

构网型储能支撑新型电力系统建设的 规划应用及挑战

徐宇豪¹, 宋晨辉^{1,2}, 曹一家¹, 李超², 谢惠藩³, 刘春晓³, 肖峻²

(1. 电网防灾减灾全国重点实验室(长沙理工大学), 长沙市 410114; 2. 智能配用电装备与系统全国重点实验室(天津大学), 天津市 300072; 3. 中国南方电网电力调度控制中心, 广州市 510663)

摘要:【目的】“双碳”目标下, 构网型储能(grid-forming energy storage, GFMS)作为适应高比例新能源接入电力系统的重要技术装备, 其应用优势尚未被充分挖掘, 亟需明晰其在新型电力系统多场景下的主动支撑机理与配置方法。【方法】从构网控制角度总结其电压、频率和惯量支撑原理; 面向正常运行、小扰动和大扰动工况, 梳理构网型储能规划配置方法; 结合工程示范, 围绕新能源集中送出、直流近区和微电网场景, 分析其规划定位、关键需求及多工况协同问题。【结果】现有研究已形成分工况的规划思路: 正常工况侧重技术经济性, 小扰动工况侧重系统强度与频率稳定, 大扰动工况侧重“预防—穿越—恢复”全过程协同; 同时, 不同应用场景下, 构网型储能的功能定位、主导约束与配置需求存在明显差异。【结论】构网型储能规划具有明显的场景差异性和多工况耦合特征, 系统强度、电压频率安全边界及故障恢复需求是影响选址定容的关键约束, 需建立兼顾技术约束与经济效益的协同规划方法。

关键词: 构网型储能(GFMS); 高比例新能源电力系统; 规划配置; 应用场景; 主动支撑

中图分类号: TM715

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2026)06-0001-16

DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2026.06.001

Planning Application and Challenges of Grid-Forming Energy Storage in Supporting New Power System Construction

XU Yuhao¹, SONG Chenhui^{1,2}, CAO Yijia¹, LI Chao², XIE Huifan³,
LIU Chunxiao³, XIAO Jun²

(1. State Key Laboratory of Disaster Prevention & Reduction for Power Grid (Changsha University of Science and Technology), Changsha 410114, China; 2. State Key Laboratory of Intelligent Power Distribution Equipment and System (Tianjin University), Tianjin 300072, China; 3. Power Dispatching and Control Center, CSG, Guangzhou 510663, China)

ABSTRACT: [Objective] Under the "Carbon peaking and carbon neutrality" goals, as a critical technology for adapting power systems to high proportions of renewable energy, the application advantages of grid-forming energy storage (GFMS) have not been fully exploited. Therefore, there is an urgent need to clarify its active support mechanisms and planning methods across multiple scenarios in the new power system. [Methods] This paper summarizes the voltage support, frequency support, and inertia support mechanisms of GFMS from the perspective of grid-forming control. Planning methods are then reviewed for normal operating conditions, small-disturbance conditions, and large-disturbance conditions. Combined with engineering demonstrations, the planning roles, key requirements, and multi-condition coordination issues of GFMS are further analyzed in renewable energy export systems, HVDC receiving-end nearby grids, and microgrids. [Results] Existing studies have established condition-oriented planning frameworks: normal-operation planning mainly emphasizes techno-economic performance; small-disturbance planning focuses on system strength and frequency stability; large-disturbance planning highlights whole-process coordination of prevention, fault ride-through, and post-fault recovery. Meanwhile, the functional role, dominant constraints, and planning requirements of GFMS differ significantly across application scenarios. [Conclusions] GFMS planning exhibits strong scenario dependence and multi-

condition coupling. System strength, voltage/frequency security margins, and fault recovery requirements are the key constraints governing siting and sizing. Future work should develop coordinated planning methods that jointly consider technical constraints and economic performance.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 52307079), China Postdoctoral Science Foundation (No. 2025M780479), Furong Plan for Young Talents of Hunan Province (No. 2025QT-91), Natural Science Foundation of Hunan Province (No. 2024JJ6050) and Science and Technology Project of China Southern Power Grid (No. ZDKJXM20250036).

KEYWORDS: grid-forming energy storage (GFMES); high-renewable-penetration power system; planning and configuration; application scenarios; active support

0 引言

当前,以风、光为代表的可再生能源正成为电力系统装机增长主力,据国际能源署统计,2024年全球可再生能源新增装机占比已超90%。我国为实现“双碳”目标,截至2024年底,全国可再生能源装机已达18.89亿kW,约占总装机的56%,电力系统已进入以新能源为主体的发展阶段^[1-2]。

然而,新能源大规模接入使电力系统呈现“双高”特征^[3]:传统同步发电机可为电网提供惯量支撑以及电压、频率调节能力^[4],而新能源发电设备主要采用跟网(grid-following, GFL)控制,通过锁相环(phase-locked loop, PLL)跟踪电网电压相位实现同步,不具备主动支撑电网电压和频率的能力^[5]。上述特征导致系统惯量支撑不足、短路比过低、阻尼减弱等问题日益突出,在弱电网条件下,跟网控制面临稳定性问题,微小扰动可能引起电网频率大幅波动,甚至导致系统崩溃^[6],近期研究也表明,构网型与跟网型储能在弱电网中的暂态响应特性及并网性能存在明显差异,构网型技术在弱系统适应性方面更具优势^[7]。

构网型储能(grid-forming energy storage, GFMES)逐渐成为解决上述问题的关键。构网型储能通过模拟同步发电机特性,使电力电子设备能够自主建立频率与电压,在稳态、暂态全工况下表现出受控电压源特性,具备频率调节、电压控制和惯量支撑能力^[8-11]。这使得其不仅可以辅助电网进行电力电量平衡,而且可以发挥范围更大、持续时间更长的稳定支撑作用^[4]。

目前,构网型储能技术虽已从理论研究转向工程实践,但其在新型电力系统中的规划配置方法仍不完善。现有研究主要围绕构网型储能控制策略、稳定性分析等方面展开,规划上虽已在正常运行经济性配置、小扰动下电压与频率稳定建模、大扰动下穿越与恢复、系统强度提升等方面开展探索,但科学规划方法依然相对薄弱,工程上依赖经验确定接入

点与容量,易导致选址考虑不足及容量配置偏差,使支撑调节能力与系统场景需求失配。新型电力系统不同应用场景下的构网型储能选址定容仍缺乏科学规划方法,特别是在新能源集中送出、直流近区、微电网等典型场景中,若未能在规划阶段考虑外送能力、过电压安全边界、黑启动与恢复等技术经济要求,将难以充分发挥构网型储能装备的多功能支撑能力与技术经济优势。

基于此,本文对构网型储能支撑新型电力系统建设时的规划应用方法及未来挑战进行了系统梳理和综述。首先,阐释了构网型储能参与电网主动支撑的相关机理;其次,面向正常运行、小扰动与大扰动下的电网全运行工况,梳理总结了当前构网型储能规划的相关方法;最后,针对新型电力系统下的构网型储能规划目标,先总结了国内外构网型储能典型工程示范案例,再围绕新能源集中送出、直流近区、微电网等典型场景,对未来构网型储能的规划研究进行了分析与展望。

1 构网型储能主动支撑机理

新能源占比逐渐攀升的新型电力系统中,源荷双向出力波动与反调峰特性使得电力广域平衡能力显著下降,电力系统惯量水平下降、频率稳定性恶化、电压支撑能力不足等问题也日益突出^[12]。构网型储能凭借其在频率调节、电压支撑、惯量响应等方面具备的主动支撑能力,逐渐成为解决新型电力系统上述运行问题的重要方案。

1.1 构网控制技术基本原理

与基于锁相环实现电网同步的跟网控制不同,构网控制本质上是实现等效惯量与系统强度支撑的功率同步过程^[13]。因此,构网型储能可以等效为通过变流器经阻抗向系统并网点提供具有维持能力的电压源^[4,14]。

图1为构网型储能基本控制原理:首先,实时监测获取电网运行三相电流 I_{abc} 和三相电压 U_{abc} ;其次,通过对监测数据进行功率计算,得到实际有功功率 P

和无功功率 Q , 并与有功功率参考值 P_{ref} 和无功功率参考值 Q_{ref} 比较后输入对应调节模块, 得到储能电压相位信息 δ 和幅值信息 U , 再将其输入参考电压合成模块, 将幅值信息与相位信息合成为电压参考值 U_{ref} 。接着, 电压闭环控制以 U_{ref} 为目标生成电流参考值 I_{Lref} , 电流闭环控制进一步根据 I_{Lref} 生成调制参考量 e_{ref} , 脉宽调制 (pulse-width modulation, PWM) 模块把 e_{ref} 转换为开关信号 S_{abc} , 驱动储能变流器系统 (power conversion system, PCS) 输出交流侧电压/电流; 最后, 通过执行构网型储能闭环控制, 实现对电网频率与电压的主动支撑^[15]。

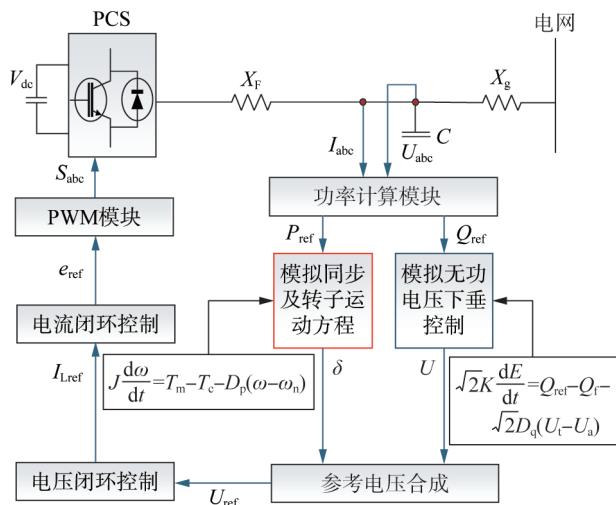


图 1 构网型储能控制原理

Fig. 1 Control logic of grid-forming storage

由此可见, 控制策略是构网型储能发挥主动支撑功能的核心。图 2 梳理了构网控制策略发展历程, 其最初起源于负载频率控制^[16], 经历下垂控制、虚拟同步发电机 (virtual synchronous generator, VSG) 控制、功率同步控制 (power synchronization control, PSC)、虚拟振荡器控制 (virtual oscillator control, VOC) 等阶段^[16-17]。目前主要以下垂控制和 VSG 控制为主。

1.1.1 下垂控制

针对构网型储能的下垂控制已有大量研究,

例如, 文献[14]提出了基于频率下垂的构网型储能控制策略, 分析了构网型储能下垂控制中频率与有功功率的关系; 文献[18]提出一种利用虚拟阻抗补偿的改进下垂控制策略, 能够提升构网型储能的功率分配精度。总体上, 虽然下垂控制在模拟同步机一次、二次调频过程时, 未考虑同步机惯性和阻尼特征, 易造成系统频率振荡和失稳^[13], 但其能够按照预设下垂曲线, 对储能输出的有功功率和无功功率分别控制, 策略简单可靠, 已在电力系统中广泛应用^[17], 其针对频率和电压的控制方程如下^[19]:

$$\begin{cases} \omega = \omega_0 + K_p(P_0 - P) \\ v = v_0 + K_q(Q_0 - Q) \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_0 、 Q_0 、 ω_0 、 v_0 分别为有功功率、无功功率、频率、电压的参考值; v 、 ω 分别为电压和频率输出值; K_p 为有功功率下垂系数; K_q 为无功功率下垂系数。

1.1.2 虚拟同步机控制

近年来, VSG 已成为构网型储能控制的主流方法^[20], 例如, 文献[21]详细阐释了 VSG 的动态控制机理, 分析了其对电力系统稳定运行的影响; 文献[22]提出了基于改进 VSG 的光-储协同控制策略, 能够有效避免光伏出力波动对并网母线电压和频率的影响。总体上, VSG 控制通过有功功率-频率控制和无功功率-电压控制, 能更加完整地实现构网型储能对同步发电机电磁与机械特性的模拟, 包括转子运动、一次调频以及励磁调节等过程^[19], 使得构网型储能具备传统同步机的惯量、阻尼和调频调压支撑能力。典型的 VSG 控制方程如下^[17]:

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = \frac{(P_0 - P)}{\omega_0} - D(\omega - \omega_0) \\ v = v_0 + K_q(Q_0 - Q) \end{cases} \quad (2)$$

式中: D 为阻尼系数; J 为转动惯量。

1.1.3 构网控制技术对比

表 1 针对当前构网控制技术, 从核心特征、优缺点、适用场景等层面进行了对比。

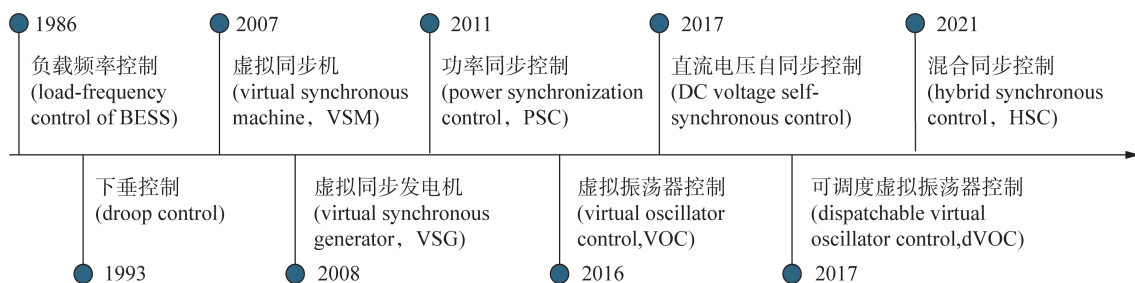


图 2 构网控制策略发展历程

Fig. 2 Development of grid-forming control

表 1 构网控制技术对比
Table 1 Comparison of grid-forming control

控制策略	核心特征	优点	缺点	使用场景
下垂控制	模拟同步机下垂特性无需通信	控制简单、结构成熟	缺乏惯性阻尼、动态响应慢、易引发频率/电压波动	分布式场景,如微网多储能并列运行
虚拟同步机控制	模拟同步发电机的转动与电磁特性,引入虚拟惯性与阻尼	能够提供惯性支撑	参数整定复杂,可能引起次生振荡,直流电压不可控	适用于高比例新能源弱电网/孤网
匹配控制	以直流母线电容电压模拟转子,实现功率同步	低时延、直流电压可控	需要大容量电容	适用于弱电网
功率同步控制	基于功率-相角动态耦合机制,自主同步	稳定性强,不依赖锁相环	控制系统复杂、控制参数耦合	适用于弱电网
虚拟振荡器控制	非线性振荡器生成电压参考,开环控制	响应快、结构简洁	谐波较大,易影响并网系统电能质量	适用于离网、孤岛交流微电网

1.2 构网型储能电压支撑

构网型储能电压支撑^[4,14,23]指其通过模拟同步机励磁调节,当电压变化时调节无功功率,从而维持电压稳定并增强系统电压稳定裕度的能力。相关研究主要围绕构网型储能电压支撑机理^[4,23]与支撑能力优化^[14]展开。例如,文献[14]阐明构网型储能在常规储能基础上,能够通过增加过流能力及改进控制策略提供电压支撑能力;文献[4]通过无功功率-电压下垂控制方法,实现了构网型储能对电网故障的有效抑制和对电压的支撑;文献[23]分析了构网型储能电压源特性对电网电压稳定性的提升作用。总体上,构网型储能的电压支撑可分为静态和动态两个层面。

从静态层面来看,由于构网型储能可等效为带有串联内阻抗的电压源,其接入系统后,相当于在系统中新增了电压源并联支路,将有效降低负荷与等效电压源间的联络阻抗,提升系统的静态电压稳定水平。具体来讲,式(3)给出了基于系统等值电路的有功传输能力表达式^[23],考虑到理论推导的完整性,本文在附录 A 中详细列出了该式涉及的系统等值电路及有功传输极限的数学推导。由式(3)可知,通过加装构网型储能设备,可降低联络阻抗 Z ,使得系统在面对更大功率传输断面时仍能保持电压稳定,直接提升了静态电压稳定极限。

$$P = \frac{E^2 Z_D \cos \varphi}{Z^2 \left[1 + \left(\frac{Z_D}{Z} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_D}{Z} \right) \cos(\theta - \varphi) \right]} \quad (3)$$

式中: E 为电源端等效电压; Z_D 、 Z 分别为负荷等效阻抗、负荷端口母线至电压源间的联络阻抗; φ 、 θ 分别为负荷功率因数角、联络阻抗角。

从动态层面来看,构网型储能动态电压支撑包括 2 个阶段:第一阶段,在故障初期,外部电压跌落瞬间,构网型储能等效电压源内电势幅值不突变,能够提供瞬时无功功率,即时支撑系统电压;第二阶段,类似于常规发电机励磁过程,通过检测系统电压,闭环调节其动态无功功率输出,实现系统动态电压的持续支撑。

1.3 构网型储能频率支撑

构网型储能频率支撑^[24-25]指其在系统频率变化时调节有功功率,实现与同步机一次调频等效的频率稳定能力,在无主从调节下完成频率稳定与功率分担。相关研究主要围绕频率支撑机理与应用^[24-26]展开。例如,文献[24]建立了构网型储能接入海上电力系统的功率-频率-功角等值模型,分析了构网型储能对系统频率稳定的提升效果;文献[25]考虑风-光-储运行特性,分析了构网控制策略对频率支撑的影响。

构网型储能通常采用有功功率-频率下垂控制策略为电力系统提供类似于传统同步机的调频能力^[4]:

$$P = P_0 + K(\omega_0 - \omega) \quad (4)$$

式中: K 为频率下垂系数。

可以看出,当系统频率偏离额定值时,构网型储能通过逆变器依据下垂关系/功率偏差调整内部角频率,自动调节有功功率输出,以补偿功率不平衡,防止频率进一步偏离,从而对电网进行即时频率支撑。

构网型储能具备充足的能量储备和快速功率响应优势,使其能在新能源发电波动导致频率偏移时及时提供有功补偿,可以显著改善电力系统的频率动态特性。特别是在弱电网以及高比例新能源场景下,构网型储能可以通过模拟传统同步发电机外特性,主动参与频率调节,有效降低频率偏差,显著增强系统的频率稳定性和响应性能^[4]。

1.4 构网型储能惯量支撑

构网型储能惯量支撑^[15,27]指其通过构建等效惯量和阻尼,在频率快速变化时短时释放或吸收能量以减缓频率变化(rate of change of frequency, RoCoF)的能力。相关研究主要围绕惯量支撑机理^[15]与应用^[27]展开。例如,文献[15]通过构网光储系统的惯量响应测试,验证了构网型储能提升电力系统惯量

的有效性;文献[27]针对新能源接入导致系统惯量下降的情况,提出了面向系统惯量提升的构网型储能选址定容方法。

构网型储能通过VSG控制模拟同步机转子,为系统提供惯量支撑,核心在于引入转子运动方程:

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_m}{\omega_0} - \frac{P_e}{\omega} - D(\omega - \omega_0) \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega - \omega_0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: P_m 、 P_e 分别是虚拟机械功率与电磁功率。

其中虚拟机械功率可通过下垂控制实现^[23]:

$$P_m = P_0 + D_p(\omega_0 - \omega) \quad (6)$$

式中: D_p 为下垂系数。

由于模拟了转子转动惯量,构网型储能在频率和功率变化过程中具有惯性,而下垂系数 D_p 的存在使得储能具备阻尼振荡的能力^[23]。

可以看出,惯量支撑本质上是通过模拟同步机惯性特征,利用构网型储能快速的功率调节能力和充足的能量储备,在检测到频率变化时立即提供相应的功率补偿。当电网出现突变扰动时,构网逆变器瞬时加大输出,等效提供同步机惯性响应,从而减缓频率波动变化率。此外,构网型储能系统内置稳定能量储备,可以通过下垂控制或同步机动态方程,持续输出过载功率,延长惯性支撑时间。

2 构网型储能规划配置方法

构网型储能发挥主动支撑作用的关键在于其功能与电网工况的充分匹配,二者匹配前提在于电网不同工况下构网型储能均能实现科学规划配置。

2.1 面向正常工况的构网型储能规划配置

电网正常工况下,构网型储能规划配置与跟网型储能类似,主要关注电能质量改善^[28-29]、供电可靠性提升^[30-31]与中长期调峰辅助服务^[32-33]等。

在电能质量改善方面,文献[28]研究了VSG综合控制在谐波抑制与不平衡补偿中的应用;文献[29]提出了针对电网短时电压波动抑制的构网型/跟网型储能协同配置策略;文献[34]通过构网型储能与九开关联合电能质量调节器联合控制提升风电系统稳定性,从电能质量治理与稳定支撑协同角度拓展了构网型储能的应用。在供电可靠性提升方面,文献[30]通过优化储能系统在配电网中的规划配置,实现了削峰填谷并提升了系统供电可靠性;文献[31]考虑储能控制策略转型,提出了一种兼顾电网运行可靠性与经济性的储能配置方法。在中长期调峰辅助服务方面,文献[32]提出了储能参与新能源

电网调峰、调频的协同配置方法;文献[33]提出了考虑频率约束的构网风储系统容量配置方法,分析了临界阻尼下的最小配置容量。

总体上,正常工况下构网型储能规划配置主要关注电网中长期运行经济性与储能配置效率,储能配置目标从传统单一服务扩展至构网多功能耦合:既考虑调峰、调频等多场景综合服务中的储能复用价值,也在配置时考虑与运行策略的协同,以兼顾配置成本与调节效果。

2.2 面向小扰动工况的构网型储能规划配置

对于电网发生扰动,但尚未造成事故的小扰动工况,构网型储能由于具有电压与频率主动支撑能力,可以有效提升系统的小扰动稳定性^[35],相关工况的构网型储能规划配置主要面向小扰动下的电压稳定性与频率稳定性提升展开。

2.2.1 基于小扰动电压稳定性的储能规划配置

面向小扰动电压稳定性提升的构网型储能规划配置研究,主要涉及规划建模^[36-37]、优化求解^[38-39]与配置策略^[40-42]等方面。

在规划建模方面,文献[36]提出了基于提升系统强度的构网型储能系统规划模型;文献[37]构建了面向构网型储能选址定容的双层规划模型。在优化求解方面,文献[38]提出了结合无功功率-电压灵敏度计算与迭代修改的储能选址定容优化方法;文献[39]结合遗传算法与序列二次规划算法对模型进行求解,实现了构网型储能规划内外层模型的联合优化。在配置应用方面,文献[40-41]提出了基于广义短路比的构网型储能选址定容策略;文献[42]提出了以提高新能源电网短路比/多馈入短路比为目标储能电站配置策略。

2.2.2 基于小扰动频率稳定性的储能规划配置

除电压问题外,电力系统随高比例新能源接入,也会因同步惯量支撑不足而面临严峻的频率稳定性挑战。相关研究针对小扰动频率稳定,提出了构网型储能的规划配置方法^[43-48],主要包括机理分析^[43-44]、优化建模^[45-46]、配置指标^[47-48]等方面。

在影响机理分析方面,文献[43]分析了储能系统对电网频率稳定性的多因素影响,提出利用构网型储能提升变惯量电力系统频率稳定性的规划方法;文献[44]分析了构网与跟网逆变器在频率稳定中的作用,量化了不同储能配比对系统惯量与阻尼分布的影响。在优化建模方面,文献[45]提出了计及惯量响应与一次调频参数的双层优化模型,兼顾储能配置对频率支撑与小扰动稳定性的作用;文献[46]将RoCoF与频率偏差纳入优化框架,采用多点配

置对频率安全进行保障支撑。在配置指标方面,文献[47]提出了考虑频率最大偏差与振荡阻尼比的多目标优化方法;文献[48]提出了引入惯量分布指标的多时间尺度构网型储能选址定容方法;文献[49]针对跟网/构网混合型新能源场站并网系统提出了基于时间卷积神经网络的小干扰稳定性快速评估方法,可为构网型储能规划中的稳定性校核与方案筛选提供支撑。

总体来看,面向小扰动工况的构网型储能规划配置已初步形成了较为系统的技术路线:针对电压稳定性,重点关注系统强度、灵敏度等指标的量化建模与优化,实现电网弱区域的优先支撑配置;针对频率稳定性,则将 RoCoF、频率偏差与阻尼比等指标纳入规划模型,结合惯量改善与一次调频需求,进行多点分布式构网型储能协同优化配置,以提升电网在小扰动下的频率稳定裕度。

2.3 面向大扰动工况的构网型储能规划配置

电网大扰动工况存在“非故障”与“故障”两种情况^[50-62]:针对非故障工况,构网型储能规划配置主要关注功率/拓扑突变引起的频率/电压偏移以及相角跃变^[50-53];针对故障工况,构网型储能规划配置则更为关注“预防—穿越—恢复”的全过程协同,以实现故障下电网的可控运行与快速恢复^[54-62]。

2.3.1 面向非故障情况的构网型储能规划配置

对于非故障情况下的系统大扰动,构网型储能规划配置的研究主要针对功率/拓扑突变引起的暂态扰动展开。

对于功率突变情况的应对,文献[50]以“避免低频减载”为目标,给出在负荷阶跃/机组解列等非故障扰动下将 RoCoF 以及频率最低点纳入定容约束的构网型储能配置思路;文献[51]基于源网荷储一体化频率响应模型,把非计划解列/功率阶跃纳入典型扰动集,实现配置与调度的联合优化。对于拓扑突变引起的扰动,文献[52]提出了一种基于虚拟有功功率的解决方案,以提高构网变流器进入电流限值时的暂态稳定裕度;文献[53]证明了更高的电流阈值可以显著提高相位跳变限制和耐受能力,并基于此提出了构网变流器电流阈值的配置和优化策略。

2.3.2 面向故障情况的构网型储能规划配置

与非故障情况不同,故障情况下的构网型储能规划配置主要针对故障全过程,围绕故障预防^[54-56]、故障穿越^[57-59]、故障恢复^[60-62]三部分展开。

针对故障预防的构网型储能规划配置注重故障扩散前的扰动抑制,以从源头减少故障触发及蔓延,提升系统运行的安全裕度。文献[54]提出了面向新

能源多场站短路比提升的构网型储能选址定容优化方法;文献[55]验证了通过部署构网型储能,可显著提升系统强度并缩短恢复时间,提出了关键母线优先配储的工程证据;文献[56]提出协同容量短路比指标,在规划模型中考虑了系统强度裕度。

针对故障穿越的构网型储能规划配置主要围绕运行策略与控保协同展开^[63-64],为故障切除创造可控运行区间。文献[57]提出了电压跌落情形下功率/电流协同的故障穿越策略;文献[65]进一步针对低电压穿越场景提出了构网型储能变换器功率协同控制策略;文献[58]提出了兼顾限流与稳定的构网型储能变流器自适应低电压穿越策略;文献[59]提出了面向逆变器故障的构网型储能自适应暂态同步支撑方法。

在故障恢复阶段,构网型储能通过其主动支撑能力与并列控制直接影响恢复路径与效率。文献[60]基于 VSG 控制提出了基于“孤网成形—分段带电—并列扩网”的构网型储能配置优化指标;文献[61]验证了黑启动阶段恢复路径,为以关键负荷恢复时间及比例为目标构网型储能配置提供了依据;文献[62]提出了动态限流与功率快速恢复策略,验证了构网型储能配置对故障恢复的电压支撑效果。

综上,面向大扰动工况的构网型储能规划配置围绕“非故障情况”与“故障情况”两方面展开。对于非故障情况大扰动,主要基于 RoCoF、频率限制及相角-电流阈值关系提出构网型储能配置要素;针对故障情况下的大扰动,构网型储能配置针对“预防—穿越—恢复”过程,围绕电网强度提升、功率/电流协同、自适应故障穿越及动态限流恢复等展开配置研究。总体上,两方面研究均更为关注电网在扰动下的可控运行与快速恢复。

2.4 面向系统强度提升的构网型储能规划配置

系统强度是评价系统安全稳定的基础性量化指标,体现了电网在扰动下对电压幅值与相角的支撑与恢复能力。当前国内外主要以短路比及其相关扩展指标作为系统强度识别与度量的核心依据^[66-67],本质上刻画了网络等效阻抗与短路容量对构网型储能等并网装备电压、相角可控性的支撑能力。表 2 对比总结了目前系统强度描述的相关指标。考虑到不同指标在规划实践中的作用存在差异,附录 B 表 B1 进一步给出了各类短路比指标在构网型储能规划中的应用方式,包括候选接入点筛选与薄弱节点排序、容量配置约束等内容。

表 2 各类短路比指标对比
Table 2 Comparison of various short-circuit ratio indicators

指标名称	与短路比的关系	临界判据差异	适用场景
短路比 ^[68]		仅关注单体设备接入点静态支撑力,偏保守	单场站或单设备并网可行性评估
有效短路比 ^[68]	考虑了无功功率补偿对交流系统强度的削弱影响	计及了本地调相机/电容器补偿影响	
广义短路比 ^[69-70]	基于模态/特征值解耦,可分析非对称网络、容量及位置变化时的影响	考虑了多新能源场站汇集动态影响,关注于区域不发生震荡	多馈入/非对称网络下的系统级强度评估
加权短路比 ^[71-72]	考虑各场站对公共连接点的短路容量贡献	受新能源总占比影响偏大	区域层面强度对比与前期并网筛选
复合短路比 ^[71-72]	将新能源集群内所有机组接入虚拟公共并网点进行分析		
等效短路比 ^[73]	刻画了场站间相互作用及其对交流系统的影响		多场站/新能源场站集中送出场景的强度评估与薄弱点识别
新能源多场站短路比 ^[74]	刻画了场站间相互作用,考虑了不同节点之间各电气量幅值、相位差	关注不同母线间的电气距离,判据随拓扑复杂程度剧烈波动	
多馈入短路比 ^[75]	从单点扩展到多馈入系统,考虑多并网电气耦合影响		常规多馈入直流、多换流站区域评估

由表 2 可以看出,对于直流单馈入系统或者距离远、耦合小的多回直流系统,在分析其电压稳定时常采用传统短路比(short circuit ratio, SCR)^[68]和有效短路比(effective short circuit ratio, ESCR)^[68],从物理意义上而言,两者较为相似,ESCR 较 SCR 增加了对无功补偿的考虑。

对于常规多馈入直流系统,电气耦合作用无法忽略,为提升评估准确性,需对 SCR 进行扩展。文献[75]针对 CIGRE 提出的多馈入短路比(multi-infeed short circuit ratio, MISCR),对 MISCR 的机理与计算方法进行了分析;文献[69-70]基于模态法将多馈入系统进行解耦,提出了广义短路比(generalized short circuit ratio, gSCR),相较 MISCR, gSCR 还适用于非对称系统分析。

进一步的,在多新能源场站接入的电网强度评估方面,文献[71-72]分别提出加权短路比(weighted short circuit ratio, WSCR)及复合短路比(composite short circuit ratio, CSCR),二者仅依赖网络特性,无需考虑电力电子设备,但未刻画场站间相互作用及其对交流系统的影响。文献[73]提出了等效短路比

(equivalent short circuit ratio, ESCR),用于评估多新能源场站并网点电压强度;文献[74]则考虑了不同节点间电气量幅值、相位,并考虑新能源设备无功功率对电网的影响,提出了新能源多场站短路比(multiple renewable energy station short circuit ratio, MRSCR)。总体上,现有相关规划研究通常从系统强度入手,以传统短路比为基础,通过考虑多馈入电气耦合差异与无功支撑条件进行相关指标扩展,进而为构网型储能的选址定容优化提供配置依据;文献[76-77]基于 MISCR 与 MRSCR,提出了计及短路比的“构网场站+调相机”协同配置策略;文献[78]提出一种综合考虑 MISCR 与 MRSCR 的新能源场站选址方法;文献[40]分析了构网型储能对系统强度的作用机理,提出了基于 gSCR 的优化选址方法。

综上,针对不同规划目标、关键因素及设备特性,已有研究提出了多种形式的短路比指标,以形成统一的量化指标来表征系统的电压支撑能力。然而,这些改进型短路比是否在机理上具有合理性,仍需严格论证,以更合理地将其作为评价系统电压支撑强度的有效依据,进而对弱系统实现有效电压稳定控制。此外,由于各类短路比指标的计算方法并不一致,其对应的临界判据也存在显著差异,尚未形成通用标准。因此,在刻画系统强度时,计算精确、具备工程可操作性的新能源临界短路比判据已成为当前构网型储能规划配置研究的关键。后续研究可重点关注以下两个方向:一是面向高比例新能源接入场景,综合考虑网架结构与多机耦合,分析不同接入点位置对系统强度的影响,识别系统稳定运行的薄弱节点,支撑构网型储能科学选址;二是定量刻画构网型储能对临界短路比的提升作用,建立“配置容量-系统强度”的映射关系,为构网型储能容量配置提供量化依据。此外,构网型储能规划配置除满足系统强度、频率稳定和电压安全等技术约束外,还应兼顾投资建设、运行维护及系统综合效益等经济性因素。对于不同应用场景,可在技术指标校核基础上,结合送出能力提升、辅助服务收益等价值开展技术经济评价,以提高构网型储能规划方案的工程可靠性。

3 新型电力系统下的构网型储能规划挑战

新型电力系统下构网型储能已经由理论研究转为示范工程建设,并在一些典型场景中初步形成了面向功能需求的配置思路^[79-80]。但针对构网型储能支撑新型电力系统建设的科学规划方法,不应仅将

其简单视为调峰资源,要推动其作为系统稳定支撑单元纳入规划评估,确定其接入层级、落点位置与容量规模^[79]。本节先梳理了当前典型的构网型储能工程示范,并进一步展望了新型电力系统不同应用场景下的构网型储能规划挑战。

3.1 构网型储能工程示范应用

当前构网型储能规划仍以示范工程建设为主,表 3 对国内外典型构网型储能示范工程进行了梳

理^[81-92]。其中,青海海西州宝库储能电站为目前世界上容量最大的高压直挂构网型储能工程,其 224.5 MW/889 MWh 规模结合 35 kV 直挂技术,可以有效实现电压、频率与惯量支撑等多重功能^[87];云南文山宝池储能电站首次实现了黑启动下的并离网无缝切换^[88];沙特红海新城通过配置 225 MW/1.3 GWh 构网型储能,已实现主城区长时间 100% 离网运行^[91]。

表 3 国内外构网型储能工程示范案例
Table 3 Domestic and foreign grid-forming energy storage demonstration projects

应用场景	项目	构网型储能规模	接入电压等级/kV	构网型储能功能	投运年
新能源集中送出	新疆莎车光储一体化电站 ^[81]	200 MW/800 MWh	35	电压、频率支撑,提升暂态稳定性	2023
	新疆巴州若羌共享储能 ^[82]	160 MW/640 MWh	35	调峰调频等并网支撑	2024
	新疆龙源奥依塔克光储电站 ^[85]	5 MW/10 MWh	35	电压支撑,改善故障后暂态电压	2023
	新疆哈密三塘湖储能电站 ^[86]	250 MW/1000 MWh	220	提升消纳、灵活性、调频能力	2024
直流近区	青海海西州宝库储能 ^[87]	224.5 MW/889 MWh	35	电压/频率/惯量支撑,故障穿越	2024
	新疆阿克苏乌什构网型储能 ^[83]	0.5 GW/2 GWh	220	电压、频率支撑	2024
微网/孤岛	宁夏吴忠共享电化学储能 ^[84]	100 MW/200 MWh	110	调峰调频等并网支撑	2023
	云南文山宝池储能 ^[88]	200 MW/400 MWh	220	黑启动、孤网供电验证	2025
	内蒙古额济纳源网荷储 ^[89]	25 MW/25 MWh	10	黑启动、并离网切换、离网运行	2023
	南澳霍恩斯代尔储能 ^[90]	150 MW/193.5 MWh	275	电压、惯量、频率支撑	2022
	沙特红海新城项目 ^[91]	225 MW/1.3 GWh		夜间独立供电,电压、频率支撑	2023
	美国夏威夷考艾岛项目 ^[92]	14 MW/70 MWh		黑启动、自给供电、电压/频率支撑	2022

3.2 新能源集中送出场景

针对新能源送出场景,当前构网型储能规划主要聚焦在送端汇集与接口薄弱点选址定容,并与无功装置和换流站控制协同以满足外送能力、电压/频率稳定性提升。例如,文献[93]针对新能源基地静态电压支撑能力不足,提出了提高新能源基地电压支撑强度的构网型储能配置方法;文献[94]提出了新能源送出时的构网型储能优化配置模型;文献[95]在构网型储能配置时,提出了计及多维频率安全的构网型储能惯量响应与参数优化方法。总体上,当前研究通常通过辨识电网薄弱点进行构网型储能选址,容量配置仍以单机配置为主^[40],且非由系统强度需求推导跟网型/构网型合理容量配比、单机大容量/分布式小容量的布局方式^[96],导致容量配置偏保守并可能出现支撑能力不均或局部冗余情况,此外,已有研究从并网性能对比与综合评估角度,对跟网型和构网型场站方案进行了量化评价^[97]。

但对于新能源集中送出场景,其资源与负荷中心分离、外送距离长、送端同步支撑薄弱且电力电子占比高,送端系统呈现出弱、极弱电网的特征^[93],难以

有效支撑新能源送出。引入构网型储能的目的在于在送端与接口侧重建并维持电压和频率基准,提供就地、快速、可控的无功与有功支撑,补足惯量与阻尼,并提升场景送出能力。因此,未来研究应进一步综合考虑场景送出能力与系统稳定性提升的协同性,在规划模型中联合优化构网型储能的位置、容量与控制参数,同时兼顾新能源外送与系统稳定的规划需求。在选址阶段,基于 SCR、gSCR、MRSCR 等系统强度指标识别薄弱并网节点;在定容阶段,结合 RoCoF、频率最低点等动态指标对方案效果进行量化评价。

3.3 直流近区场景

针对直流近区场景,当前构网型储能规划主要聚焦于在故障扰动后利用构网型储能快速建立电压与无功支撑,抑制电压上冲,满足弱网电压稳定^[36,98]。例如,文献[98]针对直流近区新能源暂态过电压抑制提出了基于构网型储能的解决方法,文献[36]同时考虑电网强度与暂态过电压风险,保证构网型储能配置同时满足系统过电压与强度边界;文献[98]针对扰动时的暂态过电压,提出了基于电压脆弱性和轨迹灵敏度的构网型储能选址方法。整体来看,

现有构网型储能能在直流近区的规划配置,多是基于电网强度或暂态过电压指标给出若干接入方案和容量建议,再通过典型工况仿真验证效果,对接入位置、容量与暂态过电压水平之间的量化关系刻画还不够清晰^[98-99]。

但对于直流近区场景,其送端交流网架薄弱、短路容量不足且大量滤波器和电容装置集中配置,直流功率骤降或闭锁时易出现近区母线暂态过电压问题^[98],因而需要配置构网型储能使得直流近区快速建立并维持送端电压,在直流故障及恢复过程中吸收或调节无功、限制暂态过电压幅值,并通过提升局部短路容量和系统强度,使直流近区在多种运行方式和故障工况下能够同时满足过电压限值约束^[99-100]。因此,未来规划研究需要利用已有的短路容量与过电压分析结果,将构网型储能接入位置、容量对送端强度、暂态过电压峰值、过电压持续时间及故障后电压恢复时间的影响用等效关系加以表征,并在规划模型中增加对过电压限值的考虑,使规划结果能够清晰反映不同接入位置与容量下直流近区的电压安全水平。

3.4 微电网场景

针对微电网场景,当前构网型储能规划研究主要聚焦新能源波动与故障扰动等工况下的选址定容,通过提供黑启动、电压/频率支撑等功能,使微电网在缺乏大电网支撑时仍能稳定独立运行^[101-103]。例如,文献[104]提出了考虑构网-跟网型单元协同的孤岛交直流混合微电网群分布式控制策略,可为微电网场景下构网型储能与其他变流单元协同配置提供参考;文献[101-102]从阻抗稳定与频率动态特性出发提出稳定判据,用于约束构网型储能规划容量配比;文献[103]考虑构网型储能对微电网的电压/频率支撑与黑启动能力,提出了在支撑较弱并网点优先配置构网型储能的思路。综合来看,现有构网型储能规划配置研究多以稳态潮流约束或系统强度指标约束推导容量^[105],对黑启动与恢复、持续供电需求考量不足,可能造成规划结果难以有效支撑恢复过程。

但对于微电网场景,其脱离上级电网后,电压与频率缺少外部基准、系统惯量支撑不足,此时新能源出力与负荷波动更容易引起电压和频率偏移。因而需要配置构网型储能,使得微电网在弱联情况下具有黑启动能力,并在过程中提供快速有功/无功调节以维持电压频率限值,提升扰动后恢复能力^[106-107]。因此,未来规划研究应结合微电网黑启动需求,将黑启动能力要求纳入选址约束,以筛选构网型储能接入点。同时考虑黑启动过程的功率需求与构网型储能容量配置的约束关系,以提升微电网的安全稳定

运行水平。对于微电网中调频资源不足的场景,还应结合 RoCoF、频率最低点、频率恢复时间等频率支撑指标对配置方案进行评价;对于需要重点保障微电网故障后恢复供电能力的场景,可进一步考虑黑启动成功率对方案进行对比验证。

4 结 论

构网型储能作为电力系统适应高比例新能源接入的重要装备,其应用优势仍未充分发挥,需明确其在多场景下的科学规划方法。本文围绕构网型储能支撑新型电力系统建设,对其规划配置方法进行了系统梳理与综述,从规划角度阐释了其作为电网调节资源时的支撑机理,针对电网正常运行、小扰动和大扰动等不同工况分析了当前构网型储能规划的主流方法与关键技术。正常工况下关注构网多功能耦合的技术经济性规划,小扰动工况下关注系统强度与频率稳定提升下的选址定容,大扰动工况下通常围绕“预防—穿越—恢复”全过程进行协同配置;并对比分析了短路比及其扩展指标在规划评估应用时的适用性。针对构网型储能在新型电力系统的典型应用场景,深入分析了构网型储能在外送能力与系统稳定性提升、暂态过电压抑制、黑启动与故障恢复等方面的规划需求、配置方法与技术挑战。

综合来看,当前构网型储能规划在科学方法与关键技术方面仍存在较大空白,尤其涉及多工况协同、场景适应性匹配等方面仍需深化。一是需要加强构网型储能在电网动态变化和长期运行中的适应性,提高规划方法对系统突发扰动、工况变化与运行态势变化的响应能力;二是需在规划层面明确构网型储能多功能支撑的可用边界与优先级,做好电压频率支撑、强度提升、故障穿越与恢复等功能在不同运行方式下的协同与权衡,避免配置结论仅对局部节点或单一工况有效;三是面向高比例新能源电网,需兼顾技术、经济边界与跟网、构网配比,构建多功能协同的配储规划方法及评价体系,协同优化构网型储能、跟网型储能、新能源场站的选址定容,以提升系统风光储协同配置的综合效率与灵活性。未来应针对上述方向,形成能够适应复杂运行环境、协同支撑调节功能、统筹多类型资源的构网型储能规划理论,为构网型储能在新型电力系统中的规模化应用与科学部署提供关键支撑,同时,还需面向不同应用场景,进一步加强构网型储能规划中技术约束与经济目标的协同建模,并开展综合评估,以支撑工程方案的科学选址与合理定容。

利益冲突声明 (Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献声明 (Authors' Contributions):

徐宇豪负责文献调研整理并起草论文初稿;宋晨辉负责论文结构、内容修改;肖峻、李超指导研究思路并参与论文修改;曹一家提出本文研究方向并负责论文审核;谢惠藩、刘春晓提供了论文在工程化应用方面的指导。所有作者均阅读并同意了论文终稿内容。

5 参考文献

- [1] 国家能源局. 2024年可再生能源并网运行情况 [EB/OL]. [2025-08-12]. <https://www.nea.gov.cn/20250221/e10f363cabe3458aaf78ba4558970054/c.html>.
- [2] International Energy Agency. Renewable energy market update: june 2023; outlook for 2023 and 2024 [R]. Paris: International Energy Agency, 2023.
- [3] 宋晨辉, 李顺宇, 肖峻, 等. 综合能源系统耦合性研究综述: 定性分析与量化应用[J]. 电力建设, 2025, 46(12): 44-56.
SONG Chenhui, LI Shunyu, XIAO Jun, et al. Review of coupling characteristics in integrated energy system: qualitative analysis and quantitative applications[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(12): 44-56.
- [4] 李亚楼, 赵飞, 樊雪君. 构网型储能及其应用综述[J]. 发电技术, 2025, 46(2): 386-398.
LI Yalou, ZHAO Fei, FAN Xuejun. Review of grid-forming energy storage and its applications [J]. Power Generation Technology, 2025, 46(2): 386-398.
- [5] 刘辉, 于思奇, 孙大卫, 等. 构网型变流器控制技术及原理综述[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(1): 277-296.
LIU Hui, YU Siqi, SUN Dawei, et al. An overview of control technologies and principles for grid-forming converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 277-296.
- [6] 詹长江, 吴恒, 王雄飞, 等. 构网型变流器稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2339-2358.
ZHAN Changjiang, WU Heng, WANG Xiongfei, et al. An overview of stability studies of grid-forming voltage source converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2339-2358.
- [7] 赵清华, 李明, 李晓龙, 等. 构网型与跟网型储能在弱电网中的暂态响应特性及并网性能研究[J]. 高压电器, 2025, 61(11): 22-33, 44.
ZHAO Qinghua, LI Ming, LI Xiaolong, et al. Study on transient response characteristics and grid-connection performance of grid-forming and grid-following energy storage in weak grids [J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(11): 22-33, 44.
- [8] HOKE A, KORALEWICZ P, KENYON R W, et al. Stabilizing inverter-based transmission systems: power hardware-in-the-loop experiments with a megawatt-scale grid-forming inverter [J]. IEEE Electrification Magazine, 2022, 10(3): 32-44.
- [9] STRUNZ K, ALMUNEM K, WULKOW C, et al. Enabling 100% renewable power systems through power electronic grid-forming converter and control: system integration for security, stability, and application to Europe [J]. Proceedings of the IEEE, 2023, 111(7): 891-915.
- [10] WU H, WANG X F. Control of grid-forming VSCs: a perspective of adaptive fast/slow internal voltage source [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(8): 10151-10169.
- [11] 刘龙, 胡彬, 王垚鑫, 等. 构网型变流器宽短路比范围适应性分析与提升[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(2): 64-72.
LIU Long, HU Bin, WANG Yaoxin, et al. Adaptability analysis and enhancement of grid-forming converter for wide-range short-circuit ratio [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(2): 64-72.
- [12] 冯梦圆, 文书礼, 时珊珊, 等. 满足新型电力系统调峰调频需求的储能优化配置及运行研究综述[J]. 上海交通大学学报, 2026, 60(1): 1-18.
FENG Mengyuan, WEN Shuli, SHI Shanshan, et al. A review of optimal allocation and operation of energy storage system for peak shaving and frequency regulation in new type power systems [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2026, 60(1): 1-18.
- [13] 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 Jianlin, DING Ziyang, LIU Haitao, et al. Research on grid-forming energy storage converters and control strategies [J]. Power Generation Technology, 2022, 43(5): 679-686.
- [14] 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 Jianlin, DING Ziyang, YOU Honghao, 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.
- [15] 侯鹏, 李丽, 张斯亮. 构网型储能技术的研究综述与应用[J]. 电力勘测设计, 2025(8): 21-27, 70.
HOU Peng, LI Li, ZHANG Siliang. Research review and application of grid-forming energy storage technology [J]. Electric Power Survey & Design, 2025(8): 21-27, 70.
- [16] 马富艺龙. 含构网型电力电子装备的新能源电力系统电压支撑强度评估与提升[D]. 杭州: 浙江大学, 2024.
MA Fuyilong. Assessment and enhancement of voltage support strength in renewable-energy-integrated power systems with grid-forming power electronic devices [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2024.
- [17] 朱宝宇, 王英, 张子翔, 等. 构网型储能变流器技术研究综述与展望[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(3): 1-12.
ZHU Baoyu, WANG Ying, ZHANG Zixiang, et al. Review and prospects on research of grid-forming energy storage converter technology [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(3): 1-12.
- [18] 支娜, 张辉, 肖曦. 提高直流微电网动态特性的改进下垂控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(3): 31-39.
ZHI Na, ZHANG Hui, XIAO Xi. Research on the improved droop control strategy for improving the dynamic characteristics of DC microgrid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(3): 31-39.
- [19] 许诒翊, 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): 3586-3594.
XU Jieyi, LIU Wei, LIU Shu, et al. Current state and development trends of power system converter grid-forming control technology [J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3586-3594.
- [20] LIU Y Q, ZHANG H K, CAO X, et al. Grid-forming energy storage damping control strategy based on proportional cross

- compensation[J]. *Journal of Energy Storage*, 2026, 151: 120502.
- [21] 曹炜, 钦焕乘, 陆建忠, 等. 新型电力系统下虚拟同步机的定位和应用前景展望[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(4): 190-207.
CAO Wei, QIN Huancheng, LU Jianzhong, et al. Orientation and application prospect of virtual synchronous generator in new power system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(4): 190-207.
- [22] 王皓靖, 刘舒, 包海龙, 等. 运用虚拟同步机技术的新型兆瓦级光-储并网结构[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(1): 446-452.
WANG Haojing, LIU Shu, BAO Hailong, et al. A new megawatt structure of PV and energy storages with virtual synchronous generator [J]. *Acta Energetica Sinica*, 2021, 42 (1) : 446-452.
- [23] 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, 189.
WANG Cong, GE Jing, WANG Ying, et al. Research on grid-forming BESS in improving voltage stability [J]. *Electric Engineering*, 2023(12): 183-185, 189.
- [24] 苏开元, 魏澈, 邱银锋, 等. 构网型储能接入海上油田群电网的频率稳定分析[J]. *中国电机工程学报*, 2025, 45(10): 3764-3774.
SU Kaiyuan, WEI Che, QIU Yinfeng, et al. Frequency stability analysis of grid-forming energy storage integration in offshore oilfield power systems [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2025, 45 (10): 3764-3774.
- [25] 赵冬梅, 徐辰宇, 杜泽航, 等. 就地无常规电源支撑下考虑新能源基地频率稳定的储能优化配置方法[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(24): 9691-9705, 10015.
ZHAO Dongmei, XU Chenyu, DU Zehang, et al. Optimization configuration method for energy storage considering frequency stability of new energy bases without conventional power supply support on site [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44 (24) : 9691-9705, 10015.
- [26] 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 Jianlin, LU Guanming, YOU Honghao, 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.
- [27] 李政凯. 考虑电力系统频率稳定的构网型储能应用研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2023.
LI Zhengkai. Application research of grid-forming energy storage considering frequency stability of power system [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2023.
- [28] DONG Y N, MA S H, HAN Z J, et al. A comprehensive virtual synchronous generator control strategy for harmonic and imbalance voltage suppression of multi-inverter parallel microgrid [J]. *Electronics*, 2022, 11(3): 492.
- [29] XUE S W, ZENG S M, JIA Q Q, et al. Collaborative optimization allocation of grid-forming and grid-following reactive power resources considering auxiliary equipment services [J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 95840-95857.
- [30] INAOLAJI A, WU X, ROYCHOWDHURY R, et al. Optimal allocation of battery energy storage systems for peak shaving and reliability enhancement in distribution systems [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 95: 112305.
- [31] 刘金峻, 唐晓骏, 霍启迪, 等. 考虑换流器型电网支撑需求与经济性的储能容量配置[J]. *电网与清洁能源*, 2025, 41(4): 43-51, 57.
LIU Jinjun, TANG Xiaojun, HUO Qidi, et al. Energy storage capacity configuration considering converter-based grid support needs and economic viability [J]. *Power System and Clean Energy*, 2025, 41(4): 43-51, 57.
- [32] 李秀慧, 崔炎. 考虑调峰调频需求的新能源电网储能优化配置[J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(11): 3594-3602.
LI Xiuhui, CUI Yan. Optimal allocation of energy storage in renewable energy grid considering the demand of peak and frequency regulation [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(11): 3594-3602.
- [33] WANG S K, SUN Y B, FU H, et al. Research on energy storage capacity configuration of grid-forming wind-storage systems based on frequency constraints [C]//2025 4th International Symposium on New Energy Technology Innovation and Low Carbon Development (NET-LC). IEEE, 2025: 100-103.
- [34] 范嘉炜, 任永峰, 杭雨祺, 等. 构网型储能与九开关UPQC联合控制提升风电系统稳定性[J]. *高压电器*, 2025, 61(11): 11-21.
FAN Jiawei, REN Yongfeng, HANG Yuqi, et al. Improvement of wind power system stability by joint control of grid-forming energy storage and nine-switch UPQC [J]. *High Voltage Apparatus*, 2025, 61(11): 11-21.
- [35] 孙培博, 王伟胜, 汪海蛟, 等. 计及小干扰稳定约束的新能源并网系统构网型单元配置方法[J]. *电工技术学报*, 2025, 40(9): 2809-2826.
SUN Peibo, WANG Weisheng, WANG Haijiao, et al. Configuration method for grid-forming units of renewable energy grid-integration system considering small signal stability constraints [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2025, 40 (9): 2809-2826.
- [36] LIU Y, CHEN Y, XIN H H, et al. System strength constrained grid-forming energy storage planning in renewable power systems [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2025, 16 (2) : 981-994.
- [37] YUAN P, FU J B, XI J H, et al. Research on the location and capacity determination method of grid-forming energy storage applied to HVDC receiving power grid [C]//2024 3rd Asian Conference on Frontiers of Power and Energy (ACFPE). IEEE, 2024: 27-31.
- [38] DUAN N X, HUO C, RONG X T, et al. Optimization of grid-forming energy storage configuration for voltage problems based on electromagnetic transient simulation [C]//2023 3rd International Conference on New Energy and Power Engineering (ICNEPE). IEEE, 2024: 1-4.
- [39] 边家瑜, 周专, 于志勇, 等. 高比例新能源电力系统下基于多尺度的构网型储能配置优化研究[J]. *可再生能源*, 2025, 43(6): 839-845.
BIAN Jiayu, ZHOU Zhuan, YU Zhiyong, et al. Research on the multi-scale configuration optimization for the grid-forming energy storage during high penetration of renewable energy in power system [J]. *Renewable Energy Resources*, 2025, 43(6): 839-845.
- [40] 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 Chen, LIU Chenxi, HUANG Wei, 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.
- [41] 王乐瑶, 吴琛, 刘晨曦, 等. 提升新能源基地电压支撑强度的储能选址优化方法[J]. *高电压技术*, 2025, 51(9): 4565-4576.
WANG Leyao, WU Chen, LIU Chenxi, et al. Optimization method of energy storage location to improve voltage support strength of renewable energy base [J]. *High Voltage Engineering*, 2025, 51(9): 4565-4576.
- [42] SUN W T, GE Y, LIU G J, et al. Siting and sizing method of GFM converters based on genetic algorithm [J]. *Inventions*, 2025, 10(1): 13.
- [43] LAAKSONEN H. Improvement of power system frequency stability with universal grid-forming battery energy storages [J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 10826-10841.
- [44] DUCOIN E A S, GU Y J, CHAUDHURI B, et al. Analytical design of contributions of grid-forming and grid-following inverters to frequency stability [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2024, 39(5): 6345-6358.
- [45] 谭玲玲, 张文龙, 康志豪, 等. 计及惯量响应与一次调频参数优化的新能源基地构网型储能规划[J]. *中国电力*, 2025, 58(7): 147-161.
TAN Lingling, ZHANG Wenlong, KANG Zhihao, et al. Grid-forming storage planning for renewable energy bases considering the co-optimization of inertia response and primary frequency regulation parameters [J]. *Electric Power*, 2025, 58(7): 147-161.
- [46] 郭嘉庆, 乔颖, 鲁宗相, 等. 考虑频率安全约束的储能-电网联合规划[J]. *全球能源互联网*, 2021, 4(4): 323-333.
GUO Jiaqing, QIAO Ying, LU Zongxiang, et al. Energy storage-grid joint planning considering frequency safety constraints [J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2021, 4(4): 323-333.
- [47] 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 Li, WANG Jiaming, ZHANG Qinglei, 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.
- [48] 杨天鑫, 黄云辉, 何珍玉, 等. 基于多时间尺度调节的构网型储能电站定容选址优化配置[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(23): 54-64.
YANG Tianxin, HUANG Yunhui, HE Zhenyu, et al. Optimal configuration of siting and sizing for grid-forming battery energy storage station based on multi-timescale regulation [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(23): 54-64.
- [49] 林涛, 林政阳, 李晨, 等. 基于 TCN 的跟网/构网混合型新能源场站并网系统小干扰稳定性快速评估[J]. *电力科学与技术学报*, 2024, 39(4): 169-177.
LIN Tao, LIN Zhengyang, LI Chen, et al. Small signal stability assessment of grid-connected system for grid-following/grid-forming hybrid new energy stations based on TCN [J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2024, 39(4): 169-177.
- [50] MANAMPERI I, AHMAD I, HABIBI D, et al. Optimising grid-forming inverters to prevent under-frequency load shedding with minimal energy storage [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 98: 112842.
- [51] 赵冬梅, 宋晨铭, 冯向阳, 等. 100% 新能源场景下考虑频率稳定约束的源网荷储一体化系统储能优化配置[J]. *电工技术学报*, 2025, 40(7): 2146-2161.
ZHAO Dongmei, SONG Chenming, FENG Xiangyang, et al. The optimal configuration of energy storage in the source-grid-load-storage integrated system considering frequency stability constraints in 100% new energy scenarios [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2025, 40(7): 2146-2161.
- [52] VATTA K K, YANG G Y. Effects of current limit for grid forming converters on transient stability: analysis and solution [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2024, 158: 109919.
- [53] ZHANG Z Q, SCHUERHUBER R, FICKERT L, et al. Investigating the effects of current thresholds on phase jump limits and withstand capabilities in grid-forming converters [J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2024, 18(11): 2133-2143.
- [54] 李建威, 张友好, 杨青青, 等. 一种计及新能源多场站短路比提升的构网型储能选址定容优化方法: CN119921365A [P]. 2025-05-02.
- [55] MAYER P F, GORDON M, HUANG W C, et al. Improving grid strength in a wide-area transmission system with grid forming inverters [J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2023, 17(2): 399-410.
- [56] LIANG J F, RONG S Y, LIU Y Q, et al. Coordinated optimization method of renewable energy sources and energy storage devices based on synergistic capacity short circuit ratio [J]. *Frontiers in Energy Research*, 2024, 12: 1467624.
- [57] ZHAO X X, KESTELYN X, FLYNN D. A fault ride-through strategy for grid-forming converters under symmetrical and asymmetrical grid faults [J]. *Electric Power Systems Research*, 2024, 235: 110672.
- [58] 李建林, 邹菲, 游洪灏, 等. 构网型储能变流器自适应低电压穿越控制策略[J]. *电工技术学报*, 2025, 40(9): 2724-2737.
LI Jianlin, ZOU Fei, YOU Honghao, et al. Adaptive low-voltage ride-through control strategy of grid-forming energy storage converter [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2025, 40(9): 2724-2737.
- [59] XING C, XIAO J J, LI P Q, et al. Adaptive transient synchronization support strategy for grid-forming energy storage facing inverter faults [J]. *Electronics*, 2025, 14(15): 2980.
- [60] ALASSI A, FENG Z W, AHMED K, et al. Grid-forming VSM control for black-start applications with experimental PHIL validation [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2023, 151: 109119.
- [61] PEÑA ASENSIO A, ARNALTES GÓMEZ S, RODRIGUEZ-AMENEDO J L. Black-start capability of PV power plants through a grid-forming control based on reactive power synchronization [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2023, 146: 108730.
- [62] ZHANG H J, MA J P, LI X P. Dynamic current-limitation strategy of grid-forming inverters based on SR latches [J]. *Electronics*,

- 2024, 13(17): 3432.
- [63] 刘一琦, 吴昱澄, 尹来承, 等. 考虑大规模新能源并网的多端柔直系统故障处理技术归纳与展望[J]. 电机与控制学报, 2025, 29(11): 168-184.
LIU Yiqi, WU Yucheng, YIN Laicheng, et al. Induction and prospects of fault processing technology considering large-scale renewable energy integration in MTDC systems [J]. Electric Machines and Control, 2025, 29(11): 168-184.
- [64] 王凤, 许建中. 基于构网储能型SVG的自适应限流策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(23): 54-64.
WANG Feng, XU Jianzhong. Adaptive current limiting strategy based on grid-forming and energy-storage SVG [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(23): 54-64.
- [65] 李建林, 宋莹莹, 游洪灏, 等. 低电压穿越场景下的构网型储能变换器功率协同控制策略[J]. 高压电器, 2025, 61(11): 1-10, 21.
LI Jianlin, SONG Yingying, YOU Honghao, et al. Coordinated power control strategy for grid-forming energy storage converters under low-voltage ride-through scenarios [J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(11): 1-10, 21.
- [66] 于琳, 孙华东, 赵兵, 等. 新能源并网系统短路比指标分析及临界短路比计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(3): 919-928.
YU Lin, SUN Huadong, ZHAO Bing, et al. Short circuit ratio index analysis and critical short circuit ratio calculation of renewable energy grid-connected system [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(3): 919-928.
- [67] 马富艺龙, 辛焕海, 刘晨曦, 等. 新能源基地柔性直流送出系统小扰动电压支撑强度评估[J]. 电工技术学报, 2023, 38(21): 5758-5770, 5938.
MA Fuyilong, XIN Huanhai, LIU Chenxi, et al. Small-disturbance system voltage support strength assessment method for renewables VSC-HVDC delivery system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(21): 5758-5770, 5938.
- [68] 电力系统安全稳定计算规范: GB/T 40581—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
Calculation specification for power system security and stability: GB/T 40581—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [69] 辛焕海, 章枫, 于洋, 等. 多馈入直流系统广义短路比: 定义与理论分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3): 633-647.
XIN Huanhai, ZHANG Feng, YU Yang, et al. Generalized short circuit ratio for multi-infeed DC systems: definition and theoretical analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 633-647.
- [70] 辛焕海, 董炜, 袁小明, 等. 电力电子多馈入电力系统的广义短路比[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6013-6027.
XIN Huanhai, DONG Wei, YUAN Xiaoming, et al. Generalized short circuit ratio for multi power electronic based devices infeed to power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6013-6027.
- [71] ZHANG Y, HUANG S F, SCHMALL J, et al. Evaluating system strength for large-scale wind plant integration [C]//2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition. IEEE, 2014: 1-5.
- [72] FERNANDES R, ACHILLES S, MACDOWELL J. Report to NERC ERSTF for composite short circuit ratio (CSCR) estimation guideline [R]. 2015.
- [73] WG B4. 62. Connection of wind farms to weak AC networks [R]. Paris: CIGRE, 2016.
- [74] 孙华东, 徐式蕴, 许涛, 等. 新能源多场站短路比定义及指标[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 497-505.
SUN Huadong, XU Shiyun, XU Tao, et al. Definition and index of short circuit ratio for multiple renewable energy stations [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 497-505.
- [75] 郭小江, 汤涌, 郭强, 等. CIGRE多馈入直流短路比指标影响因素及机理[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 69-74, 81.
GUO Xiaojiang, TANG Yong, GUO Qiang, et al. Influence factors and theory for CIGRE MISC index [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9): 69-74, 81.
- [76] 林俐, 崔灏, 徐宁. 计及短路比约束的新能源基地构网型场站与调相机协调配置策略[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(23): 57-67.
LIN Li, CUI Hao, XU Ning. Coordinated configuration strategy of grid-forming stations and synchronous condensers in renewable energy base considering short-circuit ratio constraints [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(23): 57-67.
- [77] 马鑫, 薛飞, 顾文波, 等. 考虑多场站短路比约束的构网型储能及分布式调相机优化配置方法[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(5): 40-46, 64.
MA Xin, XUE Fei, GU Wenbo, et al. Optimal configuration method of grid-forming energy storage and distributed synchronous condenser considering constraints of MRSCR [J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(5): 40-46, 64.
- [78] 于琳琳, 贾鹏, 杨游航, 等. 计及短路比约束的新能源场站布点及网架协调规划方法[J]. 电力建设, 2024, 45(10): 24-33.
YU Linlin, JIA Peng, YANG Youhang, et al. Coordinated planning method for new energy station siting and network considering short circuit ratio constraints [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(10): 24-33.
- [79] 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 Xinbao, GE Jing, HAN Lianshan, 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.
- [80] 李建林, 李昕然, 邹菲, 等. 构网型储能典型工程示范及涉网特性检测技术[J]. 高电压技术, 2025, 51(8): 4300-4312.
LI Jianlin, LI Xinran, ZOU Fei, et al. Typical engineering demonstrations and grid-related characteristic detection technologies on grid-forming energy storage [J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(8): 4300-4312.
- [81] 天山网-新疆日报. 莎车县“超级充电宝”可满足约90万户家庭基本用电 [EB/OL]. [2025-08-12]. https://www.ts.cn/zxpd/dz/202409/t20240904_23570521.shtml.
- [82] 央广网. 160 MW/640 MWh构网型储能! 新疆巴州首个共享储能项目成功并网 [EB/OL]. [2025-08-12]. https://www.sohu.com/a/843360597_121123908.
- [83] 中国水电四局. 国内在建最大构网型(独立)混合储能项目并网

- 带电成功 [EB/OL]. [2025-08-12]. <https://cn.solarbe.com/news/20241018/90754.html>.
- [84] 山东电建. 宁夏吴忠元储科技有限公司新梁变 100 MW/200 MWh 新型电化学储能电站(共享型)项目成功并网 [EB/OL]. [2025-08-12]. <https://www.sepco.net.cn/newsshow.php?cid=15&id=1042>.
- [85] 中新网新疆. 全国首次构网型储能人工短路试验在疆完成 [EB/OL]. [2025-08-12]. <https://www.xj.chinanews.com.cn/dizhou/2023-09-22/detail-ihctush5863446.shtml>.
- [86] 中国电建贵州工程公司. 新疆哈密三塘湖 100 万千瓦风电项目全容量并网发电 [EB/OL]. [2025-08-12]. <https://www.xj.chinanews.com.cn/dizhou/2024-10-18/detail-iheiaitf1652086.shtml>.
- [87] 能源界网. 南瑞继保供货世界最大容量构网型高压直挂储能项目投运(青海海西“宝库”储能电站) [EB/OL]. [2025-08-12]. <https://www.nengyuanjie.net/article/95799.html>.
- [88] 科技日报. 我国首个大型锂钠混合储能站投产(云南文山“宝池”储能站) [EB/OL]. [2025-08-12]. https://www.stdaily.com/web/gdxw/2025-05/25/content_344965.html.
- [89] 国务院国资委新闻中心. 内蒙古电网成功构建国内首个广域电网纯新能源电力系统 [EB/OL]. [2025-08-12]. <https://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588129/c29250084/content.html>.
- [90] Hornsdale power reserve: grid-forming battery energy storage system [EB/OL]. [2025-08-12]. <https://hornsdalespowerreserve.com.au/>.
- [91] Global Red Sea, Power Huawei Digital, Power ACWA. Red sea project: world's largest off-grid solar-storage microgrid [EB/OL]. [2025-08-12]. <https://www.redseaglobal.com/>.
- [92] Navy U. S., Cooperative Kauai Island Utility, AES Distributed Energy, et al. Pacific missile range facility (PMRF) - grid-forming microgrid [EB/OL]. [2025-08-12]. <https://www.nrel.gov/news/detail/features/2021/us-navy-kiuc-aes-and-nrel-innovate-and-collaborate-for-resilience-and-cost-effective-clean-energy-project-on-kauai>.
- [93] 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 [J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 1-17. [2025-08-12]. [https://link.cnki.net/urlid/10.1999.tm.20250123.1005.002](https://link.cnki.net/urlid/10.1999/tm.20250123.1005.002).
ZHAO Dongmei, BAI Junhui, LIU Hanfeng, et al. Enhancing Voltage support capability of new energy bases through grid-forming stations and reactive power source optimization configuration methods [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 1-17. [2025-08-12] <https://link.cnki.net/urlid/10.1999.tm.20250123.1005.002>.
- [94] 陈仕原, 林舜江, 杨悦荣, 等. 新能源基地经柔性直流送出系统的构网型变流器优化配置方法 [J]. 高电压技术, 1-12. [2025-08-12]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20250379>.
CHEN Shiyuan, LIN Shunjiang, YANG Yuerong, et al. Optimal configuration method of grid forming converters for large-scale renewable generation base transmitted by VSC-HVDC system [J]. High Voltage Engineering, 1-12. [2025-08-12]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20250379>.
- [95] 张玉敏, 高业豪, 叶平峰, 等. 计及调频参数优化的新能源基地构网型电-氢储能规划 [J]. 电力系统自动化, 2025, 1-20. [2025-11-05]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1180.TP.20251024.1113.002>.
- ZHANG Yumin, GAO Yehao, YE Pinfeng, et al. Electric-hydrogen energy storage planning for new energy bases with grid-forming configuration considering frequency regulation parameter optimization [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 1-20. [2025-11-05]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1180.TP.20251024.1113.002>.
- [96] 杨振奥, 陈俊儒, 刘雨珊, 等. 计及暂态响应与动态支撑能力的跟/构网型变流器容量配比方法 [J]. 智慧电力, 2025, 53(12): 123-130.
YANG Zhenao, CHEN Junru, LIU Yushan, et al. A capacity allocation method for grid-following/grid-forming converters considering transient response and dynamic support capability [J]. Smart Power, 2025, 53(12): 123-130.
- [97] 杨振奥, 陈俊儒, 刘雨珊, 等. 基于博弈论和改进 TOPSIS 的跟网型和构网型场站并网性能对比及评估 [J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(2): 206-216.
YANG Zhen'ao, CHEN Junru, LIU Yushan, et al. Comparison and evaluation of grid-connected performance of grid-following and grid-forming stations based on game theory and improved TOPSIS [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(2): 206-216.
- [98] 任冲, 任景, 程林, 等. 基于构网型储能的直流近区新能源暂态过电压抑制方法 [J]. 智慧电力, 2025, 53(9): 1-9.
REN Chong, REN Jing, CHENG Lin, et al. Transient overvoltage suppression method for renewable energy sources near DC transmission systems based on grid-forming energy storage [J]. Smart Power, 2025, 53(9): 1-9.
- [99] 赵进国, 牛浩明, 牛甄, 等. 沙戈荒新能源基地过电压及抑制策略分析研究 [J]. 电工电气, 2024(12): 27-33.
ZHAO Jinguo, NIU Haoming, NIU Zhen, et al. Analysis and research on overvoltage and suppression strategy of sand Gobi Desert new energy base [J]. Electrotechnics Electric, 2024(12): 27-33.
- [100] 牛拴保, 柯贤波, 任冲, 等. 基于短路容量量化评估的大规模新能源直流送端电网运行方式优化方法 [J]. 电力自动化设备, 2021, 41(12): 123-129.
NIU Shuanbao, KE Xianbo, REN Chong, et al. Optimal method of operation modes for large-scale new energy DC sending-end power grid based on short circuit capacity quantitative assessment [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(12): 123-129.
- [101] 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 Yufei, TIAN Zhen, ZHA Xiaoming, 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.
- [102] 尚佳宇, 虞家骏, 刘增, 等. 构网型与跟网型逆变器并联系统精确频域建模及简化稳定判据 [J]. 电力系统自动化, 2025, 49(2): 53-63.
SHANG Jiayu, YU Jiajun, LIU Zeng, et al. Accurate frequency-

- domain modeling and simplified stability criterion for parallel grid-forming and grid-following inverter system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(2): 53-63.
- [103] 刘泽洪, 郑炜, 李佳朋, 等. 构网型技术发展现状与前景[J]. 全球能源互联网, 2025, 8(4): 399-415.
- LIU Zehong, ZHENG Wei, LI Jiapeng, et al. Status and outlook for the development of grid-forming technologies [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2025, 8(4): 399-415.
- [104] 潘荣才, 岳善鹏, 张席, 等. 考虑构网-跟网型单元协同的孤岛交直流混合微电网分布式控制策略[J]. 供用电, 2025, 42(3): 46-57.
- PAN Rongcai, YUE Jingpeng, ZHANG Xi, et al. Distributed control strategy for islanded AC/DC hybrid microgrid cluster considering coordination between grid-forming and grid-following units[J]. Distribution & Utilization, 2025, 42(3): 46-57.
- [105] 黄兴华, 吴涵, 陈石川, 等. 考虑新能源出力的孤岛微网储能配置优化方法[J]. 中国电力, 2024, 57(12): 132-138.
- HUANG Xinghua, WU Han, CHEN Shichuan, et al. An optimization method for energy storage configuration of isolated island microgrid considering new energy output [J]. Electric Power, 2024, 57(12): 132-138.
- [106] ZHANG H Y, YU S B, XIONG L S, et al. Power instruction correction based frequency response strategy for grid forming inverter in islanded microgrids [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2024, 155: 109551.

- [107] KHAN M, WU W C, LI L. Grid-forming control for inverter-based resources in power systems: a review on its operation, system stability, and prospective [J]. IET Renewable Power Generation, 2024, 18(6): 887-907.

收稿日期: 2026-02-02 修回日期: 2026-03-05



徐宇豪

作者简介:

徐宇豪(2003),男,硕士研究生,主要研究方向为构网型储能规划,E-mail:xuyuh611@163.com;

宋晨辉(1993),男,博士,副研究员,硕士生导师,通信作者,主要研究方向为综合能源系统的安全分析与规划运行、储能规划,E-mail:songchenhui66399@163.com;

曹一家(1969),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统安全与控制,E-mail:yjcao@csust.edu.cn;

李超(1988),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统保护与控制、超导与储能应用,E-mail:lichao_tju@126.com;

谢惠藩(1980),男,博士,教授级高级工程师,主要研究方向为电力系统分析与新能源运行控制,E-mail:xiehuifanscut@163.com;

刘春晓(1985),女,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力系统分析与控制,E-mail:304553211@qq.com;

肖峻(1971),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统安全分析与规划,E-mail:xiaojun@tju.edu.cn.

(编辑 张小飞)

附录 A

构网型储能接入系统示意图如图 A1 所示。

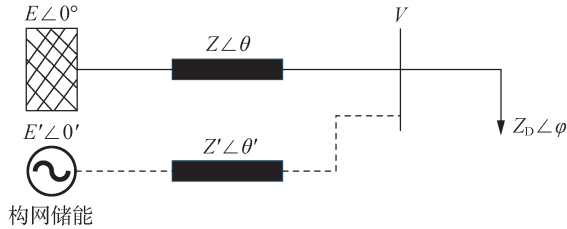


图 A1 构网型储能接入系统示意图

Fig. A1 Schematic diagram of a grid-forming energy storage access system

图 A1 中,电源端等效电压为 $E\angle 0^\circ$,经联络阻抗 $Z\angle\theta$ 向负荷阻抗 $Z_D\angle\varphi$ 供电,两者串联,总阻抗为:

$$Z_\Sigma = Z\angle\theta + Z_D\angle\varphi \quad (\text{A1})$$

回路电流为:

$$I = \frac{E\angle 0^\circ}{Z_\Sigma} \quad (\text{A2})$$

对电流取模平方:

$$|I|^2 = \frac{E^2}{|Z_\Sigma|^2} \quad (\text{A3})$$

负荷端电压为:

$$V = I(Z_D\angle\varphi) \quad (\text{A4})$$

负荷吸收的复功率为:

$$S_D = VI^* = (IZ_D\angle\varphi)I^* = |I|^2(Z_D\angle\varphi) \quad (\text{A5})$$

负荷吸收的有功功率为:

$$P = \text{Re}\{S_D\} = |I|^2 \text{Re}\{Z_D\angle\varphi\} = |I|^2 Z_D \cos\varphi \quad (\text{A6})$$

将 $|I|^2 = E^2/|Z_\Sigma|^2$ 代入式(A6),得到:

$$P = \frac{E^2 Z_D \cos\varphi}{|Z\angle\theta + Z_D\angle\varphi|^2} \quad (\text{A7})$$

对分母展开并整理,有:

$$|Z\angle\theta + Z_D\angle\varphi|^2 = Z^2 + Z_D^2 + 2ZZ_D \cos(\theta - \varphi) \quad (\text{A8})$$

将式(A8)代入式(A7),得到式(A9),即为本文公式(3):

$$P = \frac{E^2 Z_D \cos\varphi}{Z^2 \left[1 + \left(\frac{Z_D}{Z}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_D}{Z}\right) \cos(\theta - \varphi) \right]} \quad (\text{A9})$$

附录 B

表 B1 面向构网型储能规划的短路比类指标应用说明

Table B1 Application guidelines for short-circuit ratio indicators in grid-forming energy storage planning

指标名称	指导意义	规划用途	转化参数
短路比 ^[68]	用于单并网点初筛与薄弱点识别,可作为构网型储能接入必要性判断的基础指标,并为容量下限估计提供参考	选址+定容	选址:作为候选节点强弱的排序依据; 定容:作为配置后强度达标的条件/校核指标
有效短路比 ^[68]			
广义短路比 ^[69-70]	适用于多馈入/非对称网络强度评估,指导多点选址与分布式配置	选址+定容	选址:作为多节点/耦合场景候选方案的排序依据; 定容:作为配置后强度达标的条件/校核指标
加权短路比 ^[71-72]	适用于区域或集群层面的强度对比与前期筛选	选址	主要作为候选站点(区域)强度对比的筛选依据,用于缩减候选范围,一般不单独作为定容终止条件
复合短路比 ^[71-72]			
等效短路比 ^[73]	刻画多场站耦合作用,可用于识别耦合强、相互影响大的场站	选址+定容	选址:作为场站耦合强弱判断与布点方式(集中/分散)的判断依据; 定容:作为不同容量分配方案的比较依据/校核指标,判断全体场站强度是否达标的条件
新能源多场站短路比 ^[74]			
多馈入短路比 ^[75]			