

基于滑模变结构的 PWM 整流器系统设计

张红娟

(唐山学院 智能与信息工程学院, 河北 唐山 063020)

摘要:根据三相电压型 PWM 整流器的主电路拓扑结构,建立了整流器的数学模型;对控制系统的电流内环采用滑模变结构的控制算法,对电压外环进行 PI 控制,并通过 Matlab/Simulink 进行了仿真。从仿真结果可以看出,滑模变结构 PWM 整流器系统具有较好的抗干扰能力。

关键词:PWM 整流器;滑模变结构;PI 控制

中图分类号:TM461 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-349X(2015)06-0034-03

DOI:10.16160/j.cnki.tsxyxb.2015.06.013

Design of the PWM Rectifier System Based on Sliding Mode Variable Structure

ZHANG Hong-juan

(School of Intelligence and Information Engineering, Tangshan College, Tangshan 063000, China)

Abstract: The author of this paper has established the mathematical model of the three-phase voltage PWM rectifier according to the topology of its main circuit, applied sliding mode control algorithm to the inner current loop control system and simulated the PI control of the voltage loop through Matlab / Simulink. The simulation results show that PWM rectifier with sliding mode variable structure has a good anti-interference capability.

Key Words: PWM rectifier; sliding mode variable structure; PI control

三相电压型 PWM 整流器装置是典型的非线性系统,其非线性表现在控制的不连续性上,而系统同时又存在着不可预见的外部干扰。滑模变结构控制方法通过控制量的切换使系统沿滑模面滑动,使得系统在参数扰动和外部干扰时具有不变性^[1]。为此,笔者设计了基于滑模变结构 PWM 整流器系统。

1 三相电压型 PWM 整流器电路拓扑结构及数学模型

三相电压型 PWM 整流器电路拓扑结构如图 1 所示。电感 L 起滤波作用;C 为直流侧电容,起稳压滤波的作用;R 为线路与开关管的等效电阻;RL 为负载。当整流器工作时,控制开关管导通占空比按正弦规律变化,使得输出侧的直流电压不变。

定义单极性二值逻辑开关函数:

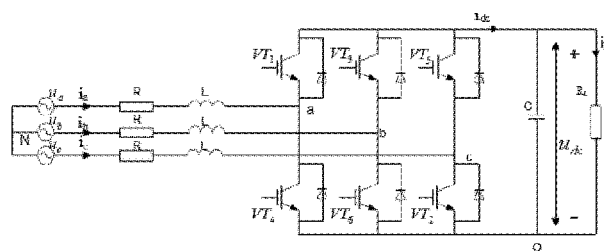


图 1 三相电压型 PWM 整流器电路拓扑结构

$$s_j = \begin{cases} 1, & j = (a, b, c), \\ 0 \end{cases} \quad (1)$$

当 $s_j = 1$ 时,表示开关管上桥臂导通,下桥臂关断; $s_j = 0$ 时,表示开关管下桥臂导通,上桥臂关断。PWM 整流器在三相静止坐标系下的数学模型为^[2]:

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} = u_a - Ri_a - (s_a - \frac{1}{3} \sum_{j=a,b,c} s_j) u_{dk} \\ L \frac{di_b}{dt} = u_b - Ri_b - (s_b - \frac{1}{3} \sum_{j=a,b,c} s_j) u_{dk} \\ L \frac{di_c}{dt} = u_c - Ri_c - (s_c - \frac{1}{3} \sum_{j=a,b,c} s_j) u_{dk} \\ i_a s_a + i_b s_b + i_c s_c = C \frac{du_{dk}}{dt} + i_L \end{cases} \quad (2)$$

为方便分析,通过 park 变换^[3]将 i_a, i_b, i_c 电流投影等效到 d, q 轴上,将定子上的电流都等效到直轴和交轴上去,对于稳态来说,这样等效之后, i_d, i_q 是常数,通过三相静止 a, b, c 坐标系到两相同步旋转坐标系进行坐标变换,得到整流器在两相旋转坐标系下的数学模型为:

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = e_d - Ri_d + \omega Li_q - s_d u_{dk} \\ L \frac{di_q}{dt} = e_q - Ri_q - \omega Li_d - s_q u_{dk} \\ C \frac{du_{dk}}{dt} = s_d i_d + s_q i_q - i_L \end{cases} \quad (3)$$

式中, e_d, e_q 分别是三相电压 u_a, u_b, u_c 在同步旋转坐标系下的 d, q 轴分量; i_d, i_q 分别是三相电流 i_a, i_b, i_c 在同步旋转坐标系下的 d, q 轴分量; s_d, s_q 分别是开关函数 s_a, s_b, s_c 在同步旋转坐标系下的 d, q 轴分量。如果有需要可以进行逆变换(dq/abc)。

2 滑模变结构控制算法

滑模变结构控制通过自行设计所需的滑模面和等效控制律,能对变化的输入做出快速响应,而对参数变换和扰动不敏感,具有很好的鲁棒性。在系统控制过程中,控制器根据系统当时的状态,以跃变方式有目的地不断变换,迫使系统按预定的“滑动模态”的状态轨迹运动。变结构是通过切换函数实现的,特别要指出的是,通常要求切换面上存在滑动模态区,故变结构控制又常被称为滑动模态控制。

滑模变结构控制的基本原理在于,当系统状态穿越状态空间的滑动超平面时,反馈控制的结构就发生变化,从而使得系统的状态轨迹能够到达这个滑动超平面,并且沿着这个超平面运动至原点,这个超平面就是滑模面。系统在滑模面上的运动性能依赖于滑动模态参数的设计:

$$\begin{cases} s_1 = \partial_1 (i_d - i_d^*) \\ s_2 = \partial_2 (i_q - i_q^*) \end{cases} \quad (4)$$

其中 ∂_1, ∂_2 均是正实数; i_d^*, i_q^* 分别是 i_d, i_q 的给定值。

准滑动模态控制率为:

$$\frac{ds}{dt} = -\epsilon \text{sat}(s), \text{ 其中 } \text{sat}(s) = \begin{cases} 1, s > \Delta \\ ks, |s| \leq \Delta, k = \frac{1}{\Delta} \\ -1, s < -\Delta \end{cases} \quad (5)$$

式中, ϵ 为正实数。保证 $s \cdot \dot{s} < 0$, 满足广义滑模条件; 在滑模变结构控制中, 需要改变切换面 $s(x) = 0$ 两边的结构, 滑动模态区上的点都必须是终止点, 当运动点到达切换面 $s(x) = 0$ 附近时, 必有 $\lim_{s \rightarrow 0} \dot{s} \leq 0$ 。 $\text{sat}(s)$ 是饱和函数, Δ 称为“边界层”。饱和函数的特点为: 在边界层外采用切换控制; 在边界层内采用线性反馈控制。在 PWM 整流器电路开关控制中, 令

$$\begin{cases} \dot{s}_1 = -W_1 \text{sat}(s_1) \\ \dot{s}_2 = -W_2 \text{sat}(s_2) \end{cases} \quad (6)$$

式中, W_1, W_2 均为大于 0 的参数。

由公式(3), (4), (6)可求得电流内环控制率:

$$\begin{cases} s_d = \frac{L}{u_{dk}} \left[\frac{1}{L} e_d - \frac{R}{L} i_d + \omega i_q + \frac{W_1}{\partial_1} \text{sat}(s_1) \right] \\ s_q = \frac{L}{u_{dk}} \left[\frac{1}{L} e_q - \frac{R}{L} i_q + \omega i_d + \frac{W_2}{\partial_2} \text{sat}(s_2) \right] \end{cases} \quad (7)$$

电压外环控制器采用 PI 控制算法^[4], 三相电压 PWM 整流系统控制框图如图 2 所示。

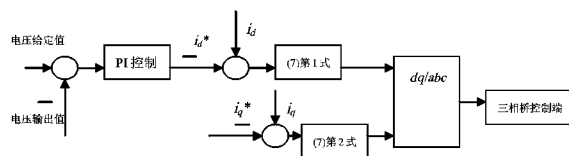


图2 系统控制结构图

3 应用 Matlab/Simulink 对系统进行仿真

三相电压 PWM 整流器是脉冲宽度调制, 其 6 个脉冲信号由滑模变结构控制算法经过 dq/abc 反变换后产生。图 3 为 PWM 整流器电路滑模变结构控制图。当 $a_1 = 0.765$, $a_2 = 0.5$, $W_1 = 15000$, $W_2 = 4500$ 时^[2] 仿真效果较好, 图 3 中 subsystem 模块如图 4 所示, 图 4 是图 3 的子系统, 是主电路部分, 其参数 $R = 0.3 \Omega$, $L = 0.02 \text{ H}$, $C = 990 \mu\text{F}$, 负载电阻 $R_L = 100 \Omega$ 。

4 仿真结果

首先, 系统可以在稳态时无静差输出, 达到最基本控制要求, 如图 5 所示。

其次, 在 0.5 s 负载发生突变时, 系统经过短暂波动恢复稳定运行状态, 抗干扰能力较强。滑模变结构输出电压波形如图 6 所示。若在 0.5 s 时输入信号由 250 V 突变到 280 V, 系统经过短暂波动后恢复到 280 V, 稳定运行, 说明系统抗干扰能力较强。滑模变结构输出情况如图 7 所示。

5 结论

滑模变结构具有动态响应快, 对参数及扰动不灵敏, 鲁棒性强的优点, 对负载扰动和电网电压波动有很强的抗干扰性。

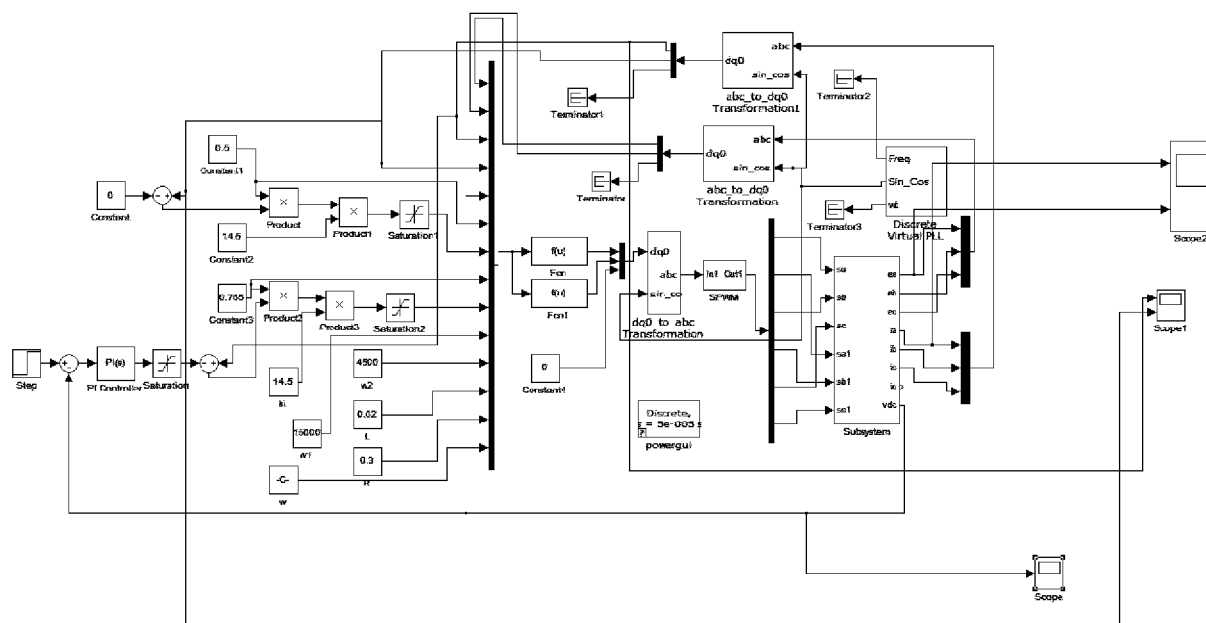


图3 PWM整流器电路滑模变结构控制

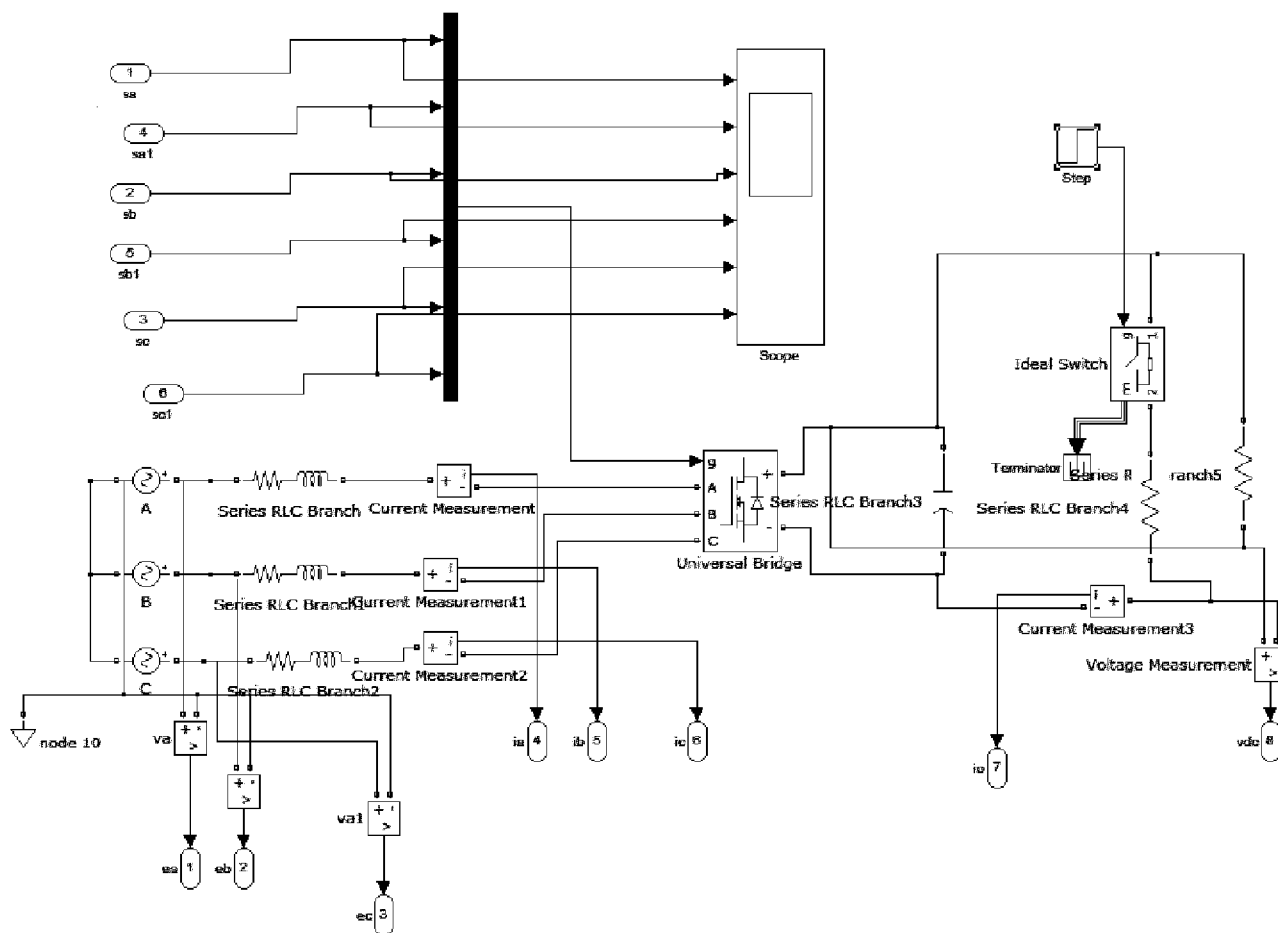


图 4 PWM 整流器仿真

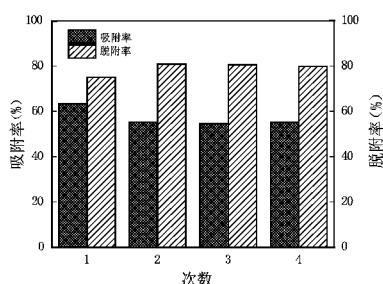


图 5 活性炭纤维电极对 Fe^{3+} 电吸附/脱附循环

(3)溶液的 pH 值偏碱性时, Fe^{3+} 的去除率较高。

(4)随着温度的升高, Fe^{3+} 的去除率升高,但温度过高,由于溶液蒸发严重, Fe^{3+} 浓度降低较慢。

(5)第二个吸附/脱附循环与第一个循环相比 Fe^{3+} 的吸附率和脱附率有变化外,之后的循环均无明显变化,说明活性炭纤维电吸附 Fe^{3+} 具有良好的再生性。

参考文献:

- [1] 林艳华,王毅力. 负载 TiO_2 的活性炭纤维改性电极电吸附除氟[J]. 环境工程学报, 2012, 6(7): 2242 - 2248.
- [2] 周贵忠,王兆丰,王绚,等. 石墨-活性炭纤维复合电极电吸附处理含盐废水的研究[J]. 环境科学, 2014, 35(5): 1832 - 1837.

- [3] 刘玲,李兴超,孟庆函. 掺杂钛碳气凝胶电极的制备及电吸附脱盐性能的研究[J]. 功能材料, 2013, 44(6): 783 - 787.
- [4] 陈榕,胡熙恩. 电吸附技术的应用与研究[J]. 化学进展, 2006, 18(1): 80 - 86.
- [5] Liu Yong, Pan Likun, Chen Taiqing, et al. Porous carbon spheres via microwave-assisted synthesis for capacitive deionization[J]. Electrochim Acta, 2015, 151: 489 - 496.
- [6] Park Kyung-Hee, Kwak Dong-Heui. Electrosorption and electrochemical properties of activated-carbon sheet electrode for capacitive deionization[J]. J. Electro. Chem., 2014, 732: 66 - 73.
- [7] 刘方圆,胡成志,李永峰,等. MnO_2 /CFP 复合电极的制备及电吸附 Pb^{2+} 特性的研究[J]. 环境科学, 2015, 36(2): 552 - 558.
- [8] Wang Gang, Pan Chao, Wang Liuping, et al. Activated carbon nanofiber webs made by electrospinning for capacitive deionization[J]. Electrochim Acta, 2012, 69: 65 - 70.

(责任编辑:李秀荣)

(上接第 36 页)

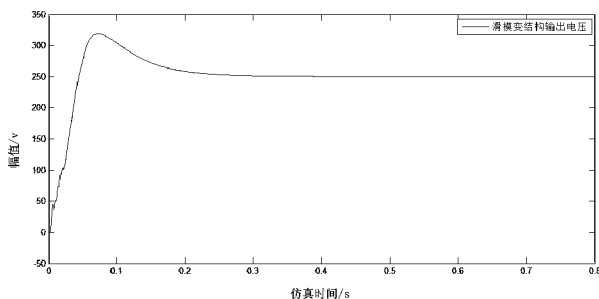


图 5 滑模变结构稳态时无静差输出情况

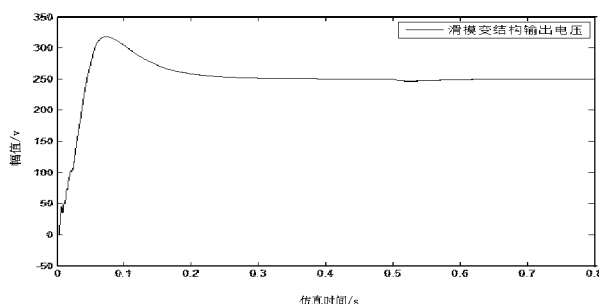


图 6 负载突变时滑模变结构输出情况

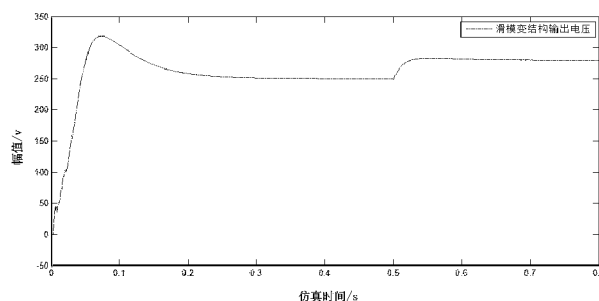


图 7 输入信号发生突变时滑模变结构输出情况

参考文献:

- [1] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 2 版. 北京:清华大学出版社, 2005: 53.
- [2] 张晓华. 控制系统数字仿真与 CAD[M]. 北京:机械工业出版社, 2015: 232.
- [3] 孔凡才. 自动控制原理与系统[M]. 3 版. 北京:机械工业出版社, 2006: 229 - 230.
- [4] 张崇巍. PWM 整流器及其控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2003: 67.

(责任编辑:夏玉玲)