Research on Control Strategy of VIENNA Rectifier Based on Sliding Mode Variable Structure

XIAO Jun, SHAO Ruping^{*}, WANG Da

(School of Automation and College Of Electrical Engineering And Control Science, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: Aiming at the nonlinear characteristics of VIENNA rectifier and the need of good dynamic performance and robust performance, a controller based on sliding mode variable structure VIENNA rectifier is proposed. The voltage outer loop adopts sliding mode variable structure control and the current inner loop adopts error iteration. The PI algorithm improves the dynamic response performance of the three-phase VIENNA rectifier and achieves the purpose of no static adjustment. According to the main circuit topology, the mathematical model of VIENNA rectifier is established. The VIENNA rectifier controller based on error iterative PI algorithm and sliding mode variable structure theory is designed. The simulation and experimental results show that the control strategy can achieve the control purpose, with dynamic response speed and robust The performance of the rod is strong, and the experiment shows that when the overshoot voltage exceeds the reference value of 50 V, the time to reach the stable value needs about 0.015 s.

Key words: VIENNA rectifier; mathematical model; sliding mode control; error iteration PI

EEACC:1210 doi:10.3969/j.issn.1005-9490.2019.03.015

基于滑模变结构的 VIENNA 型整流器研究

肖 俊,邵如平*,王 达 (南京工业大学电气工程与控制科学学院,南京 211816)

摘 要:针 VIENNA 整流器的非线性特征,以及需要良好的动态性能和鲁棒性能,提出一种基于滑模变结构的 VIENNA 整流器的控制器;电压外环采用滑模变结构控制、电流内环采用误差迭代 PI 算法,改善三相 VIENNA 整流器的动态响应性能,达到 无静差调节地目的。根据主电路拓扑建立 VIENNA 整流器的数学模型,设计了基于误差迭代 PI 算法和滑模变结构理论的 VIENNA 整流器控制器,仿真与实验结果表明该控制策略能达到控制目的,具有动态响应速度快和鲁棒性能强等特点,实验得 出,超调电压超出参考值 50 V 时,到达稳定值的时间大约需要 0.015 s。

关键词:VIENNA 整流器;数学模型;滑模变结构;误差迭代 PI

中图分类号:TM46 文献标识码:A 文章编号:1005-9490(2019)03-0613-04

伴随着电力电子技术的不断提高,对电力电子 装置的要求不再仅仅是性能可靠、效率高,并且要求 其体积小、功率密度高。三电平整流器相对于二电 平整流器具有所需无源器件少,设备体积小,同时改 善网侧电流的谐波畸变等优点。VIENNA 整流器以 其电路拓扑简单、开关应力小、开关数目少、效率高、 无需考虑开关死区补偿等优点,所以常常被用于电 动汽车充电机的前级以及有源滤波器中。VIENNA 整流器是最新的功率因素校正三电平拓扑电路,无 需考虑开关管桥臂直通问题以及不存在功率因素开 关元器件反并二极管反向恢复的情况,所以受到国 内外的越来越多学者的研究与关注[1]。

VIENNA 整流器与传统两电平整流器在控制系统上类似,文献[2]发现常规的 PI 外环控制策略难以同时满足快速性和超调的要求,动态性能无法达到预期设想,文献[3]采用矢量控制对电流 PI 控制器进行优化,但没有对电路的动态性能进行研究,文献[4-5]对 VIENNA 采用了单周期控制策略,着重对其占空比情况进行研究,未对电压外环的非线性进行考虑。为了使 VIENNA 整流器的应用更加普及,需要研发一个能同时满足动态响应快和鲁棒性强的产品,滑模变结构控制在众多非线性控制策略

中最明显的特点是系统只要处于滑模状态时,系统 改变原定参数以及外部变控量变化就不会造成系统 状态的变化,具备理想的鲁棒性和不变性,所以完全 满足需求。

本文在 VIENNA 整流器的电压外环采用具有非 线性特征的滑模变结构控制(SMC),电流内环则采 用误差迭代 PID(Proportional Integral Differential algorithm)算法。从仿真及实验结果易得,该控制策 略能提高改拓扑的动态响应速度并且加强该拓扑的 鲁棒性能,比传统的 PI 控制,直接功率控制等控制 策略有明显的优势。

1 三相 VIENNA 整流器数学模型



图 1 VIENNA 整流器主拓扑

为了系统结构的简化,得到更有效率的控制算法,现在对其作出假定:所有功率开关器件皆为理想器件,交流网侧基波频率远远小于开关频率,整流器的交流侧是三相对称,直流侧 2 个电容容量完全一样,即 $C_n = C_p = C_o$ 根据文献[6-8],则 VIENNA 整流器在 dq 坐标系下的数学模型为:

$$\begin{cases} i_{d} = \frac{L}{R} \left(\omega i_{q} - \frac{\mathrm{d}i_{d}}{\mathrm{d}t} \right) + \frac{1}{R} \left(u_{d} - \frac{\mathrm{d}'_{d}v_{\mathrm{dc}}}{2} \right) \\ i_{q} = \frac{L}{R} \left(\omega i_{d} - \frac{\mathrm{d}i_{q}}{\mathrm{d}t} \right) + \frac{1}{R} \left(u_{q} - \frac{\mathrm{d}'_{q}v_{\mathrm{dc}}}{2} \right) \\ i_{\mathrm{dc}} = -\frac{C\mathrm{d}v_{\mathrm{dc}}}{2\mathrm{d}t} + \frac{3}{4} \left(d'_{d}i_{d} + d'_{q}i_{q} \right) \end{cases}$$
(1)

式中: i_a 和 i_q 分别为dq坐标的网侧电流, u_a 和 u_q 分 别为dq坐标的网侧电压, d'_a 和 d'_q 分别为在dq坐标 的开关函数。

2 电流内环控制器设计

一般常用的 PI 控制器由于计算量小,可靠性高,对被控数据量是直流量和自身大小调节缓慢的量可以达到没有静态误差控制,当被控数据量是正弦量时,则会出现静态差值,要消除其会出现静态差

值的情况,可以使用误差迭代 PI 控制算法来实现。

为了方便研究该策略,由文献[9-10]得其最后 算法:

 $i_{r}(\tau) = i_{r}(\tau - N) + K_{p}e(\tau) - K_{p}e(\tau - N) + K_{i}e_{\tau} \quad (2)$

式中,*i*_r(τ)和*e*(τ)分别为在τ时刻的输出电流和采 样所得的误差值。从而进一步推导出误差迭代 PI 算法中输出到误差采样的传递函数:

$$G_{\rm PI}(s) = \frac{i_r(s)}{e(s)} = K_p + \frac{K_i}{1 - e^{-sN_t}}$$
(3)

式中:t是相邻样品中间空缺的时间,Nt为一个基波周期。从而推导出电流闭环传递函数频率特性方程:

$$G_{\rm Plb}(j\omega) = \frac{G_{\rm F}(j\omega)}{1 - \cos(\omega Nt) + j\sin(\omega Nt) + G_{\rm F}(j\omega)}$$
(4)

式中:

 $G_{F}(j\omega) = \lfloor K_{p} [1 - \cos(\omega Nt) + j\sin(\omega Nt)] + K_{i} \rfloor \cdot G(j\omega)$ 令角频率 $\omega = 2\pi fn$,代人上式可得:

$$G_{\rm PIb}(j2\pi fn) = 1 \quad n = 0, 1, \cdots$$
 (5)

由式(5)可得,在此电流闭环系统传递函数中, 幅值是1,相位移是0,从而确保达到无静态误差调 节的目的。

3 电压外环控制器设计

3.1 滑模变结构控制器的基本条件

滑模控制因鲁棒性强,较强的稳态精度和动态 响应能力,使得滑模变结构控制已经逐步在电力电 子控制领域获得了众多的关注。滑模控制器的设计 应首先满足滑动模态的存在性条件,其次满足可达 性和稳定性的要求。

3.2 基于滑模变结构的 VIENNA 整流器电压外环 设计

VIENNA 整流器电压外环设计的关键要求是在 不受负载电流的输出 i_L 的影响的前提,确保系统能 保持稳定并且让负载电压 v_{de} 能够跟踪已有的参考 电压 $v_{de} = v_{de}^*$ 。根据滑模变结构的理论,假设 $v = v_{de} - v_{de}^*$ 选取如下的滑模面:

$$S = v + k \left(\frac{\mathrm{d}v_{\mathrm{dc}}}{\mathrm{d}t} - \frac{\mathrm{d}v_{\mathrm{dc}}^*}{\mathrm{d}t} \right) = 0 \tag{6}$$

式中,k为滑模控制系数且大于零,当 k 越小时,则 表明系统所需进入滑动模态的时间越长。由式 (1),可得:

$$\frac{\mathrm{d}v_{\mathrm{dc}}}{\mathrm{d}t} = \frac{3d'_{d}i_{d} + 3d'_{q}i_{q} - 4i_{\mathrm{dc}}}{2C}$$
(7)

将式(6)与式(7)联立,可得

$$S(v) = \left[-(v_{\rm dc} - v_{\rm dc}^*) + k \frac{\mathrm{d}v_{\rm dc}^*}{\mathrm{d}t} - \frac{k}{2C} (3d'_d i_d - 4i_{\rm dc}) \right] \frac{2C}{3kd'_d} - i_d = 0 \quad (8)$$

为了方便研究,假设为理想状态下网侧对称三 相电压,当系统为稳定状态时,则有 $i_q, u_q, \frac{di_q}{dt}$ 皆为 0,且 $v_{dt} = v_{dt}^*$,再由式(1)推导出:

$$\begin{cases} d'_{d} = \frac{2(u_{d} - Ri_{d})}{v_{dc}} \\ d'_{q} = -\frac{2wLi_{d}}{v_{dc}} \end{cases}$$
(9)

将上式代入式(8),因为 v_{dc}^* 为给定的常量,则 $\frac{dv_{dc}^*}{dt}=0,故可得:$

$$S(v) = \left[\left(v_{\rm dc} - v_{\rm dc}^* \right) + \frac{2k}{C} i_{\rm dc} \right] \frac{C v_{\rm dc}}{3k(u_d - Ri_d)} - i_d = 0 \quad (10)$$

进入稳态后 $i_d = i_d^*$,由此推导出 d 轴的电流参 考值 i_a^* 为:

$$i_{d}^{*} = \left[\left(v_{dc}^{*} - v_{dc} \right) + \frac{2k}{C} i_{dc} \right] \frac{C v_{dc}}{3k \left(u_{d} - R i_{d} \right)}$$
(11)

得电压外环的直流输出就是电流内环的指定电流 VIENNA 控制系统框图如图 2 所示。



图 2 VIENNA 整流器控制算法结构框图

4 仿真及实验验证

为验证基于滑模变结构的 VIENNA 整流器的误 差迭代 PI 控制方法的可靠性和优越性,采用 MAT-LAB/Simulink 按图 2 搭建了模型并进行仿真。仿真 参数分别为:s 三相电压的有效值为 110 V,频率是 50 Hz;输出直流电压设定值为 v^{*}_{dc} = 300 V;网侧输入 电感值为 2 mH;直流输出侧的两个电容为 2 200 μF;开关频率 15 kHz。 图 3 和图 4 分别为系统启动和负载突变时的传 统双闭环 PI 控制方法和滑模控制方法的有功功率 响应波形图(无功功率忽略不计)。由图可见,滑膜 控制方法输出功率能够更快地到达稳定状态,超调 量更小,并且在功率突变时,系统能重新回到滑模面 上,说明了滑模控制方法的鲁棒性更好,并且能更快 地调节功率。



图 4 滑模控制下的功率响应

图 5 和图 6 分别为传统 PI 控制与滑模控制下的电压响应波形图。

从图 5 中不难看出,在参考值为 300 V 的情况 下,超调电压超出参考值 50 V 左右,到达稳定值的 时间大约需要 0.015 s,并且于 0.05 s 时,系统发生 负载突变的情况下,电压波动非常明显。

而从图 6 可以看出,超调电压超出参考值微乎 其微,并且到达稳定值的时间也远远小于 0.015 s, 并且在系统负载突变的情况下,电压波动也远远小 于传统 PI 控制下的电压波,这说明采用滑模系统可 以使系统运行轨线更加快速向滑动模态区域移动, 系统的响应速度更快,收敛时间更短,从而系统可以 更加快速到达稳定状态。





图 6 滑模控制下的电压响应

按照图 1 的拓扑图搭建所需样机,从而来验证 所提方法的可行性,采用与仿真一样的电路参数,采 用 TMS320F2812 芯片来进行对电压、电流的采样、 状态空间矢量的分配以及计算、控制采样等。双向 开关由 STW48NM60N 功率管和整流桥组成,并选用 DSEI12-06A 快恢复二极管。

由图 7 可见,输入电流可以不错的跟随着输入 电压进行波动,并都正弦度很高,谐波含量很低,接 近于同相位,满足了网侧为单位功率因素的要求。 输出电压波纹度低,且电压值很稳定。



5 结论

本文提出了一种基于滑模变结构控制的 VIENNA 整流器的控制器;电压外环和电流内环分 别采用滑模变结构控制和误差迭代 PI 算法。在传 统的双闭环 PI 控制算法的基础上,该算法提高了系 统的响应速度以及抗干扰能力,超调量更小,实现无 静差调节,在单位功率因素下运行,网侧电流的谐波 含量低,正弦度高。

参考文献:

[1] 林壮. VIENNA 拓扑整流器的控制技术研究[D]. 杭州:浙江大学 2014.3.

- [2] 刘森森. 电网受干扰时 VIENNA 整流器同步与控制方法的研究[D]. 杭州:浙江大学,2012.
- [3] 何礼高,陈鑫兵.变电感参数三电平不可逆 PWM 整流器的电流 PI优化控制[J].电工技术学报,2011,26(07):203-209.
- [4] 韦徵,陈新,陈杰,等. 单周期期控制的三相 PFC 整流器输入
 电流相位滞后及闭环补偿[J]. 中国电机工程学报,2013,33
 (33):42-49.
- [5] Wang Zhi, Fang Wei, Liu Xiaodong. Design and Analysis of Digitally Controlled High Power Factor Rectifiers Based on One-Cycle Control
 [J]. Proceeding of the CSEE, 2014, 34(21):3423-3431.
- [6] Kolar J W, Zach F C. A Novel Three-Phase Utility Interface Minimizing Line Current Harmonics of High-Power Telecommunications Rectifier Modules[J]. Intelec, 1994, 44(4):456-467.
- [7] Hadj-Youssef N B, Al-Haddad K, Kanaan H Y, et al. Small-Signal Perturbation Technique Used for DSP-Based Identification of a Three-Phase Three-Level Boost-Type Vienna Rectifier [J]. Iet Electric Power Applications, 2007, 1(2):199-208.
- [8] Youssef N B H, Al-Haddad K, Kanaan H Y. Large-Signal Modeling and Steady-State Analysis of a 1.5-kW Three-Phase/Switch/Level (Vienna) Rectifier with Experimental Validation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(3):1213-1224.
- [9] 唐欣,罗安,涂春鸣.基于递推积分 PI 的混合型有源电力滤波 器电流控制[J]. 中国电机工程学报,2003(10):38-41.
- [10] 曹会彬,孙玉香.多维力传感器耦合分析及解耦方法的研究[J].传感技术学报,2011,24(8):1136-1140.



肖 俊(1994-),男,汉族,研究方向为 非车载充电机设计研究,924090329@ qq.com;



邵如平(1964-),男,副教授,汉族,研究 方向为功率电子变换技术、分布式发电 以及电能质量,3240222938@qq.com;

王 达(1991-),男,硕士研究生,研究 方向为非车载充电机设计研究。

