

基于SiC器件的感应电机驱动器设计及性能分析

何泽宇, 刘鑫, 刘洋, 赵金

(华中科技大学 人工智能与自动化学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:对于感应电机系统而言,功率器件的开关频率是制约其电流环带宽的重要因素之一。传统硅基器件受开关损耗等因素的限制,开关频率已经接近瓶颈。碳化硅(SiC)器件作为第三代半导体器件,具有低损耗、高耐温、高开关速度等优良特性,可以大幅提高功率变换器的开关频率。针对SiC器件电机驱动器进行了设计与研究,首先分析了PWM延时对于电机控制系统电流环带宽的影响,之后对SiC电机驱动器的控制结构、驱动电路等进行了设计与验证,最后通过实验验证了SiC驱动器的性能。随着开关频率的提高,电机控制系统的电流环控制性能不断提升,从而为控制系统提供了较大的电流环带宽裕度。

关键词:碳化硅;高频;感应电机;电流环带宽;高速

中图分类号:TM436 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed21126

Design and Performance Analysis for Induction Motor Driver Based on SiC Device

HE Zeyu, LIU Xin, LIU Yang, ZHAO Jin

(School of Artificial Intelligence and Automation, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: For induction motor systems, the switching frequency of power devices is one of the important factors that restrict the bandwidth of their current loops. Traditional silicon-based devices are limited by factors such as switching losses, and the switching frequency is close to the bottleneck. As a third-generation semiconductor device, silicon carbide (SiC) devices have excellent characteristics such as low losses, high temperature tolerance, and high switching speed, and which can greatly improve the switching frequency of power converters. The design and research of SiC device-based motor drive were carried out. Firstly, the influence of PWM delay on the current loop bandwidth of motor control system was analyzed. Then the control structure and drive circuit of SiC motor driver were designed and verified. Finally, the performance of the SiC driver was verified by experiments. With the increase of the switching frequency, the current control performance of motor control system is continuously improved, thereby providing a larger current loop bandwidth margin for the system.

Key words: silicon carbide(SiC); high frequency; induction motor; bandwidth of current loop; high speed

电力电子功率半导体器件是电机驱动系统的重要组成部分,是决定其性能和可靠性的关键因素之一。目前电机驱动器所普遍采用的传统硅器件,其开关速度、开关损耗等性能已经接近其材料允许的极限。近年来,以碳化硅(silicon carbide, SiC)为代表的第三代半导体器件得到了迅速发展。相比于传统硅器件, SiC器件具有高耐温、高耐压、高开关频率等特点,拥有巨大的应用前景^[1-2]。但在具体应用中,仍然在驱动、保护

和控制方面存在一些问题,是目前的研究热点。

SiC器件应用于电机控制系统,可以实现高开关频率,间接提高了系统的控制频率,由此可以提高电流环的控制性能。SiC器件与IGBT等器件的开关特性、驱动以及性能测试方面存在较大不同。文献[3-4]对SiC器件的建模进行研究,建立了考虑寄生参数因素的SiC器件暂态模型;文献[5-6]对SiC的双脉冲测试进行研究,从寄生参数、测量仪器和测量方法等方面总结

基金项目:广东省重点领域研发计划(2019B010127001)

作者简介:何泽宇(1994—),男,硕士,Email:hezeyu28@126.com

了SiC器件双脉冲测试的特点与方法;文献[7-8]对SiC器件的驱动电路进行研究,分析和验证了不同驱动回路参数对SiC器件开关过程的影响;文献[9]对SiC器件的短路特性进行研究,分析了SiC器件的短路故障机理,确定了SiC器件的短路安全工作区。虽然已有大量文献对SiC器件应用进行了研究,但对于实际电机驱动系统中SiC对电机电流环性能提升缺乏定量分析和比较。

电流环控制性能在感应电机矢量控制系统中占有非常重要的地位,电流环控制性能的提高可以提高转矩响应,降低转矩脉动,从而提升电机系统的控制精度^[10]。电流环带宽制约因素主要包括逆变器的开关频率以及A/D采样延时、计算处理延时和PWM更新延时在内的数字延时^[11]。文献[11]通过改进电流采样与PWM更新时序,在1个载波周期内实现2次电流采样和PWM占空比更新,缩短了电流环控制周期,提高了电流环动态响应能力。文献[12]利用FPGA的逻辑运算与数字计算能力,缩短了采样运算的数字延时并实现了采样运算后PWM占空比的即时更新,使系统延时接近理论最小,实现了电流环带宽扩展。但是以上文献均是在不改变开关频率的前提下对电流环带宽进行扩展。

本文首先从理论上分析了系统延时对电机电流环控制性能的影响,指出了PWM频率提升对系统性能的改善。进一步,采用CREE公司CCS050M12CM2型号SiC器件作为核心功率器件,以TMS320F28M35作为主控制器,设计和研制了基于SiC MOSFET的感应电机驱动系统,可以将开关频率由传统硅器件的10 kHz提升至60 kHz以上。最后,在不同开关频率下对系统电流环控制性能进行了实验验证,对实验结果进行了对比与分析,得出了实验结论。

1 电流环带宽特性分析

对于电压型逆变器控制的感应电机,有:

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\Psi_{rd}}{dt} - \sigma L_s \omega_s i_{sq} - \omega_s \frac{L_m}{L_r} \Psi_{rq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\Psi_{rq}}{dt} + \sigma L_s \omega_s i_{sd} + \omega_s \frac{L_m}{L_r} \Psi_{rd} \end{cases} \quad (1)$$

式中: R_s 为定子电阻; L_s 为定子电感; σ 为漏感系

数; ω_s 为同步旋转坐标系角速度; i_{sd}, i_{sq} 为 d, q 轴定子电流; u_{sd}, u_{sq} 为 d, q 轴定子电压; Ψ_{rd}, Ψ_{rq} 为 d, q 轴转子磁通。

在转子磁场定向的矢量控制系统中, Ψ_{rq} 为0,若把式(1)中的 d, q 轴交叉耦合部分看作扰动,在低速下电流环控制对象方程可简化为

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

由此,感应电机可以近似地等效为三相阻感网络。将PWM延时环节以惯性环节近似,得到如图1所示感应电机电流环控制结构。其中, k_p 为PI调节器的比例系数; T_i 为PI调节器的积分时间常数; i_{dq}^* 为 d, q 轴设定电流; i_{dq} 为 d, q 轴采样电流; T_d 为控制环路总延时。在单次采样单次更新模式下,有 $T_d = 1.5T_p$, T_p 为PWM周期^[11]。

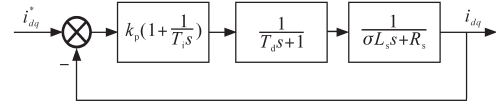


图1 电流环控制结构

Fig.1 Control structure diagram of current loop

为了消除大惯性环节对系统的延时影响,提高电流环的响应能力,取 $T = L_s / R_s$, T 为电机电枢回路时间常数; $K = 1 / R_s$, K 为电机电枢回路的增益系数,工程上一般取阻尼系数为0.707,整定后有:

$$\begin{cases} T_i = T \\ k_p = (T/2K)T_d \end{cases} \quad (3)$$

由此系统闭环传递函数为

$$G(s) = \frac{1}{2T_d^2 s^2 + 2T_d s + 1} = \frac{1}{4.5T_p^2 s^2 + 3T_p s + 1} \quad (4)$$

将系统幅频特性下降到-3 dB时所对应的频率与相频特性滞后45°时所对应的频率相比,其中较低的为系统的截止频率,即电流环的带宽。利用Matlab求解式(4)传递函数在不同 T_p 参数下的幅频特性曲线和相频特性曲线,并由此求得如图2所示幅值衰减-3 dB以及相位滞后45°时的截止频率变化曲线。

根据图2可知,相位滞后45°的截止频率和幅值衰减-3 dB的截止频率均与 T_p 成近似反比,并且本系统的带宽 ω_{cb} 应取较低的相位滞后45°对应的截止频率。由此,增大开关频率会提高系统截止频率,从而实现更好的电流动态调节。

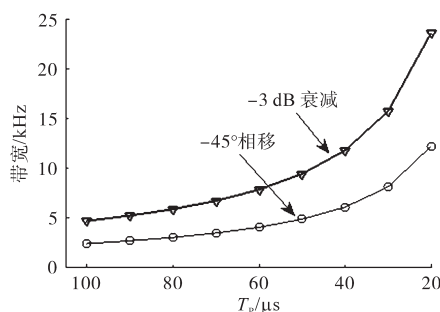


图2 带宽变化曲线

Fig.2 Bandwidth variation curves

对于转子磁链定向的感应电机控制系统,当转速提高、电流频率增加时, d, q 轴耦合加深,从而导致 d, q 轴电流环控制性能下降^[13-14]。通过提高电机驱动器的开关频率,可以显著提高电流环的带宽,从而增加电机电流环控制的带宽裕度,满足电机在高速下的电流环控制性能。

2 控制系统设计

2.1 电机控制算法

目前感应电机高性能控制领域较为成熟的控制方法主要包括基于动态模型的矢量控制以及直接转矩控制,在两种基本的电机动态模型控制方法的基础上,采用解耦后的线性控制、非线性控制以及智能控制等方法可以构成高性能的控制系统^[15]。

本文主要针对SiC器件对交流电机驱动器的性能影响进行研究,为了突出SiC功率器件高开关频率的特点,忽略复杂控制算法本身的变化因素对性能的影响,采用成熟的基于转子磁链定向的矢量控制算法作为控制方案,这也是目前主流感应电机驱动产品的控制方案,其控制结构如图3所示。本文着重研究电机控制系统中电流环的控制性能。

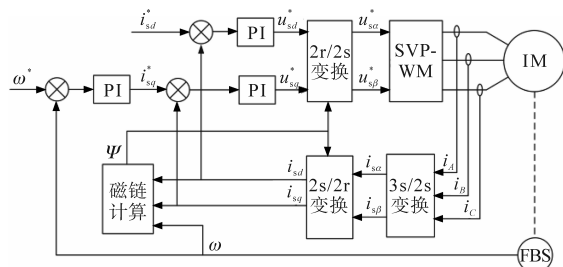


图3 感应电机矢量控制框图

Fig.3 Control block diagram of induction motor vector

2.2 控制系统硬件设计

基于SiC器件的感应电机驱动系统的总体结构如图4所示,主要包括控制电路、驱动电路、功

率电路以及传感器。

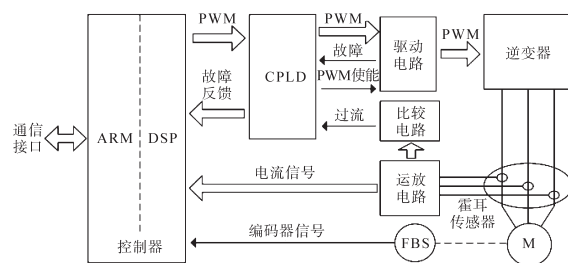


图4 控制系统硬件结构

Fig.4 Hardware structure of control system

系统器件选型如表1所示。主控制器采用TI公司TMS320F28M35双核控制器,包含Cortex-M3以及C28内核。其中,M3内核包含丰富的通信外设接口,用于PC端调试、通信以及人机交互;C28内核包含浮点数运算单元等运算引擎以及电机控制所需的ADC, QEP, PWM等接口,用于电机的高性能闭环控制。主控器件DSP内核运行速度高达150 MHz, A/D采样速率最快可达3.5 Msps,可以在15 μs内实现采样与闭环控制,从而满足最高达60 kHz的控制与开关频率要求。驱动芯片采用AVAGO公司的三代半导体器件专用驱动芯片ACPL-352J,该芯片具备光耦隔离和器件驱动的功能,驱动电流高达5 A,传输延时低于150 ns,同时具备短路故障输出和保护的功能。功率器件采用CREE公司的CCS050M12CM2三相全桥模块,该模块为全SiC功率器件,额定电压1 200 V,额定电流50 A。

表1 核心部件选型

Tab.1 Component selection

种类	型号	厂家	功能
MCU	TMS320F28M35	TI	运算、控制
CPLD	LC4128	Lattice	逻辑处理、保护
驱动芯片	ACPL-352J	AVAGO	隔离与驱动
功率器件	CCS050M12CM2	CREE	MOS开关器件
霍尔传感器	S23P50	Murata	电流检测

3 SiC MOSFET驱动设计与测试

3.1 驱动电路设计

驱动电路是功率变换器的重要组成部分,直接决定了功率变换器的性能。以ACPL-352J为核心的驱动电路拓扑结构如图5所示。

隔离驱动芯片外围电路如图6所示。其中 V_{OUTP} 与 V_{OUTN} 管脚分别用于提供开通和关断时的驱动电流,OC管脚用于过流/短路保护,SS管脚用于短路保护软关断。

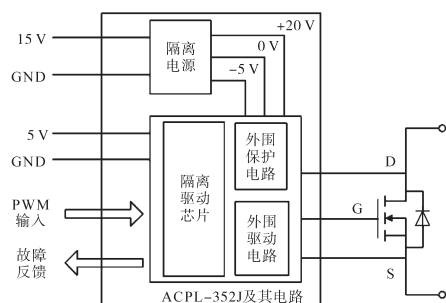


图5 SiC MOSFET驱动电路拓扑结构

Fig.5 Topology of SiC MOSFET drive circuit

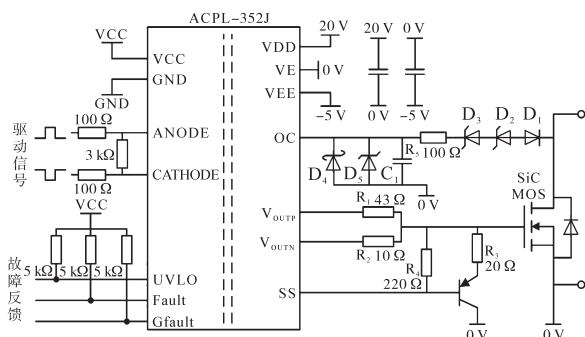


图6 ACPL-352J外围电路

Fig.6 The peripheral circuit of the ACPL-352J

3.2 双脉冲测试

为了测试SiC器件以及相应驱动电路的工作性能和相关指标,搭建如图7所示双脉冲测试电路。通过双脉冲实验对SiC器件的开通、关断过程进行分析,并以此确定开通与关断电阻的阻值。

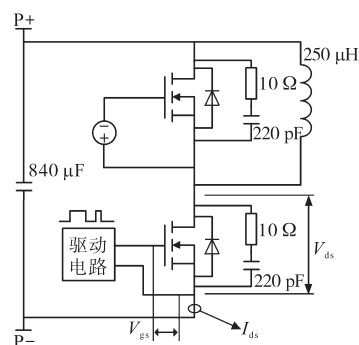


图7 双脉冲测试电路

Fig.7 The double-pulse test circuit

在双脉冲测试中,上管关断,下管进行2次脉冲开关过程,为负载电感 L 充电。测试中,母线电压设置为400V,目标电流为50A,2次脉冲总宽度设置为30 μ s,计算得负载电感 L 约为250 μ H。母线电容设计为840 μ F,满足电容容值要求,保证母线电压波动小于1%。双脉冲实验波形如图8所示。

为了在实际工况下选择合适的开通与关断电阻,选取不同开通与关断电阻进行双脉冲

测试,开通、关断过程的各项参数如图9和图10所示。

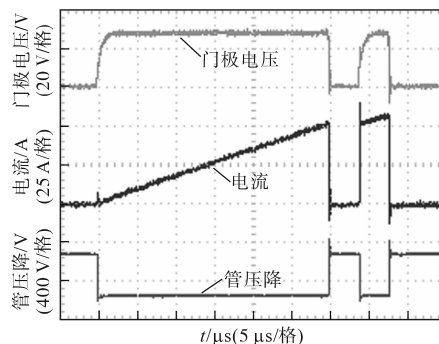


图8 双脉冲测试波形

Fig.8 The double-pulse test waveforms

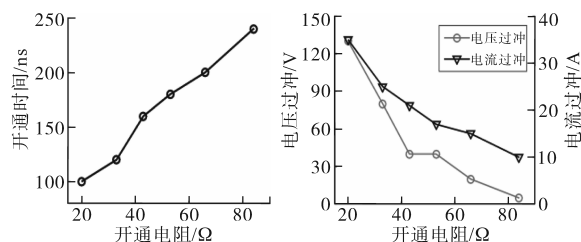


图9 双脉冲测试开通过程参数

Fig.9 The parameters of turn-on transient

state for double-pulse test

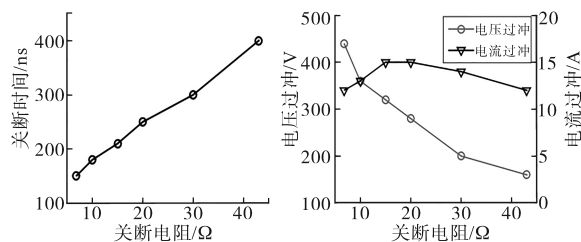


图10 双脉冲测试关断过程参数

Fig.10 The parameters of turn-off transient

state for double-pulse test

根据上述实验,SiC MOSFET的开关速度与开关过程的过冲存在矛盾。在开通过程中,随着开通电阻的减小,开通速度逐渐增大,但是电流以及电压过冲增大较为明显;在关断过程中,随着关断电阻的减小,关断速度逐渐增大,但是电压过冲增大明显。结合实际控制系统,选取开通电阻为43 Ω ,关断电阻为20 Ω 。

4 物理实验

为了验证本文所述电机驱动器的工作性能,搭建如图11所示电机控制系统实验平台,并着重对电流环控制性能进行了测试。实验平台中,母线电压设为530V,感应电机额定电压280V,额定功率2.2kW,额定转速3000r/min。



图11 SiC驱动器物理实验平台

Fig.11 SiC-based inverter experimental platform

为了测试驱动器在不同工作条件下的电流环控制性能,分别在开关频率 10 kHz, 13 kHz, 20 kHz, 40 kHz(对应 T_p 为 100 μ s, 75 μ s, 50 μ s, 25 μ s)以及转速 0 r/min, 3 000 r/min 下对装置进行电流环跟随测试。本文主要针对 q 轴电流进行测试与分析。

图12所示为不同条件下的电流环跟随效果。其中给定参考信号为频率 500 Hz、幅值 2 A 的正弦信号。由实验结果可知,在不同速度下,开关频率的增大降低了 q 轴电流的跟随延时,提高了电流环控制效果。

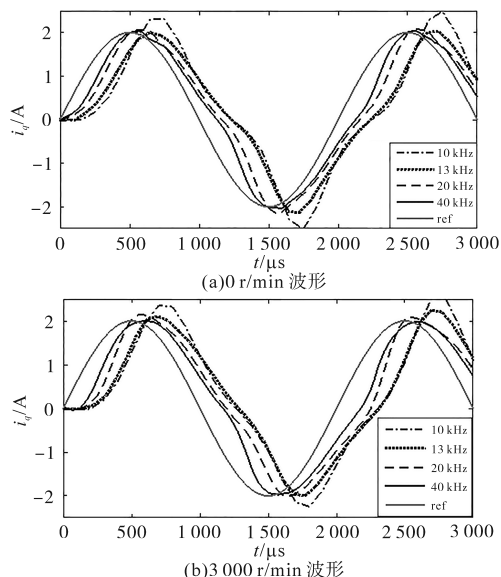


图12 500 Hz 电流跟随波形

Fig.12 The current following waveforms at 500 Hz

为了在一定程度上定量比较不同开关频率下电流环的控制性能,通过不同跟随频率的正弦跟随实验得到控制系统的电流环带宽。取闭环幅频响应增益衰减-3 dB所对应角频率以及相移-45°所对应的角频率最小值作为系统的截止频率。图13和图14所示为控制系统在不同工作条件下达到截止频率时的正弦跟随波形;系统截止频率与工作条件的关系如图15所示。

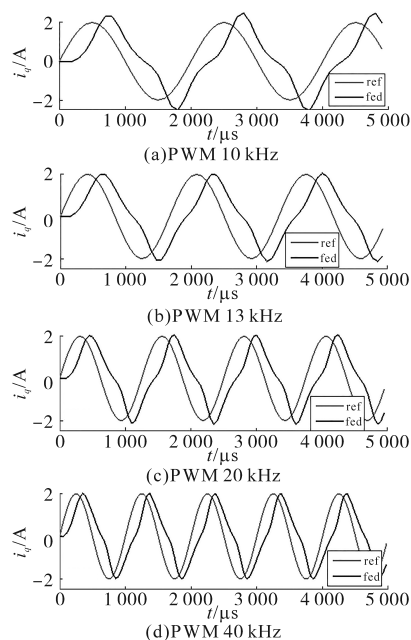


图13 截止频率下电流跟随波形(0 r/min)

Fig.13 The current following waveforms at cut-off frequency (0 r/min)

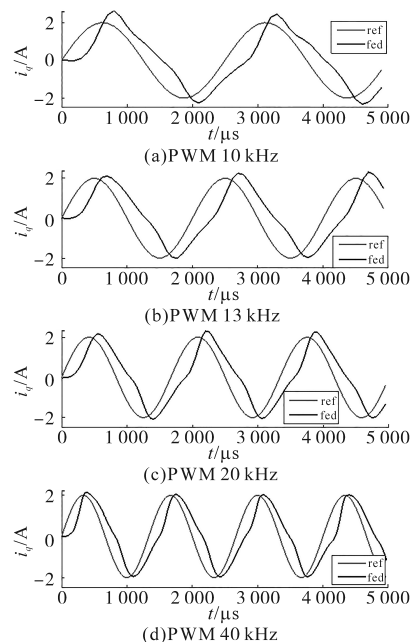


图14 截止频率下电流跟随波形(3 000 r/min)

Fig.14 The current following waveforms at cut-off frequency (3 000 r/min)

由实验数据对比可得,开关频率由 10 kHz 提升至 40 kHz 时,电流环带宽有较大的提升,在 0 r/min 与 3 000 r/min 转速下,电流环带宽分别由 500 Hz, 400 Hz 提升至 1 000 Hz, 750 Hz, 同时,电流波形也有所改善。并且,实验结果也验证了电机转速的提升导致的 d, q 轴耦合加深对电流环控制性能的负面影响。将图15中实验数据同图2中理论