

基于 FPGA 的永磁同步电机电流环带宽拓展的比较研究

昌 鹏, 高 瑾

(上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘 要: 分析了电流环的数学模型, 导出了电流环闭环传递函数, 得出带宽的大小与系统延时的大小成反比。传统基于数字信号处理器的 PMSM 电流环的延时比较大, 转速变化越大, 带宽的影响越明显, 而采用现场可编程门阵列 FPGA 控制的 PMSM, 可以将电流环的延时缩小一倍, 进而改善速度环的响应能力并试验验证理论分析。

关键词: 永磁同步电机; 延时; 数字信号控制器; 现场可编程门阵列; 带宽

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)01-0089-05

A Comparative Study of PMSM Bandwidth Broadening Based on FPGA

CHANG Peng, GAO Jin

(School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: The current loop mathematical model was at first analyzed, then the closed-loop transfer function of the current loop was derived, it was pointed out that bandwidth was inversely proportional to system delay times. The traditional PMSM current loop delay times based on digital signal processor (DSC) was relatively large, the greater the speed change, the more obvious the impact of bandwidth, while PMSM current loop delay times based on field-programmable gate array (FPGA) could be reduced one times, which improved the response of the speed loop, and experimental results verified the theoretical analysis.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); delay times; digital signal processor (DSC); field programmable gate array (FPGA); bandwidth

0 引 言

目前,微电子技术和芯片技术发展迅速,永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)控制系统具有结构简单、噪声小、功率因数高、性能好、可靠性高等优点,在航空航天、伺服控制和机器人等领域中展现了巨大的优势^[1-4]。

电流环作为 PMSM 矢量控制系统的内环,其带宽的大小直接影响速度环以及位置环的性能,目前电流环的控制方法主要有滞环控制、电流预测控制及 PI 控制^[1]。

滞环控制具有方法简单、响应速度快及与被

控对象参数无关等优点,但这种 bang-bang 的控制方式,使得逆变器开关频率变化范围宽,电流纹波大,不适用高性能的场合^[1]。采用电流预测控制可以实现对电流指令信号无超调的快速跟踪^[2],但该方法过于依赖被控对象参数的精度,虽然可以在电流环采用预测环节并联积分器^[3],或是采样大量电压及电流信号提高预测函数参考电压计算式的阶次,降低参考电压计算式中电压项的组合系数,可以消除因参数不准确带来的影响^[4],具有一定的鲁棒性,但是响应时间过长,使得电流环的带宽不会很高^[5]。PI 调节器是一种线性调节器,具有结构简单,对控制对象参数不敏

作者简介: 昌 鹏(1991—),男,硕士研究生,研究方向为永磁同步电机控制。

高 瑾(1972—),男,博士,副教授,研究方向为电机及其控制、电力电子技术。

感等优点^[6],但是其非线性能力不足,采用具有延时补偿的复合 PI 调节器可以有效地解决电流环 dq 轴动态耦合^[7-8],提高电流环的带宽。但是由于延时补偿的精度与电机参数有关,如果参数辨识不准确,依旧很难达到良好的效果^[9]。

PMSM 控制系统的微控制单元 MCU 一般采用数字信号控制器(Digital Signal Processor, DSC)或者是现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)。本文首先研究了电流环的带宽,指出电流环的带宽与系统的延时有关,由于 DSC 自身采用的是串行运算的结构,所有的指令都是逐个执行,因此基于 DSC 的 PMSM 电流环延时比较大,而采用 FPGA 作为控制器,由于 FPGA 自身采用并行运算的结构,可以将环路的延时缩小到原来的一半,拓宽了电流环的带宽,从而提高了速度环响应能力。

1 PMSM 控制系统

1.1 矢量控制原理

图 1 为 PMSM 矢量控制系统框图,包含速度环与电流环。电流环作为内环,环路的延时主要包含 AD 采样延时、PI 调节器、坐标变换、矢量变换在内的计算延时以及功率管开关延时。

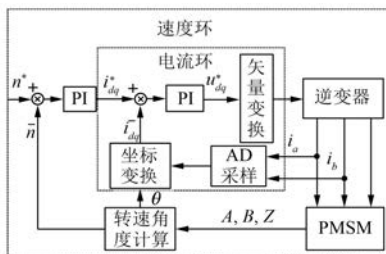


图 1 PMSM 矢量控制系统框图

1.2 电流环带宽分析

图 2 所示为带延时环节电流环结构图。为了研究影响电流环的带宽性能因素,忽略 dq 轴的耦合,AD 采样延时和反电势的影响。电流控制器采用的是 PI 调节器,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,电流环路的延时包含计算延时 T_{cal} 及功率管开关延时 T_{pwm} , L 为电机电感, R 为电机电阻, i_{dq} 为电机 dq 轴实际电流。

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 $T=L/R$, T 为电机电枢回

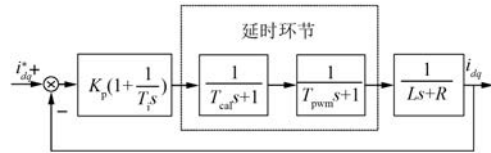


图 2 带延时环节电流环结构图

路时间常数, $K=1/R$ 为电机电枢回路的增益系数,故 $T_{cal} + T_{pwm} \ll T$,工程上一般取阻尼系数为 0.707,整定后为

$$\begin{cases} T_i = T \\ K_p = T/2K(T_{cal} + T_{pwm}) \end{cases} \quad (1)$$

由此可得系统的闭环传递函数为

$$G(s) = \frac{1}{2(T_{cal} + T_{pwm})^2 s^2 + 2(T_{cal} + T_{pwm})s + 1} \quad (2)$$

将幅频特性下降到 -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,取其中较低的为系统的截止频率,即电流环的截止频率:

$$\omega_b = (\sqrt{3} - 1)/2(T_{cal} + T_{pwm}) \quad (3)$$

由式(3)可以看出,系统的截止频率 ω_b 与环路中的计算延时和功率管开关延时之和成反比,即如果能减小环路的延时,就可以提高电流环的带宽,从而提高系统动态响应性能。

2 延时分析

2.1 基于数字信号控制器 DSC 的分析

虽然数字信号控制器 DSC 可以通过查表法快速处理复杂的运算,但是由于自身采用的是串行处理数据的方式,所有的代码只能一条一条的执行。因为 AD 采样转换及 PWM 调制需要占用大量的时间,如果将当前计算的占空比立即更新,那么每个周期的开始都要经历一段较长的计算过程,该阶段功率管始终处于关断状态,因此 PWM 占空比永远无法达到 100%,势必会影响逆变器的输出能力。

功率管在开关过程中会有延时,根据冲量等效原理可知,通过脉冲宽度调制可以等效任意模拟量,但是由于功率器件的限制,开关周期不会无限的小,通过脉冲宽度调制的方法等效模拟信号会有一定的滞后。图 3 所示为功率管开关延时分析,如果 PWM 占空比为 100%,这个信号开关管

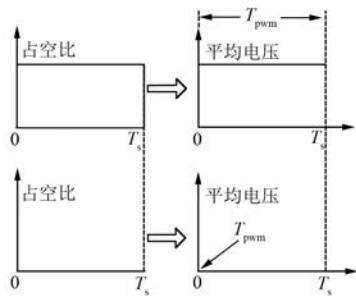


图3 开关延时分析

需要开通一个控制周期周期 T_s 的时间才能等效出占空比输出为 100% 的电压,那么功率管开关延时 T_{pwm} 为一个控制周期 T_s 。如果 PWM 占空比为 0,功率管不需要开通,那么功率管开关延时 T_{pwm} 为 0,假定整个系统 PWM 占空比输出平均值为 50%,可得

$$T_{pwm} = 0.5T_s \quad (4)$$

采用 DSC 作为控制器时,系统在每个控制周期的开始更新 PWM 占空比,电流采样一般在每个控制周期的中点。图 4 所示为 DSC 电流环控制时序图。系统在 T_{t1} 时刻向 AD 芯片发出触发信号,AD 芯片开始采样该时刻的电流,转换完成得到该时刻电流值 I_1 后,立即计算该周期的 PWM 占空比,计算得到的结果放在寄存器当中,在 T_{p2} 时刻更新。因此该系统的延时 T_d 为计算延时和功率管开关延时之和:

$$T_d = T_{cal} + T_{pwm} \quad (5)$$

在 DSC 控制下,电流环总延时为

$$T_d = T_s \quad (6)$$

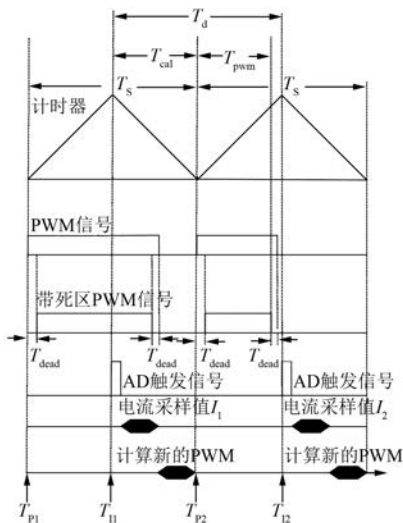


图4 DSC 电流环控制时序图

2.2 基于现场可编程门阵列 FPGA 的分析

FPGA 控制程序一般是基于查找表设计的,并且拥有丰富的时序逻辑资源、存储资源和布线资源等,整个系统采用并行的处理数据的方式,因此可以在短时间内完成大量复杂的计算以及时序设计。在 FPGA 控制下,可以通过合理安排控制时序,即上一个模块完成以后后立即起动下一个模块,而每一个模块内部算法采用并行的处理方式,可以在极短的时间内完成矢量控制算法。

采用 FPGA 作为控制器时,在周期的开始,AD 芯片采样该时刻的电流值,转换完成后,立即计算 PWM 占空比并更新。图 5 所示为 FPGA 电流环控制时序图。为了清楚地说明原理,对图 5 横坐标进行了放大,系统在 T_{t1} 时刻采样本周期的电流值,计算得到本周期的 PWM 占空比不用存入寄存器,而是直接更新。该方法利用 FPGA 强大的运算能力,可以在采样完成后很快算出 PWM 占空比,并立即更新,做到即时采样,即时更新,将系统的计算延时控制在最小的范围之内,所以整个系统的延时仅为功率管开关延时。

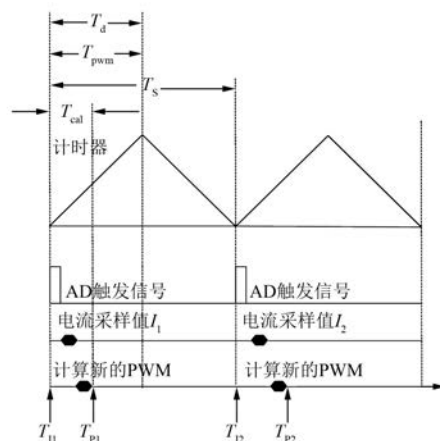


图5 FPGA 电流环控制时序图

图 6 所示为电流环矢量控制时序图。在图 6 中,所有模块均采用全局时钟 50 MHz,电流信号经过 AD 采样、滤波、 $3s/2r$ 坐标变换、 $2r/2s$ 坐标变换、PI 调节器、 $2r/2s$ 坐标变换和矢量变换,整个过程只需要 $0.72 \mu s$ 。该时序可以将计算的时间控制在 $1 \mu s$ 以内。即使该周期的占空比为 100%时,由于死区时间的存在,可以将计算延时放在死区时间内,几乎不会影响逆变器输出能力。

这种控制方式可以把电流环的计算时间缩短

到最小 $T_{cal} \approx 0$, 电流环的延时仅为功率管开关延时, 即:

$$T_d = T_{pwm} \quad (7)$$

由于功率管开关延时 T_{pwm} 一般取 0.5 个控制周期, 那么:

$$T_d = 0.5T_s \quad (8)$$

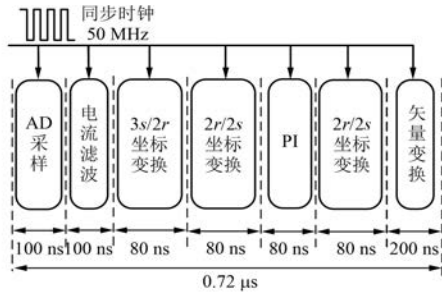


图 6 电流环矢量控制时序图

3 试验验证

3.1 试验平台

图 7 为 PMSM 对拖平台。该系统包括 2 台三相交流 PMSM1 和 PMSM2, 2 台逆变器, 开关电源, DSC 控制器, FPGA 控制器, AD 采样板。

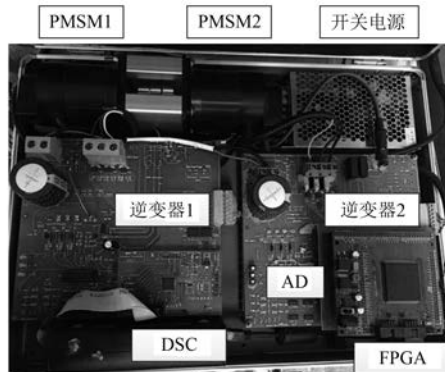


图 7 PMSM 对拖平台

电机的功率为 70 W, 额定转速为 3 000 r/min, 电阻为 0.2 Ω, 电感值为 2 mH, DSC 控制器采用的是飞思卡尔 MC56F8257, FPGA 控制器采用的是 Altera 公司的 Cyclone III 系列 EP3C250Q240C8, FPGA 的 AD 芯片采用的是 TI 公司 TLC5510, 而 DSC 采用的是内部高速 AD 芯片。

3.2 试验结果

为了验证延时的减小对速度响应的影响, 两套控制系统所用的控制算法相同。

图 8 所示为 DSC 控制下电机转速 1 500 r/min 阶跃响应图, 速度指令阶跃时间为 10 ms, 虚线为阶跃响应指令信号, 实线为实际电机转速信号。在 DSC 控制下, 电机从 0 加速至 1 500 r/min 需要 50 ms。由图 9 可知, 在 FPGA 控制下电机的加速时间缩短为 35 ms。图 10 所示为 DSC 控制下电机转速 3 000 r/min 速度阶跃响应图, 速度阶跃时间为 10 ms, 由图 10 可知, 在 DSC 控制下, 电机从 0 加速至 3 000 r/min 需要 140 ms。由图 11 可知, 在 FPGA 控制下, 电机的加速时间缩短为 70 ms, 动态响应约提高了一倍。

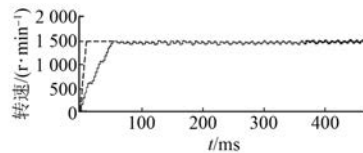


图 8 DSC 控制下转速 1 500 r/min 阶跃响应图

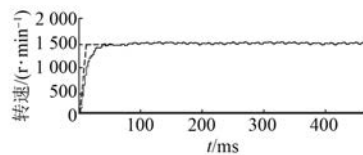


图 9 FPGA 控制下转速 1 500 r/min 阶跃响应图

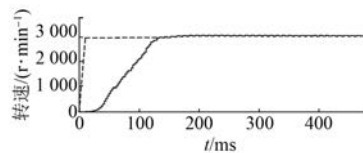


图 10 DSC 控制下转速 3 000 r/min 阶跃响应图

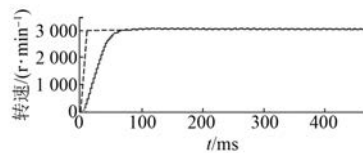


图 11 FPGA 控制下转速 3 000 r/min 阶跃响应图

在 DSC 控制时序下, 电机的转速为 1 500 r/min, A 相电流及 FFT 分析, 其电流谐波总畸变率 THD 为 32.3%, 如图 12 所示。在 FPGA 控制时序下, 电机转速为 1 500 r/min, A 相电流及 FFT 分析, 其电流总畸变率 THD 为 22.9%, 如图 13 所示。可以看出在 FPGA 控制时序下 A 相电流的跟踪性能更好, 谐波更少。

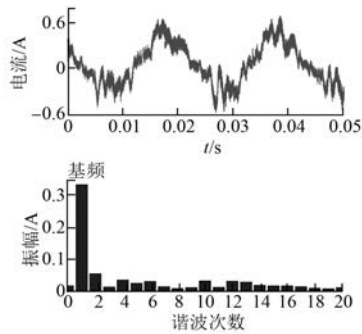


图 12 DSC 控制下 A 相电流及 FFT 分析

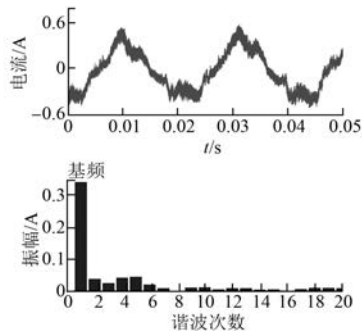


图 13 FPGA 控制下 A 相电流及 FFT 分析

4 结 语

本文分析了电流环的数学模型,利用调节器工程设计方法选择合理的参数,推导出了电流环的闭环传递函数,进而得出电流环的带宽与其环路的延时成反比,延时时间越长,其带宽越小。基于 DSC 的控制系统由于运算速度慢,一般采用的是延迟一拍的控制策略,因此导致电流环路的延时比较大,而 FPGA 的控制系统,充分利用了 FPGA 高速计算能力,采用即时采样、即时更新的控制策略,可以减小一倍的电流环路的延时。在相同控制参数的情况下,基于 FPGA 的控制系统具有更好的速度响应能力,并且转速变化越大,电

流环带宽的影响越明显。

【参考文献】

- [1] 朱海燕,吴根忠.鲁棒于电流环脉宽调制符合控制在同步电机控制中的应用[J].电机与控制应用,2011,38(8):27-31.
- [2] WANG W, XI X. Current control method for PMSM with high dynamic performance [C] // Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2013 IEEE International, 2013: 1249-1254.
- [3] 王伟华,肖曦.永磁同步电机高动态响应电流环控制方法[J].中国电机工程学报,2013,33(21):117-123.
- [4] 王伟华,肖曦,刘欢,等.电流增量预测控制策略参数稳定域拓展[J].中国电机工程学报,2014,29(3):50-56.
- [5] MOHAMED Y A R I, EI SAADANY E F. Robust high bandwidth discrete-time predictive current control with predictive internal model—A unified approach for voltage-source PWM converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(1):126-136.
- [6] 楚远征,郭强强,祁世民,等.永磁同步电机的新型滑膜抗饱和控制研究[J].电机与控制应用,2016,43(9):38-43.
- [7] NALEPA R. Generic criterion for tuning of adaptive digital PI current compensators of PMSM drives [C] // 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, IEEE, 2011: 601-606.
- [8] 韦克康,周明磊,郑琼林,等.基于复矢量的异步电机电流环数字控制[J].电工技术学报,2011,26(6):88-94.
- [9] 王恩德,黄声华.表贴式永磁同步电机伺服系统电流环设计[J].中国电机工程学报,2012,32(33):82-88.

收稿日期:2017-06-22

(上接第 88 页)

- [18] HENRÍQUEZ R P, ALONSO J B, FERRER M A, et al. Application of the teager-kaiser energy operator in bearing fault diagnosis [J]. ISA Transactions, 2013, 52(2):278-284.
- [19] PINEDA S M, PUCHE P R, RIERA G M, et al. Application of the teager-kaiser energy operator to the fault diagnosis of induction motors [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28(4):

1036-1044.

- [20] 李叶,徐科军,朱志海,等.面向时变的科里奥利质量流量计信号的处理方法研究与实现[J].仪器仪表学报,2010,31(1):8-14.
- [21] 刘翠,徐科军,侯其立,等.适用于频繁启停流量测量的科氏质量流量计信号处理方法[J].计量学报,2014,35(3):242-247.

收稿日期:2017-07-28