

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.05.008

抑制直驱风机宽频振荡的改进 ADRC 策略及其参数整定

余欣同¹, 武家辉¹, 李国栋²

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047;

2. 国网新疆综合能源服务有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:针对直驱风机与弱交流电网之间产生的宽频振荡问题,提出一种基于目标约束参数整定优化的改进自抗扰控制器(active disturbance rejection controller, ADRC)。首先,建立直驱风机并网模型,分析宽频振荡产生机理,进行网侧换流器内 ADRC 设计;然后,为解决 ADRC 参数整定困难的问题,同时为提高系统稳定性和快速响应性,建立含入网频率误差及系统调节时间的多目标优化函数,结合全局搜索寻优的方法实现改进 ADRC 的参数整定,提高 ADRC 参数设计的快速性、准确性和合理性;最后,基于 MATLAB/Simulink 仿真软件,对比分析基于传统带宽法和文中方法所设计的控制器参数的宽频振荡抑制效果。相较于采用带宽法整定的参数,文中方法整定后系统的超调量、调节时间、并网电流谐波含量都有所降低。结果表明,采用改进 ADRC 策略可以使直驱风机并网系统获得更好的动态响应特性、抗扰性和并网电流质量。

关键词:弱电网;直驱风机;宽频振荡;改进自抗扰控制器(ADRC);网侧换流器;系统稳定性

中图分类号:TM712

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2025)05-0090-10

0 引言

随着全球范围内可再生能源在电力系统中应用的不断增长^[1-3],以及国家对风力发电的大力发展,越来越多的大容量风电场接入电网。但大规模风电场的接入引发了谐波、电能质量下降、故障穿越能力下降等影响系统稳定性的重要问题^[4]。目前,国内外已出现多起新能源频繁并网引发的宽频振荡事件,在美国德州双馈风电场^[5]和中国的沽源双馈风电场^[6]都有出现。2015年,新疆哈密的直驱风电场站出现重大的频率失稳问题,造成大量火电机组停机,经济损失巨大^[7]。研究表明,这种现象的发生主要是因为直驱风机网侧换流器与电网之间的相互作用,且电网强度越小,相互作用越强^[8-9]。而风电场基本位于电网强度较弱的电网末端,因此,研究弱电网下直驱风电场宽频振荡抑制策略,对新能源的稳定送出具有重要现实意义。

目前,针对此类问题的抑制策略可以分为3类。第一类通过优化系统控制参数降低风险。文献[10]提出一种锁相环(phase locked loop, PLL)参数优化方法,解决弱电网下并网逆变器失稳问题;文献[11]提出一种正交实验法与响应面法相结合的多参数耦合优化设计策略,对电网侧控制器、转子侧控制器和 PLL 的比例系数和积分系数进行优化,实现系统宽频振荡抑制。优化控制器参数可以

减小宽频振荡现象的发生概率,但同时也会影响原本的控制效果。第二类通过引入附加控制器抑制宽频振荡。文献[12]附加栅极控制串联电容器,并根据风速和实测线电流与参考线电流之间的误差计算附加控制器的增益,从而确保系统稳定;文献[13]通过附加有源频率支持控制减少风光热耦合系统次同步振荡发生风险。引入附加阻尼器可以改善并网系统的动态响应特性,有效抑制宽频振荡,但阻尼控制器的设计和参数调整较为复杂,耗时较长,且附加阻尼器通常应用于特定的情况,不适用于工况多变引发的振荡。第三类通过采用先进控制策略部分或全部替换原有控制策略减少振荡失稳发生风险。文献[14]采用反馈线性化滑模控制替换直驱风机网侧和柔直整流器中比例积分(proportional integral, PI)控制器,有效解决直驱风电场的次同步振荡问题,但反馈线性化控制注重系统精确建模,且鲁棒性较差;文献[15]采用构网型控制方式抑制风电机组振荡失稳,但引入构网型控制后,须合理设计控制参数,从而满足功率支撑和振荡抑制的双重需求。此外,文献[16]提出采用自抗扰控制器(active disturbance rejection controller, ADRC)代替网侧换流器中的 PI 控制器。ADRC 是继承并发展 PI 控制优点的控制方式^[17],其不依赖于被控过程模型,对于随机性强的直驱风机并网系统,可以有效抑制振荡,能适应多种工况,鲁棒性强,但 ADRC 参数通常难以整定。

ADRC 主要由状态观测器(linear extended state observer, LESO)和线性状态误差反馈(linear state

收稿日期:2025-03-12;修回日期:2025-05-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52167016);新疆维吾尔自治区重点实验室开放课题(2023D04071)

error feedback, LSEF)组成。其中,LESO 能对扰动进行实时估计与补偿,通过识别并纠正扰动,增强系统对扰动的抵抗能力。一阶 ADRC 包含 3 个待整定参数,即 LESO 增益参数以及 LSEF 控制参数,这些参数共同决定 ADRC 系统的稳定性^[18-20]。部分有工程经验的研究者通过试凑法确定这些参数,但是这种方法不仅需要耗费大量的时间而且要求丰富的理论和实践经验。基于此,文献[21]提出一种带宽整定法,将原本需要整定的众多控制器参数与系统带宽相关联,进行归一化处理。但带宽整定法整定的参数之间存在着固定的数值关系,限制了参数取值范围,导致系统无法获得最佳性能。所以,在确定 ADRC 参数时,需要综合考虑系统性能,使系统在速度、精度和稳定性之间取得最佳平衡。

为了整定控制器的最优参数,部分学者采用人工智能算法整定 ADRC 参数。文献[22]采用蜂群算法优化 ADRC 参数,提高控制系统的转速响应能力;文献[21]采用深度强化学习对 ADRC 参数进行自动整定,并验证该方法的可行性和有效性。人工智能算法可以整定出控制器最优参数,但人工智能算法结构复杂,实现困难,并且在求解参数过多时容易造成智能算法的解空间维度过高,使计算复杂度和寻优难度增加。所以,人工智能算法在自动整定控制器参数方面的优势并不明显。

综上,针对传统带宽法和人工智能算法在 ADRC 参数整定方面的不足,文中建立直驱风机并网模型,分析宽频振荡产生机理和 ADRC 抑制策略原理,提出一种目标优化函数和全局搜索寻优相结合的方法优化改进 ADRC 参数,从而抑制直驱风机并网系统宽频振荡。

1 直驱风机并网系统建模

直驱式风电机组主要由风机、永磁同步发电机(permanent magnet synchronous generator, PMSG)、

机侧换流器、网侧换流器及其控制环节构成^[23]。采用脉宽调制(pulse width modulation, PWM)全功率变换器的直驱风电机组并网等值模型如图 1 所示。

图 1 中, i_{abc} 为并网点三相电流; i_{dq} 为并网点电流的 dq 轴分量; u_{abc} 为并网点三相电压; u_{dq} 为并网点电压的 dq 轴分量; ω_r 、 ω_{ref} 分别为风机角速度及其参考值; ω 为电网同步角速度; i_{sabc} 为定子三相电流; i_{sdq} 为定子电流的 dq 轴分量; i_{sdref} 、 i_{sqref} 分别为定子电流的 d 、 q 轴分量参考值; u_{sabc} 为定子三相电压; u_{sdq} 为定子电压的 dq 轴分量; u_{dc} 、 u_{dcref} 分别为系统直流侧电压及其参考值; θ 为 PLL 输出相角; L_f 、 L_g 分别为滤波电感和电网电感; u_{psd} 、 u_{psq} 分别为机侧换流器输出电压的 d 、 q 轴分量; u_{psabc} 为机侧换流器输出三相电压; ω_s 、 Ψ_f 分别为 PMSG 同步角速度和转子磁链; L_s 为定子上电感值; u_{pd} 、 u_{pq} 分别为网侧换流器输出电压的 d 、 q 轴分量; u_{pabc} 为网侧换流器输出三相电压; i_{dref} 、 i_{qref} 分别为并网点电流的 d 、 q 轴分量参考值。

直驱风机采用背靠背换流器与电网相连,并通过换流器控制风机输送到电网的功率^[24]。

机侧换流器主要实现对风机输出的最大功率跟踪控制^[22],其数学模型可表示为:

$$\begin{cases} u_{psd} = (i_{sdref} - i_{sd}) \left(k_{spd} + \frac{k_{sid}}{s} \right) - \omega_s L_s i_{sq} \\ u_{psq} = (i_{sqref} - i_{sq}) \left(k_{spq} + \frac{k_{siq}}{s} \right) + \omega_s L_s i_{sd} + \omega_s \Psi_f \end{cases} \quad (1)$$

式中: k_{spd} 、 k_{spq} 、 k_{sid} 、 k_{siq} 分别为机侧变流器内 PI 调节器 d 、 q 轴比例、积分系数。

网侧换流器主要用于维持直流侧母线电压的稳定和满足电网对风力发电机的无功功率的要求,其数学模型可表示为:

$$\begin{cases} u_{pd} = (i_{dref} - i_d) \left(k_{gpd} + \frac{k_{gid}}{s} \right) - \omega L_f i_q + u_d \\ u_{pq} = (i_{qref} - i_q) \left(k_{gpq} + \frac{k_{qiq}}{s} \right) + \omega L_f i_d + u_q \end{cases} \quad (2)$$

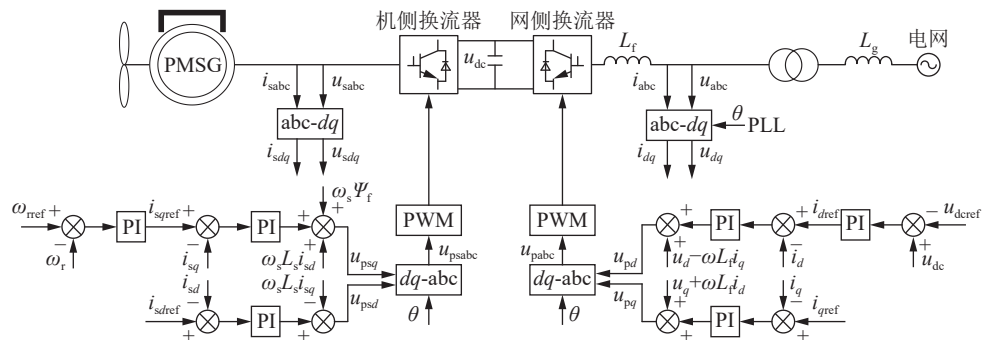


图 1 直驱风机并网模型及其控制结构

Fig.1 Direct-drive wind turbine grid-connected model and its control structure

式中: k_{gpd} 、 k_{gpq} 、 k_{gid} 、 k_{giq} 分别为网侧换流器内 PI 调节器 d 、 q 轴比例、积分系数。

2 电流内环主导的振荡形成机理

研究表明,直驱风机并网宽频振荡主要是直驱风机网侧换流器及其控制器系统与电网之间的相互作用引起的^[8]。

直驱风机接入弱电网时,相当于在线路中投入电网电感 L_g 。投入电感后,首先,由于电网电感较高,电流响应缓慢,会在并网点产生电流波动 Δi ;其次,电流波动 Δi 直接影响并网点电压,产生电压波动 Δu ;随后,电流波动 Δi 与电压波动 Δu 经过 PLL,使得 PLL 的输出角度增加相位偏移角 $\Delta\theta$ ^[25-26]。网侧换流器中电流内环通常时间常数较小,可以快速响应电流波动,而电压外环响应相对较慢,难以迅速补偿电网中的波动。所以,线路上的电流波动 Δi 与相位偏移角 $\Delta\theta$ 通过电流内环的 PI 控制器后,网侧换流器会产生新的波动分量 Δi^* 、 Δu^* 、 $\Delta\theta^*$,新的电流波动与原始电流波动不断叠加,最终导致系统出现频率失稳现象。扰动分量的反馈路径如图 2 所示,其中 Δi_d 、 Δi_q 、 Δu_d 、 Δu_q 分别为并网点电流波动和电压波动的 d 、 q 轴分量。

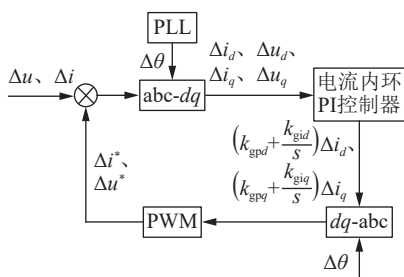


图 2 扰动分量反馈路径

Fig.2 Disturbance component feedback path

根据图 1 中网侧换流器控制环节和图 2,扰动方程可表示为:

$$\begin{cases} \Delta u_{pd} = \left(k_{\text{gpd}} + \frac{k_{\text{gid}}}{s}\right) \Delta i_d - \omega L_f \Delta i_q + \Delta u_d \\ \Delta u_{pq} = \left(k_{\text{gpq}} + \frac{k_{\text{giq}}}{s}\right) \Delta i_q + \omega L_f \Delta i_d + \Delta u_q \end{cases} \quad (3)$$

式中: Δu_{pd} 、 Δu_{pq} 分别为网侧换流器电压扰动的 d 、 q 轴分量。

从式(3)可以看出,线路上产生的扰动电流分量,经网侧换流器电流内环 PI 环节放大,在换流器的输出电压上叠加新的扰动分量,如此循环叠加,导致系统失稳。由此可知,若 PI 参数选取不当,严重时会导致频率失稳。

根据上述分析可知,当 PI 控制器的参数设置不

恰当时,对扰动有放大作用,会加剧系统不稳定。而 ADRC 相较于 PI 具有更好的抗干扰能力,能提高系统的稳定性。因此,对于直驱风机的宽频振荡问题,采用 ADRC 可以显著改善系统性能,减轻振荡,提高电力系统的可靠性。

3 自抗扰控制策略分析

3.1 ADRC 抑制宽频振荡原理

根据文献^[27],当直驱风机接入电网并稳定运行时,其网侧换流器电流为:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{u_{pd}}{L_f} + \omega i_q - \frac{u_d}{L_f} \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{u_{pq}}{L_f} - \omega i_d - \frac{u_q}{L_f} \end{cases} \quad (4)$$

而当直驱风机接入弱电网时,相当于线路上产生扰动电流,则式(4)可改为:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{u_{pd} + \Delta u_{pd}}{L_f} + \omega(i_q + \Delta i_q) - \frac{u_d + \Delta u_d}{L_f} - \frac{d\Delta i_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{u_{pq} + \Delta u_{pq}}{L_f} - \omega(i_d + \Delta i_d) - \frac{u_q + \Delta u_q}{L_f} - \frac{d\Delta i_q}{dt} \end{cases} \quad (5)$$

令 d 、 q 轴扰动分量分别为 F_d 、 F_q , 则:

$$\begin{cases} F_d = \frac{\Delta u_{pd}}{L_f} + \omega \Delta i_q - \frac{\Delta u_d}{L_f} - \frac{d\Delta i_d}{dt} \\ F_q = \frac{\Delta u_{pq}}{L_f} - \omega \Delta i_d - \frac{\Delta u_q}{L_f} - \frac{d\Delta i_q}{dt} \end{cases} \quad (6)$$

故式(5)可改写为:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{u_{pd}}{L_f} + \omega i_q - \frac{u_d}{L_f} + F_d \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{u_{pq}}{L_f} - \omega i_d - \frac{u_q}{L_f} + F_q \end{cases} \quad (7)$$

采用 ADRC 替换电流内环 PI 控制器后,ADRC 可以对 d 、 q 轴扰动分量 F_d 和 F_q 进行实时估计,并可在网侧换流器输出电压上对其进行实时补偿,抑制并入弱电网引起的扰动分量。因此,通过 ADRC 后的电流可表示为:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{u_{pd}}{L_f} + \omega i_q - \frac{u_d + L_f F_d}{L_f} + F_d = \frac{u_{pd}}{L_f} + \omega i_q - \frac{u_d}{L_f} \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{u_{pq}}{L_f} - \omega i_d - \frac{u_q + L_f F_q}{L_f} + F_q = \frac{u_{pq}}{L_f} - \omega i_d - \frac{u_q}{L_f} \end{cases} \quad (8)$$

对比式(4)和式(8)发现,采用 ADRC 替换电流内环 PI 控制器后,通过控制环节的调整,直驱风机不会输出扰动分量,从而防止风机输出电流受到弱交流电网的影响。因此,通过 ADRC 对扰动分量进行补偿,可以抑制扰动分量,从而达到增强系统稳定性的预期效果。

3.2 直驱风机网侧换流器 ADRC 设计

ADRC 是吸收现代控制理论成果并对比例-积分-微分(proportional-integral-derivative, PID)思想精髓继承和发展的新型实用技术^[28]。ADRC 可以通过基于系统状态的估计调整控制输入,实现期望的系统性能^[29]。式(4)为一阶状态方程,可知 ADRC 只需设置为一阶,其控制结构如图 3 所示。

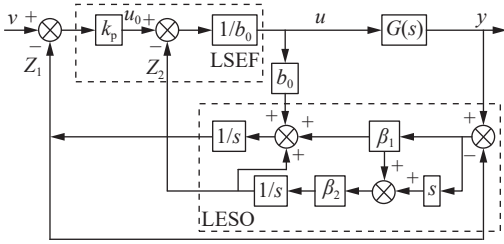


图 3 一阶 ADRC 控制结构

Fig.3 First-order ADRC control structure

图 3 中, Z_1 为系统输出 y 的实时观测值; Z_2 为系统总扰动的实时估计值; u 为观测器输入信号; b_0 为系统增益; β_1 、 β_2 为观测器可调增益; v 为控制器的输入信号; k_p 为 LSEF 中比例系数; u_0 为中间变量; $G(s)$ 为传递函数。

将式(7)按照一阶 ADRC 范式整理可得:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{u_{pd}}{L_f} + \omega i_q - \frac{u_d}{L_f} + F_d = b_0 u_d + f_{id} + f_{sd} \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{u_{pq}}{L_f} - \omega i_d - \frac{u_q}{L_f} + F_q = b_0 u_q + f_{iq} + f_{sq} \end{cases} \quad (9)$$

式中: f_{id} 、 f_{iq} 分别为系统内部扰动 d 、 q 轴分量,包含系统内部耦合项和参数摄动项; f_{sd} 、 f_{sq} 分别为系统外部扰动 d 、 q 轴分量,包含来自电网的扰动和未知扰动。

以 d 轴为例,令 d 轴总扰动 $f_d = f_{id} + f_{sd}$,则式(9)可改写为:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = b_0 u_d + f_{id} + f_{sd} = b_0 u_d + f_d \\ \frac{di_q}{dt} = b_0 u_q + f_{iq} + f_{sq} = b_0 u_q + f_q \end{cases} \quad (10)$$

在实际情况下,系统的总扰动通常难以确定,但 LESO 可以估计出系统的总扰动^[25]。因此,文中根据文献[30]提出的新型 LESO 设计理念,实现对直驱风机并网系统并网点电流的实时跟踪和系统总扰动估计。LESO 可设计为:

$$\begin{cases} e(t) = Z_1 - y \\ \dot{Z}_1 = Z_2 - \beta_1 e(t) + b_0 u \\ \dot{Z}_2 = -\beta_2 (\dot{e}(t) + \beta_1 e(t)) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $e(t)$ 为输出量 y 与观测值 Z_1 之间的误差。

LSEF 通过总扰动的实时估计值对系统进行实时补偿,进而减小扰动带来的影响^[25]。故 LSEF 及

扰动补偿环节可设计为:

$$\begin{cases} u_0 = k_p(v - Z_1) \\ u = \frac{u_0 - Z_2}{b_0} \end{cases} \quad (12)$$

采用图 3 所示的 ADRC 替换网侧换流器电流内环中的 PI 控制器即可完成自抗扰控制抑制宽频振荡的策略设计。

4 基于目标约束改进的 ADRC 参数整定

带宽整定法的参数之间存在固定的数值关系,导致抑制效果难以达到最佳。目标优化函数能够准确描述所期望的性能指标,全局搜索寻优方法能够在参数空间中全面搜索,以找到最优参数配置,实现更高的控制性能。因此,针对 ADRC 参数整定,文中提出一种目标优化函数和全局搜索寻优相结合的改进 ADRC 参数整定方法。

采用误差积分指标作为参数整定的性能指标时,等价于计算系统中的待定参数,使得指标积分数值最小。按照时间乘以绝对误差积分准则为性能指标设计系统,则系统瞬态响应的振荡性小,且对参数具有良好的选择性^[31]。为追求直驱并网风机的动态特性,文中以时间乘以绝对误差积分准则为性能指标设计控制器,建立的 ADRC 评价指标 J 计算如下:

$$J = \int_0^T \omega_1 t |e_f(t)| dt + \omega_2 t_s \quad (13)$$

式中: T 为调节周期; $e_f(t)$ 为并网点频率瞬时误差; t_s 为系统调节时间; ω_1 、 ω_2 为权值。

则目标优化函数如下:

$$\begin{cases} \min J = \min \int_0^T \omega_1 t |e_f(t)| dt + \omega_2 t_s \\ \text{s.t. } \beta_1 \in (\beta_{1,\min}, \beta_{1,\max}) \\ \beta_2 \in (\beta_{2,\min}, \beta_{2,\max}) \\ k_p \in (k_{p,\min}, k_{p,\max}) \end{cases} \quad (14)$$

式中:下标 min、max 分别为相应参数的最小值和最大值。

为了能够实现对 ADRC 参数的整定优化调整,同时考虑到直驱风机并网系统的实时动态变化,文中提出采用全局迭代寻优的方法,即不断模拟调整参数组合,并根据控制器评价指标不断修正参数,再将参数赋值给直驱风机并网系统,从而完成改进 ADRC 参数整定。

控制器评价指标 J 始终有个最小值,优化参数后得到的 J 越接近最小值,则 ADRC 控制效果越好,因此,改进 ADRC 的参数整定问题可简化为一个高维函数求最小值的问题。文中设计的基于目标优化函数和全局搜索寻优的改进 ADRC 参数整

定方法流程如图4所示。

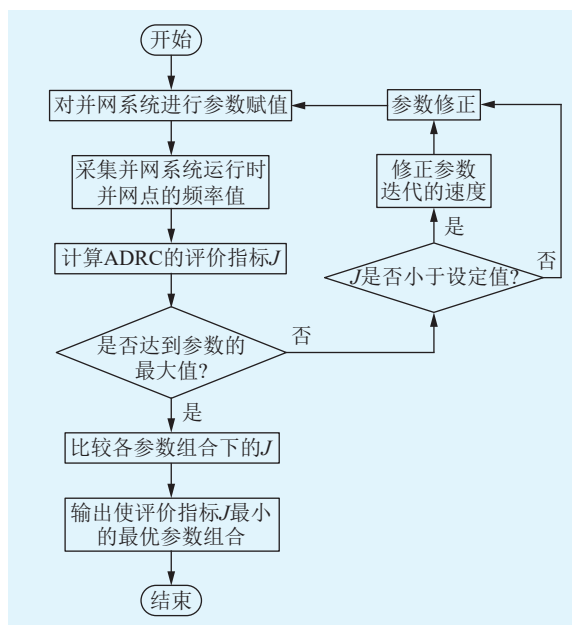


图4 基于目标优化函数和全局搜索寻优的参数整定流程
Fig.4 Flow chart of parameter tuning method based on global iterative optimization and target objective function

基于目标优化函数和全局迭代寻优的改进ADRC参数整定具体步骤如下。

(1) 设置 β_1 、 β_2 、 k_p 的允许取值范围, 根据每个参数对系统性能的影响程度, 确定各个参数的迭代速度, 故目标优化函数可变化为:

$$\begin{cases} \min J = \min \int_0^T \omega_1 t |e_i(t)| dt + \omega_2 t_s \\ \text{s.t. } \beta_1 \in (\beta_{1,\min}, h_1, \beta_{1,\max}) \\ \beta_2 \in (\beta_{2,\min}, h_2, \beta_{2,\max}) \\ k_p \in (k_{p,\min}, h_3, k_{p,\max}) \end{cases} \quad (15)$$

式中: h_1 、 h_2 、 h_3 分别为 β_1 、 β_2 、 k_p 的取值间隔。

(2) 根据各参数不同的迭代速度, 组合参数, 并将参数代入系统中。将整个直驱风机并网系统作为整体, 在系统运行过程中, 持续采集直驱风机并网实时频率数据。频率值直接反映并网系统的稳定性和性能, 故选择频率值作为优化过程中评估系统性能的关键指标。

(3) 按照参数更新公式:

$$\begin{cases} \beta_{1,i+1} = \beta_{1,i} + w h_1 \\ \beta_{2,i+1} = \beta_{2,i} + w h_2 \\ k_{p,i+1} = k_{p,i} + w h_3 \end{cases} \quad (16)$$

$$w = \begin{cases} 1 & |J| \geq 10 \\ 0.1 & |J| < 10 \end{cases} \quad (17)$$

式中: $\beta_{1,i}$ 、 $\beta_{2,i}$ 、 $k_{p,i}$ 分别为第 i 次参数更新后的参数值, $i=1, 2, \dots$; w 为权重, 调节参数的迭代速度, 当 J 小于设定值时, 减小参数迭代速度, 从而扩大参数的搜索范围。

采集各参数组合下, 并网系统运行后的频率值, 比较不同参数组合的评价指标, 以确定 J 最小时对应的参数组合。

(4) 得到一组参数, 使得直驱风机并网系统在运行时间内能够满足目标优化函数, 实现系统的最佳性能。

综上所述即可得到文中设计的抑制弱电网下直驱风机宽频振荡的改进ADRC控制策略。整体系统结构如图5所示。

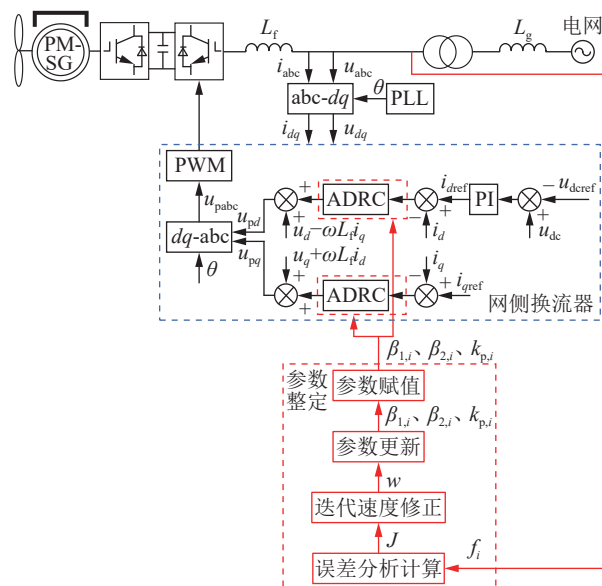


图5 基于目标函数优化的改进ADRC参数整定结构框图
Fig.5 Structure diagram for improved ADRC parameter tuning based on target optimization function

图5中, f_i 为第 i 次参数更新后并网点频率, 参数整定模块依据并网点频率计算性能指标并更新ADRC参数。

5 仿真实证

为验证文中所提改进ADRC控制策略的有效性和适应性, 在MATLAB/Simulink中建立如图5所示的等值模型。对改进ADRC控制策略加入后系统的动态特性、适应性进行对比分析。仿真系统部分参数见表1。

对于一阶ADRC, 通过极点配置, 即可确定LESO参数为 $\beta_1=2\omega_0$ 、 $\beta_2=\omega_0^2$, LSEF参数 $k_p=\omega_c$ 。其中, ω_0 为观测器带宽, ω_c 为控制器带宽, 且通常情况下, ω_0 为 ω_c 的1~3倍。改进ADRC控制策略须通过迭代运行确定满足目标优化函数的最优参数, 令 $\beta_1 \in (5\ 000, 7\ 000)$, $\beta_2 \in (8 \times 10^6, 10^7)$, $k_p \in (900, 2\ 000)$, 最大取值间隔分别为100, 10^5 , 10, 结合式(15)所示目标优化函数, 得出初步控制器参数, 根据初步控制器参数缩小参数取值范围和取值间隔,

表 1 直驱风机并网系统参数

Table 1 Parameters of the direct-drive wind turbine grid connection system

参数	数值
风机额定功率 P/MW	2
直流侧额定电压 u_{dc}/V	1 200
直流侧电容 $C_{dc}/\mu F$	60 000
网侧滤波电感 L_f/mH	0.38
网侧电压 u_{abc}/V	690

最终得出最优参数。由此可以得到传统带宽法和改进 ADRC 参数整定法的参数取值,如表 2 所示。

表 2 ADRC 参数

Table 2 ADRC parameters

方法	β_1	β_2	k_p
带宽法ADRC	6 000	9 000 000	1 000
改进ADRC	5 844	9 239 600	1 606

5.1 控制策略有效性验证

设置直驱风机的风速为 8 m/s, 电网电感 L_g 不投入并网系统, 待风电场出力稳定后, 在 2.5 s 时, L_g 投入并网系统。设置 $L_g=0.000\ 29\ H$, 经过短路比公式计算, 可得短路比为 2.6, 属于弱交流电网。投入电网电感后, 系统出现失稳现象。对比 PI、带宽法 ADRC 和改进 ADRC 3 种控制策略下系统的运行特性。仿真结果如图 6 所示。

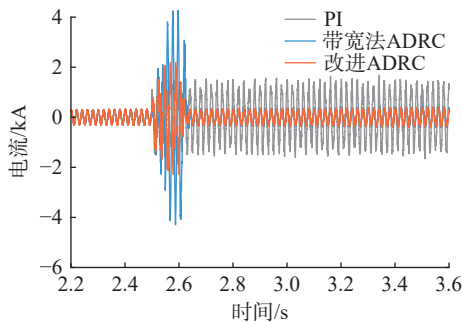


图 6 电感突变时的并网点 A 相电流波形

Fig.6 Current waveforms of phase A at the point of grid connection when inductance changes

由图 6 可知, 不改变控制方式, 当直驱风机接入弱交流电网时, 由于 PI 控制器对扰动分量的叠加作用, 风机并网点电流会产生振荡幅度较大的扰动电流, 导致系统失去稳定性。采用 ADRC 控制时, 电流波动和频率失稳现象得到了很好的抑制, 但由于传统带宽法整定参数存在一定局限性, 导致网侧换流器在进入稳态时存在较大波动; 采用改进 ADRC 策略后, 波动范围和系统调节时间都有所减小。经测量, 波动范围如表 3 所示。此时 ADRC 中 LESO 的扰动信号估计波形如图 7 所示。

表 3 电感突变时波动范围

Table 3 Fluctuation range when inductance changes

方法	并网点A相电流/A	调节时间/s
带宽法ADRC	-4 855.97~4 220.47	0.25
改进ADRC	-2 270.25~2 180.38	0.13

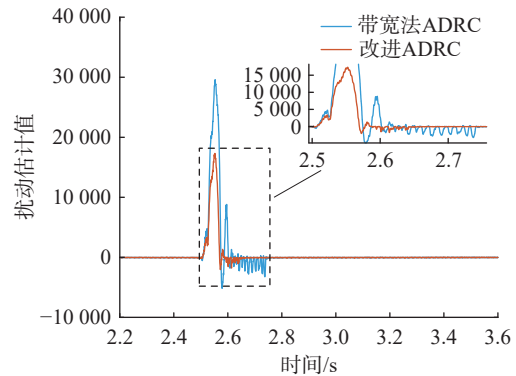


图 7 ADRC 扰动信号输出波形

Fig.7 ADRC perturbation signal output waveform

由图 7 可知, 相较于传统带宽法整定的 ADRC, 改进 ADRC 策略下, 扰动信号的观测速度较快, 精度较高。

分别对 3 种控制策略下并网点 A 相电流进行频谱分析, 得到各控制策略下的总谐波失真 (total harmonic distortion, THD) 含量, 结果如图 8 所示。

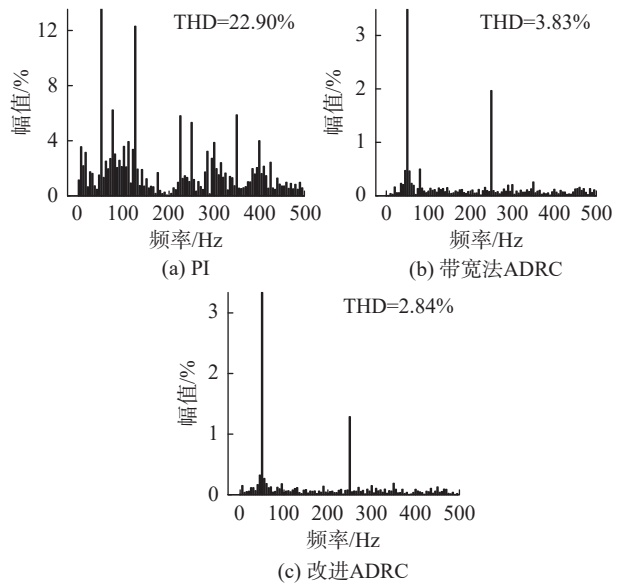


图 8 电感突变时并网点 A 相电流频谱分析

Fig.8 Spectrum analysis of phase A current at the point of grid connection when inductance changes

由图 8 可得, 在最优 PI 参数下, A 相电流的 THD 仍较大, 在 0~500 Hz 宽频段内存在较多的振荡频率分量, 不满足 IEEE 1547—2003 的并网标准; 采用 ADRC 后, A 相电流的 THD 小于 5%, 0~500 Hz 宽频段内振荡频率分量得到了抑制, 其中 300 Hz 以内的频率振荡分量得到了较强的抑制, 满足并网

标准。进一步对比图 8(b)、(c)可知,采用改进 ADRC 时, A 相并网电流的 THD 更小,入网电流质量更高。

电网强度是影响直驱风机发生宽频振荡的重要因素,通过改变电网电感的大小从而改变电网的强弱。设置直驱风机的风速为 8 m/s,电网电感 $L_g=0.000\ 19\ \text{H}$ 投入并网系统,此时短路比为 3.1,属于强电网。待风电场出力稳定后,在 4 s 时,增大电网电感 L_g 至 0.000 24 H,此时短路比为 2.8,属于弱电网,其动态响应曲线如图 9 所示。

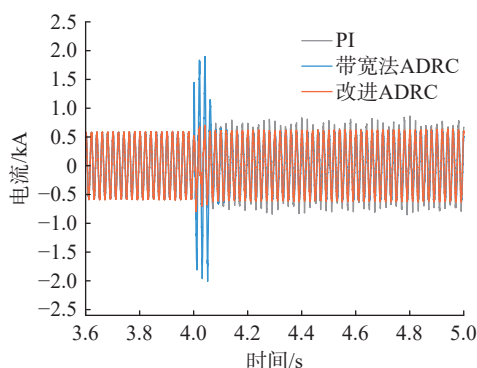


图 9 电网强度变化时并网 A 相电流波形
Fig.9 Current waveforms of phase A at the point of grid connection when grid strength changes

由图 9 可知,随着电网电感 L_g 的增大,电网由强电网转变为弱电网,PI 控制策略下系统失去稳定性,而采用 ADRC 控制策略时,系统出现短暂的瞬态过程后恢复稳定,进一步验证了 ADRC 控制策略的有效性。

分别对 3 种控制策略下的并网 A 相电流进行频谱分析,得到 3 种控制策略下的 THD 含量,结果如图 10 所示。

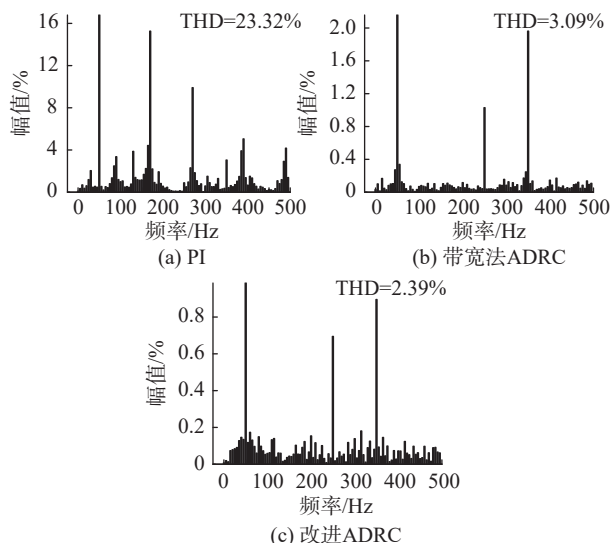


图 10 电网强度变化时并网 A 相电流频谱分析
Fig.10 Spectrum analysis of phase A current at the point of grid connection when grid strength changes

由图 10 可知,PI 控制策略下在 0~500 Hz 宽频段内存在较多的振荡频率分量和振荡模式,如振荡频率 170、270 Hz 等;而采用 ADRC 后,300 Hz 内宽频带振荡频率分量都得到了抑制,并且相较于传统带宽法 ADRC,采用改进 ADRC 时,振荡频率分量进一步减小,入网电流质量更高。

5.2 控制策略适应性验证

为验证所提抑制策略的适应性,对直驱风机不同出力工况和单相短路故障进行验证。

设置直驱风机风速为 7.5 m/s,此时直驱风机的出力为 17%,在 2.5 s 时, $L_g=0.000\ 26\ \text{H}$ 投入并网系统,2 种参数设计方法下风机输出有功功率对比结果如图 11(a)所示。设置直驱风机风速为 7 m/s,此时直驱风机的出力为 11%,在 2.5 s 时, L_g 投入并网系统,2 种参数设计方法下风机输出有功功率对比结果如图 11(b)所示。

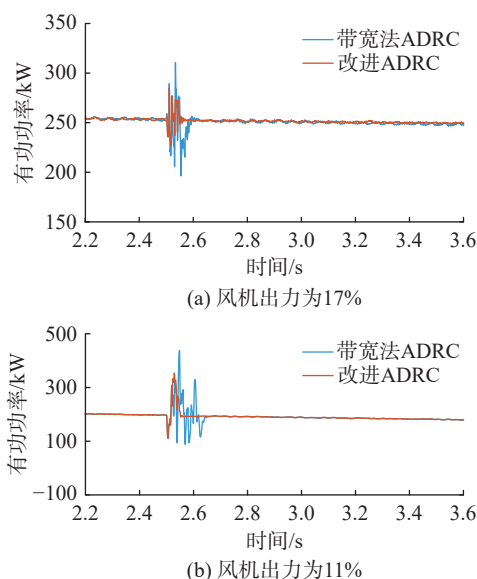


图 11 不同出力工况下风机有功功率
Fig.11 Active power of wind turbine under different output conditions

对比图 11(a)和图 11(b)可知,振荡强度随着出力的减小而增大。当风电机组有功出力改变时,ADRC 可有效抑制振荡,且相对于传统带宽法 ADRC,改进 ADRC 的调节时间和波动都有所减小。

单相短路故障是一种常见故障,在实际电力系统运行中时常发生。

设置直驱风机的风速为 8 m/s,在 2.5 s 时, L_g 投入并网系统,待系统出力稳定后,在 5 s 时,在变压器高压侧设置单相短路故障,持续 0.05 s,在不同控制策略下,风机入网电流波形如图 12 所示。

由图 12 可知,采用改进 ADRC 时,经过 2 s 后,系统恢复稳定;而采用传统带宽法整定的 ADRC

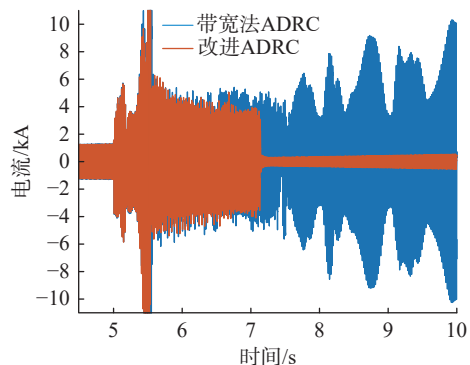


图 12 单相短路故障时并网点 A 相电流波形

Fig.12 Current waveforms of phase A at the point of grid connection in the event of a single-phase short fault

后,系统在单相短路故障时无法恢复至稳定。由此可得出,采用改进 ADRC 后并网系统的适应性更好。

5.3 控制策略频域验证

为了进一步验证控制策略的性能,在频域内进行验证。采用传统带宽法整定 ADRC 和改进 ADRC 时,直驱风机并网系统的环路增益 Bode 图如图 13 所示。

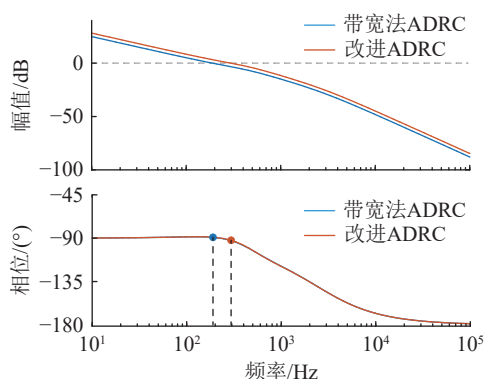


图 13 环路增益 Bode 图

Fig.13 Loop gain Bode plot

由图 13 可以看出,在不同方法整定的控制器参数下,并网系统都处于稳定状态,稳定裕度也相当,但采用改进 ADRC 的并网系统,系统的低频增益和交越频率较高。高低频增益可以提高系统的灵敏度,使其对低频扰动更敏感;高交越频率可以滤除高频噪声,并提高响应速度。所以,采用改进 ADRC 策略时,系统能更好地应对扰动,获得更好的稳定性,并且系统响应速度也有较大提升。

综上所述,通过 ADRC 替换,可以有效解决直驱风机并网弱电网引发的宽频振荡现象,且传统带宽法获得的参数并非是 ADRC 最佳参数,相比之下,文中所提改进 ADRC 策略可以进一步提高系统性能,并减少参数整定所需时间,有效解决 ADRC 参数整定困难的问题。

6 结论

文中针对直驱风机并网系统接入弱交流电网引发的宽频振荡问题,提出基于目标优化函数和全局搜索寻优相结合的改进 ADRC 参数整定策略,完成改进 ADRC 的设计,并通过仿真验证了所提方法的有效性。结论如下:

(1) 改进 ADRC 参数整定能有效解决 ADRC 参数整定困难的问题,实现参数快速、高效整定;

(2) 相较于传统带宽法整定参数的 ADRC,改进 ADRC 可以加快系统响应时间,降低超调量,提高并网电流质量;

(3) 改进 ADRC 策略可以有效抑制低频和次/超同步振荡的宽频带振荡现象,并且相较于传统带宽法整定参数的 ADRC,更能适应运行工况多变的系统。

参考文献:

- [1] 许洪华, 邵桂萍, 鄂春良, 等. 我国未来能源系统及能源转型现实路径研究[J]. 发电技术, 2023, 44(4): 484-491.
- [2] 刘洪波, 刘永发, 任阳, 等. 高风电渗透率下考虑系统风电备用容量的储能配置[J]. 发电技术, 2024, 45(2): 260-272.
- [3] 鲁翔, 陈立群, 李成博, 等. 基于阻抗分析的双馈风电场次同步振荡研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(2): 141-150,176.
- [4] 杨秀, 胡浩然, 李增尧, 等. 风电场交直流并网次/超同步振荡交互影响[J]. 电力建设, 2022, 43(1): 49-62.
- [5] HOLTINEN H, GROOM A, KENNEDY E, et al. Variable renewable energy integration: status around the world[J]. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2021, 19(6): 86-96.
- [6] 熊浩清, 何鹏飞, 孙冉, 等. 双馈风电场无串补并网振荡场景及关键影响因素研究[J]. 高电压技术, 2024, 50(2): 660-672.
- [7] XIONG Haoqing, HE Pengfei, SUN Ran, et al. Oscillation

- scenarios of grid integrated wind farm with DFIGs without series compensation and effects of key factors[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(2): 660-672.
- [7] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(8): 2806-2819.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [8] ZHANG Y, TIAN M Q, ZHANG H, et al. Admittance modeling and stability enhancement of grid-connected inverter considering frequency coupling in weak grids[J]. *Electric Power Systems Research*, 2022, 209: 108034.
- [9] 卓振宇, 张宁, 谢小荣, 等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(9): 171-191.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(9): 171-191.
- [10] 闫培雷, 葛兴来, 王惠民, 等. 弱电网下新能源并网逆变器锁相环参数优化设计方法[J]. *电网技术*, 2022, 46(6): 2210-2221.
YAN Peilei, GE Xinglai, WANG Huimin, et al. PLL parameter optimization design for renewable energy grid-connected inverters in weak grid[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(6): 2210-2221.
- [11] ZHANG Q, JIN X Y, ZHANG F, et al. Equivalent modeling and multi-parameter coupling optimization for DFIG-based wind farms considering SSO mode[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2023, 10: 1097185.
- [12] ABDEEN M, EL-BANNA S H A, ELGOHARY S, et al. Adaptive fuzzy supplementary controller for SSR damping in a series-compensated DFIG-based wind farm[J]. *IEEE Access*, 2022, 11: 1467-1476.
- [13] YAN C, YAO W, WEN J Y. Impact of active frequency support control of photovoltaic on PLL-based photovoltaic of wind-photovoltaic-thermal coupling system[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, 38(5): 4788-4799.
- [14] SHAO B B, ZHAO S Q, YANG Y H, et al. Nonlinear subsynchronous oscillation damping controller for direct-drive wind farms with VSC-HVDC systems[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2022, 10(3): 2842-2858.
- [15] 沈雅琦, 马静, 李鹏冲, 等. 含附加能量支路的虚拟同步双馈风机次同步振荡抑制策略[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(23): 83-93.
SHEN Yaqi, MA Jing, LI Pengchong, et al. Subsynchronous oscillation suppression strategy for virtual synchronous DFIG-based wind turbines with additional energy branch[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(23): 83-93.
- [16] 蔡维正, 郭昆丽, 刘璐雨, 等. 基于一阶 LADRC 控制的直驱风机次同步振荡抑制策略[J]. *中国电力*, 2022, 55(4): 175-184.
CAI Weizheng, GUO Kunli, LIU Luyu, et al. Subsynchronous oscillation mitigation strategy based on first-order LADRC for direct-drive wind turbines[J]. *Electric Power*, 2022, 55(4): 175-184.
- [17] 贺虎成, 徐景哲, 谭阜琛, 等. 基于自抗扰的感应电机无模型预测电流控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(13): 149-160.
HE Hucheng, XU Jingzhe, TAN Fuchen, et al. Active disturbance rejection control-based model free predictive current control for an induction motor[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(13): 149-160.
- [18] 程启明, 周伟成, 程尹曼, 等. 基于线性自抗扰控制的双馈风机次同步振荡抑制研究[J]. *电力建设*, 2024, 45(4): 134-146.
CHENG Qiming, ZHOU Weicheng, CHENG Yinman, et al. Research on suppressing sub-synchronous oscillation of doubly-fed induction generator based on linear active disturbance rejection control[J]. *Electric Power Construction*, 2024, 45(4): 134-146.
- [19] 马明, 廖鹏, 蔡雨希, 等. LCL 并网逆变器一阶自抗扰控制及基于粒子群优化的控制参数整定方法[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(11): 174-182.
MA Ming, LIAO Peng, CAI Yuxi, et al. First-order active disturbance rejection control and parameter tuning method based on particle swarm optimization for LCL grid-connected inverter[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(11): 174-182.
- [20] 周雪松, 周泳良, 马幼捷, 等. 风电并网逆变器的改进型线性自抗扰控制[J]. *电气传动*, 2022, 52(1): 46-53.
ZHOU Xuesong, ZHOU Yongliang, MA Youjie, et al. Improved linear active disturbance rejection control of wind power grid-connected inverter[J]. *Electric Drive*, 2022, 52(1): 46-53.
- [21] GAO Z Q, HUANG Y. Connecting theory and practice with ADRC[J]. *Control Theory and Technology*, 2023, 21(1): 1-3.
- [22] LI T, SUN S N, LI M J, et al. Intelligent ADRC-based inertia control for offshore wind farm[J]. *IET Generation Transmission & Distribution*, 2024, 18(3): 530-541.
- [23] 程东, 夏世威, 李庚银, 等. 含 SVG 的直驱风电场高频振荡分析及抑制策略[J]. *电力建设*, 2023, 44(12): 115-124.
CHENG Dong, XIA Shiwei, LI Gengyin, et al. Analysis and suppression strategy of high frequency oscillation in PMSG based wind farm with SVG[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(12): 115-124.
- [24] 龚凯, 肖昆庆, 张展, 等. 新能源并网换流器的自适应混合同步控制及其小信号稳定性分析[J]. *浙江电力*, 2024, 43(11): 3-14.
GONG Kai, XIAO Huangqing, ZHANG Zhan, et al. Adaptive hybrid synchronization control of grid-connected converters in renewable power plants and its small-signal stability analysis[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2024, 43(11): 3-14.

- [25] 聂飞, 徐海亮, 刘壮壮, 等. 弱电网下三相并网变流系统全线性自抗扰控制及其小干扰稳定性分析[J]. 高电压技术, 2022, 48(1): 199-209.
- NIE Fei, XU Hailiang, LIU Zhuangzhuang, et al. All LADRC control and small signal stability analysis of three-phase grid-connected converter system under weak AC grid condition[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 199-209.
- [26] 李博浩, 郭昆丽, 吕家君, 等. 弱电网下改进 LADRC 抑制直驱风机次同步振荡研究[J]. 中国电力, 2023, 56(4): 56-67.
- LI Bohao, GUO Kunli, LV Jiajun, et al. Inhibition of subsynchronous oscillation of direct-drive wind turbine by improved LADRC in weak grids[J]. Electric Power, 2023, 56(4): 56-67.
- [27] HEIDARY J, GHEISARNEJAD M, KHOOBAN M H. Stability enhancement and energy management of AC-DC micro-grid based on active disturbance rejection control[J]. *Electric Power Systems Research*, 2023, 217: 109105.
- [28] 范永胜, 陈卓, 郝勇生, 等. 基于相位补偿的过热汽温自抗扰控制[J]. 电力工程技术, 2024, 43(3): 254-261.
- FAN Yongsheng, CHEN Zhuo, HAO Yongsheng, et al. Phase compensation based active disturbance rejection control for superheated steam temperature[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(3): 254-261.
- [29] 高本锋, 易友川, 邵冰冰, 等. 基于自抗扰控制的直驱风电场次同步振荡抑制策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(9): 148-157.
- GAO Benfeng, YI Youchuan, SHAO Bingbing, et al. Subsynchronous oscillation mitigation strategy based on ADRC for D-PMSGs based wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 148-157.
- [30] MA Y J, SUN X T, ZHOU X S. Research on D-STATCOM double closed-loop control method based on improved first-order linear active disturbance rejection technology[J]. *Energies*, 2020, 13(15): 3958.
- [31] 廖看秋, 朱跃欧. 基于误差积分性能指标的悬浮系统仿真分析[J]. 电工技术, 2024(8): 75-78, 83.
- LIAO Kanqiu, ZHU Yueou. Simulation analysis of suspension system based on error integral performance index[J]. Electric Engineering, 2024(8): 75-78, 83.

作者简介:



余欣同

余欣同(1998), 男, 硕士在读, 研究方向为风电并网系统稳定性 (E-mail: 107552204482@stu.xju.edu.cn);

武家辉(1988), 女, 博士, 副教授, 研究方向为风电并网系统稳定性、复杂能源系统稳定分析与控制;

李国栋(1993), 男, 学士, 工程师, 从事能源网络与信息安全, 电力储能运行与发展工作。

An improved ADRC strategy and its parameter tuning for broadband oscillation suppression of direct-drive wind turbine

YU Xintong¹, WU Jiahui¹, LI Guodong²

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;

2. State Grid Xinjiang Integrated Energy Service Co., Ltd., Urumqi 830011, China)

Abstract: An improved active disturbance rejection controller (ADRC) suppression strategy is proposed to address the problem of broadband oscillation between the direct-drive wind turbine and the weak AC power grid. Firstly, the model of the direct-drive wind turbine connecting to grid is established, and the mechanism of broadband oscillation is analyzed. The ADRC design is conducted within the grid side converter. Secondly, a multi-objective optimization function is developed to tackle the difficulty of ADRC parameter tuning and improve system stability and response speed. The function includes the frequency error of the grid access and the adjustment time of the system. The parameter tuning of improved ADRC is realized by combining the method of global search and optimization to improve the rapidity, accuracy and rationality of the parameter design. Finally, MATLAB/Simulink simulations are used to compare the broadband oscillation suppression effects of controller parameters designed by the traditional bandwidth method with those from the proposed method. The overshoot, adjustment time, and harmonic content of the grid-connected current are reduced when the proposed method is applied. The results indicate that the improved ADRC strategy enables good dynamic response characteristics, noise immunity, and grid-connected current quality for the direct-drive turbine system.

Keywords: weak power grids; direct-drive wind turbine; broadband oscillation; improved active disturbance rejection controller (ADRC); grid side converter; system stability

(编辑 方晶)