

基于惯量-阻尼动态调整的跟网-构网变流器 并联系统暂态稳定控制方法

陈磊^{1*}, 郑燊聪¹, 郭瑶¹, 陈红坤¹, 曹玉媛², 黄达文²

(1. 武汉大学 电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072;

2. 广东电网有限责任公司 肇庆供电局, 广东 肇庆 526040)

Transient Stability Control Method for Parallel System of Grid-Following and Grid-Forming Converters Based on Dynamic Adjustment of Inertia-Damping

CHEN Lei^{1*}, ZHENG Shencong¹, GUO Yao¹, CHEN Hongkun¹,
CAO Yuyuan², HUANG Dawen²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Zhaoqing Power Supply Bureau, CSG Guangdong Power Grid Corporation, Zhaoqing 526040, China)

Abstract: [Objective] To address the transient stability challenges in grid-following and grid-forming (GFL-GFM) converters parallel system, this paper proposes a transient stability control method based on dynamic adjustment of inertia-damping. [Methods] Firstly, a two-stage transient control framework was established for the GFL-GFM converters parallel system. During the fault period, fault current limiters were rapidly activated to mitigate overcurrent, while in the post-fault recovery stage, the phase-locked loop (PLL) of GFL converter and the inertia-damping parameters of GFM converter were dynamically adjusted. Secondly, the Sigmoid function was adopted to achieve inertia-damping coordination tuning, and the controller parameters were adaptively adjusted by the trend of the power angle of the parallel system. Finally, a time-domain simulation model of the parallel system of GFL-GFM converters was established based on the Matlab/Simulink platform. Through comparisons with traditional control methods and tests under voltage sag conditions of varying degrees, the effectiveness of the proposed transient control method was verified from multiple aspects. [Results] The results showed that compared with the traditional PLL freezing of GFL converter and the additional power control strategy of GFM converter, the proposed control method significantly reduced the amplitude

of the power angle oscillation of GFL-GFM converters, greatly shortened the oscillation period, and adapted well to both mild and severe voltage sag conditions. The proposed control method effectively ensured the transient stability of the GFL-GFM converters parallel system during the whole fault process, and it also reduced the power angle oscillation deviation by more than 5%. [Conclusion] The proposed method enhances the adaptability and robustness of GFL-GFM converters parallel system under voltage sag of varying degrees, providing a new idea for the stable operation of grid-connected system with high proportion of power electronic equipment, which has good application value.

Key words: transient stability control; grid-following and grid-forming converters parallel system; inertia-damping coordination; Sigmoid function; power angle oscillation

摘要:【目的】为解决跟网-构网(GFL-GFM)变流器并联系统的暂态稳定问题,本文提出了一种基于惯量-阻尼动态调整的暂态稳定控制方法。【方法】首先,构建了GFL-GFM变流器并联系统的两阶段暂态控制框架,在故障初期快速投入故障电流限制器以降低过电流水平,在故障后恢复阶段动态调整GFL变流器的锁相环(PLL)与GFM变流器的惯量-阻尼参数;其次,采取Sigmoid函数实现惯量-阻尼协同整定,并通过并联系统的功角变化趋势自适应调整控制器参数;最后,基于Matlab/Simulink平台构建了GFL-GFM变流器并联系统的时域仿真模型,通过与传统控制方法的对比及在不同程度电压暂降工况下的

基金项目:南方电网科技项目(GDKJXM20231387)

Science and Technology Project of China Southern Power Grid
(GDKJXM20231387)

测试,从多方面验证了所提暂态控制方法的有效性。【结果】结果表明,相较于传统 GFL 变流器 PLL 冻结与 GFM 变流器附加功率控制策略,所提控制方法使 GFL-GFM 变流器的功角振荡幅度显著降低,功角振荡周期大幅度缩短,且能良好地适应轻度和重度电压暂降工况。所提控制方法有效保证了 GFL-GFM 变流器并联系统在整个故障过程中的暂态稳定性,并将功率角振荡偏差降低 5% 以上。【结论】本文所提方法提升了 GFL-GFM 变流器并联系统在不同程度电压暂降下的适应性与鲁棒性,为高比例电力电子设备并网系统的稳定运行提供了新思路,具有良好的应用价值。

关键词: 暂态稳定控制;跟网-构网变流器并联系统;惯量-阻尼协同;Sigmoid 函数;功角振荡

0 引言

随着全球能源结构向低碳化转型,以风电、光伏为代表的新能源发电技术得到了快速发展。据国际能源署统计,2025 年全球可再生能源发电量占比已超过 30%,其中超过 90% 的新能源并网系统依赖电力电子变流器实现电能转换^[1-3]。然而,传统同步发电机主导的电力系统正逐步被高比例电力电子装备取代,导致系统惯性水平显著下降,变流器故障穿越能力减弱,严重威胁系统稳定性^[4]。在此背景下,如何有效改善电力电子装备的暂态稳定性,成为保障新型电力系统安全运行的核心问题。

在新能源设备并网技术中,变流器根据控制策略可大致分为跟网型(Grid-Following, GFL)和构网型(Grid-Forming, GFM)^[5-6]两类。其中,GFL 变流器通过锁相环(Phase-Locked Loop, PLL)跟踪电网电压频率,具有快速响应特性,但缺乏惯性支撑能力;GFM 变流器通过虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)技术模拟同步发电机(Synchronous Generator, SG)的惯量和阻尼特性,主动参与电网频率调节^[7-8]。

近年来,为平衡 GFL 变流器和 GFM 变流器的优势,专家学者们提出了 GFL-GFM 变流器并联运行的混合拓扑结构^[9]。然而,GFL-GFM 变流器并联系统在暂态控制过程中面临以下挑战:(1)在故障初期,GFL 变流器因 PLL 未冻结将产生过电流,GFM 变流器的惯量释放可能导致功率振荡;(2)传统 GFL 变流器、GFM 变流器的控制策略多采用固

定参数,如惯量时间常数、阻尼系数,难以适应不同故障严重程度下的动态调节需求^[10-11]。

针对上述问题,国内外科研机构开展了初步研究工作。文献[12]研究了并联系统的小信号分析模型,采用阻尼转矩法揭示了 GFM 新能源占比对并联系统的振荡影响机理,但未解决故障场景下的参数协调问题。文献[13]设计了基于模糊逻辑的惯量分配策略,通过实时监测电网频率调整 GFM 变流器的虚拟惯量,但其规则库依赖人工经验,泛化能力还有待进一步提升。文献[14]采用模式切换控制抑制了故障电流,实现了 GFM 变流器的电压跟踪和 GFL 变流器的电流控制,且具备较好的抗干扰能力。文献[15]采用 PLL 冻结技术限制 GFL 变流器的电流突变,同时固定 GFM 变流器的惯量参数,但未考虑暂态控制期间两者协同对系统同步稳定性的影响。文献[16]根据电压跌落情况调整 GFM 变流器功角,并对 GFL 变流器 PLL 进行了改进,实现了混合暂态控制运行。文献[17]基于储能装置进行电压快速补偿,提高了 GFL-GFM 变流器混合系统的暂态控制能力,但故障场景下的动态特性分析有所不足,不同变流器的协同控制性能尚待充分挖掘。

尽管现有研究在暂态控制方面取得了一定进展,但侧重点通常是针对 GFL 变流器或 GFM 变流器的控制参量进行单独调整,缺乏对并联系统的协同控制研究。因此,本文提出一种基于惯量-阻尼动态调整的 GFL-GFM 变流器并联系统暂态稳定控制方法。通过构建两阶段控制框架,结合 Sigmoid 函数实现了参数自适应整定;并基于功角变化趋势优化了控制器性能;最后基于 Matlab/Simulink 平台进行仿真。仿真结果表明,相较于传统控制方法,本文所提控制方法显著降低了功角振荡幅度并能保障系统安全稳定运行,为高比例电力电子系统暂态控制提供了新思路。

1 GFL-GFM 变流器并联系统建模

GFL-GFM 变流器并联系统示意图如图 1 所示,系统主要由 SG、GFL 变流器和 GFM 变流器构成,三者通过并联方式连接至公共耦合连接点(Point of Common Coupling, PCC)及主电网。

图 1 中, U_{SG} 、 U_{GFL} 、 U_{GFM} 和 θ_{SG} 、 θ_{GFL} 、 θ_{GFM} 分别为 SG、GFL 变流器、GFM 变流器端口处的电压幅

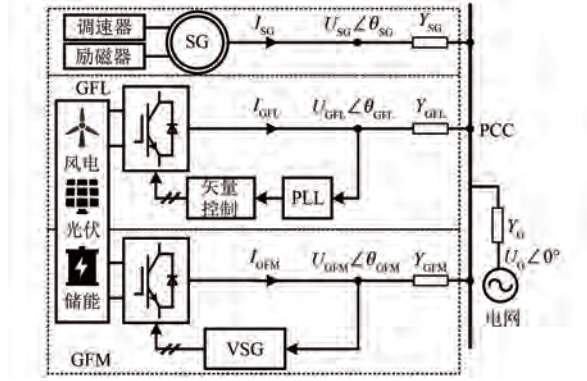


图 1 GFL-GFM 变流器并联系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of parallel system of GFL-GFM converters

值和电压相角; I_{SG} 、 I_{GFL} 和 I_{GFM} 分别为 SG、GFL 变流器和 GFM 变流器向电网输出的电流幅值; Y_{SG} 、 Y_{GFL} 和 Y_{GFM} 为对应支路等效导纳; U_G 、 Y_G 分别为电网的电压幅值、等效导纳。

SG 控制框图如图 2 所示,主要包括调速器和励磁器。其中,调速器可追踪 SG 转子角速度变化,根据 SG 额定功率 P_{SGN} 自主调节原动机机械功率 $P_{SG,ref}$,通过转子运动方程得到 SG 的角速度 ω_{SG} 。

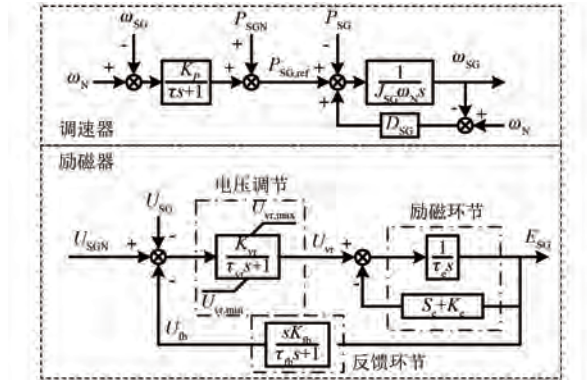


图 2 SG 控制框图

Fig. 2 Control block diagram of SG

图 2 中, J_{SG} 、 D_{SG} 和 P_{SG} 分别为 SG 的惯量、阻尼和有功功率; ω_N 为电网角速度; U_{SGN} 、 U_{SG} 分别为 SG 的额定电压、实际电压; U_{vr} 、 E_{SG} 和 U_{fb} 分别为电压调节环节、励磁环节和反馈环节的输出电压; $U_{vr,max}$ 、 $U_{vr,min}$ 分别为电压调节器输出电压的最大、最小值; τ_{vr} 、 τ_e 和 τ_{fb} 为时间常数; K_{vr} 、 K_{fb} 为增益系数; S_e 为励磁器的饱和系数; K_e 为分流励磁变阻器系数; K_p 为 SG 的有功调节系数; t 为调速器的惯性响应时间常数; s 为拉普拉斯变换

算子。

在暂态分析过程中,由于原动机响应时间较长,通常假定 $P_{SG,ref}$ 不变^[18],调速器表达式可简化为

$$J_{SG} \frac{d\omega_{SG}}{dt} = \frac{P_{SG,ref} - P_{SG}}{\omega_N} + D_{SG}(\omega_N - \omega_{SG}) \quad (1)$$

GFL 变流器的控制框图如图 3 所示,主要包括 PLL 控制与矢量控制环节。

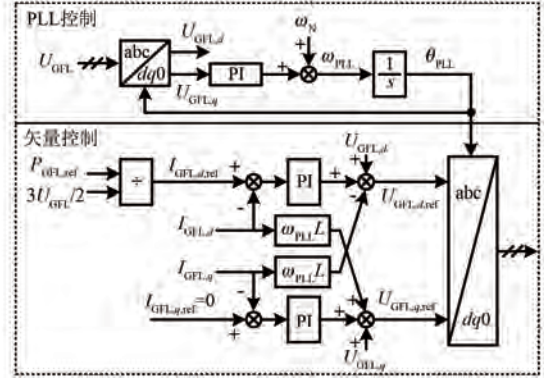


图 3 GFL 变流器控制框图

Fig. 3 Control block diagram of the GFL converter

图 3 中, P_{GFL} 为 GFL 变流器输出功率;下标 ref、d 和 q 分别为相应变量的参考值、d 轴分量和 q 轴分量; ω_{PLL} 、 θ_{PLL} 分别为锁相环角速度、相角。

PLL 控制表达式为

$$\omega_{PLL} = \omega_N + k_{P,PLL} U_{GFL,q} + k_{I,PLL} \int U_{GFL,q} dt \quad (2)$$

式中: $k_{P,PLL}$ 、 $k_{I,PLL}$ 分别为 PLL 中比例积分 (Proportional Integral, PI) 控制器的比例、积分系数。

GFM 变流器采用 VSG 控制方式,控制框图如图 4 所示^[16,19-21]。VSG 包括虚拟调速器与虚拟励磁调节器。

图 4 中, J 、 D 和 k_ω 分别为 GFM 变流器的虚

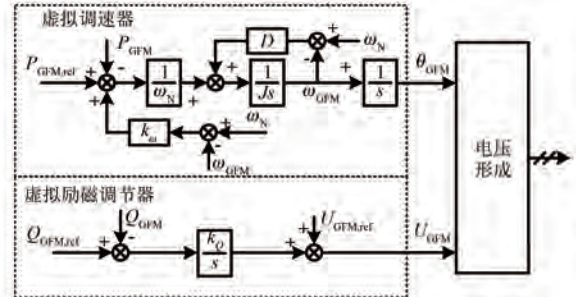


图 4 GFM 变流器控制框图

Fig. 4 Control block diagram of the GFM converter

拟惯量、虚拟阻尼系数与虚拟调频系数; ω_{GFM} 为 GFM 变流器的虚拟角速度; $P_{\text{GFM,ref}}$ 、 P_{GFM} 分别为 GFM 变流器额定有功功率、实际有功功率; k_Q 为虚拟调压系数; $U_{\text{GFM,ref}}$ 为 GFM 变流器端电压额定值; $Q_{\text{GFM,ref}}$ 、 Q_{GFM} 分别为 GFM 变流器额定无功功率、实际输出无功功率。

虚拟调速器用于模拟 SG 的调频功能, 包括有功-频率控制环节与转子运动方程, 满足式(3):

$$J \frac{d\omega_{\text{GFM}}}{dt} = \frac{P_{\text{GFM,ref}} - P_{\text{GFM}} + k_\omega(\omega_N - \omega_{\text{GFM}})}{\omega_N} + D(\omega_N - \omega_{\text{GFM}}) \quad (3)$$

虚拟励磁调节器用于模拟 SG 的无功调压功能, 满足式(4):

$$U_{\text{GFM}} = U_{\text{GFM,ref}} + k_Q \int (Q_{\text{GFM,ref}} - Q_{\text{GFM}}) dt \quad (4)$$

在分析 GFM 变流器暂态稳定性时, 可近似认为 $U_{\text{GFM}} = U_{\text{GFM,ref}}$, 即将 GFM 变流器等效成幅值为 U_{GFM} 、相角为 θ_{GFM} 的电压源。

2 GFL-GFM 变流器并联系统暂态控制方法

为解决 GFL-GFM 变流器并联系统中 SG 与 GFM 变流器的故障电流越限问题, 本文在其端口处配置故障限流器^[7], 在此基础上提出了并联系统的暂态控制框架, 如图 5 所示。主要目标是实现系统从故障暂态到稳态运行的全程动态控制。所提暂态控制框架采取两阶段控制策略。

(1) 在故障阶段, 通过监测 SG 和 GFM 变流器的电压、电流越限信号, 投入限流器以快速抑制故障电流。

(2) 在故障恢复阶段, 基于 GFL 变流器和 GFM 变流器的角频率变化率 $|d\omega/dt|$ 进行稳定性评估, 当检测到 $|d\omega/dt|$ 大于设定阈值 α_{th} 时, 动态调整 GFL 变流器 PLL 参数和 GFM 变流器控制参数, 通过抑制功角振荡来提升系统稳定性; 直到各电源满足 $|d\omega/dt| \leq \alpha_{\text{th}}$ 时退出控制, 系统恢复稳态运行。

本文采用 Sigmoid 函数实现 GFM 变流器虚拟惯量动态调整, 具有以下优势: (1) Sigmoid 函数的连续可微特性可确保虚拟惯量的平滑调整, 避免系统运行点突变, 有利于保障控制连贯性^[22-24]; (2) 通过调整 Sigmoid 函数的斜率和偏

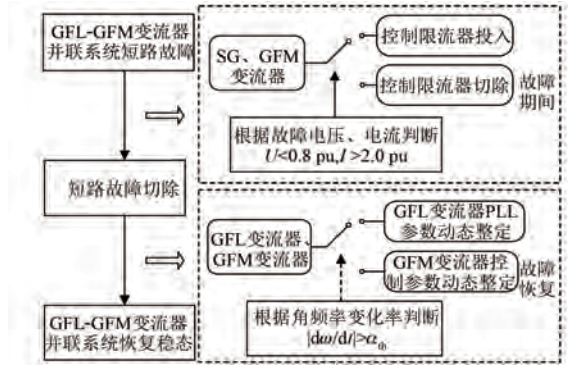


图 5 并联系统两阶段暂态控制框架

Fig. 5 Two-stage transient control framework for parallel system of GFL-GFM converters

移量, 可灵活控制虚拟惯量的调整速率和范围, 适应不同工况需求^[25]; (3) Sigmoid 函数计算简单, 可在系统扰动初期执行虚拟惯量快速调整, 实用性高^[26]。

GFM 变流器虚拟惯量 J 的动态调整过程如式(5)所示:

$$J = \begin{cases} J_0, & \left| \frac{d\omega}{dt} \right| \leq \alpha_{\text{th}} \cup \Delta\omega \geq 0 \\ J_0 + \frac{K_1}{1 + e^{-|d\omega/dt|}}, & \frac{d\omega}{dt} < 0 \cap \left| \frac{d\omega}{dt} \right| > \alpha_{\text{th}} \cap \Delta\omega < 0 \\ J_0 - \frac{K_2}{1 + e^{-|d\omega/dt|}}, & \frac{d\omega}{dt} \geq 0 \cap \left| \frac{d\omega}{dt} \right| > \alpha_{\text{th}} \cap \Delta\omega < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: J_0 为稳态时 GFM 变流器的惯量; $\Delta\omega$ 为角频率偏差; K_1 、 K_2 为 GFM 变流器惯量动态调整系数。

同时, 为保证 GFM 变流器动力学模型处于最佳阻尼比状态^[27], 考虑对 GFM 变流器虚拟阻尼系数 D 进行协同调整。GFM 变流器小信号模型如图 6 所示, 由图 6 可得:

$$\begin{cases} J \frac{d\Delta\omega_{\text{GFM}}}{dt} = \frac{\Delta P_{\text{GFM,ref}} - \Delta P_{\text{GFM}}}{\omega_N} - D\Delta\omega_{\text{GFM}} \\ \frac{d\Delta\theta_{\text{GFM}}}{dt} = \Delta\omega_{\text{GFM}} \\ \Delta P_{\text{GFM}} = \frac{EU}{X} \Delta\theta_{\text{GFM}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\Delta\omega_{\text{GFM}}$ 、 $\Delta P_{\text{GFM,ref}}$ 和 ΔP_{GFM} 分别为 GFM 变流器角速度扰动量、额定功率扰动量和输出功率扰动量; E 为 GFM 变流器内电势; E 为电网等效电压; X 为 GFM 变流器和电网之间的连接电抗。

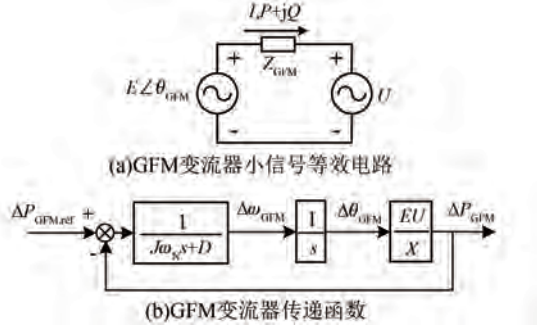


图6 GFM变流器小信号模型示意图

Fig. 6 Schematic diagram of GFM converter small-signal model

GFM变流器传递函数为

$$G_{\text{GFM}}(s) = \frac{\Delta P_{\text{GFM}}}{\Delta P_{\text{GFM,ref}}} = \frac{EU}{JX\omega_N s^2 + DXs + EU} \quad (7)$$

$$k_{\text{I,PLL}} = \begin{cases} k_{\text{I,PLL0}}, & \left| \frac{d\omega}{dt} \right| \leq \alpha_{\text{th}} \cup \Delta\omega \geq 0 \\ \frac{k_{\text{I,PLL0}}(1 + e^{-|\frac{d\omega}{dt}|})}{1 + e^{-|\frac{d\omega}{dt}|} + K_3 k_{\text{I,PLL0}}}, & \frac{d\omega}{dt} < 0 \cap \left| \frac{d\omega}{dt} \right| > \alpha_{\text{th}} \cap \Delta\omega < 0 \\ \frac{k_{\text{I,PLL0}}(1 + e^{-|\frac{d\omega}{dt}|})}{1 + e^{-|\frac{d\omega}{dt}|} - K_4 k_{\text{I,PLL0}}}, & \frac{d\omega}{dt} \geq 0 \cap \left| \frac{d\omega}{dt} \right| > \alpha_{\text{th}} \cap \Delta\omega < 0 \end{cases}$$

式中: $k_{\text{I,PLL0}}$ 为稳态时 PLL 积分系数; K_3 、 K_4 为 GFL 变流器惯量动态调整系数。

为保证 GFL 变流器 PLL 的动态特性,考虑对比例系数 $k_{\text{P,PLL}}$ 进行协同调整。首先,建立 PLL 的小信号模型如式(11)所示,构建其传递函数如式(12)所示,可得到传递函数的自然频率与阻尼比如式(13)所示。遵循 $\zeta_{\text{GFL}} = 0.707$ 最佳阻尼比原则,由式(13)可得出 $k_{\text{P,PLL}}$ 随 $k_{\text{I,PLL}}$ 变化的协同调整关系。

$$\begin{cases} \Delta\omega_{\text{PLL}} = k_{\text{P,PLL}} \Delta U_{\text{GFL,q}} + k_{\text{I,PLL}} \int \Delta U_{\text{GFL,q}} dt \\ \Delta\omega_{\text{PLL}} = d\Delta\theta_{\text{GFL}}/dt \\ \Delta U_{\text{GFL,q}} = U_{\text{GFL}} \Delta\theta_{\text{GFL}} \end{cases} \quad (11)$$

$$G(s) = \frac{\Delta\theta_{\text{GFL}}}{\Delta U_{\text{GFL,q}}} = \frac{U_{\text{GFL}} k_{\text{P,PLL}} s + U_{\text{GFL}} k_{\text{I,PLL}}}{s^2 + U_{\text{GFL}} k_{\text{P,PLL}} s + U_{\text{GFL}} k_{\text{I,PLL}}} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \zeta_{\text{GFL}} = \frac{k_{\text{P,PLL}}}{2} \sqrt{\frac{U_{\text{GFL}}}{k_{\text{I,PLL}}}} \\ \omega_{\text{GFLn}} = \sqrt{U_{\text{GFL}} k_{\text{I,PLL}}} \end{cases} \quad (13)$$

由式(7)可知,GFM变流器小信号模型结构符合经典二阶振荡环节,根据式(8)可得到其阻尼比 ζ_{GFM} 与自然角频率 ω_{GFMn} 。令阻尼比 $\zeta_{\text{GFM}} = 0.707$,推导 GFM 变流器阻尼随惯量的表达式如式(9)所示:

$$\begin{cases} \zeta_{\text{GFM}} = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{X}{EUJ\omega_N}} \\ \omega_{\text{GFMn}} = \sqrt{\frac{EU}{JX\omega_N}} \end{cases} \quad (8)$$

$$D = \sqrt{\frac{2EUJ\omega_N}{X}} \quad (9)$$

鉴于 GFL 变流器的等效惯量 $J_{\text{GFL,eq}}$ 与 PLL 积分系数 $k_{\text{I,PLL}}$ 成反比^[28],本文采用 Sigmoid 函数构建动态调整策略,如式(10)所示:

$$\begin{cases} \left| \frac{d\omega}{dt} \right| \leq \alpha_{\text{th}} \cup \Delta\omega \geq 0 \\ \frac{d\omega}{dt} < 0 \cap \left| \frac{d\omega}{dt} \right| > \alpha_{\text{th}} \cap \Delta\omega < 0 \\ \frac{d\omega}{dt} \geq 0 \cap \left| \frac{d\omega}{dt} \right| > \alpha_{\text{th}} \cap \Delta\omega < 0 \end{cases} \quad (10)$$

3 仿真分析

为验证所提方法的有效性,基于 Matlab/Simlink 建立了图1所示的仿真模型,模型参数如表1所示。其中, Z_{SG} 、 Z_{GFL} 、 Z_{GFM} 和 Z_{G} 分别为 SG、GFL 变流器、GFM 变流器和电网阻抗。

表1 仿真模型主要参数

Tab. 1 Main parameters of the simulation model

参数名称	参数值	参数名称	参数值
$P_{\text{SG,ref}}/\text{kW}$	20	$k_{\text{P,GFL}}, k_{\text{I,GFL}}$	9.5、240
U_{SGN}/V	220	$k_{\text{P,PLL}}, k_{\text{I,PLL}}$	9.85、100
$J_{\text{SG}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	4	$P_{\text{GFM,ref}}/\text{kW}$	20
$D_{\text{SG}}/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{rad}^{-1})$	80	$U_{\text{GFM,ref}}/\text{V}$	127
Z_{SG}/Ω	0.3+j0.314	$J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.5
$P_{\text{GFL,ref}}/\text{kW}$	20	$D/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{rad}^{-1})$	20
$I_{\text{GFL,d,ref}}/\text{A}$	74	Z_{GFM}/Ω	1.2+j1.57
Z_{GFL}/Ω	0.01+j0.314	Z_{G}/Ω	0.01+j0.17
K_1, K_2	0.4、0.1	K_3, K_4	0.2、0.05

将本文所提暂态控制方法与其他两种控制方法进行仿真对比。控制方法1:仅在故障期间投

入限流器,无额外暂态控制;控制方法 2:故障期间投入限流器,故障切除后同时施加 PLL 冻结控制^[15]与 GFM 变流器附加功率控制^[29]。

3.1 轻度电压暂降场景

模拟三相短路故障发生在 PCC 处,故障初始时间 $t=1.2\text{ s}$,故障电阻为 $0.5\text{ }\Omega$,电压跌落幅度不超过 0.5 p.u. ,即轻度电压暂降场景。轻度电压暂降下的并联系统功角曲线如图 7 所示。

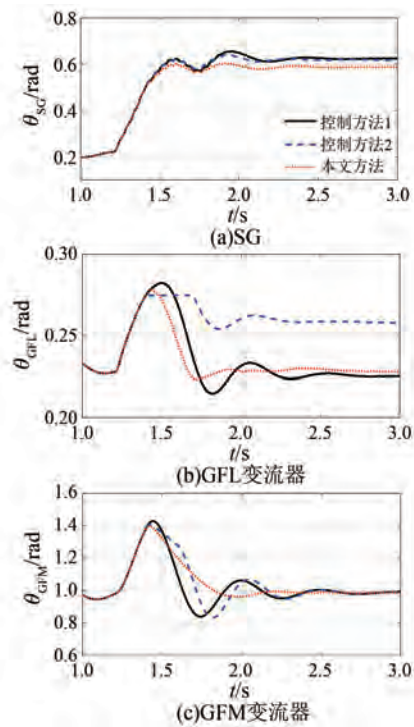


图 7 轻度电压暂降下的并联系统功角曲线
Fig. 7 Power angle curves of the parallel system under mild voltage sag

由图 7 可知,采用控制方法 1 时,SG、GFL 变流器和 GFM 变流器在故障期间呈现功角加速现象,故障切除后引发持续振荡。由于电压暂降程度较轻,SG、GFL 变流器和 GFM 变流器功角最终恢复稳定。相较于控制方法 1,采用控制方法 2 和本文方法时,功角振荡现象得到改善,但控制方法 2 和本文方法的功角振荡抑制机理与动态特性存在显著差异。

采用控制方法 2 时,GFL 变流器通过 PLL 冻结控制(1.4~1.7 s 激活)将角频率锁定为工频,有效抑制了功角振荡,但 PLL 冻结控制退出后 GFL 变流器功角再次发生振荡。此外,GFM 变流器投入功率附加控制(1.4~1.6 s 激活),通过降低参考

功率以抑制功角振荡,然而功率附加控制退出后 GFM 变流器功角再次振荡。SG 因功角交互作用其暂态稳定性得以提升,但在 GFL 变流器、GFM 变流器暂态控制退出后其功角振荡幅度与控制方法 1 基本一致。

本文方法通过动态调整 GFL 变流器 PLL 参数与 GFM 变流器惯量-阻尼参数,使 GFL 变流器、GFM 变流器功角振荡幅度显著减小,振荡周期有效缩短,展现出了良好的功角振荡抑制效果。并且,所提暂态控制成功实现了 GFL 变流器、GFM 变流器功角振荡的全过程抑制,对 SG 功角振荡的改善效果优于控制方法 2,具体对比如表 2 所示。

表 2 轻度电压暂降下故障恢复期间并联系统的平均功角偏差

控制方法	平均功角偏差/rad		
	SG	GFL 变流器	GFM 变流器
控制方法 1	0.395	0.011	0.073
控制方法 2	0.392	0.034	0.088
本文方法	0.363	0.006	0.065

表 2 数据表明,在故障恢复期间,采用本文方法能显著减小功角偏差。相较于控制方法 1,采用本文方法时,SG、GFL 变流器和 GFM 变流器的功角偏差分别降低了 8.10%、45.45% 和 10.96%。

轻度电压暂降下的并联系统有功功率曲线如图 8 所示,GFM 变流器惯量-阻尼动态调整数据和 PLL 参数动态调整数据分别如表 3 和表 4 所示。

表 3 轻度电压暂降下的 GFM 变流器惯量-阻尼动态调整数据

Tab. 3 Dynamic adjustment data of the GFM converter inertia-damping under mild voltage sag		
调整时间/s	$J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	$D/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{rad}^{-1})$
1.40~1.57	0.70	4.60
1.59~1.84	0.20	2.45
1.86~2.09	0.68	4.58
2.13~2.32	0.19	2.47
2.41~2.53	0.67	4.51
其余时间	0.30	3.00

由图 8 可知,在控制方法 1 下,SG 与 GFM 变流器在故障恢复期间呈现明显的有功功率波动现

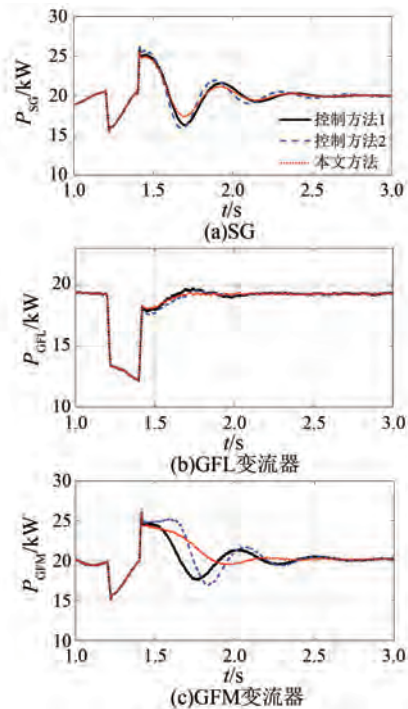


图8 轻度电压暂降下的并联系统有功功率曲线
Fig.8 Active power curves of the parallel system under mild voltage sag

象。控制方法2和本文方法通过施加暂态控制有效抑制了功率波动,且本文方法对功率波动的改善效果更明显。图8(b)表明,在三种控制方法下,GFL变流器有功功率无明显差异,这与 q 轴电压失衡主导GFL变流器功角振荡机理相吻合^[29]。

表4 轻度电压暂降下的GFL变流器PLL参数动态调整数据

Tab.4 Dynamic adjustment data of GFL converter PLL parameters under mild voltage sag

调整时间/s	$k_{p,PLL}$	$k_{i,PLL}$
1.40~1.43	7.06	2.57
1.49~1.72	7.04	2.58
1.72~1.88	11.31	6.60
其余时间	9.85	5

表3和表4的数据表明,GFM变流器惯量-阻尼参数与GFL变流器PLL参数的动态调整时序与其功角振荡时序呈现紧密关联,这说明所提方法能够有效跟踪GFM变流器、GFL变流器的功角波动,实现了其动态惯量-阻尼的平滑调整。

3.2 重度电压暂降场景

设置三相短路故障的发生位置和初始时间与

轻度电压暂降场景一致,故障电阻为 $0.01\ \Omega$,电压跌落幅度达到 $0.7\ \text{p.u.}$,即重度电压暂降场景^[30]。重度电压暂降下的并联系统功角曲线如图9所示。

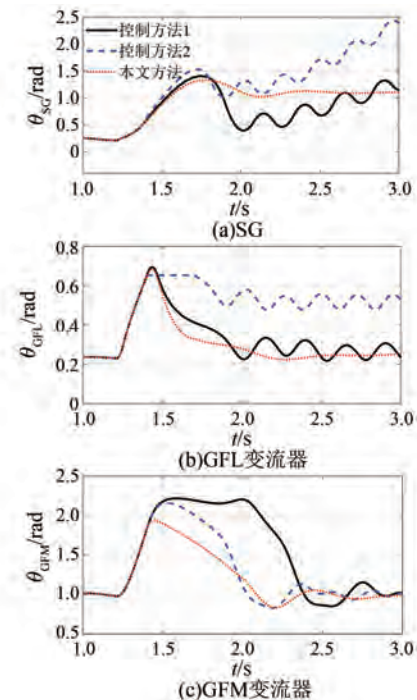


图9 重度电压暂降下的并联系统功角曲线
Fig.9 Power angle curves of the parallel system under severe voltage sag

由图9可知,在控制方法1、2下,SG与GFL变流器在故障恢复期间呈现功角振荡失稳现象,而GFM变流器虽维持功角稳定,但伴随严重的功角偏移。相较之下,本文方法成功抑制了SG和GFL变流器的功角失稳,并显著增强了GFM变流器的功角稳定性。

在重度电压暂降工况下,采用控制方法2时SG功角稳定性较控制方法1进一步恶化,这源于并联系统的功角交互作用,SG功角偏移量随着GFL变流器功角偏移量的增大而同步放大。在本文控制方法下,GFL变流器功角振荡与偏移均得到有效抑制;SG功角能够快速恢复至稳定状态,展现了其在提升系统暂态稳定性方面的技术优势。

重度电压暂降下故障恢复期间并联系统的平均功角偏差数据如表5所示。由表5可知,相较于控制方法1,在本文方法下,SG、GFL变流器和GFM变流器的平均功角偏差分别降低了

26.74%、28.43% 和 57.53%。值得注意的是,在重度电压暂降工况下,本文控制方法对 GFL 变流器功角偏差的改善效果弱于轻度电压暂降工况,这是因为重度电压暂降会引发 GFL 变流器功角偏移加剧。

表 5 重度电压暂降下故障恢复期间并联系统的平均功角偏差

控制方法	平均功角偏差/rad		
	SG	GFL 变流器	GFM 变流器
控制方法 1	0.703	0.102	0.657
控制方法 2	1.273	0.323	0.378
本文方法	0.891	0.073	0.279

重度电压暂降下的并联系统有功功率曲线如图 10 所示。可见,本文控制方法有效保障了各电源输出功率的稳定性。

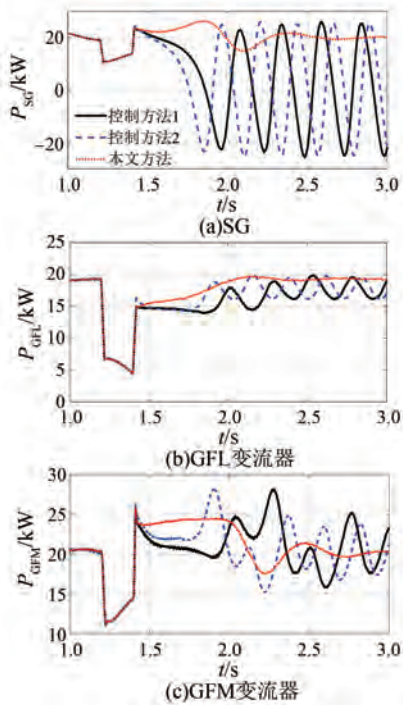


图 10 重度电压暂降下的并联系统有功功率曲线
Fig. 10 Active power curves of the parallel system under severe voltage sag

重度电压暂降下的 GFM 变流器惯量-阻尼动态调整数据与 GFL 变流器 PLL 参数动态调整数据如表 6 和表 7 所示,此动态调整有助于保障并联系统在故障恢复过程中的渐近稳定性。

表 6 重度电压暂降下的 GFM 变流器惯量-阻尼调整数据

Tab. 6 Dynamic adjustment data of GFM converter inertia-damping under severe voltage sag		
调整时间/s	$J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	$D/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{rad}^{-1})$
1.40~1.50	0.70	4.60
2.00~2.06	0.68	4.60
2.09~2.30	0.20	2.47
2.34~2.54	0.69	4.58
其余时间	0.30	3.00

表 7 重度电压暂降下的 GFL 变流器 PLL 参数动态调整数据

Tab. 7 Dynamic adjustment data of GFL converter PLL parameters under severe voltage sag		
调整时间/s	$k_{\text{P,PLL}}$	$k_{\text{I,PLL}}$
1.40~1.48	6.97	2.50
1.49~1.70	11.37	6.67
其余时间	9.85	5

4 结语

本文提出了一种基于惯量-阻尼动态调整的 GFL-GFM 变流器并联系统暂态稳定控制方法。通过理论分析、仿真对比验证了所提暂态控制方法的先进性与有效性,主要结论如下。

(1)所提基于 Sigmoid 函数的 GFL-GFM 变流器并联系统惯量-阻尼动态协同调整方法,通过实时跟踪功角动态特性,平滑调整 GFL 变流器、GFM 变流器参数,显著增强了并联系统的等效惯量和阻尼,有效抑制了功角振荡。

(2)基于 GFL-GFM 变流器并联系统的功角交互作用,所提暂态控制方法通过抑制变流器功角振荡,显著增强了 SG 的功角稳定性,实现了系统暂态稳定性的整体提升。

(3)相较于传统 GFL 变流器 PLL 冻结与 GFM 变流器附加功率控制,所提暂态控制方法在抑制功角振荡方面更具优势,其控制效果在轻度与重度电压暂降工况中得到充分验证。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。
All authors disclose no relevant conflict of

interests.

作者贡献

陈磊和郑燊聪进行了方案设计、内容总结及论文撰写,郭瑶进行了仿真试验,陈红坤、曹玉媛和黄达文参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, content summary and paper writing were carried out by Chen Lei and Zheng Shencong. The simulation experiment was conducted by Guo Yao. The manuscript was reviewed and revised by Chen Hongkun, Cao Yuyuan and Huang Dawen. All authors have read and approved the final version of the manuscript for submission.

参考文献

- [1] WANG M J, GUO J B, MA S C, et al. A novel decentralized frequency regulation method of renewable energy stations based on minimum reserve capacity for renewable energy-dominated power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(2): 3701-3714.
- [2] 刘志坚,洪朝飞,郭成,等. 基于 WRLS-ARMAX 系统辨识的新能源电力系统惯量评估[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(7): 84-93.
- LIU Z J, HONG C F, GUO C, et al. Inertia estimation of new energy power system based on WRLS-ARMAX system identification [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(7): 84-93.
- [3] 侯健生,陈新斌,王赢聪,等. 适用于微电网的 MGP 协调运行方法及装置研究[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(8): 12-19.
- HOU J S, CHEN X B, WANG Y C, et al. Research on the coordinated operation method and devices of MGP suitable for microgrid [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(8): 12-19.
- [4] 史兴华,张雪垠,甘纯,等. 基于主动电压抬升的光伏全直流汇集与送出系统网侧故障穿越策略[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(4): 20-28.
- SHI X H, ZHANG X Y, GAN C, et al. Fault ride-through strategy for PV full DC collection and transmission system based on active voltage rising method [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(4): 20-28.
- [5] JIN Y Q, ZHANG Z R, XU Z. Proportion of grid-forming wind turbines in hybrid GFM-GFL offshore wind farms integrated with diode rectifier unit based HVDC system [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2025, 13(1): 87-101.
- [6] 冷若寒,殷波,胡光,等. 对偶视角下基于特征子系统的跟网/构网互联系统强度评估[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(7): 103-114.
- LENG R H, YIN B, HU G, et al. System strength evaluation of grid-following and grid-forming interconnected system based on eigen-subsystem from dual perspective [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(7): 103-114.
- [7] CHEN L, TANG J G, QIAO X F, et al. Study of resistive SFCLs for transient stability enhancement of paralleled synchronous and virtual synchronous generators in weak grid [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 59(3): 3044-3055.
- [8] 李智,刘辉,刘明波,等. 虚拟同步发电机并网稳定性与控制技术研究综述[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(11): 1-10.
- LI Z, LIU H, LIU M B, et al. Research overview of grid-connected virtual synchronous generator stability and control technologies [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(11): 1-10.
- [9] 尚佳宇,虞家骏,刘增,等. 构网型与跟网型逆变器并联系统精确频域建模及简化稳定判据[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(2): 53-63.
- SHANG J Y, YU J J, LIU Z, et al. Accurate frequency-domain modeling and simplified stability criterion for parallel grid-forming and grid-following inverter system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(2): 53-63.
- [10] 李明,常永康,毛永涛,等. 高渗透率新能源发电并网变流器跟网/构网型稳定控制技术综述与展望[J]. 高电压技术, 2024, 50(11): 4773-4788.
- LI M, CHANG Y K, MAO Y T, et al. Review and prospect of stability control techniques for grid-following/grid-forming converters in high-penetration renewable energy generation [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(11): 4773-4788.
- [11] 韩鸿霖,王星璐,林存浩. 基于自适应 VSG 控制策略的光伏混合储能系统研究[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(2): 159-170.

- HAN H L, WANG X L, LIN C H. Research on photovoltaic hybrid energy storage system based on adaptive VSG control strategy [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2025, 52(2): 159-170.
- [12] 高本峰, 刘培鑫, 孙大卫, 等. 构网/跟网型混合风电场次同步振荡特性与机理分析[J]. *电工技术学报*, 2025, 40(6): 1945-1959.
- GAO B F, LIU P X, SUN D W, et al. Analysis of subsynchronous oscillation characteristics and mechanism of grid-forming/grid-following hybrid wind farms [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2025, 40(6): 1945-1959.
- [13] MAJEED M A, PHICHAISAWAT S, ASGHAR F, et al. High-efficiency renewable penetration via dynamic decentralized droop control in microgrid systems [J]. *IEEE Access*, 2024, 12: 143500-143514.
- [14] RIOS-CASTRO D, PEREZ-ESTEVEZ D, DOVAL-GANDOY J. Grid-connected converter with grid-forming and grid-following modes presenting symmetrical and asymmetrical fault ride-through capability [J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2024, 12(2): 2082-2096.
- [15] 潘莉, 李霞林, 王智, 等. 弱连接 VSC 的锁相环同步暂态稳定综述[J]. *电力自动化设备*, 2023, 43(9): 138-151.
- PAN L, LI X L, WANG Z, et al. Overview of transient stability analysis of phase locked loop synchronization in weak-grid connected VSC [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(9): 138-151.
- [16] 朱冰, 张龙, 司文佳, 等. 跟网型与构网型变流器混合并网的暂态特性分析及故障穿越控制[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(28): 12177-12187.
- ZHU B, ZHANG L, SI W J, et al. Analysis of transient characteristics and fault ride-through control of hybrid grid-tied converters with grid-following and grid-forming [J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(28): 12177-12187.
- [17] DAI T T, XIAO X Y, XIE Q, et al. Hybrid grid-forming and grid following PMSG-SMES architecture with enhanced FRT capability [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2024, 34(8): 5402304.
- [18] 张亚耀, 占萌. 锁相环型变流器并网系统暂态主导失稳特征分析[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(23): 9285-9297.
- ZHANG Y Y, ZHAN M. Dominant transient unstable characteristics of PLL-based grid-connected converters [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(23): 9285-9297.
- [19] SUN J D, XING X Y, ZHANG C H. Modeling, analysis, and mitigation of active power oscillation in parallel VSGs system [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2025, 40(11): 17295-17308.
- [20] 郑涛, 马英, 王珞秋, 等. 计及有功-频率环动态特性影响的储能 VSG 故障特性研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(9): 25-37.
- ZHENG T, MA Y, WANG L Q, et al. Study on fault characteristics of energy storage VSG considering the dynamic characteristics of the active power-frequency loop [J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(9): 25-37.
- [21] WEI K M, WANG X B, GU J D, et al. Study of bursting oscillations in VSG system with external excitation [J]. *IEEE Access*, 2025, 13: 121432-121443.
- [22] ZHU J, CAO X, GE Q, et al. Adaptive-SMO-based traction force fluctuation suppression strategy considering suspension system for high-speed maglev train [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2024, 71(3): 2289-2299.
- [23] COSTA J, FILHO J, PERES W. Development of steady-state voltage control techniques applied to microgrids [J]. *IEEE Access*, 2024, 12: 83887-83899.
- [24] LIMOUNI T, YAAGOUBI R, BOUZIANE K, et al. Intelligent real time control strategy and power management based on MPC and LSTM-TCN model for standalone DC microgrid with energy storage [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2025, 169: 110761.
- [25] 潘豪, 王震, 康庄, 等. 光储孤岛直流微电网混合模式平滑切换策略[J/OL]. *太阳能学报*, 2025-03-21. <https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2024-1671>.
- PAN H, WANG Z, KANG Z, et al. Hybrid mode switching strategy for PV-storage islanded DC microgrids [J/OL]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2025-03-21. <https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2024-1671>.
- [26] MOUSAVI Y, BEVAN G, KUCUKDEMIRAL I, et

- al. Observer-based high-order sliding mode control of DFIG-based wind energy conversion systems subjected to sensor faults [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2024, 60(1): 1750-1759.
- [27] 陈杰, 程静, 王维庆, 等. 应用多参数协同自适应方法的虚拟同步发电机控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(23): 74-85.
- CHEN J, CHENG J, WANG W Q, et al. Control strategy for a virtual synchronous generator using a multi-parameter cooperative adaptive method [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(23): 74-85.
- [28] 黄森, 姚骏, 钟勤敏, 等. 含跟网和构网型新能源发电单元的混联电力系统暂态同步稳定分析[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(21): 8378-8392.
- HUANG S, YAO J, ZHONG Q M, et al. Transient synchronization stability analysis of hybrid power system with grid-following and grid-forming renewable energy generation units [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(21): 8378-8392.
- [29] CHENG H, SHUAI Z, SHEN C, et al. Transient angle stability of paralleled synchronous and virtual synchronous generators in islanded microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(8): 8751-8765.
- [30] ZHANG Y, ZHAN M. Transient Synchronous stability analysis of PMSG grid-connected system considering transient switching control under severe faults [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2025, 40(5): 7298-7314.
-
- 收稿日期:2025-04-30
收到修改稿日期:2025-06-24
作者简介:
陈磊(1982-),男,博士,副教授,研究方向为新能源电力系统稳定控制,chen_lei@whu.edu.cn;
*通信作者:陈磊(1982-),男,博士,副教授,研究方向为新能源电力系统稳定控制,chen_lei@whu.edu.cn。