DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.4.59 **中图分类号**：TM721.1 **文献标志码**：A

基于 NDO 的直流微网双向变换器变增益趋近反步滑模控制

陈景文[1]，王 媛[1](中国电源学会学生会员)，王福强[2]，王同新[2]
(1.陕西科技大学电气与控制工程学院，西安 710021；2.立讯精密科技(西安)有限公司，西安 710021)

摘要：针对直流微网带恒功率负载时出现的母线电压不稳问题，提出 1 种基于非线性扰动观测器 NDO (nonlinear disturbance observer)的变增益趋近反步滑模控制策略。首先，利用精确反馈线性化方法得到系统双向 DC-DC 变换器的 Brunovsky 标准线性模型。其次，为增强系统的鲁棒性、减小系统调节时间，设计反步滑模控制器，将误差变量进行线性组合构成滑模面，并构造幂指数型变增益的滑模趋近律，实现对参考电压的快速精准跟踪；在此基础上，引入 NDO 对系统扰动进行实时估计，将估计结果补偿到反步滑模控制器中，进一步减小系统的稳态电压偏差。最后，通过 MATLAB 及 RT-LAB 半实物平台证明所提控制策略能够改善系统的稳态性能，且对系统扰动及参数摄动均具有较好的鲁棒性。

关键词：直流微电网；恒功率负载；反步滑模控制；变增益趋近；非线性扰动观测器

Variable-gain Approach Backstepping Sliding-mode Control of DC Microgrid Bidirectional Converter Based on NDO

CHEN Jingwen[1], WANG Yuan[1], *Student Member*, *CPSS*, WANG Fuqiang[2], WANG Tongxin[2]
(1. School of Electrical and Control Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China;
2. Luxshare Precision Technology (Xi'an) Co., Ltd., Xi'an 710021, China)

Abstract: Aimed at the issue of bus voltage instability caused by constant-power load in a DC microgrid, a variable-gain approach backstepping sliding-mode control strategy based on a nonlinear disturbance observer (NDO) is proposed. First, the exact feedback linearization method is used to obtain the standard Brunovsky linear model of a bidirectional DC-DC converter. Second, a backstepping sliding-mode controller is designed to enhance the robustness of the system while reducing its adjustment time. The error variables are linearly combined to form a sliding-mode surface, and the sliding-mode approach law of power-exponential variable-gain is constructed to achieve fast and accurate tracking of the reference voltage. On this basis, the NDO is introduced to estimate the system perturbation in realtime, and the estimation results are compensated to the backstepping sliding-mode controller to further reduce the steady-state voltage deviation of the system. Finally, MATLAB simulations and an RT-LAB HIL platform demonstrate that the proposed control strategy can enhance the steady-state performance of the system and is highly robust with respect to system and parameter perturbations.

Keywords: DC microgrid; constant-power load; backstepping sliding-mode control; variable-gain approach; nonlinear disturbance observer (NDO)

微电网中存在大量级联变换器，后级变换器在闭环控制下视为恒功率负载，恒功率负载的输入端负阻抗会对直流微电网系统的稳定性产生负面影响，系统会呈现出非最小相位特性，对系统的稳定性控制带来挑战[1-5]。系统在受到干扰、负载突变及输入电压变化时需设计合适的控制器来保证稳定性，消除恒功率负载对稳定性产生的负面影响[6-7]。

收稿日期：2024-01-28；**修回日期**：2024-03-04；**录用日期**：2024-03-27；**网络首发日期**：2024-04-26
基金项目：陕西省重点研发计划资助项目(2023-YBGY-304)
This work is supported by Shaanxi Key Research and Development Program under the grant 2023-YBGY-304

目前，为解决恒功率负载负阻抗特性引起系统不稳的问题，多数研究分别从线性控制与非线性控制 2 方面入手[8]。线性控制方法主要是通过有源阻尼和无源阻尼的方式。文献[9]通过在母线电容上串联电阻改善系统阻抗特性，以此提高系统稳定性，同时分析了滤波参数变化对稳定性的影响；文献[10]提出 1 种基于非线性扰动观测器 NDO (nonlinear disturbance observer)的虚拟负电感稳定控制策略，以此抵消负电阻特性的不利影响；文献[11]提出 1 种线路等效电感检测方法，实现对不同线路等效电感的自适应有源阻尼控制。上述控制方法均是基于系统的小信号模型，在实际应用中能保证系统在有限程度上及运行工作点附近的稳定性，而当系统参数受不确定因素影响及外界干扰较大时，系统的鲁棒性较差[12]。对此，许多学者针对非线性控制展开深入研究。文献[13]提出了 1 种分数阶滑模稳定控制策略，提升了系统的响应速度，但鲁棒性较弱；文献[14]将自适应滑模控制应用于降压变换器中，提升了系统的鲁棒性，减小系统响应的上升时间；文献[15-16]提出自适应反步控制，提高了系统的稳定性和鲁棒性，但响应的快速性有所降低；文献[17-18]提出兼顾母线电压稳定和响应速度的改进型滑模控制策略，增强了系统的鲁棒性，提升了系统的抗干扰能力；文献[19-21]将反步法和滑模控制互相结合，使系统鲁棒性进一步增强。上述文献所研究系统中的负载都不是完全的恒功率负载，而是带有一定的电阻性，即并未对系统不稳定最严重的情况进行研究，且在控制策略的设计中大多研究系统鲁棒性能的提升，较少考虑系统对扰动的观测和补偿，使得系统存在较明显的稳态电压偏差，且其响应的快速性仍有待提高。因此，研究进一步提升系统鲁棒性和响应快速性并减小稳态电压偏差的控制策略非常必要。

基于此，为保证带恒功率负载的系统在应对大干扰及不确定性上均能呈现较好的稳定性及鲁棒性，将反步控制 BMC (backstepping mode control)与滑模控制 SMC(sliding-mode control)相结合构成反步滑模控制 BSMC(backstepping sliding-mode control)，设计幂指数型的可变增益趋近律，更好地提升系统的鲁棒性和响应的快速性；同时，为减弱不确定性对系统性能的影响，在 2 个控制器组合使用的基础上又引入非线性扰动观测器，对系统中的不确定性和干扰进行估计和补偿，以此减小对母线电压的稳态偏差。将所设计控制器运用到双向 DC-DC 变换器上，通过仿真及实验对控制方法的有效性进行验证。

1 系统结构

直流微电网系统结构如图 1 所示，其主要构成可简化等效为源、变换器、负载 3 大部分，其中源包括可再生能源 RES (renewable energy systems)和储能系统 ESS (energy storage system)；负载为闭环控制下带电阻的 DC-DC 变换器，由于闭环控制功率恒定，可等效为恒功率负载 CPL (constant-power load)；源和负载之间通过变换器连接。为简化系统便于后续分析，将复杂的直流微电网模型等效为图 1 所示的简化形式。

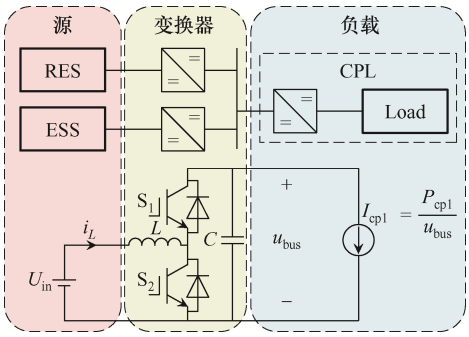


图 1 直流微电网结构及其等效电路

Fig. 1 Structure of DC microgrid and its equivalent circuit

根据直流微电网简化模型得系统状态方程为

$$\begin{cases} L\dfrac{\mathrm{d}i_L}{\mathrm{d}t}=U_{\mathrm{in}}-(1-u)u_{\mathrm{bus}} \\ C\dfrac{\mathrm{d}u_{\mathrm{bus}}}{\mathrm{d}t}=(1-u)i_L-\dfrac{P_{\mathrm{cpl}}}{u_{\mathrm{bus}}} \end{cases} \tag{1}$$

式中：i_L 为变换器电感电流；u_{bus} 为母线电压；U_{in} 为输入侧电压；P_{cpl} 为恒功率负载功率；u 为变换器占空比。

2　精确反馈线性化模型

由直流微电网简化模型所得的状态方程是 1 个二阶非线性系统，而反步滑模控制器的设计对象应该是 1 个标准线性化的系统，因此需要通过精确反馈线性化得到系统的线性化方程。在线性化过程中，若选择母线电压作为输出，则系统是部分线性的；若选择能量作为输出，则系统变为 1 个完全线性的系统。

基于此构造状态变量为

$$e_1=\frac{1}{2}Li_L^2+\frac{1}{2}Cu_{\text{bus}}^2 \tag{2}$$

对式(2)求导并代入式(1)得

$$\dot{e}=U_{\text{in}}i_L-P_{\text{cpl}} \tag{3}$$

令

$$e_2=U_{\text{in}}i_L \tag{4}$$

对式(4)求导得

$$\dot{e}_2=\frac{U_{\text{in}}^2}{L}-\frac{U_{\text{in}}u_{\text{bus}}}{L}(1-u) \tag{5}$$

定义新的状态变量为 $\boldsymbol{e}=[e_1 \quad e_2]^{\text{T}}=\left[\frac{1}{2}Li_L^2+\frac{1}{2}Cu_{\text{bus}}^2 \quad U_{\text{in}}i_L\right]^{\text{T}}$，新的控制变量为 $d=\frac{U_{\text{in}}^2}{L}-\frac{U_{\text{in}}u_{\text{bus}}}{L}\cdot(1-u)$。

由于系统在长时间运行中会受滤波电容/电感参数变化、负载功率波动等不确定性因素的影响，因此将此不确定性因素作为扰动分量引入到系统中，其在系统中所表现出的影响均可等效为功率扰动量 h_1，具体为

$$h_1=-P_{\text{cpl}}+p_{\text{cpl}} \tag{6}$$

式中，p_{cpl} 为由不确定因素引起的系统功率的扰动量。

由此可将原非线性系统变成 Brunovsky 标准线性系统，具体为

$$\begin{cases}\dot{e}_1=e_2+h_1\\ \dot{e}_2=d\end{cases} \tag{7}$$

新系统的状态变量参考值为

$$e_{1\text{d}}=\frac{1}{2}Li_{L\text{ref}}^2+\frac{1}{2}Cu_{\text{ref}}^2 \tag{8}$$

式中：$i_{L\text{ref}}$ 为变换器电感电流参考值；u_{ref} 为母线参考电压。

控制目标也转化为使 e_1 趋近于 $e_{1\text{d}}$。

3　控制器设计

为使系统能够精确快速地跟踪给定输入，本文提出基于 NDO 的变增益趋近 BSMC 控制策略，其设计是基于式(7)的标准线性化系统，具体实现是通过在 BMC 中引入滑模面，设计变增益趋近滑模控制律进一步提升系统的鲁棒性，减小系统调节时间，再引入 NDO 估计系统扰动量并进行补偿，进一步减小稳态电压偏差。

3.1　基于 NDO 的变增益趋近 BSMC 控制器设计

为达到控制目标，使标准线性化系统的状态变量 e_1 趋近于 $e_{1\text{d}}$，首先设计反步控制器，反步法设计时先定义误差变量 δ_1 和 δ_2 为

$$\begin{cases}\delta_1=e_1-e_{1\text{d}}\\ \delta_2=e_2-e_{2\text{d}}\end{cases} \tag{9}$$

反步法的实现是通过定义 Lyapunov 函数逐步反推得到系统的控制律，因此定义第 1 个 Lyapunov 函数为

$$U_1=\frac{1}{2}\delta_1^2 \tag{10}$$

由式(10)可知 U_1 正定，对其求导得

$$\dot{U}_1=\delta_1\dot{\delta}_1 \tag{11}$$

而

$$\dot{\delta}_1=\delta_2+e_{2\text{d}}+h_1-\dot{e}_{1\text{d}} \tag{12}$$

令 $\dot{\delta}_1=-k_1\delta_1+\delta_2$，得

$$e_{2\text{d}}=-k_1\delta_1-h_1+\dot{e}_{1\text{d}} \tag{13}$$

式中，k_1 为控制器系数。

此时

$$\dot{U}_1=-k_1\delta_1^2+\delta_1\delta_2 \tag{14}$$

当 $\delta_2\to 0$ 时，$\dot{U}_1$ 负定，因此新的控制目标为使 e_2 趋近于 $e_{2\text{d}}$。

由于状态变量期望值 $e_{2\text{d}}$ 中存在未知项 h_1，因

此使用 NDO 对未知项进行估计。

其设计为

$$\begin{cases}\hat{h}_1 = n(e_1 - p)\\ \dot{p} = e_2 + \hat{h}_1\end{cases} \tag{15}$$

式中：$\hat{h}_1$ 为 h_1 的估计值，满足 $\tilde{h}_1 = h_1 - \hat{h}_1$，$\tilde{h}_1$ 为实际扰动量与扰动估计值之间的偏差；p 为辅助状态变量；n 为扰动观测器系数。

且有

$$\dot{\tilde{h}} = \dot{h}_1 - \dot{\hat{h}}_1 = \dot{h}_1 - n\tilde{h}_1 \tag{16}$$

则前述误差变量重新修正为

$$\dot{\delta}_1 = \delta_2 + e_{2\mathrm{d}} + \tilde{h}_1 + \hat{h}_1 - \dot{e}_{1\mathrm{d}} \tag{17}$$

令 $\dot{\delta}_1 = -k_1\delta_1 + \delta_2 + \tilde{h}_1$，得重新修正的状态变量期望值为

$$e_{2\mathrm{d}} = -k_1\delta_1 - \hat{h}_1 + \dot{e}_{1\mathrm{d}} \tag{18}$$

定义第 2 个 Lyapunov 函数为

$$U_2 = U_1 + \frac{1}{2}\tilde{h}_1^2 \tag{19}$$

由式(19)可知 U_2 正定，对其求导得

$$\dot{U}_2 = \delta_1\dot{\delta}_1 + \tilde{h}_1\dot{\tilde{h}}_1 = -k_1\delta_1^2 + \delta_1\delta_2 + \delta_1\tilde{h}_1 + \tilde{h}_1\dot{h}_1 - n\tilde{h}_1^2 \tag{20}$$

为提升系统在不同条件下的稳定性能，增强系统的鲁棒性，可采用反步与滑模控制相结合的方式，为增加控制器设计的自由度，对现有误差变量 δ_1 和 δ_2 进行线性组合，构成的滑模面为

$$s = c\delta_1 + \delta_2 \tag{21}$$

式中：s 为滑模面；c 为滑模系数。

设计滑模的趋近律形式为幂指数型变增益趋近律，具体为

$$\dot{s} = -\lambda_1\gamma^{|s|}\,\mathrm{sgn}(s) - \lambda_2|s|^{\upsilon}\,\mathrm{sgn}(s) \tag{22}$$

式中：λ_1 和 λ_2 为冥指数型变增益趋近律的系数；$\lambda_1 > 0$，$\lambda_2 > 0$；γ 和 υ 分别为冥指数型变增益趋近律的底数和指数，$\gamma > 0$，$0 < \upsilon < 1$。

由式(22)可知，在误差变量距离滑模面较远时(|s|较大)，其趋近律的收敛速度由式(22)的前项决定(前项收敛很快，后项收敛较慢，可忽略后项影响)，提升系统调节的快速性；在误差变量距离滑模面较近时(|s|较小)，在前项与后项的共同作用下来提升控制器收敛速度(前后项收敛速度都变慢，此时后项作用不可忽略)，使得系统能够做到快速精准地跟踪，以提升系统的动态调节性能。同时，采用幂指数型趋近律也能减缓系统的抖振。而且存在

$$\dot{s} = (c + k_1)(-k_1\delta_1 + \delta_2) + d + (c + k_1 + n)\tilde{h}_1 - \ddot{e}_{1\mathrm{d}} \tag{23}$$

结合式(22)和式(23)得

$$d = -(c + k_1)(-k_1\delta_1 + \delta_2) + \ddot{e}_{1\mathrm{d}} - \lambda_1\gamma^{|s|}\,\mathrm{sgn}(s) - \lambda_2|s|^{\upsilon}\,\mathrm{sgn}(s) \tag{24}$$

式(24)即为基于 NDO 的变增益趋近 BSMC 控制器的控制律。

将式(24)代入新的控制变量表达式可得实际电路的占空比控制信号为

$$u = \left(1 - \frac{U_{\mathrm{in}}^2}{L} - d\right) \Big/ \left(\frac{U_{\mathrm{in}}u_{\mathrm{bus}}}{L}\right) \tag{25}$$

最终得到基于NDO的变增益趋近 BSMC 控制器的控制结构，如图 2 所示。

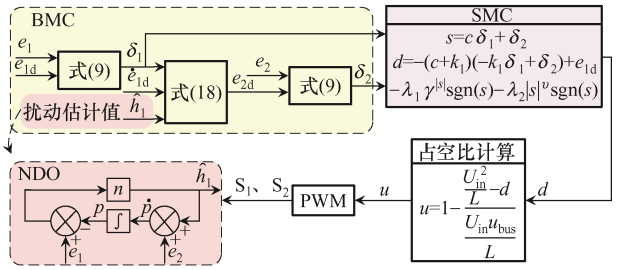


图 2 基于 NDO 的变增益趋近 BSMC 控制器结构

Fig. 2 Structure of variable-gain approach BSMC controller based on NDO

定义第 3 个 Lyapunov 函数为

$$U_3 = U_2 + \frac{1}{2}s^2 \tag{26}$$

由式(26)可知 U_3 正定，对其求导得

$$\dot{U}_3 = \delta_1\dot{\delta}_1 + \tilde{h}_1\dot{\tilde{h}}_1 + s\dot{s} = -k_1\delta_1^2 + \delta_1\delta_2 + \delta_1\tilde{h}_1 + \tilde{h}_1\dot{h}_1 - n\tilde{h}_1^2 - \lambda_1|s|\gamma^{|s|} - \lambda_2|s|^{\upsilon+1} + s[(c + k_1 + n)\tilde{h}_1] \tag{27}$$

3.2 稳定性分析证明

控制器参数的确定要保证系统渐进稳定，即需

选定合适的参数使 $\dot{U}_3$ 负定，假定扰动的观测偏差有界且稳定，即

$$\left|\tilde{h}_1\right| \leqslant \left|\overline{h}_1\right| \tag{28}$$

$$(c+k_1+n)\tilde{h}_1 \leqslant (c+k_1+n)\overline{h}_1 = \overline{\chi} \tag{29}$$

式中，$\overline{\chi}$ 为有界值。

则定义状态变量 $\boldsymbol{\delta}$ 和 $\boldsymbol{\varphi}$ 为

$$\begin{cases} \boldsymbol{\delta}^{\mathrm{T}} = [\delta_1 \quad \delta_2] \\ \boldsymbol{\varphi} = \begin{bmatrix} \left(k_1 - \dfrac{1}{2}\right) + \lambda_2 c^2 & \lambda_2 c - \dfrac{1}{2} \\ \lambda_2 c - \dfrac{1}{2} & \lambda_2 \end{bmatrix} \end{cases} \tag{30}$$

可得

$$\boldsymbol{\delta}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\varphi}\boldsymbol{\delta} = k_1\delta_1^2 - \frac{1}{2}\delta_1^2 - \delta_1\delta_2 + \lambda_2 s^2 \tag{31}$$

由此得

$$\dot{U}_3 \leqslant -\boldsymbol{\delta}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\varphi}\boldsymbol{\delta} - \frac{1}{2}\delta_1^2 + \delta_1\tilde{h}_1 + \tilde{h}_1\dot{h}_1 - n\tilde{h}_1^2 - (\lambda_1\gamma^{|s|} - \overline{\chi})|s| \tag{32}$$

引理：假定系数 a 和 b 为正数，ω 和 μ 为任意数，则对任意正数 γ，都有

$$|\mu|^a|\omega|^b \leqslant \frac{a}{a+b}\gamma|\mu|^{a+b} + \frac{b}{a+b}\gamma^{-\frac{a}{b}}|\omega|^{a+b} \tag{33}$$

根据此引理得出

$$\begin{cases} \delta_1\tilde{h}_1 \leqslant \dfrac{1}{2}\delta_1^2 + \dfrac{1}{2}\tilde{h}_1^2 \\ \tilde{h}_1\dot{h}_1 \leqslant \dfrac{1}{2}\tilde{h}_1^2 + \dfrac{1}{2}\dot{h}_1^2 \end{cases} \tag{34}$$

结合式(32)和式(34)得

$$\dot{U}_3 \leqslant -\boldsymbol{\delta}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\varphi}\boldsymbol{\delta} + \frac{1}{2}\dot{h}_1^2 - (n-1)\tilde{h}_1^2 - (\lambda_1\gamma^{|s|} - \overline{\chi})|s| \tag{35}$$

选择合适的系数即

$$n > 2.5 \tag{36}$$

$$\tilde{h}_1 \geqslant \dot{h}_1 \tag{37}$$

结合式(35)~式(37)得

$$\dot{U}_3 \leqslant -\boldsymbol{\delta}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\varphi}\boldsymbol{\delta} - \tilde{h}_1^2 - (\lambda_1\gamma^{|s|} - \overline{\chi})|s| \tag{38}$$

现选择的条件为

$$\lambda_1\gamma^{|s|} \geqslant \overline{\chi} \tag{39}$$

$$\boldsymbol{\varphi} \geqslant 0 \rightarrow \begin{cases} \left(k_1 - \dfrac{1}{2}\right) + \lambda_2 c^2 > 0 \\ \left[\left(k_1 - \dfrac{1}{2}\right) + \lambda_2 c^2\right]\lambda_2 - \left(\lambda_2 c - \dfrac{1}{2}\right)^2 > 0 \end{cases} \tag{40}$$

则 $\dot{V}_3 \leqslant 0$，负定。

4　仿真分析与实验验证

为对所提策略进行验证，建立图 1 所示的等效电路仿真模型，其中连接输入源与直流母线的前级变换器选择 Buck-Boost 变换器，与电阻相连构成 CPL 的负载变换器选择 Buck 变换器，母线电压参考值设定为 600 V。在本文中，为对比所提控制器对系统性能的改善情况，采用 3 种控制器来进行比较和评估：第 1 种控制器是基于 NDO 的 BMC 控制器；第 2 种控制器是 BSMC 控制器(滑模趋近律选择为指数趋近律，即 $\dot{s} = -\alpha s - \eta\,\mathrm{sgn}(s)$，$\alpha$、$\eta$ 为该控制器系数；第 3 种控制器是本文所提的基于 NDO 的变增益趋近 BSMC 控制器。分别对系统在负载功率及输入电压变化时控制器的调节性能进行评估，系统及控制器参数见表 1 和表 2，其中控制器参数的选取依据式(36)、式(39)和式(40)的条件，并通过重复和修改找到较优的参数值。

表 1　系统参数

Tab. 1 System parameters

参数	数值
输入电压 U_{in}/V	480
母线参考电压 u_{ref}/V	600
开关频率 f_s/kHz	10
前级变换器电感 L/mH	6
母线侧电容 C/μF	470
负载变换器电感 L_{load}/mH	6
负载侧电容 C_{load}/μF	470

4.1　负载功率、输入电压变化时的仿真对比

所提控制策略的设计目标是维持系统母线电

表 2 控制器参数

Tab. 2 Controller parameters

控制器类型	k_1	k_2	c	λ_1	λ_2	γ	υ	α	η	n
BMC+NDO	60	7 000	—	—	—	—	—	—	—	10
BSMC	30	—	3 000	—	—	—	—	5 500	100	—
BSMC+NDO	30	—	3 000	8	12	10	0.8	—	—	10

压的稳定，设定负载功率在 t=1 s 时由 20.0 kW 跳变至 20.5 kW，在此种情况下，母线电压的波形如图 3 所示，可以直观地看出 3 种控制策略中基于 NDO 的 BMC 控制响应时间较长，其他 2 种控制方式响应速度较快，且基于 NDO 的变增益趋近 BSMC 控制的鲁棒性较强。图 4 具体显示了功率变化时段 3 种控制方式下的母线电压波形，可以看出

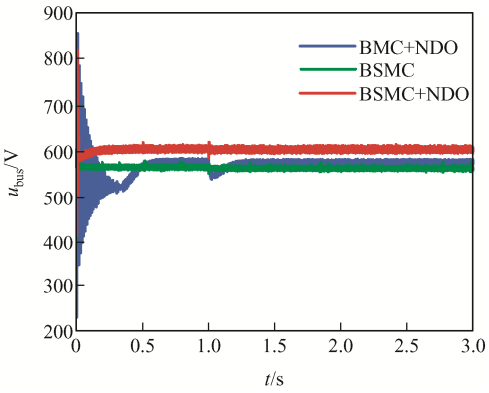


图 3 3 种控制方式下母线电压波形对比

Fig. 3 Comparison of bus voltage waveform in three control modes

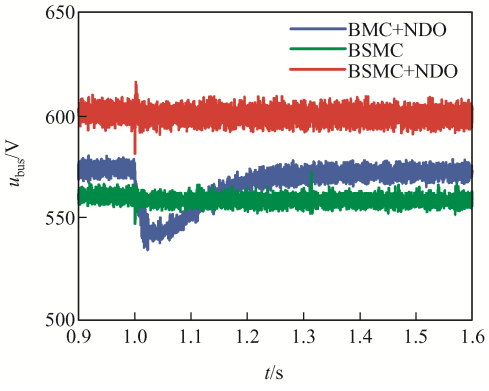


图 4 功率变化时母线电压波形

Fig. 4 Bus voltage waveforms under changes in power

基于 NDO 的变增益趋近 BSMC 控制具备较快的响应速度，且与其他 2 种控制方式相比，在系统稳态运行期间输出电压与参考电压的偏差值较小。由此可知，所提控制策略具有较短的调节时间及较小的稳态电压偏差。

图 5 为 NDO 计算 $\hat{h}_1$ 的变化曲线，可以看出其能较好地跟踪负载功率的变化。

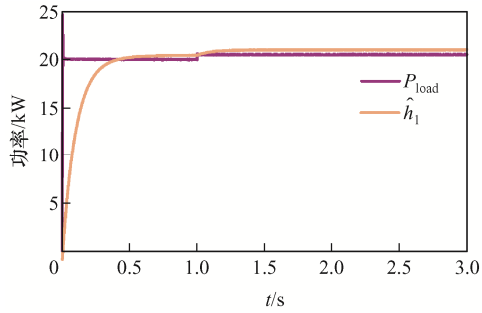


图 5 $\hat{h}_1$ 及 P_{load} 变化曲线

Fig. 5 Curves of $\hat{h}_1$ and P_{load}

设定输入电压在 t=1 s 时在原来 480 V 的基础上突增 10 V，在此种情况下，母线电压的波形如图 6 所示，基于 NDO 的 BMC 控制方式同样存在响应速度较慢的问题，而本文所提控制方式在输入侧电压突变情况下响应速度较快。图 7 具体显示了输入电压变化时段 3 种控制方式下的母线电压波形，可以看出基于 NDO 的 BMC 的控制方式在输

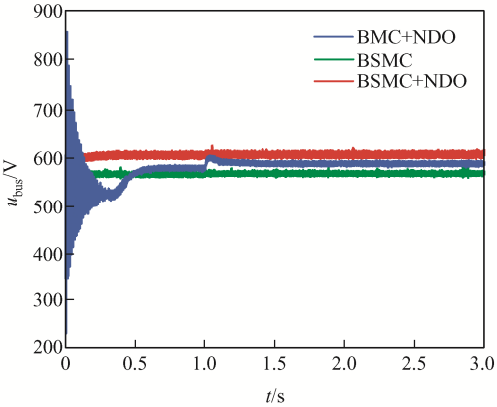


图 6 3 种控制方式下母线电压波形对比

Fig. 6 Comparison of bus voltage waveform in three control modes

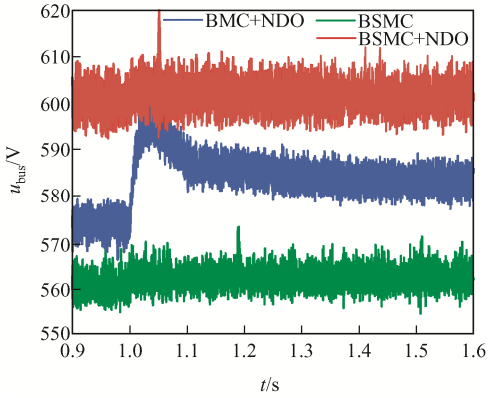


图 7　输入电压变化时母线电压波形

Fig. 7 Bus voltage waveforms under changes in input voltage

入电压波动出现后在母线电压的响应上存在超调，其他 2 种控制方式受输入侧电压波动的影响较小，基本都能够维持原来母线电压的稳定，但 BSMC 控制存在较大的母线电压偏差，而本文所提控制方法的电压偏差较小。由此可知，在此种情况下所提控制策略在性能上仍然优于其他 2 种控制策略。

为设计合适的控制方案，对电感电流极限的考虑同样不可忽略。设定系统在不同时间发生不同类型的扰动，即在 t=0.5 s 时负载功率由 20.0 kW 跃变至 20.5 kW，在 t=1.5 s 时负载功率又降至 20.2 kW；在 t=2.0 s 时输入电压增大 10 V，在 t=2.5 s 时又减小 5 V。在此扰动情况下的电感电流波形如图 8 所示，可以看出 3 种控制方式都对负载功率变化较为敏感，而对于输入电压变化没有呈现出较大的变化范围，基于 NDO 的 BMC 控制相较于其他 2 种控

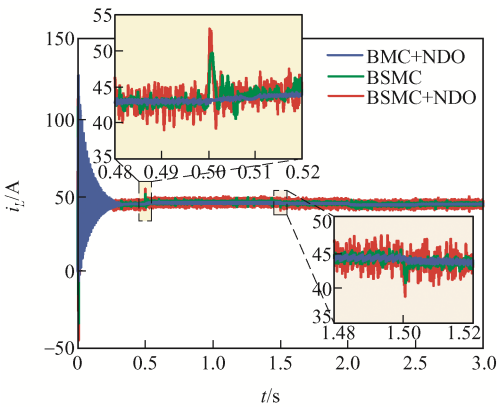


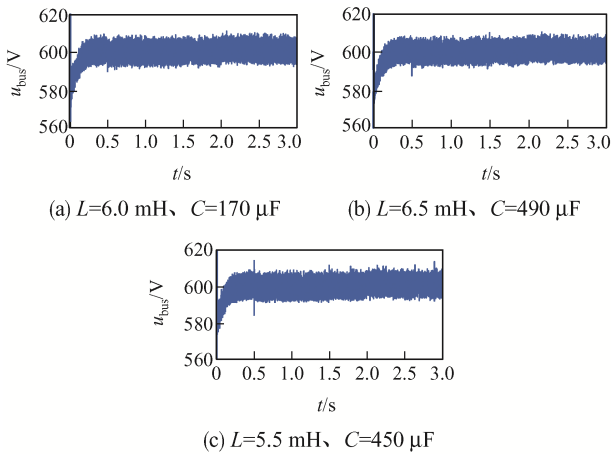
图 8　3 种控制方式下电感电流波形对比

Fig. 8 Comparison of inductor current waveform in three control modes

制方式在扰动发生后电感电流存在长时间的波动，难以立即恢复平稳。总体而言，与其他控制策略相比，所提控制策略的电感电流响应仍在可接受的性能范围之内，且其具备较好的响应速度，在处理功率和输入电压变化方面总体优于其他 2 种控制策略。

4.2　电感电容参数摄动对应的仿真结果

为验证所提控制策略在系统参数变化时对系统扰动的抑制情况，分别设定与标称值有一定偏差的电感参数值与电容参数值，不同电感电容参数在 t=0.5 s 时负载功率由 20.0 kW 跃变至 20.5 kW，t=1.5 s 时负载功率又降至 20.2 kW，t=2.0 s 时输入电压增大 10 V，t=2.5 s 时又减小 5 V 的情况下，对应的母线电压波形如图 9 所示。图 9(a)为 L=6.0 mH、C=470 μF 的母线电压，其在达到稳定时的最大电压偏差为 1.73%；图 9(b)为 L=6.5 mH、C=490 μF 的母线电压，电压偏差为 2.08%；图 9(c)为 L=5.5 mH、C=450 μF 的母线电压，电压偏差为 2.68%。结果表明，当电感与电容值在系统运行中发生微小偏移时，系统母线电压波动仍在可接受范围内，即所提控制策略对参数变化不敏感，能够保证系统在运行状况下的稳定且保持较小的稳态电压偏差。



(a) L=6.0 mH、C=170 μF　　(b) L=6.5 mH、C=490 μF

(c) L=5.5 mH、C=450 μF

图 9　电感、电容参数摄动时的母线电压波形

Fig. 9 Bus voltage waveforms when inductance and capacitance parameters are perturbed

4.3　实验验证

为了进一步验证所提控制策略的有效性，基于 RT-LAB 半实物测试平台搭建了实验装置，进行实

验研究，如图 10 所示。相关电路参数及控制器参数与仿真模型一致。

上述 3 种控制方式下的直流母线电压波形分别如图 11(a)、(b)、(c)所示，与仿真结果类似，在负载功率突增 1 kW 时，基于 NDO 的 BMC 控制策略响应时间长且与给定 600 V 的电压存在稳态偏差；BSMC 控制策略的响应时间有所减少，但仍存在较大的稳态电压偏差；基于 NDO 的变增益趋近 BSMC 控制策略，响应速度快、稳态偏差小，能够做到精准快速跟踪给定电压，控制性能优于其他 2 种控制策略。

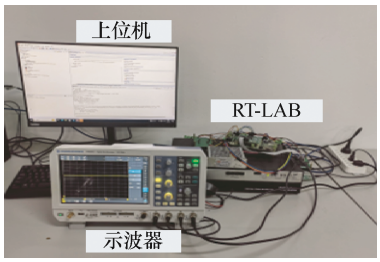


图 10 实验平台

Fig. 10 Experimental platform

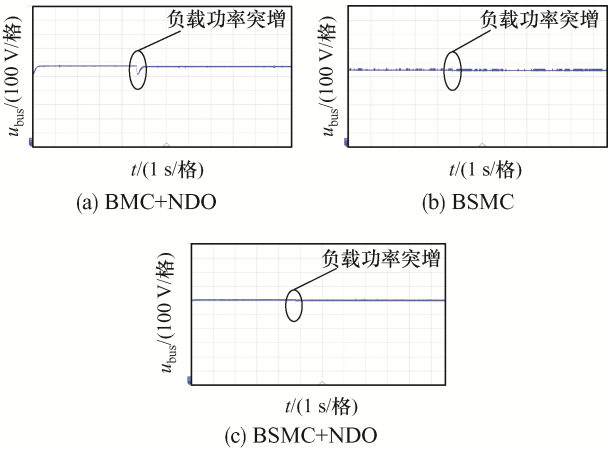


图 11 3 种控制策略下母线电压实验波形

Fig. 11 Experimental waveforms of bus voltage under three control strategies

5 结语

本文提出了 1 种基于 NDO 的变增益趋近 BSMC 稳定控制策略，这种控制策略结合了 BMC 和 SMC 2 种不同控制器的优势，弥补了这些控制器单独使用时存在的调节性能较差的缺陷，能够进一步增强系统的鲁棒性。通过设计变增益的滑模趋近律，使得系统对参考电压具有较好的跟踪性能；同时引入 NDO 来估计由于不确定性所带来的功率波动，提升系统稳态性能，增强抗扰性。通过仿真和实验比较 3 种控制策略下的母线电压，得出基于 NDO 的变增益趋近 BSMC 控制策略同时具备快速响应、鲁棒性强、稳定性好的特点，并且稳态电压偏差较小，从而验证所提控制策略的有效性。

参考文献：

[1] 刘海涛, 熊雄, 徐旖旎, 等. 含恒功率负载的直流微网稳定性分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(5): 42-49.
Liu Haitao, Xiong Xiong, Xu Yini, et al. Stability analysis of DC microgrid with constant power load [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(5): 42-49. (in Chinese)

[2] 卢浩, 朱琳, 赵学深, 等. 基于负载变流器控制带宽的直流系统稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(3): 153-160.
Lu Hao, Zhu Lin, Zhao Xueshen, et al. Stability analysis of DC system based on control bandwidth of load converter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(3): 153-160. (in Chinese)

[3] 王君瑞, 白冰超, 赵东琦, 等. 直流微网储能 DC-DC 变换器的虚拟直流电机控制[J]. 电源学报, 2026, 24(1): 136-145.
Wang Junrui, Bai Bingchao, Zhao Dongqi, et al. Virtual DC machine control of DC microgrid energy storage DC-DC converter [J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(1): 136-145. (in Chinese)

[4] 刘欣博, 刘宁, 宋晓通, 等. 基于交流恒功率负载特性的交直流混合微电网系统大信号稳定性判据[J]. 高电压技术, 2021, 47(10): 3441-3451.
Liu Xinbo, Liu Ning, Song Xiaotong, et al. Large-signal stability criteria of AC/DC hybrid microgrid based on AC constant power loads [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3441-3451. (in Chinese)

[5] 刘欣博, 孙晓溪, 宋晓通. 带恒功率负载的交直流混合

微电网系统大信号稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2021, 36(S1): 115-125.
Liu Xinbo, Sun Xiaoxi, Song Xiaotong. Large-disturbance stability analysis of hybrid AC/DC microgrid with constant power loads [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(S1): 115-125. (in Chinese)

[6] Xu Qianwen, Zhang Chuanlin, Wen Changyun, et al. A novel composite nonlinear controller for stabilization of constant power load in DC microgrid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 752-761.

[7] Hossain E, Perez R, Nasiri A, et al. A comprehensive review on constant power loads compensation techniques [J]. IEEE Access, 2018, 6: 33285-33305.

[8] 沈兰兰. 带 CPL 的直流微电网定频滑模稳定控制[J]. 电子器件, 2023, 46(4): 1022-1029.
Shen Lanlan. Constant frequency sliding mode stability control of DC microgrid with CPL [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2023, 46(4): 1022-1029. (in Chinese)

[9] 张辉, 杨甲甲, 支娜, 等. 基于无源阻尼的直流微电网稳定性分析[J]. 高电压技术, 2017, 43(9): 3100-3109.
Zhang Hui, Yang Jiajia, Zhi Na, et al. Stability analysis of DC microgrid based on the passive damping method [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(9): 3100-3109. (in Chinese)

[10] 张勤进, 郑祥鲁, 刘彦呈, 等. 船舶微电网源-荷级联系统母线电压振荡有源阻尼抑制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(3): 1-10.
Zhang Qinjin, Zheng Xianglu, Liu Yancheng, et al. Active damping suppression strategy for bus voltage oscillation in ship microgrid source-load cascade system [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(3): 1-10. (in Chinese)

[11] 周继林, 赵晋斌, 曾志伟, 等. 基于阻抗检测的直流微网自适应稳定控制策略[J]. 电力电子技术, 2023, 57(6): 97-99, 129.
Zhou Jilin, Zhao Jinbin, Zeng Zhiwei, et al. Adaptive stability control strategy of DC microgrid based on impedance detection [J]. Power Electronics, 2023, 57(6): 97-99, 129. (in Chinese)

[12] 梁海峰, 边吉, 丁锦睿, 等. 基于滑模控制的孤岛直流微电网控制策略研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2021, 48(1): 15-23, 41.
Liang Haifeng, Bian Ji, Ding Jinrui, et al. Research on control strategy of isolated DC microgrid based on sliding mode control [J]. Journal of North China Electric Power University, 2021, 48(1): 15-23, 41. (in Chinese)

[13] 王浩, 聂晶莹, 李斌, 等. 电网电压不平衡下交直流混合微电网互联接口变换器分数阶滑模控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(16): 94-103.
Wang Hao, Nie Jingying, Li Bin, et al. Fractional order sliding mode control strategy of AC/DC hybrid microgrid interconnection interface converter under grid voltage imbalance [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(16): 94-103. (in Chinese)

[14] Mustafa G, Ahmad F, Zhang Ruihong, et al. Adaptive sliding mode control of Buck converter feeding resistive and constant power load in DC microgrid [J]. Energy Reports, 2023, 9: 1026-1035.

[15] 张泽华, 宋桂英, 张晓璐, 等. 考虑恒功率负载的直流微电网稳定性与鲁棒性控制策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(16): 4391-4405.
Zhang Zehua, Song Guiying, Zhang Xiaolu, et al. Stability and robustness control strategy of DC microgrid considering constant power load [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(16): 4391-4405. (in Chinese)

[16] Debdouche N, Zarour L, Benbouhenni H, et al. Robust integral backstepping control microgrid connected photovoltaic system with battery energy storage through multi-functional voltage source inverter using direct power control SVM strategies [J]. Energy Reports, 2023, 10: 565-580.

[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 microgrid based on hybrid energy storage [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(23): 151-159. (in Chinese)

[18] Chaturvedi S, Kachhwaha M, Fulwani D. Robust integral sliding mode control for transient voltage support from

bidirectional converter-based active filters in microgrids [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics, 2023, 4(3): 995-1005.

[19] 王宝华, 蒋力. 基于精确反馈线性化的直流微电网双向直流变换器反步滑模控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 43-49.
Wang Baohua, Jiang Li. Backstepping sliding mode control based on exact feedback linearization for bi-directional DC converter in DC microgrid [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 43-49. (in Chinese)

[20] Patel V, Giri V K, Kumar A. Fractional-order adaptive sliding mode control with disturbance observer for frequency regulation in isolated microgrid [J]. International Journal of Dynamics and Control, 2024, 12(6): 2010-2019.

[21] 任会敬, 李峰, 潘欢, 等. 基于改进滑模观测器的永磁同步电动机无位置传感器控制方法[J]. 电源学报, 2026, 24(1): 300-309.
Ren Huijing, Li Feng, Pan Huan, et al. Position sensorless control method for permanent magnet synchronous motor based on improved sliding mode observer [J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(1): 300-309. (in Chinese)



陈景文

作者简介：

陈景文(1978—)，男，博士，教授。研究方向：智能微电网技术。E-mail：chenjw@sust.edu.cn。

王媛(2000—)，女，中国电源学会学生会员，通信作者，硕士研究生。研究方向：直流微电网稳定性分析与控制。E-mail：220611011@sust.edu.cn。

王福强(1976—)，男，研究生，高级工程师。研究方向：电力电子能源。E-mail：2847934595@qq.com。

王同新(1981—)，男，研究生，高级工程师。研究方向：电力电子能源。E-mail：18182588393@163.com。

(责任编辑：孙美菊)