

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240068

T型三电平储能变流器直流母线电压改进自抗扰控制

周杰¹, 皇金锋¹, 黄红杰¹, 王嘉力², 傅作超²

(1. 陕西理工大学电气工程学院, 陕西 汉中 723001; 2. 西安星源博锐新能源技术有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要: 针对T型三电平储能变流器在受到扰动时直流母线电压容易波动的问题, 提出了一种改进的线性自抗扰控制(linear active disturbance rejection control, LADRC)方法以增强直流母线电压的控制稳定性。该方法对线性扩张状态观测器(linear extended state observer, LESO)进行了改进。首先, 引入总扰动微分状态变量以提升扰动观测能力。其次, 对观测器进行降阶处理, 一方面降低观测器设计复杂度, 另一方面降低相位滞后, 提升扰动估计速度。最后, 在总扰动通道上增加一个滞后补偿环节减弱噪声放大影响。通过上述改进实现了对系统总扰动的精确快速估计。基于频域分析, 得出改进后的LADRC相比传统LADRC具有更优秀的抗扰性能。多组实验结果均表明, 与PI控制和传统LADRC相比, 在有功功率突变、无功功率突变以及电网电压跌落情况下, 所提控制策略的直流母线电压超调量更小, 暂态时间更短, 验证了所提方法的有效性, 保证了储能变流器的正常平稳运行。

关键词: T型三电平储能变流器; 母线电压波动; 自抗扰控制; 观测器; 频域分析

DC bus voltage improved active disturbance rejection control of a T-type three-level energy storage converter

ZHOU Jie¹, HUANG Jinfeng¹, HUANG Hongjie¹, WANG Jiali², FU Zuochao²

(1. School of Electrical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China;

2. Xi'an Xingyuan Bo Rui New Energy Technology Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: To address the issue of DC bus voltage fluctuation in a T-type three-level power conversion system when subjected to disturbance, an improved linear active disturbance rejection control (LADRC) method is proposed to enhance the control stability. This method improves the linear extended state observer (LESO) by first introducing a total disturbance differential state variable to enhance disturbance observation capability. Secondly, the observer is reduced to reduce both design complexity and phase lag, thereby improving disturbance estimation speed. Finally, a lag compensation loop is added on the total disturbance channel to attenuate noise amplification effects, achieving accurate and fast estimation of system total disturbances. Based on frequency domain analysis, it is found that the improved LADRC has better disturbance rejection performance than traditional LADRC. Multiple sets of experimental results demonstrate that compared with PI control and traditional LADRC, this strategy exhibits smaller overshoot and shorter transient time for DC bus voltage during active power transients, reactive power transients, and grid voltage drops. This validates the effectiveness of the proposed method and ensures normal and stable operation of the energy storage converter.

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

Key words: T-type three-level energy storage converter; DC bus voltage fluctuation; active disturbance rejection control; observer; frequency domain analysis

0 引言

随着传统不可再生能源枯竭问题和环境问题的日益严重, 能源结构逐渐向绿色、环保和低碳的趋

势发展^[1-4]。在此背景下, 以风能和太阳能为代表的新能源发电在电力系统中呈现出高渗透率, 截至2023年11月底, 中国累计太阳能发电装机容量约5.6亿kW, 风电装机容量约4.1亿kW^[5]。然而可再生能源具有间歇性和波动性的特点, 直接并入电网会引起电网电压和频率的波动, 对电网的稳定运行

基金项目: 陕西省自然科学基金项目资助(2023-JC-YB-442)

造成负面影响^[6-8]。为此,需要加入储能装置接受分布式发电的功率调度,消纳可再生能源功率的输出。

储能装置需要依靠电力电子变流器连接至电网,两者一起组成了储能变流器。储能变流器按照电平数可分为两电平、三电平和多电平拓扑,电平数越多电能质量越好,谐波含量越少,但结构复杂度和控制难度也会随之增加。综合控制难度和实际效果,本文选择更具实用价值的 T 型三电平拓扑作为研究对象,目前三电平拓扑已广泛应用于中高压场合^[9-10]。

由于储能变流器是一个多变量、强耦合的动力系统,传统的 PI 控制解耦能力有限,难以满足精度要求,不能很好地抑制直流母线电压波动。因此,寻找一种稳定可靠的控制方法具有重要的意义。自抗扰控制最初是由文献[11]提出并完善的现代控制理论,其核心是通过扩张状态观测器对系统内外总扰动进行估计,并通过状态误差反馈律对扰动进行补偿,将系统转化为积分串联型进行控制,具有很强的鲁棒性。由于非线性自抗扰控制器参数众多且调参困难,文献[12]提出了基于带宽法的线性自抗扰控制(linear active disturbance rejection control, LADRC),提高了自抗扰控制的工程实用性。在微电网领域:文献[13]为了提高 LCCL 型并网逆变器的并网电流质量和系统稳定性,采用 LADRC 代替了 PI 控制;文献[14]在光伏并网系统的直流母线电压控制中使用 LADRC 显著提高了系统的跟踪性能、抗扰能力和鲁棒性;文献[15]在风电机组上设计了虚拟惯量一阶 LADRC,减少了微网的暂态频率偏差和时间。此外,LADRC 在伺服控制系统^[16]、电磁悬浮系统^[17]、脱硝系统^[18]等领域均有应用,成为了继 PID 控制后的又一经典控制。

在 LADRC 迅猛发展的同时,一些学者意识到扩张状态观测器(linear extended state observer, LESO)的观测精度会影响 LADRC 对系统总扰动的观测能力,传统的 LESO 对扰动存在观测残留且相位滞后现象较为严重,极大地限制了 LADRC 的性能。针对这一现象,一部分学者选择结合其他控制方法提高 LADRC 的性能,例如:文献[19]提出结合 BP 神经网络和 LADRC 实现快速刀具伺服系统的精密跟踪控制;文献[20]提出基于 LADRC 和积分滑模的融合控制方法提高了压电纳米定位阶段的跟踪性能;文献[21]在永磁同步电机中将高频电流注入法和 LESO 相结合形成了一种无位置传感器控制策略,降低了观测器的相位滞后。上述文献虽然提高了控制性能,但改进后的控制器设计复杂,增

加了应用成本。另外一部分学者从观测器本身出发,例如:文献[22]在 LESO 中引入状态变量的变化趋势用于产生早期校正信号,有效削弱了干扰对微电网负荷接口输出的影响;文献[23]利用级联的 LESO 提升了 LADRC 对斜坡扰动的估计和补偿能力,提高了 Buck 变换器的输出电压稳定性;文献[24]对 LESO 进行降阶处理提升观测器的观测速度,有效改善了 Buck 变换器的鲁棒性。

根据以上研究成果,本文在传统 LADRC 的基础上,对 LESO 进行改进,提升其对总扰动的观测精度和速度,进而提出改进 LADRC 以增强直流母线电压控制的稳定性。主要工作包括:1)建立了 T 型三电平储能变流器的数学模型;2)介绍了一种改进 LESO,通过时域和频域详细分析了改进 LESO 和改进 LADRC 的性能;3)给出了 T 型三电平储能变流器的整体控制策略框图,并设计了零序分量注入法保证中点电位的平衡;4)通过实验验证了理论分析的正确性。

1 T 型三电平储能变流器概述

1.1 系统数学建模

储能变流器的拓扑结构如图 1 所示,由储能电池、斩波器、变流器、滤波电路和电网组成。定义图中: $T_{k1} - T_{k4}$ 为变流器单元的开关管, $k = a, b, c$,且 T_{k1} 和 T_{k3} 互补导通, T_{k2} 和 T_{k4} 互补导通; T_5 、 T_6 为斩波器单元的一对互补导通开关管;储能电池输出的电压为 u_{bat} ,输出的电流为 i_L ,也即流过斩波器滤波电感 L_{dc} 的电流;储能电池经过斩波器之后将电压抬高至 u_{dc} ,输出的电流为 i_{dc} ;变流器交流侧每相输出的电压为 u_k ,输出的电流为 i_k ; L 和 R 分别为滤波电感和电路等效电阻;直流母线电压通过直流母线电容 C_{dc1} 和 C_{dc2} 钳位成 P、O、N 三个等级。

根据图 1 所示结构可建立储能变流器的数学模型,但变流器部分的电压和电流为随时间变化的交流量,为方便控制器设计,通过 Park 变换建立变流器部分在两相旋转 dq 轴坐标系下的数学模型如式(1)所示。

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = e_d - Ri_d + \omega Li_q - u_d \\ L \frac{di_q}{dt} = e_q - Ri_q - \omega Li_d - u_q \end{cases} \quad (1)$$

式中: i_d 、 i_q 分别为 i_k 在 d 、 q 轴上的分量; u_d 、 u_q 分别为 u_k 在 d 、 q 轴上的分量; e_d 、 e_q 分别为电网电压在 d 、 q 轴上的分量; ω 为系统角频率。

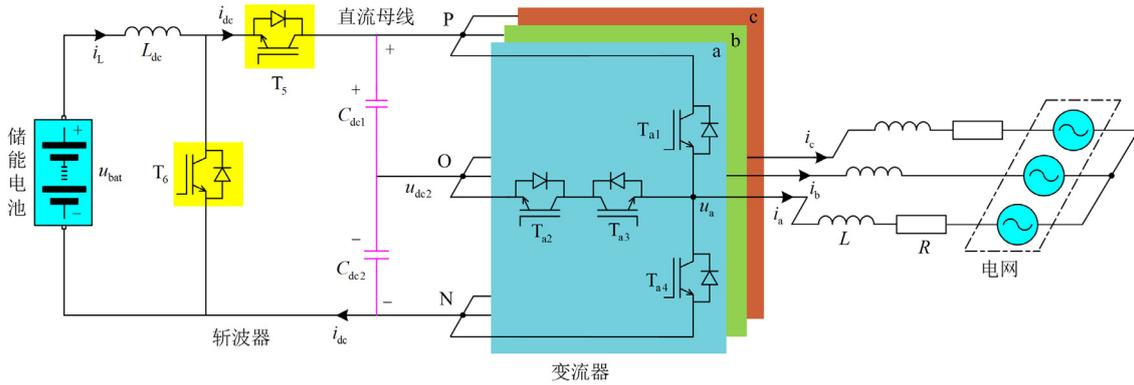


图 1 T 型三电平储能变流器拓扑结构

Fig. 1 Topology of T-type three-level energy storage converter

定义 S_{k1} 为 T_{k1} 的开关函数, S_{k4} 为 T_{k4} 的开关函数, 可推导出直流母线电压的数学表达式为

$$\begin{cases} C_{dc1} \frac{du_{dc1}}{dt} = i_{dc} - 1.5(S_{d1}i_d + S_{q1}i_q) \\ C_{dc2} \frac{du_{dc2}}{dt} = i_{dc} + 1.5(S_{d4}i_d + S_{q4}i_q) \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_{dc1} 、 u_{dc2} 分别为电容 C_{dc1} 、 C_{dc2} 两端的电压; S_{d1} 、 S_{q1} 分别为开关函数 S_{k1} 在 d 、 q 轴上的分量; S_{d4} 、 S_{q4} 分别为开关函数 S_{k4} 在 d 、 q 轴上的分量。

在实际应用中, 上下桥臂的电容大小相等, 均为 C , 因此可以将式(2)化简为

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = 2i_{dc} - 1.5[(S_{d4} - S_{d1})i_d + (S_{q4} - S_{q1})i_q] \quad (3)$$

1.2 直流母线电压分析

定义储能变流器输出功率为 P_g , 储能电池输出功率为 P_{bat} , 如果忽略斩波器和变流器的功率损耗, 则流过直流母线电容的功率 P_{dc} 可描述为

$$P_{dc} = P_g - P_{bat} = C \frac{du_{dc}^2}{dt} \quad (4)$$

根据功率瞬时值理论, 当储能变流器输出电压 d 轴分量与电网电压矢量对齐时, P_g 表达式为

$$P_g = 1.5e_d i_d \quad (5)$$

联立式(4)和式(5)可得

$$P_{dc} = 1.5e_d i_d - P_{bat} \quad (6)$$

在稳态运行时 $P_g = P_{bat}$, 即 $P_{dc} = 0$, 直流母线电压稳定在标称值。储能变流器采用电压外环电流内环控制^[25], 在暂态运行时, 有功功率指令变化时会导致 P_{bat} 变化, 电网电压暂降时会引起 e_d 变化, 虽然无功功率指令变化时会直接导致 i_q 变化, 但由式(1)可知, i_d 和 i_q 存在耦合关系, 会引起 i_d 变化。

根据式(6), 上述 3 种工况均会引起 $P_{dc} \neq 0$, 使得能量利用率下降, 同时由式(4)可知, u_{dc} 会发生剧烈振荡, 引起直流母线电容电流突变, 严重时还会击穿电容引起系统失稳^[26]。因此, 保证直流母线电压在各种工况下的鲁棒性具有重要的意义。

2 改进 LADRC 设计

以直流母线电压为状态变量, 联立式(1)和式(3)可得关于 u_{dc} 的二阶微分方程, 如式(7)所示。

$$\frac{d^2 u_{dc}}{dt^2} = b i_d + f \quad (7)$$

式中: b 为控制增益; f 为总扰动变量。相关表达式为

$$\begin{cases} b = \frac{1.5}{C} \left[\frac{R}{L} (S_{d4} - S_{d1}) + \omega (S_{q4} - S_{q1}) \right] \\ f = \frac{1.5}{LC} [(S_{d1} - S_{d4})(e_d + \omega L i_q - u_d) + (S_{q1} - S_{q4})(e_q - R i_q - u_q)] + \frac{2}{C} \frac{di_{dc}}{dt} \end{cases}$$

式(7)中的参数 b 依赖于 R 、 L 、 C 数值的精确性, 在实际情况中受到温度和老化等因素影响, 这些电路参数的实际取值并不为标称值。根据 LADRC 不需要精确数学模型的特点, 式(7)可变为

$$\frac{d^2 u_{dc}}{dt^2} = f_n - b_0 i_d \quad (8)$$

式中: b_0 为参数 b 的名义值; $f_n = b_0 i_d + b i_d + f$ 。

为方便设计自抗扰控制器, 令 $x_1 = u_{dc}$, $x_2 = \dot{u}_{dc}$, $x_3 = f_n$, $h = \dot{f}_n$, $u = i_d$, 系统状态方程可表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 - b_0 u \\ \dot{x}_3 = h \end{cases} \quad (9)$$

针对式(9)所示状态方程可在 T 型储能变流器中建立改进 LADRC 保证直流母线电压的稳定, 如图 2 所示。图中: φ_2 、 φ_5 为 x_2 、 x_3 的估计值; u_{ref} 为 u_{dc} 的估计值; u_0 为状态误差反馈律的输出; u 为系统的输出。

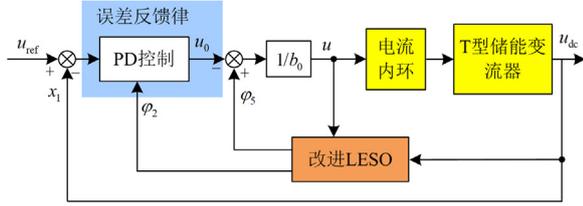


图 2 改进 LADRC 的结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of improved LADRC

2.1 改进 LESO 设计

作为 LADRC 的核心, 在控制上希望 LESO 能准确且迅速地观测系统的总扰动, 然而传统 LESO 对系统的总扰动观测存在残留。为此, 本文通过增加对总扰动微分的观测提升扰动估计能力, 改进后的 LESO 设计为

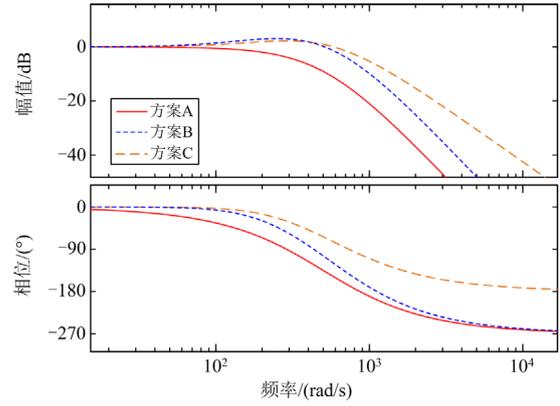
$$\begin{cases} \dot{\varphi}_1 = 4\omega_0(x_1 - \varphi_1) \\ \dot{\varphi}_2 = \varphi_3 + 6\omega_0^2(x_1 - \varphi_1) - b_0u \\ \dot{\varphi}_3 = \varphi_4 + 4\omega_0^3(x_1 - \varphi_1) \\ \dot{\varphi}_4 = \omega_0^4(x_1 - \varphi_1) \end{cases} \quad (10)$$

式中: φ_1 、 φ_3 分别为 x_1 、 x_3 的估计值; φ_4 为 h 的估计值; ω_0 为观测器带宽。

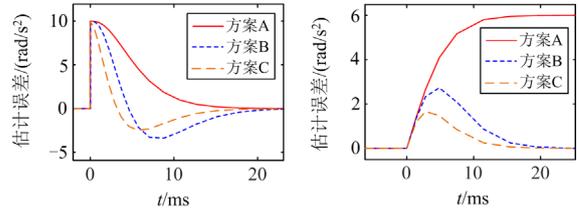
与传统 LESO 相比, 式(10)通过引入总扰动微分信号, 更加高效地观测扰动的变化趋势, 有效提升了扰动观测能力, 但 φ_4 的引入使得状态变量增加, 提高了 LESO 的设计复杂度。由于 φ_1 是 x_1 的估计值, 而 x_1 是已知的, 故无须对 x_1 进行估计, 本文基于此思想将式(10)降阶处理为

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_2 = \varphi_3 + 3\omega_0(x_2 - \varphi_2) - b_0u \\ \dot{\varphi}_3 = \varphi_4 + 3\omega_0^2(x_2 - \varphi_2) \\ \dot{\varphi}_4 = \omega_0^3(x_2 - \varphi_2) \end{cases} \quad (11)$$

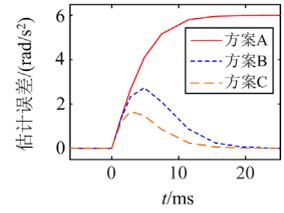
式(11)的状态变量为 3 个, 与传统 LESO 相比, 改进后的 LESO 具有相同的结构, 因此降阶处理降低了控制复杂度。为了更好地体现改进 LESO 的作用和效果, 令 $\omega_0 = 500 \text{ rad/s}$, 绘制在不同观测器下的扰动估计传递函数频率特性曲线, 对比如图 3(a)所示, 不同观测器在幅值为 10 的阶跃信号作用下的扰动误差时域响应曲线对比如图 3(b)所示, 不同观测器在斜率为 100 的斜坡信号作用下的扰动误差时域响应曲线对比如图 3(c)所示。



(a) 扰动估计传递函数频率特性曲线



(b) 阶跃信号扰动响应



(c) 斜坡信号扰动响应

图 3 不同观测器扰动观测性能对比

Fig. 3 Comparison of disturbance observation performance of different observers

图 3 中, 方案 A 为传统的 LESO, 方案 B 为式(10)所示加入总扰动微分的 LESO, 方案 C 为式(11)所示的本文改进 LESO。对比方案 A 和方案 B 可知, 通过加入系统总扰动微分提升了扰动估计能力, 在斜坡扰动作用下仍可精确估计总扰动, 但在阶跃扰动作用时, 与传统 LESO 相比估计速度并未提升。对比方案 B 和方案 C 可知, 对观测器进行降阶处理后, 无论是在阶跃扰动作用下还是斜坡扰动作用下, 降阶处理后的 LESO 具有更快的扰动估计速度。

综上可得, 改进后的 LESO 主要有以下优势:

- 1) 提升了观测器的扰动估计能力;
- 2) 提高了观测器的扰动估计速度;
- 3) 与传统 LESO 相比并未提升控制复杂度。

虽然本文所提改进 LESO 对扰动的观测具有优秀的性能, 但通过图 3 可以发现, 本文所提改进 LESO 的噪声放大现象也最明显。为此, 本文在总扰动通道上增加一个滞后补偿环节来解决这一问题, 滞后补偿环节设计为

$$\varphi_5 = \frac{T_c s + 1}{\alpha T_c s + 1} \varphi_3 \quad (12)$$

式中: T_c 为滞后时间常数; α 为大于 1 的常数。

令 $\omega_0 = 500 \text{ rad/s}$, $T_c = 0.001 \text{ s}$, 加入滞后补偿环节的改进 LESO 扰动估计传递函数频率特性曲线

在不同 α 值下的对比如图4所示。

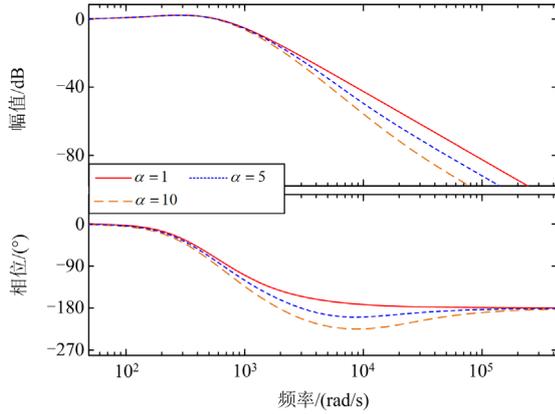


图4 滞后补偿环节对LESO噪声抑制能力的影响

Fig. 4 Effect of delay compensation on noise suppression ability of LESO

由图4可知,随着 α 的增大,改进LESO扰动估计传递函数的中低频增益保持不变,高频增益逐渐减小,且相位滞后程度基本不变。当 $\alpha=1$ 时,相当于未加滞后补偿环节。图4表明,通过增加矫正环节能在一定程度上降低观测器的噪声放大效应。

建立式(11)所示观测器需要知道 x_2 的值,最直接方法是对 x_1 求差分,但在工程上这无疑会加大计算量,并给系统带来微分噪声。为规避这一问题,本文引入中间变量 z_2 、 z_3 和 z_4 ,式(11)可变为

$$\begin{cases} \varphi_2 = z_2 + 3\omega_0 x_1 \\ \varphi_3 = z_3 + 3\omega_0^2 x_1 \\ \varphi_4 = z_4 + \omega_0^3 x_1 \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中,中间变量 z_2 — z_4 可表示为

$$\begin{cases} \dot{z}_2 = z_3 - 6\omega_0^2 x_1 - 3\omega_0 z_2 - b_0 u \\ \dot{z}_3 = z_4 - 8\omega_0^3 x_1 - 3\omega_0^2 z_2 \\ \dot{z}_4 = -\omega_0^3 z_2 - 3\omega_0^4 x_1 \end{cases} \quad (14)$$

通过式(13)和式(14)的变换,仅需知道 x_1 即可建立改进LESO,降低了实现难度。至此,改进LESO设计完成,与之相对应的控制策略框图如图5所示。

2.2 误差反馈律设计

对于二阶LADRC而言,为了让系统转化为积分串联器,在设计线性误差反馈控制律(见图2)时应采用PD控制组合,其形式为

$$u_0 = \omega_c^2 (u_{\text{ref}} - x_1) - 2\omega_c \varphi_2 \quad (15)$$

式中, ω_c 为控制器带宽。

联立式(9)、式(11)、式(12)和式(15)可得最终的控制律为

$$u = \frac{\varphi_5 - u_0}{b_0} \quad (16)$$

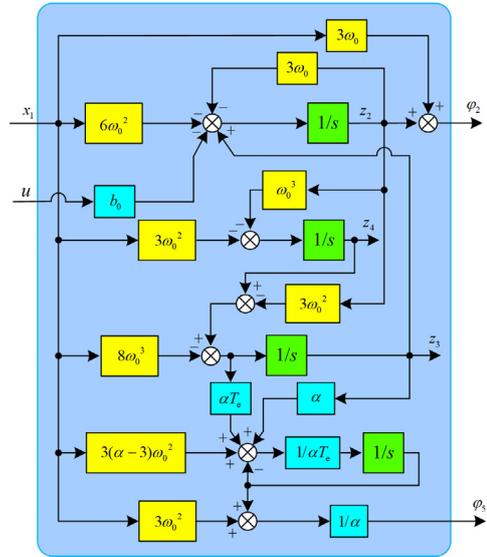


图5 改进LESO控制策略框图

Fig. 5 Block diagram of improved LESO control strategy

3 改进型LADRC频域特性分析

在理论上已经证明改进LESO具有良好的扰动观测性能,本节将结合被控对象验证改进LADRC的抗扰性能。

联立式(12)一式(16)并进行拉普拉斯变换可得

$$u = \frac{G_1(s)}{b_0} [u_{\text{ref}} \omega_c^2 - G_2(s) u_{\text{dc}}] \quad (17)$$

式中, $G_1(s)$ 、 $G_2(s)$ 的详细表达式为

$$G_1(s) = \frac{-(1 + \alpha T_e s)(s + \omega_0)^3}{\alpha T_e s^4 + G_{11} s^3 + G_{12} s^2 + G_{13} s}$$

$$G_2(s) = G_{21} + G_{22} + \omega_c^2$$

$$G_{11} = 1 + \alpha T_e (3\omega_0 + 2\omega_c); \quad G_{13} = (\alpha - 1) T_e \omega_0^3$$

$$G_{12} = 3\omega_0 (1 - T_e \omega_0 + \alpha T_e \omega_0) + 2\omega_c$$

$$G_{21} = \frac{(1 + s T_e)(3s + \omega_0) \omega_0^2 s^2}{(1 + \alpha s T_e)(s + \omega_0)^3}$$

$$G_{22} = \frac{2\omega_0 (3s^2 + 3s\omega_0 + \omega_0^2) \omega_c s}{(s + \omega_0)^3}$$

由式(9)可得系统输入与输出之间的关系为

$$u_{\text{dc}} = \frac{1}{s^2} (-b_0 u + f_n) \quad (18)$$

联立式(17)和式(18)可得系统的结构框图,如图6所示。

基于图6,可得系统的闭环传递函数为

$$u_{\text{dc}} = \frac{f_n - \omega_c^2 G_1(s) u_{\text{ref}}}{s^2 - G_1(s) G_2(s)} \quad (19)$$

将 $G_1(s)$ 、 $G_2(s)$ 的表达式代入式(19)可得式(20)。

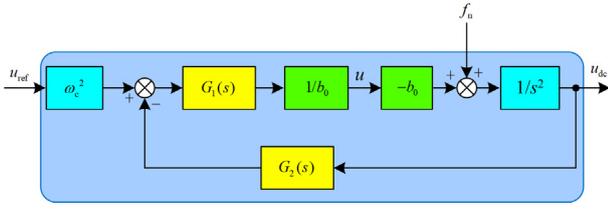


图6 改进 LADRC 控制系统结构

Fig. 6 Structure of improved LADRC control system

$$u_{dc} = \frac{\omega_c^2 u_{ref}}{(s + \omega_c)^2} + \frac{\omega_0^2 (\alpha - 1)(\omega_0 + 3s)Tf_n s}{(1 + \alpha Ts)(s + \omega_0)^3 (s + \omega_c)^2} + \frac{(3\omega_0 + s + 2\omega_c)f_n s^2}{(s + \omega_0)^3 (s + \omega_c)^2} \quad (20)$$

同理,可推导出传统 LADRC 的闭环传递函数为

$$u_{dc} = \frac{\omega_c^2 u_{ref}}{(s + \omega_c)^2} + \frac{(s + \omega_c)^2 + 3\omega_0(s + 2\omega_c + \omega_0)}{(s + \omega_c)^2 (s + \omega_0)^3} s f_n \quad (21)$$

系统的输出由跟踪项和扰动项组成,对比式(20)和式(21)可知,与传统的 LADRC 相比,本文改进 LADRC 仅在扰动项上不同。也就是说,改进 LESO 的加入仅增加了对系统总扰动的观测能力,而不影响对系统状态变量的跟踪能力。

令 $\omega_0 = 500 \text{ rad/s}$, $\omega_c = 1000 \text{ rad/s}$, $T_c = 0.001 \text{ s}$, $\alpha = 5$,改进 LADRC 与传统 LADRC 的抗干扰性能对比如图 7 所示。由图 7 可知,在控制器带宽 ω_c 范围内,改进 LADRC 的幅值更低,表明通过的干扰信号更少,对系统扰动信号的抑制能力更强。相频特性中,改进 LADRC 在相同频率下的相位明显超前于传统 LADRC,能有效提升系统动态响应。

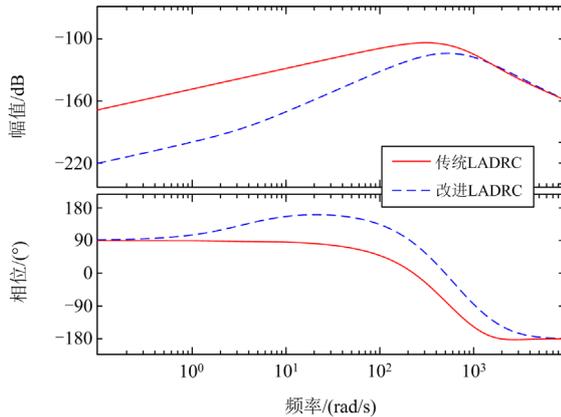


图7 改进 LADRC 与传统 LADRC 扰动抑制能力对比

Fig. 7 Comparison of disturbance suppression ability between improved LADRC and traditional LADRC

4 改进 LADRC 稳定性分析

改进 LADRC 稳定性由改进 LESO 稳定性决定。

联立式(11)和式(12)将观测器状态方程描述为

$$\dot{\xi} = A\xi + Bx_2 - Cu \quad (22)$$

式中:

$$A = \begin{bmatrix} -3\omega_0 & 1 & 0 & 0 \\ -3\omega_0^2 & 0 & 1 & 0 \\ -\omega_0^3 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{3\omega_0^2}{\alpha} & \frac{1}{\alpha T_c} & \frac{1}{\alpha} & -\frac{1}{\alpha T_c} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 3\omega_0 & 3\omega_0^2 & \omega_0^3 & \frac{3\omega_0^2}{\alpha} \end{bmatrix}^T$$

$$C = [b_0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad \xi = [\varphi_2 \ \varphi_3 \ \varphi_4 \ \varphi_5]^T$$

求解式(22)所示状态方程的特征多项式得

$$\det(\lambda I - A) = \frac{1}{\alpha T_c} [\omega_0^3 + (\alpha T_c \omega_0^3 + 3\omega_0^2)\lambda + (23)$$

$$(3\omega_0 + 3\alpha T_c \omega_0^2)\lambda^2 + (1 + 3\alpha T_c \omega_0)\lambda^3] + \lambda^4$$

式中: λ 为方阵 A 的特征值; I 为单位矩阵。

令式(23)为零,可求得各特征值,如式(24)所示。

$$\begin{cases} \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = -\omega_0 \\ \lambda_4 = -\frac{1}{\alpha T_c} \end{cases} \quad (24)$$

由式(24)可知,系统极点均在左半平面,所设计的观测器是稳定的。

5 系统整体设计

图 8 为储能变流器的整体控制策略。图中,斩波器的控制部分采用 PI 控制,控制储能变流器有功功率的输出;变流器的控制部分采用电压外环和电流内环复合控制,用以控制直流母线电压的稳定和储能变流器无功功率输出。其中,电压外环采用本文所设计的改进 LADRC,电流内环采用 PI 控制, P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为变流器输出有功功率、无功功率的参考值, i_{dref} 、 i_{qref} 分别为 i_d 、 i_q 的参考值, i_{dref} 可表示为电压外环的输出值, i_{qref} 可表示为

$$i_{qref} = -\frac{2Q_{ref}}{3e_d} \quad (25)$$

此外, T 型三电平变流器由于其自身的特点而存在中点电位不平衡的问题,会增加储能变流器交流侧输出电压和输出电流的谐波,同时直流母线上电容电压的不均衡还会影响电容的使用寿命。为解决这一问题,需要在原有调制波的基础上通过注入计算出的零序分量来维持中点电位平衡^[27]。

设 v_k 表示 k 相经过 SVPWM 算法后产生的调制波值, T_s 表示开关周期,则单位开关周期内流入中

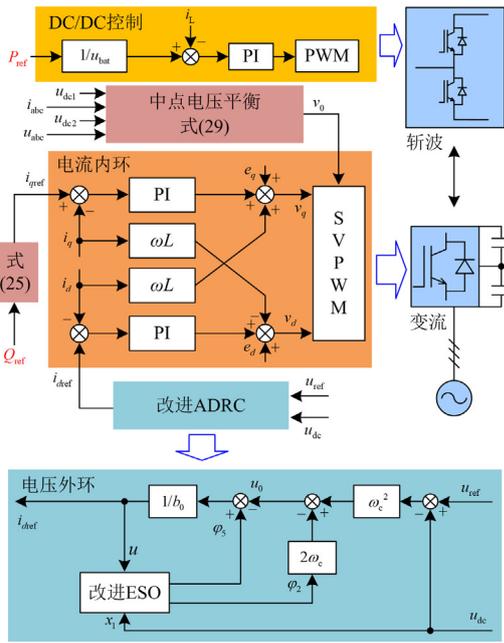


图 8 系统总体控制图

Fig. 8 Overall control diagram of the system

点的电荷 Q_1 为

$$Q_1 = (i_a + i_b + i_c - i_{npav})T_s \quad (26)$$

式中, $i_{npav} = \text{sign}(v_a)v_a i_a + \text{sign}(v_b)v_b i_b + \text{sign}(v_c)v_c i_c$, $\text{sign}(\cdot)$ 为符号函数。

设 v_0 为叠加的零序分量, 则零序分量在中点产生的电荷 Q_2 为

$$Q_2 = -[\text{sign}(v_a)i_a + \text{sign}(v_b)i_b + \text{sign}(v_c)i_c]v_0T_s \quad (27)$$

当单位周期内中性点电荷量为零时, 中性点电位处于平衡状态, 即

$$Q_1 + Q_2 + C_{dc1}u_{dc1} - C_{dc2}u_{dc2} = 0 \quad (28)$$

综合式(26)一式(28)可求得零序分量为

$$v_0 = \frac{(i_a + i_b + i_c - i_{npav})T_s + C_{dc1}u_{dc1} - C_{dc2}u_{dc2}}{[\text{sign}(v_a)i_a + \text{sign}(v_b)i_b + \text{sign}(v_c)i_c]T_s} \quad (29)$$

6 实验验证

为进一步验证理论分析的正确性, 将图 1 所示系统运行在硬件在环测试系统(hardware in the loop, HIL)中, 并采用 DSP 进行控制, 实验平台原理示意如图 9 所示, 相关的实验参数如表 1、表 2 所示。

1) 实验一: 有功功率指令突变

当储能变流器的有功功率指令由吸收 10 kW 突变为发出 20 kW 时, 不同控制策略下的直流母线电压 u_{dc} 波动情况如图 10 所示。

由图 10 可知: u_{dc} 在经典 PI 控制作用下暂态性

能最差, 超调量为 82 V, 暂态时间为 98 ms; 采用传统 LADRC 将暂态时间减少至 39 ms, 但电压超调量仍然较大, 超调量为 40 V; 采用本文改进 LADRC 相比前两者提高了控制性能, 超调量为 22 V, 暂态时间为 11 ms, 与 PI 控制相比超调量下降了 73.2%, 暂态时间减少了 88.7%, 与传统 LADRC 相比超调量下降了 45%, 暂态时间减少了 71.2%。

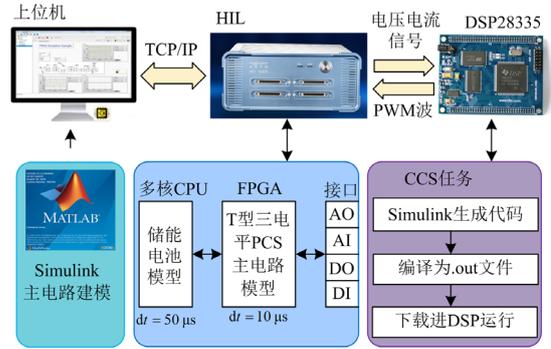


图 9 实验平台原理示意图

Fig. 9 Schematic diagram of experimental platform

表 1 电路拓扑参数

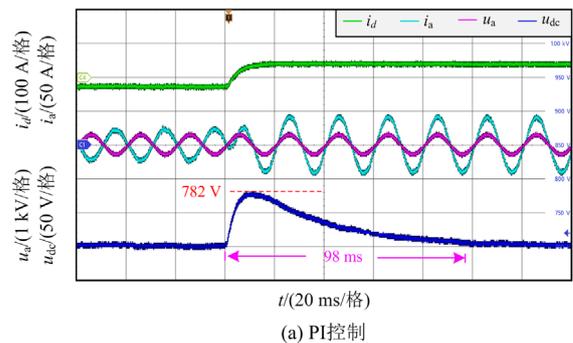
Table 1 Circuit topology parameters

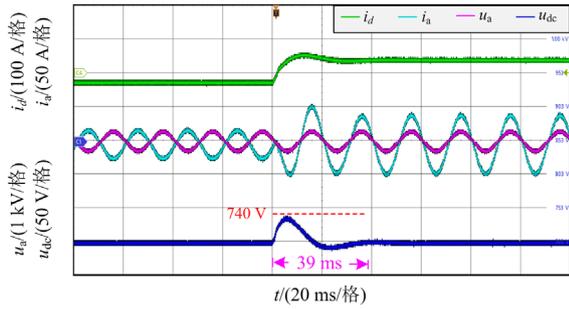
参数	数值
电网额定电压 u_n/V	380
直流母线电压 u_{dc}/V	700
变流器滤波电感 L/mH	1
电路等效电阻 R/Ω	0.01
直流稳压电容 C_{dc1} 、 C_{dc2}/mF	4.7
斩波器滤波电感 L_{dc}/mH	5
电池额定容量/Ah	100
电池标称电压 v_{bat}/V	400
电池初始荷电状态 SOC/%	50

表 2 控制电路参数

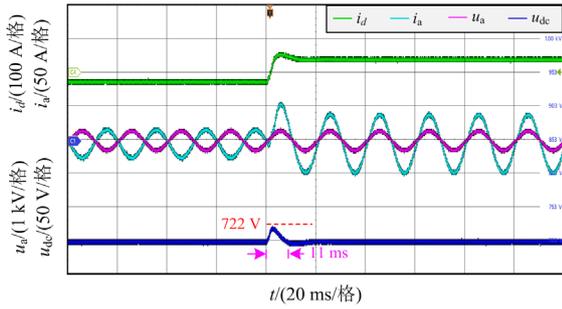
Table 2 Control circuit parameters

控制对象	PI 控制	传统 LADRC	改进 LADRC
电压外环	$k_p = 1$ $k_i = 50$	$\omega_0 = 1000$ $\omega_c = 2000$	$\omega_0 = 1000$ 、 $\alpha = 5$ $\omega_c = 2000$ 、 $T_c = 0.001$





(b) 传统LADRC



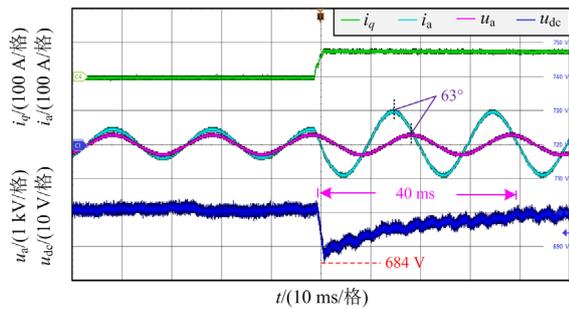
(c) 改进LADRC

图 10 有功功率突变时直流母线电压暂态过程

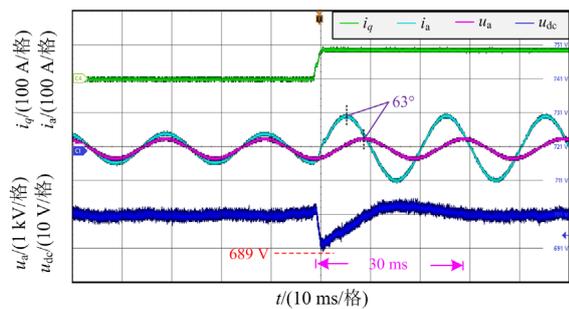
Fig. 10 Transient process of DC bus voltage when active power changes

2) 实验二：无功功率指令突变

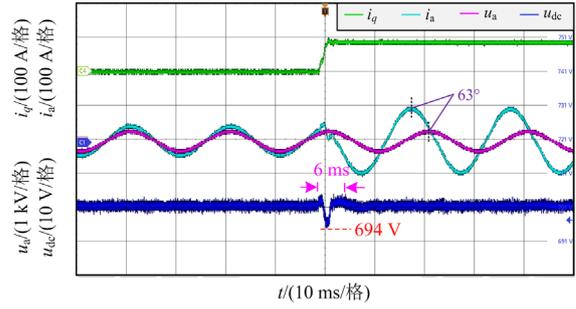
当储能变流器的容性无功功率指令由 0 kvar 突变为 40 kvar 时，不同控制策略下的直流母线电压 u_{dc} 波动情况如图 11 所示。



(a) PI控制



(b) 传统LADRC



(c) 改进LADRC

图 11 无功功率突变时直流母线电压暂态过程

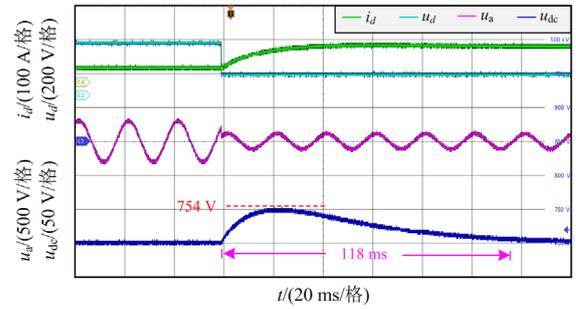
Fig. 11 Transient process of DC bus voltage when reactive power changes

图 11 中： u_{dc} 在 PI 控制作用下具有 16 V 的超调量，40 ms 的暂态时间；采用传统 LADRC 将电压超调量减少至 11 V，暂态时间减少至 30 ms；采用本文改进 LADRC 进一步提高了控制性能，超调量为 6 V，暂态时间为 6 ms，与 PI 控制相比超调量下降了 62.5%，暂态时间减少了 85%，与传统 LADRC 相比超调量下降了 45.4%，暂态时间减少了 80%。

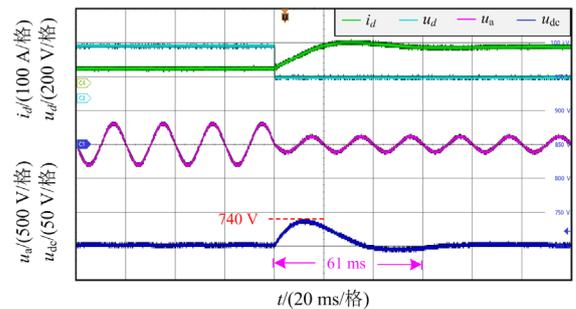
3) 实验三：电网电压暂降

考虑到实际工况会出现电网短路故障等问题，储能变流器在电网电压跌落期间应能支撑直流母线电压的稳定性。如图 12 所示，对系统进行 60% 的电网电压跌落测试。

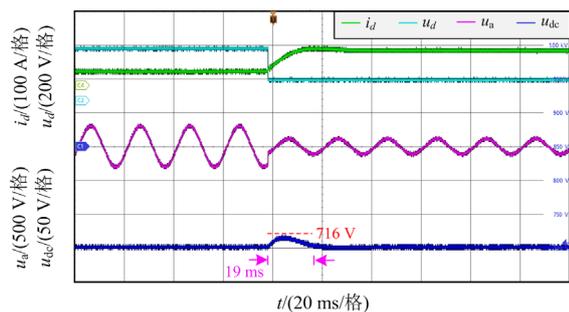
从图 12 可以看出：在 PI 控制下的 u_{dc} 超调量为 54 V，超调量最大，暂态时间为 118 ms，时间最长；



(a) PI控制



(b) 传统LADRC



(c) 改进LADRC

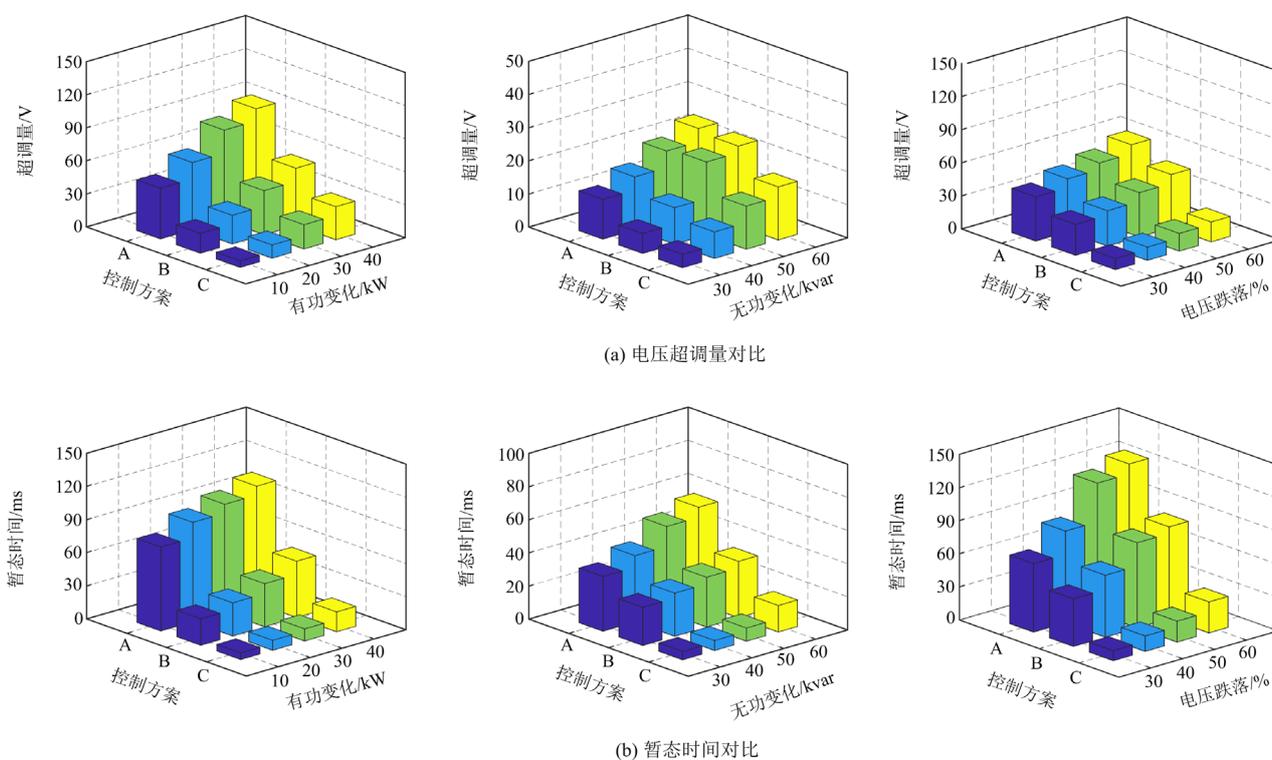
图 12 电网电压跌落时直流母线电压暂态过程

Fig. 12 Transient process of DC bus voltage when grid voltage drops

在传统 LADRC 下的性能有所提高,超调量为 40 V,暂态时间为 61 ms;在改进 LADRC 作用下的超调量仅为 16 V,暂态时间仅为 19 ms,与 PI 控制相比超调量下降了 70.4%,暂态时间减小了 83.9%,与传统 LADRC 相比超调量下降了 60%,暂态时间减小了 68.8%。

为进一步验证研究方法的有效性,排除偶然因素的影响,进行多组不同功率指令和电网电压突变的实验对比,实验结果如图 13 所示。

图 13 中,方案 A 表示 PI 控制,方案 B 表示传统 LADRC,方案 C 表示本文改进 LADRC。分别以有功功率输出 0 kW、容性无功功率输出 0 kvar、电



(a) 电压超调量对比

(b) 暂态时间对比

图 13 直流母线电压暂态性能对比

Fig. 13 Comparison of voltage transient performance of DC bus

网相电压峰值 311 V 为基准值,得出了当有功功率输出突变量为 10~40 kW,容性功率输出突变量为 30~60 kvar 以及电压跌落 30%~60%时,3 种控制策略下的电压超调量以及暂态时间对比。可以发现,在各种工况下的 PI 控制效果均为最差,传统 LADRC 效果其次,改进 LADRC 的暂态性能最好。

通过图 10—图 13 可以发现,本文通过改进 LADRC 在不同工况下均能有效提升直流母线电压的动态性能,减小直流母线电压的波动,验证了理论分析的正确性。

4) 实验四: 中点电位平衡算法验证

为了验证中点电位平衡算法的有效性,对系统进行了相关测试,如图 14 所示。由图 14 可知,在加入中点电位平衡算法时,电压 u_{dc1} 和 u_{dc2} 均可稳定在 350 V,保证了中点电位的平衡;当去掉中点电位平衡算法后, u_{dc1} 和 u_{dc2} 出现了较大偏差,也即中点电位会发生偏移,使得储能变流器内部元件功率分配不均,降低系统使用寿命。图 14 表明了本文所设计中点电位平衡算法的有效性。

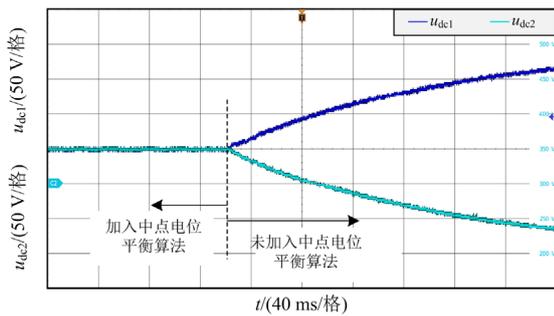


图 14 中点电位平衡算法有效性验证

Fig. 14 Validity verification of the midpoint potential balancing algorithm

7 结论

为了提高储能变流器的直流母线电压暂态性能, 本文以 T 型三电平储能变流器为例, 对 LESO 进行改进, 提出一种改进 LADRC, 并得出相关结论如下:

1) 通过频域和时域分析发现, 相比于传统 LESO, 改进后的 LESO 具有更快的扰动估计速度和更强的扰动估计能力, 并从理论上证明了改进 LADRC 的抗扰性能优于传统 LADRC;

2) 通过在不同工况下与 PI 控制和传统 LADRC 实验对比发现, 在改进后 LADRC 下的直流母线电压超调量更小, 暂态时间更短, 能更好地抑制直流母线电压波动。

参考文献

- [1] 齐金山, 姚良忠, 廖思阳, 等. 高比例新能源电力系统静态电压稳定裕度在线概率评估[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 47-57.
QI Jinshan, YAO Liangzhong, LIAO Siyang, et al. Online probabilistic assessment of static voltage stability margin for power systems with a high proportion of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 47-57.
- [2] YANG Shuxia, ZHANG Yang, CHENG Xiaoyu. Economic modeling of distributed photovoltaic penetration considering subsidies and countywide promotion policy: an empirical study in Beijing[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2022, 14(5).
- [3] ANSARI S, ZHANG Jing, SINGH R E. A review of stabilization methods for DCMG with CPL, the role of bandwidth limits and droop control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(1): 1-12.
- [4] 刘沅昆, 张维静, 张艳, 等. 面向新型电力系统的新能源与储能联合规划方法[J]. 智慧电力, 2022, 50(10): 1-8.

- LIU Yuankun, ZHANG Weijing, ZHANG Yan, et al. Joint planning method of renewable energy and energy storage for new-type power system[J]. Smart Power, 2022, 50(10): 1-8.
- [5] 中国政府网. 前 11 月风电太阳能发电新增装机超 2 亿千瓦[EB/OL]. [2024-01-07]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202312/content_6921808.html.
- [6] 贺敬, 李少林, 蔡玮, 等. 双重不确定性预测下风电场超短期有功优化控制[J]. 太阳能学报, 2023, 44(11): 270-278.
HE Jing, LI Shaolin, CAI Wei, et al. Optimal control of wind farm power based on double uncertainty prediction[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(11): 270-278.
- [7] 李登峰, 张澳归, 刘育明, 等. 考虑设备安全的新能源场站参与电网频率协调控制方法[J]. 智慧电力, 2023, 51(9): 8-15, 96.
LI Dengfeng, ZHANG Aogui, LIU Yuming, et al. Frequency coordination control method of power system contained renewable energy stations considering equipment safety[J]. Smart Power, 2023, 51(9): 8-15, 96.
- [8] 戴礼国, 杨浩, 陈力, 等. 基于深度强化学习的风电柔直并网系统次同步振荡抑制方法[J]. 智慧电力, 2023, 51(4): 1-7, 91.
DAI Ligu, YANG Hao, CHEN Li, et al. Subsynchronous oscillation suppression method for flexible direct grid-connected wind power system based on deep reinforcement learning[J]. Smart Power, 2023, 51(4): 1-7, 91.
- [9] 周思邈, 马伏军, 许明春, 等. 基于 T 型三电平变换器的优化损耗分布控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(24): 66-76.
ZHOU Simiao, MA Fujun, XU Mingchun, et al. Optimal loss distribution control strategy based on a T-type three-level converter[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(24): 66-76.
- [10] SRIVASTAVA A, SESHADRINATH J. A novel single phase three level triple boost cg switched-capacitor based grid-connected transformerless PV inverter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 59(2): 2491-2501.
- [11] 韩京清. 从 PID 技术到“自抗扰控制”技术[J]. 控制工程, 2002, 9(3): 13-18.
HAN Jingqing. From PID technique to active disturbances rejection control technique[J]. Control Engineering of China, 2002, 9(3): 13-18.
- [12] GAO Zhiqiang. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning[C]// Proceedings of the 2003 American Control Conference, June 4-6, 2003, Denver, CO, USA: 4989-4996.

- [13] HE Guofeng, CHEN Guanxu, DONG Yanfei, et al. Research on LADRC of grid-connected inverter based on LCCL[J]. *Energies*, 2022, 15(13): 4686-4697.
- [14] ZHOU Xuesong, LIU Qian, MA Youjie, et al. A modified LADRC-based DC-link voltage controller for photovoltaic grid-connected inverters[J]. *Electronics*, 2021, 10(8): 877-887.
- [15] 王义, 江汉红, 邢鹏翔. 风电机组虚拟惯量一阶自抗扰控制研究[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(4): 153-163.
WANG Yi, JIANG Hanhong, XING Pengxiang. Research of wind turbine virtual inertia first-order active disturbance rejection control[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2020, 41(4): 153-163.
- [16] 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.
- [17] YU Tongtong, ZHANG Zhizhou, LI Yang, et al. Improved active disturbance rejection controller for rotor system of magnetic levitation turbomachinery[J]. *Electronic Research Archive*, 2023, 31(3): 1570-1586.
- [18] 李炳楠, 朱峰, 梁正玉, 等. 基于改进自抗扰控制和数据驱动的脱硝系统设计及应用[J]. *控制理论与应用*, 2023, 40(6): 1034-1042.
LI Bingnan, ZHU Feng, LIANG Zhengyu, et al. Modified ADRC and data-driven for the denitration system design with its application[J]. *Control Theory & Applications*, 2023, 40(6): 1034-1042.
- [19] 刘文韬, 熊伟丽. 基于自抗扰的快速刀具伺服系统复合控制[J]. *振动与冲击*, 2023, 42(12): 39-47.
LIU Wentao, XIONG Weili. Composite control based on active disturbance rejection for a fast tool servo system[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(12): 39-47.
- [20] WANG Guangwei, WANG Bo, ZHAO Jin, et al. Robust tracking for nanopositioning stages using sliding mode control with active disturbance rejection: design and implementation[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2023, 29(15-16): 3809-3822.
- [21] DU Bochao, WU Shaopeng, HAN Shouliang, et al. Application of linear active disturbance rejection controller for sensorless control of internal permanent-magnet synchronous motor[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(5): 3019-3027.
- [22] 周雪松, 郭帅朝, 马幼捷, 等. 基于改进自抗扰的变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.
- [23] ŁAKOMY K, MADONSKI R, DAI B, et al. Active disturbance rejection control design with suppression of sensor noise effects in application to DC-DC buck power converter[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(1): 816-824.
- [24] WANG Shuwang, LI Shengquan, AI Wei, et al. Chattering free sliding mode control based on reduce order extended state observer method for a DC-DC Buck converter system[J]. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(6): 766-774.
- [25] 刘闯, 孙同, 蔡国伟, 等. 基于同步机三阶模型的电池储能电站主动支撑控制及其一次调频贡献力分析[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(15): 4854-4866.
LIU Chuang, SUN Tong, CAI Guowei, et al. Third-order synchronous machine model based active support control of battery storage power plant and its contribution analysis for primary frequency response[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(15): 4854-4866.
- [26] 刘海涛, 马丙泰, 郝思鹏, 等. 光储系统直流母线电压与超级电容荷电管理控制[J]. *控制理论与应用*, 2022, 39(9): 1661-1669.
LIU Haitao, MA Bingtai, HAO Sipeng, et al. DC bus voltage and super capacitor charge management control in optical storage system[J]. *Control Theory & Applications*, 2022, 39(9): 1661-1669.
- [27] 张建忠, 胡路才, 徐帅. 一种零序电压注入的 T 型三电平逆变器中点电位平衡控制方法[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(4): 807-816.
ZHANG Jianzhong, HU Lucai, XU Shuai. Neutral potential balance control method of T-type three-level inverter with zero-sequence voltage injection[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(4): 807-816.

收稿日期: 2024-01-14; 修回日期: 2024-04-09

作者简介:

周 杰(2000—), 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: 2114773968@qq.com

皇金锋(1978—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究生导师, 研究方向为新能源发电及电力电子控制。E-mail: jfhuang2000@163.com

(编辑 周金梅)