

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240912

基于改进 LADRC-PI 双闭环控制的单相光伏逆变器 控制策略研究

刘道生, 宋忠文, 熊世豪, 王仕会

(江西理工大学电气工程与自动化学院, 江西 赣州 341000)

摘要: 在光伏发电控制领域中, 光伏逆变器控制作为重要的一环, 其双闭环控制中比例积分(proportional integral, PI)等线性化控制方式在电压外环电流内环中得到广泛应用。然而传统 PI 等线性化控制方式没有考虑光伏逆变器系统的非线性特性, 在此控制下逆变器的动静态性能和鲁棒性较差。提出一种改进线性自抗扰控制器(linear active disturbance rejection control, LADRC)和 PI 控制相结合的双闭环控制策略。为避免光伏逆变器系统振荡, 提高系统稳定性, 提出了将输出误差补偿项加入线性状态误差反馈控制律中的改进 LADRC, 并将其应用于双闭环控制的电压外环中, 电流内环使用 PI 控制。然后, 经过参数整定和控制器性能分析, 实现对 1.2 kW 单相光伏逆变器系统的控制。在 Matlab/Simulink 中建模仿真, 分析改进 LADRC-PI 控制策略对单相光伏逆变器性能的影响。仿真结果表明, 相较于双闭环 PI 控制, 改进 LADRC-PI 双闭环控制的单相光伏逆变器系统稳定性较好, 系统响应速度快, 具有更好的动静态性能和鲁棒性。

关键词: 光伏逆变器; 线性自抗扰控制器; 线性状态误差反馈律; 超调量; 系统响应

Research on control strategy of single-phase photovoltaic inverter based on improved LADRC-PI dual closed-loop control

LIU Daosheng, SONG Zhongwen, XIONG Shihao, WANG Shihui

(School of Electrical Engineering and Automation, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: In the field of photovoltaic (PV) power generation control, inverter control plays a crucial role. In dual-loop control strategies, linear control methods such as proportional-integral (PI) control are widely used in the outer voltage loop and inner current loop. However, traditional PI and other linear control methods do not consider the nonlinear characteristics of PV inverter systems, resulting in poor dynamic and static performance and robustness. This paper proposes a dual-loop control strategy combining an improved linear active disturbance rejection controller (LADRC) with PI control. To avoid oscillations in the PV inverter system and improve system stability, an improved LADRC is designed by adding an output error compensation term to the linear state error feedback control law, and is applied to the outer voltage loop, while PI control is used in the inner current loop. After parameter tuning and controller performance analysis, it realizes the control on a 1.2 kW single-phase PV inverter system. The system is modelled and simulated in Matlab/Simulink to analyze the influence of the improved LADRC-PI control strategy on single-phase photovoltaic inverter performance. Simulation results show that compared with the traditional dual-loop PI control, the improved LADRC-PI dual-loop control has better system stability, faster response speed, and the improved dynamic and static performance and robustness.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52167017).

Key words: photovoltaic inverter; LADRC; LSEF; overshoot; system response

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52167017); 江西省自然科学基金项目资助(20224BAB204054); 赣鄱俊才支持计划-主要学科学术和技术带头人培养项目-领军人才(学术类)(20232BCJ22006)

0 引言

随着国家对能源的更高需求和环保概念的普及, 可再生能源成为未来能源开发的焦点。作为最具开发价值的可再生能源之一的太阳能, 具有广阔市场应用前景^[1]。太阳能开发需要高效可靠的电能转换装置, 光伏逆变器是电能转换的核心装备, 在光伏发电中发挥着至关重要作用, 所以对其高可控性与灵活性的要求越来越高^[2-4]。

受内部结构、环境及其他扰动因素影响, 光伏逆变器的实际数学模型复杂且呈现非线性特点。单一的控制策略如 PI 控制^[5]、无差拍控制^[6]和滑模控制^[7-8]等, 难以满足高性能要求^[9], 所以目前国内外的主要研究方向是采用电压电流双闭环控制策略改善光伏逆变器性能。文献[10]在电压、电流双闭环控制的基础上, 加入 Posicast 时滞控制, 形成双环+时滞的复合控制, 解决了输出谐振峰的振荡问题, 但系统的动静态性能改善不明显。文献[11]提出 PI 与准 PR 联合控制的光伏并网电流优化策略, 抑制了直流分量, 但对其动态性能没有较大改善。文献[12]设计了一种重复+PI 的双闭环控制方案, 内环采用 PI 控制, 外环采用重复控制无静差跟踪, 有效抑制 LCL 滤波器的谐振尖峰, 响应速度快, 但参数整定较为困难。文献[13]提出的自抗扰控制器(active disturbance rejection control, ADRC)被应用于工业控制过程, 发现自抗扰控制器对于参数的调整远比常规控制器参数的调整容易得多, 显示出其良好的应用前景。后续研究人员在其基础之上提出线性自抗扰控制器, 简化其可调参数, 使控制过程变得更简单。文献[14]进行了线性自抗扰控制器的稳定性分析, 能够得到较好的效果, 但计算过程复杂。文献[15]将一阶 LADRC 应用于电流内环控制, 有效抑制了系统的同步振荡。文献[16]把模糊 PI 控制和线性自抗扰控制技术相结合的改进算法引入到下垂控制电压电流双闭环结构的电压外环中, 在此控制下逆变器有较好的鲁棒性。

针对传统单相光伏逆变器的电压外环电流内环均采用 PI 控制器的缺点, 本文提出一种改进线性自抗扰控制器(linear active disturbance rejection control, LADRC)-PI 的电压电流双闭环控制策略。改进的 LADRC 是将输出误差补偿项加入线性状态误差反馈控制律, 并把它引入电压电流双闭环的电压外环控制, 然后进行控制系统性能分析。在 Matlab/Simulink 环境中建立仿真模型, 通过双闭环 PI 与改进 LADRC-PI 的控制策略对比, 详细分析并验证所提出的改进 LADRC-PI 的电压电流双闭环控制策略

在改进逆变器性能上的优势。

1 单相光伏逆变器的双闭环控制工作原理及其数学模型

1.1 系统概述

单相光伏逆变器的双闭环控制电路结构如图 1 所示, 它由单相逆变电路和双闭环控制结构两部分组成。逆变器拓扑结构为单相全桥拓扑结构。由于本文所研究内容与逆变器直流输入端无关联, 故光伏逆变器的光伏阵列 MPPT 及前级 BOOST 升压电路省略, 用直流电源替代。 S_1 — S_4 为开关管; L 为滤波电感; R 为关于开关器件、线路、电感的等效内阻; C 为滤波电容; Load 为等效负载。设 V_{dc} 表示直流侧输入电压值, 单位为 V; V_{ab} 表示两桥臂中点电压差, 单位为 V; V_o 表示逆变输出的电压值, 单位为 V; i_L 和 i_o 分别表示流经输出滤波电感的电流值和流经负载的输出电流值, 单位为 A。双闭环控制结构由电压外环与电流内环组成, 电压外环通过逆变器输出电压 V_o 与给定参考输出电压 V_{oref} 的偏差经 PI 控制或本文提出的改进 LADRC 控制器维持输出电压的稳态精度, 电流内环通过逆变器输出电感电流 i_L 与流经负载电流 i_o 的偏差经 PI 控制器以改善系统动态特性。由双闭环控制器产生的控制信号与三角载波经过比较器, 通过 PWM 脉冲调制产生脉冲信号 $K_{S1/S4}$ 、 $K_{S2/S3}$, 控制逆变器全桥结构开关管通断, $K_{S1/S4}$ 为开关管 S_1 与 S_4 的控制脉冲信号, $K_{S2/S3}$ 为开关管 S_2 与 S_3 的控制脉冲信号。最后系统输出与 V_{oref} 一致的电压 V_o ^[17]。

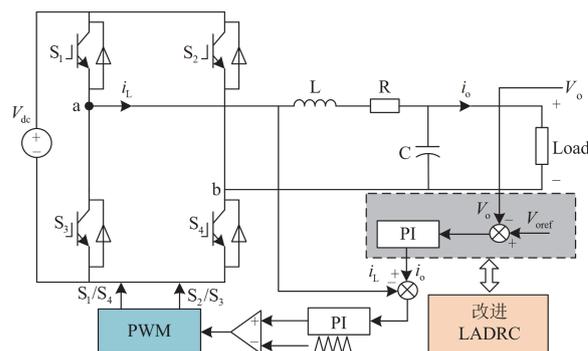


图 1 单相光伏逆变器的双闭环控制电路结构图

Fig. 1 Dual loop control circuit structure diagram of single-phase photovoltaic inverter

1.2 双闭环控制的工作原理

传统光伏逆变器的双闭环控制是由一个外环和一个内环组成, 通过两个相互嵌套的反馈回路实现对系统的精准控制。内环控制电流、外环控制电压

的方式使系统有更好的动态与稳态性能^[18-19]。传统双闭环 PI 控制框图如图 2 所示。

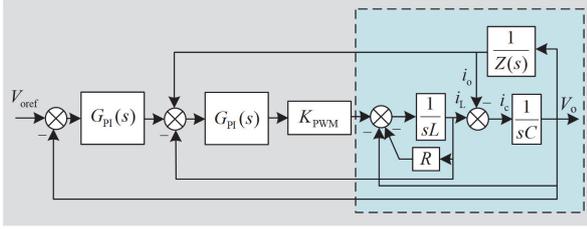


图 2 双闭环 PI 控制框图

Fig. 2 Block diagram of dual closed-loop PI control

由图 2 可以看出,双闭环 PI 控制策略中的双闭环为电压外环与电流内环,且均使用 PI 控制器。图 2 中 $Z(s)$ 为假设负载阻抗,虚线框内为单相光伏逆变器系统的等效框图,设 $G_{PV}(s)$ 为单相光伏逆变器系统的传递函数, K_{PWM} 为控制结构得到的逆变器触发脉冲信号,一般值为 0 或 1^[20]。PI 控制器的传递函数 $G_{Pi}(s)$ 如式(1)所示。

$$\sum_{x=v,i} G_{Pi}(s) = k_{px} + \frac{k_{ix}}{s} \quad (1)$$

式中: k_{pv} 和 k_{iv} 分别为电压外环 PI 控制器的比例和积分增益; k_{pi} 和 k_{ii} 分别为电流内环 PI 控制器的比例和积分增益。

本文所提出的改进 LADRC-PI 控制策略中的双闭环,外环为电压环,使用改进 LADRC 控制器,内环为电流环,使用 PI 控制器,在图 2 的双闭环 PI 控制结构的基础上使用改进 LADRC 替换 $G_{Pi}(s)$ 部分即可。

1.3 数学模型

为了便于设计改进 LADRC 控制器,需要对单相光伏逆变器系统进行数学建模,根据图 1 单相逆变器输入、输出回路及电位点 a、b 与图 2 控制框图中的单相光伏逆变器系统的等效框图,并结合基尔霍夫电流电压定律可得

$$V_{ab} = L \frac{di_L}{dt} + Ri_L + V_o \quad (2)$$

$$i_L = C \frac{dV_o}{dt} + i_o \quad (3)$$

对式(2)、式(3)进行 Laplace 变换推导出式(4)。

$$u_o(s) = \frac{1}{LCs^2 + RCs + 1} \cdot u_{ab}(s) + \frac{-(Ls + R)}{LCs^2 + RCs + 1} \cdot i_o(s) \quad (4)$$

式中, $u_o(s)$ 、 $i_o(s)$ 和 $u_{ab}(s)$ 分别为 V_o 、 i_o 和 V_{ab} 经 Laplace 变换后的对应量。

在用单相光伏逆变器构建闭环系统时,可以将

逆变器当作变比为 1 的变压器,进而可得

$$V_{ab}(s) = \frac{V_{dc}}{V_{tr}} V_{oref}(s) \quad (5)$$

$$V_{dc} = V_{tr} \quad (6)$$

式中: V_{tr} 为三角载波的幅值,单位为 V; $V_{oref}(s)$ 为 V_{oref} 经 Laplace 变换后的对应量。

根据文献[21]的状态空间平均法,结合式(4)一式(6)可得负载电压 $u_o(s)$ 与正弦调制信号 V_{oref} 的关系,以及与传递函数 $G_{PV}(s)$ 的联系,如式(7)所示。

$$G_{PV}(s) = \frac{u_o(s)}{V_{oref}(s)} = \frac{u_o(s)}{u_{ab}(s)} = \frac{1}{LCs^2 + RCs + 1} \quad (7)$$

对式(7)进行微分可得到式(8)。

$$\ddot{u}_o = a_0 u_o + a_1 \dot{u}_o + b_0 u_{ab} \quad (8)$$

式中: $a_0 = -\frac{1}{LC}$; $a_1 = -\frac{R}{L}$; b_0 为补偿因子,

$b_0 = \frac{1}{LC}$; u_o 、 u_{ab} 即是 V_o 、 V_{ab} 。

因为单相光伏逆变器在实际工况运行时,会有寄生电容参数、开关管的压降、死区时间、建模产生的内部扰动以及天气变化影响和负载变化等外部扰动^[22],将外部总扰动记作 f 。结合式(8)得到式(9)一式(11)。

$$\ddot{u}_o = b_0 u_{ab} + f_s(u_o, \dot{u}_o) + f \quad (9)$$

$$f_s(u, \dot{u}) = a_0 u_o + a_1 \dot{u}_o \quad (10)$$

式中: f_s 为逆变器系统内部已知信息; u 为系统控制输入。

为了适应改进 LADRC,合理设计线性扩张状态观测器,故把 f 看作系统的状态变量 x_3 ,进而可得到式(11)。

$$\begin{cases} x_1 = u_o \\ x_2 = \dot{u}_o \\ x_3 = f \\ u = u_{ab} \\ y = u_o \end{cases} \quad (11)$$

式中: x_1 、 x_2 、 x_3 是系统的状态变量; y 是系统输出量。

令 $x_m = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$ 为系统状态变量矩阵,结合式(9)一式(11)得单相光伏逆变器系统相关的状态方程,如式(12)所示。

$$\begin{cases} \dot{x}_m = N_m x_m + P_m u + E_n \dot{f} \\ y = C_m x_m \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{式中: } N_m = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ a_0 & a_1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; P_m = \begin{bmatrix} 0 \\ b_0 \\ 0 \end{bmatrix}; E_n = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix};$$

$$C_m = [1 \ 0 \ 0]。$$

2 改进 LADRC 设计

传统 LADRC 由线性扩张状态观测器(linear extended state observer, LESO)和线性状态误差反馈律(linear state error feedback, LSEF)两部分组成^[23-25]。LESO 能够实时对系统扰动进行观测并产生扰动估计量, 以前馈补偿方式抑制系统扰动。LSEF 通过不同的非线性控制律实现对系统补偿, 使系统具有良好的动静态性能, 线性自抗扰控制器对被控对象的依赖性较低。

由式(8)可知, 本文逆变器系统为二阶系统, 适合应用二阶线性自抗扰控制器对逆变器系统进行控制。改进 LADRC 控制结构框图如图 3 所示, 在传统 LADRC 基础上, 在 LSEF 中加入输出误差补偿项。图 3 中: u_c 是线性误差反馈律; u_1 是经过线性自抗扰控制算法得到的控制变量; y 是逆变器输出电压 V_o ; z_1 、 z_2 、 z_3 是由线性扩张状态观测器对系统状态变量的估计值; $-\beta_2(V - z_1)$ 是输出误差补偿项, β_2 是线性扩张状态观测器的增益系数。

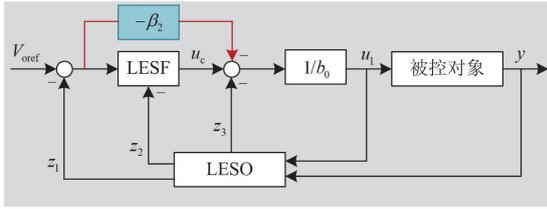


图 3 改进 LADRC 控制结构框图

Fig. 3 Improved LADRC control block diagram

2.1 扩张状态观测器设计

改进 LADRC 控制器的 LESO 为全阶型, LESO 的阶数取决于系统状态变量的个数, 可知本文单相光伏逆变器系统状态变量的个数是 3, 故应设计三阶 LESO。

根据式(12)状态方程建立三阶 LESO, 如式(13)所示。

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}}_m = (N_m - \beta_m C_m)z_m + P_m u + \beta_m y \\ \hat{y} = C_m z_m \end{cases} \quad (13)$$

式中: $z_m = [z_1 \ z_2 \ z_3]^T$ 为方便设计观测器而设立的观测器变量矩阵, 其对应系统状态变量矩阵 $x_m = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$; $\hat{z}_m = [\hat{z}_1 \ \hat{z}_2 \ \hat{z}_3]^T$ 为观测器变量矩阵 $z_m = [z_1 \ z_2 \ z_3]^T$ 对应的观测值矩阵; $\beta_m = [\beta_1 \ \beta_2 \ \beta_3]^T$ 为扩张状态观测器的增益系数矩阵; \hat{y} 为系统输出的估计值。

根据文献[26]的极点配置法可知, 矩阵 $(N_m -$

$\beta_m C_m)$ 的特征值直接影响扩张状态观测器的性能, 所以可以使用逆状态变换获得扩张状态观测器的增益系数矩阵 β_m 。

$$\lambda_0(s) = |sE - (N_m - \beta_m C_m)| = (s + w_0)^3 \quad (14)$$

式中: $\lambda_0(s)$ 为矩阵 $(N_m - \beta_m C_m)$ 的特征值方程; E 为单位矩阵; w_0 为扩张状态观测器的带宽, 扩张状态观测器所设计的系统在原点处具有 3 个极点。观测器对噪声的敏感性取决于 w_0 。观测器增益与被控对象极点观测器极点的距离成正比, 所有 3 个观测器极点都应放在根平面的左半平面, 即 $-w_0$ 处。

$$\beta_m = [\beta_1 \ \beta_2 \ \beta_3]^T = [3w_0 \ 3w_0^2 \ w_0^3]^T \quad (15)$$

通过式(15)确定观测器系数, 合理设计扩张状态观测器。令其对逆变器系统状态变量和总扰动进行实时估计, 然后实现对扰动的补偿。

2.2 线性状态误差反馈律设计

单相光伏逆变器系统双闭环控制应将系统设置成积分串联型, 使双闭环系统性能更加优越^[27]。传统 LSEF 使用的控制律为 PD 控制律, 将线性状态观测器产生的估计值用于 LSEF 设计, 如式(16)所示。

$$\begin{cases} u_1 = \frac{u_c - z_3}{b_0} \\ u_c = k_p(V - z_1) - k_d z_2 \end{cases} \quad (16)$$

式中, k_p 、 k_d 为 LSEF 的反馈增益。依据线性自抗扰理论知, $k_p = w_c^2$, $k_d = 2w_c$ ^[28], w_c 为 LSEF 系统的带宽。可以看出积分串联型的线性状态误差反馈律由两部分组成: 第一部分 $-z_3/b_0$ 为总扰动补偿, 该部分把观测器实时估计通过前馈补偿, 抑制系统总扰动, 增强系统鲁棒性, 减小系统误差; 第二部分为线性误差反馈律 u_c 中的传统控制律, 使双闭环系统有良好的动态和稳态性能。为了避免单相逆变器系统振荡, 改进的 LADRC 在 LSEF 中增加误差补偿项, 即输出误差补偿项 T , 如式(17)所示。

$$T = -\beta_2(V - z_1) \quad (17)$$

故改进 LADRC 的 LSEF 如式(18)所示。

$$u = \frac{u_c - z_3 - T}{b_0} \quad (18)$$

单相光伏逆变器改进 LADRC-PI 双闭环控制中的改进 LADRC 由加入输出误差补偿项的 LSEF 和三阶 LESO 两部分组成, 应用于双闭环控制的电压外环, 与电流内环 PI 构成双闭环控制系统。

2.3 LESO 及 LSEF 参数设定与优化方法

为了对比两种单相光伏逆变器双闭环控制策略的控制性能及其优越性, 选择合适的 w_0 和 w_c 参数

至关重要。 w_0 参数决定观测器对系统状态的跟踪速度,影响系统闭环动态响应速度、鲁棒性; w_c 参数决定系统响应速度,一般是按系统的瞬态响应要求设定。根据观测器带宽参数化的自抗扰控制方法,自抗扰控制的观测器增益采用带宽参数进行整定。带宽化整定方法是将观测器增益和反馈控制增益转化为两个带宽参数的选取^[29]。单相光伏逆变器系统的改进 LADRC-PI 双闭环控制策略的参数整定需要通过系统参数计算,本文设置的单相光伏逆变器的系统参数如表 1 所示。

表 1 单相光伏逆变器系统参数

Table 1 Parameters of single-phase photovoltaic inverter system

参数	数值	参数	数值
直流侧电压 V_{dc}/V	400	滤波电感 L/mH	4.06
开关频率/kHz	10	滤波电容 $C/\mu F$	6.23
电网频率/Hz	50	线路等效电阻 r/Ω	0.1

扩张状态观测器的准确性与快速性直接影响控制器的控制性能。根据系统设定的参数,代入式(13)一式(15),矩阵 $(N_m - \beta_m C_m)$ 特征值的极点放在 $-w_0$ 处,得到 $w_0 = 16\ 000\ rad/s$ 。为得到使观测器性能最优的 w_0 参数,分别设定 w_0 值为 12 000、14 000、16 000、18 000、20 000 rad/s,对扩张状态观测器的性能进行对比分析,寻优得到更为合适的 w_0 参数。

线性自抗扰控制将被控对象看成串联积分系统,为了简化线性自抗扰控制器参数整定,反馈控制律的带宽 w_c 与观测器带宽 w_0 的关系为 $w_0 = (3 \sim 5)w_c$ ^[30]。本文取 $w_0 = 4w_c$,即 $w_0 = 16\ 000\ rad/s$ 时, $w_c = 4000\ rad/s$ 。控制增益 w_c 的选择应依托系统的频带,分析控制器的幅频特性。在观测器带宽 w_0 整定完成后,结合观测器带宽值对 w_c 进行参数寻优,即分别设置 w_c 为 2000、3000、4000、5000、6000 rad/s 的反馈控制律带宽进行控制器性能对比分析,即可完成 w_c 的整定。

改进电压外环 LADRC-电流内环 PI 控制策略中电流内环 PI 控制的参数与双闭环 PI 控制中的一致。双闭环 PI 控制的参数依据文献[31]的控制参数设计方案,简化模型减少计算量,且利用 Bode 图进行结果分析。通过式(1),并结合本文系统参数对双闭环 PI 控制进行参数整定,得到双闭环 PI 控制的电压外环参数 $k_{pv} = 0.02$, $k_{iv} = 21$; 电流内环参数 $k_{pi} = 24$, $k_{ii} = 7$ 。

3 LADRC 控制器性能分析

为更好地优化单相光伏逆变器系统的双闭环控制策略,针对本文提出的改进 LADRC-PI 控制策略,

电压外环 PI 控制器用改进 LADRC 控制器替换,需合理设置电流内环 PI 参数和电压外环改进 LADRC 的参数值,保证 PI 与 LADRC 的控制过程可以平稳过渡,并使系统保持稳定状态。为了获得理想的双闭环控制系统,本文从控制系统的抗扰性、跟踪性和稳定性方面对提出的改进 LADRC-PI 控制策略进行分析^[32]。

3.1 抗扰性

在抗扰性分析中,通过分析观测器的幅频特性与相频特性,选择能使系统性能更为优越的带宽参数。系统的抗扰性直接受系统总扰动 f 影响,观测器对扰动的灵敏度和对噪声的抑制决定了系统变量的估计误差^[33]。所以本文通过系统变量的估计误差对观测器性能的影响来选择 w_0 参数。估计误差矩阵计算方法为

$$z_e = \hat{z}_m - z_m \quad (19)$$

式中, z_e 表示系统状态变量与观测器对系统状态变量估计值之间的估计误差矩阵, $z_e = [z_{e1} \ z_{e2} \ z_{e3}]^T$ 。

结合式(13)与式(14)得到系统扰动变量的估计误差方程,如式(20)所示。

$$z_e = (N_m - \beta_m C_m)\hat{z}_m - (N_m - \beta_m C_m)z_m - E_n f \quad (20)$$

对式(20)进行 Laplace 变换,可得估计误差 z_e 与系统总扰动 f 的传递函数,如式(21)所示。

$$\begin{cases} z_{e1} = -\frac{s}{(s+w_0)^3} \cdot f \\ z_{e2} = -\frac{s^2 + \beta_1 s}{(s+w_0)^3} \cdot f \\ z_{e3} = -\frac{s^3 + (\beta_1 - a_1)s^2 + (\beta_2 - a_0 - a_1\beta_1)s}{(s+w_0)^3} \cdot f \end{cases} \quad (21)$$

由式(21)中 z_{e3}/f 的传递函数绘制 Bode 图,如图 4 所示。

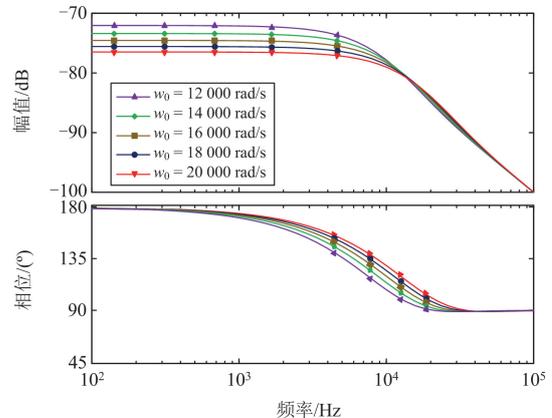


图 4 z_{e3}/f 传递函数的 Bode 图

Fig. 4 Bode diagram of z_{e3}/f transfer function

由图 4 可知, 在低频区域, 随着 ω_0 的增大, 系统的稳态精度降低, 在高频区域, 随着 ω_0 的增大, 观测器对高频干扰信号的灵敏度与噪声抑制能力减弱。 ω_0 为 14 000 rad/s 时, 无论是 Bode 图的幅频特性, 还是相频特性, 对应的稳态精度和抗扰能力都较好, 故 ω_0 应取 14 000 rad/s。

结合式(7)、式(13)、式(16)一式(18)与图 3 的控制器结构框图, 得到改进 LADRC 控制器输入与输出的传递函数, 如式(22)所示。

$$\frac{y(s)}{V(s)} = \frac{k_p(s^3 + \beta_1 s^2 + \beta_2 s + \beta_3)G_{PV}(s)}{b_0 s(s^2 + M_1 s + M_2) + G_{PV}(s)(M_3 s^2 + M_4 s + M_5)} \quad (22)$$

式中, $M_1 = k_d + \beta_1$; $M_2 = k_p + k_d \beta_1 + \beta_2$; $M_3 = k_p \beta_1 + k_d \beta_2 + \beta_3$; $M_4 = k_p \beta_2 + k_d \beta_3$; $M_5 = k_p \beta_3$ 。

当 ω_c 不同时, $y(s)/V(s)$ 的传递函数的 Bode 图对比如图 5 所示。可以看出, 在较低频段时, 不同 ω_c 的控制器都具有较好的抗扰能力。但是, 在中高频段不同 ω_c 的控制器抗扰性能存在差异。结合控制器作用的单相光伏逆变器系统频段范围, 综合考虑得出 ω_c 为 6000 rad/s 时控制器的抗扰能力是较好的, 故 ω_c 取 6000 rad/s。

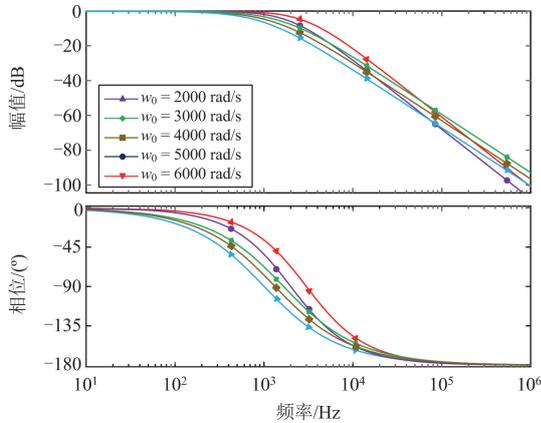


图 5 $y(s)/V(s)$ 传递函数的 Bode 图

Fig. 5 Bode diagram of the $y(s)/V(s)$ transfer function

3.2 跟踪性

控制系统的跟踪性表现为控制系统对系统输入(参考输入)的跟踪能力, 对比分析所提出的改进 LADRC-PI 和双闭环 PI 控制策略下单相光伏逆变器系统的跟踪性, 验证所提改进 LADRC-PI 控制的优越性。

在上述 LADRC 控制和 PI 控制设计与分析的基础上, 结合式(1)、式(22)得到改进 LADRC-PI 的控制框图, 如图 6 所示。

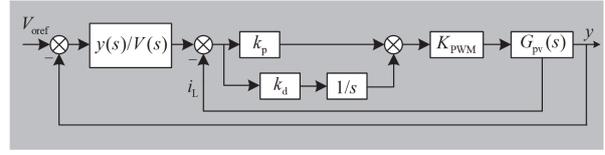


图 6 改进 LADRC-PI 控制框图

Fig. 6 Improved LADRC-PI control block diagram

由图 6 可得系统给定参考输入 V_{oref} 与输出 y 的传递函数 $G_o(s)$ 为

$$G_o(s) = \frac{y(s)}{V(s)} G_{PI}(s) = \frac{k_p(s^3 + \beta_1 s^2 + \beta_2 s + \beta_3)G_{PV}(s)(k_{pi}s + k_{ii})}{b_0 s^2(s^2 + M_1 s + M_2) + G_{PV}(s)(M_3 s^2 + M_4 s + M_5)} \quad (23)$$

双闭环 PI 控制的系统给定参考输入 V_{oref} 与输出 y 的传递函数 $G'_o(s)$ 为

$$G'_o(s) = \frac{k_{pv}k_{pi}s^2 + (k_{pv}k_{ii} + k_{iv}k_{pi})s + k_{iv}k_{ii}}{\lambda(s)} \quad (24)$$

其中

$$\lambda(s) = LCs^4 + (CR + k_{pi}C)s^3 +$$

$$(k_{pv}k_{pi} + k_{ii}C + 1)s^2 + (k_{pv}k_{ii} + k_{iv}k_{pi})s + k_{iv}k_{ii}$$

根据两种控制策略下系统给定参考输入 V_{oref} 与输出 y 的传递函数 $G_o(s)$ 和 $G'_o(s)$ 绘制 Bode 图, 如图 7 所示。

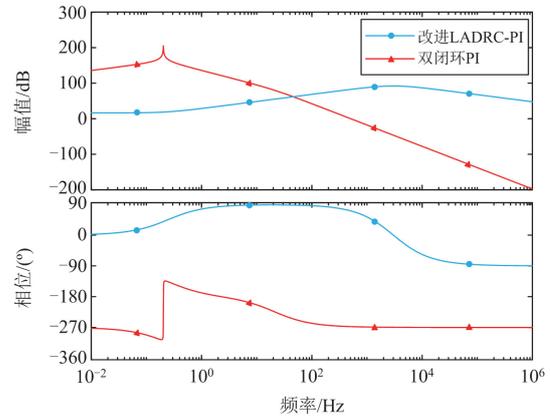


图 7 两种控制策略下 $G_o(s)$ 与 $G'_o(s)$ 的 Bode 图

Fig. 7 Bode diagram of $G_o(s)$ and $G'_o(s)$ with two control strategies

系统的幅频特性与相频特性决定了控制系统对给定参考输入的跟踪能力, 由图 7 得出, 两种控制策略中, 改进 LADRC-PI 控制策略在中高频段对给定参考信号的跟踪能力更好, 改进 LADRC-PI 控制在任何频率的相位滞后更小, 幅值衰减较慢。改进 LADRC-PI 控制比双闭环 PI 控制的剪切频率更大,

系统响应速度更快。

3.3 稳定性

控制系统通常利用现代控制理论来解决稳定性分析问题,使用更加简便,适用范围更广^[34]。本文提出的改进 LADRC-PI 控制器使用简单易行的劳斯判据的稳定性分析方法,对改进 LADRC 进行闭环系统稳定性分析。根据式(22)列出闭环系统的特征方程,如式(25)所示。

$$D(s) = s^5 + \varphi_4 s^4 + \varphi_3 s^3 + \varphi_2 s^2 + \varphi_1 s + \varphi_0 = 0 \quad (25)$$

式中, $\varphi_1 - \varphi_4$ 为特征方程系数。

由式(25)列出 $D(s)$ 的劳斯表,如表 2 所示。其中:

$$\varphi_5 = \frac{\varphi_1 \varphi_4 - \varphi_0}{\varphi_4}; \quad \varphi_6 = \frac{\varphi_3 \varphi_4 - \varphi_2}{\varphi_4}; \quad \varphi_7 = \frac{\varphi_6 \varphi_2 - \varphi_5 \varphi_4}{\varphi_6};$$

$$\varphi_8 = \frac{\varphi_7 \varphi_5 - \varphi_6 \varphi_0}{\varphi_7}。$$

表 2 $D(s)$ 的劳斯表

Table 2 Routh table of $D(s)$

s^5	s^4	s^3	s^2	s^1	s^0
1	φ_4	φ_6	φ_7	φ_8	φ_0
φ_3	φ_2	φ_5	φ_0	—	—
φ_1	φ_0	—	—	—	—

判定闭环系统稳定的充分必要条件为: 1) 闭环系统的特征方程系数均大于零; 2) 劳斯表的第一列元素都是正数。

把系统仿真参数、观测器带宽、控制器参数代入系统特征方程式(25), 计算得特征方程系数 $\varphi_i > 0 (i=1,2,3,4)$, 即满足条件 1); 表 2 中第二行元素 $\varphi_i > 0 (i=0,4,6,7,8)$, 即满足条件 2), 故该闭环系统是稳定的。

4 仿真分析

为了更好地验证电压外环改进 LADRC-电流内环 PI 控制的优越性与动稳态特性, 本文使用 Matlab/Simulink 建立了 1.2 kW 单相光伏逆变器仿真模型。分别对阻性负载下的稳态性能和空载、感性负载及阻感性负载之间切换的动态性能进行比较分析。系统仿真参数见表 1, 控制器参数见表 3。设 $V_{\text{oref}} = 300 \sin(100\pi t)$, 单位为 V, 仿真时间为 1 s, 采用双极性脉宽调制方式。

4.1 稳态控制性能的比较分析

在阻性负载不变即系统稳态时, 分别对两种控制策略下单相光伏逆变器系统进行仿真分析。双闭环 PI 控制下逆变器输出的电压电流波形如图 8 所示, u_o 的幅值为 309 V, i_o 的幅值为 3.07 A。由图 8(a)可知, 电压波形存在波形畸变。由图 8(b)可知,

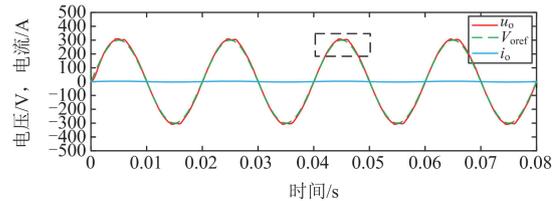
表 3 系统控制器参数

Table 3 System controller parameters

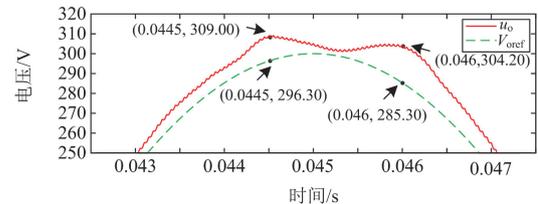
参数	数值	参数	数值
控制器带宽 $w_c/(\text{rad/s})$	5000	电压外环比例系数 k_{pv}	0.02
观测器带宽 $w_o/(\text{rad/s})$	14 000	电压外环积分系数 k_{iv}	21
补偿因子 b_0	1.54×10^{-3}	电流内环比例系数 k_{pi}	24
比例系数 k_b	1/400	电流内环积分系数 k_{ii}	7

电压最高点电压为 309 V, 与电压 V_{oref} 相比上升了 12.7 V, 超调量为 4.23%。最大波形超调量存在于波峰右侧, 电压上升了 18.9 V, 最大电压超调量为 6.30%。输出电压波峰存在电压跌落, 跌落的最大电压为 5.3 V。

总谐波失真度(total harmonic distortion, THD)会影响输出电能质量的好坏, 规定电压 1 kV 以下的系统 THD 应小于 8%, 以免对电力系统和连接设备产生不良影响^[35]。通过 FFT 工具对输出波形进行谐波分析, 如图 9 所示, 双闭环 PI 控制策略下系统输出波形的 THD 为 2.54%, 基波幅值为 309.8 V。



(a) 电流与电压波形



(b) 电压波形局部放大图

图 8 双闭环 PI 控制阻性负载下的电流与电压波形

Fig. 8 Current and voltage waveforms of resistive load under dual closed-loop PI control

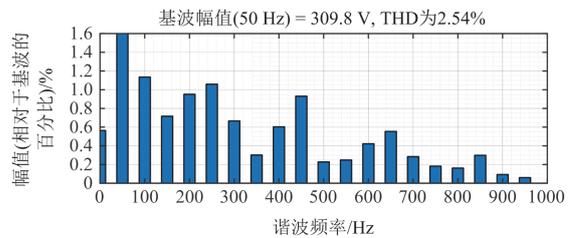


图 9 双闭环 PI 控制阻性负载下的 FFT 分析

Fig. 9 FFT analysis of resistive loads under dual closed loop PI control

在阻性负载条件下, 改进 LADRC-PI 控制策略系统仿真结果见图 10。由图10(a)可知, 逆变器输出电压 u_o 波形、电流 i_o 波形和给定参考输入的误差较小。由图 10(b)可知, 输出电压最高点电压为 300.85 V, 与电压 V_{oref} 相比上升了 0.85 V, 超调量为 0.28%。最大波形超调量存在于波峰右侧, 电压上升了 2.01 V, 最大电压超调量为 0.67%。由图 11 可知, LADRC-PI 控制策略下的系统输出波形的 THD 为 0.28%, 基波幅值为 300.7 V。

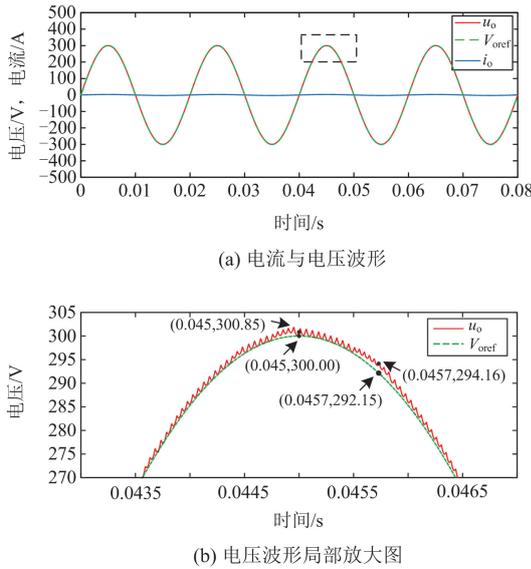


图 10 改进 LADRC-PI 控制阻性负载下的电流与电压波形
Fig. 10 Current and voltage waveforms of resistive load under improved LADRC-PI control

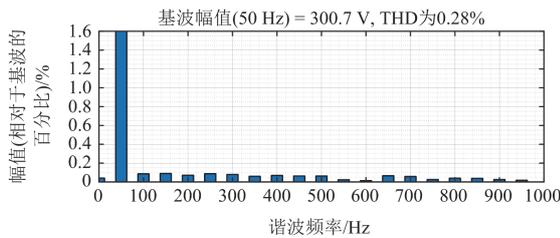


图 11 改进 LADRC-PI 控制阻性负载下的 FFT 分析
Fig. 11 FFT analysis of resistive load under improved LADRC-PI control

根据上述结论可知, 改进 LADRC-PI 控制策略的控制效果在输出电压、电流幅值与参考输入的误差、最大波形超调量、输出的谐波失真度、基波幅值的各个方面均明显优于双闭环 PI 控制。故改进 LADRC-PI 控制策略具有更好的稳态精度和优越的稳态控制性能。

4.2 动态控制性能的比较分析

为模拟现实工况条件, 在阻性负载、感性负载、

阻感性负载之间切换的条件下, 即系统动态时, 分别对双闭环 PI 控制和改进 LADRC-PI 控制策略下的单相光伏逆变器系统进行仿真分析。仿真时间为 1 s, 0~0.3 s 为阻性负载; 0.3~0.6 s 为感性负载; 0.6~1 s 为阻感性负载, 仿真结果如图 12 与图 13 所示。由图12(a)和图13(a)可知, 两种控制策略下系统输出电流电压波形大体一致, 在 0.3 s 和 0.6 s 负载切换点存在较大差异。

如图 12(b)、图 12 (c)所示, 双闭环 PI 控制策略下系统输出的电流电压在负载切换点需要动态响应时间。在 0.3 s 时, 系统从切换到进入稳态的时间为 1.6 ms。在 0.6 s 时, 系统从切换到进入稳态的时间为 1 ms。从切换点到稳态阶段存在波形畸变。

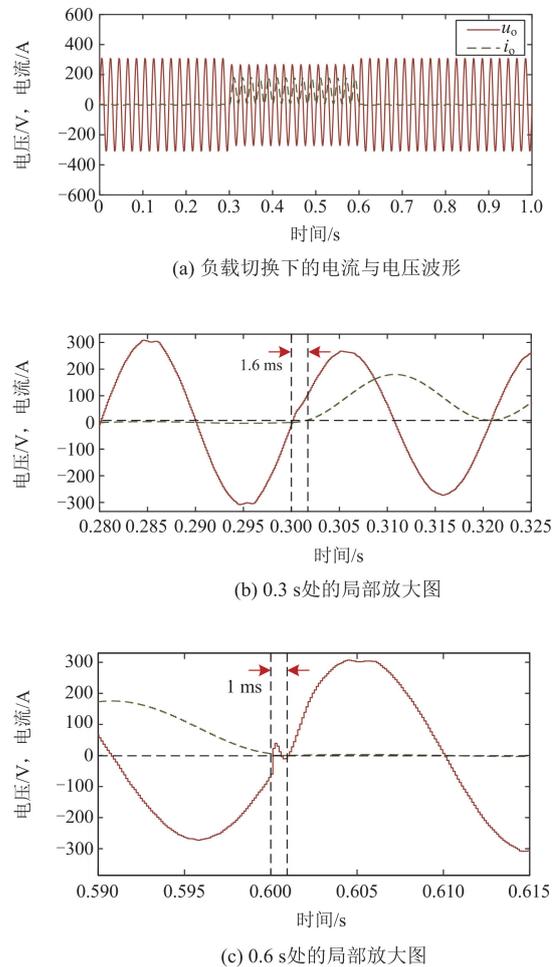


图 12 双闭环 PI 控制负载切换下的电流与电压波形
Fig. 12 Current and voltage waveforms of load switching under dual closed-loop PI control

如图 13(b)、图 13(c)所示, 改进 LADRC-PI 控制策略下系统输出电流电压波形在负载切换点 0.3 s 和 0.6 s 时进入稳态的响应时间很小, 几乎为零, 从

切换点到稳态阶段无波形畸变。

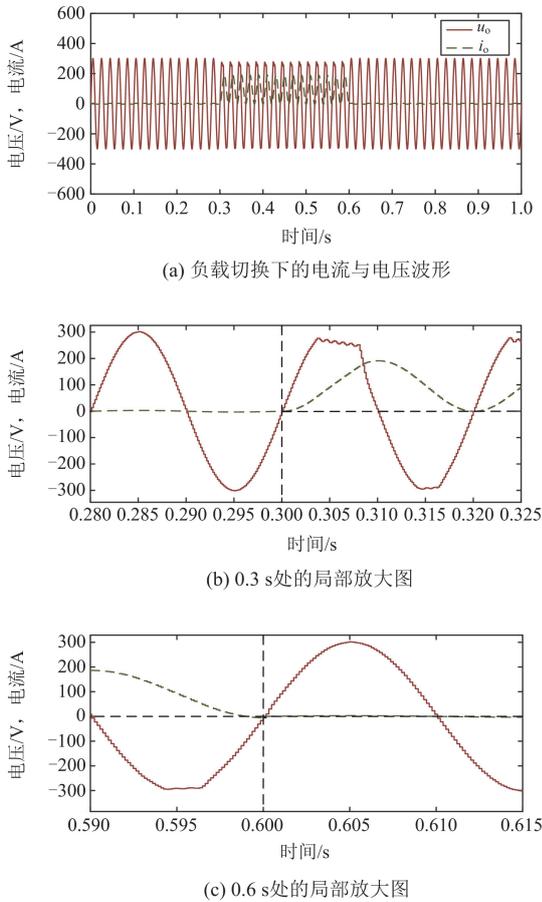


图 13 改进 LADRC-PI 控制负载切换下的电流与电压波形

Fig. 13 Current and voltage waveforms of load switching under improved LADRC-PI control

根据上述分析可知,改进 LADRC-PI 控制策略具有更好的暂态穿越能力,系统的动态响应速度更快,具有较好的鲁棒性。

5 结论

本文针对双闭环单相光伏逆变器控制策略的研究,分析了传统双闭环 PI 控制策略控制性能的不足,提出了一种基于改进 LADRC-PI 双闭环控制的单相光伏逆变器控制策略。所提控制策略在传统 LADRC 的线性状态误差反馈律中加入输出误差补偿项以消除系统振荡,应用于双闭环的电压外环。通过参数带宽法与极点配置法得到参数的初始值,利用观测器和改进 LADRC 的性能分析对控制器参数进行小范围寻找最优参数,利用劳斯判据对系统进行闭环稳定性分析。使用 Matlab/Simulink 建立单相光伏逆变器系统模型,在不同工况条件下分别对传统双闭环 PI 控制和基于改进 LADRC-PI 双闭环控

制进行动稳态对比分析,得到以下结论。

1) 改进 LADRC-PI 双闭环控制的单相光伏逆变器控制策略能够实现对逆变器的控制,控制效果较好。

2) 改进 LADRC-PI 双闭环控制的单相光伏逆变器控制系统在稳态时,系统输出超调量更低,系统稳态误差更小,THD 更低。系统具有更高的稳态精度,输出电能质量更好。

3) 改进 LADRC-PI 双闭环控制的单相光伏逆变器控制系统在动态时,系统响应速度快,鲁棒性更好,具有更好的暂态穿越能力。

参考文献

[1] 黎博, 陈民铀, 钟海旺, 等. 高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 555-581.

LI Bo, CHEN Minyou, ZHONG Haiwang, et al. A review of long-term planning of new power systems with large share of renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 555-581.

[2] KIM K, CHA H, KIM H G. A new single-phase switched-coupled-inductor DC-AC inverter for photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(7): 5016-5022.

[3] SINGH S, SAINI S, GUPTA S K, et al. Solar-PV inverter for the overall stability of power systems with intelligent MPPT control of DC-link capacitor voltage[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(1): 1-20.

[4] 邹文斌, 韩松, 荣娜, 等. 基于分布式共识协同的光伏逆变器电压控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(1): 166-173.

ZOU Wenbin, HAN Song, RONG Na, et al. Voltage control strategy for a PV inverter based on distributed consensus collaboration[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(1): 166-173.

[5] 江伟, 吴荣华. 基于 PI 控制的 H 桥逆变器工作稳定性研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(16): 62-68.

JIANG Wei, WU Ronghua. A study on working stability of H-bridge inverter based on PI control[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(16): 62-68.

[6] 葛乐, 顾佳易, 王存平, 等. 基于改进无差拍光伏并网谐振抑制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(19): 66-73.

GE Le, GU Jiayi, WANG Cuning, et al. Research on resonance suppression based on improved deadbeat grid-connected photovoltaic[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19): 66-73.

[7] 高鹏飞, 郑铭哲, 郭磊磊, 等. 基于滑模观测器的 LCL

- 型并网逆变器鲁棒预测控制研究[J]. 智慧电力, 2023, 51(1): 54-60, 93.
- GAO Pengfei, ZHENG Mingzhe, GUO Leilei, et al. Robust predictive control of grid-connected inverter with LCL filter based on sliding mode observer[J]. Smart Power, 2023, 51(1): 54-60, 93.
- [8] KUMAR S, PRADHAN, DAS D K. Sliding mode controller design via delay-dependent H^∞ stabilization criterion for load frequency regulation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(3): 1-27.
- [9] 慕昆, 孟苓辉. 光伏并网逆变器复合非线性控制设计[J]. 电力电子技术, 2013, 47(8): 44-46.
- MU Kun, MENG Linghui. Design of photovoltaic grid-connected inverter based on composite nonlinear control[J]. Power Electronics, 2013, 47(8): 44-46.
- [10] 袁绍军, 郭金智, 尹兆磊, 等. 单相逆变器双环+时滞的复合控制方法研究[J]. 电力电子技术, 2022, 56(8): 32-35, 40.
- YUAN Shaojun, GUO Jinzhi, YIN Zhaolei, et al. Research on dual loop + time delay hybrid control in single-phase inverter[J]. Power Electronics, 2022, 56(8): 32-35, 40.
- [11] 王秀云, 毛瑞鹏, 田璧源, 等. 基于 PI 与准 PR 联合控制的光伏并网电流优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 121-125.
- WANG Xiuyun, MAO Ruipeng, TIAN Biyuan, et al. Optimal control of photovoltaic grid-connected current based on PI and quasi-PR control[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 121-125.
- [12] 王攀攀, 晏夏瑜, 徐瑞东, 等. 基于重复+PI 控制的 LCL 型并网逆变器仿真研究[J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(5): 90-97.
- WANG Panpan, YAN Xiayu, XU Ruidong, et al. Simulation research of LCL grid-connected inverter based on repetitive and PI control[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2020, 39(5): 90-97.
- [13] 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. Auto-disturbances-rejection controller and its applications[J]. Control and Decision, 1998, 13(1): 19-23.
- [14] 金辉宇, 刘丽丽, 兰维瑶. 二阶系统线性自抗扰控制的稳定性条件[J]. 自动化学报, 2018, 44(9): 1725-1728.
- JIN Huiyu, LIU Lili, LAN Weiyao. On stability condition of linear active disturbance rejection control for second-order systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(9): 1725-1728.
- [15] 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.
- [16] 施昕昕, 伦靖怡. 基于模糊 PI 和线性自抗扰的下垂控制研究[J]. 电气自动化, 2023, 45(6): 62-64, 68.
- SHI Xinxin, LUN Jingyi. Research on droop control based on fuzzy PI and linear auto disturbance rejection[J]. Electrical Automation, 2023, 45(6): 62-64, 68.
- [17] 皇金锋, 杨振宇, 李帅杰. 基于混合储能的光储直流微网改进型滑模自抗扰控制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(23): 151-159.
- HUANG Jinfeng, YANG Zhenyu, LI Shuaijie. Improved sliding mode self-disturbance resistance control of an optical storage DC micro-grid based on hybrid energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(23): 151-159.
- [18] 黎嘉健. 单相电压源逆变器双环预测控制策略研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- LI Jiajian. Research on double loop predictive control strategy applied in single phase voltage source inverter[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [19] 杨浩, 周建萍, 黄烈钢, 等. 非理想条件下基于 SAADR-PI 的 MMC 型电力电子变压器 CCS-MPC 控制策略[J]. 南方电网技术, 2024, 18(9): 11-22.
- YANG Hao, ZHOU Jianping, HUANG Liegang, et al. CCS-MPC control strategy for MMC power electronic transformers based on SAADR-PI under non-ideal conditions[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(9): 11-22.
- [20] 陈亦文, 江加辉, 邱琰辉, 等. 单相电流型 PWM 逆变技术综述[J]. 电源学报, 2017, 15(1): 111-118.
- CHEN Yiwen, JIANG Jiahui, QIU Yanhui, et al. Review of single-phase current mode PWM inverting technologies[J]. Journal of Power Supply, 2017, 15(1): 111-118.
- [21] 王归新, 康勇, 陈坚. 基于状态空间平均法的单相逆变器控制建模[J]. 电力电子技术, 2004, 38(5): 9-13.
- WANG Guixin, KANG Yong, CHEN Jian. Control modeling of a single-phase inverter based on state-space average method[J]. Power Electronics, 2004, 38(5): 9-13.
- [22] 邱超颖, 黄媛, 余溢威, 等. 基于改进型 RISE-MC-LADRC 的逆变器电压控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(10): 97-106.
- QIU Chaoying, HUANG Yuan, YU Yiwei, et al. Inverter voltage control based on improved RISE-MC-LADRC[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(10): 97-106.
- [23] 周雪松, 王佳垚, 马幼捷. 基于改进型 LADRC 的光伏逆变器母线电压控制[J]. 计算机应用与软件, 2023,

- 40(6): 23-28.
ZHOU Xuesong, WANG Jiayao, MA Youjie. Bus voltage control of photovoltaic inverter based on improved LADRC[J]. Computer Applications and Software, 2023, 40(6): 23-28.
- [24] 石磊, 周宏涛, 赵元莘, 等. 光伏多功能并网逆变器迭代SMC+LADRC电流内环控制策略研究[J]. 智慧电力, 2023, 51(4): 107-114.
SHI Lei, ZHOU Hongtao, ZHAO Yuanshen, et al. Iterative SMC+LADRC current inner loop control strategy of photovoltaic multi-function grid connected inverter[J]. Smart Power, 2023, 51(4): 107-114.
- [25] 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, LÜ 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.
- [26] GAO Zhiqiang. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning[C]// Proceedings of the American Control Conference, June 4-6, 2003, Denver, Colorado: 4989-4996.
- [27] 张园, 孙明玮, 陈增强, 等. 基于扩张状态观测器的广义预测控制[J]. 系统科学与数学, 2014, 34(11): 1366-1378.
ZHANG Yuan, SUN Mingwei, CHEN Zengqiang, et al. Generalized predictive control algorithm based on extended state observer[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2014, 34(11): 1366-1378.
- [28] MA Youjie, ZHAO Faqing, ZHOU Xuesong, et al. DC side bus voltage control of wind power grid-connected inverter based on second-order linear active disturbance rejection control[J]. Energies, 2019, 12(22).
- [29] 李健, 谭文, 张彬文. 观测器带宽参数化的自抗扰控制[J]. 控制工程, 2022, 29(7): 1181-1186.
LI Jian, TAN Wen, ZHANG Binwen. Observer-bandwidth-based active disturbance rejection control[J]. Control Engineering of China, 2022, 29(7): 1181-1186.
- [30] 周蓉, 韩文杰, 谭文. 线性自抗扰控制的适用性及整定[J]. 控制理论与应用, 2018, 35(11): 1654-1662.
ZHOU Rong, HAN Wenjie, TAN Wen. On applicability and tuning of linear active disturbance rejection control[J]. Control Theory & Applications, 2018, 35(11): 1654-1662.
- [31] 梁毅, 谢运祥, 关远鹏. LCL并网逆变器双闭环控制策略及其参数设计[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(4): 30-38.
LIANG Yi, XIE Yunxiang, GUAN Yuanpeng. Novel dual loop control strategy and its parameters design method for LCL grid-connected inverter[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(4): 30-38.
- [32] 赵国军, 陈坤燚, 曾伟, 等. 计及等效负载变化的消弧逆变器性能分析与设计[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 148-157.
ZHAO Guojun, CHEN Kunyi, ZENG Wei, et al. Performance analysis and design of an arc suppression inverter considering equivalent load change[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 148-157.
- [33] 戈斌, 罗阳, 李家玮, 等. 风光互补式电动汽车充电站储能锂电池的实时状态估计[J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(1): 55-65.
GE Bin, LUO Yang, LI Jiawei, et al. Real-time state estimation of lithium batteries used for energy storage in electric vehicle charging stations with wind-solar complementary power System[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(1): 55-65.
- [34] 刘艳红, 李朋真, 李汇来, 等. 线性自抗扰控制系统的稳定性分析方法[J]. 控制工程, 2024, 31(1): 95-102.
LIU Yanhong, LI Pengzhen, LI Huilai, et al. Stability analysis method of linear active disturbance rejection control system[J]. Control Engineering of China, 2024, 31(1): 95-102.
- [35] IEEE recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems: IEEE 519—2014[S]. 2014.

收稿日期: 2024-07-13; 修回日期: 2024-12-17

作者简介:

刘道生(1976—), 男, 通信作者, 博士(后), 教授, 博士生导师, 研究方向为新能源发电及控制、电力设备检测与故障诊断、变压器绝缘材料等; E-mail: daoshengliu@aliyun.com

宋忠文(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为光伏发电技术、光伏逆变器控制。E-mail: songzhongwen1105@163.com

(编辑 周金梅)