



HUAWEI

版权所有 © 2023 华为数字能源技术有限公司。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，不得以任何形式传播。

商标声明

、HUAWEI、以及 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，出现的其他的商标、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。华为数字能源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

深圳市福田区香蜜湖街道香安社区安托山六路33号安托山总部大厦
solar.huawei.com



HUAWEI

智能光储发电机 白皮书





目录

CONTENTS

01

背景与趋势

02

主要挑战

03

智能光储发电机解决方案

04

应用案例

05

结语

01 背景与趋势



当前，新一轮能源变革蓬勃兴起，光伏、风电等可再生能源有序取代传统能源，并逐步构建清洁低碳、安全高效的新型能源体系。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。到2025年初，可再生能源发电将超越煤炭，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，也将向高比例新能源、高比例电力电子装备的“双高”新型电力系统转变。

1 中国及部分国家电网面临的典型挑战

高比例的间歇性可再生能源并网将对各国电网稳定性造成一定冲击。比较典型的问题有宽频振荡、暂态过电压、电能质量劣化、孤岛光储供电稳定性等。当前在多个国家和地区，能否改善风光储等电力电子电源的涉网性能，已成为新能源能否持续发展的最关键问题。

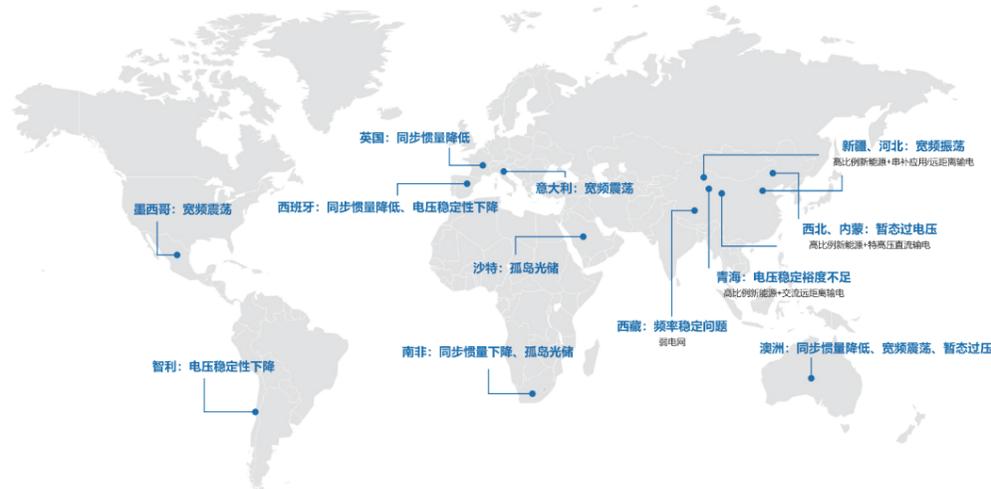


图1 中国及部分国家电网面临的典型挑战

1/2 华为在并网技术领域的创新实践

华为长期致力于提高新能源并网的安全稳定性研究，将数字技术与电力电子技术相结合，并依托其在新材料、芯片设计、有源/无源器件等诸多根技术领域的多年积累，与全球发电企业、电网企业、电力用户伙伴合作，不断推动着并网友好性相关技术的发展。

跟随电网

- 2014** 中广核浙江嘉兴9MW电站项目,华为完成业界首个分布式并网谐波测试,并通过中国电科院首个GBT29319-2012认证。
- 2014** 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电站现场零电压穿越认证的逆变器品牌。
- 2015** 内蒙锋威100MW电站项目,华为在业界首次应用了低短路容量比适应算法。
- 2018** 开发AI BOOST主动谐波抑制算法,消除弱电网环境下谐波超标隐患。
- 2019** 澳大利亚新电网标准发布,被称为全球最严苛的并网标准,华为同年获得准入许可,成为当时全球第一个、也是中国唯一的光伏逆变器品牌。

支撑电网

- 2020** 华为获中国电科院颁发的首个GBT 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(短路容量比SCR=1.5)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。
- 2021** 华为获中国电科院首个串补适应性算法认证(串补系数SCCR=0.7, SCR=1.2),提高新能源交流远距离送出稳定性与送出裕度。
- 2021** 华为参与国家能源院、青海省电力公司主导的《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》课题,就电化学储能系统硬件规格、控制策略对于电网安全稳定、新能源消纳裕度等问题进行深入研究。

增强电网

- 2022** 沙特红海新城,华为参与建设、采用构网型技术的全球首个GWh级微网项目启动交付。
- 2023.1** 青海共和,华为与中国电科院、青海电科院、华润电力协作,完成全球首次构网型光储系统现场测试,证明了构网型新能源发电系统在加强电网运行特性、实现高比例可再生能源消纳方面可发挥关键作用。

02 主要挑战

以新能源为主体的新型电力系统是实现碳达峰、碳中和目标的重要载体。与同步发电机组相比，新能源具有低可控和低转动惯量等特性，随着其渗透率的不断提升，发生故障时传统新能源系统无法像同步发电机组一样，主动进行电压和频率支撑，越来越难以适应新型电力系统发展的要求，给电力系统的安全稳定运行带来了极大挑战。

2/1 高比例新能源经特高压直流送出 加剧送端暂态过电压问题

特高压直流输电是我国能源“西电东送”战略的重要载体，随着清洁能源大基地的规模化发展，高比例新能源经特高压直流外送需求不断提高。然而，受特高压直流系统换相失败等故障的影响，送端电网容易产生暂态过电压问题。

在高比例新能源的弱同步支撑环境下，由于同步电源不足，使得新能源无功响应特性对并网点电压分布的影响增大。相比同步机组的瞬时稳压功能，传统的光储系统由于故障穿越过程中的无功响应速度较慢、调压能力较弱，导致直流换相失败期间不仅无法有效抑制暂态过电压，反而会因控制时延导致无功反调、加剧并网点过电压问题，制约了新能源发电的接入与消纳能力。

我国目前已积累了丰富的特高压直流输电工程的建设与运营经验，其中，青豫、天中、祈韶、鲁固等工程均因暂态过电压的问题使得发电能力受限[1]。以鲁固直流为例，仿真结果表明，在新能源大发、直流换相失败时，送端电网首先进入低电压状态，新能源机组会进入低电压穿越工况发出无功；直流控制策略调整后，送端无功过剩将导致其进入高电压状态，但新能源设备无法立即吸收无功，将进一步抬高过电压水平，最终过电压可能达到1.3p.u.以上，导致新能源设备保护关机。

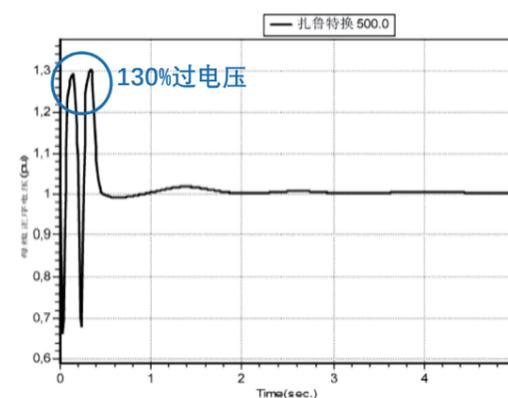


图2 扎鲁特500kV连续换相失败过电压

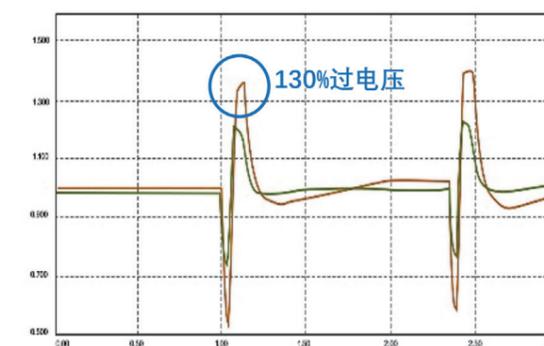


图3 扎鲁特近区新能源场站过电压

2 高比例新能源经交流电网远距离输送 2/2 系统电压稳定裕度不足

电力潮流经交流电网进行大规模、远距离输送，当无功功率不能满足系统需求时，会造成系统电压不稳定。尤其是当交流输电线路故障时，由于阻抗突增，导致输电线路的传输极限下降。同步机组具备瞬时稳压功能，同时能够维持相位不突变，因此在交流线路故障时具备较强的无功功率和有功功率控制能力，以维持PV曲线运行在电压稳定区。

常规光储系统在运行过程中一般只控功率不控相位，且无主动调压的能力，这就导致在交流线路发生故障的瞬间，无法进行必要的有功功率和无功功率控制。当光伏电站输送容量超过一定限值时，造成系统电压稳定裕度不足，容易引发“电压崩溃”的现象。为了维持电压稳定性，系统需要限制光伏电站送出功率不超过静态稳定极限，从而限制了新能源的送出能力。

中国青海海西地区光伏、风电资源丰富，是青海电网重要的新能源集中外送基地之一，其外送通道电气距离长，且近区无同步机组进行电压支撑。青海电网针对新疆~西北750kV联网通道的静态稳定性进行了分析，研究表明当外送一通道发生N-2故障后，海西地区将面临电压失稳问题，这将限制了海西新能源送出能力。

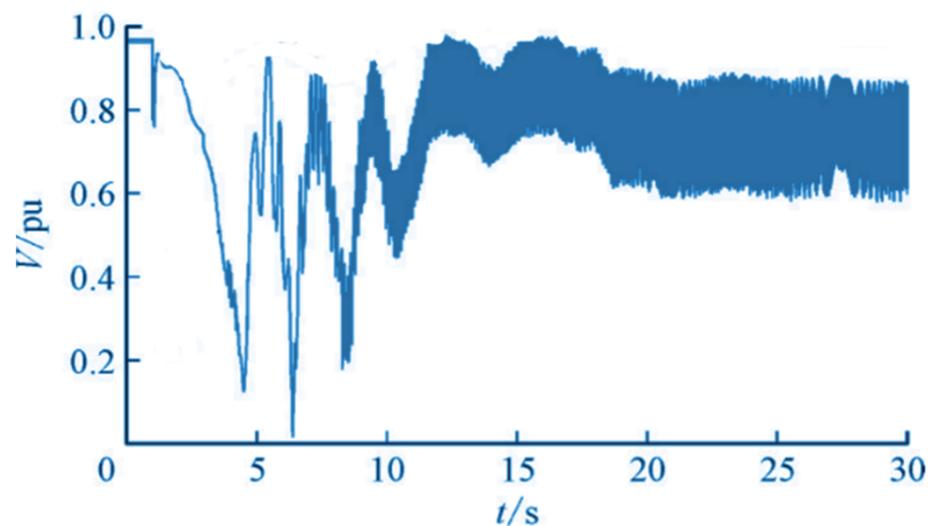


图4 西北电网750 kV外送一通道N-2海西地区电压失稳

2 高比例新能源送端低惯量系统 3 导致频率稳定控制难度加大

高比例新能源集中接入和特高压直流的大规模应用，导致送端逐步从以机械电磁系统为主的传统电力系统，向含高比例电力电子器件的新型电力系统转变，系统惯量不断降低。低惯量系统由于出力不确定性强、有功功率支撑能力弱，频率稳定问题日益突出。同步机组在系统受到有功扰动时，由于发电机转子轴系可提供强大的惯性支撑系统不失步，瞬时响应系统有功不平衡，从而保持系统频率稳定。

常规光储系统属于非同步电源，在有功扰动下无法为系统提供惯量支撑、减缓频率变化。尤其是在“强直弱交”联网系统，当直流系统发生故障时大规模光伏出力向交流输电通道转移，送端系统的弱惯量支撑导致送受端功角差不断拉大，严重时甚至可能引发功角失稳问题。

比如英国在当地时间2019年8月9日下午5点左右，就发生过大规模停电事故。事故起源于雷击造成线路停运，导致霍恩风电场意外脱网及小巴福德电站燃气机组的意外停机，超过了电网的频率调节能力。事故前根据英国电网惯量（ $H=210\text{GVA}\cdot\text{s}$ ）计算出频率变化率为 0.135Hz/s ，触发了部分新能源的保护启动阈值导致进一步脱网，扩大了事故范围。最终造成频率下降到 48.8Hz ，触发了低频减载动作，使得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。



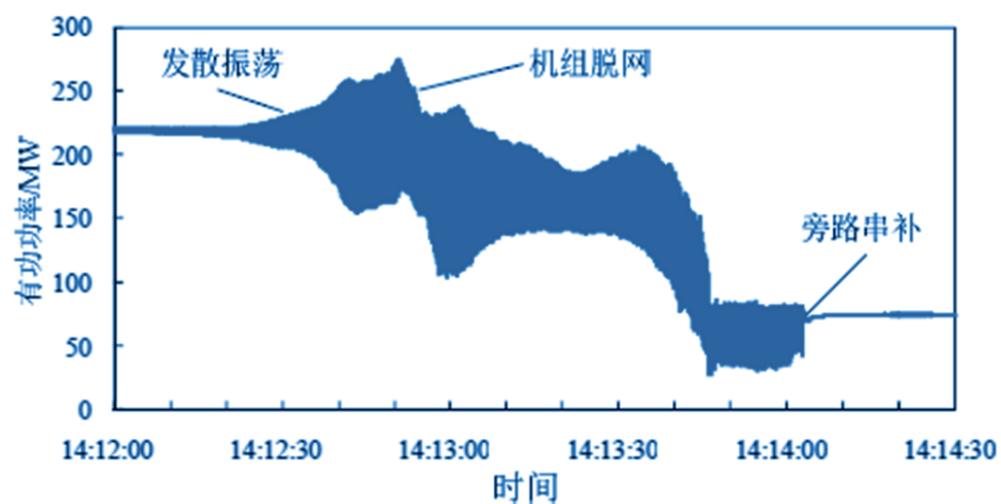
图5 英国8·9大停电事故过程的事件时序与频率变化

2 多种功率调节设备的共同作用 /4 引发宽频振荡问题

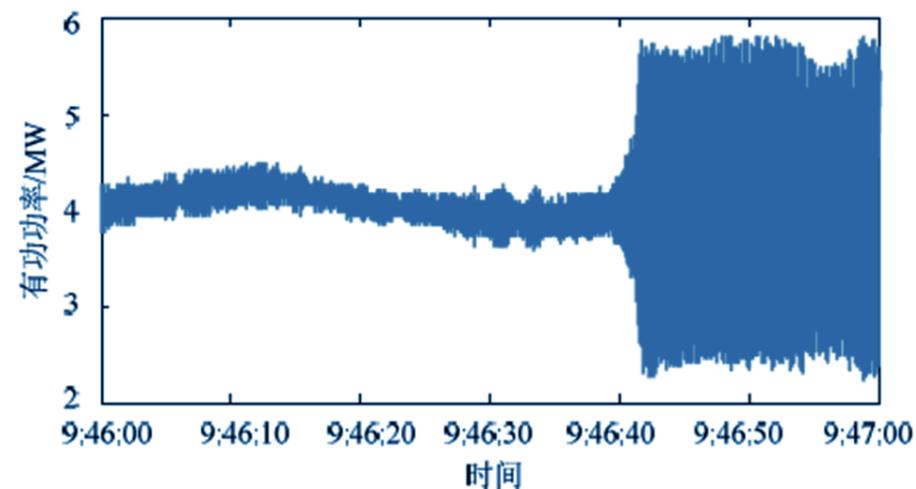
随着新能源比例的不断提高，电力电子设备之间及其与电网之间由于多种功率调节设备的共同作用，可能在更宽的频带上产生弱阻尼甚至负阻尼现象，引发电气量随时间周期产生波动，从而导致宽频振荡问题。同步机组的振荡一般由励磁控制系统振荡、调速系统振荡、轴系扭振荡等引起，振荡频率主要为低频振荡和次同步振荡。大规模新能源并网后，由于电力电子设备存在多种控制模式，系统振荡问题将更加复杂，如：

- 常规光储系统通过交流远距离送出时，存在因系统阻尼不足而导致的低频振荡问题；
- 为适应交流远距离输电场景，串联电容补偿装置成为提高输电能力的重要技术，串补激增和电力电子设备间的相互作用容易引发次同步振荡问题；
- 常规光储系统通过特高压直流送出时，变流器与直流控制系统相互作用，引入负阻尼特性，易引发超同步振荡问题。

例如，自2011年以来，中国河北沽源地区风电场就发生了上百次由风电机组与串补电网相互作用而引发的次同步谐振，其频率在3~10Hz内变化，造成变压器异常振动和大量风机脱网；2015年以来，中国新疆哈密地区也频繁出现风电机组参与的次同步振荡，频率在20~40Hz内变化，次同步振荡功率穿越多级电网，甚至激发汽轮机组轴系扭振和特高压直流功率骤降的事故。



(一套串补退出运行后振荡逐渐停止)
图6 河北沽源某风电场功率振荡



(机组扭振保护动作跳机)
图7 新疆哈密地区某风电场功率振荡

2 新能源孤岛运行 /5 供电可靠性和稳定性不足

我国电力系统经历多年快速发展，供电可靠性已达到国际先进水平，全年无中断供电已成为社会各界的普遍体验。然而，在亚非拉等地仍有10亿人口缺乏可靠的电力供应，特别是部分偏远、高原地区（尤其是富集了全球过半锂资源的高原盐湖区域）几乎没有电网覆盖。个别较发达国家因为设施老旧、维护不当、人员短缺等问题，机组故障率逐年恶化，在部分区域供电量甚至不足需求量的60%，每天停电6-10小时。在这些地区，人们不得不长期依赖柴油发电解决电力短缺问题。在此背景下，从可靠性与经济性角度考虑，采用光储新能源供电成为改善电力供应的新选择。

长期以来，光储系统作为对同步发电机组的补充，不主动承担电力系统中的扰动。而对于新能源孤岛电网，抗扰是新能源无法逃避的责任。从传统电力系统的角度，新能源孤岛系统具有低惯量、低短路容量的特点，维持稳定的频率和电压是首当其冲的挑战。不仅如此，光储新能源采用电力电子变换器作为发电单元，向系统引入了复杂的交-直耦合问题。例如交流电压的异常波动由于缺乏隔离，窜扰至直流侧导致交直流功率控制矛盾，从而引发大面积脱网；电网投入感性电机、变压器类负载或者电网短路扰动期间会产生大量谐波，干扰直流电压控制，也可能造成大面积的脱网事故；光储单机容量较小，系统异常停电后难以快速黑启；IGBT过流能力弱，发电单元暂态功角特性缺乏普适定义，从而导致系统内发电站运行失步等等。

03 智能光储发电机解决方案

为有效应对以上挑战，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，推出了智能光储发电机解决方案，并带来了一系列技术创新，在业界具有开创性意义。

3/1 电压稳定重构技术

同步机组具备次暂态特性，在故障瞬间维持内电势不变，可瞬时发出或者吸收大量的无功；同步机组还具备暂态特性，在系统发生严重故障导致电压大幅跌落时，励磁系统进入强励状态，可为系统提供紧急无功电压支撑。在新能源高渗透率下，电压稳定问题突出，需要重构光储系统电压主动支撑能力。

电压构建技术

借鉴同步机组的电压建立过程，光储发电机通过输入给定的电压和相位，以实现从传统的电流控制向电压控制的转变，因此在电力系统中的外特性表现为电压源，能够具备电压构建的能力。

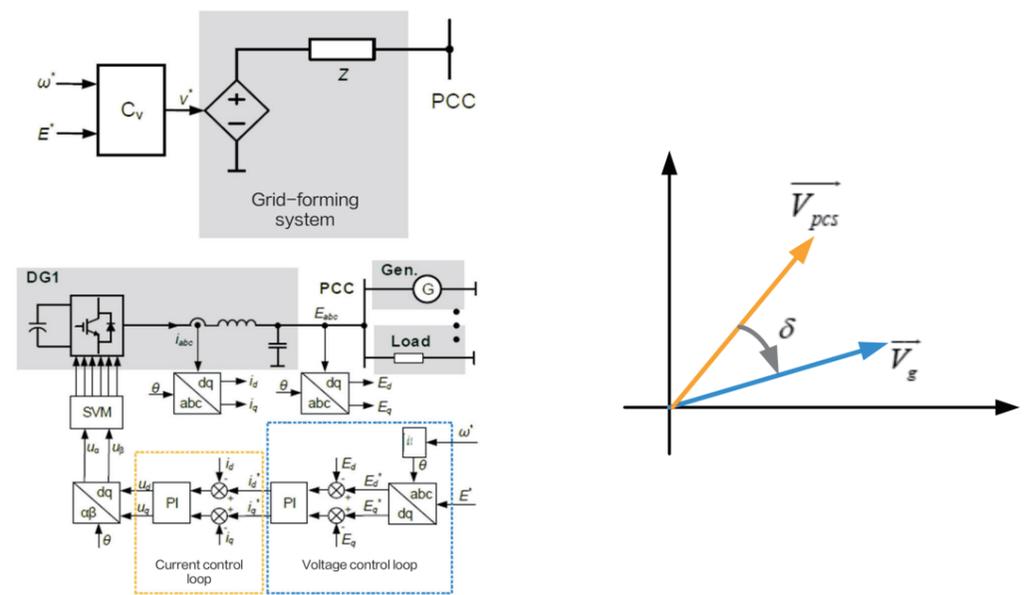


图8 构网型技术基本控制原理框架

主动快速无功响应技术

与同步机组类似，光储发电机通过调节内电势实现对机端电压和无功的控制。其内电势的构成包括三个部分，一个是反映变压器空载运行时的机端电压；第二个是反映一次调压过程，对机端电压进行无功下垂控制；第三个是反映机端电压调节单元的输出，可对应同步机组的励磁调节过程。可见光储发电机的无功调节过程完全不同于传统电流源的控制策略，无需进行电压检测与相序分解，通过对内电势的控制和调节，在系统故障穿越或者连续故障穿越过程中，可进行主动快速无功响应。2023年1月，通过在中国青海的现场测试结果表明，华为光储发电机技术在电网电压跌落过程中可实现10ms以内的无功电流响应，支撑机端电压快速恢复。

■ 大电流暂态支撑技术

同步机组由于次暂态电抗、暂态电抗较小，同时定、转子具备一定的过载能力，因此在故障期间可以立即发出额定容量数倍的无功功率支撑电网。而电力电子设备基本不具备过流能力，因此常规的光储系统在故障穿越期间只能提供约等于额定电流的无功电流。华为光储发电机通过电压同步技术，实现多台组串式PCS的并联稳定运行且无环流产生，同时由于组串式PCS颗粒度较小，可实现无功电流1~N倍的灵活配置。在中国青海的现场测试结果表明，华为光储发电机技术在电网电压跌落过程中可快速提供3倍的短路容量，提高暂态电流支撑能力。

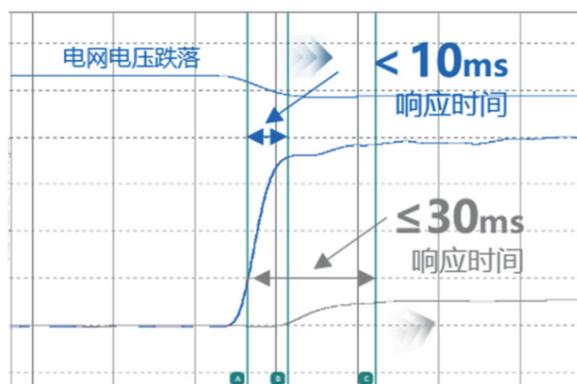


图9 光储发电机实现主动快速无功电流响应

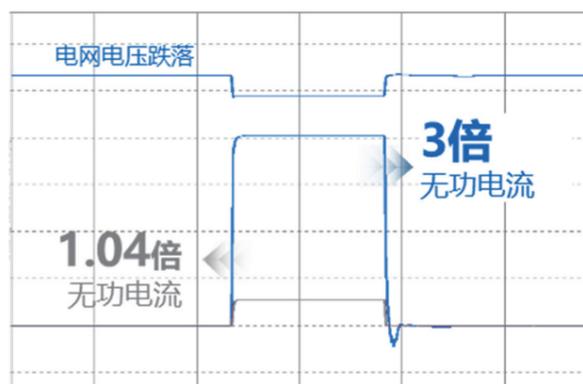


图10 光储发电机实现大电流暂态支撑

■ 双极变换架构

受特高压直流换相失败甚至闭锁等故障影响，送端电网容易产生暂态过电压问题。光储系统在高电压穿越期间若不具备有效的有功控制能力，有可能导致系统无功进一步过剩，恶化系统过电压水平。对于储能系统自身而言，当电网侧发生交流过电压时，会瞬时提升储能系统直流母线电压，导致储能输出功率会不断降低甚至反向。华为光储发电机采用DC/DC和DC/AC双极变换架构，在电网电压升高的时候，过电压传导到变流器直流母线侧，BOOST侧升压并不影响储能电池电压，因此可以更好支撑高电压穿越期间的有功稳定控制，避免因控制器性能下降导致的系统无功进一步过剩。

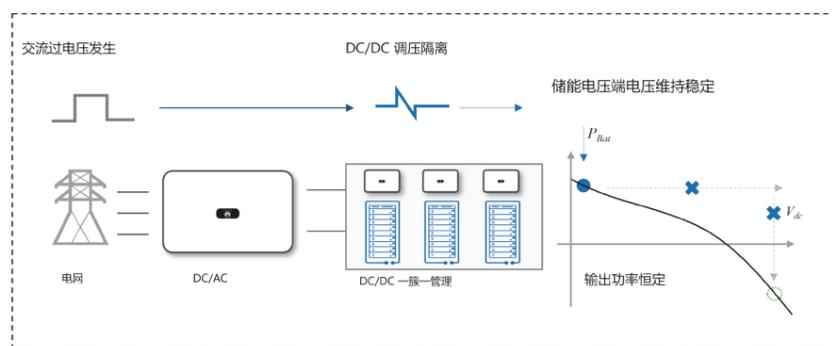


图11 双极架构提高有功功率控制能力

3/2 频率稳定重构技术

同步机组具有较大的转动惯量，通过对机械转矩的调节，可瞬时发出或者吸收大量的有功功率，提供响应系统频率变化率的短时有功功率支撑；同步机组还具备调速系统，通过调频器实现对电网频率偏差的响应，在系统发生严重故障导致频率大幅跌落时，同步机组进行一次调频，提供响应系统频率偏差的持续有功功率支撑。在新能源高渗透率下，电网的惯量和一次调频能力都在不断下降，频率稳定问题突出，需要重构光储系统频率主动支撑能力。

■ 虚拟惯量支撑技术

通过给定光储发电机的虚拟转动惯量J和阻尼系数D，从控制策略上模拟同步机组的机械运动方程，此时光伏和储能电池可类比于原动机，而变流器可等效为发电机，从而实现对同步机组两阶模式的等效。系统频率变化通常由不平衡功率冲击引起，在此过程中，光储发电机也将感受到不平衡功率的作用，在不平衡转矩的作用下，主动快速将转子动能的变化以电磁功率的形式注入电网，实现对系统的惯量支撑。与同步机组不同的是，电力电子设备的参数受硬件限制小，因此光储发电机的虚拟转动惯量J和阻尼系数D可灵活设置以适应不同的运行场景，提高对系统频率的控制能力。在中国青海的现场测试结果表明，华为光储发电机技术在电网频率按0.5Hz/s跌落过程中可实现惯量功率输出。

■ 主动快速一次调频技术

光储发电机的一次调频响应可通过模拟同步机组的调速器，通过检测频差计算机械功率的偏差指令，实现有功功率和系统频率的下垂控制。可见光储发电机的有功调节不同于传统电流源的PQ控制策略，其在并网功率跟踪的基础上，可针对其接入点频率的偏差做出有功调节响应，从而有效提升光储系统应对频率异常事件的能力。同样在中国青海的现场测试结果表明，华为光储发电机技术在电网频率跌落期间，通过虚拟惯量响应和快速一次调频响应，相比常规跟网型控制方案可更快更强地实现有功功率响应，支撑系统频率恢复。

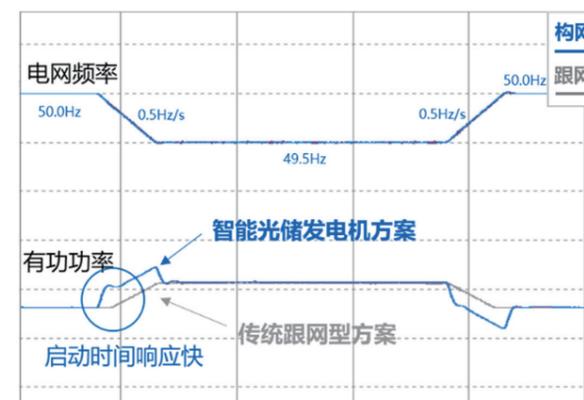


图12 智能光储发电机与传统光储系统频率响应能力对比

3/3 宽频振荡抑制技术

目前部分国家和地区已经出台了相关构网型控制技术对于功率振荡抑制的要求，如欧洲部分光储系统并网需要提供0.3~2Hz的有功POD和无功POD能力。无论是低频振荡、次同步振荡还是超同步振荡，核心是需要提供可控阻尼形成功率振荡抑制的功能，以应对高比例电力电子设备接入带来的宽频振荡风险。

■ 低频振荡POD功率抑制技术

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。光储发电机借鉴这一原理，通过在站级控制器（PPC）中引入低频振荡POD功率抑制技术，使光储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。下图为在站级控制中对比有无低频振荡POD功率抑制功能的仿真效果。

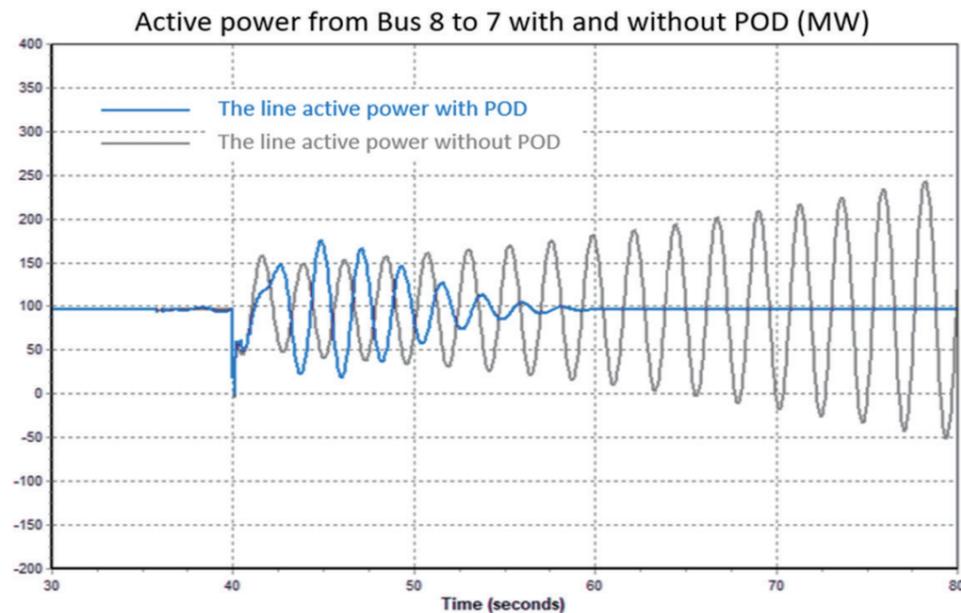


图13 低频振荡POD功率抑制效果示意

■ 自适应虚拟阻抗技术

针对次/超同步振荡问题，华为智能光伏解决方案采用自适应虚拟阻抗技术，通过AI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。

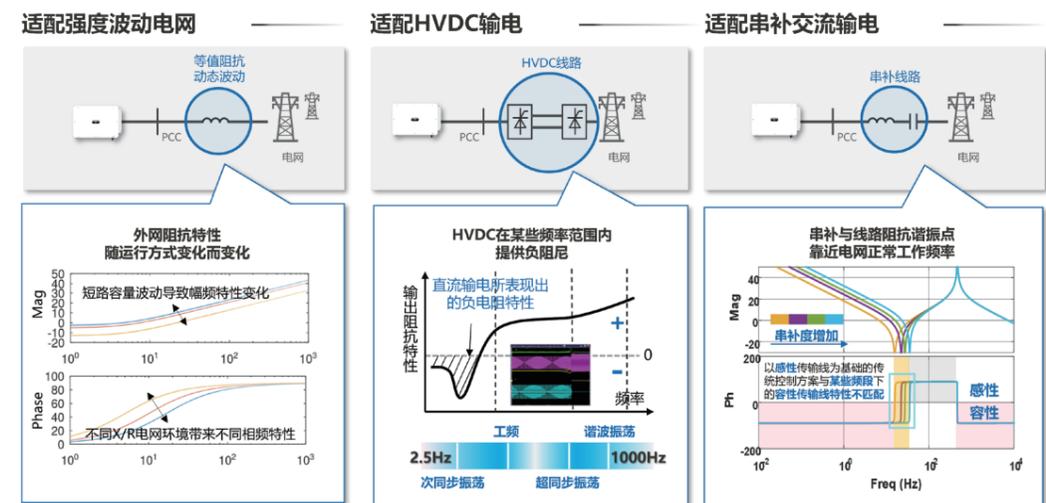


图14 自适应虚拟阻抗技术

3/4 100%电力电子系统故障穿越技术

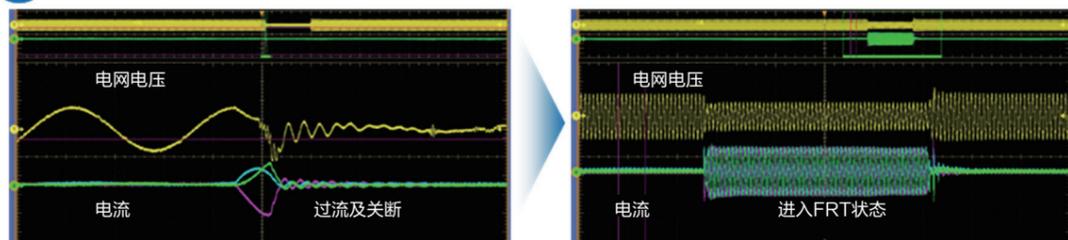
在常规并网新能源场景中，故障穿越往往是实现技术复杂度最高，对电力系统运行裕度影响最大的环节。对于100%新能源孤岛电网也是如此，但100%电力电子系统中故障穿越的内涵和挑战要比并联大电网场景下丰富、严峻得多。

	并网系统 电压频率相位主要由同步机维持	孤岛系统 电压频率相位由新能源维持
短路故障发生	主要挑战是准确识别相位跳变，确保后续相位跟踪准确。	采用电压源控制时，电力电子设备过流风险更高，需要快速抑制半导体器件电流水平。
短路故障期间	<ul style="list-style-type: none"> 按照并网标准要求注入无功、有功电流； 抑制故障穿越反复触发。 	短路电流水平极低，故障系统残压较低、联系弱，各电源之间更容易失去同步；孤岛系统未必呈现电感性为主特点，盲目注入无功不仅不能有效提升电压，还可能导致控制饱和，孤岛系统失去控制裕度导致垮网；对于储能系统，异常电压波动导致交直流电压可能存在耦合，如处理不当将导致电池、PCS控制方向矛盾，引发控制失稳。
短路故障清除	抑制过电压，恢复有功输出。	故障清除后电压恢复，大量变压器充磁、大量负载瞬间重新投入引发次生瞬间冲击；各电源相位大幅跳变，极易失去同步；故障后局部网络切除，电源-负荷原本的匹配关系不复存在，导致频率、电压再次发生畸变，引发后续其他连锁反应。

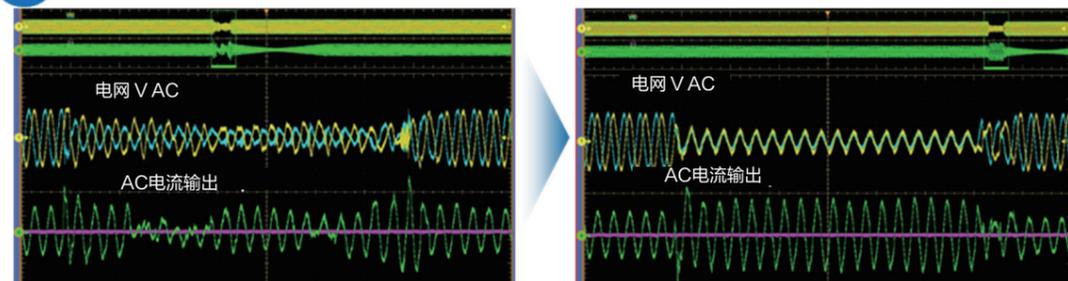
图15 并网系统与孤岛系统在故障穿越情况下的对比

离网故障穿越是大型孤岛电网中最具挑战的难题，当前全世界范围内没有成熟的机制和标准可以参考。华为通过对多学科技术的综合运用，对故障穿越过程中微秒-秒级动态过程进行完整覆盖，目前已验证在多电源100%电力电子高压发输电系统中，故障穿越是可行的。这些技术包括高过载IGBT封装、IGBT动态限流、交直流电压隔离、短路能量匹配、动态PWM调制机制、失步再同步、微网自适应动态降额等。

1 IGBT层级：用于设备级安全的瞬时电流限制



2 设备层级：避免控制饱和以保持构网能力



3 系统层级：故障后重同步算法

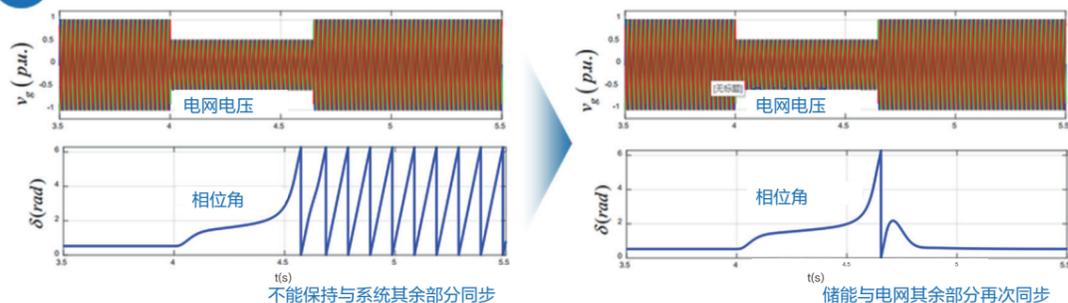


图16 多种离网故障穿越技术

3/5 大批量黑启动技术

黑启动指在整个电力系统因外部或内部故障停运进入全部失电状态后，仅通过系统内部具有黑启动能力的电源，进而带动电力系统内部无黑启动能力的电源，逐步扩大系统的恢复范围，最终重启电力系统直至恢复全部供电的过程。

传统发电厂中，单台发电机组普遍容量较大，一台机组黑启动以后通常足以带动大范围的变压器、线路以及厂用电负载，因此就黑启动过程中的电气过程而言，操作相对简便。对于储能系统，由于通常其受控的最小子阵容量仅2.5-6MW，单一储能子阵功率太小（子阵定义：接入于同一个中压变压器下的电池集装箱和PCS）。任何负载投入或者变压器投入，都很容易导致过载使得系统再次崩溃。因此对于10MW以上的孤岛电网，多个储能子阵必须要实现同步黑启，一次性提供足够大的容量，才能够为后续负载和机组投入提供基础。

实现多个储能子阵的同步黑启需要克服两个主要挑战，一是电压建立的同步性，二是应对变压器和负载投入造成的冲击。黑启动过程中，各个储能PCS以电压控制为目标，但由于指令同步性以及电压控制精度的问题，各个PCS建立电压的过程并不完全一致，而是容易出现压差。由于储能子阵内部、子阵之间电气距离较短，微小的压差就容易产生比较明显的环流，从而导致PCS过流关机（图17）。由于电气距离由物理接线决定无法改变，批量黑启的关键在于提高电压输出的一致性。

华为开发了不依赖同步并机线的电压同步技术，在不增加项目造价的情况下，使多台PCS在黑启动过程中进行自动同步电压控制和电压采样校准；同时基于硬件级的通讯协议，使得上级EMS的黑启动指令能够以近似相等的时延传递至所有储能系统。基于这两种机制，电压控制的一致性大大提高，环流水平被限制在最低水平（图18）。在沙特红海项目中，华为已在现场实现1000台以上PCS的同步启动，100MW级系统黑启动时间仅

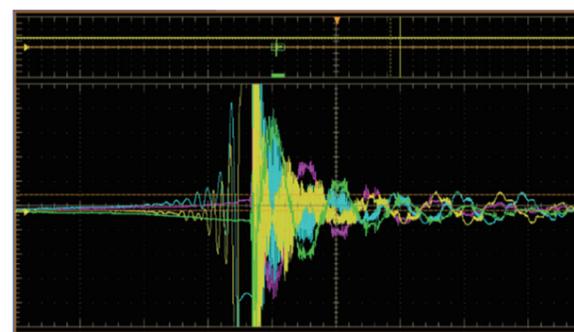


图17 多传统方案中，微小的压差也容易产生明显的环流

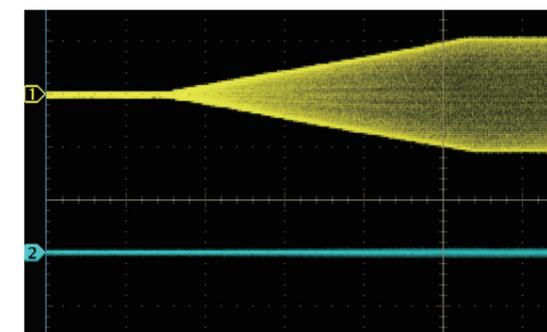


图18 华为方案将环流水平限制在低水平

3/6 主动谐波抑制技术

传统光储系统主要通过谐波电流控制，减少向电网注入谐波电流。然而在弱电网运行环境下，多个新能源电站接入同一并网点（PCC）会增大PCC节点谐波电流，同时由于系统谐波阻抗变大，导致谐波电压不断增大。因此，现有的谐波电流控制方式只能尽量避免恶化电网谐波电压，而并不能改善电网背景谐波电压。

华为智能光储发电机将通讯行业积累多年的软件算法、弱电网运行经验引入光储系统，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，采用先进的主动谐波抑制技术，具备主动谐波阻尼效应，通过控制电流谐波路径和吸收谐波电流直接改善电网的电压质量，使得光储发电机具备同步机组类似的吸收谐波的功能，并网谐波电压THDu<1.5%。

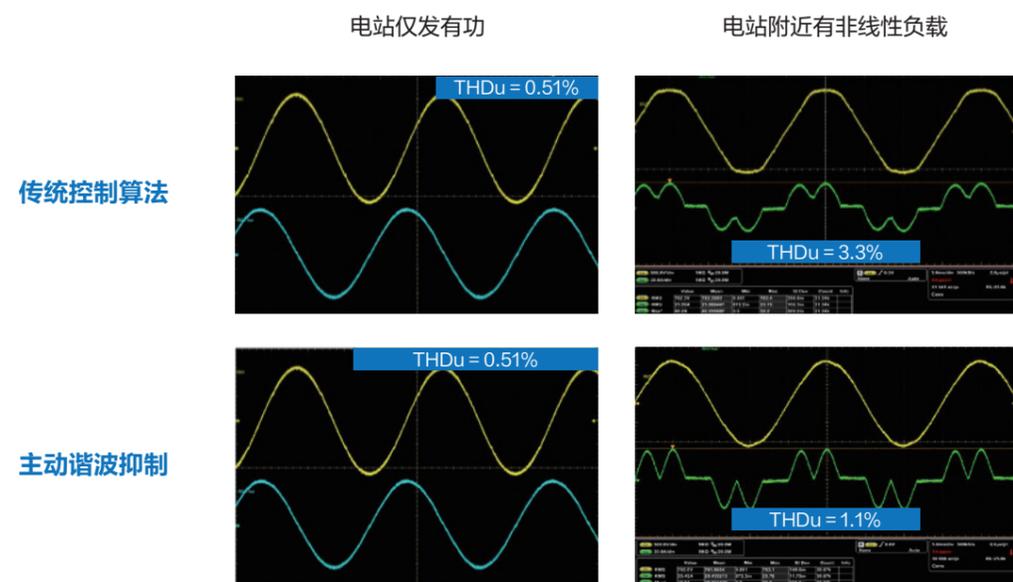


图19 主动谐波抑制技术与传统方案效果对比

04 应用案例



青海新能源资源丰富，拥有两大千万千瓦级光伏开发基地，新能源送出需求强烈。早在2014年，华为在青海共和200MW光伏电站就一举成功通过现场零电压穿越、低电压穿越等测试，在弱电网环境下的实际运行情况表明，华为逆变器涉网性能优越，获得了业主的高度评价。

近年来，青海省依托“绿电优势”打造新能源全产业链高地，新能源占比不断提高，截止2022年底青海省新能源装机2814万千瓦，占比达63%。然而受电力系统安全稳定运行制约，新能源的消纳压力与日剧增。一方面，青海海南地区青豫直流投产初期具有较强支撑作用的同步机组未能按时投产，而近区电源全部为新能源，导致青豫直流换相失败等引起的故障电压在快速变化期间出现无功反调，加剧了过电压水平，造成新能源脱网或设备损坏；另一方面，青海海西地区无常规同步电源支撑，新疆吉泉直流换相失败闭锁或新疆与西北联网一通道N-2故障后，潮流向青海海西电网转移引起低电压问题。

结合青海实际运行情况，2020年电网公司根据《电力系统安全稳定导则》（GB 38755-2019）发布了新能源电站相关技术要求，青海新能源电站必须满足耐频耐压等要求，同时对高低电压穿越、连续穿越控制策略进行了详细规定，以确保电力系统安全稳定运行。华为针对全电网运行场景，从多个方面对逆变器进行了性能优化，第一时间对红旗一电站机组性能进行了现场测试，前后仅用了2个小时，所有测试项目一次性通过。



图20 华为参与完成青豫直流机组并网测试

为进一步提升青海省新能源消纳能力，2021年国家能源局委托青海电力公司开展《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》。华为作为团队成员积极参与研究工作，负责技术指标的可行性评估，助力完成电压支撑型储能电磁仿真验证及关键技术验证等工作。相关研究成果证明电压支撑型储能对青海电网新能源消纳以及青豫直流外送能力的提升有明显作用，填补了国内空白。

基于华为研发的智能光储发电机方案，2022年华为联合华润电力，在中国电科院和青海电科院的指导下，持续开展研究课题的实际验证与示范应用工作，并于2023年1月在青海共和华润济贫光伏电站共同完成了全球首次构网型光储系统现场测试。本次测试涵盖了构网系统并联稳定性、高/低电压单次/连续故障穿越、一次调频及惯量响应特性等一系列测试。该项测试充分验证了构网型新能源发电系统在加强电网运行特性和实现高比例可再生能源目标方面可以发挥关键作用，是新能源技术发展的重要里程碑。



图21 青海共和. 完成构网型光储系统测试

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，是沙特首次采用PPP模式开展的公用事业建设项目，预计为每年100万人提供100%新能源电力。作为全球首个GWh级微网项目，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grid forming与维持电网稳定有极高要求。华为提供智能微网整体解决方案，并于2022年底陆续交付，目前已完成部分电网的构建与供电工作，全部交付预计于2023年中完成。

红海项目本质就是由光储系统构建的一个110KV的电网，其面临着微网项目如何交付，如何完成电网构建，并最终实现用户端稳定供电等诸多挑战。

华为提供了模块化、预集成的微网储能解决方案，并协助客户一同完成微网交付的前提准备、计划实施与现场实验的设计工作，达成客户快速交付的目标。

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、仿真以微网实验平台的能力，利用近两年时间，帮助完成客户完成微网逻辑的构建与仿真工作，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，load shedding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。

红海微网将会为酒店，海水淡化厂，污水处理厂，飞机场，医院等不同场景供应清洁电力。各种各样的供电设备和不同用户的操作类型，均对电网稳定运行提出挑战。华为微网在实际现场环境中，已完成多类设备以及多种操作的实际验证，达到稳定运行。



图22 沙特红海1.3GWh微网储能项目

05 结语

如何经济、高效地应对高比例新能源的并网挑战，需要整个行业共同探索、携手应对。华为坚持“三个融合”理念，即数字技术与电力电子技术融合、光伏与储能融合、能量流与信息流融合，打造智能光储发电机解决方案，重构电压、频率，同时在宽频振荡抑制、故障穿越、批量黑启动等技术领域持续创新，提升新能源稳定并网与消纳能力，与产业链伙伴一同加速光伏成为主力能源。

参考文献

- [1] 韩民晓, 赵正奎, 郑竞宏, 等. 新能源场站电网暂态电压支撑技术发展动态[J]. 电网技术, 2023, 47(4): 1309-1322.
- [2] 张舒捷, 方保民, 陈春萌, 等. 750kV串补投产后对青海电网安全稳定性的影响[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(5): 8-16.
- [3] 孙华东, 许涛, 郭强, 等. 英国“8.9”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6183-6191.
- [4] 李明节, 于钊, 许涛, 等. 新能源并网系统引发的复杂振荡问题及其对策研究[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1035-1042.
- [5] 马宁宁, 谢小荣, 贺静波, 等. 高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4720-4731.