

基于 DSP 的三相电压型整流器

任先文, 王 坤, 余志飞

(东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 为更好地实现三相电压型整流器数字化控制, 从三相电压型 PWM 整流器(VSR)主电路拓扑结构出发, 以数字化控制技术为切入点, 以 TMS320LF2812 为控制核心, 根据一种空间矢量算法, 简化了 DSP 芯片的软件设计。并在此基础上给出了由 DSP 芯片控制的三相电压型 PWM 整流器的控制系统。详细介绍了交流电压采样、直流电压检测、IPM 驱动电路、PI 调节器、空间矢量脉宽调制(SVPWM)等控制模块的设计流程及相应的软件控制框图。最后利用 Matlab/Simulink 工具箱建立了三相电压型 PWM 整流器的仿真模型, 并进行了仿真。仿真结果证明: 基于 DSP 控制的三相电压型整流器实现了单位功率因数控制, 具有优良的动态和静态性能。

关键词: 数字信号处理器; PWM 整流器; 空间矢量; 前馈解耦; 功率因数; 调理电路

中图分类号: TM 461

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2010)03-0116-05

三相电压型 PWM 整流器(VSR)能够同时控制直流电压和网侧功率因数而被广泛应用于电机驱动、蓄电池充放电控制和并网发电等场合^[1-3]。空间矢量脉宽调制(SVPWM)因其与同步旋转坐标系控制量接口方便, 直流电压利用率高、总谐波畸变小等特点被广泛应用于 PWM 整流器当中^[4-6], 相较于正弦脉宽调制(SPWM), SVPWM 更便于数字化的实现^[7]。TMS320F2812 是 TI 公司设计的电机控制专用芯片, 它的事件管理器 EV 含有硬件 SVPWM 产生电路。而且 TMS320F2812 在 150 MHz 的工作频率, 因此利用 DSP 芯片 TMS320F2812 产生 SVPWM 具有硬件结构简单、控制精度高、实时性强、软件编程容易等优点^[8]。本文着重研究了 DSP 控制芯片在 PWM 整流装置中的应用, 结合经典电流控制理论和一种空间矢量脉宽调制简化算法^[9]详细论述了基于 DSP 控制芯片的 PWM 整流器各部分的设计方法, 给出了各个模块的基本电路、软件控制流程以及仿真实验结果。

1 三相电压型 PWM 整流器的控制原理

整流器的控制目标是实现网侧高功率因数正弦波电流控制和直流侧输出电压控制。本文采用电流内环控制实际电流和指令电流的跟踪, 以电压外环控制直流输出电压的控制策略, 此模型的矢量控制方案完全能够实现功率四象限变换, 并具有动态响应快、稳态性能好的优点^[10-11]。三相电压型整流器主电路由网侧电路(见图 1)、整流器、中间电路及 PWM 控制器组成, 主电路采用 IGBT, 反并联二极管为 IGBT 的寄生二极管, L 和 R_1 为电感的等效参数, C 为直流滤波电容, u_{ca} 、 u_{cb} 和 u_{cc} 为整流桥三相控制电压。整流器的基本工作原理为通过对 6 个开关管的适当控制,

改变 u_{ca} 、 u_{cb} 和 u_{cc} 的波形和相位, 从而改变输入电流的相位, 达到改变功率因数的目的。

对于直接电流控制方案, 传统的控制策略采用双闭环控制, 即电流内环实现单位功率因数, 电压外环实现直流侧电压的调节。采用 PI 调节器分别对直流电压和输入电流进行控制, 即直流电压 PI 调节器输出得到的三相参考电流幅值 I_m^* 与交流电压相位信号相乘后得到参考电流信号 I_{sk}^* , I_{sk}^* 与实际电流 I_{sk} 比较得到电流误差, 对电流误差进行 PI 调节, 用以减缓电流在动态过程中的突变。

在 abc 坐标系和 $\alpha\beta$ 坐标系中, 整流器的输入电流在稳态时都为工频的时间变量, 由于 PI 调节器的增益和带宽有限, 可能会导致电流跟踪结果产生误差。如果通过坐标变换将三相正弦电流变换到与电流基波频率同步旋转 dq 坐标系, 稳态正弦电流变成了直流量, 而且 PI 调节器的直流增益为无穷大, 那么就可以实现电流的无差跟踪控制^[5]。

三相 VSR 两相旋转坐标系下整流器开关函数的模型为

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = u_d - i_d R_1 + \omega L i_q - u_{nd} \\ L \frac{di_q}{dt} = u_q - i_q R_1 + \omega L i_d - u_{nq} \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = -\frac{U_{dc}}{R_L} + \frac{3}{2} (S_d i_d + S_q i_q) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $u_{nd} = S_d u_{dc}$; $u_{nq} = S_q u_{dc}$; u_{nd} 、 u_{nq} 和 S_d 、 S_q 分别为整流桥在 dq 坐标系下的输入电压和开关函数; u_d 、 u_q 和 i_d 、 i_q 分别为电网侧电动势和电流 d 、 q 分量; ω 为角频率。

从式(1)可以看出, 由于三相电压型整流器 dq 轴变量相互耦合, 因而给控制器设计造成了一定的困难, 为此可采用前馈解耦控制策略。当电流调节器采用 PI 调节器时, 则 u_{nd} 、 u_{nq} 的控制方程为

$$\begin{cases} u_{nd} = -\left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s}\right)(i_d^* - i_d) + \omega L i_q + u_d \\ u_{nq} = -\left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s}\right)(i_q^* - i_q) + \omega L i_d + u_q \end{cases} \quad (2)$$

其中, K_{ip} 、 K_{il} 为电流内环比例调节增益和积分调节增益; i_d^* 、 i_q^* 为电流指令值。

式(2)表明基于前馈算法使三相电流内环实现了解耦控制,再加上外环的电压控制就构成了双闭环的整流器控制原理图,如图1所示。

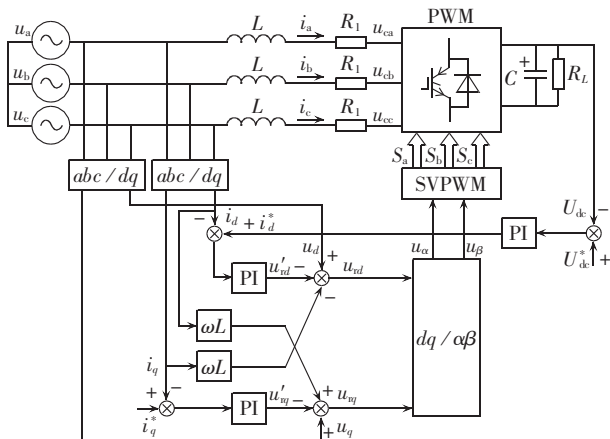


图1 三相电压型整流器控制原理框图

Fig.1 Control principle of three-phase VSR

2 VSR 的电压空间矢量控制

电压和电流双闭环调制产生的电压 u_{nd} 、 u_{nq} 信号,通过 SVPWM 控制整流器产生所需要的直流母线电压。

2.1 开关作用时间计算

传统 SVPWM 的算法步骤为:将合成电压矢量在 $\alpha\beta$ 两相直角坐标系下进行分解,通过反正切函数求出合成的相角 θ ,根据相角判断矢量所在扇区并确定电压矢量,再用正弦函数计算各电压矢量的作用时间。可见传统的 SVPWM 算法复杂,计算量大,计算精度以及控制系统的实时性将会受到不可忽视的影响。本文采用文献[9]中给出的一种实现 SVPWM 的快速算法,可有效地简化 DSP 的软件设计。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \sqrt{3} \\ 3/2 & \sqrt{3}/2 \\ -3/2 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (3)$$

由上述可知,式(3)简化了运算。其中, $V_{s\alpha}$ 、 $V_{s\beta}$ 是空间矢量在 $\alpha\beta$ 坐标轴上的投影。可根据求出的各扇区矩阵表达式,选择不同的 X 、 Y 、 Z 组合对应电压矢量的作用时间合成任一空间电压矢量。

2.2 电压矢量所在扇区判断

传统 SVPWM 判断电压矢量所在扇区是根据 $\alpha\beta$ 坐标系下的电压矢量计算出幅值,再结合电压矢量的符号判断,这种方法由于含有非线性函数,计算比较复杂,因此采用一种简单快捷的方法进行判断^[9]。定义以下变量:

$$\begin{cases} A = V_{s\beta} \\ B = -V_{s\beta} + \sqrt{3} V_{s\alpha} \\ C = -V_{s\beta} - \sqrt{3} V_{s\alpha} \end{cases} \quad (4)$$

则扇区号 N 满足以下关系式:

$$N = \text{sgn}(A) + 2\text{sgn}(B) + 4\text{sgn}(C)$$

其中,符号函数定义为

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (5)$$

3 PWM 整流器硬件系统设计

3.1 TMS320F2812 控制芯片模块

TMS320F2812 是 32 位定点 DSP 芯片。该芯片兼容 TMS320F24x 指令系统,其片上外设主要包括 2 × 8 路 12 位 ADC(最快 80 ns 转换时间)、2 路 SCI、1 路 SPI、1 路 McBSP、1 路 eCAN 等,并带有 2 个事件管理模块(EVA、EVB),分别包括 6 路 PWM/CMP、2 路 QEP、3 路 CAP、2 路 16 位定时器(或 TxPWM/TxCMP)^[12]。该芯片扩展方便,用它来构建一个控制系统简单易行,这些片内外设为 DSP 应用于电动机控制提供了方便。尤其是它具有 2 个事件管理器,利用其 PWM 输出,可以方便地控制 PWM 整流系统的 6 个开关管。图2为基于 TMS320F2812 实现的控制系统结构框图,分别将由电流传感器和电压传感器采样来的模拟量限压后送入 TMS320F2812 的 AD 口,在 TMS320F2812 中编程,实现三相静止坐标系变换到两相旋转坐标系及 PI 调节器的功能,减小了使用模拟器件所带来的偏差和温漂,提高了系统的可靠性。6 路 PWM 控制信号来自于 TMS320F2812 的事件管理器 A。

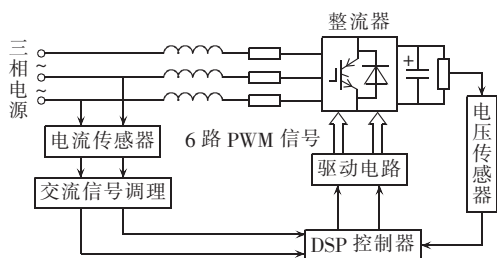


图2 基于 TMS320F2812 实现的控制系统结构图

Fig.2 Control system based on TMS320F2812

3.2 交流电流采样模块

TMS320F2812 实现了对交流电量的快速、实时、准确采样与处理。模数转换模(ADC)有以下特点:带内置采样和保持的 10 位模数转换模块的 ADC;多达 16 个模拟量输入通道(ADCIN0~ADCIN15);有 2 个独立的、最多可选择各含 8 个模拟转换通道的排序器;多个触发源可启动 AD 转换和灵活的中断控制;采样和保持获取时间有单独的预定标控制。

电流有效值计算公式为

$$I = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N i^2} \quad (6)$$

交流电流通过电流传感器实现了无畸变无延时

的信号转换,将高压电信号转换成低压弱电。由于 DSP 的 A/D 采样电压比较低(0~3.3 V),则在 DSP 进行采样前应把输入的模拟电流信号进行适当的处理,使其与 A/D 采样所需要的信号相匹配。为了提高采样精度,选择 N 值应能被 360 整除,以及要在交流电流过零点处采样。图 3 为交流电流调理电路,模拟量经过调理后送入 DSP 进行 A/D 转换。

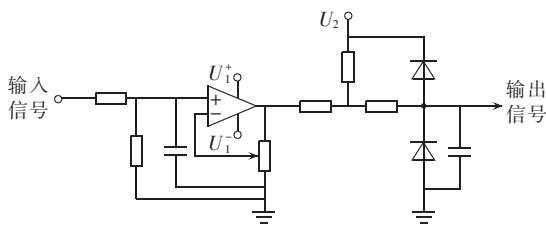


图 3 交流信号调理电路

Fig.3 AC signal conditioning circuit

3.3 直流电压检测模块

直流侧电压由电压检测电路取自直流侧电容的两端经电阻分压后转化为 0~4 V 电压信号,再由光电耦合器整定为 0~5 V 电压信号送入 DSP 的 ADCIN 端。采用电压检测电路如图 4 所示。

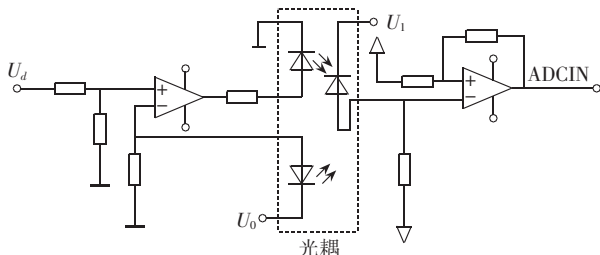


图 4 直流电压检测电路

Fig.4 DC voltage detection circuit

3.4 IPM 驱动电路

IPM 将 IGBT 所需的外围电路都集成到模块内,所以它与 DSP 的连接非常简单^①。由于 IPM 对驱动电压和信号干扰的要求严格,为防止 IPM 损坏和误动作,因此 DSP 与 IPM 之间不能有直接的电气连接,可以采用专为 IPM 等功率器件设计的高速光电耦合器作为输入信号的隔离器件。

3.5 PI 调节器的设计

在控制系统中,电压环是由模拟运放电路实现的,其 PI 输出连接 DSP 的 A/D 口作为有功电流的给定,采用 PI 控制规律时,2 个参数需确定,即零点 ($1/(R_2C)$) 和增益 (R_2/R_1),现有文献的观点认为开关电源电路的传递函数为二阶振荡环节,共轭极点由滤波电路参数决定,一对共轭极点是主导极点,为了补偿共轭极点造成的相位滞后,电压调节器的零点应选择为对应于共轭极点的频率处,即 $1/(R_2C) = 1/\sqrt{LC}$,根据此原则设计了 PI 调节器如图 5 所示。

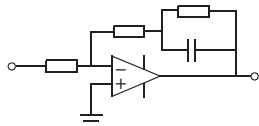


图 5 PI 调节器

Fig.5 PI regulator

3.6 SVPWM 模块

空间矢量 PWM 是依据

整流器空间电压矢量切换来控制整流器的,具有电压利用率高、动态响应快等优点。根据功率开关函数的定义,空间矢量共有 (000)(001)(010)(011)(100)(101)(110)(111) 8 种工作状态,通过分配空间电压矢量的作用时间形成等幅不等宽的 PWM 脉冲,实现开关的有效控制。直流输出电压给定信号和实际电压比较后的误差信号送入 PI 调节器,PI 调节器输出为主电路交流输入参考电流的幅值,通过式 (2) 计算出 u_d 和 u_q ,最终通过 DSP 全比较单元输出 IGBT 所需的控制脉冲。图 6 为基于 TMS320F2812 对称 SVPWM 电路结构框图。

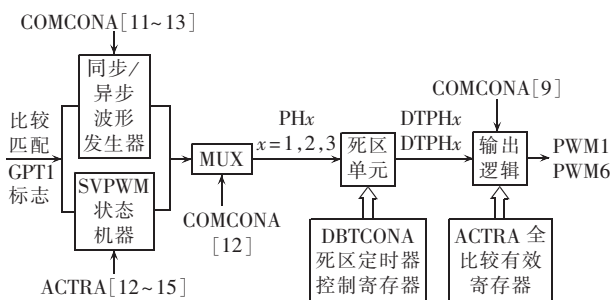


图 6 PWM 电路结构框图

Fig.6 Block diagram of PWM

在高频变换器中,以空间矢量算法为基础的各种调制方法在直流电压利用率和实现高功率因数整流等方面是基本一致的,但在降低开关元器件的开关损耗方面却有很大的差别。

4 PWM 整流器软件设计

DSP 软件包括主程序和中断服务子程序,根据 PWM 整流器控制结构图及硬件原理基于 DSP 的 C 语言给出了实现整流器功能的软件设计^{②③}。

系统主程序、A/D 转换子程序、SVWM 模块程序框图分别如图 7、8、9 所示。

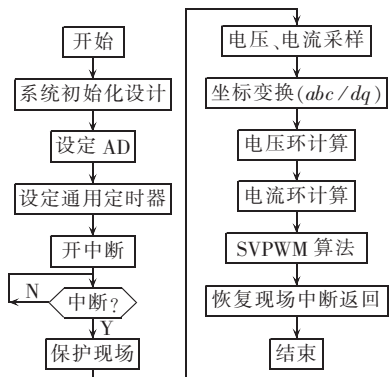


图 7 主程序

Fig.7 Flowchart of main program

① 富士公司. IGBT-IPM 应用手册.2006.

② Texas Instruments Incorporated. TMS320C28x DSP CPU and Instruction Set Reference Guide,2001.

③ Texas Instruments Application Report. TMS320F28x DSP Event Manage(EV) Reference Guide,2004.

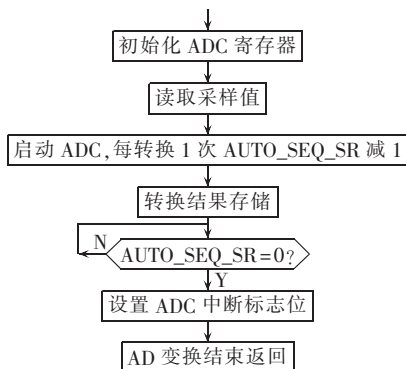


图 8 连续自动排序 AD 转换程序框图

Fig.8 Flowchart of AD conversion

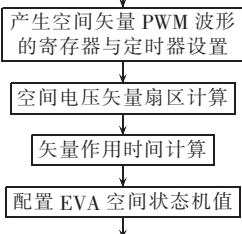


图 9 空间矢量脉宽调制算法

Fig.9 SVPWM algorithm

5 仿真结果

根据以上分析,利用 Matlab/Simulink 工具箱建立三相电压型 PWM 整流器的仿真模型进行仿真。系统主要参数如下:电源频率 50 Hz,三相交流电压幅值 310 V,滤波电感 L 取 6 mH,直流滤波电容 C 取 2200 μ F,开关频率为 6 kHz。仿真结果如图 10~13 所示。

由 a 相电压、电流波形可以看出,三相输入电压、电流基本能够保持同相位,由此可以看出,系统达到了高功率因数控制的目的。

电流从整流到逆变的变化波形,仿真时,用一个直流电压源作为反电势负载通过一个时间开关模型来切换整流器的运行状态,因为 PWM 整流器中,能量可以双向流动,分别工作于整流状态和有源逆变

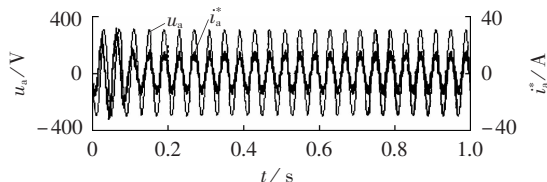


图 10 A 相电压、电流波形

Fig.10 Voltage and current waveforms of phase A

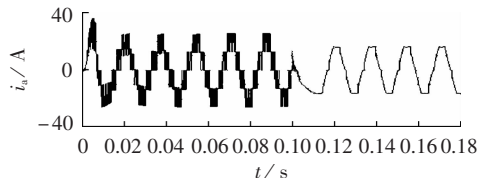


图 11 运行状态变化时的电流波形

Fig.11 Current waveform when operating state changes

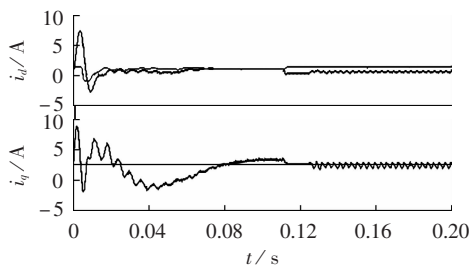


图 12 电流跟踪波形

Fig.12 Waveforms of current tracking

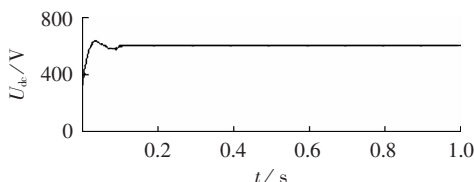


图 13 交流侧电感取 6 mH 时直流电压波形

Fig.13 DC voltage waveform ($L=6$ mH)

状态,由图 11 可以看出,电流从整流到逆变的变化中,相位差 180° ,仿真结果符合要求。

由图 12 可以看出,系统稳定后,电流的 dq 分量都能很好地跟踪给定值,达到了电流内环的控制目的。

由图 13 可以看出,当交流侧电感值取 6 mH 时,直流侧电压响应速度较快。

6 结论

以 DSP 为控制核心设计的 PWM 整流器具有功率因数高、能量双向流动、谐波污染少等优点,并且发挥了 DSP 强大功能优势,并利用空间矢量脉宽调制实现了系统的开关控制函数的求取。这种数字信号处理芯片与控制算法结合的方法应用前景十分广阔。但是在开关损耗与系统成本上有待进一步研究,以便能实现高效、廉价的产品。

参考文献:

- [1] KAZMIERKOWSKI M P, KRISHNAN R, BLAABJERG F. Control in power electronics: selected problems [M]. New York, USA: Academic Press, 2002: 232-240.
- [2] BOSE B K. Modern power electronics and AC drives [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 115-121.
- [3] RODRIGUEZ J R, DIXON J W, ESPINOZA J R. PWM regenerative rectifiers: state of the art [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(1): 15-22.
- [4] MALINOWSKI M, JASINSKI M, KAZMIERKOWSKI M P. Simple direct power control of three-phase PWM rectifier using space-vector modulation (DPC-SVM) [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(2): 447-454.
- [5] 张崇巍, 张兴. PWM 整流器及其控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 112-153.
- [6] 钟炎平, 沈颂华. PWM 整流器的一种快速电流控制方法 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(12): 52-56.
ZHONG Yanping, SHEN Songhua. A fast current control scheme for PWM rectifier [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(12): 52-56.
- [7] 刘和平, 邓力, 江渝, 等. 数字信号处理器原理、结构及应用基

- 础-TMS320F28x[M]. 北京:机械工业出版社,2007:264-269.
- [8] 周有为,刘和平,杨利辉. 基于TMS320F2812的SVPWM的研究[J]. 电气应用,2005,24(2):98-101.
- ZHOU Youwei,LIU Heping,YANG Lihui. Study of SVPWM based on TMS320F2812[J]. Electrotechnical Journal,2005,24(2):98-101.
- [9] WANG Xu,HUANG Kaizheng,WANG Wanwei. Modeling and simulation reasearch for three-phase voltage source PWM rectifier[J]. Journal of System Simulation,2008,20(19):5204-5207.
- [10] 伍小杰,罗悦华,乔树通. 三相PWM电压型整流器控制技术综述[J]. 电工技术学报,2005,20(12):7-12.
- WU Xiaojie,LUO Yuehua,QIAO Shutong. A control technical summary of three-phase voltage-source PWM rectifiers [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2005,20(12):7-12.
- [11] Hadian Amrei S R,徐殿国,郎永强. 一种PWM整流器直接功

率控制方法[J]. 中国电机工程学报,2007,27(25):78-84.

Hadian Amei S R,XU Dianguo,LANG Yongqiang. A new direct power control for PWM rectifier [J]. Proceedings of the CSEE, 2007,27(25):78-84.

- [12] 张雄伟,陈亮. DSP原理与开发应用[M]. 北京:电子工业出版社,2003:126-132.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:

任先文(1954-),男,吉林通化人,教授,主要从事电力系统继电保护、微机在电力系统中的应用等方面的研究;

王 坤(1982-),男,山东菏泽人,硕士研究生,主要从事电力系统继电保护、微机在电力系统中的应用等方面的研究
(E-mail:ultrabc@yahoo.cn)。

DSP-based three-phase voltage source rectifier

REN Xianwen,WANG Kun,YU Zhifei

(School of Electrical Engineering,Northeast Dianli University,Jilin 132012,China)

Abstract: The software design of its control core,DSP TMS320LF2812,is simplified by applying the digital control technology and space vector algorithm to better implement the digital control of a three-phase VSR (Voltage Source Rectifier) according to its main circuit topology,based on which,the DSP-based control system of three-phase voltage-type PWM rectifier is given. The design and relevant block diagrams are detailed for the control modules of AC voltage sampling,DC voltage detection,IPM drive circuit,PI regulator,SVPWM(Space Vector Pulse Width Modulation),etc. Its simulation model is established in Matlab/Simulink and the simulative results show that,the DSP-controlled VSR implements unity power factor control with excellent dynamic and static performance.

Key words: DSP; PWM Rectifier; SVPWM; feedforward decoupling; power factor; conditioning circuit