

联合体

采用自同步技术的 构网型光伏逆变器

高比例新能源时代电网稳定性的核心支撑

白皮书



根据《2024年世界能源统计年鉴》，2023年全球一次能源消费中，化石能源占比高达82%。其中，石油（32%）是最大来源，其次是煤炭（26%）和天然气（23%）。然而，这种高度依赖化石能源的结构正面临多重风险。首先是资源枯竭问题：作为占比最大的能源，石油的全球探明储量仅够维持约50年的开采。其次是气候变化挑战：化石燃料燃烧释放的大量CO₂导致全球变暖，进而引发海平面上升、生物多样性锐减等一系列严重后果。因此，当前的能源模式不仅加剧了能源安全风险，也对全球生态环境构成巨大威胁。

面对这一严峻挑战，全球178个缔约方共同签署的《巴黎协定》设定了明确目标：将全球平均温升控制在工业化前水平2°C以内，并努力限制在1.5°C以内。要实现这一意义深远的目标，根本出路在于全球能源系统的深度转型。因此，大力发展以可再生能源为代表的新能源产业，已成为实现全球零碳愿景的核心路径和必然趋势。

01	建设新型电力系统的挑战.....	04
	1.1 高比例新能源时代的新型电力系统挑战一：安全性要求	
	1.2 高比例新能源时代的新型电力系统挑战二：经济性要求	
	1.3 新型电力系统未来展望	
02	技术破局	10
	——光伏逆变器具备构建韧性电网的能力	
03	产品应用	11
	——工程实践及价值	
	3.1 技术验证一：主动支撑	
	3.2 技术验证二：振荡抑制	
	3.3 技术验证三：短路比试验	
	3.4 技术验证四：自组网和黑启动	
04	应用案例	19
	全球首例构网型光伏电站全维度验证	



摘要

上海中绿新能源科技有限公司联合禾望电气依托主力电源型新能源场站整体解决方案,推出全球首个实际应用的构网型光伏逆变器,通过虚拟同步机技术(VSG)推动解决高比例新能源接入导致的电网失稳、振荡、经济性下降等痛点。光伏场站实测表明:构网光伏逆变器在电网主动支撑、振荡抑制、提升电网强度、弱网运行、黑启动等方面具备实际可行性和技术优势,可以为能源转型提供高性价比技术路径。

01

建设新型电力系统的挑战

面对化石能源枯竭的紧迫性与生态环境问题的复杂性,能源转型已成为必然选择。构建以高比例新能源为主体的新型电力系统,则是实现人类可持续发展的关键路径。

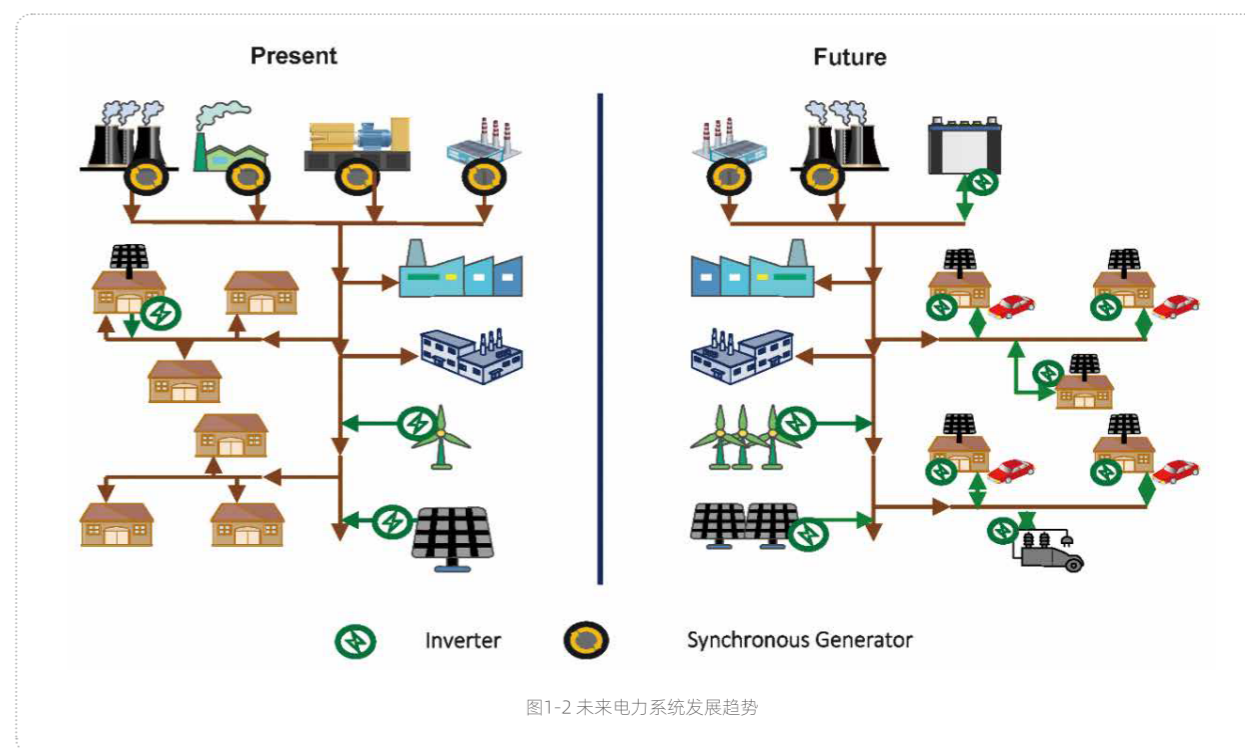
然而,在新能源项目大规模部署的进程中,其与生俱来的技术特性(如电力电子设备导致的低惯量、弱电网支撑能力)正动摇电网安全稳定运行的基础,并影响发电收益。为保障电网安全,新能源电站投资者往往需要额外承担相当规模的配套设备成本,来满足电网安全运行要求。除了显著的经济负担外,更严峻的挑战在于并网稳定性本身,即便已经配置相当数量和比例的调相机,仍然存在系统失稳风险。

由此形成了新能源发展进程中难以回避的“不可能三角”矛盾:大规模部署的必然性、电网运行的安全性、项目投资的经济性,三者难以同时兼顾。其根源在于,新能源发电本质上作为电网的“被动跟随者”,缺乏传统同步发电机所提供的惯量和电压支撑等关键系统服务能力。



1.1 高比例新能源时代的新型电力系统挑战一：安全性要求

新能源高比例接入电网可以大幅降低发电成本,但也会对电力系统的稳定性、可靠性、电能质量带来新的挑战。本质上源于电力电子控制方式与传统发电系统的差异以及新能源存在波动性、不确定性、低惯量等问题。



1.1 高比例新能源时代的新型电力系统挑战一：安全性要求

■ 典型暂态安全性问题：缺乏主动支撑

同步发电机的励磁系统可在电网电压深度跌落时，瞬时提供远超额定值的无功电流，支撑电压恢复，防止系统电压崩溃。传统跟网型逆变器依赖于锁相环跟踪电网电压，在电压严重畸变时，锁相环可能失锁，导致逆变器控制紊乱，无法提供足够的动态无功支撑，易触发保护脱网，加剧崩溃。

例如2024年中国北方某地发生“功率振荡”事件：由于线路检修，某条同步电源线路切出，电网系统无功支撑能力减弱，汇集站发生电压深度跌落，导致AVC设备闭锁。场站电压的波动导致风机、SVG反复进入高低穿，引发电网系统相继出现20Hz和16.6Hz功率振荡。最终依靠同步电源线路重新切入才消除振荡。

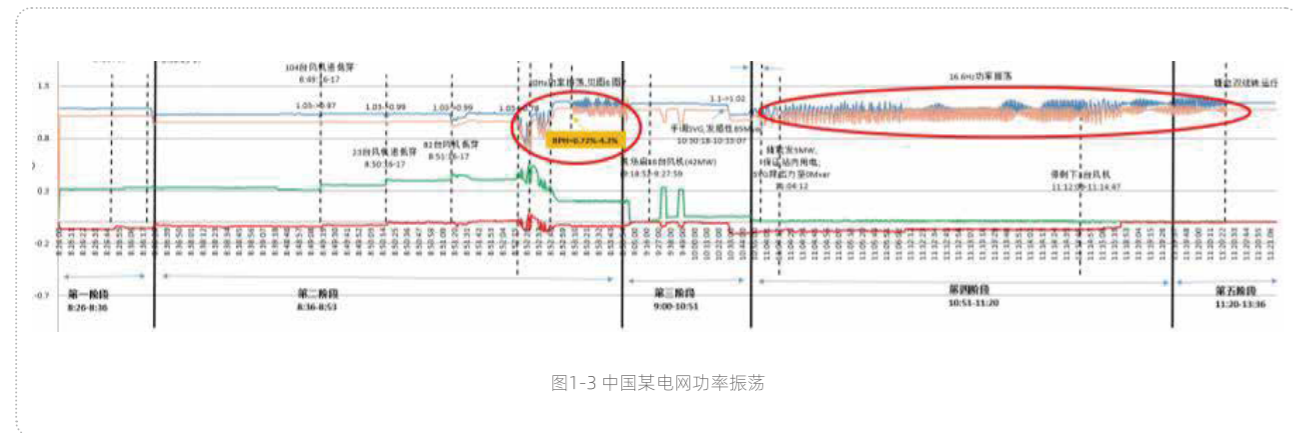


图1-3 中国某电网功率振荡

■ 典型暂态安全性问题：振荡

电力系统的长期稳定依赖于两大支柱：第一支柱为正阻尼特性，其可确保系统受小扰动后能自然回归平衡点，避免振荡发散；第二支柱为动态无功储备，是维持电压稳定的关键。同步机励磁系统可动态调节无功输出，而传统新能源设备存在较大范围的负阻尼特性以及缺乏高过载能力应对动态电网无功需求，增加电压失稳风险。

例如在2025年4月28日西班牙大停电发生前半小时内，处于高比例新能源稳态运行的伊比利亚电网曾连续检测到两次显著的低频振荡。电网运营商虽采取提升电网运行电压措施抑制系统中的振荡，但随后部分电源的解列导致了电网系统的扰动，造成了后续级联故障和大范围停电。

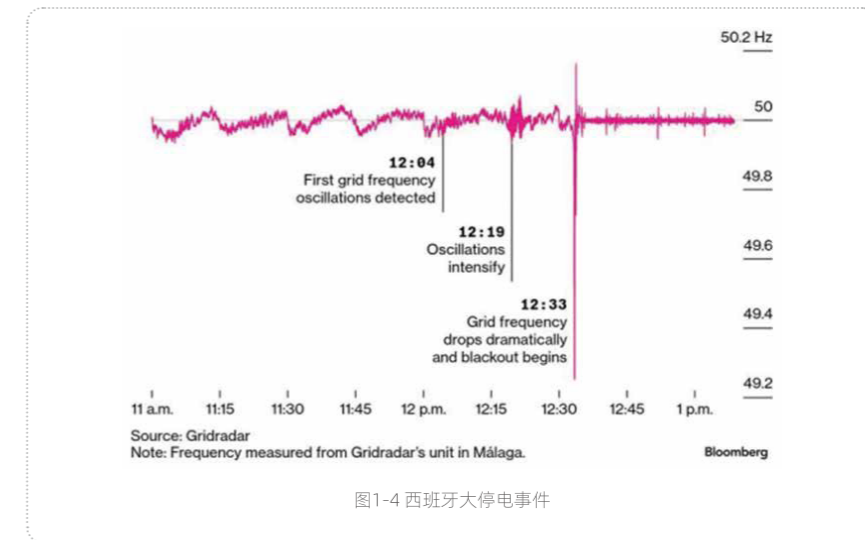


图1-4 西班牙大停电事件



1.2 高比例新能源时代的新型电力系统挑战二：经济性要求

高比例新能源接入带来的技术挑战，最终都化为显著的经济压力。这些压力不仅体现在电网系统的整体投资和运行成本上，更直接关系到新能源项目投资者的收益与生存空间。解决这些经济性问题，是能源转型能否持续推进的关键。

■ 新型电力系统建设的宏观经济压力

- 1 平抑新能源波动性需大规模配套抽水蓄能、电化学储能及智能调度系统，推高系统协调成本。
- 2 弱电网区域新建变电站、需加装调相机、SVG等设备以提升短路容量和阻尼能力，投资周期长且受土地等条件约束。
- 3 应对新能源并网问题，需部署复杂保护装置、更频繁的调试系统以及专业运维团队，显著增加日常运维成本。

■ 新能源投资商的微观经济性困境

A

在弱网或电网稳定性要求高的区域，需额外配置构网型储能、调相机，显著延长投资回收期。

B

电压失稳、宽频振荡等问题导致脱网，直接造成发电量损失。

C

稳定性问题导致电站长期不能并网或限制出力，加剧弃光、弃风。

破局的关键在于从源头上提升新能源设备自身的电网支撑能力，使其能够以更低的系统改造成本和项目配套成本，安全、稳定地接入并支撑电网。构网型光伏逆变器技术正是解决这一经济性困境的核心技术路径，它通过赋予光伏逆变器主动构建和稳定电网的能力，显著减少对外部昂贵支撑设备的依赖，从而在系统安全和项目经济性之间找到平衡点。

为此，上海中绿新能源科技有限公司联合禾望电气共同打造了**全球首款具备构网能力的光伏逆变器**，推动光伏电站从“电网适配者”向“**系统稳定构建者**”转型。

1.3 新型电力系统未来展望

过去，传统电力系统以同步发电机为核心，新能源开始作为“被动跟随者”接入电网，依赖同步机提供惯量与电压支撑。

现在，光伏、风电等跟网型电力电子设备大规模替代同步机，导致电力系统稳定性问题凸显，其并网需电网本身进行大量适应性改造。

未来，新能源设备将主动模拟同步发电机特性，自主建立和稳定电网电压与频率。不再依赖同步电源作为唯一稳定基点，而是通过分布式构网设备共同支撑系统，从根本上解决稳定性与高比例新能源接入的矛盾，并大幅降低配套投资。





技术破局：光伏逆变器具备构建韧性电网的能力

能源体系转型不仅仅是能量来源的转变，更是电力系统的重构，传统同步机组的“旋转惯量”随火电退出而消失，新能源必须成为“电网主动构建者”。构网型技术将新能源从“跟随者”重塑为“构建者”，通过软件算法稳定重构电网安全。

上海中绿新能源科技有限公司与禾望电气共同研发的逆变器采用以自同步技术为核心的构网算法，精准模拟同步发电机转子运动方程与阻尼特性，将逆变器端口特性塑造为类似同步发电机特性，从发电源头优化新能源并网带来的电力系统问题

■ 构网型设备可实现核心功能

1 主动支撑电网

提供频率/惯量支撑、主动电压支撑

2 电能质量改善

谐波抑制、不平衡抑制、提升系统阻尼

3 提升系统动态无功支撑能力

3倍强过载能力（跟网型仅1.1倍过载）

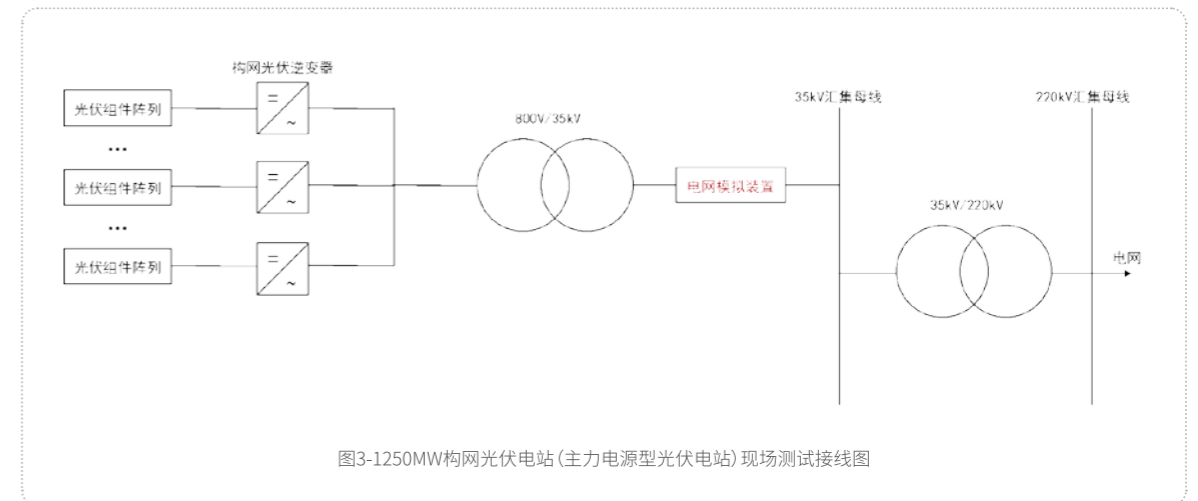
4 自组网

黑启动、孤岛运行能力



产品应用：工程实践及价值

2025年4月，世界首例构网型光伏电站(主力电源型光伏电站)在中国绿发新疆尼勒克项目完成一次调频、惯量响应、短路比适应性等10大项、21小项、209个测试工况的全面测试验证，测试结果验证了构网光伏电站(主力电源型光伏电站)的应用价值。现场测试接线图如下：



3.1 技术验证一：主动支撑

■ 暂态频率支撑测试

为验证构网型光伏逆变器对电力系统的暂态频率支撑能力，进行了以下两项关键测试：一次调频测试和惯量响应测试。

① 一次调频响应

当检测到电网频率低于额定值($f < f_0$)，表明系统存在有功功率缺额，构网型逆变器(在具备可用能量储备或功率裕度的前提下)将按控制策略增加其输出的有功功率($P \uparrow$)，旨在向电网提供额外有功支撑，帮助提升系统频率。反之，当检测到电网频率高于额定值($f > f_0$)，表明系统存在有功功率过剩，构网型逆变器将减少其输出的有功功率($P \downarrow$)，旨在帮助降低系统频率。图3-3展示了构网型光伏电站(主力电源型光伏电站)的一次调频功能现场实测曲线。

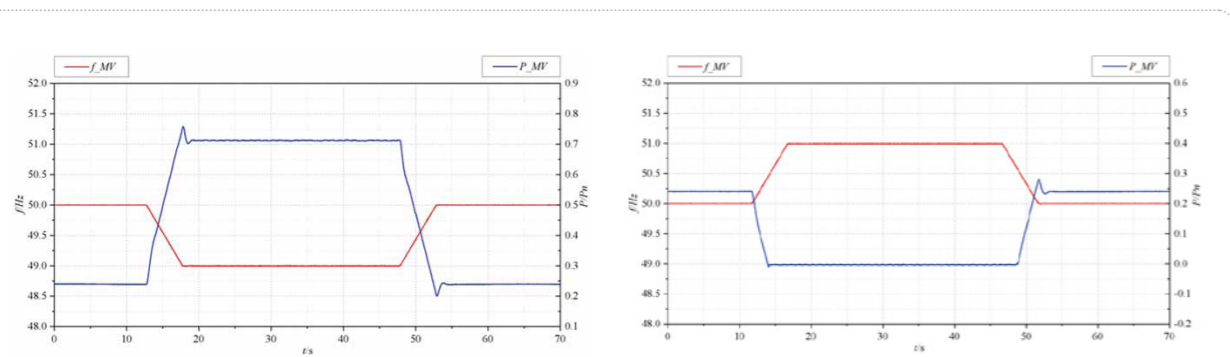


图3-3构网光伏电站(主力电源型光伏电站)一次调频现场实测曲线

② 惯量响应

当系统发生有功功率缺额(如大负荷投入)，导致频率快速下降($df/dt < 0$)时，构网型逆变器控制算法中的虚拟惯性项($-T_j * df/dt$)产生正值指令。该指令驱动逆变器(在具备可用能量储备或功率裕度的前提下)立即主动增加有功功率输出($P_m \uparrow$)，旨在模拟同步发电机的惯性响应，抑制频率的下降速率。反之，当系统发生有功功率过剩(如大负荷退出)，导致频率快速上升($df/dt > 0$)时， $-T_j * df/dt$ 项产生负值指令，驱动逆变器立即减少有功功率输出($P_m \downarrow$)，旨在抑制频率的上升速率。如下图所示：

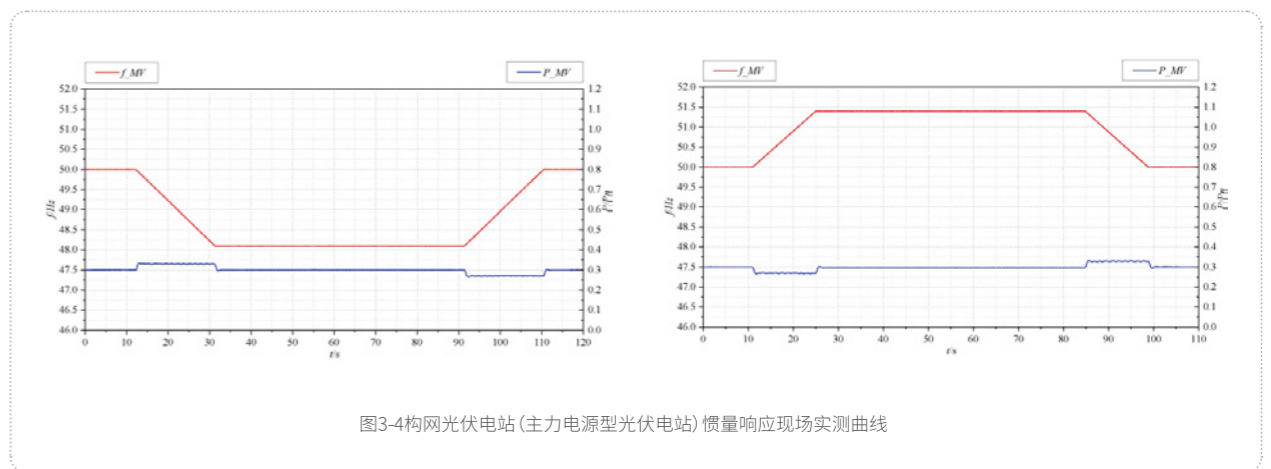


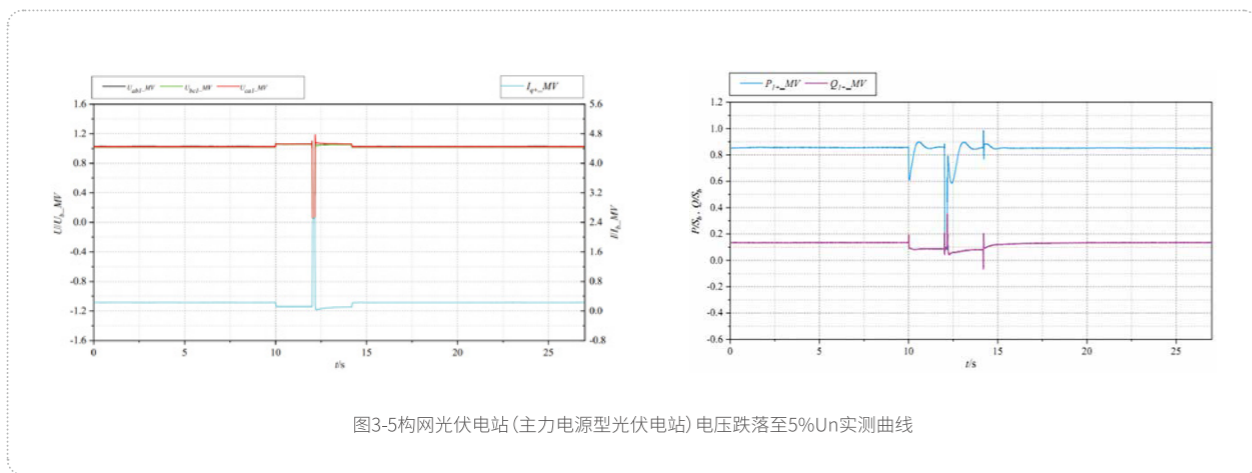
图3-4构网光伏电站(主力电源型光伏电站)惯量响应现场实测曲线



3.1 技术验证一：主动支撑

■ 暂态电压支撑测试

构网光伏电站(主力电源型光伏电站)现场验证了连续暂态电压支撑和暂态高、低电压支撑能力。当检测到并网点电压下降时,尽力维持内电势电压幅值,以影响PCC电压,无功电流输出($i_q \uparrow$)增加。下图中可以看出,当电压跌落至0.02Pu时,逆变器输出超过额定电流2.5倍以上的无功电流对电网电压进行支撑。



■ 电压相角响应测试

构网型逆变器本质是一个受控电压源,其核心在于自主建立并维持稳定的内电势幅值和相位。当电网发生扰动(如线路投切)导致并网点(PCC)电压相位发生突变时,构网逆变器内电势相位与PCC电压相位之间的功角(δ)随之突变。根据交流系统的功角特性,这种功角突变会自发地引发有功和无功功率流的瞬时调整。这种由物理定律驱动的自发功率响应,其核心作用在于:

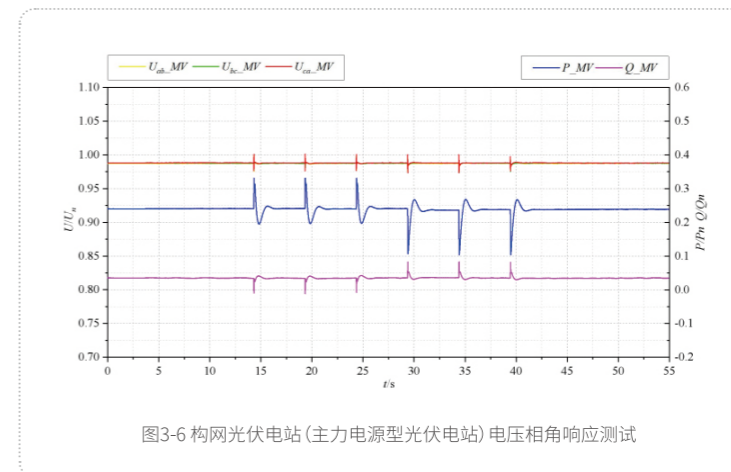
频率支撑(主要)

有功功率的快速注入/吸收,有助于维持系统的有功功率平衡,抑制频率的波动或加速其恢复。

电压支撑

无功功率的调整有助于局部电压的稳定。

图3-6展示了构网光伏电站(主力电源型光伏电站)在PCC电压相角发生跳变时,其输出功率(电流)随之波动的现场实测曲线,验证了构网型逆变器这一响应过程。



应用价值

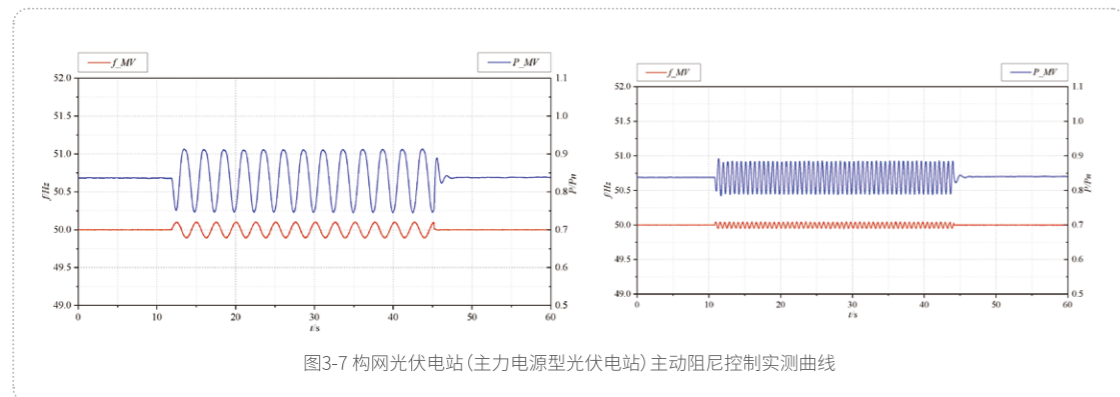
配合构网型储能可以满足电力系统对惯量响应、无功响应的需求,支撑解决高比例新能源电力系统暂态安全性问题。



3.2 技术验证二：振荡抑制

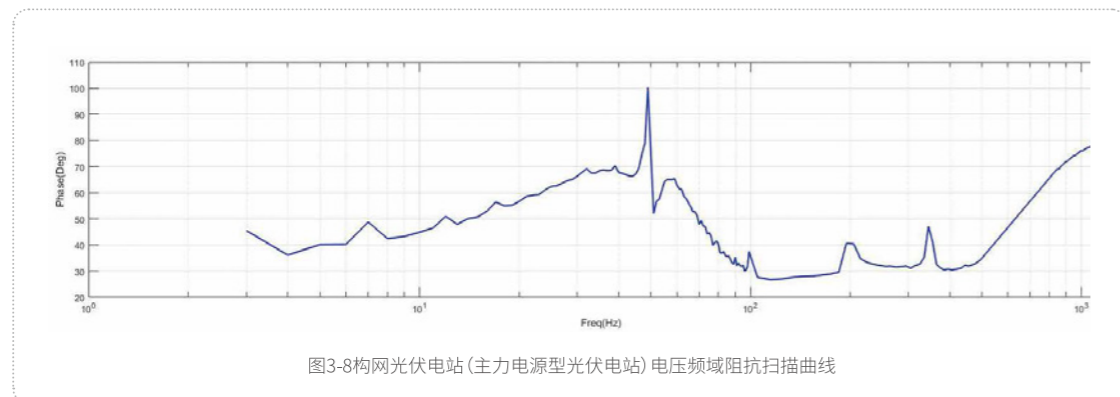
■ 主动阻尼控制

当电网特定频段频率振荡幅度大于系统频率振荡幅度设定值时，构网光伏逆变器将具备通过阻尼控制自动调节有功功率，抑制电网频率振荡的能力。阻尼控制响应时，光伏逆变器提供的振荡能量流 W 应小于零。



■ 频域阻抗扫描测试

对逆变器输出频率3~1000Hz范围内阻抗特性进行扫描，以评估对电网宽频振荡的抑制效果。图3-8显示，在3~1000Hz范围(除电网额定频率附近)内，全部输出正阻尼(阻抗角 $< 90^\circ$)，验证了构网光伏对系统1000Hz以下全范围的振荡抑制作用。

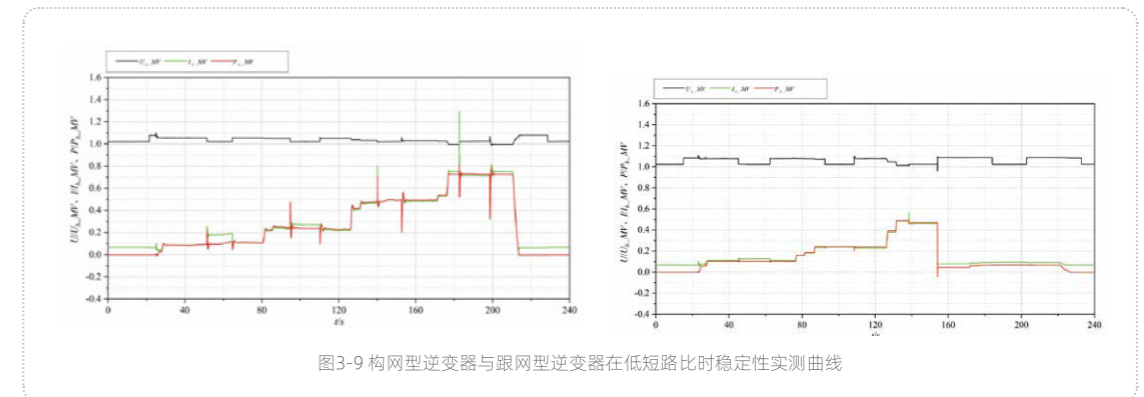


应用价值

构网光伏首先不会成为振荡源，其次还可抑制周边振荡源，减少电网振荡造成的失稳事故。同时，构网逆变器可以在保持电网足够安全裕度的情况下大幅减少调相机、构网储能的配置，提升光伏电站、电网经济性，也能够减少运行过程中因为新能源比例高可能引发电网振荡而造成的弃光现象。

3.3 技术验证三：短路比试验

分别在短路比1.0~2.0、2.0~3.0、9.0~11.0区间内测试构网逆变器是否正常启动、运行，并在同样条件下对比跟网逆变器运行情况，结果显示构网逆变器在不同短路比下均未出现逆变器脱网现象，而跟网逆变器在短路比小于2.5后，出现大面积脱网现象，不能保持稳定运行。



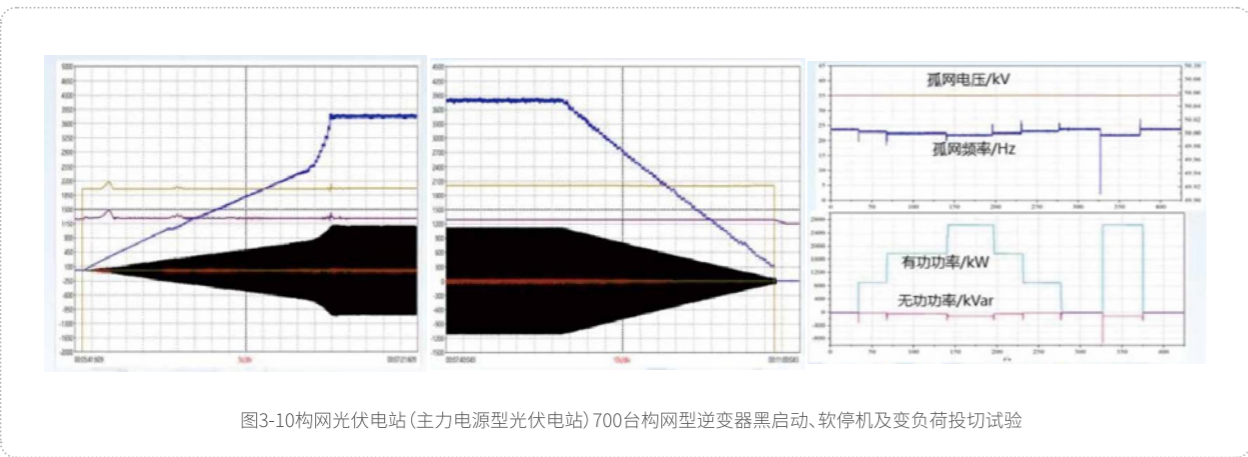
应用价值

应用构网逆变器可以提升场站短路比，同时在低短路比场景下具备更强的适应能力，在不优化电网、不增加投资条件的情况下，支持建设、接入更多的新能源电站，减少因线路检修等导致的短时弱电网造成的电网失稳。



3.4 技术验证四：自组网和黑启动

对220kV场站进行了全场站黑启动测试，包括220kV主变、全场集电线路、箱变及700台逆变器，使用4MW RLC负载形成孤网运行，并在运行中对负载进行调节，构网型逆变器始终能够自主调节有功/无功功率，保持孤网频率/电压稳定。调节成功率100%，电压波动 $< \pm 0.5\%$ ，频率偏差 $< \pm 0.1\text{Hz}$ 。



应用价值

使用构网逆变器建设的新能源场站能够更适配海岛、边防等离网应用场景，保障孤网稳定运行。

综合上述电网暂态支撑能力、小扰动稳定性、黑启动等所有测试，表明构网光伏具备高抗扰、强支撑、正阻尼、宽频稳定的特性。光伏电站配置100%构网型逆变器，并网点短路比在原有基础上可提升2.0左右，构网逆变器的投资成本与常规跟网型逆变器相当，具备巨大的社会推广和应用价值。

04 应用案例

全球首例构网型光伏电站(主力电源型光伏电站)全维度验证

该项目位于中国新疆，总容量750MW的构网光伏示范项目所需的构网型组串式光伏逆变器，解决方案由上海新能源科技有限公司提供，逆变器由上海中绿新能源科技有限公司和禾望电气联合研制并由禾望电气生产提供。

为确保现场电网稳定运行，在新疆电科院指导和国网绿发领导下，测试团队历经38天，完成了10大项、21小项209个测试工况的全维度验证，覆盖构网型光伏惯量响应、一次调频、电网故障暂态支撑、阻抗扫描等核心性能。测试结果表明上海中绿新能源科技有限公司与禾望电气联合研发的构网型光伏逆变器在极端弱网环境下具备支撑电网、抑制振荡、提高短路容量等能力，助力高比例新能源电网的稳定运行。





电话：021-60741082
邮箱：shzl@cgdg.com
地址：上海市闵行区沪闵路1391号华谊万创新所1号楼



客服热线：400-8828-705
电 话：+86-755-86026786
网 址：www.hopewind.com