

# 光伏并网系统直流母线自抗扰稳压控制

徐展策, 许巍

(内蒙古自治区锡林郭勒供电公司, 内蒙古 锡林浩特 026000)

**摘要:**针对光伏并网逆变器系统在多扰动情况下运行的问题,提出了一种集成光伏逆变器模型的线性自抗扰控制(LADRC-PM)策略。首先,对光伏并网系统的动态过程进行了分析与建模,并结合光伏系统的模型特征设计了LADRC-PM结构,在经典结构基础上进一步改进了快速性。然后,在双闭环控制框架的基础上引入该结构,使系统能够通过前馈的方式补偿扰动,以增强系统对不确定性的抑制能力。再者,通过频域分析法对所提控制策略的数学模型进行了动态分析,在理论上验证了其工程稳定性、跟踪收敛性以及抗扰优越性,并以此给出了一些参数的整定指导。最后,通过Matlab/Simulink平台仿真验证了LADRC-PM在不同场景下的优越性。

**关键词:**光伏并网;一阶自抗扰控制;模型分析与结合;多工况暂态测试

**中图分类号:**TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed25438

## ADRC-based Stabilization Control for DC Bus of PV Grid-connected System

XU Zhance, XU Wei

(XilinGol League Branch of Inner Mongolia Power (Group) Co., Ltd., Xilinhot 026000, Nei Mongol, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the photovoltaic grid-connected inverter system operates under multiple disturbances, an linear active disturbance rejection control (LADRC) grid-connected strategy combined with photovoltaic system was proposed. Firstly, the dynamic process of PV grid-connected system was analyzed and modeled, and the LADRC-PM structure was designed according to the model characteristics of the photovoltaic system, further improving the speed on the basis of the classical structure. And then, the structure was introduced on the basis of the double closed-loop control framework, so that the system could compensate the disturbance through the feedforward way to enhance the system ability to suppress the uncertainty. Furthermore, the mathematical model of the proposed control strategy was dynamically analyzed using frequency domain analysis method, and its engineering stability, tracking convergence, and disturbance rejection superiority were theoretically verified, and the guidance of adjusting some parameters was given. Finally, the advantages of LADRC-PM control strategy was verified by the Matlab/Simulink simulation in various working conditions.

**Key words:** photovoltaic grid-connected; first-order active disturbance rejection control (ADRC); model analysis and combination; multi-condition transient test

随着社会的进步,当今社会对能源的要求越来越高,这促使可再生能源(潮汐能、太阳能、风能等)的占有量逐年递增<sup>[1-2]</sup>。特别是光伏发电技术,其因环保方便而被广泛应用<sup>[3-4]</sup>。在光伏并网系统中,电力电子变换器是提高光伏板效率和系统稳定性的关键<sup>[5-9]</sup>。变换器的任务是不断调整系统,使其无论天气或负载状况如何都能维持系统的稳定<sup>[10]</sup>。工程上,双级光伏并网系统被广泛

采用,以实现光伏板与供电网络之间的高效电能交换和稳定连接,其主要由并网逆变器和DC-DC升压变换器(boost converter, BC)组成,两者通过直流电容互联,如图1所示。在无故障情况下,并网逆变器用于控制注入电网的电流/功率,而BC负责从光伏系统中提取所需功率<sup>[11]</sup>。

为了使并网逆变器能够获得良好的暂态性能和全局稳定性,目前的研究已经提出了一些方

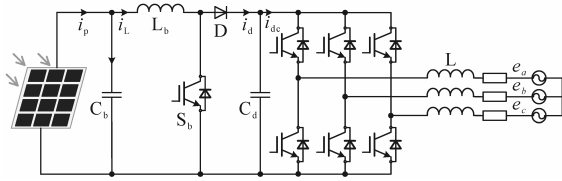


图1 光伏发电系统

Fig.1 Photovoltaic power generation system

法。经典PI控制器在级联结构下广泛应用于直流环节电压和电网电流的调节,具有结构简单、易于推广等优点。级联结构由两个环组成:外环以栅极电流的直接分量作为输入控制来调节直流环节电压,内环跟踪栅极参考电流<sup>[12-14]</sup>。因此,通过限制外循环提供的当前引用,可以很容易地处理当前约束。在文献[15-17]中,采用反馈线性化控制逆变器注入有功、无功功率。这种策略的电流因被认为是闭环系统的内部动态而不能被限制。事实上,由于电压导数过高,直流参考电压的快速变化可能导致瞬态电流超过其极限。对于在文献[18-19]中提出的模型预测控制(model predictive control, MPC)技术,其思想是找到最小化成本函数的电压矢量,其形式取决于性能要求。为此,在每个采样时间对所有可能的电压向量代价函数进行评估,并将给出最低的代价函数视为最优电压向量。这种类型的MPC策略需要精确的模型知识来保证系统的鲁棒性并且计算量较高。与传统的比例积分(PI)控制器相比,反馈线性化和MPC都比较难以推广。

针对并网逆变系统的干扰影响,人们提出了多种估计和减轻干扰影响的方法,自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)是一种合适的解决方案。基于线性自抗扰理论,有些学者通过分离传统的耦合观测器与模型误差,提出了一种基于扩张状态观测器(extended state observer, ESO)的逆变器电流控制策略,改进了观测器的鲁棒性<sup>[20]</sup>。在文献[21]中,提出了一种基于ESO的超局域模型,并从无差拍方法的电压基准中减去观测到的扰动。当电网电压出现不平衡时,类似的技术还被用于有源前端整流器,以实现稳定控制<sup>[22]</sup>。在文献[23]中,ESO被用于预测模型,并将干扰抑制作为速度控制回路的并行观测器。在文献[24]中,一种被称为广义ESO的高阶线性ESO (LESO),能够以最小的跟踪误差补偿总扰动,在不依赖精确系统模型的情况下改善系统动力学性能;然而稳定裕度随着ESO阶数的增

加而减小。

可见,ADRC对扰动的独特处理方式十分符合光伏发电系统对控制性能的要求。目前的设计思路通常将被控对象完全视为未知量,这样会对观测器的性能提出更为苛刻的要求,难以平衡带宽和噪声。为此,本文在模型动态分析的结果上给出了线性自抗扰(linear active disturbance rejection control, LADRC)框架下的数学表达,并在LADRC理论的基础上结合模型信息改造外环控制器,解决光伏发电系统因不确定性引起的动态过程恶化问题。然后,在s域分别对系统输出收敛性、整体系统稳定性以及动态抗扰能力进行了理论分析,验证了优越性。最后,通过并网点电压平衡/不平衡波动以及负载切换的测试验证了系统性能。

## 1 光伏系统建模

由图1可知系统的整体结构。为了方便设计控制策略,可将系统转化至d-q旋转参考坐标系,则有:

$$\begin{cases} \frac{di_d(t)}{dt} = -\frac{R}{L}i_d(t) + \omega i_q(t) - \frac{e_d(t)}{L} + \frac{1}{L}v_d(t) + \frac{1}{L}\eta_d(t) \\ \frac{di_q(t)}{dt} = -\frac{R}{L}i_q(t) + \omega i_d(t) - \frac{e_q(t)}{L} + \frac{1}{L}v_q(t) + \frac{1}{L}\eta_q(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $e_d(t), e_q(t)$ 分别为电网电压的d,q轴分量; $i_d(t), i_q(t)$ 分别为电网电流的d,q轴分量; $v_d(t), v_q(t)$ 分别为逆变器输出电压的d,q轴分量; $\omega$ 为电网频率; $R, L$ 分别为滤波器的电阻、电感; $\eta_d(t), \eta_q(t)$ 分别为所给出的不确定性。

$\eta_d(t), \eta_q(t)$ 的具体表达式如下:

$$\begin{cases} \eta_d(t) = \Delta R i_d(t) - \omega \Delta L i_q(t) + \Delta e_d(t) + \Delta L \frac{di_d(t)}{dt} + \zeta_d(t) \\ \eta_q(t) = \Delta R i_q(t) - \omega \Delta L i_d(t) + \Delta e_q(t) + \Delta L \frac{di_q(t)}{dt} + \zeta_q(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\Delta R, \Delta L$ 为参数变化量; $\Delta e_d(t), \Delta e_q(t)$ 分别为电压测量与实际值之间的偏差; $\zeta_d(t), \zeta_q(t)$ 分别为作用在系统上的任何其他外部干扰,如脉宽调制(PWM)偏移、角频率的变化和未建模的量等。假设所有的不确定性都有已知的边界。

前级DC-DC变换器与后级逆变器在DC-link的电压电流关系表示为

$$C \frac{dv_{dc}(t)}{dt} = i_0(t) - i_{dc}(t) \quad (3)$$

式中:  $v_{dc}(t)$  为 DC-link 的电压;  $i_{dc}(t)$  为逆变器输入电流;  $i_0(t)$  为 DC-DC 变换器输出处的电流;  $C$  为 DC-link 电容。

假设逆变器内部功率损耗忽略不计,给出了逆变器直流输入与交流输出功率平衡关系:

$$v_{dc}(t)i_{dc}(t) = \frac{3}{2} [e_d(t)i_d(t) + e_q(t)i_q(t)] \quad (4)$$

根据式(3)、式(4),在并网逆变器处,DC-link 处电压可表示为

$$\frac{dv_{dc}(t)}{dt} = -\frac{3}{2Cv_{dc}(t)} [e_d(t)i_d(t) + e_q(t)i_q(t)] + \frac{1}{C}i_0(t) \quad (5)$$

考虑系统的不确定性,可以将式(5)改写为

$$\frac{dv_{dc}(t)}{dt} = -\frac{3}{2Cv_{dc}(t)} [e_d(t)i_d(t) + e_q(t)i_q(t)] + \frac{1}{C}\eta_v(t) \quad (6)$$

式中:  $\eta_v(t)$  为不确定性变量,表示系统中的不确定性。

可将  $\eta_v(t)$  细化为

$$\eta_v(t) = -\frac{3}{2v_{dc}(t)} \{e_d(t)\Delta i_d(t) + \Delta e_d(t)[i_d(t) + \Delta i_d(t)] + e_q(t)\Delta i_q(t) + \Delta e_q(t)[i_q(t) + \Delta i_q(t)]\} + \Delta v(t) + i_0(t) + \Delta C \frac{dv_{dc}(t)}{dt} + \zeta_v(t) \quad (7)$$

式中:  $\Delta v(t)$  为由于直流环节电压测量造成的不确定性;  $i_0(t)$  为光伏电流,视为一种未知的外部干扰;  $\Delta i_d(t)$ ,  $\Delta i_q(t)$  分别为因参数变化和测量环节引发的不确定性表述;  $\zeta_v(t)$  为其他未知外部干扰。

## 2 光伏并网 LADRC

基于式(6)可知,被控对象为一阶系统。选取状态变量,  $x'_1(t) = x'(t) = v_{dc}(t)$ ,  $x'_2(t) = f(t)$ , 可将表述光伏发电系统的式(6)转化为如下形式:

$$\begin{cases} \underbrace{\begin{bmatrix} \dot{x}'_1(t) \\ \dot{x}'_2(t) \end{bmatrix}}_{\dot{x}'(t)} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} x'_1(t) \\ x'_2(t) \end{bmatrix}}_{x'(t)} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ b_0 \end{bmatrix}}_B u(t) + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}}_E \dot{f}(t) \\ y(t) = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}}_C \underbrace{\begin{bmatrix} x'_1(t) \\ x'_2(t) \end{bmatrix}}_{x'(t)} \end{cases} \quad (8)$$

基于式(8)可得对应的 LESO 方程:

$$\begin{cases} \dot{Z}'(t) = AX'(t) + Bu(t) + \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} [y(t) - \hat{y}(t)] \\ \hat{y}(t) = CZ'(t) \end{cases} \quad (9)$$

忽略可由估计得到的变量,常规 LESO 方程可进一步表述为

$$\begin{bmatrix} \dot{z}'_1(t) \\ \dot{z}'_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\beta_1 & 1 \\ -\beta_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z'_1(t) \\ z'_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \beta_1 \\ b'_0 & \beta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(t) \\ y(t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中  $[\beta_1 \ \beta_2]^T = [2\omega_0 \ \omega_0^2]^T$

再结合下式控制律,可得常规 LADRC。

$$u(t) = \frac{K_p[r(t) - z'_1(t)] - z'_2(t)}{b'_0} \quad (11)$$

为了更好地利用模型信息,将其进行等价变换:

$$\frac{dv_{dc}^2(t)}{dt} = -\frac{3}{C} [e_d(t)i_d(t) + e_q(t)i_q(t)] + \frac{2v_{dc}(t)\eta_v(t)}{C} \quad (12)$$

通常,无功轴设为零,因此式(12)可简化为

$$\frac{dv_{dc}^2(t)}{dt} = -\frac{3}{C} e_d(t)i_d(t) + w(t) \quad (13)$$

其中

$$\begin{aligned} w(t) &= \frac{2v_{dc}(t)}{C} [\Delta v(t) + i_0(t) + \Delta C \frac{dv_{dc}(t)}{dt} + \zeta_v(t)] - \frac{3}{C} \{e_d(t)\Delta i_d(t) + \Delta e_d(t) \cdot \\ &\quad [i_d(t) + \Delta i_d(t)]\} \end{aligned}$$

设:  $x(t) = v_{dc}^2(t)$ ,  $x_2(t) = f(t)$ , 且  $b = -[3e_d(t)]/C$ ,  $u(t) = i_d(t)$ 。可将式(13)转化为

$$\dot{x}(t) = bu(t) + w(t) \quad (14)$$

通过归纳  $b$  中的已知部分  $b_0$ , 可将所有的未知部分归纳为总扰动:

$$f(t) = w(t) + (b - b_0)u(t) \quad (15)$$

设  $x_1(t) = x(t)$ ,  $x_2(t) = f(t)$ , 可将表述光伏发电系统的式(14)转化为如下形式:

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1(t) \\ \dot{z}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 & 1 \\ -l_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & l_1 \\ b_0 & l_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(t) \\ y(t) \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中  $[l_1 \ l_2]^T = [2\omega_0 \ \omega_0^2]^T$

与式(16)对应的控制律为

$$u(t) = \frac{K_p[r(t) - z_1(t)] - z_2(t)}{b_0} \quad (17)$$

通过将LESO的输出、系统模型、控制律有机结合,可组成LADRC-PM结构,如图2所示。

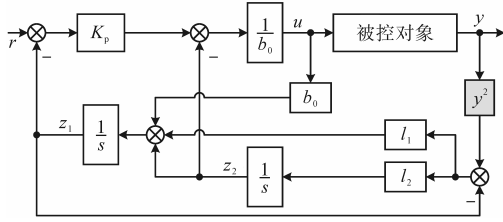


图2 光伏并网LADRC-PM结构图

Fig.2 LADRC-PM structure diagram of PV grid connection

### 3 性能分析

#### 3.1 收敛性分析

收敛性是评价一个观测器性能的关键指标,它影响着观测器对被观测量的重构性能,也决定了采用该结构的控制稳定性。

由式(16)可得LESO输出、控制变量、系统输出之间的函数关系如下:

$$z_1(s) = \frac{sl_1 + l_2}{s^2 + sl_1 + l_2} Y(s) + \frac{b_0}{s^2 + sl_1 + l_2} U(s) \quad (18)$$

$$z_2(s) = \frac{sl_2}{s^2 + sl_1 + l_2} Y(s) + \frac{b_0(s + l_1)}{s^2 + sl_1 + l_2} U(s) \quad (19)$$

根据式(8)可得:

$$f(t) = \dot{y}(t) - b_0 u(t) \quad (20)$$

综合式(16)、式(20)可得偏差表达式:

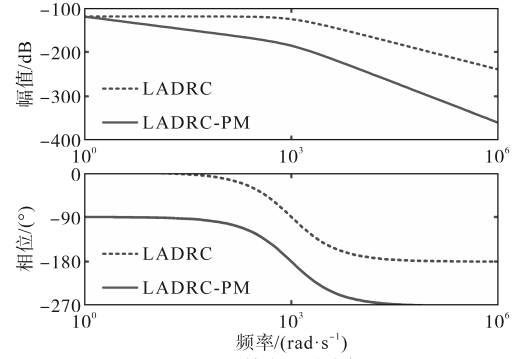
$$\begin{cases} E_1(s) = -\frac{s^2}{s^2 + sl_1 + l_2} Y(s) + \frac{1}{s^2 + sl_1 + l_2} b_0 U(s) \\ E_2(s) = -\frac{s^2(s + l_1)}{s^2 + sl_1 + l_2} Y(s) + \frac{s^2 + l_1 + s(1 + l_1) + l_2}{s^2 + sl_1 + l_2} b_0 U(s) \end{cases} \quad (21)$$

为了使结果适用于大部分应用场景, $y(t)$ ,  $u(t)$ 取为: $Y(s) = K/s$ ,  $U(s) = K/s$ 。可得:

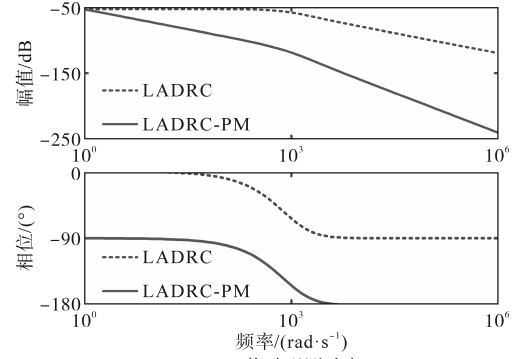
$$\begin{cases} E_{1s} = \lim_{s \rightarrow 0} E_1(s) = 0 \\ E_{2s} = \lim_{s \rightarrow 0} E_2(s) = 0 \end{cases} \quad (22)$$

由式(22)可知,在大部分应用场景下可达成偏差收敛至零的动态响应,满足LESO对系统状态和总和扰动的无偏估计。

根据收敛性分析可知,当 $y(t)$ 为斜坡信号,即 $y(t) = t$ 时,二者的Bode图如图3所示。可见,采用LADRC-PM策略的系统Bode图幅值较低。即在该情况下偏差较小。



(a)输出观测动态



(b)扰动观测动态

图3 观测偏差Bode图

Fig.3 Observational deviation Bode plot

#### 3.2 抗扰性分析

由式(17)~式(19)可得:

$$\begin{cases} U(s) = \frac{G(s)}{b_0 N(s)} R(s) - \frac{H(s)}{b_0 N(s)} Y(s) \\ G(s) = s^2 + sl_1 + l_2 \\ H(s) = sK_p l_1 + sl_2 + K_p l_2 \\ N(s) = s^2 + s + sl_1 + K_p + l_1 + l_2 \\ sY(s) = F(s) + b_0 U(s) \end{cases} \quad (23)$$

结合式(23)可得采用LADRC-PM策略的光伏逆变系统的简化框图结构,如图4所示。

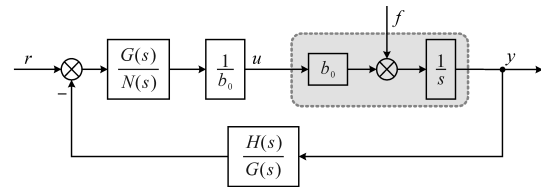


图4 LADRC-PM简化结构

Fig.4 LADRC-PM simplified structure

由图4可得:

$$\begin{aligned} Y(s) &= \frac{G(s)}{sN(s) + H(s)} R(s) + \frac{N(s)}{sN(s) + H(s)} F(s) \\ &= \frac{K_p}{s + K_p} R(s) + \frac{s(s + K_p + 2\omega_0)}{(s + K_p)(s + \omega_0)^2} F(s) \end{aligned} \quad (24)$$

由式(24)可知,当系统运行在相对平稳的工况下,可通过调整 $K_p$ 实现光伏并网系统对给定电压

的快速平稳跟踪。

根据式(19)可得总和扰动及其估计输出之间的对应关系:

$$\frac{z_2(s)}{f(s)} = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (25)$$

基于式(25)可得LESO的扰动观测性能如图5所示,由此可知,增加带宽 $\omega_0$ 可改善动态特性,有一定的优化作用。

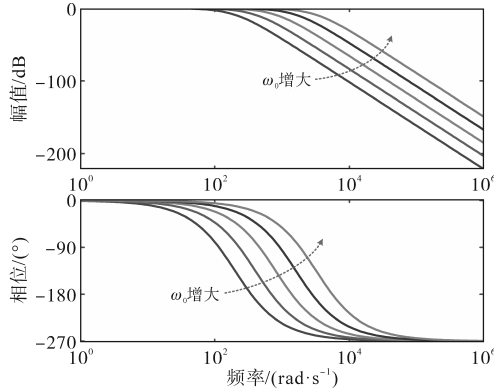


图5 LESO的扰动观测性能

Fig.5 Disturbance observation performance of LESO

由式(24)可知扰动估计项对输出的影响。由图6 LADRC-PM干扰抑制分析可知,随着 $\omega_0$ 增大,采用LADRC-PM策略的干扰抑制能力有所增强,这与LESO的扰动观测相对应。

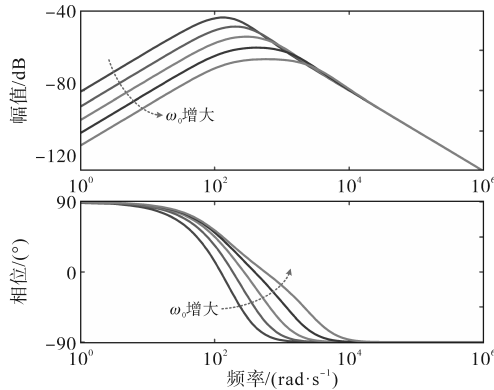


图6 LADRC-PM干扰抑制分析

Fig.6 Analysis of disturbance rejection for LADRC-PM

### 3.3 稳定性分析

根据分析可得LADRC-PM的闭环整定框图如图7所示。

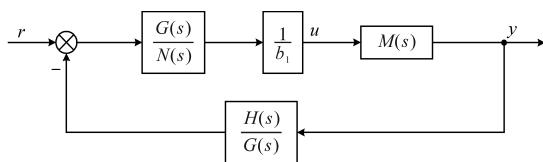


图7 采用LADRC-PM的系统框图

Fig.7 System block diagram adopting LADRC-PM

图7中, $M(s) = 1/s$ ,进而可得:

$$G_u(s) = \frac{m_2 s^2 + m_1 s + m_0}{n_3 s^3 + n_2 s^2 + n_1 s + n_0} \quad (26)$$

其中

$$\begin{cases} m_2 = 1 \\ m_1 = l_1 \\ m_0 = l_2 \end{cases} \quad \begin{cases} n_3 = b_0 \\ n_2 = b_0 + b_0 l_1 \\ n_1 = b_0 K_p + b_0 l_1 + K_p l_1 + l_2 + b_0 l_2 \\ n_0 = K_p l_2 \end{cases}$$

其中 $K_p, l_1, l_2$ 的取值可根据式(16)得到,且 $K_p > 0, \omega_0 > 0$ 。可得当 $i = 0, 1, 2, 3$ 时, $m_i > 0$ 且 $n_i > 0$ 。根据Hurwitz稳定性判据可知,在下式成立的前提下,系统可保持稳定:

$$\begin{cases} \Delta_1 > 0 \\ \Delta_2 > 0 \\ \Delta_3 > 0 \end{cases} \quad (27)$$

其中

$$\Delta_1 = n_2 \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} n_2 & n_3 \\ n_0 & n_1 \end{vmatrix} \quad \Delta_3 = \begin{vmatrix} n_2 & n_3 & 0 \\ n_0 & n_1 & n_2 \\ 0 & 0 & n_0 \end{vmatrix}$$

将式(26)代入式(27)易得: $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ 对应的多项式系数均为正,由此可知 $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ 均大于0,即基于LADRC的系统处于稳定状态,且其稳定性与控制参数取值的大小无关。

## 4 仿真与分析

为了进一步验证所提控制策略,特在Matlab/Simulink平台上搭建了仿真模型对其验证,系统参数如下:额定功率1.5 MW,网侧相电压310 V,直流母线电压700 V,直流母线电容 $C_d = 8$  mF,网侧进线等效电阻0.1  $\Omega$ ,网侧滤波器电感 $L_g = 3$  mH。在固定的温度背景下,分别对单项负载投入、并网点电压( $U_{abc}$ )跌落、高电压工况进行了仿真测试。外环LADRC-PM参数为: $\omega_0 = 500, K_p = 200, b_0 = 20000$ ;外环PI参数为: $K_{ip} = 1, K_{ii} = 45$ ;内环PI参数为: $K_{ip} = 20, K_{ii} = 120$ 。

### 4.1 并网点电压平衡跌落

为了检测电压平衡跌落的动态性能,特对其进行了测试。在该工况下,并网点电压先从正常值跌至80%,再恢复到原始值,如图8所示。

在电网电压平衡跌落测试中,由于PI控制消除偏差的特点,导致了1.14%的波动,以及约100 ms的调节时间。而LADRC-PM策略将调节时间缩短至50 ms,波动量降至0.42%,优化幅度超过

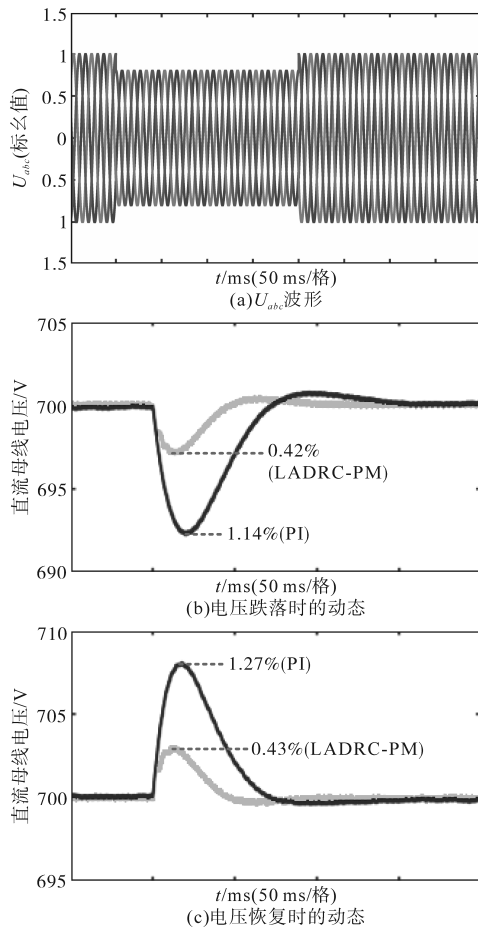


图8 电网电压平衡跌落测试

Fig.8 Power grid voltage balance drop test

60%。在并网点电压恢复至正常值后,其动态如图8c所示。可见,采用LADRC-PM策略的系统表现出更短的调整过程,以及平缓的波动。

#### 4.2 并网点电压不平衡跌落

如图9所示,在并网点电压不平衡跌落过程中,由于PI控制基于误差消除误差的滞后特性,在直流母线出现了较大的波动(峰值为4.97 V),并存在振荡现象。而在并网点电压不平衡波动结束时,采用LADRC-PM方法的母线电压可快速平缓恢复至正常值,并且较PI控制而言,恢复时间下降了29%。可见,基于LADRC-PM策略的系统对并网侧电压不平衡波动表现出较高水平的鲁棒性。

#### 4.3 并网点高电压

除了平衡、不平衡电压跌落之外,并网点还会出现高电压(正常值的120%)的情况。由图10可知,系统在出现并网点高电压200 ms后恢复正常,在此期间风力涡轮机继续正常运行。在LADRC-PM策略下,因其特有结构对扰动的补偿,超调量较PI控制而言下降了63%。此外,调

节时间也得到了28%的下降。

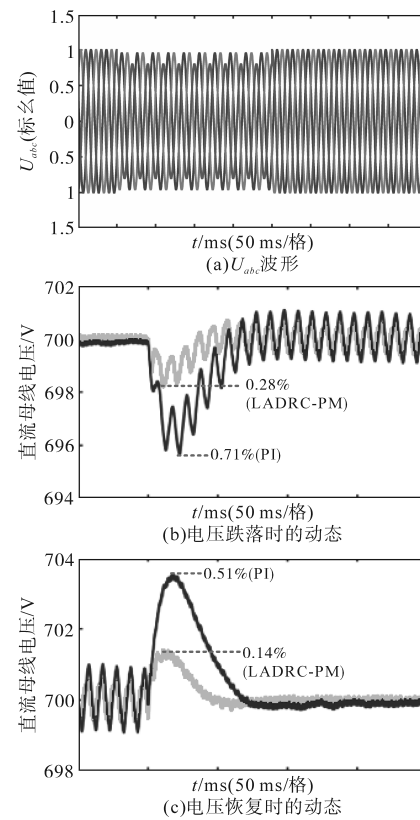


图9 不平衡波动

Fig.9 Unbalanced fluctuations

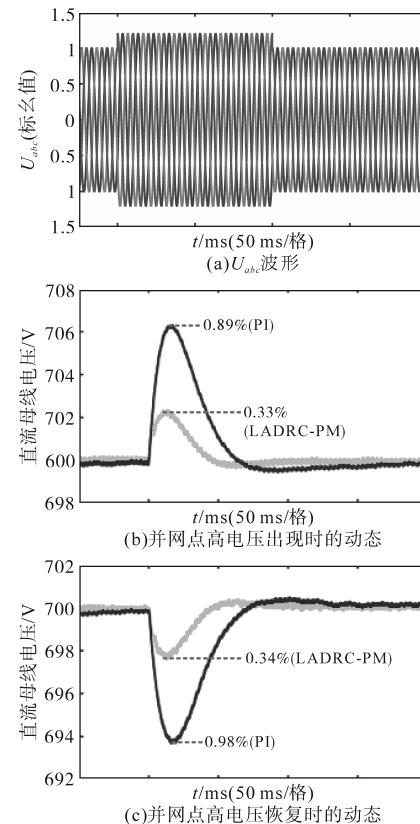


图10 电网出现高电压的测试

Fig.10 Test of a high voltage appears in the grid

#### 4.4 负载切换

对于负载变化,也进行了相似的仿真验证,如图11所示。可以看到,在负载投入的过程中,由于功率的突变以及PI控制基于误差消除误差的滞后特性,导致了2.41%的电压波动,并且经过约100 ms的调节才进入新稳态。在采用LADRC-PM策略后,受观测器扰动观测测量前馈的影响,系统仅经过约50 ms就进入新稳态,且最大波动曲线缩小至原来的36.9%。此外,对于负载切除过程,也产生了明显的优化效果,如图11c所示。

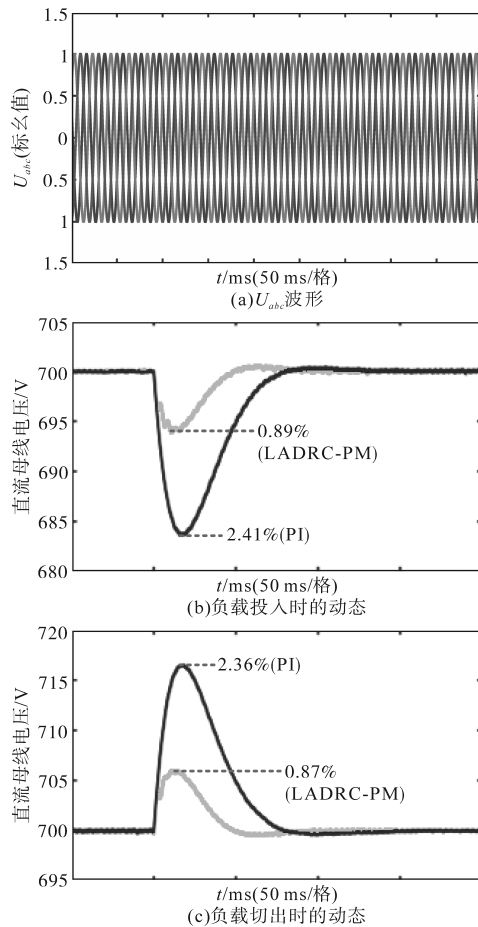


图11 负载投入与切出测试

Fig.11 Load input and cut out test

可见,无论是并网点侧的电压波动,还是负载的投切,本文所提控制策略均优于传统PI控制策略。

## 5 结论

本文提出了一种LADRC-PM策略以增强光伏并网的鲁棒性。该方案通过逆变器控制直流回路电压和电流,以便在保持直流回路电压恒定的情况下,最大限度地将电能输送到电网。并通过理论分析揭示了观测器增益对抗扰性的影响。

最后,通过Matlab数字仿真,测试了该控制系统在不同场景下的动态过程。其结果验证了本文提出的光伏自抗扰控制策略可以在同等条件下抑制直流处电压波动的幅值,并使其快速达到新的稳态,一定程度上降低了保护性装置触发的次数,可改善系统的稳定性和经济性。

#### 参考文献

- [1] HUENTELER J, NIEBUHR C, SCHMIDT T S. The effect of local and global learning on the cost of renewable energy in developing countries[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 128(Aug.1):6-21.
- [2] 陶珑,王萍,王议锋,等.微电网负载端接口变换器的自抗扰稳压控制[J].电工技术学报,2022,37(8):2076-2085.  
TAO Long, WANG Ping, WANG Yifeng, et al. Voltage stabilization strategy for load-side interface converter of microgrid combined with active disturbance rejection control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(8): 2076-2085.
- [3] DOMINGUEZ R, BARINGO L, CONEJO A J. Optimal offering strategy for a concentrating solar power plant[J]. Applied Energy, 2012, 98:316-325.
- [4] 苏乐,程静,王维庆.光伏并网的宽频振荡问题分析[J].电气传动,2023,53(9):72-80.  
SU Le, CHENG Jing, WANG Weiqing. Analysis of broadband oscillation problem of photovoltaic grid connection[J]. Electric Drive, 2023, 53(9):72-80.
- [5] GARCIA I, MCMAHON W E, STEINER M A, et al. Optimization of multijunction solar cells through indoor energy yield measurements[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2017, 5(1): 438-445.
- [6] WANG Y, ZHANG J, GUAN Y, et al. Analysis and design of a two-phase series capacitor dual-path hybrid DC-DC converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(8): 9492-9502.
- [7] WU H, JIA Y, YANG F, et al. Two-stage isolated bidirectional DC-AC converters with three-port converters and two DC buses [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(4):4428-4439.
- [8] REDDY A R, UMAPATHY M, EZHILARASI D, et al. Piezoelectric energy harvester with shape memory alloy actuator using solar energy[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(4):1409-1415.
- [9] 江悦,曹旌,梁刚,等.光伏并网逆变器谐波特性分析与谐波电流抑制[J].电力系统及其自动化学报,2022,34(9):64-72.  
JIANG Yue, CAO Jing, LIANG Gang, et al. Analysis of harmonic characteristics and suppression of harmonic current for photovoltaic grid-connected inverter[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(9):64-72.
- [10] FISCHER S, IVATURI A, FROHLICH B, et al. Upconverter

- silicon solar cell devices for efficient utilization of sub-band-gap photons under concentrated solar radiation[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2013, 4(1): 183-189.
- [11] 杨重伟,梁旭,毛岚.基于高比例光伏接入低压系统的电压控制研究[J].电气传动,2022,52(8):60-67.  
YANG Chongwei, LIANG Xu, MAO Lan. Research on voltage control of low voltage system based on high-proportion photovoltaic access[J]. Electric Drive, 2022, 52(8):60-67.
- [12] ERROUSSI R, AL-DURRA A, MUYEEN S M. Design and implementation of a nonlinear PI predictive controller for a grid-tied photovoltaic inverter[J]. IEEE Trans. on Ind. Electron., 2017, 64(2): 1241-1250.
- [13] YANG F, YANG L, MA X. An advanced control strategy of PV system for low-voltage ride-through capability enhancement[J]. Solar Energy, 2014, 109(11): 24-35.
- [14] HASANIENAND H M, MUYEEN S M. A taguchi approach for optimum design of proportional-integral controllers in cascaded control scheme[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1636-1644.
- [15] KADRI R, GAUBERT J P, CHAMPENOIS G. An improved maximum power point tracking for photovoltaic grid-connected inverter based on voltage-oriented control[J]. IEEE Trans. on Ind. Electron., 2011, 58(1): 66-75.
- [16] KIM K H, JEUNG Y C, LEE D C, et al. LVRT scheme of PMSG wind power systems based on feedback linearization[J]. IEEE Trans. on Power Electron., 2012, 27(5): 2376-2384.
- [17] MAHMUD M, POTA H, HOSSAIN M, et al. Robust partial feedback linearizing stabilization scheme for three-phase grid-connected photovoltaic systems[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2014, 4(1): 423-431.
- [18] BAO X, ZHUO F, TIAN Y, et al. Simplified feedback linearization control of three-phase photovoltaic inverter with an LCL filter[J]. IEEE Trans. on Power Electron., 2013, 28(6): 2739-2752.
- [19] HU J, ZHU J, DORRELL D G. Model predictive control of grid connected inverters for PV systems with flexible power regulation and switching frequency reduction[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2015, 5(1): 587-594.
- [20] KAKOSIMOS P E, KLADAS A G, MANIAS S N. Fast photovoltaic system voltage-or current-oriented MPPT employing a predictive digital current-controlled converter[J]. IEEE Trans. on Ind. Electron., 2013, 60(12): 5673-5685.
- [21] WANG Baochao, XU Yongxiang, SHEN Zhaoyuan, et al. Current control of grid-connected inverter with LCL filter based on extended-state observer estimations using single sensor and achieving improved robust observation dynamics[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(7): 5428-5439.
- [22] ZHANG Yongchang, JIN Jialin, HUANG Lanlan. Model-free predictive current control of PMSM drives based on extended state observer using ultralocal model[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(2): 993-1003.
- [23] YANG Haitao, ZHANG Yongchang, LIANG Jiejunyi, et al. Robust deadbeat predictive power control with a discrete-time disturbance observer for PWM rectifiers under unbalanced grid conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(1): 287-300.
- [24] SONG Zhanfeng, ZHOU Fengjiao, ZHANG Zhen. Parallel-observer-based predictive current control of permanent magnet synchronous machines with reduced switching frequency[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(12): 6457-6467.

收稿日期:2023-10-19

修改稿日期:2024-03-11

(上接第47页)

- mand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(2): 57-63.
- [15] 孙乾,许珊,朱姝豫,等.考虑DG时序特性及EV时空特性的配电网规划[J].电力自动化设备,2020,40(10):30-38.  
SUN Qian, XU Shan, ZHU Shuyu, et al. Distribution network planning considering DG timing characteristics and EV spatiotemporal characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10): 30-38.
- [16] 李亮,唐巍,白牧可,等.考虑时序特性的多目标分布式电源选址定容规划[J].电力系统自动化,2013,37(3):58-63, 128.  
LI Liang, TANG Wei, BAI Muke, et al. Multi-objective locating and sizing of distributed generators based on time sequence characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 37(3): 58-63, 128.
- [17] 王杰,王维庆,王海云,等.考虑越限风险的主动配电网中DG、SOP与ESS的两阶段协调规划[J].电力系统保护与控制,2022,50(24):71-82.  
WANG Jie, WANG Weiqing, WANG Haiyun, et al. Two-stage coordinated planning of DG, SOP and ESS in an active distribution network considering violation risk[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 71-82.

收稿日期:2024-08-23

修改稿日期:2024-09-29