

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240461

适用于光伏接入中压直流配电网的改进型 LADRC 恒压控制策略

李辰佳¹, 李琰¹, 范译文¹, 刘超¹, 王聪², 何杨¹

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. 国网北京市电力公司, 北京 100031)

摘要: 在外界扰动出现时, 含光伏的中压直流配电系统的母线电压会发生波动, 给电力系统的稳定运行带来挑战。针对传统光伏恒压控制策略抗扰性不足的问题, 提出了基于改进型线性自抗扰控制(linear active disturbance rejection control, LADRC)的光伏恒压控制策略。对于两级集成式的 DC/DC 变换器, 采用基于微分反馈的线性扩张状态观测器(linear extended state observer, LESO), 设计改进型 LADRC 结构, 并详细分析了控制器的参数整定、抗扰性和稳定性。在仿真平台中将采用 PI 控制、传统 LADRC 和改进型 LADRC 的光伏恒压控制效果进行对比。结果表明, 基于改进型 LADRC 的光伏恒压控制策略具有优秀的抗干扰能力, 能够以更小的超调量和更快的响应速度使直流母线电压恢复稳定。

关键词: 光伏发电系统; 中压直流系统; 线性自抗扰控制; 抗干扰能力

Improved LADRC constant voltage control strategy for photovoltaic integration into MVDC distribution networks

LI Chenjia¹, LI Yan¹, FAN Yiwen¹, LIU Chao¹, WANG Cong², HE Yang¹

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China)

Abstract: When external disturbances occur, the bus voltage of a MVDC distribution system with PV integration will fluctuate, posing challenges to the stable operation of the power system. In this paper, a PV constant voltage control strategy based on improved linear active disturbance rejection control (LADRC) is proposed to address the insufficient disturbance rejection of traditional PV constant voltage control strategies. For the two-stage integrated DC/DC converter, a linear extended state observer (LESO) based on differential feedback is used to design the improved LADRC structure, and the parameter tuning, disturbance rejection, and stability of the controller are analyzed in detail. The effects of PV constant voltage control using PI control, traditional LADRC, and improved LADRC are compared on a simulation platform. The results show that the PV constant voltage control strategy based on the improved LADRC has excellent anti-interference capability and can restore the DC bus voltage to stability with smaller overshoot and faster response speed.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U23B20120).

Key words: photovoltaic power generation system; MVDC system; linear active disturbance rejection control; anti-interference capability

0 引言

在碳达峰目标与碳中和愿景下, 我国能源体系面临全面转型, 光伏发电因安全高效、环境友好、资源分布广泛等优势, 在能源结构中的占比持续攀

升^[1-3]。但光伏发电具有随机性、波动性和间歇性, 其大规模接入电网给电压稳定性带来挑战^[4-5]。而且随着光伏发电装机容量的增加, 光伏发电单元无法仅运行在低压配电系统, 需要考虑并入更高电压等级的配电系统。含光伏的中压直流配电系统涉及单个光伏单元的控制策略、多个光伏单元的协同控制策略以及光伏单元与中压直流系统之间的稳定运行

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (U23B20120)

控制策略。针对光照强度变化等扰动会引起直流母线电压波动的问题, 本文聚焦于中压直流系统的恒压控制策略, 不再采用传统的光伏发电最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制策略, 而是根据光伏输出功率和直流母线电压的实时变化情况选取恰当的恒压控制策略, 以提升中压直流系统的抗扰性。

自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)技术由文献[6]提出, 许多学者从现代控制论的角度出发认为它可以替代传统 PI 控制^[7]。针对 ADRC 参数整定困难的问题, 文献[8-9]阐述 ADRC 参数与频率相关联的“带宽法”, 提出线性自抗扰控制(linear active disturbance rejection control, LADRC), 将控制参数减少为 3 个, 降低了参数整定难度, 便于工程应用。文献[10]提出适用于同步电机电流内环的改进型 LADRC, 通过串联滞后校正环节以减少观测器噪声放大现象的发生。文献[11]针对直流混合储能系统, 以 LADRC 替代储能双向变换器的 PI 控制, 提高了控制响应速度并减小了母线电压波动程度。文献[12]将 LADRC 与 DC/DC 变换器恒压控制结合, 采用带宽法计算双闭环 LADRC 的参数, 简化了控制器参数整定过程。文献[13]提出参数自适应调节的 LADRC, 提升了三相隔离电源输出电压的响应速度。可以看出, 采用 LADRC 技术能够获得良好的控制效果。

为了提升光伏发电系统输出信号的质量, LADRC 在光伏发电系统中也有所应用。文献[14]针对光伏发电系统的 Boost 和 Buck/Boost 变换电路, 提出基于 LADRC 的 MPPT 控制器, 减少了光伏输出功率的振荡, 但该控制器仅适用于单峰值的最大功率点跟踪策略。文献[15]设计了光伏逆变器的模糊串级 LADRC, 降低了并网电流谐波含量, 但其仅适用于电力系统线性负载接入的场景。文献[16]为了提升抗扰性并实现全局 MPPT, 将变步长扰动观察法、粒子群算法分别与 LADRC 结合, 但未实现两种控制方法在光照条件快速变化时的切换。文献[17]设计了光伏并网逆变器的解耦一阶 LADRC, 提高了控制器的抗扰能力, 但未考虑短路故障的电网运行状态。文献[18]提出适用于分布式光储系统的滑模自抗扰控制, 减少了可调参数数量并提高了系统的鲁棒性, 但滑模控制固有的抖振现象会产生不利影响。

为了进一步提升光伏恒压控制策略的抗扰性, 本文提出基于改进型 LADRC 的光伏恒压控制策略。在输入并联输出串联(input-parallel output-series, IPOS)式的 Boost-LLC 直流变换器工作原理基础上,

利用光伏单元降功率运行模式特性和改进 LADRC 技术, 调节光伏阵列经直流变换器的输出功率以抑制母线电压的波动。并具体分析了改进 LADRC 参数整定、抗干扰性能和稳定性。为验证所提控制策略的优越性, 进行了光照强度、温度和负载变化以及三相短路故障工况的仿真。结果表明, 适用于含光伏中压直流配电系统的改进型 LADRC 的光伏恒压控制策略具有优秀的抗干扰能力。

1 光伏发电接入中压直流系统运行特性

本研究构建的中压直流系统结构如图 1 所示, 光伏发电单元由光伏阵列、DC/DC 变换器构成。

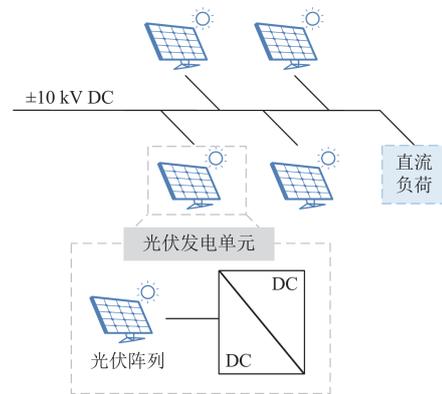


图 1 中压直流系统结构图

Fig. 1 Structure of MVDC system

1.1 光伏发电单元的数学模型

本文使用 Boost 变换器和 LLC 谐振变换器, 设计了集成式直流变换器, 其为 IPOS 的级联结构, 即多个模块在输入端并联连接以实现电流加倍, 在输出端串联连接以实现电压加倍。本变换器能够将光伏阵列的输出功率顺利传输到中压直流系统。IPOS-Boost-LLC 型 DC/DC 变换器拓扑如图 2 所示。

当开关管 K 导通, 二极管 D_0 关断时, 充电状态表达式为

$$\begin{cases} U_L = L \frac{dI_L}{dt} = -U_b \\ I_C = C \frac{dU_C}{dt} = -\frac{1}{R} U_o \end{cases} \quad (1)$$

式中: U_L 、 I_L 、 U_C 、 I_C 分别表示 Boost 变换器中的电感电压、电感电流、电容电压、电容电流; L 、 C 、 R 分别为电感值、电容值和 Boost 变换器输出端等效电阻; U_b 、 U_o 分别为 Boost 变换器输入电压和输出电压。

当开关管 K 关断, 二极管 D_0 导通时, 放电状态可表示为式(2)。

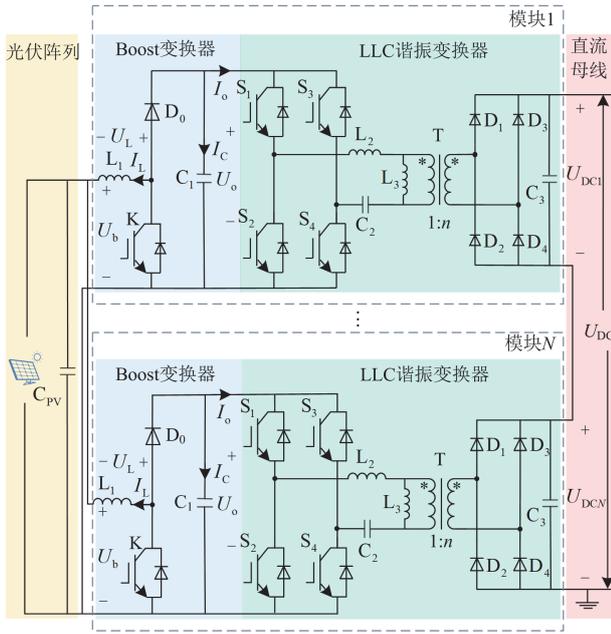


图2 IPOS-Boost-LLC型DC/DC变换器拓扑图

Fig. 2 Topology of IPOS-Boost-LLC type DC/DC converter

$$\begin{cases} U_L = L \frac{dI_L}{dt} = U_o - U_b \\ I_C = C \frac{dU_C}{dt} = -\frac{1}{R} U_o - I_L \end{cases} \quad (2)$$

变压器 T 原边和副边的匝数比为 $1:n$ 时, 第 i 个模块的 LLC 谐振变换器输入电压 U_{in} 与输出电压 U_{DCi} 的关系为

$$\frac{U_{in}}{U_{DCi}} = \frac{2(1-d_1)}{n} \quad (3)$$

式中, d_1 为 LLC 谐振变换器占空比。

由式(3)可知, 改变 LLC 变换器占空比能够提升 IPOS-Boost-LLC 型 DC/DC 变换器的电压增益。

1.2 光伏发电单元的运行模式

光伏输出电流 I 与输出电压 U 的关系^[19]为

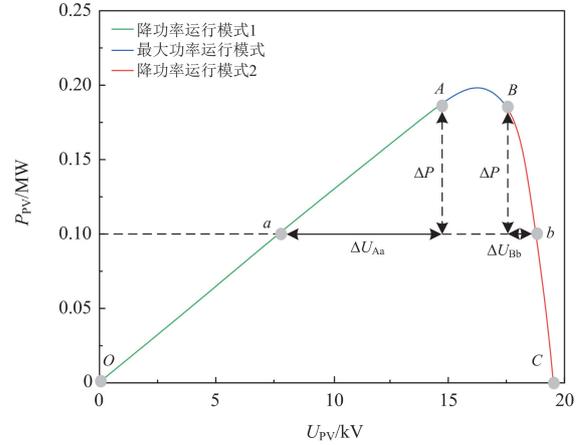
$$I = I_{sc} - I_{sc} A_1 \left[\exp\left(\frac{U}{A_2 U_{oc}}\right) - 1 \right] \quad (4)$$

$$\begin{cases} A_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}\right) \exp\left(-\frac{U_m}{A_2 U_{oc}}\right) \\ A_2 = \left(\frac{U_m}{U_{oc}} - 1\right) \left[\ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}\right)\right]^{-1} \end{cases} \quad (5)$$

式中, I_{sc} 、 I_m 、 U_{oc} 、 U_m 分别为任意环境条件下的光伏电池的短路电流、最大功率输出电流、开路电压、最大功率输出电压。

光照强度为 1000 W/m^2 、温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 的标准环

境下, 由式(4)和式(5)可得光伏阵列 $P-U$ 特性曲线如图3所示。

图3 光伏阵列 $P-U$ 特性曲线图Fig. 3 $P-U$ characteristic curve of PV array

如图3所示, 光伏最大功率运行模式为 AB 阶段, 降功率运行模式为 OA 、 BC 阶段。当负荷变化量为 ΔP 时, OA 段电压变化量 $|\Delta U_{Aa}|$ 大于 BC 段电压变化量 $|\Delta U_{Bb}|$ 。

当负荷发生波动时, 若光伏阵列端口输出电压变化量较小, 则无法通过准确调节光伏输出功率以满足直流母线电压的要求。因此, 针对中压直流配电网的母线电压因干扰发生波动的问题, 本文进行光伏发电单元恒压控制策略的研究时, 光伏发电单元应运行在 OA 段。

2 LADRC 结构改进设计

2.1 LADRC 原理

LADRC 由线性扩张状态观测器(linear extended state observer, LESO)、线性误差反馈控制律(linear state error feedback, LSEF)两部分组成^[20-21], 核心组成部分为 LESO, 其估计系统状态和内外部扰动, 提供准确信息用于控制器对扰动的实时补偿^[22-24]。LADRC 结构框图如图4所示。

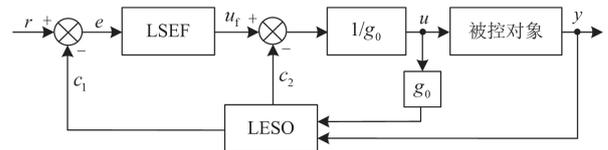


图4 LADRC 结构框图

Fig. 4 Block diagram of LADRC structure

一阶被控对象可以表示为^[25]

$$\dot{y} = g_0 u + f \quad (6)$$

$$f = -ay + \omega + (g - g_0)u \quad (7)$$

式中： y 、 u 、 ω 、 a 分别为为被控对象输出信号、被控对象输入信号、外部扰动和系统的未知系数； g 为系统控制增益； g_0 为 g 的可求解部分； f 是包括系统内扰、外扰和控制增益未知部分的总扰动量。

将式(6)表示的系统写成状态空间模型形式，如式(8)所示^[26]。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{cases} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} g_0 \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} h \quad (8)$$

$$y = [1 \quad 0]x + [0]u$$

式中： $x_1 = y$ ； $x_2 = f$ ； $h = \dot{f}$ 。

对应二阶 LESO 方程表达式为式(9)。

$$\begin{cases} \dot{c}_1 \\ \dot{c}_2 \end{cases} = \begin{bmatrix} -k_1 & 1 \\ -k_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_0 & k_1 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ y \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \hat{y}_1 \\ \hat{y}_2 \end{cases} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix}$$

式中： c_1 和 c_2 是 LESO 的状态变量，分别为 y 和 f 的估计值； \hat{y}_1 和 \hat{y}_2 是 LESO 的输出变量； k_1 、 k_2 均为 LESO 的可调参数，使用带宽法进行控制器极点配置^[27]， $k_1 = 2\omega_0$ ， $k_2 = \omega_0^2$ ， ω_0 表示 LESO 的带宽值。

LSEF 的表达式为

$$u_f = k_3(r - c_1) \quad (10)$$

式中： r 、 u_f 分别为输出电压的参考值和 LSEF 输出信号值； k_3 为 LSEF 的可调参数。

扰动补偿环节的输出值作为被控对象输入信号 u ，控制律设定为

$$u = \frac{u_f - c_2}{g_0} \quad (11)$$

若观测器的参数设置良好，则有 c_1 趋近于 y ， c_2 趋近于 f ，将式(10)和式(11)代入式(6)可得

$$\dot{y} = g_0 \frac{u_f - c_2}{g_0} + f = k_3(r - y) \quad (12)$$

据以上的理论分析可知，经过 LADRC 补偿的一阶被控对象能够被简化为一个单积分器。LADRC 通过 LESO 估计扰动，并通过 LSEF 结构和扰动补偿环节将扰动值补偿到 u 。因此，需要对 LESO 和 LSEF 配置合适的参数 k_1 、 k_2 和 k_3 ，以确保 LADRC 的有效估计。

2.2 基于微分反馈的 LADRC 改进设计

本文为了提升一阶线性自抗扰控制器的动态性能，在 LADRC 的 LESO 结构中添加微分反馈环节，即对状态变量 c_1 与输出信号 y 的差值进行求导计

算，并将求导结果反馈至对系统总扰动估计的过程。

基于微分反馈的新型 LESO 的表达式为

$$\begin{cases} \dot{c}_1 = -k_1(c_1 - y) + c_2 + g_0 u \\ \dot{c}_2 = -k_1 k_2(c_1 - y) - k_2(\dot{c}_1 - \dot{y}) \end{cases} \quad (13)$$

改进型 LADRC 结构框图如图 5 所示。

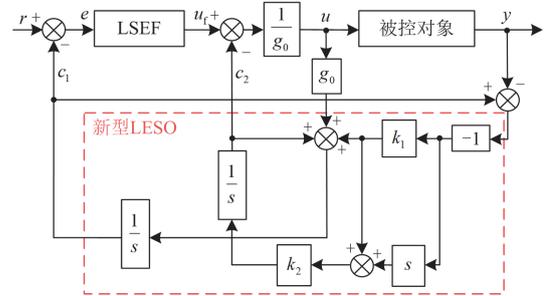


图 5 改进型 LADRC 结构框图

Fig. 5 Block diagram of improved-LADRC structure

使用带宽法进行极点配置时，将极点选择为 s 平面的左半平面 $-\omega_0$ 处，则 LESO 的特征方程为

$$\lambda = (s + k_1)(s + k_2) = (s + \omega_0)^2 \quad (14)$$

改进型 LADRC 的数学模型总结为

$$\begin{cases} \dot{c}_1 = -k_1 c_1 + c_2 + g_0 u + k_1 y \\ \dot{c}_2 = -k_2 c_2 - g_0 k_2 u + k_2 \dot{y} \\ u_f = k_3(r - c_1) \\ u = \frac{u_f - c_2}{g_0} \end{cases} \quad (15)$$

3 基于改进型 LADRC 的光伏恒压控制策略及其参数研究

本文对光伏恒压控制策略的研究是将改进 LADRC 应用于 IPOS-Boost-LLC 型 DC/DC 变换器，以加快光伏恒压控制的响应速度并减小超调量，进而提升控制策略的动态性能。

3.1 控制策略研究

光伏恒压控制通过改变 Boost 变换器关断比，将光伏功率输送到中压直流系统以调节直流母线电压。传统光伏恒压控制对于 Boost 变换器电流内环和电压外环的设计均采用 PI 控制器^[28]。Boost 变换器输出电压的稳定性主要由电压外环决定，本文将改进型 LADRC 应用于电压外环。基于改进型 LADRC 的光伏恒压控制结构如图 6 所示。

图 6 中： $G_{PI1}(s)$ 、 $G_{PI2}(s)$ 分别为传统恒压控制的电压外环和电流内环 PI 控制器的传递函数； $G_{PI}(s)$ 为本文所提控制结构中电流内环 PI 控制器的传递函数； $G_{id}(s)$ 为占空比 d 到电感电流 I_L 的传递函数； $G_{vi}(s)$ 为电感电流 i_L 到输出电压 u_o 的传递函数。

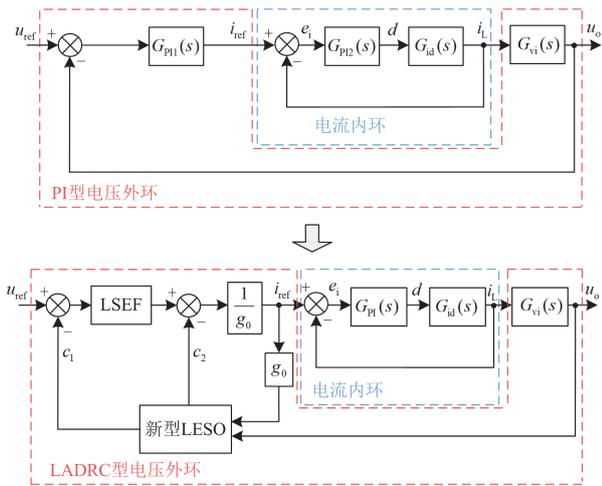


图 6 基于改进型 LADRC 的光伏恒压控制结构框图

Fig. 6 Block diagram of PV constant voltage control structure based on improved-LADRC

$$G_{PI}(s) = \frac{K_{ip}s + K_{ii}}{s} \quad (16)$$

式中, K_{ip} 和 K_{ii} 分别为电流内环 PI 控制器的比例增益系数和积分增益系数。

$G_{id}(s)$ 和 $G_{vi}(s)$ 的表达式分别为

$$G_{id}(s) = \frac{I_L(s)}{d(s)} = \frac{-U_o CRs}{LCRs^2 + Ls + R\beta^2} \quad (17)$$

$$G_{vi}(s) = \frac{U_o(s)}{I_L(s)} = \frac{-R\beta^2 + Ls}{R\beta Cs} \quad (18)$$

式中, d 、 β 分别表示 Boost 变换器的占空比和关断比, $\beta = 1 - d$ 。

由图 6 可知, 控制对象 $G(s)$ 为

$$G(s) = \frac{G_{PI}(s)G_{id}(s)}{1 + G_{PI}(s)G_{id}(s)} \cdot G_{vi}(s) = \frac{b_2s^2 + b_1s + b_0}{a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s} \quad (19)$$

其中

$$\begin{cases} b_2 = (-U_o L K_{ip}) / R\beta \\ b_1 = (-U_o L K_{ii} + R\beta^2 U_o K_{ip}) / R\beta \\ b_0 = U_o \beta K_{ii} \\ a_3 = (-U_o LC) / R\beta \\ a_2 = (-U_o L + U_o^2 CR K_{ip}) / R^2 \beta \\ a_1 = (-U_o \beta^2 + CU_o^2 K_{ii}) / R\beta \end{cases} \quad (20)$$

3.2 参数整定

将式(19)所示的传递函数化成微分方程, 再对等式两侧积分计算, 可推导出如式(21)所示的一阶系统表达式。

$$\begin{cases} a_3 \ddot{y} + a_2 \dot{y} + a_1 y = b_2 \ddot{u} + b_1 \dot{u} + b_0 u \\ \dot{y} = \frac{b_1 u}{a_2} + \frac{1}{a_2} \left[b_2 \dot{u} + b_0 \int u - (a_3 \dot{y} + a_1 y) \right] \end{cases} \quad (21)$$

将改进 LADRC 的控制量增益设定为一阶系统控制增益可求解部分 g_0 , 式(21)与式(6)对照可得 g_0 的表达式为

$$g_0 = \frac{b_1}{a_2} = \frac{-RLK_{ii} + R^2 \beta^2 K_{ip}}{-L + CRU_o K_{ip}} \quad (22)$$

由式(15)、式(13)可得, 输入量为 r 、 y 和 \dot{y} 的新型 LESO 方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{c}_1 \\ \dot{c}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_1 - k_3 & 0 \\ k_2 k_3 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_3 & k_1 & 0 \\ -k_2 k_3 & 0 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ y \\ \dot{y} \end{bmatrix} \quad (23)$$

其传递函数形式的表达式写为

$$\begin{bmatrix} c_1(s) \\ c_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{k_3}{W} & \frac{k_1}{W} & 0 \\ -\frac{k_2 k_3 (s + k_1)}{sW} & \frac{k_1 k_2 k_3}{sW} & \frac{k_2}{s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r(s) \\ y(s) \\ \dot{y}(s) \end{bmatrix} \quad (24)$$

式中, $W = s + k_1 + k_3$ 。

根据线性系统的叠加定理, 可分别求得从参考值 r 到控制量 u 的传递函数以及从输出值 y 到控制量 u 的传递函数, 如式(25)所示。

$$\begin{cases} \frac{U(s)}{R(s)} = \frac{k_3 s^2 + k_3 (k_1 + k_2) s + k_1 k_2 k_3}{g_0 s^2 + g_0 (k_1 + k_3) s} \\ \frac{U(s)}{Y(s)} = -\frac{(k_2 + k_1 k_3) s + k_2 (k_1 + k_3 + k_1 k_3)}{g_0 s^2 + g_0 (k_1 + k_3) s} \end{cases} \quad (25)$$

通过式(25)可以将一阶改进 LADRC 等效为二自由度控制器, 如图 7 所示。

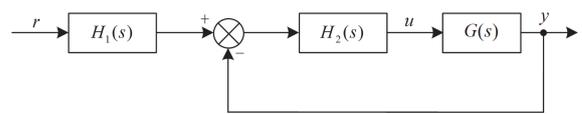


图 7 一阶改进 LADRC 的等效二自由度控制器

Fig. 7 Block diagram of the equivalent two-degree-of-freedom controller of first-order improved LADRC

图 7 中, $H_1(s)$ 和 $H_2(s)$ 的表达式可由式(25)推得, 如式(26)所示。

$$\begin{cases} H_1(s) = -\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{k_3 s^2 + k_3 (k_1 + k_2) s + k_1 k_2 k_3}{(k_1 k_3 + k_2) s + k_2 (k_1 + k_3 + k_1 k_3)} \\ H_2(s) = -\frac{U(s)}{Y(s)} = \frac{(k_2 + k_1 k_3) s + k_2 (k_1 + k_3 + k_1 k_3)}{g_0 s^2 + g_0 (k_1 + k_3) s} \end{cases} \quad (26)$$

$H_2(s)$ 可等效为 PI 控制器与一阶低通滤波器的串联, 即 $H_2(s)$ 可写为

$$H_2(s) = \frac{(k_2 + k_1 k_3)s + k_2(k_1 + k_3 + k_1 k_3)}{g_0 s(s + k_1 + k_3)} = \frac{k_p' s + k_i'}{s} \cdot \frac{1}{(1 + \tau s)} \quad (27)$$

式中: k_p' 和 k_i' 为等效 PI 控制器的参数; τ 为等效低通滤波器的时间常数。

由式(27)可得关于 k_2 的一元三次方程为

$$k_2^3 - k_p' g_0 k_2^2 + k_i' \tau g_0 k_2 - (k_i' g_0)^2 = 0 \quad (28)$$

由式(27)和式(28)可知, 通过设计等效参数 k_p' 、 k_i' 和 τ , 可进一步获得改进 LADRC 可调参数值 k_1 、 k_2 和 k_3 , 简化了光伏发电单元恒压控制策略的参数整定过程。

3.3 抗扰性能分析

分析式(26)、式(27)可初步判断, 参考量 r 输入控制器时能够经过初步的柔化过程, 避免 r 值突变导致的深度饱和问题。反馈回路的低通滤波器能够抑制高频信号的干扰, 改进 LADRC 的抗扰性良好。以下将通过 Bode 图进一步评估控制器的抗扰性能。

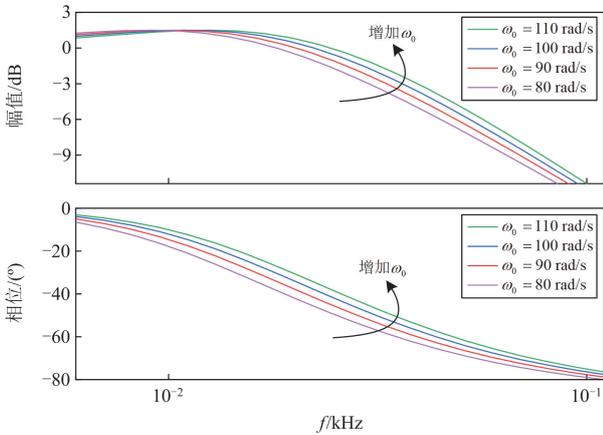
由拉普拉斯变换得到

$$\begin{cases} C_1(s) = \frac{g_0 s}{(s + \omega_0)^2} U(s) + \frac{2\omega_0 s + \omega_0^2}{(s + \omega_0)^2} Y(s) \\ C_2(s) = -\frac{\omega_0 g_0}{s + \omega_0} U(s) + \frac{\omega_0 s}{s + \omega_0} Y(s) \end{cases} \quad (29)$$

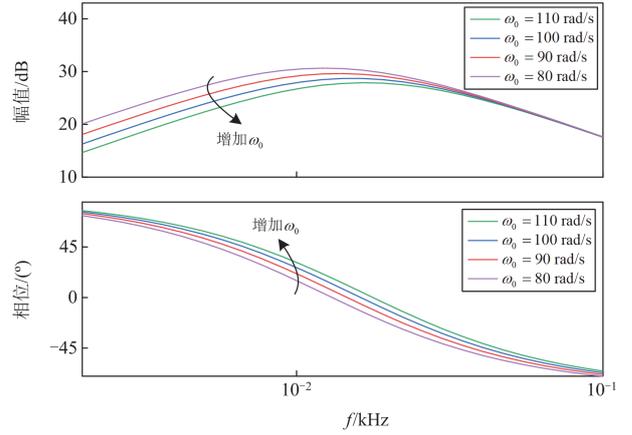
输出量和输入量与 c_i 的传递函数分别为

$$\begin{cases} G_1(s) = \frac{2\omega_0 s + \omega_0^2}{(s + \omega_0)^2} \\ G_2(s) = \frac{g_0 s}{(s + \omega_0)^2} \end{cases} \quad (30)$$

令 $g_0 = 5 \times 10^3$ 并改变带宽 ω_0 值, 改进 LADRC 抗扰性能分析结果如图 8 所示。



(a) 传递函数 $G_1(s)$ 的 Bode 图



(b) 传递函数 $G_2(s)$ 的 Bode 图

图 8 改进 LADRC 抗扰性能分析

Fig. 8 Analysis of immunity performance of improved LADRC

由图 8 可见, 随着 ω_0 的增大, 输出量和输入量噪声扰动幅值的绝对值大小降低, 相位变得延迟, 改进型 LADRC 能够有效抑制高频扰动量。

3.4 稳定性分析

由图 7 可知, 参考值 r 与输出信号 y 的传递函数 $G_3(s)$ 为

$$G_3(s) = H_1(s) \frac{H_2(s)G(s)}{1 + H_2(s)G(s)} = \frac{q_5 s^5 + q_4 s^4 + q_3 s^3 + q_2 s^2 + q_1 s^1 + q_0}{m_6 s^6 + m_5 s^5 + m_4 s^4 + m_3 s^3 + m_2 s^2 + m_1 s^1 + m_0} \quad (31)$$

式中:

$$\begin{cases} m_6 = a_3 g_0 e_1 \\ m_5 = e_1 g_0 [a_2 + a_3 (k_1 + k_3)] + k_2 e_2 a_3 g_0 \\ m_4 = g_0 (k_1 + k_3) (a_2 e_1 + a_3 k_2 e_2) + b_2 e_1^2 + g_0 a_1 e_1 + g_0 a_2 k_2 e_2 \\ m_3 = k_2 e_2 (2b_2 e_1 + g_0 a_1) + e_1^2 b_1 + g_0 (k_1 + k_3) (a_1 e_1 + a_2 k_2 e_2) \\ m_2 = k_2 e_2 [2b_1 e_1 + k_2 e_2 b_2 + g_0 a_1 (k_1 + k_3)] + e_1^2 b_0 \\ m_1 = k_2 e_2 (2e_1 b_0 + k_2 e_2 b_1) \\ m_0 = k_2^2 e_2^2 b_0 \end{cases} \quad (32)$$

$e_1 = k_2 + k_1 k_3$; $e_2 = k_1 + k_3 + k_1 k_3$; $q_1 - q_6$ 为各项系数。

根据李纳德-威帕特稳定判据^[29], 控制系统稳定的充要条件为赫尔维兹行列式大于 0, 即

$$\Delta_6 = \begin{vmatrix} m_5 & m_3 & m_1 & 0 & 0 & 0 \\ m_6 & m_4 & m_2 & m_0 & 0 & 0 \\ 0 & m_5 & m_3 & m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_6 & m_4 & m_2 & m_0 & 0 \\ 0 & 0 & m_5 & m_3 & m_1 & 0 \\ 0 & 0 & m_6 & m_4 & m_2 & m_0 \end{vmatrix} > 0 \quad (33)$$

当设置合适的改进 LADRC 参数值使 $\Delta_6 > 0$ 时, 中压直流系统光伏发电单元恒压控制器具有良好的稳定性。

4 仿真分析

基于 Matlab/Simulink 仿真平台搭建如图 1 所示的中压直流系统。由式(22)、式(27)和式(28)可计算出改进型 LADRC 具体参数, 如表 1 所示。

表 1 改进型 LADRC 参数

Table 1 Parameters of improved LADRC controller

电路参数	数值
g_0	5.73×10^6
k_1	294
k_2	3.25
k_3	1.48×10^9

根据光伏发电单元经 IPOS-Boost-LLC 型直流升压变换器接入中压直流配电系统的升压倍数要求, 设计 Boost 变换器和 LLC 谐振变换器的具体元件参数值。并记录光伏阵列在环境温度为 25 °C、光照辐射强度为 1000 W/m² 时的运行参数。中压直流系统的电路参数如表 2 所示。

表 2 中压直流系统的电路参数

Table 2 Circuit parameters of the MVDC system

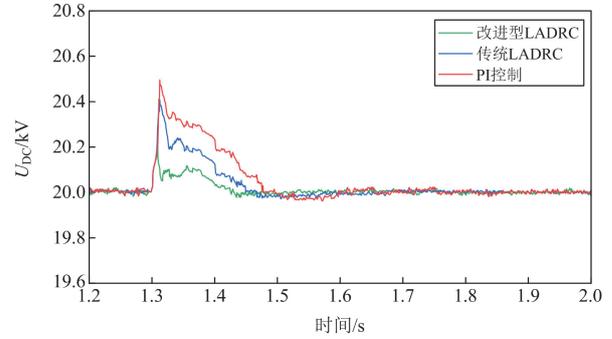
电路参数	数值
直流母线电压 U_{DC}/kV	± 10
直流负荷变化范围 P_{DC}/MW	0.16~0.26
LLC 谐振变换器直流升压倍数	6.25
Boost 变换器开关频率 f_s/Hz	1×10^3
Boost 变换器电感 L/mH	2
Boost 变换器电容 $C/\mu F$	600
光伏阵列最大功率 P_{mpp}/MW	0.194
光伏阵列开路电压 U_{oc}/kV	0.982
光伏阵列电压变化范围 U_{PV}/kV	0.10~0.82
光伏阵列短路电流 I_{sc}/kA	0.269

4.1 光照强度变化

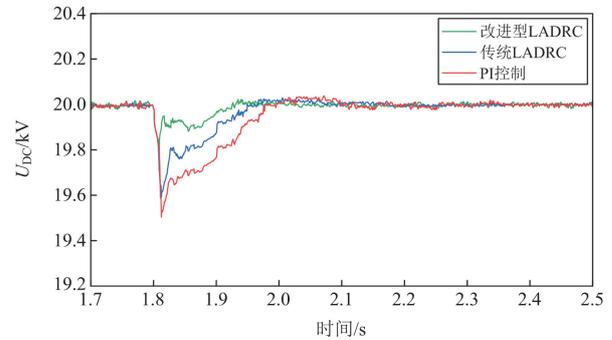
令温度、直流负荷保持不变, 光照强度在 1.3 s 时由 800 W/m² 变化至 1000 W/m², 1.8 s 时由 1000 W/m² 恢复至 800 W/m², 基于改进 LADRC、传统 LADRC 和 PI 控制技术的光伏恒压控制策略下直流母线电压波形对比如图 9 所示。

由图 9 可知, 采用 PI 控制时电压波动程度大, 光照辐射强度升高及降低时电压最大、最小值分别为 20.4938 kV、19.5042 kV; 传统 LADRC 减小了电压波动程度, 两种工况时电压最大、最小值分别

为 20.4132 kV、19.5827 kV; 采用改进 LADRC 时的电压波动程度最低, 两种工况下电压最大、最小值分别为 20.2261 kV、19.7066 kV。改进 LADRC 有效降低了直流母线电压在光照强度变化时的波动程度。



(a) 光照强度增加工况



(b) 光照强度降低工况

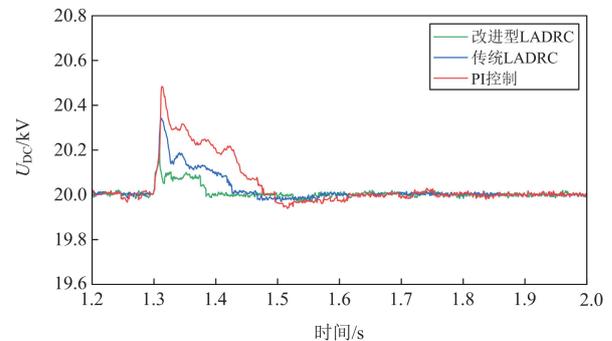
图 9 光照强度变化下直流母线电压波形

Fig. 9 DC bus voltage waveforms under light intensity change

4.2 环境温度变化

令温度在 1.3 s 时由 25 °C 升高到 28 °C, 1.8 s 恢复为 25 °C, 其他条件不变, 电压波形如图 10 所示。

由图 10 可知, 采用 PI 控制器在温度升高/降低工况时稳压所需时间最长, 分别在 1.7552 s、2.2545 s 恢复稳定, 超调量为 0.32%。传统 LADRC 在两种工况时电压恢复稳定的时刻分别为 1.5665 s 和 2.1195 s,



(a) 温度升高工况

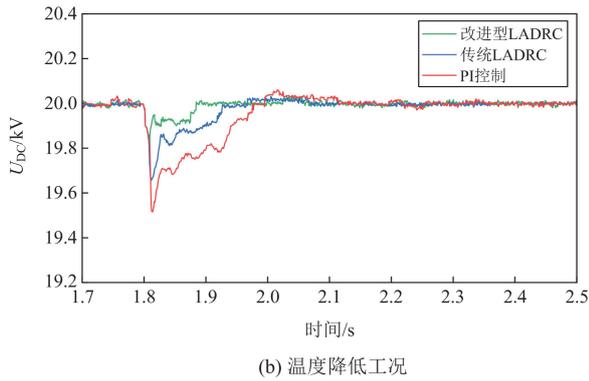


图 10 温度变化工况下直流母线电压波形

Fig. 10 DC bus voltage waveforms under temperature change

超调量为 0.16%。改进 LADRC 分别在 1.4785 s 和 2.0020 s 使电压恢复稳定，超调量为 0.05%，基于改进 LADRC 的光伏恒压控制策略响应速度最快且超调量最小，降低了温度变化对电压的不利影响。

4.3 负载变化

令光照强度和环境温度保持不变，直流负荷在 1.5 s 时由 0.16 MW 跳变到 0.26 MW，2.3 s 时降低为 0.16 MW，直流母线电压波形如图 11 所示。

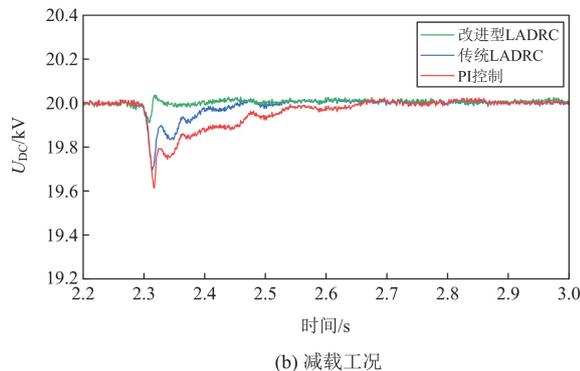
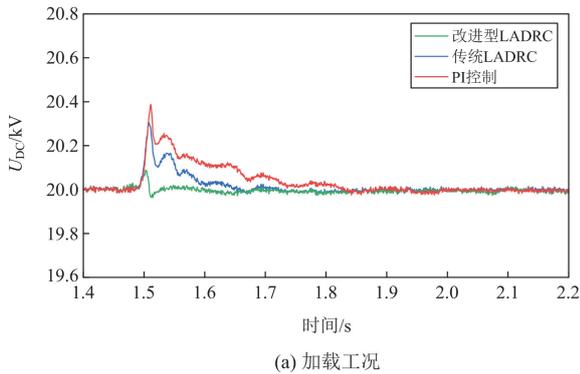


图 11 负载变化工况下直流母线电压波形

Fig. 11 DC bus voltage waveforms under load variation

由图 11 可知，采用 PI 控制、传统 LADRC 和改进 LADRC 的恒压控制策略，在负载增加工况时

直流母线电压峰值分别为 20.386 kV、20.302 kV、20.096 kV，电压恢复稳定时刻分别为 1.843 s、1.747 s、1.684 s；负载减少时电压最小值分别为 19.612 kV、19.698 kV、19.912 kV，电压恢复稳定时刻分别为 2.656 s、2.523 s、2.426 s。改进型 LADRC 抑制母线电压波动效果更好，电压恢复时间更短。

4.4 三相短路故障

当送端直流母线某处 3.0 s 发生三相短路故障(故障接地电阻分别为 10 Ω 和 50 Ω)、3.06 s 故障切除时，仿真结果如图 12 所示。

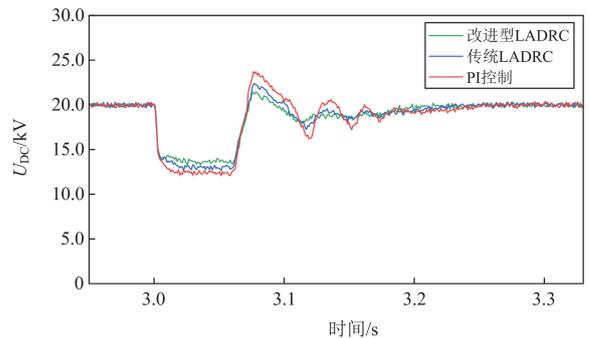
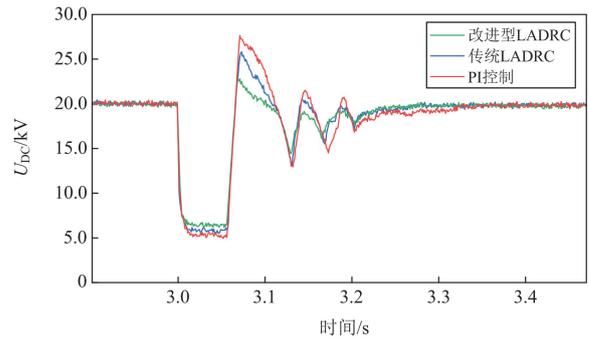


图 12 三相短路时直流母线电压波形

Fig. 12 DC bus voltage waveforms during three-phase short circuit

由图 12 可看出，故障接地电阻为 10 Ω 时，采用 PI 控制、传统 LADRC 和改进 LADRC 时，母线电压最低值分别为 4.93 kV、5.78 kV 和 6.82 kV，且 3 种控制器分别在 3.323 s、3.280 s、3.245 s 使母线电压恢复稳定。故障接地电阻为 50 Ω 时，采用 PI 控制、传统 LADRC 和改进 LADRC 时，母线电压最低值分别为 12.12 kV、12.96 kV 和 14.09 kV，且 3 种控制器分别在 3.290 s、3.253 s、3.206 s 使直流母线电压恢复到正常值。因此，改进 LADRC 能够在故障期间有效地支撑母线电压，在保护装置动作后使电压更快恢复到正常范围内。

5 结论

针对光伏恒压控制的抗扰性问题, 在含光伏中压直流配电系统的应用场景下, 本文提出了一种基于改进型 LADRC 的光伏恒压控制策略。得到以下结论:

1) 本文使用基于微分反馈的新型 LESO 结构设计了改进型线性自抗扰控制器, 将其应用于 IPOS-Boost-LLC 型直流变换器的电压外环。所提光伏恒压控制策略可以抑制高频扰动信号。

2) 基于等效二自由度结构, 本文提出了简化的改进 LADRC 参数整定方法。求解等效 PI 控制器和等效低通滤波器的参数, 可获得改进型 LADRC 的 3 个关键控制参数, 降低了参数整定复杂度, 便于控制器的实际应用。

3) 基于 PI 控制、传统 LADRC 和改进 LADRC 的光伏恒压控制策略在不同干扰类型下的仿真结果表明, 采用改进型 LADRC 的光伏恒压控制具备优秀的动态响应性能和抗干扰能力, 能够加快响应速度并减小超调量, 降低直流母线电压波动程度, 提高了中压直流系统的电压质量及供电可靠性。

参考文献

- [1] 杨华磊, 杨敏. 碳达峰碳中和: 中国式现代化的能源转型之路[J]. 经济问题, 2024, 46(3): 1-7.
YANG Hualei, YANG Min. Peak carbon emission and carbon neutrality: China's path to energy transition in modernization[J]. Economic Problem, 2024, 46(3): 1-7.
- [2] BAGNALL D M, BORELAND M. Photovoltaic technologies[J]. Energy Policy, 2008, 36(12): 4390-4396.
- [3] 高放, 胡嵘昭, 殷林飞, 等. 基于定位收缩法的局部阴影条件下光伏最大功率点跟踪[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(4): 87-99.
GAO Fang, HU Rongzhao, YIN Linfei, et al. Locate and shrink method for PV maximum power point tracking in partial shading conditions[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(4): 87-99.
- [4] 钟诚, 姜志富, 张翔宇, 等. 含风光出力随机性的独立微电网二次频率控制[J]. 太阳能学报, 2024, 45(1): 523-533.
ZHONG Cheng, JIANG Zhifu, ZHANG Xiangyu, et al. Secondary frequency control of islanded microgrid considering wind and solar stochastics[J]. Acta Energetica Sinica, 2024, 45(1): 523-533.
- [5] 黄泽, 毕贵, 谢旭, 等. 基于 MBI-PBI-ResNet 的超短期光伏功率预测[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(2): 165-176.
HUANG Ze, BI Gui, XIE Xu, et al. Ultra-short-term PV power prediction based on MBI-PBI-ResNet[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2): 165-176.
- [6] 韩京清. 自抗扰控制技术: 估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [7] 夏亮, 孙天夫, 李鑫宇, 等. 基于线性自抗扰控制技术的伺服控制系统研究[J]. 电气工程学报, 2023, 18(4): 43-49.
XIA Liang, SUN Tianfu, LI Xinyu, et al. Research on servo control system based on linear active disturbance rejection control technology[J]. Journal of Electrical Engineering, 2023, 18(4): 43-49.
- [8] GAO Zhiqiang. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning[C]// Proceedings of the 2003 American Control Conference, June 4-6, 2003, New York, USA: 4989-4996.
- [9] GAO Zhiqiang, LI Song, ZHOU Xuesong, et al. A new maximum power point tracking method for PV system[C]// 29th Chinese Control and Decision Conference, May 28-30, 2017, Chongqing, China: 545-549.
- [10] LIU Chunqiang, LUO Guangzhao, CHEN Zhe, et al. Measurement delay compensated LADRC based current controller design for PMSM drives with a simple parameter tuning method[J]. ISA Transactions, 2020, 101: 482-492.
- [11] 郑昊, 杜贵平, 雷雁雄, 等. 混合储能双向 DC/DC 变换器线性自抗扰控制研究[J]. 电力电子技术, 2022, 56(9): 80-83.
ZHENG Hao, DU Guiping, LEI Yanxiong, et al. Research on linear active disturbance rejection control of hybrid energy storage bidirectional DC/DC converter[J]. Power Electronics, 2022, 56(9): 80-83.
- [12] LI Hui, LIU Xinxiu, LU Junwei. Research on linear active disturbance rejection control in DC/DC boost converter[J]. Electronics, 2019, 8(11): 1249-1267.
- [13] 孟建辉, 吴小龙, 张自力, 等. 三相隔离型 AC-DC-DC 电源自适应线性自抗扰控制方法及纹波抑制补偿策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(14): 3898-3908.
MENG Jianhui, WU Xiaolong, ZHANG Zili, et al. Adaptive linear active disturbance rejection control method and ripple suppression compensation strategy for three-phase isolated AC-DC-DC power supply[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(14): 3898-3908.
- [14] 高志强, 李松, 周雪松, 等. 线性自抗扰在光伏发电系统 MPPT 中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 52-59.
GAO Zhiqiang, LI Song, ZHOU Xuesong, et al. Design of MPPT controller for photovoltaic generation system based on LADRC[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 52-59.
- [15] 赵冬. LCL 型光伏并网逆变器模糊串级自抗扰控制策略研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2023.
ZHAO Dong. Research on fuzzy string-level active disturbance rejection control strategy for LCL-type grid-

- connected photovoltaic inverters[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2023.
- [16] 尤笑莹. 复杂光照下基于线性自抗扰的光伏发电系统最大功率点跟踪研究[D]. 保定: 河北大学, 2020.
YOU Xiaoying. Research on maximum power point tracking of photovoltaic power generation system based on linear active disturbance rejection under complex lighting[D]. Baoding: Hebei University, 2020.
- [17] 马幼捷, 魏聪聪, 周雪松. 光伏并网逆变器的解耦自抗扰控制设计[J]. 现代电子技术, 2022, 45(15): 175-181.
MA Youjie, WEI Congcong, ZHOU Xuesong. Design of decoupling active disturbance rejection control of photovoltaic grid-connected inverter[J]. Modern Electronics Technique, 2022, 45(15): 175-181.
- [18] 戴腾飞, 茅靖峰, 吴爱华, 等. 分布式光储直流微电网滑模自抗扰鲁棒运行控制[J]. 可再生能源, 2022, 40(11): 1505-1514.
DAI Tengfei, MAO Jingfeng, WU Aihua, et al. Sliding mode active disturbance rejection robust operation control for distributed photovoltaic and energy storage DC microgrid[J]. Renewable Energy Resources, 2022, 40(11): 1505-1514.
- [19] 程启明, 孙伟莎, 程尹曼, 等. 直流微网中 PV 发电系统的改进型恒压控制策略[J]. 太阳能学报, 2019, 40(11): 3071-3077.
CHENG Qiming, SUN Weisha, CHENG Yinman, et al. Improved constant voltage control of PV power generation system in DC microgrid[J]. Acta Energetica Sinica, 2019, 40(11): 3071-3077.
- [20] 张建功, 周雪松, 马幼捷, 等. 基于 Buck 变换器的模糊自抗扰 Hopf 分岔扰动抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(15): 12-21.
ZHANG Jianguo, ZHOU Xuesong, MA Youjie, et al. Fuzzy ADRC Hopf bifurcation disturbance suppression strategy based on a Buck converter[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(15): 12-21.
- [21] 王超, 侯凯翔, 吴铁洲, 等. 基于动态级联自抗扰的交流微网直流母线稳压控制[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(7): 115-124.
WANG Chao, HOU Kaixiang, WU Tiezhou, et al. Dynamic cascade active disturbance rejection-based DC bus stabilizing control for an AC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(7): 115-124.
- [22] 王永帅, 陈增强, 孙明玮, 等. 一阶惯性大时滞系统 Smith 预估自抗扰控制[J]. 智能系统学报, 2018, 13(4): 500-508.
WANG Yongshuai, CHEN Zengqiang, SUN Mingwei, et al. Smith prediction and active disturbance rejection control for first-order inertial systems with long time-delay[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2018, 13(4): 500-508.
- [23] 陶珑, 王萍, 王议锋, 等. 微电网低压接口变换器的参数寻优自抗扰控制[J]. 电工技术学报, 2022, 37(16): 4202-4211.
TAO Long, WANG Ping, WANG Yifeng, et al. Active disturbance rejection control with automatic optimization for low-voltage interface converter in microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(16): 4202-4211.
- [24] 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.
- [25] 卢启昌, 韩文杰, 谭文. 一阶线性自抗扰控制的整定[J]. 信息与控制, 2022, 51(4): 423-432.
LU Xingqi, HAN Wenjie, TAN Wen. Tuning of first-order linear active disturbance rejection control[J]. Information and Control, 2022, 51(4): 423-432.
- [26] WANG Gaolin, LIU Ran, ZHAO Nannan, et al. Enhanced linear ADRC strategy for HF pulse voltage signal injection-based sensorless IPMSM drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 34(1): 514-525.
- [27] 马明, 廖鹏, 蔡雨希, 等. LCL 并网逆变器一阶自抗扰控制及基于粒子群优化的控制参数整定方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(11): 174-182.
MA Ming, LIAO Peng, CAI Yuxi, et al. First-order active disturbance rejection control and parameter tuning method based on particle swarm optimization for LCL grid-connected inverter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(11): 174-182.
- [28] 周讯杰. Boost 电路及双闭环 PI 控制仿真实验分析[J]. 光源与照明, 2022, 45(4): 168-170.
- [29] YU Yuewei, WANG Jingye, SONG Yunpeng, et al. Stability analysis of power bogie system and forward design of its yaw damper damping parameter[J]. Engineering Letters, 2023, 31(4): 1434-1441.

收稿日期: 2024-04-16; 修回日期: 2024-07-23

作者简介:

李辰佳(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电与并网运行控制; E-mail: lcj18006371180@163.com

李琰(1977—), 男, 通信作者, 博士, 教授级高级工程师, 硕士研究生导师, 研究方向为可再生能源并网, 能源互联网协调运行; E-mail: liyan@epri.sgcc.com.cn

范译文(1993—), 女, 博士, 研究方向为新能源发电建模、新能源发电并网运行与主动支撑控制技术、新能源发电稳定性分析等。E-mail: 18810263095@163.com

(编辑 周金梅)