DOI：10.12096/j.2096-4528.pgt.24052　　中图分类号：TK 02; TM 73

构网型储能及其应用综述

李亚楼[1]，赵飞[1*]，樊雪君[2]
（1. 中国电力科学研究院，北京市 海淀区 100192；
2. 中国电子信息产业集团有限公司第六研究所，北京市 海淀区 102209）

Review of Grid-Forming Energy Storage and Its Applications

LI Yalou[1], ZHAO Fei[1*], FAN Xuejun[2]
(1. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China;
2. The 6th Research Institute of China Electronics Corporation, Haidian District, Beijing 102209, China)

摘要：【目的】“双高”电力系统(高比例可再生能源和高比例电力电子设备)低惯性、低阻尼的特征使电网在频率、电压等稳定问题面临着严峻的挑战。构网型储能(grid-forming energy storage，GFM-ES)具有频率调节和电压控制的能力，针对其特性、应用场景和研究展望等方面进行综述。【方法】首先从GFM-ES和跟网型储能的区别以及控制方法等方面阐述了GFM-ES的主要特点；然后从频率支撑、电压支撑和黑启动等方面介绍了GFM-ES的主要应用场景；最后从GFM-ES的稳定性、优化配置和实际工程应用等方面提出了研究展望。【结论】构网型变流器的稳定性对储能机组的运行特性具有重要影响，需要进一步关注稳定问题的诱导原因、参数整定、控制和限流策略切换等；GFM-ES规划配置中，需要在功能性、复杂性、成本等方面进行权衡，以及构网型和跟网型储能的混合配置有待继续研究；加强GFM-ES机组之间的协调性和运行交互性，完善工程测试规范和标准，推动其在交直流混合电网及高压输电网络的应用。

关键词：构网型储能；频率支撑；电压支撑；优化配置

ABSTRACT: [Objectives] The characteristics of low inertia and low damping in “double-high” (high renewable energy penetration and high power electronics application) power system pose significant challenges to grid stability, particularly in terms of frequency and voltage. Grid-forming energy storage (GFM-ES), which has the capability of frequency regulation and voltage control, is reviewed in terms of its characteristics, application scenarios, and research outlook. [Methods] Firstly, the main characteristics of GFM-ES are described from the aspects of the differences between GFM-ES and grid-following energy storage, as well as the control methods. Then, the main application scenarios of GFM-ES, including frequency support, voltage support, and black start, are elaborated. Finally, the research outlook is presented, focusing on the stability, optimal configuration, and practical engineering applications of GFM-ES. [Conclusions] The stability of GFM converters has an important impact on the operational characteristics of energy storage units, and further attention needs to be paid to the induced causes of the stability problem, parameter tuning, and switching of control and current limiting strategies. The GFM-ES configuration requires trade-offs in terms of functionality, complexity, and cost, and the hybrid configuration of grid-forming and grid-following energy storage needs to be further investigated. Coordination and interoperability between GFM-ES units should be strengthened, and technical test specifications and standards should be improved to promote their application in hybrid AC-DC grids and high-voltage transmission grids.

KEY WORDS: grid-forming energy storage; frequency support; voltage support; optimal configuration

0 引言

为应对气候变化，实现能源系统低碳转型，世界各国都在积极推动可再生能源的建设。据国家能源局统计，2023年全国可再生能源装机规模已突破14.5亿kW，超过全国总发电机装机的50%，历史性地超过火电装机[1]。新型储能也从试点示范向商业化规模化应用转变，2023年底，新型储能累计装机相较2022年底增长超过了260%，达3 139万kW/6 687万kW·h，进入了高速发展的

基金项目：国家自然科学基金项目(U2166211)。
Project Supported by National Natural Science Foundation of China (U2166211).

黄金时期[2]。

传统的燃煤、燃气同步发电机可以为电网提供惯量支撑以及电压、频率调节，被视为电力系统安全的“压舱石”。随着电力电子设备渗透率的增加，电力系统正在向低惯性、低阻尼的弱电网转变。太阳能电池板主要是基于静态功率变流器的发电技术，其不存在转动惯量。风力涡轮机虽然具有一定的惯性，但由于其随机性和波动性，仍不能长时间可靠地支撑双高电力系统[3]。在这种情况下，微小的扰动就可能会引起电网频率的较大波动和偏差，甚至导致系统崩溃[4]。

在变流器的跟网(grid-following，GFL)控制方式中，为了与电网保持同步，需要通过锁相环(phase-locked loop，PLL)测量并获取并网点(point of common coupling，PCC)的相位信息。然而，在弱电网、物理惯性低的情况下，GFL 控制方式会面临稳定性问题，此时变流器更适合采用构网(grid-forming，GFM)控制方式。构网变流器具有频率调节和电压控制的能力，使其可以像同步发电机一样提供惯量支撑。风电和光伏均可以改造和配备构网型变流器为系统提供虚拟惯性和阻尼，但是可再生能源波动的特性使其无法为系统提供持续和稳定的支撑。而构网型储能(grid-forming energy storage，GFM-ES)具有能量储备和快速功率响应的优势，不仅可以为电网提供能量平衡服务，而且可以提供范围更大、持续时间更长的稳定支撑作用。

国内外相继开展构网型储能示范项目，并推动相关研究和规模化应用[5-18]。澳大利亚于2017年推出 Hornsdale Power Reserve 项目[19]，并于 2020 年扩建，由特斯拉提供的锂离子电池组成，总功率为150 MW，容量为194 MW·h，不仅可以开展能源套利和阻塞管理业务，而且可以提供快速频率响应和合成惯性等服务[20]。2023 年，澳大利亚对构网型储能的支持力度进一步增加，新建了 Broken Hill BESS、Riverina and Darlington Point 和 New England BESS 等项目。此外，作为全球领先的太阳能系统技术公司，SMA Solar Technology AG 对大规模应用的并网变流器表现出极大的兴趣，在葡萄牙、法属波利尼西亚、德国等地开展了不同规模和目标的构网型储能相关项目，并证明了100%的可再生能源是可行的[21]。

近年来国内积极出台相关政策，支持构网型储能建设，例如2023年9月底，国家能源局发布的《关于组织开展可再生能源发展试点示范的通知》提到：组织开展新能源加储能构网型技术示范，旨在提升风电光伏大基地项目输电通道的安全稳定送电能力[22]。另外，西藏和新疆发改委于2023年7月对构网型储能的配置比例作出了进一步的指示，规定构网型储能的占比不小于年度独立新型储能20%的规模[23-24]。在构网型储能典型案例方面，新疆克州阿克陶为50 MW光伏电站配建5 MW/10 MW·h构网型储能，是国内首个具备高过流能力(3倍)的构网型储能。其于2023年3月份完成了包括静态功率测试、惯量响应、一次调频、电压响应、相位跳变(有功瞬时分担)、过载能力验证等现场试验工作，满足对电网的支撑性能设计指标要求[25]。另外，位于内蒙古边境的额济纳旗的供电系统具有极高的新能源占比，其供电范围11.46万 km^2，在“三道防线”框架下，建设了25 MW/25 MW·h构网型储能系统，构建网源荷储一体化新型电力系统。并于2023年5—10月开展了多项世界首例试验，如广域纯新能源电力系统黑启动试验、极高比例新能源电力系统49 h中长期离网运行试验，以及纯新能源电力系统离网状态下故障穿越试验等，系统性地验证了构网型储能完全具备传统发电机同步电压源支撑作用，能够系统地解决弱电网短路容量、转动惯量不足等问题，可有效提升高比例新能源电力系统的稳定性和可靠性[26]。

针对近年来构网型储能的研究热点和发展趋势，本文综述了其特性和应用等方面的研究进展及面临的问题。

1　构网型储能的特性与控制方法

1.1　构网型储能和跟网型储能的区别

目前储能设备广泛采用的仍然是跟网型技术，而构网型储能是一项新兴的应用，其与跟网型储能的特性对比[27]见表1。

跟网型储能的应用主要集中在通过最大功率

表1 跟网型储能和构网型储能的特性对比

Tab. 1 Comparison of the characteristics of grid-following and grid-forming energy storage

跟网型储能	构网型储能
可视为恒流源	可视为电压源
需要PLL	无需PLL
无法黑启动	可以黑启动
不能控制电网的频率和电压	可主动调整输出频率和电压
不利于故障限流和穿越实现	有利于故障限流和穿越实现
循环效率优于构网型储能	循环效率低于跟网型储能
无法在完全(100%)电力电子设备系统中运行	理论上可以在完全(100%)电力电子设备系统中运行
目前应用广泛，只适用于强电网，不适用于孤岛	目前应用较少，可适用于弱电网和孤岛

点跟踪(maximum power point tracking，MPPT)技术向电网注入有功功率[28]。因此，无功电源是很小的，往往接近于零。从整体循环效率的角度来看，跟网型储能更有吸引力。而构网型储能的主要优势之一是调节电网的电压和频率，为了实现这一目标，构网型储能中的有功功率和无功功率参考值不断变化。

从控制的角度来看，跟网型储能的行为可以近似为具有并联高阻抗的受控电流源。跟网型储能测量PCC处的电压v_{PCC}，并通过PLL测出v_{PCC}的相位角。然后，改变终端电压，从而实现所需的*d-q*电流。跟网型储能的有功功率和无功功率支撑分别通过控制注入的*d-q*电流来实现。与跟网型储能相比，构网型储能可以近似为具有低串联阻抗的电压源。与跟网型储能相反，构网型储能没有PLL，并且无须通过测量v_{PCC}以实现同步目的，而是形成v_{PCC}以调节其功率输出。跟网型储能和构网型储能控制的另一个主要区别是，构网型储能可以在没有电网连接的情况下建立自己的参考电压和频率[29]，具有和同步发电机类似的运行特性。因此，构网型储能理论上可以在完全(100%)电力电子设备系统中运行，适用于弱电网和孤岛，而跟网型储能比较适用于具有强电网支撑的应用场景。但是，由于开关设备的电流限制，构网型储能的电力电子设备容量通常很大，以满足故障电流通流要求，这使得建设成本增加。

1.2 构网型储能的控制方法

构网型储能的常用控制方式见表2，主要分为基于下垂的控制、基于同步机的控制和其他控制方式[41-42]。

表2 构网型储能的常用控制方式

Tab. 2 Common control methods for grid-forming energy storage

分类	控制结构
下垂控制	基于频率的下垂控制[30] 基于角度的下垂控制[31] 功率同步控制[32]
基于同步机的控制	虚拟同步机[33] 摆动方程模拟[34] 增强的虚拟同步发电机控制[35] 同步变流器[36] 匹配控制[37]
其他控制方式	基于虚拟振荡器的方法[38] 基于$H_\infty\backslash H_2$的鲁棒控制[39] 基于频率构形的控制[40]

提供虚拟惯性能力是构网型储能控制方法的一个重要方面。基于下垂的控制方法不具备虚拟惯性提供能力，因为它们通常是高带宽控制器。另一方面，大多数基于同步机的控制方法都能够提供虚拟惯性。

对于平滑的电网同步，PCC和电网在振幅、频率和相位方面的电压差应该是最小的。为此，通常基于下垂和基于同步机的控制方式需要同步单元与电网保持同步，尽管在运行期间不需要同步单元，因为同步由电源控制器保持，这类似于同步电机在并网前的同步过程。文献[43]中的PI控制器可以克服同步器中的这一缺陷。文献[44]提出了虚拟振荡器控制微电网的全局渐近同步。文献[45]提出了二次控制策略，以实现电网同步和无缝过渡。

通常情况下，基于下垂或基于同步机的控制方式既可以带有内环(电压和电流)，也可以不带有内环[46]。如果构网型储能与内环一起实现，则可以通过限制内电流回路的参考值来帮助过流保护。同步变流器是首次在不使用内循环的情况下提出的[47]。早期的基于虚拟振荡器的方法也缺乏过流保护和故障处理能力。文献[48]针对基于虚拟振荡器的控制器提出了过电流保护。

基于频率的下垂控制的主要优势之一是能够仅基于局部测量运行。相比之下，基于角度的下垂控制需要一个角度参考。然而，基于角度的下垂不需要变流器之间的通信。与基于频率的下垂控制类似，基于同步机的控制和其他控制方式不需要通信网络进行操作。此外，基于多输入多输出$H_\infty\backslash H_2$的鲁棒控制设计框架支持构网型储能的集中式、分散式和分布式控制设计。集中式和分布式控制器需要通信网络来进行变流器之间的通信，而分散式控制器不需要通信网络。

2　构网型储能应用

储能在新型电力系统的源、网、荷侧都发挥着重要作用[49-50]，本文参考欧洲输电系统运营商联盟 (European Network of Transmission System Operators for Electricity，ENTSO-E)将储能的应用分为能源管理和辅助服务 2 个方面[51]。能源管理包括负荷转移、调峰和价格套利等，其主要目的是实现可靠的负荷供应；辅助服务包括调频、调压和黑启动等，其主要目的是维持电网稳定、提高电能质量，同时促进可再生能源消纳[52]。其中能量管理属于储能的常规功能与应用，而构网型储能除了可以促进系统的能量平衡外，还可以支撑系统的安全稳定，因此本文着重介绍构网型储能的辅助服务方面的应用。

2.1　频率支撑

风电和光伏等可再生能源通常是通过电力电子功率变流器连接到电网，它们的机械惯性很小或根本不存在[53-54]。随着可再生能源对传统同步发电机的逐步替代，电力系统的惯量降低，导致频率响应不足，不利于在各种干扰下维持系统稳定[55]。可再生能源设施通常在其最大功率点运行以提高系统效率，需要 PLL 使电源与电网同步。此外，风电光伏通常以跟网的形式运行，不参与频率或电压调节。构网型储能不仅具有功率储备，而且其爬坡速率和响应速度优异，具有快速可控的动态特性，非常适合为系统提供虚拟惯性[56]。构网型储能可以通过有功功率–频率(*P*-*f*)下垂控制来提供快速频率响应服务[57-58]，其频率支撑特性曲线和控制框图如图 1 所示，图中f_0和f分别为频率的参考值和检测值，P_0和P分别为输出有功功率的参考值和检测值，有功功率偏差与下垂系数K_p的乘积项为频率的调节量。在网络中有多个并联构网型逆变器并网运行时，任何干扰或波动都可能引起工作点移位，从而导致并联逆变器的输出功率及逆变器之间的功率分配发生变化。因此，*P*-*f*下垂控制函数用于调节逆变器的输出频率，以防止系统进一步增加/减少其输出功率，如图 1(a)所示。类似于旋转同步发电机，这种频率调节改变了逆变器电压的相位角，从而调节其有功发电量。文献[59-62]探讨了具有虚拟惯性支持的储能规模估计问题，以增强电力系统在高新能源渗透水平下的惯性响应，其中文献[60-61]研究了考虑器件故障导致的惯性损失情景下储能选型的概率方法，文献[62]提出了储能选型的技术经济框架。

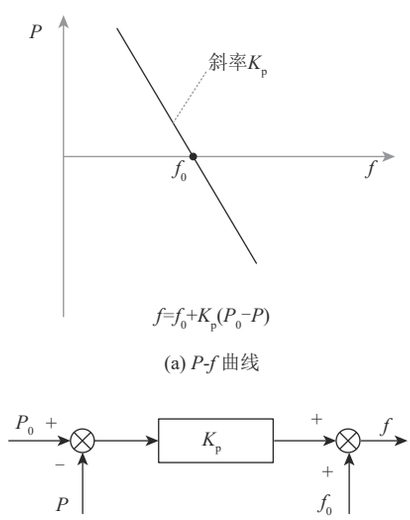

图 1　频率支撑特性曲线和控制框图

Fig. 1　Characteristic curves of frequency support and control block

2.2　电压支撑

可再生能源的功率波动会引起节点电压的波动，甚至导致电压跌落，进而引发电网的严重故障。在这种情况下，双馈风电系统的定子磁链会振荡，进而引起许多风力发电机组因电压下降而脱离电网。这不仅阻止了它们在故障期间向电网提供必要的有功和无功功率支持，还可能引起电网电压和频率的不稳定，从而对工业生产造成重大损失[63-64]。为此，研究人员开展了关于并网变流

器动态限流控制策略的研究，发现构网型变流器能有效抑制电压下降[65]。此外，还有学者证实构网型储能能够在电网故障时替代同步机，其电压支撑特性曲线和控制框图如图2所示，图中v_0和v分别为电压的参考值和检测值，Q_0和Q分别为输出无功功率的参考值和检测值，无功功率偏差与下垂系数K_q的乘积项为电压的调节量。通过无功功率–电压(Q-v)下垂控制可以有效支持电网电压，对维持节点电压稳定和抑制电网故障具有显著效果[31,66]。同时，Q-v下垂控制实现了防止并联构网型逆变器内无功循环的功能。在系统受到干扰引起工作点波动时，通过调节逆变器输出电压的大小，消除了构网型逆变器无功发电中的振荡，从而使逆变器之间的环流最小，保证了网络中多个并联逆变器的平稳运行。

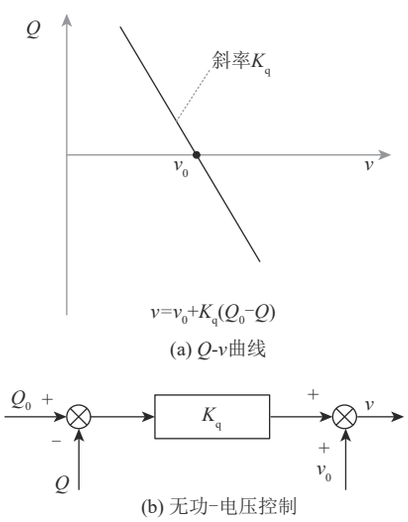

图2 电压支撑特性曲线和控制框图

Fig. 2 Characteristic curves of voltage support and control block

2.3 黑启动

随着分布式能源和微电网的逐渐普及和构网变流器技术的发展，构网型储能为电网提供黑启动支持的潜力也越来越受关注[67-68]。黑启动功能是电网在没有外部电网支持的情况下，从停电中恢复供电和运行的能力和过程[69]。构网型储能通常与带有构网型变流器的光伏、风电等分布式能源一起，以初始电压、频率、惯性等支持电网。多个变流器提高了冗余性和可靠性，并通过下垂控制、虚拟同步发电机(virtual synchronous generator，VSG)等方式实现并联构网型变流器之间的负载同步与共享。在构网型储能和分布式能源提供初始电压、频率后，其他负载或发电机可以按照一定的恢复策略重新连接到电网，从而在停电事件中恢复系统的正常运行。然而，多个构网型设备的启动顺序与协调同步仍需要进一步研究[70]。

3 构网型储能研究展望

3.1 构网型储能的稳定性

稳定性分析是评价构网型储能控制策略性能的一个重要因素，构网型变流器的稳定性主要分为小信号稳定性和暂态稳定性。暂态稳定性又主要包含功角稳定、频率稳定和电压稳定。下面分别从这几方面阐述目前还需要深入研究的问题。

3.1.1 小信号稳定

构网型变流器的小信号稳定性被定义为当受到小干扰时，变流器自动返回到初始工作状态而没有自发振荡或非周期性失步的能力。在强电网中，构网型变流器的v_{PCC}难以调节，容易引起振荡和小信号失稳，主要可分为低频振荡和同步振荡[71]。这是由于当电网强度较大时，构网控制的小信号稳定裕度会减少，在强电网中采用功率同步控制方式时，微小的相位差(变流器和电网之间)变化可能导致功率波动，从而引发同步振荡。因此，需要对构网型储能的小信号同步稳定性进行更多的研究，例如，针对未来具有大量构网型储能的电力系统，研究新的降阶或数据驱动的建模方法[72-73]。此外，功率控制环的参数被认为是影响整个系统小信号稳定性的关键因素[74-75]。具体来说，这些关键参数可以通过状态空间分析来确定。对于基于低通滤波器的下垂变流器，下垂系数是关键参数，它影响着系统状态矩阵[30]的低频主导特征值。文献[76]指出，虚拟阻抗也是关键参数。与状态空间方法相比，阻抗分析方法只需要输出电压和电流的测量，实用性更强。阻抗分析方法还包括序列–阻抗建模[77]和dq–阻抗建模[78]。

综合以上分析可知，为了使构网型变流器可以适用于不同电网强度情形，可靠的阻尼控制策略显得至关重要[28]。除此之外，小信号失稳还可能是因为构网控制的参数不合适，例如下垂系数

或惯量和阻尼系数设置不当。在对构网型变流器进行参数整定时，应确保阻尼比的合理范围。

3.1.2　暂态稳定

当受到较大的扰动，例如发生交流故障时，构网型变流器的限流器可能饱和，变流器的工作模式将从电压源模式转变为电流源模式。对于新能源主导的弱有源电网，系统频率主要由变流器的输出频率主导。

在暂态过程中，PCC 的频率将随着连接的变流器的输出频率而变化。PCC 频率和变流器频率之间的差异可以忽略不计，相位角差δ几乎是恒定的。在这种情况下，传统的基于δ变化来评估暂态稳定性的分析方法不再适用。为了解决这一问题，文献[79]引入的传统电力系统中惯性中心(center of inertia，COI)的概念。由于 COI 信息反映了整个系统的全局变化，因此利用 COI 信息进行暂态稳定分析可以有效地指导系统的一致性和稳定性[80-81]。文献[82]采用李雅普诺夫直接法对构网型变流器的暂态角度稳定性进行了研究，分析了不同控制参数对角度稳定性的影响。文献[83]结合李亚普诺夫稳定理论进一步获得了构网型变流器的暂态和次暂态阻抗。

构网型储能通常采用下垂控制和虚拟惯性控制参与电力系统的频率调整。下垂控制的基本原理是构网型储能根据频率偏差，以一定的比例系数向电网输送有功功率，来响应电网的频率变化。但是当频率偏差过大时，构网型储能按固定比例调整输出功率可能无法满足或超过系统恢复频率的需求，甚至导致频率的持续下跌或者过度调频的情况发生。虚拟惯性控制是模拟同步发电机的惯性响应来进行频率调节。该控制方法存在和下垂控制类似的缺点，不能改善频率偏差的稳态值[84]。此外，上述控制方法都主要关注电力系统频率信息，而没有考虑构网型储能设备的其他参数。这些方法在分析储能设备参与电力系统调频时存在一定的限制，无法全面评估储能设备在调频过程中的变化趋势。此外，这些控制方法也没有充分考虑储能设备的自身运行状态，特别是储能设备的荷电状态(state of charge，SOC)，这对于提高构网型储能调频的经济性和稳定性不利[85]。

构网型变流器具有低压穿越功能，可以抑制电压跌落，进而维持电压稳定。文献[86]提出了在不同电压跌落状况下计算最优无功电流的方法，以实现最优电压支撑，同时确保设备的安全性。文献[87]则介绍了级联型并网逆变器在不同故障情况下的控制方法，提出了一种基于旁路原理的低电压穿越控制方式。文献[88]探讨了一种主动支撑型新能源机组低电压穿越控制方法，该方法基于虚拟阻抗，但虚拟阻抗参数的设计较为复杂，且无法应对电网强度变化的影响。需要指出的是，上述研究未充分考虑 boost 变流器和并网构网型变流器之间的协调控制关系[89]。此外，穿越功能是由电网互联标准来定义的。然而，这些穿越功能源于并网跟网型逆变器，将这些功能实现到并网和孤岛运行的构网型逆变器中需要进一步修改电网互联标准[90]。

综合以上分析，构网型变流器的稳定性对储能的运行特性具有重要影响，需要在稳定问题的诱导原因、参数整定、控制和限流策略切换等方面进一步开展研究。

3.2　构网型储能的配置

构网型储能系统由构网型变流器、升压变压器和电力线路组成。系统容量的变化会直接影响构网型变流器、升压变压器和电力线路的等效阻抗。所以，不能简单地将构网型储能视为理想电压源[91]。储能系统的等效阻抗和容量变化会对系统稳定性产生何种影响，以及如何有效协调和优化构网型储能与可再生能源的比例，需要进一步研究，以对构网型储能高效地管理和控制。

文献[92]和[93]分别通过详细数学模型和每小时数值模拟来优化光伏和燃料电池组合系统的容量配置。文献[94]提出了一种基于模型预测控制框架的微电网运行策略，该框架包括氢储能和电池储能单元，所提控制策略增加了电池寿命并且降低了维护成本。文献[95]基于虚拟同步发电机的小信号模型，根据不同的惯性与阻尼参数，提出了设计构网型储能功率和容量的解析方法，但该模型没有考虑到储能的一次调频能力。文献[96]综合考虑了储能配置中的惯量特性和调频特性，详细分析了储能功率、容量与 VSG 参数之间的关系，

但其模型仅关注单机运行工况，没有推广至多机运行工况，且惯量支撑与一次调频在动态响应和功能定位方面存在差异。文献[97]探讨了两者的不同点，但对于储能的具体配置方案，如最大功率、容量需求和响应时间等方面的讨论较为有限。

目前，大多数研究关注于单一类型储能的规划，对于同时含有构网型储能和跟网型储能的多类型组合储能系统稳定性分析及其优化配置的相关研究尚不多见[98-99]。跟网型储能的效率和经济性优于构网型储能，但其无法为电网提供频率/电压支撑。因此，需要针对不同场景(孤岛、并网、源网荷侧、不同可再生能源占比)下，在经济性和稳定支撑功能间作合理折中，以优化构网型储能和跟网型储能的配比，并分析二者的动态交互和功率分配问题。文献[100]使用状态空间模型研究了构网型和跟网型变流器组合系统，并探讨了跟网型变流器功率渗透率对小扰动稳定性的影响。文献[101]则使用特征值分析法，研究了多VSG并联系统的稳定性，并结合特征值运动轨迹探讨了不同系统参数变化对稳定性的影响。然而，目前关于考虑构网型储能和跟网型储能组合系统的动态交互和稳定约束下的优化配置方面的研究较少，需进一步开展探索[102]。

综上所述，构网型储能的各单元的选型和配置是设计过程中的首要问题，需要在功能性、复杂性、成本等方面进行权衡。不同储能单元间的能量管理和协调控制是另一个关键问题，其中参数设计、多机功率均衡共享等都需要进一步的研究。

3.3 实际工程应用

在目前大多数工程应用案例中，大多数构网型储能都是连接到中压电网，高压应用相对较少，而连接到低压电网的示范工程也多定位于为中压电网提供服务[5]。构网型储能的调频调压、黑启动等功能推动了微电网和孤岛电网工程的建设，这有利于减少偏远地区或特殊应用场景下对大电网的依赖性，以及提高对极端气候事件的防御能力。微电网和孤岛电网规模通常较小，相对易于管理，因此目前构网型储能工程项目提供的支撑服务较多应用于中电压等级，在高电压等级的输电网中的工程应用还处于起步阶段。此外，构网型储能技术成熟度仍有待改进，安装建造成本较高，需要在安装规模和经济性间作合理的平衡。

另一个需要关注的重要问题是探究多个构网型储能协同工作的实际工程表现，测试不同控制参数设置下构网型转换器之间的协调性和运行交互性方面的不足。同时推动相关测试流程、标准和规范等评价体系的建立，以对设备进行有效的实验测试。

交–直流混合中低压微电网正受到越来越多学术界和工业界研究人员的广泛关注，是高效整合电力系统中的分布式灵活调节资源的可行方式。因此，未来需要加速推动构网型储能在交–直流混联电网中的工程试验，探索其在交–直流混联电网中的功能特性，积累实际项目测试案例与数据，不断提升构网型储能实际工程应用的成熟度。

4 结论

相对于跟网型储能需要有强电网支撑，构网型储能可以在没有电网连接的情况下建立自己的参考电压和频率，具有和同步发电机类似的运行特性，适用于弱电网和孤岛的应用场景。针对构网型储能的稳定性、配置优化和实际工程应用等方面进行总结，提出未来研究方向具体如下：

1）关注构网型变流器的稳定性对储能机组运行的影响，包括稳定问题诱导原因、参数整定、控制和限流策略等。

2）规划设计构网型储能系统时，需克服各单元选型和配置的兼容性，同时权衡功能、复杂性和成本，并探究构网型和跟网型储能的混合配置。

3）加强多个储能设备之间、储能和新能源机组之间的能量管理与控制，提升协调性和运行交互性。

4）加快完善工程测试流程、标准和评价体系的建立，以推动构网型储能在混合电网和高压输电网络中的应用。

参考文献

[1] 光明日报．我国可再生能源装机达14.5亿千瓦占全国发电总装机比重超过五成[EB/OL]．(2023-12-25)[2024-01-29]．https://news. gmw. cn/2023-12/25/content_

37049137.htm.
Guangming Daily. China's installed renewable energy capacity reaches 1.45 billion kilowatts, accounting for more than 50% of the country's total installed power generation capacity [EB/OL]. (2023-12-25)[2024-01-29]. https://news.gmw.cn/2023-12/25/content_37049137.htm.

[2] 人民日报. 新型储能进入大规模发展期[EB/OL]. (2024-03-18)[2024-03-29]. https://paper.people.com.cn/rmrbwap/html/2024-03/18/nw.D110000renmrb_20240318_1-19.htm.
People's Daily. New energy storage enters large-scale development period [EB/OL]. (2024-03-18)[2024-03-29]. https://paper.people.com.cn/rmrbwap/html/2024-03/18/nw.D110000renmrb_20240318_1-19.htm.

[3] KHAZALI A, REZAEI N, SABOORI H, et al. Using PV systems and parking lots to provide virtual inertia and frequency regulation provision in low inertia grids[J]. Electric Power Systems Research, 2022, 207: 107859.

[4] ZHANG H, XIANG W, LIN W, et al. Grid forming converters in renewable energy sources dominated power grid: control strategy, stability, application, and challenges[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(6): 1239-1256.

[5] MUSCA R, VASILE A, ZIZZO G. Grid-forming converters: a critical review of pilot projects and demonstrators[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 165: 112551.

[6] 李建林，康靖悦，辛迪熙. 新型电力系统储能技术应用研究[J]. 分布式能源，2024，9(6)：1-8.
LI J L, KANG J Y, XIN D X. Application research of new power system energy storage technology[J]. Distributed Energy, 2024, 9(6): 1-8.

[7] 马立红，梁亚峰，程西，等. 计及构网型储能稳定拓展的微电网群优化运行[J]. 电力工程技术，2024，43(6)：214-222.
MA L H, LIANG Y F, CHENG X, et al. Optimal operation of microgrids considering stabilized expansion of grid-forming energy storage[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(6): 214-222.

[8] 刘雨姗，陈俊儒，常喜强，等. 构网型储能变流器并网性能的多层级评价指标体系及应用[J/OL]. 中国电力，1-11. (2024-10-15). https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20241015.1025.002.html.
LIU Y S, CHEN J R, CHANG X Q, et al. Multi-level evaluation index system and application of grid-connected performance of grid-forming energy storage converters[J/OL]. Electric Power, 1-11. (2024-10-15). https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20241015.1025.002.html.

[9] 李建林，卢冠铭，游洪灏，等. 基于改进LADRC的构网型储能调频控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制，2024，52(15)：142-154.
LI J L, LU G M, YOU H H, et al. Frequency regulation control strategy for grid-forming energy storage based on improved LADRC[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(15): 142-154.

[10] 李立，王佳明，张青蕾，等. 兼顾系统频率稳定性和小干扰稳定性的构网型储能参数优化方法[J]. 电力建设，2023，44(12)：125-135.
LI L, WANG J M, ZHANG Q L, et al. Parameter optimization method of grid-forming energy storage considering system frequency stability and small signal stability[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(12): 125-135.

[11] 王吉利，占领，张钢，等. 提高构网型储能系统功角稳定性的附加阻尼方法[J]. 电力科学与技术学报，2023，38(4)：75-81.
WANG J L, ZHAN L, ZHANG G, et al. Additional damping method for improving the power angle stability of grid-forming energy storage system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(4): 75-81.

[12] 王新宝，葛景，韩连山，等. 构网型储能支撑新型电力系统建设的思考与实践[J]. 电力系统保护与控制，2023，51(5)：172-179.
WANG X B, GE J, HAN L S, et al. Theory and practice of grid-forming BESS supporting the construction of a new type of power system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 172-179.

[13] 印欣，张锋，阿地利·巴拉提，等. 新型电力系统背景下电热负荷参与实时调度研究[J]. 发电技术，2023，44(1)：115-124.
YIN X, ZHANG F, ADILI B, et al. Study on participation of electricity-driven thermal load in real-time scheduling of new power system[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(1): 115-124.

[14] 徐波，李沛泓，姚寅，等. GFM、GFL变流器与同步发电机构成的混合电力系统小信号建模与稳定性分析[J]. 电力科学与技术学报，2024，39(6)：141-151.
XU B, LI P H, YAO Y, et al. Small signal modeling and stability analysis of hybrid power system with GFM and GFL converters and synchronous generator[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(6): 141-151.

[15] 刘瑞平，袁亮，胡铭欣，等. 含构网型新能源发电单元的孤立电网暂态稳定性提升策略[J]. 电力科学与技术学报，2024，39(6)：152-161.
LIU R P, YUAN L, HU M X, et al. A transient stability improvement strategy of isolated power grids with grid-forming-based renewable energy power

generation units[J]. Journal of Electric Power Science and Technology，2024，39(6)：152-161.

[16] 印黄达，柯德平，杨欢欢，等. 基于暂态电动势控制的双馈风机鲁棒自同步控制策略[J]. 电工技术学报，2025，40(4)：1046-1062.
HUANG D，KE D P，YANG H H，et al. Robust self-synchronization control strategy for doubly-fed induction generator based on transient electromotive force control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2025，40(4)：1046-1062.

[17] 熊小玲，李昕悦，周琰，等. 基于陷波器的构网型换流器同步频率谐振抑制策略[J]. 电工技术学报，2024，39(12)：3827-3839.
XIONG X L，LI X Y，ZHOU Y，et al. Synchronous frequency resonance suppression of grid-forming converter based on Notch filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2024，39(12)：3827-3839.

[18] 谢震，杨曙昕，代鹏程，等. 构网型全功率风电机组网侧变流器耦合分析及抑制策略[J]. 电工技术学报，2023，38(14)：3745-3758.
XIE Z，YANG S X，DAI P C，et al. Grid-side coupling analysis and suppression strategy of grid-forming full-power wind turbines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2023，38(14)：3745-3758.

[19] Aurecon. Hornsdale power reserve-year 1 technical and market impact case study[EB/OL]. (2018-01-01) [2024-01-29]. https://victorianbigbattery. com. au/wp-content/uploads/2022/12/Aurecon-Hornsdale-Power-Reserve-Impact-Study-year-1.pdf.

[20] Aurecon. Hornsdale power reserve-year 2 technical and market impact case study[EB/OL]. (2020-01-01)[2024-01-29]. https://victorianbigbattery.com.au/wp-content/uploads/2022/12/Aurecon-Hornsdale-Power-Reserve-Impact-Study-year-2.pdf.

[21] SMA. Battery inverters[EB/OL]. (2021-08-09) [2024-01-29]. https://www. sma. de /en/products/battery-inverters.

[22] 国家能源局. 国家能源局关于组织开展可再生能源发展试点示范的通知[EB/OL]. (2023-09-27)[2024-01-29]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/2023-09/27/c_1310745991.htm.
National Energy Administration. Circular of the national energy administration on the organisation of pilot demonstration of renewable energy development [EB/OL]. (2023-09-27) [2024-01-29]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/2023-09/27/c_1310745991.htm.

[23] 西藏自治区发展和改革委员会. 关于积极推动西藏电力系统构网型储能项目试点示范应用的通知[EB/OL]. (2023-07-21) [2024-01-29]. http://drc. xizang. gov. cn/zwgk_1941/tz/202307/P020230724689284930311.pdf .
Xizang Autonomous Region Development and Reform Commission. Notice on actively promoting the pilot demonstration and application of grid-connected energy storage projects in the Xizang power system[EB/OL]. (2023-07-21) [2024-01-29]. http://drc. xizang. gov. cn/zwgk_1941/tz/202307/P020230724689284930311.pdf.

[24] 数字储能网新闻中心. 疆储：新疆下发组织上报2023年独立新型储能建设方案的通知，喀什等地构网型储能比例不低于20%！[EB/OL]. (2023-07-17) [2024-01-29]. https://www. desn. com. cn/news/show-1595023.html.
Digital Energy Storage Network News Centre. Xinjiang storage： Xinjiang issued a notice to organise the reporting of the construction programme of independent new energy storage in 2023， and the proportion of Kashi and other places of structural network-type energy storage is not less than 20%！[EB/OL]. (2023-07-17) [2024-01-29]. https://www. desn. com. cn/news/show-1595023.html.

[25] 翟文辉，张龙，李明. 全疆首套构网型储能系统并网性能调试及现场测试完成[EB/OL]. (2023-03-17)[2024-01-29]. http://xj.news.cn/zt/2023-03/17/c_1129440935.htm.
ZHAI W H， ZHANG L， LI M. Grid-connected performance commissioning and field test of the first set of grid-configured energy storage system in Xinjiang completed[EB/OL]. (2023-03-17)[2024-01-29]. http://xj.news.cn/zt/2023-03/17/c_1129440935.htm.

[26] 内蒙古国资委. 内蒙古电网成功构建国内首个广域离网纯新能源电力系统[EB/OL]. (2023-11-03) [2024-01-29]. http://www. sasac. gov. cn/n2588025/n2588129/c29250084/content.html.
Inner Mongolia State-owned Assets Supervision and Administration Commission. Inner Mongolia Power Grid successfully builds China's first wide-area off-grid pure new energy power system [EB/OL]. (2023-11-03) [2024-01-29]. http://www. sasac. gov. cn/n2588025/n2588129/c29250084/content.html.

[27] PISHBAHAR H， BLAABJERG F， SABOORI H. Emerging grid-forming power converters for renewable energy and storage resources integration-a review[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments，2023，60：103538.

[28] 许诘翊，刘威，刘树，等. 电力系统变流器构网控制技术的现状与发展趋势[J]. 电网技术，2022，46(9)：3586-3595.
XU J Y，LIU W，LIU S，et al. Current state and development trends of power system converter grid-forming control technology[J]. Power System Technology，2022，46(9)：3586-3595.

[29] ROSSO R， WANG X， LISERRE M， et al. Grid-forming converters：an overview of control approaches and future trends[C]//2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Detroit，MI，USA：

IEEE，2020：4292-4299．
[30] SHARMA R K，MISHRA S，PULLAGURAM D．A robust H1 multivariable stabilizer design for droop based autonomous AC microgrid[J]．IEEE Transactions on Power Systems，2020，35(6)：4369-4382．
[31] HU J，ZHU J，DORRELL D G，et al．Virtual flux droop method：a new control strategy of inverters in microgrids[J]．IEEE Transactions on Power Electronics，2014，29(9)：4704-4711．
[32] HARNEFORS L，HINKKANEN M，RIAZ U，et al．Robust analytic design of power-synchronization control[J]．IEEE Transactions on Industrial Electronics，2019，66(8)：5810-5819．
[33] CHEN Y，HESSE R，TURSCHNER D，et al．Comparison of methods for implementing virtual synchronous machine on inverters[J]．Renewable Energy & Power Quality Journal，2012：734-739.
[34] WANG F，ZHANG L，FENG X，et al．An adaptive control strategy for virtual synchronous generator[J]．IEEE Transactions on Industry Applications，2018，54(5)：5124-5133．
[35] KARIMI A，KHAYAT Y，NADERI M，et al．Inertia response improvement in AC microgrids：a fuzzy-based virtual synchronous generator control[J]．IEEE Transactions on Power Electronics，2020，35(4)：4321-4331．
[36] ROLDÁN-PÉREZ J，RODRÍGUEZ-CABERO A，PRODANOVIC M，Design and analysis of virtual synchronous machines in inductive and resistive weak grids[J]．IEEE Transactions on Energy Conversion，2019，34(4)：1818-1828．
[37] ARGHIR C，DÖRFLER F．The electronic realization of synchronous machines：model matching，angle tracking，and energy shaping techniques[J]．IEEE Transactions on Power Electronics，2020，35(4)：4398-4410．
[38] AWAL M A，YU H，HUSAIN I，et al．Selective harmonic current rejection for virtual oscillator controlled grid-forming voltage source converters[J]．IEEE Transactions on Power Electronics，2020，35(8)：8805-8818．
[39] MADANI S S，KAMMER C，KARIMI A．Data-driven distributed combined primary and secondary control in microgrids[J]．IEEE Transactions on Control Systems Technology，2021，29(3)：1340-1347．
[40] JIANG Y，BERNSTEIN A，VOROBEV P，et al．Grid-forming frequency shaping control for low-inertia power systems[J]．IEEE Control Systems Letters，2021，5(6)：1988-1993．
[41] RATHNAYAKE D B，AKRAMI M，PHURAILATPAM C，et al．Grid forming inverter modeling，control，and applications[J]．IEEE Access，2021，9：114781-114807．
[42] 李建林，丁子洋，刘海涛，等．构网型储能变流器及控制策略研究[J]．发电技术，2022，43(5)：679-686．
LI J L，DING Z Y，LIU H T，et al．Research on grid-forming energy storage converters and control strategies[J]．Power Generation Technology，2022，43(5)：679-686．
[43] ZHONG Q C，NGUYEN P L，MA Z，et al．Self-synchronized synchronverters：inverters without a dedicated synchronization unit[J]．IEEE Transactions on Power Electronics，2014，29(2)：617-630．
[44] JOHNSON B B，DHOPLE S V，HAMADEH A O，et al．Synchronization of parallel single-phase inverters with virtual oscillator control[J]．IEEE Transactions on Power Electronics，2014，29(11)：6124-6138．
[45] AWAL M A，YU H，TU H，et al．Hierarchical control for virtual oscillator based grid-connected and islanded microgrids[J]．IEEE Transactions on Power Electronics，2020，35(1)：988-1001．
[46] 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[J]．IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics，2020，8(2)：963-975．
[47] ZHONG Q C，WEISS G．Synchronverters：inverters that mimic synchronous generators[J]．IEEE Transactions on Industrial Electronics，2011，58(4)：1259-1267．
[48] AWAL M A，HUSAIN I．Unified virtual oscillator control for grid-forming and grid-following converters[J]．IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics，2021，9(4)：4573-4586．
[49] 李建林，丁子洋，游洪灏，等．构网型储能支撑新型电力系统稳定运行研究[J]．高压电器，2023，59(7)：1-11．
LI J L，DING Z Y，YOU H H，et al．Research on stable operation of new power system supported by grid forming energy storage system[J]．High Voltage Apparatus，2023，59(7)：1-11．
[50] ZHU H，LI H，LIU G，et al．Energy storage in high variable renewable energy penetration power systems：technologies and applications[J]．CSEE Journal of Power and Energy Systems，2023，9(6)：2099-2108．
[51] SAHOO S，TIMMANN P．Energy storage technologies for modern power systems：a detailed analysis of functionalities，potentials，and impacts[J]．IEEE Access，2023，11：49689-49729．
[52] RIBÓ-PÉREZ D，LARROSA-LÓPEZ L，PECONDÓN-TRICAS D，et al．A critical review of demand response products as resource for ancillary services：international experience and policy recommendations[J]．

Energies，2021，14(4)：846．

[53] SUVOROV A，ASKAROV A，BAY Y，et al．Freely customized virtual generator model for grid-forming converter with hydrogen energy storage[J]．International Journal of Hydrogen Energy，2022，47(82)：34739-34761．

[54] ZHANG Z S，SUN Y Z，LIN J，et al．Coordinated frequency regulation by doubly fed induction generator-based wind power plants[J]．IET Renewable Power Generation，2012，6(1)：38-47．

[55] TIELENS P，VAN HERTEM D．The relevance of inertia in power systems[J]．Renewable and Sustainable Energy Reviews，2016，55：999-1009．

[56] BERA A，CHALAMALA B R，BYRNE R H，et al．Sizing of energy storage for grid inertial support in presence of renewable energy[J]．IEEE Transactions on Power Systems，2022，37(5)：3769-3778．

[57] WANG Y，XU Y，TANG Y，et al．Aggregated energy storage for power system frequency control：A finite-time consensus approach[J]．IEEE Transactions on Smart Grid，2019，10(4)：3675-3686．

[58] VASILJ J，GROS S，JAKUS D，et al．Multi-market scheduling of battery storages within renewable portfolios[C]//2018 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)．Sarajevo．IEEE，2018：21-25．

[59] KNAP V，CHAUDHARY S K，STROE D I，et al．Sizing of an energy storage system for grid inertial response and primary frequency reserve[J]．IEEE Transactions on Power Systems，2016，31(5)：3447-3456．

[60] YUE M，WANG X．Grid inertial response-based probabilistic determination of energy storage system capacity under high solar penetration[J]．IEEE Transactions on Sustainable Energy，2015，6(3)：1039-1049．

[61] BERA A，ABDELMALAK M，ALZAHRANI S，et al．Sizing of energy storage systems for grid inertial response[C]//2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)．Montreal，QC，Canada：IEEE，2020：1-5．

[62] GOLPÎRA H，ATARODI A，AMINI S，et al．Optimal energy storage system-based virtual inertia placement：a frequency stability point of view[J]．IEEE Transactions on Power Systems，2020，35(6)：4824-4835．

[63] 王伟，苗云涛，侯甫坤．电网单相电压跌落故障对双馈异步风电机组的影响[J]．太阳能，2022(10)：94-100．
WANG W，MIAO Y T，HOU F K．Influence of power grid single-phase voltage drop fault on DFIG[J]．Solar Energy，2022(10)：94-100．

[64] 谭丽平，谭鑫，王立娜，等．电网电压不平衡下考虑电流峰值限制的储能变流器协调控制策略[J]．高压电器，2022，58(7)：111-18．
TAN L P，TAN X，WANG L，et al．Coordinated control strategy of power conversion system considering current peak limit under unbalanced grid voltage[J]．High Voltage Apparatus，2022，58(7)：111-118．

[65] 王盼宝，王鹏，李珅光，等．电网故障下构网型逆变器动态限流控制策略[J]．高电压技术，2022，48(10)：3829-3837．
WANG P B，WANG P，LI S G，et al．Dynamic current-limiting control strategy of grid-forming inverter under grid faults[J]．High Voltage Engineering，2022，48(10)：3829-3837．

[66] 杨本星，王伟，杨明轩，等．辅助风电并网的构网型储能控制策略研究[J]．高压电器，2023，59(7)：56-64．
YANG B X，WANG W，YANG M X，et al．Research on grid-forming energy storage control strategy for auxiliary wind power grid connection[J]．High Voltage Apparatus，2023，59(7)：56-64．

[67] MARCHGRABER J，GAWLIK W．Investigation of black-starting and islanding capabilities of a battery energy storage system supplying a microgrid consisting of wind turbines，impedance and motor-loads[J]．Energies，2020，13(19)：5170-5193．

[68] JAIN H，SEO G S，LOCKHART E，et al．Blackstart of power grids with inverter-based resources[C]//2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)．Montreal，QC，Canada：IEEE，2020：1-1．

[69] SUN W，LIU C C，ZHANG L．Optimal generator start-up strategy for bulk power system restoration[J]．IEEE Transactions on Power Systems，2011，26(3)：1357-1366．

[70] GANJIAN-ABOUKHEILI M，SHAHABI M，SHAFIEE Q，et al．Seamless transition of microgrids operation from grid-connected to islanded mode[J]．IEEE Transactions on Smart Grid，2020，11(3)：2106-2114．

[71] WANG X，BLAABJERG F．Harmonic stability in power electronic-based power systems：concept，modeling，and analysis[J]．IEEE Transactions on Smart Grid，2019，10(3)：2858-2870．

[72] FAN L，MIAO Z，SHAH S，et al．Data driven dynamic modeling in power systems：a fresh look on inverter-based resource modeling[J]．IEEE Power and Energy Magazine，2022，20(3)：64-76．

[73] LAAKSONEN H．Improvement of power system frequency stability with universal grid-forming battery energy storages[J]．IEEE Access，2023，11：10826-

10841.

[74] RODRÍGUEZ-CABERO A，ROLDÁN-PÉREZ J，PRODANOVIC M. Virtual impedance design considerations for virtual synchronous machines in weak grids[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics，2020，8(2)：1477-1489.

[75] UNNIKRISHNAN B K，JOHNSON M S，CHERIYAN E P. Small signal stability improvement of a microgrid by the optimised dynamic droop control method[J]. IET Renewable Power Generation，2020，14(5)：822-833.

[76] XU H，YU C，LIU C，et al. An improved virtual capacitor algorithm for reactive power sharing in multi-paralleled distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics，2019，34(11)：10786-10795.

[77] WU W，CHEN Y，ZHOU L，et al. Sequence impedance modeling and stability comparative analysis of voltage-controlled VSGs and current-controlled VSGs[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics，2019，66(8)：6460-6472.

[78] CAO W，MA Y，YANG L，et al. D-Q impedance based stability analysis and parameter design of three-phase inverter-based AC power systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics，2017，64(7)：6017-6028.

[79] LAN Z，GAN D，SHI L，et al. A study on the control of AC/DC power systems based on system dynamic COI[C]//2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting. Tampa，FL，USA：IEEE，2007：1-5.

[80] CHOOPANI M，HOSSEINIAN S H，VAHIDI B. New transient stability and LVRT improvement of multi-VSG grids using the frequency of the center of inertia[J]. IEEE Transactions on Power Systems，35(1)：527-538.

[81] CHEEMA K M，MEHMOOD K. Improved virtual synchronous generator control to analyse and enhance the transient stability of microgrid[J]. IET Renewable Power Generation，2020，14(4)：495-505.

[82] SHUAI Z，SHEN C，LIU X，et al. Transient angle stability of virtual synchronous generators using Lyapunov's direct method[J]. IEEE Transactions Smart Grid，2018，10(4)：4648-4661.

[83] ESKANDARI M，SAVKIN A V. On the impact of fault ride-through on transient stability of autonomous microgrids：nonlinear analysis and solution[J]. IEEE Transactions Smart Grid，2021，12(2)：999-1010.

[84] 叶林，王凯丰，赖业宁，等. 低惯量下电力系统频率特性分析及电池储能调频控制策略综述[J]. 电网技术，2023，47(2)：446-464.
YE L，WANG K F，LAI Y N，et al. Review of frequency characteristics analysis and battery energy storage frequency regulation control strategies in power system under low inertia level[J]. Power System Technology，2023，47(2)：446-464.

[85] TAN Z X，LI X R，HE L，et al. Primary frequency control with BESS considering adaptive SoC recovery[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems，2020，117：105588.

[86] 李红，粟时平，唐铭泽，等. 不对称故障下考虑电压跌落程度的新能源逆变器控制策略[J]. 电力系统保护与控制，2023，51(1)：21-32.
LI H，SU S P，TANG M Z，et al. Control strategy of renewable energy inverter considering voltage sag degree under asymmetric faults[J]. Power System Protection and Control，2023，51(1)：21-32.

[87] 王书征，李先允，许峰. 不对称电网故障下级联型光伏并网逆变器的低电压穿越控制[J]. 电力系统保护与控制，2019，47(13)：84-91.
WANG S Z，LI X Y，XU F. Low voltage ride-through controlling of cascaded inverter for grid-connected photovoltaic systems under asymmetric grid fault[J]. Power System Protection and Control，2019，47(13)：84-91.

[88] 王雪梅，王艺博，刘雨桐，等. 基于虚拟电抗的主动支撑型新能源机组低电压穿越控制方法[J]. 电网技术，2022，46(11)：4435-4444.
WANG X M，WANG Y B，LIU Y T，et al. Low voltage ride-through control of actively-supported new energy unit based on virtual reactance[J]. Power System Technology，2022，46(11)：4435-4444.

[89] 吕思卓，郑超，姜静雅. 基于功率指令切换的双级式构网型光伏故障穿越控制策略[J]. 电网技术，2024，48(3)：1281-1291.
LÜ S Z，ZHENG C，JIANG J Y. Fault ride-through control strategy for double-stage grid-forming photovoltaic based on power order switching[J]. Power System Technology，2024，48(3)：1281-1291.

[90] SONG G，CAO B，CHANG L. Review of grid-forming inverters in support of power system operation[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering，2022，8(1)：1-15.

[91] 吴琛，刘晨曦，黄伟，等. 提升新能源电力系统稳定性的构网型变流器选址定容方法[J]. 电力系统自动化，2023，47(12)：130-136.
WU C，LIU C X，HUANG W，et al. Siting and sizing method of grid-forming converters for improving stability of power system with renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems，2023，47(12)：130-136.

[92] SINGH S，CHAUHAN P，SINGH N. Capacity optimization of grid connected solar/fuel cell energy

system using hybrid ABC-PSO algorithm[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(16): 10070-10088.

[93] OKUNDAMIYA M S. Size optimization of a hybrid photovoltaic/fuel cell grid connected power system including hydrogen storage[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46: 30539-30546.

[94] ABDELGHANY M B, AL-DURRA A, GAO F. A coordinated optimal operation of a grid-connected wind-solar microgrid incorporating hybrid energy storage management systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023, 15(1): 39-51.

[95] 曾正，邵伟华，冉立，等. 虚拟同步发电机的模型及储能单元优化配置[J]. 电力系统自动化，2015，39(13)：22-31.
ZENG Z, SHAO W H, RAN L, et al. Mathematical model and strategic energy storage selection of virtual synchronous generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(13): 22-31.

[96] 张波，张晓磊，贾焦心，等. 基于惯量支撑和一次调频需求的VSG储能单元配置方法[J]. 电力系统自动化，2019，43(23)：202-209.
ZHANG B, ZHANG X L, JIA J X, et al. Configuration method for energy storage unit of virtual synchronous generator based on requirements of inertia support and primary frequency regulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 202-209.

[97] 秦晓辉，苏丽宁，迟永宁，等. 大电网中虚拟同步发电机惯量支撑与一次调频功能定位辨析[J]. 电力系统自动化，2018，42(9)：36-43.
QIN X H, SU L N, CHI Y N, et al. Functional orientation discrimination of inertia support and primary frequency regulation of virtual synchronous generator in large power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 36-43.

[98] 胡宇飞，田震，查晓明，等. 构网型与跟网型变流器主导孤岛微网阻抗稳定性分析及提升策略[J]. 电力系统自动化，2022，46(24)：121-131.
HU Y F, TIAN Z, ZHA X M, et al. Impedance stability analysis and promotion strategy of islanded microgrid dominated by grid-connected and grid-following converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(24): 121-131.

[99] 郭小龙，杨桂兴，张彦军，等. 构网型储能与跟网型光伏混联发电系统阻抗建模与小扰动稳定机理分析[J/OL]. 电气工程学报，2024：1-10. (2024-01-18). http://kns. cnki. net/kcms/detail/10.1289. TM. 20230907. 1747.006.html.
GUO X L, YANG G X, ZHANG Y J, et al. Impedance modeling and small-signal stability mechanism analysis of grid-forming energy storage and grid-following PV hybrid power generation system[J/OL]. Journal of Electrical Engineering, 2024: 1-10. (2024-01-18). http://kns. cnki. net/kcms/detail/10.1289. TM. 20230907. 1747.006.html.

[100] 李翼翔，田震，唐英杰，等. 考虑构网型与跟网型逆变器交互的孤岛微电网小信号稳定性分析[J]. 电力自动化设备，2022，42(8)：11-18.
LI Y X, TIAN Z, TANG Y J, et al. Small-signal stability analysis of island microgrid considering interaction between grid-forming converter and grid-following converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(8): 11-18.

[101] 涂春鸣，谢伟杰，肖凡，等. 多虚拟同步发电机并联系统控制参数对稳定性的影响分析[J]. 电力系统自动化，2020，44(15)：77-86.
TU C M, XIE W J, XIAO F, et al. Influence analysis of control parameters of parallel system with multiple virtual synchronous generators on stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(15): 77-86.

[102] 王聪，葛景，汪莹，等. 构网型储能提升系统电压稳定作用研究[J]. 电工技术，2023(12)：183-185.
WANG C, GE J, WANG Y, et al. Research on grid-forming BESS in improving voltage stability[J]. Electric Engineering, 2023(12): 183-185.

收稿日期：2024-04-01。
修回日期：2024-05-27。

作者简介：

李亚楼

李亚楼(1974)，男，博士，高级工程师，研究方向为电力系统仿真分析、综合能源系统仿真分析，liyalou@epri.sgcc.com.cn；

赵飞

赵飞(1995)，男，博士研究生，研究方向为能源系统建模和优化，本文通信作者，2726662488@qq.com；

樊雪君

樊雪君(1993)，女，博士，研究方向为电力系统网络信息安全、高性能计算等，1871614410@qq.com。

(责任编辑 杨阳)