

助力新型电力系统平稳运行

阳光电源干细胞电网技术 (Stem Cell Tech) 白皮书



Clean power for all

前言

PREFACE

“双碳”背景下，可再生能源并网比例持续提升，极端气候频发，诸多不确定性因素叠加，新型电力系统形态趋于复杂，系统运行稳定性面临新挑战。

储能系统作为新型电力系统中的关键环节，在电网稳定性构建中发挥着不可或缺的作用。随着新能源比例进一步提升，对储能系统的电网支撑能力提出了新要求。

阳光电源创新性提出 Stem Cell 干细胞电网技术，探索电网稳定性课题，助力新型电力系统平稳运行，白皮书对技术方案及应用作了系统化阐述，供行业参考。

目录

CONTENTS



01

新型电力系统特征与趋势

- 1.1 高比例可再生能源接入
- 1.2 高比例电力电子设备接入
- 1.3 高比例特高压直流输电

02

新型电力系统面临的挑战

- 2.1 电压不稳定
- 2.2 宽频振荡
- 2.3 惯量低、频率不稳定

03

干细胞电网技术

- 3.1 增强型连续高低穿技术
- 3.2 自适应宽频振荡抑制技术
- 3.3 POD功率振荡阻尼技术
- 3.4 微秒级电压构建技术
- 3.5 柔性惯量支撑技术
- 3.6 GW级黑启动技术
- 3.7 虚拟双源叠控技术

04

客户价值

11

05

应用案例

13

- 5.1 西藏措勤1500kW微电网项目
- 5.2 湖北随州32MW新型电力系统项目
- 5.3 北美印第安纳州15MW/5.5MWh黑启动项目

06

总结及展望

15

C1

新型电力系统 特征与趋势

一

高比例 可再生能源接入

“双碳”目标下，能源结构转型进一步加速，可再生能源比例不断提升。截至 2022 年，全球风、光发电累计装机量高达 2168GW，占全球总装机量的 25%，成为能源结构中重要组成部分。据预测，2030 年全球风、光发电装机规模将增至 7219GW，占全部装机量的 47%，未来的电网形态将发生较大变化。

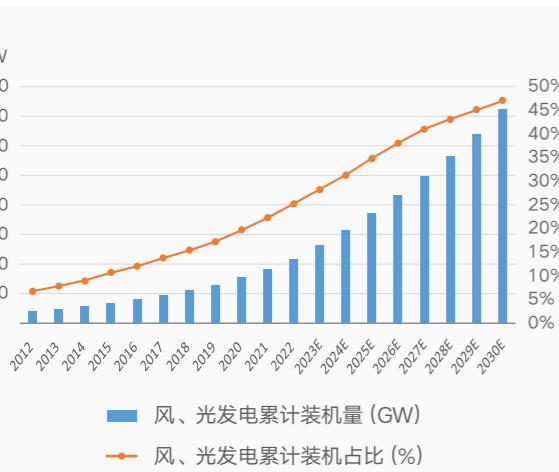


图 1：全球风、光发电装机规模预测（数据来源：彭博新能源财经）

高比例 电力电子设备接入

伴随风、光等可再生能源大量接入，电力电子发电设备在电力系统中占比不断提升，由于可再生能源发电与传统同步发电机的控制特性差异、电网中诸多电力电子设备控制方案不同，低惯量、低阻尼、弱电压支撑已成为新型电力系统的显著特征。同时，输电侧的换流站和潮流控制（如统一潮流控制器，静止同步串联补偿器）、用电侧的充电桩等电力电子设备大量接入，进一步增加了电网复杂性，对电网稳定运行提出新挑战。



高比例 特高压直流输电

我国能源生产、消费呈现逆向分布，风、光能源大基地、大水电、大核电等集约化开发主要集中在西南、西北、东北、华北地区，电力负荷中心主要集中在中东部地区，以特高压为骨干网架的大容量、远距离能源输送大通道建设全面加速，不断深化“西电东送”、扩大“北电南送”的能源配置格局。截至“十三五”末，累计建成投运“14 交 12 直”特高压工程，“十四五”规划建设“24 交 14 直”工程，涉及线路 3 万余公里，变电换电容量达 3.4 亿 kVA。大容量远距离能源输送通道下，由严重故障引发的局部电网间解列会引起全网功率大范围转移。目前特高压直流母线电压高达 ±1100kV，当发生换相失败、直流闭锁，导致功率不平衡、瞬时过电压等问题时，会增加系统频率和电压失稳风险，对变流设备性能如惯量支撑、频率支撑、电压支撑提出更高要求。

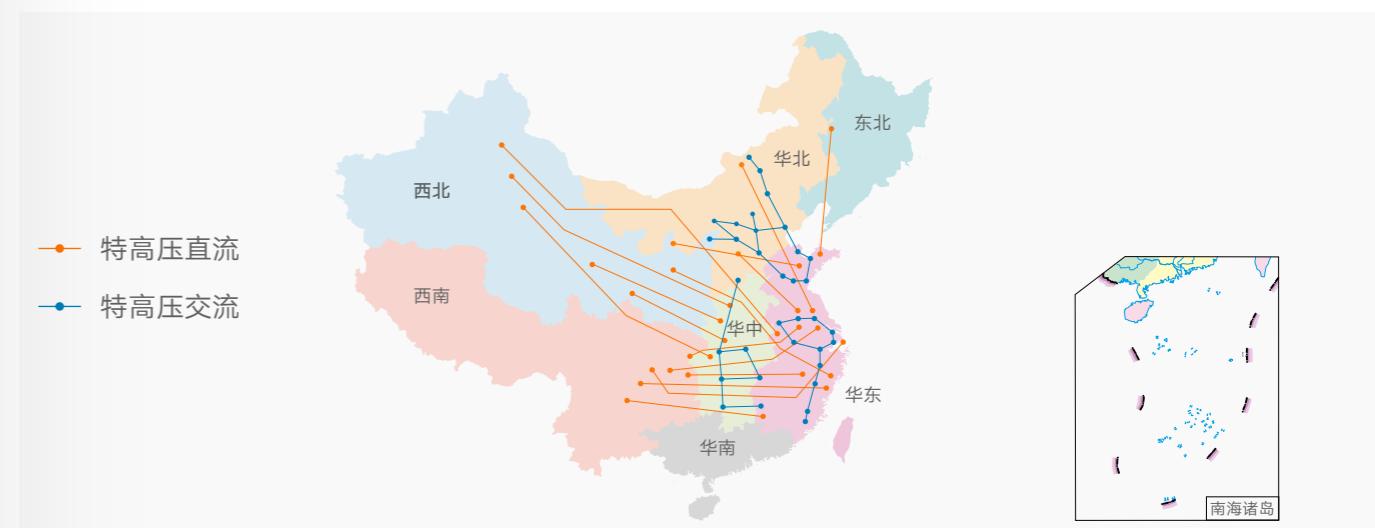


图 2：我国特高压输电分布示意图（信息来源：公开资料整理）

C2

新型电力系统 面临的挑战

高比例可再生能源接入和消纳、同步发电机容量降低，系统惯量减小，风、光发电的波动性、随机性、间歇性、特高压直流换相失败等因素，对电力系统的运行稳定性产生影响。



1 电压不稳定

在有限的区域电网容量条件下，新能源电站大规模接入，风力、光照等天然因素影响功率波动，导致系统电压稳定性降低。在输电线串补投退、特高压直流换相失败等场景下，系统电压的稳态、暂态波动更大，对电力系统动态电压调节能力提出更高要求。在工程应用中，存在高低电压多次连续故障穿越的支撑需求，如图 3 所示。



图 3：电网连续电压故障穿越需求示例

2 宽频振荡

电力电子设备自身属性引发的电力系统振荡由传统的工频段扩展到中高频段，新型电力系统呈现多种失稳模式耦合的复杂特性。近年来，全球发生多起新能源大规模并网引发振荡脱网事故，宽频振荡成为新型电力系统亟待解决的问题。

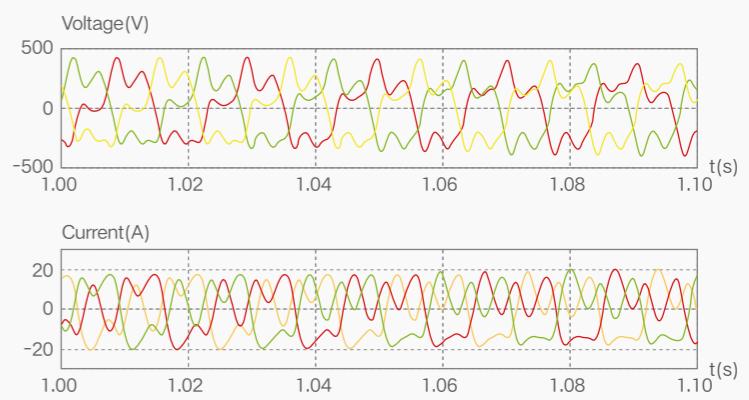


图 4：电力电子设备端宽频振荡现象

3 惯量低、频率不稳定

高比例可再生能源接入，电力系统由“确定性发电跟踪不确定负荷”转变为“不确定发电与不确定负荷双向匹配”。风、光发电等可再生能源大规模接入，系统惯量变低，引发频率不稳定，影响电机和其他电气设备的使用性能，严重时会导致系统的频率崩溃，造成大面积停电。

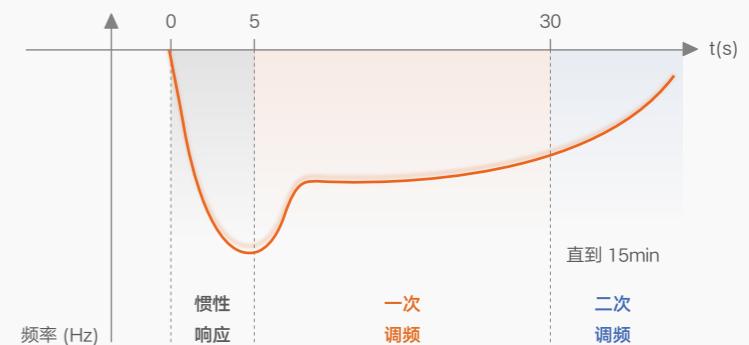


图 5：电力系统频率调节过程

C3

干细胞电网技术 Stem Cell Tech

随着可再生能源渗透率的持续提升，储能系统并网技术从适应电网阶段到支撑电网阶段，迈入构建电网阶段。

阳光电源基于对电网的深刻理解，创新性提出干细胞电网技术(Stem Cell Tech)，助力新型电力系统平稳运行，构网型控制技术是其中重要组成之一。

储能系统通过调频调压、谐波抑制、黑启动等助力电网稳定运行，如同干细胞对人体组织的修复、净化、造血等功能。



1 增强型连续高低穿技术

并网点电压因短路等导致跌落、大负荷扰动导致过压时，需要储能系统保持并网，向电网提供无功功率支持电网恢复，“穿越”故障区域。GB/T 34120、GB/T 36547 等多个并网标准要求电压故障穿越期间的无功响应时间为 30ms。在“三高”背景下，储能系统应具备多次连续高低穿构建能力，这也是下一代并网标准要求趋势。

技术方案

① 快速正负序解耦技术：

储能系统快速进行电网电压的故障检测（超出 0.9p.u.~1.1p.u.），基于实时正负序解耦算法，提取电网电压正负序分量，快速功率控制算法，实现 10ms 级无功响应，支撑电压故障恢复。

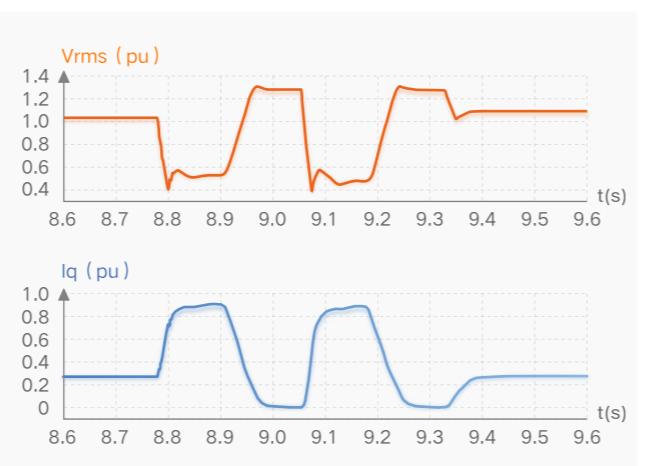


图 6：连续电网电压故障穿越无功响应过程示例

② 动态虚拟阻抗技术：

当系统正常运行时，PCS 以常规虚拟阻抗并网运行，提升有功功率和无功功率的自动均分能力。

当系统短路或过载，PCS 产生过电流，输出电流大于预设值且端口电压低于预设电压时，PCS 自动切换为虚拟阻抗自适应模式，自动调节虚拟阻抗值，实时调整电压给定、闭环控制设备并网点的电压。PCS 能实时参与构建电网电压，自动输出无功，平稳完成连续电网电压故障穿越，是分布式电网场景下电压故障穿越的基础技术。

2 自适应宽频振荡抑制技术

在电力电子化的新型电力系统内，系统等效阻抗不匹配、控制参数不当、系统延时等会增加工频和高频振荡的风险。如区域内外的功率协调调度策略不一致和响应差异、电力电子设备与电网阻抗之间的谐振等，将引发系统宽频振荡现象。

技术方案

基于高性能数字控制器的公共连接点（PCC）电压、电流快速频域 / 时域谐振分析，通过多维度宽频振荡的智能感知，提取关键特征信息识别振荡，利用电压源构网技术，重塑并网阻抗，消除振荡，使系统适应复杂的电网工况。

如图 7 仿真示例所示，光伏和储能并网点通过两回输电线接入主网，其中 Line 1 额定电压 275kV，Line 2 额定电压 132kV，光伏并网容量 100MW，储能并网容量 20MW/20MWh。仿真运行工况：当 Line 1 发生短路，继保动作切除故障点。

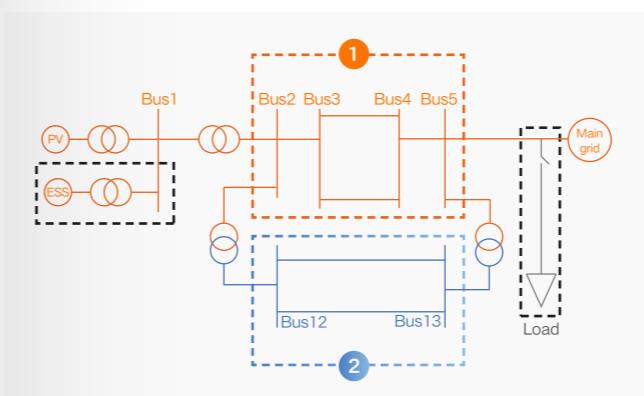


图 7：储能配套光伏可靠并网仿真拓扑

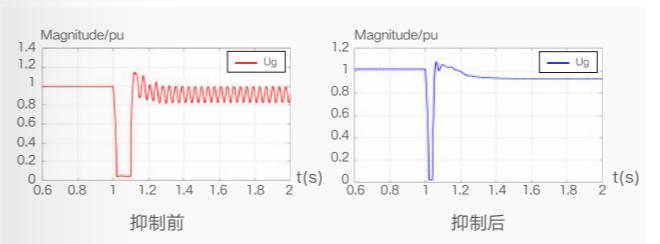


图 8：储能采用电压源抑制宽频振荡效果

从图 8 可以看出，在储能不进行宽频振荡抑制的情况下，光储并网点 Bus 1 处电压发生持续性振荡，振荡频率在 30Hz 附近。当引入宽频振荡抑制策略并采用电压源控制时，可在工频周期内快速消除振荡，稳定电网。

3 POD 功率振荡阻尼技术

全球范围内已有部分国家的电力并网规范要求储能系统具备功率振荡阻尼（POD）技术，需检测并抑制 0.3-2Hz 低频范围内有功振荡，在新能源渗透率较高的区域将提出更高要求。

技术方案

阳光电源储能系统采用站级调度群控技术，能量管理系统（EMS）的 POD 控制器基于采集 PCC 功率和频率信息。当检测频率超阈值范围时，基于功率微分计算量进行比例调节，并进行通讯延时和响应延时的补偿校正，输出阻尼功率，储能系统响应阻尼功率的指令叠加，可在 3~5 个周波内抑制 0.15-2.5Hz 低频功率振荡，控制原理如图 9 所示。



图 9：POD 技术控制原理

如图 10 所示，在 PSCAD 仿真系统中建立含有储能的系统配置，其中 SG1、SG2 为同容量 200MW 的发电单元，各自近端有本地负荷 100MW。储能系统 ESS 在近 SG2 一侧。模拟负荷干扰，LOAD3 有功 10MW。

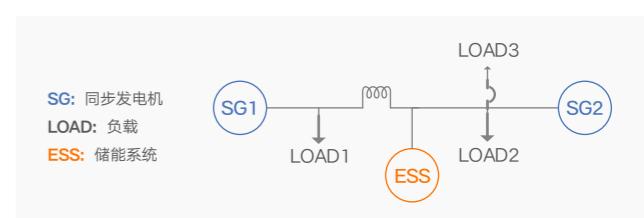


图 10：PSCAD 仿真系统资源配置

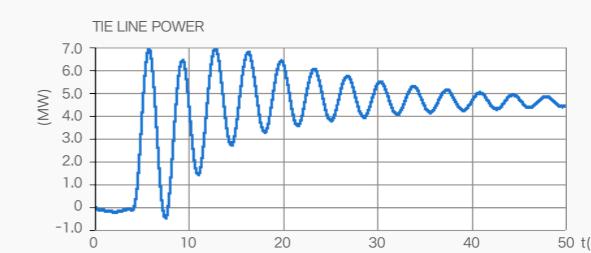


图 11：无 POD 系统产生的宽频振荡

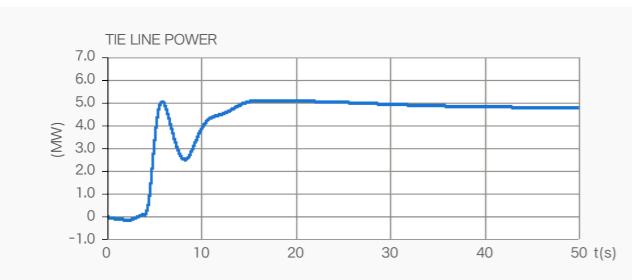


图 12: POD 技术对宽频振荡的抑制效果

如图 11 所示, 初始时刻, 连接 LOAD3 的断路器处于断开状态, 此时 SG1, SG2 分别为近端负荷供电, 联络线功率为 0。第 4s 时, LOAD3 的断路器闭合, 联络线功率发生振荡, 振荡频率 0.3Hz。如图 12 所示, 引入 POD 控制器后, 储能响应 POD 输出功率指令, 系统振荡被快速抑制。

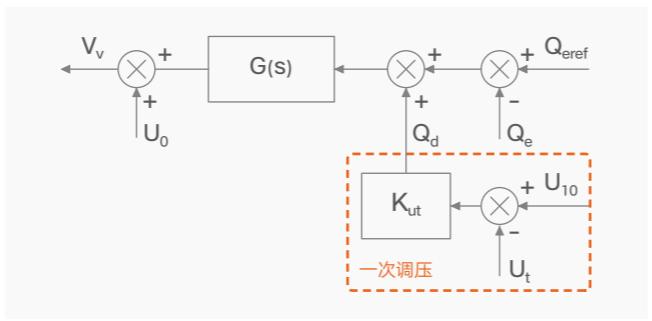


图 14: 电压调节控制框图

① 在虚拟同步机(VSG)控制中, 将端电压 U_t 下垂调节(一次调压功能)加入无功功率控制回路, 有效支撑端电压 U_t 的幅值; 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。

② 将端电压 U_t 进行实时闭环控制, 在弱网、故障穿越等引发电压暂态变化的工况下, 输出无功功率支撑端电压 U_t 。

弱网下电流源模式控制效果见图 15 所示, 当满载功率调度时, 电网电压波动范围为 $12\%U_n$, 易导致局部电网不稳, 引发系统振荡。弱网下电压源模式控制效果见图 16 所示, 当并网满载功率调度时, 实现微秒级无功响应, 电网电压波动低于 $2\%U_n$, 在不影响有功调度的情况下, 同时自动稳定端电压 U_t 。

4 微秒级电压构建技术

同步发电机具有自平衡能力、下垂特性、大转动惯量等特点, 有利于电力系统的稳定运行和负荷功率的合理分配。在高比例可再生能源的新型电力系统中, 需要储能系统模拟同步发电机特性, 在正常运行时表现为低阻抗电压源, 以控制其输出电压幅值和相角, 具有抑制其快速变化的固有特性, 提高电力系统稳定性, 参见图 13 所示。

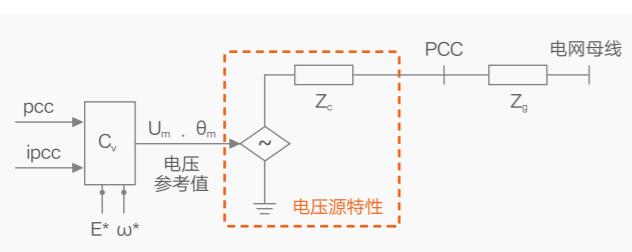


图 13: 电压源等效原理图

技术方案

储能系统通过模拟同步发电机的调压特性, 实现对电网的无功支撑, 如图 14 所示。

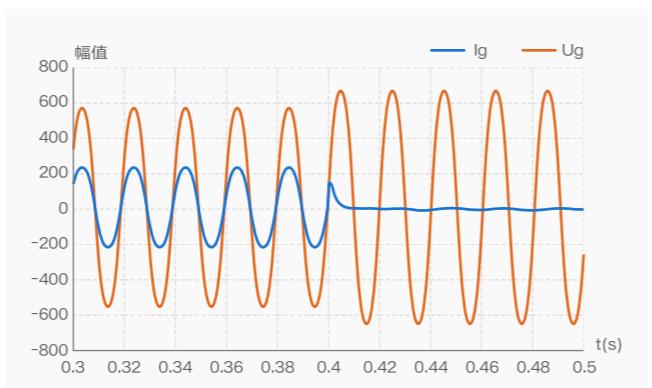


图 15: 弱网下电流源模式自主电压调节效果

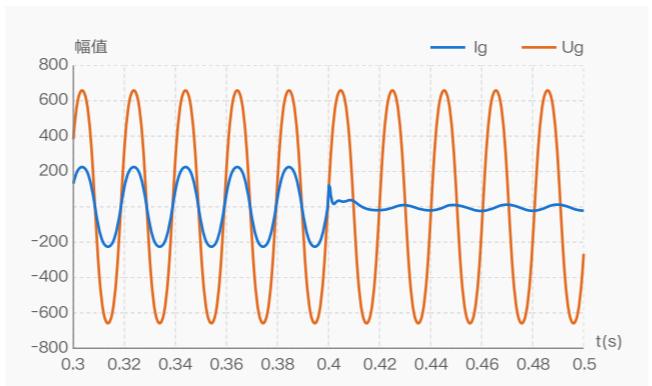


图 16: 弱网下电压源模式自主电压调节效果

5 柔性惯量支撑技术

同步发电机具有大转动惯量特性, 基于电力电子技术的储能系统应具备相应惯量支撑能力。电流源模式下的储能系统, 执行频率响应时需先检测再控制, 产生秒级延迟, 难以满足新型电力系统的惯量响应需求。因此, 储能系统需要具备电压源特性, 提供 ms 级惯量响应能力, 稳定电网频率。

技术方案

储能系统采用虚拟同步机控制前提下:

① 将一次调频加入有功功率控制回路, 支撑电网频率, 如控制框图 17 所示。

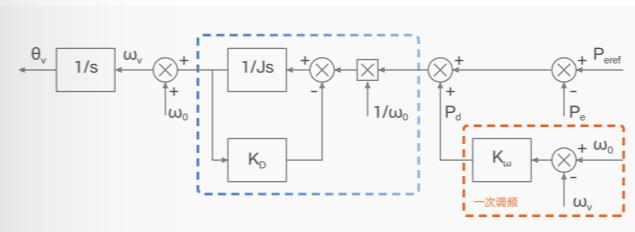


图 17: 频率调节控制框图

② VSG 的转动惯量 J 受硬件条件限制较小, 可灵活模拟设置。在系统发生扰动时, 转动惯量 J 和阻尼系数 K_D 等参数作用使系统频率变化减慢, 提高系统频率和功角的稳定性。

在离网和并网两种场景中, 惯量大小对频率变化的影响如下:

离网场景: 多台变流器与柴油发电机及其它能源组成电网, 通过设置变流器的 T_J (惯性时间常数) 在微电网中运行。

a. $T_J=0s$, 系统无惯性

b. $T_J=0.5s$

当负载接入和切出时, 系统在两个不同时间常数下的频率变化, 如图 18 所示。

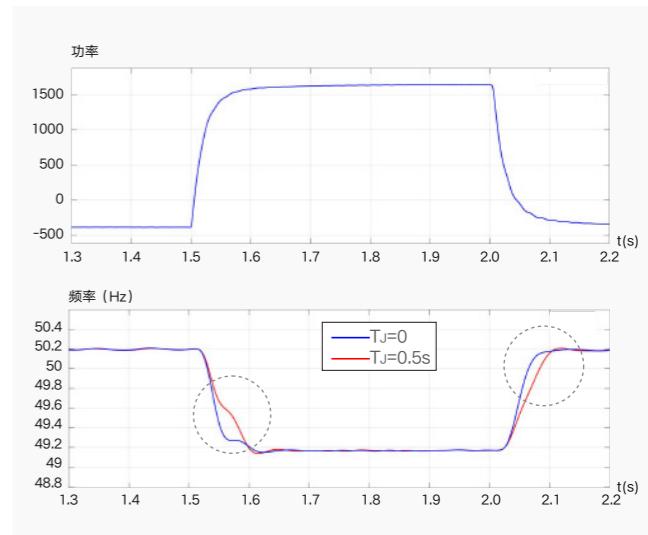


图 18: 离网下惯量大小对频率变化的影响

从图 18 以看出, 负载在 1.5 秒时加载、2 秒时切断, 当系统无惯性时, 频率下降或上升更快。随着虚拟惯性增加, 系统的频率变化率显著降低, 系统频率更加稳定。

并网场景: 变流器并入电网, 并设置变流器的 T_J 。

a. $T_J=0s$, 即系统无惯性

b. $T_J=0.5s$

当频率发生变化时, 系统在两个不同时间常数下的功率变化, 如图 19 所示。

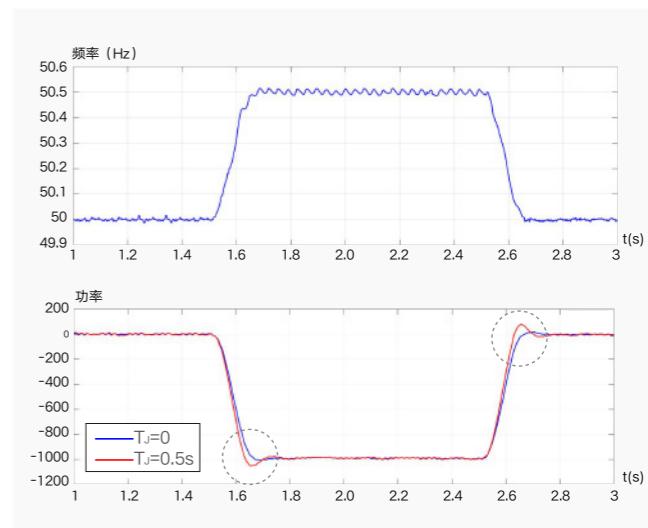


图 19: 并网下惯量大小对频率变化的影响

从图 19 可以看出, 当变流器增加 $T_J=0.5s$ 惯性时, 在电网动态频率变化期间, 与无惯性的系统相比, 可以更快地自发注入有功功率, 仿效同步发电机的转子特性, 抑制电网频率变化。

6 GW 级黑启动技术

黑启动是同步发电机在异常停机的情况下，通过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。随着可再生能源接入比例越来越高、分布式电源普及，对储能系统黑启动的功能需求迫切，对黑启动规模要求增大。储能系统通过电压源模式可以实现零电压构网，协同多机同时零电压起步、励磁主变，其功能应具备：

- ① **足够的储存能量**: 确保为部分电网供电，在离网模式下，为局域电网内辅助系统提供能量；
- ② **耐大电流冲击能力**: 在变压器通电或启动同步发电机瞬间，可耐短时大电流冲击；
- ③ **软启动能力**: 以适宜斜率输出电压从零升压至标称电压，避免通电时产生过大的浪涌电流而触发保护。

技术方案

以超大规模城市供电系统为例，电网分为多个供电子单元，各单元之间通过 110kV 及以上电压等级联络，提高供电可靠性。供电子单元主要包含光伏、储能、燃机等，如图 20 所示。

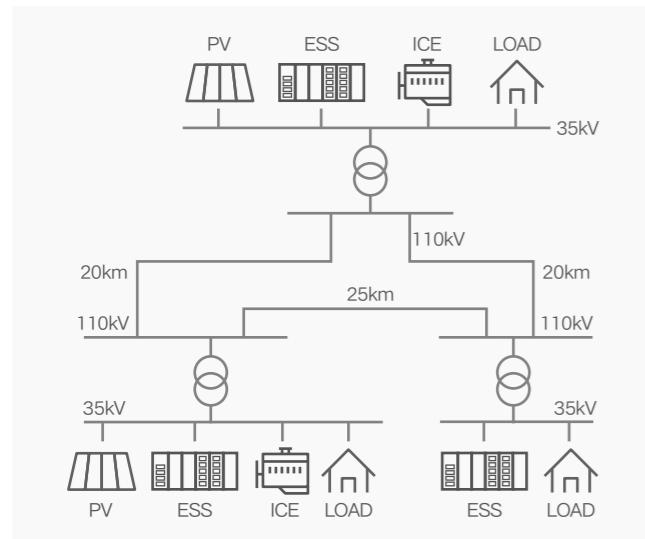


图 20: 多微网互联供电系统图

大规模分布式电网的黑启动采用分区异步方式，主要过程为：

① 分区异步启动，建立各子站内部微网

系统黑启动时，单套储能系统无法带动燃气轮机的辅助负载，EMS 根据微网内的启动负荷，选取下限启动容量，调度对应容量的储能系统并联启机，支撑变压器建立励磁。某项目 50MW 变流器同时启动、建立电压，与其它储能系统（ESS）、光伏并列组网，建立微网的过程见图 21 所示。

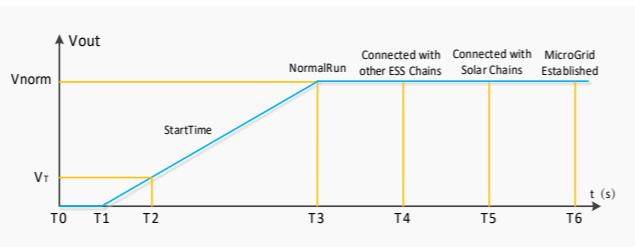


图 21: 微网供电子单元启动过程

其关键技术在于：

多台变流器同步启动控制: 接收到黑启动信号后，多台变流器在无互联互通条件下同步启动，输出电压实现连续无台阶爬升，且启动过程具备带载能力，励磁大容量主变。

动态下垂均流控制: 多台变流器组网后，拖动燃机辅助启动电机或者大容量隔离变压器的投入，耐受大电流冲击。

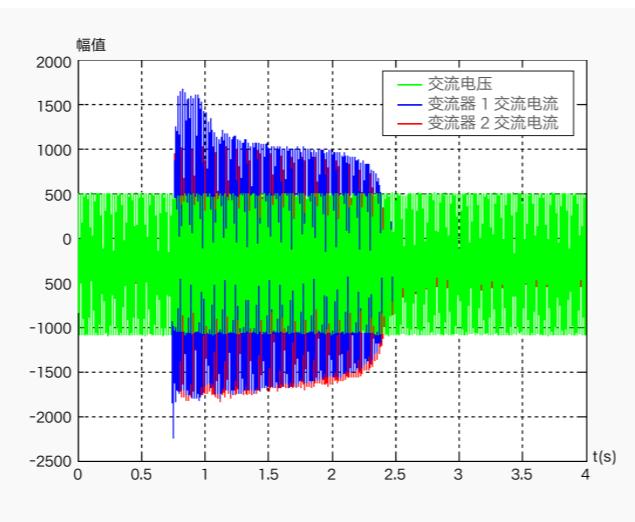


图 22: 组网后大容量负荷瞬时投耐冲击能力示例

7 虚拟双源叠控技术

电力系统运行复杂多变，电压源型并网控制具有实时稳压、惯量支撑、构建电压、提高电网强度等优点，但电压源并网在强网下稳定性不足、调度响应慢，结合电流源型并网控制可起到互补作用。

现有基于电网阻抗自适应的双模式控制理论，需要进行电网阻抗实时检测，工程实现挑战大。阳光电源提出虚拟双源叠控技术，采用虚拟电流源、电压源特性叠加的构网控制策略，如图 24 所示。

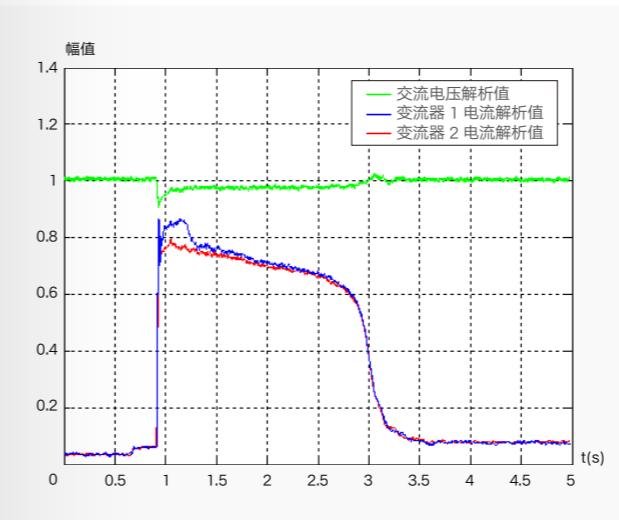


图 23: 多台变流器间暂态均流效果示例

② 分区间同期并列

不同分区支持电压、频率可调节，分区内外 EMS 联络外部电压、频率信息，同期装置进行合闸，完成整个分布式电网的构建。

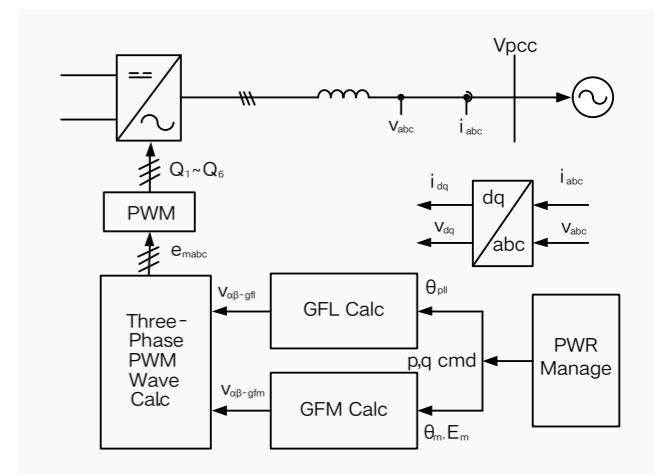


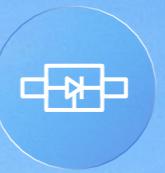
图 24: 虚拟双源叠控技术的控制策略

虚拟双源叠控技术基于叠加原理，同时进行电压源和电流源控制运算，并根据应用需求进行功率分配和管理，对外输出兼具电压源和电流源控制双重优势，实时支撑电网电压，提供惯量支撑，提高电网强度，实现宽范围 SCR (0-100) 系统稳定性，整站调度性能更好。

C4

客户价值

干细胞电网技术 (Stem Cell Tech) 使发电侧呈现更稳定、更柔性的电源特征，可助力新型电力系统电压、频率更加稳定，提高风电、光伏脱网后的快速恢复能力。



提升系统强度

电网出现频率波动时，提供毫秒级惯量响应，快速抑制频率波动；电网电压暂态变化时，实现有功功率与端口电压同步调节，电网电压波动低于 2%Un。



恢复电网供电

当局部电网发生脱网故障时，快速辅助燃气轮机重启、新能源场站发电再接入，实现区域、城市级的分布式电网构建，快速恢复供电。



提升辅助收益

快速灵活的参与电网调峰、调频、备电应用等辅助服务，获取收益。



C5 应用案例



西藏·措勤

1500kW 微电网项目

措勤县平均海拔 4700 米以上，是国内为数不多的高海拔县之一。年最高气温 25.0℃、最低气温 -34.0℃，日照充足，冬春寒冷。当地能源结构以水电支撑为主、光伏为辅，发电出力受气候影响大。措勤县远离西藏主电网，网架结构薄弱，运行控制难度大，整体供电可靠性较低。



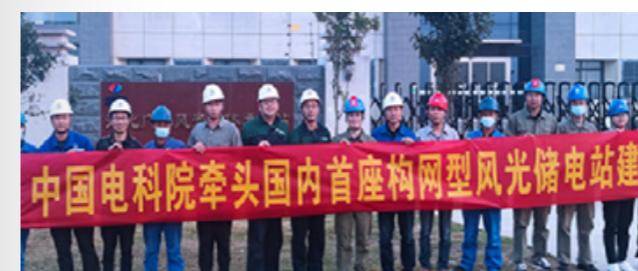
阳光电源集合水电、光伏、风电、混合储能（锂电及铅酸）、柴油发电 5 种电源并联运行，建成三条电源进线、四条负荷出线的 10kV 微电网。通过 VSG 控制策略，将同步发电机转子运动方程、一次调频特性及无功调压特性引入变流器中，具备电网电压构建能力，提高微网系统频率稳定性和供电质量。

该电站是典型的可再生能源多能互补供电系统项目，通过多电源稳定地馈入负荷并保障电压支撑能力，系统稳定性能大幅提升，保障措勤县 4000 多城镇、工商、牧民等用户的可靠供电，在微电网领域多能源互补应用、高海拔地区应用、以及虚拟同步电机技术应用等多个方面具有里程碑意义。

湖北·随州

32MW 新型电力系统项目

随州位于湖北省北部，地处长江、淮河流域的交汇地带，属于北亚热带季风气候。受太阳辐射和季风环流影响，随州气候温和、四季分明、光照充足、雨量充沛。受外送卡口限制，新能源消纳困难，常规电源无法应对新能源出力波动，导致电量平衡困难。新能源无惯量、对电网支撑弱，导致系统调频调压能力下降，电网难以稳定运行。



阳光电源采用基于能量路由器的多微网互联解耦技术，提高外送能力；针对部分风力、光伏发电机组进行电压源支撑技术改造，实时支撑电压，提供虚拟惯量，且满足孤岛运行下的电压构建能力。

提高区域电网的供电质量，10kV 母线电压波动幅度从 15%Un 降低到 10%Un。减小电力系统投资，改善新能源消纳能力，提高系统稳定性。

北美·印第安纳州

15MW/5.5MWh 黑启动项目

印第安纳州位于美国中北部，主要产业为先进制造业、工业机械生产、物流运输等，是丰田汽车北美第二大生产厂、联邦快递美国第二大中心。近年来，随着煤炭能源被逐步淘汰，印第安纳州着手发展可再生能源，通过配置储能系统整合新增的间歇性可再生能源，并应对紧急的发电侧脱网事故。

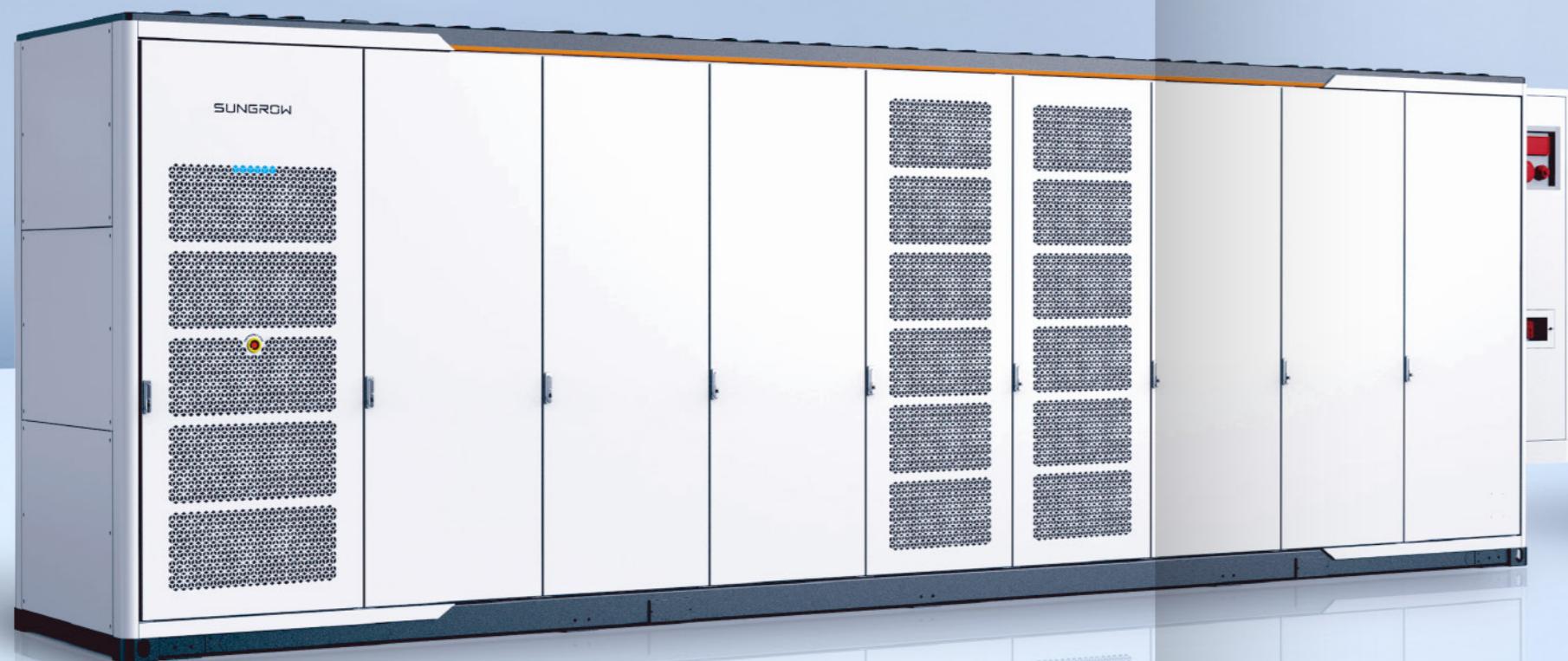


阳光电源采用 15MW/5.5MWh 储能系统，基于下垂控制的多台 PCS 无线并联构网技术，能够快速拖动燃气轮机转子至设定速度，并且励磁和软启动百兆瓦级送电主变压器。

完成 2 台 110MW 燃气轮机的黑启动，快速恢复电网的稳定运行，替代柴油发电机，实现燃气电站黑启动，整个过程安全、优质、经济。

C6

总结与展望



面向未来，新型电力系统建设将是一项极具创新性的系统工程，需要发电侧、电网侧、用户侧等多元主体深度协作、联合创新，共建“源网荷储”协调发展新生态。

作为可再生能源规模化并网接入的重要一环，阳光电源储能系统坚持“三电融合 专业集成”的技术理念，将在系统强度和短路容量提升、惯量支撑、宽频振荡抑制、故障穿越、大规模黑启动等技术应用基础上，不断创新突破，持续助力新型电力平稳运行。



阳光电源股份有限公司
中国合肥市高新区习友路1699号

+86-551-6532 7878
www.sungrowpower.com

