



永磁同步电机直接转矩控制系统 实验教学设计与实现

陈 哲, 李金程, 高 聪, 焦宁飞, 骆光照

(西北工业大学 自动化学院, 西安 710072)

摘要: 为加深学生对电气传动控制技术和永磁同步电机(PMSM)直接转矩控制(DTC)系统理论知识的理解, 培养学生的团队合作能力和综合实践能力, 搭建了直接转矩控制系统的实验平台, 在课程教学中引入了 HiGale 半实物仿真系统和 MATLAB 软件。学生基于 MATLAB 软件对永磁同步电机的直接转矩控制系统进行仿真建模、参数调试、运行和分析, 并进一步在 HiGale 中进行半实物仿真实验, 对主要实验过程及结果加以分析, 使得教学形式更加多样化。该平台帮助学生加深对直接转矩控制系统的理解和认识, 提高学生理论联系实际的能力, 激发学生对电机控制技术的学习兴趣。

关键词: 直接转矩控制系统; 半实物仿真实验; 永磁同步电机; MATLAB

中图分类号: TP75

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230421

Design and Implementation of Experimental Teaching of the Direct Torque Control System for the Permanent Magnet Synchronous Motor

CHEN Zhe, LI Jincheng, GAO Cong, JIAO Ningfei, LUO Guangzhao

(School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to deepen students' understanding of the theoretical knowledge of the electrical drive technology and permanent magnet synchronous motor (PMSM) direct torque control (DTC) system, cultivate their cooperative ability and comprehensive practical ability, an experimental platform for the PMSM DTC system has been established. The HiGale semi physical simulation system and MATLAB have been introduced into the course teaching. Students are required to conduct simulation modeling, parameter debugging, operation, and analysis of the PMSM DTC system based on MATLAB, further conduct semi physical simulation experiments in HiGale, and analyze the main experimental processes and results. This platform makes the teaching method more diverse, helps students deepen their understanding of the DTC system, improves their ability to integrate theory with practice, and stimulates students' interest in learning the motor control technology.

Key words: direct torque control system; semi-physical simulation experiment; permanent magnet synchronous motor; MATLAB

现代交流电机调速技术需要电气工程专业知识的综合应用, 与工程实践联系密切, 是一门实用性很强的课程^[1]。随着科教融合理念^[2]和计算机辅助教学的兴起, 只有将专业软件的仿真实验融入教学中, 才能不断地创新、发展、改革教学方式来适应时代的变化, 使得教学形式更加多样化^[3-5]。

本文以电气工程专业现代交流电机调速技术课程中的永磁同步电机直接转矩控制系统知识点

为对象, 进行教学设计。首先对直接转矩控制系统理论知识做了详细讲解, 然后利用 MATLAB 进行离线仿真教学, 最后通过 HiGale 半实物仿真平台对直接转矩控制系统进行半实物仿真实验教学, 提高了课程的深度。该课程通过理论联系实际, 培养学生综合运用所学知识解决实际问题的能力, 为今后成为电气工程专业人员打下了坚实的理论基础^[6-7]。

收稿日期: 2023-09-08; 修回日期: 2023-11-27

基金项目: 陕西省重点研发计划(2022GY-264); 2023 年度西北工业大学研究生培养质量提升工程(23KC0073)。

作者简介: 陈哲(1986-), 男, 博士, 副教授, 主要从事永磁同步电机高性能伺服控制、无位置传感器控制方面的研究。E-mail: zhe.chen@nwpu.edu.cn

1 基本工作原理和硬件介绍

1.1 永磁同步电机数学模型

永磁同步电机(PMSM)在旋转 d 、 q 坐标系下定子电压和定子磁链方程分别为:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_e \psi_q \\ u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_e \psi_d \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_d 、 u_q 为 d 、 q 轴定子电压; L_d 、 L_q 为 d 、 q 轴定子电感, 对于表贴式永磁同步电机, $L_d = L_q = L_s$; i_d 、 i_q 为 d 、 q 轴定子电流; ψ_d 、 ψ_q 为 d 、 q 轴定子磁链; R_s 为电枢电阻; ψ_f 为永磁体产生的磁链, 常量; ω_e 为电机电角速度, 永磁同步电机 d 、 q 坐标系下电磁转矩方程和运动方程分别为:

$$T_e = \frac{3}{2} p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] = \frac{3}{2} p \psi_f i_q \quad (3)$$

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_L - F_B \omega_r \quad (4)$$

式中: p 为电机极对数, J 为转动惯量, F_B 为摩擦系数, ω_r 为转子机械角速度。

由于本文研究对象为表贴式永磁同步电机 ($L_d = L_q$), 根据式(3), 电磁转矩只与极对数、永磁体磁链和 q 轴电流 3 个参数有关。

1.2 永磁同步电机直接转矩控制理论

永磁同步电机直接转矩控制系统结构简单, 易于实现, 动态响应快, 控制器的计算负担小, 但也有转矩脉动大, 电流波形差, 谐波含量高等缺点。文献 [8-9] 采用空间矢量调制、占空比恒定、细分开关表等方法对其进行了优化。

本文介绍的永磁同步电机直接转矩控制采用定子磁场定向, 直接将电机和逆变器看作一个整体, 将磁链和转矩直接作为控制变量^[10], 取消了矢量控制中的坐标变换, 减小了计算量, 原理框图如图 1 所示。

表贴式永磁同步电机的电磁转矩可表示为:

$$T_e = \frac{3}{2} p \frac{\psi_f \times \psi_s}{L_s} = \frac{3}{2} p \frac{\psi_f \psi_s}{L_s} \sin \delta \quad (5)$$

式中: ψ_f 是永磁体产生的转子磁链矢量; ψ_s 是定子磁链矢量; δ 是负载角, δ 等于定子磁链角 θ_s 与转子位置角 θ 的差值。

从式(5)可以看出, 知道了定子磁链幅值、转

子磁链的幅值和负载角 δ 这 3 个参数就能得到电磁转矩。由于定子磁链幅值 ψ_s 参考值给定通常为常数, 转子永磁体磁链幅值也几乎不会发生改变, 因而要改变电磁转矩的大小只能通过改变定子磁链与转子磁链之间夹角 δ 的大小。在动态条件下, 可以通过电压矢量 u_s 迅速地改变 ψ_s 的方向, 而转子磁链矢量在这个过程中来不及变化, 这样就能较为容易地改变负载角 δ 的大小, 直接转矩控制系统中空间电压矢量的选择由开关表实现。

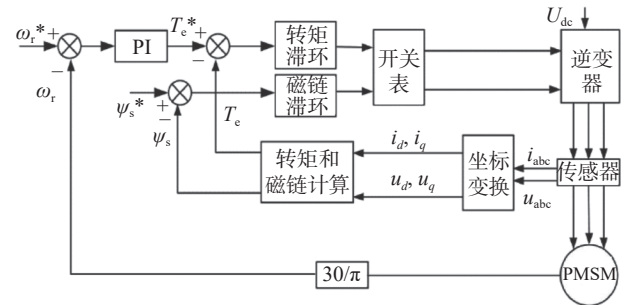


图 1 直接转矩控制系统框图

在滞环控制器中, 根据电机的实际值和期望值得出其差值, 同时设定滞环允许的环宽。当差值大于环宽时, 滞环控制器输出信号 1; 当差值小于环宽时, 控制器输出信号 0; 当差值不超过环宽时, 输出值继续为上一周期的输出值。

$$\psi = \begin{cases} 1, & |\psi_s^*| - |\psi_s| > \Delta\psi \\ \text{不变}, & ||\psi_s^*| - |\psi_s|| \leq \Delta\psi \\ 0, & |\psi_s^*| - |\psi_s| < -\Delta\psi \end{cases} \quad (6)$$

$$\tau = \begin{cases} 1, & |T_e^*| - |T_e| > \Delta T \\ \text{不变}, & ||T_e^*| - |T_e|| \leq \Delta T \\ 0, & |T_e^*| - |T_e| < -\Delta T \end{cases} \quad (7)$$

结合转矩和磁链滞环控制, 并根据所判断的定子磁链扇区, 建立三相永磁同步电机的开关矢量选择表^[11], 如表 1 所示。

表 1 DTC 开关表

ψ	τ	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6
1	1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6	u_1
	0	u_6	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5
0	1	u_3	u_4	u_5	u_6	u_1	u_2
	0	u_5	u_6	u_1	u_2	u_3	u_4

通过开关表, 选择合适的电压矢量, 从而实现电机控制。永磁同步电机直接转矩控制的基本实现步骤如下^[12-13]:

1) 采样获得速度反馈值、位置反馈值以及三

相电流反馈值;

2) 速度反馈与参考值(通过输入给定)的差值经过PI控制输出为电磁转矩的给定值。由电流反馈值计算得到当前的定子磁链和电磁转矩;

3) 定子磁链分解到 α 、 β 轴,得到 ψ_α 、 ψ_β ,再由 ψ_α 、 ψ_β 得到当前定子磁链所在扇区;

4) 定子磁链幅值与参考值(通过输入给定)比较的差值输入到磁链滞环控制器,电磁转矩与给定值比较的差值输入到转矩滞环控制器;

5) 通过查表选择出电压矢量开关表中合适的电压矢量,转换为功率变换器的开关信号,实现对电机的闭环控制。

1.3 在线实验平台硬件介绍

永磁同步电机直接转矩控制的HiGale半实物仿真实验平台如图2所示,各部分功能如下。

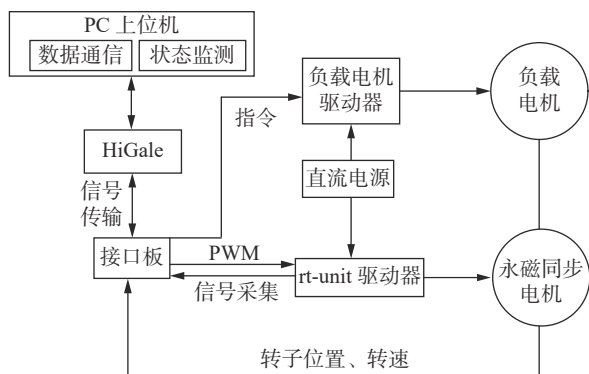


图2 半实物仿真实验平台

1) 直流电源负责给rt-unit驱动器提供直流电。

2) 三相全桥逆变器(rt-unit公司RTI-INV-6025IR)由整流电路、制动电路、逆变电路以及采样电路4个部分组成。它支持交/直流两种输入模式,直流输入电压不超过600V,最大输出电流为25A,内置驱动电阻为300 Ω ,具有过流、直流过压、过温、绝缘栅双极晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)驱动故障和脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)脉冲同高保护等硬件保护功能。

3) HiGale仿真机本次实验使用的电机控制卡是恒润科技自主研发的HR-cPCI-5111,具有电机控制所需的各种外围接口,用于实现永磁同步、异步和直流无刷等电机控制以及快速控制原型(RCP)开发应用。HR-cPCI-5111可以采集调理后的电压、电流信号,支持常用速度/位置传感器(旋变解码器、增量解码器和霍尔传感器)信号解

算,并输出带死区控制逻辑的PWM信号和通用PWM信号,为电机功率驱动装置提供控制信号。

4) PC上位机内部安装的HiGale软件可用来监控实验过程。

5) 接口板为HiGale和rt-unit驱动器之间的接口电路,用来采集电机的电流、转速和位置信号,并输出PWM控制信号。

6) 负载电机驱动器用于驱动负载电机运行,可以实现电机加载和卸载。

7) 永磁同步电机的右侧电机是被控电机,左侧电机作为负载运行。

1.4 实验平台开放性和通用性设计

搭建的HiGale半实物仿真平台是一个交直流电机通用控制算法验证平台,不局限于实现永磁同步电机直接转矩控制验证,它对于异步电机、同步磁阻电机和直流电机等都可以完成调速控制。

在交流电机的控制算法验证方面,由于该平台软硬件功能完善可以实现矢量控制、直接转矩控制和模型预测控制等电机调速算法,还可以实现自抗扰控制、自适应控制和神经网络控制等先进控制算法。

为激发学生的自主学习能力,基于该平台可以设计如下多种开放性实验,增强学生的实践能力。

1) 不同功率等级永磁同步电机算法通用性验证

以直接转矩控制算法为例,实验室可提供多台不同参数的永磁电机供学生实验调试。在控制架构一致的情况下,如何根据不同参数电机来选择控制参数就是一个很好的实践,可以深化学生对被控对象的理解。

2) 不同转子位置传感器的解码

实验室可提供同一功率等级电机装载不同位置传感器,有工业用标准2500线光电编码器、3相霍尔传感器和伺服用旋转变压器。引导学生学习不同位置传感器的测量原理,利用实时模块搭建解算算法获取实际转子位置。

3) 通用变频器加载方式学习

本实验平台为两台电机对拖,负载电机由通用变频器控制给被测电机加载。由于负载侧通用变频器和被控侧变频器共直流母线,引导学生思考为什么能量流动可以通过母线平衡。加载时负载侧通用变频器可以运行于转矩控制模式或速度模式,引导学生思考运用电机的四象限运行知识

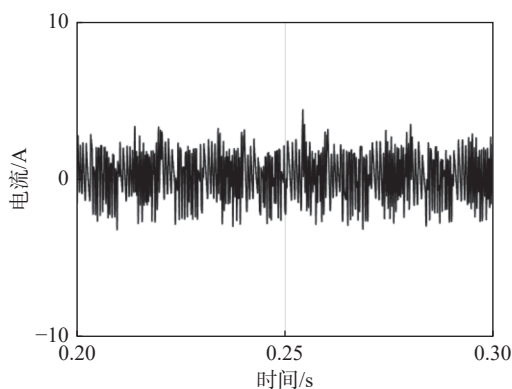


图4 电机转速 750 r/min 时空载 A 相电流仿真结果

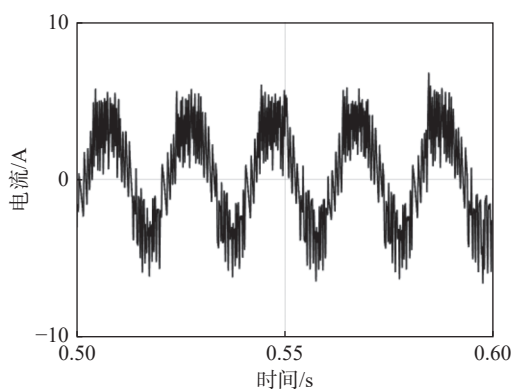


图5 电机转速 750 r/min 时 50% 额定负载 A 相电流仿真结果

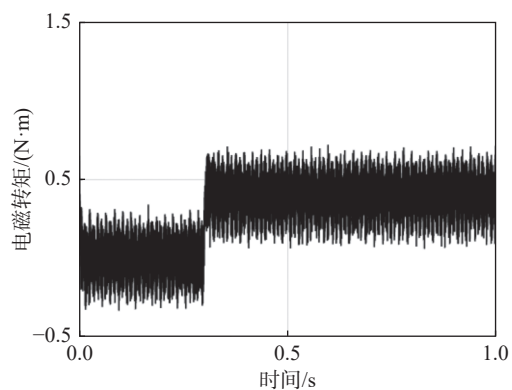


图6 电机转速 750 r/min 时电磁转矩仿真结果

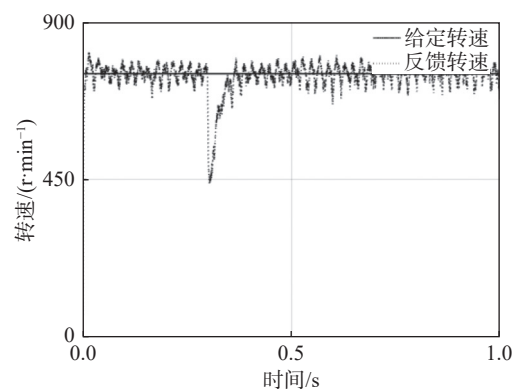


图7 电机转速 750 r/min 时转速跟踪仿真结果

2.2 在线仿真模型的搭建

离线仿真完成后,教师引导学生进一步将离线仿真模块进行替换,然后在 HiGale 中进行半实物仿真实验,与离线仿真作比较,培养学生分析和解决问题的能力。

2.2.1 半实物仿真模型的建立

HiGale 内嵌于 Simulink 模块库中,与 MATLAB 软件无缝连接,学生在离线仿真模型的基础上,建立半实物仿真模型如图 8 所示。其中,所用到的 HiGale 模块有 ADC 模块、DAC 模块、Resolver 模块和 PWM 模块。

1) ADC 模块是将模拟量转换为数字量,对应 8 个输出通道,用来采集三相电流、直流母线电压等模拟量。

2) DAC 模块将数字量转换成模拟量,用来控制负载转矩。

3) Resolver 模块对应 1 个旋变解码通道,通过旋转变压器模块实时获取转子位置及转速。

4) PWM 模块对应 A、B、C 共 3 个 PWM 输出通道。PWM 模块主要应用于二相或者三相桥臂的控制,每个通道对应控制一路桥臂信号。3 路 PWM 输出的频率保持一致,改变频率则 3 路 PWM 输出频率会同时改变。

2.2.2 HiGale 半实物仿真

HiGale 软件可以对实时仿真模型运行过程进行在线监控,支持模拟实验中的变量显示、参数调整、数据记录、实验监控和脚本测试功能,监控页面包括编辑区和实验控件。在编辑状态下,用户可以向监控页面添加控件并调整控件布局的方式设计所需监控页面。监控界面常用的控件有表格显示、表格调参和示波器控件,如图 9 所示。

1) 表格调参

在上位机中通过图形化的界面,可以实时调整在线模型中的参数,而不用反复地修改 HiGale 中运行的实时模型。

2) 表格显示

通过图形化的界面,实时显示在线模型中变量的值。

3) 示波器

以仿真步长时间间隔绘制动态曲线的方式显示仿真变量变化值。主要用于瞬时动态曲线显示。可以支持多条曲线的同时绘制,并通过颜色进行区分。

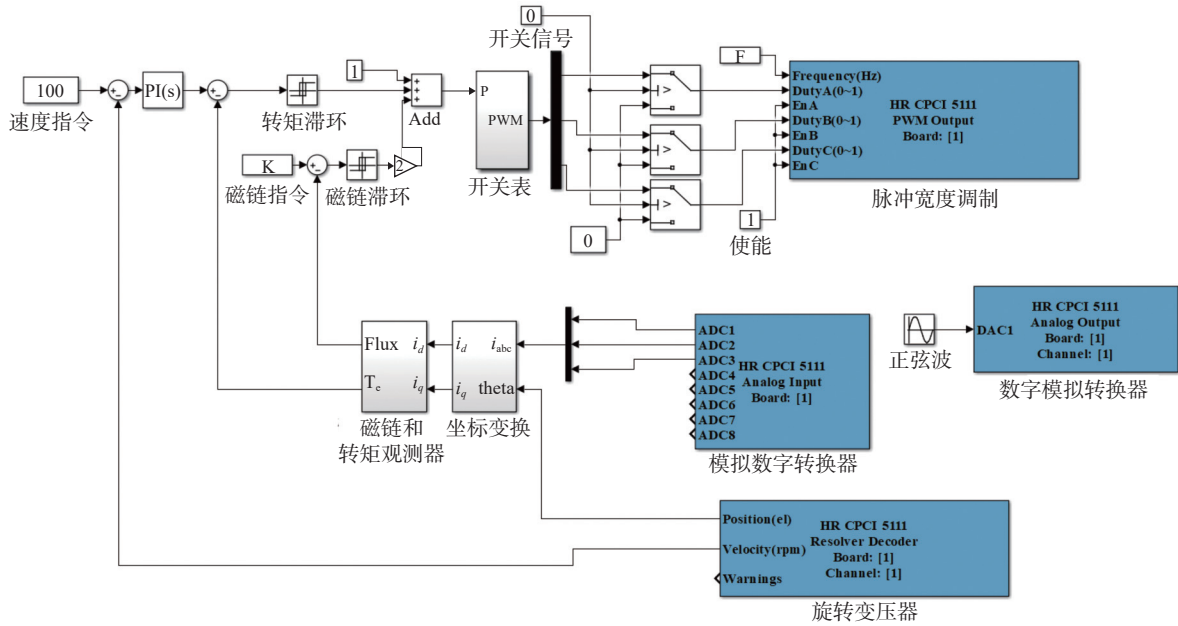


图 8 半实物仿真模型

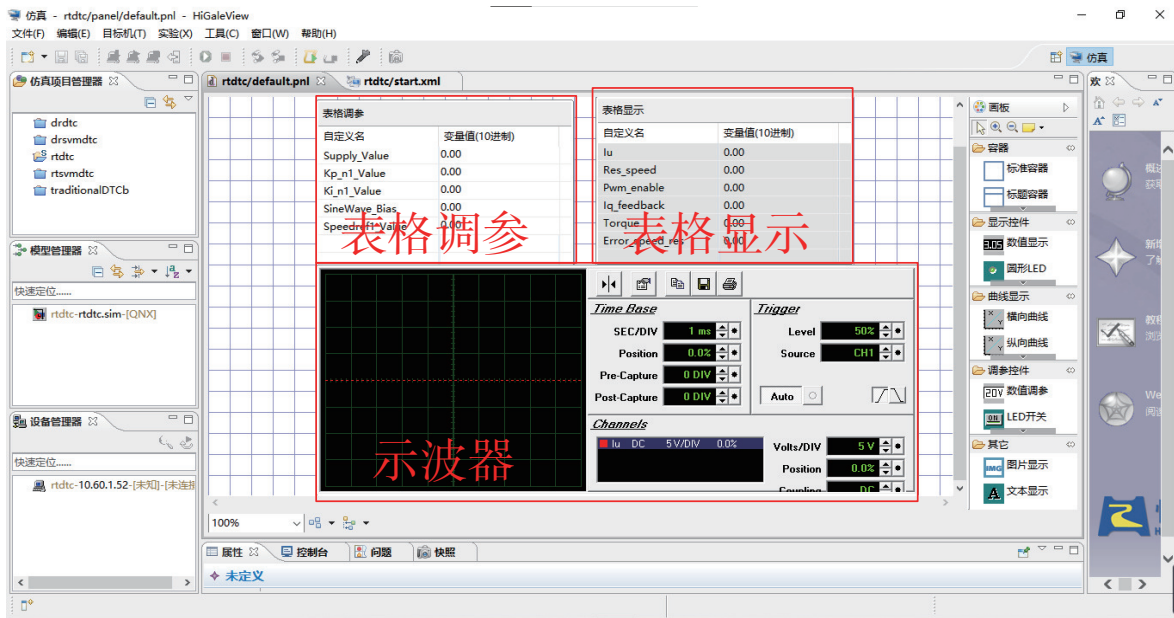


图 9 上位机 HiGale 监控界面

3 实验及结果分析

3.1 实验关键参数选择

1) 给定磁链选择

给定磁链为定子磁链幅值，表示为：

$$\psi_s = \sqrt{\psi_f^2 + (L_s i_s)^2} \quad (8)$$

由于本文中 $i_d = 0$ ，式(8)可简化为：

$$\psi_s = \sqrt{\psi_f^2 + (L_q i_q)^2} \quad (9)$$

由于 q 轴电感及 q 轴电流都比较小，且获取难度比较大，精度不高，式(9)也可进一步简化为：

$$\psi_s \approx \psi_f \quad (10)$$

为了控制的精确性，本文中参考磁链根据式(9)选择。

2) 转速环 PI 参数选择

转速 PI 控制器的参数比例常数 k_p 较大，动态响应快，但是容易导致相电流过大，电流变化率也会较大，对驱动器及电机的安全造成威胁； k_p 过小则动态响应慢，无法很好地跟踪给定值，

失去了直接转矩控制系统的优势。积分常数则与稳态误差有关,积分常数 k_i 过小会产生稳态误差,转速无法跟踪给定值; k_i 过大容易导致系统不稳定,且容易导致PI控制器饱和。本文中取 $k_p = 0.001$, $k_i = 0.05$ 。

3) 转矩滞环与磁链滞环的宽度

转矩滞环与磁链滞环的宽度应该选择一个合适的值,如果宽度过小,会导致选择的开关电压矢量频繁切换,转矩脉动大;反之如果过大,控制效果差,系统不稳定。根据 Simulink 仿真最优结果,本文取仿真相同值,即额定值的 0.5%。

3.2 实验结果分析

永磁同步电机直接转矩控制的实验结果如图 10~图 13 所示。结果表明永磁同步电机直接转矩控制系统动态响应快,且能够较好地跟踪参考转速。但是转速波动较大,转矩脉动大,电流谐波含量高,正弦度不好。通过实验可以帮助学生加深对于永磁同步电机及其直接转矩控制系统的理解,增强学生的动手实践能力,同时也能帮助学生养成良好的实验习惯,保证安全性。

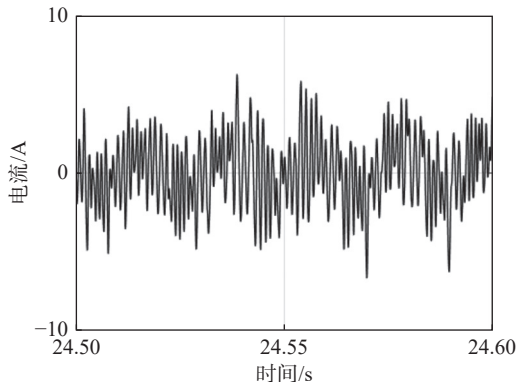


图 10 电机转速 750 r/min 时空载 A 相电流实验结果

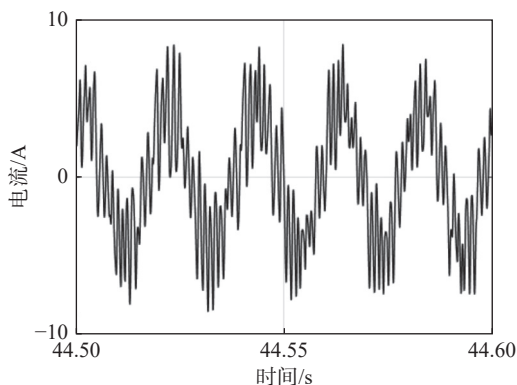


图 11 电机转速 750 r/min 时 50% 额定负载 A 相电流实验结果

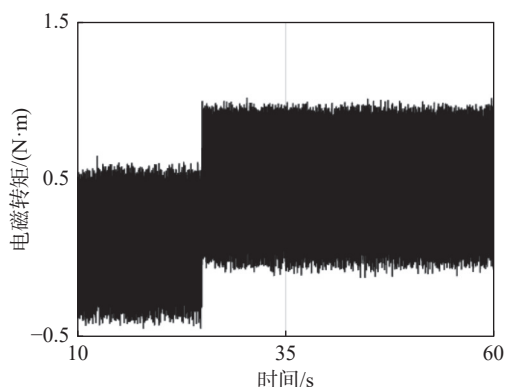


图 12 电机转速 750 r/min 时电磁转矩实验结果

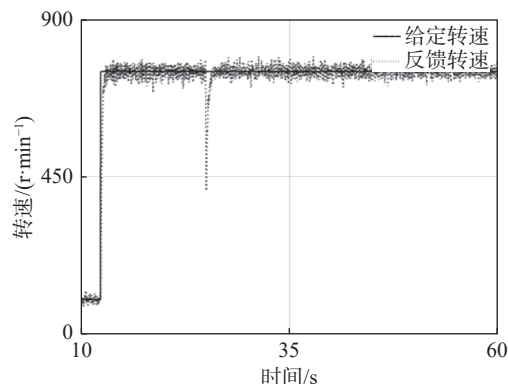


图 13 电机转速 750 r/min 时转速跟踪实验结果

与仿真结果对比可以发现,在实验中,电磁转矩脉动更大,电流谐波含量更高。这主要是由于在实验过程中各个系统之间存在相互干扰,逆变器存在死区效应等因素,无法达到仿真中的理想条件。

通过 Higate 平台的实验验证,学生已经了解到实际数字控制系统和理想离线仿真存在较大差距,下一步要引导学生思考如何通过优化算法来消除两者结果的差异。一方面可以设计电流的数字低通滤波器,通过调节滤波器的截止频率可以保证基波频率无损通过,同时有效抑制开关频率附近及以上的高频噪声;另一方面,可以考虑使用逆变器死区补偿算法,通过补偿 SVPWM 的输入指令来抵消死区时间的影响,削弱第 5、第 7 次谐波电流。这些都是工程上非常实用的矢量控制优化算法。当然,也可以引导学生在离线仿真模型中人为添加系统噪声和随机噪声,并且在 SVPWM 模型中添加死区时间故意制造电流第 5、第 7 次谐波,让离线仿真结果更逼近实际。这种双向思维的训练可以让学生扎实掌握交流电机调速的实现,为后续的深造和工作打下良好基础。

4 教学内容与教学目标

本课程主要介绍了永磁同步电机数学模型及直接转矩控制系统的原理,并利用 Simulink 进行仿真,最后利用 HiGale 半实物仿真平台进行了半物理实验,加深了学生对于永磁同步电机的认识,帮助学生理解和掌握永磁同步电机直接转矩控制系统的原理和调参方法,培养学生综合运用专业知识解决电气领域具体工程问题的能力。

本课程采用理论与仿真实践相结合的教学方法,旨在培养学生对电机调速系统的兴趣,加深对知识的理解,以达到如下教学目标:

1) 熟悉和掌握交流调速系统的核心技术基础,包括与现代交流调速技术相关的电力电子器件、变频器、两电平逆变器技术等专业知识;

2) 培养学生综合运用电机、电力电子和自动控制的相关原理,理解和分析如同步电动机的调速系统、无速度传感器的高性能调速等具体工程问题;

3) 通过实验训练,培养学生综合运用嵌入式系统、HiGale 半实物仿真等技术的能力,完成交流电机调速系统的实践运用。

5 结束语

现代交流电机调速技术是面向工程实践为导向的,融合了电力电子技术、电气传动及控制基础、自动控制原理及控制系统仿真与建模等知识的一门课程。采用理论与实验结合的教学方式,帮助学生对所教授的知识融会贯通,在课程考试方面,也通过大作业和实验两个途径来考察学生的实验操作能力。综合提升了学生解决复杂工程问题的能力与创新实践能力,培养了学生工程设

计思维、团队合作与责任担当意识及安全意识。

参考文献

- [1] 白锐,张健.交流调速控制系统课程的教学改革与实践[J].中国现代教育装备,2012(9):56-57.
- [2] 曹吉花,温艳,李彪,等.科教融合的《电机与拖动》的课堂教学[J].电子世界,2022(1):19-20.
- [3] 蒋丹,赵雯婷,周兵源,等.基于AMESim和MATLAB的液压调速回路仿真实验教学研究[J].实验科学与技术,2023,21(3):71-76.
- [4] 郭铁明,南雪丽,尹燕,等.基于OBE+新工科理念的材料分析方法教学的“两性一度”设计[J].中国现代教育装备,2021(17):93-95.
- [5] 张颖,程如岐,张维,等.PLC原理与实验课程四立方模式的设计与实践:以自动化立体车库控制系统教学为例[J].实验室研究与探索,2021,40(12):173-177.
- [6] 张志华,王莉,沈明新,等.MATLAB仿真技术在运动控制系统教学中的应用[J].中国冶金教育,2016(1):95-97.
- [7] 蒯松岩,衡凤平,崔鑫,等.基于Matlab的“运动控制系统”课程教学改革[J].电气电子教学学报,2016,38(1):29-31.
- [8] 李文.非理想反电势永磁同步电机转矩控制研究[D].南京:南京邮电大学,2019.
- [9] 李世霖.基于直接转矩控制的永磁同步电机转矩脉动抑制研究[D].大连:大连海事大学,2017.
- [10] 樊明迪.永磁同步电机直接转矩控制技术研究[D].西安:西北工业大学,2014.
- [11] 岳驰丹.电动观光车用永磁同步电机直接转矩控制研究[D].淮南:安徽理工大学,2022.
- [12] 李耀华,师浩浩,任佳越,等.表面式永磁同步电机直接转矩控制系统自适应变角度电压矢量选择策略[J].微电机,2019,52(6):57-61.
- [13] 李耀华,孟祥臻,师浩浩,等.基于双变量预测控制的表贴式永磁同步电机直接转矩控制系统[J].电机与控制应用,2019,46(6):15-20.

编辑 葛晋