

基于布伦特迭代算法的构网型变流器 频率支撑需求动态评估

杨凯璇¹, 王学斌¹, 宋锐¹, 索心语², 傅国斌¹, 王澧森², 文云峰²

(1. 国网青海省电力公司电力科学研究院, 西宁市 810000;

2. 湖南大学电气与信息工程学院, 长沙市 410082)

摘 要:【目的】为提升变流器高占比系统频率稳定性,探讨了构网型(grid-forming, GFM)变流器频率支撑需求的动态评估与量化方法。【方法】首先,建立耦合GFM变流器功-频特性的多机系统频率响应模型;其次,综合考虑预想扰动下频率变化速率(rate of change of frequency, RoCoF)与最大暂态频率偏差双重约束条件,构建了GFM变流器频率支撑需求评估方法;最后,基于布伦特迭代算法实现不同运行工况下GFM变流器虚拟惯量与一次调频增益临界阈值的动态评估。基于改进的IEEE-39节点系统,开展了多场景算例测试。【结果】结果表明,GFM变流器的引入可将频率最低点提高至49.5 Hz,显著提升系统稳定性,证明了高比例电力电子化系统中配置GFM变流器的必要性。进一步对比3种算法性能,所提迭代方法平均迭代次数仅为11次,较传统方法减少20%以上,验证了所提评估方法和迭代算法的有效性。【结论】所提评估方法从系统层面明确了电网对GFM变流器频率支撑能力的需求,可为GFM变流器的优化配置与参数整定提供理论基础。

关键词:构网型;变流器;频率支撑;需求评估;布伦特迭代算法

中图分类号: TM46

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2026)01-0025-12

DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2026.01.003

Dynamic Evaluation of Frequency Support Requirements for Grid-Forming Converters Based on the Brent Iteration Algorithm

YANG Kaixuan¹, WANG Xuebin¹, SONG Rui¹, SUO Xinyu², FU Guobin¹,
WANG Lisen², WEN Yunfeng²

(1. Electric Power Science Research Institute, State Grid Qinghai Electric Power Company, Xining 810000, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

ABSTRACT: [Objective] To enhance frequency stability in systems with a high penetration of converters, this paper investigates a dynamic evaluation and quantification method for determining the frequency support requirements of grid-forming (GFM) converters. [Methods] First, a multi-machine system frequency response model is developed by incorporating the power - frequency characteristics of coupled GFM converters. Second, considering both the rate of change of frequency (RoCoF) and the maximum transient frequency deviation under anticipated disturbances, a comprehensive assessment method is constructed to evaluate the frequency support requirements of GFM converters. Finally, based on the Brent iterative algorithm, the critical thresholds of virtual inertia and primary frequency regulation gain for GFM converters are dynamically assessed under various operating conditions. Based on the modified IEEE-39 bus system, multiple scenario-based case studies were conducted. [Results] The results show that the introduction of GFM converters can raise the minimum system frequency to 49.5 Hz, significantly enhancing system stability and highlighting the necessity of deploying GFM converters in highly power-electronic systems. Furthermore, a performance comparison of three algorithms demonstrates that the proposed iterative method requires only 11 iterations on average, reducing the iteration count by over 20% compared to traditional approaches, thereby validating the effectiveness of the proposed assessment method and iterative algorithm. [Conclusions] The proposed assessment method clarifies, from a system-level perspective, the frequency support requirements imposed by the grid

on GFM converters, providing a theoretical foundation for their optimal allocation and parameter tuning.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52077066) and the Science and Technology Project of State Grid Qinghai Electric Power Company (No. 522807240005).

KEYWORDS: grid-forming; converter; frequency support; requirement evaluation; Brent iterative algorithm

0 引言

近年来,随着风电、光伏等清洁能源的大规模并网,电网电力电子化程度持续攀升,我国电力系统结构正经历从以同步机组为主体到以变流器接口型电源为主体的重大变革。截至 2024 年底,全国新能源发电装机容量达到 14.5 亿 kW,首次超过煤电装机规模,其中,青海、甘肃、河北、新疆维吾尔自治区等省、自治区的清洁能源装机占比超过 50%^[1-3]。

随着电力电子设备的大量接入,同步电源开机容量持续压缩,系统等效转动惯量显著降低、一次调频能力弱化以及功率波动范围增加,频率稳定性面临严峻挑战^[4-5]。在相同扰动条件下,频率变化速率(rate of change of frequency, RoCoF)和频率波动幅度增大,致使低频减载与高频切机保护动作概率增加^[6-7]。近年来,澳大利亚南部电网、英国电网、西班牙电网在新能源高占比运行场景遭受扰动冲击所导致的大停电事故,均为系统频率支撑能力不足引发严重后果的典型案例^[8]。可见,频率安全问题已成为变流器高占比系统不容忽视的重大威胁,亟待通过技术升级,提出新的管控措施加以应对。

常规控制方式下,变流器通常运行于最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)模式,无法响应系统功率波动,难以为电网提供频率支撑^[9]。当前,国内外最新发布的相关导则已对新能源参与电网惯量响应和一次调频提出了明确要求。例如,《电力系统安全稳定导则》(GB 38755—2019)规定,接入 35 kV 及以上电压等级的风电、光伏均需具备一次调频能力;《风电场接入电力系统技术规定》(GB/T 19963.1—2021)则对风电场惯量响应指标提出了要求。

工程实践中目前广泛应用的变流器主要采用跟网型(grid-following, GFL)控制技术,可基于锁相环(phase-locked loop, PLL)的频率测量信号进行附加频率控制。然而,受限于 PLL 固有延迟及电流环带宽约束,其惯量支撑作用较弱,缺乏独立构建电压/频率的能力,且存在弱电网适应性差、易触发保护脱网等问题^[10-13]。与之相比,构网型(grid-forming, GFM)变流器在弱电网环境下展现出更强的主动支撑性能^[14-17]。GFM 变流器在特定控制策略下可以模拟同步发电机的运行特性,具备独立的功角特性,无需 PLL 即可与

电网自主同步,可增强电网的惯量响应能力和阻尼特性,有效提升在弱电网场景下的并网稳定性和频率支撑强度,在电力电子设备占主导的新型电力系统中具有广阔的应用前景^[18-23]。

国内外研究机构针对构网型变流器的并网稳定性、控制策略优化等方面开展了大量研究^[24-26]。文献[27]以节点频率为视角研究了电力系统的频率空间特性并提出了构网型惯量资源的分配优化策略。文献[28]提出计及频率动态分布性的新能源机组惯量需求分析方法。文献[29]针对风储系统的频率调整需求及特点,提出风、储协同控制策略来满足系统惯量支撑和一次调频需求。文献[30]提出了基于主从博弈的新型电力系统惯量需求优化调度策略。文献[31]提出了基于系统惯量与阻尼需求和风机安全稳定运行约束的虚拟惯量优化控制策略。文献[32]讨论了构网型储能在新电力系统中的定位,并研究了构网型储能对电力系统的支撑原理。然而,多数研究仅基于特定工况进行定值分析,缺乏对构网型变流器在不同运行方式或扰动条件下支撑能力需求的系统性研究。

与此同时,构网型变流器的安全并网不仅依赖于灵活可变的控制策略,如何合理整定变流器的调频参数以应对多变工况下频率安全需求也是亟待解决的问题^[33]。文献[34]在深度强化学习框架下设计串联-并联辨识结构,对构网型变流器惯量参数进行估算。文献[35]以满足系统频率稳定性和小干扰稳定性约束的概率最大为目标,建立风电虚拟惯量参数优化模型。文献[36]定量分析了虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)动态响应特性与虚拟惯量及阻尼系数的关系。文献[37]提出了一种储能型虚拟同步机参数协同控制策略。针对当前对构网型变流器响应系统不平衡功率特性及其支撑能力认知的局限性,文献[38]提出基于设备统一化运动方程的构网型变流器频率支撑能力评估方法。目前相关方法在优化效率和收敛性方面仍存在明显不足,尤其是在面向多变系统场景时,多采用固定步长或启发式搜索策略,存在收敛性差、效率低等问题,难以满足复杂系统场景下快速求解的需求。

总体来看,现有工作多聚焦于局部控制器设计或单一指标优化,尚未在系统层面建立适用于多工况的频率支撑需求动态评估与量化方法。从

frequency response, SFR) 或平均系统频率 (average system frequency, ASF) 模型^[43], 既涵盖了多元异构资源的频率响应特性, 也反映了新型电力系统的电源结构形态。

图 2 中, 直流输电通过频率限制控制 (frequency limiting control, FLC) 调整直流传输功率参与系统调频; GFL 变流器采用带有延时环节的虚拟惯量控制和下垂控制, GFM 变流器则不考虑虚拟惯量延时。对于同步机组: K_G 、 K_H 和 K_T , H_G 、 H_H 和 H_T 分别表示各类同步机组的容量占比系数、惯性常数, 其余参数的含义与典型取值参考文献[28]。直流频率调制模型中: K_F 为直流容量占比系数; $P_{\max_F}$ 、 $P_{\min_F}$ 分别为直流调制的上下限幅; R_f 为直流等效调差系数; T_f 为测量环节延时常数; K_r 、 K_i 为比例增益; T_d 为积分环节时间常数; F_{band} 为频差死区的限制范围。对于变流器控制环节: $P_{\max_GFM}$ 、 $P_{\min_GFM}$ 分别为 GFM 变流器功率的上下限幅; $P_{\max_GFL}$ 、 $P_{\min_GFL}$ 分别为 GFL 变流器功率的上下限幅; k_{GFM} 和 k_{GFL} 分别为 GFM 和 GFL 变流器的容量占比系数; H_{GFL} 、 R_{GFL} 为 GFL 变流器的虚拟惯性常数和下垂控制系数; T_{DM} 和 T_{DL} 分别表征 GFM 和 GFL 变流器的虚拟下垂控制响应延时^[44]。

系统受扰后的频率动态响应过程可表示为:

$$2H_{\text{sys}} \frac{d\Delta f}{dt} = \Delta P + \Delta P_{\text{FLC}} + \Delta P_{\text{GFL}} + \Delta P_{\text{GFM}} - D_{\text{sys}} \Delta f - \Delta P_L \quad (3)$$

式中: H_{sys} 为系统等值惯性常数; Δf 为系统惯性中心频率; ΔP 为所有同步发电机组的一次调频功率之和; ΔP_{FLC} 为直流参与 FLC 控制释放的功率; ΔP_{GFL} 为 GFL 变流器提供的快速调频功率; ΔP_{GFM} 为 GFM 变流器提供的一次调频功率; D_{sys} 为系统等值阻尼系数; ΔP_L 为系统扰动量。

GFM 变流器可表现出类似同步发电机的惯性响应特性, 将其惯性常数 H_{GFM} 与同步机组的惯性常数进行聚合, 得到系统等值惯性常数 H_{sys} :

$$H_{\text{sys}} = H_T + H_H + H_G + H_{\text{GFM}} \quad (4)$$

2 构网型变流器频率支撑需求评估框架

构网型变流器的频率支撑需求, 是指为确保电力系统在给定运行工况和预想故障下满足频率稳定约束, 应由构网型变流器提供的最小等效惯量与一次调频增益。等效惯量反映变流器在系统扰动初期的惯量响应能力, 主要用于抑制频率变化速率, 而一次调频增益则用于抑制最大频率偏差、支撑系统频率恢复。不同运行工况下系统惯量缺口和频率安全态势不同, 对构网型变流器虚拟惯量和一次调频支撑的需

求量存在显著差异, 因此需进行动态量化和评估。

本章主要介绍预想扰动故障下, 基于构建的多机频率响应模型和频率安全指标约束条件, 动态评估构网型变流器频率支撑能力需求边界的建模思路与流程。

构网型变流器作为新型电力电子接口设备, 其频率支撑能力依赖于控制器内部的虚拟惯量与一次调频机制, 具有快速响应、灵活配置的特点。本文将 GFM 控制器中的关键参数 (虚拟惯量系数 H_{GFM} 和一次调频增益 K_{GFM}) 作为频率支撑需求的度量指标, 评估其在系统安全约束下的临界配置参数值, 为 GFM 的频率支撑功能提供参数选型依据。

基于所构建的系统多机频率响应模型, 首先将参数初始值代入系统中, 在频率变化率安全约束下, 通过自适应布伦特算法迭代修正构网型变流器的等效虚拟惯量需求 H_{GFM} , 直至系统频率变化率满足临界约束条件。随后, 将评估得到的 H_{GFM} 作为已知参数, 进一步迭代评估获得系统频率响应的最大偏差。根据最大频率偏差与系统安全边界的耦合关系, 动态修正表征构网型变流器调频需求的参数 K_{GFM} , 最终得到满足频率安全约束的最低惯量和调频需求组合。评估流程如图 3 所示。

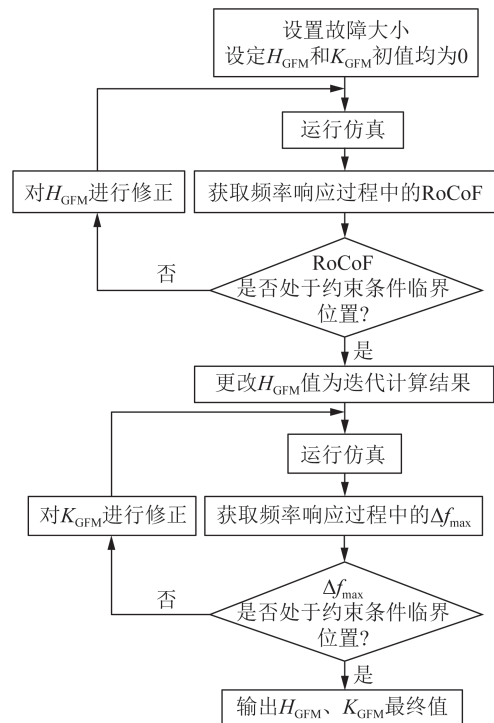


图 3 构网型变流器惯量和一次调频支撑需求评估流程

Fig. 3 Evaluation process for inertia and primary frequency support requirements of grid-forming converters

具体步骤如下所示:

1) 在搭建的系统多机频率响应仿真模型中, 设

定系统中同步机组惯量水平、系统所受故障量大小、构网型变流器虚拟惯量和一次调频系数迭代初值、仿真时间、时段步长等各种参数。

2)运行仿真模型,通过频率响应曲线的前200 ms响应值计算系统频率变化率。

3)判断是否满足最大RoCoF约束,若不满足,则对 H_{GFM} 进行修正,重复第2)步计算,直至判断RoCoF正好处在安全约束临界位置。

4)将迭代计算得到的 H_{GFM} 临界需求值重新输入模型中,作为已知参数进一步评估最小一次调频需求 K_{GFM} 。

5)运行仿真模型,得到受扰后模型响应曲线最大偏差值。

6)判断频率响应过程中的最大频率偏差值 Δf_{max} 是否达到设定的安全约束值,若否,则对 K_{GFM} 值进行修正,重复第5)步计算,直至符合条件,输出此刻的 K_{GFM} 计算结果。

3 构网型变流器频率支撑需求动态评估

遭受有功冲击瞬间至变流器和同步机组一次调频动作之前,系统的频率变化仅由总体惯量水平决定(由同步发电机和GFM机组提供),受扰后频率最大波动幅值则主要由系统一次调频能力决定。为抑制大扰动场景和同步电源小开机方式下系统频率快速变化,确保频率稳定性,需要对构网型变流器的频率支撑需求进行量化评估。本章介绍考虑频率变化率约束和最大频率偏差约束的构网型变流器虚拟惯量和一次调频支撑需求动态评估方法,通过多机频率响应模型仿真获取受扰后频率指标,基于自适应布伦特算法迭代修正对应参数,以获得构网型变流器频率支撑能力的临界需求。

3.1 求解目标分析

GFM通过控制器中的虚拟惯量环节模拟惯性响应,其等效惯量值可调,可有效抑制RoCoF过快变化。一次调频环节则仿照传统下垂控制策略,根据频率偏移程度调节有功输出,从而控制最大频率偏差 Δf_{max} 。频率变化率随系统惯量单调递减,GFM变流器的虚拟惯性常数 H_{GFM} 值增大,则频率变化率减小;最大频率偏差随系统一次调频能力单调递减,GFM变流器的 K_{GFM} 值增大,则最大频率偏差减小。由于这些环节具备明确的控制参数与频率响应耦合关系,且RoCoF与 Δf_{max} 对参数呈单调变化,系统频率安全指标的临界满足条件可转化为参数零点求解问题。

经典的零点迭代求解算法包括牛顿法、二分法和割线法等,这些方法在数值计算过程中不断更新

估计值,直至收敛至零点。然而,由于暂态频率安全指标无法通过高阶传递函数显式获得,因此涉及高阶导数运算的求解方法(如牛顿法等)并不适用。本节采用融合二分法和割线法的自适应布伦特算法,来迭代获取构网型变流器虚拟惯量系数与一次调频系数的临界阈值。

3.2 二分法修正参数

二分法的基本思想是通过不断缩小区间范围,逐步逼近方程的根。由于GFM频率响应主要由其控制器决定,具备较好的可调性与单调性,因此适合采用二分法进行初始逼近。根据介值定理,区间内必然存在一个根,则更新 H_{GFM} 和 K_{GFM} 为:

$$\begin{cases} H_{\text{GFM}} = \frac{H_{\text{max}} + H_{\text{min}}}{2} \\ K_{\text{GFM}} = \frac{K_{\text{max}} + K_{\text{min}}}{2} \end{cases} \quad (5)$$

式中: H_{max} 和 H_{min} 分别为当前 H_{GFM} 评估范围最大值和最小值; K_{max} 和 K_{min} 分别为当前 K_{GFM} 评估范围最大值和最小值。

二分法是线性收敛的,每迭代一次,区间长度减半,误差大致减少一半。

3.3 割线法修正参数

割线法是一种改进的牛顿法,但不需要计算导数,仅依赖函数值来逼近零点。为保证能够在相同维度上对比二分法和割线法,割线法的2个初值采用二分法的初始区间值。

割线法在GFM频率响应函数中表现出更快的收敛性,尤其当频率变化指标随参数变化较大时,可快速逼近目标值。此方法无需显式导数,对仿真型频率响应目标函数具有较好的适应性。

利用两点之间的割线来近似函数的切线:

$$\begin{cases} R_{\text{oCoF}}|_{H_{\text{GFM}}} - R_{\text{oCoF}}|_{H_{\text{max}}} = \frac{R_{\text{oCoF}}|_{H_{\text{max}}} - R_{\text{oCoF}}|_{H_{\text{min}}}}{H_{\text{max}} - H_{\text{min}}} (H_{\text{GFM}} - H_{\text{max}}) \\ \Delta f_{\text{max}}|_{K_{\text{GFM}}} - \Delta f_{\text{max}}|_{K_{\text{max}}} = \frac{\Delta f_{\text{max}}|_{K_{\text{max}}} - \Delta f_{\text{max}}|_{K_{\text{min}}}}{K_{\text{max}} - K_{\text{min}}} (K_{\text{GFM}} - K_{\text{max}}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $R_{\text{oCoF}}|_{H_{\text{GFM}}}$ 为当前参数值 H_{GFM} 对应的系统受扰后的频率变化率; $R_{\text{oCoF}}|_{H_{\text{max}}}$ 为当前评估范围最大值 H_{max} 对应的系统受扰瞬间频率变化率; $R_{\text{oCoF}}|_{H_{\text{min}}}$ 为当前评估范围最小值 H_{min} 对应的系统受扰瞬间频率变化率; $\Delta f_{\text{max}}|_{K_{\text{GFM}}}$ 为当前参数值 K_{GFM} 对应的系统受扰后的最大频率偏差; $\Delta f_{\text{max}}|_{K_{\text{max}}}$ 为当前评估范围最大值 K_{max} 对应的

系统受扰后最大频率偏差; $\Delta f_{\max}|_{K_{\min}}$ 为当前评估范围最小值 $K_{\min}$ 对应的系统受扰后最大频率偏差。

通过割线与目标约束值的交点来更新迭代 H_{GFM} 和 K_{GFM} , 其表达式为:

$$\begin{cases} H_{\text{GFM}} = H_{\max} - \frac{(R_{\text{oCoF}}|_{H_{\max}} - R_{\text{oCoFtarget}})(H_{\max} - H_{\min})}{R_{\text{oCoF}}|_{H_{\max}} - R_{\text{oCoF}}|_{H_{\min}}} \\ K_{\text{GFM}} = K_{\max} - \frac{(\Delta f_{\max}|_{K_{\max}} - \Delta f_{\max_target})(K_{\max} - K_{\min})}{\Delta f_{\max}|_{K_{\max}} - \Delta f_{\max}|_{K_{\min}}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $R_{\text{oCoFtarget}}$ 为设定的频率变化率目标值; $\Delta f_{\max_target}$ 为设定的最大频率偏差目标值。其核心思想是用 2 个最近的迭代点来估计函数的斜率, 用割线的根 (即割线与目标约束值的交点) 作为新的迭代值, 更新最近迭代点。

3.4 自适应布伦特算法

二分法的优点在于算法结构简单、数值稳定性高, 且能够保证在满足介值定理的前提下收敛至零点, 适用于初始参数区间已知、目标函数连续单调的场景。在 GFM 频率支撑需求评估中, 二分法能够有效地在给定区间内逼近虚拟惯量或一次调频需求的临界值。然而, 其收敛速度较慢, 特别是在目标函数变化较平缓时, 迭代次数显著增加, 且其线性收敛速率在处理高维复杂系统频率响应时可能不满足工程应用的效率要求。

相比之下, 割线法利用当前和上一次迭代点的目标函数值, 构造割线来预测根的位置, 从而获得更快的收敛速度。当频率安全指标 (如 RoCoF 或最大频率偏差) 随参数变化速率较大时, 割线法具有明显的加速效果。但割线法存在以下缺点: 当目标函数具有非凸性或形状复杂时, 割线可能跨越实际零点区间, 导致发散或收敛失败; 此外对初始点选择敏感, 稳定性不足^[45-46]。

在系统频率临界响应区间附近, 频率安全指标 RoCoF 和 $\Delta f_{\max}$ 通常变化趋慢, 直接导致二分法的收敛速度过慢, 迭代次数过多。而割线法虽然在陡变区间表现优越, 但在下凸或多拐点区域可能产生不稳定跳跃。因此, 单独采用二分法或割线法都存在精度和效率上的折中, 难以满足构网型变流器频率支撑参数快速、准确求解的工程需求。

为兼顾稳健性与收敛效率, 本节提出基于二分法与割线法融合的自适应布伦特算法, 用于动态评估 GFM 的频率支撑需求。该方法通过动态切换判断

机制, 根据目标函数的局部特性自动选择当前最优迭代策略, 从而提升整体评估效率与求解精度。

自适应布伦特算法融合了二分法和割线法的优点, 初期使用二分法, 确保稳健收敛; 当区间或区间范围极值对应的安全指标缩小到一定范围内时, 说明频率指标函数已经接近目标临界值的位置或比较平缓, 则自动切换至割线法以提升收敛速度并减少仿真次数。其修正流程如图 4 所示。

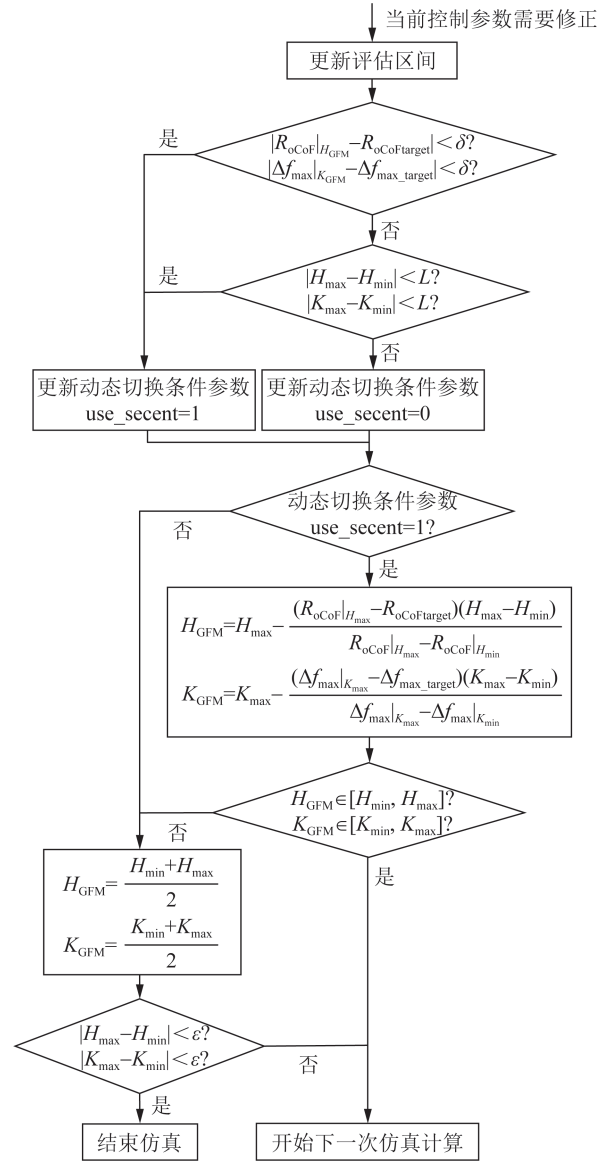


图 4 自适应布伦特法修正流程

Fig. 4 Adaptive Brent's method correction process

步骤如下:

1) 当控制参数需要修正时, 首先根据当前根的位置, 缩小区间范围。若满足:

$$\begin{cases} R_{\text{oCoF}}|_{H_{\text{GFM}}} - R_{\text{oCoFtarget}} < 0 \\ \Delta f_{\max}|_{K_{\text{GFM}}} - \Delta f_{\max_target} < 0 \end{cases} \quad (8)$$

则更新区间范围:

$$\begin{cases} H_{\min} = H_{\min}, H_{\max} = H_{\text{GFM}} \\ K_{\min} = K_{\min}, K_{\max} = K_{\text{GFM}} \end{cases} \quad (9)$$

若满足:

$$\begin{cases} R_{\text{oCoF}}|_{H_{\text{GFM}}} - R_{\text{oCoFtarget}} > 0 \\ \Delta f_{\max}|_{K_{\text{GFM}}} - \Delta f_{\max_target} > 0 \end{cases} \quad (10)$$

则更新区间范围:

$$\begin{cases} H_{\min} = H_{\text{GFM}}, H_{\max} = H_{\max} \\ K_{\min} = K_{\text{GFM}}, K_{\max} = K_{\max} \end{cases} \quad (11)$$

2) 评估是否满足切换条件:若满足 $|R_{\text{oCoF}}|_{H_{\max}} - R_{\text{oCoF}}|_{H_{\min}}|$ 或区间长度缩小至预设阈值以下(修正 K_{GFM} 时不满足 $|\Delta f_{\max}|_{K_{\max}} - \Delta f_{\max}|_{K_{\min}}|$ 或区间长度缩小至预设阈值以下),则将 use_secant 置为 1,启用割线法;否则继续保持 use_secant=0,采用稳健的二分法更新需求值。

3) 判断当前是否满足使用割线法的条件(即标志变量 use_secant 是否为 1);若为 0,则采用二分法修正当前需求值;若为 1,则尝试采用割线法修正需求值。

4) 执行割线法修正后,判断新需求值是否在当前的评估范围内;若越界,则退回使用二分法修正,避免不稳定修正;若在有效区间内,则当前所得需求即为修正后需求值。

5) 二分法修正后,判断当前的评估范围区间长度是否足够小,若满足精度 ε 则直接结束仿真评估;若未达到精度要求,当前所得需求即为修正后需求值。

6) 需求参数修正流程结束,进入下一轮需求修正仿真,直至满足频率安全指标对构网型变流器频率支撑的临界配置。

通过引入布伦特算法的动态自适应特性,本方法能够显著提升需求评估的效率与精度,特别适用于频率响应函数非线性强、可调参数维度较高的 GFM 控制策略设计场景。

4 算例分析

基于 Matlab/Simulink 平台,搭建了耦合直流和新能源的 IEEE-39 节点系统频率响应模型,对所提构网型变流器频率支撑需求动态评估方法的有效性进行测试和验证。

4.1 仿真环境介绍

如图 5 所示,系统中共包含 8 台同步机组、1 个跟网型变流器场站(G32)、1 个构网型变流器场站(G34)和 1 回馈入直流,各类型资源出力情况如表 1 所示。

在给定工况下,系统负荷水平为 10 880 MW,其中跟网型变流器出力 1000 MW,构网型变流器出力

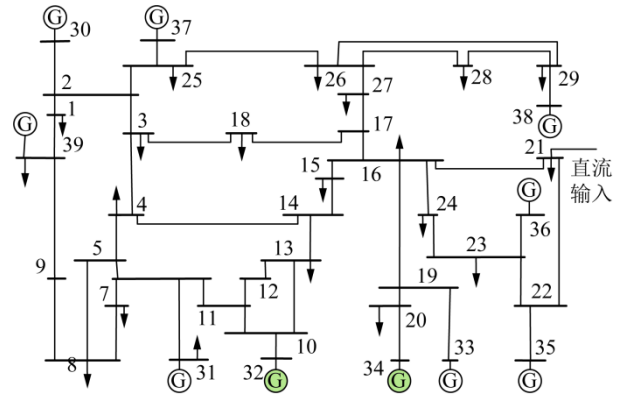


图 5 系统多机频率响应仿真模型

Fig. 5 Simulation model of multi-machine system frequency response

表 1 系统出力情况
Table 1 System processing status

出力类型	出力/MW	出力占比/%
同步机	5280	48.53
直流	1600	14.71
跟网型变流器	1000	9.19
构网型变流器	3000	27.57
总出力	10 880	100.00

3000 MW,出力占比分别为 9.19% 和 27.57%,新能源出力总占比达 36.76%。

4.2 3 种迭代算法对比

本文设置系统安全约束的最大频率变化率为 1 Hz/s,受扰后的最大频率偏差为 0.5 Hz^[47]。在 2 种工况下,采用不同故障量扰动进行构网型变流器惯量和一次调频能力需求评估。**工况 1:**同步机参与调频,直流不参与调频,故障量为 600 MW 和 700 MW;**工况 2:**同步机参与调频,直流参与调频,故障量为 800 MW 和 900 MW。不同工况和不同扰动下加入 GFM 控制前后的频率曲线对比结果如图 6 所示。

由图 6 可以看出,在未加入构网型变流器控制前系统的频率支撑能力都存在明显不足。在加入构网型变流器控制后,系统频率抗干扰性能得到极大改善,证明了在高比例电力电子化系统中接入构网型变流器的必要性。

不同工况和不同故障下,3 种迭代算法的迭代次数对比结果如表 2 所示。根据仿真数据分析,3 种算法的计算误差普遍控制在 5% 以内,峰值误差亦未超过 10%,均满足工程精度要求,验证了 3 种迭代算法在本文模型中的适用性。对迭代收敛特性进行分析,二分法在大容量故障场景下展现出显著的收敛速度优势,而割线法在小容量故障时则呈现出更高的计算效率。值得注意的是,自适应布伦特算法在各类预想故障

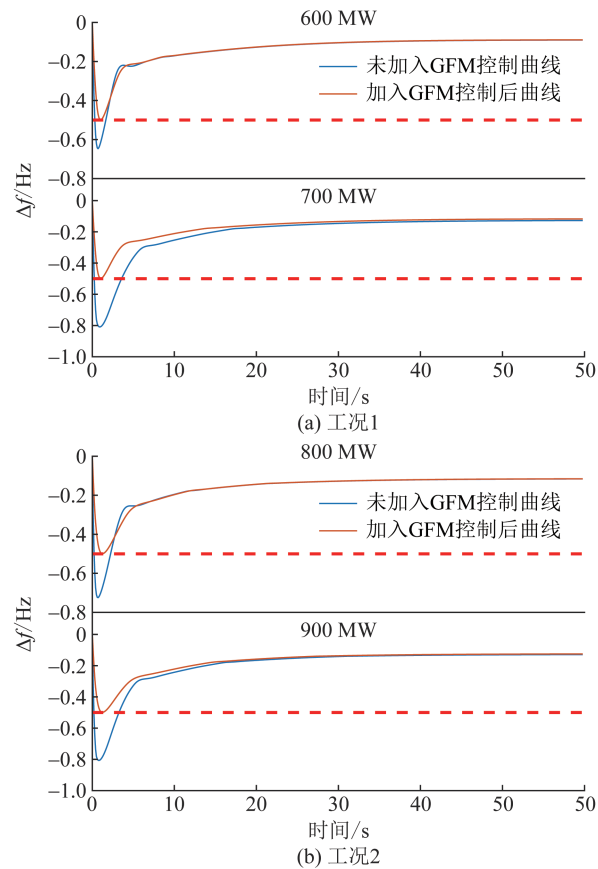


图 6 不同故障下构网型控制加入前后频率曲线对比
Fig. 6 Comparison of frequency curves before and after applying grid-forming control under different faults

场景下基本均能展现出最优的收敛性能。

为更好地对 3 种算法的收敛性能优劣进行对比,选取工况 1 下 700 MW 预想故障下评估构网型变流器表征调频需求参数 K_{GFM} 的迭代过程,对比 3 种算法中参数每次迭代数值,结果如图 7 所示。

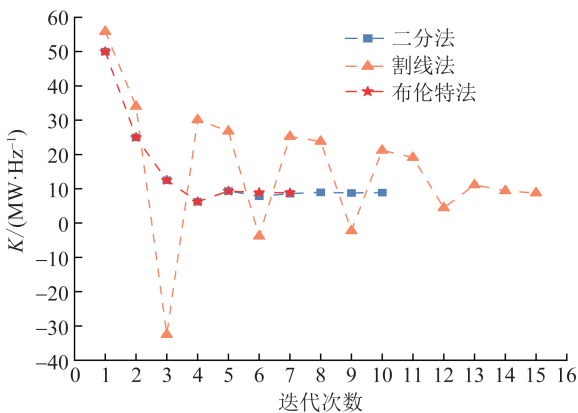


图 7 700 MW 预想故障下 3 种算法迭代过程对比
Fig. 7 Comparison of iteration processes for three algorithms under a 700 MW fault

实验数据表明,初始区间的选择对迭代算法的性能具有显著影响。当目标需求值搜索区间较大时,割线法在迭代过程中容易出现参数漂移,导致部分样本的估计值超出预设区间(如割线法的第 3 次迭代数据为 -33.54 MW/Hz),引发数值震荡,并增加了平均迭代次数。相比之下,二分法在初始阶段表现出指数级收敛速度,但在接近目标阈值时,由于其线性收敛特性,收敛速率明显下降。实验数据显示,该阶段的迭代次数(二分法第 4 次迭代之后)占总迭代量的 60% 以上,这主要归因于二分法固定区间折半机制的固有局限。

相较而言,自适应布伦特算法通过动态收敛策略有效整合了不同算法的优势。它在保持二分法初期指数级收敛特性的同时,能够在残差进入阈值区间时,智能切换至割线法迭代模式。此混合策略既避免了二分法后期线性收敛阶段的效率瓶颈,又借

表 2 不同故障下 3 种算法迭代次数对比
Table 2 Comparison of iteration counts for three algorithms under different faults

故障量/ MW	迭代算法	H_{GFM}/s	H_{GFM} 最大相对 误差/%	$K_{\text{GFM}}/(\text{MW} \cdot \text{Hz}^{-1})$	K_{GFM} 最大相对 误差/%	H_{GFM} 迭代 次数/次	K_{GFM} 迭代 次数/次	总迭代 次数/次	求解 时间/s
600 (工况 1)	二分法	3.58	1.94	1.12	9.19	7	11	18	6.88
	割线法	3.53		1.04		8	4	12	6.21
	布伦特法	3.60		1.02		5	6	11	5.95
700 (工况 1)	二分法	7.34	3.29	8.89	1.01	7	10	17	6.71
	割线法	7.59		8.80		10	15	25	10.55
	布伦特法	7.56		8.85		5	7	12	6.28
800 (工况 2)	二分法	4.38	5.19	3.38	4.36	5	8	13	6.30
	割线法	4.62		3.44		6	3	9	5.87
	布伦特法	4.61		3.29		5	5	10	5.98
900 (工况 2)	二分法	8.28	0.60	10.05	1.18	7	10	17	6.72
	割线法	8.23		10.17		6	5	11	6.01
	布伦特法	8.28		10.07		7	4	11	6.13

助动态边界约束机制控制割线法的参数漂移风险,使得融合算法在整体性能上更具优越性和适用性。

4.3 新能源渗透率对构网型变流器频率支撑能力的影响

所提方法可进一步在新能源接入比例逐渐提高情况下,评估构网型变流器所需的惯性和调频性能。随着电网中新能源渗透率的提高,新能源接入后挤占有功出力空间,提供主要有功支撑的同步机组开机容量下降,频率支撑能力恶化。为方便对比新能源渗透率提高对构网型变流器频率支撑性能需求的影响,本节设定系统总负荷水平保持不变,引入新能源出力系数 K_{new} 表征系统中的新能源渗透率,引入同步机组和直流的出力系数 K_c ,二者之和等于1^[48]。不同新能源渗透率下构网型变流器频率支撑需求如图8所示。

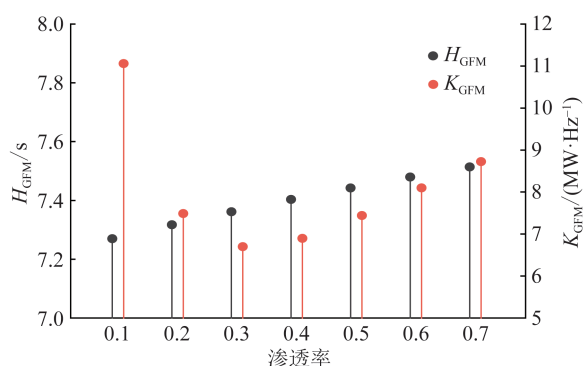


图8 不同新能源渗透率下构网型变流器频率支撑需求

Fig. 8 Frequency support requirements of grid-forming converters under different levels of renewable energy penetration

仿真结果表明,随着新能源渗透率的持续提升,构网型变流器的等效惯量需求 H_{GFM} 呈现单调递增特性,而频率调节需求 K_{GFM} 则表现出先减小后增大的非线性趋势。从机电暂态过程分析,系统受扰瞬间的暂态频率变化率主要受整个系统等效惯性时间常数的制约,因此 H_{GFM} 随着渗透率增大而不断增大。在系统受扰后,最大频率偏差 Δf_{max} 同时受整个系统等效惯量水平和一次调频能力的耦合影响:当新能源渗透率较小时,惯性支撑能力的增强有效抑制了频率跌落幅度,反而导致调频需求 K_{GFM} 减小;而当渗透率提高到一定的比例后,新能源机组占比过高引发的惯量支撑饱和效应,迫使系统通过提升 K_{GFM} 来补偿动态调节能力缺口,从而形成 K_{GFM} 参数先减小后增大的特性。

由构网型变流器惯量与调频性能的动态耦合机制可推测,惯量需求 H_{GFM} 和调频需求 K_{GFM} 之间应存在一个最优组合,使得整体系统可达到某个优化目标。结合实际电网发展情况来看,现行电力系统仍以跟

网型变流器为主,提高构网型变流器比例可依据最小成本或者最优性能等优化目标,灵活选择采用改装跟网型还是加装构网型。

5 结论

本文提出了一种量化构网型变流器频率支撑需求的评估方法。通过构建包含构网型变流器虚拟惯量和一次调频需求的动态评估模型,在频率变化率和频率偏差约束下,实现关键需求临界值的高效求解。

所提出的自适应布伦特算法融合了二分法全局收敛性与割线法超线性收敛特性,计算效率显著提升。当新能源渗透率提高时,系统的频率安全性下降,需由构网型变流器通过虚拟惯量与一次调频协同发挥作用,揭示了高渗透率场景下惯量支撑与动态调频补偿之间的耦合作用机制。

建立的构网型变流器频率支撑需求评估方法为后续构网型变流器的优化配置和参数整定提供了理论基础,其算法框架可扩展至多类型电力电子设备的协同调频分析。此外,在沙戈荒新能源基地开发背景下,基地内部跟网型与构网型容量占比等问题逐渐凸显,后续可深入开展相关研究。

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):

杨凯璇提出研究概念与总体研究方向,设计论文的基本框架,主导研究方案构建;王学斌设计研究思路与方法体系,开展研究方案可行性分析,组织实施主要研究过程;宋锐负责模型搭建、仿真实验设计与对比实验开展,完成实验结果分析;索心语确定研究对象范围,负责数据收集、处理与统计分析;傅国斌承担关键算法模块开发,负责图表绘制和技术实现细节完善;王澧森参与文献调研与资料整理,协助提出部分研究内容,参与论文撰写;文云峰起草论文主要章节,负责论文修订、结构调整与终稿审核。所有作者均阅读并同意了论文的最终版本。

6 参考文献

- [1] 刘翔宇, 李晓明, 朱介北, 等. 新型电力系统的频率响应模型综述及展望[J]. 南方电网技术, 2022, 16(10): 38-47.
LIU Xiangyu, LI Xiaoming, ZHU Jiebei, et al. Review and prospect on frequency response models of new power system [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(10): 38-47.
- [2] 雷歆蕊, 赵坤. 构网型储能如何成就青海“好风光”?[N]. 中国电力报, 2025-04-18(001).

- [3] 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.
- [4] 鲁宗相, 李佳明, 乔颖, 等. 新能源场站快速频率支撑能力评估研究现状与技术展望[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(10): 1-19.
- LU Zongxiang, LI Jiaming, QIAO Ying, et al. Research status and technology prospects of fast frequency support capability assessment for renewable energy stations [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(10): 1-19.
- [5] 金楚, 李作红, 林勇, 等. 考虑频率安全及风能转移的风电场规划与运行[J]. 电力建设, 2025, 46(3): 155-165.
- JIN Chu, LI Zuohong, LIN Yong, et al. Planning and operation of wind farms considering frequency safety and wind energy transfer [J]. Electric Power Construction, 2025, 46(3): 155-165.
- [6] 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.
- [7] 李翼翔, 田震, 唐英杰, 等. 考虑构网型与跟网型逆变器交互的孤岛微电网小信号稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(8): 11-18.
- LI Yixiang, TIAN Zhen, TANG Yingjie, et al. Small-signal stability analysis of island microgrid considering interaction between grid-forming converter and grid-following converter [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(8): 11-18.
- [8] 孙华东, 许涛, 郭强, 等. 英国“8·9”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6183-6192.
- SUN Huadong, XU Tao, GUO Qiang, et al. Analysis on blackout in Great Britain power grid on August 9th, 2019 and its enlightenment to power grid in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6183-6192.
- [9] 鲁宗相, 汤海雁, 乔颖, 等. 电力电子接口对电力系统频率控制的影响综述[J]. 中国电力, 2018, 51(1): 51-58.
- LU Zongxiang, TANG Haiyan, QIAO Ying, et al. The impact of power electronics interfaces on power system frequency control: a review [J]. Electric Power, 2018, 51(1): 51-58.
- [10] 刘延龙, 陈晓光, 姚爽爽, 等. 基于构网型SVG控制优化的双馈风场高频谐振抑制分析[J]. 电力建设, 2024, 45(11): 125-136.
- LIU Yanlong, CHEN Xiaoguang, YAO Shuangshuang, et al. Analysis of high-frequency resonance suppression in doubly-fed wind farms based on grid-forming SVG control optimization [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(11): 125-136.
- [11] 张斌, 张学广, 徐殿国. 构网型与跟网型变流器混联并网系统配比关键影响因素分析[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(1): 47-58.
- ZHANG Bin, ZHANG Xueguang, XU Dianguo. Analysis on key influence factors of ratio of grid-forming and grid-following converters in hybrid parallel grid-connected system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(1): 47-58.
- [12] 郑云平, 焦春雷, 亚夏尔·吐尔洪, 等. 基于新能源发电的构网型协调储能控制策略研究[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 65-74.
- ZHENG Yunping, JIAO Chunlei, YAXAR·Turgun, et al. Research on grid-forming coordinated energy storage control strategy based on converter-interfaced generation [J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 65-74.
- [13] 阮亮, 王杨, 肖先勇, 等. 跟网型和构网型变流器动态交互特性分析[J]. 智慧电力, 2024, 52(7): 103-110.
- RUAN Liang, WANG Yang, XIAO Xianyong, et al. Dynamic interaction control characteristic analysis of gridfollowing and grid-forming inverters [J]. Smart Power, 2024, 52(7): 103-110.
- [14] 魏澈, 苏开元, 邱银锋, 等. 风电为主体的海上油田群电力系统构网方式初探[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(2): 147-154.
- WEI Che, SU Kaiyuan, QIU Yinfeng, et al. Preliminary exploration of grid-forming strategies for wind power-dominant new-type offshore oilfield power systems [J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(2): 147-154.
- [15] 马子涵, 黄萌, 付熙坤, 等. 构网型电源接入下新能源场站的稳定运行能力评估[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(1): 38-46.
- MA Zihan, HUANG Meng, FU Xikun, et al. Stable operation capability evaluation for renewable energy station with grid-forming power sources [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(1): 38-46.
- [16] 胡同宇, 杨德健, 钱敏慧, 等. 基于惯量同步的构网型永磁直驱风电机组频率支撑及转速恢复策略[J]. 智慧电力, 2024, 52(7): 72-79.
- HU Tongyu, YANG Dejian, QIAN Minhui, et al. Frequency support and speed recovery strategy of grid-forming PMSGs based on inertia synchronization [J]. Smart Power, 2024, 52(7): 72-79.
- [17] 符杨, 陈禹瑾, 季亮, 等. 考虑功率解耦的构网型逆变器的低电压穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(15): 1-13.
- FU Yang, CHEN Yujin, JI Liang, et al. Low voltage ride-through control strategy of a grid-forming inverter considering power decoupling [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(15): 1-13.
- [18] CHEN Y R, ZHANG X P, YAN S H. Frequency stability analysis of grid-forming control in voltage source converters [J]. IEEE Access, 2024, 12: 197816-197826.
- [19] 汪梦军, 郭剑波, 马士聪, 等. 新能源电力系统暂态频率稳定分析与调频控制方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1672-1694.
- WANG Mengjun, GUO Jianbo, MA Shicong, et al. Review of transient frequency stability analysis and frequency regulation control methods for renewable power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1672-1694.
- [20] 辛焕海, 王宇轩, 刘晨曦, 等. 提高新能源场站稳定性的构网型与跟网型变流器容量配比估算[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(14): 5463-5473.
- XIN Huanhai, WANG Yuxuan, LIU Chenxi, et al. Estimation of capacity ratios between grid-forming and grid-following converters for improving the stability of renewable energy stations [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(14): 5463-5473.
- [21] XIN H H, LIU C X, CHEN X, et al. How many grid-forming converters do we need? A perspective from small signal stability and power grid strength [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2025, 40(1): 623-635.
- [22] 宋璐瑶, 陈俊儒, 程静, 等. 构网型新能源场站环流产生机理研究[J]. 智慧电力, 2024, 52(3): 8-16.

- SONG Luyao, CHEN Junru, CHENG Jing, et al. Mechanism of generating circulating current in grid-forming renewable energy power plant[J]. Smart Power, 2024, 52(3): 8-16.
- [23] 张建坡, 柴欣茹, 辛光明, 等. 换相失败场景下构网型风机对送端暂态过电压影响因素分析及抑制策略研究[J]. 智慧电力, 2024, 52(9): 1-8, 17.
- ZHANG Jianpo, CHAI Xinru, XIN Guangming, et al. Influencing factors of GFM-PMSG on sending-end transient overvoltage under commutation failure & its suppression strategies[J]. Smart Power, 2024, 52(9): 1-8, 17.
- [24] ROSSO R, WANG X F, LISERRE M, et al. Grid-forming converters: control approaches, grid-synchronization, and future trends: a review[J]. IEEE Open Journal of Industry Applications, 2021, 2: 93-109.
- [25] 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.
- [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] 江叶峰, 夏宇翔, 施琳, 等. 基于频率空间特性和灵敏度分析的惯量配置方法[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(5): 209-217.
- JIANG Yefeng, XIA Yuxiang, SHI Lin, et al. Inertia allocation method based on spatial frequency characteristic and sensitivity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(5): 209-217.
- [28] 马宁嘉, 谢小荣, 李浩志, 等. 计及频率动态分布性的新能源机组惯量需求分析[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(9): 3500-3508.
- MA Ningjia, XIE Xiaorong, LI Haozhi, et al. Inertial requirements for renewable energy units considering the space-time distribution characteristics of frequency[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(9): 3500-3508.
- [29] 张祥宇, 邵改建, 付媛. 风储并网发电系统的虚拟多段协同调速与频率安全支撑技术[J]. 电工技术学报, 2025, 40(15): 4677-4693.
- ZHANG Xiangyu, SHAO Zijian, FU Yuan. Virtual multi-stage coordinated speed regulation and frequency safety support technology of wind-storage grid-connected power generation system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(15): 4677-4693.
- [30] 赵正晖, 王夏楠, 齐步洋, 等. 基于主从博弈的新型电力系统惯量需求优化调度策略[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(7): 179-188.
- ZHAO Zhenghui, WANG Xianan, QI Buyang, et al. Optimal scheduling strategy for inertial demand of new power system based on Stackelberg game[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(7): 179-188.
- [31] 王祺, 余鹏, 郭建伟, 等. 风机参与系统一次调频虚拟惯量优化控制[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(16): 6368-6380.
- WANG Qi, YU Peng, GUO Jianwei, et al. Virtual inertia optimization control of the system's primary frequency modulation with wind turbine participation[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(16): 6368-6380.
- [32] 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.
- [33] 杨可昕, 鲍颜红, 任先成, 等. 直接电压控制构网型变流器控制参数暂态稳定影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8): 20-30.
- YANG Kexin, BAO Yanhong, REN Xiancheng, et al. Analysis of transient stability effects of control parameters for direct voltage control grid-forming converters[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8): 20-30.
- [34] 李玉京, 胡鹏飞, 曹宇, 等. 计及频率响应延时的构网型变流器惯量参数数据驱动估计方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(19): 80-88.
- LI Yujing, HU Pengfei, CAO Yu, et al. Data-driven estimation method for inertia parameters of grid-forming converter considering frequency response delay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(19): 80-88.
- [35] 刘珏麟, 余娟, 杨知方, 等. 面向电力系统概率稳定性提升的风电虚拟惯量参数优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(17): 6602-6614.
- LIU Juelin, YU Juan, YANG Zhifang, et al. Virtual inertia parameter optimization method for power system probabilistic stability improvement[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(17): 6602-6614.
- [36] 王亚军, 杨立波, 马斌, 等. 虚拟同步机惯量及阻尼系数协调优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(19): 88-98.
- WANG Yajun, YANG Libo, MA Bin, et al. Coordination and optimization strategy of virtual inertia and damping coefficient of a virtual synchronous generator[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(19): 88-98.
- [37] 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.
- [38] 刘彦军, 何维, 朱东海, 等. 基于二阶VSG的变换器频率支撑能力评估及提升方法[J]. 电力建设, 2024, 45(11): 102-113.
- LIU Yanjun, HE Wei, ZHU Donghai, et al. Evaluation and improving method of frequency support of converters based on second-order VSG section[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(11): 102-113.
- [39] 张娜, 赵琳, 郭力滔, 等. 面向频率响应容量规划的快速随机生产模拟算法[J]. 现代电力, 2023, 40(3): 352-362.
- ZHANG Na, ZHAO Lin, GUO Litao, et al. Research on fast probabilistic production simulation algorithm for frequency response capacity planning[J]. Modern Electric Power, 2023, 40(3): 352-362.
- [40] 刘瑞平, 袁亮, 胡铭欣, 等. 含构网型新能源发电单元的孤立电

- 网暂态稳定性提升策略[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(6): 152-161.
- LIU Ruiping, YUAN Liang, HU Mingxin, et al. A transient stability improvement strategy of isolated power grids with grid-forming-based renewable energy power generation units [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(6): 152-161.
- [41] 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.
- [42] 刘洋, 林英明, 余达, 等. 构网型虚拟同步化光储并网系统的频率支撑策略[J]. 电源学报, 2025, 23(3): 152-161.
- LIU Yang, LIN Yingming, YU Da, et al. Frequency support strategy for grid-forming virtual synchronization PV-storage grid-connected system [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(3): 152-161.
- [43] CHAN M L, DUNLOP R D, SCHWEPPE F. Dynamic equivalents for average system frequency behavior following major disturbances [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1972, PAS-91(4): 1637-1642.
- [44] 董玮, 施志明, 张晓琳, 等. 计及新能源场站调频时延的电力系统频率响应模型及应用[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(12): 4657-4669.
- DONG Wei, SHI Zhiming, ZHANG Xiaolin, et al. Frequency response model and application of power system considering the frequency regulation delay of renewable energy station [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(12): 4657-4669.
- [45] BURDEN R L, FAIRES J D. Numerical analysis [M]. Boston: Brooks/Cole, 2015: 76-78.
- [46] ZHANG X, VITTAL V. Design of inertia emulation controller for wind turbine generators based on adaptive model reference control [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(1): 256-266.
- [47] 刘洋, 邵广惠, 张弘鹏, 等. 新能源参与系统一次调频分析及参数设置[J]. 电网技术, 2020, 44(2): 683-689.
- LIU Yang, SHAO Guanghui, ZHANG Hongpeng, et al. Analysis of renewable energy participation in primary frequency regulation and parameter setting scheme of power grid [J]. Power System Technology, 2020, 44(2): 683-689.
- [48] 张剑云, 李明节. 新能源高渗透的电力系统频率特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 3498-3507.
- ZHANG Jianyun, LI Mingjie. Analysis of the frequency characteristic of the power systems highly penetrated by new energy generation [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3498-3507.

收稿日期: 2025-05-20 修回日期: 2025-07-31

作者简介:



杨凯璇

杨凯璇(1997),女,本科,助理工程师,主要研究方向为电力系统仿真分析、电网调度运行, E-mail: 806867060@qq.com;

王学斌(1988),男,硕士,高级工程师,从事电网运行控制技术研究, E-mail: 13997235270@163.com;

宋锐(1979),男,本科,高级工程师,主要从事电力系统及其自动化工作, E-mail: 13997233347@163.com;

索心语(2002),女,博士研究生,主要研究方向为低惯量电力系统运行与控制, E-mail: xinyu.suo@qq.com;

傅国斌(1993),男,本科,工程师,主要研究方向为电力系统分析、电网运行与控制, E-mail: fgbin0814@163.com;

王澧森(2001),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统频率稳定分析与控制, E-mail: wanglisen@hnu.edu.cn;

文云峰(1986),男,博士,教授,博士生导师,通信作者,主要研究方向为低惯量电力系统规划、运行与控制, E-mail: yunfeng.8681@163.com。

(编辑 张小飞)