

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.10.016

基于改进自抗扰的直流配电网母线电压波动抑制策略

包伟奇, 韩民晓, 张 理, 郝玲靖, 王世纪

(华北电力大学电气与工程学院, 北京 100096)

摘要: 针对直流配电网受到间歇性电源输出功率及负荷投切等扰动造成的直流母线电压波动,提出了一种改进型线性自抗扰控制策略。首先,建立换流器系统的数学模型。然后在传统线性自抗扰控制器中引入电流前馈,并改进扩张状态观测器,通过理论分析证明了稳定性方面的优势。最后在不同工况下对各种控制方式进行仿真及实验验证。结果表明,所提控制策略较PI双环控制和传统线性自抗扰控制具有更加良好的动态特性,对抑制直流配电网母线电压波动具有实际应用价值。

关键词: 母线电压; 线性自抗扰控制; 电流前馈; 扩张状态观测器; 动态特性

Bus Voltage Fluctuation Suppression Strategy for DC Distribution Network Based on Improved Active Disturbance Rejection Control

BAO Weiqi, HAN Minxiao, ZHANG Li, HAO Lingjing, WANG Shiji

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 100096, China)

Abstract: To address the DC bus voltage fluctuations caused by disturbances such as intermittent power supply output power variations and load switching in DC distribution network, an improved linear active disturbance rejection control strategy is proposed. First, the mathematical model of the converter system is set up. Then, the current feedforward is introduced into the traditional linear active disturbance rejection control and the extended observer is improved. The advantages of the proposed method in terms of stability is demonstrated by theoretical analysis. Finally, simulation and experiments for various control modes are performed under different operating conditions. The results show that the proposed control strategy has better dynamic characteristics than PI doubleloop control and traditional linear active disturbance rejection control, and has practical application value for suppressing the bus voltage fluctuation of DC distribution networks.

Key words: bus voltage; linear active disturbance rejection control; current feedforward; extend state observer; dynamic characteristics

0 引言

自2020年以来,习总书记曾多次明确“碳达峰,碳中和”的节能目标,对配电系统的高效性提出了新的需求。生产力的快速发展与电力电子技术的进步使得越来越多的风、光、储能接入电网,各种家用产品以及工业变频设备持续对配电网电能质量造成污染,交流配电网的效率与稳定性亟需提高^[1-4]。

不同于交流配电网,直流配电网不存在无功扰动问题且在分布式电源接入时可省去一个换流环节,具有供电可靠性高、传输容量大、成本低、损耗小等优势^[5-8]。直流配电网中负载的瞬时投切以及分布式电源的间歇性出力都会对直流母线电压造成扰动,影响直流配电系统的电能质量,触发保护系统工作,严重情况下造成直流电压崩溃,对系统设备造成不可逆损坏^[9-13]。因此,研究新型控制策略抑制直流配电网母线电压波动,改善配电网电能质量,具

收稿日期:2026-05-10; 修回日期:2026-07-01

基金项目:国家科技部重点研发项目(2018YFB0904700)。

Project Supported by Key Project of National Key Research and Development Plan of China(2018YFB0904700).

有实际工程意义与经济价值。

换流器的电压电流双闭环PI控制作为传统控制手段,具有悠久的历史应用^[14]。但PI控制下的系统动态特性与稳定性存在矛盾,难以满足能抑制扰动的同时具有优良的动态性能。目前的主要手段有电流前馈或功率前馈控制方法^[15-16]。文[17]提出了一种鲁棒扰动观测器以补偿母线电压的动态问题,但系统设计较为复杂。自抗扰控制(active disturbance rejection controller, ADRC)作为新型控制手段代表,能在不依赖于控制对象具体模型的情况下反馈和补偿所有的扰动信息,具有几乎模型无关性、鲁棒性强、灵活性高等优点。但是由于ADRC的非线性特性,当控制高阶对象时,参数整定较为复杂。因此,有学者对ADRC提出了频率尺度概念,形成线性自抗扰控制器(linear active disturbance rejection controller, LADRC),突破了ADRC参数整定、工程化的瓶颈^[18]。文[19-20]结合非线性反馈与ADRC,一定程度上提升了系统稳态性能,但系统数学模型复杂,参数难以整定,工程应用价值较低。文[21]在自抗扰控制器中加入输出微分反馈信号,提高了系统的稳定性和可靠性,但增加了微分项的参数整定,使系统参数调节难度增加。文[22-23]对线性扩张观测器进行升阶以改善系统动态性能,但难以用数学模型表示高阶扩张观测器,工程应用难度较大。文[24]引入滑模控制,对直流母线电压波动具有良好的抑制效果,但是滑模控制的抖动难以消除,影响系统稳定。文[25]在LADRC中采用级联状态观测器,实现了多源扰动下的电压稳定,但是增加了控制系统复杂性。文[26-27]提出了模糊自抗扰控制理论,并结合人工智能数学算法,提升了系统稳态性能,但响应速度慢。

为抑制直流配电网母线电压波动,文中从LADRC出发,以改善换流器动态响应为控制目标,设计了改进型LADRC,对配电网直流母线电压受到负荷功率扰动时的波动情况进行MATLAB/Simulink仿真及实验验证。结果表明该改进型LADRC的动态性能明显优于传统双闭环PI控制器及传统自抗扰控制器。

1 AC/DC 换流器数学模型

配电网中三相换流器拓扑结构见图1。图1中: U_a, U_b, U_c 为交流电网侧相电压; u_a, u_b, u_c 为输入相电压; i_a, i_b, i_c 为交流电网侧相电流; u_{dc} 为直流侧电

压; i_{dc} 为直流侧电流; R_s 为交流侧滤波电感寄生电阻与开关损耗等效电阻之和; L 为交流侧滤波电感; C 为直流侧滤波电容; S_1-S_6 为换流器功率开关。定义开关函数 $S_k(k=a, b, c)$, $S_k=1$ 为 k 相上管导通、下管关断, $S_k=0$ 为下管导通、上管关断。

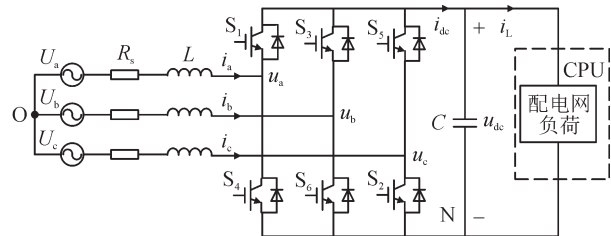


图1 三相换流器拓扑结构图

Fig. 1 Topology of three-phase converter

当直流配电网稳定运行时,将配电网负荷等效为恒功率负荷CPL,则根据功率守恒可列出直流侧电压方程

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = \frac{U_d i_d - R_s i_d^2}{u_{dc}} - \frac{P_{CPL}}{u_{dc}} \quad (1)$$

式(1)中: U_d, i_d 分别为有功电压和有功电流,是交流侧相电压、相电流经Park变换后的 d 轴分量。由于 R_s 一般很小可忽略不计,可得到以下直流侧电压方程

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = \frac{U_d i_d - P_{CPL}}{u_{dc}} \quad (2)$$

传统双闭环PI控制的原理是依靠积分器的作用消除误差,当换流器出口的直流母线遇到扰动时,积分器的滞后作用使控制器不能快速准确地获得扰动信息并补偿,导致直流配电系统容易发生不稳定现象。自抗扰控制由于扩张状态观测器以及扰动补偿环节的存在,能反馈输出的全部信息,使得其不存在积分环节仍具有良好的控制效果,因此对直流母线电压控制具有更加良好的动态特性。

2 换流器线性自抗扰控制器设计

直流配电网中的负荷投切、新能源间歇性出力以及配电网联络线之间的功率扰动等会导致直流母线电压的波动。用LADRC代替传统双闭环PI控制中的电压外环,能有效提高系统的动态性能。

2.1 传统LADRC设计

LADRC主要包括3个部分:线性扩张状态观测器(linear extend state observer, LESO)、线性状态误差反馈控制率(linear state error feedback, LSEF)和扰动估计补偿。典型一阶自抗扰控制器基本结构图见图2,扰动估计补偿环节为图2中虚线方框部分。

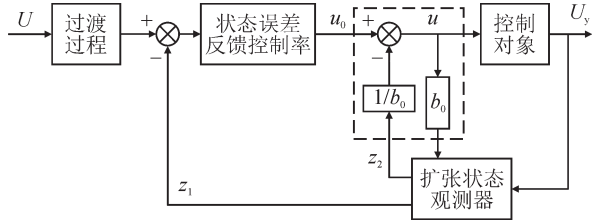


图2 典型一阶LADRC基本结构图

Fig. 2 Typical structure diagram of typical first-order LADRC

由式(2)可知,有功电流 i_d 到输出直流电压 u_{dc} 为一阶系统,因此设计一个一阶LADRC,将被控对象还原为标准的积分串联型。

设 $U_y = u_{dc}^2$ 为系统输出量, $u = i_d$ 为系统控制量,将式(2)写成标准LADRC控制对象的微分方程形式

$$U_y = f + b_0 u \quad (3)$$

式(3)中

$$\begin{cases} f = \frac{-2P_{CPL}}{C} \\ u = i_d \\ b_0 = \frac{2U_d}{C} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: b_0 为控制对象增益; f 为总扰动变量。令 $x_1 = U_y, x_2 = f$,可得电压外环扩张状态方程

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + b_0 u \\ \dot{x}_2 = f \\ U_y = x_1 \end{cases} \quad (5)$$

传统一阶LADRC对应的LESO数学形式为

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = 2\omega_o(U_y - z_1) + z_2 + b_0 u \\ \dot{z}_2 = \omega_o^2(U_y - z_1) \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中: ω_o 为线性状态观测器带宽,rad/s; z_1, z_2 为状态变量 x_1, x_2 经LESO后的估计值。对于一阶系统,LADRC设计目标为将其表示为单积分系统,因此设计LSEF见式(7)。基于传统LADRC的电压外环控制框图见图3。

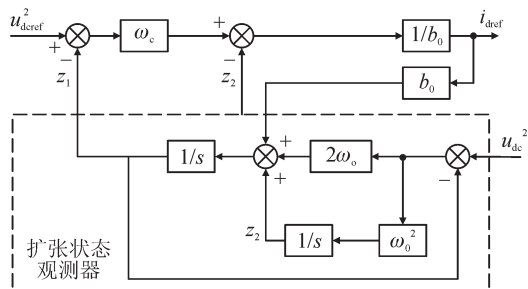


图3 基于传统ADRC的电压外环控制框图

Fig. 3 Control block of the voltage loop based on traditional ADRC

$$\begin{cases} u_0 = \omega_c(U - z_1) \\ u = \frac{-z_2 + u_0}{b_0} \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中, ω_c 为线性自抗扰控制器带宽,rad/s。

考虑电流内环影响,可得基于传统LADRC的换流器整体控制结构框图,见图4。其中 $G_{i_close}(s) = \omega_i / (s + \omega_i)$,为理想设计下电流内环等效闭环传递函数, ω_i 为电流环带宽,为讨论系统输出电压 y 与总扰动 f 的关系,基于以上对一阶LADRC的设计,根据式(4)-(6)可以列出系统输出变量 U_y 与系统扰动变量 f 的传递函数见式(8)。

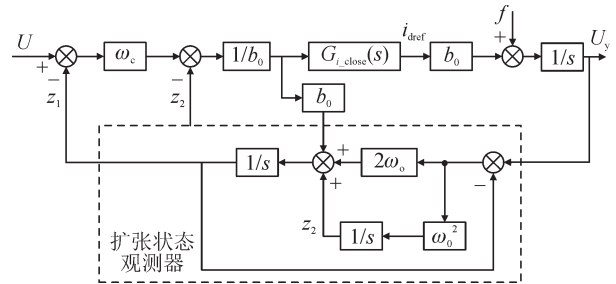


图4 基于传统LADRC的换流器整体控制结构框图

Fig. 4 Control block of the converter based on conventional LADRC

$$N(s) = \frac{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{b_4 s^4 + b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0} \quad (8)$$

式(8)中

$$\begin{cases} a_2 = 1 \\ a_1 = \omega_i + \omega_c + 2\omega_o \\ a_0 = \omega_i(\omega_c + 2\omega_o) \\ b_4 = 1 \\ b_3 = \omega_i + \omega_c + 2\omega_o \\ b_2 = \omega_i(\omega_c + 2\omega_o) \\ b_1 = \omega_i \omega_o (2\omega_c + \omega_o) \\ b_0 = \omega_i \omega_c \omega_o^2 \end{cases} \quad (9)$$

2.2 改进型LADRC设计

为增强控制系统对扰动变量 f 的抑制能力,在控制算法中引入电流前馈并采用降阶扩张状态观测器设计了改进型LADRC,改进后的LESO数学模型见式(10),LSEF数学模型见式(11),对应的改进型LADRC换流器整体控制结构框图见图5。

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = -\omega_o z_1 - \omega_o^2 U_y - \omega_o b_0 u \\ \dot{z}_2 = z_1 + \omega_o U_y \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} u_0 = \omega_c(U - U_y) \\ u = \frac{-z_2 + u_0}{b_0} \end{cases} \quad (11)$$

根据式(5)、(10)、(11)可列出改进后的系统输出变量 U_y 与系统扰动变量 f 的传递函数见式(12),输出变量 U_y 与反馈电流 I_o^2 的传递函数见式(13):

定较为方便,降低了所提改进型LADRC的工程应用难度。

4 仿真与实验验证

为验证文中所提改进型LADRC具有更加良好的动态性能,基于MATLAB/Simulink进行了仿真实验,分别在两种工况下对比PI控制、传统LADRC、改进型LADRC对直流母线电压的控制效果。仿真采用电阻投切的方式模拟直流配电网负荷投切、新能源间歇性出力造成的扰动,其拓扑结构见图1,关键系统参数见表1。

表1 系统参数

Table 1 System parameters

参数	数值
电网频率 f/Hz	50
线电压有效值 U_{ms}/V	220
直流母线电压 U_{dc}/V	375
网侧滤波电感 L/mH	3
网侧等效电阻 R/Ω	0.1
直流侧电容 $C/\mu\text{F}$	100
LADRC带宽 $\omega/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	300
LESO带宽 $\omega/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	600

换流器启动后运行在50%额定功率处,在0.6 s时投入负荷,换流器运行在额定功率,在1 s时再次切除负荷,换流器恢复运行到50%额定功率。两种工况下直流母线电压波动情况如下:

1) 工况1。负荷投入时直流母线电压动态特征。在0.6 s时负荷投入后3种不同控制方式下直流母线电压波动情况对比图见图7,3种不同控制下母线电压动态响应情况见图8。图8(a)为PI控制,最小电压为305 V,电压暂降18.6%,调整时间为0.076 s(恢复到额定电压的98%,即367 V,下同)。图8(b)为传统LADRC控制,最小电压为294 V,电压暂降21.6%,调整时间为0.045 s。图8(c)为改进型LADRC控制,最小电压为306 V,电压暂降18.4%,调整时间为0.016 s。在抗扰性方面,改进型LADRC与PI性能相近,且优于传统LADRC。在快速性方面,改进型LADRC明显优于传统LADRC且明显优于PI控制。因此改进型LADRC较传统LADRC与PI控制拥有更加良好的动态性能。

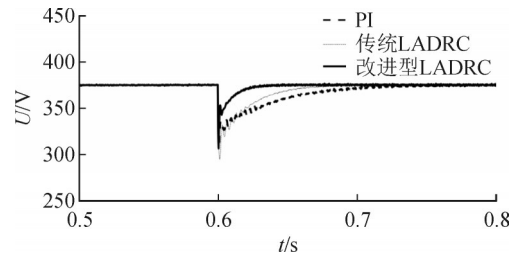
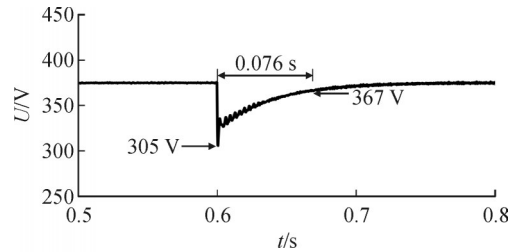
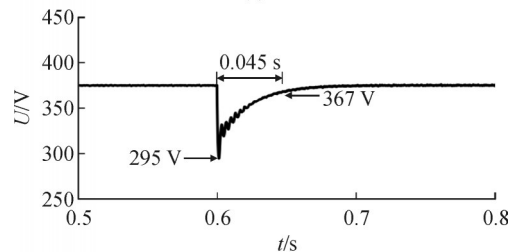


图7 负荷投入时电压波动情况对比图

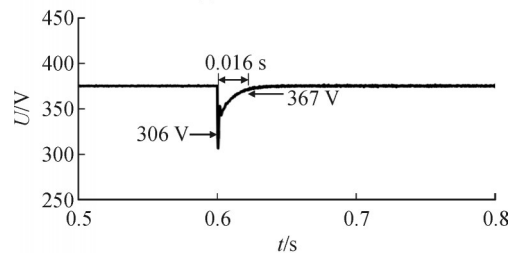
Fig. 7 Comparison of voltage fluctuation during load input



(a) PI控制



(b) 传统LADRC控制



(c) 改进型LADRC控制

图8 负荷投入时直流母线电压动态响应

Fig. 8 Dynamic response of DC bus voltage during load input

2) 工况2。负荷切除时直流母线电压动态特征。在1 s时负荷切除后3种不同控制方式下直流母线电压波动情况对比图见图9,3种不同控制下母线电压动态响应情况见图10。图10(a)为PI控制,最大电压为457 V,电压暂升21.8%,调整时间为0.063 s(恢复到额定电压的102%,即382 V,下同)。图10(b)为传统LADRC控制,最大电压为476 V,电压暂升26.9%,调整时间为0.034 s。图10(c)为改进型LADRC控制,最大电压为461 V,电压暂升22.9%,调整时间为0.013 s。抗扰性与快速性结论与工况1相同。

为进一步验证所提控制策略及理论分析的正

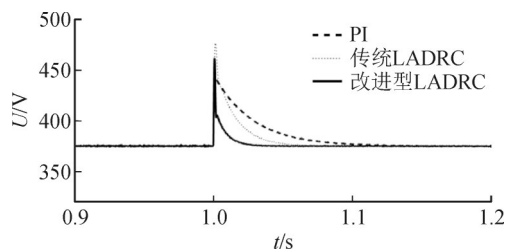
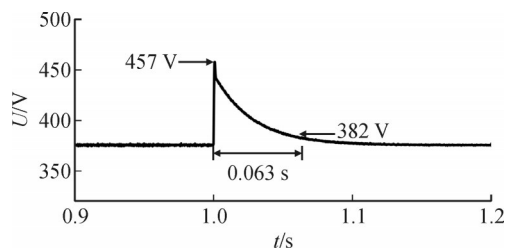
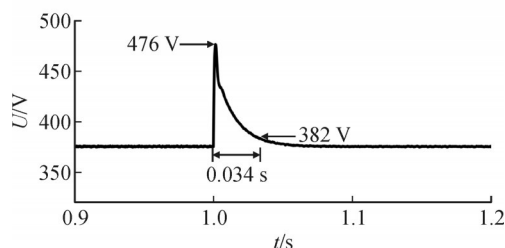


图9 负荷切除时电压波动情况对比图

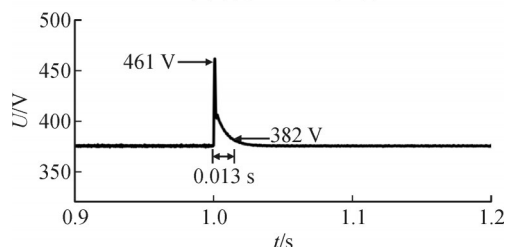
Fig. 9 Comparison of voltage fluctuation during load cutoff



(a) PI控制



(b) 传统LADRC控制



(c) 改进型LADRC控制

图10 负荷切除时直流母线电压动态响应

Fig. 10 DC bus voltage dynamic response during load cutoff

确性,搭建了额定功率1 kVA的直流配电网模拟实验平台,见图11。其中控制器采用RTU-BOX204实时数字控制器,IGBT采用FF50R12RT4,直流母线电压设置100 V,滤波电感采用3 mH,滤波电容采用2 200 μF 。3种控制方式下负荷投入与负荷切除时的直流母线电压波动情况见图12、13,各工况的实验数据(取整)见表2、3。实验结果表明,所提改进型LADRC较传统LADRC及PI控制具有更加良好的抗扰性与快速性,验证了其提高直流配电网母线电压波动抑制能力的有效性。

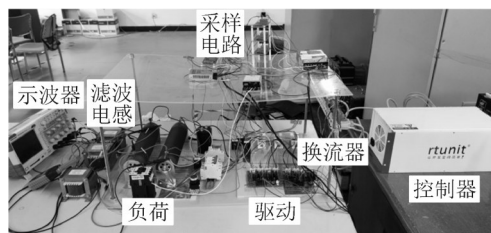
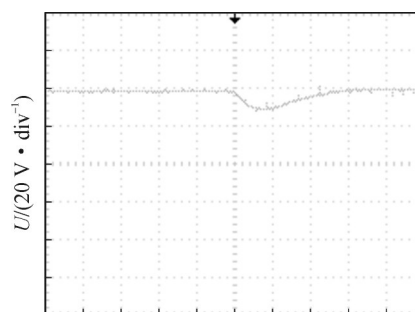


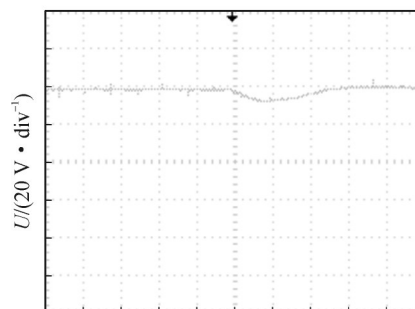
图11 直流配电网模拟实验平台

Fig. 11 Simulation experimental platform of DC distribution network



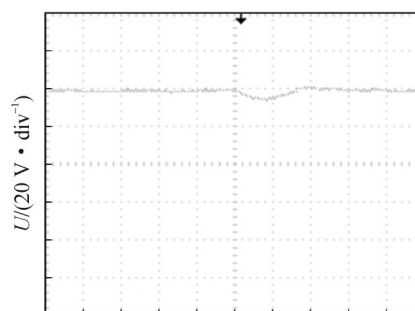
t/(25 ms · div⁻¹)

(a) PI控制



t/(10 ms · div⁻¹)

(b) 传统LADRC控制



t/(10 ms · div⁻¹)

(c) 改进型LADRC控制

图12 负荷投入时直流母线电压波动情况

Fig. 12 DC bus voltage fluctuation during load input

5 结语

文中针对直流配电网受到负载突变、间歇性电源输出功率等扰动造成的直流母线电压波动,基于引入电流前馈及改善线性扩张状态观测器,提出了

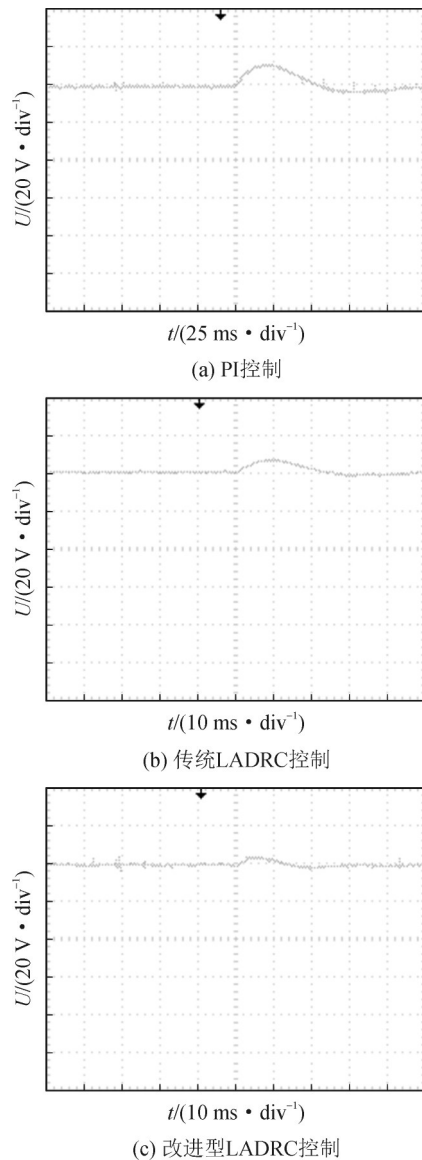


图 13 负荷切除时直流母线电压波动情况

Fig. 13 DC bus voltage fluctuation during load cutoff

表 2 投入负荷时实验数据

Table 2 Experimental data during load input

控制方式	电压跌落/V	调整时间/ms
PI	13	62
传统LADRC	8	22
改进型LADRC	5	15

表 3 切除负荷时实验数据

Table 3 Experimental data during load cutoff

控制方式	电压抬升/V	调整时间/s
PI	11	100
传统LADRC	8	20
改进型LADRC	4	13

一种改进型一阶LADRC控制器。经理论分析、仿真和实验验证,表明所提改进型LADRC具有良好的稳定性,在直流母线受到扰动冲击时仍能维持直流母

线电压稳定。相比于传统LADRC与PI控制,所提改进型LADRC对直流母线电压波动的抑制效果更佳,具有更加良好的动态性能,且参数整定简单、易于实现,拥有实际应用价值。

参考文献:

- [1] 胡鹏飞,朱乃璇,江道灼,等. 柔性互联智能配电网关键技术研究进展与展望[J]. 电力系统自动化,2021,45(8):1-12.
Hu Pengfei, Zhu Naixuan, Jiang Daozhuo, et al. Research progress and prospects of key technologies of flexible interconnected smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021,45(8):1-12.
- [2] 张智,徐永海,张世聪,等. 直流配电网电能质量指标研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2025,53(3):172-187.
Zhang Zhi, Xu Yonghai, Zhang Shicong, et al. Review of power quality indices of a DC distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2025,53(3):172-187.
- [3] 李彦晨,贾燕冰,谢栋,等. 计及电能质量影响的配电网风储优化配置[J]. 电网技术,2023,47(6):2391-2402.
Li Yanchen, Jia Yanbing, Xie Dong, et al. Optimal configuration of wind turbine and energy storage system in distribution network considering influence of power quality[J]. Power System Technology, 2023,47(6):2391-2402.
- [4] 张沈习,王丹阳,程浩忠,等. 双碳目标下低碳综合能源系统规划关键技术及挑战[J]. 电力系统自动化,2022,46(8):189-207.
Zhang Shenxi, Wang Danyang, Cheng Haozhong, et al. Key technologies and challenges of low-carbon integrated energy system planning for carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022,46(8):189-207.
- [5] 刘沛津,石梦涛,何林,等. 中低压直流配电网母线电压稳定控制[J]. 电力自动化设备,2022,42(2):120-125.
Liu Peijin, Shi Mengtao, He Lin, et al. Stability control of bus voltage for medium- and low-voltage DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022,42(2):120-125.
- [6] 周琦,张正涛,张敬昊,等. 基于PI-MPC的中压直流配电网自取能电路控制策略研究[J]. 电器与能效管理技术,2025(11):20-25.
Zhou Qi, Zhang Zhengtao, Zhang Jinghao, et al. Research on control strategy of self-powered circuit in medium voltage DC distribution network based on PI-MPC[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2025(11):20-25.
- [7] 李经儒,潘峰,杨雨瑶,等. 考虑源荷随机性与相关性的直流配电网量测概率优化配置方法[J]. 电测与仪表,2024,61(7):138-145.
Li Jingru, Pan Feng, Yang Yuyao, et al. Stochastic optimal placement method of measurement for DC distribution network considering probability and correlation of source load[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024,61(7):138-145.
- [8] 韩民晓,谢文强,曹文远,等. 中压直流配电网应用场景与系统设计[J]. 电力系统自动化,2019,43(23):1-11.
Han Minxiao, Xie Wenqiang, Cao Wenyan, et al. Application

- scenarios and system design of medium-voltage DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 1-11.
- [9] Jiang Songhan, Peng Ke, Xu Bingyin, et al. Present situation and prospect of DC distribution system demonstration project[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 219-231.
- [10] 秦昌民, 马兆兴, 朱文杰. 电力电子化不利于电力系统的小扰动稳定性[J]. 济南大学学报, 2023, 37(3): 316-321.
- Qin Changmin, Ma Zhaoxing, Zhu Wenjie. Power electronics is detrimental to the small disturbance stability of power systems[J]. Journal of University of Jinan, 2023, 37(3): 316-321.
- [11] Wang Kai, Yuan Xibo. Stability analysis of the virtual inductance for LCL filtered droop - controlled grid - connected inverters[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(3): 2685-2698.
- [12] 辛保安, 郭铭群, 王绍武, 等. 适应大规模新能源友好送出的直流输电技术与工程实践[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(22): 1-8.
- Xin Baoan, Guo Mingqun, Wang Shaowu, et al. Friendly HVDC transmission technologies for large - scale renewable energy and their engineering practice[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 1-8.
- [13] 唐欣, 屈贝, 张睿宁, 等. 多端直流配电系统负载变流器相位补偿控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(2): 50-61.
- Tang Xin, Qu Bei, Zhang Ruining, et al. Phase compensation control strategy for load converters in multi - terminal DC distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(2): 50-61.
- [14] Xie Zhiwei, Chen Yandong, Wu Wenhua, et al. Admittance modeling and stability analysis of grid-connected inverter with LADRC-PLL[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(12): 12272-12284.
- [15] 曹文远, 韩民晓, 谢文强, 等. 基于扰动观测器的电压源型逆变器负载电流前馈控制及参数设计方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(4): 862-873.
- Cao Wenyuan, Han Minxiao, Xie Wenqiang, et al. A disturbance-observer - based load current feedforward control and parameter design method for voltage - sourced inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(4): 862-873.
- [16] Wang Chengshan, Li Xialin, Guo Li, et al. A nonlinear-disturbance-observer - based DC - bus voltage control for a hybrid AC/DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(11): 6162-6177.
- [17] 胡长斌, 王海鹏, 罗珊珊, 等. 基于鲁棒扰动观测器的直流微电网电压动态补偿控制[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(5): 207-214.
- Hu Changbin, Wang Haipeng, Luo Shanna, et al. Voltage dynamic compensation control of DC microgrid based on robust disturbance observer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5): 207-214.
- [18] Gao Zhiqiang. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning[C]//Proceedings of the 2003 American Control Conference, 2003: 4989-4996.
- [19] Xu Jinming, Xie Shaojun. LCL-resonance damping strategies for grid-connected inverters with LCL filters: a comprehensive review[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(2): 292-305.
- [20] 韩永强, 徐明忻, 孙 磊, 等. 改进LADRC的储能逆变器直流母线电压控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(1): 13-21.
- Han Yongqiang, Xu Mingxin, Sun Jie, et al. Improved DC bus voltage control of LADRC energy-storage inverter[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(1): 13-21.
- [21] Lin Ping, Wu Zhen, Fei Zhongyang, et al. A generalized PID interpretation for high - order LADRC and cascade LADRC for servo systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(5): 5207-5214.
- [22] 陈超波, 王霞霞, 高 嵩, 等. 基于区间滑模观测器的逆变器开路故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(14): 4569-4579.
- Chen Chaobo, Wang Xiaxia, Gao Song, et al. A diagnosis method for open-circuit faults in inverters based on interval sliding mode observer[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4569-4579.
- [23] 孙 斌, 王海霞, 苏 涛, 等. 永磁同步电机调速系统非线性自抗扰控制器设计与参数整定[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(20): 6715-6725.
- Sun Bin, Wang Haixia, Su Tao, et al. Nonlinear active disturbance rejection controller design and tuning for permanent magnet synchronous motor speed control system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(20): 6715-6725.
- [24] Zhang Chenghui, Li Xiaoyan, Xing Xiangyang, et al. Modeling and mitigation of resonance current for modified LCL - type parallel inverters with inverter-side current control[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(2): 932-942.
- [25] 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 based on improved active disturbance rejection[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(10): 65-72.
- [26] Hou Xiaochao, Sun Kai, Zhang Xin, et al. A hybrid voltage/current control scheme with low-communication burden for grid-connected series - type inverters in decentralized manner[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(1): 920-931.
- [27] Kumar A, Anwar M N, Kumar S. Sliding mode controller design for frequency regulation in an interconnected power system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 6.
- 包伟奇(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为直流配电网电压质量(E-mail: 1243765482@qq.com)。
- 韩民晓(1963—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为电力电子技术应用在电力系统中的应用(通信作者)(E-mail: corresponding_han@163.com)。