

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.03.008

基于 FSB50760SF 驱动永磁同步电机驱动器的设计与实现

胡正国, 易桢桢, 王远洋, 王 卫, 刘 亚, 刘煜鸿

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 设计了一种基于 FSB50760SF 驱动永磁同步电机的控制器及验证电路, 并将其应用在洗衣机的控制器中。测试结果表明: 基于 FSB50760SF 驱动永磁同步电机的设计完全满足设计要求。

关键词: FSB50760SF; 永磁同步电机; 驱动器

中图分类号: TM341

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2018)03-0042-06

Design and Implementation of Permanent Magnet Synchronous Motor Drivers Based on FSB50760SF

HU Zhengguo, YI Qianqian, WANG Yuanyang, WANG Wei, LIU Ya, LIU Yuhong

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: A controller has been designed for permanent magnet synchronous motors based on FSB50760SF, with its verification circuit applied to the controller of washing machines. The results show that the design of PMSM based on FSB50760SF can fully meet the desired requirements.

Keywords: FSB50760SF; permanent magnet synchronous motor; driver

0 引言

洗衣机是生活中比较重要的大家电, 对洗衣机而言, 高洗净低磨损、健康洗涤、智能静音、节水节能等创新技术才是体现产品竞争力的根本。市场上主流的洗衣机都会在节水节能和智能静音方面采取重要的技术手段。针对节水节能和智能静音技术, 需要选取一个好的电机和一个好的控制驱动器。

目前, 家电市场上应用较多高效率的电机有开关磁阻电机和永磁同步电机等。相较而言, 永磁同步电机工作的时候产生的噪音最低。而且永磁同步电机工作效率高、控制简单, 更加适用于洗衣机家电行业。

同时, 永磁同步电机具有如下优点: 1) 启动力矩大、过载能力强; 2) 运行效率高, 节能效果尤为明显^[1-2]。

在许多电机控制应用中, 选择使用逆变器的一个重要因素就是优化整个传动系统的总成本与性能比。针对工程中的要求, 在设计一台洗衣机驱动系统的时候需要设计好逆变器。查找资料得知, Fairchild (飞兆) 半导体公司已经开发出智能功率模块 (intelligent power module, IPM) 系列产品。本研究中课题组选择 Fairchild 公司智能功率模块 FSB50760SF 设计洗衣机控制板, 不仅能够很好地满足低功率电机控制“节约能源”和“静音运转”的需要, 同时做到控制器的结构尽量紧凑, 成本尽量低。

收稿日期: 2017-06-19

作者简介: 胡正国 (1989-), 男, 江西上饶人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为现代电力电子技术及系统,

E-mail: 313071533@qq.com

1 驱动器

对于洗衣机而言, 驱动器的设计很重要。现在主要的驱动器为传统的驱动器和目前使用较多的 IPM 模块驱动器。

1.1 传统逆变器与 IPM 逆变器

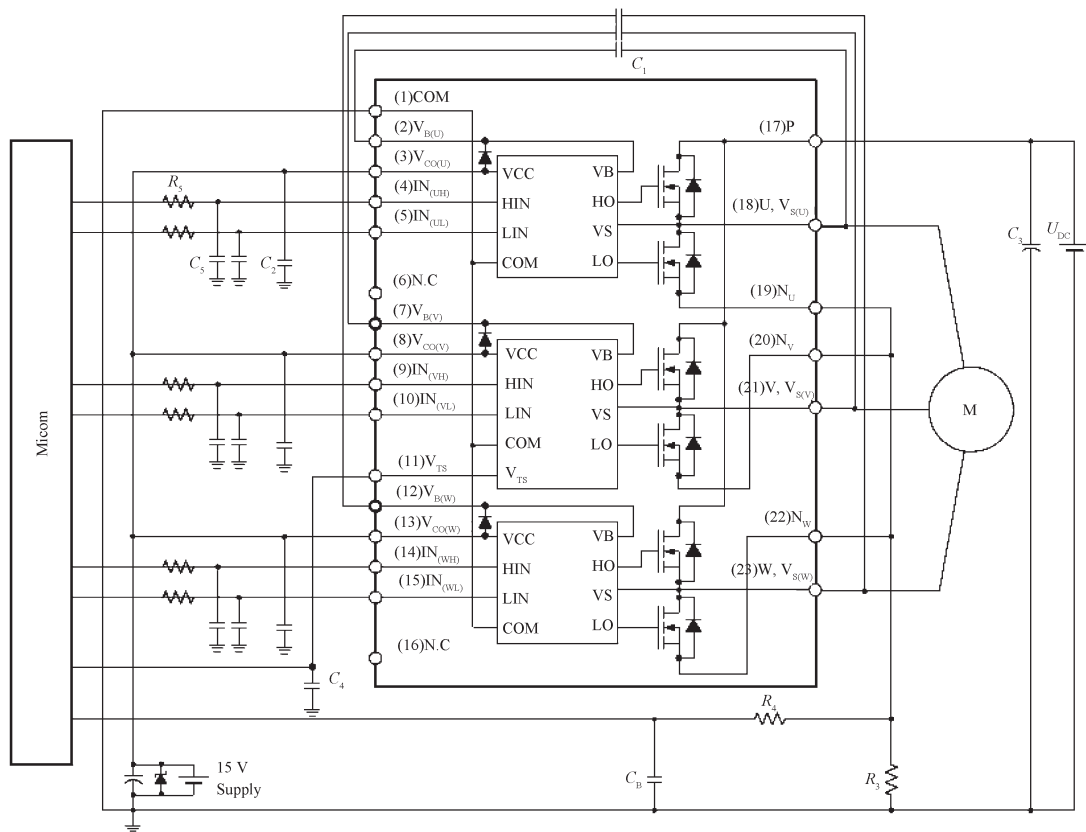
传统的驱动器在逆变器部分设计的时候, 一般采用外置 6 个 IGBT 器件, 组成一个三桥臂的逆变器产生三相电压。但 6 个 IGBT 器件很占空间, 使得控制板不得不制作得比较大, 成本较高。

随着现在对驱动器的结构要求越来越紧凑, 空间变得越来越狭小, 必须采用智能功率模块。IPM 主要通过 6 个 IGBT 器件集成, 组成一个三桥臂的逆变

器产生三相电压。IPM 不仅能够缩小整个控制板的大小, 而且能够使电机输出性能稳定。

1.2 电路结构

驱动器的主电路结构如图 1 所示, 主要由微控制器 (Micom)、IPM 和永磁同步电机 3 部分组成, 其控制核心为 IPM。微控制器主要产生 6 路脉宽调制 (pulse width modulation, PWM) 逆变器驱动信号, IPM 的输入端为 6 路高低电平信号, 分别连接微控制器产生的 6 路 PWM 逆变器驱动信号^[3-4]; 其输出端为三相输出端, 连至永磁同步电机的三相输入端。设计电路时, 通常要避免波形在大功率电路中出现震荡。在微控制器与 IPM 之间加上 RC 滤波电路, 可以使输出的 PWM 波形比较稳定, 不受干扰。



kHz 的脉宽调制波,是完全能够满足要求的。

2.2 IPM 模块主要引脚功能

该 IPM 模块的引脚布局和内框如图 2 所示,下面介绍其引脚功能。

1) 输入端

a) $IN_{(UH)}$ 、 $IN_{(WH)}$ 、 $IN_{(VH)}$ 、 $IN_{(UL)}$ 、 $IN_{(WL)}$ 、 $IN_{(VL)}$ 为 PWM 信号输入端,6 路 PWM 信号波由微控制器控制,其中 $IN_{(UH)}$ 与 $IN_{(UL)}$ 为 U 相桥臂的上下桥臂输入端, $IN_{(WH)}$ 和 $IN_{(WL)}$ 为 W 相桥臂的上下桥臂输入端, $IN_{(VH)}$ 和 $IN_{(VL)}$ 为 V 相桥臂的上下桥臂输入端。

b) P 为直流母线电压输入端, N_U 、 N_V 、 N_W 为直流母线电压负输入相, COM 为公共接地端, N.C 为无连接, $V_{B(U)}$ 、 $V_{B(V)}$ 、 $V_{B(W)}$ 分别为 U、V、W 相 IGBT 的驱动电压输入端。

2) 输出端

VTS 提供 HVIC (高压集成电路) 温度感测输出, $V_{S(U)}$ 、 $V_{S(V)}$ 、 $V_{S(W)}$ 为三相电压输出端。

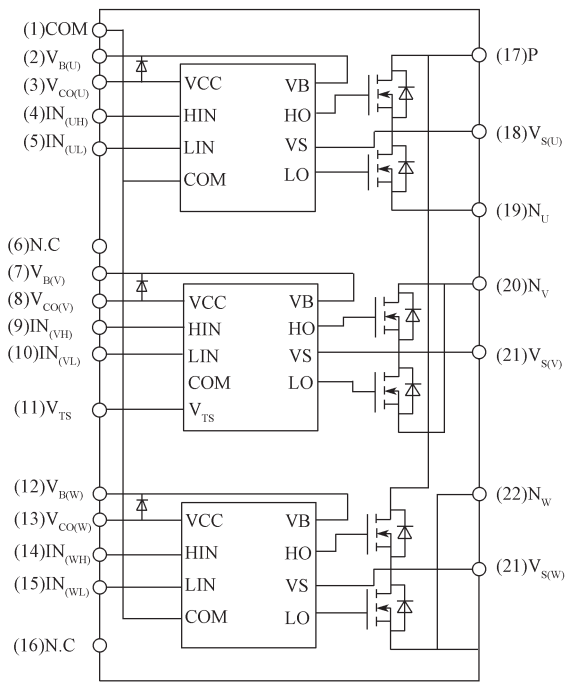


图 2 引脚布局和内框图

Fig. 2 Pin layout and internal block diagram

3 功耗的计算

IPM 的损耗主要包括 IGBT 和二极管的导通功耗和开关功耗。关断稳态下的功耗可以忽略不计,因为它很小,仅仅造成器件温度的小幅上升。故下面仅计算该 IPM 内部的 IGBT 和二极管的导通功耗与开关功耗的大小。

3.1 导通损耗

IPM 内部的 IGBT 和二极管的导通功耗,主要发

生在电路正常工作的时候,是由这些器件的正向压降决定的,其典型特性可以分别近似为如下线性方程:

$$\begin{cases} U_I = U_I + R_I \cdot i, \\ U_D = U_D + R_D \cdot i. \end{cases} \quad (1)$$

式中: i 为输出电流; U_I 为 IGBT 的阈值电压; U_D 为二极管的阈值电压; R_I 为 IGBT 导通状态的动态阳极电阻; R_D 为二极管导通状态的动态阳极电阻^[5]。

查资料手册可以得知,该 IPM 中的 $U_I=600$ V、 $U_D=20$ V、 $R_I=530$ mΩ、 $R_D=460$ mΩ。

在开关频率设得很高的情况下, PWM 逆变器的输出电流可以近似为正弦波形,即有

$$i = I_{peak} \sin(\theta - \phi), \quad (2)$$

式中, ϕ 为输出电压和输出电流的相位差; I_{peak} 为输出电流的尖峰值; θ 为初始角。

在 $\phi=0$ 时,可以得出 $i=I_{peak}=9.4$ A, $U_I=605$ V, $U_D=24.3$ V, 故能够算出单个的 IGBT 和二极管在工作时的导通功耗,具体如下:

$$P_I = \frac{U_I I_{peak}}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}+\phi}^{\frac{\pi}{2}+\phi} \xi \cos(\theta - \phi) d\theta + \frac{R_I I_{peak}^2}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}+\phi}^{\frac{\pi}{2}+\phi} \xi \cos^2(\theta - \phi) d\theta, \quad (3)$$

$$P_D = \frac{U_D I_{peak}}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}+\phi}^{\frac{\pi}{2}+\phi} (1 - \xi) \cos(\theta - \phi) d\theta + \frac{R_D I_{peak}^2}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}+\phi}^{\frac{\pi}{2}+\phi} (1 - \xi) \cos^2(\theta - \phi) d\theta. \quad (4)$$

式(3)~(4)中 ξ 是由软件部分给出的,为

$$\xi = \frac{1 + MI \cos \theta}{2}. \quad (5)$$

式(5)中 MI 为 PWM 调制系数,同时 MI 也定义为相电压峰值与直流母线电压一半的比值^[6],故对于该 IPM,查资料得知 $MI=1.4$ 。

最后,综合式(3)和(4),同时将 MI 代入式(6),得到如下总的逆变器导通功耗:

$$P = P_I + P_D = \frac{I_{peak}}{2\pi} (U_I + U_D) + \frac{I_{peak}}{8} (U_I - U_D) MI \cos \phi + \frac{I_{peak}^2}{8} (R_I + R_D) + \frac{I_{peak}^2}{3\pi} (R_I - R_D) MI \cos \phi. \quad (6)$$

由上述关系式可以得知,逆变器在导通时产生的总的功耗为单个的 IGBT 功耗 P 的 6 倍。当工作条件

温度为 25 ℃、直流母线电压为 310 V 时, 将上述计算出的数据代入式 (6), 即 $U_i=600$ V、 $U_D=20$ V、 $I_{peak}=9.4$ A、 $MI=1.4$ 、 $R_i=530$ mΩ、 $R_D=460$ mΩ, 可计算出单个 IGBT 的功耗为 $P=14.5$ W, 总的逆变器导通功耗为 $6 \times P=6 \times 14.5$ W=87 W。

3.2 开关功耗

IPM 产生的开关功耗由其内部的 IGBT 与二极管所产生, 但是 IGBT 与二极管的开关功耗有所不同, 这是由两者的开关特性不同导致的。此外, 由于 IGBT 与二极管均随着所加电压、电流的大小不同而有所不同。在计算开关功耗和设计电路时, 还应该考虑工作环境温度与给定的频率发生变化时, 开关功耗也会有所不同。在一个开关工作周期内, 器件的功耗与切换电流之间的表达式为

$$W = (E_I + E_D) \times i, \quad (7)$$

$$E_I = E_{I, ON} + E_{I, OFF}, \quad (8)$$

$$E_D = E_{D, ON} + E_{D, OFF}。 \quad (9)$$

式 (7)~(9) 中: W 为开关能量功耗; E_I 为 IGBT 的开关功耗; E_D 为二极管的开关功耗, E_I 和 E_D 可以近似为一个常数; $E_{I, ON}$ 、 $E_{I, OFF}$ 为 IGBT 开关在导通、关断时刻损失的能量; $E_{D, ON}$ 、 $E_{D, OFF}$ 为开关在导通、关断时刻损失的能量。

在正常工作条件下, FSB50760SF 型号的 IPM 的 $E_{I, ON}=120$ μJ、 $E_{I, OFF}=10$ μJ、 $E_{D, ON}=30$ μJ、 $E_{D, OFF}=3$ μJ, 所以 $E_I=130$ μJ、 $E_D=33$ μJ。在等式 (2) 中, 输出电流近似为正弦波形, 故在正常工作时, 每个 PWM 周期都会有开关功耗, 而且是连续产生的。因此, 假设开关频率一定, 此处先设为 f_{sw} , 每个器件的开关功耗为式 (10):

$$P_{sw} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}+\phi}^{\frac{\pi}{2}+\phi} (E_I + E_D) \cdot i \cdot f_{sw} d\theta =$$

$$\frac{(E_I + E_D) f_{sw} I_{peak}}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}+\phi}^{\frac{\pi}{2}+\phi} \cos(\theta - \phi) d\theta =$$

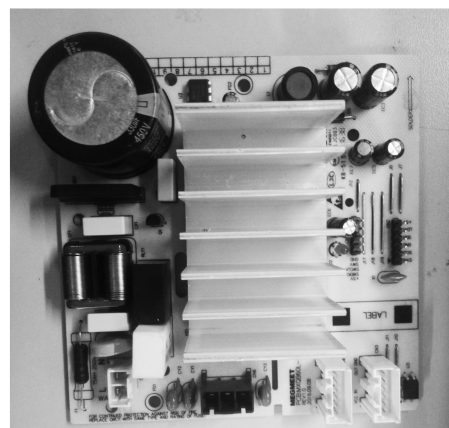
$$\frac{(E_I + E_D) f_{sw} I_{peak}}{\pi}。 \quad (10)$$

将本设计中 $f_{sw}=15$ kHz, $I_{peak}=9.4$ A, $E_I=130$ μJ, $E_D=33$ μJ 代入上述公式, 最后计算出 $P_{sw}=7.4$ W。

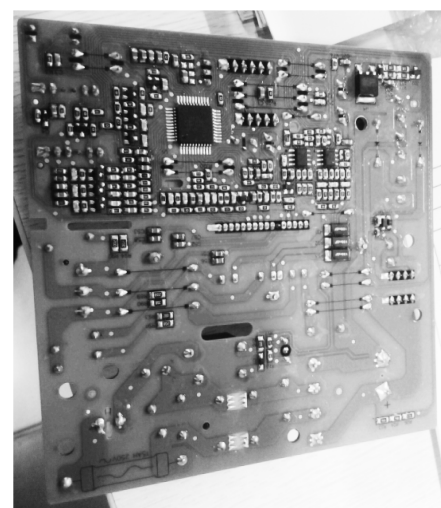
4 测试结果

为了进一步验证上面的功耗定量计算与 IPM 选取的合理性, 课题组设计了如图 3 所示的实际电路,

并将其应用在洗衣机上。针对焊接成型的 PCB 板, 要测试以下 2 点: 1) 应用在洗衣机上时, 电源 IC 的工作温度与工作环境会对 IPM 模块输出的有效电流与载波频率特性是否会受温升的影响; 2) 电机在运转时产生的 PWM 波的信号是否会受 IPM 内部开关功率管损耗的影响。



a) 正面



b) 背面

图 3 PCB 板

Fig. 3 Physical map of PCB plate

4.1 温升考虑和计算实例

将样机应用在洗衣机上时, 电源 IC 的工作温度与工作环境会对 IPM 模块输出的有效电流与载波频率特性有一定影响, 得到有效电流与开关频率特性如图 4 所示。加在 IGBT 与二极管上的电压 $U=300$ V, 同时当 IPM 的供电电压 U_{CC} 与它的自举电容上的电压 U_{BS} 相等的时候, 即 $U_{CC}=U_{BS}=15$ V; 同时开关损耗取典型值, 查资料可以得知, 对于 FSB50760SF 模块, 当环境温度 $T_c=100$ ℃时, 该 IPM 内部每个 IGBT 和二极管上的结壳热阻上的温度 $T_j=125$ ℃左右变化。

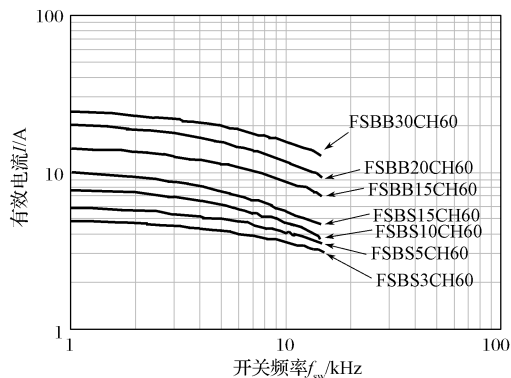


图4 有效电流与载波频率的特性

Fig. 4 Characteristics of effective current and carrier frequency

在不同电机和不同控制系统下,有效电流与载波频率的特性会有所不同。为此,对样板工作在环境温度 $T_c=100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下进行测试。根据图4给出的特性曲线。可以得到设计的样板在该温度下工作的逆变器仍然能够正常工作。这表明随着结温的上升,样板输出的有效电流在工作范围内^[7-8]。

图5为制作出来的PCB板在利用热像仪测量板卡正常工作时芯片的温度。由图可知,在正常工作的时候,芯片的最高温度为 $67.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,低于 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$,在芯片的温度控制范围内,满足设计要求,IPM的正常工作,未受到温度的影响。

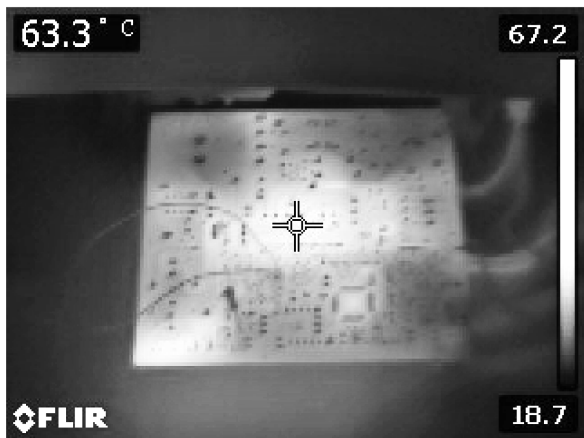


图5 热像仪测试IC温度

Fig. 5 Test of IC temperature by the thermal imager

4.2 波形测试

永磁同步电机工作时,将有启动、加速、减速、停止几个过程,但每一过程均受PWM信号控制。因此PWM信号的输出是否平稳将会影响电机以及整个控制系统的运行性能。如果频率过高,电机以及整个系统受到的干扰性会很高,将加剧该IPM内部开关功率管的损耗;如果频率过低,电机启动时或者运转时的噪声将会变得很大,使得电机的运行

性能变差^[9]。

测试时,采用频率为 13.8 kHz ,同时采用高精度示波器(泰克M3104示波器)进行测试,充分保证测试结果的正确。用泰克示波器的CH1通道测试,得到IPM其中一个全桥上桥臂输入信号如图6所示。由图6可以看出,输出波形比较平稳,说明PWM信号频率选择合理。

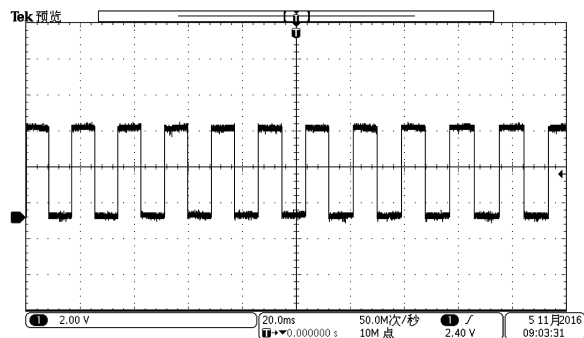


图6 上桥臂输出信号波形

Fig. 6 Output signal waveform of the upper bridge arm

测试时,用泰克示波器的CH1、CH2通道同时测试,得到的IPM中同一全桥上下桥臂输入信号如图7所示。由图7可以看出,上下桥臂输入信号波形比较平稳,同时死区时间在 $1\text{ }\mu\text{s}$ 内,表明IPM内部开关功率管损耗未增大。

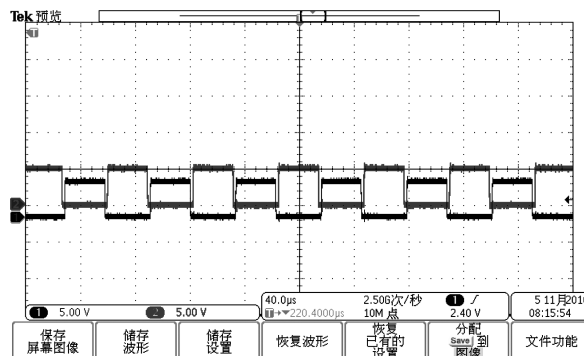


图7 上下桥臂输出信号波形

Fig. 7 Output signal waveforms of the upper and lower bridge arms

测试时,用泰克示波器的CH1、CH2通道同时测试,得到IPM中相邻两桥臂上管PWM信号波形图8所示。由图8可以看出,输出波形比较平稳,说明PWM信号在正常工作。

通过对样机进行实测,从温升考虑和计算实例、波形的测试结果可以看出,该IPM在芯片的温度控制范围内能够输出有效电流,同时也能够稳定输出信号。这一结果表明该IPM符合要求,满足设计要求,达到了预期的效果。

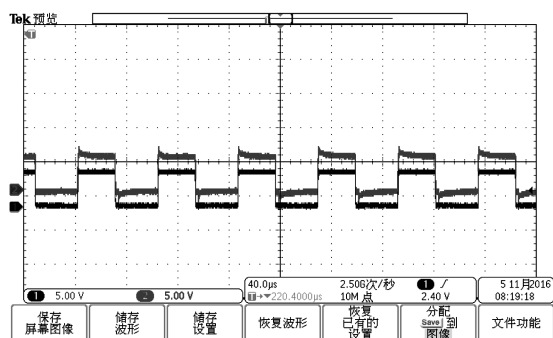


图8 相邻两桥臂上管 PWM 信号波形

Fig. 8 PWM signal waveforms of two adjacent bridge arms

5 结语

本文设计了基于FSB50760SF驱动永磁同步电机的控制器。该驱动器^[10]不仅具有结构紧凑, 功能强大和成本较低的优点, 而且运用在洗衣机上能够很好地满足低功率电机控制“节约能源”和“静音运转”的需要。在实际运用中, 该控制器运行稳定可靠, 具有良好的动态特性和较强的使用价值, 值得推广。

参考文献:

- [1] 朱俊. 与洗衣机配套的节能型新电机[J]. 电机技术, 2012(3): 61-64.
ZHU Jun. New Type of Energy-Saving & Environment-Proof Motors Equipped into the Washing Machines[J]. Electrical Machinery Technology, 2012(3): 61-64.
- [2] 刘家峰, 吉卫喜. 滚筒洗衣机减振技术的发展[J]. 机械工程师, 2013(4): 41-43.
LIU Jiafeng, JI Weixi. The Development of Vibration Damping Techniques About Front-Loading Wash Machine[J]. Mechanical Engineer, 2013(4): 41-43.
- [3] 张凯, 秦斌, 王欣, 等. 基于电压前馈解耦的地铁永磁同步电机矢量控制研究[J]. 湖南工业大学学报, 2016, 30(5): 22-26.
ZHANG Kai, QING Bin, WANG Xin, et al. Research on Vector Control of Metro Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Voltage Feed-Forward Decoupling[J]. Journal of Hunan University of

Technology, 2016, 30(5): 22-26.

- [4] 龚事引, 于惠钧, 宋翼颀, 等. 基于模糊PID的永磁同步电机矢量控制系统[J]. 湖南工业大学学报, 2015, 29(4): 40-44.
Gong Shiyin, YU Huijun, SONG Yijie, et al. PMSM Vector Control System Based on Fuzzy PID[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2015, 29(4): 40-44.
- [5] 陈荣, 邓智泉, 严仰光. 永磁同步伺服系统低速性能研究[J]. 电气自动化, 2005, 27(2): 16-19.
CHEN Rong, DENG Zhiqian, YAN Yangguang. Research on Low-Speed Performance of Permanent Magnet Synchronous Servo System[J]. Electrical Automation, 2005, 27(2): 16-19.
- [6] 宋聚明, 苏彦民. 基于精确建模下的永磁同步电动机(PMSM)最佳效率控制研究[J]. 电工电能新技术, 2004(2): 22-25.
SONG Juming, SU Yanmin. Study of Efficiency-Optimized Control Based on Accurate Modeling for PMSM[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2004(2): 22-25.
- [7] 杨碧石. IPM智能功率模块的驱动控制电路[J]. 电工技术杂志, 2004(1): 51-52.
YANG Bishi. Driving Control Circuit of IPM Intelligent Power Module[J]. Electrotechnical Journal, 2004(1): 51-52.
- [8] 周文卫. 直流PWM调速系统的研究[J]. 电气技术, 2009(7): 37-39.
ZHOU Wenwei. Research for Direct Current PWM Regulating Speed System[J]. Electrical Technology, 2009(7): 37-39.
- [9] CIMINI G, CORRADINI M L, IPPOLITI G, et al. Passivity-Based PFC for Interleaved Boost Converter of PMSM Drives[C]//11th IFAC International Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing. Caen: [s. n.], 2013: 128-133.
- [10] ZHONG L, RAHMAN M F, HU W Y, et al. Analysis of Direct Torque Control in Permanent Magnet Synchronous Motor Drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1997, 12(3): 528-536.

(责任编辑: 申剑)