

基于电力电子变换器的双三相永磁同步电机模拟器

邓 念, 郑 虎

(上海汽车集团股份有限公司技术中心, 上海 201804)

摘 要: 电动助力转向(EPS)系统是汽车的核心部件,采用功率硬件在环仿真测试技术可以缩短系统的开发时间、降低开发成本,同时降低开发风险,已经成为开发流程中非常重要的一环。以 EPS 用相移 30° 的双三相永磁同步电机(PMSM)为研究对象,提出了一种基于电力电子变换器的电机模拟器方案,以实现对不同负载条件下的电机动、静态电气行为模拟,为 EPS 系统的控制算法开发和故障模拟测试提供了高效平台。仿真结果验证了所提方案的有效性和可行性。

关键词: 双三相永磁同步电机; 模拟器; 电力电子变换器

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)10-0092-05

doi: 10.12177/emca.2020.104

Emulator for Dual Three-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Power Electronic Converter

DENG Nian, ZHENG Hu

(Technology Center of Shanghai Automotive Group Co., Ltd., Shanghai 201804, China)

Abstract: The electric power steering (EPS) system is the core component of the car. The use of power hardware-in-the-loop simulation test technology can shorten the system development time, reduce the development cost, and reduce the development risk, so it has become a very important part of the development process. A dual three-phase permanent magnet synchronous motor (PMSM) with a phase shift of 30° is used as the research object, and a motor emulator scheme based on a power electronic converter is proposed to simulate the dynamic and static electrical behaviors of the motor under different load conditions. It provides an efficient platform for the control algorithm development and fault simulation tests of EPS system. Simulation results verify the effectiveness and feasibility of the proposed scheme.

Key words: dual three-phase permanent magnet synchronous motor (PMSM); emulator; power electronic converter

0 引 言

转向系统是汽车的关键部件,电动汽车的智能化和网联化发展提高了对转向安全和可靠性需求,因此电动助力转向(EPS)系统的冗余驱控技术亟待攻关。当前 EPS 主要采用三相变频电机,

经过长期的发展,其技术已日趋成熟。随着电机驱动技术的进步,在一些低压大功率且对可靠性要求较高的场合,多相电机驱动系统带来了更广阔的应用前景。在各类多相电机中,双三相电机由于与传统三相电机具有紧密的联系而得到了更多的关注^[1-6]。

收稿日期: 2020-03-16; 收到修改稿日期: 2020-07-17

作者简介: 邓 念(1982—),男,硕士,研究方向为汽车电子软件开发。

郑 虎(1974—),男,高级工程师,研究方向为电动转向系统及其控制。

在双三相电机冗余驱控技术研究中,硬件在环(HIL)被认为是简化复杂系统原型和测试过程的有效方法。然而,HIL技术只提供了真实硬件与HIL平台之间的信号耦合,因此局限于测试复杂系统的低功耗部分(电子板、传感器和低功耗执行器)。EPS系统是新能源汽车领域的重要系统,其高精度的实时性要求、大电压大电流的安全性、信号接口的特殊属性、以及系统的可扩展性测试是系统开发流程中非常重要的一环,HIL技术无法满足要求。

基于电力电子器件的功率硬件在环(PHIL)进行电机仿真的“电机模拟器”思想,为了解决上述问题提供了技术方案。电机模拟器旨在通过电力电子变换器产生与实际电机相似的电力负载特性,文献[7-11]提出了虚拟感应电机(IM)。文献[12-15]提出了同步发电机(SG)和ZIP负载(电力系统分析中使用的数学负载模型,由恒阻Z、恒流I和恒功率P组件组成)。

本文以相移 30° 双三相永磁同步电机(PMSM)为研究对象,搭建基于电力电子变换器的双三相PMSM模拟器,取代EPS系统的实际电机和负载,实现双三相PMSM的电气行为特性的动态和静态模拟。该研究方案的实现,为双三相PMSM的高可靠性控制算法和驱动器的设计提供验证测试平台。最后,基于MATLAB/Simulink平台进行仿真,仿真结果验证了双三相PMSM模拟器方案的正确性和可行性。

1 双三相PMSM模拟器设计

1.1 电机模拟器设计思路

双三相PMSM模拟器的设计目的在于能够产生与实际电机相同的电压和电流响应,核心在于获取准确的电压和电流指令,从而实现对端口电压和电流的跟踪控制。

实时采集电机模拟器的端口电压,电机模型对得到的端口电压进行计算求解,得到电机在当前电压输入和负载条件下的电机运行状态;电机运行状态中的电流和转速等信息用于系统的控制器设计;电机运行状态中的电流则用于作为参考指令,与采样电路得到的实际电流信息通过电流控制器实现电流的闭环矢量控制。电流控制器的指令通过空间脉宽调制(SVPWM)技术产生

脉宽调制(PWM)信号,电力电子变换器在PWM控制信号下生成的电压和电流与实际电机外特性一致。

此外,为了使电机模拟器与实际模拟的双三相PMSM的响应相同,接口电路中的电阻和电感参数与实际电机参数相同。

1.2 电机模拟器结构

根据设计思路,双三相PMSM模拟器结构如图1所示。

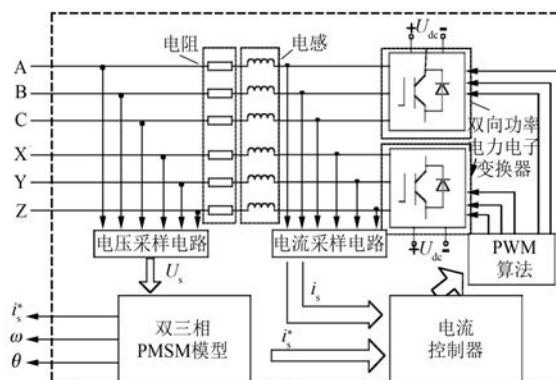


图1 双三相PMSM模拟器结构框图

模拟器硬件部分主要包括2个双向功率电力电子变换器、电阻、电感、直流电源 U_{dc} 和电压、电流采样电路;软件部分包括双三相PMSM模型、电流控制器以及PWM算法。

电压和电流采样用于获取双三相PMSM模拟器的端口电压和电流;双三相PMSM模型用于表征电机的电气和机械行为特性;电流控制器用于实现电机模拟器的控制要求;SVPWM用于产生满足控制要求的脉冲驱动信号;双向功率电力电子变换器采用2个三相电压型两电平变换器,其拓扑结构如图2所示。

因为模拟侧变换器开关频率引起纹波电流的耦合,所以本文选取L型滤波器作为电力电子变换器之间的接口电路。

2 双三相PMSM模型

双三相PMSM模型是决定电机模拟器准确性的关键部分之一,对电机建立数学模型,不以解耦控制为目的,而在于准确表征电机的电气和机械行为特征。本文中双三相PMSM的绕组结构如图3所示。

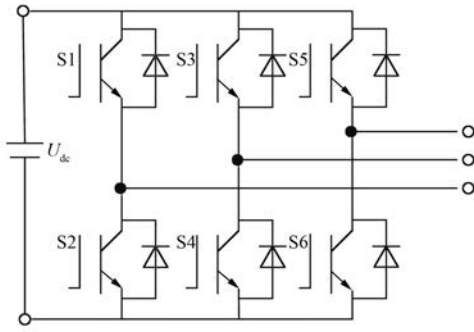


图2 双向功率电力电子变换器拓扑结构

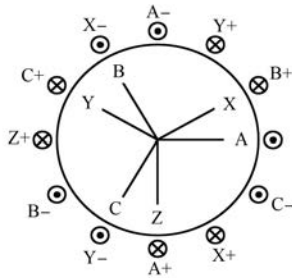


图3 相移30°双三相PMSM绕组结构示意图

电机的定子由2套Y型连接的三相对称绕组组成,ABC为第1套绕组,XYZ为第2套绕组,且2套绕组在空间上相差30°电角度。

双三相PMSM在自然坐标系下的定子相电压和磁链基本方程分别为

$$\mathbf{u}_s = \mathbf{R}_s \mathbf{i}_s + \frac{d\boldsymbol{\psi}_s}{dt} \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\psi}_s = \mathbf{L}_s \mathbf{i}_s + \boldsymbol{\lambda}_s \boldsymbol{\psi}_f \quad (2)$$

式中: $\mathbf{u}_s$ 、 $\mathbf{i}_s$ 为定子相电压和相电流; $\mathbf{R}_s$ 、 $\mathbf{L}_s$ 、 $\boldsymbol{\lambda}_s$ 为电阻系数矩阵、电感系数矩阵和磁链系数矩阵; $\boldsymbol{\psi}_s$ 为定子磁链; $\boldsymbol{\psi}_f$ 为永磁体在每一相绕组中产生的磁链幅值。

从机电能量转换的角度出发,双三相PMSM的电磁转矩等于磁场储能对机械角度的偏导。电

磁转矩可表示为

$$T_e = \frac{1}{2}p \frac{\partial(\mathbf{i}_s^T \cdot \boldsymbol{\lambda}_s)}{\partial \theta_m} \quad (3)$$

式中: T_e 为电磁转矩; p 为电机的极对数; θ_m 为机械角度。

电机的运动方程为

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

式中: J 为转动惯量; ω_m 为机械角速度; T_L 为负载转矩; B 为阻尼因数。

3 电流控制器控制策略

电流控制器是双三相PMSM模拟器的控制核心,需满足系统的快速性和稳定性要求。在两相坐标系下采用电流闭环的控制策略时,因为PI控制调节器参数和算法设计均有成熟的设计方法,且设计及实现简单、动态响应较快,所以采用PI电流控制器。PI调节器结构框图如图4所示。

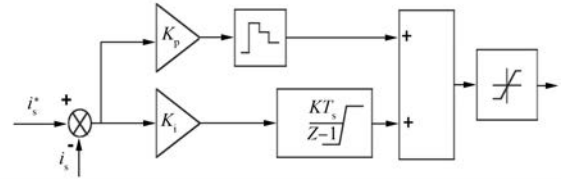


图4 PI调节器结构框图

将通过双三相PMSM模型得到当前工作条件下的电流作为电流控制器指令。指令电流与采样获取的实际电流在旋转坐标系下通过PI调节器实现电流的闭环矢量控制,电机模拟器的端口实际电流跟踪指令电流,满足电机模拟器的电流特性要求。将自然坐标系下的指令电流和采样电流变换为旋转坐标系下的变换矩阵:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_1 & 0 \\ 0 & \mathbf{P}_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{P}_1 = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta_e & \cos\left(\theta_e - \frac{2}{3}\pi\right) & \cos\left(\theta_e + \frac{2}{3}\pi\right) \\ -\sin\theta_e & -\sin\left(\theta_e - \frac{2}{3}\pi\right) & -\sin\left(\theta_e + \frac{2}{3}\pi\right) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{P}_2 = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\left(\theta_e - \frac{\pi}{6}\right) & \cos\left(\theta_e - \frac{5}{6}\pi\right) & \cos\left(\theta_e + \frac{\pi}{6}\right) \\ -\sin\left(\theta_e - \frac{\pi}{6}\right) & -\sin\left(\theta_e - \frac{5}{6}\pi\right) & -\sin\left(\theta_e + \frac{\pi}{6}\right) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中： θ_e 为电角度。

电流控制器的闭环控制策略如图 5 所示。

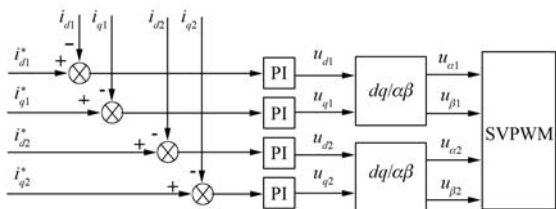


图 5 电流控制器的闭环控制策略

4 电机模拟器性能验证

为了验证双三相 PMSM 模拟器设计方案的正确性和可行性,以一个典型的双三相 PMSM 驱动系统为参照对象,系统框图如图 6 所示。电机参数如表 1 所示。选用 2 个三相两电平电压型逆变器驱动双三相 PMSM,逆变器功率半导体器件的通断脉冲通过 SVPWM 技术产生。电机采用基于双 $d-q$ 变换的矢量控制策略进行控制。

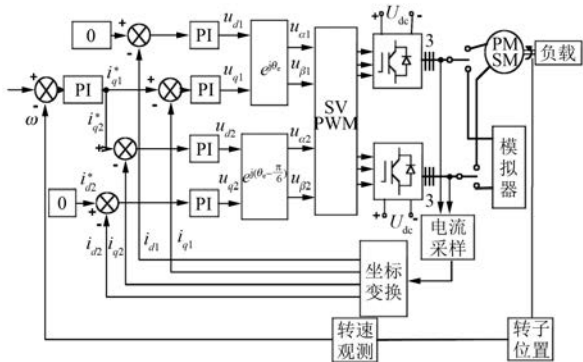


图 6 双三相 PMSM 模拟器驱动系统框图

表 1 双三相 PMSM 参数

参数名称	参数值
母线电压/V	12
极对数	5
转动惯量/($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	0001
额定电流/A	84
额定转矩/($\text{N}\cdot\text{m}$)	4.7

双三相 PMSM 模拟器的设计目标在于:在相同的控制策略、控制参数和负载条件下,电机模拟器产生的端口电压和电流响应与实际双三相 PMSM 相同,且电机模拟器的瞬态响应速度与实

际双三相 PMSM 的响应速度足够接近。

本文通过 MATLAB/Simulink 仿真平台对所提模拟器方案进行验证。选取与表 1 中电机参数相同的双三相 PMSM 作为模拟对象,电机模拟器的控制策略和负载条件与所模拟的电机驱动系统的配置相同。图 7~图 10 所示为电机驱动系统和电机模拟器驱动系统的机械和电气行为特性。

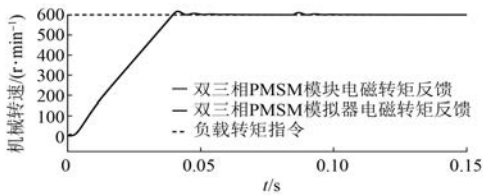


图 7 电机模块/模拟器机械行为特性

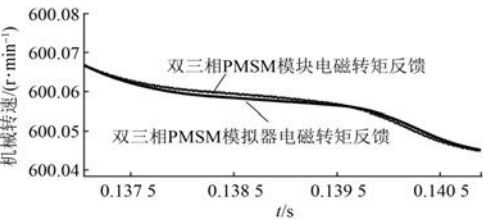


图 8 电机模块/模拟器机械行为特性(放大)

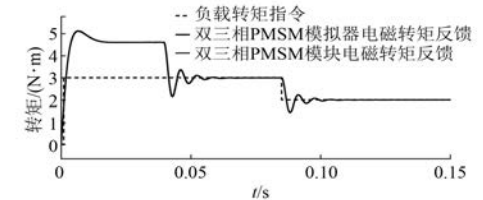


图 9 电机模块/模拟器电气行为特性

从图 7~图 10 可以看出,在相同指令条件下,双三相 PMSM 模拟器和实际电机模块机械速度和电磁转矩波形一致,拥有相同的机械和电气行为特性。

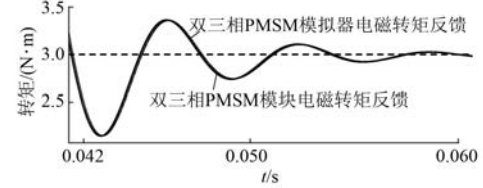


图 10 电机模块/模拟器电气行为特性(放大)

图 11 为双三相 PMSM 模拟器的端口电流响应。图 12 为双三相 PMSM 模块和模拟器的端口线电压(开关周期内作平均)和相电流对比图。

从图 11、图 12 可以看出,无论在起动,还是在负载变化过程中,双三相 PMSM 模拟器与实际电机模块有相同的电压和电流响应。

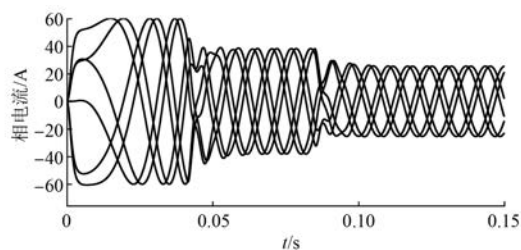


图 11 电机模拟器驱动系统的电流响应

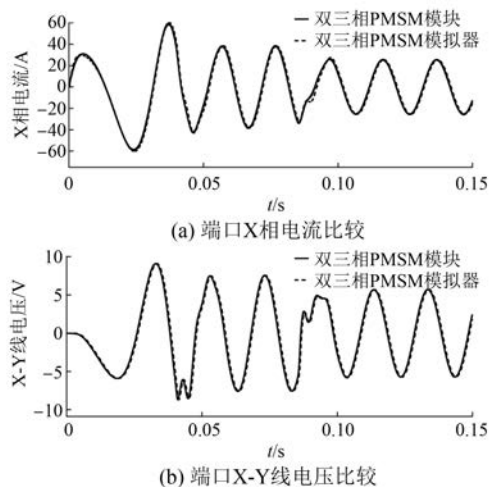


图 12 端口电压和电流比较

仿真结果证明,双三相 PMSM 模拟器可以准确模拟实际电机在不同工况下的端口特性,且动态响应和稳态响应均与实际电机模块一致。

5 结 语

针对应用于 EPS 系统领域的双三相 PMSM 控制算法和驱动器性能测试困难问题,本文提出了一种基于电力电子变换器的双三相 PMSM 模拟器,为高品质转矩控制算法和驱动器开发和验证提供接近真实工况的运行状态,缩短了开发周期,提高了开发效率,同时又避免了开发和验证过程中的能源浪费。通过仿真结果证明在相同的端口电压和负载作用下,双三相 PMSM 模拟器与实际电机拥有相同的电压和电流响应。

【参考文献】

[1] 张虎. 基于永磁同步电机的电动助力转向系统力

矩控制算法研究[D]. 长春:吉林大学,2015.

- [2] 孔武斌. 电动汽车用多相电机驱动系统研究[D]. 杭州:浙江大学,2014.
- [3] 杨金波. 双三相永磁同步电机驱动技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [4] 周长攀. 双三相永磁同步电机驱动及容错控制技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
- [5] 杨金波,杨贵杰,李铁才. 双三相永磁同步电机的建模与矢量控制[J]. 电机与控制学报,2010,14(6): 1.
- [6] 张平. 双三相电机矢量控制及容错控制策略研究[D]. 杭州:浙江大学,2014.
- [7] SLATER H J, ATKINSON D J, JACK A G. Real-time emulation for power equipment development part 2: the virtual machine[J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications,1998(2): 153.
- [8] BOLLER T, KENNEL R M. Virtual machine a hardware in the loop test for drive inverters [C] // 2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications,2009.
- [9] KENNEL R M, BOLLER T, HOLTZ J. Replacement of electrical (load) drives by a hardware-in-the-loop system [C] // International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics and Electromotion, Joint Conference,2011.
- [10] 黄清军. 模拟电机特性的电力电子负载研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.
- [11] 黄清军,孙牧村,邹旭东,等. 模拟电机端口特性的电力电子负载系统设计[J]. 电力系统自动化,2014,38(3): 71.
- [12] YANG L, WANG J, MA Y, et al. Three-phase power converter-based real-time synchronous generator emulation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2017,32(2): 1651.
- [13] WANG J, MA Y, YANG L, et al. Power converter-based three-phase induction motor load emulator[C] // Proceeding of IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC),2013.
- [14] KAARTHIK R S, PILLAY P. Emulation of a permanent magnet synchronous generator in real-time using power hardware-in-the-loop [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification,2018,4(2):474.
- [15] WANG J, YANG L, MA Y, et al. Static and dynamic power system load emulation in converter-based reconfigurable power grid emulator[C] //2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE),2014.