

DOI: 10.19666/j.rlfed.202404095

基于新型自抗扰控制方法的风火协同 调频策略研究

陈旭¹, 綦晓², 杜鸣^{3,4}, 蒋文珂², 张文广^{3,4}

(1.南方海上风电联合开发有限公司, 广东 珠海 519082;

2.暨南大学能源电力研究中心, 广东 珠海 519070;

3.华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206;

4.华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

[摘要] 随着风电在电力系统渗透率的逐渐提高, 电力系统惯量水平下降, 调频资源不足, 频率响应裕度逐渐趋于临界值, 频率安全面临严峻挑战。针对高比例风电电力系统调频能力不足的问题, 首先, 从调控机理角度出发, 构建了基于风电虚拟惯量控制的风火协同调频模型, 利用风机转子动能快速响应频率波动, 提高电力系统综合惯量水平; 在此基础上, 提出并设计了基于新型自抗扰控制方法的风火协同电力系统负荷频率控制器, 提升电力系统对不确定风电功率及负荷扰动的抗扰能力, 并通过设计串级扩张状态观测器, 解决现有自抗扰控制方法在高频噪声抑制与快速响应性能之间的矛盾, 避免频率测量噪声对风电和火电机组造成过度调控, 提高风火协同调控品质; 最后, 采用遗传粒子群算法对所提出的负荷频率控制器参数进行优化。仿真结果表明, 相比基于常规自抗扰控制及其他传统控制方法的调频策略而言, 所提出的基于新型自抗扰控制方法的风火协同调频策略可有效提升频率响应特性, 避免测量噪声对系统频率响应幅值、控制器动作幅值等性能的影响。

[关键词] 风火协同; 电力系统调频; 自抗扰控制; 串级扩张状态观测器

[引用本文格式] 陈旭, 綦晓, 杜鸣, 等. 基于新型自抗扰控制方法的风火协同调频策略研究[J]. 热力发电, 2024, 53(12): 29-38. CHEN Xu, QI Xiao, DU Ming, et al. Coordination frequency regulation strategy of wind-thermal power based on novel active disturbance rejection control method[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(12): 29-38.

Coordination frequency regulation strategy of wind-thermal power based on novel active disturbance rejection control method

CHEN Xu¹, QI Xiao², DU Ming^{3,4}, JIANG Wenke², ZHANG Wenguang^{3,4}

(1.China Southern Power Grid Southern Offshore Wind Power Joint Development Co., Ltd., Zhuhai 519082, China;

2.Energy and Electricity Research Center, Jinan University, Zhuhai 519070, China;

3.Control and Computer Engineering Department, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

4.State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: With the increase of wind power penetration in power systems, the inertia of the power system decreases and the frequency regulation resources are insufficient. The frequency response margin approaches the critical value, which results in great challenges to frequency security. To solve the problem, from the perspective of regulation mechanism, a wind-thermal cooperative frequency control model based on virtual inertia control of wind power is constructed. The kinetic energy of rotor is used for fast frequency regulation. Then, a load frequency controller of wind-thermal cooperative power system based on a novel active disturbance rejection

收稿日期: 2024-04-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(52206009); 新能源电力系统国家重点实验室开放基金(LAPS24009); 广东省基础与应用基础研究基金(2021A1515110016)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (52206009); State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (LAPS24009); Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2021A1515110016)

第一作者简介: 陈旭(1981), 男, 工程师, 主要研究方向为风电功率控制及优化运行, chenxu2@csg.cn.

通信作者简介: 綦晓(1992), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为新能源电力系统频率控制与优化、自抗扰控制等, qixiao.jnu@gmail.com.

control (ADRC) method is proposed and designed. This improves the anti-disturbance capability to uncertain wind power and load disturbances. The designed cascade extended state observer also solves the contradiction between high frequency noise suppression and fast response performance of conventional ADRC. The excessive regulation of wind power and thermal power units caused by frequency measurement noise can be avoided and the quality of wind-thermal coordination regulation can be improved. Finally, genetic algorithm based particle swarm optimization is used to optimize the parameters of the proposed load frequency controller. The simulation results show that, compared with the conventional ADRC and other conventional control methods, the proposed strategy can effectively improve the frequency response characteristics, and suppress the effect of measurement noise on the amplitude of system frequency response and control signal.

Key words: coordination control of wind and thermal power; frequency regulation of power systems; active disturbance rejection control; cascade extended state observer

随着“双碳”国家战略目标的稳步推进,我国风电发展迅速,截止 2023 年底,全国风电装机容量为 4.412 4 亿 kW,占比超过 15%^[1]。电力系统的风电渗透率不断提高,在多个区域形成典型的高比例风电并网系统。然而,一方面,风电具有强随机性和波动性,大规模风电并网将产生严重的源荷双侧强扰动,电网频率稳定性将面临极大冲击^[2];另一方面,风电渗透率的提高意味着传统火电机组占比下降,极大压缩了电力系统调频容量及资源。且风电机组转速与电力系统频率解耦,传统风电控制策略下,风电机组不具备对电力系统频率的快速响应能力,传统同步机被取代后,电力系统惯量大幅下降,频率脆弱性明显增强^[3]。强扰动和低惯量共同导致频率安全问题突出^[4],传统调频策略面临严峻挑战^[5]。频率是电力系统安全稳定运行的重要性指标,负荷频率控制(load frequency control, LFC)是电力系统频率稳定的重要保障^[6-7]。因此,针对高比例风电并网系统,研究具有强抗扰能力的风火协同调频策略具有重要意义。

近年来,高比例风电并网系统的调频问题引起了工业界和学术界的广泛关注,风火协同调频研究主要集中在以下两方面:一是优化风火协同调控机理,从根本上提高系统频率支撑能力;二是优化负荷频率控制方法,从控制手段上提高频率响应性能。其中,在调控机理方面,文献[8]提出一种以火电机组调频为主、风电机组调频为辅的一次调频联合控制策略,有效提高了高比例风电并网系统的调频容量。文献[9]提出一种基于多尺度分解的风火协同调频控制策略,利用小波包分解方法,获取适应火电、风电调频响应特性的频差指令中低频分量,实现不同频率分量的精准对应,提升了风电场对电网频率的主动支撑能力,有效改善了系统频率特性。然而,上述研究未考虑系统低惯量特性,惯量支撑能力有待提高,且该研究仅关注一次调频,未对风火协同

调频下的二次调频性能进行分析。文献[10]提出了风机虚拟管理控制方法,并设计了自适应模糊控制策略实现虚拟惯量的动态调控,有效减小了负荷突变造成的频率最大偏差。文献[11]基于虚拟惯量控制方法,进一步结合数值分析方法建立了考虑火电机组协同的风电机组最优功率控制曲线,风电功率变化更为平滑,有效避免了频率二次跌落的发生。

在控制方法方面,模型预测控制(model predictive control, MPC)^[12]、滑模控制(sliding mode control, SMC)^[13]、自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)等先进控制理论及方法能够在一定程度上解决高比例风电电力系统 LFC 面临的频率响应速率不足问题。MPC 基于滚动时域优化,可实现频率性能的全局最优运行,能够有效提高频率响应速率、减小频率最大偏差。然而,对于大规模电力系统, MPC 优化求解计算量剧增,且 MPC 对预测模型的依赖性高,难以有效解决模型结构及参数变化等系统内部扰动造成的影响。SMC 响应速度快,鲁棒性强,能够有效抑制源荷双侧扰动造成的频率波动,然而滑模面切换时易发生抖振问题,不利于频率的稳定。因此,亟需设计一种具有强抗干扰能力和鲁棒性、结构简单且参数易整定的高效 LFC 控制器,适应高比例新能源电力系统 LFC 过程所面临的低惯量及强扰动特征。

ADRC 于 20 世纪 90 年代由中国科学院韩京清研究员提出^[14]。30 年来,ADRC 相关理论体系不断完善,在实际工程中得到了广泛应用,包括电力系统控制^[15]、工业机器人控制^[16]、飞行器姿态控制^[17]等诸多领域。ADRC 不依赖精确数学模型,在处理外部不确定扰动(外扰)及系统结构参数扰动(内扰)方面具有明显优势。在此基础上,高志强教授提出了线性自抗扰控制(linear active disturbance rejection control, LADRC)^[18],进一步简化了控制器结构,降低了参数整定难度。LADRC 广泛应用于

解决电力系统 LFC 问题, 利用扩张状态观测器 (extended state observer, ESO) 对系统内扰及外扰进行估计并反馈补偿, 相比其他控制方法, 抗扰能力具有明显提升^[19]。在此基础上, 文献[20]利用量子遗传算法对 LADRC 控制器参数进行优化整定, 以此缩短频率调节时间, 提高频率暂态性能。文献[21]针对多区域互联电力系统的 LFC 问题, 提出一种考虑估计等效输入扰动补偿的双层 LADRC 方法, 强化了对功率不平衡及参数变化等不确定性扰动的抑制能力。文献[22]提出基于时延补偿 ESO 的控制方法, 有效解决了通信时延对频率稳定性造成的影响。

ESO 对 LADRC 控制方法的性能提升至关重要, 国内外诸多学者提出了多种串级扩张状态观测器 (cascade extended state observer, CESO)。文献[23]针对多任务追踪问题, 提出一种 CESO 结构, 利用多个 ESO 估计不同状态的扰动, 以此提高多级任务的动态性能和鲁棒性。文献[24]针对不确定性系统, 设计了一种基于连续时间估计器、连续观测误差预测器和复位补偿器组成的 CESO, 实现了系统状态和总扰动的联合估计。文献[25]提出一种降阶 CESO, 并将其与积分滑模控制结合, 有效改善了云台系统的外部扰动鲁棒性。然而, 上述文献致力于利用不同 CESO 提升系统控制性能, 并未实现有效的高频噪声抑制。针对该问题, 文献[26]提出低增益 CESO, 在不明显降低控制效果的前提下抑制高频噪声, 但该方法的参数设计依赖经验, 控制效果难以进一步提升。

在现有研究的基础上, 本文从调控机理和控制方法两方面着手, 解决高比例风电并网系统调频能力不足、频率抗扰能力差的问题。首先, 从调控机理角度出发, 通过构建基于风电虚拟惯量控制的风火协同调频模型, 充分利用风机转子动能快速响应特性, 弥补电力系统传统机械转动惯量的缺失, 进而提高系统惯量支撑和一次调频能力; 其次, 从控制方法角度出发, 基于上述风火协同调频模型, 本文设计了基于新型自抗扰控制方法的风火协同负荷频率控制器, 利用自抗扰控制方法出色的抗扰性能, 提升电力系统在不确定风电功率和负荷双重扰动下的抗扰能力, 进一步地, 通过设计串级扩张状态观测器, 提高系统对频率测量噪声等高频噪声的抑制效果, 解决现有自抗扰控制方法在高频噪声抑制和快速响应性能之间的矛盾; 最后, 采用遗传粒子群优化算法对控制器参数进行优化, 并通过多场景下的仿真实验对比验证了本文所提

调频策略的有效性。

1 风电电力系统负荷频率控制模型

1.1 基于虚拟惯量控制的风电机组功率控制模型

在新能源电力系统中, 风电机组可通过功率备用控制与转子动能控制 2 种方式参与调频。虚拟惯量控制^[27]属于转子动能控制方式, 在系统频率波动发生后, 可通过快速调控风机出力达到模拟同步发电机组物理惯量的效果, 是解决高比例新能源电力系统低惯量问题的重要手段^[28]。

本文将虚拟惯量控制下的双馈风电机组进行建模, 风机模型及参数参考文献[8]。其中, P_m 为风机机械功率; C_p 为风能利用系数; ρ 为空气密度; r 为风力机半径; v 为实际风速; J_w 为风机转动惯量; ω_w 为风机转速; P_e 为风机电磁功率; k_{opt} 为最大功率点跟踪 (MPPT) 系数。

风机叶片捕获风能并转化为机械功率过程可表示为:

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \rho \pi r^2 v^3 \quad (1)$$

机械功率经传动机构传递至发电机, 以单质块模型为例, 该传动机构物理过程为:

$$P_m - P_e = J_w \omega_w \frac{d\omega_w}{dt} \quad (2)$$

基于 MPPT, 当风机转速 $\omega_w < 1.2 p.u.$ 时, 风机叶片传递到发电机最大功率为:

$$P_{MPPT} = k_{opt} \omega_w^3 \quad (3)$$

由于虚拟惯量控制的介入, 风机需按照虚拟惯量作用下的参考功率变化值运行, 该功率变化为^[29]:

$$\Delta P_{VIC} = K_p \Delta f + K_d \frac{df}{dt} \quad (4)$$

式中: Δf 为系统频率偏差; K_p 和 K_d 分别为虚拟惯量控制的比例系数和微分系数。进而, 最终经逆变器并网后的风机输出功率可表示为:

$$P_e = \frac{1}{T_e s + 1} (P_{MPPT} + \Delta P_{VIC}) \quad (5)$$

式中: T_e 为逆变器响应时间常数。

综上所述, 虚拟惯量控制方式下的风电机组模型如图 1 所示, 以该模型作为风电场等值模型进行仿真研究。

1.2 火电机组功率控制模型

本文采用传统火电再热机组等效电力系统所有同步发电机组^[30], 火电机组模型如图 2 所示。其中, u 为一次调频动作值 (式(6)) 与二次调频控制

信号（即负荷频率控制器输出信号）的综合控制信号； X_g 和 T_g 分别为火电厂锅炉出力及锅炉动态响应时间常数； P_r 、 F 和 T_r 分别为火电厂汽轮机功率输出、增益系数及响应时间常数； P_g 和 T_l 分别为火电厂调速器功率输出及响应时间常数； P_{PFR} 为一次调频调节功率； R 为下垂系数。

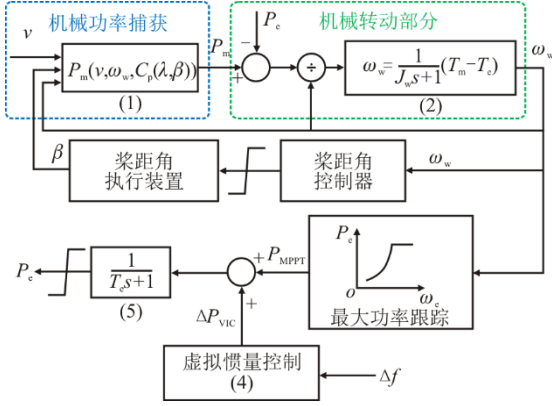


图1 风电机组功率控制模型

Fig.1 Power control model of wind turbine unit

$$P_{PFR} = -\frac{1}{R} \cdot \Delta f \quad (6)$$

调速器模型为：

$$X_g = \frac{1}{T_g s + 1} u \quad (7)$$

再热锅炉模型为：

$$P_r = \frac{FT_r s + 1}{T_r s + 1} X_g \quad (8)$$

汽轮机模型为：

$$P_g = \frac{1}{T_l s + 1} P_r \quad (9)$$

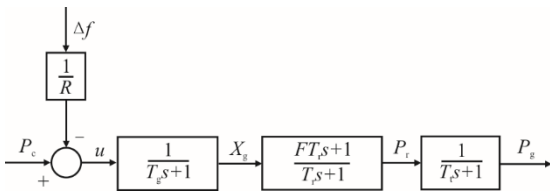


图2 传统火电机组功率控制模型

Fig.2 Power control model of conventional thermal power unit

1.3 单区域电力系统风火协同调频建模

在单区域电力系统中，系统有功负荷不平衡将导致系统频率波动，该有功-频率动态过程可表示为：

$$\Delta f = \frac{1}{Ms + D} (P_g + P_e - P_l) \quad (10)$$

式中： M 和 D 分别为系统等效惯性常数和阻尼常数； P_l 为系统负荷。

基于图1风电机组模型和图2火电机组模型，可最终构建新型电力系统 LFC 模型，结果如图3所示。

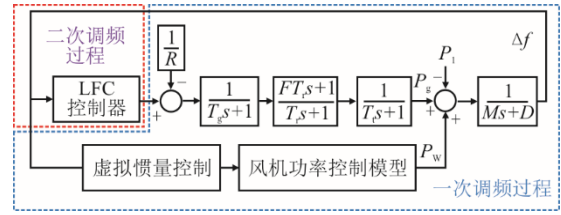


图3 电力系统 LFC 模型

Fig.3 LFC model of power system

2 基于串级扩张状态观测器的 LFC 自抗扰控制器设计

依据上一节内容中所构建的模型，将其写成状态空间方程的形式：

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{D}\dot{\mathbf{e}}(t) \quad (11)$$

$$y(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t)$$

式中： $\mathbf{x}(t) = (\Delta f, X_g, P_r, P_g, \omega_w, P_w)^T$ 为系统状态变量； $\mathbf{e}(t) = f(\Delta M, P_l, d)$ 为考虑系统变惯量参数、负荷扰动以及测量噪声扰动等在内的系统总扰动，并假设扰动可微且 $h(t) = \dot{f}(\Delta M, P_l, d)$ 。由于篇幅原因，其他矩阵参数在此不再详述。下文将针对该模型，分别设计基于 ESO 和 CESO 的 LADRC 负荷频率控制器。

2.1 基于 ESO-LADRC 的负荷频率控制器

传统 LADRC 控制结构如图4所示。ESO 将估计的总扰动扩张成一个系统状态变量，通过对总扰动的补偿和控制产生控制律，实现扰动的快速抑制和消除。基于 ESO-LADRC 控制方法的状态空间表达式为：

$$\dot{\hat{\mathbf{z}}} = \mathbf{A}_i \hat{\mathbf{z}} + \mathbf{B}_i u + \mathbf{L}_i (y - \mathbf{C}_i^T \hat{\mathbf{z}}) \quad (12)$$

$$u = \mathbf{K}(r - \hat{\mathbf{z}})$$

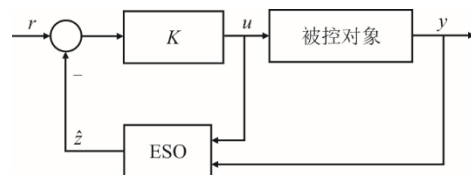


图4 ESO-LADRC 结构

Fig.4 Structure of ESO-LADRC

2.2 基于 CESO-LADRC 的负荷频率控制器

传统 ADRC 框架核心在于设计扩张状态观测器估计系统总扰动 $e(t)$ 。然而，有时为获得更精确的扰动估计值，往往导致观测器增益过高，同时弱

化了对高频测量噪声的抗扰能力。因此，本文采用具有低增益特征的 CESO 取代传统 ESO，其结构如图 5 所示。

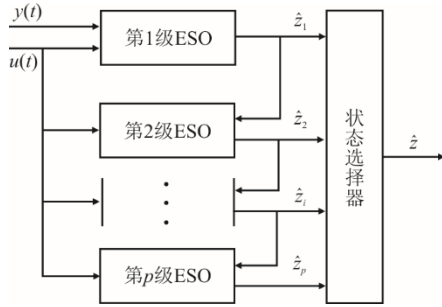


图 5 CESO 结构
Fig.5 Structure of CESO

CESO 由 p 级传统 $n+1$ 阶 ESO 串联构成，其中，第 $I(I>2)$ 级 ESO 可表示为：

$$\begin{aligned} \dot{\hat{z}}_i(t) &= \mathbf{A}_{i,n+1} \hat{z}_i(t) + \mathbf{B}_{i,n+1} u(t) - \\ &\quad \mathbf{B}_{i,n+1} (\mathbf{D}_{i,n+1}^T \frac{1}{b_0} \hat{z}_{i-1}) + \mathbf{L}_{i,n+1} (\hat{y}_{i-1}(t) - \hat{y}_i(t)) \quad (13) \\ \hat{y}_i(t) &= \mathbf{C}_{i,n+1} \hat{z}_i(t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_i &= \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{n \times 1} & \mathbf{I}_{n \times n} \\ \mathbf{0}_{1 \times 1} & \mathbf{0}_{1 \times n} \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}_i &= [\mathbf{0}_{1 \times (n-1)} \quad b_0 \quad 0]^T \\ \mathbf{L}_i &= [\beta_{i,1}, \beta_{i,2}, \dots, \beta_{i,n}, \beta_{i,n+1}]^T \end{aligned}$$

式中： L_i 为 CESO 中第 i 级观测器参数。

选取第 i 级 ESO 的输出估计值 $\hat{y}_i(t)$ 与系统控制信号 $u(t)$ ，传递至第 $i+1$ 级 ESO，以此类推，最终依据以下规则选取反馈控制信号：

$$\hat{z}(t) = \hat{z}_{p,n+1}(t) + \mathbf{D}_{i,n+1} \mathbf{D}_{i,n+1}^T \sum_{i=1}^{p-1} \hat{z}_{i,n+1}(t) \quad (14)$$

据此设计状态反馈控制率为：

$$u(t) = -\mathbf{K} \hat{z}(t) \quad (15)$$

式中： $\mathbf{K}=1/b_0[k_1, k_2, \dots, k_n, 1]$ ，为系统状态反馈控制率参数； $\mathbf{C}_i=[1 \ \mathbf{0}_{1 \times n}]^T$ ； $\mathbf{D}_i=[\mathbf{0}_{1 \times n} \ 1]^T$ 。

此时，CESO-LADRC 控制方法的状态空间表达式可表示为：

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{Z}}(t) &= \mathbf{A}_u \mathbf{Z}(t) + \mathbf{B}_u u(t) + \mathbf{L}_1 y(t) + (\mathbf{L}_u \mathbf{C}_u - \mathbf{D}_u) \mathbf{Z}(t) \\ u(t) &= -\mathbf{K}_u \mathbf{Z}(t) \end{aligned} \quad (16)$$

其中， $\mathbf{Z} = [\hat{z}_1, \dots, \hat{z}_p]^T$ ，

$$\mathbf{K}_u = \mathbf{K} \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{(n-1) \times (n-1)} & \mathbf{0}_{(n-1) \times 1} & \mathbf{I}_{n \times n} \\ \mathbf{0}_{1 \times (n-1)} & 1 & \mathbf{0}_{1 \times n} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A}_u = \text{diag}[\mathbf{A}_1 \ \dots \ \mathbf{A}_p], \quad \mathbf{B}_u = [\mathbf{B}_1 \ \dots \ \mathbf{B}_p]^T,$$

$$\mathbf{L}_u = \text{diag}[\mathbf{L}_1 \ \dots \ \mathbf{L}_p],$$

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_u &= \begin{bmatrix} -1 & \dots & \dots & \dots \\ 1 & & & \\ \vdots & & & \\ \vdots & & 1 & -1 \end{bmatrix} [\text{diag}(\mathbf{C}_i^T)], \\ \mathbf{D}_u &= \begin{bmatrix} & & & 0 \\ & & \frac{1}{b_0} \mathbf{B}_i \mathbf{D}_i^T & 0 \\ & \frac{1}{b_0} \mathbf{B}_i \mathbf{D}_i^T & \dots & \frac{1}{b_0} \mathbf{B}_i \mathbf{D}_i^T & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

2.3 LFC 控制器参数优化

针对图 3 及式(11)所示系统模型，选择构建二阶自抗扰控制器，此时，扩张状态观测器阶数为 $2+1$ 阶。因此，对三阶扩张状态观测器进行解列串联，如式(16)所示，然后依据式(13)对各级观测器扰动估计状态进行选择，完成 CESO-LADRC 控制器的设计。

在该控制器中，需要整定的参数包括各级串联扩张状态观测器阶数 n_i 、串联扩张状态观测器个数 p 、各观测器参数 L_i 、状态反馈控制率参数 K 。其中，观测器参数和控制器参数满足^[18,22]：

$$\beta_{i,j} = \binom{j+1}{i} \omega_{0,i}, \quad i=1,2,\dots,j+1 \quad (17)$$

$$k_i = \binom{n}{i-1} \omega_{c,n-i+1}, \quad i=1,2,\dots,n$$

为进一步减少参数整定复杂性，本文设定串联扩张状态观测器阶数一致，即 $n_1=n_2=\dots=n_i=n$ ，且设定观测器带宽缩放参数 θ ，观测器带宽参数符合以下公式：

$$\omega_{0,1} = \theta \omega_{0,2} = \theta^2 \omega_{0,3} = \dots = \theta^{p-1} \omega_{0,p} \quad (18)$$

因此，针对上述待整定参数，本文采用遗传粒子群算法 (GAPSO) 进行参数优化，GAPSO 智能优化算法流程如图 6 所示。

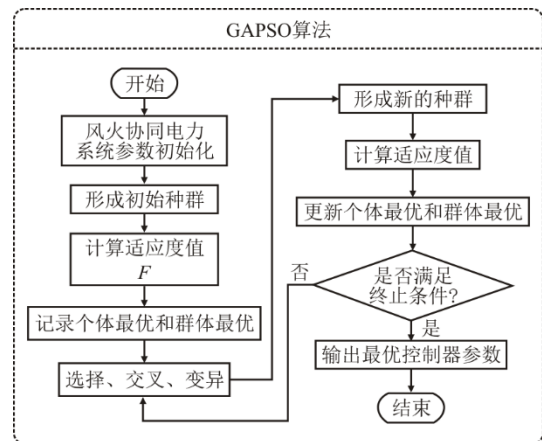


图 6 GAPSO 智能优化算法流程
Fig.6 Flowchart of the GAPSO intelligent optimization algorithm

GAPSO 智能优化算法首先基于图 3 所示模型, 在 Simulink 环境下搭建该模型并对风火协同电力系统参数进行初始化, 设定初始种群数量与迭代次数, 通过手动调节给定合理的控制器参数初始值, 形成初始种群。随后, 以频率偏差的时间积分函数作为适应度函数, 如式(19)所示, 通过仿真实验计算各种群的适应度值, 记录个体最优和群体最优, 进行选择后通过交叉变异形成新的种群。重复上述步骤, 直到满足终止条件, 得到较优的控制器参数。

$$ITAE = \int |\Delta f| \cdot t dt \quad (19)$$

进一步地, 为避免以 ITAE 作为单一适应度函数进行优化后, 可能造成频率偏差短时频繁波动的情况, 本文在 ITAE 的基础上, 引入频率波动次数 N , 并赋予权重, 重构适应度函数如式(20)所示, 实现多目标优化。其中, 权重系数 w_1 为 ITAE 在优化目标函数中的权重, 权重系数 w_2 为频率波动次数 N 在优化目标函数中的权重, 通过多次对比优化结果, 分析不同权重对频率响应结果的影响, 本文将权重系数 w_1 和 w_2 的数值分别设定为 1 和 10。基于式(20), 利用 GAPSO 进行优化, 详细流程如图 5 所示。以 ESO-LADRC 为例, 优化后系统 ITAE 为 0.001 48。

$$F = ITAE \cdot w_1 + N \cdot w_2 \quad (20)$$

3 仿真分析

基于图 3 所构建的高比例风电电力系统 LFC 模型, 在 MATLAB/Simulink 中搭建该模型, 系统模型参数见表 1, 通过将本文所设计的 CESO-LADRC-LFC 与 PID-LFC、ESO-LADRC-LFC 和基于滤波器的 LADRC-LFC (F-ESO-LADRC-LFC) 等控制策略进行对比, 验证所提控制策略的有效性。表 2 为不同控制器参数。

首先, 基于 GAPSO 优化后的控制器参数, 验证本文所提风火协同控制策略在调控机理和对源荷双侧强扰动的抗扰性能方面的优越性。随后, 为进一步验证本文所提策略的高频测量噪声抑制性能, 通过手调参数至与不同控制策略下系统频率响应结果接近一致, 进而通过功率阶跃扰动、频率测量噪声、控制信号约束 3 个不同角度完成系统仿真实验, 验证本文所提控制策略的有效性。本文仿真实验均在 MATLAB 2023a 的 Simulink 环境下完成, 所使用的计算平台核心硬件配置为 Intel i9-12900K CPU @5.2 GHz 以及 64 GB RAM。

表 1 LFC 模型参数
Tab.1 Parameters of the LFC model

子系统	参数
风电机组	$J_w=10.38, T_e=0.02, k_{opt}=0.578, C_{p,n}=0.44, K_p=2.4, K_d=5.5$
火电机组	$T_g=7, T_r=0.3, T_i=0.02, F=0.3, R=3$
电网	$M=5, D=1$

表 2 不同控制器参数
Tab.2 Parameters of different controllers

控制方法	控制器参数
PID	$k_p=4\ 500.3, k_i=3\ 530.5, k_d=4\ 034.1$
ESO-LADRC	$\omega_c=0.97, \omega_0=266.23, b_0=0.073$
F-ESO-LADRC	$\omega_c=0.97, \omega_0=266.23, b_0=0.095$
CESO-LADRC	$\omega_c=200.00, \omega_0=21.00, b_0=0.004, \theta=0.1, n=3, p=2$

3.1 不同控制策略下系统频率抗扰能力分析

本节针对 CESO-LADRC、F-ESO-LADRC-LFC、ESO-LADRC 和 PID 4 种不同控制策略在负荷随机扰动下的系统频率抗扰能力进行仿真分析。图 7 为不同控制策略下系统随机扰动响应结果。

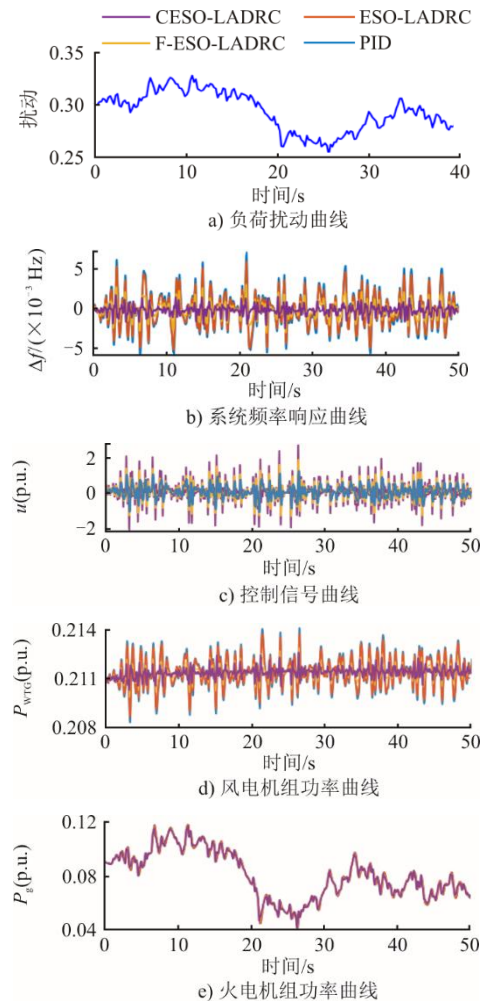


图 7 不同控制策略下系统随机扰动响应结果
Fig.7 Stochastic disturbance responses of power system with different control methods

由图 7 可见, 负荷随机扰动下, 基于 PID、ESO-LADRC 和 F-ESO-LADRC 控制策略的频率偏差波动范围分别为 $-0.0059\sim 0.0073$ Hz、 $-0.0050\sim 0.0061$ Hz 和 $-0.0029\sim 0.0033$ Hz, CESO-LADRC 的频率偏差波动范围为 $-0.0023\sim 0.0019$ Hz, 显著低于其他 3 种方法。同时, 基于 CESO-LADRC 的火电机组功率波动幅值略有减小, 风电功率波动幅值明显减小。因此, 本文提出 CESO-LADRC 方法在随机扰动工况下, 系统频率抗扰能力更强。

3.2 功率阶跃扰动下系统抗扰实验

本节针对 3 种不同控制策略下系统频率对功率阶跃扰动的响应情况进行仿真分析, 在 $t=0$ s 时, 令负荷功率突增 0.11p.u., 系统频率响应曲线、控制信号变化曲线、风电机组功率曲线以及火电机组功率曲线如图 8 所示。

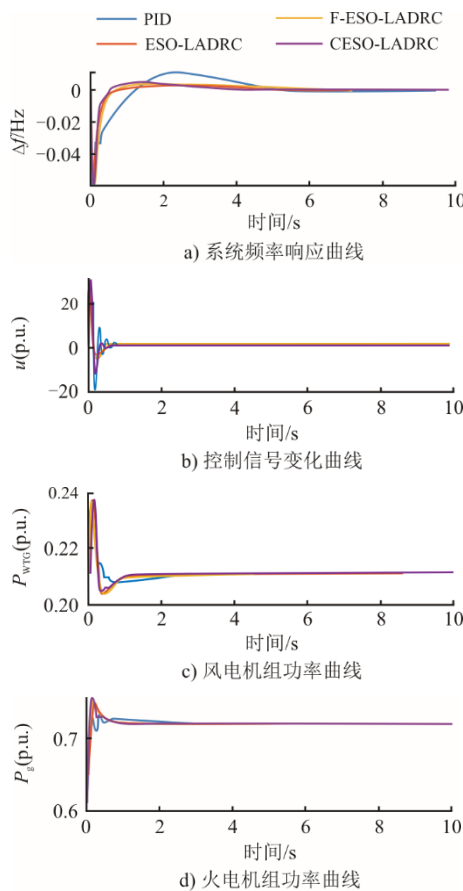


图 8 不同控制方法下系统阶跃响应结果

Fig.8 Step responses of power system with different control methods

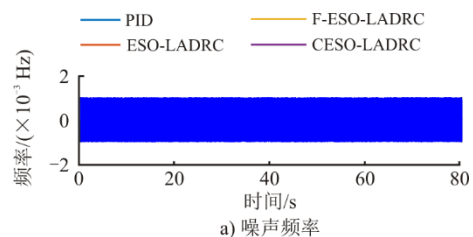
当负荷阶跃扰动发生后, 3 种不同控制策略下, 最大频率偏差均稳定在 0.058 Hz, 基于 PID 的控制策略频率响应时间更长, 表明 CESO-LADRC、F-ESO-LADRC 和 ESO-LADRC 能够有效减小调节

时间。在控制信号方面, 由于控制带宽的增加, 在处理阶跃扰动时, 基于 CESO-LADRC 的控制策略控制信号变化幅值略高于其他 3 种方法。因此, 实验结果表明, 本文所提出的 CESO-LADRC 控制策略在处理负荷阶跃扰动时, 能够实现与 ESO-LADRC 控制策略等同的抗扰性能, 调节时间、最大偏差等控制性能指标方面并未降低。

3.3 控制信号约束下系统抗扰实验

为进一步探究 CESO-LADRC 在抗高频噪声方面的综合性能, 本节针对系统稳定状态下、在不同控制信号约束下的 4 种不同控制策略的频率响应结果进行仿真实验和分析。图 9 为不同控制信号约束下系统高频噪声抗扰结果。施加到频率反馈信号的测量噪声如图 9a)所示, 是一组均匀分布的随机信号, 采用 MATLAB/Simulink 中的 Uni-form Random Number 模块进行模拟。

为便于对比分析不同控制策略在高频噪声扰动下控制性能, 对控制信号施加如下约束: 1) 在 0~20 s 时间段, 控制信号无约束; 2) 在 20~40 s 时间段, 施加控制信号约束为 $|u|<5$; 3) 在 40~60 s 时间段, 施加控制信号约束为 $|u|<2$; 4) 在 60~80 s 时间段, 施加控制信号约束为 $|u|<1$ 。3 种控制策略在不同时间段内的变化曲线如图 9b)所示。由图 9b)可以发现, 在 ESO-LADRC-LFC 控制策略下, 频率测量噪声信号被控制器明显放大, 控制信号变化幅值小于 8, 在 PID-LFC 控制策略下, 控制信号变化幅值小于 6, F-ESO-LADRC 控制策略下, 控制信号变化幅值小于 3, 而在本文所提出的 CESO-LADRC-LFC 控制策略下, 控制信号变化幅值小于 1.5。当控制信号约束起作用后, 基于 ESO-LADRC 和 PID 的负荷频率控制器均造成频率波动幅值不同程度增加。特别地, ESO-LADRC 受控制信号约束作用明显, 频率波动幅值成倍增加, 同时导致风电机组和火电机组功率发生较大波动。图 10 为不同控制信号约束下系统功率响应结果。上述结果表明, CESO-LADRC 对高频噪声扰动有明显的抑制作用, 可以有效解决传统 LADRC 控制策略对高频噪声的放大问题。



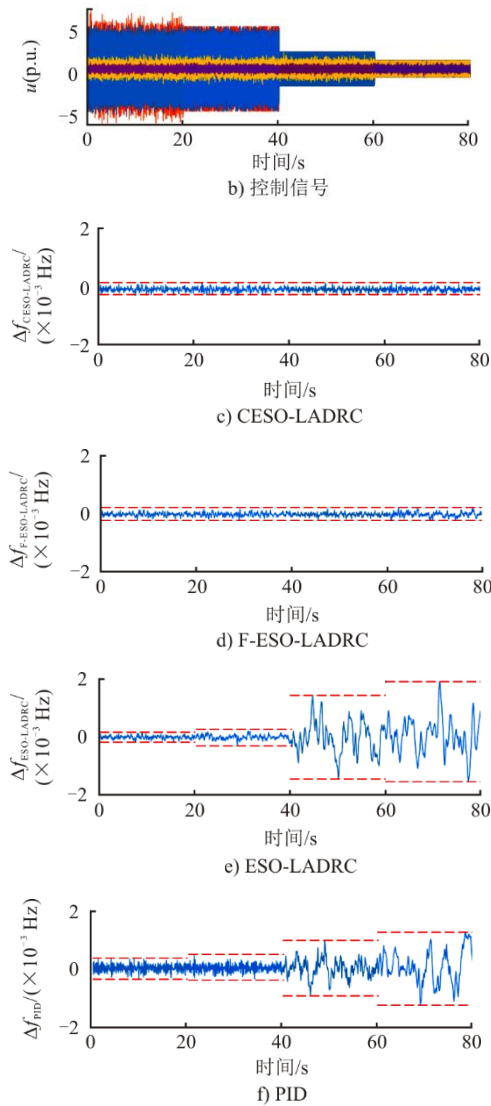


图 9 不同控制信号约束下系统高频噪声抗扰结果
Fig.9 Anti-disturbance results of power system with different constraints of control signal

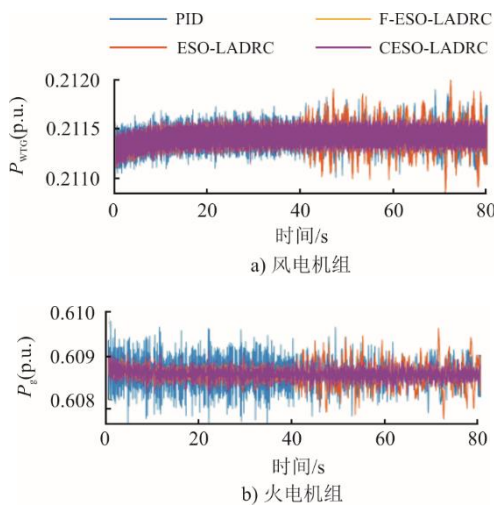


图 10 不同控制信号约束下系统功率响应结果
Fig.10 Output power results with different constraints of control signal

3.4 阶跃及测量噪声扰动实验

为进一步验证本文所提出控制策略在抗扰性能方面的优越性，本节在负荷阶跃扰动实验的同时，对频率反馈信号施加高频噪声。此外，为充分探究在实际运行过程中，各控制策略下的系统响应性能，本节未对控制器输出信号施加约束，仿真结果如图 11 所示。由图 11 可见，阶跃扰动发生后，带有频率测量噪声的频率响应结果与图 7 并未有明显差别。当仅考虑阶跃扰动时，CESO-LADRC 控制器产生的控制信号变化幅值最大，但在附加频率测量噪声后，由于本文所提出的方法在高频噪声抑制方面的优越性，其控制信号能够基本维持不变，而 F-ESO-LADRC 控制器产生较小的控制信号波动，ESO-LADRC 及 PID 控制器信号的波动较大。对包括火电机组调速器、新能源系统逆变器等执行机构产生过度调控，会使用机组寿命大幅下降，故障率增加。

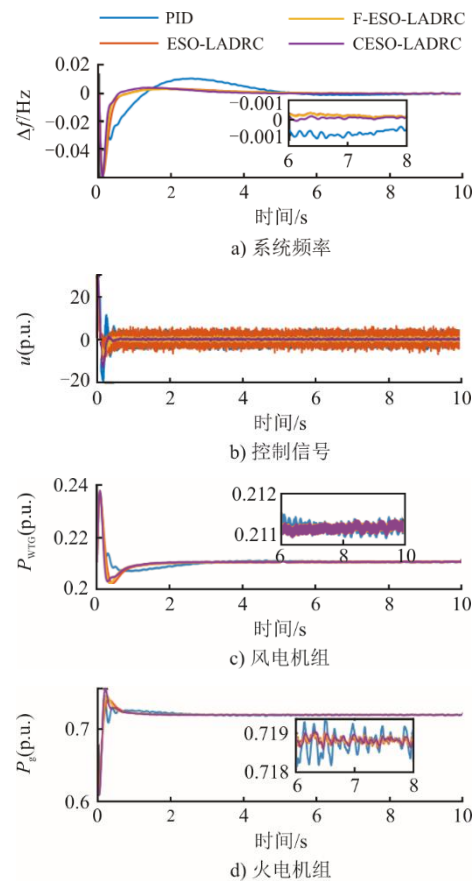


图 11 不同控制方法下系统高频噪声抗扰结果
Fig.11 Anti-disturbance results of power system with different control methods

4 结 论

本文提出针对高比例风电电力系统负荷频率

控制问题,提出一种基于 CESO-LADRC 的风火协同调频策略,在不降低控制性能的前提下,有效抑制高频测量噪声,控制信号变化范围低于 F-ESO-LADRC,且远低于 PID 和 LADRC 控制器,避免了过度调控可能造成的设备寿命下降、故障率增加等问题。

随着风电大规模并网,风电功率对电网带来的影响日益加剧,在本文研究的基础上,一方面,需要分析基于 CESO-LADRC-LFC 的风火协同调频系统的稳定性,得到严谨的理论分析和证明;另一方面,围绕风电功率控制,需要针对频率测量噪声对风电虚拟惯量控制带来的影响进行分析,利用 CESO-LADRC 设计和优化虚拟惯量控制环节,提高风火协同效率,避免风电功率的过度调控,这是风电电力系统负荷频率控制未来的重要研究方向。

【参考文献】

- [1] 国家能源局. 国家能源局发布 2023 年全国电力工业统计数据 [EB/OL]. (2024-02-03) [2024-03-03]. https://www.nea.gov.cn/2024-01/26/c_1310762246.htm.
- [2] 郭良杰, 王德林, 谢棚, 等. 高风电渗透下电网调峰运行时的频率稳定控制策略研究[J]. 热力发电, 2022, 51(10): 103-113.
GUO Liangjie, WANG Delin, XIE Peng, et al. Research on frequency stability control strategy of power grid peak shaving operation under high wind power penetration[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(10): 103-113.
- [3] VEERS P, DYKES K, LANTZ E, et al. Grand challenges in the science of wind energy[J]. Science, 2019, 366(6464): 2027.
- [4] 汤广福, 周静, 庞辉, 等. 能源安全格局下新型电力系统发展战略框架[J]. 中国工程科学, 2023, 25(2): 79-88.
TANG Guangfu, ZHOU Jing, PANG Hui, et al. Strategic framework for new electric power system development under the energy security pattern[J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(2): 79-88.
- [5] LINARO D, BIZZARRI F, GIUDICE D, et al. Continuous estimation of power system inertia using convolutional neural networks[J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 4440.
- [6] 张怡, 刘向杰. 互联电力系统鲁棒分布式模型预测负荷频率控制[J]. 控制理论与应用, 2016, 33(5): 621-630.
ZHANG Yi, LIU Xiangjie. Robust distributed model predictive control for load frequency control of uncertain power systems[J]. Control Theory & Applications, 2016, 33(5): 621-630.
- [7] MA Y X, HU Z C, SONG Y H. A reinforcement learning based coordinated but differentiated load frequency control method with heterogeneous frequency regulation resources[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(1): 2239-2250.
- [8] 刘吉臻, 姚琦, 柳玉, 等. 风火联合调度的风电场一次调频控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3462-3469.
LIU Jizhen, YAO Qi, LIU Yu, et al. Wind farm primary frequency control strategy based on wind & thermal power joint control[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3462-3469.
- [9] 陈鹏, 王玮, 杨建青, 等. 基于多尺度分解的风火储协同调频控制策略[J]. 太阳能学报, 2024, 45(3): 428-435.
CHEN Peng, WANG Wei, YANG Jianqing, et al. Cooperative frequency regulation control strategy of wind-thermal-storage system based on multi-scale decomposition[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2024, 45(3): 428-435.
- [10] 周天沛, 孙伟. 高渗透率下变速风力机组虚拟惯性控制的研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 486-496.
ZHOU Tianpei, SUN Wei. Study on virtual inertia control for DFIG-based wind farms with high penetration[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 486-496.
- [11] SUN M, SUN Y, CHEN L, et al. A novel temporary frequency support control strategy of wind turbine generator considering coordination with synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(2): 1011-1020.
- [12] ERSDAL A M, IMSLAND L, UHLEN K. Model predictive load-frequency control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 31(1): 777-785.
- [13] 米阳, 郝学智, 刘红业, 等. 基于滑模控制的含风储多域电力系统负荷频率控制[J]. 控制与决策, 2019, 34(2): 437-444.
MI Yang, HAO Xuezhi, LIU Hongye, et al. Multi-area power system with wind power and energy storage system load frequency control based on sliding model control[J]. Control and Decision, 2019, 34(2): 437-444.
- [14] HAN J Q. From PID to active disturbance rejection control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 900-906.
- [15] HEIDARY J, OSHNOEI S, GHEISARNEJAD M, et al. Shipboard microgrid frequency control based on machine learning under hybrid cyberattacks[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 71(7): 7136-7146.
- [16] CHENG X, TU X, ZHOU Y F, et al. Active disturbance rejection control of multi-joint industrial robots based on dynamic feedforward[J]. Electronics, 2019, 8(5): 591.
- [17] ZHU Y K, GUO L, QIAO J Z, et al. An enhanced anti-disturbance attitude control law for flexible spacecrafts subject to multiple disturbances[J]. Control Engineering Practice, 2019, 84: 274-283.
- [18] GAO Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning[C]//ACC. 2003: 4989-4996.
- [19] DONG L L, ZHANG Y. On design of a robust load frequency controller for interconnected power systems[C]//Proceedings of the 2010 American Control Conference. IEEE, 2010: 1731-1736.
- [20] HUANG Z Y, CHEN Z Q, ZHENG Y M, et al. Optimal design of load frequency active disturbance rejection control via double-chains quantum genetic algorithm[J]. Neural Computing and Applications, 2021, 33: 3325-3345.
- [21] LIU F, LI Y, CAO Y J, et al. A two-layer active disturbance rejection controller design for load frequency control of interconnected power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 31(4): 3320-3321.
- [22] FU C F, TAN W. Decentralised load frequency control for power systems with communication delays via active disturbance rejection[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(6): 1397-1403.
- [23] FAN K, LIU Y H, HUO B Y, et al. Cascaded ESO based multi-task priority tracking and null-space compliance control for redundant robots[J]. Control Engineering

- Practice, 2023, 141: 105710.
- [24] HE K H, DONG C Y, WANG Q. Active disturbance rejection control for uncertain nonlinear systems with sporadic measurements[J]. IEEE-CAA Journal of Automatic Sinica, 2022, 9(5): 893-906.
- [25] LI H T, YU J K. Anti-disturbance control based on cascade ESO and sliding mode control for gimbal system of double gimbal CMG[J]. IEEE Access, 2020, 8: 5644-5654.
- [26] LAKOMY K, MADONSKI R, DAI Bin, et al. Active disturbance rejection control design with suppression of sensor noise effects in application to DC-DC buck power converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(1): 816-824.
- [27] 姚雅涵, 熊永新, 姚伟, 等. 面向电网频率快速支撑的风电场自适应分布式协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(2): 561-573.
YAO Yahan, XIONG Yongxin, YAO Wei, et al. Adaptive distributed cooperative control of wind farms for grid frequency fast support[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(2): 561-573.
- [28] BONFIGLIO A, INVERNIZZI M, LABELLA A, et al. Design and implementation of a variable synthetic inertia controller for wind turbine generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 34(1): 754-764.
- [29] 邢鹏翔, 侍乔明, 王刚, 等. 风电机组虚拟惯量控制的响应特性及机理分析[J]. 高电压技术, 2018, 44(4): 1302-1310.
XING Pengxiang, SHI Qiaoming, WANG Gang, et al. Response characteristics and mechanism analysis about virtual inertia control of wind generators[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1302-1310.
- [30] QI X, MADONSKI R, HUANG C Z, et al. Tracking-differentiator-based dynamic virtual inertial control of offshore wind power plant for frequency regulation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 141: 108150.

(责任编辑 杜亚勤)