

# 基于非线性ESO的风电并网逆变器 改进自抗扰控制

周雪松<sup>1,2</sup>, 陈昱龙<sup>1,2</sup>, 马幼捷<sup>1,2</sup>, 崔阳阳<sup>1,2</sup>, 孙小桐<sup>1,2</sup>, 葛建鹏<sup>1,2</sup>

(1. 天津理工大学 电气电子工程学院, 天津 300384; 2. 天津理工大学  
天津市复杂系统控制理论及应用重点实验室, 天津 300384)

**摘要:**针对永磁直驱风电系统并网逆变器中传统双闭环PI控制策略抗扰性能和控制精度不足的问题,提出一种基于非线性扩张状态观测器(NLESO)的改进型自抗扰控制(ADRC)技术用以提高直流母线电压的控制性能。通过将线性扩张状态观测器(LESO)中的误差增益矩阵变为随时间变化的非线性函数对传统LADRC进行了改进,提高了LESO的动态扰动观测性能,从而增强系统对集总扰动的补偿抑制能力,并对其进行稳定性证明。最后通过仿真对比分析改进NLADRC和传统LADRC控制下并网点电压和逆变器直流侧电压波形,验证了改进NLADRC的正确性和可行性。

**关键词:**并网逆变器;非线性自抗扰控制;扰动观测性能;抗扰性能

**中图分类号:**TM464 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd22244

## Improved Active Disturbance Rejection Control of Wind Power Grid-connected Inverter Based on Nonlinear ESO

ZHOU Xuesong<sup>1,2</sup>, CHEN Yulong<sup>1,2</sup>, MA Youjie<sup>1,2</sup>, CUI Yangyang<sup>1,2</sup>, SUN Xiaotong<sup>1,2</sup>, GE Jianpeng<sup>1,2</sup>

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China;

2. Tianjin Key Laboratory for Control Theory and Application in Complicated Systems, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

**Abstract:** Aiming at the insufficient problem of anti-disturbance performance and control accuracy of the traditional double closed-loop PI control strategy in the grid-connected inverter of the magnetic direct drive wind power system, an improved active disturbance rejection controller (ADRC) technology based on the nonlinear extended state observer (NLESO) was proposed to enhance the control performance of the DC bus voltage. The traditional LADRC was improved by changing the error gain matrix in the linear extended state observer (LESO) into a non-linear function that varies with time, and the dynamic disturbance observation performance of LESO was also improved. The compensation inhibition ability against lumped disturbances was enhanced, and its stability was proved. Finally, through simulation and comparative analysis for the grid-connected point voltage and the DC voltage waveforms of the inverter under the control of the improved NLADRC and the traditional LADRC, the correctness and feasibility of the improved NLADRC were verified.

**Key words:** grid-connected inverter; nonlinear active disturbance rejection controller (NLADRC); disturbance observation performance; immunity performance

近年来随着新能源技术的急速发展,风力发电系统机组容量不断提升,因永磁直驱风电系统更加优越的性能,其关注度逐渐得到提高<sup>[1]</sup>。并

网逆变器作为可再生能源与电网连接直-交流转换的核心电力电子装置<sup>[2-3]</sup>,运用于多种新能源发电系统中,其控制策略性能的优劣直接决定系统

**基金项目:**国家自然科学基金(51877152);天津自然科学基金(18JJCZDJC97300)

**作者简介:**周雪松(1964—),男,博士,教授,Email:zxssjteam112233@126.com

输出的电能质量和运行成本<sup>[4]</sup>,这就要求风电机组要在各种复杂实际工况下拥有足够的抗扰性能来提供有效且可靠的能源<sup>[5-8]</sup>。因此需要研究并优化永磁直驱风电机组的控制策略,进一步提高其故障穿越能力<sup>[9]</sup>,文献[10-12]中提到并网逆变器是非线性、时变、强耦合和负载扰动性强的系统,而PID控制存在振荡和超调等抗扰能力不足的缺点,无法满足系统实际运行中所要求的瞬态响应高、抗扰能力强和稳态精度高等控制需求<sup>[13]</sup>。自抗扰控制技术(active disturbance rejection control, ADRC)是韩京清教授提出的一种不依赖于实际系统具体数学模型的控制技术,其核心扩张状态观测器(extended state observer, ESO)在观测出系统状态变量估计值的同时,能够对系统的集总扰动进行观测补偿用以消除集总扰动的影响,克服了传统PID控制的缺陷<sup>[14]</sup>。目前ADRC控制技术已应用于永磁同步电机、机器人控制、热能系统控制、武器系统控制和航空器控制等多个领域。针对风电并网逆变器的控制,传统方法一般采用电压外环、电流内环的双闭环控制结构<sup>[15]</sup>,为提高母线电压的控制性能,文献[16]将外部扰动的电流作为前馈量引入到控制结构中,以减少母线电压波动。

本文研究以永磁直驱风电系统并网逆变器直流母线电压为控制对象,通过坐标变换首先将逆变器数学模型从三相静止坐标系变为两相静止垂直坐标系,再变为两相旋转坐标系;之后介绍了传统二阶线性自抗扰控制器(linear active disturbance rejection controller, LADRC)观测器及控制器的设计和参数配置方法;然后将原有线性扩张状态观测器(linear extended state observer, LESO)中的误差增益矩阵变为随时间变化的非线性函数,设计出基于非线性ESO的改进型ADRC控制器,通过Lyapunov渐近稳定判别定理给出新型NLADRC的收敛稳定条件,最后通过Matlab和Simulink数字仿真对新型非线性自抗扰控制器(nonlinear active disturbance rejection controller, NLADRC)更优越的控制性能进行验证。

## 1 风电系统数学建模及传统LADRC控制器设计

### 1.1 系统数学建模

永磁同步直驱全功率风电变流器经过多年的发展已出现多种拓扑结构,本文采用全功率二

电平背靠背变流器,通过它将风电机组和电网相连接,同时实现机侧和网侧的解耦控制,其系统控制简单、可靠,并且具有相对较好的电网适应性。具体原理结构如图1所示。

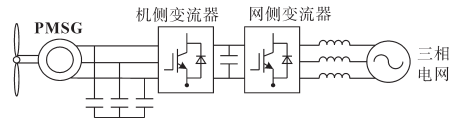


图1 永磁同步直驱风电系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of permanent magnet synchronous direct drive wind power system

风电并网系统并网控制的关键是网侧逆变器的控制策略,本文讨论的系统中采用电压源型并网逆变器,其拓扑结构如图2所示。

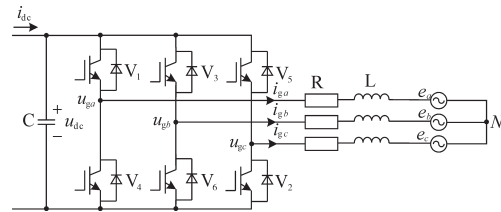


图2 网侧逆变器拓扑结构图

Fig.2 Topology structure diagram of grid-side inverter

图2中,  $u_{ga}, u_{gb}, u_{gc}$  为网侧逆变器三相电压;  $e_a, e_b, e_c$  为三相电网电压;  $i_{ga}, i_{gb}, i_{gc}$  为网侧逆变器三相电流;  $R, L, C$  分别为网侧滤波电阻、滤波电感和电容;  $i_{dc}$  为直流电流;  $u_{dc}$  为直流电压。

由图2可知,在三相静止坐标系下,网侧逆变器电压方程为

$$\begin{bmatrix} u_{ga} \\ u_{gb} \\ u_{gc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

当只考虑三相平衡系统时,系统只有两个自由度,意味着可将三相静止  $a-b-c$  坐标系变换为两相静止垂直  $\alpha-\beta$  坐标系。变换矩阵为

$$T_{3s/2s} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

再将两相静止  $\alpha-\beta$  坐标系下的数学模型变换为同步旋转  $d-q$  坐标系下的模型,变换矩阵为

$$T_{2s/2r} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

变换后可得:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + L \begin{bmatrix} -\omega i_d \\ \omega i_q \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $e_d, e_q$  为电网电动势的  $d, q$  轴分量;  $U_d, U_q$  为三相逆变器交流侧电压的  $d, q$  轴分量;  $i_d, i_q$  为三

相逆变器交流侧电流的 $d, q$ 轴分量; $\omega$ 为同步旋转角频率。

由式(4)可知,网侧逆变器的电流控制不仅取决于动态电流的跟踪控制,也与 $d, q$ 轴电感压降和电网电压扰动有关,同时 $d, q$ 轴存在耦合现象,所以可采用基于前馈解耦的电流环控制策略,如图3所示。

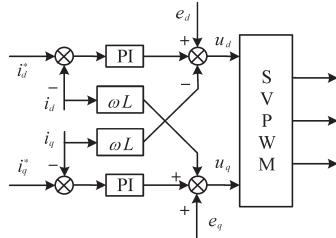


图3 基于前馈解耦的电流环控制结构

Fig.3 Current loop control structure based on feedforward decoupling

根据瞬时功率理论,系统的瞬时有功功率 $p$ 和无功功率 $q$ 分别为

$$\begin{cases} p = \frac{3}{2} (e_d i_d + e_q i_q) \\ q = \frac{3}{2} (e_d i_q - e_q i_d) \end{cases} \quad (5)$$

在基于电网电压定向时, $e_q = 0$ ,式(5)可简化为

$$\begin{cases} p = \frac{3}{2} e_d i_d \\ q = \frac{3}{2} e_d i_q \end{cases} \quad (6)$$

在网侧逆变器中,直流侧输入的有功功率瞬时值为

$$p = u_{dc} i_{dc} \quad (7)$$

不考虑逆变器功率损耗时,由式(6)、式(7)可得:

$$p = u_{dc} i_{dc} = \frac{3}{2} e_d i_d \quad (8)$$

这意味着不计功率损耗时,网侧逆变器直流电压 $u_{dc}$ 与输出电流的 $d$ 轴分量 $i_d$ 成正比,所以对 $u_{dc}$ 的调节可通过控制有功功率 $p$ 或 $i_d$ 来实现。

网侧电流方程如下:

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} \sum_{k=d,q} S_k i_k - i_{dc} \quad (9)$$

式中: $S_k$ 为开关函数。

结合式(4)可得:

$$\frac{d^2 u_{dc}}{dt^2} = \frac{3}{2C} \sum_{k=d,q} S_k \left( \frac{e_k}{L} - \frac{i_d R}{L} - \frac{u_k}{L} + \omega i_d \right) \quad (10)$$

综上,基于电网电压定向的风电三相并网逆变器控制采用直流电压外环和有功、无功电流内

环的双闭环控制结构。

## 1.2 传统LADRC控制器设计

LADRC结构图如图4所示,LADRC由以下三部分组成:线性扩张状态观测器(LESO)、线性状态误差反馈率(LSEF)和线性跟踪微分器(LTD)。一般情况下,为避免直流母线电压的高频次振荡扰动,不采用线性跟踪微分器。

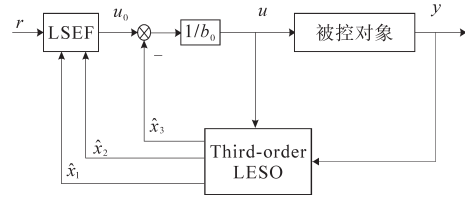


图4 线性ADRC结构图

Fig.4 Linear ADRC structure diagram

图4中, $r$ 为系统参考输入; $u$ 为控制器的输出; $y$ 为系统输出; $b_0$ 为控制增益; $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3$ 为扩张状态观测器观测出的系统输出及其微分和集总扰动的估计值。

由式(10)得等效被控系统为

$$\ddot{y} = -a_1 \dot{y} - a_2 y + w + (b - b_0)u + b_0 u \quad (11)$$

式中: $a_1, a_2$ 为变量系数; $w$ 为系统扰动; $b - b_0$ 为系统未知增益。

令 $y = u_{dc}$ ,  $f = -a_1 \dot{y} - a_2 y + w + (b - b_0)u$ ,则

$$\ddot{y} = f + b_0 u \quad (12)$$

其中  $f = \frac{3S_d}{2C} \left( \frac{e_d}{L} - \frac{i_d R}{L} + \omega i_d \right)$   $b_0 = \frac{3}{2LC}$

式中: $f$ 为包含了外扰和内扰的集总扰动。

选取状态变量 $x_1 = y, x_2 = \dot{y}, x_3 = f$ ,构建扩张状态空间如下:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 \\ \dot{\hat{x}}_2 \\ \dot{\hat{x}}_3 \end{cases} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_0 \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} f \quad (13)$$

$$y = x_1$$

对应线性扩张状态观测器(LESO)为

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 + L_1 (y - \hat{y}) \\ \dot{\hat{x}}_2 = \hat{x}_3 + L_2 (y - \hat{y}) + b_0 u \\ \dot{\hat{x}}_3 = L_3 (y - \hat{y}) \\ \hat{y} = \hat{x}_1 \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3$ 和 $\hat{y}$ 分别为原状态变量的估计值; $L_1, L_2, L_3$ 为误差增益系数。

构建如下的线性状态误差反馈率(LSEF):

$$u_0 = k_p (r - \hat{x}_1) - k_d \hat{x}_2 \quad (15)$$

式中: $k_p, k_d$ 为控制器增益。

设计扰动补偿环节:

$$u = \frac{u_0 - \hat{x}_3}{b_0} \quad (16)$$

通过文献[17]提出的参数化方法,可以把矩阵  $A - LC$  的特征方程的极点配置在  $-\omega_0$  ( $\omega_0$  为控制器带宽),使得式(16)成立,特征方程如下:

$$|sI - (A - LC)| = (s + \omega_0)^3 \quad (17)$$

从而得出误差增益矩阵  $L$ :

$$\begin{cases} L_1 = 3\omega_0 \\ L_2 = 3\omega_0^2 \\ L_3 = \omega_0^3 \end{cases} \quad (18)$$

同理可得控制器增益矩阵  $K$  如下 ( $\omega_c$  为控制器增益):

$$\begin{cases} k_p = \omega_c^2 \\ k_d = 2\omega_c \end{cases} \quad (19)$$

综上所述,传统 LADRC 控制器设计完成,通过配置可简化为  $\omega_0, \omega_c$  和  $b_0$  三个控制参数。

## 2 新型非线性 ADRC 结构设计

### 2.1 非线性扩张状态观测器

为了更好地推广和简化应用 ARDC,将其从非线性系统发展为线性系统,但是这并不意味着线性 ADRC 在调节能力、抗扰能力和控制性能上要优于非线性 ADRC。目前在某些控制系统中线性 ADRC 已经出现控制能力不足的问题,实际上有时候线性可以被看作是非线性的特例,故非线性 ADRC 相对于线性 ADRC 有更好的适应能力。

上文提到,为简化控制器系统结构和参数配置的复杂度,将扩张状态观测器(ESO)的误差增益系数配置为观测器带宽  $\omega_0$ ,即令误差增益矩阵为  $L = [3\omega_0 \quad 3\omega_0^2 \quad \omega_0^3]^T$ ,这样虽然降低了控制器的设计难度,但并不能实现最佳的控制性能。所以为提高控制器的跟踪性能和抗扰动能力,本文基于文献[18]提出一种新型非线性扩张状态观测器(NLESO),它的数学表达式如下:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 + \frac{\alpha_1}{\varepsilon} (y - \hat{y}) \\ \dot{\hat{x}}_2 = \hat{x}_3 + \frac{\alpha_2}{\varepsilon^2} (y - \hat{y}) + b_0 u \\ \dot{\hat{x}}_3 = \frac{\alpha_3}{\varepsilon^3} (y - \hat{y}) \\ \hat{y} = \hat{x}_1 \end{cases} \quad (20)$$

其中

$$\frac{1}{\varepsilon} = \begin{cases} \mu \frac{1 - e^{-\alpha t}}{1 + e^{-\beta t}} & 0 \leq t \leq t_s \\ \mu & t > t_s \end{cases} \quad (21)$$

式中:  $\alpha_1, \alpha_2$  和  $\alpha_3$  为正实数,且多项式  $s^3 + \alpha_1 s^2 + \alpha_2 s + \alpha_3$  满足 Hurwitz 条件;  $\frac{1}{\varepsilon}$  为所设计的非线性函数;  $\mu, \alpha$  和  $\beta$  为正实数。

同时非线性 ADRC 的其余部分,线性状态误差反馈率(LSEF)和扰动补偿环节仍如式(15)、式(16)所示保持不变,所以新型非线性自抗扰控制器(NLADRC)结构图如图5所示。

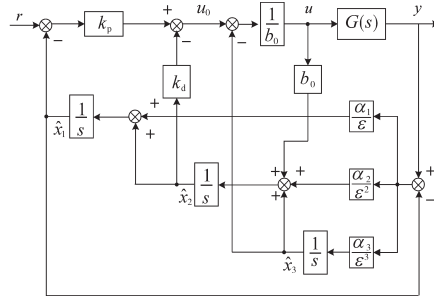


图5 非线性ADRC结构图

Fig.5 NL ADRC structure diagram

### 2.1 非线性扩张状态观测器的分析及稳定性证明

定义向量<sup>[19]</sup>  $\eta = [\eta_1 \quad \eta_2 \quad \eta_3]^T$ , 其中

$$\begin{cases} \eta_1 = \frac{x_1 - \hat{x}_1}{\varepsilon^2} \\ \eta_2 = \frac{x_2 - \hat{x}_2}{\varepsilon} \\ \eta_3 = f - \hat{x}_3 \end{cases} \quad (22)$$

结合式(13)、式(14)和式(22)可得:

$$\begin{aligned} \varepsilon \dot{\eta}_1 &= \frac{\dot{x}_1 - \dot{\hat{x}}_1}{\varepsilon} = \frac{1}{\varepsilon} \{x_2 - [\hat{x}_2 + \frac{\alpha_1}{\varepsilon} (x_1 - \hat{x}_1)]\} \\ &= -\frac{\alpha_1}{\varepsilon^2} (x_1 - \hat{x}_1) + \frac{1}{\varepsilon} (x_2 - \hat{x}_2) \\ &= -\alpha_1 \eta_1 + \eta_2 \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon \dot{\eta}_2 &= \dot{x}_2 - \dot{\hat{x}}_2 = b_0 u + f - \hat{f} - \frac{\alpha_2}{\varepsilon^2} (x_1 - \hat{x}_1) - b_0 u \\ &= -\alpha_2 \eta_1 + \eta_3 \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon \dot{\eta}_3 &= \varepsilon (\dot{f} - \dot{\hat{f}}) = -\frac{\alpha_3}{\varepsilon^2} (x_1 - \hat{x}_1) + \varepsilon \dot{f} \\ &= -\alpha_3 \eta_1 + \varepsilon \dot{f} \end{aligned} \quad (25)$$

可得观测误差状态方程为

$$\varepsilon \dot{\eta} = A \eta + \varepsilon B \dot{f} \quad (26)$$

$$\text{其中 } A = \begin{bmatrix} -\alpha_1 & 1 & 0 \\ -\alpha_2 & 0 & 1 \\ -\alpha_3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

矩阵  $A$  的特征方程为

$$|\lambda I - A| = \lambda^3 + \alpha_1 \lambda^2 + \alpha_2 \lambda + \alpha_3 = 0 \quad (27)$$

通过选择特征根使矩阵  $A$  为 Hurwitz 稳定,即令  $(\lambda + 1)(\lambda + 2)(\lambda + 3) = 0$ , 从而得  $\alpha_1 = 6, \alpha_2 = 11, \alpha_3 = 6$ 。则对于任意的给定的对称正定矩阵  $Q$ , 存在对称正定矩阵  $P$  满足如下 Lyapunov 方程:

$$A^T P + PA + Q = 0 \quad (28)$$

定义非线性观测器的 Lyapunov 函数为

$$V(\eta) = \varepsilon \eta^T P \eta \quad (29)$$

则

$$\begin{aligned} \dot{V}(\eta) &= \varepsilon \dot{\eta}^T P \eta + \varepsilon \eta^T P \dot{\eta} \\ &= (A\eta + \varepsilon B \dot{f})^T P \eta + \eta^T P (A\eta + \varepsilon B \dot{f}) \\ &= \eta^T A^T P \eta + \varepsilon (B \dot{f})^T P \eta + \eta^T P A \eta + \varepsilon \eta^T P B \dot{f} \\ &= \eta^T (A^T P + PA) \eta + 2\varepsilon \eta^T P B \dot{f} \end{aligned} \quad (30)$$

结合式(27)和式(29)可得:

$$\dot{V}(\eta) \leq -\eta^T Q \eta + 2\varepsilon \|PB\| \cdot \|\eta\| \cdot |\dot{f}| \quad (31)$$

且

$$\dot{V}(\eta) \leq -\lambda_{\min}(Q) \|\eta\|^2 + 2\varepsilon K \|PB\| \cdot \|\eta\| \quad (32)$$

令  $Q$  的最小特征值为  $\lambda_{\min}, \lambda_{\min} > 0; f$  为集总扰动且有界, 所以令  $|\dot{f}| = K > 0$ 。则由  $\dot{V} \leq 0$  可得非线性扩张状态观测器稳定收敛的条件为

$$\|\eta\| \leq \frac{2\varepsilon K \|PB\|}{\lambda_{\min}} \quad (33)$$

由式(33)可知, 观测误差  $\eta$  的收敛速度与参数  $\varepsilon$  有关, 即  $\varepsilon$  越小,  $\eta$  收敛到 0 的速度越快, 随着  $\varepsilon$  的减小, 观测误差逐渐趋近于 0。同时由于扩张状态观测器是高增益观测器, 为防止峰值现象设计  $\frac{1}{\varepsilon}$  如式(21)所示<sup>[20]</sup>, 这样不但可以保证观测误差能够快速收敛而且具有足够高的估计精度。综上可确定所设计非线性扩张状态观测器满足 Lyapunov 渐近稳定条件。

结合非线性自抗扰控制器设计的风电系统并网逆变器双闭环控制策略如图 6 所示, 其解决了扰动估计滞后的问题, 并提高了系统跟踪精度及抗扰能力。

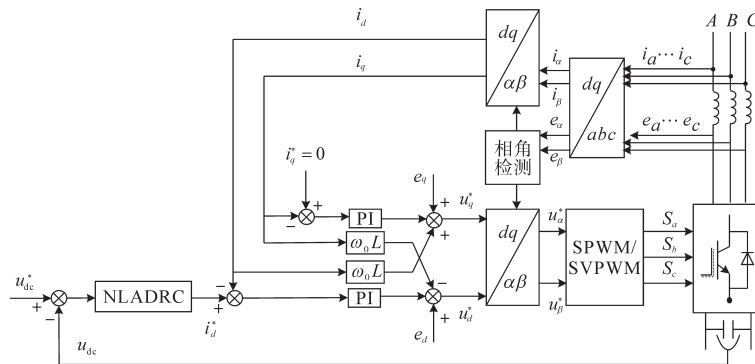


图6 控制系统结构

Fig.6 Structure of control system

至此可得基于改进非线性ADRC的风电系统网侧逆变器电压外环的控制模型如下式所示:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 + \frac{\alpha_1}{\varepsilon} (i_d^* - \hat{y}) \\ \dot{\hat{x}}_2 = \hat{x}_3 + \frac{\alpha_2}{\varepsilon^2} (i_d^* - \hat{y}) + b_0 u \\ \dot{\hat{x}}_3 = \frac{\alpha_3}{\varepsilon^3} (i_d^* - \hat{y}) \\ u_0 = k_p (u_{dc}^* - \hat{x}_1) - k_d \hat{x}_2 \\ u = \frac{u_0 - \hat{x}_3}{b_0} \end{cases} \quad (34)$$

式中:  $k_p, k_d$  取值如式(19)所示。

在该控制系统中将逆变器的直流母线电压状态变量  $u_{dc}$  和系统外环的集总扰动  $f$  选作状态变量。

### 3 仿真与分析

基于 Matlab/Simulink 软件搭建 1.5 MW 的永磁直驱同步风力发电系统进行仿真, 来验证本文所提出 NLADRC 控制策略的可行性。系统主要参数如下: 额定功率 1.5 MW, 网侧线电压 690 V, 直流母线电压 1 070 V, 直流母线电容值 240  $\mu\text{F}$ , 直流进线等效电阻值 0.942  $\Omega$ , 直流侧滤波电容 147  $\mu\text{F}$ , 滤波器滤波电容 94  $\mu\text{F}$ , 滤波器机侧电感 20  $\mu\text{H}$ , 滤波器网侧电感 120  $\mu\text{H}$ , 卸荷电阻 0.8  $\Omega$ 。控制器参数如下: 电流环 PI 控制器  $K_p = 0.8, K_i = 10$ ; 电压环 LADRC 观测器带宽  $\omega_0 = 600, \omega_c = 1\,500$ , 增益  $b_0 = 15\,000$ ; NLADRC 观测器  $\mu = 400, \alpha = 50, \beta = 50$ ; NLADRC 控制器带宽  $\omega_c = 1\,500, b_0 = 15\,000$ 。

下面给出永磁直驱风电系统分别采用传统线性ADRC和改进型非线性ADRC控制策略的仿真图像并做出对比。

当风电系统在不被外界扰动影响时,对直流母线电压进行从暂态进入到稳态运行的仿真分析,如图7所示为传统线性ADRC和改进非线性ADRC两种控制策略下的直流母线电压图像对比。从图7可得传统线性ADRC控制下的直流母线电压进入稳态的时间是0.09 s,而改进非线性ADRC控制下的直流母线电压进入稳态的时间是0.036 s,明显具有更强的调节能力;同时可以得到暂态时,传统LADRC控制下的直流母线电压超调幅值达到1.15(标么值),改进NLADRC控制下的直流母线电压超调幅值则仅为1.09(标么值),相对来说超调幅值减少了约40%,因此可以得出系统的微分峰值现象得到了较大的改善。

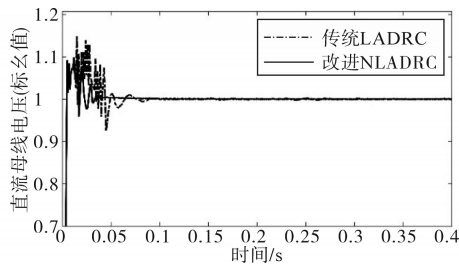
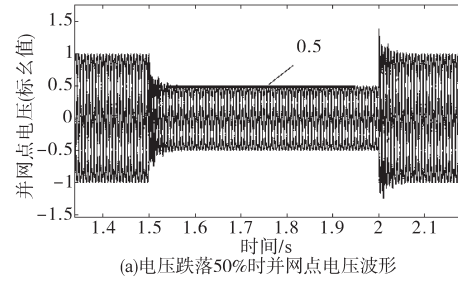


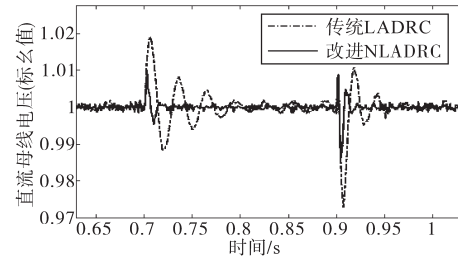
图7 无扰动情况下直流母线电压  
Fig.7 DC bus voltage without disturbance

电网发生电压跌落故障既低电压穿越时的直流母线电压波形和并网电压波形如图8所示,设置电压跌落幅度为50%,经过一段时间后恢复至正常额定电压。从图8b可以得出,故障发生时传统LADRC和改进NLADRC控制下的超调最大幅值分别达到1.019(标么值)和1.009(标么值),调节时间分别为100 ms和15 ms;在电网电压恢复至原有额定值时,两种控制策略对应的跌落幅度分别为0.027 1(标么值)和0.014 3(标么值),恢复时间为59 ms和24 ms。

图9为不对称电压跌落故障下的直流母线电压仿真结果,同样是跌落幅度为50%,持续一段时间后恢复正常。从图中可以看出使用改进NLADRC控制策略相比于传统LADRC控制策略,无论是在故障持续时间内的波动范围还是在故障结束时的超调幅度和进入稳态的时间都更小且更短。传统控制策略下的最大幅值为1.021(标么值),恢复时间为59 ms,而改进控制策略下对应的幅度和时间分别是1.01(标么值)和16 ms。



(a)电压跌落50%时并网电压波形



(b)电压跌落50%时直流母线电压波形

图8 电网电压跌落工况下的控制效果对比

Fig.8 Comparison of control effects under grid voltage drop conditions

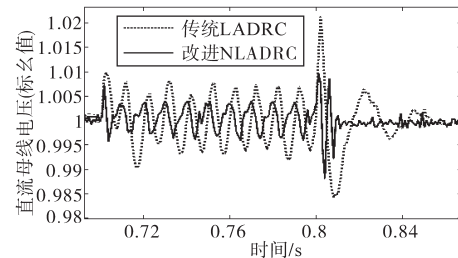
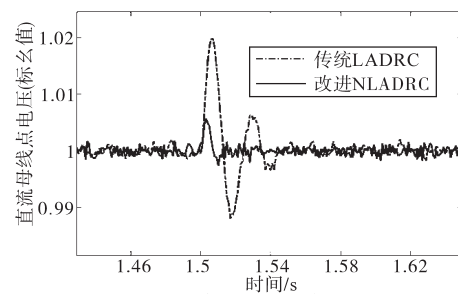


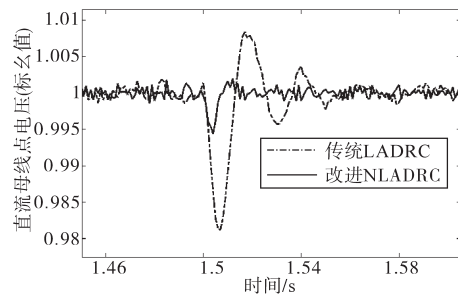
图9 不对称电压跌落工况下的控制效果对比

Fig.9 Comparison of control effects under asymmetric voltage drop

图10为风机加、减载时并网逆变器的直流母线电压仿真结果。



(a)风机负载从30%增加至80%



(b)风机负载从100%减小至0

图10 风机加、减载工况下控制效果对比

Fig.10 Comparison of control effect under loading or unloading of fan

图10a对应风机负载从30%突然增加到80%时直流母线电压的变化情况,传统LADRC和改进NLADRC控制策略下的直流母线电压最大波动幅值分别为1.02(标么值)和1.006(标么值),而母线电压恢复至原有额定电压的时间分别是45 ms和23 ms。图10b表示风机负载由额定值100%突然减到0时的直流母线电压仿真波形,在两种控制策略下直流母线电压跌落的幅值分别为0.02(标么值)和0.006(标么值),而恢复到额定电压的时间分别为53 ms和21 ms。

通过仿真结果验证,在对称、不对称电压跌落和电机加、减载时的工况下,改进NLADRC相较于传统LADRC控制策略拥有更好的控制精度和抗扰性能,具有较好的工程应用价值。

## 4 结论

本文提出一种应用于PMSG风电系统的基于非线性扩张状态观测器的NLADRC控制策略。该策略在原有传统LESO的结构基础上引入非线性误差增益函数,实现快速跟踪补偿集总扰动的效果,使系统的暂态过程和受扰动时的控制性能明显改善。仿真结果表明,改进NLADRC控制策略在风机突然加、减载和电网电压对称或不对称电压跌落的工况下能有效抑制直流母线电压的波动,并使其更快地恢复到额定值,效果明显优于传统LADRC控制策略。大大提高了永磁直驱风电机组的低电压故障穿越能力和抗扰性能,验证了理论分析地正确性和实用性。

### 参考文献

- [1] Sai Manoj P, Vijayakumari A, Kottayil Sasi K. Development of a comprehensive MPPT for grid-connected wind turbine driven PMSG[J]. *Wind Energy*, 2019, 22(6).
- [2] Liao C Y, Lin W S, Chen Y M, et al. A PV micro-inverter with PV current decoupling strategy[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(8): 6544-6557.
- [3] 刘军, 赵晨聪, 谢宙桦, 等. 电网不平衡故障下风电并网逆变器的控制综述[J]. *电气传动*, 2020, 50(8): 65-73.  
Liu Jun, Zhao Chencong, Xie Zhouhua, et al. An overview on control of wind power grid-connected inverter under unbalanced grid fault[J]. *Electric Drive*, 2020, 50(8): 65-73.
- [4] 董密, 罗安. 光伏并网发电系统中逆变器的设计与控制方法[J]. *电力系统自动化*, 2006, 30(20): 97-102.  
Dong Mi, Luo An. Design and control strategies of inverters for a grid-connected photovoltaic power system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, 30(20): 97-102.
- [5] 张冲, 王伟胜, 何国庆, 等. 基于序阻抗的直驱风电场次同步振荡分析与锁相环参数优化设计[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(23): 6757-6767.  
Zhang Chong, Wang Weisheng, He Guoqing, et al. Subsynchronous oscillation analysis and phase-locked loop parameter optimization design of direct-driven wind farms based on sequence impedance[J]. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2017, 37(23): 6757-6767.
- [6] Zhu Yongchao, Zhu Caichao, Song Chaosheng, et al. Improvement of reliability and wind power generation based on wind turbine real-time condition assessment[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2019, 113.
- [7] 张迪, 魏艳君, 杨宗丰, 等. 不平衡电网电压下基于滑模变结构控制的双馈风电系统转子侧变流器控制策略[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(17): 121-131.  
Zhang Di, Wei Yanjun, Yang Zongfeng, et al. Rotor side converter control strategy for doubly-fed wind power system based on sliding mode variable structure control under unbalanced grid voltage [J]. *Journal of Electrical Technology*, 2016, 31(17): 121-131.
- [8] Ghatikar G, Mashayekh S, Stadler M, et al. Distributed energy systems integration and demand optimization for autonomous operations and electric grid transactions[J]. *Applied Energy*, 2016, 167: 432-448.
- [9] 年珩, 徐韵扬, 陈亮, 等. 并网逆变器频率耦合特性建模及系统稳定性分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(5): 1421-1431.  
Nian Heng, Xu Yunyang, Chen Liang, et al. Frequency coupling characteristics modeling and system stability analysis of grid-connected inverters [J]. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2019, 39(5): 1421-1431.
- [10] 李杰, 王得利, 陈国呈, 等. 直驱式风力发电系统的三相Z源并网逆变器建模与控制[J]. *电工技术学报* 2009, 24(2): 114-120.  
Li Jie, Wang Deli, Chen Guocheng, et al. Modeling and control of three-phase Z-source inverter for direct-drive wind generation system[J]. *Journal of Electrical Technology*, 2009, 24(2): 114-120.
- [11] 孙谊嫻, 南东亮, 张公生. 含超级电容储能的直驱永磁风电机组高电压穿越控制策略[J]. *电气传动*, 2018, 48(10): 48-52, 84.  
Sun Yiqian, Nan Dongliang, Zhang Gongsheng. High voltage ride through control strategy of direct-drive permanent magnet wind turbine with super capacitor energy storage[J]. *Electric Drive*, 2018, 48(10): 48-52, 84.
- [12] 刘军, 赵晨聪. 电网电压不平衡时对风电并网逆变器的控制研究[J]. *电气传动*, 2016, 46(4): 50-54, 79.  
Liu Jun, Zhao Chencong. Research on the control strategy for grid-connecting converter of wind power generation system under unbalanced grid voltage[J]. *Electric Drive*, 2016, 46(4): 50-54, 79.

(下转第61页)

- 13-20.
- Jin Hongyang, Sun Hongbin, Niu Tao, *et al.* Robust unit commitment considering uncertainties of wind and energy intensive load dispatching[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(22): 13-20.
- [12] 王乐,余志伟,文福拴.基于机会约束规划的最优旋转备用容量确定[J].*电网技术*,2006,30(20):14-19.  
Wang Le, Yu Zhiwei, Wen Fushuan. A chance-constrained programming approach to determine requirement of optimal spinning reserve capacity[J]. *Power System Technology*, 2006, 30(20): 14-19.
- [13] 蒋万泉,刘继春,韩晓言,等.离网条件下考虑短时间尺度的水光蓄多能互补发电系统备用容量确定方法[J].*电网技术*, 2020, 44(7): 2492-2502.  
Jiang Wanxiao, Liu Jichun, Han Xiaoyan, *et al.* Reserve optimization for offline multi-energy complementary generation system in short time scale[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(7): 2492-2502.
- [14] 赵文猛,刘明波,周保荣,等.含风电接入多区域电力系统的分散式随机动态经济调度方法[J].*中国电机工程学报*, 2017,37(24):7087-7098.  
Zhao Wenmeng, Liu Mingbo, Zhou Baorong, *et al.* Decentralized stochastic dynamic economic dispatch for multi-area power systems with wind power integrated[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(24): 7087-7098.
- [15] 文云峰,郭创新,郭剑波,等.多区互联电力系统的分散协调风险调度方法[J].*中国电机工程学报*,2015,35(14):3724-3733.  
Wen Yunfeng, Guo Chuangxin, Guo Jianbo, *et al.* Coordinated decentralized risk-based dispatch of multi-area interconnected power systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(14): 3724-3733.
- [16] 陈厚合,王子璇,张儒峰,等.含虚拟电厂的风电并网系统分布式优化调度建模[J].*中国电机工程学报*,2019,39(9):2615-2624.  
Chen Houhe, Wang Zixuan, Zhang Rufeng, *et al.* Decentralized optimal dispatching modeling for wind power integrated power system with virtual power plant[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(9): 2615-2624.
- [17] Zhou X, Ai Q. An integrated two-level distributed dispatch for interconnected microgrids considering unit commitment and transmission loss[J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2019, 11(2):025504.
- [18] 李华东,李勇,李文博.考虑源网荷互动的虚拟发电厂分布式协同控制[J].*电气传动*,2019,49(3):72-77.  
Li Huadong, Li Yong, Li Wenbo. Distributed cooperative control for virtual power plants considering interaction of source, network and load[J]. *Electric Drive*, 2019, 49(3): 72-77.
- [19] Qin Jiahu, Wan Yanni, Yu Xinghuo, *et al.* Consensus-based distributed coordination between economic dispatch and demand response[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(4): 3709-3719.
- [20] 税月,刘俊勇,高红均,等.考虑风电不确定性的电气能源系统两阶段分布鲁棒协同调度[J].*电力系统自动化*,2018,42(13):43-50,75.  
Shui Yue, Liu Junyong, Gao Hongjun, *et al.* Two-stage distributed robust cooperative dispatch for integrated electricity and natural gas energy systems considering uncertainty of wind power[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(13): 43-50, 75.

收稿日期:2020-08-24

修改稿日期:2020-09-10

(上接第53页)

- [13] 张强,张崇巍,张兴,等.风力发电用大功率并网逆变器研究[J].*中国电机工程学报*,2007,35(16):54-59.  
Zhang Qiang, Zhang Chongwei, Zhang Xing, *et al.* Study on grid-connected inverter used in high-power wind generation system[J]. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2007, 35(16): 54-59.
- [14] 韩京清.自抗扰控制器及其应用[J].*控制与决策* 1998, 13(1):19-23.  
Han Jingqing. Active disturbance rejection controller and its application[J]. *Control and Decision*, 1998, 13(1): 19-23.
- [15] Blaabjerg F, Teodorescu R, *et al.* Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2006, 53(5): 1398-1409.
- [16] Yao Jun, Li Hui, Liao Yong, *et al.* An improved control strategy of limiting the DC-link voltage fluctuation for a doubly fed induction wind generator[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2008, 23(3): 1205-1213.
- [17] Gao Zhiqiang. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning[C]//*IEEE American Control Conference*. Denver, USA, 2003:4989-4996.
- [18] 王新华,陈增强,袁著祉.基于扩张观测器的非线性不确定系统输出跟踪[J].*控制与决策*,2004(10):1113-1116.  
Wang Xinhua, Chen Zengqiang, Yuan Zhuzhi. Output tracking based on extended observer for nonlinear uncertain systems[J]. *Control and Decision*, 2004(10):1113-1116.
- [19] Khalil H K. *Nonlinear systems 3rd edition*[M]. New Jersey, Upper Saddle River:Prentice hall, 2002.
- [20] 王新华,刘金琨.微分器设计与应用—信号滤波与求导[M].北京:电子工业出版社,2010.  
Wang Xinhua, Liu Jinkun. Design and application of differentiator—signal filtering and derivation[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2010.

收稿日期:2020-07-30

修改稿日期:2020-09-09