

磁浮列车悬浮控制器主电路实时仿真

朱跃欧¹, 荣立军², 张文跃¹, 廖看秋¹, 蒋毅¹

(1. 中车株洲电力机车有限公司, 湖南 株洲 412001;

2. 同济大学 国家磁浮交通工程技术研究中心, 上海 201804)

摘要: 以中低速磁浮列车悬浮控制器主电路为研究对象, 建立了充电回路和斩波器电路的数学模型。利用 dSPACE 实时仿真软件和硬件平台建立了悬浮控制器主电路仿真模型, 并对充电回路和斩波器电路以及电流跟随情况进行了仿真实验验证和对比分析。仿真和测试结果表明, 建立的悬浮控制器主电路仿真模型较为准确, 为后续用仿真模型替代真实的悬浮控制器主电路提供了理论依据, 为悬浮控制策略的开发与调试奠定了基础。

关键词: 磁浮列车; 悬浮控制器主电路; 实时仿真系统

中图分类号: TM571.6 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)09-0050-07

doi: 10.12177/emca.2022.092

Real-Time Simulation for Suspension Controller Main Circuit of Maglev Train

ZHU Yueou¹, RONG Lijun², ZHANG Wenyue¹, LIAO Kanqiu¹, JIANG Yi¹

(1. CRRC Zhuzhou Locomotive Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China;

2. National Maglev Transportation Engineering R&D Center, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The main circuit of the suspension controller for low and medium speed maglev trains is studied and a mathematical model of the charging circuit and chopper circuit is developed. A simulation model of the suspension controller main circuit is established using the dSPACE real-time simulation software and hardware platform, and the charging circuit and chopper circuit as well as the current tracking situation are verified and compared. The simulation results show that the simulation model of the suspension controller main circuit established is more accurate. A theoretical basis is provided for the subsequent replacement of the real suspension controller main circuit by the simulation model, and the foundation is also provided for the development and debugging of the suspension control strategy.

Key words: maglev train; suspension controller main circuit; real-time simulation system

0 引言

悬浮控制器是悬浮系统的核心部分, 其主电路通常称作斩波器主电路。斩波器主电路是电磁悬浮系统中悬浮控制器的功率控制部分和执行机构, 其功能是给悬浮电磁铁供电, 使悬浮电磁铁产生悬浮力。悬浮斩波器的性能好坏直接影响到整个悬浮系统的性能。因此, 有必要对悬浮斩波器

开展优化和测试。

除了必要的理论分析计算外, 现有文献[1-3]对悬浮控制器主电路斩波器的研究主要采用 OrCAD/PSpice、Simplorer、Simulink 等仿真软件搭建仿真模型或设计实际的斩波电路, 在实验室环境进行测试验证。上述仿真工具具有优异的电路仿真功能, 但均属于离线仿真软件, 无法仿真实时系统中的执行时间、中断延时等状态^[4]; 此外, 在

收稿日期: 2022-04-19; 收到修改稿日期: 2022-08-08

作者简介: 朱跃欧(1986—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为磁浮列车悬浮系统设计。

实验室条件下搭建实际的斩波电路进行测试,需花费较高的试验成本和调试时间,不利于悬浮控制器主电路的优化。

为解决上述问题,本文基于 dSPACE 软硬件平台,搭建悬浮控制器主电路实时仿真模型,并进行仿真分析研究。开展试验测试,为替代真实的悬浮控制器主电路和悬浮控制策略的开发调试提供基础。

1 悬浮控制系统简介

图 1 所示为悬浮控制系统的原理框图,磁浮列车悬浮系统主要由悬浮控制器、悬浮传感器和悬浮电磁铁组成。悬浮控制器通过悬浮传感器、电流传感器、电压传感器等采集悬浮电磁铁与轨道之间的间隙和加速度信号,以及流过悬浮电磁铁的负载电流信号和主电路的电压信号。悬浮控制电路依据上述传感器信号,通过合适的控制策略进行运算,并输出控制信号驱动斩波器主电路开关管的导通和关断,以此改变悬浮电磁铁的负载电流,进而改变悬浮电磁力,保证磁浮列车与轨道之间维持额定的悬浮间隙,实现列车的稳定悬浮。

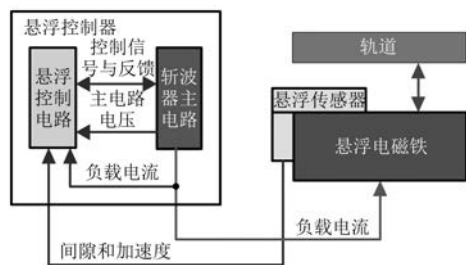


图 1 悬浮控制系统原理框图

2 悬浮控制器主电路模型分析

根据悬浮电磁铁线圈负载两端电压和负载电流的工作区域不同,可将斩波器主电路分为两象限悬浮斩波器和四象限悬浮斩波器。两象限悬浮斩波器向电磁铁负载线圈提供方向固定的电流,常用于电磁吸力悬浮系统;四象限悬浮斩波器负载电流方向可变,主要用于永磁-电磁混合悬浮系统。

本文研究的悬浮控制器主电路为 H 型两象限斩波器结构,该电路为两象限全桥电路。如图 2 所示,由接触器 KM1、接触器 KM2、充电电阻 R_c 组成预充电回路,由功率开关器件 IGBT (VT1、

VT2、VT3、VT4) 和二极管 (VD2、VD3) 组成斩波器的 2 个桥臂, C 为支撑电容, U_d 为电源输入, $u(t)$ 为悬浮电磁铁两端电压, $u_c(t)$ 为电容两端电压, $i(t)$ 为悬浮电磁铁电流。通常将悬浮电磁铁采用电阻 R_0 和电感 L_0 等效,作为斩波器主电路的负载,串联于 2 个桥臂之间,并采用 VT1、VT4 同时导通和关断的控制方式实现悬浮电磁铁电流的增加和减小。

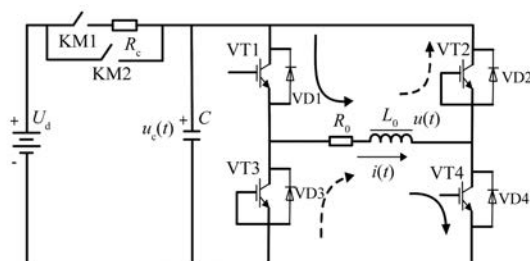


图 2 悬浮控制器主电路原理图

为便于分析,本文以主电路充电电容为分界线,将悬浮控制器主电路分为 2 个部分:充电回路部分和悬浮斩波器部分。

2.1 充电回路

充电回路的主要作用是为了避免上电过程的大电流冲击,在接触器 KM2 两端再并联一个电阻 R_c 及接触器 KM1。充电回路的暂态过程如下:当悬浮控制器主电路上电时,先闭合预充电回路接触器 KM1,此时接触器 KM2 为断开状态,充电电路部分可近似为一个 RC 电路,电源 U_d 给电容 C 充电,则有方程:

$$U_d = R_c C \frac{du_c(t)}{dt} + u_c(t) \quad (1)$$

设初值 $t=0$ 时, $u(t)=0$,解微分方程得:

$$u_c(t) = U_d (1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (2)$$

当电容电压与电源电压接近时,再闭合主回路接触器 KM2,断开接触器 KM1,此时电容两端电压为电源电压 U_d 。

2.2 斩波器电路

主回路接触器 KM2 闭合后,悬浮斩波器电路开始工作,此时电源电压 U_d 为悬浮斩波器电路的输入,斩波器电路的示意图如图 3 所示。

进一步分析,当 VT1 和 VT4 同时导通时,对应的电路等效图如图 4(a) 所示,此时负载两端承受正向电压,电源给负载提供能量,线圈电流增加;当 VT1 和 VT4 同时关断时,VD2 和 VD3 导通

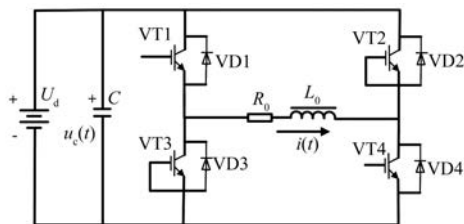


图3 斩波器电路示意图

续流,对应的电路等效图如图4(b)所示,此时负载两端承受反向电压,能量从负载回馈至电源,线圈电流减小^[5-6]。

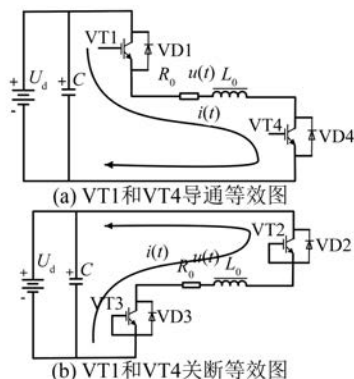


图4 斩波器电路不同状态下电路等效图

根据图4悬浮斩波器的电路等效图,推导悬浮斩波器电路的稳态分析如下^[7-9]：

(1) 等效图4(a)。电路中电压 $u(t) = U_d > 0$, 电感储能, $i(t)$ 增大, 则有方程:

$$u(t) = U_d = L_0 \frac{di(t)}{dt} + R_0 i(t) \quad (3)$$

设初值 $i(t)|_{t=t_1} = I_1$, 解微分方程得:

$$i(t) = \frac{U_d}{R_0} \left[e^{-\frac{R_0}{L_0}(t-t_1)} - 1 \right] + I_1 e^{-\frac{R_0}{L_0}(t-t_1)} \quad (4)$$

(2) 等效图4(b)。电路中电压 $u(t) = -U_d < 0$, 电感释放能量, $i(t)$ 减小, 则有方程:

$$u(t) = -U_d = L_0 \frac{di(t)}{dt} + R_0 i(t) \quad (5)$$

设初值 $i(t)|_{t=t_2} = I_2$, 解微分方程得:

$$i(t) = -\frac{U_d}{R_0} \left[e^{-\frac{R_0}{L_0}(t-t_2)} - 1 \right] + I_2 e^{-\frac{R_0}{L_0}(t-t_2)} \quad (6)$$

3 实时仿真模型搭建

3.1 dSPACE 仿真系统平台

dSPACE 仿真系统是由德国 dSPACE 公司开

发的一套半实物仿真的软硬件工作平台,其处理器具有高速的计算能力,并配备了丰富的 I/O 支持,用户可以根据需要进行组合;软件环境功能强大且使用方便,可实现代码自动生成和下载,并包括了试验和调试的整套工具^[10-11]。

本文的悬浮控制器主电路实时仿真系统主要基于 DS1006 处理器板卡,包括 A/D 板卡、D/A 板卡、FPGA 板卡和 PCI 通信板卡等,板卡之间通过 PHS 总线进行通信,板卡的详细信息和参数如表1所示。

表1 dSPACE 仿真机柜板卡信息

名称	主要技术参数
DS1006	处理器板卡,四核 AMD Opteron™ 处理器, 2.8 GHz
DS2004	A/D 板卡,16 个 A/D 输入通道,16 位分辨率, $\pm 5\text{ V}$ 或 $\pm 10\text{ V}$ 输入电压范围
DS2102	D/A 板卡,6 个并行 D/A 转换器;16 位分辨率, $\pm 5\text{ V}$ 或 $\pm 10\text{ V}$ 或 $0 \sim 10\text{ V}$ 输出电压范围
DS5203	FPGA 板卡,用于仿真悬浮控制器主电路模型
DS814	PCI 通信板卡(机箱)
DS817	PCI 通信板卡(主机)

根据前述分析,将悬浮控制器主电路数学模型拆分为充电电路与斩波器电路,而二者又可分别用 RC 模型与 RL 模型等效替代,故在 dSPACE 系统的 FPGA 平台中分别搭建 RC 模型与 RL 模型。

3.2 RC 模型和 RL 模型搭建

在实时仿真系统中采用定步长进行仿真,因此需对微分方程进行求解并离散化。根据 RC 电路和 RL 电路的微分方程,本文采用梯形法进行求解,设定在同一仿真步长内,电流或电压值保持恒定不变,则线性电容元件电压与电流之间的关

系可写为 $u(t_2) = \frac{t_2 - t_1}{C} i + u(t_1)$, 仿真计算的步长为 $T_s = t_2 - t_1$, 线性电感元件电压与电流之间的关

系可写为 $i(t_2) = \frac{t_2 - t_1}{L} u + i(t_1)$ 。根据上述等式搭

建了可在 FPGA 板卡 DS5203 中运行的 RC 模型和 RL 模型,如图5所示。由于 dSPACE 系统的 FPGA 平台无法直接观测信号,故需借助 PHS_Write 模块将信号传输至处理器平台信号,再进行观测。

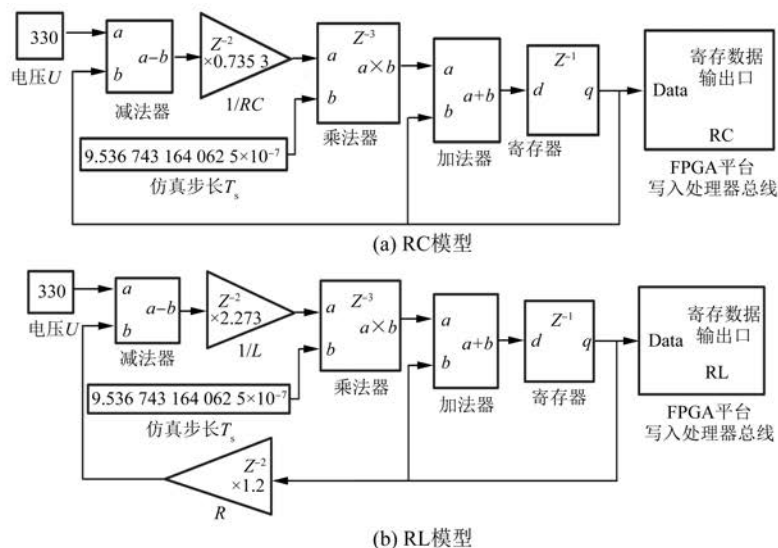


图5 RC电路和RL电路仿真模型

3.3 悬浮斩波器模型搭建

由悬浮斩波电路的模型分析可知,悬浮控制器的斩波电路可等效为图4(a)与图4(b)的反复切换。因此,可先根据微分方程式(4)搭建图4(a)的仿真模型A,如图6所示^[12]。再以此为基础,并根据微分方程式(6)搭建图4(b)的仿真模型B,完成悬浮斩波器仿真模型的搭建。考虑到仿真模型B与仿真模型A结构基本一致,因此在文中并未重复列出。

从等效图4中分析可知,PWM波的值决定了开关管VT1与VT4的状态,也决定了悬浮斩波器模型运行在仿真模型A或者模型B。当PWM波为1时,悬浮斩波器仿真模型按照仿真模型A运

行;当PWM波为0时,斩波器实际按照仿真模型B运行。

每当上升沿来临时,即PWM波由0切换到1时,仿真模型A采用仿真模型B在当前时刻的输出作为初值开始运行,由于dSPACE系统的FPGA平台修改参数后编译时间较长,而在处理器平台编译的时间较短,因此,一般采用在处理器平台修改参数,再借助PHS_Read模块将信号传输至FPGA平台的方法进行仿真分析。

当下降沿来临时,即PWM波由1变为0时,模型B采用模型A在当前时刻的输出作为初值开始运行。

将模型A与模型B相连,最终输出调用三输

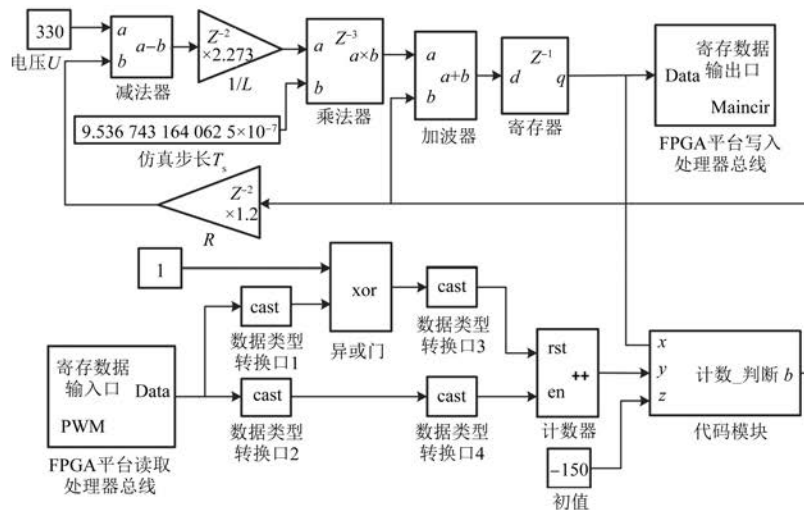


图6 仿真模型A

入系统 MUX 模块来实现信号选取:当 $PWM=1$ 时,选取模型 A 的输出作为最终输出;当 $PWM=0$ 时,

选取模型 B 的输出作为最终输出,二者的输出共同构成了悬浮斩波器模型的输出,如图 7 所示。

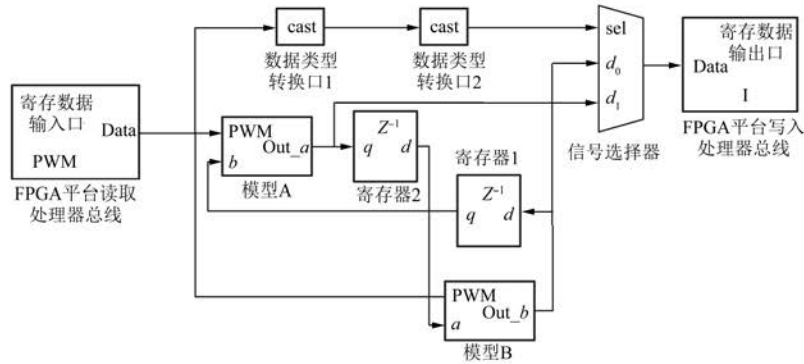


图7 悬浮控制器斩波器仿真模型

为形成 PWM 控制信号,保证电路输出可控,在仿真模型中采用 Bang-Bang 控制算法构成电流环,将输出电流作为反馈值与给定电流相比较,构成完整的闭环控制电路^[13]。同时,将充电电路部

分与悬浮斩波器部分结合,并设置当充电电压 $>0.95 U_d$ 时,开始向悬浮斩波器部分提供电压,共同构成了整个悬浮控制器主电路的实时仿真模型,如图 8 所示。

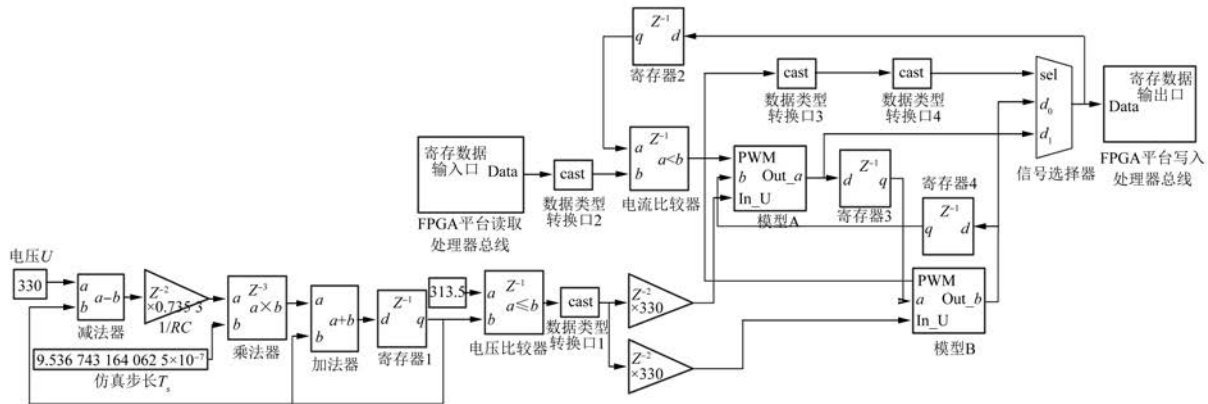


图8 悬浮控制器主电路仿真模型

上述模型运行于 dSPACE 仿真系统硬件平台中,为进一步构成悬浮控制器主电路硬件在回路实时仿真模型,将主电路模型运行于 dSPACE 仿真机 DS5203 板卡中,在悬浮控制器电路板中运行充电回路控制逻辑和电流环,并利用电路板的 PWM 模块生成 PWM 控制波形。考虑到模型的计算精度和控制电路板硬件的资源,模型中的电压、电流等信号均采用标么化处理。处理器板卡 DS1006 负责模型下载和数据监测,并通过 PHS 总线与板卡进行数据交互,悬浮控制器主电路硬件在回路实时仿真模型如图 9 所示。

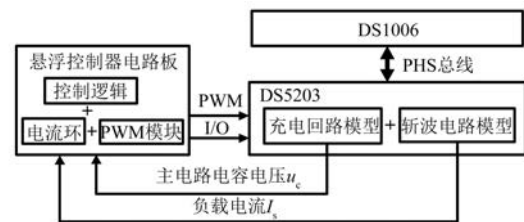


图9 主电路硬件在回路实时仿真模型

4 试验结果及分析

图 10 所示为悬浮控制器主电路硬件在回路的实时仿真系统架构,dSPACE 实时仿真机通过信号

隔离调理箱与悬浮控制器控制单元连接,由 ControlDesk 软件完成仿真结果和数据的监测显示。

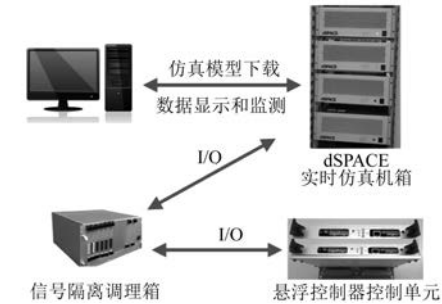


图 10 主电路硬件在回路实时仿真系统架构

实际悬浮控制器中充电电阻 $R_c = 100\ \Omega$, 支撑电容 $C = 13\ 600\ \mu\text{F}$, 电磁铁负载的等效电阻 $R_0 = 1\ \Omega$, 等效电感 $L_0 = 400\ \text{mH}$, 电源电压 $U_d = 330\ \text{V}$ 。根据上述参数搭建悬浮控制器主电路实时仿真模型。设置仿真步长为 $1\ \mu\text{s}$, 编译完成后, 将生成的 .ini 文件导入处理器平台, 编译后在 Controldesk 中进行观测。

在斩波电路仿真模型输入 60% 占空比, 频率为 5 kHz 的 PWM 波进行开环测试, 如图 11(a) 所示, 经过约 1 s 左右时间后, 斩波电路的开环负载电流稳定在 55 A 左右。在实际的悬浮控制器主电路中, 电流传感器量程为 0~100 A, 输出 0~20 mA 电流信号。经信号调理电路后, 输出范围为 0~10 V。因此, 信号调理电路中每 1 V 电压值代表 10 A 的实际电流值, 如图 11(b) 所示。从图 11(a) 和图 11(b) 分析对比可以看出, 两者电流值基本吻合。

同时, 为验证整个斩波电路电流的跟随性, 将

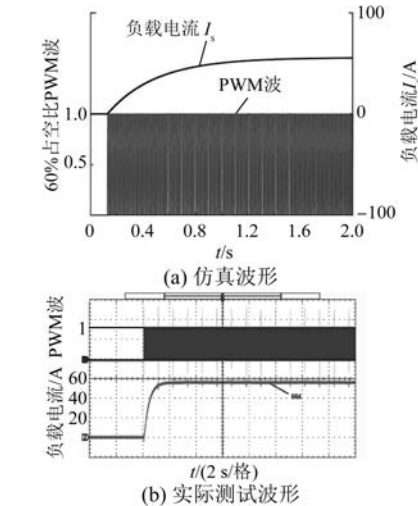


图 11 斩波电路开环负载电流

电流环与斩波电路相结合, 由电流环的反馈电流与给定电流生成 PWM 波, 构成完整的 PWM 闭环控制电路, 电流环采用 Bang-Bang 控制算法。设定给定电流为方波, 频率 5 Hz, 电流范围为 0~30 A, 如图 12(a) 所示, 斩波电路输出的负载电流 I_s 可有效跟随给定电流 I 。负载电流 I_s 仿真值和实测值基本吻合, 如图 12 所示。

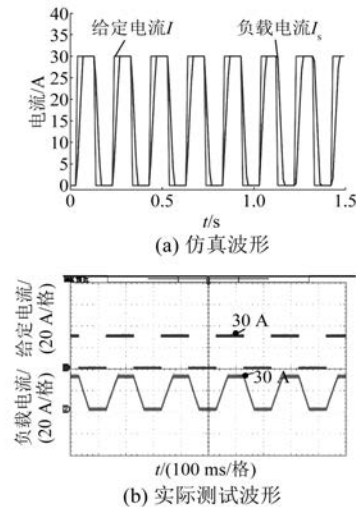


图 12 给定方波电流时的电流仿真与测试波形

设定给定电流为正弦波, 频率 5 Hz, 电流范围为 0~30 A, 如图 13(a) 所示, 斩波电路输出的负载电流 I_s 可有效跟随给定电流 I 。负载电压 I_s 仿真值和实测值基本吻合, 如图 13 所示。

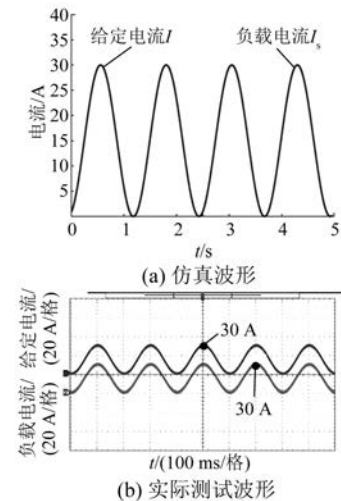


图 13 给定正弦波电流时的电流仿真与测试波形

5 结 语

本文对悬浮控制器主电路进行了分析研究,

通过将悬浮控制器主电路拆分为充电回路和斩波器回路,等效为 RC 、 RL 模型后对微分方程进行求解,建立了数学模型。利用 dSPACE 实时仿真软硬件平台建立了悬浮控制器主电路仿真模型,对充电回路和斩波器电路以及电流跟随情况进行了仿真验证,并与悬浮控制器控制电路构成了硬件在回路的对比分析测试。仿真和测试结果表明,本文建立的悬浮控制器主电路仿真模型与试验测试值基本吻合,电流跟随状态良好,为替代真实的悬浮控制器主电路提供了依据,能够大幅减少悬浮控制器调试开发时间和成本。

【参考文献】

- [1] 盛婕. 悬浮电流特性及悬浮斩波器电流跟随控制策略研究[D]. 成都:西南交通大学,2018.
- [2] 刘战涛. 四象限软开关悬浮斩波器研究[D]. 成都:西南交通大学,2008.
- [3] 张晨昊. 基于半实物仿真的磁悬浮系统实验平台设计与实现[D]. 成都:西南交通大学,2020.
- [4] 宋玉美,刘陈,游小杰,等. HX_D2C 型电力机车辅助变流系统实时仿真研究[J]. 机车电传动,2014(1):21.
- [5] 宋静文,王健安,郭育华,等. 四象限三电平悬浮斩波器研究[J]. 电力电子技术,2012,46(2):72.
- [6] 何昱. 中低速磁浮列车悬浮斩波器优化研究[D]. 成都:西南交通大学,2015.
- [7] 周媛. 三电平悬浮斩波器性能研究[J]. 电气传动,2011,41(12):12.
- [8] 王明义,曹继伟,李立毅,等. 基于三电平斩波器的双电磁铁磁浮系统控制方法[J]. 电机与控制学报,2016,20(11):70.
- [9] 梁达. 单周期电流控制在悬浮系统中的应用[D]. 成都:西南交通大学,2018.
- [10] dSPACE GmbH. PHS bus system hardware reference [M]. Paderborn:dSPACE GmbH,2020.
- [11] GHAFARI A. dSPACE and real-time interface in simulink[J]. San Diego:San Diego State University,2012.
- [12] dSPACE GmbH. Real-Time interface (RTI and RTIM) implementation guide [M]. Paderborn:dSPACE GmbH,2005.
- [13] 李云钢,常文森. 磁浮列车悬浮系统的串级控制[J]. 自动化学报,1999(2):107.
- [16] 韩雪岩,祁坤,张哲,等. 永磁同步直线电机磁阻力分析及抑制措施[J]. 电工技术学报,2015,30(6):70.
- [17] 黄文美,杨帅. 减小永磁直线电动机齿槽力的分析研究[J]. 微特电机,2012,40(9):34.
- [18] FANG L, LI D, SHI C, et al. Design and analysis of fractional pole-pair linear permanent magnet machine [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics,2022,10(2):1766.
- [19] TSENG W T, KUO C N. Reducing cogging force of a permanent magnet transverse flux linear synchronous motor[J]. Applied Mechanics and Materials,2013,479/480:197.
- [20] 陈卫宝,范承志,叶云岳. 低速大力矩圆筒永磁直线电机齿槽力优化[J]. 微电机,2011,44(3):5.

(上接第49页)

【主要栏目】

- | | | |
|--------------|-----------|-------------|
| · 控制与应用技术 | · 研究与设计 | · 故障诊断与保护 |
| · 新能源发电与局域电网 | · 新能源汽车技术 | · 发电机组及其控制 |
| · 测试技术与测控系统 | · 材料与工艺 | · 电机生产及质量管理 |
| · 电力电子变流器技术 | · 智能制造 | · 节能应用 |
| · 实用技术成果 | | |