

[文章编号] 1003-4684(2021)04-0027-04

基于滑模控制的能馈型交流电子负载的研究

张 鑫¹, 廖冬初^{1,2}, 蔡华锋^{1,2}, 周 浩¹

(1 湖北工业大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430068;

2 湖北工业大学 太阳能高效利用湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 为了提高直流能馈型交流电子负载系统中输入电流控制的跟踪性能和抗干扰性能,提出一种基于新型的变指数趋近律的滑模控制器设计方法。采用比例积分滑模面减小输入电流跟踪过程中的稳态误差。通过新型的变指数趋近律实现快速跟随输入电流指令。用双曲正切函数替代开关函数来减小抖振现象。同基于一般指数趋近律控制器的对比仿真表明,所提出控制器使输入电流控制不仅获得了较快的跟踪性能和较好的抗干扰性能,而且进一步减小抖振现象。

[关键词] 交流电子负载; 滑模控制; 变指数趋近律; 积分滑模面

[中图分类号] TM461 [文献标识码] A

由于传统电源出厂测试使用的模拟负载存在巨大能源消耗的问题,将测试能量回馈到待测电源输入端的交流电子负载具有能耗低、体积小、易调节等优点。目前,直流能量回馈型交流电子负载采用两级电路,前级是负载模拟单元,采用三相电压型 PWM(脉冲宽度调制)整流电路,后级是能量回馈单元,采用移相全桥电路^[1]。经典的 PID(比例-积分-微分)控制在三相电压型 PWM 整流电路中已经得到了广泛的应用^[2]。但是三相电压型 PWM 整流器是一个多输入多输出的强耦合非线性系统,传统的 PID 控制方法应用到三相电压型 PWM 整流电路中,仍存在鲁棒性差、难以满足输入电流快速响应指令的要求等^[3]。

滑模变结构控制诞生于 20 世纪 50 年代,它对系统模型要求不高,而且还具有系统响应速度快、抗干扰能力强以及实现简单等诸多优点^[4]。目前,国内外针对滑模控制抖振问题的研究很多,其中典型的是准滑模方法、高阶滑模方法、动态滑模方法和趋近律方法^[5]。双幂次趋近律是一种改进的幂次趋近律,提高了系统状态趋近滑模面的速度^[6]。积分滑模面能够减小稳态误差,同时控制律中不会出现状态变量的二阶导数,实现起来比较简单^[7]。

采用传统的双闭环控制策略在负载变化及电压波动时,直流母线电压波动较大,响应速度慢,稳态性能差^[8]。为了改善三相 VSR(电压整流器)的性能,负载模拟单元采用直接电流控制,能量回馈单元

采用双环控制,因篇幅有限,本文主要对负载模拟单元展开研究。

1 负载模拟单元的数学模型

三相电压型 PWM 整流器(VSR)主电路如图 1 所示。 e_a 、 e_b 、 e_c 、 u_a 、 u_b 、 u_c 分别为三相电网相电压和三相 VSR 交流侧相电压; i_a 、 i_b 、 i_c 为三相 VSR 交流侧相电流; L 、 R 分别为交流侧单相滤波电感和单相输入线路等效电阻; C 为母线电容; R_L 为母线电容的放电电阻。

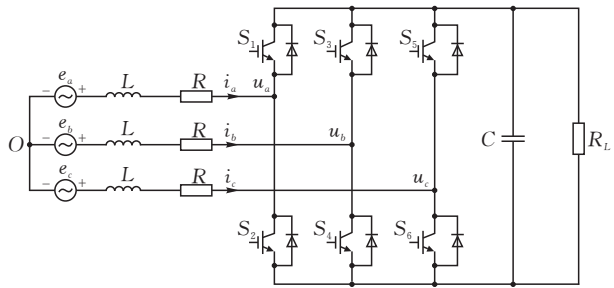


图 1 三相 VSR 主电路结构图

三相电压型整流器在两相同步旋转坐标系下的数学模型为:

$$L \frac{di_d}{dt} = \omega Li_q - Ri_d + e_d - S_d U_{dc}$$

$$L \frac{di_q}{dt} = -\omega Li_d - Ri_q + e_q - S_q U_{dc} \quad (1)$$

式中: i_d 和 i_q 分别为相电流 i_a 、 i_b 、 i_c 在 dq 坐标系下的交流侧电流; e_d 和 e_q 分别为相电压 e_a 、 e_b 、 e_c 在 dq

[收稿日期] 2021-04-21

[基金项目] 太阳能高效利用及储能运行控制湖北省重点实验室基金项目(HBSKFZD2017008)

[第一作者] 张 鑫(1996-),男,湖北黄冈人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为模式识别与智能系统

坐标系下的交流侧电压; S_d 和 S_q 分别为开关函数在 dq 坐标系下的变量; ω 为三相电网相电压角频率。式(1)表明三相电压型 PWM 整流器是一个多输入多输出的强耦合非线性系统,故无法采用一般的线性化控制技术实现精确解耦控制。

2 滑模控制器设计

系统在滑模变结构控制器作用下,可以沿设定的状态轨迹进行滑模运动,且不受系统被控对象的参数及外界扰动的影响,在滑模变结构控制下系统具有良好的鲁棒性。在四种经典的趋近律中,指数趋近律是趋近效果比较好的一种趋近律,指数趋近律的趋近速度随着与滑模切换面距离的变化而变化。

2.1 一般指数趋近律控制器

一般指数趋近律:

$$\dot{s} = -\epsilon \cdot \operatorname{sgn}(s) - k \cdot s, \epsilon > 0, k > 0 \quad (2)$$

式中: ϵ, k 都是大于零的常数, ϵ 表示切换函数的幅值, k 表示指数趋近项系数。

从式(2)可知,一般指数趋近律由两项组成,当系统远离滑模切换面时,误差变量 e 相对较大,此时等速趋近项和指数趋近项共同作用收敛于滑模面, k 越大,系统响应速度越快,系统抖振越大;当系统靠近滑模切换面时,误差变量 e 相对较小,指数趋近项 $-k \cdot s$ 相对较小,等速趋近项 $-\epsilon \cdot \operatorname{sgn}(s)$ 发挥主导作用, ϵ 越小,系统趋近速度越慢,系统抖振越小。因此,一般指数趋近律无法同时满足系统响应速度和抖振的控制要求。

2.2 改进型指数趋近律控制器

为了减弱经典趋近律控制器所带来的抖振问题,同时保证系统的响应速度,在经典指数趋近律基础上进行改进,得出的指数趋近律如下:

$$\dot{s} = -\epsilon \cdot s^2 \cdot \operatorname{sgn}(s) - k \cdot s, \epsilon > 0, k > 0 \quad (3)$$

上式中的变速趋近项 $\epsilon \cdot s^2 \cdot \operatorname{sgn}(s)$ 起到了关键作用,趋近速度大小与 s^2 成正比。当系统状态点离滑模面比较远时,趋近速度比较大;随着控制器对系统误差的调节,系统状态点离滑模面越来越近,趋近速度也越来越小。此时系统逐渐趋于平衡,系统在滑模面上的抖动也将是经典趋近律的抖动的平方次。所以,采用了变速趋近项代替一般指数趋近律中的等速趋近项,不但能增加系统跟随给定的快速性,而且能减弱滑模切换面上的抖振问题。

观察式(3),引起系统在滑模面上抖振的主要原因是由于开关函数 $\operatorname{sgn}(s)$ 的正负切换特性,因此,为了进一步减弱抖振问题,本文提出双曲正切函数 $\tanh(a \cdot s)$ 来代替 $\operatorname{sgn}(s)$, 因此本文的指数趋近律

改进为

$$\dot{s} = -\epsilon \cdot s^2 \cdot \tanh(a \cdot s) - k \cdot s, \epsilon > 0, k > 0, a > 0$$

图2给出不同 a 值下的 $\tanh(a \cdot s)$ 变化曲线,可以看出当 $s > 3$ 或 $s < -3$ 时, $\tanh(a \cdot s) \approx \operatorname{sgn}(s)$; 当 $-3 < s < 3$ 时, a 的大小决定了 $\tanh(a \cdot s)$ 的收敛速度,当 $a \geq 5$ 时, $\tanh(a \cdot s)$ 的收敛速度无明显变化。本文取 $a = 5$, 最终的指数趋近律为:

$$\dot{s} = -\epsilon \cdot s^2 \cdot \tanh(5 \cdot s) - k \cdot s, \epsilon > 0, k > 0 \quad (4)$$

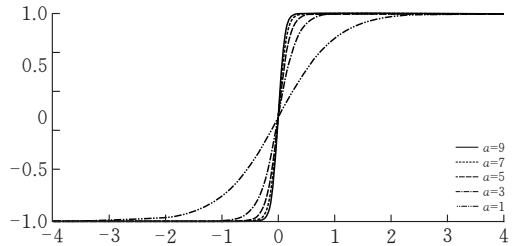


图2 $\tanh(a \cdot s)$ 变化曲线

2.3 滑模面的设计

滑模面的选择直接关系到滑动控制过程的稳定性、存在性、可达性以及良好动态性能等问题。传统线性滑模面控制在系统跟踪过程中会存在一定的稳态误差,而积分滑模面在传统线性滑模面基础上增加了积分项,在跟踪过程中不存在稳态误差且具有良好的动态性能。以两相静止坐标系的 d 轴为例,选取积分滑模面 s 为:

$$s = e + c \cdot \int_0^t e dt \quad (5)$$

式中: $e = i_d - i_d^*$, i_d^* 是 d 轴电流给定信号, i_d 是 d 轴电流反馈信号, c 是积分滑模面参数, $c > 0$ 。

选取李雅普诺夫函数为:

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (6)$$

对式(6)两端求导,可得:

$$\dot{V} = s \cdot \dot{s} = -\epsilon \cdot s^3 \cdot \tanh(5s) - k \cdot s^2 \quad (7)$$

已知 $k > 0, \epsilon > 0, s^3 \cdot \tanh(5s) \geq 0$, 所以可知 $\dot{V} \leq 0$, 式(7)满足李雅普诺夫稳定性判据,控制系统是渐进稳定的,滑模面 s 在式(4)趋近律作用下可达到滑模面 $s = 0$ 。

根据式(4)趋近律结合式(5)滑模面和式(1)被控对象数学模型可得系统在两相静止坐标系 d 轴上的滑模控制器输出为:

$$\begin{cases} e = i_d - i_d^* \\ s = i_d - i_d^* + c \cdot \int_0^t (i_d - i_d^*) dt \\ S_d \cdot U_{dc} = L \cdot (\epsilon \cdot s^2 \cdot \tanh(5s) + k \cdot s + c \cdot e) + \omega L i_q - R i_d + e_d \end{cases}$$

系统在两相静止坐标系 q 轴上的滑模控制器输出为:

$$\begin{cases} e = i_q - i_q^* \\ s = i_q - i_q^* + c \cdot \int_0^t (i_q - i_q^*) dt \\ S_q \cdot U_{dc} = L \cdot (\epsilon \cdot s^2 \cdot \tanh(5s) + k \cdot s + c \cdot e) - \\ \omega L i_d - R i_q + e_q \end{cases}$$

3 仿真实验

为验证滑模控制对于三相 VSR 负载输入电流具有较好的跟踪性能和抗干扰能力,在 Matlab 中进行仿真,根据以上设计搭建模型,负载模拟单元仿真参数:交流侧电感 2 m H,线路等效电阻 0.01Ω,输入预充电电阻 2Ω,直流母线电容 8000 uF。能量回馈单元仿真参数:谐振电感 10 uH,隔直电容 72 uF,高频变压器 1:1.5,滤波电感 800 uH,滤波电容 54 uF,输出预充电电阻 20Ω。交流电子负载主要技术指标见表 1。

表 1 交流电子负载主要技术指标	
性能指标	参数
额定功率	50 kW
输入相电压有效值	AC220 V±5%
输入相电压频率	50 Hz±1%
输出电压	DC600 V
中间直流母线电压	DC650 V
前级开关频率	5000 Hz
后级开关频率	5000 Hz

在额定功率下,输入电流有功电流给定值为 107 A,无功电流给定值为 0。以输入单相电压和电流为例分析,输入单相电压峰值为 311 V,输入侧单相电压和电流波形见图 3。

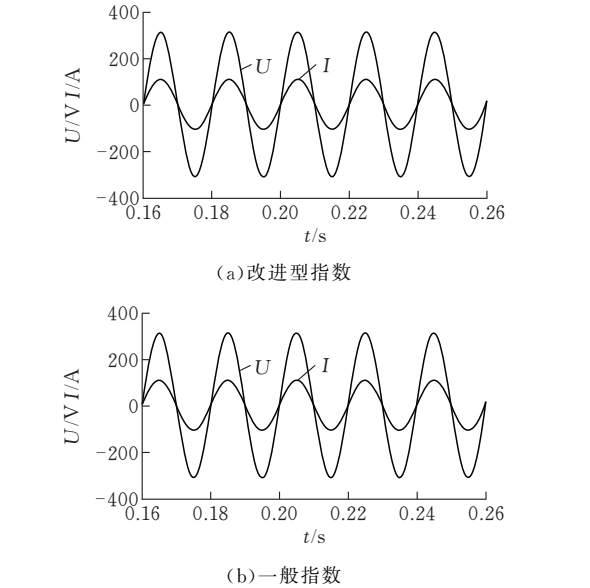


图 3 两种控制策略下的输入单相电压和电流波形

在两种控制策略下,输入单相电流峰值均能达到 107 A,并且输入电流与输入电压相位相同,频率一致,输入电流实现跟踪控制,交流电子负载在额定

功率运行。
对输入电流进行坐标变换,得到输入电流的 d 轴分量 I_d 和 q 轴分量 I_q (图 4)。由图 4a 可知,收敛时间分别为 $t_1=0.0003$ 和 $t_2=0.002$ 。由图 4b 可知,收敛时间分别为 $t_1=0.00035$ 和 $t_2=0.0024$ 。可以看出,在改进型指数趋近律控制下,系统的收敛速度加快了 12%,因此在趋近律中引入 s^2 项可加快系统收敛速度。

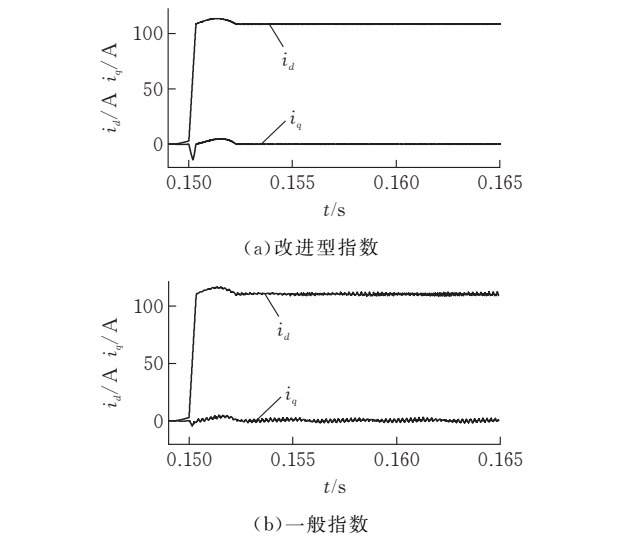


图 4 两种控制策略下的输入电流收敛过程

以输入电流 d 轴分量 I_d 的稳定运行波形为例,分析双曲正切函数对输入电流的抖振现象具有减弱作用(图 5)。系统以额定功率运行,输入电流的 d 轴分量 I_d 给定值为 107 A。由图 5a 可知,输入电流的 d 轴分量 I_d 稳态值为 107.2 A,稳态误差为 0.2 A,抖振幅值为 0.2 A。由图 5b 可知,输入电流 d 轴分量 I_d 稳态值为 107.3 A,稳态误差为 0.3 A,抖振幅值为 0.3 A。

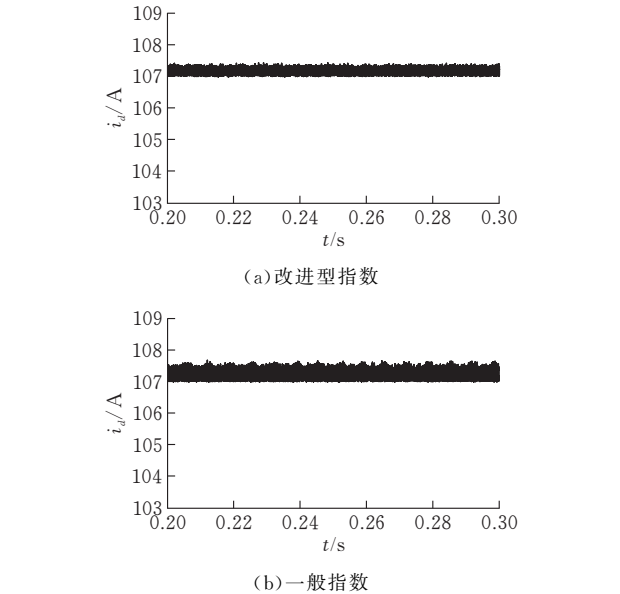


图 5 两种控制策略的输入电流抖振波形

可以看出,采用双曲正切函数,输入电流的稳态误差较小,抖振幅值也较小,对系统稳态性能具有较好的优化效果。结合图 4 和图 5 输入电流波形,具体性能指标对比见表 2。由表 2 可知,采用双曲正切函数替换开关函数,对输入电流的抖振具有明显减弱效果,从而提高输入侧的功率因数及抑制输入电流高频谐波,减少对交流电网的谐波污染。采用变指数趋近项替换一般指数趋近项,加快了系统收敛速度,使系统更快趋于稳定。

表 2 两种控制策略性能指标对比

控制策略	收敛时间	收敛时间	稳态误差	抖振大小
	t_1/s	t_2/s		
改进滑模	0.0003	0.002	0.2	0.2
一般滑模	0.00035	0.0024	0.3	0.3

4 结 论

为提高交流电子负载的跟踪性能和稳态性能,对于负载模拟单元,提出了改进型指数趋近律的直接电流控制策略。通过仿真验证,和一般指数趋近律控制相比较,采用改进型指数趋近律的滑模变结构控制可进一步减弱抖振问题,减小稳态误差,并且加快系统收敛速度,因此在趋近律中引入 s^2 项和双曲正切函数具有较好的控制效果。不过收敛速度和抖振幅值等系统指标有待进一步提升。

[参 考 文 献]

[1] 钟炎平,陈耀军,吴胜华.三相电压型 PWM 整流器的

稳定性研究[J].电气自动化,2013,35(2):10-12.
[2] 宋文祥,尹赞.一种基于内模控制的三相电压型 PWM 整流器控制方法[J].电工技术学报,2012,27(12):94-101.
[3] 王恩德,黄声华.三相电压型 PWM 整流的新型双闭环控制策略[J].中国电机工程学报,2012,32(15):24-30+18.
[4] 李慧洁,蔡远利.基于双幂次趋近律的滑模控制方法[J].控制与决策,2016,31(3):498-502.
[5] 张合新,范金锁,孟飞,等.一种新型滑模控制双幂次趋近律[J].控制与决策,2013,28(2):289-293.
[6] 戴鹏,徐楠,谢后晴,等.永磁同步电机调速系统的快速幂次趋近律控制[J].电机与控制学报,2017,21(11):32-38.
[7] 薛太林,陈治强,张学军,等.滑模变结构控制在三相电压型 PWM 整流器中的应用[J].电气传动,2018,48(5):21-26.
[8] 苗敬利,郑大伟,周重霞.基于新型趋近律的永磁同步电机模糊滑模控制[J].电气传动,2019,49(3):3-7.
[9] 毛亮亮,周凯,王旭东.永磁同步电机变指数趋近律滑模控制[J].电机与控制学报,2016,20(4):106-111.
[10] 张瑶,马广富,郭延宁,等.一种多幂次滑模趋近律设计与分析[J].自动化学报,2016,42(3):466-472.
[11] Direct Power Control of Three-Phase Boost Rectifiers by using a Sliding-Mode Scheme[J]. Journal of Power Electronics,2013,13(6):1000-1007.
[12] 窦海学,余赵林.三相电压型 PWM 整流器滑模控制算法研究[J].电工技术,2019(8):26-28.
[13] JIAN LI,ZEXU LIU,QINGYU SU. Improved adaptive backstepping sliding mode control for a three-phase PWM AC-DC converter [J]. IET Control Theory & Applications,2019,13(6):854-860.

Research on Energy Fed AC Electronic Load
Based on Sliding Mode Control

ZHANG Xin¹,LIAO Dongchu^{1,2},CAI Huafeng^{1,2},ZHOU Hao¹

(1 School of Electrical and Electronic Engin.,Hubei Univ. of Tech.,Wuhan 430068,China ;
2 Hubei Collaborative Innovation Center for High-Efficiency Utilization of Solar Energy ,
Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China)

Abstract: In order to improve the tracking performance and anti-interference performance of input current control in DC energy fed AC electronic load system, a sliding mode controller design method based on a new variable exponential reaching law is proposed. The proportional integral sliding mode surface is used to reduce the steady-state error in the process of input current tracking. A new variable exponential reaching law is used to fast follow the input current command. The hyperbolic tangent function is used to replace the switch function to reduce chattering. Compared with the general exponential approach controller, the simulation results show that the proposed controller not only achieves faster tracking performance and better anti-interference performance, but also further reduces the chattering phenomenon.

Keywords: AC electronic load; sliding mode control; variable exponential reaching law; integral sliding mode surface

[责任编辑: 张岩芳]