

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240093

基于改进 LADRC 的构网型储能调频控制策略研究

李建林¹, 卢冠铭¹, 游洪灏¹, 郭雅娟², 辛迪熙¹, 袁晓冬²

(1. 国家能源用户侧储能创新研发中心(北方工业大学), 北京 100144;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要: 为提升高比例风电渗透下电力系统的频率稳定性, 同时解决风储联合系统调频过程中参数间相互影响难以兼顾导致系统调频控制性能不佳的问题, 提出一种基于改进型线性自抗扰控制策略(linear active disturbance rejection control, LADRC)的构网型(grid-forming, GFM)储能调频控制策略。首先, 在传统应用 LADRC 对角频率进行快速控制的基础上, 引入有功差额补偿, 加速有功指令响应速度, 消除参数互耦。同时, 针对构网型储能调频控制策略参数影响规律, 分析了角频率和参考功率至输出功率的小信号模型, 推导控制环节传递函数, 实现对系统调频性能优化。最后在 Matlab/Simulink 仿真平台上搭建风储联合系统仿真模型, 对不同控制策略在不同工况下电网频率和储能出力的变化情况进行对比分析。结果表明, 所提控制策略有效提升复杂工况下风储联合系统对电网频率的支撑能力。

关键词: 构网型储能; 小信号模型; 自抗扰控制策略; 风储联合系统; 频率支撑

Frequency regulation control strategy for grid-forming energy storage based on improved LADRC

LI Jianlin¹, LU Guanming¹, YOU Honghao¹, GUO Yajuan², XIN Dixi¹, YUAN Xiaodong²

(1. National User-Side Energy Storage Innovation Research and Development Center (North China University of Technology), Beijing 100144, China; 2. Electric Power Science Research Institute of State Grid

Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China)

Abstract: A strategy of grid-forming (GFM) energy storage frequency regulation control based on an improved linear active disturbance rejection control (LADRC) is proposed to help overcome two problems: the frequency stability of a power system with a high proportion of wind power penetration; it is difficult to take into account the interaction between parameters in the process of frequency regulation of a wind-storage combined system, resulting in poor frequency regulation control performance of the system. First, using the fast control of the diagonal frequency of the traditional application LADRC, active power difference compensation is introduced to accelerate the response speed of active power instructions and eliminate parameter cross-coupling. From the influence law of the parameters of the grid-forming energy storage frequency regulation control strategy, a small-signal model of angular frequency and reference power to the output power is analyzed. The transfer function of the control link is deduced to optimize the frequency regulation performance of the system. Finally, a simulation model of the combined wind storage system is built on the Matlab/Simulink simulation platform, and the changes of the power grid frequency and energy storage output in different working conditions are compared and analyzed with different control strategies. The results show that the proposed control strategy effectively improves the support ability of the combined wind storage system to the power grid frequency in complex working conditions.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of the State Grid Corporation of China: Key Technologies Standard, Support Tool and Application Research of Vehicle and Network Interaction (No. 5400-202318585A-3-2-ZN).

Key words: GFM energy storage; small-signal model; active disturbance rejection control strategy; wind-storage combined system; frequency support

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助“车网互动关键技术标准、支持工具及应用研究”(5400-202318585A-3-2-ZN)

0 引言

随着电网中风电渗透率日益增高, 系统惯性逐渐下降, 同时风电具有随机波动性以及电力系统运行时自身存在负荷高峰低谷变动、频率电压不稳定等问题, 电力系统的安全稳定运行受到了严重威胁^[1-3]。面对风电及电力系统内部双重不稳定因素, 增强电网的抗干扰能力和对频率的主动支撑能力成为当前亟需解决的问题^[4]。

在此背景下, 构网型储能凭借其灵活且快速的能量存储和释放特性^[4-5], 以及能为电网提供足够惯性支撑和可以根据给定功率进行能量分配达到增强调频效果的特点, 成为解决分布式电源并网稳定性的有效方法^[6-8]。目前, 构网型储能控制策略主要分为下垂控制、虚拟同步机控制(virtual synchronous generator, VSG)、匹配控制和虚拟振荡器控制这 4 种控制策略^[9-12], 其中以虚拟同步机技术为基础的控制策略占主导地位。

当前有许多学者对 VSG 控制的有功频率支路环节进行了优化研究, 文献[13]中提出了基于超前滞后控制环节的 VSG 控制策略, 并分析考虑了微分增益的条件, 有效降低有功超调量最大值, 但是该研究方案没有对阻尼系数进行单独调节, 易引入高频谐波降低系统稳定性; 文献[14-15]通过在 VSG 控制策略中引入有功滞后控制环节, 设计了一种有关阻尼参数的前馈反馈补偿方案, 但并没有给出系统主导极点的相关参数优化设计过程; 文献[16]构建了阻尼改进方案, 将高阶的有功闭环传递函数等效降阶成典型的二阶传递函数系统, 并给出了相关参数整定方法; 文献[17]采用惯量自适应的控制方法提供恰当的惯量参数, 能够实时调节惯量参数来降低控制过程中的功率振荡, 但并未分析惯量与阻尼系数共同调节对系统稳定性的改善情况; 文献[18]提出了一种虚拟惯量与虚拟阻尼均自动连续调节的改进策略, 但不能从根本上解决参数耦合的问题; 文献[19-22]中考虑惯量与阻尼对系统频率特性的综合作用, 并给出了参数设置方法, 但是没有从整体系统小信号模型的角度来深入探讨参数之间相互作用对系统特性的影响。上述文献针对有功频率的控制策略均可有效快速抑制构网型储能并网有功的动态振荡, 但均没有考虑构网型储能输出频率存在过冲的问题。

自抗扰控制可以提高系统的动态性能和抗扰能力。因此, 针对前述问题, 可以利用自抗扰控制来优化构网型储能调频效果。文献[23]提出将一种基于改进型线性自抗扰控制策略(linear active disturbance

rejection control, LADRC)算法与构网型储能控制相结合, 通过对有功频率控制环节输入功率进行自抗扰控制; 文献[24]从系统稳定性角度出发, 利用二阶 LADRC 算法与构网型储能控制相结合实现对频率的调节, 但存在参数阻尼比不能始终保持最优值而引起动态振荡的问题; 文献[25]在构网型储能逆变器控制策略中引入改进型 LADRC, 通过提高线性扩张状态观测器(linear expansion state observer, LESO)的观测带宽使得所观测的相位幅值明显降低, 能够提高自抗扰控制器的抗扰能力; 文献[26]提出一种电压电流双闭环控制与非线性自抗扰控制配合调控的策略, 能够提高系统的抗扰能力。以上文献提出的控制策略都通过引入自抗扰控制提高电力系统频率稳定性, 但都没有考虑控制参数互耦导致 LADRC 控制性能不佳的问题。

综上所述, 考虑电力系统中快速抑制干扰信号以及系统控制性能优化的问题, 本文在有功频率控制模块中的角频率输出端加入 LADRC 配合前馈控制环节, 提出一种基于改进 LADRC 的构网型储能调频控制策略。从有功频率控制结构的角度出发, 通过补偿角频率的偏差量并将前馈控制环节的输出量与原始有功功率的输出相叠加, 有效降低了功率冲击, 并加快系统有功指令追踪速度, 解决了由于一次调频系数与虚拟阻尼控制系数相互耦合而导致动态振荡与稳态偏差难以兼顾的问题, 有效增强了系统频率的稳定性。最后通过在 Matlab/Simulink 中搭建风储联合系统调频模型验证该策略的有效性和可行性。

1 风储联合系统模型

本文针对含风储联合系统及公用电网的调频系统模型, 进行构网型储能策略优化研究, 如图 1 所示。其中风力发电系统通过总线 3 与电池储能系统(battery energy storage system, BESS)相连, 火力发电

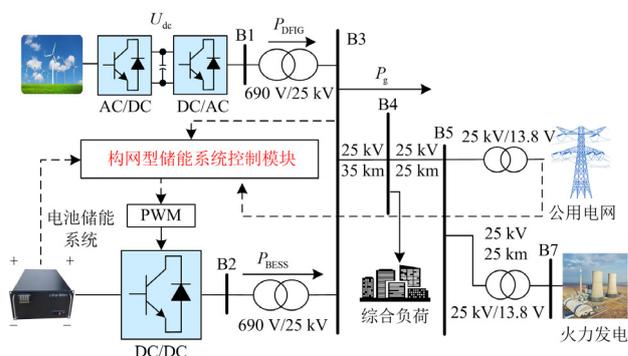


图 1 含风储联合系统及公用电网的调频系统模型图

Fig. 1 Model of frequency regulation system with wind-storage combined system and utility grid

系统通过 5 号母线与公用电网相连, 综合负荷与 4 号母线相连接, BESS 既能实时追踪系统频率等重要参数, 又可以根据外界干扰信号进行快速反馈, 保持新型电力系统的频率动态平衡^[27]。

1.1 风储联合系统建模

风储联合系统结构图如图 2 所示。风力发电机组根据风速进行桨距控制和功率跟踪控制, 调节风能利用系数, 使得机组能够追踪实际风速进行自我调节而保持最大功率追踪(maximum power point tracking, MPPT)的运行状态。与传统发电中常用的大型同步发电机不一样, 风机转子中存储的能量与定子输出功率之间耦合关系很弱, 机组输出的有功 P_{DFIG} 与电网频率 f 解耦, 这导致在电网受到扰动或者出现故障时, 风机无法利用传统发电机中转子所

含的能量来抑制电网中的频率波动, 本身不具备主动向电网提供惯量支撑的能力, 甚至随着电力系统风机装机容量持续升高, 电力系统整体控制频率稳定能力持续降低, 这给电力系统的安全稳定运行带来了巨大挑战。

本文采用具有双向可充可放特性的 BESS 进行调频策略研究^[28]。所采用的 BESS 变流器控制策略结构图如图 2 所示, 其中直流侧采用恒定电压源 U_{bat} ; 交流侧经线路阻抗及滤波电路为公共连接点 (point of common coupling, PCC) 的区域负荷供电。在构建 BESS 模型时, 充分考虑由于系统频率频繁波动而导致 BESS 频繁启停动作, 使得 BESS 寿命降低且电力系统运行成本增加等问题。BESS 模型的频率死区参数为 $\pm 0.033 \text{ Hz}$ ^[28]。

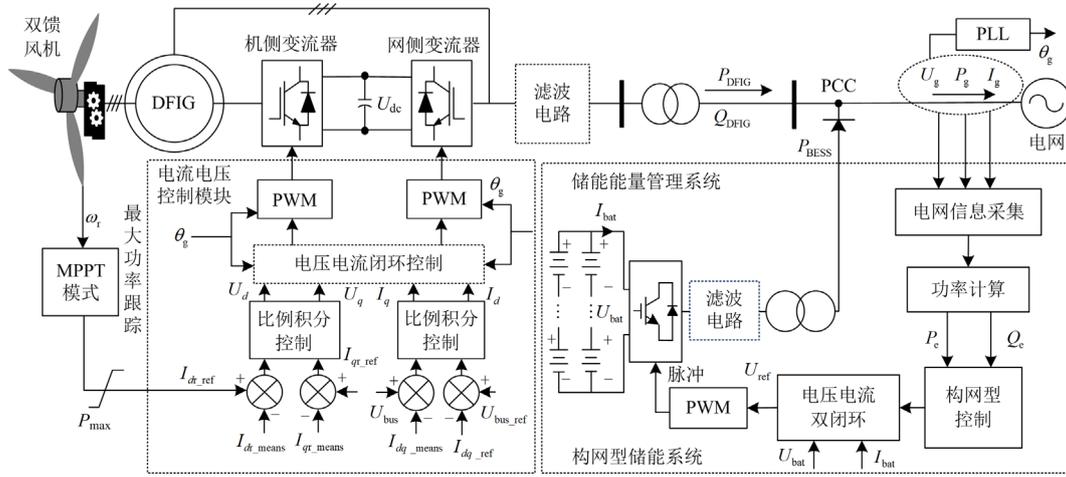


图 2 风储联合系统结构图

Fig. 2 Structural diagram of the wind-storage combined system

1.2 构网型储能控制系统建模

本文所搭建的构网型储能系统控制结构框图如图 3 所示。以典型 VSG 控制构成的功率外环和以电压电流双闭环构成的内环共同组成。

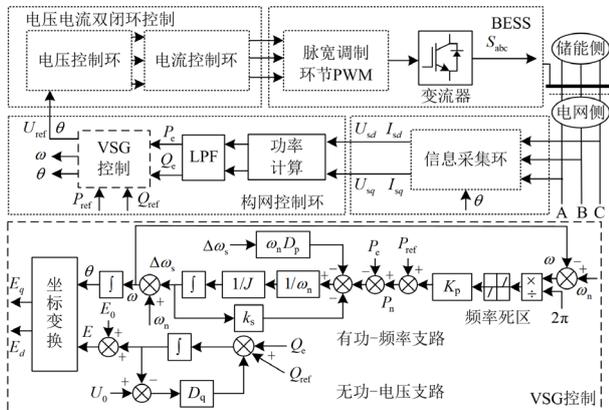


图 3 构网型储能系统控制结构框图

Fig. 3 Control principle block diagram of GFM-BESS

VSG 控制通过模拟同步发电机转子运动的二阶方程, 精确地模拟同步机的运行特性。同步机转子运动二阶方程为

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - D_p(\omega - \omega_n) \\ \frac{P_{ref}}{\omega_n} - \frac{P_e}{\omega_n} - D_p(\omega - \omega_n) \\ \omega_n \\ k_c \frac{dE}{dt} = (Q_{ref} - Q_e) + D_q(U_n - U_0) \\ \omega = \frac{1}{J_s} [D_p(\omega_n - \omega) + (P_{ref} - P_e)] \end{cases} \quad (1)$$

式中: J 为虚拟转动惯量; ω 为 VSG 输出角频率; T_m 为机械转矩; T_e 为电磁转矩; D_p 和 D_q 分别为 P-F 支路的阻尼系数、Q-V 支路的阻尼系数; ω_n 为系统参考角频率; P_{ref} 和 Q_{ref} 分别为 VSG 有功功率、无功功率参考值; P_e 和 Q_e 分别为经 PCC 采集电压电

流参数信息后计算所得的有功功率和无功功率; k_c 为同步电压增益系数; E 为 VSG 输出电势幅值; s 为拉普拉斯算子; U_n 为网侧额定电压幅值; U_0 为网侧交流电压幅值。

通过分析典型 VSG 控制原理框图易知, P_c 实际上直接受有功参考值 P_{ref} 与电网侧角频率 ω_r 两种信号的影响, 构建 P_{ref} 、 ω_r 至 P_c 的小信号模型 $G_{P_{ref}}$ 、 G_{ω_r} , 表示为

$$\begin{cases} G_{P_{ref}} = \frac{\Delta P_c}{\Delta P_{ref}} \Big|_{\Delta \omega_r=0} = \frac{k_c}{J\omega_n s^2 + (D_p \omega_n + k_s)s + k_c} \\ G_{\omega_r} = \frac{\Delta P_c}{\Delta \omega_r} \Big|_{\Delta P_{ref}=0} = -\frac{J\omega_n k_c s + k_c(D_p \omega_n + k_s)}{J\omega_n s^2 + (D_p \omega_n + k_s)s + k_c} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\Delta \omega_r = \omega_r - \omega_n$; k_s 为有功频率支路反馈系数; ω_1 、 ξ_1 分别为系统振荡角频率、阻尼比, 表示为

$$\begin{cases} \omega_1 = \sqrt{k_c / (J\omega_n)} \\ \xi_1 = \frac{k_s + D_p \omega_n}{2} \sqrt{1 / (k_c J\omega_n)} \end{cases} \quad (3)$$

当 $\omega_r - \omega_n \neq 0$ 时, 根据式(2)可以得到有功输出的稳态误差为

$$\lim_{s \rightarrow 0} G_{\omega_r} \Delta \omega_r = -(k_s + \omega_n D_p) \Delta \omega_r \quad (4)$$

由式(3)可知, D_p 值的增大会导致阻尼比 ξ_1 增大, 此时系统的响应会更加稳定; D_p 值的取值减小时则结果相反, 结合式(4)分析可知, D_p 与 k_s 互耦强相关共同影响有功输出稳态误差, 两者的合理取值对系统性能具有重要影响。但是在复杂的运行工况下两者又难以同时兼顾, 因此提出一种能使参数 D_p 与 k_s 解耦的基于改进 LADRC 的构网型储能控制策略。

2 基于改进 LADRC 的构网型储能调频策略研究

2.1 改进型 LADRC 策略

图 4 给出了一种基于改进型 LADRC 的构网型储能控制策略框图。自抗扰控制器主要包含跟踪微分器(tracking differentiator, TD)、线性扩展状态观测器和线性状态误差反馈(linear state error feedback, LSEF)3 部分, LADRC 结构及原理框图见图 5。

在满足储能系统具备优良动态响应特性的基础上, 为解决在复杂运行工况下构网型储能系统发生动作时, 由于 D_p 与 k_s 强相关导致难以兼顾系统动态振荡与稳态偏差的问题, 本文提出基于改进型 LADRC

的构网型储能调频控制策略, 相较于传统构网型储能控制和线性自抗扰控制, 可以有效地减小风电机组出力及负荷需求变化等对电网的影响, 避免由于锁相环繁杂操作带来的误差, 同时能够给电力系统提供惯性支撑, 使得控制系统响应速度更快, 可以根据给定功率进行能量快速分配, 起到提高调频质量以及确保电网在极端运行条件下安全稳定运行的作用。

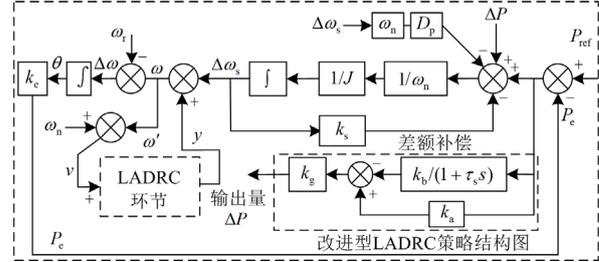


图 4 基于改进型 LADRC 的构网型储能控制策略框图

Fig. 4 Block diagram of GFM-BESS control strategy based on improved LADRC

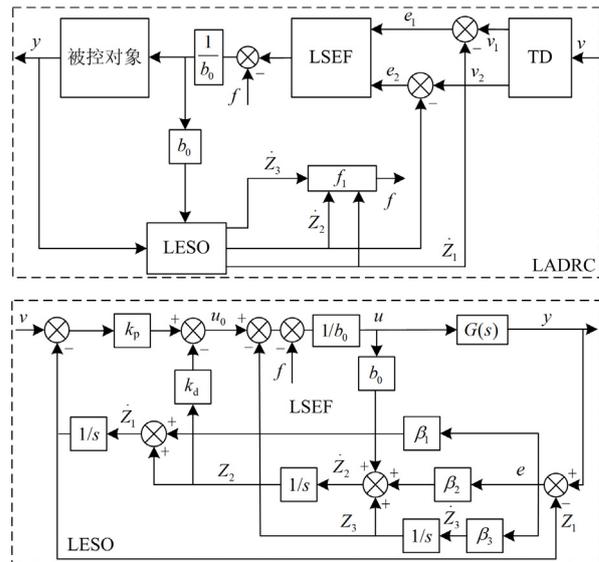


图 5 LADRC 结构及原理框图

Fig. 5 Structure and block diagram of LADRC

图 5 中: v 为输入信号; v_1 和 v_2 为目标跟踪信号; y 为被控对象输出量; Z_1 、 Z_2 和 Z_3 分别为系统输出的观测值、输出微分的观测值和系统总扰动的观测值; b_0 为系统总扰动的补偿系数; u 为补偿后的控制信号; β_1 、 β_2 和 β_3 为观测器增益; f 表示系统内外总扰动。二阶微分方程 \dot{y} 表示为

$$\begin{aligned} \dot{y} &= -ay - by + (b - b_0)u + b_0u = \\ & f(y, \dot{y}, \omega, t) + b_0u \end{aligned} \quad (5)$$

式中, a 和 b 为微分方程 \dot{y} 和 y 的系数, 扩张状态观测器为

$$\begin{cases} e = y - Z_1 \\ \dot{Z}_1 = Z_2 + \beta_1 e \\ \dot{Z}_2 = Z_3 + \beta_2 e + b_0 u \\ \dot{Z}_3 = \beta_3 e \end{cases} \quad (6)$$

式中, e 为系统跟踪误差。通过式(6)将 LESO 的状态方程进行拉普拉斯变换, 可得

$$\mathbf{Z}(s) = \frac{1}{s^3 + \beta_1 s^2 + \beta_2 s + \beta_3} \times \begin{bmatrix} b_0 s & \beta_1 s^2 + \beta_2 s + \beta_3 \\ b_0 s^2 + b_0 \beta_1 s & \beta_2 s^2 + \beta_3 s \\ -b_0 \beta_3 & \beta_3 s^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U(s) \\ V(s) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{Z}(s)$ 为系统观测矩阵; $U(s)$ 为将补偿后的控制信号 u 进行拉普拉斯变换后的函数; $V(s)$ 为将输入信号 v 进行拉普拉斯变换后的函数。根据状态观测推导可得

$$u = \frac{k_p(v - z_1) - k_d z_2 - f - z_3}{b_0} = \frac{-z_3 - f + u_0}{b_0} \quad (8)$$

式中, k_p 和 k_d 为 LSEF 的增益系数。同时设 $u_0 = k_p(v - z_1) - k_d z_2$, $v' = 0$, 经过推导可得此时的闭环传递函数为没有零点的二阶传递函数。结合式(7)和式(8)得到

$$U(s) = \frac{1}{b_0} [k_p R(s)C(s) - V(s)H(s)C(s)] \quad (9)$$

$$\frac{V(s)}{R(s)} = \frac{k_p}{s^2 + k_d s + k_p} \quad (10)$$

$$C(s) = \frac{s^3 + \beta_1 s^2 + \beta_2 s + \beta_3}{s^3 + (\beta_1 + k_d) s^2 + (\beta_1 k_d + \beta_2 + k_p) s} \quad (11)$$

$$H(s) = \frac{(k_p \beta_1 + k_d \beta_2 + \beta_3) s^2 + (k_p \beta_2 + k_d \beta_3) s + k_p \beta_3}{s^3 + \beta_1 s^2 + \beta_2 s + \beta_3} \quad (12)$$

式中, $R(s)$ 为推导过程中形成的整体函数。

将式(6)、式(9)、式(11)、式(12)联立可以得到 LADRC 系统传递函数框图, 如图 6 所示。

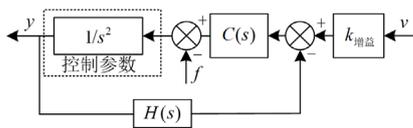


图 6 LADRC 系统传递函数框图

Fig. 6 Transfer function block diagram LADRC system

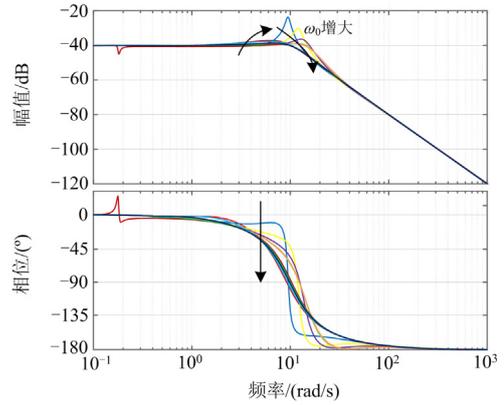
根据式(5)、式(8)和图 6 推导出控制系统闭环传递函数 $L(s)$ 为

$$L(s) = \frac{s^3 + \beta_1 s^2 + \beta_2 s + \beta_3}{s^5 + a_1 s^4 + a_2 s^3 + a_3 s^2 + a_4 s + k_p \beta_3} \quad (13)$$

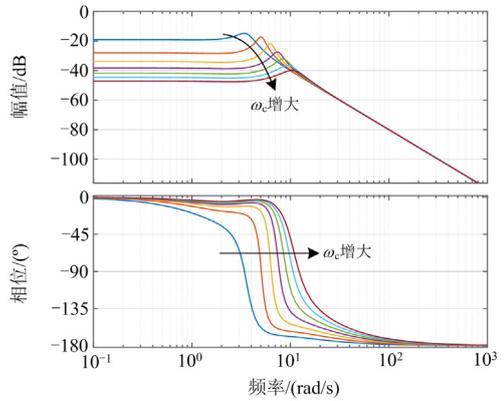
式中: $a_1 = \beta_1 + k_d$; $a_2 = k_d \beta_1 + \beta_2 + k_p$; $a_3 = k_d \beta_2 + k_p \beta_1 + \beta_3$; $a_4 = k_p \beta_2 + k_d \beta_3$ 。

2.2 改进型 LADRC 策略控制性能分析

结合自抗扰控制框图, 将虚拟同步机控制中有功频率模块作为主要控制对象, 将角频率作为输入信号; LSEF 通过观测输出信号并及时反馈补偿被控变量, 使输出信号及时跟踪输入信号, 得到 LADRC 系统伯德图, 如图 7 所示。



(a) ω_0 增大时控制系统伯德图



(b) ω_c 增大时控制系统伯德图

图 7 LADRC 系统伯德图

Fig. 7 Bode diagram of LADRC system

图 7 中: ω_0 为自抗扰控制中的观测器带宽; ω_c 为控制器带宽。为了明确 ω_0 和 ω_c 对控制性能的影响, 参数 ω_c 设置为 10, 将 ω_0 从 0.1 到 10 进行取值, 得到自抗扰控制系统伯德图如图 7(a)所示, 发现随着 ω_0 取值增大, 系统对高频信号的抑制能力先降低后逐渐提高。当 ω_0 取值较小时, 系统在低频率段相位裕度浮动剧烈, 这不利于电力系统的安全稳定运行; 当 ω_0 取值在中频率段时, 系统在中频段对干扰

信号的抑制能力降低, 并且在频段相位裕度也有所下降, 但是系统在高频段稳定性提高; 当 ω_0 取值较大时, 系统对干扰信号的抑制能力降低, 相位裕度在高频段也有所下降。通过伯德图参数对比发现, 当 ω_0 取值约为 3 时性能较好, 能同时满足抑制干扰信号和相位裕度充足的条件。将参数 ω_0 设置为 3, 当 ω_c 从 3 到 15 进行取值, 得到自抗扰控制系统伯德图如图 7(b)所示, 分析发现随着 ω_c 的增大, 系统的抗干扰性能逐渐提升, 在中频段附近相位裕度有了明显的提高, 系统抵御外界干扰能力增强, 与此同时, ω_c 增大对低频率段的干扰信号有更好的抑制效果。综上所述, 考虑 LADRC 中 ω_c 与 ω_0 的参数关系, 设置 $\omega_c = 15$, $\omega_0 = 3$ 。

推导 P-F 支路整体系统的传递函数, 求出参考有功 P_{ref} 至输出有功功率 P_e 的小信号模型 $G_{P_{ref2}}$ 、电网侧角频率 ω_r 至 P_e 的小信号模型 $G_{\omega_{r2}}$, 如式(14)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} G_{P_{ref2}} = \frac{\Delta P_e}{\Delta P_{ref}} \Big|_{\Delta \omega_r = 0} = \frac{k_c k_g k_a \tau_s s + k_c k_g (k_a - k_b)}{\left[J \omega_n \tau_s s^3 + (\tau_s k_s + \tau_s D_p \omega_n + J \omega_n) s^2 + (k_s + D_p \omega_n + k_c k_g k_a \tau_s) s + k_c k_g (k_a - k_b) \right]} \\ G_{\omega_{r2}} = \frac{\Delta P_e}{\Delta \omega_r} \Big|_{\Delta P_{ref} = 0} = \frac{-k_e [J \omega_n \tau_s s^2 + (\tau_s k_s + J \omega_n + \tau_s D_p \omega_n) s + k_s + D_p \omega_n]}{\left[J \omega_n \tau_s s^3 + (J \omega_n + \tau_s k_s + \tau_s D_p \omega_n) s^2 + (k_s + D_p \omega_n + k_c k_g k_a \tau_s) s + k_c k_g (k_a - k_b) \right]} \end{array} \right. \quad (14)$$

式中: k_g 为前馈差额增益系数; τ_s 为差额系数; k_a 为前馈增益系数; k_b 为差额增益系数。将式(14)中的阻尼系数 D_p 设置为 0, 以消除阻尼参数的影响, 得到式(15)。

$$\left\{ \begin{array}{l} G_{P_{ref2}} = \frac{\Delta P_e}{\Delta P_{ref}} \Big|_{\Delta \omega_r = 0} = \frac{k_c k_g k_a \tau_s s + k_c k_g (k_a - k_b)}{\left[J \omega_n \tau_s s^3 + (\tau_s k_s + J \omega_n) s^2 + (k_s + k_c k_g k_a \tau_s) s + k_c k_g (k_a - k_b) \right]} \\ G_{\omega_{r2}} = \frac{\Delta P_e}{\Delta \omega_r} \Big|_{\Delta P_{ref} = 0} = \frac{-k_e [J \omega_n \tau_s s^2 + (\tau_s k_s + J \omega_n) s + k_s]}{\left[J \omega_n \tau_s s^3 + (\tau_s k_s + J \omega_n) s^2 + (k_s + k_c k_g k_a \tau_s) s + k_c k_g (k_a - k_b) \right]} \end{array} \right. \quad (15)$$

对比式(2)与式(15)可以发现, 在 LADRC 控制前端引入补偿控制环节, 能够改变传统构网型储能

有功频率支路闭环控制系统的零极点分布, 也相应地改变了输出有功功率 P_e 的动态响应特性。通过去除小信号模型中对系统稳定性影响极小的项, 将式(15)仅包含 τ_s 不包含 k_g 的参数项直接省略, 可得到小信号模型 G_{P2} , 如式(16)所示。

$$G_{P2} = \frac{k_c k_g k_a \tau_s s}{J \omega_n s^2 + (k_s + k_c k_g k_a \tau_s) s + k_c k_g (k_a - k_b)} + \frac{k_c k_g (k_a - k_b)}{J \omega_n s^2 + (k_s + k_c k_g k_a \tau_s) s + k_c k_g (k_a - k_b)} \quad (16)$$

此时, 系统振荡角频率 ω_2 、阻尼比 ξ_2 如式(17)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_2 = \sqrt{\frac{k_c k_g (k_a - k_b)}{J \omega_n}} \\ \xi_2 = \frac{D_p \omega_n + k_c k_g k_a \tau_s + k_s}{2 \sqrt{k_c k_g (k_a - k_b) J \omega_n}} \end{array} \right. \quad (17)$$

对于式(16)所示的二阶系统, 若阻尼比小于 1, 则系统振荡幅度较大、调节时间较长, 因此设置阻尼比不小于 1。据此整理式(17)可得到式(18)。

$$k_g \tau_s \geq \frac{-(k_s + D_p \omega_n) + 2 \sqrt{2 k_c k_g (k_a - k_b) J \omega_n}}{k_e k_a} \quad (18)$$

结合式(18)及表 1, 得到传统构网型储能控制策略的伯德图, 如图 8 所示, 同理得到改进型 LADRC 策略在惯性参数不同时, 参数 k_a 和 k_b 变化的伯德图和极点根轨迹图, 具体如图 9、图 10 所示。

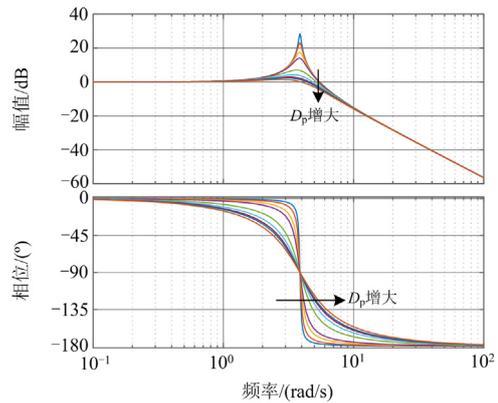


图 8 传统构网型储能控制系统伯德图

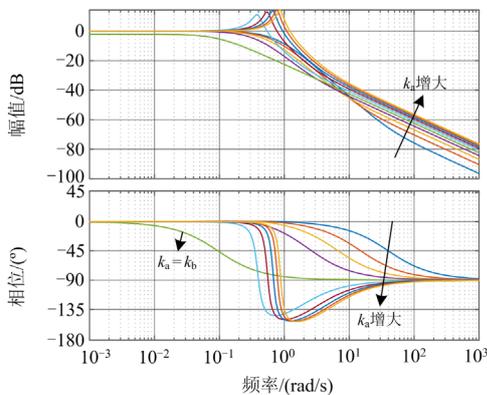
Fig. 8 Bode diagram of traditional GFM-BESS control system

分析发现在传统构网型储能控制中, 将阻尼参数 D_p 从 5 增大到 150, 可以有效降低系统中干扰信号的幅值, 在低频段系统相位裕度有所降低, 在高频段稳定性得到了提升。阻尼系数的变化对系统的控制性能影响较大, 但在实际参数整定中, 阻尼参

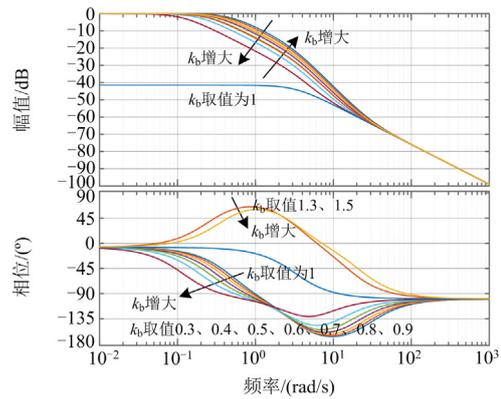
数 D_p 与有功频率支路反馈参数 k_s 相互影响,难以同时兼顾,因此提出基于改进型 LADRC 的构网型储能调频控制策略。设置 k_a 的取值从 0.1 到 1 逐渐增大(k_b 取值为 0.5),随着参数 k_a 的增大,系统整体相位裕度降低,在高频段系统对于干扰信号抑制效果有所降低,并且当 k_a 取值过高或者过低时,中频段的信号会有增幅,因此当 k_a 取值接近 k_b 时,既可以提高系统相位裕度,也可以提高系统对于干扰信号抑制能力。 k_b 的取值从 0.5 到 1.5 逐渐增大(k_a 取值为 1),随着 k_b 的增大系统在中频段的相位裕度逐渐增大,系统对于干扰信号的抑制能力提高;当 k_b 取值大于 k_a 时,随着 k_b 的增大,系统对于干扰信号的抑制能力逐渐降低,因此,在实际参数设计时应设置 k_b 小于 k_a 值,并且当 k_a 与 k_b 取值接近时,系统对于干扰信号的抑制能力最强,相位裕度也充足。由图 10 可知,随着 k_a 减小或 k_b 增大,系统的一对共轭极点逐渐接近负实轴,并最终落在负实轴上,系统对功率超调的控制效果好。

结合图 8—图 10 可知,在传统构网型储能控制策略下,信号频率达到 10^0 rad/s 以后才开始被抑制,并且在接近系统基频时会产生振荡,这对电力系统的安全运行造成严重威胁,传统构网型储能控制策略无法满足当前电网对频率稳定性的需求,而在基于改进型 LADRC 的构网型储能调频控制策略下,信号频率在达到 10^{-1} rad/s 之前就已经得到抑制,采用后者控制策略时系统相位裕度明显更加充足,因此本文所采用的改进型 LADRC 构网型储能调频控制策略具有更强的抗干扰能力,因而构网储能系统具有更强的稳定性。

综上所述,在参数设置合理的情况下,基于改进型 LADRC 的构网型储能调频策略,能够通过响应频率偏差信号对电网有功缺额进行补偿,有效消除了 D_p 与 k_s 参数互耦造成的系统振荡与稳态误差



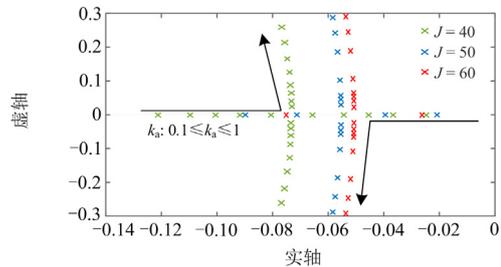
(a) k_a 变化时改进型LADRC控制系统伯德图



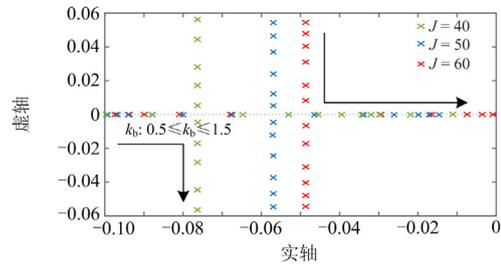
(b) k_b 变化时改进型LADRC控制系统伯德图

图 9 改进型 LADRC 系统伯德图

Fig. 9 Bode diagram of improved LADRC system



(a) k_a 变化时改进型LADRC系统根轨迹图



(b) k_b 变化时改进型LADRC系统根轨迹图

图 10 改进型 LADRC 系统根轨迹图

Fig. 10 Root trajectory diagram of improved LADRC system

难以同时考虑的问题,同时改进型 LADRC 的构网型储能调频策略的引入可以有效抵抗外界信号的干扰,提升系统的整体控制性能。

3 仿真验证

结合所提模型及表 1 中的仿真模型参数,在 Simulink 仿真系统中搭建风储联合系统并网调频系统仿真模型, BESS 储备变流器控制采用基于改进型 LADRC 的构网型储能调频策略,传统火力发电机组容量设置为 750 MW,风电机组容量为 300 MW, BESS 容量为 100 MW/300 MWh。

设置阶跃负荷扰动和连续负荷扰动两种典型工

况, 将所提基于改进型 LADRC 的构网型储能调频策略与传统自抗扰控制、传统构网型储能控制策略的结果进行对比分析。

表 1 系统仿真参数

Table 1 System simulation parameters

含义	参数	数值
储能响应时间常数	T_{BESS}	0.1
火电机组响应时间常数	T_{HP}	0.3
系统参考角频率	$\omega_n / (\text{rad/s})$	$2 \times 50 \times \pi$
火电机组涡轮机机械转矩	$F_s / (\text{N} \cdot \text{m})$	1.8
储能初始电荷状态	S_{oc1}	0.75
有功频率支路反馈系数	k_s	0.15
前馈差频增益系数	k_g	0.4
火电机组额定功率	P_T / W	7.8×10^8
风电机组额定功率	$P_{\text{DFIG}} / \text{W}$	2×10^8
前馈增益系数	k_a	1
电力系统额定频率	f / Hz	50
差频增益系数	k_b	0.9
风机虚拟惯量参数	$J_{\text{DFIG}} / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	90
风机阻尼参数	$D_{\text{DFIG}} / (\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{rad})$	0.1

3.1 阶跃负荷扰动工况

设置自抗扰控制方法中的参数 $\omega_0 = 3 \text{ rad/s}$ 、 $\omega_c = 15 \text{ rad/s}$ 、 $b_0 = 4$, 其他参数如表 1 所示。当电网中发生负荷阶跃扰动时, 系统输出功率如图 11 所示。当采用传统构网型储能控制策略时, 动态响应过程出现响应速度慢, 外界高频干扰抑制能力有限的情况; 采用传统 LADRC 时相比前者的响应速度有所提高, 抑制外界干扰的能力也得到加强; 当采用基于改进 LADRC 的构网型储能调频策略时, 动态响应性能进一步提升, 具备了更好的抵御外界干扰的能力。

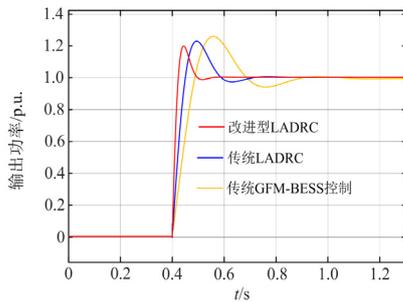


图 11 系统在阶跃负荷扰动工况下的动态响应

Fig. 11 Dynamic response of the system under step load disturbance condition

在阶跃负荷扰动工况下, 评价指标为动态响应超调量 $|H_{\text{max}}|$ 和稳定时间 t 。从图 11 可知, 采用改

进型 LADRC 策略时 $|H_{\text{max}}| = 0.192$ 、 $t = 0.21 \text{ s}$, 相较于传统 LADRC 时 $|H_{\text{max}}| = 0.221$ 、 $t = 0.32 \text{ s}$ 和传统构网型储能控制策略时 $|H_{\text{max}}| = 0.273$ 、 $t = 0.53 \text{ s}$, 指标超调量和稳定时间分别降低了 13.12%、34.375% 和 29.67%、60.377%。阶跃信号扰动工况结果表明, 相比其他两种策略, 本文所提基于改进型 LADRC 的构网型储能调频策略的响应速度更快、控稳性能更强。

3.2 连续负荷扰动工况

在 Matlab/Simulink 仿真平台中, 通过信号叠加得到连续负荷干扰信号, 参数设置参照表 1。评价指标为功率偏差最大值 $|P_{\text{max}}|$ 和频率偏差最大绝对值 $|\Delta f_{\text{max}}|$ 。

由图 12 和图 13 可以看出, 当电网中发生连续高频扰动时, 与传统的控制方法相比, 采用改进型 LADRC 策略对频率波动的整体控制效果更好, 系统能够获得更好的稳定性。由图 12 中 4.0205~4.024 s 时间段的定量指标可知, 采用改进型 LADRC 策略时 $|P_{\text{max}}| = 137.8 \text{ MW}$, 相比于传统构网型储能控制时 $|P_{\text{max}}| = 148.6 \text{ MW}$, 评价指标 $|P_{\text{max}}|$ 降低了 7.267%, 相比于传统 LADRC 策略时 $|P_{\text{max}}| = 142.3 \text{ MW}$, 评价指标 $|P_{\text{max}}|$ 降低了 3.162%。说明在连续负荷扰动工况下, 改进型 LADRC 策略能有效降低电网频率偏差峰值, 具有更强的抗扰能力。

由图 13 可知, 采用改进型 LADRC 策略时 $|\Delta f_{\text{max}}| = 0.062 \text{ Hz}$, 相比于采用传统构网型储能控制

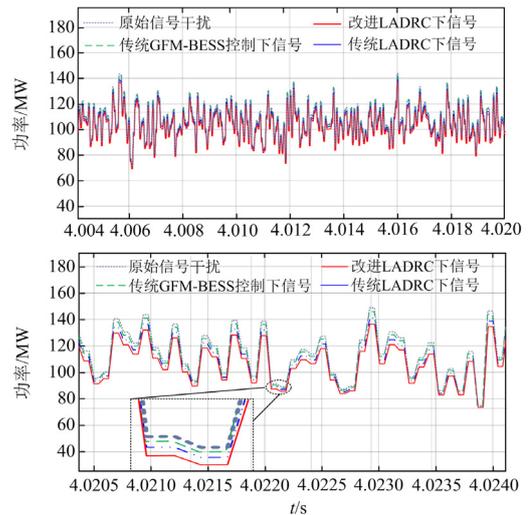


图 12 系统在连续负荷扰动工况下的动态响应

Fig. 12 Dynamic response of the system under continuous load disturbance

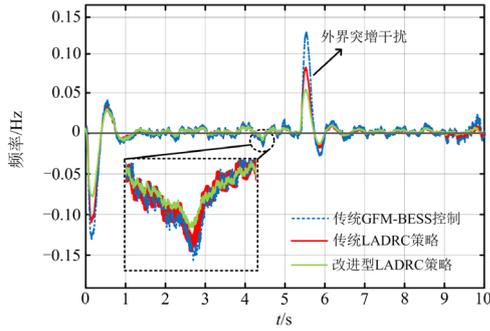


图 13 连续负荷扰动工况下系统频率变化图

Fig. 13 System frequency variation diagram under continuous load disturbance condition

时 $|\Delta f_{\max}| = 0.134 \text{ Hz}$ 和采用传统 LADRC 策略时 $|\Delta f_{\max}| = 0.082 \text{ Hz}$ ，评价指标频率偏差 $|\Delta f_{\max}|$ 分别降低了 53.731%和 24.39%。通过分析含储能的风力发电调频系统的仿真结果可以看出，采用改进型 LADRC 控制时，系统可以更好地抵御外界干扰，有效提高了系统的响应速度，系统响应超调量也有所降低，系统的动态响应性能得到明显提升，改进型 LADRC 策略可以有效降低电网频率偏差峰值，减小频率值的峰谷差，使得电力系统具有更强的抗干扰能力。

3.3 负荷需求突变工况

考虑到电网负荷需求不稳定的情况，总线 4 中接入的负载功率在 1.5 s 时增加 50 MW，从 1030 MW 增加到 1080 MW，模拟总时间为 3.5 s，风力发电的风速保持在 11.5 m/s。

由图 14 可知，采用改进型 LADRC 策略时 $|\Delta f_{\max}| = 0.11 \text{ Hz}$ ，相比于传统构网型储能控制的 $|\Delta f_{\max}| = 0.21 \text{ Hz}$ 和传统 LADRC 策略时 $|\Delta f_{\max}| = 0.16 \text{ Hz}$ ，评价指标 $|\Delta f_{\max}|$ 分别降低了 47.62%和 31.25%。仿真结果说明，在负荷需求突然变化工况下，改进型 LADRC 策略可以降低系统频率下降的幅值，提高电能质量。

3.4 有负荷需求时大电网断开工况

考虑电网中极端运行工况，在 2 s 时大电网与电力系统断开，此时储能出力参与调频为系统提供惯量支撑。在传统构网型储能控制下，由于不能提供足够的系统惯量，系统频率会迅速降低到 48.7 Hz 以下，这会直接导致电力系统面临崩溃甚至造成严重停电事故。BESS 变流器采用传统 LADRC 策略参与系统调频后，系统频率会快速恢复稳定。采用改进型 LADRC 策略时系统频率稳定性最好，由图 15 中 2 s 之后的定量指标可知，采用改进型 LADRC 策略时 $|\Delta f_{\max}| = 0.017 \text{ Hz}$ ，相比于采用传统 LADRC

策略时 $|\Delta f_{\max}| = 0.078 \text{ Hz}$ 和采用传统构网型储能控制方法时 $|\Delta f_{\max}| = 0.324 \text{ Hz}$ ，评价指标 $|\Delta f_{\max}|$ 分别降低了 78.21%和 94.75%。说明在大电网断开极端运行工况下，采用改进型 LADRC 策略能提供足够的系统惯量支撑，有效抑制外界扰动给系统稳定性带来的不利影响，同时通过迅速改变有功出力，降低系统频率下降幅度和速率。

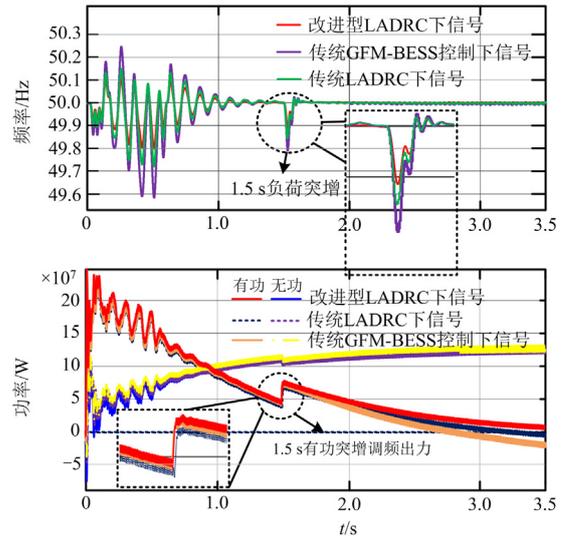


图 14 负荷需求突变工况下系统频率变化图

Fig. 14 System frequency variation diagram under sudden load demand variation

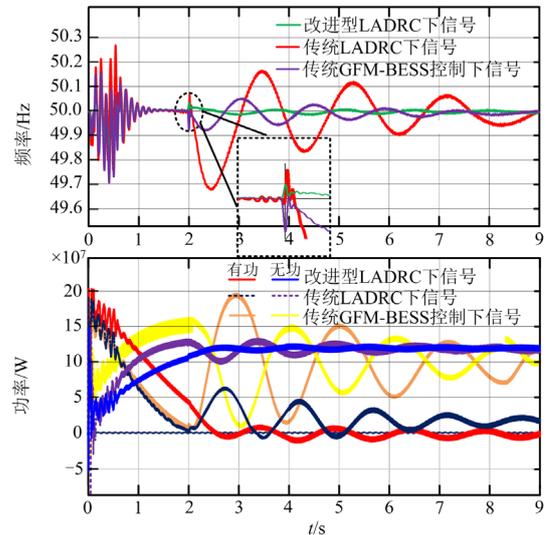


图 15 有负荷需求时大电网断开工况下系统频率变化图

Fig. 15 System frequency variation diagram under large power grid disconnection condition with load demand

3.5 电压突变扰动工况

考虑到电力系统中的电压不稳定，总线 5 中公

用电网接入的电压在 2 s 时先降低到 0.9 p.u., 后在 2.5 s 时增加至 1.1 p.u., 在该电压变化工况下得到系统的频率变化图, 如图 16 所示。

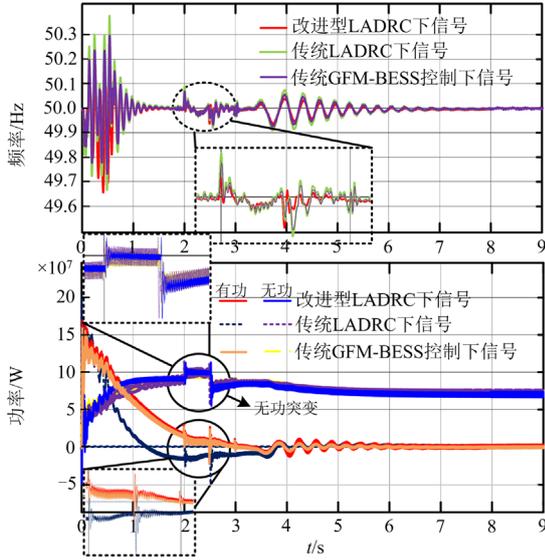


图 16 电压变化工况下系统频率变化图

Fig. 16 System frequency variation diagram under voltage variation condition

由图 16 的仿真结果可以看出, 在大电网电压突变工况下, 电压在 2 s 时突增 0.1 p.u. 和 2.5 s 时突降 0.1 p.u., BESS 通过改变无功出力以稳定系统电压, 但由于系统中的有功和无功仍然存在弱耦合, 电力系统频率会发生较弱的波动, 对电力系统安全稳定运行带来了不利影响。由图 16 中 2 s 后的定量指标可知, 采用改进型 LADRC 策略时 $|\Delta f_{\max}| = 0.068 \text{ Hz}$, 相比于采用传统 LADRC 策略时 $|\Delta f_{\max}| = 0.074 \text{ Hz}$ 和采用传统构网型储能控制方法 $|\Delta f_{\max}| = 0.087 \text{ Hz}$, 评价指标 $|\Delta f_{\max}|$ 分别降低了 8.108% 和 21.839%。通过对图 16 的波形进行分析发现, 采用改进型 LADRC 策略可以有效抑制电压突变给系统频率带来的扰动, 可以在较小的频率波动情况下提供较足够的有功支撑, 系统频率快速恢复。

3.6 频率突变扰动工况

考虑到电力系统中的频率不稳定, 总线 5 中公用电网接入的频率在 6 s 时突降 0.4 Hz。

图 17 的仿真波形结果表明, 在频率突变工况下, BESS 通过有功出力突增对电力系统进行调频, 比其他两种方法, 改进型 LADRC 策略使得系统输出有功增量较多, 这是前馈控制环节对有功差额补偿快速响应的结果。

3.7 风电变化扰动工况

风力发电具有不稳定性, 因此风力发电机组向

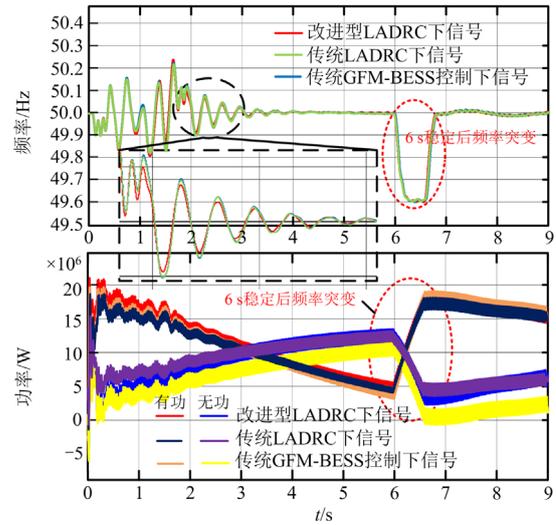


图 17 频率变化工况下系统频率变化图

Fig. 17 System frequency variation diagram under frequency variation condition

电力系统输入功率时也会不稳定, 进而导致系统频率发生变化。因此在考虑风速变化的情况下对电力系统进行调频分析具有现实意义。风速变化如图 18 所示, 公用电网在整个模拟时间内一直保持连接状态, 仿真时间为 9 s, 得到风速变化工况下系统频率变化图如图 19 所示。不同工况下系统调频指标如表 2 所示。

系统频率变化如图 19 所示, 在 3.5~7 s 时风速发生变化, BESS 通过向系统注入功率来补偿模拟过程中的频率振荡, 因此系统频率能保持在允许的振荡区内, 并且快速恢复到正常频率附近。在图 19 中, 评价指标系统仿真 3 s 后频率第一次降低幅值为 $|\Delta f_{\text{down}1}|$, 第二次降低幅值为 $|\Delta f_{\text{down}2}|$, 第一次上升幅值为 $|\Delta f_{\text{up}1}|$, 第二次上升幅值为 $|\Delta f_{\text{up}2}|$, 采用改进型 LADRC 策略时 $|\Delta f_{\text{down}1}| = 0.057 \text{ Hz}$, $|\Delta f_{\text{down}2}| = 0.065 \text{ Hz}$, $|\Delta f_{\text{up}1}| = 0.093 \text{ Hz}$, $|\Delta f_{\text{up}2}| = 0.023 \text{ Hz}$, 相比于仅采用传统 LADRC 策略时的 $|\Delta f_{\text{down}1}| = 0.058 \text{ Hz}$, $|\Delta f_{\text{down}2}| = 0.087 \text{ Hz}$, $|\Delta f_{\text{up}1}| = 0.095 \text{ Hz}$, $|\Delta f_{\text{up}2}| = 0.037 \text{ Hz}$ 分别降低了 1.724%、25.287%、21.052%、37.837% 和采用传统构网型储能控制方法时 $|\Delta f_{\text{down}1}| = 0.1 \text{ Hz}$ 、 $|\Delta f_{\text{down}2}| = 0.107 \text{ Hz}$, $|\Delta f_{\text{up}1}| = 0.128 \text{ Hz}$, $|\Delta f_{\text{up}2}| = 0.024 \text{ Hz}$ 分别降低了 43%、39.252%、27.343%、4.167%。仿真结果表明, 相比另外两种方法, 改进型 LADRC 策略可以有效抑制风机出力不稳定给系统频率带来的不利影响, 说明所提改进型 LADRC 策略具有优良的抑制外界干扰

信号的性能。

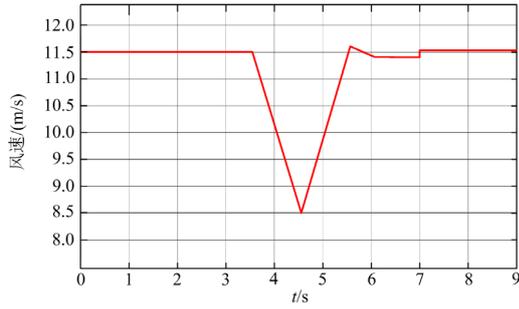


图 18 风速变化图

Fig. 18 Wind speed variation chart

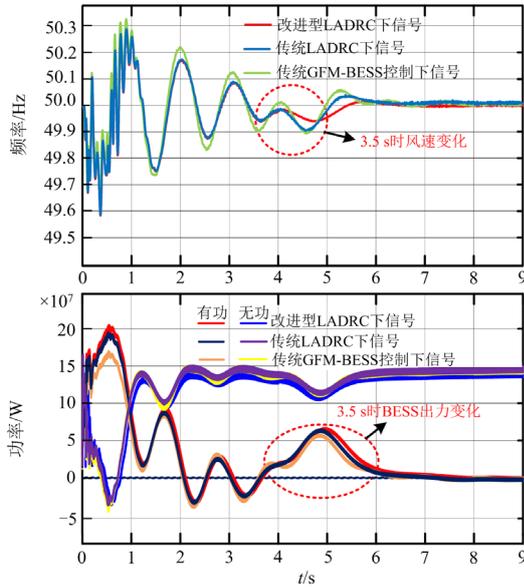


图 19 风速变化工况下系统频率变化图

Fig. 19 System frequency variation diagram under variable wind speed

表 2 不同工况下系统调频指标结果

Table 2 System frequency regulation index results under different working conditions

工况 1: 阶跃负荷扰动工况		
控制策略	参数指标	
	$\Delta f/\text{Hz}$	$t/(\text{m/s})$
改进型 LADRC	0.192	0.21
传统 LADRC	0.221	0.32
传统 GFM-BESS	0.273	0.53
工况 2: 连续负荷扰动工况		
控制策略	参数指标	
	$ \Delta f_{\max} /\text{MW}$	$\Delta f/\text{Hz}$
改进型 LADRC	137.8	0.062
传统 LADRC	142.3	0.134
传统 GFM-BESS	148.6	0.082

续表 2

工况 3: 负荷需求变化工况				
控制策略	参数指标			
	$\Delta f_{\max}/\text{Hz}$			
改进型 LADRC	0.11			
传统 LADRC	0.16			
传统 GFM-BESS	0.21			
工况 4: 有负荷需求时大电网断开工况				
控制策略	参数指标			
	$\Delta f_{\max}/\text{Hz}$			
改进型 LADRC	0.017			
传统 LADRC	0.078			
传统 GFM-BESS	0.324			
工况 5: 电压突变扰动工况				
控制策略	参数指标			
	$\Delta f_{\max}/\text{Hz}$			
改进型 LADRC	0.068			
传统 LADRC	0.074			
传统 GFM-BESS	0.087			
工况 7: 风电变化扰动工况				
控制策略	参数指标			
	$ \Delta f_{\text{down}1} $	$ \Delta f_{\text{down}2} $	$ \Delta f_{\text{up}1} $	$ \Delta f_{\text{up}2} $
改进型 LADRC	0.057	0.065	0.093	0.023
传统 LADRC	0.058	0.087	0.095	0.037
传统 GFM-BESS	0.1	0.107	0.128	0.024

4 结论

本文针对高比例风电渗透下电力系统频率稳定性低，风储联合系统调频过程中参数间相互影响难以兼顾，导致系统调频控制性能不佳的问题，提出一种基于改进 LADRC 的构网型储能调频控制策略。

1) 从系统控制原理小信号模型角度分析储能系统参数间影响特性，通过在有功频率控制环节引入前馈差额环节，加速系统有功指令追踪速率，解决参数间互相影响难以兼顾的问题，降低系统控制复杂程度，充分挖掘构网型储能系统的调频能力。

2) 所提改进型 LADRC 构网型储能调频控制策略，将有功控制环节和角频率输出环节串联，推导整体系统小信号模型，分析系统参数对整体系统控制性能的影响特性，实现系统整体出力的优化控制，使系统具有更好的协同控制性能。

3) 所提改进型 LADRC 构网型储能控制策略在阶跃扰动、连续负荷扰动、综合负荷突然需求变化、风速变化以及电网出现故障等复杂工况下，相比其他两种控制策略具有更优的调频效果，能够为电网频率提供充足的支撑。

参考文献

- [1] 李建林, 郭兆东, 曾伟, 等. 面向调频的锂电池储能建模及仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 33-42.
LI Jianlin, GUO Zhaodong, ZENG Wei, et al. Modeling and simulation analysis of lithium battery energy storage oriented to frequency modulation[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 33-42.
- [2] 金吉良, 彭书涛, 朱云峰, 等. 安全稳定控制装置标准化测试系统研究与开发[J]. 电测与仪表, 2022, 59(11): 147-154.
JIN Jiliang, PENG Shutao, ZHU Yunfeng, et al. Research and development of standardized test system for security and stability control equipment[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(11): 147-154.
- [3] 张建新, 常东旭, 邱建, 等. 适应新型电力系统的安全稳定控制系统及装置设计方法[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(12): 10-19.
ZHANG Jianxin, CHANG Dongxu, QIU Jian, et al. A design method of stability control device and system adapted to new power systems[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(12): 10-19.
- [4] 赵恩盛, 韩杨, 周思宇, 等. 微电网惯量与阻尼模拟技术综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(4): 1413-1428.
ZHAO Ensheng, HAN Yang, ZHOU Siyu, et al. Review and prospect of inertia and damping simulation technologies of microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4): 1413-1428.
- [5] 刘曼佳, 凌在汛, 熊亮雳, 等. 面向工业园区电压暂降治理的构网型储能逆变器控制策略研究[J]. 供用电, 2023, 40(8): 34-42.
LIU Manjia, LING Zaixun, XIONG Liangli, et al. Research on the control strategy of grid-forming inverter for voltage sag control in industrial parks[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(8): 34-42.
- [6] 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.
- [7] 詹长江, 吴恒, 王雄飞, 等. 构网型变流器稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2339-2359.
ZHAN Changjiang, WU Heng, WANG Xiongfei, et al. Survey on the stability of reticulated converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2339-2359.
- [8] 王新宝, 葛景, 韩连山, 等. 构网型储能支撑新型电力系统建设的思考与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 172-179.
WANG Xinbao, GE Jing, HAN Lianshan, et al. Theory and practice of grid-forming BESS supporting the construction of a new type of power system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 172-179.
- [9] LIU J, YANG Z, YU J, et al. Coordinated control parameter setting of DFIG wind farms with virtual inertia control[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 122(12): 1-11.
- [10] WANG H, CHEN Z, JIANG Q. Optimal control method for wind farm to support temporary primary frequency control with minimised wind energy cost[J]. IET Renewable Power Generation, 2015, 9(4): 350-359.
- [11] WANG Yi, MENG Jianhui, ZHANG Xiangyu, et al. Control of PMSG-based wind turbines for system inertial response and power oscillation damping[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(2): 565-574.
- [12] OCHOA D, MARTINEZ S. Fast-frequency response provided by DFIG-wind turbines and its impact on the grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 4002-4011.
- [13] 王亚维, 刘邦银, 段善旭, 等. 虚拟同步控制的暂态特性优化策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(20): 5885-5893, 6169.
WANG Yawei, LIU Bangyin, DUAN Shanxu, et al. Research on transient characteristic optimization of virtual synchronization generator control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(20): 5885-5893, 6169.
- [14] 颜湘武, 贾焦心. VSG 一次调频和转速振荡阻尼的解耦控制方案[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1566-1575.
YAN Xiangwu, JIA Jiaoxin. Decoupling control of primary frequency regulation and rotational speed damping of VSG[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1566-1575.
- [15] SHUAI Z K, HUANG W, SHEN Z J, et al. Active power oscillation and suppression techniques between two parallel synchronverters during load fluctuations[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 4127-4145.
- [16] 李美依, 黄文焘, 邵能灵, 等. 频率扰动下虚拟同步电机控制型分布式电源自适应惯性控制策略[J]. 电网技术, 2020, 44(4): 1525-1533.
LI Meiyi, HUANG Wentao, TAI Nengling, et al. Adaptive inertial control strategy for inverter interfaced distributed generator based on virtual synchronous generator under frequency disturbances[J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1525-1533.

- [17] THOMAS V, ASHOK K S. Fuzzy controller-based self-adaptive virtual synchronous machine for microgrid application[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(3): 2427-2437.
- [18] 杨赟, 梅飞, 张宸宇, 等. 虚拟同步发电机转动惯量和阻尼系数协同自适应控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 125-131.
YANG Yun, MEI Fei, ZHANG Chenyu, et al. Coordinated adaptive control strategy of rotational inertia and damping coefficient for virtual synchronous generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 125-131.
- [19] LI Dongdong, ZHU Qianwei, LIN Shunfu, et al. A self-adaptive inertia and damping combination control of VSG to support frequency stability[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(1): 397-398.
- [20] 任碧莹, 邱姣姣, 刘欢, 等. 基于虚拟同步发电机双机并联系统的参数自适应优化控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(1): 128-138.
REN Biying, QIU Jiaojiao, LIU Huan, et al. Optimization control strategy of self-adjusting parameter based on dual-parallel virtual synchronous generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(1): 128-138.
- [21] 王坦坦, 孙树敏, 王楠, 等. 基于混合储能的微电网控制策略研究[J]. 现代电子技术, 2020, 43(21): 119-121, 126.
WANG Tantan, SUN Shumin, WANG Nan, et al. Research on microgrid control strategy based on hybrid energy storage[J]. Modern Electronics Technique, 2019, 43(21): 119-121, 126.
- [22] 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.
- [23] ZHANG Y, ZHU J, DONG X, et al. A control strategy for smooth power tracking of a grid-connected virtual synchronous generator based on linear active disturbance rejection control[J]. Energies, 2019, 14(15): 3024-3024.
- [24] 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-EPSA, 2022, 34(10): 81-88.
- [25] 韩永强, 徐明忻, 孙碣, 等. 改进 LADRC 的储能逆变器直流母线电压控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(1): 13-21.
HAN Yongqiang, XU Mingxin, SUN Jie, et al. Improved DC bus voltage control of LADRC energy-storage inverter[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(1): 13-21.
- [26] 徐海珍, 张兴, 刘芳, 等. 基于超前滞后环节虚拟惯性的 VSG 控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(7): 1918-1927.
XU Haizhen, ZHANG Xing, LIU Fang, et al. Virtual synchronous generator control strategy based on lead-lag link virtual inertia[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 1918-1927.
- [27] 石荣亮, 张烈平, 王文成, 等. 基于频率微分原理的储能变换器虚拟惯量控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2088-2101.
SHI Rongliang, ZHANG Lieping, WANG Wencheng, et al. Research on virtual inertia control strategy for energy storage converters based on a frequency derivative scheme[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2088-2101.
- [28] 王育飞, 程伟, 薛花, 等. 基于串级 PI-(1+PD)算法的含飞轮储能互联电网 AGC 控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14): 127-138.
WANG Yufei, CHENG Wei, XUE Hua, et al. Controller design of an AGC based on a cascade PI-(1+PD) algorithm for an interconnected power grid with flywheel energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(14): 127-138.

收稿日期: 2024-01-21; 修回日期: 2024-04-11

作者简介:

李建林(1976—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博导, 研究方向为大规模储能技术; E-mail: dkyjl@163.com

卢冠铭(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为构网型储能技术; E-mail: lgm700809@163.com

游洪灏(1997—), 男, 博士, 研究方向为构网型储能技术。E-mail: uhhao@mail.ncut.edu.cn

(编辑 许威)