

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250499

基于 LADRC 的匹配控制构网型 PMSG 快速频率支撑策略

杨德健, 胡同宇, 李超全, 严干贵

(现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林 吉林 132012)

摘要: 为提升匹配控制构网型(grid-forming, GFM)风电机组联网频率支撑特性, 同时解决单一的控制策略和参数对电网运行工况适应性差的问题, 提出一种基于线性自抗扰控制(linear active disturbance rejection control, LADRC)的匹配控制构网型永磁直驱风电机组(permanent magnet synchronous generator based wind generator, PMSG)快速频率支撑策略。首先, 构建基于匹配控制的构网型 PMSG 控制架构并阐述直流电压与频率的匹配机理。其次, 设计匹配控制构网型 PMSG 的 LADRC 频率支撑策略, 并分析控制器带宽参数对 LADRC 抗扰能力的影响规律。然后, 结合遗传算法(genetic algorithm, GA)对 LADRC 中的带宽参数进行在线寻优, 使其具备一定的参数自整定能力。最后, 基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台, 对不同控制策略在不同工况下电网频率和风机出力的变化情况进行对比分析。仿真结果表明, 所提策略可在多种场景下提升风电联网系统对电网频率的支撑能力。

关键词: 构网型风电机组; 线性自抗扰控制; 快速频率响应; 匹配控制; 遗传算法

Fast frequency support strategy of grid-forming PMSGs based on LADRC with matching control

YANG Dejian, HU Tongyu, LI Chaoquan, YAN Gangui

(Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin 132012, China)

Abstract: To enhance the frequency support characteristics of grid-forming (GFM) wind turbines under matching control, and to overcome the poor adaptability of single control strategies and fixed parameters to varying power grid operating conditions, this paper proposes a fast frequency support strategy for GFM permanent magnet synchronous generator (PMSG) wind turbines based on linear active disturbance rejection control (LADRC). First, a GFM control architecture of grid-connected PMSG based on matching control is constructed, and the matching mechanism between DC voltage and frequency is explained. Second, an LADRC-based frequency support strategy for matching control GFM PMSGs is designed, and the influence of controller bandwidth parameters on the disturbance rejection capability of LADRC is analyzed. Then, a genetic algorithm (GA) is integrated to perform online optimization of the bandwidth parameters in LADRC, endowing the controller with a certain degree of self-tuning capability. Finally, comparative analyses of grid frequency and wind turbine power output under different operating conditions and control strategies are conducted using the PSCAD/EMTDC simulation platform. Simulation results show that the proposed strategy can enhance the frequency support capability of grid-connected wind power systems under various scenarios.

This work is supported by the Smart Grid-National Science and Technology Major Project of China (2030) (No. 2024ZD0801400).

Key words: grid-forming wind turbine; linear active disturbance rejection control; fast frequency response; matching control; genetic algorithm

0 引言

随着我国“双碳”目标的实施, 风电、光伏等

新能源发电设备正逐步取代传统同步发电机并入电网^[1-2]。然而, 新能源机组通常依赖电力电子装置实现联网, 缺乏传统同步机的转动惯量特性。受扰时难以主动响应频率变化, 对外表现出近零惯性的特征, 导致系统整体惯性和抗扰能力显著下降, 对电网频率稳定性造成了严重威胁。此外, 风电机组

基金项目: 智能电网重大专项(2030)资助(2024ZD0801400); 国家电网公司科技项目资助(52272224000V)

对频率异常的耐受能力相对较弱,在极端情况下容易触发大规模脱网事故,进而引发连锁反应,加剧系统运行风险^[3-4]。

考虑到电力电子器件的高灵活性及强可控性,有学者提出了双馈风力发电机(doubly-fed induction generator, DFIG)的虚拟惯量控制策略^[5-7],即在同步机一次调频动作之前,DFIG 释放旋转动能,与同步机组惯量响应共同补偿系统有功缺额,减缓频率下降速度。同时,国内外的电网规范中均要求联网风电场站需具备一定的惯量支撑能力^[8-10]。例如,加拿大魁北克电网要求 10 MW 以上的风电场必须具备频率支撑功能,其中高频与低频阶段分别由一次调频与惯量控制实现^[11]。

新能源渗透率的不断提升导致电网强度呈现持续下降趋势,这对传统跟网型(grid-following, GFL)风机的稳定运行带来挑战^[12]。GFL 控制依赖锁相环(phase locked loop, PLL)实现与电网的同步,难以在弱电网下稳定运行,且不具备电网支撑能力^[13-14]。构网型(grid-forming, GFM)控制增强了变流器与弱电网的交互稳定性,在高比例风电并网场景具有良好的应用前景^[15-16]。下垂控制作为最常见的 GFM 控制策略,已在工程上得到广泛应用。虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制通过模拟同步发电机转子运动方程,相比下垂控制能够更为精确地模拟同步机的运行特性,为系统提供惯性和阻尼^[17-19]。然而,VSG 控制将控制影响延伸至机侧变流器(machine-side converter, MSC),通过有功调制实现自同步,这可能会引发风机转子转速变化和最大功率运行点偏移等问题^[20-21]。

部分学者近期通过开展基于变流器直流电容动态特性的研究,提出了一种新型的基于直流电压同步的匹配构网型控制^[22-23]。区别于传统的 VSG 控制,该方法利用直流电压与转子的动态类似性^[24],建立一种利用直流电压和交流电压角频率匹配关系的自同步机制,无需有功调制,仅通过直流电压信号即可实现自同步。因此,风机 MSC 能够最大程度保留最大功率跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制,而网侧变流器(grid-side converter, GSC)独立承担构网功能^[25]。由于未改动 MSC 结构,风机始终运行在 MPPT 模式,无法自主响应频率波动,不具备频率支撑能力,调频策略需通过附加控制环路实现。通过建立直流电容电压与系统频率的耦合关系,弱化通信延时对频率支撑效果的影响。在现有研究中,文献[26]仅仅在无穷大电源的电网中验证了匹配控制策略的有效性,缺乏在含同步发电机组的电网中验证控制策略的有效性。文献[27]通过

扩展直流电容惯量实现惯量支撑,但扩展后的惯量一般不超过风轮的物理惯量,在面对频率扰动时,频率支撑效果受限,未能充分发挥风电机组的频率支撑潜力。

自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)能够有效地解决系统中存在的不确定性、外部扰动、模型误差等问题,通过实时估计扰动和系统状态,能够消除外部扰动的影响,并根据系统实际动态调整控制策略。因此,针对上述问题,可以利用 ADRC 提升频率支撑效果。文献[28]基于水平轴风力发电机(horizontal axis wind turbine, HAWT)系统,通过 ADRC 补偿转速提升了频率抗扰能力。文献[29-30]将改进线性自抗扰控制(linear active disturbance rejection control, LADRC)引入含风机的频率响应模型中,通过 LADRC 替代虚拟惯量控制,实现对风电机组的惯量支撑,但其参数整定依赖经验法获取,无法实现多工况的自整定。文献[31]提出将 LADRC 与 VSG 控制相结合,通过对改进功率外环实现二次调频,然而其参数过多,整定较为复杂。文献[32]开展了基于 VSG 的构网型储能的频率支撑研究,实践结果表明,LADRC 在未知大扰动下仍能取得较好的控制效果。上述文献通过引入 ADRC 提升了频率稳定效果。然而,鲜有文献将 LADRC 技术用作调频装置,更少见其应用于匹配控制构网型风电机组中。此外,现有研究未充分考虑 LADRC 参数耦合问题,或因参数选取不当导致系统性能不佳。

综上,为提升匹配控制构网型永磁直驱风电机组(permanent magnet synchronous generator based wind generator, PMSG)的频率支撑能力,本文设计 LADRC 控制器替换传统频率支撑控制策略,提出一种基于 LADRC 的匹配控制构网型 PMSG 快速频率支撑策略。首先,搭建了匹配控制构网型 PMSG 控制架构,并明晰构网型 PMSG 匹配控制特性及对电网频率稳定支撑机理。其次,基于直流电压与频率的匹配机制,利用直流电压作为输入量,设计基于 LADRC 的快速频率支撑策略。然后,根据 LADRC 控制器参数与带宽的联系,分析带宽参数对系统性能的影响规律,进而结合遗传算法(genetic algorithm, GA)进行参数寻优。最后,基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台,在多种场景下验证所提策略的有效性。

1 基于匹配控制的构网型 PMSG 控制架构及匹配机理分析

图 1 给出了基于匹配控制的构网型 PMSG 控制结构框图, MSC 通过惯量传递环节扩展惯量以增强

系统的主动支撑能力^[27]。GSC 将直流电压标幺值 U_{dc}^* 积分后再经过 ω_n 的增益后, 得到变流器输出电压的相角 θ 用于脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM), 建立直流电压标幺值 U_{dc}^* 与 GSC 输出角频率 ω_g^* 之间的实时联动关系^[25], 从而可以直接由直流母线电压映射电网频率, 避免了由 PLL 引发的失稳问题及电压变化造成频率测量不准的问题^[33]。下面对构网型匹配控制机理进行详细分析。

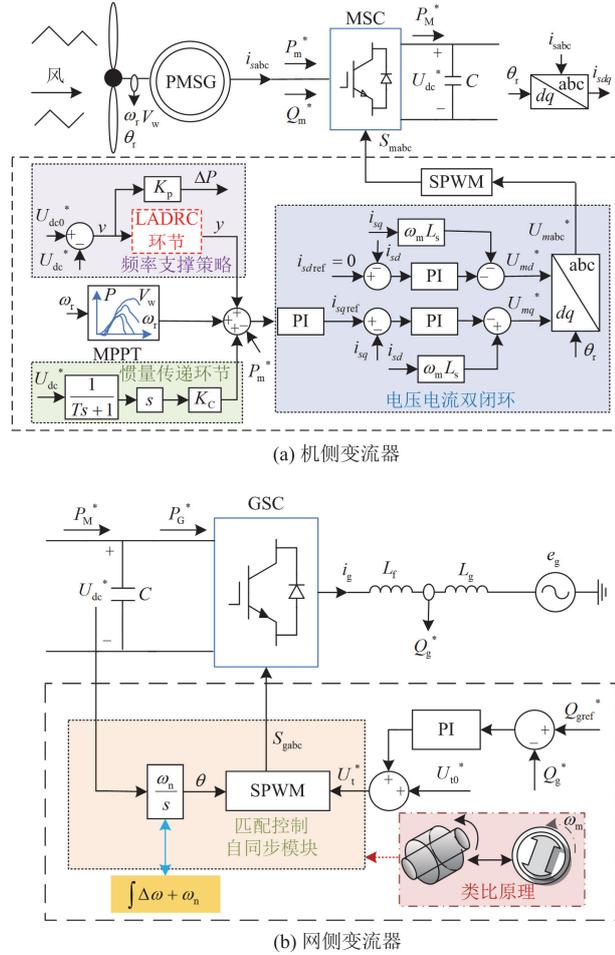


图 1 基于 LADRC 的构网型 PMSG 控制策略框图

Fig. 1 Block diagram of grid-forming PMSG control strategy based on LADRC

风电变流器的直流母线电压动态方程为

$$2H_C U_{dc}^* \frac{dU_{dc}^*}{dt} = P_M^* - P_G^* \quad (1)$$

式中: H_C 为直流电容的惯性时间常数; P_M^* 为风机 MSC 输出功率标幺值; P_G^* 为 GSC 输入功率标幺值。

$$H_C = \frac{CU_{dcn}^2}{2S_n} \quad (2)$$

式中: S_n 为视在功率基准值; U_{dcn} 为直流电压的基准值。

类比为同步发电机转子运动方程, 如式(3)所示。

$$2H_G \omega_m \frac{d\omega_m}{dt} = P_m - P_e \quad (3)$$

式中: H_G 为同步发电机的惯量时间常数; ω_m 为同步发电机角频率; P_m 、 P_e 分别为同步发电机的机械功率与电磁功率。

因此, 从动力学方程上看, 图 1 中 GSC 输出交流电压角频率 ω_g^* 与直流电压标幺值 U_{dc}^* 的关系为

$$\omega_g^* = U_{dc}^* \quad (4)$$

忽略 GSC 损耗, 风机输出有功功率 P_g^* 为

$$P_g^* = \frac{U_t^* E_g^*}{X_g^*} \sin \delta \quad (5)$$

式中: U_t^* 为 GSC 输出调制电压; E_g^* 为电网电压的标幺值; X_g^* 为线路电抗的标幺值; δ 为电压超前相位角。

图 1(b)为构网功能的核心部分, GSC 通过检测直流电容电压信号生成同步相角, 其中 GSC 输出调制电压的相角 θ 为

$$\theta = \frac{\omega_n}{s} [1 + (U_{dc}^* - U_{dcref}^*)] \quad (6)$$

式中: U_{dcref}^* 为直流电压参考值。

忽略延时等因素的影响, 可认为变流器端口电压近似等于 GSC 电压控制环节输出调制电压 U_t^* , 其中, U_t^* 可以表示为

$$U_t^* = U_{t0}^* + \left(k_{p1} + \frac{k_{i1}}{s} \right) (Q_{gref}^* - Q_g^*) \quad (7)$$

式中: U_{t0}^* 为调制电压初始值; k_{p1} 和 k_{i1} 分别为比例积分(proportional-integral, PI)控制器的比例系数和积分系数; Q_g^* 、 Q_{gref}^* 分别为无功功率实际值与参考值。

在不考虑端电压变化的情况下, 由式(5)可整理得到风机输出功率变化量 ΔP_g^* 为

$$\Delta P_g^* = \frac{U_{t0}^*}{X_g^*} \sin(\delta_{E0}) \Delta E_g^* + \frac{E_{g0}^* U_{t0}^*}{X_g^*} \cos(\delta_{E0}) \Delta \delta_E \quad (8)$$

式中: δ_{E0} 为稳态功角; ΔE_g^* 为电网电压变化量; E_{g0}^* 为电网电压稳态标幺值; $\Delta \delta_E$ 为功角变化量。

将式(8)进一步整理得

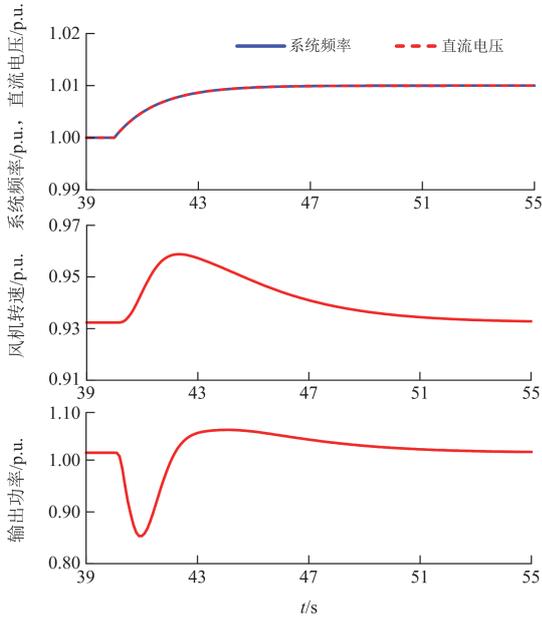
$$\Delta P_g^* = k_{E_g} \Delta E_g^* + k_{\delta} \Delta \delta_E \quad (9)$$

其中

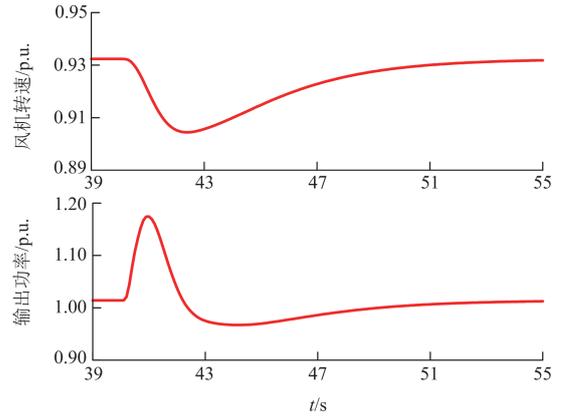
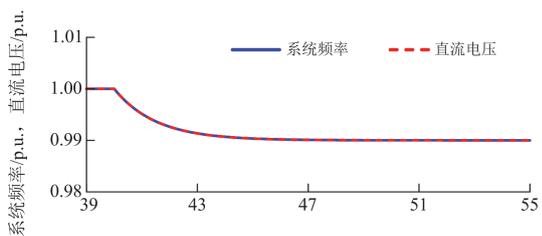
$$\begin{cases} k_{E_g} = \frac{U_{t0}^*}{X_g^*} \sin(\delta_{E0}) \\ k_{\delta} = \frac{E_{g0}^* U_{t0}^*}{X_g^*} \cos(\delta_{E0}) \\ \Delta \delta_E = \frac{\omega_{g0}^*}{s} (\Delta U_{dc}^* - \Delta \omega_g^*) \end{cases} \quad (10)$$

式中: ω_{g0}^* 为 GSC 输出的稳态电压角频率; ΔU_{dc}^* 为直流电容电压的变化量; $\Delta \omega_g^*$ 为交流电压角频率的变化量。

结合式(9)和式(10), 施加高频、低频扰动信号, 观测直流电压与频率的响应情况, 结果如图 2 所示。当系统受到扰动时, 并网功率的波动会触发直流母线电压的动态响应, 电网频率降低导致 δ 增大, 进而使并网功率上升, 同时直流电压下降; 反之, 当电网频率上升时, δ 减小, 并网功率减少, 直流侧电压升高。通过匹配控制的电网自同步机制, 实现直流电压与电网频率的自然联动, 将交流侧电网频率的幅值变化转换为直流侧电压的幅值变化, 完成频率信息的定量传递^[26]。



(a) 高频扰动



(b) 低频扰动

图 2 构网型 PMSG 直流电压与频率响应曲线

Fig. 2 DC voltage and frequency response curve of grid-forming PMSG

2 基于 LADRC 的匹配控制构网型 PMSG 快速频率支撑策略

2.1 基于 LADRC 的构网型 PMSG 调频策略设计

ADRC 由韩京清教授提出, 其核心是针对现代控制理论过多依赖于数学模型的问题, 通过扩张状态观测器观测系统状态, 并在反馈控制环节中进行补偿。ADRC 主要由跟踪微分器(tacking differentiator, TD)、扩张状态观测器(expansion state observer, ESO) 和非线性状态误差反馈(nonlinear state error feedback, NLSEF) 3 个部分构成。LADRC 技术^[34-36]是将扩张状态观测器的非线性函数线性化, 得到线性扩张状态观测器(linear extended state observer, LESO), 同时用线性状态误差反馈律(linear state error feedback, LSEF)替代非线性状态误差反馈律, 其结构框图如图 3 所示。LADRC 将整个系统看作是一个积分器串联形式, 可在不依赖模型精度的条件下, 实现系统内、外扰动的观测与补偿^[37]。

2.1.1 LESO

LADRC 技术的核心在于对 LESO 的设计, 通过系统输出 y 和被控对象补偿控制量 u 来跟踪状态信息并估计系统的总扰动。相关表达式为

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1(z_1 - U_{dc}^*) \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_2(z_1 - U_{dc}^*) + b_0 u \\ \dot{z}_3 = -\beta_3(z_1 - U_{dc}^*) \end{cases} \quad (11)$$

式中: \dot{z}_1 、 \dot{z}_2 、 \dot{z}_3 为观测器输出信号变量; z_1 为跟踪给定指令信号; z_2 为微分信号; z_3 为 LESO 估计的系统内外扰动总和; β_1 、 β_2 、 β_3 为 LESO 增益系数; b_0 为控制增益。

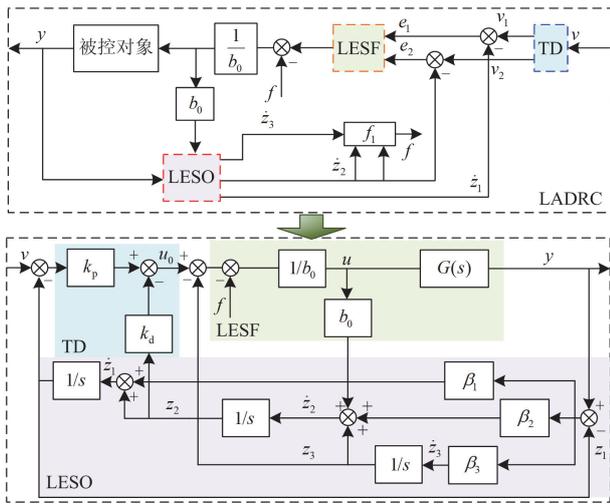


图 3 LADRC 结构框图

Fig. 3 Block diagram of LADRC structure

为使得控制系统获得更好的稳定性能, 减小调节时间, 待整定参数 β_1 、 β_2 和 β_3 与观测器带宽 ω_0 有如式(12)所示的数学关系^[38]。

$$\begin{cases} \beta_1 = 3\omega_0 \\ \beta_2 = 3\omega_0^2 \\ \beta_3 = \omega_0^3 \end{cases} \quad (12)$$

根据式(12)得知, ω_0 与参数 β_1 、 β_2 、 β_3 呈正比例关系, β_1 、 β_2 、 β_3 随 ω_0 值增加成相应比例增加。合理范围内提高 LADRC 参数 β_1 、 β_2 、 β_3 , 可以提高 LESO 和 LSEF 的观测和跟随性能, 有效缩短控制系统反应时间, 通过估计系统的内外扰动, 实现对系统扰动偏差量的实时补偿, 从而充分发挥风机的频率调节潜力, 进一步释放风机的转子动能, 同时提升系统的响应速度, 增强系统频率支撑能力。

2.1.2 线性状态误差反馈器

结合 TD 将系统直流电压的给定值与 z_1 的差值连同 z_2 一起输入线性状态误差反馈器, 从而得到输出量 u_0 。根据 LESO 对总扰动的估计进行反馈控制量 u_0 的补偿过程, 最终得到补偿后的控制量 u ^[28], 其中 LSEF 表达式为

$$\begin{cases} e_1 = v_1 - z_1 \\ e_2 = -z_2 \\ u_0 = k_p(U_{dc}^* - z_1) - k_d z_2 \\ u = \frac{u_0 - z_3}{b_0} \end{cases} \quad (13)$$

式中: e_1 、 e_2 分别为控制系统误差值; v_1 为目标分支跟踪令值; k_p 为控制系统的比例系数; k_d 为控制系统的微分系数。

TD 控制无须对控制器本身进行离散化, 只须对控制律中的比例系数 k_p 和微分系数 k_d 进行调节。将式(13)中 u_0 的表达式进行拉普拉斯变换后得到整个系统的闭环传递函数, 如式(14)所示。

$$U(s) = \frac{k_p}{s^2 + k_d s + k_p} \quad (14)$$

对式(14)进行极点配置, 选取 $-\omega_c$ 作为 TD 控制器带宽(极点)后可得

$$s^2 + k_d s + k_p = [s - (-\omega_c)]^2 = s^2 + 2\omega_c s + \omega_c^2 \quad (15)$$

根据式(15)等号两端对应关系, 可得整定后的比例、微分系数为

$$\begin{cases} k_p = \omega_c^2 \\ k_d = 2\omega_c \end{cases} \quad (16)$$

结合式(13)和式(16)可得

$$u = \frac{\omega_c^2 (U_{dc}^* - z_1) - 2\omega_c z_2 - z_3}{b_0} \quad (17)$$

将式(13)、式(14)代入式(17)中并进行拉普拉斯变换, 可得

$$u = \frac{1}{b_0} G(s) [\omega_c^2 U_{dc}^* - H(s)y] \quad (18)$$

其中

$$G(s) = \frac{s^3 + \beta_1 s^2 + \beta_2 s + \beta_3}{s^3 + (\beta_1 + k_d) s^2 + (\beta_1 k_d + \beta_2 + k_p) s} \quad (19)$$

$$H(s) = \frac{(k_p \beta_1 + k_d \beta_2 + \beta_3) s^2 + (k_p \beta_2 + k_d \beta_3) s + k_p \beta_3}{s^3 + \beta_1 s^2 + \beta_2 s + \beta_3} \quad (20)$$

$$y = \frac{1}{s^2} (f + b_0 u) \quad (21)$$

式中: f 为系统外部扰动。

联立式(19)一式(21)可得到简化后的 LADRC 结构框图, 如图 4 所示。

根据图 4, 由叠加定理可将式(21)进一步展开为

$$y = \frac{G(s)}{s^2 + G(s)H(s)} \omega_c^2 U_{dc}^* + \frac{1}{s^2 + G(s)H(s)} f \quad (22)$$

将式(12)代入式(20), 进一步化简得到 LADRC 系统的闭环传递函数 $L(s)$ 为

$$L(s) = \frac{s^3 + 3\omega_0 s^2 + 3\omega_c^2 \omega_0^2 s + \omega_0^3}{s^5 + (3\omega_0 + 2\omega_c) s^4 + (6\omega_0 \omega_c + 3\omega_0^2 + \omega_c^2) s^3 + (6\omega_c \omega_0^2 + 3\omega_c^2 \omega_0 + \omega_0^3) s^2 + (3\omega_0^2 \omega_c^2 + 2\omega_c \omega_0^3) s + (\omega_0^2 + \omega_c^2)} \quad (23)$$

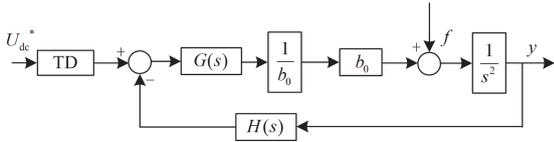


图 4 简化后的 LADRC 结构框图

Fig. 4 Simplified block diagram of LADRC structure

2.2 LADRC 带宽参数影响特性分析

传统二阶 LADRC 的设计中, 参数主要包括 ω_0 、 ω_c 、 b_0 , 通常采用经验法来进行参数整定。两个带宽之间存在着一定倍数关系, 研究者们通过大量数据分析总结出 $\omega_0 = (3 \sim 5)\omega_c$ 的经验关系^[39], 但目前尚无有效的带宽获取方法, 仍依赖适配法逐步调试, 由于带宽对应关系不清晰, 尤其在控制系统带宽较小时, ω_0 、 ω_c 之间的倍数关系可能不再适用, 经验法难以获取精确参数。

为进一步分析不同控制器带宽参数变化对控制系统的影响, 结合式(23)并选取 $\omega_c = 15$, $\omega_0 = 30$ 、40、50、60, 绘制 LADRC 系统的伯德图, 如图 5 所示。当 ω_c 取值一定时, 随 ω_0 取值增大, 对系统频率幅值抑制能力先减小后增大, 达到高频信号时不同 ω_0 抑制能力相差较小。

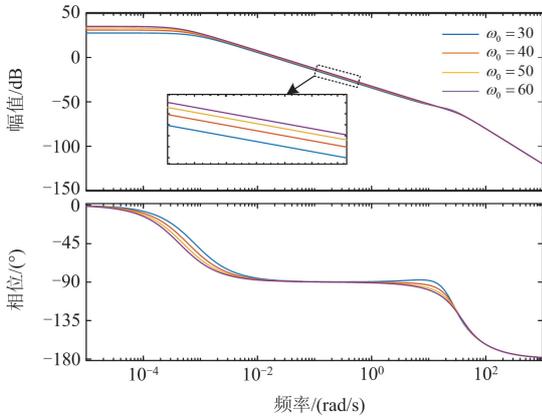


图 5 ω_0 变化时系统伯德图

Fig. 5 Bode plot of system with variation of ω_0

为探究 ω_c 参数变化时系统抗扰动性能的影响情况, 选取 $\omega_0 = 50$, $\omega_c = 5$ 、10、15、20, 得到 ω_c 变化时 LADRC 系统的伯德图, 如图 6 所示。当 ω_0 取值一定时, 随 ω_c 的增大, 系统抗干扰能力不断提升, 系统抵御外界扰动能力有所增强。

因此, 适当增加 ω_c 、 ω_0 可使得扰动增益减小, 系统抗扰动能力增强。综上所述, 结合经验法及系统伯德图特性, 本文 LADRC 初始参数设置为 $\omega_c = 15$, $\omega_0 = 50$ 。控制增益 b_0 表示控制对象的特

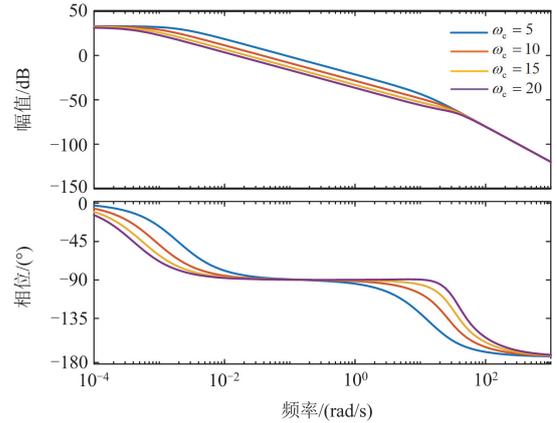


图 6 ω_c 变化时系统伯德图

Fig. 6 Bode plot of system with variation of ω_c

性, 可以由阶跃对象的初始加速度导出, b_0 越大, 抗干扰能力越弱, 为使系统保持稳定, b_0 不能过大也不能过小, 经多次实验, 本文将 b_0 设置为 0.15。

2.3 基于 GA 的 LADRC 参数整定方法

GA 是一种用于最优化问题的进化算法, 具有优越的全局寻优能力和并行搜索特性, 广泛应用于控制系统参数优化^[40-41]。为解决 LADRC 的控制器带宽参数过于依赖经验法获取, 难以在不同工况下快速准确确定控制器参数, 本文使用遗传算法作为线性自抗扰控制器参数整定方法。GA 优化 LADRC 参数的结构示意图如图 7 所示。

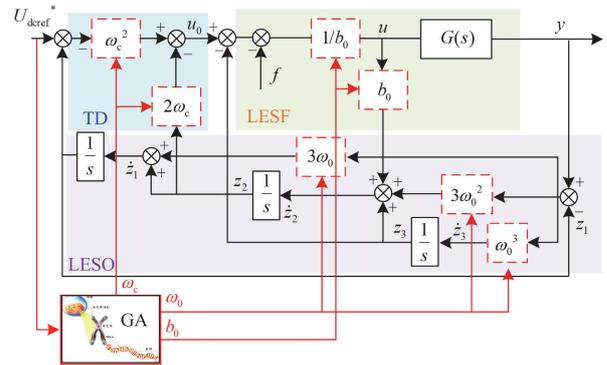


图 7 基于 GA 的 LADRC 结构示意图

Fig. 7 Schematic diagram of GA-based LADRC structure

扰动抑制是过程控制中的关键问题, 虽然控制系统的扰动通常发生在低频段, 但它会以多种形式影响被控过程。线性自抗扰控制器的整定是通过闭环系统对过程输入或输出的单位阶跃负荷扰动响应来表征负荷扰动的抑制效果。为增强参数寻优的效果, 本文选取上升时间 t_r 及误差绝对值积分(integral of absolute error, IAE)作为适应度函数, 将负荷扰动

后的直流电压 ΔU_{dc}^* 作为扰动信号。其中 IAE 是表征控制系统负荷扰动衰减的关键指标, 其表达式为

$$S_{IAE} = \int |\Delta U_{dc}^*|^2 dt \quad (24)$$

结合 2.2 节中结论, 若想提高 LADRC 输出值、提高系统频率支撑特性, 则期望 β_1 、 β_2 、 β_3 取较大值, 即 LESO 控制器带宽 ω_0 越大, 输出 ΔU_{dc}^* 越大, IAE 数值越大, 适应度函数越大, 遗传到下一代的概率越大, 进而系统性能指标越强, 误差收敛越快。综合以上限制因素, 构建适应度目标函数为

$$f_{fitness} = S_{IAE} + \lg t_r \quad (25)$$

图 8 为 GA 优化 LADRC 参数的基本流程图, 参数详细寻优步骤如下: 首先, 将伯德图得到的参数初值作为 GA 的待寻优参数集并进行编码; 然后, 根据适应度函数计算种群的适应值; 接着, 判断是否达到最大迭代次数或已找到最优解, 如果不满足条件, 令种群 2 等于种群 1 重新进行迭代, 直至找到最优解或达到最大迭代次数, 输出最优参数集。

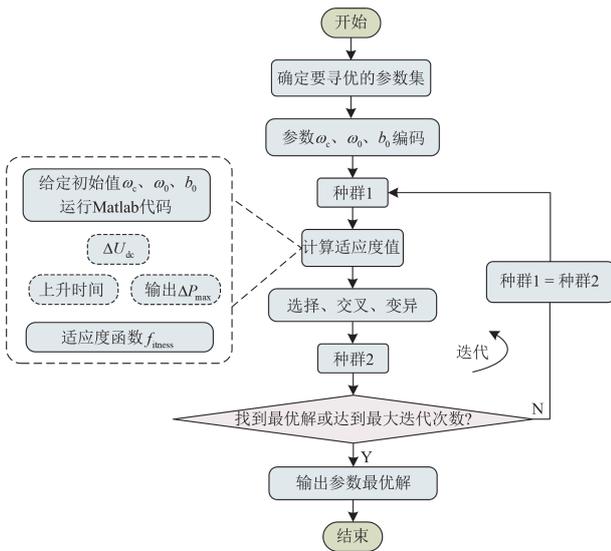


图 8 GA 优化 LADRC 参数的基本流程图

Fig. 8 Basic flowchart of GA-optimized LADRC parameters

本文提出的基于 LADRC 的构网型 PMSG 快速频率支撑策略, 相比于常规的下垂控制, 能够通过响应直流电压信号对电网有功缺额进行补偿, 缓解负荷变化等对电网的影响。同时利用 GA 算法进行参数寻优进一步提升了系统的调频性能。

3 仿真分析

为验证本文所提快速频率支撑策略的有效性, 基于 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真平台分别在策略 1: 无附加调频控制; 策略 2: 下垂控制(采用电网导则推荐恒定参数 $K_p = 20$ [8]); 策略 3: 恒定参数

的线性自抗扰支撑策略(LADRC); 策略 4: 基于遗传算法优化线性自抗扰控制(GA-LADRC)策略下对单机并网仿真模型进行不同工况的仿真分析。图 9 为系统仿真模型的结构示意图, 其中风机额定有功功率为 2 MW, 同步发电机额定有功功率为 10 MW, 初始静态负荷为 7 MW, 在仿真 25 s 时, 增加 P_{L2} 以造成 2.5 MW、4 MW 的动态负荷扰动, 仿真参数详见表 1。

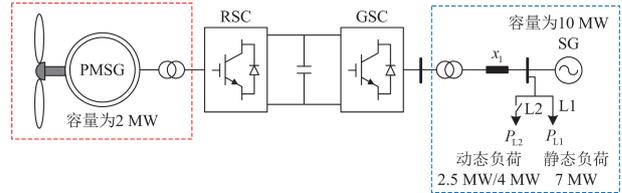


图 9 仿真模型

Fig. 9 Simulation model

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	数值
同步机额定功率/MW	10
同步机额定频率/Hz	50
同步机惯性时间常数/s	5
同步机稳态功率/p.u.	1.0
风机功率基准值 S_B /MW	2
相电压有效值 U_B /kV	0.563
直流电压基准值 U_{dcn} /kV	1.1
定子侧角频率基准值 ω_{Bm} /(rad/s)	84.6
电网侧角频率基准值 ω_{Bg} /(rad/s)	314
永磁同步发电机同步电感 L_s /p.u.	0.5495
直流电容惯性时间常数 H_c /ms	3.025
直流电压稳定值 U_{dc0}^* /p.u.	1.0
无功功率的稳定值 Q_{g0}^* /p.u.	0
电网相电压稳定值 e_g /p.u.	1.0
变换器开关频率 f_s /kHz	2

1) 工况 1: 风速为 10 m/s, 负荷突增 2.5 MW

工况 1 的仿真结果如图 10 所示。扰动发生后, 无附加调频策略的策略 1 系统频率下跌至 49.667 Hz。而其他调频策略均通过释放转子动能参与调频, 频率最低点得到不同程度的改善, 其中采用常规下垂控制策略的策略 2 频率最低点跌至 49.705 Hz, 相较策略 1 提升了 0.038 Hz, 而采用本文所提的基于 LADRC 的调频策略 3 和策略 4, 频率最低点跌至 49.726 Hz、49.760 Hz, 相较策略 2 分别提升了 0.021 Hz、0.055 Hz, 风机转子转速分别跌至 0.749 p.u.、0.691 p.u., 转子动能得到了充分释放, 风机最大输出功率分别提升至 0.962 p.u.、1.055 p.u.,

调频效果得到显著提升。

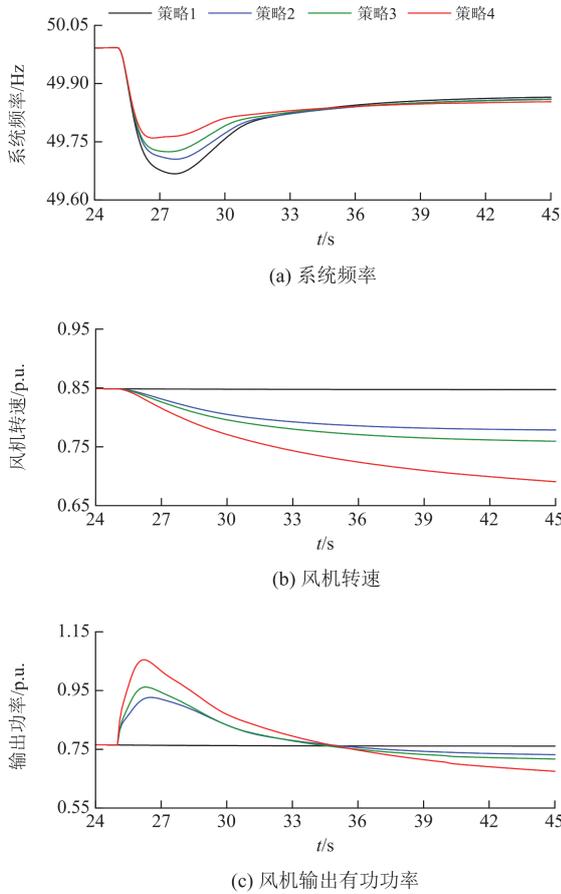


图 10 工况 1 的仿真结果

Fig. 10 Simulation results of Case 1

构网型 PMSG 采用本文提出的 GA-LADRC 策略时，根据直流电压实时反馈信号反馈给 GA，经过选择、交叉、变异编码后得到优化后的 ω_c 、 ω_0 、 b_0 分别为 10.5088、46.1659、0.1398，采用最优参数的策略 4 转子转速相较策略 3 降低了 0.058 p.u.，风机输出功率提升了 0.093 p.u.，频率最低点提升了 0.034 Hz，由此可知，采用 GA 优化的 LADRC 不仅解决了固定参数下 LADRC 支撑能力不足、不同工况下适应性差的问题，而且进一步改善了频率最低点，弥补了基于匹配控制的构网型风电机组频率主动支撑能力不足的缺陷。

2) 工况 2: 风速为 10 m/s，负荷突增 4 MW

保证其他工况不变的情况下，进一步增大负荷扰动为 4 MW，仿真结果如图 11 所示。

其中无附加调频策略的策略 1 频率最低点跌至 49.463 Hz，策略 2、3、4 频率最低点分别为 49.517、49.559、49.605 Hz，相较策略 1 分别提升了 0.054、0.096、0.142 Hz，取得了较好的调频效果。

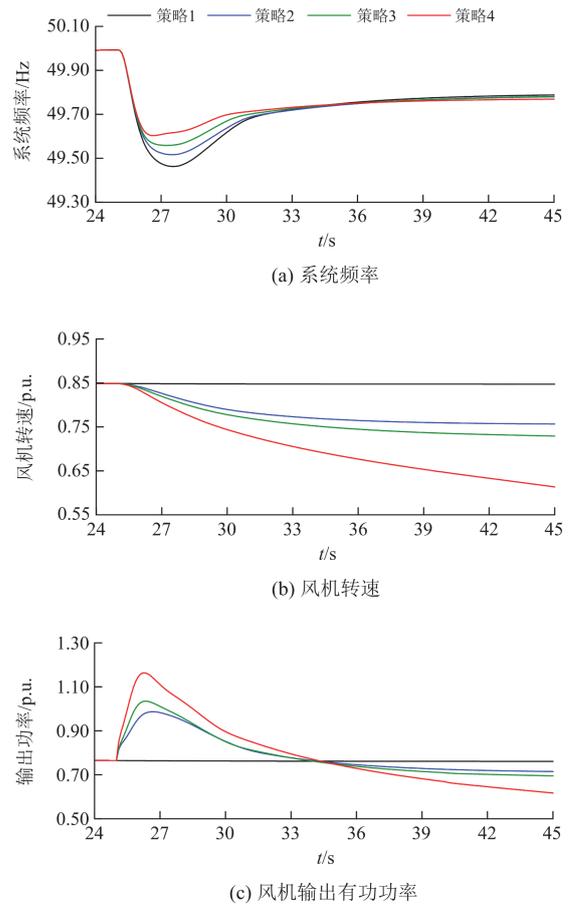


图 11 工况 2 的仿真结果

Fig. 11 Simulation results of Case 2

本文所提的基于 GA 优化的 LADRC 参数分别为 $\omega_c = 11.2146$ 、 $\omega_0 = 49.8998$ 、 $b_0 = 0.1453$ ，经过 GA 优化后的策略 4 相较固定系数的策略 3 频率最低点抬升了 0.046 Hz；转子转速降低了 0.069 p.u.；输出功率增发了 0.129 p.u.，转子动能得到进一步释放，有效地补充了功率缺额。

4 结论

本文聚焦于基于匹配控制的构网型风电联网系统，针对基于匹配控制的构网型风电机组主动频率支撑能力受限，且常规调频控制参数整定难、调频潜力不足以及在不同工况下适应性较差的问题，提出了基于 LADRC 的快速频率支撑策略。结合相关算例仿真，得出以下结论。

1) 构建的基于匹配控制的构网型 PMSG 模型架构，利用直流电压作为同步信号，实现了频率与直流电压实时匹配，但该方法不具备阻尼响应能力，频率支撑能力不足。本文通过附加 LADRC 充分发挥了风电机组频率支撑的潜力，有效抬升了频率最低点。

2) 本文以 LADRC 作为快速频率支撑策略的研究表明: LADRC 参数在系统频率支撑特性和风机运行状态性能指标方面受到双重约束的影响。为解决上述参数整定的难题, 本文利用 TD 控制器和 LESO 控制器的带宽设定初值, 并结合 GA 优化 LADRC 对应参数, 实现不同工况下控制器参数的在线优化, 加快参数整定速率的同时提升了调频性能。

3) 仿真结果表明, LADRC 作为调频装置相较传统下垂控制具备更优的调频性能, 采用 GA-LADRC 的调频策略相较 LADRC 策略具备更好的工况适应性, 对频率最低点的支撑能力较为优越。

参考文献

- [1] 孙华东, 王宝财, 李文锋, 等. 高比例电力电子电力系统频率响应的惯量体系研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(16): 5179-5192.
SUN Huadong, WANG Baocai, LI Wenfeng, et al. Research on inertia system of frequency response for power system with high penetration electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5179-5192.
- [2] 张兴, 战祥对, 吴孟泽, 等. 高渗透率新能源发电并网变流器跟网/构网混合模式控制综述[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(21): 1-15.
ZHANG Xing, ZHAN Xiangdui, WU Mengze, et al. Review on grid-following/grid-forming hybrid mode control for grid-connected converter in high penetration rate of renewable energy generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(21): 1-15.
- [3] 刘洋, 王聪颖, 夏德明, 等. 电网故障导致大面积风电低电压穿越对电网频率的影响分析及措施[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3505-3514.
LIU Yang, WANG Congying, XIA Deming, et al. Influence of large area wind power low voltage ride-through on power grid frequency caused by power grid faults[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3505-3514.
- [4] 杨桂兴, 郭小龙, 孙谊嫔, 等. 虚拟同步发电机频率偏差前馈阻尼控制策略的参数整定方法[J]. 高压电器, 2024, 60(10): 46-53.
YANG Guixing, GUO Xiaolong, SUN Yiqian, et al. Parameter tuning method of frequency deviation feedforward based damping control strategy for virtual synchronous generator[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(10): 46-53.
- [5] 李卫国, 梁智豪. 基于风机转子转速以及荷电状态的变系数风储联合系统参与一次调频控制策略[J]. 东北电力大学学报, 2025, 45(1): 83-94.
LI Weiguo, LIANG Zhihao. Control strategy of the variable coefficient wind-storage combined system participating in power system primary frequency regulation based on the rotor speed and the state of charge[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2025, 45(1): 83-94.
- [6] YANG Dejian, WANG Xin, YAN Gangui, et al. Decoupling active power control scheme of doubly-fed induction generator for providing virtual inertial response[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 149.
- [7] 钱敏慧, 张建胜, 秦文萍, 等. 计及 DFIG 调频的系统频率响应特性分析及快速频率支撑策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(3): 58-67.
QIAN Minhui, ZHANG Jiansheng, QIN Wenping, et al. System frequency response characteristic considering DFIG frequency regulation and fast frequency response strategy[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(3): 58-67.
- [8] 肖亮, 陈亦平, 伍阳阳, 等. 风电场快速调频技术的工程实践及关键参数取值[J]. 高电压技术, 2023, 49(6): 2536-2548.
XIAO Liang, CHEN Yiping, WU Yangyang, et al. Engineering practice and key parameter selection for fast frequency regulation technology of wind farms[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2536-2548.
- [9] NYCANDER E, SÖDER L. Review of European grid codes for wind farms and their implications for wind power curtailments[C]// Proceedings of the 17th International Wind Integration Workshop, October 17-19, 2018, Stockholm, Sweden: 1-7.
- [10] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 风电场接入电力系统技术规定 第 1 部分: 陆上风电: GB/T 19963.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical specification for connecting wind farm to power system—part 1: on shore wind power: GB/T 19963.1—2021[S]. Beijing: China Standard Press, 2021.
- [11] FISCHER M, ENGELKEN S, MIHOV N, et al. Operational experiences with inertial response provided by type 4 wind turbines[J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 10(1): 17-24.
- [12] 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.
- [13] LUO Yi, YAO Jun, CHEN Zhaoyang, et al. Transient synchronous stability analysis and enhancement control

- strategy of a PLL-based VSC system during asymmetric grid faults[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2023, 8(2): 1-17.
- [14] 袁泉添, 杜正春, 李宇骏, 等. 基于直流电压同步的构网型直驱风机两阶段主动阻尼支撑控制策略[J]. *电网技术*, 2023, 47(12): 4995-5007.
YUAN Xiaotian, DU Zhengchun, LI Yujun, et al. Two-stage control of DC voltage-synchronized directly-driven wind turbine for active damping support[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(12): 4995-5007.
- [15] 桑顺, 徐婷, 齐琛, 等. 惯性同步构网型变换器定量感知电网频率的机理及抗干扰控制策略[J]. *电网技术*, 2023, 47(4): 1395-1408.
SANG Shun, XU Ting, QI Chen, et al. Mechanism of quantitative sensing grid frequency and anti-interference control strategy for the grid-forming converter[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(4): 1395-1408.
- [16] 刘泽洪, 郑炜, 李佳朋, 等. 构网型技术发展现状与前景[J]. *全球能源互联网*, 2025, 8(4): 399-415.
LIU Zehong, ZHENG Wei, LI Jiapeng, et al. Status and outlook for the development of grid-forming technologies[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2025, 8(4): 399-415.
- [17] ZHONG Q, NGUYEN P L, MA Z, et al. Self-synchronized synchronverters: inverters without a dedicated synchronization unit[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 29(2): 617-630.
- [18] 胡秦然, 巫绍辉, 韩汝帅, 等. 多虚拟同步发电机主导系统稳定性分析及提高措施综述[J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(12): 11-30.
HU Qinran, WU Shaohui, HAN Rushuai, et al. Review of stability analysis methods and improvement measures for power system dominated by multiple virtual synchronous generators[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(12): 11-30.
- [19] 石荣亮, 兰才华, 张群英, 等. 储能 VSG 并联组网系统的有功振荡特性分析及其改进策略[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(5): 51-57.
SHI Rongliang, LAN Caihua, ZHANG Qunying, et al. Analysis and improvement strategy of active power oscillation characteristics for energy storage VSG parallel networking system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(5): 51-57.
- [20] HUANG Linbin, XIN Huanhai, ZHANG Leiqi, et al. Synchronization and frequency regulation of DFIG-based wind turbine generators with synchronized control[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2017, 32(3): 1251-1262.
- [21] 胡佳鑫, 陈俊儒, 刘雨姗, 等. 计及白天有功-夜间无功支撑的改进 VSG 光储协同控制[J]. *智慧电力*, 2025, 53(5): 31-39.
HU Jiaxin, CHEN Junru, LIU Yushan, et al. Improved VSG-based coordinated control of photovoltaic-energy storage systems incorporating daytime active power and nighttime reactive power support[J]. *Smart Power*, 2025, 53(5): 31-39.
- [22] TAOUBA J, CATALIN A, FLORIAN D. Grid-friendly matching of synchronous machines by tapping into the DC storage[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, 49(22): 192-197.
- [23] 孙大卫, 于思奇, 王潇, 等. 电压电流双环控制对匹配控制构网型变流器阻抗特性的影响机理[J]. *电力自动化设备*, 2025, 45(11): 218-226.
SUN Dawei, YU Siqu, WANG Xiao, et al. Influence mechanism of voltage-current double-loop control on impedance characteristics of grid-forming converter based on matching control[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2025, 45(11): 218-226.
- [24] 桑顺, 齐琛, 张新松, 等. 永磁直驱风电机组的构网型控制与黑启动[J]. *电网技术*, 2022, 46(8): 3168-3180.
SANG Shun, QI Chen, ZHANG Xinsong, et al. Grid-forming control and black start of PMSG-based direct-driven wind turbine[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(8): 3168-3180.
- [25] YANG Renxin, SHI Gang, CAI Xu, et al. Autonomous synchronizing and frequency response control of multi-terminal DC systems with wind farm integration[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(4): 2504-2514.
- [26] 桑顺, 张琛, 蔡旭, 等. 全功率变换风电机组的电压源控制(一): 控制架构与弱电网运行稳定性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(16): 5604-5616.
SANG Shun, ZHANG Chen, CAI Xu, et al. Voltage source control of wind turbines with full-scale converters (part I): control architecture and stability analysis[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(16): 5604-5616.
- [27] 刘辉, 于思奇, 孙大卫, 等. 构网型变流器控制技术及原理综述[J]. *中国电机工程学报*, 2025, 45(1): 277-297.
LIU Hui, YU Siqu, SUN Dawei, et al. An overview of control technologies and principles for grid-forming converters[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2025, 45(1): 277-297.
- [28] ZOU Yaping, BAI Xingying, LI Linyi, et al. Variable pitch fractional-order model-assisted active disturbance rejection controller for wind turbine active power regulation[J]. *Electric Power System Research*, 2024, 233.
- [29] 王义, 江汉红, 邢鹏翔. 独立微网中并网逆变器自抗

- 扰控制辅助调频算法[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(4): 8-19.
- WANG Yi, JIANG Hanhong, XING Pengxiang. Auxiliary frequency regulation algorithm for grid-connected inverter with auto-disturbance rejection control in stand-alone micro-grid[J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(4): 8-19.
- [30] 王义, 江汉红, 邢鹏翔. 风电机组虚拟惯量一阶自抗扰控制研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(4): 153-163.
- WANG Yi, JIANG Hanhong, XING Pengxiang. Research of wind turbine virtual inertia first-order active disturbance rejection control[J]. Acta Energetica Sinica, 2020, 41(4): 153-163.
- [31] 葛胜升, 王鹏, 施凯. 基于二阶线性自抗扰的虚拟同步发电机二次调频控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(10): 81-88.
- GE Shengsheng, WANG Peng, SHI Kai. Secondary frequency modulation control of virtual synchronous generator based on second-order linear active disturbance rejection control[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2022, 34(10): 81-88.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 李辰佳, 李琰, 范译文, 等. 适用于光伏接入中压直流配电网的改进型 LADRC 恒压控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(3): 37-46.
- LI Chenjia, LI Yan, FAN Yiwen, et al. Improved LADRC constant voltage control strategy for photovoltaic integration into MVDC distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(3): 37-46.
- [35] MENG Jianhui, SUN Yaxin, ZHANG Zili, et al. Adaptive linear active disturbance-rejection control strategy reduces the impulse current of compressed air energy storage connected to the grid[J]. Global Energy Interconnection, 2024, 7(5): 577-589.
- [36] 曹炯琼, 张达敏, 曾汉超, 等. 基于改进型 LADRC 的直驱风机次同步振荡抑制策略[J]. 智慧电力, 2025, 53(4): 62-70.
- CAO Jiongqiong, ZHANG Damin, ZENG Hanchao, et al. Improved LADRC based sub-synchronous oscillation suppression strategy for direct-drive permanent magnet synchronous generator[J]. Smart Power, 2025, 53(4): 62-70.
- [37] 周杰, 皇金锋, 黄红杰, 等. T 型三电平储能变流器直流母线电压改进自抗扰控制[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(21): 81-91.
- ZHOU Jie, HUANG Jinfeng, HUANG Hongjie, et al. DC bus voltage improved active disturbance rejection control of a T-type three-level energy storage converter[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(21): 81-91.
- [38] 唐艳梅. 线性自抗扰控制器在孤岛微网负荷频率控制中的应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- TANG Yanmei. Linear active disturbance rejection-based load frequency control in isolated microgrid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [39] 梁青, 王传榜, 潘金文, 等. 线性自抗扰控制参数 b_0 辨识及参数整定规律[J]. 控制与决策, 2015, 30(9): 1691-1695.
- LIANG Qing, WANG Chuanbang, PAN Jinwen, et al. Parameter identification of b_0 and parameter tuning law in linear active disturbance rejection control[J]. Control and Decision, 2015, 30(9): 1691-1695.
- [40] 户杏启, 韩文杰, 谭文. 一阶线性自抗扰控制的整定[J]. 信息与控制, 2022, 51(4): 423-432.
- HU Xingqi, HAN Wenjie, TAN Wen. Tuning of first-order linear active disturbance rejection control[J]. Information and Control, 2022, 51(4): 423-432.
- [41] 刘泽健, 杨苹, 林旭, 等. 基于海上风力发电机组中虚拟飞轮储能系统的频率支撑协调控制策略[J]. 智慧电力, 2024, 52(2): 101-107.
- LIU Zejian, YANG Ping, LIN Xu, et al. Coordination control strategy for frequency support based on virtual flywheel energy storage system in offshore wind turbines[J]. Smart Power, 2024, 52(2): 101-107.

收稿日期: 2025-05-12; 修回日期: 2025-11-12

作者简介:

杨德健(1990—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为可再生能源并网; E-mail: yangdejian@ncepu.edu.cn

胡同宇(2001—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为可再生能源并网。E-mail: hty1160638397@163.com

(编辑 周金梅)