

基于改进一阶 LADRC 光伏逆变器母线电压控制

谢宝平, 曾江*, 刘佩, 赵本强, 马海杰, 叶康权
(华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510641)

Bus Voltage Control of Photovoltaic Inverter Based on Improved First-Order LADRC

XIE Baoping, ZENG Jiang*, LIU Pei, ZHAO Benqiang, MA Haijie, YE Kangquan

(School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: The stability of the intermediate DC-bus voltage of the two-stage photovoltaic inverter is crucial for its good power generating quality and long-term operation. The power generation of photovoltaic inverters is easily affected by environmental factors such as the strength of illumination and temperature, and this power fluctuation can cause significant disturbance on the DC-bus voltage. In order to improve the disturbance resistance of the DC-bus voltage and the control performance of the inverter, a photovoltaic inverter bus voltage control strategy based on improved first-order linear active disturbance rejection control (LADRC) is proposed. The voltage outer loop controller in the dual loop control of the inverter is designed by using improved first-order LADRC. On the basis of the traditional LADRC linear extended state observer, the system control component in the expression of the state variable is removed, so that the observation error equation of the state variable only contains error components related to the system input, which reduces the observation error of the state variable. A new state variable is added and the system control quantity of the previous control cycle is introduced, and total disturbance is re-estimated and compensated based on the total disturbance expression. The control performance of improved LADRC is analyzed in the frequency domain. Compared with the traditional LADRC, the improved LADRC has an increased system bandwidth, enhanced dynamic tracking ability, and smaller disturbance gain in the mid to low frequency range. Simulation and experiments show that the improved LADRC has a shorter regulating time, better system dynamic performance, and the disturbance resistance ability of DC-bus voltage is enhanced.

基金项目: 广东省自然科学基金项目(2021A1515012616)

Natural Science Foundation of Guangdong Province, China
(2021A1515012616)

Key words: photovoltaic grid-connected inverter; DC-bus voltage; voltage outer loop; linear active disturbance rejection control; frequency domain analysis

摘要: 两级式光伏逆变器的中间直流母线电压的稳定性是光伏逆变器良好的发电质量和长期运行的关键。光伏逆变器的发电功率易受到光照强度、温度等环境因素的影响,该功率波动会在直流母线电压上产生较大扰动。为了提高直流母线电压的抗扰性,改善逆变器的控制性能,提出了一种基于改进一阶线性自抗扰控制(LADRC)的光伏逆变器母线电压控制策略。采用改进一阶 LADRC 对逆变器双环控制中的电压外环控制器进行设计。在传统 LADRC 的线性扩张状态观测器的基础上,将状态变量表达式中系统控制量的分量去除,使得状态变量的观测误差方程中只含有与系统输入量相关的误差分量,减小了状态变量的观测误差。新增状态变量并引入前一控制周期的系统控制量,根据总和和扰动表达式对总和和扰动重新进行估计并补偿。在频域上对改进 LADRC 的控制性能进行分析,相较传统 LADRC 而言,改进 LADRC 的系统带宽增大,动态跟踪能力增强,在中低频段具有更小的扰动增益。仿真和试验表明改进 LADRC 具有更短的调节时间,系统动态性能具有较好的提升,直流母线电压的抗扰性增强。

关键词: 光伏并网逆变器; 直流母线电压; 电压外环; 线性自抗扰控制; 频域分析

0 引言

为应对全球气候变化趋势,能源结构逐渐低碳化,以光伏、风电为主的新能源将在能源转型中起主导作用^[1-4]。光伏逆变器为光伏阵列的并网接口,光伏阵列通过光伏逆变器实现功率转换及并网发电。光伏逆变器的稳定运行和优良的控制

性能能够保证良好的光伏发电质量。由于光伏组件的发电功率受到光照强度、温度等环境条件的影响,光伏组件的输出功率具有较强的波动性和随机性。光伏逆变器的直流母线作为前级 DC-DC 变换器和后级逆变桥的连接环节,母线电压的稳定性和抗扰性对逆变器的控制性能具有较大的影响^[5-7]。

光伏逆变器前级 DC-DC 变换器用于实现光伏阵列最大功率点跟踪和直流电压的变换。后级的逆变桥中,电压外环和电流内环组成的双环控制仍是主要的控制方式,其中电压外环负责控制并维持直流母线电压^[8-10]。

为提高直流母线电压的控制性能,文献[11]对逆变器的双环控制器采用传统比例积分(Proportional Integral, PI)进行设计,对控制系统进行频域分析,优化了控制器参数,但仍有超调和快速性之间的矛盾,在遇到大幅扰动时控制精度难以满足要求。文献[12]提出了一种高增益 DC-DC 变换器,实现光伏最大功率点跟踪和直流母线电压的稳定,但是该 DC-DC 变换器需要使用三个开关器件,增加了硬件成本。文献[13]针对微网系统双向 DC-DC 变换器直流母线电压外环采用基于自适应粒子群优化的前馈线性自抗扰控制策略,实现了自抗扰控制参数的自主寻优,但工程实践中准确的数学模型难以获得,进而难以广泛应用。

自抗扰控制是在传统比例积分微分(Proportional Integral Derivative, PID)控制的基础上结合现代控制理论提出的控制策略,其将作用于被控对象的所有不确定因素,利用扩张状态观测器对其进行估计并给予补偿^[14]。文献[15]通过极点配置法将自抗扰控制参数简化成控制器带宽和观测器带宽,提出了线性自抗扰控制策略。

自抗扰控制已在无人机控制^[16-17]、机器人控制^[18]以及电机控制^[19-21]等诸多领域得到了广泛的推广应用,其中在并网逆变器中的应用也已取得一定的研究成果。文献[22]将扩张状态观测器的电流微分观测量作为有源阻尼反馈量以抑制逆变器的 LCL 滤波器的谐振峰;文献[23]在有源滤波器(Active Power Filter, APF)的直流侧设计了基于线性自抗扰的电压外环控制器,使得系统具有良好的动态特性。文献[24]将自抗扰控制

应用于风电并网逆变器的电压外环中,提高了逆变器的稳态和暂态性能。

文中建立了光伏逆变器的数学模型,以直流母线电压为控制对象,将传统线性自抗扰控制(Linear Active Disturbance Rejection Control, LADRC)应用于电压外环控制器的设计中;其次将前一周期的系统控制量引入线性扩张状态观测器中进行改进,提出了一种基于改进一阶 LADRC 的光伏逆变器母线电压控制策略;然后在频域上对传统 LADRC 和改进 LADRC 二者的动态性能及抗扰性进行分析;最后搭建仿真模型和试验平台,通过仿真和试验验证了改进 LADRC 的控制性能。

1 光伏并网逆变器建模

三相光伏并网逆变器结构如图 1 所示,主要由前级 Boost 变换器、二极管中点钳位型三电平逆变器和 LCL 滤波器组成。图中: u_{pv} 为光伏阵列电压; C_{pv} 为光伏逆变器输入侧滤波电容; L_{Boost} 为 Boost 变换器升压电感; C_{d1} 和 C_{d2} 分别为母线上、下侧电解电容; i_1 为 Boost 变换器输出电流; i_c 为直流侧母线电容流入电流; i_2 为逆变桥输入电流; u_{dc} 为逆变桥直流母线电压; u_a 、 u_b 和 u_c 为逆变桥输出侧三相电压; i_a 、 i_b 和 i_c 为逆变桥输出侧三相电流; L_1 、 L_2 分别为 LCL 滤波器逆变侧和网侧电感; C 为 LCL 滤波器的滤波电容; u_s 为电网电压; u_0 为电网中性点对地电压。

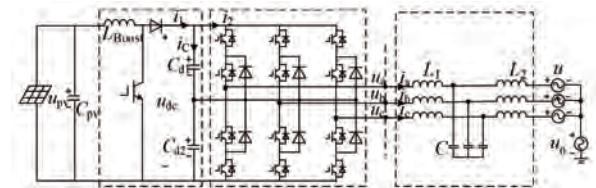


图 1 光伏并网逆变器结构

Fig. 1 Structure of photovoltaic grid-connected inverter

根据图 1 可得逆变器数学模型:

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} = u_a - u_{sa} - u_0 \\ L \frac{di_b}{dt} = u_b - u_{sb} - u_0 \\ L \frac{di_c}{dt} = u_c - u_{sc} - u_0 \\ C_d \frac{du_{dc}}{dt} = i_1 - i_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_{sa} 、 u_{sb} 和 u_{sc} 为三相电网电压; C_d 为 C_{d1} 与 C_{d2} 的串联值; L 为 L_1 和 L_2 之和, 低频段 LCL 滤波器特性与 L 滤波器近似, 在对逆变器进行建模时将 LCL 滤波器等效为 L 滤波器, 不影响后续分析。

根据坐标变换得到两相同步静止坐标系下的逆变器数学模型:

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = u_d - \omega Li_q - u_{sd} \\ L \frac{di_q}{dt} = u_q + \omega Li_d - u_{sq} \\ C_d \frac{du_{dc}}{dt} = i_1 - \frac{3}{2}(S_d i_d + S_q i_q) \end{cases} \quad (2)$$

式中: ω 为电网电压角频率; u_d 、 u_q 分别为逆变桥输出侧三相电压的 d 、 q 轴分量; i_d 、 i_q 分别为逆变桥输出侧三相电流的 d 、 q 轴分量; u_{sd} 、 u_{sq} 分别为电网电压的 d 、 q 轴分量; S_d 、 S_q 分别为逆变桥开关函数的 d 、 q 轴分量。

根据光伏逆变器数学模型采用电压电流双闭环控制策略, 对应的控制框图如图 2 所示。电压控制外环稳定直流母线电压, 输出 d 轴电流内环给定值, 电流控制内环控制逆变桥输出电流跟踪给定值 i_d^* 和 i_q^* , 加入电网电压的 d 、 q 轴分量及耦合的逆变桥输出电流的 d 、 q 轴分量进行前馈解耦, 最后通过空间矢量脉宽调制 (Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM) 生成逆变桥各开关管的开关信号。

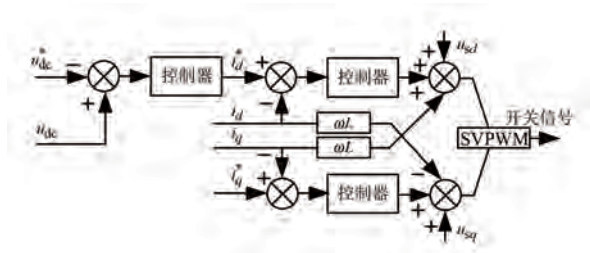


图 2 光伏逆变器控制框图

Fig. 2 Control block diagram of photovoltaic inverter

根据瞬时无功功率理论可得逆变桥输出侧功率为

$$P_{\text{out}} = \frac{3}{2}(u_d i_d + u_q i_q) \quad (3)$$

忽略逆变桥的开关器件及线路的功率损耗可得:

$$u_{dc} i_2 \approx P_{\text{out}} = \frac{3}{2}(u_d i_d + u_q i_q) \quad (4)$$

逆变器设置为单位功率因数运行模式, 即 $i_q = 0$, 并将式 (4) 与式 (1) 结合可得母线电压 u_{dc} 与逆变桥输出电流 d 轴分量 i_d 的关系式如下:

$$C_d \frac{du_{dc}}{dt} = i_1 - \frac{3}{2} \frac{u_d}{u_{dc}} i_d \quad (5)$$

在逆变器的电压电流双闭环控制系统设计中, 电流内环的控制带宽往往远大于电压外环, 在对电压外环的控制器进行设计时, 可忽略电流内环的动态过程, 认为逆变桥输出电流 d 轴分量 i_d 可实时跟踪电压控制外环输出的给定值 i_d^* , 对式 (5) 进行改写可得:

$$C_d \frac{du_{dc}}{dt} = i_1 - \frac{3}{2} \frac{u_d}{u_{dc}} i_d^* \quad (6)$$

根据式 (6) 可对电压外环设计一阶线性自抗扰控制器。

2 LADRC 控制器设计

2.1 传统 LADRC 控制器设计

传统 LADRC 控制器由跟踪微分器、线性扩张状态观测器、线性误差反馈律和扰动估计补偿构成。针对一阶被控对象, 将式 (6) 改写为

$$\begin{cases} \dot{u}_{dc} = f(\omega(t), t) + (b - b_0) i_d^* + b_0 i_d^* \\ y = u_{dc} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $f(\omega(t), t)$ 为模型误差、光伏阵列输入功率等内外部扰动不确定量; b 为未知的控制器增益; b_0 为设置的近似控制器增益。

将 $f(\omega(t), t)$ 和 $(b - b_0) i_d^*$ 当作总和扰动 g , 并设计二阶线性扩张状态观测器进行状态变量观测及扰动估计:

$$\begin{cases} e = z_1 - u_{dc} \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 e + b_0 i_d^* \\ \dot{z}_2 = -\beta_2 e \end{cases} \quad (8)$$

式中: z_1 为状态变量观测值; z_2 为总和扰动估计值; e 为状态变量 z_1 观测误差; β_1 和 β_2 为扩张状态观测器的观测器增益。

根据极点配置法^[15], 设置扩张状态观测器的观测器增益:

$$\begin{cases} \beta_1 = 2\omega_0 \\ \beta_2 = \omega_0^2 \end{cases} \quad (9)$$

式中: ω_0 为观测器的观测带宽。

设计扰动估计补偿和线性误差反馈律为

$$i_d^* = \frac{1}{b_0} [k_p(u_{dc}^* - z_1) - z_2] \quad (10)$$

式中: u_{dc}^* 为直流侧电容电压给定值; k_p 为控制器增益。

当总和扰动估计值 z_2 能准确估计系统总和扰动时,将式(10)代入式(7)中可得:

$$\begin{cases} \dot{u}_{dc} = k_p(u_{dc}^* - z_1) \\ y = u_{dc} \end{cases} \quad (11)$$

根据式(11)可知,自抗扰控制器可将电压控制外环重构成一阶积分器串联型控制系统,由此简化了母线电压的控制并提高了控制系统对未知扰动的抗扰能力。针对直流母线电压被控对象,根据设计的扩张状态观测器、线性误差反馈律和扰动估计补偿可得一阶传统 LADRC 控制器结构框图,如图 3 所示。

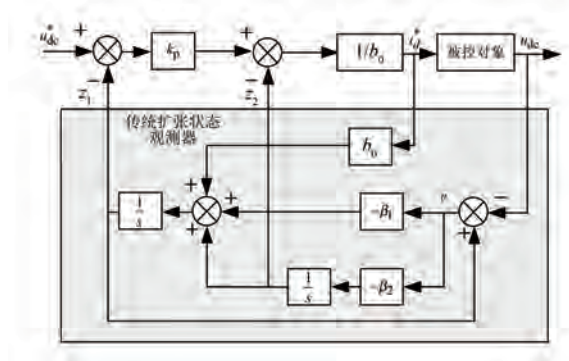


图 3 一阶传统 LADRC 结构框图

Fig. 3 Block diagram of first-order traditional LADRC structure

2.2 改进 LADRC 控制器设计

线性扩张状态观测器能否准确观测系统状态变量并实现对总和扰动的精确估计是 LADRC 的关键,根据式(8)可得 z_1 、 z_2 的传递函数:

$$\begin{cases} z_1 = \frac{\beta_1 s + \beta_2}{s^2 + \beta_1 s + \beta_2} u_{dc} + \frac{s}{s^2 + \beta_1 s + \beta_2} b_0 i_d^* \\ z_2 = \frac{\beta_2 s}{s^2 + \beta_1 s + \beta_2} u_{dc} - \frac{\beta_2}{s^2 + \beta_1 s + \beta_2} b_0 i_d^* \end{cases} \quad (12)$$

式中: s 为复数 $j\omega$ 。

根据式(7)可得总和扰动的表达式为

$$g = \dot{u}_{dc} - b_0 i_d^* \quad (13)$$

将式(13)与式(7)、式(12)结合作差可得 z_1 、 z_2 的观测误差传递函数:

$$\begin{cases} e = \frac{s^2}{s^2 + \beta_1 s + \beta_2} u_{dc} + \frac{s}{s^2 + \beta_1 s + \beta_2} b_0 i_d^* \\ e_1 = -\frac{s^3 + \beta_1 s^2}{s^2 + \beta_1 s + \beta_2} u_{dc} - \frac{s^2 + \beta_1 s}{s^2 + \beta_1 s + \beta_2} b_0 i_d^* \\ e_1 = z_2 - g \end{cases} \quad (14)$$

由式(14)可知, z_1 的观测误差 e 包含了来自系统输出量 u_{dc} 和系统控制量 i_d^* 两部分的误差, z_1 是对系统输出量 u_{dc} 的观测, z_1 的表达式中关于 i_d^* 的分量实则是观测误差的来源。为了改善线性扩张状态观测器的动态性能,可对线性扩张状态观测器进行改进以消除观测误差中来自系统控制量 i_d^* 的误差分量。

将扩张观测器的表达式(8)中的 $b_0 i_d^*$ 去除后, z_1 、 z_2 的传递函数为

$$\begin{cases} z_1 = \frac{\beta_1 s + \beta_2}{s^2 + \beta_1 s + \beta_2} u_{dc} \\ z_2 = \frac{\beta_2 s}{s^2 + \beta_1 s + \beta_2} u_{dc} \end{cases} \quad (15)$$

由式(15)可知, z_1 的表达式中已去除关于 i_d^* 的分量,减小了观测误差,但此时 z_2 已不是对总和扰动的观测,而是对系统输出量 u_{dc} 的一阶微分进行跟踪。根据式(13)新增状态变量 z_3 对总和扰动进行观测,可得:

$$z_3 = z_2 - b_0 i_d^* \quad (16)$$

式中: i_d^* 为前一控制周期的系统控制量。

对式(16)进行拉氏变换可得:

$$z_3 = z_2 - \frac{1}{T_s s + 1} b_0 i_d^* \quad (17)$$

式中: T_s 为控制周期。

根据式(17)可得改进后的扩张状态观测器为

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 e \\ \dot{z}_2 = -\beta_2 e \\ \dot{z}_3 = -\beta_2 e + \frac{1}{T_s} (z_2 - z_3 - b_0 i_d^*) \end{cases} \quad (18)$$

根据式(18)设计扰动估计补偿和线性误差反馈律为

$$i_d^* = \frac{1}{b_0} [k_p(u_{dc}^* - z_1) - z_3] \quad (19)$$

根据式(19)所得的改进扩张状态观测器,可得一阶改进型 LADRC 控制器结构框图,如图 4 所示。

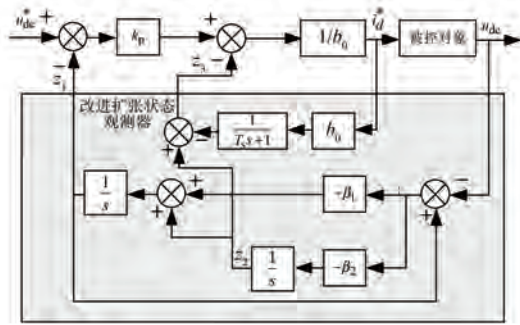


图 4 一阶改进 LADRC 结构框图
 Fig. 4 Block diagram of first-order improved LADRC structure

3 改进 LADRC 控制器性能分析

根据式(7)可知,被控对象模型为

$$u_{dc} = \frac{1}{s}(g + b i_d^*) \quad (20)$$

结合式(18)和式(19)可得:

$$\begin{cases} i_d^* = G_1(s) \frac{N(s)}{D(s)} \left[\frac{D(s)}{N(s)} u_{dc}^* - u_{dc} \right] \\ G_1(s) = \frac{k_p}{b_0} \frac{T_s s + 1}{T_s s} \\ D(s) = (s + \omega_0)^2 \\ N(s) = \left(2\omega_0 + \frac{\omega_0^2}{k_p} \right) s + \omega_0^2 \end{cases} \quad (21)$$

由式(20)和式(21)可得传递函数形式的电压外环控制框图,如图 5 所示。



图 5 电压外环控制框图
 Fig. 5 Control block diagram of voltage outer loop

根据图 5 可得系统的闭环传递函数为

$$\varphi(s) = \frac{bG_1(s)D(s)}{sD(s) + b_0G_1(s)N(s)} \quad (22)$$

针对扰动 g 的传递函数为

$$\varphi_g(s) = \frac{D(s)}{sD(s) + b_0G_1(s)N(s)} \quad (23)$$

由此可得系统输出量 u_{dc} 对参考输入和扰动

的传递函数:

$$u_{dc} = \frac{bG_1(s)D(s)}{sD(s) + bG_1(s)N(s)} u_{dc}^* + \frac{D(s)}{sD(s) + bG_1(s)N(s)} g \quad (24)$$

同理可得一阶传统 LADRC 控制器的系统输出量 u_{dc} 对参考输入和扰动的传递函数:

$$\begin{cases} u_{dc} = \frac{bG_2(s)}{s + bG_2(s)H_2(s)} u_{dc}^* + \frac{1}{s + bG_2(s)H_2(s)} g \\ G_2(s) = \frac{k_p(s + \omega_0)^2}{b_0s(s + \beta_1 + k_p)} \\ H_2(s) = \frac{(\beta_1 k_p + \beta_2)s + \beta_2 k_p}{k_p(s + \omega_0)^2} \end{cases} \quad (25)$$

根据传统 LADRC 和改进 LADRC 的系统输出量 u_{dc} 对参考输入的传递函数画取波特图进行频域特性分析,如图 6 所示。两种 LADRC 的参数保持一致,其中控制器参数 $k_p = 2\,000$ rad/s,观测器带宽 $\omega_0 = 10\,000$ rad/s,控制周期 $T_s = 52.08$ μ s, $b_0 = -200\,000$ 。由图 6 可知改进型 LADRC 具有更高的系统带宽,且在中频段减小了一定的相位滞后,具有更好的动态跟踪能力。

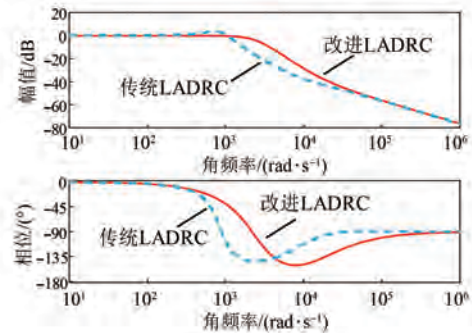


图 6 两种 LADRC 的参考输入传递函数波特图
 Fig. 6 Bode diagram of the reference input transfer functions of the two LADRC

根据传统 LADRC 和改进 LADRC 的系统输出量 u_{dc} 对扰动 g 的传递函数画取波特图进行频域特性分析,如图 7 所示。由图 7 可知,在中低频段,改进型 LADRC 的扰动增益相较传统 LADRC 明显减小,对扰动具有更强的抑制能力。

针对改进型 LADRC 的扰动传递函数分析,令扩张状态观测器的带宽 ω_0 为 10 000 rad/s,取控制器参数 k_p 为 1 000、2 000、3 000、4 000 和

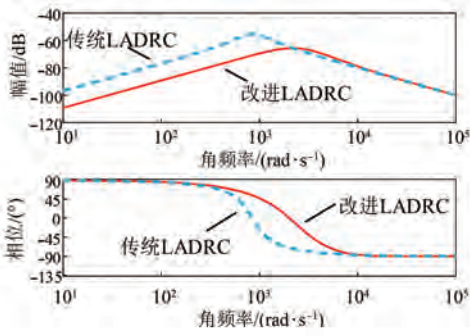


图7 两种 LADRC 的扰动传递函数波特图
Fig. 7 Bode diagram of the disturbance transfer functions of the two LADRC

5 000 rad/s, k_p 变化的频域特性曲线如图 8 所示。

由图 8 可知,当控制器参数 k_p 增大时,在中低频范围内系统对扰动的抑制能力增强。令控制器参数 k_p 为 2 000,观测器带宽 ω_0 为 6 000、8 000、10 000、12 000 和 14 000 rad/s, ω_0 变化的频域特性曲线如图 9 所示。当观测器带宽 ω_0 增大时,在中频段系统对扰动的抗扰能力增强。

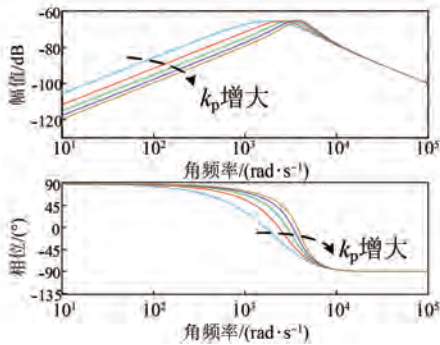


图8 改进型 LADRC 的扰动传递函数波特图 (k_p 变化)
Fig. 8 Bode diagram of the disturbance transfer functions of the improved LADRC (when k_p changes)

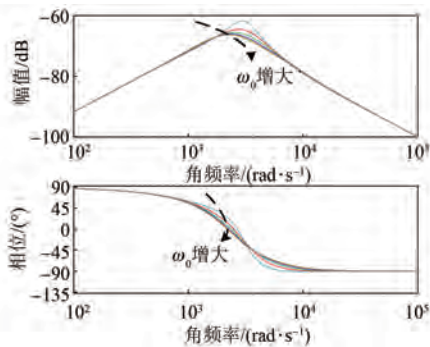


图9 改进型 LADRC 的扰动传递函数波特图 (ω_0 变化)
Fig. 9 Bode diagram of the disturbance transfer functions of the improved LADRC (when ω_0 changes)

针对斜坡扰动分析两种 LADRC 对其抑制能力,选取扰动 g 为斜率 k 的斜坡信号:

$$g = \frac{k}{s^2} \quad (26)$$

将式(26)代入式(24)和式(25),并选取 k 为 1×10^6 、 2×10^6 、 3×10^6 、 4×10^6 和 5×10^6 ,得到传统 LADRC 和改进 LADRC 的系统输出量 u_{dc} 对斜坡扰动 g 的时域响应,如图 10 所示。由图 10 可知,扰动斜率增大时,二者的扰动抑制能力减弱,当受到相同斜率的扰动时,改进 LADRC 对于斜坡扰动的抑制能力更强,其对系统输出量 u_{dc} 的影响更小。

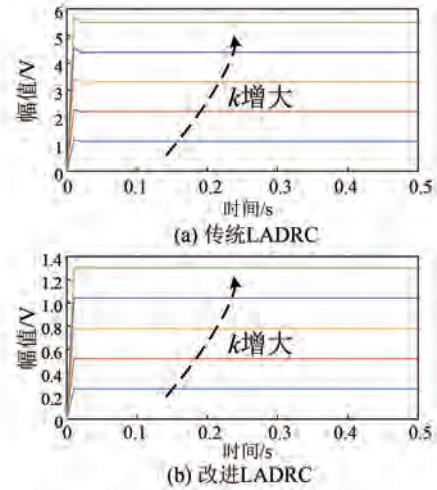


图10 两种 LADRC 的斜坡扰动时域响应
Fig. 10 Time domain response of ramp disturbance for the two LADRC

4 仿真及试验结果

4.1 仿真结果

基于 Matlab/Simulink 仿真软件,搭建了 20 kW 光伏逆变器模型,具体结构如图 1 所示,逆变器模型主要参数如表 1 所示。

表 1 逆变器模型参数

Tab. 1 Inverter model parameters

| 参数名称 | 参数值 |
|---|--------|
| 母线上下侧电容 C_{d1} 、 $C_{d2}/\mu\text{F}$ | 100 |
| LCL 滤波器逆变侧电感 $L_1/\mu\text{H}$ | 860 |
| LCL 滤波器网侧电感 $L_2/\mu\text{H}$ | 33 |
| LCL 滤波器滤波电容 $C/\mu\text{F}$ | 8 |
| 电网频率/Hz | 50 |
| 电网电压有效值/V | 220 |
| 开关频率/Hz | 19 200 |

设置直流母线电压参考值为 620 V,传统

LADRC 和改进 LADRC 的参数保持一致, 控制器参数 $k_p = 4\ 000$, 观测器带宽 $\omega_0 = 6\ 000\ \text{rad/s}$, $b_0 = -200\ 000$ 。图 11 为光照强度突变时传统 LADRC 和改进 LADRC 的直流母线电压波形对比。

如图 11(a) 所示, 在 0.5 s 时光照强度从 $1\ 000\ \text{W/m}^2$ 阶跃变为 $500\ \text{W/m}^2$, 改进 LADRC 的直流母线电压最大跌落 15.7 V, 超调量为 2.53%, 调节时间为 0.015 s; 传统 LADRC 的直流母线电压最大跌落 16.8 V, 超调量为 2.71%, 调节时间为 0.028 s。

如图 11(b) 所示, 在 0.6 s 时光照强度从 $500\ \text{W/m}^2$ 阶跃变为 $1\ 000\ \text{W/m}^2$, 改进 LADRC 的直流母线电压最大升压 13.9 V, 超调量为 2.24%, 调节时间为 0.009 s; 传统 LADRC 的直流母线电压最大升压 15.8 V, 超调量为 2.55%, 调节时间为 0.02 s。

光照强度变化时, 改进 LADRC 与传统 LADRC 相比超调量有一定的减小, 而对于调节时间, 改进 LADRC 的调节时间相较传统 LADRC 有明显的改善, 具有更强的抗干扰能力。

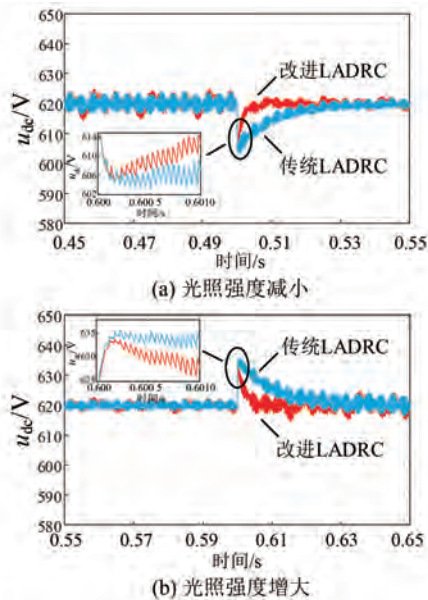


图 11 光照强度变化时的直流母线电压仿真波形
Fig. 11 The simulation waveforms of DC-bus voltage when solar irradiance changes

图 12 为对系统控制量 i_d^* 施加斜率为 200 的斜坡扰动时传统 LADRC 和改进 LADRC 的直流母线电压波形对比。施加的斜坡扰动如图 12(a) 所示, 扰动在 0.2 s 开始上升, 0.3 s 时升至 20 A,

0.5 s 到 0.6 s 期间扰动从 20 A 下降至 0 A。由图 12(b) 和 (c) 可知, 当斜坡扰动上升和下降时, 改进 LADRC 的直流母线电压几乎能够始终保持稳定在参考值, 而传统 LADRC 的直流母线电压在斜坡扰动上升时, 电压最大跌落 8.3 V; 当扰动稳定后, 直流母线电压逐渐回到设定的参考值; 当斜坡扰动下降时, 传统 LADRC 的直流母线电压最大升压 8 V, 从 0.6 s 开始直流母线电压开始缓慢回到设定的参考值。

由此可知, 改进 LADRC 相比传统 LADRC 受到斜坡扰动的影响更小, 在扰动过程中, 改进 LADRC 几乎未受到影响。在对斜坡扰动的抑制方面, 改进 LADRC 具有更好的性能。

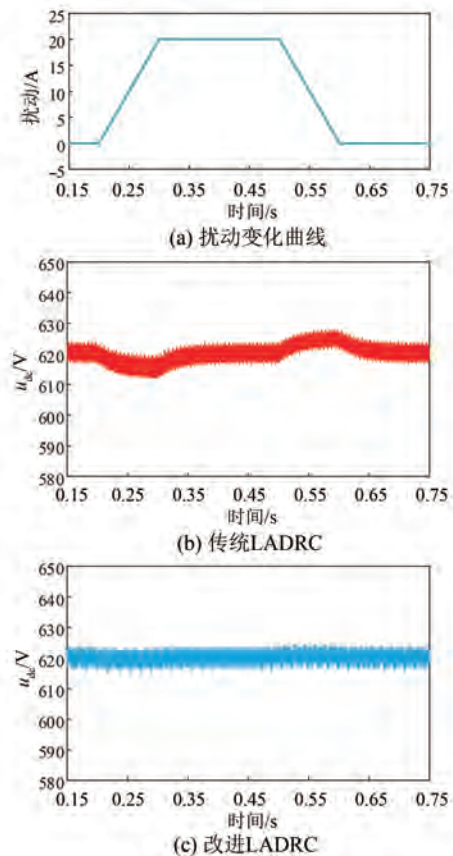


图 12 施加斜坡扰动时的直流母线电压仿真波形
Fig. 12 The simulation waveforms of DC-bus voltage with ramp disturbance

4.2 试验结果

为了验证所提控制策略的可行性, 搭建了如图 13 所示的 20 kW 光伏逆变器试验平台, 该平台主要由两台 15 kW 的光伏模拟器、20 kW 光伏逆变器、示波器和公共电网组成。其中光伏模拟器

可设置光伏输出特性曲线,模拟真实的光伏阵列。将光伏模拟器与光伏逆变器的两路输入进行连接,光伏逆变器的主要参数与表 1 一致,光伏逆变器的输出直接接入到公共电网。示波器及电压探头用于获取光伏逆变器直流母线电压数据。

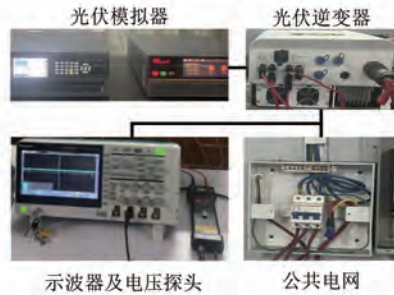


图 13 光伏逆变器试验平台

Fig. 13 Experimental platform for photovoltaic inverter

设置两台光伏模拟器的最大输出功率均为 8 kW,光照强度为 $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$,温度为 $25\ ^\circ\text{C}$ 。当光伏逆变器稳定工作在最大功率点后,设置两台光伏模拟器的光照强度从 $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ 阶跃跌落到 $500\ \text{W}/\text{m}^2$,改进 LADRC 和传统 LADRC 的母线电压试验波形如图 14(a)所示。改进 LADRC 电压最大跌落 $61.5\ \text{V}$,超调量为 9.46% ,调节时间为 $13\ \text{ms}$;传统 LADRC 电压最大跌落 $69\ \text{V}$,超调量为 10.62% ,调节时间为 $28\ \text{ms}$ 。

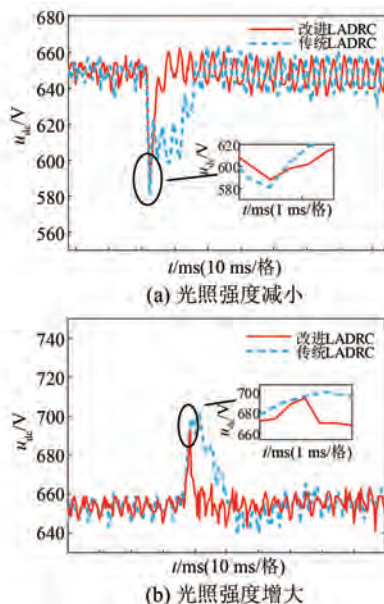


图 14 光照强度变化时的直流母线电压试验波形

Fig. 14 The experimental waveforms of DC-bus voltage when solar irradiance changes

设置两台光伏模拟器的光照强度从 $500\ \text{W}/\text{m}^2$ 阶跃上升至 $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$,两种 LADRC 的母线电压试验波形如图 14(b)所示。改进 LADRC 电压最大升压 $43\ \text{V}$,超调量为 6.62% ,调节时间为 $11\ \text{ms}$;传统 LADRC 电压最大升压 $53\ \text{V}$,超调量为 8.15% ,调节时间为 $33\ \text{ms}$ 。

试验结果表明当光照强度突变时,改进 LADRC 的最大跌落电压和最大上升电压均略小于传统 LADRC,改进 LADRC 的调节时间比传统 LADRC 的调节时间更短。由此可知改进 LADRC 在受到扰动后能够更快速地恢复稳态,具有更好的动态性能和更强的抗扰能力。

5 结语

文中针对光伏并网逆变器直流母线电压外环提出了一种改进一阶 LADRC 控制策略。该策略在扩张状态观测器中引入前一控制周期的系统控制量进行改进,减小了观测器的观测误差;对改进前后的 LADRC 的控制性能进行频域分析,改进 LADRC 提高了系统带宽,具有更低的扰动增益,提升了直流母线电压外环的动态性能和抗扰性。仿真和试验结果表明改进 LADRC 具有更强的抗扰性和更优的控制性能。

参考文献

- [1] 康重庆,杜尔顺,郭鸿业,等. 新型电力系统的六要素分析[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1741-1750.
- [2] 邹才能,熊波,薛华庆,等. 新能源在碳中和中的地位与作用[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(2): 411-420.
- [3] ZOU C N, XIONG B, XUE H Q, et al. The role of new energy in carbon neutral [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(2): 411-420.
- [4] SINKE W C. Development of photovoltaic technologies for global impact [J]. Renewable Energy, 2019, 138: 911-914.
- [5] VAIRAVASUNDARAM I, VARADARAJAN V, PAVANKUMAR P J, et al. A review on small power

- rating PV inverter topologies and smart PV inverters [J]. *Electronics*, 2021, 10(11): 1296.
- [5] 周雪松, 刘乾, 马幼捷, 等. 基于改进自抗扰的光伏并网逆变器直流母线电压控制[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(10): 65-72.
- ZHOU X S, LIU Q, MA Y J, et al. DC-link control of photovoltaic grid-connected inverter based on improved active disturbance rejection [J]. *Acta Energiae Solaris Sinca*, 2022, 43(10): 65-72.
- [6] TANG W, ZONG X, YANG J, et al. Voltage control method of PV grid-connected DC bus based on tracking differentiator [C] // 2020 Chinese Automation Congress, Shanghai, 2020.
- [7] TAGHIZADEH S, KARIMI-GHARTEMANI M, HOSSAIN M J, et al. A fast and robust DC-bus voltage control method for single-phase voltage-source DC/AC converters [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 34(9): 9202-9212.
- [8] ZHAO E S, HAN Y, LIN X Y, et al. Harmonic characteristics and control strategies of grid-connected photovoltaic inverters under weak grid conditions [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022, 142(Part B): 108280.
- [9] AOUCHECHE N. Meta-heuristic optimization algorithms based direct current and DC link voltage controllers for three-phase grid connected photovoltaic inverter [J]. *Solar Energy*, 2020, 207: 683-692.
- [10] 解宝, 李萍宇, 苏建徽, 等. 弱电网下光伏并网逆变器的数字 H_∞ 鲁棒控制器设计[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(2): 353-360.
- XIE B, LI P Y, SU J H, et al. Design of digital H_∞ robust controller for photovoltaic grid-connected inverter in weak grid [J]. *Acta Energiae Solaris Sinca*, 2023, 44(2): 353-360.
- [11] ZHAO Z, HU J, CHEN H. Bus voltage control strategy for low voltage DC microgrid based on AC power grid and battery [C] // 2017 IEEE International Conference on Energy Internet, Beijing, 2017.
- [12] LAKSHMI M, HEMAMALINI S. Coordinated control of MPPT and voltage regulation using single-stage high gain DC-DC converter in a grid-connected PV system [J]. *Electric Power Systems Research*, 2019, 169: 65-73.
- [13] 李浩东, 肖伸平, 余锦. 基于自适应 PSO 的微电网双向 DC-DC 变换器前馈自抗扰控制[J]. *电机与控制应用*, 2023, 50(2): 73-81.
- LI H D, XIAO S P, YU J. Feedforward active disturbance rejection control of microgrid bidirectional DC-DC converter based on adaptive PSO [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(2): 73-81.
- [14] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. *控制与决策*, 1998, 1: 19-23.
- HAN J Q. Auto-disturbance-rejection controller and its applications [J]. *Control and Decision*, 1998, 1: 19-23.
- [15] GAO Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning [C] // American Control Conference 2003 Proceedings of the IEEE, Denver, 2003.
- [16] 王术波, 韩宇, 陈建, 等. 基于 ADRC 迭代学习控制的四旋翼无人机姿态控制[J]. *航空学报*, 2020, 41(12): 319-331.
- WANG S B, HAN Y, CHEN J, et al. Active disturbance rejection control of UAV attitude based on iterative learning control [J]. *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica*, 2020, 41(12): 319-331.
- [17] 鄢化彪, 徐炜宾, 黄绿娥. 基于改进 ADRC 的四旋翼姿态控制器设计[J]. *北京航空航天大学学报*, 2023, 49(12): 3283-3292.
- YAN H B, XU W B, HUANG L E. Design of quadrotor attitude controller based on improved ADRC [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2023, 49(12): 3283-3292.
- [18] 牟方厉, 吴丹, 董云飞. 具有多层感知器力矩补偿的机器人自抗扰控制[J]. *控制理论与应用*, 2020, 37(6): 1397-1405.
- MOU F L, WU D, DONG Y F. Active disturbance rejection control with multilayer perceptron compensating network for robot systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(6): 1397-1405.
- [19] 郭伟, 罗力成, 陆江燕, 等. 基于线性自抗扰控制的永磁同步电机无传感器控制[J]. *电机与控制应用*, 2023, 50(8): 1-8.
- GUO W, LUO L C, LU J Y, et al. Sensorless control of permanent magnet synchronous motor based on linear active disturbance rejection control [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(8): 1-8.
- [20] 迟世伟, 刘慧博. 基于前馈补偿的永磁同步电机自抗扰控制[J]. *电机与控制应用*, 2023, 50(1):

- 9-13.
- CHI S W, LIU H B. ADRC control of permanent magnet synchronous motor based on the feedforward compensation [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(1): 9-13.
- [21] 方圣龙, 樊继东. 一种基于自抗扰的永磁同步电机复合控制策略[J]. *电机与控制应用*, 2023, 50(10): 62-69.
- FANG S L, FAN J D. A composite control strategy of permanent magnet synchronous motor based on active disturbance rejection [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(10): 62-69.
- [22] 杨林, 曾江, 黄仲龙. 线性自抗扰技术在 LCL 逆变器并网电流控制及有源阻尼中的应用[J]. *电网技术*, 2019, 43(4): 1378-1386.
- YANG L, ZENG J, HUANG Z L. Application of linear active disturbance rejection technique in grid-connected current control and active damping of LCL type inverter [J]. *Power System Technology*, 2019, 43(4): 1378-1386.
- [23] 陈美锋, 王久和, 杨道宽, 等. 基于 EL 模型的 TNPC 型 APF 自抗扰无源控制策略[J]. *电机与控制应用*, 2022, 49(2): 90-96.
- CHEN M F, WANG J H, YANG D K, et al. Active disturbance rejection passivity-based control strategy of TNPC-APF based on EL model [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2022, 49(2): 90-96.
- [24] 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 X S, ZHOU Y L, MA Y J, et al. Improved linear active disturbance rejection control of wind power grid-connected inverter [J]. *Electric Drive*, 2022, 52(1): 46-53.

收稿日期:2023-12-21

收到修改稿日期:2024-01-23

作者简介:

谢宝平(1999-),男,硕士研究生,研究方向为光伏逆变器控制技术,19866793959@163.com;

*通信作者:曾江(1972-),男,博士,副教授,研究方向为配电网自动化、电能质量分析与控制,zengxy@scut.edu.cn。

Bus Voltage Control of Photovoltaic Inverter Based on Improved First-Order LADRC

XIE Baoping, ZENG Jiang^{*}, LIU Pei, ZHAO Benqiang, MA Haijie, YE Kangquan

(School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Key words: photovoltaic grid-connected inverter; DC-bus voltage; voltage outer loop; linear active disturbance rejection control; frequency domain analysis

In response to the global trend of climate change, the investment in energy systems is gradually transitioning from fossil fuels to renewable energy, and solar plays a significant role in the energy market. The photovoltaic inverter is the grid connection interface for the photovoltaic array, and its stable operation and excellent control performance can ensure good photovoltaic power generating quality. Due to the uncertainty of photovoltaic power generation, fluctuations in photovoltaic power generation can cause significant disturbances in the DC-bus voltage.

In order to improve the disturbance resistance of the DC-bus voltage and the control performance of the inverter, a photovoltaic inverter bus voltage control strategy based on improved first-order linear active disturbance rejection control (LADRC) is proposed. Firstly, the voltage outer loop controller is designed by traditional LADRC.

Secondly, on the basis of traditional linear extended state observer (LESO), improvements are made to it. The system control component in the expression of the state variable is removed, so that the observation error equation of the state variable only contains error components related to the system input, which reduces the observation error of the state variable. A new state variable is added and the system control quantity of the previous control cycle is introduced, and total disturbance is re-estimated and compensated based on the total disturbance expression. The block diagram of first-order improved LADRC structure is shown in Fig.1.

Finally, the control performance of improved LADRC is analyzed in the frequency domain. Compared with the traditional LADRC, the improved LADRC has an increased system bandwidth, enhanced dynamic tracking ability, and smaller disturbance gain in the mid to low frequency range.

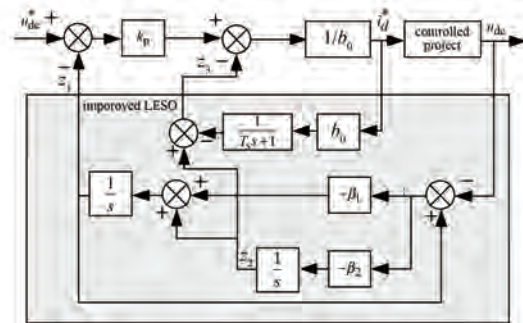


Fig. 1 Block diagram of first-order improved LADRC structure

In order to verify the effectiveness of the proposed improved LADRC strategy, simulations and experiments are conducted on both the traditional LADRC and improved LADRC strategies. The experimental results of DC-bus voltage when solar irradiance changes are shown in Tab.1. Simulation and experiments show that the improved LADRC has a shorter regulating time, better system dynamic performance, and the disturbance resistance ability of DC-bus voltage is enhanced.

Tab. 1 The experimental results of DC-bus voltage when solar irradiance changes

| Disturbance type | Overshoot/% | | Regulating time/ms | |
|---------------------------|-------------------|----------------|--------------------|----------------|
| | Traditional LADRC | Improved LADRC | Traditional LADRC | Improved LADRC |
| Decrease solar irradiance | 10.62 | 9.46 | 28 | 13 |
| Increase solar irradiance | 8.15 | 6.62 | 33 | 11 |