

用于开发车辆 MCU 的变参数电机 硬件在环测试方法

李 金, 吴帅军, 石林龙
(上海科梁信息工程股份有限公司, 上海 200233)

摘 要: 分析了电机驱动控制器硬件在环(HIL)仿真技术的关键点, 基于 NI 平台和 OPAL-RT 电机和电力电子仿真工具包建立了完整的用于开发、测试和验证车辆微控制单元(MCU)的 HIL 仿真测试系统, 功能涵盖试验配置和管理、模型自定义、非线性特征定义和在线调参等。详细介绍了试验中各部分模型的建立方法。结合电机标定测试工况, 分别基于电机定参数模型和变参数模型进行仿真测试。测试结果表明, 变参数电机模型的试验结果与真实台架的测试结果近似, 误差小于 15%。通过软件故障注入功能, 方便地实现了功率管失效、桥臂直通和相间短路等电气故障注入测试。

关键词: 电机驱动控制器; 硬件在环; 实时仿真; MCU; 电气故障注入

中图分类号: TM 306 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2020)07-0079-08

doi: 10.12177/emca.2020.063

HIL Test Method Based on Variable Parameter Motor Model for Developing Automotive MCU

LI Jin, WU Shuaijun, SHI Linlong

(Shanghai Keliang Information Tech.& Eng.Co., Ltd., Shanghai 200233, China)

Abstract: The key points of hardware-in-the-loop (HIL) simulation technology of the motor drive controllers are analyzed. Based on NI platform and OPAL-RT software package for motor and power electronic simulation, a well-structured HIL simulation test system for developing, testing and verifying automotive micro controller unit (MCU) is established, providing complete functionalities including test management and configuration, customizing models, adding nonlinear features, online tuning and so forth. Detailed configuration methods of models of all parts are introduced respectively. On the basis of the motor calibration test, simulation tests with motor models of constant parameters and variable parameters are performed respectively. The test results of the variable parameter motor model are similar to those of the real bench test, with a relative error of less than 15%. Benefiting from software-implemented fault injection, the fault injection tests of IGBT fault, shoot-through of bridge arm and interphase short circuit are conveniently realized.

Key words: motor drive controller; hardware-in-the-loop (HIL); real-time simulation; micro controller unit (MCU); electrical fault injection

0 引 言

汽车电气化在近几十年获得了突飞猛进的发

展,同时产品及设计复杂性也在日趋增加,尤其是嵌入式软硬件的开发复杂程度呈爆发式的增长,传统的电气控制单元测试方法已无法满足电动汽

收稿日期: 2020-04-14; 收到修改稿日期: 2020-05-22

作者简介: 李 金(1989—),男,硕士,工程师,研究方向为电机驱动控制硬件在环仿真技术。

吴帅军(1987—),男,硕士,工程师,研究方向为电动车辆半实物仿真测试系统。

石林龙(1981—),男,硕士,工程师,研究方向为大规模电力系统功率硬件在环测试技术。

车的所有测试要求。硬件在环(HIL)仿真测试,是以实时处理器运行仿真模型来模拟受控对象的运行状态,通过 I/O 接口与被测控制系统连接,对被测控制系统进行全方面和系统的测试。不同于实物测试,HIL 仿真测试具备可配置软硬件,灵活且可扩展,可高效地进行各种复杂测试,由于是信号等级测试,不会有任何测试风险,在保障安全的同时可降低开发和测试成本^[1]。

高保真度的模型是电机驱动控制器 HIL 仿真测试的关键^[2]。电机驱动控制器的微控制单元(MCU)区别于一般控制器的特殊之处是通过高频脉宽调制(PWM)脉波控制驱动电路,开关频率通常在 10 kHz 以上,HIL 仿真测试系统需对高频电力电子电路模型进行高速解算,实时仿真步长要求至少达微秒级^[3-4],才能精确地模拟驱动电路的动态,从而更准确地测试和验证 MCU 的性能。

通过现场可编程逻辑门阵列(FPGA)并行运算技术,可以满足高速实时仿真的需求。在使用同等规格 FPGA 芯片的情况下,关键技术是对模型的求解方法。FPGA 的建模亦有技术门槛,需具备一定的 VHDL 知识和 FPGA 建模技能,对于习惯使用高级语言进行开发的人员来说难度很大^[4-6]。目前主流的图形化 FPGA 建模工具有 Xilinx[®]开发的 Xilinx System Generator(XSG)和 MATLAB[®]开发的 HDL Coder,均是基于一定的模型库、定义规则和特定的工作流程进行开发,但是由于仍然具有需要进行长时间的离线仿真、冗长的模型测试周期以及定点数运算带来的精度问题等缺点,使得开发定制化 FPGA 模型依然很困难^[7-8]。文献[9]提出了一种无需进行 FPGA 建模的用于开发 MCU 的 HIL 解决方案,但是由于不开源,且仅支持固定的两电平逆变电路架构,应用范围相对局限。

OPAL-RT 基于 XSG 开发的 eHS (Electric Hardware Solver)高性能浮点数求解器^[10-11],实现了业界最快的电力电子电路实时求解速度,最小仿真步长为 110 ns(Boost 电路)。通过 eHS,使用者无需进行 FPGA 建模,可自动生成 FPGA 代码,同时可使用常用的建模工具自定义电力电子电路拓扑,并且可以在无需重新生成 FPGA 代码的情况下在线修改电路拓扑。

车辆应用对设计安全性要求很高,HIL 仿真架构中的电机模型必须具备足够高的精度,电机

的非线性特性如转子不对称、反电势谐波、磁饱和、功率管死区影响等需考虑在内。将实测获得的电感-电流数据表或基于电机有限元分析(FEA)模型生成的等效电路(ECE)模型数据表导入至 HIL 平台中,可实现更准确的仿真测试^[12]。

1 MCU-HIL 仿真测试系统

基于 NI 和 OPAL-RT 的技术解决方案构建了用于开发、测试和验证车辆 MCU 的 HIL 仿真测试系统,MCU 及 MCU-HIL 系统包含在整车仿真系统的架构中,本文仅讨论 MCU 部分。本文讨论的车辆系统中,电机类型为内置式永磁同步电机(PMSM),逆变电路采用传统三相两电平架构,通过电压型霍尔传感器采集电流,使用旋转变压器计算电机转速和角位置。MCU 选择某厂家通用型电机控制板,具备转速控制和转矩控制 2 种控制模式。HIL 仿真测试系统通过仿真模拟电机、逆变器和传感器等的物理动态行为,通过 I/O 接口与被测 MCU 相连,构成闭环测试系统。

1.1 系统架构

MCU-HIL 仿真测试系统基于 NI 的软、硬件和电机和电力电子仿真工具包(OPAL-RT Power Electronic Add-on for VeriStand)进行搭建,主要由上位机、NI 软件和仿真工具包、NI PXI 下位机、NI SLSC 和被测 MCU 组成,如图 1 所示。

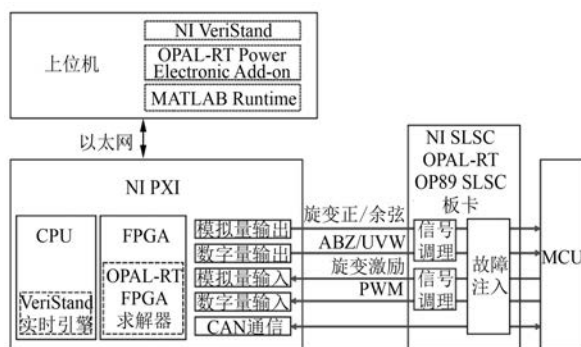


图 1 MCU-HIL 仿真测试系统架构

上位机运行 NI VeriStand 软件,VeriStand 用于实时测试试验管理、模型下载、数据监测和故障注入。OPAL-RT Power Electronic Add-on 工具包集成于 VeriStand 中,包含有电机、电力电子电路、传感器和编码器等模型和 FPGA 实时求解器,模型的建立通过直观的参数配置和模型导入的方式完成。

NI PXI 下位机机箱内嵌有高性能多核 CPU 控制器、FPGA 板卡、数字量 I/O 板卡、模拟量 I/O 板卡及 CAN 通信板卡等;NI SLSC 主要用于信号调理和硬线故障注入,内部集成了 OPAL-RT 开发的 OP89 系列 SLSC 板卡;HIL 仿真测试系统最终通过终端信号连接模块与 MCU 连接。电机和电力电子电路等模型运行在 FPGA 板卡上,动态较慢的负载模型和电池模型运行在 CPU 上,CPU 和 FPGA 之间通过 PXIe 进行交互,结合 FPGA 和多核 CPU 联合仿真技术的 HIL 仿真测试平台,满足了不同动态系统对仿真步长的不同需求。

系统的工作原理是:上位机通过 CAN 通信控制 MCU 和电池管理系统(BMS),通过 BMS 给 MCU 上高压电和低压电,起动 MCU,选择控制模式、输出控制指令,MCU 发出 PWM 控制信号和旋变激励信号至 HIL 仿真测试平台的高速数字量和模拟量输入接口,经模型解算之后,测试平台通过与 FPGA 板卡直接相连的模拟量输出通道输出电机三相电流、直流母线电压和旋变正、余弦信号至 MCU。数字量输入采样率为 10 MS/s,模拟量输出更新率为 1 MS/s,内部模型解算步长小于 $1\ \mu\text{s}$,HIL 测试平台从接收到 MCU 发出的 PWM 信号到输出反馈信号的总延时为微秒级。

1.2 HIL 模型配置

OPAL-RT Power Electronic Add-on 工具包基于 OPAL-RT 的高精度 FPGA 模型和高性能浮点数 FPGA 求解器,经过 VeriStand 集成形成了一种直观、高效的工作流程以及可配置的、灵活的测试架构。

1.2.1 逆变电路模型

OPAL-RT Power Electronic Add-on 工具包中包含 2 个 FPGA 求解器,一个是用来解算高频电力电子电路的求解器 eHS,另一个是解算电机模型的求解器,2 个求解器相互独立。

eHS 的工作流程是:基于常用的建模软件如 PLECS、PSIM、MATLAB/Simulink 和 NI Multisim 等建立电力电子电路拓扑,称之为 netlist,将其导入 eHS,eHS 基于 netlist 进行矩阵和数据解算,然后在 .m 文件中转换电路方程,生成与所用 FPGA 兼容的数据格式,最后将电路参数和拓扑下载至 FPGA 芯片。通过这种在 .m 文件中编写脚本的建模方式,eHS 使 FPGA 建模速度比一般的 XSG 建模方式提升了至少 100 倍^[10]。

eHS 通过 FAMN (Fixed Admittance Matrix Nodal)^[13] 方法对电力电子开关电路进行求解。FAMN 的技术关键点是,当开关导通时,将其等效为电感,当其断开时,将其等效为电容。再通过隐式欧拉法进行离散化,使得无论开关导通与否,整个电路的导纳矩阵结构将保持不变。通过该等效方法,仿真开关数量和电路规模均能得到极大程度的提升。

由于电力电子电路模型和电机模型是使用 2 个不同的求解器进行求解,2 个模型中均需加入相关的耦合变量,为了解决使用 2 个不同求解器、因计算延时可能带来不稳定的问题,模型中设置有缓冲电路。图 2 为在 MATLAB/Simulink 环境中构建的逆变电路拓扑。模型中,U02_Ia 和 U03_

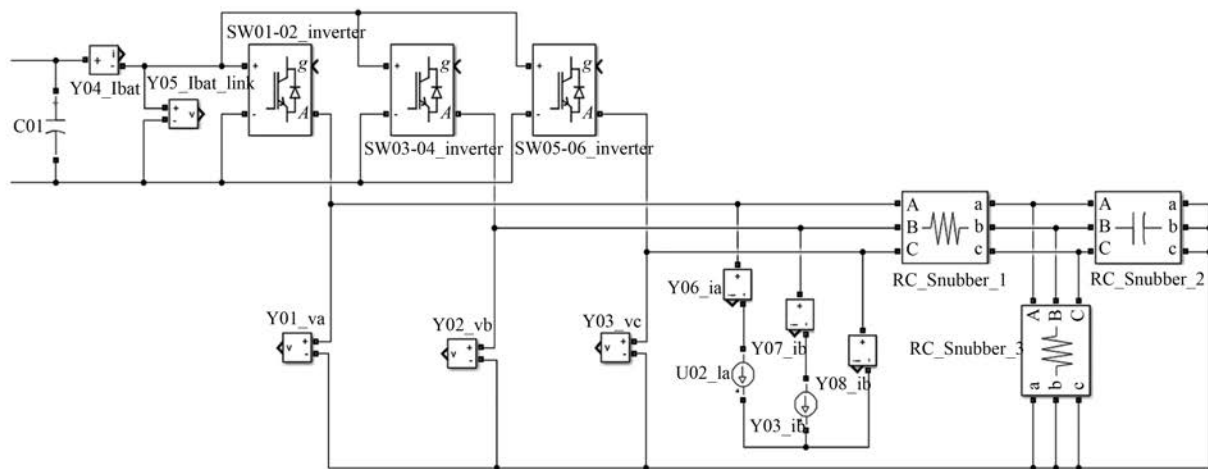


图 2 在 MATLAB/Simulink 环境中构建逆变电路拓扑

I_b 即电机两相电流, 为由电机侧输入的变量; Y01~Y03 即三相输入电压, 为逆变电路输出至电机的变量, RC_Snubber 为缓冲电路。

1.2.2 电机模型

OPAL-RT Power Electronic Add-on 工具包中的电机模型为参数化模型, 提供了 3 种电机参数配置方法, 包括定 dq 模型、变 dq 模型和 FEA 模型。本文仅讨论前 2 种。电机 dq 模型基于 PMSM 电压和电磁转矩方程进行建立, 采用等功率 Clarke 和 Park 变换:

$$I_{abc} = [L_{abc}(\theta)]^{-1} \left\{ \int (U_{abc} - R_s I_{abc}) dt - \psi_{abc} \right\} \quad (1)$$

$$T_e = p[\psi_r i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (2)$$

式中: U_{abc} 、 I_{abc} 、 ψ_{abc} 分别为定子三相电压、三相电流、磁链; $L_{abc}(\theta)$ 为电机定子三相绕组电感矩阵; R_s 为定子每相电阻; p 为转子极对数; ψ_r 为永磁体磁链; i_d 、 i_q 分别为等效两相旋转坐标系下的 d 、 q 轴电流; L_d 、 L_q 为 d 、 q 轴电感。

在定参数模型中, L_d 、 L_q 和 ψ_r 均为常量, 模型未考虑电机磁饱和和非线性特征, 只能满足一般的测试需求。变参数模型基于根据电机的实测数据或其他模型分析数据建立的 L_d 、 L_q 和 ψ_r 的两维变化表(以 i_d 和 i_q 为坐标), 通过查表的方式获取不同工作点下的 d 、 q 轴电感和磁链并进行实时更新, 这种模型在稳态上是精确的, 在各个工作点处, 模型将磁饱和因素考虑在内, 可以产生足够精确的转矩。

工具包支持电机变参数表格的最大维度为 128×128, 因受 FPGA 兼容性限制, 工作点的数据也需以“0”为中心对称分布, 对获取到只有一半象限的数据则需预先进行相应的处理。

除了以上提及的电机参数, 模型中还可进行配置参数有转子的初始角度、转动惯量、静态摩擦力和黏性阻尼系数。电机参数的完整性和准确性将直接影响到 HIL 仿真测试能否进行, 以及其仿真精度。

1.2.3 编码器模型

工具包中的编码器模型均为参数化模型, 包含旋转变压器、增量型 ABZ 编码器和霍尔型 UVW 编码器, 车辆应用通常采用旋转变压器。工具包中旋变输出的正余弦信号通过式(3)、式(4)

可计算得出:

$$V_{\sin} = V_{\text{exc}}(\sin\theta \cdot G_1 + \cos\theta \cdot G_2) \quad (3)$$

$$V_{\cos} = V_{\text{exc}}(\sin\theta \cdot G_3 + \cos\theta \cdot G_4) \quad (4)$$

式中: $V_{\sin}$ 、 $V_{\cos}$ 分别为正、余弦信号; V_{exc} 为激励信号; θ 为转子角度; $G_1 \sim G_4$ 分别为正弦信号的 $\sin\theta$ 和 $\cos\theta$ 分量以及余弦信号的 $\sin\theta$ 和 $\cos\theta$ 分量的比例衰减值。

工具包支持设置旋变的极对数、输出速度反向和安装偏移角, 还可对激励信号进行处理, 如设置激励时延和修改激励采样频率。

1.2.4 I/O 模型

I/O 模型包含数字量输入模型、模拟量输入模型和模拟量输出模型。数字量输入主要是 PWM 输入接口的定义, 可选择高电平有效或低电平有效 2 种开关动作方式, 并设置开关器件导电导值。模拟量输入主要是旋变激励信号的定义, 需结合实际旋变的规格和平台输入的限制对输入信号的比例值、偏移量和极限值进行设定。

通过模拟量输出可输出旋变的正、余弦信号及所需的电机参数变量, 如直流母线电压、输入有功功率和无功功率、电机三相电流、 i_d 、 i_q 和反电动势等。对电机三相电流, 通过对相应模拟量输出通道的比例值和偏移量进行设定, 可以模拟电压型霍尔电流传感器的特性。若采用的是电流型霍尔传感器, 则需结合 MCU 的电路设计确定采样点和输出比例值。为了避免模拟量输出幅值过大造成 MCU 硬件损坏, 须结合 MCU 硬件 AD 接口的耐压量, 对每一路模拟量输出通道设置输出限幅值。此外, 模拟量输出配置中的参数均可在线修改, 据此可模拟传感器断线和零漂故障。

2 车辆 MCU 的 HIL 仿真测试

在进行 HIL 测试之前, 根据系统各部件的数据规格书或者通过实测的方式获取系统配置所需的参数。表 1 所示为本文进行 MCU-HIL 测试所基于的电机参数和其他主要参数。表 1 中, d 、 q 轴电感为平均值, 用于电机定 dq 模型的 HIL 测试。在真实的台架上测试不同工作点下(i_d 和 i_q 变化范围为 10~400 A, 测量间隔为 10 A)的 d 、 q 轴电感值, 建立数据表并导入测试工程, 以进行电机变 dq 模型的 HIL 测试。

表 1 MCU-HIL 仿真测试系统主要参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
定子电阻/ Ω	0.014	额定功率/kW	80
d 轴电感/mH	0.3	额定电流/A	228
q 轴电感/mH	0.8	传感器比例系数/ $(V \cdot A^{-1})$	0.001 83
磁体磁链/Wb	0.098 58	传感器偏移量/V	1.5
转动惯量/ $(kg \cdot m^2)$	0.9	旋变激励幅值/V	5
阻尼系数	0.02	旋变极对数	8
极对数	8	旋变初始角度/ $(^\circ)$	60
额定转速/ $(r \cdot min^{-1})$	1 250	母线电压/V	537
额定转矩/ $(N \cdot m)$	610	母线电容/ μF	800

在真实的台架上对电机进行标定测试,采用转矩控制模式,在 261~2 600 r/min 转速范围内取若干转速值进行加载,变化转矩给定,范围在 18%~189% (相对于额定转矩) 之间,以测量电机响应。电机标定测试的结果将作为 HIL 仿真测试结果准确度的判定依据。HIL 仿真测试的试验条件与台架测试保持一致,最终对比测试结果,进行误差分析。

图 3 所示为 HIL 仿真系统测试流程图。根据图 3,准备硬件和软件,完成模型配置和系统配置,根据端口定义连接 MCU 和 HIL 设备的 I/O,完成上位机和 MCU 的通信设定,开始进行 MCU 的 HIL 仿真测试。在 VeriStand 中部署工程成功后,首先对 NI 的 2 种交互界面 UI Manager 和 Workspace 进行预配置,包括 MCU 与其他车辆控制器之间进行联动操作的相关入口设定、MCU 的控制指令以及 MCU-HIL 的观测变量设置,可观测变量有电机转速、电磁转矩、 i_d 、 i_q 、三相电流、直流母线电压、电机位置等。

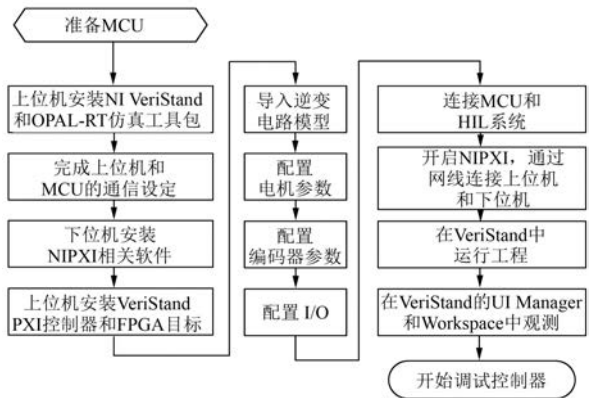


图 3 MCU-HIL 仿真测试流程

在 HIL 仿真测试平台上复现电机标定测试工

况,分别采用电机定 dq 模型和变 dq 模型进行测试,下文给出电机工作在电动模式下,3 种恒转速 (1 040 r/min、261 r/min、2 600 r/min) 负载下转矩控制的测试结果。注意,在真实的台架上测试时转速有 5 r/min 以内的抖动,在进行 HIL 测试时忽略此转速变化,取恒定转速。设定转速为 1 040 r/min,转矩给定由 18.7% 逐渐增至 188.8%,转矩给定值待系统稳定后变更,变化的时间点不作固定。图 4 和图 5 分别为电机定 dq 模型和变 dq 模型下的电机的电磁转矩响应波形。波形采样频率设定为 10 kHz,即每 100 ms 采样一次数据。

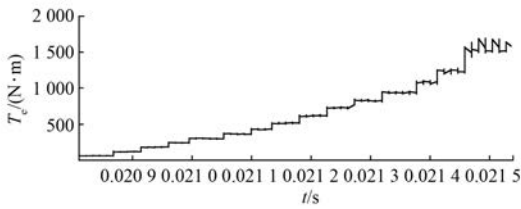


图 4 电机定 dq 模型 HIL 仿真测试电磁转矩波形

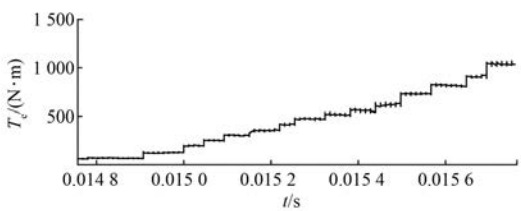


图 5 电机变 dq 模型 HIL 仿真测试电磁转矩波形

经测试可知,在 2 种模型配置下,电机的电磁转矩均跟随给定转矩指令的变化而变化,没有出现异常响应情况。当转矩给定增大至一定值 (约 100%) 后,定 dq 模型的电磁转矩输出比变 dq 模型的输出更大,并且转矩脉动呈增大趋势。

对每一个转矩给定下的电磁转矩取平均值,将 HIL 仿真测试结果与电机标定测试结果绘制于同一张图中,如图 6 所示。

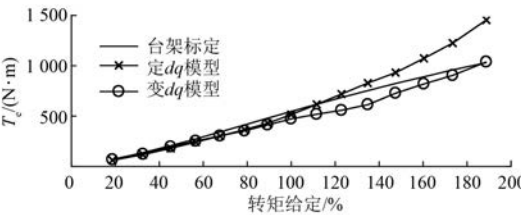


图 6 转矩模式、转速 1 040 r/min 的电机标定结果与 HIL 仿真测试结果对比

分析图 6 可知,与标定测试结果相比,定 dq 模型的 HIL 仿真测试结果的整体误差较大,仅在转矩给定约 110% 时误差较小,原因是定 dq 模型的 L_q 取固定值,即 0.8 mH,根据变参数数据表,在 i_q 为 160~180 A, i_d 为 180~240 A 的区间内,即给定转矩约为 110% 时, L_q 值在 0.8 mH 附近变化,与定参数模型设定的 L_q 值对应,在其他测试区间,由于实际的 L_q 值在发生变化,导致定参数模型的测试误差较大。

与电机标定测试结果相比,变 dq 模型的 HIL 仿真测试结果在整个测试区间内的整体误差在 15% 以内。在最大转矩给定下,定 dq 模型的电磁转矩误差超过 40%,不能准确反映电机动态,而变 dq 模型的误差仅为 0.7%。真实情况下,变 dq 模型将 L_q 随电流的增大而逐渐减小的特性考虑在内,因此仿真精度更高。

转速为 261 r/min 和 2 600 r/min 下的 HIL 仿真测试结果与电机标定测试结果,如图 7、图 8 所示。可以得出,与电机标定测试结果相比,电机变 dq 模型的 HIL 仿真测试结果的精度高于 85%。

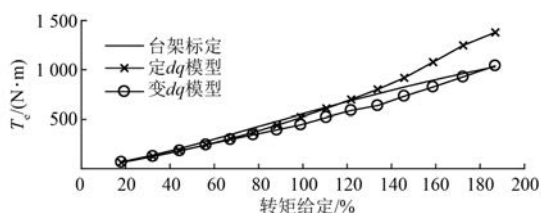


图 7 转矩模式、转速为 261 r/min 的 HIL 仿真测试结果与电机标定测试结果对比

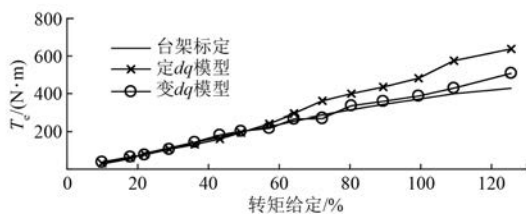


图 8 转矩模式、转速为 2 600 r/min 的 HIL 仿真测试结果与电机标定测试结果对比

HIL 仿真测试误差不可避免的原因是, HIL 仿真是系统级仿真,由于是实时仿真,仿真速度要求高,硬件资源和性能有限,技术受限,无法将器件特性也考虑在内,故不可能将偏差降低至零。然而,对于控制器的定性分析来说,至少 80% 以

上的仿真精度已经可以满足开发与测试需求。

3 故障注入测试

通过 OPAL-RT Power Electronic Add-on 工具包中的 Scenario 功能,可在线修改逆变电路中的所有被动元件的参数,不仅可实现在线调参,如修改直流母线电容和泄放电阻等参数,更可实现多种类型的软件故障注入。通过 Scenario 可自动生成一个包含逆变电路拓扑中所有被动元件参数的表格,通过修改表格中元件的参数建立不同的测试场景。在 HIL 工程运行过程中,通过修改 Scenario 变量值对不同测试场景进行切换。

在逆变电路中加入用于模拟电气故障的被动元件,如图 9 所示。为了模拟三相逆变电路单个功率管开路和短路故障,在每个半桥臂均加入了控制开路的电阻 openSW 和控制短路的电阻 shortSW, openSW 电阻的默认值为 1 $\mu\Omega$,模拟开路时将其阻值设置为 10 000 Ω , shortSW 的默认值为 10 000 Ω ,模拟短路时将其阻值设置为 1 $\mu\Omega$ 。用同样的方法亦可加入模拟相间短路、单相对地短路、直流母线短路、单相断线等故障的控制电阻。

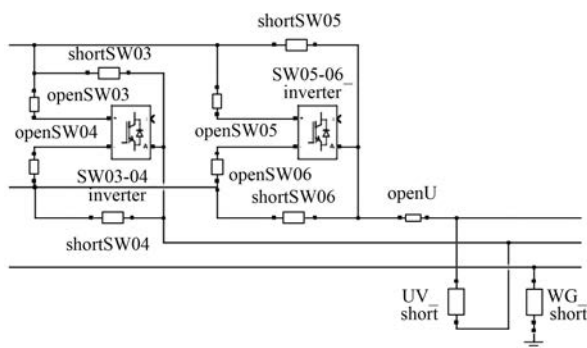


图 9 在电路中加入用于故障模拟的被动元件

运行 HIL 仿真测试,给电机施加 261 r/min 恒转速负载,施加给定转矩至额定,待系统运行稳定,切换 Scenario 至 W 相对地短路故障,电机三相电流发生畸变并过流,一段时间后 MCU 报出过流故障并停机。图 10 所示为该故障发生前后的电机三相电流和电磁转矩变化波形。

切换 Scenario 至 U 相欠相故障,立即可见电机三相电流出现畸变、电磁转矩出现剧烈振荡,如图 11 所示。切换 Scenario 至 U 相上桥臂开关开

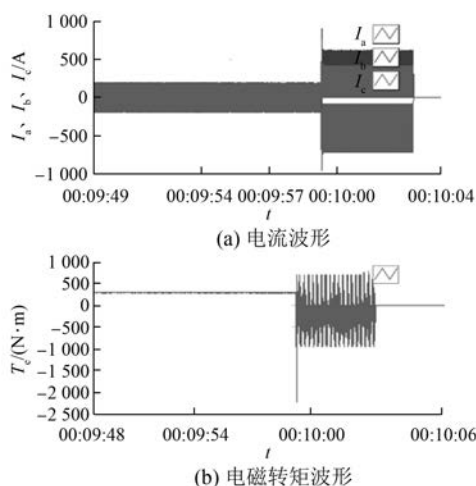


图 10 模拟 W 相对地短路故障前后的电机三相电流和电磁转矩变化波形

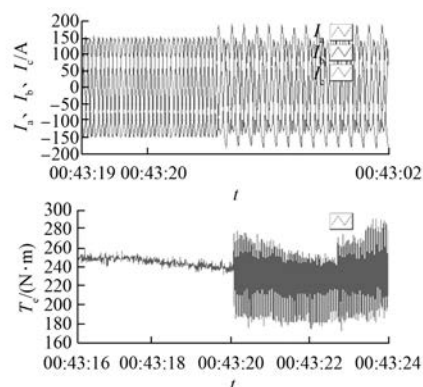


图 11 模拟 U 相欠相故障前后的电机三相电流和电磁转矩变化波形

路故障,可观测到随即出现过流现象并瞬间导致 MCU 停机,故障发生前后的电流和电磁转矩变化波形如图 12 所示。

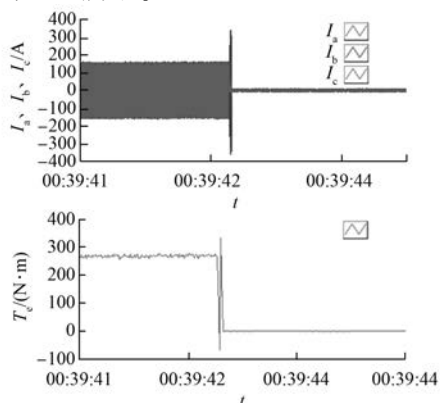


图 12 模拟 U 相上桥臂开关开路故障前后的电流和电磁转矩变化波形

因为被测 MCU 为性能成熟的电机控制器,所以在故障模拟测试中其保护功能均能有效作用。对仍在开发初期的电机控制器,进行故障注入测试则尤其必要。通过提高波形采样率或者在外围电路上进行采样、经示波器观测波形的细节,可真实地观测到故障发生瞬间的过流值和电压的振荡范围等,可作为调整控制算法和进行功率器件选型的依据。

4 结 语

(1) 使用基于 NI 平台和 OPAL-RT 电机和电力电子仿真工具包实现的用于开发车辆 MCU 的解决方案可以在免于进行 FPGA 模型开发的前提下,利用参数化模型配置和既有模型直接导入的方式,高效地完成 HIL 环测试的试验配置。

(2) 基于系统部件的真实物理参数以及电机标定测试工况进行 HIL 仿真测试,测试结果表明,电机变 dq 模型的仿真精度较高,与电机标定测试结果相比,误差小于 15%。

(3) 利用工具包提供的软件故障注入功能,可在试验运行过程中方便地注入各类电气故障,以此进行 MCU 保护功能的测试和验证。

【参考文献】

- [1] POPOVICI K, MOSTERMAN P J. Real-Time Simulation Technologies: Principles, Methodologies, and Applications[M]. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [2] VENUGOPAL R. Hardware-in-the-loop (HIL) for electric drive applications [N/OL]. IEEE Transportation Electrification Community Newsletter, 2013. <https://tec.ieee.org/newsletter/september-2013/hardware-in-the-loop-hil-for-electric-drive-applications>.
- [3] BÉLANGER J, VENNE P, PAQUIN J N. The what, where and why of real-time simulation [J]. Planet RT, 2010, 1: 37.
- [4] DUFOUR C, ABOURIDA S, BELANGER J. Hardware-in-the-loop simulation of power drives with RT-LAB [C] // 2005 International Conference on Power Electronics and Drives Systems, 2005.
- [5] MEKA R, SLODERBECK M, FARUQUE M O, et al. FPGA model of a high-frequency power electronic converter in an RTDS power system co-simulation [C] // 2013 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), 2013.

- [6] VEKIĆ M S, GRABIĆ S U, MAJSTORVIĆ D P, et al. Ultralow latency HIL platform for rapid development of complex power electronics systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(11): 4436.
- [7] DELAVARI A, BRUNELLE P, KAMWA I. Real-time closed-loop PQ control of NPC multi-level converter using OPAL-RT and speedgoat simulators [C]//2018 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 2018.
- [8] ABOURIDA S, CENSE S, DUFOUR C, et al. Hardware-in-the-loop simulation of electric systems and power electronics on FPGA using physical modeling [C]//4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2013.
- [9] WANG M S, HSIEH M F, LIN H Y. Operational improvement of interior permanent magnet synchronous motor using fuzzy field-weakening control [J]. Electronics, 2018, 7: 452.
- [10] DUFOUR C, CENSE S, OULD-BACHIR T, et al. General-purpose reconfigurable low-latency electric circuit and drive solver on FPGA [C]//IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2012: 3073.
- [11] OULD-BACHIR T, MERDASSI A, CENSE S, et al. FPGA-based real-time simulation of a PSIM model: an indirect matrix converter case study [C]//IECON 2015-41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2015: 3336.
- [12] DUFOUR C, BLANCHETTE H, BELANGER J. Very-high speed control of an FPGA-based finite-element-analysis permanent magnet synchronous virtual motor drive system [C]//2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 2008.
- [13] OULD-BACHIR T, DUFOUR C, BELANGER J, et al. A fully automated reconfigurable calculation engine dedicated to the real-time simulation of high switching frequency power electronic circuits [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2013, 91: 167.

(上接第 61 页)

【参考文献】

- [1] 齐军, 王小海, 侯佑华, 等. 适用于蒙西电网的大规模储能技术分析 [J]. 内蒙古电力技术, 2019, 37(4): 1.
- [2] 李博. 矿用锂离子电池组均衡管理系统研究 [J]. 自动化与仪器仪表, 2014(7): 20.
- [3] 辛喆, 葛元月, 薄伟, 等. 基于单片机的纯电动汽车电池管理系统设计 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(12): 163.
- [4] 杨洁, 廖俊杰, 谷肖飞, 等. 基于 STM32F407 + BQ76PL536 的电池管理系统设计 [J]. 电源技术, 2018, 42(11): 1640.
- [5] 窦汝振, 翟世欢, 赵钢. 动力电池组电压采集及均衡控制策略研究 [J]. 电测与仪表, 2015, 52(2): 90.
- [6] 王越, 杨玉新, 李立伟. 基于 LTC6804 的电池监测单元设计 [J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2019, 34(1): 70.
- [7] 王晓辉, 徐自强, 林金明, 等. 动力电池 PACK 状态监测系统设计与实现 [J]. 电源技术, 2019, 43(6): 1039.
- [8] 陈康. 一种利用 SOC 数据实现主动均衡的锂电池管理系统 [D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [9] 李宏英. 三维电阻抗成像系统设计 [D]. 天津: 天津科技大学, 2014.
- [10] 何军. 动力锂电池组管理系统 SOC 估算研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [11] 安昌祖, 张蕊萍, 张小周, 等. 基于模糊无迹卡尔曼滤波算法的锂电池 SOC 估计 [J]. 电源技术, 2020, 44(3): 333.
- [12] 王润, 朱振兴. 电池管理系统荷电状态估算策略的设计 [J]. 农业装备与车辆工程, 2020, 58(3): 118.
- [13] 庞瀛洲. 关于电池 BMS 系统 SOC 估测算法的研究 [D]. 西安: 长安大学, 2015.
- [14] 王通, 于洁, 马文会, 等. 电池管理系统 SOC 估算方法研究进展 [J]. 电源技术, 2018, 42(2): 312.
- [15] 罗辑, 孙卫明, 钟清, 等. 老化锂离子电池 Peukert 方程的适用性分析 [J]. 电源技术, 2017, 41(3): 370.