

基于扩展卡尔曼滤波与线性自抗扰控制的风机转子动能功率平滑策略

黄 蕾¹, 徐帅奇^{2*}, 朱 瑛²

(1. 国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 210003;

2. 河海大学 电气与动力工程学院, 江苏 南京 211100)

Wind Turbine Rotor Kinetic Energy Power Smoothing Strategy Based on Extended Kalman Filter and Linear Active Disturbance Rejection Control

HUANG Lei¹, XU Shuaiqi^{2*}, ZHU Ying²

(1. Guodian Nanjing Automation Co., Ltd., Nanjing 210003, China;

2. School of Electrical and Power Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: [Objective] Aiming at the wind power grid-connected power fluctuation problem, this paper proposes a wind turbine rotor kinetic power smoothing strategy based on extended Kalman filter (EKF) and linear active disturbance rejection control (LADRC), in order to solve the problems of phase lag and insufficient disturbance rejection capabilities of the traditional methods. [Methods] Firstly, the aerodynamic model and mathematical model of the permanent magnet direct drive wind power generation system were established. Secondly, the LADRC was designed for the speed loop control, and the rotor kinetic energy algorithm based on EKF was proposed to dynamically update the noise statistical characteristics and optimize the power command estimation. Finally, the simulation model was constructed, and the proposed EKF-LADRC strategy was compared and analyzed with the traditional proportional integral (PI) control and active disturbance rejection control (ADRC) under the turbulence conditions of the high wind speed region and the rated wind speed region. [Results] The simulation results showed that, under turbulent condition in the high wind speed region, EKF-LADRC reduced the power standard deviation by 87.5% and 69.5%, respectively, compared to PI control and ADRC, and suppressed the speed fluctuation to 0.02 r/min. And the power output smoothing was significantly improved under turbulent condition in the rated wind speed region. Simulation results verified the effectiveness of the proposed strategy in suppressing power fluctuations under different wind

conditions. [Conclusion] The synergistic strategy of EKF-based rotor kinetic energy algorithm and LADRC proposed in this paper can significantly reduce the power fluctuation and enhance the system robustness. The adaptive noise estimation capability of EKF successfully eliminates the phase lag in traditional filter, and LADRC disturbance compensation mechanism ensures rapid response to turbulent wind conditions. The strategy not only outperforms the traditional methods in terms of dynamic performance, but also maintains operational stability under extreme operating conditions, and its computationally efficient and engineering realizability are of great value for applications in high percentage renewable energy grids that require stringent power quality standards.

Key words: wind power generation; power smoothing; rotor kinetic energy; extended Kalman filter; linear active disturbance rejection control

摘 要: 【目的】针对风电并网功率波动问题,本文提出了一种基于扩展卡尔曼滤波(EKF)与线性自抗扰控制(LADRC)的风机转子动能功率平滑策略,以解决传统方法相位延迟、抗扰能力不足的问题。【方法】首先,建立永磁直驱风力发电系统的空气动力学模型和数学模型;其次,设计 LADRC 用于转速环控制,同时提出基于 EKF 的转子动能算法,动态更新噪声统计特性并优化功率指令估计;最后,通过搭建仿真模型,在高风速区湍流和额定风速区湍流工况下将本文所提 EKF-LADRC 策略与传统比例积分(PI)控制及自抗扰控制(ADRC)进行对比分析。【结果】仿真结果表明,在高风速区湍流工况下,相较于 PI 控制和 ADRC, EKF-LADRC 将功率标准差分别降低了 87.5%、69.5%,并将转速波动抑制在 0.02 r/min;在额定风

基金项目: 国家自然科学基金(52477045)

National Natural Science Foundation of China (52477045)

速区湍流工况下,功率输出平滑性显著提升。仿真结果验证了所提策略在不同风况下抑制功率波动的有效性。

【结论】本文所提基于 EKF 的转子动能算法与 LADRC 协同策略能够显著降低功率波动,增强系统鲁棒性。EKF 的自适应噪声估计消除了传统滤波器的相位延迟;LADRC 的扰动补偿确保了对湍流风速的快速响应。该策略不仅在动态性能上优于传统方法,还能在极端工况下保持运行稳定性,其计算高效性和工程可实现性对需要严格电能质量标准的高比例可再生能源电网具有重要应用价值。

关键词: 风力发电;功率平滑;转子动能;扩展卡尔曼滤波;线性自抗扰控制

0 引言

随着风电在电力系统中的渗透率不断提高,风机输出功率的随机波动对电网频率稳定性和电能质量的影响日益显著^[1]。大规模风电并网导致的功率波动不仅增加了电网调频压力,还可能导致频率越限等安全问题。因此,如何有效平滑风机输出功率已成为风电并网技术研究的关键问题之一。目前,主流的功率平滑方法主要包括转子动能控制、储能系统补偿以及先进控制算法等^[2]。其中,基于双馈感应发电机转子动能调节的方法因无需额外硬件设备、成本低廉且响应迅速等特点,受到了学术界和工业界的广泛关注^[3]。然而,现有转子动能控制策略在动态响应速度、抗干扰能力以及转速恢复稳定性等方面仍存在诸多挑战,亟需进一步深入研究^[4-5]。

在转子动能控制领域,国内外学者提出了多种解决方案。文献[6]采用模型预测控制优化功率分配策略,通过约束转子转速变化率来平衡功率平滑效果与机械载荷,但其计算复杂度较高,且对模型精度依赖性强。文献[7]提出了一种基于模糊逻辑的自适应转速限制调整方法,该方法能够根据风速变化动态调节动能释放深度,但模糊规则的设定缺乏理论依据,可能导致控制性能不稳定。在信号处理方面,文献[8]提出了一种基于小波多分辨率分析的独立变桨控制策略,用于处理漂浮式海上风机在风-浪-流联合载荷下的振动问题,虽然该方法能有效降低气动载荷并抑制多模态振动,但小波分解固有的相位延迟问题可能影响系统的动态响应性能。此外,文献[9]将

H_∞鲁棒控制理论与转子动能调节相结合,增强了系统对参数不确定性的适应能力,但控制器设计过程较为复杂,且未充分考虑风速突变情况下的动态特性。

近年来,卡尔曼滤波技术在风电领域的应用逐渐受到重视。文献[10]将卡尔曼滤波技术用于风速预测,通过状态估计减少测量噪声的影响。文献[11]采用无迹卡尔曼滤波器替代传统卡尔曼滤波器,在高度非线性系统中实现了更精确的状态估计,有效降低了功率波动并提升了电网频率调节能力。然而,这些研究主要关注单一状态估计问题,未能将滤波技术与转子动能控制有机结合。与此同时,自抗扰控制(Active Disturbance Rejection Control, ADRC)凭借其其对系统内外扰动的强抑制能力,在风机控制中展现出独特优势。文献[12]设计了基于扰动观测的降阶自抗扰控制器,通过扰动观测与 ADRC 的协同补偿机制提升系统鲁棒性。文献[13]提出了一种改进的自适应滑模与 ADRC 结合的方案,提升了系统运行的稳定性。尽管如此,现有 ADRC 方法在功率平滑场景中的应用仍存在不足,特别是对转子动能动态过程与电网功率指令之间非线性耦合关系的处理尚不完善。

通过对现有研究的系统分析可知,当前风机功率平滑技术面临几个关键问题:(1)低通滤波、小波分解等传统滤波方法虽然能够抑制高频噪声,但会引入相位延迟,导致功率跟踪性能下降;(2)多数控制策略未充分考虑风速湍流强度,以及额定风速区湍流对系统功率输出的影响;(3)观测器与控制器通常独立设计,缺乏协同优化框架,在复杂工况下难以实现全局最优控制。

针对上述问题,本文提出了一种基于扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter, EKF)与线性自抗扰控制(Linear ADRC, LADRC)的风机转子动能功率平滑策略。本文创新点主要体现在以下几个方面:(1)针对传统滤波方法存在的相位延迟问题,提出了一种基于 EKF 的转子动能算法,通过构建包含转速约束的状态空间模型,将转子动能作为核心状态变量,动态更新噪声统计特性,实现了功率指令的高精度估计。该方法克服了传统卡尔曼滤波在非线性系统中估计精度不足的缺陷,同时通过引入转子动能动态特性,更敏感地捕

提系统的非线性行为,显著提升了功率指令的估计准确性;(2)提出了一种协同控制架构,将LADRC与转子动能调节相结合,利用扩张状态观测器统一估计系统未建模动态和外部扰动,并将滤波后的功率指令分解为跟踪目标和动能调节分量,实现了多目标优化控制。仿真结果表明,该架构在高风速湍流和额定风速湍流工况下均表现出优异的动态响应性能和抗干扰性能,有效抑制了功率波动和转速振荡,为高比例可再生能源电力系统的稳定运行提供了新的解决方案。

1 永磁直驱风力发电系统建模

1.1 风力机空气动力特性

永磁直驱风力发电机作为现代风电系统的重要机型,其空气动力特性直接影响整个系统的能量转换效率^[14]。与双馈感应发电机不同,永磁直驱系统省去了齿轮箱环节,使得风轮与发电机直接耦合,这一结构特点使其空气动力特性表现出独特的动态响应行为。

风力机能够将风能转化为机械能,从风能中捕获的机械功率 P_w 和机械转矩 T_w 为

$$\begin{cases} P_w = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3 C_p(\lambda, \beta) \\ T_w = \frac{P_w}{\omega_m} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ρ 为空气密度; r 为风机叶片半径; v 为风速; C_p 为风能利用系数; β 为桨距角; ω_m 为转子角速度; λ 为叶尖速比,其表达式为

$$\lambda = \frac{\omega_m r}{v} \quad (2)$$

C_p 是风力机将风能转换为机械能效率的核心参数,与 λ 和 β 具有非线性函数关系^[15],其表达式如式(3)所示,函数曲线如图1所示。

$$\begin{cases} C_p = 0.5176 \left(\frac{116}{\gamma} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\gamma}} + 0.0068\lambda \\ \gamma = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: γ 为与 λ 、 β 相关的中间变量。

由图1可知,在 $\beta=0$ 时, C_p 最大,为0.48,此时 λ 为8.1。在低风速时需要充分利用风能,应

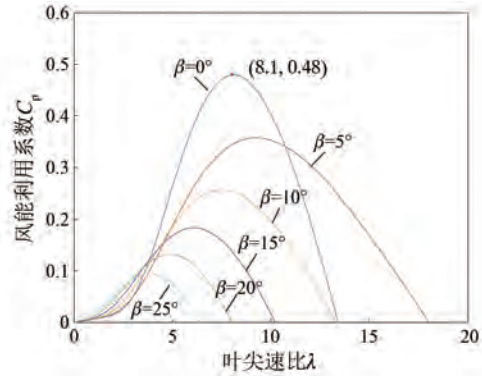


图1 C_p 与 λ 和 β 之间关系的函数曲线

Fig. 1 Functional curves of the relationship between C_p and λ and β

当保持风机在最大 C_p 处工作,此时可以根据 λ 给定电机转速参考值;随着 β 增大, C_p 降低,在高风速时转子转速较快,此时为限制风机输出功率需要采用变桨距的方式增加 β ,从而降低 C_p ,维持所需的输出功率。

1.2 永磁直驱风力发电系统数学模型

本文基于电机正常运行工况进行假设,假设定、转子表面光滑且结构对称;不计电机中涡流损耗和磁滞损耗的影响;磁通和磁动势遵循正弦波形分布;忽略电机内部磁路饱和的影响^[16]。在此假设基础上,永磁同步电机在 dq 轴下的数学模型^[17]为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_m L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_m (L_d i_d + \psi_f) \end{cases} \quad (4)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (5)$$

式中: u_d 、 u_q 、 i_d 、 i_q 和 L_d 、 L_q 分别为定子 d 、 q 轴电压、电流和电感; R_s 为定子电阻; ψ_f 为永磁体磁链; p 为极对数。

永磁直驱风力发电系统无齿轮传动装置,风力机角速度即为发电机角速度,风力机产生的机械转矩 T_w 拖动发电机运行。系统的动态方程为

$$\begin{cases} \frac{dE_k}{dt} = J \omega \frac{d\omega}{dt} = P_w - P_e \\ J \frac{d\omega}{dt} = T_w - T_e \end{cases} \quad (6)$$

式中: E_k 为发电机转子动能, $E_k = \frac{1}{2} J \omega^2$; J 为转子

转动惯量; ω 为风机转速, 由于风机与发电机同轴相连, 故风机转速与发电机转子角速度相同, 即 $\omega = \omega_m$ 。

令 $\frac{d\omega}{dt} = 0$ 即可求出稳态值 v_0 、 ω_0 , 对应的转矩为额定转矩 T_{rated} 。当 $v \leq v_0$ 时, 保持 $\beta = 0$, 充分利用风能从而获得最佳功率输出; 当 $v > v_0$ 时, 风机功率超过额定值, 需要进行变桨控制。

对 T_w 在稳态点进行泰勒展开, 如式(7)所示:

$$T_w = T_{w0} + \frac{\partial T_w}{\partial v}(v - v_0) + \frac{\partial T_w}{\partial \beta}(\beta - \beta_0) + \frac{\partial T_w}{\partial \omega}(\omega - \omega_0) + 0(h) \quad (7)$$

式中: $0(h)$ 为高阶无穷小量。

进而 ΔT_w 为

$$\Delta T_w = T_w - T_{rated} = J \frac{d\omega}{dt} - J \frac{d\omega_0}{dt} = J \Delta \dot{\omega} = \frac{\partial T_w}{\partial v}(v - v_0) + \frac{\partial T_w}{\partial \beta}(\beta - \beta_0) + \frac{\partial T_w}{\partial \omega}(\omega - \omega_0) \quad (8)$$

根据 ΔT_w 设计控制器, 对风机进行调节, 而在高风速区维持额定功率输出。

1.3 变桨距控制模型

变桨距控制是风力发电机组在风速大于额定值时实现功率调节的核心策略。其基本原理是通过实时比较设定转速与测量转速的偏差, 由控制算法计算出所需的 β , 并驱动变桨执行机构调整叶片角度, 从而调节风轮的气动特性, 使发电机输出功率稳定在额定值。当风速超过额定值时, 增大 β 可减小叶片攻角, 降低风能捕获效率, 避免机组超速和过载^[18]; 当风速小于额定值时, β 通常维持在最优角度 ($0^\circ \sim 5^\circ$), 以最大化风能利用率。

在统一变桨控制方式下, 三个独立的电动变桨执行系统根据控制器指令同步调节所有叶片的 β 。变桨执行机构通常安装在叶根处, 由伺服电机驱动, 其动态响应可近似为一阶惯性环节。由于电气伺服系统的动态响应 (如磁场定向控制、转矩调节等) 远快于机械系统的惯性, 因此在系统建模时通常忽略其动态特性, 主要考虑变桨机构的机械延迟和惯性影响。变桨距控制模型框图如图 2 所示。图中, ω_{ref} 为参考转速; β_{ref} 为参考桨距角; T_β 为惯性环节时间常数。

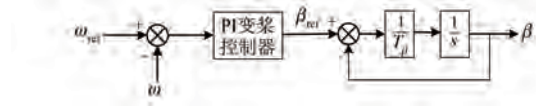


图 2 变桨距控制模型框图

Fig. 2 Block diagram of variable pitch control model

传统比例积分 (Proportional Integral, PI) 变桨控制方程为

$$\Delta \beta = K_p \Delta \omega + K_i \int_0^t \Delta \omega dt \quad (9)$$

式中: K_p 、 K_i 分别为 PI 控制器的比例、积分控制增益系数。

变桨执行机构传递函数为

$$\beta = \frac{1}{T_\beta s + 1} \beta_{ref} \quad (10)$$

在风电机组运行过程中, 桨距控制系统的输入为转速信号, 输出为转矩和 β 。当风速接近额定值时, 机组运行在额定功率点附近。若控制策略设计不当, β 将出现频繁调节现象。这种持续的动态调整不仅会导致转矩、转速及功率等关键运行参数出现显著波动, 还可能影响机组的动态稳定性。针对这一问题, 需优化控制策略, 以有效平抑 β 频繁调节所引发的功率波动幅度较大问题, 从而提升系统稳定性。

2 基于 EKF 与 LADRC 的风机转子动能功率平滑策略设计

LADRC 是一种基于 ADRC 理论发展而来的先进控制策略, 具有结构简单、鲁棒性强以及抗干扰能力突出等优势, 在风电机组控制等复杂系统中表现出良好的应用潜力。LADRC 不依赖被控对象的精确数学模型, 而是通过在线估计和补偿系统内外部扰动 (如风速波动、机械磨损和模型不确定性等) 来实现控制目标, 因此对参数变化和非线性因素具有较强的适应性。LADRC 通过扩张状态观测器实时估计并补偿系统总扰动 (包括未建模动态和外部干扰), 从而显著降低扰动对系统输出的影响, 提高动态响应速度, 并减少超调^[19]。相比传统 ADRC, LADRC 采用线性化设计, 其参数整定更直观, 计算复杂度更低。

在风机控制领域, 现有研究多集中于转速或转矩的直接观测, 而忽略了转子动能这一综合表征系统动态特性的关键参数。本文所提方法将转

子动能作为核心状态变量,能够更全面地反映系统的能量变化,从而提高状态估计的精度和鲁棒性。相较于仅依赖转速测量的传统卡尔曼滤波,本文方法能够更敏感地捕捉系统的非线性动态特性,同时能够更有效地耦合摩擦、阻尼等非线性因素,减少模型失配带来的估计偏差。

2.1 转子动能功率平滑分析

由式(6)可知:

$$J\omega \frac{d\omega}{dt} = P_w - P_e \quad (11)$$

将 P_e 改为电磁功率参考值 P_{e_ref} 作为电磁功率平滑输出量,式(11)可变为

$$J\omega \frac{d\omega}{dt} = P_w - P_{e_ref} \quad (12)$$

对式(12)中时间 t 从 t_a 到 t_b 进行积分^[20],可得:

$$\frac{J}{2}(\omega_{t_b}^2 - \omega_{t_a}^2) = \int_{t_a}^{t_b} (P_w - P_{e_ref}) dt \quad (13)$$

式中: ω_{t_a} 、 ω_{t_b} 分别为 t_a 、 t_b 时刻的转速, ω_{t_b} 也为转子动能参考转速。

对式(13)化简可得:

$$\omega_{t_b} = \sqrt{\omega_{t_a}^2 + \frac{2}{J} \int_{t_a}^{t_b} (P_w - P_{e_ref}) dt} \quad (14)$$

2.2 基于 EKF 的转子动能算法

EKF 是传统卡尔曼滤波在非线性系统中的推广,通过局部线性化技术实现对复杂动态系统的状态估计。相较于传统卡尔曼滤波,EKF 的核心优势在于其能够有效处理非线性状态转移和观测模型,适用于转子动能估计等具有显著非线性特性的工程问题。EKF 通过实时计算状态方程和观测方程的雅可比矩阵,在每一步迭代中对系统进行局部线性近似^[21],从而在保证算法实时性的同时,显著提升非线性工况下的估计精度,在满足高斯噪声假设的条件下,能够提供最小方差意义上的最优状态估计。

针对风力发电系统电磁功率信号中存在的突变扰动与噪声耦合问题,建立三状态非线性模型^[22]。定义状态向量为

$$\mathbf{x}_k = [P_k \quad \dot{P}_k \quad M_k]^T \quad (15)$$

式中: P_k 为电磁功率; $\dot{P}_k$ 为电磁功率变化率; M_k 为电磁功率突变幅值。

通过引入状态突变量,克服了传统模型对突发扰动观测不足的问题。考虑突变量的指数衰减特性,进而构建离散状态转移函数:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & \Delta t & e^{-(t-t_{peak})/\tau} \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}_k} \mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k \quad (16)$$

式中: $\mathbf{A}_k$ 为状态转移矩阵; Δt 为功率变化率耦合项; $e^{-(t-t_{peak})/\tau}$ 为突变量的动态耗散, τ 为衰减时间常数; $\mathbf{w}_k$ 为随机噪声。

为了区分正常运行工况与突变工况,设计动态噪声协方差矩阵 $\mathbf{Q}_k$:

$$\mathbf{Q}_k = \begin{cases} \text{diag}(10^6, 10^8, 10^5), & |\Delta P| > 0.15P_{\text{rated}} \\ \text{diag}(10^4, 10^6, 10^3), & \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

式中: P_{rated} 为额定功率。

2.2.1 预测阶段

算法基于系统动力学模型进行先验状态估计,根据预测方程更新状态估计矩阵以及误差协方差预测矩阵:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = \mathbf{A}_k \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1} \quad (18)$$

$$\mathbf{L}_{k|k-1} = \mathbf{A}_k \mathbf{L}_{k-1|k-1} \mathbf{A}_k^T + \mathbf{Q}_k \quad (19)$$

式中: $\hat{\mathbf{x}}$ 为状态估计矩阵; $\mathbf{L}$ 为误差协方差预测矩阵。 $\hat{\mathbf{x}}$ 、 $\mathbf{P}$ 的初始条件如式(20)所示:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}}|_0 = E\{\mathbf{x}|_0\} \\ \mathbf{L}|_0 = E\{(\mathbf{x}|_0 - \hat{\mathbf{x}}|_0)(\mathbf{x}|_0 - \hat{\mathbf{x}}|_0)^T\} \end{cases} \quad (20)$$

式中: E 为参数初始量。

2.2.2 更新阶段

当获得新数据后,算法进入测量更新阶段。首先计算 EKF 增益矩阵,该矩阵动态平衡了模型预测与实测数据的权重,之后状态估计通过融合预测值和测量残差进行更新,误差协方差预测矩阵同步更新以反映估计精度的提升:

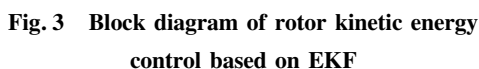
$$\mathbf{K}_k = \mathbf{L}_{k-1|k-1} \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{L}_{k-1|k-1} \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (21)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k (z_k - \mathbf{H} \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}) \quad (22)$$

$$\mathbf{L}_{k|k} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}) \mathbf{L}_{k|k-1} \quad (23)$$

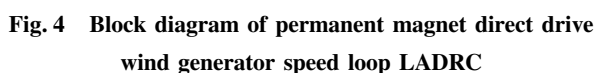
式中: $\mathbf{K}$ 为 EKF 增益矩阵; $\mathbf{H}$ 为功率观测矩阵; $\mathbf{R}$ 为观测噪声协方差矩阵; z_k 为电磁功率输入值; $\mathbf{I}$ 为单位矩阵。

基于 EKF 的转子动能控制框图如图 3 所示。



© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

为验证所提 EKF-LADRC 策略在高速区湍流环境下的有效性,采用平均风速为 14.5 m/s 的高速湍流模型进行仿真分析。图 5 为高速湍流模型,其具有较强的随机波动性,能够有效模拟实际风场的动态变化。



为验证本文所提 EKF-LADRC 策略的可行性,基于 Simulink 搭建控制器与仿真模型,编写相应的控制代码。风力发电机参数如表 1 所示。

Tab. 1 Parameters of wind generator

Fig. 5 Turbulence model in high wind speed region

表 2 不同控制策略下的指标标准差

Tab.2 Standard deviation of indicators under different control strategies

由图 6 和表 2 可知,相较于传统 PI 控制与 ADRC,EKF-LADRC 能够更有效地抑制风速波动带来的扰动,使功率输出更加平稳,转速波动幅度更小,同时桨距角调节更为迅速且稳定。因此 EKF-LADRC 策略在高风速湍流环境下具有更优的动态响应性能和抗干扰性能,能够提升风力发电系统的运行稳定性。

在额定风速区,湍流风场对风力机输出功率的影响尤为显著。由于此时机组运行在额定功率附近,风速的随机波动会直接导致机械转矩的变化,进而影响发电功率的稳定性和质量。为评估所提 EKF-LADRC 策略在额定风速区湍流环境下的抗干扰性能,建立平均风速为 10.45 m/s 的湍

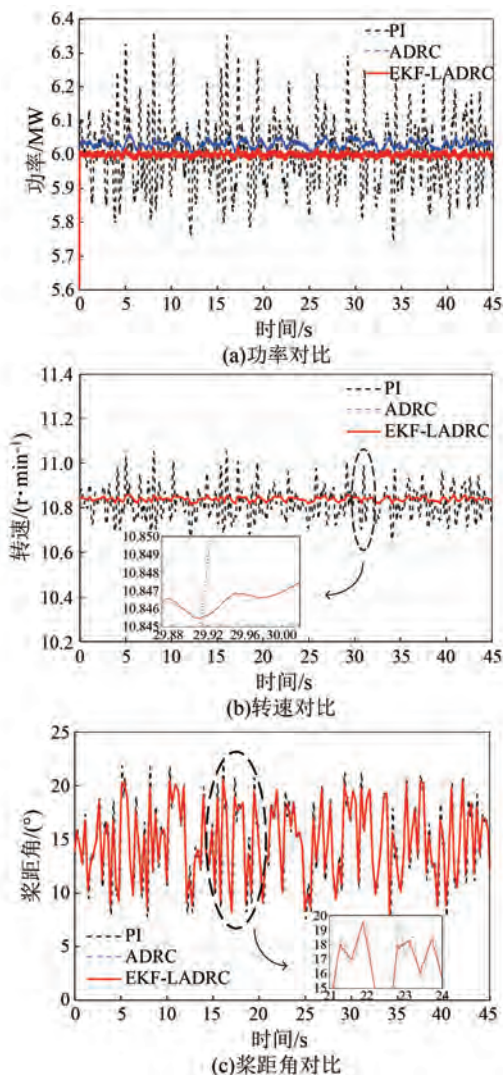


图 6 高风速区湍流环境下各指标对比结果

Fig. 6 Comparative results of various indicators under turbulence conditions in high wind speed region

流风场模型,如图 7 所示。

在额定风速区湍流环境下,EKF-LADRC 与传统 PI 控制和 ADRC 在功率、转速及桨距角方面的

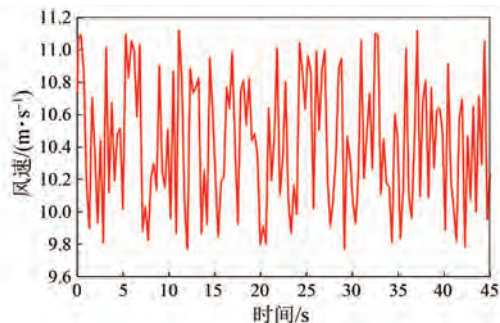


图 7 额定风速区湍流模型

Fig. 7 Turbulence model in rated wind speed region

对比如图 8 所示。

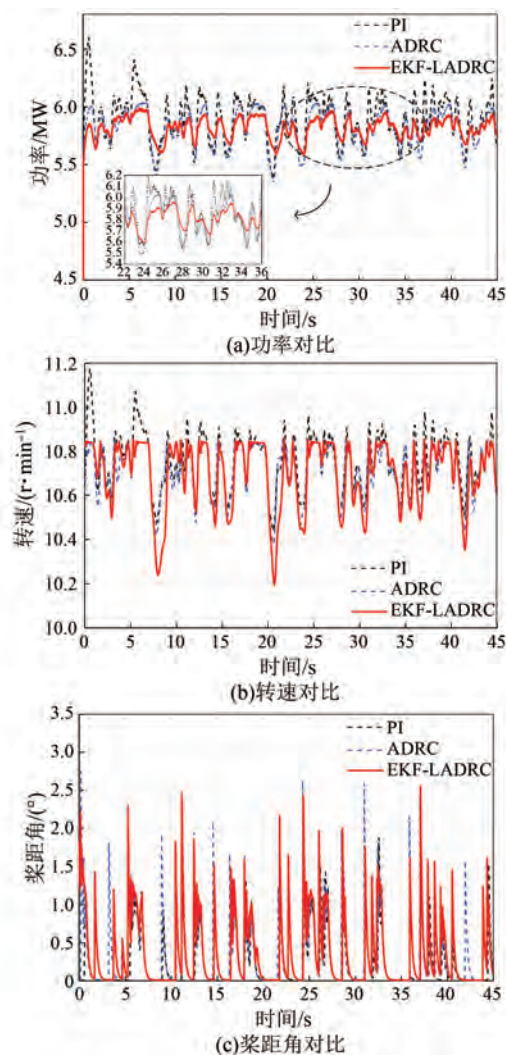


图 8 额定风速区湍流环境下各指标对比结果

Fig. 8 Comparative results of various indicators under turbulence conditions in rated wind speed region

由图 8 可知,在额定风速区湍流工况下,风电机组面临功率波动大、机械载荷高及执行机构频繁动作等问题。本文所提 EKF-LADRC 策略显著降低了系统输出功率的波动。

综上可得,本文策略在应对高湍流风况时展现出显著优势。在额定风速区,相较于传统 PI 控制与 ADRC,本文策略通过转子动能自适应调节与 EKF 的协同作用,实现了更精确的扰动估计与补偿,使其能够快速响应风速突变并抑制高频扰动,从而使功率输出更平稳;在高风速区,本文策略控制效果更佳,当遭遇风速骤变时,传统 ADRC 因观测器带宽固定导致扰动估计延迟,引发约 1.3% 的功率超调,而本文控制器设计使超调现象

大幅降低。这些特性使得本文策略更适用于海上风电场等强湍流环境,为高比例可再生能源电网中的频率稳定问题提供了新的解决方案。

4 结语

本文提出了一种基于 EKF 的转子动能状态估计与 LADRC 相结合的风机功率平滑策略。该策略在高湍流风况下展现出显著的控制优势。与传统 PI 控制和 ADRC 的仿真对比结果表明,在不同风况条件下,本文所提策略具有显著优势。相比传统单一控制方法,该策略能够更好地实现风力发电机组平稳的功率输出,降低功率波动幅度;同时可有效抑制极端湍流工况下的功率波动,显著提升了系统的抗干扰能力和鲁棒性,为风力发电机组的安全稳定运行提供了可靠保障。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

黄蕾、徐帅奇进行了方案设计、仿真研究、内容总结与论文撰写,朱瑛参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, simulation study, content summary and paper writing were carried out by Huang Lei and Xu Shuaiqi. The manuscript was reviewed and revised by Zhu Ying. All authors have read and approved the final version of the manuscript for submission.

参考文献

- [1] 洪国庆, 吴国旻, 金宇清, 等. 电力系统风力发电建模与仿真研究综述[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(17): 22-36.
- [2] 朱瑛, 高云波, 臧海洋, 等. 风电机组输出功率平滑技术综述[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(18): 182-191.

- [3] LEE J, MULJADI E, SRENSSEN P, et al. Releasable kinetic energy-based inertial control of a DFIG wind power plant [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(1): 279-288.
- [4] 文立斌, 胡弘, 孙志媛, 等. 基于转子动能的双馈风机频率支撑优化方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2024, 36(2): 19-25.
- [5] 朱元振, 苗伟威, 鲍冠南, 等. 基于风电可用转子动能评估的频率支撑需求优化分配策略[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(12): 94-103.
- [6] ZHU Y Z, MIAO W W, BAO G N, et al. Optimal allocation strategy of frequency support demand based on assessing wind power available rotor kinetic energy [J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(12): 94-103.
- [7] ZHANG Y Z, LIU X D, LI H T, et al. A model independent predictive control of PMSG wind turbine systems with a new mechanism to update variables [J]. Energies, 2023, 16(9): 3764-3772.
- [8] TANG Y F, YANG P, YANG Y, et al. Fuzzy adaptive frequency support control strategy for wind turbines with improved rotor speed recovery [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2024, 15(2): 1351-1364.
- [9] SARKAR S, CHEN L, FITZGERALD B, et al. Multi-resolution wavelet pitch controller for spar-type floating offshore wind turbines including wave-current interactions [J]. Journal of Sound and Vibration, 2020, 442(2): 430-442.
- [10] MAGNUS D M, SCHARLAU C C, PFITSCHER L L, et al. A novel approach for robust control design of hidden synthetic inertia for variable speed wind turbines [J]. Electric Power Systems Research, 2021, 196(6): 196-210.
- [11] HUR S H. Short-term wind speed prediction using extended Kalman filter and machine learning [J]. Energy Reports, 2021, 2(7): 1046-1054.
- [12] GARMAT A, GUESMI K. Unscented Kalman filter-

- based control strategy for wind turbine systems [J]. International Journal of Automation and Control, 2023, 17(6): 613-634.
- [12] 庄吉霓. 风电机组有功功率自抗扰控制策略设计及仿真研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
- ZHUANG J N. Research on strategy design and Simulink of active disturbance rejection control for wind turbines active power control [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023.
- [13] 祝可可, 阮琳. 永磁直驱风力发电机自抗扰技术及其无位置传感器控制策略[J]. 太阳能学报, 2022, 43(10): 266-274.
- ZHU K K, RUAN L. Active disturbance rejection technology for permanent magnet direct drive wind generator and its position sensorless control strategy [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2022, 43(10): 266-274.
- [14] 马毓敏, 赵南南, 刘金颂, 等. 永磁直驱风力发电机非奇异终端滑模控制[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(3): 86-94.
- MA Y M, ZHAO N N, LIU J S, et al. Permanent magnet direct drive wind generator control based on non-singular terminal sliding mode [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(3): 86-94.
- [15] 张强, 侯涛. 基于 T-S 模糊加权的风电机组变桨距的双模切换优化控制[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(7): 122-126.
- ZHANG Q, HOU T. Variable pitch double mode switching optimal control of wind turbines based on T-S fuzzy weighted [J]. Electric Machines & Control Application, 2018, 45(7): 122-126.
- [16] 付兴贺, 顾胜东, 熊嘉鑫. 永磁同步电机交直流电流解耦控制方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(1): 314-332.
- FU X H, GU S D, XIONG J X. Review of dq axis current decoupling strategy for permanent magnet synchronous motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(1): 314-332.
- [17] 赵南南, 杨旭, 邹琳, 等. 基于鲸鱼优化算法的风力发电机组变桨模糊控制策略[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(2): 80-89.
- ZHAO N N, YANG X, ZOU L, et al. Pitch fuzzy control strategy for wind turbines based on whale optimisation algorithm [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(2): 80-89.
- [18] MISHRA J, PATTNAIK M. On-line assessment of wind turbine emulator with pitch control mechanism [J]. Energy Systems, 2024, 15(2): 673-690.
- [19] JIA C Z, GENG H, LIU Y S, et al. Linear active disturbance rejection control for large onshore wind turbines in full wind speed range [J]. Control Engineering Practice, 2024, 15(1): 106-112.
- [20] 朱瑛, 王志聪, 石琦, 等. 基于转子动能调节的风电输出功率平滑控制策略比较与改进[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(22): 157-165.
- ZHU Y, WANG Z C, SHI Q, et al. Comparison and improvement of power smoothing control strategies for wind power output based on rotor kinetic energy adjustment for rotor [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(22): 157-165.
- [21] GONZALEZ-CAGIGAL M A, ROSENDO-MACIAS J A, GOMEZ-EXPOSITO A. Parameter estimation of wind turbines with PMSM using cubature Kalman filters [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3): 1796-1804.
- [22] 时隋翔, 刘瀚文, 王玉彬. 基于 EKF 的 IPMSM 无位置传感器控制估计误差补偿方法[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(8): 20-29.
- SHI S X, LIU H W, WANG Y B. Estimation error compensation method for sensorless control of interior permanent magnet synchronous motors based on extended Kalman filter [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(8): 20-29.
- [23] 张丽. 基于线性自抗扰的输出分布控制研究及其在风力发电中的应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
- ZHANG L. Research on output distribution control based on linear active disturbance rejection control and its application in wind power generation [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.

收稿日期: 2025-07-16

收到修改稿日期: 2025-08-13

作者简介:

黄 蕾 (1978-), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为新能源发电、电厂保护控制技术的研究与管理, 27304055@qq.com;

* 通信作者: 徐帅奇 (2001-), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电控制, 241606010034@hhu.edu.cn.