，测试三相 / 单相接地	通过
10 并离网模式切换	并网额定功率放电，断开电网，接入 Pn、0.66Pn、0.33Pn 阻性负载， 记录端口电压稳定至 ±5% 的时间	通过
11 一次调频	±Pn，电网频率从 50Hz 阶跃至 47Hz/53Hz	通过
12 黑启动	两台构网型变流器并联，首先接入 0.2Pn 负载，待母线电压稳定，1min 后再将负载增加至 1Pn	通过
13 过载	±Pn，使构网型变流器在 1.2In、1.5In、3In 运行	通过

图 33：TÜV 莱茵对阳光电源构网型变流器性能的测试

05

因网制宜的项目案例

阳光电源全球构网型项目容量超 12GWh，项目总数达 30+，覆盖发电侧、输电侧、用电侧、微电网等差异化应用，以“因网制宜 守护电网安全稳定”的技术理念，定制化构网技术解决方案，助力各区域新型电力系统平稳运行。

西藏乃东才朋 20MW/80MWh 构网型储能项目

西藏乃东才朋地处偏远、网架结构薄弱、高比例新能源消纳能力有限、天气变幻莫测，电网稳定性问题凸显。同时该地区平均海拔约 4200 米，年度最低气温达零下 21℃，冬春季节供暖用电需求旺盛，面临电力短缺的风险。

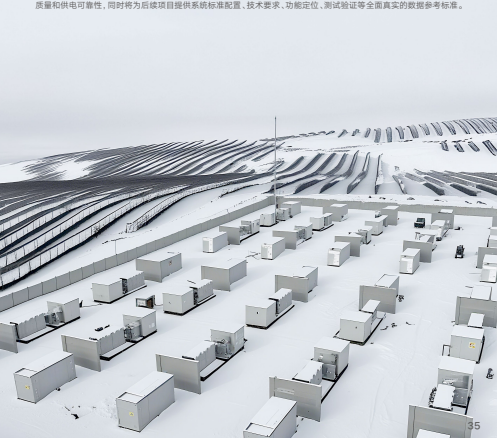
阳光电源提供 20MW/80MWh 的构网型 PowerTitan 2.0 解决方案，与当地光伏能源项目融合提高新能源消纳水平，储能系统支持源网成构网实时自切换，在 100μs 内实时构建电压，5ms 完成频率调节，适时帮电网"充合适的电"，大幅降低阴晴雨雪天气对电网稳定性影响，并且吸收谐波进一步保障电网的稳定运行，针对该地区冬春季节常见的风沙现象，PowerTitan 2.0 通过 AI 仿生热平衡技术，自动识别储能系统内部运行状态和外部气象条件，自主调节热管理模式，保障系统处于最佳的运行温度的同时，减少 20% 热管理损耗，起长储能系统寿命。通过储能系统充放电曲线结合光伏电力缓解藏中地区冬春季节电力短缺情况。

四川阿坝州红原安曲 50MW/100MWh 构网型储能项目

平均海拔 3600 米的阿坝州红原县，面临高海拔、偏远地区网架结构薄弱、供电可靠性差、高比例新能源消纳能力有限、弱网振荡等问题，电网安全稳定运行和可靠性面临诸多挑战。

阳光电源提供 50MW/100MWh 的构网型 PowerTitan 2.0 解决方案，通过先进的构网控制算法和策略、高海拔的电气和结构设计等，不仅为区域电网提供惯量支撑、调频调压、黑启动、抑制宽频振荡、并离网切换等功能，还解决构网型储能电站在实际运行中的环流抑制、SOC 一致性管理、黑启动组网、高海拔 3 倍 10S 过载能力等诸多难题。针对当地网况、储能站运行工况，阳光电源进行整站级和单元级仿真，保障了储能电站顺利并网。

作为四川省新型电力系统建设示范的首个构网型储能电站，不仅提高当地电网强度和新能源消纳能力、提升电能质量和供电可靠性，同时将为后续项目提供系统标准配置、技术要求、功能定位、测试验证等全面真实的数据参考标准。



四川甘孜色达县 40MW/80MWh 县域微网项目

甘孜北部地区地处青藏高原东南部，地理位置偏远，大电网延伸困难，色达县所处县域为单线单变供电，若发生线路故障或检修，将造成大面积长时间停电，供电质量和可靠性长期面临挑战。随着当地经济的快速发展和人民生活水平的不断提高，电力需求持续增长，电网保供压力日益加大。

阳光电源提供 40MW/80MWh 的构网型 PowerTitan 2.0 解决方案，首创了业内在高海拔地区由构网型储能支撑县域负荷的场景应用。PowerTitan 2.0 在平均海拔 4000m 的色达县稳定发挥削峰填谷的作用、通过柔性频率控制和微秒级电压构建提升电网供电能力；在电网故障时，通过不间断并离网切换技术能够快速切换至离网模式，脱离大电网自主运行，保障色达县重要负荷的稳定供电，解决了甘孜北部电网单线路故障或检修导致的长时间停电问题，为四川、西藏、新疆等偏远地区的县域微网规划作出了先驱性的示范。

06

总结与展望

构网技术正从设备级控制迈向系统级重构，千细胞构网技术 2.0 将稳定基因植入新能源电站，实现从被动跟随到主动构建的跃迁。在“因网制宜”的技术理念下，千细胞构网技术 2.0 的“电池 - 变流 - 场站”三级协同架构，不仅赋能电网类同步机支撑能力，更解锁了不同网况下调频调压等辅助收益的提升，进化了新能源电站“稳定即收益”的商业逻辑。

阳光电源将积极推动与产业界的协同合作，完善新能源电站并网标准规范，加强基础研究和先进支撑技术开发应用，为全球能源绿色转型贡献力量。

干燥剂有限体式2.0
2020年6月印刷

SUNGROW

让人人享用清洁电力
Clean power for all

阳光电源股份有限公司
中国合肥市高新区习友路1699号

邮编：230088
总机：0551-65327878，7877
网址：www.sungrowpower.com

销售热线：
400 119 7799
邮箱：sales@sungrowpower.com

阳光光储抖音号　阳光光储微小程序　阳光光储充云方微信

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、产品类别、新技术的信息。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。阳光电源不对因本文档采取上市治的任何行为承担责任。阳光电源可随下列通知将本上述信息，恕不另行通知。