

# 基于SLADRC的三相交错并联DC-DC 变换器稳压控制

赵发平<sup>1</sup>, 余彦杰<sup>1</sup>, 孙环宇<sup>1</sup>, 卜祥洲<sup>2</sup>, 白涛<sup>3</sup>

(1. 国网洛阳供电公司, 河南 洛阳 471000; 2. 河南宏博测控技术有限公司, 河南 郑州 450000;  
3. 国网河北省电力有限公司, 河北 石家庄 050021)

**摘要:**针对三相交错并联型DC-DC变换器在输出侧负载和输入侧母线电压数值改变以及其他扰动影响下而出现的输出电压波动现象,提出一种滑模线性自抗扰控制策略。首先,建立三相交错并联DC-DC变换器在s域下的数学模型,并分析能量传输不平衡原理;然后,根据系统模型,设计合适的观测器和线性自抗扰控制器;进一步,为提高系统对输出电压波动的抑制能力,引入滑模控制,形成滑模线性自抗扰控制,提高系统的抗扰性和快速性;最后,设计多种工况对新型控制策略进行仿真验证和半实物仿真实验验证。结果表明:与传统控制策略相比,滑模线性自抗扰控制不仅具备优异的电压波动抑制能力,而且具有优越的稳态运行能力和暂态穿越能力,保证了系统能量传输间的平衡。

**关键词:**DC-DC变换器;线性自抗扰控制;观测器;滑模控制

**中图分类号:**TM464 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd25165

## Stable Voltage Control of Three-phase Interleaved Parallel DC-DC Converter Based on SLADRC

ZHAO Faping<sup>1</sup>, SHE Yanjie<sup>1</sup>, SUN Huanyu<sup>1</sup>, BU Xiangzhou<sup>2</sup>, BAI Tao<sup>3</sup>

(1. State Grid Luoyang Power Supply Company, Luoyang 471000, Henan, China; 2. Henan Hongbo Measurement and Control Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450000, Henan, China; 3. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050021, Hebei, China)

**Abstract:** A sliding mode linear self disturbance rejection control strategy was proposed to address the output voltage fluctuations caused by sudden load changes, changes in DC bus voltage, disturbance addition, and other disturbances in three-phase interleaved parallel DC-DC converters. Firstly, a mathematical model of three-phase interleaved parallel DC-DC converter in the s domain was established and the principle of energy transmission imbalance was analyzed. Then, based on the system order, appropriate observers and linear auto-disturbance rejection controllers were designed. Furthermore, in order to improve the ability to suppress the fluctuation of the output voltage of the system, sliding mode control was introduced to form a sliding mode linear auto disturbance rejection control, which improves the anti-interference and rapidity of the system. Finally, multiple operating conditions were designed to simulate and verify the new control strategy. The results show that compared with traditional control strategies, sliding mode linear active disturbance rejection control not only has excellent voltage fluctuation suppression ability, but also has superior steady-state operation ability and transient traversal ability, ensuring the balance between system capability transmission.

**Key words:** DC-DC inverter; linear active disturbance rejection control (LADRC); observer; slide mode control (SMC)

能源是现代社会的命脉,事关国家的能源安全、经济发展和环境状况。近年来,随着人口增

长和工业化、城市化的加速,全球能源消耗量快速增长,能源供需矛盾日益突出<sup>[1-3]</sup>。一方面,能

**基金项目:**国网河南省电力公司重点科技项目(5217A0230002)

**作者简介:**赵发平(1981—),男,本科,高级工程师,主要研究方向为电力系统自动化,Email:13643872905@163.com

源的需求量正在快速增长;另一方面,人们对电力、煤气、石油和其他化石燃料等形式的依赖对环境造成了不可忽视的影响。为打破能源短缺和环境污染的困局,世界各国在不可再生能源的基础上,大力开发新能源。新能源以“环保、绿色、清洁”为核心特性,具有资源丰富、采集周期短、成本低等突出特性。新能源发电以电力电子变换器为核心部件,为减少输出电流纹波,提高系统功率,引入交错并联技术。交错并联DC-DC变换器是一种常用的转换器拓扑结构,该电路通常有两个或多个单级变换器通过电力器件交错并联在一起,具有输出电流高、输出电压低、输出电压稳定性好等优点。但当系统负载突变、扰动加入、直流母线电压突变等因素引入时,输出电压将出现电压波动情形,波动幅度过大,持续时间过长,波动频率高时将严重影响电力网的稳定性和安全性,引发电网故障,甚至停电。为提高交错并联型DC-DC变换器在暂态下的稳压能力,文献[4]提出一种高电压增益宽范围的软开关双向DC-DC变换器拓扑,具有低压侧电流纹波小、相电流小、开关管及电容电压应力低等优点,但设计方式较为复杂,降低了系统的经济性;文献[5]提出三模式切换控制策略,提高了输出电压的范围,但切换过程中会增加系统的额外损耗;文献[6]提出两相交错并联 Buck 平面电感高密度集成与优化设计方法,优化了电路的工作特性,但暂态下的输出电压仍然具有波动性;文献[7]以多相交错并联双向 DC-DC 变换器为对象,设计了三角电流控制模式,简化了驱动电路和滤波器的复杂设计,但缺少系统在多种工况下的验证;文献[8]对多相交错引入最小时间控制思想,稳态时采用平均电流均流控制,提升了变换器的负载瞬态性能,但是暂态性能并不理想。

线性自抗扰控制(linear active disturbance rejection control, LADRC)以传统控制理论和主动干扰控制理论为基础,旨在提高控制系统对不确定性、非线性及干扰的抗扰性能,是一种新型的、强化的控制策略。LADRC 的核心思想就是利用一种称为“扰动观测器”的算法,实现测量系统状态及外部干扰信号的反馈补偿,使控制系统对干扰的鲁棒性得到了显著提高。在实际应用中,为了实现精细化控制,LADRC 根据需要进行扩展与其他控制方式结合。文献[9]在 LADRC 基础上引入平坦理论,对直流微网进行控制,但理论设计

极其复杂,不利于工程应用;文献[10]引入自适应算法对 LADRC 控制器参数进行实时更新,但优化效果并不明显,参数变化范围较小;文献[11]引入广义扰动补偿算子对观测器进行快速预估补偿扩张状态,虽实现了更好的观测效果,但降低了观测器的灵敏度。

针对三相交错并联型 DC-DC 变换器输出电压波动现象,本文以 LADRC 为核心控制算法,以滑模控制(SMC)为辅助算法,形成 SLADRC。首先,分析交错并联 DC-DC 变换器的电压波动原理;其次,建立系统数学模型,并设计 SLADRC;最后,搭建数字仿真模型,进行仿真验证与仿真对比,证实了 SLADRC 的正确性和优异性。

## 1 输出电压波动原理及数学模型建立

### 1.1 输出电压波动原理

图1为三相交错并联DC-DC变换器示意图。图中, $i_{dc}$ 为直流母线电流; $U_{dc}$ 为直流母线电压; $u_a, u_b, u_c$ 为DC-DC变换器输出电压; $i_a, i_b, i_c$ 为DC-DC变换器输出电流; $i_2$ 为电感电流之和; $i_c$ 为电容电流; $u_o$ 为输出电压; $i_o$ 为电阻电流; $L$ 为电感; $C$ 为电容; $R$ 为负载; $O$ 为中性点;根据图1,可列出输出侧能量关系为

$$u_o i_2 = C u_o \frac{du_o}{dt} + \frac{1}{R} u_o^2 \quad (1)$$

由式(1)可知,当三相交错并联DC-DC变换器输出侧的电容电压存在稳定性不足、电压波形振荡等问题时,电容电流将不再为零,输出电容将消耗一部分的电能,因此导致变换器输出的能量并不能全部被负载利用,降低了负载的能量利用率,对系统的经济性有一定的影响。为此,需设计合适的闭环控制策略对变换器进行控制,从而提高能量利用率。

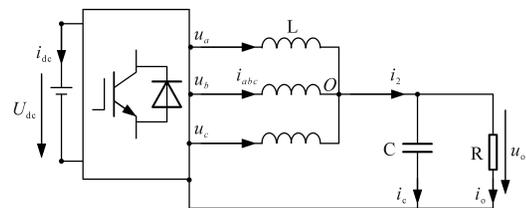


图1 三相交错并联DC-DC变换器

Fig.1 Three-phase interleaved parallel DC-DC converter

### 1.2 数学模型建立

根据图1,建立系统的输出侧数学模型为

$$\frac{du_o}{dt} = \frac{1}{C} i_2 - \frac{1}{RC} u_o \quad (2)$$

由式(2)可知,三相交错并联型DC-DC变换器为1阶系统。

根据图1,建立三相交错并联型DC-DC变换器的输出侧数学模型为

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} = u_a - u_o \\ L \frac{di_b}{dt} = u_b - u_o \\ L \frac{di_c}{dt} = u_c - u_o \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知,DC-DC变换器输出侧为3个电感模型,每个模型为1阶系统。

## 2 1阶LADRC设计及频域分析

### 2.1 1阶LADRC设计

由式(2)可知,系统为1阶系统,需要设计1阶LADRC对其进行控制。根据1阶LADRC数学模型的要求,式(2)可改写为

$$\dot{u}_o = b_0 i_2 + f \quad (4)$$

式中: $b_0$ 为控制环路调节增益; $f$ 为动态扰动与内部扰动之和。

$b_0$ 和 $f$ 的具体表达式为

$$\begin{cases} b_0 = \frac{1}{C} \\ f = -\frac{1}{RC} u_o \end{cases} \quad (5)$$

LADRC由线性扩张状态观测器(linear extend state observer, LESO)、线性误差反馈律(linear error feedback law, LSEF)组成,如图2所示。图中, $u_o^*$ 为 $u_o$ 的期望信号; $z_1$ 为 $u_o$ 的估计值; $z_{n+1}$ 为 $u_o$ 的 $n$ 阶微分信号的估计值。

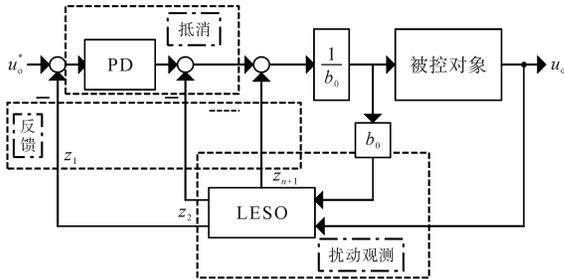


图2 LADRC控制结构图

Fig.2 LADRC control structure diagram

LESO通过引入一个扩张状态变量,将系统动态扰动与外部扰动进行分离,从而实现对系统及扰动的高精度估计。LSEF通过调节控制器对输出变量与期望变量之间的误差进行调节,使系统保持稳定并满足预期控制要求<sup>[12-13]</sup>。作为

LADRC的核心部分,LESO和LSEF对于控制器的性能具有决定性作用,建立2阶LESO的数学模型为

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = \alpha_1 (u_o - z_1) + z_2 + b_0 i_2 \\ \dot{z}_2 = \alpha_2 (u_o - z_1) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $z_2$ 为 $u_o$ 的1阶微分信号的估计值; $\alpha_1, \alpha_2$ 为观测器增益。

在传统控制理论中,闭环系统稳定的条件是系统特征根的实部均小于0,因此为了保证系统稳定,同时降低增益参数调节难度,可将观测增益用一个变量表示, $\alpha_1, \alpha_2$ 可表示为

$$\begin{cases} \alpha_1 = 2\omega_0 \\ \alpha_2 = \omega_0^2 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\omega_0$ 为观测器带宽。

为了实现复杂系统的近似转换,可设计LSEF的表达式为

$$b_0 i_2 + z_2 = k_p (u_o^* - z_1) \quad (8)$$

式中: $k_p$ 为控制增益; $u_o^*$ 为输出电压期望信号。

联立式(2)与式(8),可得:

$$\dot{u}_o + z_2 - f = k_p (u_o^* - z_1) \quad (9)$$

由式(9)可知,当系统趋于稳态时, $z_1 = u_o, z_2 = f$ ,则式(9)可改写为

$$\dot{u}_o = k_p (u_o^* - u_o) \quad (10)$$

根据式(10),可绘出稳态时系统的控制框图,如图3所示。

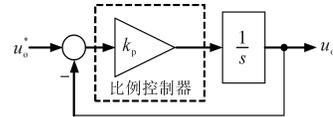


图3 稳态时系统的控制框图

Fig.3 Control block diagram of the system in steady-state

由图3可知,三相交错并联DC-DC变换器系统可转换为由1个积分器和比例控制器串联而成的简单系统,此时只需调节参数 $k_p$ ,便可使系统达到稳态。根据图3,可写出稳态时的系统闭环传递函数为

$$\frac{u_o}{u_o^*} = \frac{k_p}{s + k_p} \quad (11)$$

由式(11)可知,闭环系统存在一个特征根,根据极点配置法,将特征根配置在根平面的左半平面, $k_p$ 的表达式为

$$k_p = \omega_c \quad (12)$$

式中: $\omega_c$ 为控制器带宽。

根据2阶LESO和LSEF的数学模型,可绘制1阶LADRC的闭环控制框图,如图4所示。

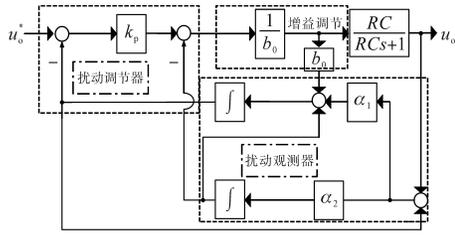


图4 1阶LADRC的闭环控制框图

Fig.4 Closed loop control block diagram of 1st order LADRC

## 2.2 频域分析

为方便写出三相交错并联DC-DC变换器的传递函数,对图4进行简化,可得到图5。

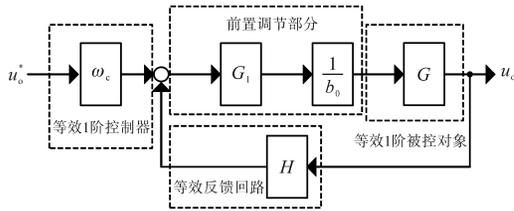


图5 闭环控制框图

Fig.5 Closed loop control block diagram

根据图5所示的闭环控制框图,可写出闭环传递函数为

$$u_o = \frac{s(s + 2\omega_0 + \omega_c)}{(s + \omega_c)(s + \omega_0)^2} f + \frac{\omega_c}{s + \omega_c} u_o^* \quad (13)$$

由式(13)可知,系统输出包含给定项和扰动项。仅考虑给定部分时,控制器的带宽 \$\omega\_c\$ 决定了系统的输出特性。仅考虑扰动项时,系统的输出和 \$\omega\_0, \omega\_c\$ 均相关。分别保持 \$\omega\_c\$ 不变,调整 \$\omega\_0\$ 的大小,以及保持 \$\omega\_0\$ 不变,调整 \$\omega\_c\$ 的大小得到 \$\omega\_0, \omega\_c\$ 与输出的频域特性曲线如图6、图7所示。

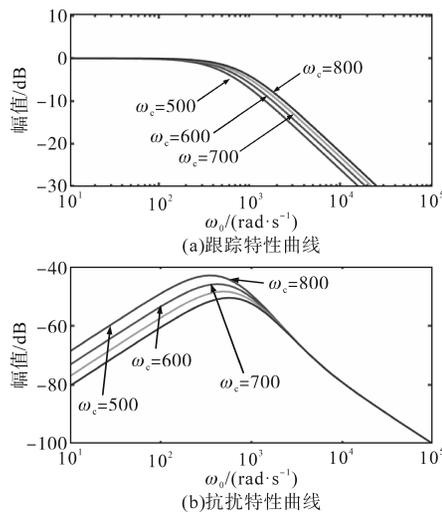


图6 控制带宽参数增加时的幅频特性

Fig.6 Amplitude frequency characteristics when controlling bandwidth parameter increase

情形一:控制带宽增加时的幅频特性。图6a中,当 \$\omega\_c\$ 由 500 rad/s 增加到 800 rad/s 的过程中,

低频段的曲线处于相同位置,中频段系统的带宽不断增加,提高了系统的响应速度,降低了系统的调节时间,但对高频噪声的抵抗能力不断下降,即降低了系统的抗扰性。图6b中,当 \$\omega\_c\$ 由 500 rad/s 增加到 800 rad/s 的过程中,高频段曲线处于相同的位置,对高频噪声的抵抗能力一致,低频段和中频段曲线不断降低,提高了对扰动的抵抗能力,使系统拥有了更好的抗扰性。

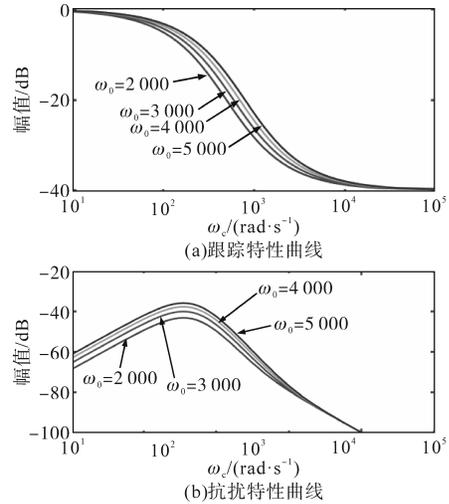


图7 观测带宽参数增加时的幅频曲线

Fig.7 Amplitude frequency characteristics when observation bandwidth parameters increase

情形二:观测带宽增加时的幅频特性。图7a中, \$\omega\_0\$ 由 2 000 rad/s 增加到 5 000 rad/s 的过程中,低频段曲线和高频段曲线处于相同的位置,中频段曲线带宽不断增加,提高了系统的跟踪性能,但对扰动的抵抗能力不断降低;图7b中,高频段曲线处于相同的位置,低中频段曲线不断下降,提高了对系统的抗扰性。

## 2.3 稳定性分析

1阶LADRC的稳定性包括2阶LESO的稳定性和1阶LADRC的整体稳定性,为精确分析2阶LESO的稳定性,在2阶LESO的数学模型中引入扰动项,可将式(6)改写为

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = 2\omega_0(u_o - z_1) + z_2 + b_0 i_2 \\ \dot{z}_2 = \omega_0^2(u_o - z_1) + h(z_1, f) \end{cases} \quad (14)$$

式中: \$h(z\_1, f)\$ 为系统扰动。

根据式(14),可得到2阶LESO的误差:

$$\begin{cases} e_1 = u_o - z_1 \\ e_2 = f - z_2 \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} e_1 = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} e_2 = 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中: $e_1, e_2$ 为2阶LESO的误差。

由式(16)可知,当 $t \rightarrow \infty$ 时,2阶LESO的误差趋于0,即2阶LESO将稳定收敛。

在三相交错并联DC-DC变换器的控制策略中,控制输入为 $i_2$ ,控制输出为 $u_0$ ,系统的输入和输出均为有界量。重新对反馈环路进行设计,反馈环路的等效反馈量可定义为

$$b_0 i_2 = \sum_{i=1}^2 k_i (u_0 - z_i) \quad (17)$$

式中: $k_i$ 为正值常数。

利用状态空间法,将式(17)改写为

$$\dot{m} = \mathbf{A}m + e \quad (18)$$

式中: $m$ 为反馈环路的状态误差变量; $\mathbf{A}$ 为状态矩阵。

对式(18)所列的微分方程进行求解,结果为

$$m = \int_0^t e^{\mathbf{A}(t-\tau)} d\tau + m(0)e^{\mathbf{A}t} \quad (19)$$

式中: $\tau$ 为积分变量。

为保证系统稳定且便于后述的分析,对 $\mathbf{A}$ 求特征值,即

$$|\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}| = k_1 + \lambda = \lambda + \lambda_1 \quad (20)$$

式中: $\mathbf{I}$ 为单位矩阵; $\lambda$ 为 $\mathbf{A}$ 的特征值的相反数, $\lambda > 0$ 。

根据范数理论得:

$$\|e^{\mathbf{A}t}\|_2 \leq e^{-\lambda_1 t} \quad (21)$$

若令 $a = \|\mathbf{A}\|_2$ ,可得:

$$\|e^{\mathbf{A}(t-\tau)}\|_2 \leq a e^{-\lambda_1(t-\tau)} \quad (22)$$

$$\left\| \int_0^t e^{\mathbf{A}(t-\tau)} d\tau \right\|_2 \leq \int_0^t a e^{-\lambda_1(t-\tau)} d\tau + \int_0^t e^{\mathbf{A}(t-\tau)} d\tau \quad (23)$$

考虑到 $e(t)$ 的2-范数有上界,若 $a$ 为 $\mathbf{A}$ 的范数不等式增益,同理可得:

$$\left\| \int_0^t e^{\mathbf{A}(t-\tau)} d\tau \right\|_2 \leq \frac{a}{\lambda_1} e^{-\lambda_1 t} - \frac{a}{\lambda_1} e^{-2\lambda_1 t} \quad (24)$$

联立式(23)和式(24),可知当时间趋于无穷时,两类误差积分均收敛至0,因此可得状态误差变量的极限值:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} m(t) = 0 \quad (25)$$

由式(25)可知,反馈环路中引入自抗扰下的闭环系统最终会稳定收敛。

### 3 SLADRC设计及稳定性证明

#### 3.1 SLADRC设计

SMC是一种强鲁棒性控制策略,主要用于非线性、不确定性和扰动等条件下的控制。SMC通

过引入滑模面来实现对系统状态和控制输入的快速调节和反馈,从而实现对系统的精确控制。SMC的基本思路是将系统状态空间划分为两个部分,即滑模面的上、下区域。因此,SMC可产生一个滑模控制变量,使系统状态通过该面达到期望目标,并在一定的误差范围内保持稳定。在1阶LESO中,有如下表达式:

$$\begin{cases} z_1 \rightarrow u_0 \\ z_2 \rightarrow f = \dot{u}_0 - b_0 i_2 \end{cases} \quad (26)$$

建立滑模控制的误差趋近律为

$$\eta = k_d s + \dot{s} \quad (27)$$

其中  $s = u_0^* - z_1$

联立式(26)、式(27),可得到滑模自抗扰(SLADRC)控制律:

$$b_0 u + z_2 = a \operatorname{sgn}(\eta) + k \eta \quad (28)$$

式中: $a$ 为趋近函数增益; $k$ 为趋近律增益。

由式(28)可知,SLADRC的控制律由误差反馈律 $u_0$ 和扰动补偿项 $z_2/b_0$ 组成,其中新的控制变量 $u$ 为

$$u = \frac{1}{b_0} [a \operatorname{sgn}(\eta) + k \eta - z_2] \quad (29)$$

在系统启动过程中,额定电压与实际电压相差较大,此时误差反馈律起主要作用。系统在受到干扰时,扰动补偿器会根据2阶LESO的观测进行适当的补偿,从而使系统具有良好的动态性能<sup>[14-17]</sup>。根据式(29)可绘制SLADRC的控制结构图,如图8所示。

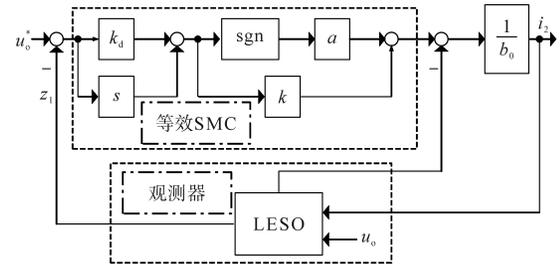


图8 SLADRC的控制结构图

Fig.8 Control structure diagram of SLADRC

#### 3.2 稳定性证明

设置李雅普诺夫函数为

$$V = s^2/2 \quad (30)$$

对式(30)两边同时求导可得:

$$\dot{V} = -\eta|s| - ks^2 \leq 0 \quad (31)$$

由 $V \geq 0, \dot{V} \leq 0$ 可知,系统在平衡点 $s=0$ 处是稳定的,系统的状态变量可以在有限时间内收敛到滑模面,系统是渐进稳定的。综上所述,当 $t \rightarrow \infty$ 时,SLADRC控制下的系统将稳定收敛。SLADRC

主要对三相交错并联DC-DC变换器的电压外环进行控制,电流内环选择传统比例积分控制,对电流内环作解耦处理,表达式为

$$\begin{cases} u_a - u_o = (i_2 - i_b - i_c - i_a)(k_p + k_i/s) \\ u_b - u_o = (i_2 - i_a - i_c - i_b)(k_p + k_i/s) \\ u_c - u_o = (i_2 - i_b - i_a - i_c)(k_p + k_i/s) \end{cases} \quad (32)$$

式中: $k_p$ 为比例系数; $k_i$ 为积分系数。

根据式(32),可绘制出电流内环解耦控制框图,如图9所示。

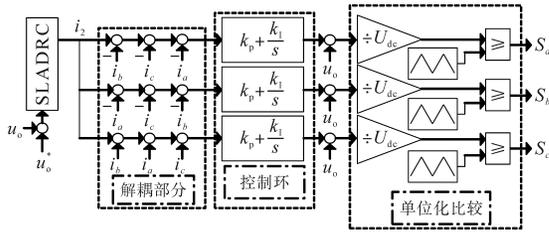


图9 电流内环解耦控制框图

Fig.9 Current inner loop decoupling control block diagram

三相交错并联DC-DC变换器的闭环控制流程为,采集实际输出电压信号与期望输出电压信号进行比较,电压误差信号送入SLADRC控制器,输出电感总电流,然后进行abc相的解耦处理,解耦后的abc三相电流信号被送入PI控制器,生成PWM信号,对DC-DC变换器进行控制<sup>[17-18]</sup>。为清晰展示上述的控制流程,绘制三相交错并联DC-DC变换器整体控制结构图如图10所示。

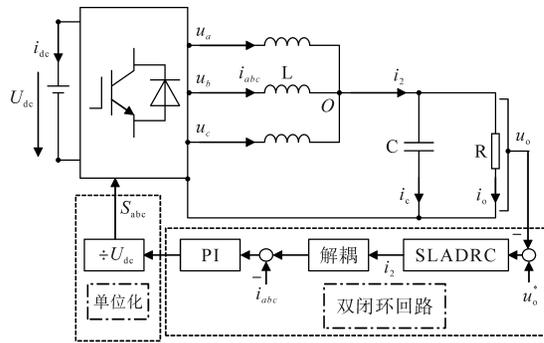


图10 三相交错并联DC-DC变换器整体控制结构图

Fig.10 Overall control structure diagram of three-phase interleaved parallel DC-DC converter

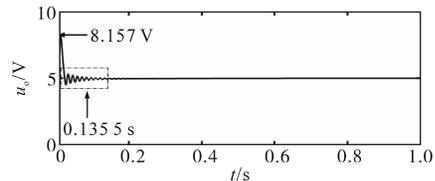
## 4 仿真及实验验证

### 4.1 仿真

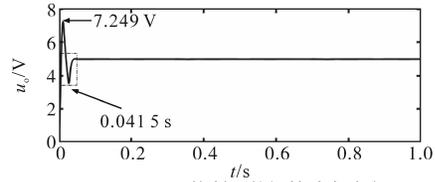
为了验证SLADRC控制策略的正确性和优越性,在Matlab/Simulink中搭建三相交错并联DC-DC变换器的数字仿真模型,设计4种工况进行验证。系统仿真参数如下:并网频率50 Hz,开关频率10 kHz,直流母线期望电压10 V,输出侧

电容1 000  $\mu$ F,电感4 700  $\mu$ H,负载40  $\Omega$ , $\omega_o=460$ , $\omega_c=1 240$ , $a=50$ , $k=50$ 。

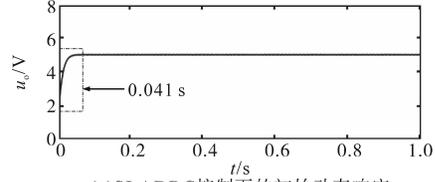
工况1:变换器输出电压起始动态响应对比,结果如图11所示。图11中,当变换器的控制环路应用SLADRC时,输出电压的初始动态电压响应曲线并无超调,而其余两类控制策略下的输出电压曲线均存在电压超调,因此在SLADRC下输出电压初始状态并无明显波动,且经过短暂动态时间后可进入电压稳态,即SLADRC下的系统具有更优异的初始电压动态特性。



(a)PI控制下的初始动态响应



(b)LADRC控制下的初始动态响应



(c)SLADRC控制下的初始动态响应

图11 起始动态响应对比

Fig.11 Comparison of initial dynamic response

工况2:直流母线电压由10 V增加为20 V,电压降低暂态过程如图12所示。图12中,当直流母线电压由10 V增加至20 V时,暂态过程中,SLADRC控制下的电压由初始值5 V最大增加至5.179 V,暂态过程运行时间为0.031 s,而其余两类控制方法下的输出电压在1 s时电压突变程度较高,暂态过程运行时间较长,因此在暂态过程中,SLADRC对电压波动现象的抑制效果最优,改善了暂态运行过程中的暂态电压质量。

工况3:直流母线电压由10 V降低为2 V,负载降低暂态过程如图13所示。图13中,当直流母线电压由10 V降低为2 V时,SLADRC控制下的电压由初始值5 V最小减小为4.973 V,电压波动数值为0.027 V,电压调整时间为0.02 s,而其余两类控制策略电压减小程度较大,并且由暂态重新回归稳态的时间较长,因此经电压特性对比可知,在暂态过程中,SLADRC对于直流母线电压变

动具有更强的抑制效果,表现出更强的抗扰性,提升了输入侧与输出侧之间的能量传输效果。

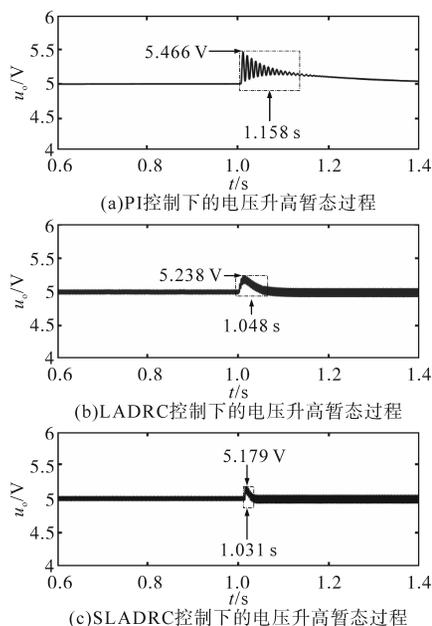


图12 直流母线电压由10V增加为20V  
Fig.12 The DC bus voltage has risen from 10 V to 20 V

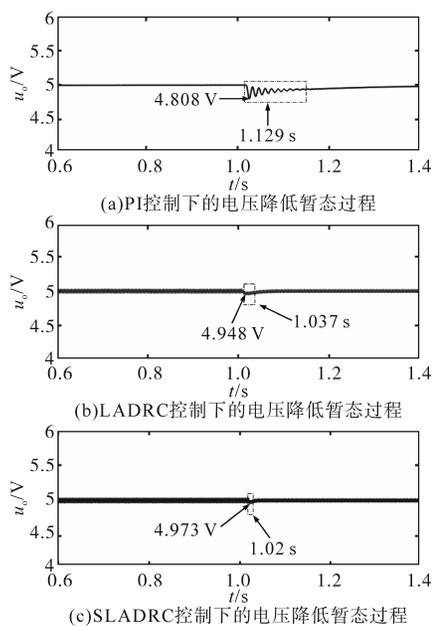


图13 直流母线电压由10V降低为2V  
Fig.13 The DC bus voltage has reduced from 10 V to 2 V

工况4:负载由 $40\ \Omega$ 减小为 $20\ \Omega$ ,负载降低暂态过程如图14所示。图14中,暂态过程中,SLADRC控制下的电压最小减小至 $4.866\ \text{V}$ ,电压波动数值为 $0.134\ \text{V}$ ,电压调整时间为 $0.014\ \text{s}$ ,与其他两类控制策略相比,SLADRC对于输出侧负载数值变动具有更好的抑制能力,不仅改善了扰动影响下的电压质量,而且为变换器系统的稳定运行提供了重要保障。

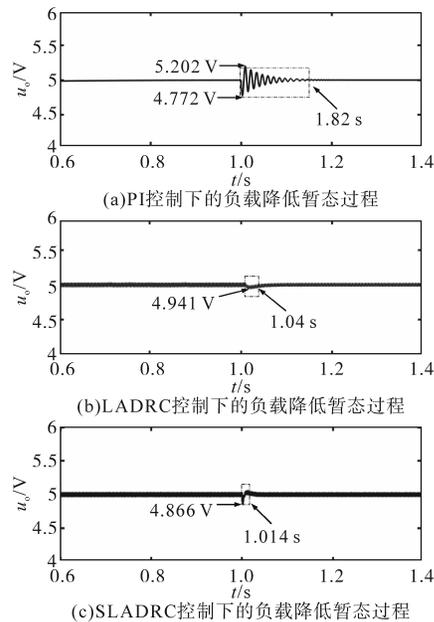


图14 负载由 $40\ \Omega$ 减小为 $20\ \Omega$   
Fig.14 The load has decreased from  $40\ \Omega$  to  $20\ \Omega$

## 4.2 半实物仿真验证

半实物仿真结果如图15所示。由图15可知,在工况1稳态特性下,输出电压最大电压为 $5.255\ \text{V}$ ,与稳态值 $5\ \text{V}$ 相差 $0.255\ \text{V}$ ,最小电压为 $4.627\ \text{V}$ ,

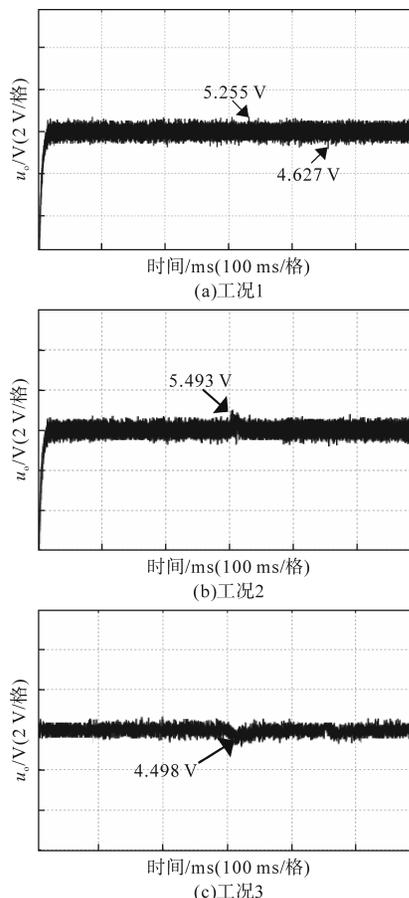


图15 半实物仿真图

Fig.15 Simulation diagram of semi physical

与稳态值相差0.373 V;在工况2直流母线电压由10 V增加至20 V扰动下,最大电压为5.493 V,与稳态值相差0.493 V;在工况3直流母线电压由10 V降低至2 V扰动下,最小电压为4.498 V,与稳态值相差0.502 V。由上述数据可知,在半实物仿真实验中,输出电压的波动均在允许偏移范围内,证明了所设计的SLADRC的正确性。

## 5 结论

本文以三相交错并联DC-DC变换器为控制对象,以抑制输出电压波动为目标,设计了一种以LADRC和SMC相结合的SLADRC闭环控制策略,经数字仿真和半实物仿真验证后,可得:

1)PI控制和LADRC控制下的稳态输出电压波动幅度较大,而SLADRC波动幅度较小,因此SLADRC控制策略拥有更优异的输出电压波动抑制能力;

2)由暂态过程对比可知,SLADRC拥有更好的扰动抑制能力,即拥有更好的抗扰性;

3)由初始电压响应曲线对比可知,SLADRC使变换器输出侧获得了更优的电压质量,强化了变换器系统的电压性能。

### 参考文献

- [1] 高娜,张宇,关清心,等.基于有源中点钳位五电平电路的双有源桥DC/DC变换器[J].中国电机工程学报,2023,43(5):1950-1961.  
GAO Na, ZHANG Yu, GUAN Qingxin. Five-level active neutral point clamed dual active bridge DC/DC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1950-1961.
- [2] 张纯江,暴云飞,孟宪慧,等.直流微网储能DC/DC变换器的自适应虚拟直流电机控制[J].电力系统保护与控制,2023,51(1):12-20.  
ZHANG Chunjiang, BAO Yunfei, MENG Xianhui, et al. Adaptive virtual DC machine control for a DC microgrid energy storage DC/DC converter[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 12-20.
- [3] 李彬彬,王宁,赵晓东,等.适用于全直流海上风电场的柔性换流高压大容量直流变压器[J].电力系统自动化,2022,46(22):129-141.  
LI Binbin, WANG Ning, ZHAO Xiaodong, et al. High-voltage large-capacity DC transformer based on flexible commutation for full-DC offshore wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(22): 129-141.
- [4] 尹华杰,丁杰,赵世伟.基于耦合电感与开关电容单元的高增益DC/DC变换器[J].电机与控制学报,2021,25(11):66-74.

- YIN Huajie, DING Jie, ZHAO Shiwei. High step-up DC/DC converter based on coupled inductor and switched capacitor unit [J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(11): 66-74.
- [5] 曹以龙,陈莹,刘雪莹,等.带三模式前馈四开关变换器平滑切换控制策略[J].电力电子技术,2023,57(1):1-5.  
CAO Yilong, CHEN Ying, LIU Xueying, et al. Smooth switching control strategy of four-switch converter with three-mode feedforward[J]. Power Electronics, 2023, 57(1): 1-5.
- [6] 倪硕,吴红飞,陈君雨,等.交错并联临界导通模式Buck电感高密度集成与优化[J].电工技术学报,2022,37(18):4688-4696.  
NI Shuo, WU Hongfei, CHEN Junyu, et al. Integration and optimization of a high power density inductor for an interleaved critical conduction mode buck converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(18): 4688-4696.
- [7] 杨天翔,程志江,杨涵棣,等.基于自抗扰控制的风电并网变流器锁相环设计[J].太阳能学报,2023,44(4):147-155.  
YANG Tianxiang, CHENG Zhijiang, YANG Handi, et al. Design of phase-locked loop of grid connected converter based on active disturbance rejection control[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2023, 44(4): 147-155.
- [8] 陶珑,王萍,王议锋,等.微电网低压接口变换器的参数寻优自抗扰控制[J].电工技术学报,2022,37(16):4202-4211.  
TAO Long, WANG Ping, WANG Yifeng, et al. Active disturbance rejection control with automatic optimization for low-voltage interface converter in microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(16): 4202-4211.
- [9] 高崇禧,颜景斌,李学东,等.脉冲负载下PWM整流器自适应线性自抗扰控制[J].电机与控制学报,2023,27(1):55-64.  
GAO Chongxi, YAN Jingbin, LI Xuedong, ect. Adaptive linear active disturbance rejection control method of PWM rectifier under pulse load[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(1): 55-64.
- [10] 祝可可,阮琳.永磁直驱风力发电机自抗扰技术及其无位置传感器控制策略[J].太阳能学报,2022,43(10):266-274.  
ZHU Keke, RUAN Lin. Active disturbance rejection technology for permanent magnet direct drive wind generator and its position sensorless control strategy[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2022, 43(10): 266-274.
- [11] 杨挺,唐子慧.太阳能联产系统自抗扰功率协调控制[J].电力系统自动化,2022,46(6):92-101.  
YANG Ting, TANG Zihui. Coordinated power control with active disturbance rejection for integrated solar combined cycle system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(6): 92-101.
- [12] 马明,廖鹏,蔡雨希,等.LCL并网逆变器一阶自抗扰控制及基于粒子群优化的控制参数整定方法[J].电力自动化设备,2021,41(11):174-182.  
MA Ming, LIAO Peng, CAI Yuxi, et al. First-order active disturbance rejection control and parameter tuning method based

(下转第65页)

- 2011, 31(31):102-108.
- [14] SUSTO G A, SCHIRRU A, PAMPURI S, et al. Machine learning for predictive maintenance: a multiple classifier approach [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2015, 11(3): 812-820.
- [15] 李杰其, 胡良兵. 基于机器学习的设备预测性维护方法综述 [J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(21): 11-19.  
LI Jieqi, HU Liangbing. Review of machine learning for predictive maintenance[J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(21): 11-19.
- [16] 张友强, 钟加勇, 魏甦, 等. 基于贝叶斯网络的智能变电站继电保护设备状态检修方法[J]. 科技通报, 2019, 35(10): 101-104.  
ZHANG Youqiang, ZHONG Jiayong, WEI Su, et al. A state maintenance method for Relaying protection equipment in intelligent substation based on bayesian network[J]. Bulletin of Science and Technology, 2019, 35(10): 101-104.
- [17] GARGARI M Z, HAGH Z, ZADEH S G, et al. Preventive maintenance scheduling of multi energy microgrid to enhance the resiliency of system[J]. Energy, 2021, 221: 119782.
- [18] 刘文颖, 谢昶, 文晶, 等. 基于小生境多目标粒子群算法的输电网检修计划优化[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 141-148, 19.  
LIU Wenyong, XIE Chang, WEN Jing, et al. Optimization of transmission network maintenance scheduling based on niche multi-objective particle swarm algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 141-148, 19.
- [19] 吴欣, 郭创新, 曹一家. 基于贝叶斯网络及信息时序属性的电力系统故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 14-18.  
WU Xin, GUO Chuangxin, CAO Yijia. A new fault diagnosis approach of power system based on bayesian network and temporal order information[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 14-18.
- [20] BOTTIEAU J, HUBERT L, GRÈVE Z D, et al. Very-short-term probabilistic forecasting for a risk-aware participation in the single price imbalance settlement[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(2): 1218-1230.

收稿日期:2023-04-14

修改稿日期:2023-06-02

(上接第48页)

- on particle swarm optimization for LCL grid-connected inverter [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(11): 174-182.
- [13] 耿强, 李亮, 周湛清, 等. 双永磁电机系统抗扰动转速同步控制[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(19): 6787-6796.  
GENG Qiang, LI Liang, ZHOU Zhanqing, et al. Speed synchronization control of disturbance rejection of dual-PMSM system [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(19): 6787-6796.
- [14] 朱焯秋, 顾志伟. 基于模糊神经网络逆系统的五自由度无轴承永磁同步电机自抗扰控制[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(2): 72-81.  
ZHU Huangqiu, GU Zhiwei. Active disturbance rejection control for 5-degree-of-freedom bearingless permanent magnet synchronous motor based on inverse system using the fuzzy neural network[J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(2): 72-81.
- [15] 朱进权, 葛琼璇, 王晓新, 等. 基于自抗扰和负载功率前馈的高速磁悬浮系统PWM整流器控制策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(2): 320-329.  
ZHU Jinqian, GE Qiongxuan, WANG Xiaoxin, et al. Control strategy for PWM rectifier of high-speed maglev based on active disturbance rejection control and load power feed-forward [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(2): 320-329.
- [16] 马幼捷, 陶珑, 周雪松, 等. 结合自抗扰的风电系统电压环模糊自适应控制[J]. 太阳能学报, 2020, 41(12): 330-337.  
MA Youjie, TAO Long, ZHOU Xuesong, et al. Fuzzy adaptive control of voltage loop in wind power system combined with linear active disturbance rejection control[J]. Acta Energetica Sinica, 2020, 41(12): 330-337.
- [17] 马明, 廖鹏, 蔡雨希, 等. LCL并网逆变器的自抗扰控制策略[J]. 高电压技术, 2021, 47(6): 2223-2231.  
MA Ming, LIAO Peng, CAI Yuxi, et al. Active disturbance rejection control strategy of LCL grid-connected inverter[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 2223-2231.

收稿日期:2023-06-02

修改稿日期:2023-07-07