

低惯量新型电力系统频率安全评估与 惯量协同控制研究综述

沈赋^{1,2}, 魏子玉¹, 束洪春^{1,2}, 曹旻³, 华昊辰³, 王健^{1,2}, 单节杉^{1,2}

(1. 昆明理工大学电力工程学院, 昆明市 650500; 2. 昆明理工大学省部共建智能电网故障检测与保护控制
协同创新中心, 昆明市 650500; 3. 河海大学电气与动力工程学院, 南京市 211100)

摘要:【目的】在高比例可再生能源(renewable energy sources, RES)与电力电子设备大规模接入的背景下, 传统同步发电机(synchronous generator, SG)占比持续下降, 导致新型电力系统的等效转动惯量显著削弱, 系统频率安全与稳定运行面临严峻挑战。本文旨在围绕电力系统惯量建模、安全评估与协同控制三大关键领域, 对国内外相关研究进展进行系统梳理与综合评述, 深入分析低惯量电力系统所面临的核心科学问题与关键技术瓶颈, 明确未来研究的重点方向, 为低惯量、高不确定性新型电力系统的安全稳定运行提供理论依据与技术路径参考。【方法】系统构建了低惯量新型电力系统安全稳定分析的核心技术体系。首先, 分析了低惯量电力系统的本质特征与运行机理, 在此基础上建立多维度惯量建模框架, 涵盖同步发电机等效惯量建模、电力电子接口设备建模以及多时间尺度动态建模方法。其次, 构建面向全运行场景的安全评估方法体系, 包括频率安全评估、在线动态安全评估及不确定性条件下的安全评估方法。最后, 提出面向空间、多时间尺度特性的协同控制策略, 实现风电、光伏、储能与负荷等多类资源的协同优化控制, 为系统规划与运行提供技术支撑。【结果】系统总结了低惯量新型电力系统从特性分析、惯量建模、安全评估到协同控制的完整技术体系, 深化了对低惯量电力系统运行机理与安全问题的认识, 为相关理论研究与工程实践提供了重要参考。【结论】本文研究对保障高比例可再生能源接入条件下新型电力系统的安全、稳定与高效运行具有重要意义。

关键词: 新型电力系统; 低惯量; 安全评估; 协同控制

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2026)08-0066-22

DOI: 10. 12204/j. issn. 1000-7229. 2026. 08. 006

Review on Frequency Security Assessment and Coordinated Inertia Control for Low-Inertia Modern Power Systems

SHEN Fu^{1,2}, WEI Ziyu¹, SHU Hongchun^{1,2}, CAO Yang³, HUA Haochen³,
WANG Jian^{1,2}, SHAN Jieshan^{1,2}

(1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;
2. State Key Laboratory of Collaborative Innovation Center for Smart Grid Fault Detection, Protection and Control Jointly,
Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 3. School of Electrical and Power
Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

ABSTRACT: [Objective] The large-scale integration of high-penetration renewable energy sources (RES) and power-electronic-interfaced devices has continuously displaced the conventional synchronous generators (SG). This transition has led to a significant reduction in the equivalent rotational inertia of modern power systems, posing unprecedented challenges to frequency security and stable operation. This paper systematically reviews and critically analyzes the state-of-the-art research on power system inertia modeling, security assessment, and coordinated control. By identifying key scientific issues and technological bottlenecks associated with low-inertia power systems, this study clarifies future research priorities and establishes theoretical foundations and technical pathways to support the secure and stable operation of highly uncertain, low-inertia modern power systems. [Methods] This paper develops a comprehensive technical framework for the security and

基金项目: 国家自然科学基金项目(62563016); 云南省应用基础研究计划项目(202501AS070456, 202201AU070111); 云南省兴滇英才支持计划项目(KKRD202204021); 昆明理工大学高层次人才平台建设项目(KKZ7202004004)

stability analysis of low-inertia modern power systems. First, the fundamental characteristics and operational mechanisms of such systems are examined, based on which a multi-dimensional inertia modeling framework is established, including equivalent inertia modeling of synchronous generators, modeling of power-electronic-interfaced devices, and multi-timescale dynamic modeling. Second, a unified security assessment framework covering diverse operating conditions is proposed, incorporating frequency security assessment, online dynamic security assessment, and assessment under uncertainty. Finally, coordinated control strategies are developed from both spatial and multi-timescale perspectives to enable the optimal coordination of heterogeneous resources—including wind power, photovoltaic systems, energy storage, and flexible loads—thereby supporting system planning and operation. [Results] This paper systematically summarizes the complete technical framework of low-inertia modern power systems, encompassing characteristic analysis, inertia modeling, security assessment, and coordinated control strategies. The presented review deepens the understanding of operational mechanisms and security challenges in low-inertia power systems and provides valuable references for both theoretical research and engineering practice. [Conclusions] The findings offer critical technical support for ensuring the secure, stable, and efficient operation of modern power systems with high penetration of renewable energy sources.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 62563016), Yunnan Applied Basic Research Project (No. 202501AS070456, No. 202201AU070111), Yunnan Xingdian Talent Support Program (No. KKRD202204021) and High-level Platform Construction Project of Kunming University of Science and Technology (No. KKZ7202004004).

KEYWORDS: modern power system; low inertia; security assessment; coordinated control

0 引言

在“双碳”目标的引领下,风电、光伏等可再生能源(renewable energy sources, RES)装机容量持续快速增长,新能源发电正由传统的补充能源逐步转变为电力系统的主体电源之一,推动电力系统由同步发电机(synchronous generator, SG)主导形态向高比例电力电子化方向演进。

在新型电力系统中,大量新能源发电单元通过逆变器电源(inverter-based resources, IBR)并网运行。与传统同步发电机依赖转子动能提供固有转动惯量不同,IBR本身不具备物理惯量,其对系统频率的支撑能力高度依赖控制策略。随着同步发电机容量占比持续下降,系统整体转动惯量水平显著降低,电力系统逐步呈现出典型的低惯量运行特征。在此运行条件下,系统对有功功率扰动的缓冲能力明显减弱,频率变化速率加快,频率稳定裕度下降,传统依赖同步机惯量支撑的频率稳定分析方法和控制策略面临严峻挑战^[1]。

在低惯量运行条件下,电力系统频率动态特性及稳定机理显著改变。一方面,在相同扰动下,系统频率下降速度加快、频率最低点降低,易触发基于频率变化率(rate of change of frequency, RoCoF)或频率越限的保护动作,严重时可能引发连锁脱网甚至大规模停电事故^[2]。

近年来,多起典型电力系统频率稳定事故凸显了低惯量运行带来的安全隐患。例如,2016年南澳大利亚大停电事故以及2019年英国“8·9”大停电事

件,均发生在系统惯量水平较低的运行时段。事故分析表明系统在扰动初期缺乏足够的惯量支撑是频率失稳的重要诱因之一^[3]。另一方面,频率支撑机制由同步发电机主导的被动惯量响应转变为电力电子设备控制策略主导的主动响应,其动态特性及稳定机理更加复杂。因此,准确刻画高比例新能源条件下系统惯量的动态特性及其空间分布规律,是开展频率安全评估与频率支撑控制的前提条件^[4-5]。

在惯量表征方面,惯量建模与动态评估旨在刻画系统频率响应机理,是后续分析的基础。针对高比例电力电子接入条件下传统方法适用性不足的问题,相关研究主要包括机理建模、数据驱动辨识及机理-数据融合3类方法。机理建模方法通过扩展摆动方程引入虚拟惯量环节,实现多类型资源的统一建模^[6],数据驱动辨识及机理-数据融合方法依托扰动响应与广域测量数据,实现系统等效惯量的在线估计,并在相量测量单元(phasor measurement unit, PMU)等高精度量测技术支持下不断提升精度与适应性^[7-9],上述惯量建模与在线辨识结果不仅用于描述系统惯量水平,还为后续频率安全评估中的RoCoF计算、频率最低点预测以及最小惯量需求分析提供关键参数基础。尤其在低比例新能源场景下,系统惯量呈现显著时变性与区域差异性,其建模精度将直接影响频率安全裕度评估结果的准确性。

在惯量需求分析方面,相关研究重点关注最小惯量评估问题。现有方法通常基于RoCoF与频率偏差约束,对典型扰动下维持频率安全所需的最小惯量进行量化分析^[10];现有研究已覆盖双馈感应发电

机(doubly-fed induction generator, DFIG)惯量评估、电力电子并网装备惯量特性分析以及互联电网频率安全评估等多个层面,初步形成了从建模、辨识、评估到调控的技术体系^[11-13]。然而,该类方法多基于确定性场景,难以反映新能源波动及负荷不确定性对惯量需求的影响。因此,惯量需求分析不仅用于判定系统在典型扰动下的频率安全边界,还可进一步量化系统惯量缺额,为后续构网型设备惯量参数配置、储能容量分配及多资源频率支撑策略设计提供依据。

在完成系统惯量表征及频率安全裕度评估后,需要进一步针对惯量不足场景设计频率支撑策略,以满足 RoCoF 约束、频率最低点约束及频率恢复性能要求。因此,协同控制问题本质上是基于安全评估结果对多类型资源惯量响应与调频能力进行优化配置的过程。现有研究主要通过构网型(grid-forming, GFM)控制,如虚拟同步发电机(virtual synchronous generators, VSG)和下垂控制来赋予电力电子设备类惯量响应特性^[14],并结合储能系统及可调负荷参与频率调节,通过优化调度提升系统整体动态性能。

面向更长时间尺度的频率调节需求,现有研究聚焦多类型频率支撑资源的协同调度。通过引入储能系统及可调负荷参与调频,并结合优化调度与能量管理策略,实现从惯量响应到一次调频乃至更长时间尺度调节的协调控制。同时,融合模型预测控制与机器学习方法的自适应策略逐渐被用于多资源协同优化^[15-16],然而,受不同资源动态特性差异影响,现有方法多局限于局部优化,系统级协同控制机制仍有待建立。

尽管针对低惯量电力系统惯量响应及频率控制问题,国内外已开展大量综述研究,但现有工作大多侧重于惯量建模、虚拟惯量控制或频率调节等单一方面,对“惯量表征-频率安全评估-频率支撑控制”之间的内在关联缺乏系统梳理。基于此,本文面向高比例新能源接入条件下低惯量电力系统的频率安全问题,围绕“惯量建模与动态评估—最小惯量需求分析—多资源频率支撑协同控制”这一技术主线展开综述,重点分析不同惯量表征方法对频率安全评估结果的影响,梳理 RoCoF 约束、频率最低点约束及频率恢复约束下的惯量需求评估方法,并进一步总结构网型设备、储能系统及柔性负荷协同参与频率支撑的关键控制策略与发展趋势。在此基础上,本文还对低惯量电力系统频率安全研究面临的关键问题与未来发展方向进行展望,以期对新型电力系统频率安全分析与控制研究提供参考。

1 低惯量系统的惯量表征与建模

1.1 低惯量新型电力系统的特征

随着新能源发电占比持续提高以及电力电子接口大规模并网,传统以同步发电机为主体的电力系统结构正发生深刻变革,系统整体转动惯量持续下降,呈现出显著的低惯量运行特征。综合已有研究成果,低惯量新型电力系统主要表现出以下 3 个方面的典型特征。

1) 同步机占比下降与系统惯量弱化。

目前同步发电机在系统总装机容量与实时发电结构中的占比显著下降,系统惯量来源发生根本性变化。同步发电机转子惯量长期以来构成电力系统抵御频率扰动的物理基础,其减少直接导致系统 RoCoF 增大、频率稳定裕度下降^[17]。在低惯量条件下,即便较小幅度的功率失衡,也可能引发快速且剧烈的频率波动,对系统安全运行构成严峻挑战。

电力系统的总惯量主要由并网运行的各同步发电机转子所具有的转动惯量叠加形成。系统惯量是衡量电力系统抵抗频率变化能力的重要物理量。通常采用系统等效惯量常数 H_{eq} 表征,其表达式为:

$$H_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^N H_i S_i}{\sum_{i=1}^N S_i} \quad (1)$$

式中: H_i 、 S_i 分别为第 i 台同步机或构网型设备的惯量常数、额定容量; N 为同步机或构网型设备的数量。

当系统出现有功功率不平衡时, RoCoF 与系统惯量成反比关系。该物理关系可通过经典的系统频率响应模型或简化的发电机摇摆方程进行描述。在忽略网络电磁暂态、机组控制非线性及空间分布效应的条件下,系统频率动态可近似表示为二阶等效频率响应模型,其典型表达式为:

$$2H_{sys} \frac{d\Delta f(t)}{dt} + D\Delta f(t) = \Delta P_g(t) - \Delta P_l(t) \quad (2)$$

式中: H_{sys} 为系统等效惯性时间常数; D 为系统阻尼系数; $\Delta f(t)$ 为频率偏差; $\Delta P_g(t)$ 、 $\Delta P_l(t)$ 分别为发电机、负荷的功率扰动。当 H_{sys} 降低时,即使是相同大小的功率扰动,也会引起更大、更快的频率变化。

需要指出的是,上述模型属于基于集中参数假设的等效频率响应模型,其本质上反映的是系统主导惯性与一次调频阶段的平均频率动态特性。该模型适用于分析大扰动初期的整体频率响应规律,以及惯量水平变化对 RoCoF 的影响机理。然而,在高比例新能源接入的低惯量电力系统中,由于构网型/跟网型变流器控制策略差异、频率空间分布特性、网络

强耦合效应以及电力电子快速控制动态的存在,系统频率响应往往呈现多时间尺度与非线性特征。因此,式(2)难以精确刻画新能源主导系统中的局部频率振荡、电磁暂态过程及复杂控制耦合行为,其更适合作为低惯量系统频率安全分析中的等效机理模型,而非适用于所有低惯量场景的一般化动态模型。

近年来,随着高比例新能源接入以及同步发电机占比持续下降,传统仅基于等效惯量常数表征系统惯量水平的方法已难以全面反映低惯量电力系统的动态特性。国际上通常采用系统惯量、RoCoF以及系统非同步电源渗透率(system non-synchronous penetration, SNSP) δ_{SNSP} 等指标衡量电力系统惯量水平。随着风电、光伏等非同步电源占比持续提高,系统同步惯量不断下降,电力系统逐渐由传统高惯量运行状态向低惯量甚至超低惯量运行状态演化。其中, SNSP用于描述非同步电源在系统供电中的占比,已成为爱尔兰、英国等具有高新能源渗透率电力系统的国家评估低惯量运行特性的关键指标。随着 SNSP 提高,系统频率动态响应加快, RoCoF 增大,频率安全问题日益突出^[18]。

其中, SNSP 已成为衡量高比例新能源系统惯量水平的重要运行指标,其定义为某一时刻非同步电源输出功率占系统总负荷与联络线交换功率之和的比例。

$$\delta_{\text{SNSP}} = \frac{P_{\text{Ns}}}{P_{\text{Load}} + P_{\text{Export}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: P_{Ns} 为风电、光伏等非同步电源输出功率; P_{Load} 为系统总负荷; P_{Export} 为联络线外送功率。

除 SNSP 外,惯量比 R_{IR} 也常用于衡量系统惯量下降程度,其定义为系统当前惯量与基准运行状态惯量之比。

$$R_{\text{IR}} = \frac{H_{\text{current}}}{H_{\text{base}}} \quad (4)$$

式中: H_{current} 为当前运行状态系统等效惯量; H_{base} 为基准工况下系统惯量。惯量比能够反映系统相对于传统运行方式的惯量衰减程度,在新能源高渗透率场景分析中得到广泛应用。

需要指出的是,目前国际上尚未形成统一严格的惯量等级划分标准,上述范围主要依据 IEEE、ENTSO-E、AEMO、EirGrid 及近年来低惯量系统频率稳定相关研究总结得到。因此,不同国家和地区通常会根据系统规模、运行方式及频率安全约束差异,对低惯量运行阈值进行适应性调整^[19-20]。

综合现有研究成果,不同惯量水平系统通常可依据 RoCoF、SNSP 及惯量支撑能力进行综合划分,如表1所示^[18]。

表1 不同惯量水平系统划分标准

Table 1 Classification criteria for power systems with different inertia levels

系统类型	RoCoF/ (Hz/s)	系统运行特性
高惯量系统	<0.2	同步机占比较高,频率变化缓慢,惯量支撑充足
中惯量系统	0.2~0.5	新能源渗透率提升,系统惯量呈现时变特性
低惯量系统	>0.5	电力电子化程度较高,频率对扰动敏感

2) GFL/GFM 并存。

随着同步发电机占比持续下降,电力电子逆变器逐渐成为连接新能源与电网的主要接口,其控制策略从根本上决定了并网单元的行为特性,并对系统动态特性产生关键影响。当前,新型电力系统正处于以跟网型(grid-following, GFL)逆变器为主、GFM 逆变器逐步应用的混合运行阶段^[21]。

GFL 逆变器核心是依赖一个锁相环(phase-locked loop, PLL)来精确跟踪电网的电压相位和频率。在此基础上,GFL 逆变器通常被控制为受控电流源,通过调节输出电流的幅值与相位实现有功与无功功率控制。由于其运行基准依赖外部电网电压,因此,GFL 逆变器本身不具备主动建立系统频率与电压的能力,其惯量响应主要依赖附加控制环节实现^[19]。

GFM 与 GFL 相反,GFM 逆变器不依赖 PLL 跟踪电网,而是能够主动建立系统电压与频率。GFM 逆变器能够有效改善低惯量系统频率稳定性,并提升系统扰动后的动态支撑能力^[22]。文献[23]进一步指出,未来高比例新能源系统将逐渐由传统同步机主导转向构网型逆变器主导运行模式,并通过下垂控制、虚拟同步机控制等策略实现类似同步机的动态特性^[24]。

在惯量支撑方面,GFM 逆变器可通过引入虚拟惯量与阻尼控制,在系统扰动初期快速调节输出功率,从而有效抑制 RoCoF,并改善系统频率稳定性^[25-26]。

相较于 GFM 逆变器能够自主建立电压与频率,GFL 逆变器高度依赖 PLL 进行同步,在弱电网条件下容易因 PLL 与电网阻抗耦合而引发低频振荡、小信号失稳及暂态同步问题^[27]。此外,GFL 逆变器短路电流贡献能力有限,难以提供类似同步发电机的故障支撑能力,而 GFM 逆变器由于具备电压源特性,在故障期间能够提供更强的电压与频率支撑,因此被认为是未来高比例新能源电力系统的关键技术。

针对 GFL 与 GFM 逆变器在故障响应、稳定性及

控制适配等方面的差异特性,已有研究进行了深入分析。文献[27]结合跟网型与构网型逆变电源的故障穿越策略,定量分析了两者正、负序等值阻抗的幅值与相位特性。文献[28]通过建立短路故障期间的系统解析模型,刻画了故障电流、并网点电压及输出功率的动态特征,并提出了一种切换控制策略,在单机及多机场景下均能够有效提升系统暂态响应能力。

随着新能源渗透率不断提高,电力系统逐渐呈现逆变器主导(inverter-based resource dominated, IBR-dominated)运行特征,其稳定问题逐渐由传统同步机电振荡问题转变为电力电子控制主导稳定问题。文献[29]指出,逆变器控制与电网阻抗之间的耦合作用已成为影响未来电力系统稳定运行的重要因素。文献[30]从阻抗建模角度分析了并网变流器的小信号稳定特性。文献[31]进一步指出,在低短路比条件下,PLL动态可能显著降低系统稳定裕度。相比之下,GFM逆变器由于不依赖PLL同步,能够主动建立系统频率与电压,因此在弱电网条件下具有更好的稳定支撑能力。

综上所述,现有研究已针对低惯量系统频率稳定、GFM/GFL控制特性以及弱电网稳定性等问题开展了大量研究。然而,目前关于高比例新能源条件下GFL与GFM混合运行系统的惯量支撑特性、频率动态响应机制以及多时间尺度频率安全评估方法仍有待进一步研究。

3)多源异构、多层级控制。

新型电力系统的复杂性不仅体现在电源接口的多样性,更体现在整个系统形态从过去由少数大型、同质化发电机组主导的集中式系统,演变为由海量、异构、分散的资源共同构成的复杂网络。

传统电力系统结构相对清晰,大型发电厂通过高压输电网络向负荷中心输送电能,并经配电网分配至终端用户。相比之下,新型电力系统呈现出显著的异构特性,风能、光伏、核能及氢能等多种能源形式并存,其出力特性及动态响应能力存在显著差异。在此背景下,系统惯量不再仅由同步发电机提供,而是由多类型资源共同决定,其等效表达可示为:

$$H_{\text{sys}} = \frac{\sum_{i=1}^n H_{\text{SG},i} S_i + \sum_{j=1}^m H_{\text{V1},j} S_j}{\sum_{i=1}^n S_i + \sum_{j=1}^m S_j} = \frac{\sum_{i=1}^n E_{\text{SG},i} + \sum_{j=1}^m E_{\text{V1},j}}{\sum_{i=1}^n S_i + \sum_{j=1}^m S_j} \quad (5)$$

式中: $E_{\text{SG},i}$ 、 $H_{\text{SG},i}$ 分别为同步发电机*i*的等效动能、虚拟惯量常数; $E_{\text{V1},j}$ 、 $H_{\text{V1},j}$ 分别为非同步发电机*j*的等效动

能、虚拟惯量常数; n 、 m 分别为同步发电机、非同步发电机的数量。

在多源异构特性基础上,系统运行与控制模式亦发生相应变化。虚拟电厂(virtual power plant, VPP)作为多类型资源聚合与多层级协同控制的重要实现载体,在新型电力系统中发挥关键作用。通过对分布式电源、储能及可调负荷等资源的统一建模与协调控制,虚拟电厂能够实现多类型资源在不同层级之间的协同优化调度,是连接局部资源与系统级控制的重要桥梁。

针对传统方法中存在的建模静态化、评估指标单一以及资源调节统筹不足等问题,相关研究从动态建模与分层控制角度进行了深入探索,文献[32]提出了一种基于储能充放电过程中容量衰减与效率退化特性构建的动态储能模型,整合风电、光伏、可调负荷及电网交易等多元能源形成“源-储-荷”协同运行的VPP模型。在频率支撑方面,虚拟电厂通过多层级控制结构实现系统级与局部资源响应的协同,文献[33]提出一种基于广域测量系统(wide-area measurement system, WAMS)的VPP频率主动支撑方法,构建兼顾全局与局部特性的频率控制策略,并利用灰狼优化算法实现协调反馈信号的最优分配,从而提高多资源参与频率调节的响应效率与协调性。

基于上述分析,从低惯量新型电力系统的核心特征出发进行多维度梳理,有助于更加系统地刻画其本质属性。图1给出了低惯量新型电力系统的结构组成及关键特征示意,并与传统高惯量电力系统形成对比,揭示了2类系统在运行机理及调节能力上的本质差异。

1.2 低惯量新型电力系统的建模方法

低惯量系统对功率失衡极为敏感,RoCoF增大,频率最低点下降,系统稳定边界收窄,惯量作为衡量系统频率抗扰动能力的核心指标,其精准建模是实现惯量动态调控、保障系统稳定运行的前提。现有研究围绕惯量建模的核心需求,结合新能源特性、储能配置、控制策略等多维度构建了多样化方法,但各类方法的建模逻辑、约束条件与应用场景存在显著差异,亟需从宏观视角梳理建模方法的核心框架,揭示不同方法的内在联系、解决的关键问题及面临的挑战,为后续研究提供清晰脉络。本节将围绕系统等效惯量建模、电力电子接口建模、多时间尺度建模3个方面,对当前研究进展进行系统性综述。

1)系统等效惯量建模。

传统电力系统中,系统惯量主要来源于同步发电机转子的旋转动能。由于同步机容量大、分布广

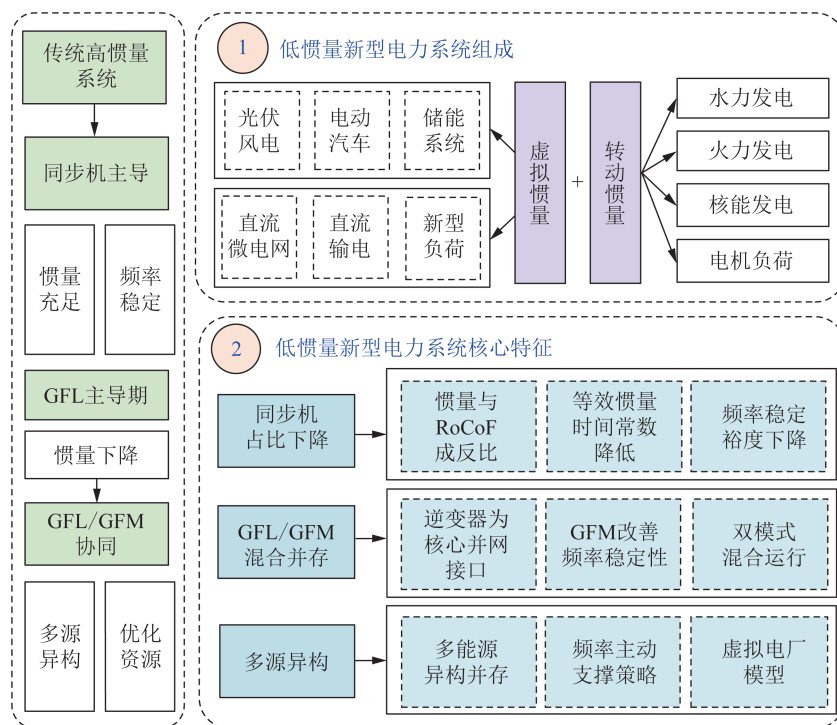


图1 低惯量新型电力系统组成及特征

Fig. 1 Composition and characteristics of the power system with low inertia

且动态特性相对一致,系统整体惯量水平通常较高,因此早期研究主要关注系统整体频率稳定性及暂态动态特性分析。在此背景下,电力系统惯量通常采用系统等效惯量进行统一表征,即通过聚合同步发电机惯量参数来描述系统整体频率响应能力。

在多机电力系统中,为统一刻画多类型惯量资源对系统频率动态的综合作用,通常引入系统等效惯量这一概念,系统等效惯量主要用于从全局角度描述系统整体频率响应能力,通常采用聚合参数形式表征系统平均惯量水平^[34]。然而,在高比例新能源接入条件下,不同区域新能源渗透率及同步机分布存在明显差异,即使系统整体等效惯量保持不变,局部区域仍可能出现频率支撑不足问题。因此,节点惯量概念逐渐受到关注,其主要用于描述局部节点或区域的惯量支撑能力以及惯量空间分布特性。相比系统等效惯量,节点惯量更加关注惯量的区域差异性 & 局部频率动态行为^[35]。

在建模方法方面,等效惯量建模正从传统的系统级平均化描述向节点级、机组级精细化建模发展,并由单一电源侧建模向源-荷协同建模拓展,同时更加关注多控制环节动态特性及多时间尺度效应的耦合刻画。文献[36]基于节点瞬时扰动不平衡功率与频率变化率之间的时空对应关系,构建了节点瞬时等效惯性时间常数计算模型,突破了传统方法的平均化假设,实现了对不同时间断面惯量响应能力的

节点级量化。文献[37]构建了涵盖机械、电气及控制全环节的频率响应全阶模型,系统揭示了PLL、桨距角控制及变流器控制等多环节对等效惯量动态特性的影响。文献[38]突破了仅关注电源侧惯量的建模局限,提出了一种计及负荷等效惯量的源-荷协同建模方法。

等效惯量的实时监测与短期预测是实现系统动态调度与在线安全评估的前提条件。围绕该问题,现有研究已形成了物理机理驱动与数据驱动相结合的发展路径,在兼顾实时性的同时提升预测精度。文献[7]提出了一种基于离散时间域的等效惯量在线监测方法,有效克服了传统算法收敛时间长、估计精度不足等问题,满足了在线应用对实时性与可靠性的要求。文献[39]提出时间卷积网络-双向长短期记忆网络混合预测模型,显著提升了等效惯量短期预测的精度与鲁棒性。

2) 电力电子接口建模。

随着风能、太阳能等可再生能源的大规模并网,电力系统的惯量特性发生了根本性变化。电力电子接口逐渐成为低惯量系统中的核心动态单元,其控制策略直接决定其所提供的虚拟惯量及频率支撑能力。根据并网控制方式的不同,电力电子变流器通常可分为GFL与GFM两大类^[14]。作为新能源并网的关键设备,GFL与GFM变流器在控制机理和性能特性上存在显著差异。文献[14]综述了GFL与GFM变

流器控制技术的发展现状,并将相关控制策略划分为单一模式控制、双模式切换与融合控制以及多机场站混合模式控制3类。GFL具有较优的功率跟踪性能,但在弱电网条件下稳定性不足;GFM变流器通过构建电压源特性主动参与电网电压与频率调节,其建模需体现虚拟同步特性或下垂控制机制。下垂控制是目前应用最广泛的GFM控制方式之一,其核心思想是通过建立输出有功功率与频率之间的静态映射关系,实现多逆变器间的功率分配与频率协调^[40]。由于下垂控制未显式引入转动惯量,其惯量响应能力相对有限,系统的瞬态频率调节主要依赖下垂系数的配置。当下垂系数较大时,系统频率调节能力下降;而下垂系数较小时,则可能引发低频功率振荡问题^[41]。

相比之下,虚拟同步机(virtual synchronous machine, VSM)控制通过模拟同步发电机的转动惯量和阻尼特性,可在频率扰动初期提供快速惯量响应,有效改善系统瞬态频率性能;同时,阻尼环节设计能够显著抑制低频功率振荡^[42-43]。改进下垂控制或惯量下垂控制则在保持下垂控制简单性的同时,通过引入虚拟惯量或动态阻尼调节,提高了系统对频率扰动的响应速度和振荡抑制能力^[44]。

因此,不同GFM控制方式在惯量模拟能力、阻尼配置灵活性以及功率振荡抑制效果上存在显著差异,这直接影响系统动态性能设计与参数优化策略^[45-46]。

针对低惯量系统频率支撑能力不足问题,国内外学者围绕虚拟惯量与快速频率响应(fast frequency response, FFR)开展了大量研究。针对同步惯量不足问题,虚拟惯量技术通过控制变流器快速释放储能或转子动能,实现对同步惯量动态特性的模拟,已成为新能源主动支撑频率稳定的重要技术路径。当前研究重点主要集中于惯量响应速度、频率支撑持续性以及虚拟惯量参数自适应优化等方面^[47]。文献[48]系统总结了虚拟惯量控制的发展现状,指出基于储能及电力电子控制的惯量模拟技术能够有效改善系统RoCoF及频率最低点特性。此外,随着频率安全问题逐渐由动态分析扩展至调度运行层面,频率最低点约束调度(frequency nadir constrained scheduling, FNCS)逐渐成为研究热点。相关研究通过建立惯量水平与频率动态响应之间的映射关系,将频率最低点与RoCoF约束直接引入机组组合与经济调度模型,实现惯量安全约束下的优化运行^[49-50]。研究表明,通过在机组组合与经济调度中引入频率约束,可有效提升高比例新能源系统频率安全水平,

为低惯量系统频率安全运行提供了新的研究思路。

在建模层面,虚拟惯量通过改变电力电子接口的动态响应特性,进而影响系统等效惯量水平。通过引入虚拟惯量控制环节,可使新能源发电与储能系统在扰动初期提供额外惯量支撑,从而改善频率动态性能。然而,需要注意的是,风电、光伏、储能以及直流电容提供虚拟惯量并非无限制,其输出能力受到能量储备和功率约束的限制^[32-34]。具体而言,储能系统的荷电状态(state of charge, SOC)、风光发电的实时功率以及直流母线电容的能量容量都会限制虚拟惯量的可用性,导致其只能在短时间内提供有效支撑。文献[51]针对大型风光储基地,建立了风-光-储虚拟同步惯量数学模型,同时考虑了储能SOC和发电功率约束,实现了等效惯量的动态调整。文献[52]提出一种基于有功暂态补偿(transient stability compensation, TSC)与虚拟惯量自适应的联合建模方法,通过一阶滞后环节构造暂态补偿量,并在建模过程中考虑了虚拟惯量输出的能量限制,实现“暂态抑制-自适应优化”的双层建模逻辑。文献[53]提出DFIG桨距角控制与虚拟惯量协同建模方法,在发电侧引入改进下垂控制桨距角减载备用模型,同时约束虚拟惯量输出范围,以兼顾动态与稳态频率性能。DFIG并网运行原理如图2所示。通过清晰标注各组件的接口关系、信号流向以及能量传输路径,图2直观呈现了系统中多部件的协同工作机制与内部逻辑结构,不仅揭示了DFIG各模块间的互联关系,也反映了其在电网运行中的拓扑特征和能量流动规律。

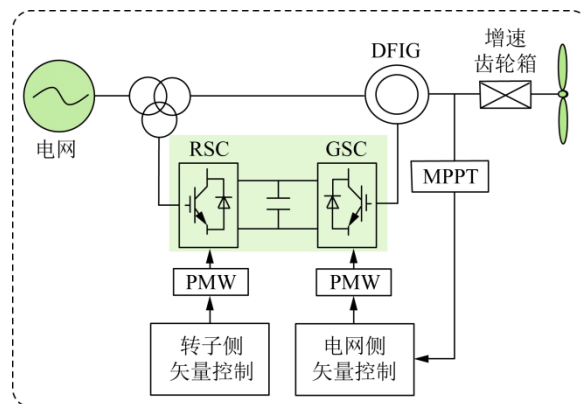


图2 DFIG原理

Fig. 2 DFIG schematic diagram

研究表明,电力电子接口建模是实现虚拟惯量功能的关键,而等效惯量则用于系统层面对多源惯量支撑能力进行统一量化表征,二者在建模层与评估层分别发挥作用,共同决定系统频率响应特性。

3)多时间尺度建模。

低惯量新型电力系统的动态过程跨越多个时

间尺度,从电力电子器件的微秒级、控制器的毫秒级、频率响应的秒级,到调度决策的分钟级至小时级,构成高度耦合的复杂动态系统。为了系统性展示低惯量新型电力系统中不同时间尺度下的惯量建模与频率支撑特性,本文将微秒级至小时级的系统动态进行了分类整理,明确各时间尺度对

应的典型设备、控制目标及主要稳定问题。表 2 给出了多时间尺度惯量建模的概览,秒级为惯量响应核心阶段,微秒级至毫秒级为辅助输入阶段,分钟级至小时级为频率支撑延迟调节阶段,为后续多时间尺度建模与控制策略设计提供直观参考。

表 2 多时间尺度惯量建模与频率支撑概览
Table 2 Overview of multi-time-scale inertia modeling and frequency support techniques

时间尺度	典型设备/模型	控制目标	主要稳定问题
微秒级	电力电子开关、快速保护装置	瞬时电流、电压波动最小化	开关暂态冲击、电流/电压尖峰
毫秒级	逆变器控制器、储能快速调节器	局部电压与功率稳定	小信号振荡、短时功率波动
秒级	虚拟同步发电机、储能系统、同步机	能量平衡、经济优化	频率超调
分钟级	储能调度、可调负荷、风光平滑	扰动可重复、信噪比高	中期功率偏差、设备疲劳
小时级及以上	发电机调度、储能计划、需求响应	长期频率安全、能量优化	功率缺口、频率漂移、调度不确定性

多时间尺度建模的核心在于匹配不同时间尺度下的响应特性与调控需求,其中惯量支撑主要作用于短时间尺度,而频率支撑贯穿中长期动态过程。因此,多时间尺度建模作为刻画系统动态行为并支撑控制策略设计与资源配置优化的关键手段,其本质在于实现不同时间尺度下调控需求与设备响应特性的协调匹配,已成为保障新型电力系统安全高效运行的重要技术支撑。

在多时间尺度支撑功能精细化建模方面,文献[54]量化了秒级至分钟级功率耦合关系,实现了惯量与频率支撑能力的精细表征,有效适配了高比例新能源接入条件下的频率安全与稳定运行需求。在多时间尺度分层优化控制建模方面,文献[55]提出了涵盖分钟级至小时级的深度强化学习(deep reinforcement learning, DRL)优化方法,通过储能跨时间尺度协调充放电,实现惯量需求变化下的调压协同控制。在多时间尺度协同调控建模方面,文献[56]针对双级储能虚拟同步发电机构建了秒级至分钟级功率平衡模型,实现惯量参数的精确计算与动态配置。文献[57]聚焦惯量建模中关键测量环节的优化问题,提出基于最小二乘法与无限脉冲响应(infinite impulse response, IIR)滤波的 RoCoF 测量建模方法,优化了秒级惯量响应的 RoCoF 测量环节,为多时间尺度惯量建模提供高质量输入数据。

总体而言,多时间尺度建模为统一刻画惯量支撑与频率支撑的协同作用提供了重要手段。然而,当前研究在跨尺度耦合机理、时间尺度划分标准以及不确定性适应能力等方面仍存在不足,尤其是在满足频率安全方面仍有待深化。

2 频率安全与安全惯量评估方法

2.1 频率安全评估方法

随着高比例新能源和电力电子设备的深度渗透,电力系统惯量水平持续下降,频率稳定问题已成为制约新型电力系统安全运行的核心瓶颈之一^[2]。在电力系统频率动态过程中,惯量支撑主要作用于扰动初期,通过同步发电机转子动能释放或电力电子装置的虚拟惯量控制抑制 RoCoF;频率支撑则贯穿整个频率响应过程,涵盖一次调频、快速频率响应以及储能与负荷侧调节等多类型调节手段。两者在作用机理与时间尺度上具有明显差异,但共同决定了系统在扰动过程中的动态演化特性。因此,低惯量电力系统的频率安全本质上取决于多类型频率支撑资源在不同时间尺度下的协同作用能力。为实现低惯量电力系统频率安全的快速评估,系统频率响应(system frequency response, SFR)模型被广泛应用于频率动态分析与惯量需求评估。传统单机 SFR 模型通常将系统等效为单台同步发电机,通过聚合惯量、阻尼及调频参数描述系统频率动态过程,具有结构简单、计算效率高等特点,广泛应用于频率安全快速评估及惯量约束调度研究^[58]。

随着高比例新能源及多区域互联系统的发展,传统单机 SFR 模型难以准确反映不同区域惯量分布差异及多资源动态耦合特性。为此,研究人员进一步提出基于惯量中心(center of inertia, COI)的多机聚合 SFR 模型,通过构建系统 COI 频率,更准确地描述系统整体频率动态行为及不同类型电源的频率响应贡献^[59]。相比传统单机 SFR 模型,COI-SFR 模型在低惯量系统频率最低点、RoCoF 及频率恢复过程分析

中具有更高精度,尤其适用于高比例新能源接入及区域互联系统场景。随着IBR占比持续提高,现有研究进一步关注面向新能源主导系统的扩展SFR建模方法,通过引入虚拟惯量、电力电子动态及多时间尺度频率支撑特性,以提升低惯量系统频率安全评估的准确性与适用性^[60-61]。

在多阶段频率响应背景下,为准确评估系统安全性,必须建立能够量化各阶段动态特性的评价指标体系。在扰动初期,系统频率对突发功率不平衡的瞬态敏感性决定了频率跌落速率,评价指标包括RoCoF和频率最低点,用于刻画惯量支撑能力和初期频率稳定性。在一次调频及快速频率响应阶段,系统频率由惯量响应过渡到调频资源主导控制,评价指标为准稳态频率偏差,反映调频资源的充分性及频率在短期的偏离程度。在长期恢复阶段,衡量系统频率恢复至允许波动范围所需时间,评价指标为频率恢复时间,反映系统动态恢复能力和长期稳定性。在此背景下,面向低惯量电力系统开展频率安全的精准评估,并建立能够反映多阶段动态特性的分析方法,已成为保障电网安全稳定运行的关键问题。

通过以上指标体系,可对低惯量电力系统在高比例新能源接入下的频率动态进行全面量化。基于此,本文进一步从惯量需求表征、频率安全快速评估以及非同步发电机承载能力评估3个维度,对低惯量电力系统频率安全评估方法进行系统综述。

惯量需求的科学定义与精准表征是频率安全评估的基础。现有研究多以单一频率指标作为约束条件,未能充分反映惯量响应的多阶段动态特性及不同频率安全防线的协同作用,容易导致评估结果偏于保守。针对前述问题,文献[62]从惯量支撑功率的时序响应特征出发,明确了电力系统惯量需求的定义。为量化惯量需求,该研究提出表征指标 H_{sur} ,从能量视角耦合惯量响应时变特性、调频能力相关性与故障严重程度,较传统指标更直观合理,并通过研究分析了惯量需求的主要影响因素及补偿机制,完善了惯量需求理论体系,为惯量资源的精准调控提供了重要依据。

在频率安全快速评估方面,需在计算精度与评估效率之间取得平衡。传统时域仿真方法计算量大,难以满足在线评估需求;而简化解析模型往往忽略关键非线性环节,易引入较大误差。针对上述矛盾,文献[63-64]分别从非线性环节修正与数据驱动建模2个方向提出解决方案。在“双高”电力系统中,多元异质资源的频率响应特性差异显著,且普遍存

在频率死区、功率限幅等非线性因素,传统简化模型难以准确刻画系统频率动态变化。为此,文献[65]聚焦“双高”电力系统中多元异质资源的频率响应特性,构建了多元异质资源系统频率响应模型,并通过一阶传递函数建立各类资源的通用低阶等值模型,为“双高”电力系统频率安全快速评估提供了新范式。

高比例非同步机电源接入导致系统惯量与调频能力同步弱化,其承载能力评估需综合考虑惯量约束与频率安全要求。针对传统方法忽略机组组合优化、模型精度不足等问题,文献[66]提出“优化-校验-修正”三阶段协同评估方法,实现了非同步机承载能力的精细化量化。在新能源高渗透条件下,传统调度方法未能充分耦合频率-惯量约束与新能源出力不确定性,系统安全性与经济性难以兼顾^[67-68]。文献[69]建立了考虑频率与安全惯量约束的多目标优化调度模型,为含储能系统的新能源消纳与频率安全协同优化提供了技术支撑。此外,数据驱动方法在频率安全在线评估中的应用也取得积极进展。针对时域仿真效率不足的问题,文献[70]将数据驱动方法与系统辨识技术相结合,针对量测数据饱和问题,提出引入可变遗忘因子的递推最小二乘算法,通过指数衰减机制增强对动态数据的跟踪能力,为高比例新能源系统的在线惯量监测提供了新工具。图3给出了低惯量电力系统频率安全评估的总体分析框架,从惯量需求表征、频率动态建模及非同步发电机承载能力评估3个方面系统刻画了评估问题的核心结构。该框架在统一不同评估方法作用机理及适用边界的基础上,揭示了各类方法在不同时间尺度与应用场景下的内在联系,为频率安全的定量分析与方法集成提供系统化视角,并为后续多时间尺度频率支撑资源的协同控制与优化调度奠定理论基础。

传统惯量评估通常假设系统惯量均匀分布,忽略电网拓扑结构和参数差异对频率响应的影响。随着“节点计算惯量”概念的提出,研究人员开始关注不同节点的惯量支撑能力差异。文献[71]提出了一种基于节点计算惯量的量化分析方法,为惯量空间分布特性的精细表征提供了新思路。与此同时,高比例非同步机电源接入使系统频率安全风险与新能源消纳需求之间的矛盾日益突出,现有评估方法多基于固定机组组合或简化模型,结果偏保守^[72]。在多直流送出电网中,直流外送与新能源高渗透之间的耦合作用加剧了系统频率与电压稳定风险。然而,现有评估方法尚未充分考虑多直流短路比等关键约束条件,导致相关评估结果在工程应用中的适

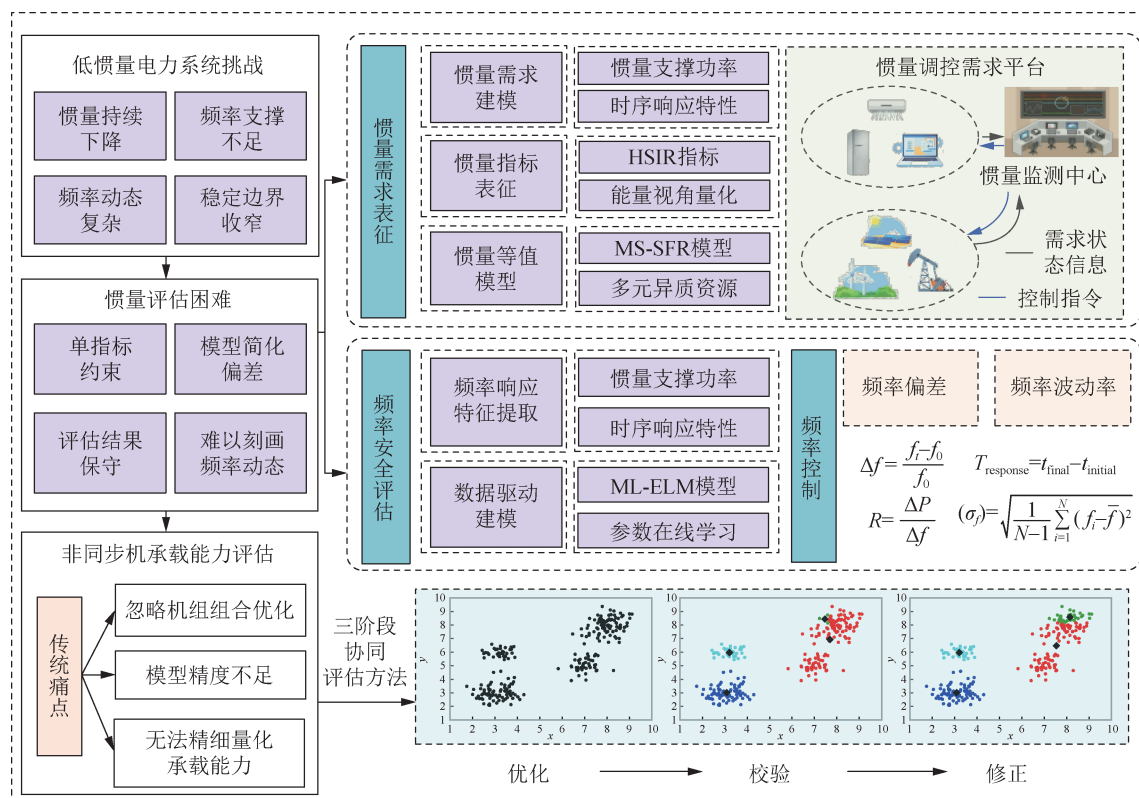


图3 面向低惯量电力系统的频率安全评估研究框架

Fig. 3 Framework of frequency security assessment for low-inertia power system

用性受到一定限制^[73-74]。针对上述问题,文献[75]提出了一种计及安全稳定约束的新能源极限渗透率评估方法,为多直流送出场景下电网规划与运行提供了重要的技术支撑。另一方面,随着低惯量问题对系统频率安全影响日益增强,研究重点从惯量表征扩展至惯量需求评估。在此基础上,安全惯量被用于描述系统满足 RoCoF、频率最低点及一次调频等安全约束条件下所需的最小惯量水平^[76]。因此,安全惯量并不对应具体惯量来源,而是频率安全评估中的约束指标,其本质反映的是系统维持频率稳定运行所需的最低惯量需求。

2.2 惯量在线动态安全评估方法

随着可再生能源在电力系统中的渗透率持续提升,传统依赖同步发电机的惯量支撑模式被逐步打破,系统惯量呈现出显著的时变特性且整体水平不断下降,易引发频率跌落加剧、稳定裕度降低等问题,严重威胁电力系统的安全稳定运行。作为实时掌握系统惯量状态、优化备用配置与控制策略的关键手段,惯量在线动态安全评估已成为当前电力系统领域的研究热点。现有研究主要聚焦于基于量测数据与先进系统辨识算法的在线惯量估计方法。

鉴于惯量在线评估是刻画系统惯量动态变化并支撑电网实时频率调控的重要基础,不同评估方法在适用场景、技术路径及评估精度等方面存在显著

差异,而相关差异将直接影响电网调度决策的科学性与时效性。因此,有必要对现有惯量在线评估方法进行系统性的分类与梳理,以明确不同方法的适用条件与技术特点。表3展示了新型电力系统惯量在线评估的方法分类,清晰呈现各类在线评估方法的基本原理及优点,为电网运行人员精准选用评估方案、优化惯量管控策略提供直观的参考框架。为进一步体现不同在线惯量估计方法在工程应用中的适用性差异,有必要从扰动条件、量测精度以及模型参数依赖程度等技术条件进行对比分析。不同方法对系统运行环境与数据质量的要求存在明显差异,其适用场景亦有所不同。

其中,动态回归扩展混合(dynamic regressor extension and mixing, DREM)方法因其收敛条件宽松、鲁棒性强及实时性优越等特点,逐渐发展为惯量在线动态安全评估的重要技术方向。新能源机组与系统频率之间的解耦特性改变了传统电力系统的惯量分布规律,其惯量响应机理与建模方法是开展惯量在线动态安全评估的基础。DFIG作为当前主流风电并网技术,本身不具备天然惯量,但可通过附加控制策略模拟惯量响应。文献[77]以DFIG参与的孤立电力系统为研究对象,系统分析了DFIG对系统频率扰动的动态贡献特性,为在线评估模型的参数校准提供了量化参考。得益于其宽松的收敛条件、较强

表 3 惯量在线评估方法分类
Table 3 Classification of online inertia estimation methods

方法类别	基本原理	扰动条件要求	测量精度要求	模型参数依赖程度	优点
基于 DREM 的方法	将频率动态建模为回归形式,通过回归扩展与混合实现参数解耦与快速收敛	需要系统存在一定频率扰动以保证动态可观测性,对持续激励要求较低	对频率测量精度较敏感,需抑制噪声影响	需要已知频率响应模型结构及部分系统参数	收敛条件宽松、实时性强
基于能量函数的方法	基于系统动能变化与频率偏差构建惯量估计模型	无需人为扰动,可利用自然运行波动进行估计	需准确获取频率与功率同步量测数据	对系统模型结构依赖较低	无需扰动事件、物理意义清晰
基于统计学习的方法	通过概率模型刻画频率与惯量的非线性映射关系	对扰动形式要求较低,依赖历史样本覆盖典型工况	对数据完整性与样本质量要求较高	对机理模型依赖较弱	无需物理模型、适应性强
基于可控扰动的方法	利用 HVDC 可控功率变化作为激励进行能量化积分	需要主动施加可控扰动	对测量噪声不敏感,估计精度较高	对系统模型参数依赖较低	扰动可重复、信噪比高

的抗扰能力及良好的实时性,DREM方法已成为惯量在线动态安全评估中的核心算法之一,相关研究已拓展至单机、区域级及大规模互联系统等多个层面。文献[78-79]针对传统在线估计方法依赖人工扰动、抗噪声能力不足等问题,提出了基于自回归外生模型与离散DREM的惯量在线估计方法。针对配电网中部分区域拓扑结构未知、量测信息受限等实际问题,文献[78]提出了一种基于同步输入与状态估计的惯量在线评估方法,通过同步估计系统状态与外部扰动,实现了在部分网络信息已知条件下对系统惯量与未知扰动的联合估计,为配电网等测量不完备场景下的惯量在线动态评估提供了新的技术路径。

扰动时间的准确检测是惯量在线评估的前提,传统方法需依赖预设阈值,易受系统波动影响。文献[79]提出扰动时间与惯量同步在线估计算法,解决了扰动时刻未知导致的估计偏差问题。文献[80]将DREM方法拓展至大规模互联系统,提出基于聚合模型的在线估计方案,仅通过PMU实时测量数据即可实现在线计算。针对PMU测量中普遍存在的相位同步误差及频率信号多模态干扰问题,文献[81]提出了一种基于能量函数的惯量在线估计方法,实现了系统惯量、阻尼系数及同步系数的同步估计,适用于含高比例新能源的复杂电力系统。文献[82]提出了一种基于广域测量数据的惯量在线估计方法,通过滑动窗口对频率及有功功率信号进行实时处理,实现了扰动时刻与系统惯量的同步估计。该方法利用惯量估计值在扰动期间的收敛特性,将惯量辨识问题转化为收敛性检测问题,从而避免了对扰动时刻及扰动幅值的先验依赖。此外,通过引入置信区间机制,有效抑制了振荡过程中的误检测问题。相比传统离线方法,该方法在实时性、鲁棒性及工程可实施性方面具有显著优势,但其性能仍受到测量噪声及采样率等因素的影响。

统计学习方法通过挖掘历史运行数据中频率与惯量之间的潜在映射关系,实现无需依赖系统物理模型的惯量在线估计,特别适用于数据积累充分的大规模电力系统。该类方法具有实时性高、鲁棒性强等优势,能够有效应对测量中断等复杂运行场景。文献[83]提出基于切换马尔可夫高斯模型的惯量在线估计方法,利用高斯混合模型刻画频率与惯量之间的非线性关系,并引入马尔可夫链描述时间序列的动态演化特性,实现了在无扰动条件下的连续惯量监测。

基于可控扰动的惯量在线评估方法通过主动引入可重复的功率扰动,并结合能量守恒原理实现惯量估计,其核心优势在于扰动信噪比高、可控性强,且能够同时计及发电侧与需求侧的惯量贡献。文献[84]提出了一种基于高压直流输电(high voltage direct current, HVDC)互联器功率扰动的惯量在线估计方法,将HVDC功率方向切换所产生的可控扰动作为激励输入,通过积分扰动功率与频率偏差之间的关系计算系统总惯量。文献[85]提出了一种基于多层感知器的惯量在线估计方法,通过周期性触发扰动对模型进行更新,以适应系统惯量的动态变化。

2.3 不确定性下的安全惯量评估方法

随着可再生能源发电的大规模渗透,电力系统中传统SG占比持续下降,系统惯量的时变性与不确定性显著增强。作为维持电网频率稳定的关键物理量,系统惯量的概率特性及其不确定性量化结果,直接影响运行决策与安全约束设置的合理性,相关评估方法已成为当前研究的重点方向。现有研究多依托PMU及WAMS获取的高精度量测数据,结合系统辨识理论、能量函数方法及摆动方程模型,形成了一系列针对惯量不确定性的评估技术体系。

综合现有研究成果,惯量评估中的不确定性主要来源于3个方面:1)测量的不确定性,包括PMU噪声、相位同步误差及数据缺失;2)模型的不确定性,

源于模型简化假设及参数选取偏差;3)运行场景的不确定性,涵盖扰动强度差异、可再生能源出力波动引起的惯量时变特性以及系统拓扑变化等因素。上述不确定性通常具有显著的随机性与时变性特征,需通过连续监测或概率建模方法加以刻画。

针对惯量不确定性的评估,目前已经提出了多种技术方法。为了便于系统理解各方法的技术路线、适用范围及特点,并为后续的针对性选用与优化提供参考,表4对现有的惯量不确定性评估方法进行

了分类梳理,同时总结了各方法的优势与局限性。

表 4 惯量不确定性评估方法分类

Table 4 Classification of inertia uncertainty assessment methods

代表性方法	主要数据来源	优点	局限性	典型适用场景
PMU 环境信号法	PMU/WAMS	无需大扰动,支持连续在线监测	信号幅值小,易受噪声影响,需校准	正常运行状态下的惯量连续监测
李雅普诺夫能量函数法	PMU 频率、功率	物理机理清晰,无需复杂模型	对测量精度敏感,难以刻画强非线性	中小扰动下的在线评估
多项式拟合	多节点 PMU	计算效率高,易于实现	依赖扰动事件,模型结构依赖强	扰动后惯量快速评估
BN 不确定性聚合	仿真+测量	可区分认知、偶然不确定性	建模复杂,计算量较大	规划与中长期安全评估
基于深度信念网络方法	大规模历史数据	非线性建模能力强,精度高	可解释性不足,需大量样本	实时概率评估与极端工况预测

环境信号作为电力系统正常运行状态下的自然扰动响应,其连续性优势为惯量在线监测提供了可能,但信号强度弱、噪声干扰等问题易引发评估不确定性。针对以上问题,文献[86]提出一种基于 PMU 环境测量数据的区域惯量在线估计方法,有效降低了单一测量通道或模型假设带来的不确定性。文献[87]提出基于 Teager-Kaiser 能量算子的事件检测方法,提升了环境信号条件下扰动时刻识别的准确性。文献[88]将系统辨识方法与扰动信号分类相结合,建立了“连续监测-精准校准”的双模式评估框架,有效抑制了环境信号随机性带来的累积不确定性。能量函数法通过解析系统能量转换关系实现惯量估计,其不确定性主要来源于 PMU 测量精度和模型假设简化。考虑到 PMU 数据传输过程中的数据缺失以及模型参数选取不当可能引入额外不确定性,文献[89]提出基于多项式拟合的惯量与阻尼系数联合估计方法,利用 WAMS 采集的多节点 PMU 数据计算系统中心惯量频率,在计及扰动强度差异的同时,为多运行场景下的不确定性补偿提供了有效手段。在概率评估层面,现有研究主要围绕贝叶斯网络、多项式混沌展开、蒙特卡罗模拟及敏感性分析等方法展开。文献[90]提出了基于贝叶斯网络的不确定性量化框架,实现了多源不确定性的聚合评估,提高了高维系统中惯量评估的计算效率,同时区分偶然不确定性与认知不确定性的贡献,为针对性降低不确定性提供了理论依据。文献[91]基于蒙特卡罗模拟生成训练样本,利用贝叶斯网络的学习能力构建可靠性评估模型,实现惯量的概率预测。文献[92]通过故障树或最小路径集构建贝叶斯网络,实现组件故障对系统惯量影响的因果推理,为惯量提升策略制定提供支持。文献[93]将贝叶斯网络与时间序列模拟相

结合,实现含时间维度的可靠性指标计算。此外,文献[94]基于协方差分析 (analysis of covariance, ANCOVA) 的灵敏度分析方法,将系统响应的不确定性分解为各随机变量的独立贡献与相关贡献,从而定量刻画相关性对系统性能的影响。该类方法为不确定性条件下的安全指标评估提供了重要理论基础。文献[95]提出基于切片采样蒙特卡罗马尔可夫链的高比例新能源系统等效惯量概率评估方法,实现了惯量组成特性的系统量化与高效不确定性传播。

深度学习作为机器学习的重要分支,凭借其较强的非线性映射能力与自动特征提取能力,在电力系统惯量评估与安全稳定分析领域得到广泛关注。针对不同类型的运行数据与动态特征,研究者构建了深度信念网络、卷积神经网络、循环神经网络等多种深度学习模型,以提高复杂运行场景下的惯量评估效率与概率预测能力。文献[96]提出了一种基于深度信念网络的暂态稳定关联惯量评估方法,通过多层特征学习提升了惯量概率评估的鲁棒性。文献[97]构建两级卷积神经网络架构,实现了惯量不确定性影响下的系统稳定状态识别,为大规模系统惯量快速评估提供了新的研究思路。

然而,深度学习方法在电力系统安全稳定评估中的应用仍存在一定局限性,其性能高度依赖训练数据的完整性与样本覆盖范围。当训练数据主要来源于典型运行工况时,模型对于极端扰动、低概率故障以及新能源出力剧烈波动等非典型场景的泛化能力可能不足,从而影响评估结果在实际运行中的可靠性。此外,深度学习模型通常缺乏明确的物理机理约束,其“黑箱”特性导致模型决策过程与特征贡献难以解释^[98]。对于频率安全评估等高安全性场

景,仅依赖数据驱动模型可能难以保证结果满足实际运行安全约束。

因此,当前研究逐渐由单纯追求预测精度转向兼顾物理一致性、安全可解释性与工程可信性的方向发展。一方面,通过引入系统频率响应模型、机理约束以及物理信息神经网络(physics-informed neural network, PINN)等方法,提高深度学习模型与电力系统动态规律之间的一致性^[99];另一方面,结合 RoCoF 约束、频率最低点校核以及在线安全验证机制,对模型输出结果进行后验安全校核,以增强其在实际调度与安全控制中的应用可靠性^[100-101]。因此,深度学习方法更适合作为频率安全评估与惯量预测的辅助分析工具,其工程应用仍需与机理模型及安全约束分析相结合。

3 安全惯量协同控制策略

集中式控制由于灵活性不足、单点故障风险高,难以适应分布式资源高渗透率的应用场景。相比之下,分布式协同控制凭借可靠性高、可扩展性强等优势,通过多智能体交互与分布式算法优化,实现惯量支撑资源的协同控制,逐渐成为解决惯量安全问题的关键技术路径。本章聚焦安全惯量协同控制,系统综述目前基于分布式协同控制策略及多时间尺度协调机制的研究进展,梳理相关核心算法、应用场景及技术特征,为后续研究提供参考。

3.1 基于分布式的协同控制策略

随着分布式电源大规模并网及电力系统结构的去中心化发展,系统惯量呈现出明显的空间分散特征。传统集中式控制难以适应多区域、多主体协同运行需求,分布式协同控制策略通过局部信息交互与自主决策,实现全局惯量支撑与频率稳定目标,已成为惯量安全调度的重要实现路径。目前针对分布式电源并网、孤岛电网运行等不同场景以及信息对称、公平分配、经济性提升等差异化优化需求,已经逐步形成一致性算法、构网型储能分布式协同控制、加权一致性与成本感知型协同算法三大核心路径。

一致性算法作为分布式协同控制的基础方法,通过相邻节点之间的信息交互实现系统状态的一致收敛,为惯量支撑资源的协同调度提供了理论基础。文献[102]提出连续时间与离散时间一致性算法,通过拉普拉斯矩阵描述通信拓扑,有效解决分布式电源出力分散导致的惯量信息不对称问题。文献[103]将平均一致性算法应用于风储协同控制场景,为惯量响应资源的优化分配提供数据支撑,实现了惯量响应资源的优化分配与频率调节协同控制。然

而,分布式一致性控制的有效实施通常依赖于通信网络连通性、邻居节点信息实时交互以及算法迭代收敛等条件。当通信拓扑发生变化、链路时延增大或节点信息丢失时,系统一致性收敛速度与协同控制稳定性将受到影响,严重情况下可能导致惯量支撑响应失效。此外,随着分布式电源规模扩大,迭代计算与通信负荷增加,也会对算法实时性与系统鲁棒性提出更高要求。因此,如何在复杂通信环境下保证一致性算法的快速收敛与稳定运行,已成为分布式惯量协同控制研究的重要方向。

分布式孤岛电网由于脱离主网惯量与调频支撑,其惯量不足和电压稳定问题尤为突出,构网型储能的分布式协同控制逐渐成为该类系统的重要解决方案。分布式构网型储能(distributed grid-forming energy storage, DGES)通过模拟同步发电机特性,为系统提供虚拟惯量与电压支撑,成为提升低惯量系统稳定性的关键技术^[104]。该类策略以本地化控制为核心,并结合分布式通信架构,实现多储能单元的惯量协同支撑。在控制架构方面,文献[105]构建了多层级分布式控制架构,其中能量管理系统负责全局调度,变流器管理系统执行控制分配,储能变流器实现能量调节,电池管理系统保障运行安全,从而实现惯量支撑能力的精细化分配。

在此基础上,加权一致性与成本感知型协同算法通过引入权重因子及经济约束,提升了资源分配的公平性与经济性。文献[106]提出了一种基于加权一致性的分布式分配算法,通过邻居节点之间的迭代交互,实现需求响应任务的公平分配,避免局部惯量支撑能力的过度集中或不足。文献[107]针对电池储能系统(battery energy storage system, BESS)成本异质性问题,提出成本感知型一致性算法,通过引入局部辅助变量并进行信息交互,实现惯量支撑功率的优化分配。文献[108]针对柔性负荷与储能资源在时间维度上的耦合特性,提出一种引入相对功率约束变量的改进一致性算法,通过抑制惯量响应资源在时间上的集中释放,使惯量支撑在时间维度上更加均匀。

相关分布式协同控制策略已在风储协同运行、孤岛电网以及柔性负荷参与调频等多种应用场景中得到验证。研究结果表明,此类方法能够有效提升系统频率稳定水平,使频率偏差、RoCoF 等关键指标满足相应的安全运行要求。表 5 对各类控制算法的优势与局限进行了系统归纳,可为后续控制策略的工程应用、算法选型以及优化提供重要参考^[102-108]。

表 5 分布式协同控制算法分类

Table 5 Classification of distributed coordinated control algorithms

技术类型	优点	缺点
一致性算法 ^[102-103]	结构简洁、易实现;仅需局部信息交互,无需中心节点控制;能有效消除惯量信息差,为协同控制奠定基础	无经济约束与权重设计,难以实现任务公平分配及经济性优化;对通信拓扑可靠性依赖较高
构网型储能分布式协同控制 ^[104-105]	适配孤岛电网、低惯量系统场景;惯量支撑与设备安全管理兼顾;实现惯量精细化分配	控制体系结构复杂,各层级协同难度较高;对设备硬件性能要求高
加权一致性与成本感知型协同算法 ^[106-108]	兼顾公平性与经济性,适配多类型资源协同场景;能优化时间维度惯量支撑均匀性;适配储能成本异质性及柔储耦合特性	算法设计复杂,需引入辅助变量与约束条件;迭代交互过程对通信实时性要求更高

总体而言,现有研究已逐步构建起多维度的分布式协同控制惯量安全防护体系,基于一致性算法的控制方法奠定了全局信息协同的理论基础,通过局部信息交互实现惯量支撑资源的全局协调与优化;Leader-Follower算法依托分层控制架构,在兼顾控制效率的同时保持分布式特性,能够灵活适应不同规模和拓扑结构的电力系统。构网型储能的分布式控制策略则通过主动提供虚拟惯量,有效提升了低惯量系统的频率响应能力。引入事件触发机制的协同控制方法在保证控制性能的前提下降低了通信频率,从而减少了惯量控制过程中对通信与计算资源的消耗。加权一致性及成本感知控制算法实现了惯量支撑在安全性、公平性与经济性之间的协调统一。

3.2 面向多时间尺度特性的协同控制策略

随着高比例可再生能源并网及 HVDC 跨区域输电技术的广泛应用,电力系统惯量水平持续下降,系统动态过程呈现出显著的多时间尺度特征。单一资源难以在不同时间阶段同时满足惯量响应与调频需求,多资源协同控制通过构建“惯量响应-一次调频-二次调频”的时间协调机制,实现惯量支撑的动态优化配置。

作为跨区域电能传输的核心载体,HVDC 依托其快速、可控的功率调节能力,与可再生能源的惯量响应特性相结合,为低惯量系统提供了一种重要的惯量支撑手段。现有研究主要围绕电压源型高压直流(voltage source converter-based HVDC, VSC-HVDC)与风电系统之间的协同机制展开,通过合理设计控制策略以实现不同惯量支撑资源之间的动态匹配。文献[109]针对多区域异步电网,提出 HVDC 频率控制器与区域电网的协同控制策略,优化 HVDC 频率控制器的下垂参数与惯量参数,最终通过状态空间模型验证了策略对系统惯量和阻尼的提升效果。文献[110]针对含大规模 DFIG 的电网换相换流器的高压直流输电(line commutated converter-high voltage

direct current, LCC-HVDC)送端系统,提出 DFIG 与 LCC-HVDC 的多时间尺度协同惯量控制策略,使惯量支撑的时效性与经济性得到平衡。在控制结构方面,多阶段协同策略逐渐成为研究重点,文献[111]提出基于快速功率补偿(rapid power compensation, RPC)的多源协同策略,构建“RPC 模式-下垂控制模式-稳态模式”的三段式协同框架,避免了惯量支撑过程中的二次频率波动。针对典型应用场景,文献[112]通过 VSC-HVDC 与海上风电场的协同控制,为受端电网提供瞬时惯量支撑,在低风速场景下通过储能与风电的协同维持惯量安全。文献[113]提出常规电源-可再生能源-HVDC 的协同需解决“惯量响应-一次调频-二次调频”的多时间尺度匹配问题,保障协同控制的经济性与安全性。可再生能源 LCC-HVDC 送端电力系统结构如图 4 所示。

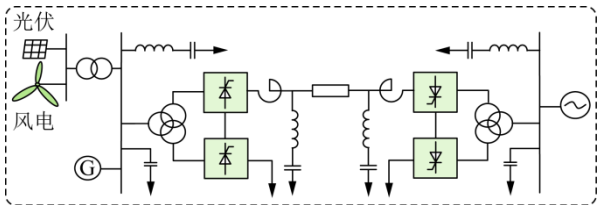


图 4 可再生能源 LCC-HVDC 送端电力系统结构

Fig. 4 Structure of LCC-HVDC sending end power system with renewable energy

图 4 所示结构可充分发挥 DFIG 虚拟惯量的快速响应优势与 LCC-HVDC 的持续有功调节能力,其通过将系统扰动过程划分为暂态、动态和稳态等不同阶段,协调两者的控制时序和参数配置,实现系统惯量在各阶段的精准匹配与高效支撑,从而显著改善送端系统的频率动态响应特性,提升整体抗扰动能力和频率稳定性。

随着高比例可再生能源并网、HVDC 技术规模化应用及电动汽车(electric vehicles, EV)的普及,电力系统惯量水平持续下降,多时间尺度协同控制逐步向多源融合方向发展。文献[114]针对风电场经柔直并网系统,提出基于协同控制理论的无通信惯量

支撑策略,其整合 DFIG 的转子动能与柔直系统的直流电容储能,既发挥了柔直的毫秒级响应优势,又挖掘了风机的惯量调节潜力。文献[115]针对高比例 RES 与 EV 并网场景,提出 RES-EV-HVDC 多源协同惯量控制框架,建立了横向资源互补和纵向时序协同的惯量支撑网络,形成全时间尺度的惯量支撑链条。文献[116]提出基于分布式模型预测控制(distributed model predictive control, DMPC)的多子系统惯量协同策略,将系统分解为多个互联子系统,为

跨区域、大规模多资源惯量协同提供了可行路径。

为进一步体现不同多资源协同惯量控制方法之间的技术差异,表6对现有典型研究的协同对象、时间尺度、核心控制策略以及适用场景进行了系统对比。由表6可以看出,现有研究已逐渐由传统“风电-HVDC”双源协同模式,发展为融合储能、电动汽车及多区域子系统的多源协同框架,其控制目标也由单一惯量支撑扩展至频率稳定、经济优化与鲁棒控制等综合目标^[109-116]。

表 6 多资源协同惯量控制典型技术特征比较
Table 6 Technical comparison of multi-resource coordinated inertia control strategies

技术路线	典型协同对象	核心特征	主要优势	关键问题
双源协同控制 ^[109-110]	风电-HVDC、LCC-HVDC	利用 HVDC 快速调节与风机虚拟惯量互补,实现暂态惯量支撑	响应速度快,适用于低惯量场景	控制参数耦合强,协调能力有限
多时间尺度协同控制 ^[111]	风电-HVDC-常规机组	“惯量响应-一次调频-二次调频”协调机制	提升全过程频率稳定性	多阶段切换复杂
多源融合协同控制 ^[114-115]	RES-EV-HVDC-储能	多类资源横向互补与纵向时序协同	提升惯量支撑灵活性与资源利用率	资源不确定性较强
分布式协同控制 ^[116]	多区域互联系统	基于 DMPC 等分布式优化实现多主体协同	适用于大规模系统	通信与计算复杂度高

总体来看,多资源协同惯量控制技术正由传统双源协同模式向多源融合与分布式智能协同方向发展,其研究重点也由单一惯量补偿逐渐扩展至多时间尺度协调优化、系统鲁棒性提升以及大规模异构资源协同控制等方面。

4 惯量协同控制的挑战与研究展望

4.1 惯量评估与协同控制面临的挑战

尽管现有研究在惯量评估方面已取得一定进展,但在新型电力系统背景下仍面临诸多基础性挑战。首先,系统惯量由传统近似恒定参数演变为受新能源出力、运行方式及网络拓扑共同影响的时变量,其时空分布呈现显著动态性与不均衡特征,使基于静态假设的评估方法难以准确反映实际惯量水平。其次,惯量评估高度依赖频率及相角量测,而量测噪声、采样延迟及可观测性不足等问题在实际系统中普遍存在,尤其在扰动初期低信噪比条件下易引入较大估计误差。此外,频率响应过程涉及频率死区、功率限幅及控制饱和等非线性环节,并跨越毫秒级至秒级多时间尺度,使现有模型在精度与复杂度之间难以兼顾。最后,高比例新能源接入导致随机波动、多扰动叠加及运行方式频繁变化,使惯量需求与分布的不确定性显著增强,现有方法在复杂及极端场景下的适应能力仍有待提升。

多资源协同控制通过时序协调与参数优化整合 VSC-HVDC、风电场、BESS 及 SG 等资源的惯量支撑

能力,但不同资源在动态特性及控制参数耦合方面存在显著差异,增加了协同控制设计的复杂性。其中,时序匹配问题尤为突出,各类资源在响应速度与作用时段上的差异使固定参数策略难以适应动态工况。例如,下垂系数过小将限制 VSC-HVDC 的瞬时支撑能力,而过大则可能引发风机转速恢复与 SG 接管过程之间的时序冲突。同时,控制参数间的强耦合性使单参数调整可能引起多资源响应联动,增加优化难度。现有方法多针对特定工况设计,对随机风速及多扰动场景的适应性有限,导致实际运行中的鲁棒性不足。

在大规模系统及极端运行条件下,上述问题进一步凸显。现有研究多基于 WSCC-9 节点、IEEE-123 节点等小规模系统,其结论在实际电网中的可推广性仍有待验证。从系统层面看,分布式惯量资源空间分散且分布不均,协同控制依赖跨区域通信,通信时延与信息不完备性成为关键约束;同时,可再生能源出力与负荷波动叠加使惯量需求呈现更强不确定性,增加了评估与控制难度。在极端扰动场景下,多扰动叠加与惯量缺额可能导致单一资源支撑能力迅速耗尽,需依赖多资源深度协同维持频率稳定。然而,现有控制策略对极端场景适应性不足,且扰动初期惯量响应有限、频率变化速率加快,压缩了控制调节时间窗口,从而显著加剧系统频率稳定风险。

4.2 研究展望

电力系统伴随 RES 的大规模并网,正逐步向“电

力电子接口主导”的运行形态演变,惯量安全问题也日益受到关注。RES固有的低惯量特性对系统惯量分布格局、动态响应机制及稳定边界产生了深远影响,并在一定程度上呈现出惯量资源分散化、多主体响应差异化以及安全约束复杂化等特征,从而对惯量评估、调度与协同控制方法提出了新的挑战。针对现有电力系统惯量评估与协同控制方法的局限性,未来研究可从跨区域协同调度、多资源协同控制及惯量资源价值量化等方面进行探索。

首先,跨区域惯量资源的协同调度与优化配置机制有待系统构建。高比例RES并网导致惯量资源在空间分布上呈现显著不均衡特征,区域间惯量余缺互补需求日益突出。借助VSC-HVDC等灵活直流输电技术,构建“分布式惯量资源聚合-跨区域传输-动态优化配置”的协同调度框架,有望提升系统整体惯量支撑能力与频率安全裕度。然而,受制于跨区域通信延迟及运行不确定性,该类机制在实际应用中的有效性与鲁棒性仍需研究。

其次,面向多资源协同的低延迟控制策略与时序协调机制仍需深入探索。不同惯量支撑资源在响应速度与作用时间尺度上存在显著差异,叠加通信时延与控制耦合效应,易引发协同控制失配问题。未来可结合DMPC或弱通信依赖的控制策略,优化GFM设备、储能系统及同步发电机之间的响应时序与控制参数,以提升多资源协同控制的实时性与稳定性。

此外,多类型惯量支撑资源在响应速度与作用时间尺度上的显著差异,使得传统惯量评估方法难以覆盖“瞬时-动态-稳态”的全时序频率安全需求,也难以对精细化调控提供可靠支撑。现有研究多聚焦单一时间尺度及传统频率指标,难以刻画高比例RES并网系统下多时间尺度耦合的复杂动态特性。因此,面向多时间尺度的惯量建模与评估方法亦是值得重点关注的研究方向。通过构建统一的多时间尺度分析框架,实现惯量响应过程的精细刻画与频率安全的全流程评估,有助于支撑多资源协同优化与系统安全运行。

与此同时,随着WAMS及人工智能技术的发展,基于数据驱动的惯量在线辨识与频率安全预测方法也逐渐成为低惯量系统研究的重要方向。相比传统模型驱动方法,数据驱动方法在处理高维运行数据、复杂非线性耦合关系以及运行不确定性方面具有潜在优势,有望提升惯量感知与频率安全评估的实时性与自适应能力。然而,如何解决模型泛化能力不足、训练数据与实际运行场景不匹配以及物理机理

约束缺失等问题,仍是未来需要重点突破的关键技术难点。

5 结 论

低惯量系统的惯量表征与建模、安全稳定评估及协同控制策略体系,作为破解高比例可再生能源并网引发的系统惯量衰减难题、保障电力系统安全稳定运行的核心技术集群,不仅是厘清低惯量系统动态特性、筑牢安全运行底线的基础,还对优化频率调节资源配置、提升系统应急响应能力、推动高比例可再生能源规模化并网具有重要意义。本文系统综述了低惯量系统在惯量表征与建模、安全惯量与稳定性评估方法以及惯量安全协同控制策略等方面的研究进展,并结合低惯量系统的运行特性,对未来研究方向进行了分析与展望。通过梳理电力系统由传统高惯量形态向低惯量形态演进过程中,惯量表征方式、评估方法及控制策略的发展脉络,深入比较了不同技术路径的优势与局限,重点分析了其在高比例可再生能源渗透背景下的适用性与挑战。

在惯量表征与建模方面,不同方法在建模精度、计算复杂度及应用场景适配性等方面各具特点,是精准刻画低惯量系统本质特性的核心基础。在安全稳定评估方面,在线动态评估方法强调实时性与快速响应能力,概率与不确定性评估方法能够有效应对低惯量系统中广泛存在的随机性与波动性,而频率安全评估方法则直接聚焦低惯量系统最为关键的频率稳定风险,3类方法相互补充,共同构成较为完整的惯量安全评估体系。在控制策略层面,分布式协同控制策略契合分布式电源大规模接入的系统拓扑特征,多资源协同控制策略强调各类调节资源之间的协调联动,以充分释放系统整体调节潜力,而通用惯量安全协同控制框架则为不同控制手段的统一建模与分析提供了理论基础。

通过构建“惯量表征-安全评估-协同控制”一体化技术体系,有望在保障低惯量系统运行安全性与稳定性的同时,兼顾经济性与运行效率,为低惯量电力系统的规划、运行与优化提供系统性的理论支撑与实践指导,对实现高比例可再生能源背景下电力系统的安全稳定运行与高效调控具有重要意义。

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):

沈赋、束洪春、曹旻进行了研究设计;魏子玉、王健参与了论文写作;华昊辰、单节杉参与了论文修

订。所有作者均阅读并同意了论文终稿内容。

6 参考文献

- [1] 朱东海, 马玉梅, 胡家兵. 电网故障下新能源并网系统多时间尺度暂态稳定问题与研究现状[J]. 中国电机工程学报, 2026, 46(1): 212-231.
Zhu Donghai, Ma Yumei, Hu Jiabing. Multi-timescale transient stability issues and research status of renewable energy grid-connected systems during grid faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2026, 46(1): 212-231.
- [2] 傅国斌, 杨凯璇, 孙海斌, 等. 低惯量电力系统频率安全约束优化运行研究综述与展望[J]. 中国电力, 2025, 58(9): 148-163.
Fu Guobin, Yang Kaixuan, Sun Haibin, et al. Frequency security constrained optimal operation of low-inertia power systems: review and prospects[J]. Electric Power, 2025, 58(9): 148-163.
- [3] 樊陈, 姚建国, 张琦兵, 等. 英国“8·9”大停电事故振荡事件分析及思考[J]. 电力工程技术, 2020, 39(4): 34-41.
Fan Chen, Yao Jianguo, Zhang Qibing, et al. Reflection and analysis for oscillation of the blackout event of 9 August 2019 in UK[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(4): 34-41.
- [4] 张圣祺, 刘何毓, 汪飞, 等. 面向电网二次调频需求的“PXP”储能集群分布式均衡控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(3): 886-898.
Zhang Shengqi, Liu Heyu, Wang Fei, et al. A balancing control strategy for “power-X-power” energy storage cluster in system load frequency control[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(3): 886-898.
- [5] 葛磊蛟, 郑轶文, 李小平, 等. 高比例分布式光伏接入下配电网多类型储能优化配置技术综述[J]. 浙江电力, 2025, 44(5): 1-11.
Ge Leijiao, Zheng Yiwen, Li Xiaoping, et al. A review of optimal allocation technologies for multi-type energy storage in distribution networks with high penetration of DPV[J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(5): 1-11.
- [6] 陶思钰, 江福庆. 集群化发展模式下风电场预测、规划及控制关键技术综述[J]. 电力工程技术, 2024, 43(1): 86-99.
Tao Siyu, Jiang Fuqing. Review of the key technologies of wind farm cluster prediction, planning and control[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(1): 86-99.
- [7] 宋魁. 基于离散时间域的电力场站汇集点等效惯量监控[J]. 现代工业经济和信息化, 2025, 15(8): 252-254.
Song Kui. Monitoring and analysis of equivalent inertia of power station convergence point based on discrete time domain[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2025, 15(8): 252-254.
- [8] 曹斌, 原帅, 刘家豪, 等. 考虑频率动态响应实时分区的电力系统惯量在线评估方法[J]. 电网技术, 2023, 47(3): 930-940.
Cao Bin, Yuan Shuai, Liu Jiahao, et al. Power system online inertia estimation considering real-time clustering of frequency dynamic response[J]. Power System Technology, 2023, 47(3): 930-940.
- [9] 汪进锋, 田野, 江霖, 等. 计及碳-绿证市场耦合的新能源和储能虚拟惯量-阻尼调度方法[J]. 广东电力, 2025, 38(8): 80-90.
Wang Jinfeng, Tian Ye, Jiang Lin, et al. Optimal virtual inertia-damping scheduling method for renewable energy and energy storage considering carbon-green certificate market coupling[J]. Guangdong Electric Power, 2025, 38(8): 80-90.
- [10] 王彦婷, 文云峰, 郑文伟, 等. 电力系统临界惯量需求的优化仿真协同评估方法[J/OL]. 中国电机工程学报, 2025-07-24. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20250724.1529.013>.
Wang Yanting, Wen Yunfeng, Zheng Wenwei, et al. Optimization and simulation synergetic approach for power system critical inertia requirement assessment[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2025-07-24. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20250724.1529.013>.
- [11] 王彤, 邢其鹏, 李鸿恩, 等. 计及虚拟惯量控制的DFIG等效惯量在线评估与响应特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(11): 52-60.
Wang Tong, Xing Qipeng, Li Hongen, et al. Online evaluation and response characteristics analysis of equivalent inertia of a doubly-fed induction generator incorporating virtual inertia control[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11): 52-60.
- [12] 贾焦心, 杨添淇, 颜湘武, 等. 电力电子并网装备等效惯量评估研究进展[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(9): 3-10.
Jia Jiaoxin, Yang Tianqi, Yan Xiangwu, et al. Research progress on equivalent inertia estimation of grid-connected power electronic devices[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(9): 3-10.
- [13] 刘翔宇, 李慧斌, 顾雪平, 等. 考虑惯量充裕度与频率变化率的互联电网在线频率安全分析[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1780-1788.
Liu Xiangyu, Li Huibin, Gu Xueping, et al. On-line frequency security analysis of interconnected power grid considering inertia adequacy and RoCoF[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1780-1788.
- [14] 付利达, 贾清泉, 孙玲玲, 等. 构网/跟网型光伏逆变器混联的配电网有功无功双层调压策略[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(12): 171-183.
Fu Lida, Jia Qingquan, Sun Lingling, et al. Bi-level voltage regulation strategy for active and reactive power of distribution network with hybrid grid-forming/grid-following photovoltaic inverters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(12): 171-183.
- [15] 汪莹, 崔伟, 王聪, 等. 新能源基地柔性直流送出系统安全稳定评估方法[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(1): 137-145.
Wang Ying, Cui Wei, Wang Cong, et al. A safety and stability evaluation method for new energy VSC-HVDC transmission systems[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(1): 137-145.
- [16] 杨悦, 臧哲, 成龙, 等. 基于“预测-控制-修正”闭环反馈的主动配电网鲁棒优化运行策略[J/OL]. 中国电机工程学报, 2025-12-09. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.psee.251696>.
Yang Yue, Zang Zhe, Cheng Long, et al. Robust optimization operation strategy for active distribution networks based on “prediction-control-correction” closed-loop feedback[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2025-12-09. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.psee.251696>.
- [17] Imris P, Taylor G A, Bradley M E, et al. A novel hardware-in-the-loop approach to investigate the impact of low system inertia on

- RoCoF relay settings[J]. *Energies*, 2022, 15(17): 6386.
- [18] O'Sullivan J, Rogers A, Flynn D, et al. Studying the maximum instantaneous non-synchronous generation in an island system: frequency stability challenges in Ireland[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(6): 2943-2951.
- [19] ENTSO-E. Future system inertia[R]. Brussels: ENTSO-E, 2015.
- [20] EirGrid, SONI. Ensuring a secure, reliable and efficient power system in a changing environment[R]. EirGrid, 2011.
- [21] 黄全全, 韦微, 曾嘉成, 等. 基于等效内电势重塑的构网型逆变器故障穿越控制策略[J]. *电网与清洁能源*, 2025, 41(10): 14-23.
- Huang Quanquan, Wei Zheng, Zeng Jiacheng, et al. Fault ride-through control strategy for GFM inverters based on equivalent internal potential reshaping[J]. *Power System and Clean Energy*, 2025, 41(10): 14-23.
- [22] Tayyebi A, Groß D, Anta A, et al. Frequency stability of synchronous machines and grid-forming power converters [J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2020, 8(2): 1004-1018.
- [23] Crivellaro A, Tayyebi A, Gavriluta C, et al. Beyond low-inertia systems: massive integration of grid-forming power converters in transmission grids[C]//2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). IEEE, 2020: 1-5.
- [24] 杨尚瑾, 李德才, 庞广恒, 等. 基于锁相环同步的低惯量构网控制方法[J]. *电网技术*, 2026, 50(4): 1423-1434.
- Yang Shangjin, Li Decai, Pang Guangheng, et al. Low-inertia grid-forming control method based on phase-locked loop synchronization [J]. *Power System Technology*, 2026, 50(4): 1423-1434.
- [25] Chandorkar M C, Divan D M, Adapa R. Control of parallel connected inverters in standalone AC supply systems [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1993, 29(1): 136-143.
- [26] 王双双, 吴雪莲, 李兆伟, 等. 计及构网型新能源主动支撑特性的频率紧急控制适应性分析[J]. *电力工程技术*, 2025, 44(2): 80-89.
- Wang Shuangshuang, Wu Xuelian, Li Zhaowei, et al. Analysis of the adaptability of frequency emergency control considering the active support characteristics of grid-forming new energy [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2025, 44(2): 80-89.
- [27] 林宇轩, 李威, 朱玲, 等. 电网电压跌落下构网型变流器暂态控制策略综述[J]. *电力工程技术*, 2025, 44(2): 55-68.
- Lin Yuxuan, Li Wei, Zhu Ling, et al. Review of transient control strategies for grid-forming converters under grid voltage sag conditions [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2025, 44(2): 55-68.
- [28] 严干贵, 葛奕麟, 岳霖, 等. 跟网型变流器暂态同步失稳机理分析与稳定性提升策略[J/OL]. *电网技术*, 2025-12-02. <https://link.cnki.net/urlid/11.2410.TM.20251202.0813.001>.
- Yan Gangui, Ge Yilin, Yue Lin, et al. Analysis of transient synchronization instability mechanism and study on stability enhancement strategies for grid following converter [J/OL]. *Power System Technology*, 2025-12-02. <https://link.cnki.net/urlid/11.2410.TM.20251202.0813.001>.
- [29] NERC. Reliability guideline: bulk power system reliability perspectives on the adoption of IEEE 1547-2018 [R]. Atlanta, USA: North American Electric Reliability Corporation, 2023.
- [30] Harnefors L, Bongiorno M, Lundberg S. Input-admittance calculation and shaping for controlled voltage-source converters [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, 54(6): 3323-3334.
- [31] XU Y, LIU F, MEI S, et al. Analysis of phase-locked loop synchronization stability for grid-connected converters under weak grid conditions [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(1): 437-451.
- [32] 王辉东, 倪琳娜, 芦鹏飞, 等. 考虑储能动态特性的虚拟电厂多指标融合可靠性评估方法[J]. *中国电力*, 2026, 59(1): 33-43.
- Wang Huidong, Ni Linna, Lu Pengfei, et al. Multi index fusion reliability evaluation method for virtual power plants considering the dynamic characteristics of energy storage [J]. *Electric Power*, 2026, 59(1): 33-43.
- [33] 钟伟麟, 徐志豪, 李国庆, 等. 基于广域测量系统的虚拟电厂频率主动支撑方法[J/OL]. *电力自动化设备*, 2026-01-13. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202601005>.
- Zhong Weilin, Xu Zhihao, Li Guoqing, et al. Frequency initiative support method for virtual power plant based on wide-area measurement system [J/OL]. *Electric Power Automation Equipment*, 2026-01-13. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202601005>.
- [34] Ulbig A, Borsche T S, Andersson G. Impact of low rotational inertia on power system stability and operation [J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2014, 47(3): 7290-7297.
- [35] Tuo Y, Liu Y, Milano F. Definition and analysis of system frequency response metrics in low-inertia power systems [J]. *Electric Power Systems Research*, 2020, 189: 106742.
- [36] 逯瑞鹏, 秦文萍, 朱志龙, 等. 基于节点瞬时等效惯量指标的暂态频率稳定可能性评估[J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(13): 113-127.
- Lu Ruipeng, Qin Wenping, Zhu Zhilong, et al. Possibility evaluation of transient frequency stability based on instantaneous equivalent inertia indicators of buses [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(13): 113-127.
- [37] 姜继恒, 鲁宗相, 乔颖, 等. 基于全阶模型的直驱风电机组多时间尺度等效惯量机理建模[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(8): 79-90.
- Jiang Jiheng, Lu Zongxiang, Qiao Ying, et al. Multi-time-scale equivalent inertia mechanism modeling of direct-drive wind turbines based on full-order model [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(8): 79-90.
- [38] 宋嘉雯, 王琦, 王亚伦, 等. 计及负荷等效惯量的新型电力系统机组组合安全优化方法[J]. *电力建设*, 2025, 46(9): 111-119.
- Song Jiawen, Wang Qi, Wang Yalun, et al. Security optimization method for unit commitment in new power systems considering load equivalent inertia [J]. *Electric Power Construction*, 2025, 46(9): 111-119.
- [39] 刘鑫, 吕世轩, 位俊明, 等. 基于时间卷积网络-双向长短期记忆网络的系统等效惯量短期预测方法[J/OL]. *现代电力*, 2025-12-01. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2025.0015>.
- Liu Xin, Lü Shixuan, Wei Junming, et al. Short-term prediction

- method for system equivalent inertia based on temporal convolutional network and bi-directional long short-term memory network[J/OL]. *Modern Electric Power*, 2025-12-01. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2025.0015>.
- [40] Guerrero J M, Vasquez J C, Matas J, et al. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids: a general approach toward standardization[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(1): 158-172.
- [41] Song X, Zhang Y, Blaabjerg F. Enhanced droop control for grid-forming inverters with virtual inertia[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2018, 12(15): 1783-1792.
- [42] Beck H, Dörfler F, Andreasson M. Virtual synchronous machines: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 113: 109-124.
- [43] Zhang Y, Li H, Wu B. Improving grid-forming inverter performance via virtual synchronous machine control[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(4): 3157-3167.
- [44] Wu B, Yu X, Blaabjerg F. Power oscillation damping in inverter-based microgrids via inertia emulation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(3): 2056-2066.
- [45] 郭旭存, 任永峰, 张岩, 等. 基于双自适应协同优化的构网型储能主动支撑策略[J]. *高电压技术*, 2026, 52(5): 2194-2204.
- Guo Xucun, Ren Yongfeng, Zhang Yan, et al. Active support strategy for grid-forming energy storage based on dual adaptive collaborative optimization[J]. *High Voltage Engineering*, 2026, 52(5): 2194-2204.
- [46] 首建威, 杨峰雄, 张平, 等. 计及构网型储能的新能源基地暂态无功支撑优化控制[J/OL]. *电力电子技术*, 2025-08-29. <https://doi.org/10.20222/j.cnki.cn61-1124/tm.20250829.003>.
- Shou Jianwei, Yang Fengxiong, Zhang Ping, et al. Transient reactive power optimization control of renewable energy base considering grid-forming energy storage station[J/OL]. *Power Electronics*, 2025-08-29. <https://doi.org/10.20222/j.cnki.cn61-1124/tm.20250829.003>.
- [47] 史梓益, 张晓楠, 田晓康, 等. 基于 gSCR-IMR 的构网型变流器选址定容方法[J]. *浙江电力*, 2025, 44(10): 69-80.
- Shi Ziyi, Zhang Xiaonan, Tian Xiaokang, et al. A siting and sizing method for grid-forming converters based on gSCR and IMR[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2025, 44(10): 69-80.
- [48] Tamrakar U, Shrestha D, Maharjan M, et al. Virtual inertia: current trends and future directions[J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(7): 654.
- [49] Wen Y F, Li W Y, Huang G, et al. Frequency dynamics constrained unit commitment with battery energy storage[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(6): 5115-5125.
- [50] Teng F, Strbac G. Assessment of the role and value of frequency response support from wind plants[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2016, 7(2): 586-595.
- [51] 冯燕波, 王姗姗, 吴广禄, 等. 新能源孤岛柔直送出系统耗能电阻优化配置研究[J]. *浙江电力*, 2024, 43(7): 94-102.
- Feng Yanbo, Wang Shanshan, Wu Guanglu, et al. Study on optimal configuration of energy-dissipating resistors in VSC-HVDC system for new energy island[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2024, 43(7): 94-102.
- [52] 冯建洲, 胡泽春. 兼顾电力系统新能源消纳和小干扰稳定支撑的跟网型与构网型储能联合规划[J]. *电网技术*, 2025, 49(10): 4103-4113.
- Feng Jianzhou, Hu Zechun. A grid-following and grid-forming energy storage co-planning method for enhancing renewable energy accommodation and small-signal stability of power systems[J]. *Power System Technology*, 2025, 49(10): 4103-4113.
- [53] 张丽娜, 王金梅, 苗海东. 基于 DFIG 桨距角与虚拟惯量的协调频率控制策略研究[J]. *太阳能学报*, 2026, 47(4): 329-336.
- Zhang Lina, Wang Jinmei, Miao Haidong. Research on coordinated frequency control strategy based on DFIG pitch angle and virtual inertia[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2026, 47(4): 329-336.
- [54] 刘雨姗, 陈俊儒, 刘牧阳, 等. 兼顾多时间尺度频率-电压支撑与稳定性约束的构网型储能容量优化配置方法[J]. *电网技术*, 2026, 50(4): 1463-1472.
- Liu Yushan, Chen Junru, Liu Muyang, et al. Optimal capacity configuration of grid-forming energy storage considering multi-timescale frequency-voltage support and stability constraints[J]. *Power System Technology*, 2026, 50(4): 1463-1472.
- [55] 黄冬梅, 余京朋, 崔承刚, 等. 多时间尺度深度强化学习光储配电网电压优化[J]. *中国电机工程学报*, 2025, 45(17): 6709-6723.
- Huang Dongmei, Yu Jingpeng, Cui Chenggang, et al. Voltage optimization for PV-ES distribution network with multi-timescale deep reinforcement learning method[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2025, 45(17): 6709-6723.
- [56] 叶帆, 王杰, 黄文焄, 等. 双级式储能虚拟同步机惯量计算模型与方法[J/OL]. *中国电机工程学报*, 2026-01-04. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20260104.1117.005>.
- Ye Fan, Wang Jie, Huang Wentao, et al. Inertia calculation model and method for two-stage energy storage virtual synchronous generator[J/OL]. *Proceedings of the CSEE*, 2026-01-04. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20260104.1117.005>.
- [57] 黄颖峰, 王峰, 蔡德胜, 等. 储能电站虚拟惯量控制技术及其应用[J]. *中国电力*, 2026, 59(2): 148-153.
- Huang Yingfeng, Wang Feng, Cai Desheng, et al. Virtual inertia control technology and application of energy storage power station[J]. *Electric Power*, 2026, 59(2): 148-153.
- [58] Anderson P M, Mirheydar M. A low-order system frequency response model[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1990, 5(3): 720-729.
- [59] Shi Q X, Li F X, Cui H T. Analytical method to aggregate multi-machine SFR model with applications in power system dynamic studies[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(6): 6355-6367.
- [60] Azizipanh-Abarghoee R, Terzija V, Saadatmand H, et al. Modeling DFIG-based system frequency response for frequency trajectory sensitivity analysis[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2018, 12(9): 1028-1037.
- [61] Xia Y X, Wang Q, Miao C R, et al. An extended SFR model based fast frequency security assessment method for power systems[J]. *Energy Reports*, 2023, 9: 2045-2053.
- [62] 文云峰, 赵荣臻, 肖友强, 等. 基于多层极限学习机的电力系统

- 频率安全评估方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 133-140.
- Wen Yunfeng, Zhao Rongzhen, Xiao Youqiang, et al. Frequency safety assessment of power system based on multi-layer extreme learning machine [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 133-140.
- [63] 皇甫成, 邱婷, 梁吉, 等. 一种考虑电力系统频率安全的新能源并网限值评估方法[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(2): 85-90, 98.
- Huangfu Cheng, Qiu Ting, Liang Ji, et al. A sustainable energy penetration limit evaluation method considering power system frequency security[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(2): 85-90, 98.
- [64] 蔡国伟, 孙正龙, 王雨薇, 等. 基于改进频率响应模型的低频减载方案优化[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3131-3136.
- Cai Guowei, Sun Zhenglong, Wang Yuwei, et al. Optimization of under frequency load shedding scheme based on improved system frequency response model[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3131-3136.
- [65] 郭威, 郑文伟, 文云峰, 等. 考虑非线性环节的双高电力系统频率安全快速评估方法[J]. 电力自动化设备, 2026, 46(3): 168-177.
- Guo Wei, Zheng Wenwei, Wen Yunfeng, et al. Fast frequency security calculation method for double-high power system considering nonlinear elements [J]. Electric Power Automation Equipment, 2026, 46(3): 168-177.
- [66] 郑文伟, 文云峰, 李鸿鑫, 等. 考虑惯量和频率安全约束的非同步机电源承载能力评估方法[J/OL]. 电力自动化设备, 2026-01-04. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202512034>.
- Zheng Wenwei, Wen Yunfeng, Li Hongxin, et al. Evaluation method of non-synchronous generation hosting capacity considering inertia and frequency security constraints [J/OL]. Electric Power Automation Equipment, 2026-01-04. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202512034>.
- [67] 李东东, 孙雅茹, 徐波, 等. 考虑频率稳定的新能源高渗透率电力系统最小惯量与一次调频容量评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(23): 54-61.
- Li Dongdong, Sun Yaru, Xu Bo, et al. Minimum inertia and primary frequency capacity assessment for a new energy high permeability power system considering frequency stability [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(23): 54-61.
- [68] 张礼浩, 刘翔宇, 顾雪平, 等. 新型电力系统频率安全稳定研究综述及展望[J]. 浙江电力, 2024, 43(10): 12-26.
- Zhang Lihao, Liu Xiangyu, Gu Xueping, et al. Review and prospects of frequency security and stability research in new-type power systems [J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(10): 12-26.
- [69] 洪晗笑, 吴晨曦, 倪索引. 考虑频率-惯量安全约束的新型电力系统优化调度[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(8): 176-184.
- Hong Hanxiao, Wu Chenxi, Ni Suoyin. Optimal scheduling of new-type power system considering frequency-inertia security constraints [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(8): 176-184.
- [70] 周茂一, 黄婷钰, 刘子文, 等. 基于含可变遗忘因子递推最小二乘的电力系统惯量评估方法[J]. 电力工程技术, 2025, 44(5): 148-158.
- Zhou Maoyi, Huang Tingyu, Liu Ziwen, et al. Evaluation of power system inertia based on recursive least squares with variable forgetting factors [J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(5): 148-158.
- [71] 刘方蕾, 胥国毅, 刘家豪, 等. 考虑电网结构和参数的电力系统惯量分布特性[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(23): 60-67.
- Liu Fanglei, Xu Guoyi, Liu Jiahao, et al. Inertia distribution characteristics of power system considering structure and parameters of power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(23): 60-67.
- [72] 李晓栋, 徐政, 张哲任. 含非同步机电源交流电网暂态稳定性的电磁暂态仿真研究[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(9): 57-68.
- Li Xiaodong, Xu Zheng, Zhang Zheren. Electromagnetic transient simulation study on transient stability of AC power grid with non-synchronous machine sources [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 57-68.
- [73] 贺杨烨, 郑晓冬, 邵能灵, 等. 交直流混联电网LCC-HVDC换流器建模方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11): 3119-3129.
- He Yangyang, Zheng Xiaodong, Tai Nengling, et al. A review of modeling methods for LCC-HVDC converter in AC/DC hybrid power grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3119-3129.
- [74] 樊鑫, 郭春义, 杜夏冰, 等. 特高压混合级联直流输电系统抑制逆变站后续换相失败的无功功率调控方法[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3443-3452.
- Fan Xin, Guo Chunyi, Du Xiabing, et al. Reactive power coordinated control approach for suppressing subsequent commutation failure of inverter station in hybrid cascaded UHVDC system [J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3443-3452.
- [75] 陈义宣, 王国腾, 李玲芳, 等. 计及安全约束的多直流送出电网新能源极限渗透率估计方法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(9): 236-242.
- Chen Yixuan, Wang Guoteng, Li Lingfang, et al. Estimation method of maximum renewable energy penetration rate for multi-send HVDC system considering security and stability constraints [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(9): 236-242.
- [76] ENTSO-E. Frequency stability evaluation criteria for the synchronous zone of continental Europe[R]. Brussels: ENTSO-E, 2016.
- [77] Kayikci M, Milanovic J V. Dynamic contribution of DFIG-based wind plants to system frequency disturbances [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 859-867.
- [78] Schiffer J, Aristidou P, Ortega R. Online estimation of power system inertia using dynamic regressor extension and mixing [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4993-5001.
- [79] Ali Abooshahab M, Hovd M, Bitmead R R. Disturbance and state estimation in partially known power networks [C]//2019 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA). IEEE, 2019: 98-105.

- [80] Wall P, Terzija V. Simultaneous estimation of the time of disturbance and inertia in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(4): 2018-2031.
- [81] Panda R K, Mohapatra A, Srivastava S C, et al. Energy function based approach for online inertia estimation utilizing synchrophasor measurements[C]//2020 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC). IEEE, 2020: 1-6.
- [82] Panda R K, Mohapatra A, Srivastava S C. Online estimation of system inertia in a power network utilizing synchrophasor measurements[C]//2021 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). IEEE, 2021: 01.
- [83] Cao X, Stephen B, Abdulhadi I F, et al. Switching Markov Gaussian models for dynamic power system inertia estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3394-3403.
- [84] Best R J, Brogan P V, Morrow D J. Power system inertia estimation using HVDC power perturbations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(3): 1890-1899.
- [85] Hernandez M A J, Pinto R T. Artificial neural network-based inertia estimation[C]//2022 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). IEEE, 2022: 1-5.
- [86] Zhu L, Farantatos E, Ramasubramanian D, et al. Ambient PMU measurements based online regional inertia estimation and monitoring [C]//2024 International Conference on Smart Grid Synchronized Measurements and Analytics (SGSMA). IEEE, 2024: 1-5.
- [87] Sanchez A, Ramirez J M, Paternina M R A, et al. Synchronous machines' inertia estimation through PMU data-driven[C]//2023 North American Power Symposium (NAPS). IEEE, 2023: 1-7.
- [88] Ye H B, Chen X M, Cui Y, et al. Generator available inertia estimation based on various disturbance measurements of PMU[C]//2021 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). IEEE, 2021: 605-610.
- [89] Alshahrestani A, Golshan M E H, Alhelou H H. WAMS based online estimation of total inertia constant and damping coefficient for future smart grid systems [C]//2018 Smart Grid Conference (SGC). IEEE, 2018: 1-5.
- [90] Nannapaneni S, Mahadevan S, Rachuri S. Performance evaluation of a manufacturing process under uncertainty using Bayesian networks[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 113: 947-959.
- [91] Ebrahimi A, Daemi T. A novel method for constructing the Bayesian network for detailed reliability assessment of power systems[C]//2009 International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, (EPECS). IEEE, 2009: 1-6.
- [92] Huo L M, Zhu Y L, Fan G F. Reliability assessment of power systems by Bayesian networks [C]//Proceedings of International Conference on Power System Technology. IEEE, 2002: 876-879.
- [93] Huang L H, Hou C W, Wang H, et al. Assessment of distribution system reliability based on Bayesian network and time sequence simulation [C]//2009 Sixth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. IEEE, 2009: 481-486.
- [94] Wang X T, Liu R P, Wang X Z, et al. A comparative study of polynomial chaos expansion-based methods for global sensitivity analysis in power system uncertainty control[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2024, 71(1): 216-220.
- [95] 王强强, 姚良忠, 徐箭, 等. 基于切片采样-马尔科夫链蒙特卡洛模拟的高比例新能源电力系统等效惯量概率评估[J]. 电网技术, 2024, 48(1): 140-149.
- Wang Qiangqiang, Yao Liangzhong, Xu Jian, et al. S-MCMC based equivalent inertia probability evaluation for power systems with high proportional renewable energy [J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 140-149.
- [96] Xie J, Alvarez-Fernandez I, Sun W. A review of machine learning applications in power system resilience [C]//2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). IEEE, 2020: 1-5.
- [97] Yan R, Geng G C, Jiang Q Y, et al. Fast transient stability batch assessment using cascaded convolutional neural networks[C]//2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). IEEE, 2020: 1.
- [98] Samek W, Wiegand T, Müller K R. Explainable artificial intelligence: understanding, visualizing and interpreting deep learning models[J]. ITU Journal: ICT Discoveries, 2017, 1(1): 1-10.
- [99] Raissi M, Perdikaris P, Karniadakis G E. Physics-informed neural networks: a deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations [J]. Journal of Computational Physics, 2019, 378: 686-707.
- [100] Huang Z, Wang J, Chen Y, et al. Physics-informed machine learning for power systems: a review[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2023, 9(2): 308-325.
- [101] Zhou Y Z, Zhao W L, Guo Q L, et al. Transient stability assessment of power systems using cost-sensitive deep learning approach[C]//2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). IEEE, 2018: 1-6.
- [102] 杨珺, 侯俊浩, 刘亚威, 等. 分布式协同控制方法及在电力系统中的应用综述[J]. 电工技术学报, 2021, 36(19): 4035-4049.
- Yang Jun, Hou Junhao, Liu Yawei, et al. Distributed cooperative control method and application in power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(19): 4035-4049.
- [103] 徐波, 俞向栋, 杨逸欣, 等. 基于多智能体系统的分布式风储协同频率控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(19): 13-24.
- Xu Bo, Yu Xiangdong, Yang Yixin, et al. Distributed wind-storage coordinate frequency control strategy based on a multi-agent system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(19): 13-24.
- [104] 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.
- [105] 张勇军, 蒋崇颖, 唐文虎, 等. 分布式孤岛电网构网型储能控制与运行研究综述[J]. 电力系统自动化, 2026, 50(10): 1-15.

- Zhang Yongjun, Jiang Chongying, Tang Wenhui, et al. Review of grid-forming energy storage control and operation research in distributed islanded grids [J]. Automation of Electric Power Systems, 2026, 50(10): 1-15.
- [106] Muñoz M A, Pineda S, Morales J M. A bilevel framework for decision-making under uncertainty with contextual information [J]. Omega, 2022, 108: 102575.
- [107] Zheng Z, Tang R, Luo X W, et al. A distributed coordination strategy for heterogeneous building flexible thermal loads in responding to smart grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024, 15(2): 1620-1633.
- [108] Li J, Ye Y J, Papadaskalopoulos D, et al. Distributed consensus-based coordination of flexible demand and energy storage resources [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4): 3053-3069.
- [109] Lei J X, Yang R Z, Wu W X, et al. Coordinated control strategy for HVDC frequency controllers in multi-area asynchronous grid [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2025, 167: 110577.
- [110] Jiang S Q, Du Y L, Li G Q, et al. Coordinated control strategy for improving frequency security of LCC HVDC sending-end system with large-scale wind power [J]. Electric Power Systems Research, 2025, 239: 111287.
- [111] Wei P, Chai B, Shi L, et al. RPC-based frequency control strategy of LCC-HVDC sending end power system with renewable energy [J]. Frontiers in Energy Research, 2022, 10 (10): 1037825.
- [112] Yan K F, Li G Q, Zhang R F, et al. Frequency control and optimal operation of low-inertia power systems with HVDC and renewable energy: a review [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(2): 4279-4295.
- [113] Li H, Li Y K, Meng Y, et al. Coordinated frequency support strategy for VSC-HVDC integrated offshore wind farm system[J]. Frontiers in Energy Research, 2024, 12: 1351353.
- [114] 谭珺孜, 彭晓涛, 李旭涛, 等. 基于协同控制优化风电-柔直并网惯性响应策略研究[J]. 电工技术学报, 2025, 40(5): 1355-1367.
- Tan Junmi, Peng Xiaotao, Li Xutao, et al. Optimization of inertia response strategy based on synergetic control for wind power integrating to power grid via VSC-HVDC [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(5): 1355-1367.
- [115] Saleh A M, Vokony I, Waseem M, et al. Power system stability with high integration of RESs and EVs: benefits, challenges, tools, and solutions[J]. Energy Reports, 2025, 13: 2637-2663.
- [116] Shi Y, Tuan H D, Savkin A V, et al. Distributed model predictive control for joint coordination of demand response and optimal power flow with renewables in smart grid [J]. Applied Energy, 2021, 290: 116701.
-
- 收稿日期: 2026-04-07 修回日期: 2026-05-21
- 
- 沈赋
- 作者简介:
- 沈赋(1988),男,博士,副教授,主要研究方向为新型电力系统建模、惯量评估,E-mail: shenfu@kust.edu.cn;
- 魏子玉(2003),女,硕士研究生,主要研究方向为新型电力系统惯量评估,E-mail: Yu13992822579@163.com;
- 束洪春(1961),男,博士,教授,博士生导师,从事电力系统新型继电保护与故障测距、故障录波、数字信号处理及DSP应用等方面的研究,E-mail: kmshe@sina.com.cn;
- 曹畅(1998),男,博士研究生,主要研究方向为新型电力系统惯量评估,E-mail: cy18988480056@163.com;
- 华昊辰(1988),男,博士,教授,主要研究方向为新型电力系统惯量评估,E-mail: huahc16@tsinghua.org.cn;
- 王健(1994),男,博士,讲师,通信作者,主要研究方向为新型电力系统建模,E-mail: jianwangzx@163.com;
- 单节杉(1979),男,博士,副教授,硕士研究生导师,主要从事新型电力系统建模方面的研究工作,E-mail: 736495310@qq.com。
- (编辑 景贺峰)