

新能源汽车驱动电机硬件在环仿真技术综述

王志福¹, 孙庆乐¹, 李昊龙², 王旭², 郭毅锋², 梁常春³, 王瑞³

(1. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081;

2. 广西科技大学 电气与信息工程学院, 广西 柳州 545026;

3. 北京空间飞行器总体设计部 空间智能机器人系统技术与应用北京市重点实验室, 北京 100094)

摘要:随着新能源汽车电机驱动系统的发展以及复杂度和集成度的提高,电机驱动系统的测试已成为整车开发的重要组成部分。但大功率电机驱动测试难度较大且风险较高,尤其对于电机控制系统,传统的台架和实车测试往往不能满足需求。从信号级硬件在环和功率硬件在环仿真的结构、实时仿真模型、应用领域三个方面进行综述,通过比较硬件在环仿真和传统台架测试的优缺点,明确了电机硬件在环仿真准确性和灵活性的优点,体现出电机硬件在环仿真测试方法的优越性。

关键词:电机模拟;电机驱动;硬件在环测试;功率级电机模拟器

中图分类号:TM306 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed22138

Overview of New Energy Vehicle Drive Motor Hardware-in-the-loop Simulation Technology

WANG Zhifu¹, SUN Qingle¹, LI Haolong², WANG Xu², GUO Yifeng², LIANG Changchun³, WANG Rui³

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Guangxi University of Science and Technology,

Liuzhou 545026, Guangxi, China; 3. Beijing Key Laboratory of Intelligent Space Robotic System Technology and Applications, Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: With the development of motor drive system of new energy vehicle and the increase in complexity and integration, testing of motor drive system has become an important part of vehicle development. But high-power motor drive testing is more difficult and has higher risks, especially for motor control system, traditional bench and real vehicle tests often fail to meet demand. An overview was provided from the three aspects of signal hardware-in-the-loop and power hardware-in-the-loop simulation structures, real-time simulation models and applications. By comparing the advantages and disadvantages of hardware-in-the-loop simulation and traditional bench testing, the advantages of accuracy and flexibility of motor hardware-in-the-loop simulation were clarified, and the superiority of the motor hardware-in-the-loop simulation test method was reflected.

Key words: motor emulation; motor drive; hardware-in-the-loop test; power motor emulator

随着新能源汽车普及率的提高,未来十年内电机在新能源汽车的占比仍将增长,为了促进大功率电机的研发和新型电机结构的设计,精准的电机模型和高性能的电机仿真是必不可少的。对电机仿真的研究将使:1)显著缩短电机驱动系统设计周期,提高电机设计的效率,从而加快设计速度和产品上市时间;2)电机仿真能实现与电

机驱动器之间的控制信号或真实功率的交互;3)在开发初期快速地验证电机控制系统方案的正确性和可行性,避免造成过多的资源浪费和时间消耗。在过去的半个世纪中,离线仿真是在进行硬件原型设计和现场部署之前进行设计验证和测试的主要工具^[1-2]。离线仿真是在理想环境下的仿真,无法模拟和检测电机系统实际运行的中

基金项目:国家自然科学基金项目(51775042)

作者简介:王志福(1977—),男,博士,高级实验师,Email: wangzhifu@bit.edu.cn

通讯作者:李昊龙(1994—),男,硕士生,Email: lhlforeversuccess@qq.com

断延迟、执行速率、内存读取、端口特性等问题^[3]。电机硬件在环仿真可以模拟故障和极限测试条件,工程师可在无损条件下评估控制器或驱动器的性能^[4-5]。电机仿真主要经历:物理仿真、数字仿真以及硬件在环实时仿真^[6-7]。

物理仿真是将真实的电机系统按照比例缩小处理,各个部分按照实际的接线方式进行连接,组成物理模拟系统。物理模拟系统对研究机理不清晰和具有新颖控制方法的电机系统提供了直观可靠的仿真方法,但因其成本较高,无法灵活调整参数和扩展性差的缺点,导致物理仿真的应用十分受限。数字仿真是在理想环境下通过建立电机数学模型,选择合适方法搭建电机仿真模型进行仿真试验。但数字仿真只用于学习和测试电机基本理论和控制策略,无法考虑真实电机硬件系统的连接和搭建,也无法模拟真实电机的运行状态。硬件在环(hardware-in-the-loop, HIL)仿真是根据真实电机在仿真设备中建立实时仿真模型,待检测的电机控制器并不连接真实电机,而是与能够模拟真实电机运行状态的仿真设备相连,将实际的电机控制器置于由实时数字仿真设备建立的虚拟电机系统中进行闭环仿真。从电机控制器输入端口来看,该模拟系统与真实电机是等效的。这种能够模拟真实电机运行状态的仿真系统,也被称为电机模拟器。HIL仿真分为信号级硬件在环(signal hardware-in-the-loop, SHIL)仿真与功率连接型硬件在环(power hardware-in-the-loop, PHIL)仿真^[8]。

在SHIL中,被测设备(例如电机控制器)是实际存在的,电机和逆变器用仿真模型代替。仿真设备中实时运行虚拟电机模型模拟真实电机系统的状态信息和测试环境,对被测设备进行功能测试。SHIL电机仿真设备与物理被测设备交互的是控制信号,此时,物理被测设备一般为电机驱动和保护装置^[9-11]、电机控制器(motor control unit, MCU)^[12-13]等。PHIL是SHIL的拓展,PHIL的仿真系统回路之间交互真实的物理功率,并能够灵活模拟大功率电机在各种工况下的状态信息,从而对被测设备进行全方面的测试。

本文首先介绍电机硬件在环仿真的原理结构,分析了电机硬件在环仿真的特性及其适用领域,最后根据现有电机硬件在环仿真的问题和不足,对电机硬件在环仿真关键技术发展方向进行了展望。

1 信号级硬件在环仿真

硬件在环仿真^[14]是将数字仿真和物理仿真结合的一种先进的仿真方法。仿真设备中实时运行电机模型,能够模拟真实电机在各种工况下的状态信息,通过I/O口将被测设备连接到仿真环境中,通过实时的仿真完成对被测设备功能的测试。硬件在环仿真充分利用数字仿真建模方便的优点,通过实时仿真完成对被测设备功能的测试,保真度较高。硬件在环仿真能在无损环境中完成对被测设备全方面的测试,为电机系统的研发和测试提供了安全高效的途径^[15-17]。

1.1 驱动电机硬件在环仿真

电机的SHIL可灵活地修改电机和负载的参数,可以低成本验证电机控制策略。当真实测试系统风险太大无法直接进行测试时,SHIL仿真就可以安全高效地对电机控制器进行测试。SHIL的优势在于可以大大加快电机设计和电机控制器测试验证的速度,降低研发和测试成本,同时防止测试对实际系统造成的损害^[18-19]。因为电机功能具有多样性,所以要求硬件在环仿真系统能适应不同种类的电机、运行速度快、仿真精度高、能实时修改电机和负载参数、并且能够进行电机极限工况测试和电机故障仿真。硬件在环仿真能够在开发前期在无损的环境下对电机设计方案和控制策略的合理性进行验证,降低研发成本,缩短开发时间^[20]。

电机硬件在环仿真系统搭建主要包括硬件系统和软件系统两部分的搭建^[21-22]。硬件系统包括待测电机控制器和电机实时仿真设备。仿真设备由CPU、I/O板卡和内部信号处理电路组成。软件系统包括电机实时仿真系统和测试管理界面,电机仿真器通过I/O口和功能板卡实现与被测实物信号的交互;测试管理界面的功能是方便实时修改电机和负载的参数,测试管理界面一般带有示波器,方便对被测设备进行观察。电机硬件在环仿真系统连接图如图1所示。

SHIL研究目标是用实时电机模型准确模拟电机在各种工况下的特性,因此电机的数学模型是保证电机模拟准确性的关键^[23-24]。文献[25]以永磁同步电机为对象搭建了电机驱动控制系统的硬件在环仿真平台。采用 d, q 轴同步坐标系下的永磁同步电机数学模型,以逆变器输出电压量为输入,输出三相电流。电机的定子三相电流和

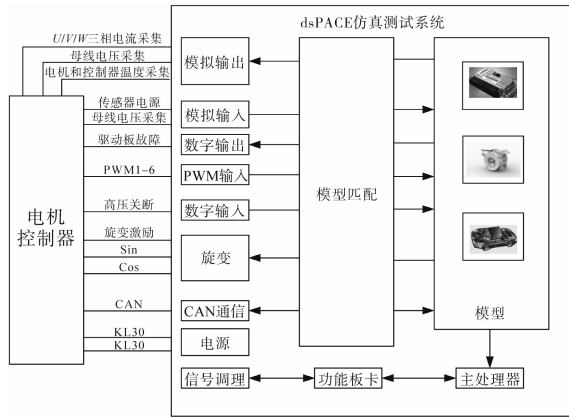


图1 电机硬件在环仿真系统连接图

Fig.1 Connection diagram of motor hardware-in-the-loop simulation system

直流母线电压通过实时仿真系统的数字模拟端口输出给实际的电机控制器,电机控制器再通过模拟数字端口采样电机定子三相电流和直流母线电压进行控制,由此完成对电机控制器的闭环测试。赵钢^[26]基于永磁同步电机 d, q 轴数学模型在Simulink中搭建电机的矢量控制算法模型,并且实现自动生成代码下载到数字信号处理(digital signal processing, DSP)电机控制器中,并在硬件在环仿真平台上搭建逆变器、永磁同步电机仿真系统,连接DSP对永磁同步电机(permanent magnetic synchronous machine, PMSM)矢量控制算法进行测试,仿真精度达到ns级,完成了永磁同步电机控制器的开发。文献[27]在现场可编程逻辑门阵列(field programmable gate array, FPGA)芯片中搭建了车用内置式永磁同步电机的非线性 d, q 轴模型,与真实的电机控制器相连,构建了硬件在环仿真平台。该SHIL平台仿真步长为 $1\mu\text{s}$,与产品级的永磁同步电机多工况的对比试验中,SHIL平台的转矩、转速、A相电流峰值的平均误差为4.14%,充分验证了建立的SHIL仿真平台具有较高的准确性。

1.2 电机非线性硬件在环仿真

在电机控制设计过程中为了简化分析,常对永磁同步电机的 $d-q$ 模型假设:忽略铁芯的涡流损耗和磁滞损耗;定子绕组的电阻、电感是线性的;电感和永磁体磁链设为固定值。这样的 $d-q$ 模型虽然便于分析,但计算误差较大。随着电机控制技术的提升,电机的有限元模型因准确度高且能模拟电机非线性特性的优点,逐渐成为业界广泛采用的建模方法^[28-29]。林潜等^[30]利用有限元软件搭建永磁同步电机分析模型,搭建的永磁同

步电机有限元和逆变器模型经编译后下载到RT-LAB实时仿真器,通过RT-LAB与真实的电机控制器相连,构建永磁同步电机实时硬件在环测试平台。在两种工况下,仿真实验平台的电流的基波有效值与全实物实验平台的误差在5%以内,齿谐波分量的误差在15%以内,充分验证了建立的永磁同步电机的SHIL平台具有较高的保真度与准确性。文献[31]为了测试和优化无刷直流电机(brushless DC motor, BLDCM)控制器,使用静态有限元分析(finite element analysis, FEA)获得的BLDCM参数的查表模型,搭建了基于DSP和FPGA的SHIL平台。根据实时相电压信号更改BLDCM状态来提高仿真精度。通过该查表模型,可以改善干扰条件下的仿真性能,并在保持与FEA模型相同的高精度的同时获得更快的计算速度。

虽然电机的有限元建模具有精度高的优点,但是其仿真建模通常只针对某一特定电机,导致模型通用性不足;并且没有考虑大功率电机运行损耗,会造成一定的误差。高瑾^[32-33]搭建的永磁电机SHIL平台,采用标幺化方法建立电机模型,方便电机参数的实时修改,使电机仿真能适应不同功率等级的电机。将该SHIL平台与全实物平台的试验数据进行了对比,试验数据误差在5%以内,证明SHIL平台能准确模拟BLDCM在不同控制下的运行状态。文献[34]针对传统永磁同步电机线性集中参数模型在仿真阶段无法描述谐波电流的问题,构建基于FPGA的永磁同步电机分布参数电机模型。利用该模型反映了齿槽转矩、气隙磁场等特性,反映了真实电机谐波电流,通过与真实控制器连接,为相应算法的测试提供了平台,该SHIL平台信号传输过程如图2所示。

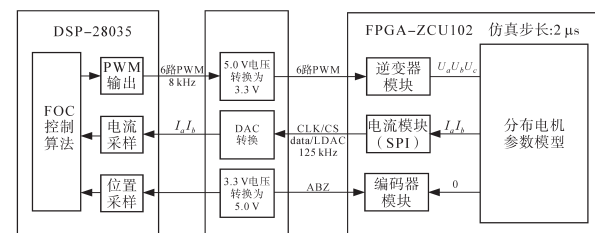


图2 SHIL仿真平台信号传输过程

Fig.2 Signal transmission process of SHIL simulation platform

1.3 电机控制器硬件在环仿真测试

在电机硬件在环仿真测试中,仿真设备通过实时运行虚拟电机模型来模拟真实电机的端口特性,使被测设备判断处于真实的测试环境中,

从而完成对被测设备全方面的测试。因此电机的硬件在环测试被广泛应用于电机控制器功能测试中。文献[35]基于实时仿真设备 DSPACE 搭建了永磁同步电机的硬件在环测试平台。电机控制器通过功能板卡与仿真设备的信号模块相连实现控制信号的交互,测试平台的上位机界面可以实时监测与分析 MCU 信号。借助该测试平台可以完成对 MCU 状态切换、控制、信息传输、安全保护等全方面的测试。陈众等^[36]基于硬件在环技术,构建了一种利用嵌入式装置运行电机模型搭配实体可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)的硬件在环实时仿真平台。嵌入式装置与 PLC 进行实时通讯,并通过 PLC 反馈的信息实时调节电机转速,构成一个闭环实时控制系统,整个过程最终呈现在上位机界面。该平台能精准地模拟出真实电机启停、变速等过程中内部电磁与机械状态的变化过程。

硬件在环测试的特点是虚拟电机与被测设备之间是控制信号的交互,SHIL通过模拟真实的测试环境验证被测设备的功能逻辑,不会因测试对电机造成实质的损害,因此硬件在环测试能够安全高效地完成电机控制和故障保护策略的开发测试。文献[37]结合插电式混合动力汽车系统特点构建基于电量消耗-电量保持型控制策略,确定车辆多种运行模式之间的切换规则及发动机、电机的转矩分配原则,通过 SHIL 对控制策略进行在环实时监控和调参,为该控制策略应用于其他混合动力汽车奠定理论基础。文献[38]以永磁同步电机作为硬件在环系统的被控对象,通过 Matlab/Simulink 在实时仿真设备 RT-LAB 中搭建永磁同步电机数学模型、逆变器模型和硬件接口模型,对电机速度和位置(即模型参考自适应方法)进行研究。在电机控制器上运行速度位置估算算法和磁场定向控制算法,在硬件在环仿真平台上验证无传感器控制算法的可行性与在逆变器不同类型故障下电机的运行状况,为电机控制算法的优化奠定了基础。文献[39]基于实时仿真设备 DSPACE 搭建了 SHIL 测试系统,该电机模拟器系统通过实时数字接口与真实控制器相连,通过上位机实时修改电控系统中的电压、电流等参数,模拟真实电机的各种故障工况,并监测控制器故障触发和恢复时的参数阈值以及总线发出的故障信号,完成对电机控制器故障保护策略执行速度和可靠性的验证。

SHIL 仿真依靠与被测设备控制信号的实时交互,实现对真实设备低延迟、高保真度的测试。但 SHIL 与被测设备的回路中不存在真实物理功率交互,SHIL 无法对被测设备进行功率测试,因此 SHIL 的应用领域存在一定的局限性。

2 功率硬件在环仿真

在 SHIL 仿真中,硬件和仿真器之间交互的是信号级实时信息。而电机 PHIL 仿真器集成了大功率电力电子设备,仿真设备实时运行电机和机械负载的模型模拟真实电机端口电流、电压特性,并利用功率接口实现被测实物与仿真模型之间的匹配连接,因此 PHIL 系统中交互的是电压、电流等实际功率,故又称为功率硬件在环仿真系统。根据不同类型的功率转换器件,PHIL 模拟和测试设备的功率等级范围在几十 W 与 MW 之间,因为仿真设备与硬件交互的是真实的电压、电流,更能准确模拟真实测试环境。PHIL 系统使用功率放大器或 PWM 整流器来调整电平,这使 PHIL 系统可以在实际的电气系统和电气负载下进行实时测试^[40-44]。PHIL 模拟器继承了 SHIL 的诸多优点,除此之外,还解决了 SHIL 无法对被测装置进行功率测试的问题,在仿真系统中实现真实的电功率交互。PHIL 无需添加和改动硬件装置便可以和被测装置连接,从物理连接上看 PHIL 系统等同于真实电机^[45]。通过大容量的功率变换装置搭建功率硬件在环测试平台,能对风力电机、船舶电机、新能源汽车等高功率电机设备进行在环测试^[46-48]。

2.1 驱动电机功率硬件在环仿真

PHIL 由虚拟电机系统(virtual electrical system, VES)、物理被测系统(hardware under test, HUT)和功率接口装置3个部分构成,其具体结构如图3所示。

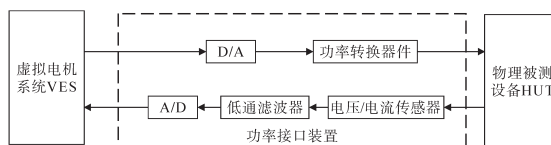


图3 PHIL系统结构

Fig.3 PHIL system structure

VES是运行电机模型的实时仿真机,功率接口装置由数模转换器、模数转换器、功率转换器和信息采集电路等装置和接口算法组成。PHIL的原理是电机模型根据传感器输入的采样信息

实时计算出包含真实电机端口特性的指令电流,控制功率转换器件生成与指令电流数值和波形相匹配的端口电流^[49-50]。SHIL和PHIL之间结构的主要区别如图4所示,PHIL通过功率接口装置实现了被测设备和实时仿真设备的功率交互,其余部分SHIL和PHIL架构相同。

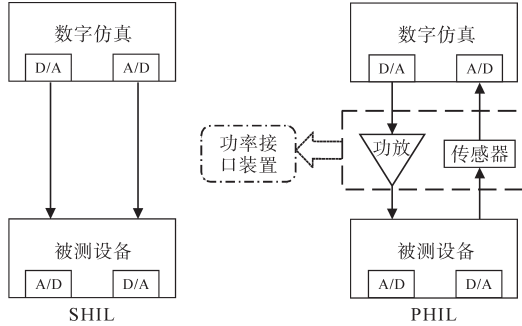


图4 SHIL与PHIL的结构区别

Fig.4 The structural difference between SHIL and PHIL

PHIL在SHIL的结构基础上添加了被VES实时控制的功率转换器件,功率转换器件根据VES的指令模仿真实电机运行时的电气特性。根据功率转换器件选型的不同,PHIL的拓扑结构也有多种类型。文献[51]设计了无刷直流电机功率级电机模拟器,电机模拟器输入的电流和电压由霍尔传感器采集,经A/D转换器作为状态空间变量输入给模拟器中BLDCM模型,通过逆变器和电感产生电机模型计算出的电机端口电流、电压,电机模拟器输出的电流和电压与实际BLDCM相匹配。BLDCM模拟器通过更改逆变器和电感来实现不同电机参数的BLDCM的仿真。文献[52-53]提出了一种可模拟交流电机端口特性的电力电

子负载模拟系统,取代了传统交流传动平台对各类电机进行测试。该模拟系统的拓扑结构如图5所示,模拟系统的功率转换器由模拟变换器(simulation converter, SC)和并网变换器(grid connection converter, GCC)组成。采用实时数字仿真技术建立电机模型,通过电机模型的实时仿真获得真实电机运行的状态信息,并控制SC准确跟踪指令电流,使SC输出的电流具有与实际电机相同的电流特性。GCC将电流高效反馈回电网,实现能量的回收和双向流动。对于被测电机控制器而言,具有相同端口特性的电机模拟器等效于实际电机。邢美丽^[54]搭建的功率级电机模拟器的拓扑结构如图6所示,电机模拟器由实际电机的等效电路和功率级电流源组成。电机的数字模型通过电机等效电路生成旋变信号和霍尔信号;通过功率级电压源输出与真实电机具有相同性质的相电流和相电压。由于模拟器的电机数字模型具有通用性,所以不需要改变模拟器的硬件电路,只需要改变电机的反电动势和电磁转矩模型,便可以实现对BLDCM和PMSM的功率级模拟仿真。

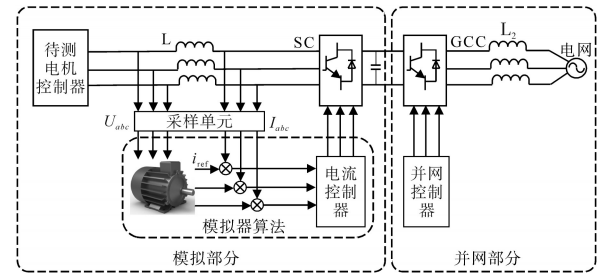


图5 电机模拟器结构示意图

Fig.5 Structure diagram of motor emulator

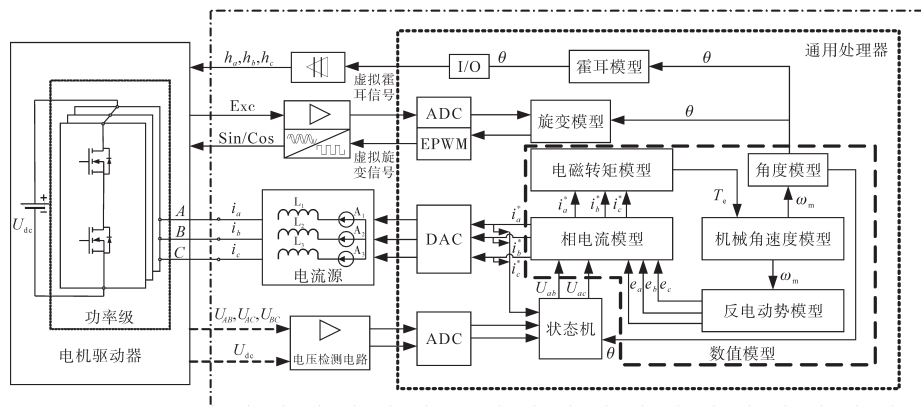


图6 通用型电机功率级模拟器系统结构

Fig.6 Universal motor power level emulator system configuration

文献[55-56]根据电机模型不同的输入量和输出量,构建了电压-电流(voltage to current, VTC)和电流-电压(current to voltage, CTV)电机

模拟系统。VTC以电压采样为输入量,定子电流为输出量;CTV以定子电流为输入量,以定子电压或反电势作为输出量。两种电机模拟器均以

背靠背的PWM整流器作为电机模拟器功率转换器,实现电机端口特性的模拟和能量双向流动。在空载、突加负载和三相电源不平衡三种典型工况下完成对逆变器和电机控制器的测试。

2.2 驱动电机非线性功率硬件在环仿真

由于PHIL通过功率转换器件模拟真实电机的端口特性,所以对电机模型的实时性和准确性提出了更高要求。宋鹏先^[57]采用Adams法实现了同步和异步电机模型的数字化,使用Adams电机数字模型准确度高、计算时间短,适用于DSP等常用数字芯片计算电机的端口信息。许家群等^[58]采用双线性变换和逆Z变换推导了基于线电压的PMSM和BLDCM电机模型。在通用型电机功率级模拟器上,通过改变反电动势和电磁转矩模型,便可以分别实现对PMSM和BLDCM的端口特性模拟,极大地提高PHIL系统的通用性。文献[59]提出了一种基于PHIL的PMSM电机模拟系统,该系统使用基于有限元分析工具生成的基于查找表数据的机器模型。使用此类机器模型可以模拟电机的磁性(例如饱和度)和几何特征(例如齿槽转矩),四象限功率放大器与实时仿真器相连能模拟真实电机端口电流特性,从而大大提高了模拟的准确性和实用性。文献[60]采用两步亚当斯法建立永磁同步电机的数学模型,模拟电机可实时计算出当前时刻的电机状态量。采用改进的内模控制器,控制逆变器准确跟踪指令电流,保证电机模拟器电流跟踪的快速性和准确性;设计的龙伯格转矩预估观测器,使电机产生高频脉动转矩以抵消电机转矩的波动,保证PHIL平台电机测试的准确性和稳定性。文献[61]针对三相永磁同步电机,提出了一种基于三相定子坐标系的永磁同步电机电流-磁链有限元反查表模型的PHIL,并建立了接口电路的数学模型和电压前馈电流反馈控制的接口算法,所提出的PHIL平台误差小、准确度高。

2.3 功率硬件在环仿真接口算法

PHIL中功率转换器件的输出电流准确跟踪指令电流是保证PHIL模拟准确性的关键。传统的PI控制无法实时追踪指令电流,容易造成较大的稳态误差。文献[62]在功率级三相异步电机模拟器 α - β 坐标系中采用无差拍控制。无差拍控制精度高、动态响应快,能在电流的动态变化中准确跟踪指令电流,并且不依赖锁相系统,保证了功率级三相异步电机模拟的准确性。文献[63]

提出一种基于虚拟转子磁链定向的电流控制跟踪策略。该策略能适应端口电流的动态变化,减小暂态电流非重复性变化造成的稳态误差。文献[60,64]依据二自由度原理,对传统的内模控制进行改进,引入了两个调解参数。即保证内模控制解耦性能,又提高了内模控制的鲁棒性,减小电流跟踪的误差。

PHIL仿真是实时仿真的高级应用,是结合软件和硬件测试的新颖方法。PHIL因其交互真实功率的特性将逐渐取代HIL,被市场大规模地接纳。

3 结论

电机硬件在环仿真将数字仿真和实测设备相结合,可以在无损环境中对实测装备进行测试。对于硬件在环测试系统,其关键的两个部分为:1)电机实时仿真模型的建立;2)电机仿真设备与被测设备端口匹配,以及功能板卡的设计。SHIL的电机模型需要准确模拟电机在各种工况下的状态信息,通过通讯接口和板卡与被测设备进行信号交互。现阶段SHIL的电机建模主要有 d 、 q 轴建模、有限元建模和标幺化的模型。基于 d 、 q 轴的电机模型通过对定子电流的控制便可实现矢量控制的目的,简化电机控制的设计过程,便于分析和电机控制,但其忽略电机的非线性特点且计算误差大,使其应用受限。电机的有限元模型准确度高且能模拟电机非线性特性,是业内主流的电机建模方式。但是电机的有限元模型无法直接应用于仿真设备,只能通过生成查表模型在数字处理器中应用,但常用数字处理器的采样频率和处理速度无法满足SHIL仿真对快速性和准确性的要求,所以在SHIL中电机的有限元模型往往应用于特定的仿真设备(例如RT-LAB),模型的通用性不足。电机的标幺化建模能适应不同功率等级的电机,方便参数的调整,但是建模过程繁琐、计算量大。随着SHIL技术的发展,要求电机模型不仅能模拟电机的非线性特点,还要具有较高的通用性,能适用不同类型仿真设备和功率等级,满足电机SHIL仿真对实时性和准确性的要求。SHIL的板卡依据功能分为故障注入板卡、信号调理板卡、电阻板卡等。测试对象的不同,SHIL使用的板卡也不同。SHIL板卡的发展应朝着多功能和通用性发展,不需要更换板卡便满足不同测试对象信号传输。目前业界的

SHIL仿真多集中单一的部件测试,SHIL的未来发展重心是多部件系统级的仿真测试。

PHIL在SHIL的基础上添加了功率转换器和传感器。将仿真设备的控制信号转换为电压、电流,将被测设备反馈的电压、电流转换为控制信号,实现仿真设备和被测设备之间的功率交互,更接近真实的环境。功率硬件在环仿真的三个关键部分为:1)建立能准确模拟电机端口特性的电机模型;2)PHIL的拓扑结构;3)电流跟踪控制策略。由于PHIL中的电机模型需要根据传感器的采样信息模拟真实电机的端口特性,对PHIL电机模型的实时性和准确性提出了更高的要求。现阶段电机模型求解方法多采用欧拉法、梯形法和Adams离散电机模型。欧拉法精度低;梯形法精度高但计算复杂;Adams在合适步长下具有较高的计算精度,适用于DSP等处理器完成电机模型的数值求解。为了满足PHIL电机模型数值求解对精度和实时性的要求,双线性变换、后向拆分法和逆Z变换等数值求解方法也逐步在PHIL中得到应用,新型数值求解方法的推导应用将是PHIL电机模型发展的一个重要方向。

PHIL的拓扑结构包含功率转换装置,使PHIL可以进行极限工况和故障条件下的模拟实验,可信度较高。现阶段的PHIL多以PWM整流器为功率转换器件,以背靠背的架构实现PHIL电能的双向流动和回收。但是PWM整流器需要较高的A/D采样频率才能满足电机模型数值计算的准确性要求。所以可编程的功率级电流源和功率放大器也逐渐被业内接受,广泛应用于PHIL的功率转换中。而新型功率器件的研发能提高PHIL模拟的功率等级,开发更多的系统架构方案。在PHIL系统中,由于功率转换器件的引入,使得传统的电流控制策略无法准确跟踪指令电流,造成较大的稳态误差。基于二自由度的内模控制和线性预测补偿的无差拍控制器都是通过对现有电流跟踪控制策略和控制器的改进,来提高电流跟踪的准确性。随着业界对高功率设备仿真测试需求的增高,电流跟踪控制策略的改进和开发将是PHIL研究的重点方向之一。

随着技术的发展,电机功率硬件在环仿真的准确性和稳定性也得到了提高,PHIL将朝着高功率等级的方向发展。PHIL也将逐步替代SHIL成为业界内驱动电机仿真和测试的首选,我们的未来研究将沿着这个方向进行。

参考文献

- [1] Krause P C, Thomas C H. Simulation of symmetrical induction machinery[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1965, 84(11):1038-1053.
- [2] Dommel H W. Digital computer solution of electromagnetic transients in single-and multiphase networks[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1969, 88(4):388-399.
- [3] 郭希铮,游小杰,徐从谦,等.大功率电力牵引控制系统硬件在回路实时仿真[J]. 电工技术学报,2012,27(4):65-70.
Guo Xizheng, You Xiaojie, Xu Congqian, *et al.* Simulation of hardware in loop for high-power electrical traction system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4):65-70.
- [4] Habbi Hanan M, 黄苏融,高瑾,等. 基于交叉耦合效应的车用内置式永磁电机转子位置估计[J]. 中国电机工程学报, 2012,32(15):124-133.
Habbi Hanan M, Huang Surong, Gao Jin, *et al.* Robust sensorless rotor position estimation of IPM in EV cooperation with cross saturation effects[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(15):124-133.
- [5] 夏长亮,方红伟. 永磁无刷直流电机及其控制[J]. 电工技术学报,2012,27(3):25-34.
Xia Changliang, Fang Hongwei. Permanent-magnet brushless DC motor and its control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3):25-34.
- [6] Shahbazi M, Poure P, Saadate S, *et al.* FPGA-based reconfigurable control for fault-tolerant back-to-back converter without redundancy[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(8):3360-3371.
- [7] Guillaud X, Faruque M O, Teninge A, *et al.* applications of real-time simulation technologies in power and energy systems[J]. IEEE Power and Energy Technology Systems Journal, 2015, 2(2):103-115.
- [8] Ren W, Sloderbeck M, Steurer M, *et al.* Interfacing issues in real-time digital simulators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2):1221-1230.
- [9] Palla S, Srivastava A K, Schulz N N. Hardware in the loop test for relay model validation[C]//2007 IEEE Electric Ship Technologies Symposium, IEEE, 2007: 449-454.
- [10] Craciun O, Florescu A, Munteanu I, *et al.* Protection devices testing based on power-hardware-in-the-loop simulation[C]// IECON 2011-37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IEEE, 2011: 3736-3741.
- [11] Sham M V, Vittal K P. Development of DSP based high speed numerical distance relay and its evaluation using hardware in loop power system simulator[C]//ISGT 2011-India, IEEE, 2011: 37-42.
- [12] 王涛,邹毅军,年晓红,等. 并网双馈风力发电实时仿真控制方案研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(14):4306-4311.

- Wang Tao, Zou Yijun, Nian Xiaohong, *et al.* Real-time simulation of DFIG-based wind farm connected to power grid[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(14): 4306-4311.
- [13] 刘其辉, 李万杰. 双馈风力发电及变流控制的数模混合仿真方案分析与设计[J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(1): 83-86, 95.
- Liu Qihui, Li Wanjie. Analysis and design of digital/physical hybrid simulation scheme for doubly-fed induction generator wind turbine and its converter control[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(1): 83-86, 95.
- [14] 郑三立, 黄梅, 张海红. 电力系统数模混合实时仿真技术的现状与发展[J]. *现代电力*, 2004, 21(6): 29-33.
- Zheng Sanli, Huang Mei, Zhang Haihong. Present situation and development of hybrid real-time simulator for power systems[J]. *Modern Electric Power*, 2004, 21(6): 29-33.
- [15] Parma G, Dinavahi V. Real-time digital hardware simulation of power electronics and drives[C]//Power Engineering Society General Meeting, IEEE, 2007.
- [16] Vekić M S, Grabić S U, Majstorović 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): 4436-4444.
- [17] 刘延彬, 金光. 半实物仿真技术的发展现状[J]. *仿真技术*, 2003(1): 27-32.
- Liu Yanbin, Jin Guang. The development status of hardware-in-the-loop simulation technology[J]. *Simulation Technology*, 2003(1): 27-32.
- [18] Kotsampopoulos P C, Lehfuss F, Lauss G F, *et al.* The limitations of digital simulation and the advantages of PHIL testing in studying distributed generation provision of ancillary services[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(9): 5502-5515.
- [19] Langston J, Steurer M, Woodruff S, *et al.* A generic real-time computer simulation model for superconducting fault current limiters and its application in system protection studies[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2005, 15(2): 2090-2093.
- [20] 孙倩, 林辉, 王志远. 永磁同步电机HIL仿真研究[J]. *电子测量技术*, 2009(1): 24-27.
- Sun Qian, Lin Hui, Wang Zhiyuan. Research on HIL simulation of permanent magnet synchronous motor[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2009(1): 24-27.
- [21] Hanselmann Herbert. Hardware-in-the-loop simulation testing and its integration into a CACSD toolset[C]//Proceedings of Joint Conference on Control Applications Intelligent Control and Computer Aided Control System Design, IEEE, 1996.
- [22] 金晓华. 基于dSPACE半实物仿真的电机测试平台研究[D]. 南京: 东南大学, 2006: 1-50.
- Jin Xiaohua. Research on dSPACE-based half-practicality simulation platform for motor control experiment[D]. Nanjing: Southeast University, 2006: 1-50.
- [23] 金海, 黄进. 基于模型参考方法的感应电机磁链的自适应观测及参数辨识[J]. *电工技术学报*, 2006, 21(1): 65-69.
- Jin Hai, Huang Jin. Adaptive flux estimation and parameters identification of induction motors based on model reference approach[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2006, 21(1): 65-69.
- [24] 徐奇伟, 宋立伟, 崔淑梅. 感应电机矢量控制中转子参数自适应辨识[J]. *电工技术学报*, 2011, 26(6): 81-87.
- Xu Qiwei, Song Liwei, Cui Shumei. Induction motor vector control based on adaptive identification of rotor parameters[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2011, 26(6): 81-87.
- [25] 李诚. 永磁同步电机驱动控制系统硬件在回路半实物仿真平台研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018: 1-70.
- Li Cheng. Research on hardware-in-the-loop semi-physical simulation platform of permanent magnet synchronous motor drive control system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018: 1-70.
- [26] 赵钢, 朱奥辞, 张世忠. 基于HIL的永磁同步电机矢量控制系统的开发[J]. *电测与仪表*, 2019, 56(21): 117-121, 152.
- Zhao Gang, Zhu Aoci, Zhang Shizhong. Development of vector control system of permanent magnet synchronous motor based on HIL[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, 56(21): 117-121, 152.
- [27] 高瑾, 黄洋, 宋石阳, 等. 车用电机硬件在环实时仿真与测试平台[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(11): 99-106.
- Gao Jin, Huang Yang, Song Shiyang, *et al.* Hardware-in-loop real-time simulation and test bench for electrical vehicle[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(11): 99-106.
- [28] Dufour C, Belanger J, Abourida S, *et al.* FPGA-based real-time simulation of finite-element analysis permanent magnet synchronous machine drives[C]//IEEE Power Electronics Specialists Conference, IEEE, 2007.
- [29] 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, IEEE, 2008.
- [30] 林潜, 葛宝明, 毕大强, 等. 永磁同步电机控制硬件在环测试平台的实现[J]. *电工电能新技术*, 2014, 33(3): 76-80.
- Lin Qian, Ge Baoming, Bi Daqiang, *et al.* Hardware-in-the-loop platform for permanent magnet synchronous machine control[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2014, 33(3): 76-80.
- [31] Bo Z, Xu J. Interpolation method in hardware-in-the-loop simulation for brushless DC motor[C]//Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation, IEEE, 2014: 5852-5857.
- [32] 高瑾, 徐秋霞, 董召强. 无刷直流电机半实物实时仿真及测试[J]. *电机与控制学报*, 2018, 22(4): 8-15.
- Gao Jin, Xu Qiuxia, Dong Zhaoqiang. Real-time simulation and test for brushless DC motor with hardware-in-the-loop[J]. *Electric Machines and Control*, 2018, 22(4): 8-15.

- [33] 高瑾,殷桂来,霍锋伟,等.考虑损耗的内置式永磁同步电机标么化系统硬件在环实时仿真与测试[J].电工技术学报, 2016,31(19):147-154.
Gao Jin, Yin Guilai, Huo Fengwei, *et al.* The real-time simulation and test of IPMSM Per-unit HIL system considering loss[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31 (19): 147-154.
- [34] 钟再敏,黄益伦,邵仲书.基于FPGA的永磁同步电机谐波电流实时仿真研究[J].电机与控制应用,2019,46(9):25-30.
Zhong Zaimin, Huang Yilun, Shao Zhongshu. Real-time simulation of harmonic current of permanent magnet synchronous motor based on FPGA[J]. Electric Machines & Control Application, 2019, 46(9): 25-30.
- [35] 党美婷,任佳越,杨启东.基于dSPACE的电机控制器硬件在环测试研究[J].汽车实用技术,2019(18):131-134.
Dang Meiting, Ren Jiayue, Yang Qidong. Hardware-in-the-loop test study of motor controller based on dSPACE[J]. Automobile Technology, 2019(18): 131-134.
- [36] 陈众,余思维,罗通,等.基于嵌入式系统的异步电机半实物实时仿真平台[J].电力科学与工程,2017,33(10):16-21.
Chen Zhong, Yu Siwei, Luo Tong, *et al.* Real-time simulation platform for asynchronous motor based on embedded system[J]. Electric Power Science and Engineering, 2017, 33(10): 16-21.
- [37] 潘广纯,赵红,闫松,等.插电式混合动力汽车控制策略硬件在环仿真研究[J].机械制造与自动化,2019,48(6):111-114.
Pan Guangchun, Zhao Hong, Yan Song, *et al.* Hardware in the loop simulation study on control strategy pf plug-in hybrid electric vehicle[J]. Machine Building & Automation, 2019, 48 (6): 111-114.
- [38] 张灵霞,黄河,张凯.基于无位置传感器的永磁同步电机硬件在环仿真研究[J].机电工程,2017,34(2):156-160.
Zhang Lingxia, Huang He, Zhang Kai. Simulation of hardware-in-loop for PMSM based on speed sensorless[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017, 34(2): 156-160.
- [39] 田鑫,刘全周,晏江华,等.基于HIL的车用电机控制器故障保护策略测试[J].电机与控制应用,2019,46(11):82-87.
Tian Xin, Liu Quanzhou, Yan Jianghua, *et al.* Fault protection strategy test of vehicle motor controller based on HIL[J]. Electric Machines & Control Application, 2019, 46(11): 82-87.
- [40] Mahmoud Matar, Iravani Reza. Massively parallel implementation of AC machine models for FPGA-based real-time simulation of electromagnetic transients[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 830-840.
- [41] Maccleery Brian, Trescases Olivier, Mujagic Muris, *et al.* A new platform and methodology for system-level design of next-generation FPGA-based digital SMPS[C]//2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), IEEE, 2012.
- [42] Bachir T O, Dufour C, David J P, *et al.* Floating-point engines for the FPGA-based real-time simulation of power electronic circuits[C]//IPST, June (2011). in Proc. IPST, 2011:1-7.
- [43] Bachir T O, David J P, Dufour C, *et al.* Effective FPGA-based electric motor modeling with floating-point cores[C]//IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, IEEE, 2010: 829-834.
- [44] Bachir T O, Dufour C, Bélanger 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: 167-177.
- [45] 崔昊天.无刷直流电机功率硬件在环模拟器设计[D].北京:北京工业大学,2017:1-50.
Cui Haotian. Design of power hardware-in-the-loop simulator for brushless DC motor[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017:1-50.
- [46] Steurer M, Edrington C S, Sloderbeck M, *et al.* A megawatt-scale power hardware-in-the-loop simulation setup for motor drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(4): 1254-1260.
- [47] Ren W, Steurer M, Woodruff S. Applying controller and power hardware-in-the-loop simulation in designing and prototyping apparatuses for future all electric ship[C]//2007 IEEE Electric Ship Technologies Symposium, IEEE, 2007: 443-448.
- [48] Ren W, Steurer M, Qi L. Evaluating dynamic performance of modern electric drives via power-hardware-in-the-loop simulation[C]//2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, IEEE, 2008: 2201-2206.
- [49] 安然然,赵艳军,盛超,等.基于实时仿真的功率连接型数模混合仿真技术研究[J].广东电力,2015,28(2):50-56.
An Ranran, Zhao Yanjun, Sheng Chao, *et al.* Research on power connection typed digital-analog hybrid simulation technology based on real-time simulation[J]. Guangdong Electric Power, 2015, 28(2): 50-56.
- [50] 杨向真,孙麒,杜燕,等.功率硬件在环仿真系统性能分析[J].电网技术,2019,43(1):251-258.
Yang Xiangzhen, Sun Qi, Du Yan, *et al.* Performance analysis of power hardware-in-loop simulation[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 251-258.
- [51] Liu C, He Y, Zhang B. Design of BLDCM emulator for transmission control units[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Advances in Materials, Machinery, Electronics (AMME 2018), 2018.
- [52] 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):71-77.
Huang Qingjun, Sun Mucun, Zou Xudong, *et al.* Design of power electronic load system simulating motor port characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems. 2014, 38(3): 71-77.
- [53] 金帅炯.模拟永磁同步电机的电力电子负载研究[D].南京:南京邮电大学,2018:1-50.
Jin Shuaijiong. Research on power electronic load of simulated permanent magnet synchronous motors[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2018:1-50.

- [54] 邢美丽.面向无刷直流电机与永磁同步电机的通用型功率级模拟器设计[D].北京:北京工业大学,2018:1-70.
Xing Meili. Universal power level simulator design for brushless DC motor and permanent magnet synchronous motor[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2018:1-70.
- [55] 汪苗.交流电机及其负载的模拟方法研究[D].合肥:合肥工业大学,2019:1-50.
Wang Miao. Research on simulation method of AC motor and load[D]. Hefei:Hefei University of Technology, 2019:1-50.
- [56] 吴政.异步电动机及负载一体化模拟器研究[D].合肥:合肥工业大学,2017:1-50.
Wu Zheng. Research on the integragration of asynchronous motor and load emulator[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017:1-50.
- [57] 宋鹏先,李耀华,王平,等.交流电机端口特性的数字化实现方法[J].电工技术学报,2015,30(14):184-192.
Song Pengxian, Li Yaohua, Wang Ping, *et al.* The digital realization method of AC motor simulator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 184-192.
- [58] 许家群,邢美丽,张红强.无刷直流电机回馈制动功率级实时仿真[J].北京工业大学学报,2019,45(8):733-741.
Xu Jiaqun, Xing Meili, Zhang Hongqiang. Power-level real-time simulation of brushless DC motor in regenerative braking process[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2019, 45(8):733-741.
- [59] Amitkumar K S, Kaarthik R S, Pillay P. A versatile power-hardware-in-the-loop-based emulator for rapid testing of transportation electric drives[J]. IEEE Transactions on Transportation electrification, 2018, 4(4): 901-911.
- [60] 郭毅锋,李昊龙,王志福,等.基于逆变器的永磁同步电机端口特性模拟及控制技术研究[J/OL].电测与仪表:[2020-10-15].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.th.20200921.1105.003.html>.
- Guo Yifeng, Li Haolong, Wang Zhifu, *et al.* Research on port characteristics simulation and control technology of permanent magnet synchronous motor based on inverter[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation: [2020-10-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.th.20200921.1105.003.html>.
- [61] 王志福,孙庆乐,李昊龙,等.基于有限元分析的永磁同步电机实时模拟器研究[J/OL].北京理工大学学报:[2020-10-15].<https://doi.org/10.15918/j.tbit1001-0645.2020.094>.
Wang Zhifu, Sun Qingle, Li Haolong, *et al.* Research on real-time simulator of permanent magnet synchronous motor based on finite element analysis[J/OL]. Journal of Beijing Institute of Technology: [2020-1015].<https://doi.org/10.15918/j.tbit1001-0645.2020.094>.
- [62] 宋鹏先,张郁颀,李耀华,等.基于无差拍控制的交流电机端口特性模拟[J].电工电能新技术,2016,35(6):24-28.
Song Pengxian, Zhang Yuqi, Li Yaohua, *et al.* Simulation of port characteristics of AC motor based on deadbeat control[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35(6): 24-28.
- [63] 吴政,苏建徽,徐华电,等.基于逆变器的异步电机特性模拟及控制技术研究[J].电气传动,2017,47(10):7-11.
Wu Zheng, Su Jianhui, Xu Huadian, *et al.* Research on simulation for characteristics of asynchronous motor and control strategies based on inverters[J]. Electric Drive, 2017, 47(10): 7-11.
- [64] 孟钊,李好文,孙朋朋.永磁同步电机电流环改进内模解耦控制的研究[J].电气传动,2016,46(2):11-15,30.
Meng Zhao, Li Haowen, Sun Pengpeng. Research on the improved internal model decoupling control of current loop for permanent magnet synchronous motor[J]. Electric Drive, 2016, 46(2): 11-15,30.

收稿日期:2020-07-06

修改稿日期:2020-10-30