

单相 PWM 整流器设计

周桂煜¹, 张超²

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 卧龙电气集团杭州研究院有限公司, 浙江 杭州 310051)

摘要:针对目前非线性化负载大量使用引起电网谐波和无功污染日益严重的问题,设计对电网污染很小的单相 PWM 整流器。通过建立和分析单相电压型 PWM 整流器的拓扑结构和数学模型,给出了该系统的电压、电流双闭环控制方法。该方法采用构造虚拟电流的方法进行电流内环的解耦控制,并通过分析系统的瞬时有功、无功功率流以实现电压外环的线性化控制。对系统进行基于 Matlab/SIMULINK 的仿真分析,并进行硬件设计,搭建整流器实验模型,以进行实验验证。仿真和实验结果验证了该电压、电流双闭环控制方法的可行性,同时表明单相 PWM 整流器具有网侧单位功率因数运行、网侧电流正弦化、直流输出电压纹波小等优点,对电网的谐波和无功污染很小。

关键词:单相 PWM 整流器; 虚拟电流; 解耦控制; 瞬时有功、无功功率; 双闭环控制

中图分类号:TM 461 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-449X(2014)08-0049-06

Design of single-phase PWM rectifier

ZHOU Gui-yu¹, ZHANG Chao²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. Wolong Electric Group Hangzhou Research Institute Co.,LTD, Hangzhou 310051, China)

Abstract:Serious current harmonics and reactive power pollution are caused in power grid by the wide use of nonlinear loads. A single-phase pulse width modulation(PWM) rectifier with little pollution to the power grid was designed. A control strategy with voltage and current dual-closed-loop was given by establishing the topology and mathematical model of the single-phase PWM rectifier. In the inner current loop control a method of constructing a virtual current was utilized to achieve decoupling control, and in the outer voltage loop control instantaneous active and reactive power theory was utilized to achieve the linearization control of voltage. Then, simulation was made using the software of Matlab/Simulink, while hardware system was designed and prototyped. Simulation and experimental results verify the feasibility of the voltage and current dual-closed-loop control method. And, the results also demonstrate that the single-phase PWM rectifier has advantages of unit power factor operation and sinusoidal current in the AC side, small ripple in the DC output voltage, etc. Thus, current harmonics and reactive power pollution to the power grid caused by single-phase rectifier are all very small.

Key words:single-phase PWM rectifier; virtual current; decoupling control; instantaneous active and reactive power; dual-closed-loop control

收稿日期: 2013-11-27
基金项目: 国家 863 项目(2011AA11A101)
作者简介: 周桂煜(1992—),男,博士研究生,研究方向为高效感应电机本体及其驱动;
张超(1989—),男,助理工程师,研究方向为电机控制。
通讯作者: 周桂煜

0 引言

近年来,国家大力倡导绿色能源和节能减排,而非线性化负载的广泛使用,大量无功和谐波注入到电网中,对电网造成严重污染,使得电网的效率降低。为改变这一状况,需要变流装置以实现网侧电流正弦化,并使网侧运行于单位功率因素,以达到减小电网无功和谐波污染的目的。大多数的变流设备有整流环节,且存在大量要求以直流电源供电的设备和装置,传统的整流环节广泛使用二极管不控整流或晶闸管相控整流,会向电网注入大量谐波和无功功率,而 PWM 整流器进行 AC/DC 变换,能实现网侧电流正弦化,保证单位功率因素运行^[1],而逐渐受到人们的关注。

PWM 整流器按照电网相数可分为单相和三相两类,按照储能形式可分为电流型和电压型两类。文献[2]分析了三相 PWM 整流器的模型及其控制方法,文献[3]分析了电流型 PWM 整流器,而本文重点分析单相电压型 PWM 整流器的原理及其控制方法。

单相 PWM 整流器的性能与其控制方法密切相关,本文采用电压、电流双闭环的控制方法。由于 PI 调节器对直流量有比交流量更好的控制效果,因此需要解耦控制,而单相 PWM 整流器网侧电流只有一相,无法直接通过坐标变换实现解耦,因此本文通过构造虚拟电流实现电流内环的解耦控制。电压外环采用瞬时有功、无功功率方法,动态控制系统有功和无功功率,并实现直流外环电压的线性化控制。最后,通过仿真和实验来验证该控制方法具有良好的控制效果。

1 单相电压型 PWM 整流器模型建立

1.1 单相电压型 PWM 整流器基本拓扑结构

单相电压型 PWM 整流器主要由交流电源、交流电感、功率开关桥(H 桥、IGBT)、直流侧储能电容、负载等组成,如图 1 所示。单相电压型 PWM 整流器是按照升压电路(Boost 电路)的原理工作,因此,其输出的直流电压只能从输入交流电压峰值向上调节,而不能低于交流电压的峰值,否则会导致系统不能正常工作^[4]。

通过理论分析可知,单相 PWM 整流器直流侧存在一个 2 倍于电网频率的 2 次谐波电流(或功率)分量^[5],该谐波分量的存在不仅影响输出直流

电压的稳定性,负反馈后还会使网侧电流出现 3 次谐波而对电网造成污染^[6],同时为抑制直流侧低频电压脉动,需要用更大的电容器,这将导致整流器尺寸和质量增加、寿命降低。因此,需要 2 次谐波滤波器来滤除直流侧的 2 次谐波分量。2 次谐波滤波器可以采用 LC 无源滤波器(见图 1),该滤波器是采用典雅谐振的方法滤除 2 次谐波。但是由于采用无源滤波器其体积仍较大,在某些场合不能达到良好的效果,而需要采用有源滤波器,有源滤波器的控制将复杂很多,文献[7-8]列举了一些有源滤波器的例子。

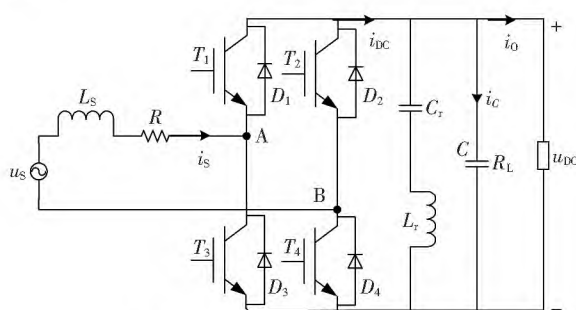


图 1 单相电压型 PWM 整流器

Fig. 1 Single-phase voltage-type PWM rectifier

1.2 单相电压型 PWM 整流器数学模型

单相电压型 PWM 整流器交流侧的等效电路如图 2 所示,可列出方程为

$$L_s \frac{di_s(t)}{dt} + Ri_s(t) + u_{AB}(t) = u_s(t). \quad (1)$$

对直流侧分析,列出方程为

$$i_{DC} = C \frac{du_{DC}(t)}{dt} + i_o(t). \quad (2)$$

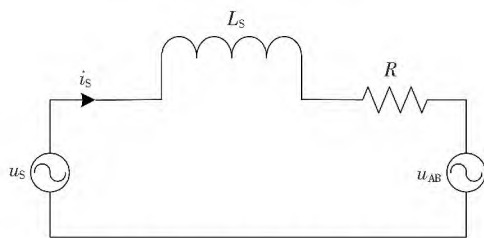


图 2 单相 PWM 整流器交流侧等效电路

Fig. 2 AC side equivalent circuit of single-phase PWM rectifier

单相 PWM 整流器能实现四象限运行,其运行状态向量图^[4]如图 3 所示,从该图可知,PWM 整流电路只要控制 \dot{U}_{AB} 的相位,就能方便实现能量双向流动,这对需要有再生制动功能、欲实现四象限运行的交流调速系统是一种必须的电路方案。

万方数据

后,通过解耦变换,得到 $i_{sd}(t)$ 、 $i_{sq}(t)$,同时将 $i_{sq}(t)$ 的给定值设为零,以实现整流器的单位功率因素运行。对于电压外环控制,根据式(14),若以 $u_0^2(t)$ 作为电压外环的控制量能实现外环的线性化控制。

3 系统硬件设计

3.1 系统主电路硬件设计

单相电压型 PWM 整流器主电路包括网侧的交流电源、交流电感、功率模块和直流侧的储能电容、2 次谐波滤波电路等。

交流电感的选取应考虑两个方面,一是电感磁芯材料,二是电感量的大小。整流器交流电感的磁芯材料应具有低损耗、高饱和磁感应强度、高频磁性良好等特点,比如非晶材料等,同时应考虑电感的成本和体积等要求。电感量和直流侧储能电容的电容量的选取可参见文献[11]。功率模块可以采用三菱公司的 IPM 模块,IPM 不仅把功率开关器件和驱动电路集成在一起,而且还内藏有过电压,过电流和过热等故障检测电路,并可将检测信号送到 CPU。

3.2 系统控制电路硬件设计

控制电路主要包括中央处理器、可编程逻辑器件(complex programmable logic device, CPLD)、电压传感器、电流传感器、隔离电路和驱动电路等。总体结构详见图 7。

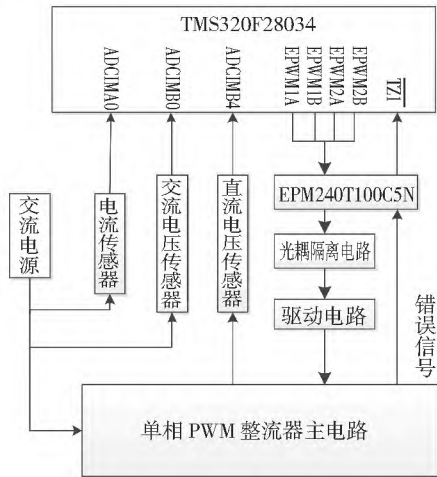


图 7 控制电路结构
Fig. 7 Control circuit diagram

4 系统仿真分析

系统仿真使用 Matlab 软件中的 SIMULINK,设置网侧电感为 7 mH、直流侧电容为 470 μ F、网侧输入的正弦电压的有效值为 5 V、控制输出的直流电压为 20 V、负载为 150 Ω 。

带负载运行情况下,待系统稳定运行后,得到的网侧电压、电流波形如图 8 所示。图 9 为网侧电流的谐波分析。可以看出,网侧电压、电流相位相同,并且电流的谐波较小,这说明了 PWM 整流器具有运行在单位功率因素、网侧电流正弦化等优点。图 10 为整流器直流侧的直流电压波形,直流输出电压从零上升,然后稳定在 20 V,并且电压波动很小。

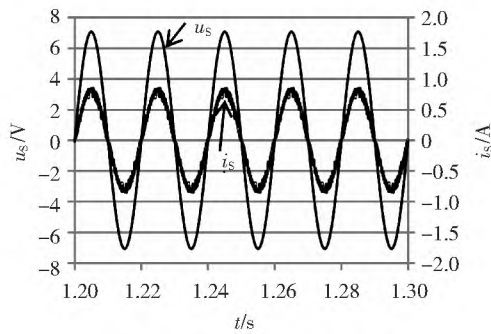


图 8 网侧电压、电流波形
Fig. 8 Voltage and current waveforms of AC side

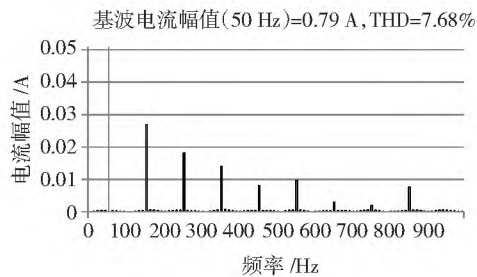


图 9 网侧电流谐波分析
Fit. 9 Current harmonic analysis of AC side

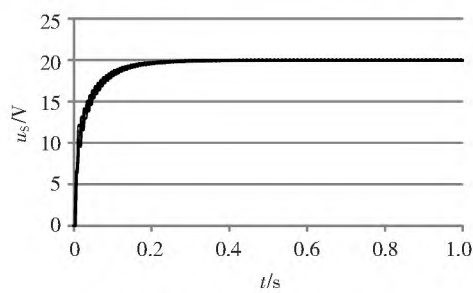


图 10 直流电压波形
Fig. 10 DC voltage waveform

对于整流器,其需要一定的抗干扰能力。当系统运行于空载,突加负载,那么这一瞬间系统的网侧和直流侧的电压、电流均会有一些的变化,分别如图 11、图 12 所示。可以发现,网侧电流逐渐变大,直流侧电压有略微的下降后又马上恢复到 20 V,因此,系统具有良好的抗负载变化能力和动态响应能力,直流电流在突加负载时瞬间变大。

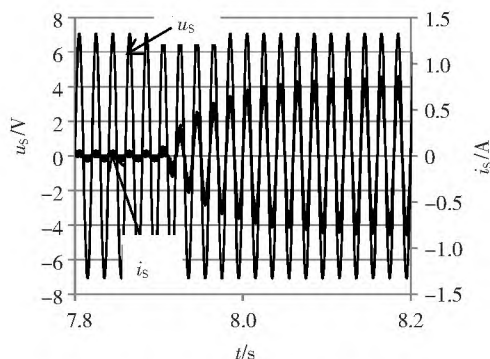


图 11 突加负载时网侧电压、电流波形

Fig. 11 Voltage and current waveforms of AC side when suddenly load

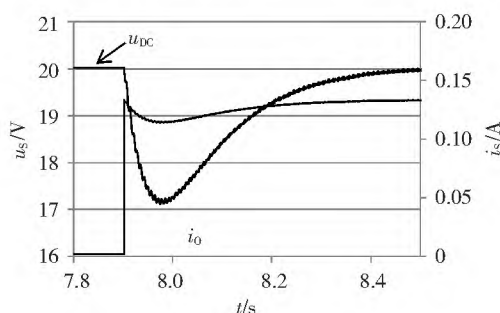


图 12 突加负载时直流电压、电流波形图

Fig. 12 Voltage and current waveforms of DC side when suddenly load

5 系统实验分析

硬件系统搭建用到的原件及相关参数为:卧龙电气集团设计开发的 IPM 集成板 1 块;卧龙集团设计开发的 TMS320F28034 芯片开发板 1 块;交流电感 2 个,电感量为 1 mH,磁芯为非晶材料; ± 15 V 直流电压源 1 个;电压传感器(TBV10/25 A)2 个;运算放大器(LM324)1 个;DSP 仿真器 1 个;电容 3 个,电容量为 470 μ F,耐压 100 V;滤波电感 1 个,电感量为 2.6 mH;隔离变压器和降压变压器各 1 个。

控制输入网侧交流电压在 5 V 左右,输出直流电压为 20 V,得到的交流电压、电流波形如图 13 所示,直流电压波形如图 14 所示。

由图 13 可知,网侧电压和电流的相位基本相同,整流器处于单位功率因素运行状态;交流侧的电流近似为正弦曲线,不过有一定的纹波。减小纹波相对值的方法有增大网侧滤波电感值、提高 IGBT 开关频率、增大直流侧负载等。由图 14 可知,输出直流电压在略微的超调后稳定在给定的电压值,并且电压纹波很小。实验结果表明,该单相电压型 PWM 整流器运行状况良好。

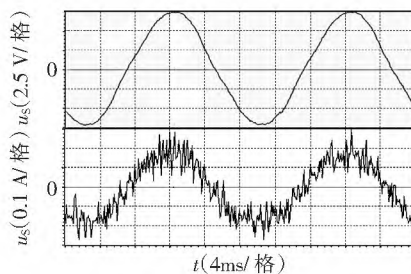


图 13 网侧电压、电流波形

Fig. 13 Voltage and current waveforms of AC side

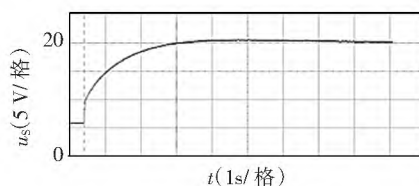


图 14 直流电压波形

Fig. 14 Voltage waveform of DC side

6 结 语

本文对单相电压型 PWM 整流器进行了深入的理论分析,研究和阐释了其控制策略,并进行系统的仿真分析,搭建系统硬件平台,并调试使系统稳定工作。

仿真和实验结果表明,PWM 整流器能运行在网侧单位功率因素下,并保证网侧电流畸变少,直流输出电压纹波少,有良好的抗干扰能力。相比于传统的整流器,PWM 整流器对电网的污染小、性能好,因此在电网中使用 PWM 整流器对改善电网电能质量具有重要作用。

参 考 文 献:

- [1] 张崇巍,张兴. PWM 整流器及其控制[M]. 北京:机械工业出版社,2003: 15-18.
- [2] 邵克存,戴瑜兴,杨金辉,等. 三相高功率因数整流器的神经网络内模控制[J]. 电机与控制学报,2012,16(2): 44-49. GAO Kecun, DAI Yuxing, YANG Jinhui, et al. The control method of three-phase high-factor rectifier based on neural network internal model theory[J]. Electric Machines and Control, 2012, 16(2): 44-49.
- [3] 谈龙成,李耀华,刘丛伟,等. 三相电流型 PWM 整流器的功率因数控制方法[J]. 电工技术学报,2010,25(2): 86-93. TAN Longcheng, LI Yaohua, LIU Congwei, et al. Power factor control method of three phase current source PWM rectifier[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(2): 86-93.
- [4] 贺益康,潘再平. 电力电子技术[M]. 北京:科学出版社,2010: 224-227.
- [5] 王义锋,金新民. 关于单相 PWM 整流器二次吸收回路的研究

[J]. 电力电子,2003,1(5): 39-41.

WANG Yifeng, JIN Xinmin. Research on the second-harmonics filter circuit of single-phase PWM rectifier[J]. Power Electronics, 2003,1(5): 39-41.

[6] WU Z X, ZOU Y P, WANG C Z, et al. A performance improvement technique for single-phase PWM rectifier[C]//2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference, May 17-20, 2009, Wuhan, China. 2009: 1638-1642.

[7] SAITO M, MATSUI N. Modeling and control strategy for a single-phase PWM rectifier using a single-phase instantaneous active/reactive power theory[C]//The 25th International Telecommunications Energy Conference, 2003. October 23-23, 2003, Yokohama, Japan. 2003: 573-578.

[8] CHAO K H, CHENG P T, SHIMIZU T. New control methods for single phase PWM regenerative rectifier with power decoupling function[C]//International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2009, November 2-5, 2009, Taipei, China. 2009: 1091-1096.

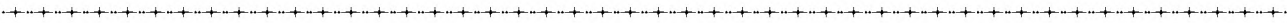
[9] 肖汉. 单相 PWM 整流器矢量控制的研究[D]. 广州:广东工业大学,2010.

[10] 刘秀翀, 张化光, 褚恩辉, 等. 三相电压型 PWM 整流器功率控制方法[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(1): 47-51.

LIU Xiuchong, ZHANG Huaguang, CHU Enhui, et al. Power control scheme for three-phase voltage-type PWM rectifiers[J]. Electric Machines and Control, 2009, 13(1): 47-51.

[11] 刘娟. 基于 DSP 的单相 PWM 整流器的研究[D]. 成都:西南交通大学,2011.

(编辑:于双)



(上接第 42 页)

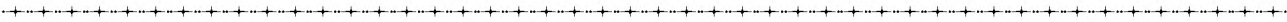
[12] 叶伟,张晓光,孙力. 基于线性霍尔传感器的高速永磁同步电机控制系统设计[J]. 伺服控制,2010(3): 41-44.

YE Wei, ZHANG Xiaoguang, SUN Li. Design of high-speed PMSM control system based on linear Hall sensors[J]. Servo Control, 2010(3): 41-44.

[13] 付彦超. 基于线性霍尔的交流永磁同步电机伺服驱动系统[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院,2011.

[14] HU J H, ZOU J B, XU F, et al. An improved PMSM rotor position sensor based on linear Hall sensors[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(11): 3591-3594.

(编辑:于双)



(上接第 48 页)

[14] PERESADA S, TILLI A, TONIELLI A. New passivity-based speed-flux tracking controllers for induction motor[J]. Industrial Electronics Society, 2000: 1099-1104.

[15] SANGCHEOL Lee, KWANGHEE Nam. Dynamic modelling and passivity-based control of an induction motor powered by doubly fed induction generator[C]//Industry Applications Conference, 2003: 1970-1975.

[16] 杨金明, 吴捷, 董萍, 等. 基于无源性理论的风力机最大风能捕获控制[J]. 太阳能学报, 2003, 24(5): 724-728.

YANG Jinming, WU Jie, DONG Ping, et al. Maximum wind energy capture control with passivity-based theory[J]. Acta Ener-giae Solaris Sinica, 2003, 24(5): 724-728.

[17] EKANAYAKE J B, HOLDSWORTH L, WU Xueguang, et al. Dynamic modeling of doubly fed induction generator wind turbines[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 803-809.

[18] MANOJ R. A novel robust control and fault ride through for wind turbines with doubly fed induction generator operating in weak grids[D]. University of Minnesota, 2005.

(编辑:于智龙)