

DOI: 10.61369/NPS.2025030003

基于参数辨识的高压直挂构网型大容量 储能电站虚拟惯量实测验证方法

陈雨鸽^{1,2}, 石吉银^{1,2}, 林文彬^{1,2}, 张抒凌^{1,2}, 李建平^{1,2}, 李智诚^{1,2}

(1. 国网福建省电力有限公司 电力科学研究院, 福建 福州 350007;

(2. 国网福建省电力有限公司 电力储能技术研究与应用实验室, 福建 福州 350007)

A Virtual Inertia Measurement and Verification Method of High-Voltage, Direct-Connected, Grid-Forming and High-Capacity Capacity Energy Storage based on Parameter Identification

CHEN Yuge^{1,2}, SHI Jiyin^{1,2}, LIN Wenbin^{1,2}, ZHANG Shuling^{1,2}, LI Jianping^{1,2}, LI Zhicheng^{1,2}

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350007;

(2. Electric Energy Storage Technology Research and Application Laboratory, State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350007)

摘要:【目的】惯量支撑是构网型储能的核心功能,对提升电力系统的主动调节能力至关重要。然而,现有测试标准(如 GB/T 36548—2024)由于试验设备条件限制,难以对 25 MW 及以上大容量直挂储能的惯量性能进行有效验证,阻碍了构网储能在电力系统中的大规模推广应用。【方法】本文提出了一种基于参数辨识的高压直挂构网型大容量储能电站虚拟惯量实测验证方法。该方法通过分析同步发电机转子运动方程和构网控制原理,明确了惯量支撑的关键可调参数;采用频域参数辨识算法,实现了这些关键参数的协同辨识与精准解耦;并结合工程实际,设计了并网、离网工况下的虚拟惯量实测方案,从而对构网储能的惯量支撑能力进行量化评估。【结果】该方法已在福建省某百兆瓦级大容量储能电站完成工程实测。测试结果表明,该方法能够准确捕获储能在频率扰动下的惯量响应特性,其中惯性时间常数的测量误差小于 3%,阻尼系数误差低于 2%,为评估构网型储能作为电力系统关键灵活性资源提供了可靠依据。【结论】这项研究突破了大容量构网储能性能验证的技术瓶颈,不仅为构网型储能虚拟惯量参数设计和系统应用提供了技术支持,还为虚拟电厂等需要主动支撑功能的系统级应用提供了技术保障。

关键词: 构网储能; 惯量支撑; 高压直挂; 虚拟惯量; 参数辨识; 虚拟同步机

ABSTRACT: [Objectives] Inertia support is the core function of grid-structured energy storage, which is very important to improve the active regulation ability of power system. However, due to the limitation of test equipment, the existing test standards (such as GB / T 36548—2024) are difficult

to effectively verify the inertia performance of 25 MW and above large-capacity direct-connected energy storage, which hinders the large-scale application of grid-connected energy storage in power system. [Method] The research team proposed a virtual inertia measurement and verification method based on parameter identification for high-voltage direct-connected grid-type large-capacity energy storage power station. This method clarifies the key adjustable parameters of inertia support by analyzing the motion equation of synchronous generator rotor and the principle of network construction control. The frequency domain parameter identification algorithm is used to realize the collaborative identification and precise decoupling of these key parameters. Combined with the engineering practice, the virtual inertia measurement scheme under grid-connected and off-grid conditions is designed, so as to quantitatively evaluate the inertia support capacity of grid-connected energy storage. [Result] The method has been tested in a 100 MW large-capacity energy storage power station in Fujian Province. The test results show that the method can accurately capture the inertia response characteristics of energy storage under frequency disturbance. The measurement error of inertia time constant is less than 3%, and the error of damping coefficient is less than 2%. It provides a reliable basis for evaluating grid-connected energy storage as a key flexibility resource of power system. [Conclusion] This study breaks through the technical bottleneck of performance verification of large-capacity grid-connected energy storage. It not only provides technical support for the design of virtual inertia parameters and system application of grid-connected

energy storage, but also provides technical support for system-level applications such as virtual power plants that need active support functions.

KEY WORDS: network energy storage; inertia support; high pressure direct hanging; virtual inertia; parameter identification; virtual synchronous machine

0 引言

随着“双碳”目标的深入推进,截至2024年底,我国新型储能装机规模已达到7 376万kW/1.68亿kW·h,在促进新能源开发消纳、保障电网顶峰供电以及维护电力系统安全稳定运行等方面发挥着关键作用,正日益成为构建新型电力系统的核心支撑^[1-2]。新型电力系统建设面临着新能源消纳利用、系统调节能力提升和应急供电保障等关键挑战,这为新型储能提供了广阔的应用场景,同时也对储能的电网支撑能力提出了更高要求。从当前发展态势看,各类储能技术装备正朝着单机大容量、高压化和构网型方向演进^[3-6]:储能电站规模呈现集中式和大型化特征,百兆瓦级项目已成为行业标配;技术路线从以“低压并联式”为主导发展为“低压并联式”与“高压直挂式”等多种形式并存;并网技术要求不断提高,构网型技术的推广应用正在加速推进。

要推动新型储能在新型电力系统中的适应性发展,关键在于掌握储能的涉网性能。其中,惯量支撑是构网型储能区别于跟网型储能的显著优势。然而,现行的《电化学储能电站接入电网测试规程》(GB/T 36548—2024)和《构网型储能系统并网测试规范》(TCES-244—2023)等标准虽然要求验证储能模拟同步发电机惯量响应的性能,但由于电网工况模拟测试设备的限制,目前仅能支持25 MW以下小容量储能的测试,无法满足百兆瓦级高压直挂储能系统的测试需求^[7-8]。在针对大容量高压直挂构网型储能的虚拟惯量推导与实测方案研究中,现有方法普遍存在精度不足、工程实用性不强以及储能与新能源构网性能难以解耦分析等问题。例如,传统的阶跃扰动法在大容量测试中容易引发系统振荡,导致惯量参数辨识误差较大^[9];扫频分析法虽然提高了精度,但依赖高精度信号发生器,难以适应工程现场的复杂工况^[10]。文献[11]采用小信号分析法推导构网型储能的虚拟惯量,建立了线性化模型,但未能充分考虑电网动态响应特性的影

响;文献[12]提出基于PSO-ADMM算法的虚拟惯量测算方法,可实时采集系统运行模式并映射虚拟惯量,但无法解耦风机、光伏和储能等多设备的虚拟惯量贡献,导致构网型储能的惯量支撑能力仍缺乏有效表征。因此,开展大容量高压直挂构网型储能虚拟惯量的实测研究,准确评估其对电网惯量支撑的实际表现,不仅有助于优化储能的构网支撑性能,还可为运行控制策略提供理论依据。同时,该研究对完善构网型储能并网测试标准、推动我国在该领域确立技术领先优势具有重要的现实意义和工程应用价值。

本文针对大容量构网型储能虚拟惯量的工程实测需求,提出了一种基于参数辨识的高压直挂构网型大容量储能虚拟惯量实测方法。研究首先从同步发电机转子运动方程与构网控制原理出发,深入分析了惯量支撑关键可调参数的作用机理;随后采用频域参数辨识算法,实现了惯性时间常数与阻尼系数的协同辨识与精确解耦;在此基础上,创新设计了基于构网型与跟网型储能对拖控制策略的大容量储能并、离网实测方案,并在福建省某百兆瓦级储能电站完成了工程验证。

1 构网型储能虚拟同步控制可调可变关键参数

1.1 构网型储能

储能系统通过电池堆和变流器的协同工作,实现对电能存储和释放的灵活调控^[13]。如图1所示,按照变流器控制技术的不同,储能系统主要分为跟网型(grid following, GFL)和构网型(grid forming, GFM)两类^[14-15]。其中,跟网型储能依赖锁相环(phase-locked loop, PLL)跟踪电网电压相位,采用电流源型控制方式,其功率输出受限于电网电压相位,必须在稳定电网条件下运行,缺乏自主建立电压和频率的能力;而构网型储能则以虚拟同步机(virtual synchronous generation, VSG)算法为核心控制策略,通过模拟同步发电机运行机制,能够自主构建电压和频率形成电网支撑节点,无需依托电网电压相位,具备独立建立电网稳定运行点的自同步能力。技术原理对比表明,构网型储能特有的电压、频率、惯量自主稳定能力,使其在支撑高比例新能源和电力电子设备接入的新型电力系统稳定性方面具有显著优势。深入理解构网型储能区别于跟网型储能的惯量支撑特性,并据

此优化构网型储能控制策略及相关测试标准, 将提升储能系统涉网性能带来重要的系统性价值。

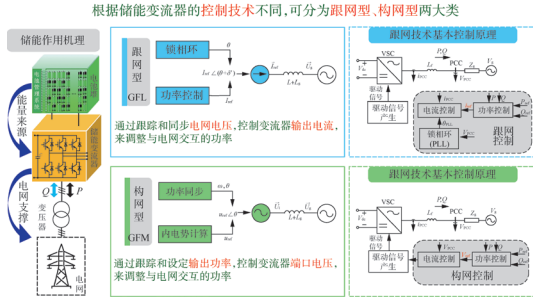


图 1 构网型和跟网型储能技术原理示意图

Fig.1 Principle of grid-type and grid-type energy storage technology

1.2 基于虚拟同步控制的构网型储能惯量支撑可调可变关键参数

构网型储能的技术原理表明, 其核心在于通过电力电子变流器的控制策略设计, 使储能系统能够作为电压源运行, 具备自主的电压与频率支撑能力。这一功能通过图2所示的虚拟同步控制策略实现。

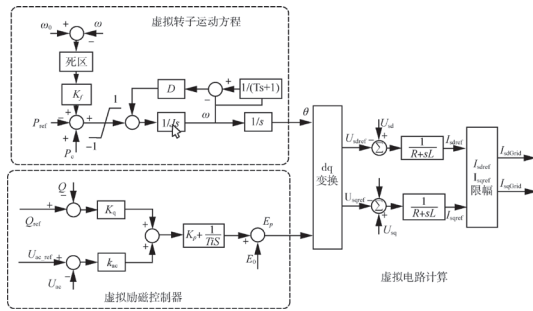


图 2 构网型储能虚拟同步控制策略示意图

Fig.2 Schematic diagram of virtual synchronous control strategy for grid-connected energy storage

具体而言, 构网控制策略模拟了传统同步发电机的一次调压方程和转子运动方程, 形成虚拟同步机特性, 从而为系统提供虚拟惯量和阻尼支撑, 并确保系统在离网状态下仍能稳定运行。基于同步发电机有功功率控制的转子运动方程, 可进一步推导出如式(1)所示的虚拟转子运动方程频域表达式。

$$Js[\omega(s) - \omega_0] = P_c(s) - P_{ref}(s) + D\left(\frac{1}{0.2s+1} - 1\right)[\omega(s) - \omega_0] - K_f[\omega(s) - \omega_0] \quad (1)$$

式中: J 、 D 和 K_f 分别为构网型储能等效的虚拟同步机转动惯量、阻尼系数和一次调频的下垂系数; ω 为实时的转子角频率; ω_0 为额定角频率; P_c 为实时的有功功率; P_{ref} 为给定的有功功率参

$$\text{令: } \begin{cases} \Delta\omega(s) = \omega(s) - \omega_0 \\ \Delta P(s) = P_c(s) - P_{ref}(s) \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{则: } Js\Delta\omega(s) = \Delta P(s) + D\left(\frac{1}{0.2s+1} - 1\right)\Delta\omega(s) - K_f\Delta\omega(s) \quad (3)$$

2 高压直挂式大容量构网型储能虚拟惯量的实测验证方法设计

2.1 基于参数辨识的构网型储能虚拟惯量与阻尼参数辨识模型

针对式(4)给出的传递函数, 参考参数辨识方法^[16], 本文推导了构网型储能系统虚拟惯量参数的解耦计算方法。为简化参数辨识过程的数学表达式, 进行如下变量替换, 令:

$$\Delta\omega_1(s) = \frac{\Delta\omega(s)}{1+0.2s} \quad (5)$$

则式(4)可改写为:

$$G(s) = \frac{\Delta\omega_1(s)}{\Delta P(s)} = \frac{1}{0.2Js^2 + (J + 0.2D + 0.2K_f)s + K_f} \quad (6)$$

采用后向差分法将上式离散化, 可得到:

$$G_1(z) = \frac{1}{0.2Js^2 + (J + 0.2D + 0.2K_f)s + K_f} \bigg|_{s=\frac{1-z^{-1}}{T}} = \frac{K}{1 - az^{-1} - bz^{-2}} \quad (7)$$

式中: T 为连续信号经理想采样的采样周期; K 、 a 、 b 为引入的中间变量, 具体表达式如下:

$$\begin{cases} K = \frac{1}{\frac{0.2J}{T^2} + \frac{J + 0.2D + 0.2K_f}{T} + K_f} \\ a = \frac{\frac{0.4J}{T^2} + \frac{J + 0.2D + 0.2K_f}{T}}{\frac{0.2J}{T^2} + \frac{J + 0.2D + 0.2K_f}{T} + K_f} \\ b = \frac{-\frac{0.2J}{T^2}}{\frac{0.2J}{T^2} + \frac{J + 0.2D + 0.2K_f}{T} + K_f} \end{cases} \quad (8)$$

将 $G_1(z)$ 改写如下:

$$(1 - az^{-1} - bz^{-2})\Delta\omega_1(z) = K\Delta P(z) \quad (9)$$

得到递推表达式如下:

$$\Delta\omega_1(n) = a\Delta\omega_1(n-1) + b\Delta\omega_1(n-2) + K\Delta P(n) \quad (10)$$

式中: $n \in [3, 4, \dots, N]$, N 为离散数据长度。

对应的相量方程为:

$$\Delta\dot{\mathbf{u}}_{1N} = \ddot{\mathbf{O}}_N \dot{\mathbf{e}} \quad (11)$$

其中:

$$\begin{aligned} \Delta\omega_{1N} &= [\Delta\omega_1(3), \Delta\omega_1(4), \dots, \Delta\omega_1(N)]^T \\ \ddot{\mathbf{O}}_N &= [\varphi_3, \varphi_4, \dots, \varphi_N]^T \\ \varphi_N &= [\Delta\omega_1(N-1), \Delta\omega_1(N-2), \Delta P(N)]^T \\ \dot{\mathbf{e}} &= [a, b, K]^T \end{aligned} \quad (12)$$

$\dot{\mathbf{e}}$ 的最小二乘法估算值 $\hat{\mathbf{e}}$ 为:

$$\hat{\mathbf{e}} = (\ddot{\mathbf{O}}_N^T \ddot{\mathbf{O}}_N)^{-1} \ddot{\mathbf{O}}_N^T \Delta\dot{\mathbf{u}}_{1N} \quad (13)$$

根据试验实测数据, 求解出 $\hat{\mathbf{e}}$, 即得到中间变量 K 、 a 、 b 的值, 再根据上述3个变量的定义表达式, 即可解得 J 、 D 、 K_f 。

2.2 构网型储能虚拟惯量的实试验证方法设计

由前述构网型储能惯量与阻尼的参数辨识模型可知, 需通过试验获取式(12)中 $\ddot{\mathbf{O}}_N$ 序列实测值, 进而可求得构网型储能虚拟惯量关键参数。阶跃信号为测试控制系统性能的典型输入形式, 其反映输入信号在某一时刻在2个恒值之间的突变, 非线性强且变化陡峭, 若某一系统在阶跃信号作用下能满足要求, 则在其他信号作用下也能满足要求^[17]。因此, 本文以功率控制阶跃作为输入, 获取构网型储能在受到阶跃信号干扰后的有功功率和频率响应特性, 进而可利用2.1节所述的参数辨识方法求得构网型储能的虚拟惯量、阻尼等关键参数。

此外, 考虑构网型储能具有并、离网稳定控制的双重支撑能力, 为保证项目实测结果能充分反映储能构网支撑性能, 并可在实际的大容量高压直挂式构网型储能电站开展测试, 本文设计了如图3所示的有功功率控制阶跃试验和跟网、构网储能对拖功率阶跃试验分别对并网、离网工况下的虚拟惯量

进行测试。

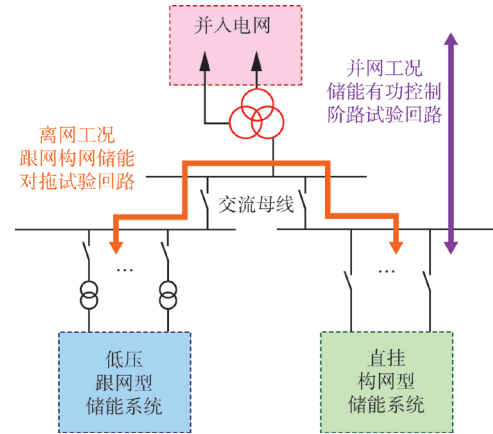


图3 构网型储能虚拟惯量实试验示意图

Fig.3 The schematic diagram of the virtual inertia test of grid-connected energy storage

3 高压直挂式大容量构网型储能虚拟惯量实试验结果分析

3.1 试验验证算例系统

本文基于福建省某百兆瓦级大容量储能电站开展虚拟惯量工程实测。该储能电站总装机容量为200 MW/400 MW·h, 其中跟网型和构网型储能装机容量均为100 MW/200 MW·h。构网型储能主要由“柔性直流换流系统”和“直流直挂储能系统”等部分组成, 能够在百毫秒内响应电力系统调节需求, 具有较强的电网安全稳定支撑能力。该储能电站的“柔性直流换流系统”是实现构网支撑特性的核心模块, 采用虚拟同步控制策略如式(1)所示的虚拟转子运动方程), 使储能电站具备惯量、阻尼及一次调频等功能。

3.2 惯量测试结果

基于前述大容量高压直挂构网型储能电站, 开展了虚拟惯量测试。测试设定并网和离网工况下构网型储能的有功功率和频率初始运行值分别为50 Hz、-40 MW以及49.95 Hz、0 MW。频率阶跃扰动下的实测录波响应曲线如图4所示。从图4可以看出, 在并网工况下, 构网型储能的功率调节能在频率扰动发生后几十毫秒内快速响应, 并在约300 ms内有效抑制频率的大幅波动; 而在离网工况下, 有功功率和频率调节几乎同步, 有功功率响应可在百毫秒内完成。结果表明, 无论是并网还是离网工况, 构网型储能均可通过有功功率控制对系统频率扰动进行快速响应, 并有效抑制频率的大幅振

荡，从而为系统提供稳定支撑。

对图4所示的响应曲线进行等间隔数据提取，根据式(8)(12)(13)计算得到试验辨识结果如表1所示。

表1 惯量测试辨识结果

Tab.1 Inertia test identification results

参数	设定值	并网工况测试值	离网工况测试值	最大误差 /%
惯性时间常数	8	8.20	7.76	2.98
阻尼系数	45	45.10	45.79	1.75

表1数据表明，在并网和离网工况测试中，构网型储能系统的实测惯性时间常数误差控制在3%以内，阻尼系数误差不超过2%。考虑到工程实践中存在的试验仪器录波数据噪声干扰、参数辨识数据截取合理性等不可避免的影响因素，虚拟惯量参数的辨识结果与设定值之间存在一定偏差是可以理解的。需要指出的是，目前针对高压大容量直挂构网型储能的虚拟惯量实测研究尚未见报道。参考现有新能源发电机组的虚拟惯量评估结果^[18-20]，本文提出的构网型储能虚拟惯量实测方法的参数测试误差均小于5%，优于现有研究误差水平，这表明该方法具有较高的测试准确度。

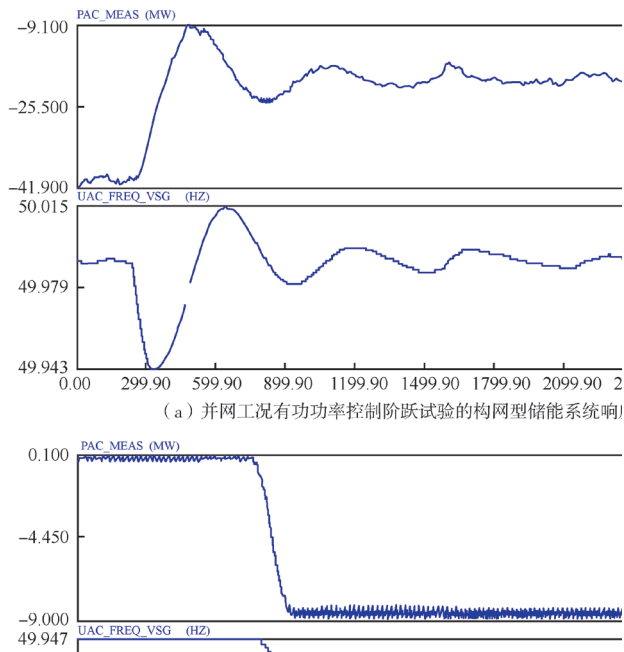


图4 构网储能功率控制阶跃试验结果示意图

Fig. 4 Schematic diagram of step experimental results of energy storage power control in grid structure

基于实测获得的惯量和阻尼参数，可以评估构网型储能在电网频率扰动时的支撑能力。以0.5 Hz/s的频率下降速率为例，根据并网工况测试数据

计算得出，相配构网型储能能够提供24.1 MW的有功功率支撑

综合分析测试结果可知，本文研究的储能电站在系统频率跌落时的惯量支撑能力，相当于1台额定容量140 MW、惯性时间常数8 s的同步发电机。这一量化结果直观反映了构网型储能对电力系统的同步稳定支撑作用，将为构网控制策略的优化升级和储能技术推广应用提供重要参考。

需要说明的是，在近端短路故障工况下，受并网变流系统过流能力限制，构网型储能的支撑能力与同容量同步发电机仍存在差异。

4 结论

本文基于构网型储能虚拟惯性响应特性的分析和模拟参数辨识原理的研究，提出了一种适用于大容量高压直挂构网型储能的虚拟惯量实测方法。该方法能够较准确地评估各构网储能电站的等效惯量，相关理论分析和福建省某百兆瓦级构网型储能电站的实测数据验证表明：

(1) 研究提出的高压直挂构网储能虚拟惯量实测方法具有较高的测量精度，为评估高压直挂构网储能的惯量支撑性能提供了可靠的定量分析手段。该方法不仅能为高压直挂构网储能的优化配置和运行控制提供切实可行的理论依据，还能高比例新能源电力系统的安全稳定运行增添灵活多样的技术保障。

(2) 基于福建省某百兆瓦级储能电站的实测数据分析表明，构网型储能的惯量支撑性能可超越同等容量的同步发电机。测试结果显示，该方法成功实现了虚拟惯量参数的有效解耦，实测误差控制在3%以内，能够准确表征储能的虚拟惯量性能表现。这项研究不仅为量化评估构网型储能对电力系统的同步稳定支撑提供了有效手段，更为构网型储能在新型电力系统中的规模化应用及相关标准体系完善提供了重要技术支撑。与此同时，构网型储能兼具传统储能的能量存储优势，且不存在环保问题，更有利于电力系统消纳高比例新能源。本研究可以为能源电力行业提供更加经济环保的投资决策参考。

(3) 本研究创新性地设计了并网工况下构网储能有功功率阶跃响应测试与离网工况下跟网、构网储能对拖功率阶跃响应试验，提出了一种能够同时评估构网型储能在并网与离网状态下支撑能力

的虚拟惯量实测方法,从而全面刻画其惯量支撑特性。该方法可为构网储能在弱电网支撑、黑启动等应用场景的拓展提供技术参考。

参考文献

- [1] ALEX V J,MIGUEL S R,DANNY E S,et al.Deploying Renewable Energy Sources and Energy Storage Systems for Achieving Low-Carbon Emissions Targets in Hydro-Dominated Power Systems:a Case Study of Ecuador[J]. Renewable Energy,2025,241:122198.
- [2] 陈昌铭,章天晗,沈子康,等.新型电力系统的发用电侧共享储能商业模式研究综述[J].电力系统自动化,2025,49(15):20-42.
CHEN Changnin,ZHANG Tianhan,SHEN Zikang,et al. Review of Shared Energy Storage Business Models on and User Sides in New Power Systems[J].Automation of Electric Power Systems,2025,49(15):20-42.
- [3] KISHORE G I,NALAMATI C S,AGRAWAL A.A Novel Zero Back Power Flow (ZBPF) Controlled Dab for DC Bus Stability and Energy Storage Integrations in Hybrid DC/AC Off-Grid Systems[J].Journal of Energy Storage,2024,105:114547.
- [4] ZHU N X,HU P F,JIANG C X,et al.Comparative Analysis and Optimal Allocation of Virtual Inertia from Gridforming and Grid-Following Controlled ESSs[J]. Renewable Power Generation,2024,18(14): 2416-2429.
- [5] YAN W H,VAHAN G,PRZEMYSŁAWK,et al. Regional Power System Black Start with Run-of-River Hydro-power Plant and Battery Energy Storage[J].Journal of Modern Power Systems And Clean Energy,2024,12(5): 1596-1604.
- [6] BADAQJSHAN S,RAHMAN J,ZHANG J,et al. Black Start of Coastline Power Networks from Grid-Forming Ship-to-Grid Services[J].2024,15(2):1670-1679.
- [7] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会.电化学储能电站接入电网测试规程:GB/T 36548—2024[S].北京:中国标准出版社,2024.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of China. Test Code for Electro-Chemical Energy Storage Station Connected to Power Grid:GB/T 36548—2024[S]. Beijing: China Standards Press,2024.
- [8] 中国电工技术学会.构网型储能系统并网测试规范:T/CES 244—2023 [S/OL].中国电工技术学会,(2023-12-27),[2025-06-25].<https://expo.ces.org.cn/xhtml/files/24030057-1.htm>.
China Electro-Technical Society.Grid-Forming Energy Storage System Grid-Connection Test Specification: T/CES 244—2023[S/OL].China Electro-Technical Society,(2023-12-27),[2025-06-25].<https://expo.ces.org.cn/xhtml/files/24030057-1.htm>.
- [9] ZHANG G Q,ZHAO X R,WANG Q W,et al.PR Internal Mode Extended State Observer-Based Iterative Learning Control for Thrust Ripple Suppression of PMLSM drives[J].IEEE Transaction on Industrial Electronics,2024,39(8):10095-10105.
- [10] LEE J,JANG S,KIM D,et al.A Discrete Multitone Wireline Transceiver Datapath with On-Chip Sign-sign LMS Adaptation and Loading Profile Optimization on RFSoc[J]. IEEE Transaction on Circuits and Systems II-Express Briefs,2024,71(12):4889-4893.
- [11] ZHANG R , WANG G , LI Z ,et al.Virtual Inertial Control of Small and Medium Sized Wind Turbines on Mobile Offshore Platforms with DC Microgrids[J].International Transactions on Electrical Energy Systems, 2024, 2024(1):3886096. DOI:10.1155/2024/3886096.
- [12] 刘俊杰,殷小东,余佑成,等.一种构网新能源发电装备虚拟惯量的计算方法及系统:CN 119378755A[P]. 2024.
LIU Junjie,YIN Xiaodong,YU jiecheng,et al.Method and System for Calculating Virtual Inertia of Grid-Forming Renewable Energy Generation Equipment:CN 119378755A[P].2024.
- [13] REN P.DONG YC,ZHANG H L,et al.A Unified Robust Planning Framework for Hydrogen Energy Multi-Scale Regulation of Integrated Energy System[J].Energy,2025,314:134325.
- [14] 王冠淇,裴玮,熊佳旺,等. 新能源场站跟网/构网变流器协同控制策略综述[J].高电压技术,2025,51(2):793-805.
WANG Guanqi,PEI wei,XIONG Jiawang,et al.Review of coordinated Control Strategies for Renewable Energy Station with Grid-Following and Grid-Forming Inverters [J]. High Voltage Engineering,2025,51(2):793- 805.
- [15] TAFIZARE E,RAHIMI M.Grid-Following and Grid-Forming Control Modes of the Rotor and Grid Sides Converters for Seamless and Universal Operation of the Hybrid DFIG-Wind/ Battery Energy Storage System in Grid-Connected and Stand-Alone Conditions[J]. Journal of Energy Storage,2024,104:114623.
- [16] XIE F,YU F,AN C C.Research on Dynamic Identification of Servo Motor Load Inertia Based on the Error Gain Factor Model[J].Energies,2021,14(20): 6664.
- [17] 马燕峰,李金媛,王子建,等.基于量测数据的新能源电力系统区域等效惯量评估方法[J].电工技术学报,2024,39(17):5406-5421.

MA Yanfeng,LI Jinyuan,WANG Zijian,et al.Assess- ment Method of Regional Equivalent Inertia of New Energy Power System Based on Measured Data[J].Tra- nsactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(17):5406–5421.

- [18] ZHANG J B,XU H C.Online Identification of Power System Equivalent Inertia Constant[J].IEEE Transac- tions on Industrial Electronics,2017,64(10):8098–8107.

- [19] 李世春,徐松林,李惠子,等.风电场等效虚拟惯量快速估计方法[J].电网技术,2021,45(12):4683–4691.

LI Shichun,XU Songlin,LI Huizi,et al.Rapid Estimation of Equivalent Virtual Inertia of Wind Farm[J]. Journal Power System Technology,2021,45(12): 4683–4691.

- [20] 安军,盛帅,周毅博,等.基于量测数据的风电场等效虚拟惯量评估方法[J].电网技术,2023,47(5):1819–1829.

AN Jun,SHENG Shuai,ZHOU Yibo,et al.Evaluation of Equivalent Virtual Inertia of Wind Farm Based on Measured Data[J].Journal Power System Technology,2023, 47(5):1819–1829.

收稿日期：2025 年 6 月 30 日

作者简介：



陈雨鸽

陈雨鸽(1998),女,硕士,工程师,研究方向为储能运行与调控等, 807897763@qq.com。



石吉银

石吉银(1981),男,硕士,高级工程师,研究方向为继电保护与自动化等, 75175303@qq.com。



林文彬

林文彬(1987),男,硕士,高级工程师,研究方向为通信工程等, 28847785@qq.com。



张抒凌

张抒凌(1997),女,硕士,工程师,研究方向为储能安全管控等, 573917554@qq.com。



李建平

李建平(1998),男,硕士,工程师,研究方向为电动汽车聚合调控等, 2228945734@qq.com。



李智诚

李智诚(1988),男,通信作者,博士,高级工程师,研究方向为构网型储能运行控制等, 565339368@qq.com。