Research of Hardware-in-the-Loop Simulation Modeling Techniques for Power Conversion Devices Based on High-Speed FPGA *

LÜ Shukang[1*], YUAN Xiaodong[1], ZENG Fei[1], WANG Hao[2], CHEN Yihan[2]
(1.State Grid Jiangsu Electric Power Research Institute, Nanjing Jiangsu 211103, China;
2.College of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing Jiangsu 210023, China)

Abstract: Hardware-in-the-loop (HIL) simulation, as a commonly used preliminary system development approach in industrial settings, offers advantages such as short development cycles, high efficiency, and low cost. For HIL simulation scenarios involving power conversion devices, four representative hardware system construction schemes are summarized and analyzed, and a comparison and selection recommendation is prorided for these schemes. Additionally, discretized modeling of power conversion circuits is a crucial prerequisite for implementing HIL simulation. Four modeling methods are reviewea, i.e., the ideal switch method, average state-space method, binary resistor method, and binary LC method. Finally, the oscillation and simulation power loss issues associated with the binary LC are addressed method based on node voltage equations, their causes are analyzed and commonly used improvement methods are summarized.

Key words: hardware-in-the-loop; real-time simulation platform; FPGA; discrete modelling for power electronics
EEACC: 1210; 7220 **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2026.04.002

基于高速 FPGA 的功率变换装置硬件在环仿真建模技术研究 *

吕舒康[1*], 袁晓冬[1], 曾 飞[1], 王 浩[2], 陈轶涵[2]
(1.国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103; 2.南京邮电大学自动化学院, 江苏 南京 210023)

摘 要: 硬件在环仿真作为工业场合常用的前期系统开发方案, 具有开发周期短、效率高、成本低等优势。针对功率变换装置的硬件在环仿真场景, 归纳并分析了四种具有代表性的硬件系统构建方案, 并完成了四种方案的比对和选择建议。此外, 功率变换电路的离散化建模是实现硬件在环仿真的重要前提, 归纳了四种建模方法, 分别为理想开关法、平均状态空间法、二值电阻法以及二值 LC 法, 最后针对基于节点电压方程的二值 LC 法的振荡与仿真功率损耗问题, 分析了其产生的原因, 并归纳了当前常用的改进方法。

关键词: 硬件在环仿真; 实时仿真平台; FPGA; 电力电子离散建模
中图分类号: TP15 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2026)04-0728-10

硬件在环仿真是目前工业界普遍采用的一种仿真技术, 它广泛用于车辆、电力、船舶、航空航天等诸多领域。它可以在工程投入运行之前尽可能还原出系统的整体性能, 提前发现不足并做出改进, 因此采用硬件在环仿真可以缩短开发周期、降低开发成本、提高研究的可行性[1-2]。

硬件在环仿真(Hardware in the Loop, HIL)是半实物仿真的一种, 另一种是快速控制原型(Rapid Control Prototype, RCP)。其中, 硬件在环仿真是实际的控制器+虚拟对象。

有别于 HIL 仿真, RCP 仿真是虚拟控制器+实际对象。快速控制原型是来自于制造业的快速原型(Rapid Prototyping, RP)的一种仿真技术, 它是一种控制系统设计方法, 通过快速开发控制算法和实时测试系统, 以加速控制系统的开发和测试过程[3]。文献[4]借助于 MATLAB/Simulink 软件建模仿真, 建立以宝马 I3 纯电动汽车各关键组件的仿真模型与控制策略的模型, 在理想环境中进行软件仿真验证, 并基于快速控制原型的思想, 设计搭建了以 dSPACE 为控制中心的复合储能系统能量管理策略快速控制验证平台, 搭配可编辑电力参数的外部电子负载设备, 完成了能量管理策略的半实物实验验证。文献[5]基于双向交-直-交变流器硬件控制系统, 使用 RT-Lab 数字实时控制器及快速控制原型技术, 完成了对基于空间矢量调制的网侧变流器矢量控制策略、磁场定向矢量控制策略的硬件系统验

项目来源: 国网江苏省电力有限公司科技项目(J2024072)
收稿日期: 2024-09-02 **修改日期**: 2024-10-09

证;并且对双向交-直-交变流器的整体控制进行了可行性验证。相较于硬件在环仿真,快速控制原型仿真在研发过程中,实际的系统出现意想不到的故障,甚至对开发人员造成人身伤害。文献[6]采用基于 MATLAB/Simulink 代码生成技术与 RTDS 实时仿真系统相结合的方法,以高压直流输电系统模型为研究对象,利用 Embedded Coder 开发工具对系统的控制模块进行代码生成,并在 RTDS 中完成代码移植实验。通过对比仿真波形,该方法能够有效利用 Simulink 良好的开发环境和 RTDS 的实时仿真特性,在离线仿真成功的基础上,完成实时仿真测试,使工作便捷高效,同时保证结果精准可信。

硬件在环仿真的被控对象和控制系统与快速控制原型是相反的,它是指将部分或整体被控对象用高速运行的实时仿真模型代替,控制系统采用实物与实时仿真模型进行连接。硬件在环仿真相较于快速控制原型有一些其自身的优势,在汽车发动机开发过程中,很多实验无法在原型机上完成,比如故障诊断、极限工况测试、超高转速实验等,由于发动机处于开发的过程中,开发人员对于发动机一些未知的因素掌握不全,因此会对开发人员造成伤害[7];又比如对新能源汽车充电桩做故障诊断时,如果采用原型机直接做故障,同样会引发不可逆的损害。因此,硬件在环仿真由于是将被控对象运行在虚拟板卡中,不会像快速控制原型那样造成实际损坏,同时,它也可以快速搭建对象平台,缩短开发周期,降低开发成本、提高研究可行性。文献[8]和文献[9]都未采用对实际充电桩进行故障诊断,而是采用人工智能中的深度学习的方法进行研究,大大降低了对系统和实验人员的威胁。

当前,为了提高功率变换装置的开发效率,降低开发周期和成本,出现了大量应用 HIL 仿真进行功率变换装置产品开发和技术研究的案例。文献[10]研究了由四个基于逆变器的源组成的系统,其广泛使用的 L 型和 RL 型下垂控制器进行操作,并通过 MATLAB/Simulink 进行仿真。基于控制器硬件在环(CHIL)的实验验证在 Typhoon HIL 中进行,并携带了线性、非线性和感应电动机负载,实验结果验证了控制策略不仅增强了功率共享,还有效抑制了由动态负载引起的振荡。文献[11]研究基于 FPGA 的 MMC 实时仿真建模方法,将每个桥臂的子模块进行分组,每组通过 FPGA 流水线架构提高计算效率,实验最终结果表明,所建立的模型可外接控制器,适用于系统级、阀级控制保护装置调试、大电网实时仿真等领域。文献[12]对永磁同步电机驱动系统进行了硬件在环仿真,搭建了 RT-LAB 实时仿真模型和 DSP 电机控制器,通过对比 Simulink 中的离线仿真,验证了 $i_d=0$ 的矢量控制方案,并通过对比搭建的永磁同步电机驱动系统的全实物实验平台,验证了所建立的永磁同步电机硬件在环仿真平台具有较高的准确度。文献[13]研究了电力牵引传动系统硬件在环仿真模型,分别推导出系统中的开关器件、逆变器和整流器不同状态下各自开关函数的逻辑表达式,同时考虑了变流器电流过零点时的换流情况,采用状态方程及矩阵方程分别对变流器和异步电机进行建模,并将数学模型集成在 FPGA 中加以实现,在 RT-LAB 实时仿真器上进行 HIL 仿真,验证了仿真平台的正确性。

上述文献均采用基于高速 FPGA 所构建的实时对象来模拟不同类型功率系统,由于 FPGA 并行计算的特性,可以大幅缩短仿真的步长,突破了中央处理器速度限制,实现了微秒级系统模型实时仿真,提高了 HIL 仿真系统的响应速度以及准确度。同时,对于硬件在环仿真来说,被控对象模型的准确度至关重要,不仅决定仿真精度,也会带来产品开发的周期变化[14-15]。

本文首先主要介绍了半实物仿真中快速控制原型和硬件在环仿真的技术特征,重点归纳了硬件在环仿真在电力电子方面的应用;第一部分分析并归纳了进行硬件在环仿真所需要的硬件系统构建方案,并根据所介绍的不同实时仿真平台阐述其在功率变换装置开发与研究背景下的应用情况;第二部分主要归纳和比较了多种功率变换装置的离散化建模方法,其也是实现其硬件在环仿真的模型前提,该部分主要介绍了四种建模方法并例举了在功率变换装置中的应用情况;最后,总结全文内容并阐述了功率变换装置在环仿真目前的所遇到的一些问题。

1　硬件在环仿真的硬件方案

硬件在环仿真是将被控对象运行于高速运行的实时处理器中,并通过控制器对其进行控制,因此需要实时处理器与上位机系统、控制器进行连接,图 1 所示为硬件在环仿真的整体结构[14]。

上位机系统控制硬件在环仿真进程,把被控对

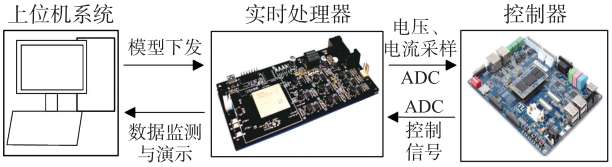


图 1　硬件在环仿真整体结构图

象模型发送至实时处理器中,控制器通过 I/O 接口取得数据,如电压、电流等信号,并将所产生的控制信号发送到实时处理器中的模型中,运行在实时处理器中的模型得到控制信号后做出响应,最终将得到的仿真数据发送回上位机系统,以方便开发人员观察数据[16-17]。目前主流硬件在环仿真方案(表1)有 RT-LAB 系统实时仿真平台、dSPACE 系统实时仿真平台、Simulink 系统实时仿真平台,NI 实时仿真平台[18],以及分立式硬件在环仿真平台[19-20]。

①RT-LAB 是由加拿大 OPAL-RT 公司开发的,具有多领域特征实时仿真平台,目前,它已成为工程师们快速开发和验证复杂应用的理想选择。RT-LAB 作为一款成熟的实时仿真平台,兼具灵活性和可拓展性,具有很好的开放性:其支持用户自定义开发模型(完全兼容 MATLAB/Simulink 与 SimPower System),支持众多第三方板卡、主流 I/O 和通信板卡,支持用户协议开发,支持众多第三方 IO 板卡[21]。文献[22]设计基于 RT-LAB 的高机动性装备半物理测试平台,通过 Simulink 构建了装备属性模型,基于 RT-LAB 高质量的硬件板卡支撑性能以及多核分布式并行运算,完成高机动性装备半物理测试仿真,最后将模型注入 RT-LAB 实时目标机,实现基于 RT-LAB 半物理的高机动性装备测试仿真。文献[23]研究了基于 RT-LAB 的 MMC 半实物仿真,设计了一种包含上位机、OP5600 硬件仿真机、模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)、数字和模拟仿真平台接口、控制保护系统的半实物仿真平台,详细阐述了该平台设计方案。同时分析了 MMC 控制系统结构,并结合电容电压分层的均压控制方式及基于比例谐振(Proportional-Resonant,PR)的环流抑制策略,实现了 MMC 稳定运行以及基于半实物仿真平台的实验验证。

②dSPACE 实时仿真平台由德国 dSPACE 公司开发,它是一种集控制系统、性能测试以及半实物仿真于一身的多功能工作平台。dSPACE 实时仿真平台非常适合高性能复杂算法的检验,它具有运算速度快,使用方便和界面友好等优点。

dSPACE 实时仿真平台功能强大,它既可以和实际控制对象相连(称为快速控制原型),此时充当控制器作用,也可以和实际控制器相连(称为硬件在环仿真),此时充当运行被控对象作用[24-25]。

文献[26]以 dSPACE 半实物实时仿真系统为基础,利用 dSPACE 与 MATLAB/Simulink 可以实现无缝链接的优势,将离线仿真模型通过试验进行快速验证,提高电机控制系统开发效率。此外,该研究还完成了基于 dSPACE 电机控制试验平台的设计。最后在此平台上实现永磁同步电机 SVPWM 矢量控制,验证了 dSPACE 电机控制试验平台进行控制算法开发的高效性。

③此外半实物仿真平台的另一大分支为瑞士 Speedgoat 公司的相关产品,该公司主力由 MathWorks 前员工组成,致力于提供专门针对 MATLAB/Simulink 环境的实时系统。Speedgoat 实时目标机作为 MATLAB/Simulink 官方实时仿真平台,能够无缝衔接 Simulink,其显著特点就是 All in Simulink,从建模、离线仿真、到实时仿真、调参监控,均可在 Simulink 环境完成。Speedgoat 实时仿真平台可以直接使用 Simulink 和强大的物理建模工具创建被控对象模型,可以直接将 Speedgoat I/O 驱动程序放置于 Simulink 模型中,并通过对话框配置信号参数[27]。整个实时仿真的过程均可在 Simulink 界面实现监控,并能够在实时运行中动态调整信号参数,这对于新手开发人员来说是非常方便的,从而能够缩短大型系统相关关键技术的开发周期[28]。文献[29]研究了一种针对独立微电网(Micro-Grid, MG)系统的网络攻击抗扰性次级频率控制(Secondary Frequency Control,SFC)方案。该方案基于一种混合系统,采用未知输入观测器进行状态估计、网络攻击检测与重构,并利用类型-2 模糊逻辑系统最小化可能由网络攻击引起的电网频率偏差。该研究最终通过使用 Speedgoat 实时数字系统仿真器验证了所提混合方案的可行性。

④NI 公司实时仿真平台 PXI,是一种基于 PC 的系统,结合了 PCIe 电气总线功能、模块化机箱、I/O 同步技术以及用户定义或特定应用测试软件。该平台主要由三部分构成:CRIO 实时控制器、可重配 FPGA 和 I/O 模块构成。CompactRIO 的 RIO(FPGA)核心内置数据传输机制,负责把数据传到嵌入式处理器以进行实时分析、数据处理、数据记录或与联网主机通信。利用 Lab VIEW FPGA 基本的 I/O 功能,用户可以直接访问 CompactRIO 硬件每个 I/O 模块的输入输出电路。所有 I/O 模块都包含内置的接口、信号调理、转换电路(如 ADC 或 DAC)以及可选配的隔离屏蔽[18]。

文献[30]研究了 NI PXI 电池管理系统硬件在环的整体架构设计及其 BMS 硬件在环测试平台关键技术,硬件设计和软件设计,及其其他附属单元以及相关板卡的选型和使用,BMS 控制器研究等;研究电池管理系统硬件在环仿真的测试平台实验与应用,研究硬件在环仿真测试的整体测试流程,并根据测试用例

对电池管理系统的安全性能、通讯功能等部分功能进行硬件在环测试,并对测试结果进行分析研究。

⑤分立式硬件在环仿真平台同前四个仿真平台不同,开发人员可以根据自己的需求来搭建仿真模型和硬件环境,这极大降低了搭建硬件在环仿真的成本,但此方案需要开发人员建立系统模型后,将其转换并优化为 FPGA 可识别的硬件语言,如 Verilog 或 VHDL 语言,这极大地增加了开发人员的工作量。

为了解决上述的问题,分立式硬件在环仿真平台可以采用 Xilinx 提供的可嵌入插件 System Generator,它是 Xilinx 公司在 ISE/Vivado 开发环境中提供的一个系统级建模工具,该工具可以和 MATLAB/Simulink 联合使用[31],对电路进行快速建模并完成模型代码的自动生成工作。

文献[32]利用 System Generator 软件平台,实现基于模块化建模方法的变换器建模,并简化语言编写控制系统的复杂过程。研究了从 MATLAB—Xilinx 环境中导出使用模块化建模方法搭建的控制算法。通过 MATLAB 仿真、软硬件联合仿真和实验进行验证,证明了将控制算法导出使用的可行性。

表 1　硬件在环仿真平台对比

仿真平台名称	特点	新手上手难度	成本
RT-LAB	可靠性高;灵活性和可拓展性强;实时性能强;仿真全程监测、在线调参	易	高
dSPACE	可靠性高;组合性强;过渡性好;实时性强;仿真全程监测、在线调参	易	高
Speedgoat	可靠性高;组合性强;过渡性好;实时性强;仿真全程监测、在线调参	易	高
NI	All in Simulink;新手友好,易上手;仿真全程监测、在线调参	较易	较高
分立式	需掌握一定硬件描述语言;开发人员需要一定经验;可根据需求自行搭建仿真平台,大幅度降低开发成本	难	低

2　基于硬件在环仿真的功率变换电路离散化建模方法

硬件在环仿真建模是进行硬件在环仿真前必不可少的一步,它是根据系统的物理意义推导出更具有广泛意义的数学表达式,因此采用不同的建模方法会影响硬件在环仿真的结果[33]。因为 FPGA 芯片是根据时钟信号周期进行运算的,而实际的电力电子电路中处理的信号是连续的,因此需要把电力电子电路进行离散化建模[34]。

目前,功率电路的硬件在环仿真建模方法主要有理想开关法、平均状态空间法、二值电阻法、二值 LC 及改进方法。

①理想开关法

理想开关法如图 2 所示,u_s 为支路两端电压,i_s 为支路流过的电流。导通时,开关是一根零阻抗导线,关断时,阻抗无穷大相当于断路。开关状态的转换是瞬间完成的,没有中间过程[35]。理想开关法是一种比较理想的状态,实际电路中很难实现,因此该方法局限性极大。用变量 s 表示开关的状态,当开关关断(off)时,此时 $s=0$,电路断开,通过开关两端电流为 0;当开关导通(on)时,此时 $s=1$,电路导通,开关两端电位差为 0。

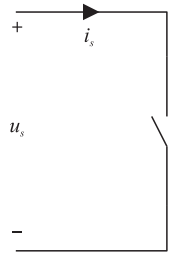


图 2　理想开关模型

$$\begin{cases} s=0 \Leftrightarrow \text{off} \Leftrightarrow i_s=0 \\ s=1 \Leftrightarrow \text{on} \Leftrightarrow u_s=0 \end{cases} \tag{1}$$

②平均状态空间法

状态空间(State-Space Representation)是控制工程中的一个名词。状态是指在系统中可决定系统状态、最小数目变量的有序集合[36]。而所谓状态空间则是指该系统全部可能状态的集合[37]。简单来说,状态空间可以视为一个以状态变数为坐标轴的空间,因此系统的状态可以表示为此空间中的一个向量。

状态空间表示法即为一种将物理系统表示为一组输入、输出及状态的数学模式,而输入、输出及状态之间的关系可用许多一阶微分方程来描述。状态空间表达式如(2)所示:

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=Ax+Bu \\ y=Cx \end{cases} \tag{2}$$

式中:A 代表状态矩阵,B 代表输入矩阵,C 代表输出向量,x 代表状态变量,u 代表输入向量,通常选取电感电流和电容电压作为状态变量[38]。

文献[39]研究了功率变换装置中的基础电路

Buck 电路,其拓扑如图 3 所示。

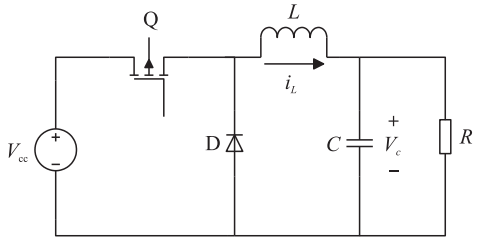


图 3 Buck 电路拓扑图

MOSFET(Q)和二极管(D)的开通(t_{on})和关断(t_{off})形成了不同电路基本关系式,当 MOSFET 导通时,二极管承受反压截止关断,由基尔霍夫电压定律和基尔霍夫电流定律,同时取流过电感上的电流和电容两端电压为状态变量时,可求得此时(t_{on})状态空间表达式:

$$\begin{pmatrix} \dfrac{\mathrm{d}i_L}{\mathrm{d}t} \\ \dfrac{\mathrm{d}V_c}{\mathrm{d}t} \end{pmatrix} = A_{on}x + B_{on}u \tag{3}$$

$$\begin{pmatrix} \dfrac{\mathrm{d}i_L}{\mathrm{d}t} \\ \dfrac{\mathrm{d}V_c}{\mathrm{d}t} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \dfrac{1}{L} \\ \dfrac{1}{C} & -\dfrac{1}{RC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_L \\ V_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \dfrac{V_{cc}}{L} \\ 0 \end{pmatrix} \tag{4}$$

当 MOSFET 关断(t_{off})时,此时二极管为电感 L 续流,同理,可以求得 Buck 电路此时的状态空间表达式:

$$\begin{pmatrix} \dfrac{\mathrm{d}i_L}{\mathrm{d}t} \\ \dfrac{\mathrm{d}V_c}{\mathrm{d}t} \end{pmatrix} = A_{off}x + B_{off}u \tag{5}$$

$$\begin{pmatrix} \dfrac{\mathrm{d}i_L}{\mathrm{d}t} \\ \dfrac{\mathrm{d}V_c}{\mathrm{d}t} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \dfrac{1}{L} \\ \dfrac{1}{C} & -\dfrac{1}{RC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_L \\ V_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{6}$$

一般来说,一个变换器的平均模型可以用一个表达式来表示其动态特性。用数学语言表示就是变换器在 t_{on}周期模型和 t_{off}周期模型的总和,其数学表达式见式(7):

$$\dot{x} = (A_{on}x + B_{on}u)d + (A_{off}x + B_{off}u)(1-d) \tag{7}$$

式中:占空比 d 即 MOSFET 导通时间(t_{on}),为输出电压 V_c 与输入电压 V_{cc}的比值,关断时间(t_{off})为导通时间的补值,其表达式见式(8):

$$\begin{cases} d = t_{on} = \dfrac{V_c}{V_{cc}} \\ t_{off} = 1 - t_{on} = 1 - d \end{cases} \tag{8}$$

由上述推导可得 Buck 电路系统特征:$A_{on} = A_{off}$,$B_{off} = 0$,$u = 1$,因此可求得平均状态空间表达式:

$$\begin{cases} \dot{x} = A_{on}x + B_{on}u \\ \dot{x} = \begin{pmatrix} 0 & \dfrac{1}{L} \\ \dfrac{1}{C} & -\dfrac{1}{RC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_L \\ V_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \dfrac{V_{cc}}{L} \\ 0 \end{pmatrix} d \end{cases} \tag{9}$$

以电容两端电压 V_c 和流经电感上的电流 i_L 为系统输出,输出向量 y 可以表示为:

$$\begin{cases} y = Cx \\ C = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \end{cases} \tag{10}$$

③二值电阻法

二值电阻法本质就是对电力电子器件进行离散线性化处理,然后借助线性电路的求解办法,节点电压法求解电路状态,得到电路的节点电压暂态,再结合此时的系统输入(功率开关管驱动)确定整个电路的开关模态,最后用阻值矩阵表示当前的开关模态,重复解矩阵方程,最终实现电力电子电路的迭代计算仿真[40]。

对于电力电子开关器件的离散化,将导通时开关器件看作小电阻,将关断时的开关器件看作大电阻,通过改变电阻值来模拟开关状态的改变。这种大小电阻切换的方式在开关状态发生变化时,保证了电路拓扑结构不变,仅有开关等效电阻值发生变化[40-41]。图 4 为开关器件等效示意图,开关器件的导通判断条件如式(11)和式(12)所示:

$$R = \begin{cases} R_{on} & g = 1 \\ R_{on} & (g = 0)\&(V_{sw} < 0) \\ R_{off} & (g = 0)\&(V_{sw} \geqslant 0) \end{cases} \tag{11}$$

$$R = \begin{cases} R_{on} & V_D > 0 \\ R_{off} & V_D \leqslant 0 \end{cases} \tag{12}$$

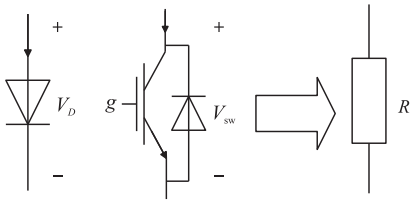


图 4 开关器件等效示意图

对于储能元件电感 L 和电容 C 来说,可以采用后向欧拉法和梯形积分法进行离散,分别得到其一阶差分模型和二阶差分模型[42]。电容 C 连续微分方程为:

$$i_c = C\frac{\mathrm{d}u_c}{\mathrm{d}t} \tag{13}$$

若采用后向欧拉法进行离散,可得到电容元件的一阶差分模型迭代公式:

$$\begin{cases} u_c^{n+1} \approx u_c^n + \dfrac{T}{C} i_c^{n+1} \\ i_c^{n+1} \approx \dfrac{C}{T} u_c^{n+1} - \dfrac{C}{T} u_c^n = G_c u_c^{n+1} - j_c^{n+1} \\ j_c^{n+1} = \dfrac{C}{T} u_c^n \end{cases} \tag{14}$$

若采用梯形积分法进行离散,可得到电容元件的二阶差分模型迭代公式:

$$\begin{cases} u_c^{n+1} \approx u_c^n + \dfrac{T}{2C}(i_c^{n+1} + i_c^n) \\ i_c^{n+1} \approx \dfrac{2C}{T} u_c^{n+1} - \left(\dfrac{2C}{T} u_c^n + i_c^n\right) = G_c u_c^{n+1} - j_c^{n+1} \\ G_c = \dfrac{2C}{T} \\ j_c^{n+1} = \dfrac{2C}{T} u_c^n + i_c^n \end{cases} \tag{15}$$

由此可以得到电容元件 C 离散迭代模型,如图 5 所示。

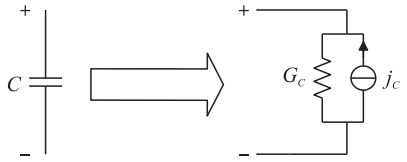


图 5　电容 *C* 离散迭代模型

电感 L 连续微分方程为:

$$u_L = L \frac{\mathrm{d}i_L}{\mathrm{d}t} \tag{16}$$

若采用后向欧拉法进行离散,可得到电感元件一阶差分模型迭代公式:

$$\begin{cases} i_L^{n+1} \approx \dfrac{T}{L} u_L^{n+1} + i_L^n = G_L u_L^{n+1} - j_L^{n+1} \\ j_L^{n+1} = -i_L^n \end{cases} \tag{17}$$

若采用梯形积分法进行离散,可得到电容元件的二阶差分模型迭代公式:

$$\begin{cases} i_L^{n+1} = i_L^n + \dfrac{T}{2L}(u_L^{n+1} + u_L^n) = G_L u_L^{n+1} + j_L^n \\ j_L^n = i_L^n + G_L u_L^n \\ G_L = \dfrac{T}{2L} \end{cases} \tag{18}$$

由此可以得到电感元件 L 离散迭代模型,如图 6 所示。

对于耗能元件 R 来说,在连续系统中就是线性和连续的,数学模型为常数函数。因此易知电阻的离散化线性模型与连续模型相比,只在时间上进行了离散化,其他特性不变[40]。图 7 为采用二值电阻法进行 Buck 电路离散迭代示意图,其中 MOSFET(Q)和二极管(D)分别由电阻 R_1 和 R_2 替代,电感 L 和电容 C 分别使用电导和电流源并联所得。

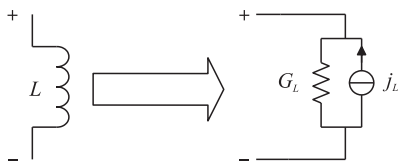


图 6　电感 *L* 离散迭代模型

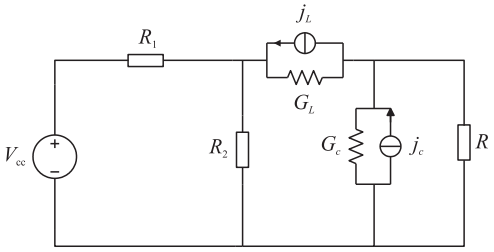


图 7　Buck 电路二值电阻法离散迭代示意图

文献[42]首先分析了器件模型和电路模型的离散化迭代计算过程,在此基础上使用开关函数与组合逻辑的方法改善了多电路模态的建模方法。其次,分析了离散迭代算法,从计算过程的角度分析,提出了一种改进的梯形法,通过使用历史数据提高运算速度。最后结合电力电子建模方法与数值算法提出了自上向下的 FPGA 程序设计流程,从程序结构的角度入手叙述了实时仿真平台的设计思路,分别在 Xilinx 和 Altera 两种 FPGA 中进行仿真计算,证明了仿真平台搭建方法的可兼容性。

文献[43]研究基于 FPGA 的电力电子电路实时仿真的建模方法,采用了状态方程法,建立起电路的状态方程模型,通过数值积分完成了仿真模型的离散化。同时,采用曲线拟合的方法来近似计算电力电子电路运行过程中功率模块产生的实时开关损耗。最后基于上述方法,以电压型桥式逆变器为例进行了实验研究,搭建了其基于单片 FPGA 的实验环境并将模型在 FPGA 硬件平台上运行的结果和 Plecs 中的仿真结果进行对比,结果验证了所采用的建模方法开关损耗拟合算法在单片 FPGA 上实现实时仿真的可行性和合理性。

④二值 LC 法

二值 LC 建模是一种近似的离散时间开关模型,它所描述的是单个开关器件的特性。理想的开关器件在导通时阻抗为零,在关断时电导为零,并且可以在很短的时间内进行两种状态的切换。将导通的开关等效为理想电感,关断的开关等效为理想电

容。因此,该方法被称为二值 LC 建模法[44]。图 8 所示为离散开关二值 LC 等效模型。

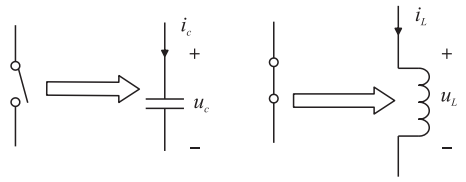


图 8 离散开关二值 LC 等效模型

对电感元件 L 和电容元件 C 进行离散后,可以使用统一的等效电路来表示,等效电路采用等效电导和电流源并联得到,如图 9 所示。

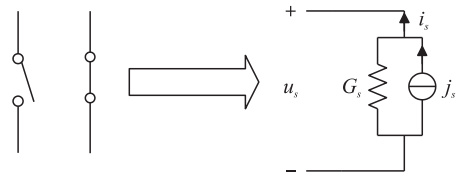


图 9 开关管等效电路

其数学表达式为:

$$i_s^{n+1}=G_s u_s^{n+1}-j_s^{n+1} \tag{19}$$

图 10 所示为 Buck 电路采用二值 LC 法离散迭代模型,它是在二值电阻法的基础上进一步进行改进,MOSFET(Q)和二极管(D)分别采用电导和电流源并联形成所得。

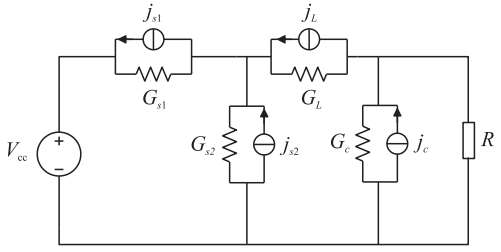


图 10 Buck 电路二值 LC 离散迭代模型

文献[45]介绍了一种对电力电子电路进行时域分析和建模的方法。所有电路元件(包括有源元件和无源元件)均采用传输线建模(Transmission Line Modeling,TLM)方法,通过传输线截面以离散方式建模。这种方法需要一个固定的系统矩阵,该矩阵只取决于电路配置和时间步长,而不取决于电路的开关状态。由于这种方法采用的是离散方法,因此它能提供离散模型的精确解,即使对于僵硬的网络也能保持稳定。

文献[46]描述了一种用于快速时域仿真带开关的分段线性网络的方法。该方法基于一种离散时间开关模型,该模型由一个与电流源并联的恒导体组成。在每个仿真步骤中,电流源的值作为已知网络信号的函数进行更新。该函数根据开关的状态(开启或关闭)采取两种形式之一。由于系统矩阵是恒定的,无论开关的状态如何,仿真时间基本上与同等复杂度的线性时不变网络相同。

为了减少开关在暂态过程中产生的数值振荡问题,在二值 LC 建模基础上,又产生了改进的二值 LC 建模法,开关关断时,等效电容 C 串联电阻 R,而开关导通时仍然采用电感 L 去替代[47-48],图 11 所示为离散开关改进二值 LC 等效模型。

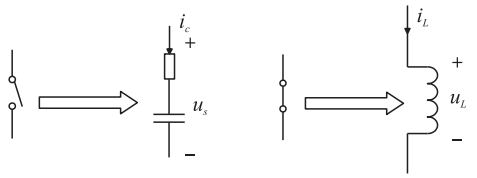


图 11 离散开关改进二值 LC 等效模型

对于电容和电感来说,其物理特性存在充电和放电过程,而如果单纯地把开关等效成电感和电容必然会带来开关的暂态误差。当采用二值 LC 法进行建模时,在开关状态改变时会有能量的损失,即当开关从闭合变为断开时,原先存储在电感中的能量会消失;当开关从断开变为闭合时,原先存储在电容中的能量会消失。结合电感电容的一阶差分模型迭代公式,可得到式(20):

$$E_{\text{loss}}\approx E_L+E_C=\frac{1}{2}LI_s^2+\frac{1}{2}CU_s^2=\frac{1}{2}\frac{T}{G_s}I_s^2+\frac{1}{2}G_s\cdot T\cdot U_s^2 \tag{20}$$

式中:E_L 代表开关等效成电感后能量损耗,E_C 代表开关等效成电容后能量损耗,I_s 代表开关等效成电感后其上通过的电流,U_s 代表开关等效成电容后其两端电压。

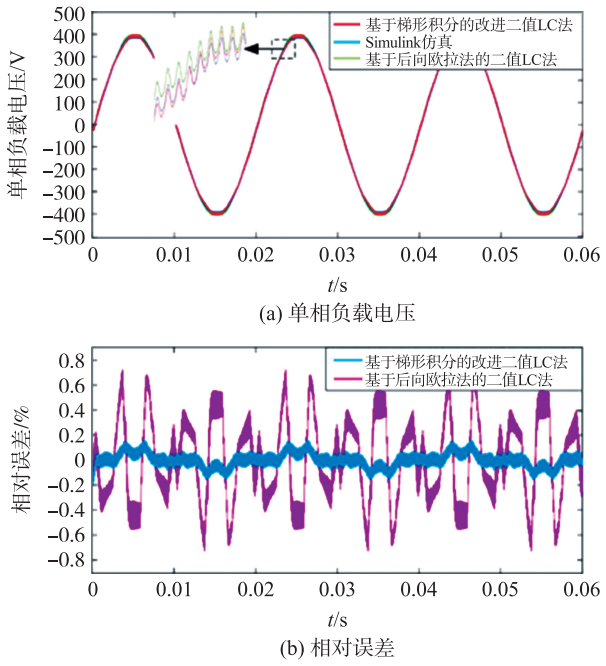
根据上式的推导可以采用如下的方法来减少仿真产生的开关损耗:

选择小的仿真步长:从如上的公式推导可以得出,仿真步长和开关损耗是成正比的。所以小的仿真步长有利于减小由于建模方法引起的开关损耗,小的仿真步长也有利于得到更准确的仿真结果。选择合适的参数 G_s:从电感和电容存储能量的公式可以分析出,大的 G_s 会减小由于电感带来的损耗,小的 G_s 会减小由于电容带来的损耗。所以对于 G_s 的选择需要做出权衡。

对于能量损耗问题,文献[49]针对电力电子硬件在环仿真内存消耗问题,尤其是基于 FPGA 的实时系统,主要将电感 L 和电容 C 开关模型与状态空间表示相结合,以减少常规状态空间方法的内存消耗。此外,在传统的二值 LC 的基础上进行了改进,

以减少在开关状态变化时的瞬态现象。

图 12 为文献[50]采用基于梯形积分法的改进二值 LC 建模法的仿真结果。



(a) 单相负载电压

(b) 相对误差

图 12　仿真波形

将 Simulink 中的仿真结果和采用基于后向欧拉法的二值 LC 建模法的仿真结果进行对比,图 12(a)所示为三相逆变器的负载电压在采用基于梯形积分的改进二值 LC 建模方法、基于后向欧拉法的二值 LC 建模方法以及 Simulink 仿真下的输出波形;图 12(b)所示为其相对误差,可以观察到不管是使用改进的二值 LC 法还是使用二值 LC 法进行建模,其相对误差均在 1%以内,由此可知引入二值 LC 电路所造成的电感电容充放电现象对系统级电路的输出结果造成的影响很小,证明了二值 LC 等效电路的正确性。同时,采用改进二值 LC 法得到的相对误差要比采用二值 LC 法得到的相对误差更小,表明了改进的二值 LC 建模方法的优越性,可以有效抑制电压波动,提高模型精度。

本节主要介绍了四种基于 FPGA 的电力电子电路硬件在环仿真建模方法。理想开关法是开关理想的状态,局限性很大,使用很少,可与其他方法结合使用;平均状态空间法是根据开关在开通和关断时出现不同电路拓扑列写基本电路方程,并选取状态变量(常选取电容两端电压和流过电感的电流),最终得到平均状态方程,它的建模过程相较简单,但它只能体现状态变量的变换情况,不能体现开关管中电压变化情况[50];二值电阻法是把开关管在开通和关断时分别使用小电阻和大电阻去替代,但它需要根据开关信号判断系统矩阵是否发生变化;二值 LC 法是根据开关管开通和关断时分别使用电感 L 和电容 C 替代,优点是相较于二值电阻法不需要重新生成系统矩阵,缺点是容易产生数值振荡,因此在此基础上产生了改进二值 LC 法,即开关管在关断时使用电容 C 和电阻 R 串联,而开通时仍使用电感 L 替代,为了进一步减小开关损耗,可以选择小的仿真步长或者选择合适的 G_s 参数。

上述四种方法具有不同的特点,需要根据系统复杂程度以及应用场景去选择。目前将硬件在环仿真技术应用于功率变换装置的故障诊断是一重要的应用和研究方向,它可以使用硬件在环仿真降低开发人员的人身危害,且故障具有瞬变的特点,不易捕获和浮现[51-52],采用硬件在环仿真可以更好地对其故障再现及诊断故障,为下一步的开发奠定基础。针对故障诊断,建模方法宜选择改进二值 LC 方法,结合节点电压方程提高功率电路建模和本体硬件故障诊断策略精度和速度的硬件在环验证。

3　总结

本文对电力电子硬件在环仿真的实时仿真平台以及离散建模作了介绍,随着数字计算机技术、现代控制理论的进一步发展,硬件在环仿真在电力电子方面的应用能够得到更好的发展。但与此同时,硬件在环仿真虽然具有更好的实时性,但进行硬件在环仿真会带来成本和开发难度之间的矛盾。目前市场上已有成熟硬件在环仿真平台方案,但其价格较为昂贵,其价格在数十万至上百万之间,分立式的硬件在环仿真虽然不会花费几十上百万,但其在搭建过程中难度较大,工程师需要同时具备电力电子、FPGA 开发相关知识,该项技术具有技术壁垒。未来需要更多技术人员开发分立式硬件在环仿真,以提高实时性、缩短产品开发周期并降低开发成本,推动其在更多应用背景下的推广。

参考文献:

[1] 丁晟,董天天,郑雪芳,等. 基于 FPGA 的自动驾驶 HIL 视频注入系统设计[J]. 电子器件,2023,46(4):1075-1082.

[2] 葛兴来,冯晓云,韩坤,等. 三电平牵引变流器无拍频控制的硬件在回路实时仿真[J]. 电工技术学报,2014,29(8):204-210.

[3] 丁荣军. 快速控制原型技术的发展现状[J]. 机车电传动,2009(4):1-3,15.

[4] 汪亚飞. 电动汽车复合储能系统能量管理策略及其快速控制原型验证[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2020.

[5] 夏锐. 面向风力发电的双向交-直-交变流器研究与设计[D]. 成都:电子科技大学,2023.
[6] 赵晓龙,陈卓,李强胜,等. MATLAB/Simulink 代码生成技术在 RTDS 上的应用[J]. 现代电子技术,2020,43(9):161-165.
[7] 位正. 新一代硬件在环仿真平台的研究和开发[D]. 北京:清华大学,2009.
[8] 刘梓强,金涛,刘宇龙,等. 基于张量重构融合诊断的电动汽车直流充电桩开路故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报,2023,43(5):1831-1843.
[9] 赵翔,陈良亮,李明贞,等. 一种基于深度神经网络的直流充电桩故障诊断方法[J]. 电测与仪表,2021,58(6):148-152.
[10] Khan I, Vijay A S, Doolla S. Evaluating Power Sharing Performance of Distributed Generators in Microgrids with Hybrid Sources and Mixed Tie-Lines[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2023,59(5):5363-5375.
[11] 王宇,刘崇茹,李庚银. 基于 FPGA 的模块化多电平换流器实时仿真建模与硬件在环实验[J]. 中国电机工程学报,2018,38(13):3912-3920,4033.
[12] 林潜. 永磁同步电机驱动系统的硬件在环半实物仿真平台研究[D]. 北京:北京交通大学,2014.
[13] 郝琦,葛兴来,宋文胜,等. 电力牵引传动系统微秒级硬件在环实时仿真[J]. 电工技术学报,2016,31(8):189-198.
[14] 袁佳琦. 电力电子硬件在回路仿真系统建模及 FPGA 资源优化方法的研究[D]. 北京:北京交通大学,2019.
[15] 樊振东. 功率硬件在环仿真系统的稳定性及接口算法研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2019.
[16] 万洪宇. 基于 FPGA 的电力电子硬件在环仿真研究[D]. 青岛:青岛科技大学,2017.
[17] 李月芳,梁瑞宇. 一种分布式风力机信息采集和状态监测系统的设计[J]. 电子器件,2016,39(5):1270-1274.
[18] 郑国,杨锁昌,张宽桥. 半实物仿真技术的研究现状及发展趋势[J]. 舰船电子工程,2016,36(11):8-11.
[19] 邵志一,杨坤博,陶浩栋,等. 改进型开关磁阻发电机功率变换器及其数据与电能同步传输策略[J]. 电力工程技术,2026,45(2):30-40.
[20] 尤浩哲. 基于 FPGA 的永磁同步电机驱动系统建模与实时仿真技术[D]. 合肥:合肥工业大学,2021.
[21] Noureen S S, Roy V, Bayne S B. An Overall Study of a Real-Time Simulator and Application of RT-LAB Using MATLAB Simpowersystems [C]//2017 IEEE Green Energy and Smart Systems Conference (IGESSC), Long Beach, CA, USA, IEEE, 2017:1-5.
[22] 逯云杰. 基于 RT-LAB 的高机动性装备半物理测试平台设计[J]. 现代电子技术,2018,41(16):183-186.
[23] 张冀川,徐家斌,童亦斌,等. 基于 RT-LAB 的 MMC 半实物仿真平台设计[J]. 电力电子技术,2016,50(3):26-28.
[24] 王玉伟. 基于 DSPACE 的 ESP 硬件在环仿真实验台的开发[D]. 长春:吉林大学,2011.
[25] 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.
[26] 宋国强. dSPACE 电机控制平台设计与 SVPWM 矢量控制实现[J]. 电机与控制应用,2015,42(9):23-26.
[27] 朱德清. 基于 Speedgoat 的同步电机静止变频起动系统设计与实现[D]. 成都:电子科技大学,2022.
[28] 李博文. 基于 Speedgoat 的抽水蓄能机组静止变频起动控制策略研究[D]. 成都:电子科技大学,2021.
[29] Aluko A O, Musumpuka R, Dorrell D G. Cyberattack-Resilient Secondary Frequency Control Scheme for Stand-Alone Microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2023,70(2):1622-1634.
[30] 胡泽军. 电池管理系统硬件在环仿真测试[D]. 重庆:重庆理工大学,2019.
[31] 徐文波,田耘. Xilinx FPGA 开发实用教程[M]. 北京:清华大学出版社,2012:15-26.
[32] 刘朝勇,王绥超,郑先成. 基于 System Generator 模型导出法的 Boost 变换器控制[J]. 电子技术应用,2017,43(7):59-62.
[33] 齐鲲鹏. 柴油机准维模型建模及共轨喷油系统硬件在环仿真研究[D]. 大连:大连理工大学,2010.
[34] 许为,应婷,李卫红. 电力电子半实物仿真技术及其发展[J]. 大功率变流技术,2014,(6):1-5.
[35] 汪然,苏建徽,施永. 基于 FPGA 的电力电子系统实时仿真算法[J]. 电力电子技术,2021,55(5):87-89.
[36] Nagrath I J, Goral M. Control System Engineering[M]. New Delhi, India: Wiley Eastern Limited, 1985:450.
[37] 朱福喜,朱三元,伍春香. 人工智能基础教程[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
[38] Pinto S J, Panda G, Peesapati R. An Implementation of Hybrid Control Strategy for Distributed Generation System Interface Using Xilinx System Generator[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics,2017,13(5):2735-2745.
[39] Cervantes M H, Ramírez M C G, Téllez-Anguiano A C, et al. Design of a Hardware in the Loop scheme in DC-DC Converters Using LabVIEW FPGA[C]//2020 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing(ROPEC), Ixtapa, Mexico, 2020:1-6.
[40] 徐正洋. 基于二值电阻的电力电子半实物仿真建模研究[D]. 南京:南京大学,2016.
[41] 秦朗. 基于 FPGA 的双有源桥 DC/DC 变换器建模与实时仿真技术[D]. 合肥:合肥工业大学,2021.
[42] 施文. 基于 FPGA 的高频电力电子电路定点数实时仿真算法研究[D]. 天津:河北工业大学,2019.
[43] 杨颖华. 基于 FPGA 的电力电子电路的实时仿真研究

[D]. 天津:河北工业大学,2017.
[44] 汪然. 基于 FPGA 的光伏并网系统建模与实时仿真技术[D]. 合肥:合肥工业大学,2021.
[45] Hui S Y R, Christopoulos C. A Discrete Approach to the Modeling of Power Electronic Switching Networks [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1990, 5(4): 398-403.
[46] Pejovic P, Maksimovic D. A Method for Fast Time-Domain Simulation of Networks with Switches[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1994, 9(4): 449-456.
[47] Dagbagi M, Hemdani A, Idkhajine L, et al. FPGA-Based Real-Time Hardware-in-the-Loop Validation of a 3-Phase PWM Rectifier Controller [C]//IECON 2013: 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Vienna, Austria, 2013: 5374-5379.
[48] Maguire T, Giesbrecht J. Small Time-Step(<Z μSec) VSC Model for the Real Time Digital Simulator[C]//2005 International Conference on Power Systems Transients, Montreal Q C, Canada, 2005: IPST05-168.
[49] Kiffe A, Witting K, Puschmann F. Simulation of a Vienna Rectifier Using a Fixed State-Space Approach [C]// PCIM Europe Digital Days 2020: International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nuremburg Germany, 2020: 1-6.
[50] 应鹏飞. 基于 FPGA 的 DC/AC 建模与实时仿真技术[D]. 合肥:合肥工业大学,2021.
[51] 孙博宇. 地铁牵引逆变器的故障诊断研究[D]. 南京:东南大学,2017.
[52] 袁臣虎,米璐晗,周佳文,等. 融合光伏的直流配电网光伏线路极间故障暂态分析[J]. 现代电子技术,2022,45(15):164-168.

吕舒康(1993—),男,汉族,浙江嘉兴人,博士,工程师,研究方向为电力电子及车网互动技术,jsdky_tsk@163.com;

袁晓冬(1979—),男,汉族,江苏无锡人,硕士,研究员级高级工程师,研究方向为新能源并网及电动汽车车网互动;

曾　飞(1984—),男,汉族,江西赣州人,硕士,高级工程师,研究方向为电动汽车车网互动及配电自动化;

王　浩(2000—),男,汉族,江苏徐州人,硕士研究生,研究方向为电力电子实时仿真;

陈轶涵(1982—),男,汉族,浙江台州人,博士,副教授,研究方向为功率电子变换及可再生能源技术。