



主力电源型新能源及其构建电网的思考与实证

蔡旭^{1*}, 王富文², 王晗¹, 张宇¹, 郭子腾¹, 李征¹

1. 上海交通大学电气工程学院, 上海 200240

2. 上海中绿新能源科技有限公司, 上海 200240

* E-mail: xucai@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2025-07-01; 接受日期: 2025-11-17; 网络版发表日期: 2026-01-14

“中国绿发-上海交大联合研究中心”项目(编号: 23H010202519)资助项目

摘要 风电和光伏快速发展, 在装机容量上逐步成为新型电力系统的主体电源。但是, 新能源尚不能承担起主体电源的责任。为此, 本文指出自同步电压源构网技术是构建主力电源型新能源发电单元切实可行的技术路线。针对这一观点, 文章系统地总结了构网控制、频率主动响应、暂态电压支撑与电网适应性等技术现状, 提出了主力电源型新能源场站的概念、组成、技术指标及需要解决的关键技术问题, 构建了包括发电单元、储能、系统控制在内的技术体系。基于甘肃干河口主力电源型风电场和新疆尼勒克主力电源型光伏电站开展示范应用及全面测试, 验证了技术路线的可行性和经济性, 指出由主力电源型风电场/光伏电站承担电力系统的暂态功率平衡, 由电力市场和需求响应重塑负荷特性, 各类储能和宽范围常规机组实现电力电量平衡, 是构建新型电力系统经济可行的途径。

关键词 主力电源, 新能源, 构网型技术, 主动支撑

1 引言

在“碳达峰、碳中和”目标驱动下, 以风电和光伏为主体的新能源迎来快速发展。截至2024年底, 国内风电、光伏累计装机达14.1亿千瓦, 占发电总装机规模的42%, 首次超越煤电占比。根据国家能源局的预测^[1], 2050年风光发电装机容量将会达到51亿千瓦, 占总装机容量的72%; 预计每年产生9.66万亿千瓦时的电能, 占总发电量的64%。在高速发展态势下, 新能源即将取代过去水/火/核电等传统电源, 成为电力系统的

主体电源。届时, 新能源与传统火电、水电将共同构成“高比例新能源渗透、高比例电力电子占比”的“双高”电力系统^[2]。

在这一进程中, 电力系统的电能特性和电源特性都在产生重大变革: 在电能特性方面, 新能源发电具有随机性和波动性, 过去主要通过调度计划安排电源出力的运行方式受到重大挑战, 电力系统的能量平衡需要依靠发展多种灵活性资源来解决, 例如大规模储能、火电灵活性改造、需求侧响应以及电力市场等技术^[3]。在电源特性方面, 风光新能源发电系统依赖电力

引用格式: 蔡旭, 王富文, 王晗, 等. 主力电源型新能源及其构建电网的思考与实证. 中国科学: 技术科学, 2026, 56: 245–258

Cai X, Wang F W, Wang H, et al. Renewable energy as dominant power source and its grid integration: Considerations and empirical study (in Chinese). Sci Sin Tech, 2026, 56: 245–258, doi: 10.1360/SST-2025-0168

电子并网变换器作为并网接口, 电源特性由控制方式主导, 与传统电源同步发电机由物理特性主导迥异。由于硅基电力电子装备过载能力弱, 长期以来, 均采用电压快速跟踪和有功、无功功率解耦控制构建跟网运行模式, 使新能源的并网接口体现为电流源特征, 无法自主构建电压和频率, 不能自发支撑电网的暂态电压和频率, 这对基于同步发电机理论构建的电力系统安全运行带来巨大挑战。

随着新能源渗透率不断提升, 如何使新能源通过并网变换器实现稳定、可靠及灵活并网是目前面临的重大难题。过去由于对这一阶段的发展目标认知不足, 新能源并网比例攀升带来的影响缺乏理论指导, 导致相关的稳定性问题与脱网事故频繁发生。早期运行经验表明, 风光新能源的随机波动引发随机负荷平衡和调峰困难, 由于送出通道容量、灵活性调节资源和本地负荷消纳能力不足, 曾经长期存在严重的弃风弃光现象^[4]。随着新能源并网比例逐渐提升, 并网变换器接口的宽频振荡特性和过载能力不足的问题逐渐显现, 引发了大小扰动振荡等电网安全事故。例如, 串补线路和同步机轴系会激发变换器控制的宽频域动态特性, 分别在河北沽源^[5]和新疆哈密^[6]等地的风电场引发次超同步振荡; 电网短路故障、线路甩负荷和直流输电系统闭锁等造成电网电压和功率剧烈变化时, 发生多起大规模连锁脱网事故^[7]。可以预见, 随着新能源占比进一步提升, 上述新能源对电网安全稳定运行的挑战必将成为新能源发展的“卡脖子”问题。

综上所述, 新能源主导下的电力系统特性发生了根本性变革, 电能平衡与电网安全问题成为制约新能源发展的核心挑战。新能源必须从“被动依赖电网”向“主动支撑电网”和“构建电网”转变。为此, 亟需构建一套适应新能源高占比新型电力系统运行与控制的理论和技术体系。

新能源电力系统的构建是一个长期演变、逐渐形成的过程, 同步发电机理论必将在这一过程中继续发挥作用, 而非重建新的理论体系, 但是, 这一理论需要发展和变革。同步发电机是构网型装备, 不仅建立电压和频率、提供惯量和暂态电流支撑暂态频率和电压, 而且在调度指挥下还跟随负荷变化调整工作点维持电力平衡和无功经济运行。由于风光资源的波动性, 风电场/光伏电站不可能成为完全意义上的构网型电源, 但是由风光电源承担起一次调频及以下时间尺度的电网

支撑责任是完全可能的。

本文将从主力电源型新能源场站的定义、理论与技术、工程实证和分析思考四个方面开展论述: 首先, 定义主力电源型新能源场站的概念及技术指标, 给出主力电源型新能源场站的组成和结构形态。其次, 重点探讨存在的科学问题及关键技术, 进而通过世界首例主力电源型风电场和光伏电站的工程实践验证理论和技术的可行性。最后, 针对新型电力系统的构建提出建议与思考, 保障国家能源安全, 助力“双碳”目标实现。

2 主力电源型风光场站的概念与定位

2.1 主力电源型新能源的概念与技术指标

主力电源型风光场站的基本结构如图1所示, 由自同步电压源型风电机组/光伏发电单元、10%场站容量的35 kV高压直挂自同步电压源储能、场站监测与稳定控制系统等组成。由于风光变流器本身具备模拟同步机运行的能力, 但考虑到风光电源的能量来源是波动的, 其无法在长时间尺度上模拟同步发电机的调频性能, 仅在短时间尺度内可以模拟同步机的出力特性, 如一次调频特性、惯量响应等。此外, 与采用单台大容量机组的传统发电形式不同, 风光新能源的单机容量小, 全场站模拟同步发电机特性才有意义。在此基础上, 定义主力电源型风光场站的电气特性: 以新能源场站整体为对象, 暂态电气性能在一次调频时间尺度内整体上达到或超越同步发电机的暂态特性; 稳态运行时有功功率可按最大功率发电, 也可响应调度指令降功率运行, 无功功率响应调度指令; 具备黑启动、孤网运行能力。主力电源型风光场站核心理念在于通过场站级统一控制和发电单元自主响应的有机结合, 在不影响发电量的前提下, 实现如同传统同步机那样的电力系统暂态支撑能力, 从“被动依赖电网”转变为“主动支撑电网”, 孤网运行时独立构建电网, 成为新型电力系统的主力电源。

此外, 在直流并网模式下(如新能源经柔性直流输电并网的系统), 主力电源型风光场站的构造如图2所示, 这是指以新能源场站经直流送出系统整体为对象, 从受端来看, 具备暂态特性达到或超越同步发电机又不影响发电量的效果。其系统构成包括: 自同步电压源型直流受端换流器、10%场站容量的储能设备以及

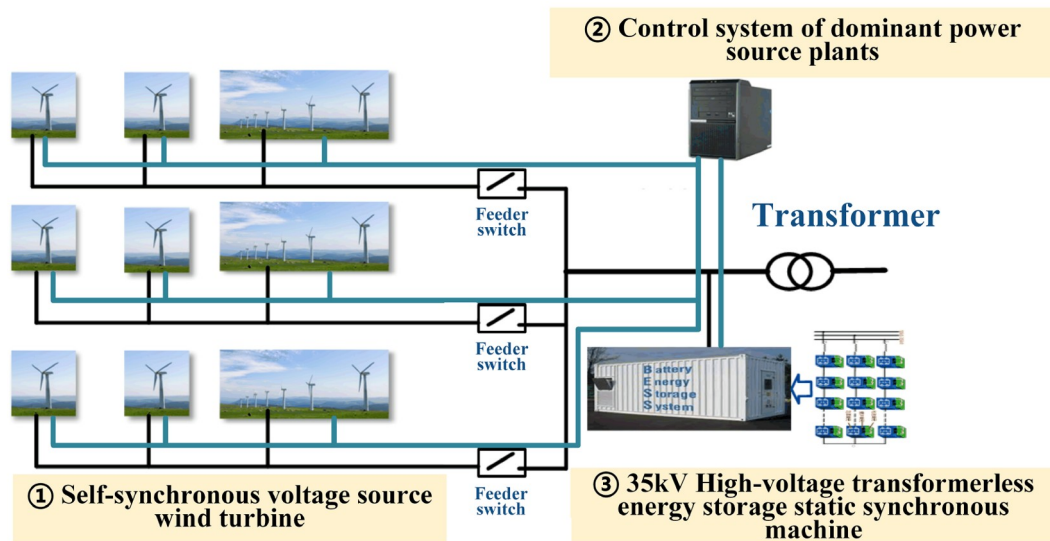


图 1 (网络版彩图)主力电源型风光场站(交流并网)

Figure 1 (Color online) Dominant power-type wind farms and photovoltaic plants (AC grid-connected).

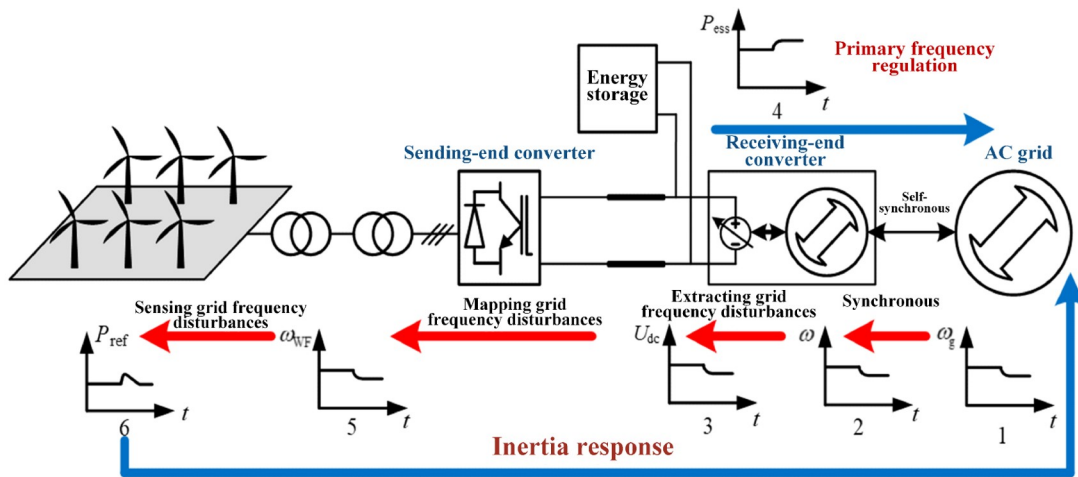


图 2 (网络版彩图)主力电源型风光场站(直流并网)

Figure 2 (Color online) Dominant power-type wind farms and photovoltaic plants (DC grid-connected).

送端柔直换流器频率镜像控制/二极管整流和自同步电压源发电单元。在这种直流并网模式下,受端换流器能够主动感知、映射并传递电网频率波动,通过与发电单元和储能联合,实现自主惯量响应、一次调频和电压支撑。

总体上,主力电源型风光场站各发电单元应具备“自同步电压源”特征,即下列特性:

(1) 电压源特性,能够自发、稳定地构建一定幅值

和频率的交流电压;

(2) 自同步特性,多个发电单元经交流线路互联,无论是否接入交流电网,其频率都能够趋于一致。

主力电源型风光场站关键技术指标如下。

(1) 稳态电压响应:可在并网和孤网等不同模式下自主建立并维持场站电压稳定,控制范围内的功率因数可达到 ± 0.85 。

(2) 暂态电压响应:能够提供暂态电压支撑。当发

生电压扰动时,具备无延时自主暂态电压响应能力,输出最高三倍额定电流、持续时间不少于625 ms的暂态电流,上升时间不超过20 ms。

(3) 动态频率响应:能够基于风力机旋转惯量、储能装备、光伏超配等多元手段,自主释放惯量支撑电网暂态频率。风光场站还具备一次调频能力,调频响应不低于额定容量的10%。

(4) 黑启动和孤网运行:在无外部电源支持的情况下能够自主建立电压和频率独立带负载稳定运行。

2.2 主力电源型新能源场站的定位

灵活性与安全性是保障电力系统安全稳定运行的关键。灵活性意味着系统能够平滑应对电源出力 and 负荷的波动,保持稳态下的功率平衡;而安全性则侧重于系统遭遇故障等突发扰动后,能够迅速恢复至稳定运行状态的能力。电网灵活性用于解决电量长时间尺度的平衡问题,安全性用于解决电网暂态过程中的功率实时平衡问题,因此,安全性是灵活性的前提。

新型电力系统构建的核心思想在于通过主力电源型风光场站的自主响应支撑电网暂态过程,解决电网安全性问题;电力市场重塑负荷特性,多元储能、宽范围常规电源等灵活性资源协同参与实现长期功率平衡,解决电网电力电量平衡问题。

主力电源型风光场站的定位是支撑电网暂态,离网时可支撑孤网运行。必须具备建立电压和频率、自主响应电网暂态的能力,整体实现与传统同步机类似甚至更优异的动态响应性能,从“被动依赖电网”向“主动支撑电网”和“构建电网”转变,成为保障电力系统安全稳定的“主力电源”。

3 主力电源型风光场站的科学与技术问题

3.1 拟解决的科学问题

构建主力电源型新能源风光场站需要解决两个科学问题。第一是电力电子装备接口的随机电源集群自主协同经济性支撑电网暂态频率的机制。动力源存在随机波动性,发电设备集群需实现同步运行,能量在转子、电感电容等元件中储存与缓冲,其释放过程呈现多时间尺度特性。同时,储能配置及与发电集群的协同受经济性制约,需在多重约束耦合条件下建立场站有功出力快速自主支撑电网频率稳定的动态机制。

第二是电力电子装备单机自主-集群协同经济性支撑电网暂态电压的原理。电力电子并网装备存在过载能力弱、能力提升受成本限制等问题。在暂态电压扰动下,无功出力与有功出力相互耦合,单机直流侧电压稳定性与规模化装备集群交流侧电压同步问题尤为突出,需理清受过载能力约束的从单机到集群、多机协同无功出力同步支撑电网暂态电压的机制。

风光变流器的动态特性在功率器件过载能力范围内可软件定制,以上两大科学问题具备实现的条件。下面将从自同步电压源构建、经济性频率支撑、经济性电网电压支撑以及宽短路比适应等方面深入讨论。

3.2 自同步电压源构建技术的讨论

构网型技术是一种概念的定性描述^[8],自同步电压源技术是一种模拟同步机电气特性实现构网能力的具体技术,电力系统是人类建立的最大的系统,新能源主导的新型电力系统构建是一个渐变过程,不可能一蹴而就。在同步机主导的电力系统逐步向新能源主导电力系统渐变的过程中,新能源模拟同步机特性运行是实现这一进程最合理的路径。所以,自同步电压源控制技术是使风光新能源向主力电源转变的关键技术^[9]。相比于过去基于锁相环并网的跟网型控制,该技术拟将新能源模拟同步发电机外特性,体现为自同步电压源特性。但是,由于源动力的随机波动性,风光新能源的自同步电压源控制面临巨大挑战。国内外研究团队针对风电机组/光伏发电单元的自同步电压源控制技术开展了大量研究工作。尽管风光电源网侧变换器可以模拟同步发电机的并网特性,其前端出力特性却还与锅炉/水轮机等常规能源迥异。因此,风光电源实际采用的自同步电压源控制技术应在模拟同步发电机特性的基础上进行差异化改进^[10]。目前,风电机组/光伏发电单元的自同步电压源控制技术已经取得实质性突破,其核心思想是多种控制模式的深度融合应用。

对于风力发电,其自同步电压源控制包括两条技术路线^[11,12]。一种方法是网侧变换器采用惯性同步控制建立电压并将电网的频率信息映射到变流器的直流母线电压上,然后机侧变换器基于直流母线电压变化信息控制机制实现频率响应^[9,10]。该方法所采用的惯性同步控制由本团队于2017年提出,同期国外提出了对应的匹配控制^[13,14]。这类控制方法无需对机侧变换器控制结构作调整,仅通过频率-直流电压映射和机侧

惯量模拟实现频率响应功能。另一种方式是机侧变换器控制直流母线电压恒定, 网侧变换器采用虚拟同步控制^[15]。这类控制改变了机侧变换器的控制结构, 为保持机组的稳定性, 一般需要在直流母线上配置储能协助稳定直流电压。此外, 构网型控制对风机轴系等机械结构带来的载荷及振动问题需要详细评估, 文献[16]提出构网型双馈风机的轴系扭振问题需要通过专门的补偿回路来消除。

对于光伏发电单元, 自同步电压源控制使光伏发电单元体现为电压源, 能够自发响应电网的功率变化。然而, 由于缺乏物理惯量作为能量缓冲, 光伏板和电网两侧的随机扰动与直流侧电容的弱惯量构成天然矛盾, 两侧的不平衡功率会迅速反映在直流电压上, 引起直流电压崩溃等严重问题^[17]。早期的自同步电压源控制一般通过在直流侧配置储能(即光储一体化)实现^[18], 然而光储一体化方案成本高、实施复杂, 对于大型集中式光伏电站并不适用。文献[19]研究了并网逆变器直接采用惯性同步控制, 通过直流电容实现同步, 然而, 并网功率随前端光强变化而改变, 无法实现电网频率响应、离网运行和黑启动。文献[20]提出发电单元降功率运行, 网侧采用虚拟同步控制实现自同步电压源, 但这会造成弃光问题。可见, 自同步电压源光伏发电构成“经济-构网-稳定不可能三角”。由团队提出的“双模并运、竞争主导”自同步电压源技术成为了破解光伏构网难题的可行方案, 多个同步回路在控制器中并运, 通过环路竞争的方式在多种构网型控制模式之间切换。无需配置额外的储能电源, 实现了发电最优和电网友好目标的双重融合。该项技术已经成功用于新疆尼勒克主力电源型光伏电站的常规运营(详见4.2节的分析讨论)。

3.3 频率响应的讨论

根据风电并网国家标准^[21], 目前要求风电机组具有8~12 s的惯量响应能力和向上6%、向下10%的一次

调频能力。机组的惯量响应能力来自风力机本身的旋转惯量, 由于风机转速的变化, 机组的等效惯量时间常数随之变化。以某款3 MW双馈机组为例, 其惯性时间常数如表1所示, 最小8.6 s, 最大达21.1 s, 远高于同步发电机组(火电: 2.5~10 s, 水电: 2~4 s)^[22]。可见, 风电机组客观上具备高惯量响应能力。

风电/光伏机组通常工作在最大功率捕获点, 具备向下的单方向一次调频能力, 可在电网频率上升时通过降低出力实现一次调频, 但在电网频率下降时不具备进一步增大出力的能力。通过降功率运行可同时实现双向一次调频, 但长期预留一次调频功率严重影响发电效率^[23]。因此, 主力电源型新能源场站需要配置短时储能实现一次调频功能。占场站10%容量的储能配置及分钟级持续时间, 可经济性解决新能源场站的向上一次调频问题。

在调频响应方面, 同步发电机受限于汽轮机或水轮机等大惯性机械环节, 导致一次调频滞后时间 ≤ 3 s, (0%~10%)响应时间 ≤ 15 s, (0%~90%)上升时间 ≤ 30 s, 调节时间 ≤ 45 s; 相比之下, 主力电源型风电场的调频响应具有明显优势, 一次调频无延时响应, (0%~10%)响应时间 ≤ 20 ms, (0%~90%)上升时间 ≤ 100 ms, 调节时间 ≤ 1 s。一次调频速度的提升能有效改善电网的频率特性。图3展示了两机系统从惯量响应到二次调频的整个过程。可以看出, 当同容量的主力电源型风电场替代了调频机组后, 系统在负荷增加后的频率跌落有效减少。

3.4 电压支撑的讨论

由于“沙戈荒”新能源基地常规电源少、汇集距离远。许多新能源场站并网点短路比低于2, 且考虑两级升压变总漏抗约为0.2 pu, 到机组并网点短路比普遍低于1.4, 发电单元接入点电压极弱^[24]。

常规新能源在极弱电网下运行, 不仅需要较大的无功可调范围补偿电压变化, 还需要快速的无功响应

表 1 3.0 MW风力发电机惯量计算表

Table 1 Calculation table of 3.0 MW wind turbine inertia

Operating point	Rotor speed	Inertia J (kg m ²)	Time constant H (s)
Rated rotor speed	10.25174	54993060	21.10563
Synchronous rotor speed	8.543114	54993060	14.65669
Minimum rotor speed	6.549721	54993060	8.614876

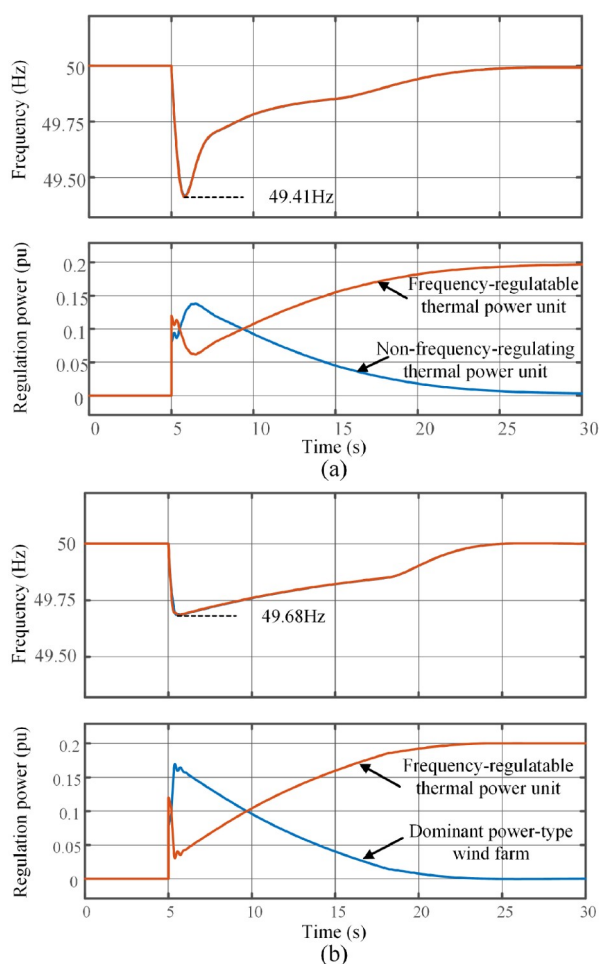


图 3 (网络版彩图)主力电源型新能源对频率特性的提升。(a) 两台火电机组; (b) 火电机组与主力电源型风电场
Figure 3 (Color online) Enhancement of frequency characteristics by dominant power-type renewable energy. (a) Two thermal power units; (b) thermal power unit and dominant power-type wind farm.

来适应有功变化引发的动态无功需求, 无功缺乏或响应不及时将会造成电压越限, 进而引发设备脱网^[25]。早期由于机组缺乏动态无功调节能力, 在交流短路故障后, 短暂无功盈余造成的过电压曾经引发多起风电场连锁脱网事故^[7]。尽管后来国家标准要求在暂态期间注入动态无功改善了暂态电压问题, 但动态无功通过检测电压被动产生, 还存在一定的时间滞后, 依然会导致无功回撤不及时, 进而引发电压越限^[26], 甚至由反复进出高低穿模式从而产生并网点电压振荡^[27]。目前, 解决暂态过电压的主流方案是在新能源并网点增加同步调相机, 但该方案前期投入成本巨大(同步调相机成本约5000万元), 后期维护费用也十分

高昂, 且这部分费用由业主承担。在当前风光电源取消补贴、平价上网的情况下, 同步调相机方案对新能源发电企业带来了巨大的经济压力。

相比于常规跟网型风电场由指令产生的动态无功电流, 主力电源型场站的无功响应更快、大小符合电路分压规律, 电压支撑作用大幅提升。研究表明, 通过将若干场站改造为自同步电压源控制, 能够提升新能源大基地的馈入广义短路比^[28]、降低暂态过电压水平^[29], 从而提升新能源送出上限。然而, 由于电力电子变流装备的过载能力弱, 大扰动下为保护器件安全, 电流限幅机制介入, 自同步电压源装备的特性由电压源退化为电流源, 原有的电压支撑能力和机制将发生突变, 这对自同步电压源装备的暂态稳定性和并网点的电压恢复带来不利影响。

面对自同步电压源装备暂态电压支撑的需求, 提升变换器的过载能力变得非常关键。根据变换器滤波器0.12 pu、箱变0.07 pu、场站升压变0.14 pu估算, 从变换器交流端口到场站并网点的总阻抗为0.33 pu。因此, 对于新能源场站并网点之外的短路故障, 全场站短路电流一般不超过3倍, 故3倍额定短路电流即能满足主力电源型场站对电网暂态电压支撑的需求。截至目前, 新疆发改委在2023年独立新型储能建设方案的通知中要求储能具有3倍额定值持续至少10 s的短路电流能力^[30], 团体标准《构网型风电机组并网技术要求与测试规程》也同样规定风电机组具备3倍短路电流能力, 持续时间至少625 ms^[31]。业内一般通过对变流器扩容实现3倍短路电流, 但该做法不具备价格成本优势, 难以长期为继。团队经过长期理论实践论证, 基于混合调制、动态降频和直流降压技术, 提出不超配功率器件实现变换器三倍过载能力的控制方法, 并在1 MW变流器上通过实验验证^[32]。经过工程测算, 所提技术仅需更换大量程电流传感器即可实现变换器动态扩容, 由此说明自同步电压源提供暂态3倍短路电流具备经济可行性。

3.5 宽短路比适应性讨论

以短路容量与新能源额定容量之比所定义的短路比一般称为“结构短路比”, 该定义下的短路比实际上衡量的是场站输出额定功率下的电压强度, 但在实际运行过程中, 电压强度与新能源开机方式、输出功率相关, 导致实际运行短路比会有很大的变化。

常规新能源在低短路比下运行被认为容易引发小扰动失稳问题^[33], 其机理是感性的电网阻抗与变换器锁相环主导的容性负阻尼阻抗引发谐振. 而自同步电压源控制在中低频段基本体现为感性正阻尼特性, 谐振风险大幅降低.

在电压极弱的电网, 新能源场站发出有功需要同时提供较高的无功, 以确保并网点电压在合理范围内, 被称为静态稳定问题. 静态运行边界包括装备最大输出电流、直流运行电压等, 两者较低均会导致无功输出能力不足, 最终引发有功输出受限. 研究表明, 在极弱电网下实现静态稳定除了需要提高装备的电流过载能力和直流电压大小, 还需要在无功电压外环控制上合理设计控制参数^[34].

在高短路比的强电网中, 电网的等效阻抗较低, 自同步电压源变换器容易产生小扰动失稳问题, 振荡频率一般出现在低频段和中高频段. 在低频段, 较低的电网阻抗会造成同步环的阻尼降低, 由此引发 2.5 Hz 以下的持续性功角振荡问题, 该问题一般可以通过增加同步环的动态阻尼来解决^[35]. 在中高频段, 相关失稳一般由控制内环产生, 体现为自同步电压源装备间联络阻抗减小, 并联引发的失稳风险增加^[36]. 研究表明, 双闭环内环控制的输出阻抗极低, 在高短路比下易引发振荡问题^[37]; 相比之下, 采用虚拟导纳控制的单闭环内环控制通过模拟同步机电枢电抗进而提供了较大的联络阻抗, 能够实现控制与电网动态的解耦, 具有较高的宽短路比适应能力^[38].

4 主力电源风电场/光伏电站的工程实证

国际上苏格兰电力可再生能源公司在位于南艾尔郡的 Dersalloch 69 MW 风电场, 通过改变风电变换器的控制, 开展了为期约 6 周的含 23 台机组的电压源风电场实证运行, 观测评估其在惯量响应、一次调频和黑启动方面的表现, 没有开展电网故障暂态支撑方面的评价工作^[39]. 目前, 该风场已恢复到原跟网控制模式. 国内开展了基于自同步电压源技术的主力电源型风电场和主力电源型光伏电站示范, 具体如下.

4.1 甘肃干河口主力电源型风电场

2023 年 11 月, 如图 4 所示的世界首例主力电源型风电场——甘肃干河口南北风电场投入运行. 工程包含

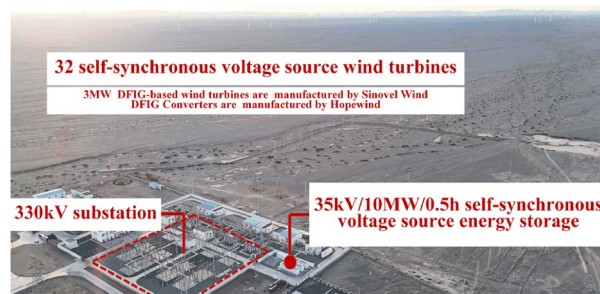


图 4 (网络版彩图)甘肃干河口南北风电场
Figure 4 (Color online) North-south wind farm in Ganhekou, Gansu.

32 台自同步电压源型双馈型风电机组 (单机容量 3 MW)、1 台自同步电压源型 35 kV/10 MW/5 MWh 的高压直挂储能和风场控制系统. 截至 2024 年 8 月, 通过了甘肃省电力公司电科院的电网适应性、惯量响应、一次调频、高低电压穿越、黑启动、孤网运行和三相短路等 530 项测试.

图 5 为惯量响应典型测试波形, 等效惯性时间常数约 12 s, 该常数与自同步电压源控制参数有关.

图 6 为故障电压支撑测试波形, 当电网电压跌落至 0.2 pu 时, 自同步电压源风电机组无延时输出最大 3 pu 的短路电流, 上升时间小于 20 ms; 当电网电压升高至 1.3 pu 时, 无功电流无延时响应, 吸收 0.5 pu 无功电流, 上升时间小于 20 ms. 非对称故障时, 风电机组输出平稳的正序无功电流支撑暂态电压.

图 7 为自同步电压源型高压直挂储能带 330 kV 主变、全场集电线路和箱变实现零起升压黑启动. 启动后, 带 15 台风机 (每台极限功率 450 kW) 和 4 MVA 负载孤网运行, 投切负载 3 MW, 3 Mvar, 1 MW/3 Mvar, 3 MW/1 Mvar, 储能和风电机组自主调节有功/无功功率, 保持孤网频率为 50.5 Hz 稳定运行. 最后, 在 35 kV 近母线位置做三相金属性短路试验, 全场输出 3 倍额定值短路电流, 上升时间小于 15 ms.

4.2 新疆尼勒克主力电源型光伏电站

2025 年 4 月, 世界首例主力电源型光伏电站——新疆尼勒克库克拜光伏电站建成, 由新疆电科院完成了 10 大项、21 小项、209 个测试工况的全维度测试. 该示范项目装机总容量 500 MW, 采用 1575 台 320 kW 自同步电压源组串式光伏发电单元.

每 10 台光伏发电单元构成 1 个光伏发电子阵, 额定

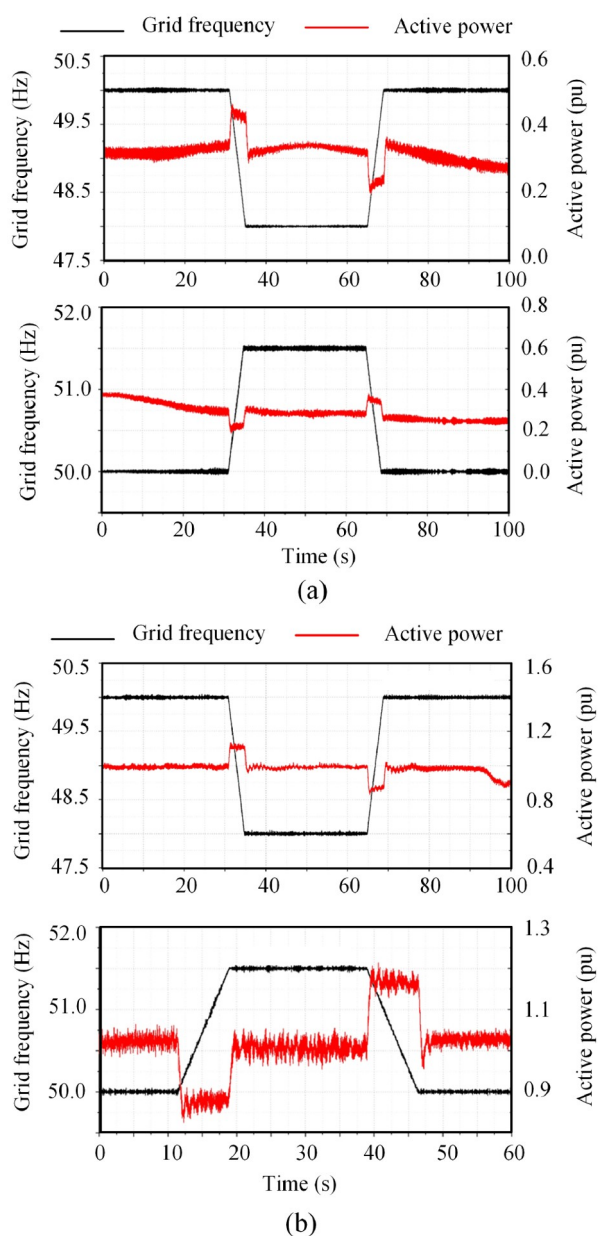


图5 (网络版彩图)机组惯量响应波形. (a) $P < 0.3P_n$; (b) $P > 0.9P_n$

Figure 5 (Color online) Inertia response waveforms of wind turbine. (a) $P < 0.3P_n$; (b) $P > 0.9P_n$.

功率3.2 MW. 图8为典型光伏子阵惯量响应测试波形, 等效惯性时间常数为15 s. 图9为光伏子阵的电压响应测试波形, 电网电压幅值扰动0.02 pu, 子阵自主调节无功出力减小电网电压波动. 当电网电压相位跳变 10° 时, 光伏逆变器自主调节有功和无功出力, 子阵保持稳定运行.

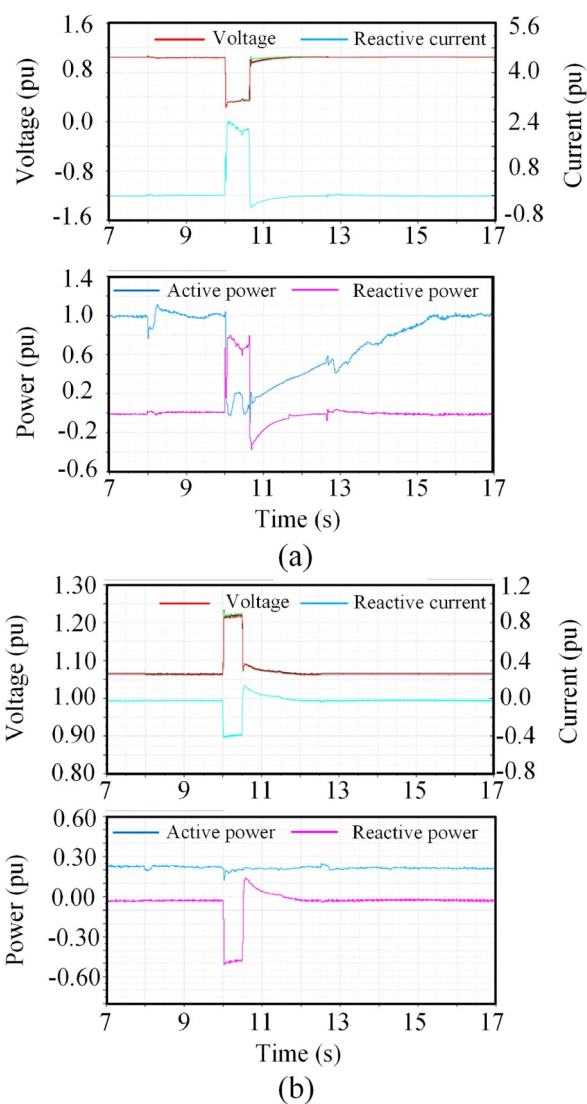


图6 (网络版彩图)电压暂态工况实测波形. (a) 电网电压跌落至 $20\% U_n$; (b) 电网电压骤升至 $130\% U_n$

Figure 6 (Color online) Waveforms under voltage transient conditions. (a) Grid voltage drops to $20\% U_n$; (b) grid voltage drops to $130\% U_n$.

图10(a)为自同步电压源光伏发电单元的阻抗扫描曲线, 在3 Hz~3 kHz内相位特性均在 $\pm 90^\circ$ 之内, 呈现正阻感性, 无振荡风险. 图10(b)为弱网适应性测试波形, 投切电抗模拟短路比变化, 最低短路比1.2, 光伏发电子阵输出有功阶跃变化, 子阵稳定运行.

由700台自同步电压源光伏发电单元带220 kV主变、全场集电线路和箱变实现零起升压黑启动, 并带4 MVA负载孤网运行. 如图11所示, 稳态频率为50.01 Hz. 投切负载3 MW, 3 Mvar, 1 MW/3 Mvar,

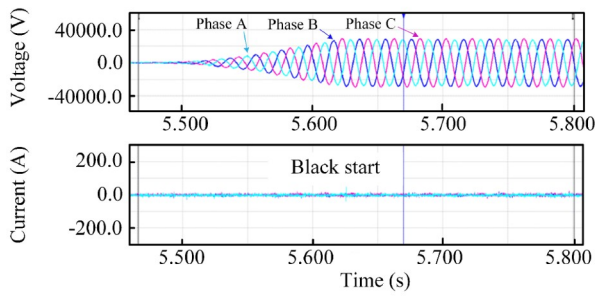


图 7 (网络版彩图)储能黑启动实测波形

Figure 7 (Color online) Measured waveforms during the black start of energy storage.

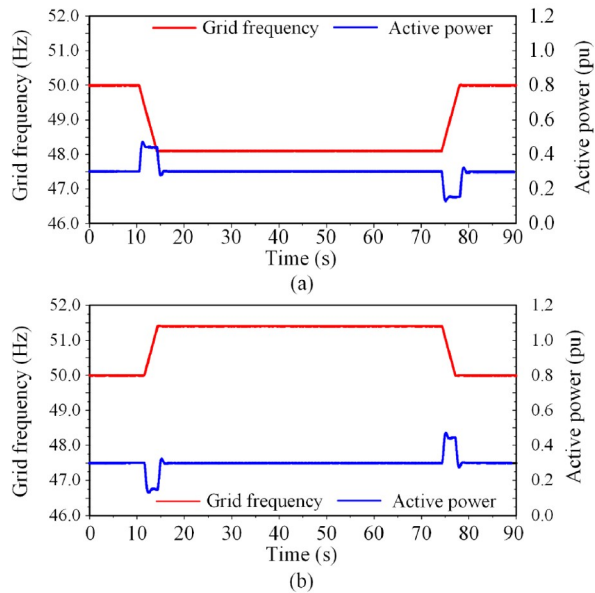


图 8 (网络版彩图)惯量响应实测波形(降功率运行). (a) 向下惯量响应; (b) 向上惯量响应

Figure 8 (Color online) Measured waveforms of inertia response (operation in reduced power state). (a) Downward inertia response; (b) upward inertia response.

3 MW/1 Mvar, 光伏发电自主调节有功/无功功率, 保持孤网频率为50.1 Hz稳定运行。

图12为35 kV集电线路金属性短路测试波形, 光伏电站输出3倍短路电流, 将电压支撑至7.15 kV, 故障后孤网恢复稳定运行。

4.3 主力电源型风光场站技术指标对比分析

通过现场实证数据, 将主力电源型风电场和光伏电站的关键技术指标进行整理, 如表2所示。

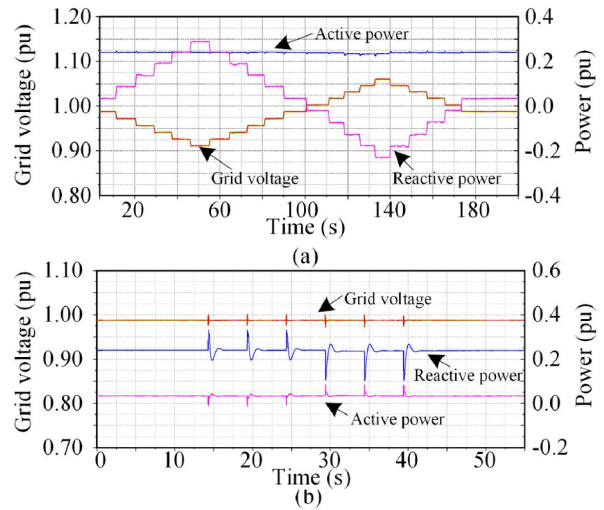


图 9 (网络版彩图)光伏子阵稳态电压响应实测波形. (a) 电网电压幅值突变; (b) 电网电压相角突变

Figure 9 (Color online) Measured steady-state voltage response waveforms of photovoltaic subarrays. (a) Grid voltage amplitude sudden change; (b) grid voltage phase angle jump.

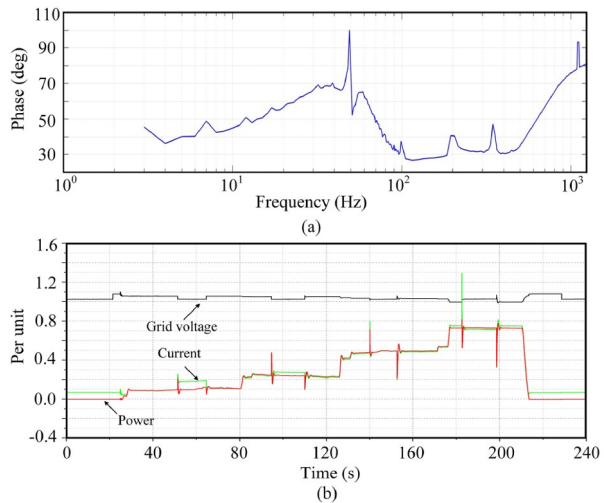


图 10 (网络版彩图)小扰动稳定性测试. (a) 逆变器相频特性; (b) 弱电网适应性测试

Figure 10 (Color online) Tests of small disturbance stability. (a) Phase-frequency characteristics of the inverter; (b) tests of weak grid adaptation.

由表2可知, 主力电源型风电场站和光伏电站在暂态频率支撑、暂态电压支撑、弱电网适应性以及黑启动等功能方面的技术指标大体相当, 其惯性时间常数可达12~15 s, 暂态电流响应时间小于20 ms, 最大短路电流达到3倍额定电流, 在短路比为1.2的极弱电网下

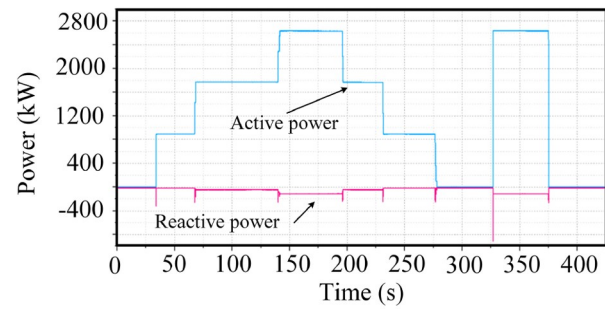


图 11 (网络版彩图)孤网带负荷投切测试
Figure 11 (Color online) Test of island grid with loading switching.

可满足功率稳定运行, 能在60 s左右的时间内完成黑启动, 体现出显著的主力电源特性。

5 思考与展望

工程实证表明, 主力电源型风电场/光伏电站的频率及电压支撑能力均优于跟网型场站, 其电网暂态支撑特性达到并超越了常规同步机电源。关键技术指标如表3所示。然而, 作为新型电力系统的主体电源, 主力电源型风光场站的发展仍需要更深入全面的研究, 并在实践中不断完善。

首先, 理论上需要回答电力电子接口的随机电源集群如何自主协同并在经济性约束下支撑电网暂态频率, 电力电子装备如何实现单机自主-集群协同经济性支撑电网暂态电压。本文的实证案例分别提出并验证了一种风电和光伏自同步电压源构建方法的可行性和

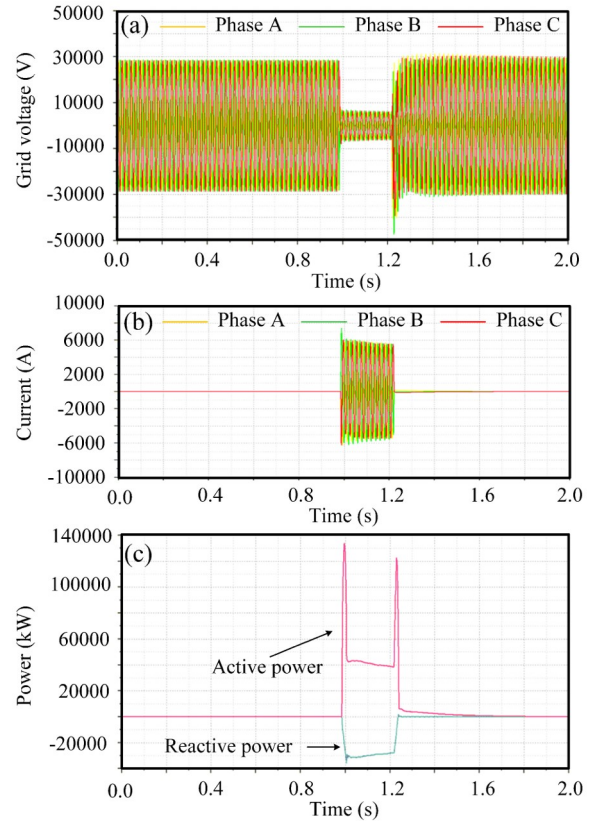


图 12 (网络版彩图)主力电源型光伏电站孤网带负荷投切实验. (a) 35 kV并网点电压; (b) 短路电流; (c) 功率
Figure 12 (Color online) Islanded load switching test of a dominant power-type photovoltaic plant. (a) 35 kV grid voltage; (b) grid current; (c) power.

有效性, 但仍需要更全面、更深入地探索和量化分析源侧能量不稳定条件下发电单元自同步电压源的构建

表 2 主力电源型新能源场站的关键技术指标

Table 2 Key technical metrics for dominant power-type renewable energy plants

Technical metrics		Wind farm	PV plant
Inertia response	Response time t_s (ms)	400	380
	Inertia time constant H (s)	12	15
Primary frequency regulation	Response time t_s (ms)	380	330
	Adjusting rate	10%	4.3%
Low voltage support	Current rise time t_r (ms)	8.7	17.3
	Maximum short-circuit current (pu)	3	3
High voltage support	Current rise time t_r (ms)	13.8	8.7
	Maximum reactive current (pu)	0.7	1.6
Weak grid adaptability	Minimum operating short circuit ratio	1.2	1.2
Black start	Zero-start boost time (s)	65	63

表 3 主力电源型风光场站的特性对比
Table 3 Comparison of the characteristics of dominant power-type wind farms and photovoltaic plants

Characteristics	Synchronous generator	Grid following wind farms and PV plants	Dominant power-type wind farms and PV plants
Primary frequency regulation	Delay time	≤3 s	≤50 ms (frequency detection)
	Adjustment time	≤45 s	≤1 s
	Frequency regulation power (Po: operating point)	Upward: 1.1 Pn-Po; downward: Po	Upward: without; downward: Po
	Duration	Minute timescale	Second-to-minute timescale
Secondary frequency regulation function		Bidirectional	Unidirectional
Inertia time constant		3–6 s (fixed)	0.01–20 s (adjustable)
Voltage regulation response time		≤15 s	≤100 ms
Transient voltage support		Rise time ≤ 20 ms	Rise time ≥ 50 ms
Maximum short-circuit current		6–10 times	1.1 times
Typical black start time requirement		6 h (thermal power), 10 min (hydropower)	Without

方法，攻克复杂暂态过程中有功、无功精准解耦控制难题，理清功率器件过载能力与自同步电压源构建的量化关系，明晰电力系统新能源化程度与新能源支撑能力需求的关系，刻画新能源发电单元自同步集群能力的边界，给出控制参数、过载能力、支撑需求与稳定运行裕度的量化关系和稳定判据，逐步形成主力电源型新能源的标准化模型和设计准则，指导新能源开发规划、装备规范化制造和支撑型新能源场站的有序建设。

其次，风光新能源发电装备面临过载能力约束下装备自身暂态安全与稳定运行挑战。硅基电力电子器件固有脆弱性导致其暂态耐受能力不足(传统方案过载能力<1.5倍)，在电-热-控多场动态交互过程中易引发连锁失效风险，而单纯通过硬件扩容提升过载能力将导致系统成本激增。同时，原动机固有响应时滞与电网暂态的毫秒级响应形成量级差异，使暂态能量自洽与快速电网支撑的协同极其困难。

最后，主力电源型风光场站主要解决了一次调频及以下时间尺度支撑电力系统暂态频率和电压的问题，作为主体电源构建新型电力系统时，尚需协同不同时间尺度的储能、常规机组，并在电力市场和需求响应重塑系统负荷的配合下，实现电力电量平衡。

随着理论原理的完善、关键技术的突破、工程实践经验的不断积累，可以预见，由主力电源型风光场站

支撑电网暂态，电力市场重塑负荷特性、常规电源和各种储能进行调峰，是一种构建新型电力系统经济可行的途径。

6 结论

本文综述了新能源构建电网的相关研究成果，提出了主力电源型新能源场站的概念、定义、关键技术指标、需要解决的关键科学问题和关键技术，实证了主力电源型新能源的技术可行性，形成主要结论：

- (1) 主力电源型风光场站与常规同步机电源相比，在一次调频及以下的时间尺度上具备相当或更优的电网支撑能力；
- (2) 电力电子变换器控制下的风/光伏发电系统具备高度灵活的可塑特性，使大规模自同步电压源型设备在理论上存在稳定运行的可能；
- (3) 主力电源型新能源场站可孤网稳定运行，技术的突破可经济性地实现主力电源型风光场站建设；
- (4) 主力电源型风光场站在控制、稳定、设计等方面尚需形成系统的理论体系。

展望未来，由主力电源型风光场站支撑电网暂态，电力市场和需求响应重塑负荷特性、常规电源和各种储能进行调峰，是一种构建新型电力系统经济可行的途径。

参考文献

- 1 Energy Research Institute of National Development and Reform Commission. Research on the scenario and path of China's 2050 high proportion renewable energy development (in Chinese). 2015: 1–46 [国家发展和改革委员会能源研究所. 中国2050高比例可再生能源发展情景暨路径研究. 2015: 1–46]
- 2 Xie X R, He J B, Mao H Y, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics (in Chinese). *Proc CSEE*, 2021, 41: 461–475 [谢小荣, 贺静波, 毛航银, 等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨. *中国电机工程学报*, 2021, 41: 461–475]
- 3 Bai J H, Xin S X, Liu J, et al. Roadmap of realizing the high penetration renewable energy in China (in Chinese). *Proc CSEE*, 2015, 35: 3699–3705 [白建华, 辛颂旭, 刘俊, 等. 中国实现高比例可再生能源发展路径研究. *中国电机工程学报*, 2015, 35: 3699–3705]
- 4 Shu Y B, Zhang Z G, Guo J B, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation (in Chinese). *Proc CSEE*, 2017, 37: 1–9 [舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究. *中国电机工程学报*, 2017, 37: 1–9]
- 5 Dong X L, Tian X, Zhang Y, et al. Practical SSR incidence and influencing factor analysis of DFIG-based series-compensated transmission system in Guyuan farms (in Chinese). *High Voltage Eng*, 2017, 43: 321–328 [董晓亮, 田旭, 张勇, 等. 沽源风电场串补输电系统次同步谐振典型事件及影响因素分析. *高电压技术*, 2017, 43: 321–328]
- 6 Xie X R, Liu H K, He J B, et al. Mechanism and characteristics of subsynchronous oscillation caused by the interaction between full-converter wind turbines and AC systems (in Chinese). *Proc CSEE*, 2016, 36: 2366–2372 [谢小荣, 刘华坤, 贺静波, 等. 直驱风机风电场与交流电网相互作用引发次同步振荡的机理与特性分析. *中国电机工程学报*, 2016, 36: 2366–2372]
- 7 He J B, Zhuang W, Xu T, et al. Study on cascading tripping risk of wind turbines caused by transient overvoltage and its countermeasures (in Chinese). *Power Syst Technol*, 2016, 40: 1839–1844 [贺静波, 庄伟, 许涛, 等. 暂态过电压引起风电机组连锁脱网风险分析及对策. *电网技术*, 2016, 40: 1839–1844]
- 8 Liu H, Yu S Q, Sun D W, et al. An overview of control technologies and principles for grid-forming converters (in Chinese). *Proc CSEE*, 2024, 44: 1–16 [刘辉, 于思奇, 孙大卫, 等. 构网型变流器控制技术及原理综述. *中国电机工程学报*, 2024, 44: 1–16]
- 9 Cai X, Qin Y, Wang H, et al. Review of self-synchronous voltage source control for wind turbine generator (in Chinese). *High Voltage Eng*, 2023, 49: 2478–2490 [蔡旭, 秦垚, 王晗, 等. 风电机组的自同步电压源控制研究综述. *高电压技术*, 2023, 49: 2478–2490]
- 10 Qin S Y, Qi C, Li S L, et al. Review of the voltage-source grid forming wind turbine (in Chinese). *Proc CSEE*, 2023, 43: 1314–1334 [秦世耀, 齐琛, 李少林, 等. 电压源型构网风电机组研究现状及展望. *中国电机工程学报*, 2023, 43: 1314–1334]
- 11 Huang L, Wu C, Zhou D, et al. Comparison of DC-link voltage control schemes on grid-side and machine-side for type-4 wind generation system under weak grid. In: *Proceedings of the IECON 2021—47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2021. 1–6
- 12 Huang L, Wu C, Zhou D, et al. Challenges and potential solutions of grid-forming converters applied to wind power generation system—An overview. *Front Energy Res*, 2023, 11: 1040781
- 13 Curi S, Gross D, Dorfler F. Control of low-inertia power grids: A model reduction approach. In: *Proceedings of the 2017 IEEE 56th Annual Conference on Decision and Control (CDC)*. 2017. 5708–5713
- 14 Arghir C, Dorfler F. The electronic realization of synchronous machines: Model matching, angle tracking, and energy shaping techniques. *IEEE Trans Power Electron*, 2019, 35: 4398–4410
- 15 Zhong Q C, Ma Z, Ming W L, et al. Grid-friendly wind power systems based on the synchronverter technology. *Energy Convers Manage*, 2015, 89: 719–726
- 16 Guo Z T, Zhang Y, Zhang C, et al. Damping control of grid-forming DFIG-based wind turbine based on virtual synchronous phase angle compensation (in Chinese). *High Voltage Eng*, 2025, 51: 1318–1328 [郭子腾, 张宇, 张琛, 等. 基于虚拟同步相角补偿的构网型双馈风电机组轴系扭振阻尼控制. *高电压技术*, 2025, 51: 1318–1328]
- 17 Zhou S Z, Song X Z, Geng Y, et al. Accurate active power reserve control for grid-forming photovoltaic inverters considering disturbances from both source and grid (in Chinese). *High Voltage Eng*, 2025, 51: 1–14 [周少泽, 宋昕哲, 耿越, 等. 计及源网扰动的构网型光伏逆变器有功精准备用控制. *高电压技术*, 2025, 51: 1–14]
- 18 Yin K, Xiao Y, Shen X, et al. Review of photovoltaic-battery energy storage systems for grid-forming operation. *Batteries*, 2024, 10: 288

- 19 Cvetkovic I, Boroyevich D, Burgos R, et al. Modeling and control of grid-connected voltage-source converters emulating isotropic and anisotropic synchronous machines. In: Proceedings of the 2015 IEEE 16th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics. 2015. 1–5
- 20 Zhong C, Li H, Zhou Y, et al. Virtual synchronous generator of PV generation without energy storage for frequency support in autonomous microgrid. *Int J Electrical Power Energy Syst*, 2022, 134: 107343
- 21 State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Technical specification for connecting wind farm to power system—Part 1: On shore wind power: GB/T 19963.1-2021 (in Chinese). 2021: 28 [国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 风电场接入电力系统技术规定第1部分: 陆上风电: GB/T 19963.1-2021. 2021: 28]
- 22 Kundur P. Power System Stability and Control. New York: McGraw-Hill Education, 1994
- 23 Deng Z Y, Wang W, Wang H, et al. Inertia response control of voltage source wind turbines at full wind speed (in Chinese). *Proc CSEE*, 2022, 42: 12–25 [邓桢彦, 王伟, 王晗, 等. 电压源风电机组的全风速段惯量响应控制. 中国电机工程学报, 2022, 42: 12–25]
- 24 Xi G W, Zhao B, Zhen S F, et al. Transmission capacity and improvement measures of the UHVDC sending system from new energy base (in Chinese). *Electr Power Constr*, 2022, 43: 131–138 [习工伟, 赵兵, 郑帅飞, 等. 新能源基地经特高压交流送出系统输电能力与提升措施. 电力建设, 2022, 43: 131–138]
- 25 Du W Z, Luo Y Z, Li Y H, et al. Reviews of transient overvoltage problem cause by extra reactive power in large scale wind power systems (in Chinese). *Proc CSEE*, 2022, 42: 3224–3239 [杜维柱, 罗亚洲, 李蕴红, 等. 风电汇集系统无功盈余导致暂态过电压问题的研究综述. 中国电机工程学报, 2022, 42: 3224–3239]
- 26 Sun D W, Wu L L, Liu H, et al. Effect of the low voltage ride through characteristics on PMSG terminal transient voltage in weakly-synchronized grid (in Chinese). *Proc CSEE*, 2021, 41: 4777–4786 [孙大卫, 吴林林, 刘辉, 等. 弱电网直驱风机低电压穿越特性及其对机端暂态电压的影响. 中国电机工程学报, 2021, 41: 4777–4786]
- 27 Wu L L, Zhao W, Xu M, et al. Mechanism analysis and suppression of repeated voltage fluctuation considering fault ride through characteristics of the wind turbine (in Chinese). *J Glob Energy Interconnect*, 2022, 5: 290–297 [吴林林, 赵伟, 徐曼, 等. 考虑风电机组故障穿越特性的电压反复波动机理分析与抑制. 全球能源互联网, 2022, 5: 290–297]
- 28 Xin H H, Wang Y X, Liu C X, et al. Estimation of capacity ratios between grid-forming and grid-following converters for improving the stability of renewable energy stations (in Chinese). *Proc CSEE*, 2024, 44: 5463–5473 [辛焕海, 王宇轩, 刘晨曦, 等. 提高新能源场站稳定性的构网型与跟网型变流器容量配比估算. 中国电机工程学报, 2024, 44: 5463–5473]
- 29 Zhao D M, Bai J H, Liu H F, et al. Enhancing voltage support capability of new energy bases through grid-forming stations and reactive power source optimization configuration methods (in Chinese). *J NCEPU*, 2025, 52: 1–17 [赵冬梅, 白俊辉, 刘涵枫, 等. 提高新能源基地电压支撑能力的构网型场站与无功源优化配置方法. 华北电力大学学报(自然科学版), 2025, 52: 1–17]
- 30 Zhou J H, Li J. Comparison and analysis of domestic and international technical standards for grid-forming energy storage conversion system (in Chinese). *Autom Electr Power Syst*, 2024, 48: 1–22 [周京华, 李津. 构网型储能变流器国内外技术标准对比与分析. 电力系统自动化, 2024, 48: 1–22]
- 31 China Electrical Equipment Industry Association. Grid-connected technical requirements and test procedures for grid forming wind turbine: T/CEEIA 804-2024 (in Chinese). 2024 [中国电器工业协会. 构网型风电机组并网技术要求与测试规程: T/CEEIA 804-2024. 2024]
- 32 Deng Z, Cao S, Ma K, et al. Active thermal control for enhancing fault current output capability of grid-forming converters. *IEEE Trans Power Electron*, 2025, 40: 13448–13458
- 33 Chen X, Wang Y C, Gong C Y, et al. Overview of stability research for grid-connected inverters based on impedance analysis method (in Chinese). *Proc CSEE*, 2018, 38: 2082–2094, 2223 [陈新, 王贇程, 龚春英, 等. 采用阻抗分析方法的并网逆变器稳定性研究综述. 中国电机工程学报, 2018, 38: 2082–2094, 2223]
- 34 Zhang Y, Zhang C, Liu H, et al. Power transfer limit analysis and weak grid operating requirements of new energy sources under multiple electrical constrains (in Chinese). *J Shanghai Jiao Tong Univ*, 2025, 59: 1–24 [张宇, 张琛, 刘辉, 等. 新能源并网多电气约束有功受限机理与弱电网下满额运行条件. 上海交通大学学报, 2025, 59: 1–24]
- 35 Li X, Liu G L, Yang R C, et al. VSG control strategy with transient damping term and seamless switching control method (in Chinese). *Power Syst Technol*, 2018, 42: 2081–2088 [李新, 刘国梁, 杨苒晨, 等. 具有暂态阻尼特性的虚拟同步发电机控制策略及无缝切换方法. 电网技术, 2018, 42: 2081–2088]
- 36 Zhan C J, Wu H, Wang X F, et al. An overview of stability studies of grid-forming voltage source converters (in Chinese). *Proc CSEE*, 2023, 43: 2339–2359 [詹长江, 吴恒, 王雄飞, 等. 构网型变流器稳定性研究综述. 中国电机工程学报, 2023, 43: 2339–2359]

- 37 Du W, Chen Z, Schneider K P, et al. A comparative study of two widely used grid-forming droop controls on microgrid small-signal stability. *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, 2020, 8: 963–975
- 38 Liu L, Yang R X, Shi G, et al. A novel AC voltage control strategy with inner current loop and its parameter design for a grid-forming MMC (in Chinese). *Power Syst Prot Control*, 2025, 53: 27–39 [刘黎, 杨仁炘, 施刚, 等. 含电流内环的构网型MMC新型交流电压构建策略及参数设计. *电力系统保护与控制*, 2025, 53: 27–39]
- 39 Roscoe A, Knueppel T, Da Silva R, et al. Response of a grid forming wind farm to system events, and the impact of external and internal damping. *IET Renew Power Gen*, 2020, 14: 3908–3917

Renewable energy as dominant power source and its grid integration: Considerations and empirical study

CAI Xu¹, WANG FuWen², WANG Han¹, ZHANG Yu¹, GUO ZiTeng¹ & LI Zheng¹

¹*School of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*

²*Shanghai Zhonglv New Energy Technology Co., Ltd., Shanghai 200240, China*

The rapid development of wind and photovoltaics (PV) has gradually become the dominant power sources in the new power system in terms of installed capacity. However, renewable energy has yet to fully assume the responsibilities of dominant power source. Therefore, this article points out that self-synchronous voltage source grid-forming technology is a feasible technical pathway for developing dominant power-type renewable energy generation equipment. A systematic review is conducted on key technologies, including grid-forming control, active frequency response, transient voltage support, and grid adaptability. The concept, composition, technical specifications, and critical challenges of dominant power-type renewable energy plants are proposed, forming a comprehensive technical framework that integrates power generation units, energy storage, and system-level control. The Ganhekou dominant power-type wind farm in Gansu and the Nileke dominant power-type PV plant in Xinjiang were implemented and comprehensively tested, validating the technical feasibility and economic viability of this approach. All of the evidence above proves that it is an economically feasible way to construct the new power system by having the dominant power-type wind farms/PV plants to undertake the transient power balance of power system, by having the power market and demand response to reshape the load characteristics, and by having various types of energy storage and wide-range conventional units to realize the power electricity balance.

dominant power source, renewable energy, grid-forming technology, active support

doi: [10.1360/SST-2025-0168](https://doi.org/10.1360/SST-2025-0168)