

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230334

基于混合储能的光储直流微网改进型滑模自抗扰控制

皇金锋, 杨振宇, 李帅杰

(陕西理工大学电气工程学院, 陕西 汉中 723001)

摘要: 针对光储直流微网混合储能系统在光伏输出波动、负荷波动等大扰动下导致的母线电压稳定性差和系统响应速度慢等问题, 提出一种兼顾母线电压稳定和响应速度的改进型滑模自抗扰控制策略。首先, 针对一级观测器扰动估计能力有限问题, 引入二级观测器进行观测补偿, 并将级联观测器对总扰动的估计值反馈到控制器进行消除。其次, 针对原有的非线性控制器响应速度慢、鲁棒性差等问题, 设计非奇异快速终端滑模控制进行优化, 利用混合储能单元特性, 分别补偿高低频分量, 来提高系统的响应速度; 并根据巴尔巴辛定理以及李雅普诺夫准则证明了所设计控制器的稳定性。最后, 基于 Matlab 仿真平台与其他控制策略进行仿真对比, 仿真结果验证了所提策略的有效性。

关键词: 光储直流微网; 混合储能; 级联观测器; 滑模自抗扰控制

Improved sliding mode self-disturbance resistance control of an optical storage DC micro-grid based on hybrid energy storage

HUANG Jinfeng, YANG Zhenyu, LI Shuaijie

(School of Electrical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China)

Abstract: To address the problems of poor bus voltage stability and slow system response when there are large disturbances such as PV output and load fluctuations in the optical storage DC micro-grid hybrid energy storage system, an improved sliding mode self-anti-disturbance control strategy that balances bus voltage stability and response speed is proposed. First, to address the problem of limited disturbance estimation capability of the first-stage observer, a second-stage observer is introduced for observation compensation, and the estimated value of the total disturbance from the cascaded observer is fed back to the controller for elimination. Second, to address the problems of slow response speed and poor robustness of the original non-linear controller, a non-singular fast terminal sliding mode control is designed for optimization, and the hybrid energy storage unit characteristics are used to compensate for the high and low frequency components to improve the system response speed. The stability of the designed controller is proved by Balbasin's theorem and Liapunov's criterion. Finally, the simulation is compared with other control strategies based on the Matlab simulation platform, and the simulation results verify the effectiveness of the proposed strategy.

This work is supported by the Natural Science Research Project of Shaanxi Province (No. 2023-JC-YB-442).

Key words: optical storage DC microgrid; hybrid energy storage; cascade observer; sliding mode self-disturbance resistance control

0 引言

在全球能源危机日益严峻的大背景下, 可再生能源的占比逐渐提高。但分布式电源不可控的随机性和波动性, 为大规模使用以及并网带来了巨大的挑战, 微电网的提出实现了分布式电源灵活多样的应用^[1]。以光伏发电为主体的直流微电网, 可以充

分吸收可再生能源, 提高能源效率^[2-4]。由于太阳能资源的随机性, 直流微电网经常遇到电压质量问题。为了解决这一问题, 常加入储能系统来弥补间歇性光伏输出, 但单一的储能单元不能同时满足高功率、高能量密度的特性。因此, 混合储能成为目前研究的热点。

光储系统容易受到负荷、光照等不确定性因素的影响, 降低了母线电压的控制性能^[5-7]。为提高母线电压的稳定性, 研究人员提出了多种非线性控制策

基金项目: 陕西省自然科学基金项目资助(2023-JC-YB-442)

略^[8-11], 如自适应控制、滑模控制、微分平坦控制以及线性自抗扰控制(linear active disturbance rejection control, LADRC)等。文献[12]针对由燃料电池组成的升压系统, 设计微分平坦双闭环控制策略, 提高了系统的可靠性。但微分平坦控制依赖被控系统的精确模型, 缺乏考虑不确定扰动的影响, 从而增加了系统控制的难度。文献[13]针对升压型 DC/DC 变换器, 提出了一种基于 LADRC 的串级控制策略, 解决了升压变换器由于非最小相位特性、输入电压和负载变化而导致的输出电压不稳定问题。文献[14]针对光储系统, 设计了一种前馈自抗扰控制策略, 同时将线性自抗扰引入变频后的电流环中, 以实现不同储能设备间的协调控制, 但当外扰频率较高时, 状态观测器对总扰动的跟踪能力较差。

虽然简化参数后的 LADRC 控制方便实现, 但对系统中的未知干扰、耦合、不确定性等补偿能力下降。为此, 有学者提出改进型线性自抗扰策略, 来增强 LADRC 的控制性能^[15-16]。文献[17]通过在观测器扰动观测通道中引入序列校正的思想, 实现对扰动项的精确跟踪。文献[18]针对光伏并网逆变器母线电压控制存在不确定干扰的问题, 提出级联线性扩张状态观测器^[19](cascade linearly expanded state observer, CLESO)来补偿传统方法下未估计的剩余扰动, 进而提升扰动估计抑制能力。以上文献都是针对观测器进行改进, 提高了观测精度, 但误差反馈控制仍采取 PD 控制, 系统收敛速度仍然较慢。文献[20]针对永磁同步电动机伺服系统提出滑模自抗扰控制策略, 用积分滑模控制器代替传统自抗扰控制中的非线性误差状态反馈环节, 进而提高系统的鲁棒性。但传统滑模控制固有的抖振问题影响了系统控制性能。非奇异快速终端滑模控制(non-singular fast terminal sliding mode control, NFTSMC)因具有比传统滑模控制更快的收敛速度和更强的鲁棒性, 被应用于多类控制系统中, 如四旋翼无人机^[21]、永磁同步电机^[22], 并取得了显著效果。

基于以上文献, 并针对其存在的不足, 本文针对光储直流微网混合储能系统, 设计改进型滑模自抗扰(improved sliding mode auto-disturbance rejection, ISMADRC)双闭环控制策略。通过引入第二级观测器补偿第一级观测器未观测部分, 提高扰动观测精度, 并将估计出的总扰动在控制端进行补偿。设计非奇异快速终端滑模面得到控制率, 加快系统收敛的同时避免非奇异现象。级联观测器与非奇异快速终端滑模控制相结合的方式, 提高观测精度的同时也增强了控制性能。最后通过仿真验证了本文所提

的控制方法相比于 PI 控制和 LADRC 控制具备更快的收敛速度和更强的鲁棒性, 验证了理论方法的有效性。

1 光储直流微网系统

直流微电网结构示意图如图 1 所示。其中分布式电源光伏、风机分别经 Boost 电路、AC/DC 整流电路与直流母线相连; 由蓄电池和超级电容构成的混合储能系统, 分别通过双向 DC/DC 变换器(bi-directional DC-DC converter, BDC)与直流母线相连, 以满足间歇性功率波动的需要; 同时将连接到直流母线的直流负载、恒功率负载等统称为直流负载。

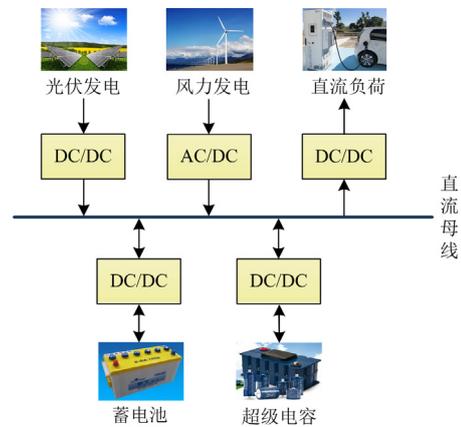


图 1 直流微电网结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of DC microgrid structure

以光伏作为分布式电源的光储直流微网系统简化模型如图 2 所示。

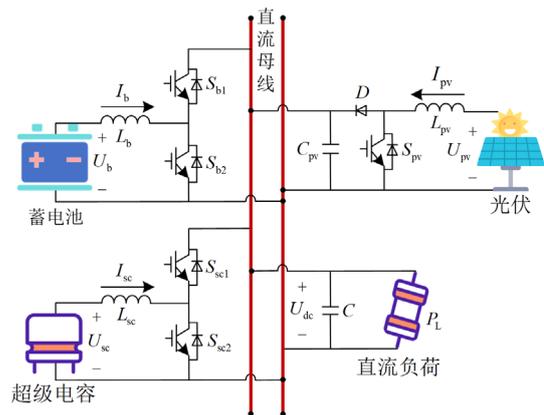


图 2 光储直流微网系统简化模型

Fig. 2 Simplified model of optical storage DC microgrid system

图 2 中: U_b 、 I_b 、 L_b 、 S_{b1} 和 S_{b2} 分别为蓄电池侧的端电压、电感电流、电感以及开关管的占空比; U_{sc} 、 I_{sc} 、 L_{sc} 、 S_{sc1} 和 S_{sc2} 分别为超级电容侧的端电压、电感电流、电感以及开关管的占空比;

U_{pv} 、 I_{pv} 、 L_{pv} 、 C_{pv} 、 D 和 S_{pv} 分别为光伏电源侧的端电压、电感电流、电感、滤波电容、二极管和开关管的占空比； U_{dc} 、 C 分别为母线侧的电压、电容； P_L 为直流负荷。

2 改进型滑模自抗扰控制器设计

本文的电压电流环采用相同的控制策略，故后续设计中均以电压环为例。首先通过 CLESO 观测系统受到的总扰动，并将总扰动输入到控制端进行补偿；以鲁棒性强、收敛速度快的 NFTSMC 作为系统控制器，提升母线电压抗干扰能力以及系统动态响应能力。ISMADRC 控制器简化框图如图 3 所示。

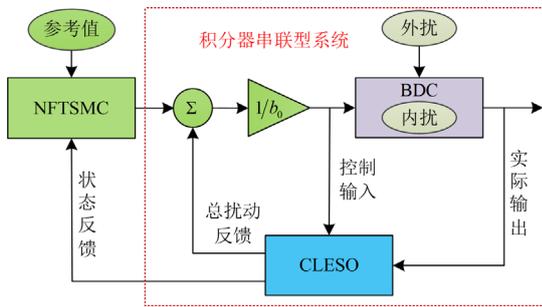


图 3 ISMADRC 控制器简化框图

Fig. 3 Simplified block diagram of ISMADRC controller

图 3 中的参考值、控制输入、实际输出分别为电压环下的母线电压参考值、总参考电流输出值以及母线电压实际值； b_0 为系统待设计的控制增益；外部扰动包括分布式电源功率波动以及负荷扰动等；内部扰动包括系统未建模部分以及系统参数摄动等。

2.1 级联观测器设计

一般的，对于二阶系统如式(1)所示。

$$\dot{y} = -a_1 \dot{y} - a_2 y + \omega + bu \quad (1)$$

式中： u 为系统输入； y 为系统输出； ω 为外部扰动； a_1 、 a_2 为系统参数； b 为系统增益； a_1 、 a_2 和 b 未知；且有 $b_0 \approx b$ 。

设 $f(y, \dot{y}, \omega) = -a_1 \dot{y} - a_2 y + \omega + (b - b_0)u$ 为系统的广义扰动，包含系统内部不确定性和外部扰动。依据扩张状态观测器(expanded state observer, ESO)的设计准则，定义状态变量 $x_1 = y$ ， $x_2 = \dot{y}$ ，并将扰动项 f 扩展为系统新的状态变量 x_3 ，则可得系统的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + b_0 u \\ \dot{x}_3 = f \\ y = x_1 \end{cases} \quad (2)$$

与传统的线性扩张状态观测器(linearly expanded state observer, LESO)类似，LESO1 的输入是被控对象的控制信号 u 和输出信号 y 。基于式(2)设计的 LESO1 为

$$\begin{cases} \dot{e}_z = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 e_z \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_2 e_z + b_0 u \\ \dot{z}_3 = -\beta_3 e_z \end{cases} \quad (3)$$

式中： z_1 、 z_2 和 z_3 分别为 y 、 \dot{y} 和 f 的状态重构值； e_z 为 LESO1 的直流母线电压跟踪误差； β_1 、 β_2 和 β_3 为待设计的 LESO1 增益。

在 LESO2 的构造中，将总扰动的初始重构变量 z_3 作为其已知部分，则式(3)可重构为

$$\begin{cases} \dot{e}_v = v_1 - y \\ \dot{v}_1 = v_2 - \xi_1 e_v \\ \dot{v}_2 = v_3 - \xi_2 e_v + b_0 u + z_3 \\ \dot{v}_3 = -\xi_3 e_v \end{cases} \quad (4)$$

式中： v_1 、 v_2 和 v_3 为 LESO2 的状态重构值； e_v 为 LESO2 的直流母线电压跟踪误差； ξ_1 、 ξ_2 和 ξ_3 为待设计的 LESO2 增益。

重构变量 z_1 、 z_2 和 v_1 、 v_2 在跟踪状态 y 、 \dot{y} 中起着相同的作用。此外， v_3 提供了剩余扰动量 $x_3 - z_3$ 的估计，以补充对 LESO1 的不完全估计。为了简化参数设计，将两个 LESO 的观测器增益设计为

$$\begin{cases} \beta_1 = \xi_1 = 3\omega_0 \\ \beta_2 = \xi_2 = 3\omega_0^2 \\ \beta_3 = \xi_3 = \omega_0^3 \end{cases} \quad (5)$$

式中， ω_0 为观测器带宽^[23]。

2.2 滑模控制器设计

通过观测值 z_3 和 v_3 的实时合成，重构了总扰动 f 的信息。若 u_0 为设计的控制率，则系统的控制量 u 为

$$u = \frac{u_0 - (z_3 + v_3)}{b_0} \quad (6)$$

通过设计，使观测值 v_1 能够在有限时间内快速准确地追踪母线电压期望值 σ 。

定义母线电压跟踪误差 φ_e 为

$$\varphi_e = \sigma - v_1 \quad (7)$$

对式(7)求导数，得

$$\dot{\varphi}_e = \dot{\sigma} - \dot{v}_1 \quad (8)$$

将式(4)代入式(8)并求导数，得

$$\ddot{\varphi}_e = -v_3 - z_3 - b_0 u \quad (9)$$

为提高系统收敛速度和减少滑模抖振，避免奇异性，设计非奇异快速终端滑模面 λ 为

$$\lambda = \varphi_e + \kappa_1 \text{sig}^a(\varphi_e) + \kappa_2 \text{sig}^c(\dot{\varphi}_e) \quad (10)$$

式中： $\kappa_1 \in \mathbb{R}^+$ ； $\kappa_2 \in \mathbb{R}^+$ ； $\text{sig}^a(\dot{\varphi}_e) = |\dot{\varphi}_e|^a \text{sign}(\dot{\varphi}_e)$ ； $\text{sig}^c(\dot{\varphi}_e) = |\dot{\varphi}_e|^c \text{sign}(\dot{\varphi}_e)$ ； $1 < a < 2$ ； $1 < c < 2$ ； $a > c$ 。

对式(10)求导数，可得

$$\dot{\lambda} = \dot{\varphi}_e + \kappa_1 a |\varphi_e|^{a-1} \dot{\varphi}_e + \kappa_2 c |\dot{\varphi}_e|^{c-1} \ddot{\varphi}_e \quad (11)$$

依据所选滑模面，控制器 u 设计为

$$u = u_{\text{eq}} + u_{\text{re}} \quad (12)$$

式中： u_{eq} 为等效控制器； u_{re} 为鲁棒控制器。

将式(9)代入式(11)得到等效控制器 u_{eq} 为

$$u_{\text{eq}} = \frac{\dot{\varphi}_e + \kappa_1 a |\varphi_e|^{a-1} \dot{\varphi}_e + \kappa_2 c |\dot{\varphi}_e|^{c-1} (-v_3 - z_3)}{b_0 \kappa_2 c |\dot{\varphi}_e|^{c-1}} \quad (13)$$

鲁棒控制器 u_{re} 设计为

$$u_{\text{re}} = b_0^{-1} [\kappa_3 \lambda + \kappa_4 \text{sig}^\rho(\lambda)] \quad (14)$$

式中： $\text{sig}^\rho(\lambda) = |\lambda|^\rho \text{sign}(\lambda)$ ； $\kappa_3 > 0$ ； $\kappa_4 > 0$ ； $0 < \rho < 1$ 。

故完整的 NFTSMC 控制器 u 为

$$u = u_{\text{eq}} + u_{\text{re}} = b_0^{-1} [\kappa_3 \lambda + \kappa_4 |\lambda|^\rho \text{sign}(\lambda) - z_3 - v_3 + (c\kappa_2)^{-1} (1 + a\kappa_1 |\varphi_e|^{a-1}) |\dot{\varphi}_e|^{2-c} \text{sign}(\dot{\varphi}_e)] \quad (15)$$

综上可得电压环 ISMADRC 控制系统结构框图如图 4 所示。

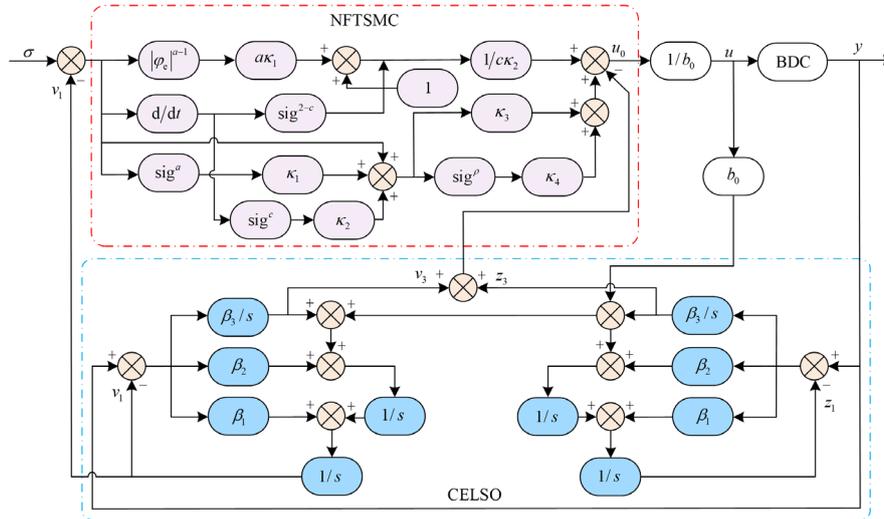


图 4 电压环 ISMADRC 控制框图

Fig. 4 Block diagram of voltage ring ISMADRC control

2.3 电流分频设计

因蓄电池和超级电容是并联接线，当不考虑线路阻抗时，功率分配可等效为电流分配。其电流分配为

$$I_{\text{ref}} = I_b + I_{\text{sc}} \quad (16)$$

式中， I_{ref} 为总输出电流参考值。

根据超级电容快速性的特点，通过总输出电流 I_{ref} 减去超级电容实际电流 I_{sc} ，可得到蓄电池参考电流 I_{bref} 为

$$I_{\text{bref}} = I_{\text{ref}} - I_{\text{sc}} \quad (17)$$

将未补偿的蓄电池电流添加到超级电容电流参考值中，从而得到超级电容参考电流 I_{scref} 为

$$I_{\text{scref}} = I_{\text{ref}} (1 - T_{\text{LPF}}) + k(I_{\text{bref}} - I_b) \quad (18)$$

式中： T_{LPF} 为低通滤波值；增益 $k = U_b / U_{\text{sc}}$ ，用于

限制蓄电池电流误差。

综上分析可知，电流环参考电流分频结构框图如图 5 所示。

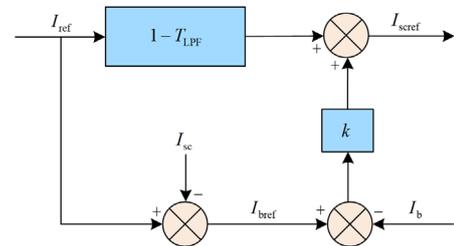


图 5 电流环参考电流分频框图

Fig. 5 Block diagram of current ring reference current frequency

3 系统控制器稳定性分析

电压环和电流环的稳定性证明类似，为了节约

篇幅, 下面仅以电压环为例进行稳定性证明。

3.1 级联 LESO 稳定性分析

证明: 定义各状态变量的观测误差分别为

$$\theta_1 = v_1 - x_1, \theta_2 = v_2 - x_2, \theta_3 = v_3 + z_3 - x_3。$$

对观测误差 θ_1 、 θ_2 和 θ_3 分别求导数可得

$$\begin{cases} \dot{\theta}_1 = \theta_2 - \xi_1 \theta_1 \\ \dot{\theta}_2 = \theta_3 - \xi_2 \theta_1 \\ \dot{\theta}_3 = -2\xi_3 \theta_1 - \dot{f} \end{cases} \quad (19)$$

令 $\varpi_1 = \theta_1$ 、 $\varpi_2 = \theta_2 - \xi_1 \theta_1$ 、 $\varpi_3 = \theta_3 - \xi_1 \theta_2 + (\xi_1^2 - \xi_2) \theta_1$, 并代入式(19)可得

$$\begin{cases} \dot{\varpi}_1 = \varpi_2 \\ \dot{\varpi}_2 = \varpi_3 \\ \dot{\varpi}_3 = -\xi_1 \varpi_3 - \xi_2 \varpi_2 - 2\xi_3 \varpi_1 - \dot{f} \end{cases} \quad (20)$$

由巴尔巴辛公式^[24]得到误差系统的 Lyapunov 函数 V , 如式(21)所示。

$$V = \xi_1 \xi_3 (\varpi_1^2 + \frac{2}{\xi_1} \varpi_1 \varpi_2 + \frac{\xi_2}{2\xi_1 \xi_3} \varpi_2^2) + \frac{1}{2} (\xi_1 \varpi_2 + \varpi_3)^2 \quad (21)$$

当满足 $\xi_1 \xi_2 > 2\xi_3$ 时, 将式(21)化简可得

$$V > \xi_1 \xi_3 (\varpi_1^2 + \frac{\varpi_2^2}{\xi_1}) + \frac{1}{2} (\xi_1 \varpi_2 + \varpi_3)^2 \geq 0 \quad (22)$$

对式(21)求导数, 并将式(20)代入得

$$\dot{V} = (2\xi_3 - \xi_1 \xi_2) \varpi_2^2 - (\xi_1 \varpi_2 + \varpi_3) \dot{f} \quad (23)$$

当满足 $\xi_1 \xi_2 > 2\xi_3$ 时, V 正定; 当 $\dot{f} = 0$ 时,

$\dot{V} < 0$ 。因此级联 LESO 的误差系统在平衡点 ($\theta_1 = 0$; $\theta_2 = 0$; $\theta_3 = 0$) 大范围渐进稳定。

3.2 NFTSMC 稳定性分析

引理 1 给定一个连续可微且正定的函数 $V(x)$:

$\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, 若对于所有的非零状态 x , 满足:

$$\dot{V}(x) \leq -\mathcal{G}_1 V(x) - \mathcal{G}_2 V^\delta(x) \quad (24)$$

则系统的状态可以在有限时间^[25]内收敛到平衡点, 且收敛时间 T_r 满足式(25)。

$$T_r \leq \frac{1}{\mathcal{G}_1(1-\delta)} \ln \frac{\mathcal{G}_1 V_{(0)}^{1-\delta} + \mathcal{G}_2}{\mathcal{G}_2} \quad (25)$$

式中, $V_{(0)}$ 为李雅普诺夫函数 $V(x)$ 的初始值。

证明: 选取 Lyapunov 函数 V_e 为

$$V_e = \frac{1}{2} \lambda^2 \quad (26)$$

对式(26)求导数, 可得

$$\dot{V}_e = \lambda [\dot{\varphi}_e + \kappa_1 a |\varphi_e|^{a-1} \dot{\varphi}_e + \kappa_2 c |\dot{\varphi}_e|^{c-1} (-v_3 - z_3 - b_0 u)] \quad (27)$$

将式(15)代入式(27)化简, 可得

$$\dot{V}_e = -\lambda^2 \kappa_2 \kappa_3 c |\dot{\varphi}_e|^{c-1} - \lambda \kappa_2 \kappa_4 c |\dot{\varphi}_e|^{c-1} \text{sig}^\rho(\lambda) \quad (28)$$

由引理 1 可知, 总存在两个常数 l_1 、 l_2 , 使

$$\dot{V}_e \leq -2l_1 V_e - 2^{(\rho+1)/2} l_2 V_e^{(\rho+1)/2} \quad (29)$$

式中: $l_1 \leq \kappa_2 \kappa_3 c |\dot{\varphi}_e|^{c-1}$; $l_2 \leq \kappa_2 \kappa_4 c |\dot{\varphi}_e|^{c-1}$ 。

跟踪误差 φ_e 将在有限时间内沿滑模面(10)收敛到平衡点, 有限时间 T_r 为

$$T_r \leq [2l_1(1-(\rho+1)/2)]^{-1} \ln \frac{2l_1 V_{(0)}^{(1-\rho)/2} + 2^{(\rho+1)/2} l_2}{2^{(\rho+1)/2} l_2} = [l_1(1-\rho)]^{-1} \ln \frac{l_1 V_{(0)}^{(1-\rho)/2} + 2^{(\rho-1)/2} l_2}{2^{(\rho-1)/2} l_2} \quad (30)$$

综上所述, 电压环在控制率 u 的作用下能在有限时间内收敛到给定参考位置, 系统稳定。

4 仿真实验

本节基于 Matlab/Simulink 平台搭建光储直流微网混合储能仿真模型, 验证本文所提控制方法的可行性。为了更好地验证本文设计控制器的响应速度及抗扰动能力, 在电气模型参数保持不变的情况下, 将其与 PI 控制及 LADRC 控制进行对比。系统初始条件设定为: 环境温度 25 °C, 光照强度 1000 W/m², 光伏单元采用 MPPT 控制。系统模型参数如表 1 所示, 控制器参数如表 2 所示。

表 1 系统模型参数

Table 1 System model parameters	
模型参数	数值
直流母线参考电压 U_{dc}/V	700
直流母线电容 C/F	0.005
蓄电池初始端电压 U_b/V	240
超级电容初始端电压 U_{sc}/V	240
蓄电池侧电感 L_b/H	0.01
超级电容侧电感 L_{sc}/H	0.1
开关频率 f/kHz	10

表 2 控制器参数

Table 2 Controller parameters		
控制器	电压环	电流环
PI	$K_{pv} = 0.5$	$K_{pi} = 100$
	$K_{iv} = 15$	$K_{ii} = 0.5$
LADRC	$\omega_0 = 314.15, b_0 = 240$	$\omega_0 = 3141.59, b_0 = 240$
	$k_p = 62.8, k_d = 3943.8$	$k_p = 62.8, k_d = 3943.8$
ISMADRC	$\kappa_1 = 30, \kappa_2 = 2.05, \kappa_3 = 40$	$\kappa_1 = 30, \kappa_2 = 2.05, \kappa_3 = 40$
	$\kappa_4 = 5, a = 1.5, c = 1.15$	$\kappa_4 = 5, a = 1.5, c = 1.15$
	$\rho = 0.6, b_0 = 240,$	$\rho = 0.6, b_0 = 240,$
	$\omega_0 = 314.15$	$\omega_0 = 3141.59$
低通滤波	$T_{LPF} = 0.005$	

4.1 负荷功率扰动仿真对比

保持光照强度 1000 W/m^2 不变, 光伏输出功率恒为 3 kW 时, 负荷功率的变化如图 6 所示。

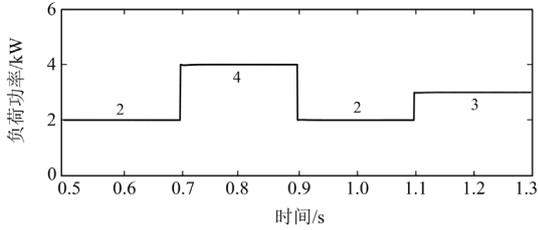


图 6 负荷功率波动

Fig. 6 Load power fluctuations

分析图 6 可知, 在 0.7 s 时负荷功率由 2 kW 突增为 4 kW , 此时光伏输出功率小于负荷功率, 母线电压跌落, 混合储能系统补偿差额功率, 维持母线电压恒定; 在 0.9 s 时, 负荷功率降为 2 kW , 此时光伏输出大于负荷需求, 母线电压上升, 为维持母线电压恒定, 混合储能单元吸收多余功率; 在 1.1 s 时, 负荷功率上升为 3 kW , 母线电压短暂波动后经储能单元补偿达到稳定。对于负荷功率扰动, 在控制器参数不变的情况下, 将 3 种控制策略进行如下仿真对比分析。

4.1.1 母线电压仿真对比

负荷功率扰动时不同控制策略下母线电压起始波形对比如图 7 所示。

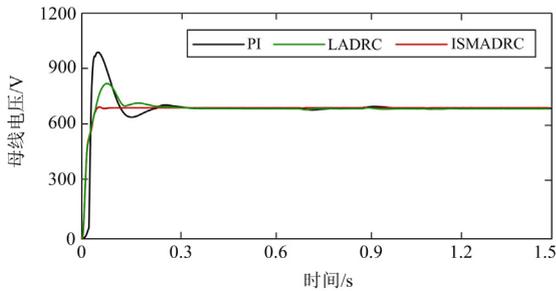
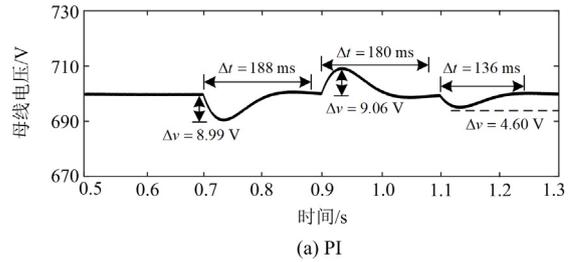


图 7 负荷功率扰动时母线电压起始波形

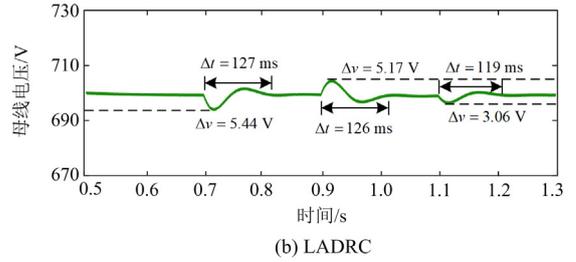
Fig. 7 Bus voltage starting waveform during load power perturbation

分析图 7 可知, PI、LADRC 和 ISMADRC 策略下的最大电压峰值分别为 1001 V 、 837 V 和 702 V ; 电压超调分别为 301 V 、 137 V 和 2 V ; 调节时间分别为 0.36 s 、 0.46 s 、 0.09 s 。对比以上仿真结果可知, 本文所提 ISMADRC 策略在负荷功率扰动时, 超调量更小, 暂态响应速度更快。

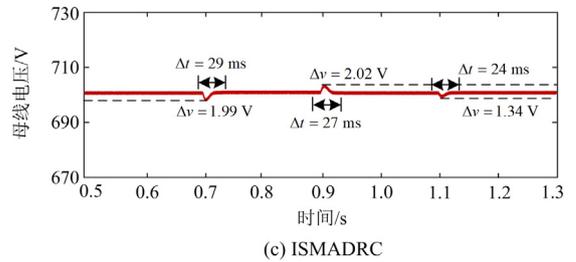
负荷扰动时不同控制策略下母线电压波形对比如图 8 所示。



(a) PI



(b) LADRC



(c) ISMADRC

图 8 负荷功率扰动时母线电压波形对比

Fig. 8 Comparison of bus voltage waveform during load power disturbance

以 0.7 s 负荷突增为例, 此时系统负荷功率由 2 kW 突增为 4 kW , 分析图 8(a)—图 8(c)可知, 光伏输出小于负荷需求, 母线电压跌落, 储能单元补偿差额功率, 稳定母线电压。在 PI 控制策略下, 母线电压跌落为 8.99 V , 经 188 ms 后达到稳定; 在 LADRC 策略下, 母线电压跌落为 5.44 V , 经 127 ms 后达到稳定; 在 ISMADRC 策略下, 母线电压跌落为 1.99 V , 经 29 ms 后达到稳定。对比以上仿真结果可知, 本文所提控制策略在负荷功率扰动时母线电压波动更小, 暂态恢复速度更快。

4.1.2 蓄电池 SOC 仿真对比

负荷功率扰动时不同控制策略下蓄电池 SOC 容量变化对比如图 9 所示。

分析图 9 可知, 当系统受到负荷功率扰动而使母线电压发生波动时, 混合储能系统承担补偿差额功率的作用。根据蓄电池循环次数有限的特性, 为减少蓄电池充放电次数、保护电池寿命, 蓄电池的容量变化应越小越好。对比以上仿真结果可知, 基于 ISMADRC 策略下的蓄电池 SOC 容量变化最小, 优于其他两种控制策略。

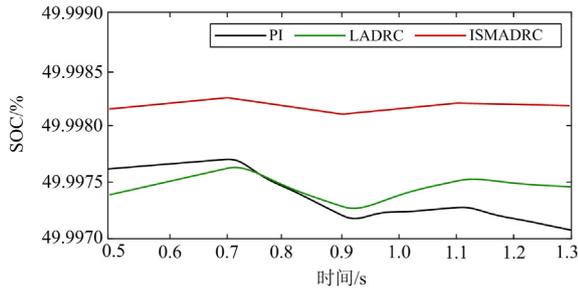


图 9 负荷功率扰动时蓄电池 SOC 容量变化对比
Fig. 9 Comparison of battery SOC capacity change during load power disturbance

4.2 光伏功率扰动仿真对比

保持负荷以恒定功率 2 kW 运行, 当光照强度发生改变时, 光伏电源输出功率变化情况如图 10 所示。

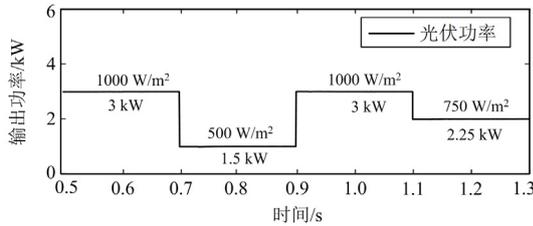


图 10 光伏电源输出功率

Fig. 10 Photovoltaic power supply output power

分析图 10 可知, 在 0.7 s 时光照强度突变为 500 W/m^2 , 此时光伏输出功率小于负荷需求, 母线电压下降, 此时混合储能单元补偿差额功率; 在 0.9 s 时光照强度由 500 W/m^2 增加为 1000 W/m^2 , 光伏输出功率大于负荷需求, 母线电压瞬间升高, 混合储能单元吸收多余功率, 维持母线电压恒定; 在 1.1 s 时光照强度降为 750 W/m^2 , 母线电压短暂波动并经储能单元补偿后恢复平衡。对于光伏功率扰动, 在控制器参数不变的情况下, 将 3 种控制策略进行如下对比分析。

4.2.1 母线电压仿真对比

光伏功率扰动时不同控制策略下母线电压起始波形对比如图 11 所示。

分析图 11 可知, PI、LADRC 和 ISMADRC 策略下的最大峰值电压分别为 989 V、834 V 和 701 V; 电压超调分别为 289 V、134 V 和 1 V; 调节时间分别为 0.34 s、0.45 s、0.09 s。对比以上仿真结果可知, 本文所提 ISMADRC 策略在负荷功率扰动时, 超调量更小, 暂态响应速度更快。

光伏功率扰动时不同控制策略下母线电压抗扰动波形如图 12 所示。

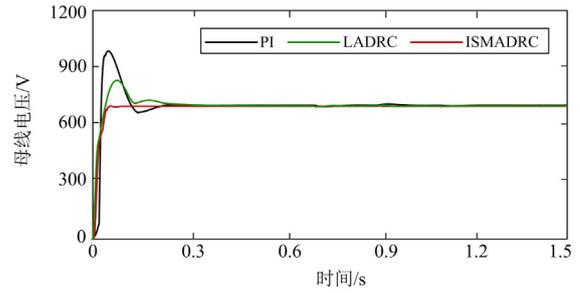
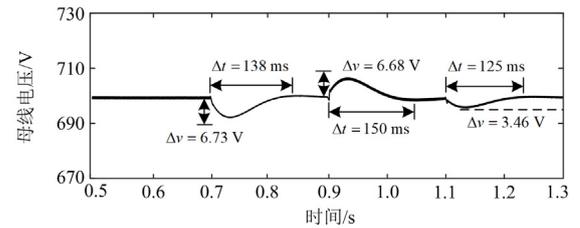
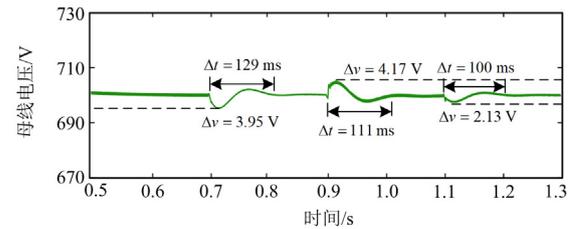


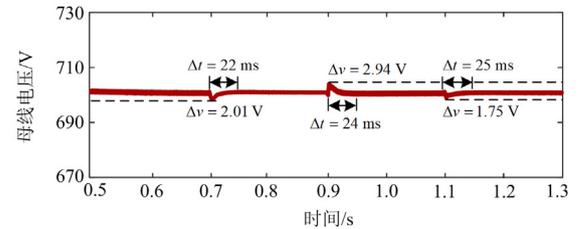
图 11 光伏功率扰动时母线电压起始波形
Fig. 11 Bus voltage starting waveform during photovoltaic power disturbance



(a) PI



(b) LADRC



(c) ISMADRC

图 12 光伏功率扰动时母线电压波形对比

Fig. 12 Comparison of bus voltage waveform during photovoltaic power disturbance

以 0.7 s 时为例, 此时光照强度由 1000 W/m^2 突降为 500 W/m^2 , 分析图 12 可知, 光伏输出小于负荷需求, 母线电压出现跌落, 储能单元补偿差额功率, 稳定母线电压。在 PI 控制下, 母线电压跌落为 6.73 V, 经 138 ms 后达到稳定; 在 LADRC 控制下, 母线电压跌落为 3.95 V, 经 129 ms 后达到稳定; 在 ISMADRC 策略下, 母线电压跌落为 2.01 V, 经 22 ms 后达到稳定。通过以上参数对比分析, 本文所提控制策略在光伏功率扰动时母线电压波动更

小, 暂态恢复速度更快。

4.2.2 蓄电池 SOC 仿真对比

光伏功率扰动时不同控制策略下蓄电池 SOC 容量变化对比波形如图 13 所示。

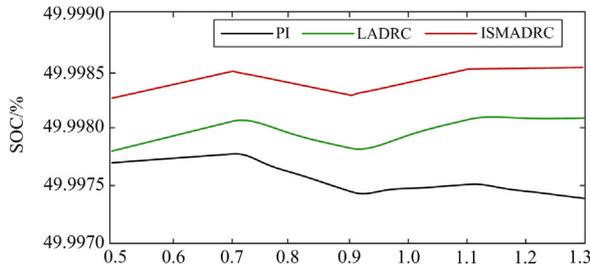


图 13 光伏功率扰动时蓄电池 SOC 容量变化对比

Fig. 13 Comparison of battery SOC capacity change during photovoltaic power disturbance

分析图 13 可知, 当系统受到光伏功率扰动使母线电压发生波动时, 混合储能系统承担补偿差额功率的作用。根据蓄电池循环次数有限的特点, 为减小蓄电池充放电次数、保护电池寿命, 蓄电池的容量变化应越小越好。仿真结果可知, 在 ISMADRC 策略下的蓄电池 SOC 容量变化最小, 优于其他两种控制策略。

5 结论

针对光伏功率波动以及负荷扰动引起光储直流微网混合储能系统母线电压稳定性差、系统响应速度慢等问题, 提出一种改进型滑模自抗扰控制策略。通过理论分析及仿真验证, 得到如下结论:

1) 针对传统 LADRC 中观测器精度低及控制器补偿能力有限问题, 提出改进型滑模自抗扰控制, 通过设计级联观测器以及非奇异快速终端滑模控制器, 增强系统扰动观测性能以及补偿能力。

2) 根据混合储能单元特性, 设计电流环功率分频控制。以超级电容快速性为原则, 得到蓄电池以及超级电容各自补偿电流参考值, 减少了蓄电池的充放电次数, 保护了电池寿命。

参考文献

[1] 李霞林, 郭力, 王成山, 等. 直流微电网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 2-17.
LI Xialin, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Key technologies of DC microgrids: an overview[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 2-17.

[2] 张宇涵, 杜贵平, 雷雁雄, 等. 直流微网混合储能系统控制策略现状及展望[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 177-187.
ZHANG Yuhan, DU Guiping, LEI Yanxiong, et al. Current

status and prospects of control strategy for a DC micro grid hybrid energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 177-187.

- [3] WANG L, LIU X, NI X, et al. A stability control way of bus voltage in DC microgrid with constant power load[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2021, 16(9): 1187-1194.
- [4] 刘自发, 刘炎. 基于虚拟直流机的直流微电网电压稳定控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 62-71.
LIU Zifa, LIU Yan. Voltage stability control strategy of a DC microgrid based on a virtual DC machine[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 62-71.
- [5] 陈景文, 周媛, 李晓飞, 等. 光储直流微网混合储能控制策略研究[J]. 智慧电力, 2022, 50(1): 14-20, 87.
CHEN Jingwen, ZHOU Yuan, LI Xiaofei, et al. Hybrid energy storage control strategy of optical storage DC microgrid[J]. Smart Power, 2022, 50(1): 14-20, 87.
- [6] 张继红, 赵锐, 高雷, 等. 直流微网母线电压稳定控制策略[J]. 电网技术, 2021, 45(12): 4922-4929.
ZHANG Jihong, ZHAO Rui, GAO Lei, et al. DC bus voltage stability control strategy for DC microgrid[J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4922-4929.
- [7] 杨继鑫, 王久和, 王勉, 等. 基于无源控制的光储直流微网虚拟惯性控制策略研究[J]. 发电技术, 2021, 42(5): 576-584.
YANG Jixin, WANG Jiuhe, WANG Mian, et al. Research on virtual inertial control strategy of DC microgrid with photovoltaic and storage system based on passivity-based control[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(5): 576-584.
- [8] WANG Y, TAO L, WANG P, et al. Improved linear ADRC for hybrid energy storage microgrid output-side converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(9): 9111-9120.
- [9] 杨旭红, 陈阳, 贾巍, 等. 基于 RBF 神经网络的电压外环滑模控制的 Vienna 整流器[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(18): 103-115.
YANG Xuhong, CHEN Yang, JIA Wei, et al. Vienna rectifier with voltage outer loop sliding mode control based on an RBF neural network[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(18): 103-115.
- [10] 张世欣, 皇金锋, 杨艺. 基于平坦理论的直流微电网双向 DC-DC 变换器改进滑模自抗扰控制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 107-116.
ZHANG Shixin, HUANG Jinfeng, YANG Yi. Improved sliding mode and active disturbance rejection control based on flatness theory for a bi-directional DC-DC converter in a DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 107-116.
- [11] 周雪松, 郭帅朝, 马幼捷, 等. 基于改进自抗扰的交流系统直流母线电压波动抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 68-78.

- ZHOU Xuesong, GUO Shuaichao, MA Youjie, et al. DC bus voltage fluctuation suppression strategy of a converter system based on improved active disturbance rejection[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(3): 68-78.
- [12] FERAHYIA S, DJERIOUI A, ZEGHLACHE S, et al. A hybrid power system based on fuel cell, photovoltaic source and supercapacitor[J]. *SN Applied Sciences*, 2020, 2(5): 1-11.
- [13] YUAN H, KIM Y. Compensated active disturbance rejection control for voltage regulation of a DC-DC boost converter[J]. *IET Power Electronics*, 2020, 14(2): 432-441.
- [14] 刘志坚, 李晓磊, 梁宁, 等. 基于前馈自抗扰的光伏微电网混合储能控制策略[J]. *电力建设*, 2021, 42(9): 96-104. LIU Zhijian, LI Xiaolei, LIANG Ning, et al. Control strategy of hybrid energy storage for photovoltaic microgrid applying feedforward active disturbance rejection[J]. *Electric Power Construction*, 2021, 42(9): 96-104.
- [15] 杨丰萍, 程权, 周铭枢, 等. 基于改进自抗扰控制的微电网混合储能控制策略[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(5): 1898-1905. YANG Fengping, CHENG Quan, ZHOU Mingzhi, et al. Microgrid hybrid energy storage control strategy based on improved active disturbance rejection control[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(5): 1898-1905.
- [16] 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.
- [17] WANG Y, TAO L, WANG P, et al. Improved linear ADRC for hybrid energy storage microgrid output-side converter[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(9): 9111-9120.
- [18] 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 Xuesong, LIU Qian, MA Youjie, et al. DC-link voltage control of photovoltaic grid-connected inverter bases on improved active disturbance rejection[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2022, 43(10): 65-72.
- [19] 朱良红, 张国强, 李宇欣, 等. 基于级联扩张观测器的永磁电机无传感器自抗扰控制策略[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(18): 4614-4624. ZHU Lianghong, ZHANG Guoqiang, LI Yuxin, et al. Active disturbance rejection control for position sensorless permanent magnet synchronous motor drives based on cascade extended state observer[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(18): 4614-4624.
- [20] 赵希梅, 陈广国, 金鸿雁. 基于改进灰狼优化算法的PMSM滑模自抗扰控制[J]. *电机与控制学报*, 2022, 26(11): 132-140. ZHAO Ximei, CHEN Guangguo, JIN Hongyan. Sliding mode active disturbance rejection control for PMSM based on improved grey wolf optimization algorithm[J]. *Electric Machines and Control*, 2022, 26(11): 132-140.
- [21] 赵振华, 肖亮, 姜斌, 等. 基于扩张状态观测器的四旋翼无人机快速非奇异终端滑模轨迹跟踪控制[J]. *控制与决策*, 2022, 37(9): 2201-2210. ZHAO Zhenhua, XIAO Liang, JIANG Bin, et al. Fast nonsingular terminal sliding mode trajectory tracking control of a quadrotor UAV based on extended state observers[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(9): 2201-2210.
- [22] 康尔良, 贺建智, 王一琛. 永磁同步电机非奇异终端滑模控制器的设计[J]. *电机与控制学报*, 2021, 25(12): 58-64. KANG Erliang, HE Jianzhi, WANG Yichen. Design of non-singular fast terminal sliding mode controller for permanent magnet synchronous motors[J]. *Electric Machines and Control*, 2021, 25(12): 58-64.
- [23] GAO Z. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning[C] // *Proceedings of the 2003 American Control Conference*, June 4-6, 2003, Denver, CO, USA: 4989-4996.
- [24] 孙佃升, 章跃进. 线性扩张状态观测器的改进及观测精度分析[J]. *国防科技大学学报*, 2017, 39(6): 111-117. SUN Diansheng, ZHANG Yuejin. Improvement and observation accuracy analysis of linear extended state observer[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2017, 39(6): 111-117.
- [25] 孙国法, 赵尔全, 张国巨, 等. 基于扰动观测器补偿的机械臂非奇异快速终端滑模控制[J]. *控制理论与应用*, 2022, 39(8): 1506-1515. SUN Guofa, ZHAO Erquan, ZHANG Guoju, et al. Non-singular fast terminal sliding mode control of manipulator based on disturbance observe compensation[J]. *Control Theory & Applications*, 2022, 39(8): 1506-1515.

收稿日期: 2023-03-30; 修回日期: 2023-06-15

作者简介:

皇金锋(1978—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为直流微电网稳定性及控制技术; E-mail: jfhuang2000@163.com

杨振宇(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为直流微电网稳定性及控制技术; E-mail: 978067471@qq.com

李帅杰(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电及电力电子变换器控制技术. E-mail: li580013@163.com

(编辑 魏小丽)