

多光伏逆变器并联的小步长硬件在环仿真研究

谭伟¹, 王志鹏¹

(1.上海科梁信息工程股份有限公司, 上海市 200233;)

摘要: 光伏并网逆变器是光伏阵列与电网的连接装置, 其控制策略的优化和效果对整个光伏并网系统起着关键的作用。随着光伏电站容量的不断增大, 多逆变器并联的结构被越来越多的采用, 越来越多的开关器件给光伏并网逆变器的控制策略验证也带来了新的挑战。本文基于 RT-LAB 平台, 采用 FPGA 实时仿真器, 实现了多逆变器并联的次微秒步长实时仿真, 搭建了四组 T 型三电平光伏逆变器并联的硬件在环仿真平台, 为多逆变器并联的或异形结构逆变器的控制策略验证及优化提供了一种快速、有效的验证方法。仿真结果表明该平台和硬件在环仿真方法的有效性。

关键词: 光伏逆变器; 多逆变器并联; 硬件在环; FPGA ; RT-LAB

Research on HIL Simulation of Multi-Photovoltaic Inverters in Parallel

Tan wei¹, Wang zhipeng¹

(1.Shanghai KeLiang Information Tech. & Eng. Co.,Ltd, Shanghai 200233)

Abstract: Grid-connected inverter is the connection device between PV array and grid, whose control strategy plays a key role in the whole PV grid-connected system. With the increasing capacity of photovoltaic power plants, multi-inverter parallel topology is used more and more, but the more switches brings many new challenges to control strategy validation of the inverters. Based on the RT-LAB platform, this paper implement the real-time simulation of multi-inverter parallel with FPGA real-time simulator under 1 microsecond. Then a Hardware in the loop(HIL) simulation platform of a four T-type three-level photovoltaic inverter in parallel is builtd, which provides a fast and effective test method for the verification and optimization of multi-inverter parallel topology or special inverter topology. Finally, the simulation results verify the effectiveness of the platform and HIL simulation method.

Key words: PV inverter; multi-inverter parallel; HIL; FPGA; RT-LAB

0 引言

能源是人类社会发展的必备的基础,随着人口数量的快速增加和人类社会持续、高速的发展,能源短缺已经成为当今社会的重大问题,同时由于煤炭、石油、天然气等传统能源的持续大规模的开发与利用,使得人类面临的环境形势越来越严峻,如温室效应、酸雨以及最近几年,我国有些地方持续出现雾霾天气,严重阻碍了交通运输,影响市民的身体健 康,给人民的日常生活造成极大不便,给国家形象造成极大的负面影响^[1]。

太阳能具有取之不尽、用之不竭、分布广泛、环境友好等优势。作为一种新型能源,研究太阳能并网发电,是解决能源危机以及环境污染的重要方式之一,同时因其具备广阔的应用前景而在国内外得到迅速发展。光伏并网逆变器是太阳能发电系统的关键部件,其性能和控制策略的优劣不仅影响和决定着整个光伏发电系统稳定、安全、可靠、高效地运行,同时也是影响整个系统使用寿命的主要因素^[2]。

随着光伏并网电站容量的不断扩大,一方面为了优化并网逆变器的容量配置,提高功率跟踪效率及故障冗余运行的能力,越来越多的光伏电站采用了多逆变器并联的系统结构^[3,4],另一方面,大规模光伏电站并网发电对电网的经济稳定运行、优化调度配置及配电网设计提出了更高的要求,新的控制功能以及更先进的控制策略需要被考虑到光伏逆变器的控制器中。目前电力电子器件的离线暂态仿真方法已较为成熟,但暂态实时仿真作为硬件在环(Hardware in the loop, HIL)仿真中保护设备调试、控制器设计与功能验证以及新型电路拓扑物理特性研究试验的重要手段,仍是一项充满挑战性的工作。在仿真中,电力电子设备的存在本身就会造成系统矩阵时变、步长内发生事件以及数值振荡等问题^[5],而采用多逆变器并联结构的光伏发电单元通常包含数十个开关器件,常规的基于 CPU 架构的实时仿真平台已经很难满足对其的仿真精度要求。本文介绍了一种基于 FPGA 的、可以迅速、方便的搭建不同电力电子装置的小步长硬件在环仿真实硬件在环仿真实现方法,并将其应用到了四组 T 型三电平逆变器并联的光伏逆变器中,通过与离线仿真结果对比,验证了该方案的有效性 及准确性。

1 基于 FPGA 的硬件在环仿真平台

1.1 基于 CPU 与 FPGA 的实时仿真对比

常规的实时仿真设备基于 CPU 或者 DSP 处理

器,其通常通过非实时系统与实时系统的代码转换以软件的方式实现算法及模型的实时执行,其具有实时代码生成快、建模简单的特性。然而传统的实时仿真器算法的执行方式为串行方式,使得其仿真步长只能达到数十微秒,甚至更大,很难适应分布式发电等电力电子高频领域。同时,由于实时仿真需使用定步长方式进行计算,而定步长仿真算法仅可在步长的整数倍时刻检测到开关状态,当步长较大时,这将不可避免的导致开关动作时间延迟,而造成仿真结果与实际结果不符。

现场可编程门阵列 FPGA 作为最新的实时仿真设备,其最大优点在于采用硬件语言描述、高度并行性、内存分布性以及流水线架构,其仿真步长可以达到纳秒级别,较常规的实时仿真器提升了数十倍,但由于 FPGA 编程复杂需要考虑不同的时序问题、所需布局布线所需时间太长,给仿真调试过程和算法研究人员带来了极大的不方便。然而毋庸置疑的是,随着 FPGA 上计算资源密度越来越高、成本逐渐降低以及 IP 核的日益丰富与先进,FPGA 将成为分布式发电系统暂态实时仿真最有力的工具。

表 1 基于 CPU 与 FPGA 的仿真平台对比

项目	CPU	FPGA
算法实现形式	软件	硬件
算法执行方式	串联	并行
实时代码生成	较快	非常慢
仿真步长	10-100us	0.2-1us

1.2 基于 eHS 的 FPGA 仿真技术

eHS,即 electrical Hardware Solver,是由 OPAL-RT 开发的一种针对电力电子高速实时仿真的基于 FPGA 的浮点型模型解算技术^[6,7]。该技术采用离散化的普约维奇(Pejovic)法,并结合图形化的 FPGA 编程设计,无 FGPA 硬件语言描述的门槛,可以极大的提高研究人员开展对电力电子的 FPGA 建模与功能调试。

1.离散化的普约维奇(Pejovic)法

基于 FPGA 实现电力电子设备的实时仿真计算最大难点在于对开关器件的建模与解算方法。在电力电子仿真中,由开关动作对解算结果产生的影响很大程度取决于仿真步长。当真步长越小时,一方面由同步开关仿真造成的误差将变得越小,另一方面由多重开关出现的频次也越少。综合考虑电力电

子设备实时仿真的解算精度及计算规模，eHS 在采用小步长仿真的同时应用离散化的普约维奇解算方法，以避免矩阵因子化计算以及大量逆矩阵带来的存储压力和计算压力，将仿真步长尽量最优化。

在电力电子仿真中，开关将具备两种不同的状态，即导通和关断。在离散化的普约维奇解算方法中，将开关导通和关断状态分别视为电感和电容，进而通过离散化处理，将其进行诺顿等效为一个电流源并联一个电阻，如下所示：

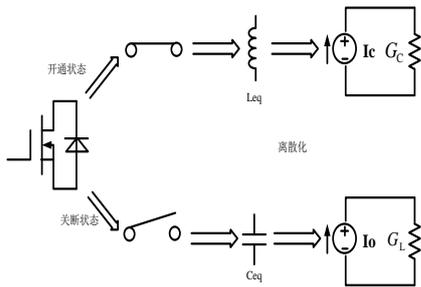


图 1-1 开关的不同状态等效示意图

对于开关导通状态有：

$$Leq \frac{dI_{Leq}}{dt} = U_{Leq} \quad (1)$$

采用后向欧拉法，对式(1)进行离散化处理，可得：

$$I_{Leq}(t) = I_{Leq}(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{Leq} \cdot V_{Leq}(t) \quad (2)$$

令

$$\begin{cases} I_{LeqHist}(t) = I_{Leq}(t) \\ G_L = \frac{\Delta t}{Leq} \end{cases} \quad (3)$$

有

$$I_{Leq}(t) = I_{LeqHist}(t - \Delta t) + G_L \cdot V_{Leq}(t) \quad (4)$$

采用同样的分析方法，对于开关关断状态有：

$$I_{Ceq}(t) = I_{CeqHist}(t - \Delta t) + G_C \cdot V_{Ceq}(t) \quad (5)$$

其中，

$$\begin{cases} I_{CeqHist}(t) = -\frac{Ceq}{\Delta t} \cdot V_{LeqL}(t) \\ G_C = \frac{Ceq}{\Delta t} \end{cases} \quad (6)$$

由上述分析可得，在对开关器件进行离散等效之后，其输出电流特性可以由电流的历史值和当前电压表征，与此同时令：

$$G_L = G_C = Gs \quad (7)$$

即：

$$\begin{cases} Leq = \frac{\Delta t}{Gs} \\ Ceq = \Delta t \cdot Gs \end{cases} \quad (8)$$

上式中 Δt 为 FPGA 的仿真步长，通常为几百纳秒，Gs 为一个可以调整 IGBT 等效特性的可调参数，若上式满足，既可保证开关状态切换时系统的导纳矩阵不变，从而极大地提高计算速度、缓解了存储压力。

2. 图形化的 FPGA 建模方式

常规的 FPGA 建模采用硬件语言描述，开展 FPGA 的建模，不但需要对不同的 FPGA 硬件有足够的了解，还需要掌握相应的开发编程软件，给算法研究人员开展电力电子的 FPGA 小步长仿真带来了极大的不便。eHS 仿真算法，充分结合了图形化建模与 FPGA 可重构的技术的优势，可以将按照一定规则的 Simulink 模型、PLECS 模型或者 PSIM 模型，直接下载到高精度的 FPGA 仿真器中解算，为开展分布式电源及电力电子设备的小步长仿真，提供了极大的方便。

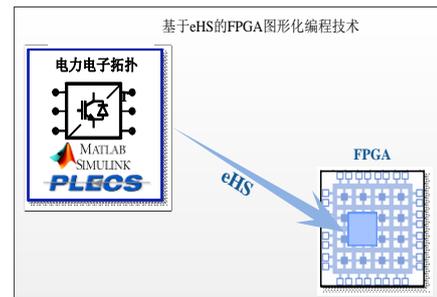


图 1-2 图形化 FPGA 建模方式示意图

如图 1-2 所示，利用 eHS 仿真技术，研究人员即可摆脱 FPGA 硬件知识及软件编程语言的束缚，方便的使用 FPGA 硬件平台，开展仿真研究。该平台的主要优势体现在如下几点：

1. 支持 Simulink 模型、PLECS 模型或者 PSIM 模型自动转化，对使用这些仿真软件开展离线仿真研究的人员，使用 eHS 平台，可在短时间内开展 FPGA 实时仿真，甚至数分钟即可。

2. 无需丰富的 FPGA、VHD 等编程语言的知识，方便开发人员专注所关心的算法研究。

3. 在线修改 IGBT、RLC 等电器元件参数，实时观察运行结果的动态变化，给仿真研究带来了极大地方便。

4. 极小的接口延时。得益于 FPGA 高速并行的计算能力、高频时钟及直接管理 IO，采用 FPGA 实

时仿真平台与外部控制器进行硬件在环仿真时，整个闭环的接口延时将只有几个微秒。

2.基于 eHS 的多光伏逆变器并联的次微秒硬件在环仿真开发

2.1 系统组成

基于 eHS 的多光伏逆变器并联的次微秒硬件在环仿真平台原理图见图 2-1 所示。

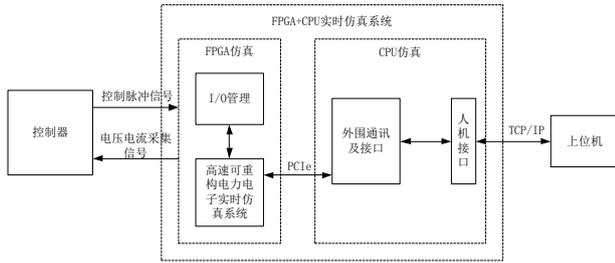


图 2-1 伏逆变器硬件在环仿真平台原理图

由图 2-1 可知，光伏逆变器硬件在环仿真平台共包括三大部分：上位机、实时仿真系统及控制器。

上位机。上位机可为普通的 PC 机，运行在 Windows 或者 XP 系统，并需要安装有相应的离线建模软件，如 Simulink 或者 PLECS 等。其主要功能为离线建模、离线数据分析及实时仿真的管理。

实时仿真系统。实时仿真系统包括两个部分 CPU 平台和 FPGA 平台。其中 FPGA 平台为 eHS 的实时仿真平台，进行模型的小步长实时解算，而 CPU 平台则主要作为上位机与 FPGA 平台的通讯接口及实时数据存储。实时仿真系统中 CPU 与 FPGA 之间的通讯采用的是高速的 PCIe 协议，而由于对实时仿真系统与上位的通讯速率要求不高，故采用的是常用的 TCP/IP 协议。

控制器。光伏逆变器控制器为真实的待测设备，是整个光伏发电系统的核心部件。在基于模型的开发流程中，首先会依据并网光伏逆变器的控制框图建立系统仿真模型，对各个模块及系统的整体功能进行离线仿真分析，调整控制策略、控制参数及关键的主电路参数，验证控制算法和策略的有效性，并进行优化设计。在仿真分析满足设计要求之后，将控制器模型实现到真实的控制器如 DSP 或者 FPGA 中，进行硬件在环仿真实验，以解决控制器算法在离线仿真时波形完好而实际控制器控制误差较大的问题。

综上光伏逆变器硬件在环仿真系统连接示意图如 2-2 所示。从图中可以看出采用基于 FPGA 的硬件在环仿真接口延时大约为 2us，较采用基于 CPU 的硬件在环仿真数十个微秒的接口延时，更加

逼近实际情况，可信度更高。

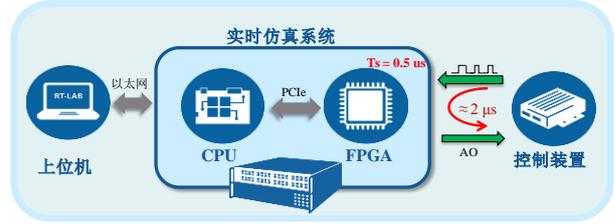


图 2-2 基于 FPGA 硬件在环仿真连接示意图

2.2 多光伏逆变器并联模型开发

考虑到本文研究的重点为多逆变器并联，故不考虑光伏发电系统的光伏板及升压电路，直流侧以电压源等效，其拓扑如图 2-3 所示。

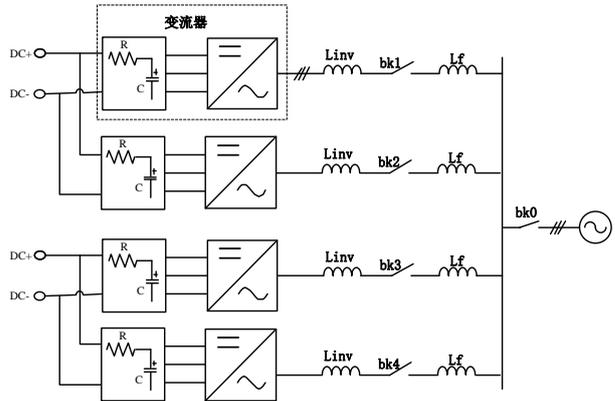


图 2-3 多逆变器并联拓扑图

如图 2-3 所示，实验所研究的对象为四组逆变器并联的拓扑结构，每两组采用了共直流侧的方式，其中核心部件变流器采用了 T 型三电平的结构，如图 2-4 所示。

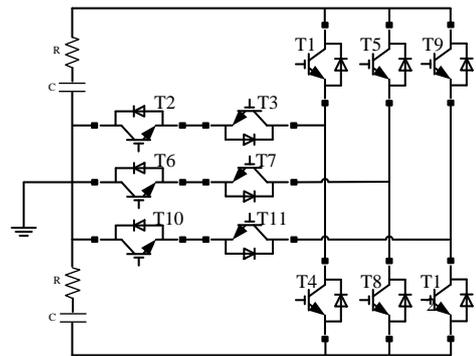


图 2-4 变流器结构

从多光伏逆变器并联拓扑中，可以得出该拓扑具有 63 个开关器件和 32 个状态量。

在基于 eHS 的 FPGA 仿真技术中，首先利用仿真软件 MATLAB/SimPowerSystem 建立四组光伏逆变器并联的拓扑模型（如图 2-5 所示）

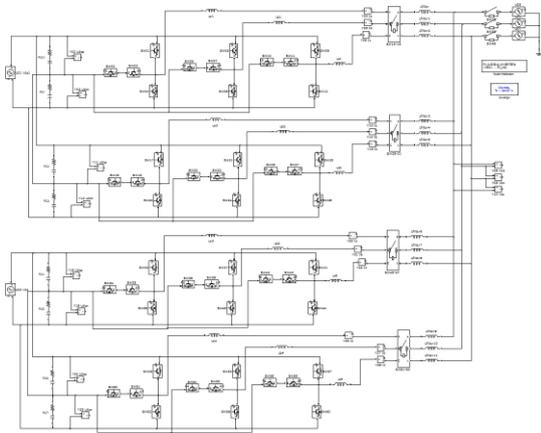


图 2-5 多逆变器并联模型拓扑

然后通过 eHS 的解算模块调用该模型,如图 2-6 所示,即可完成多逆变器并联对象的 FPGA 建模。

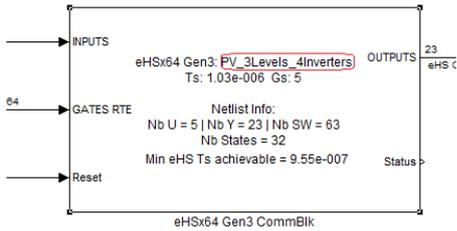


图 2-6 eHS 调用模型

从图 2-6 我们可以得出, eHS 所获取的开关个数及状态信息与理论相符,同时该模型共设置了 5 个输入及 23 个输出,特别的可以看出使用该算法是的模型在 FPGA 中运行的最优步长约为 1us。

最后进行外面接线,将仿真对象输入输出与控制器进行交换,即可建立多光伏逆变器并联的 FPGA 硬件在环仿真。

3 仿真验证

设置仿真参数为 $R=0.001\text{ohm}$, $L_{inV}=0.12\text{mH}$, $L_f=0.04\text{mH}$, $C=100\text{uF}$ 。进行了离线仿真与基于 eHS 的 FPGA 的硬件在环仿真结果进行了对比,结果分别如下,其中电压的基准值为 315V、功率的基准值为 500kW。

1. eHS 硬件在环仿真

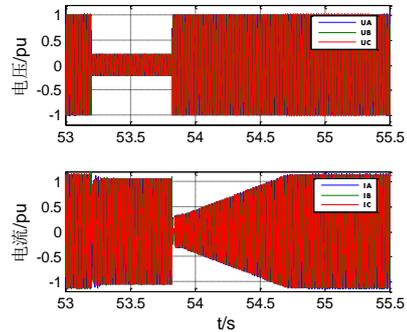


图 3-1 硬件在环仿真电压电流（全）

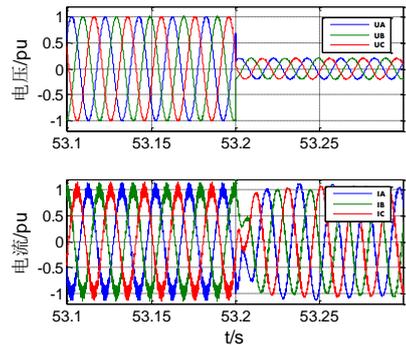


图 3-2 硬件在环仿真电压电流稳态及跌落过程

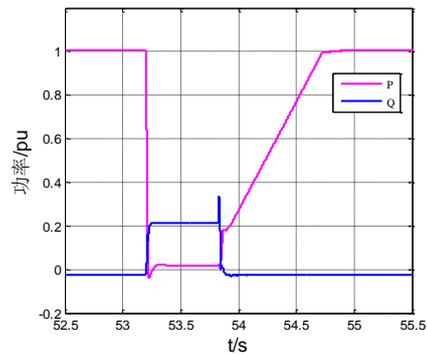


图 3-3 硬件在环仿真有功无功

仿真运行中,使得电网电压跌落 80%,持续时间为 625ms,图 3-1~3-3 给出了 eHS 硬件在环仿真结果。从仿真结果中可以看出在电网电压跌落,光伏发电系统有功输出降为了 0 附近,改为提供了约 0.2pu 的无功支撑,在电网电压恢复时,即刻就不在发出无功,并以一定的速率进行了有功的恢复,在电压跌落时保持了运行状态,并满足了低电压穿越的要求。

2.eHS 硬件在环仿真与离线仿真对比

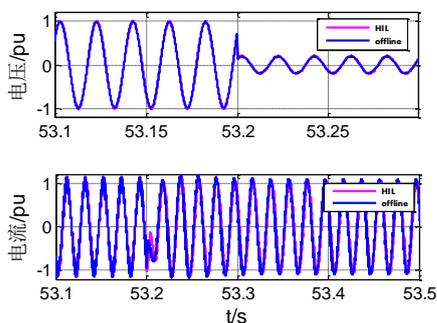


图 3-4 电压电流跌落对比波形

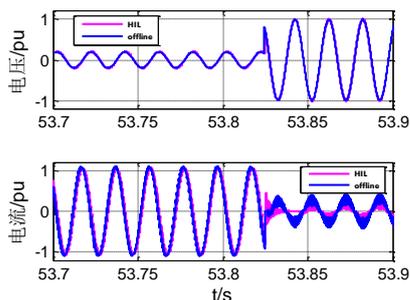


图 3-5 电压电流恢复对比波形

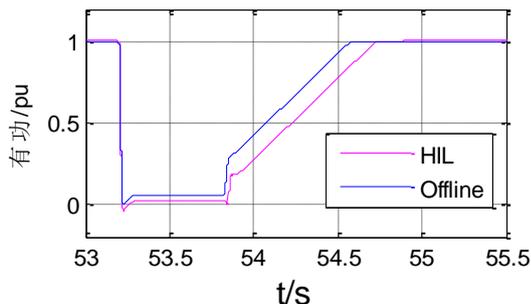


图 3-5 有功功率对比波形

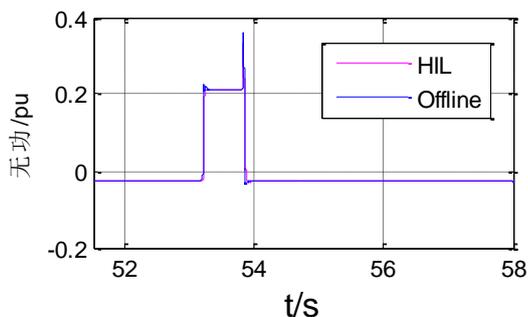


图 3-5 无功功率对比波形

所有图中，蓝颜和紫色分别为硬件在环仿真结果和离线仿真结果。从仿真结果可以看出，由于硬件和通讯的存在，硬件在环仿真在电压跌落时，电流的响应较离线仿真慢了一点，而恢复时，硬件在环仿真功率和电流恢复较离线仿真慢了约一个周波的时间。总体来说硬件在环仿真结果与离线仿真结

果差异不大，满足硬件设计要求。

4 结论

硬件在环仿真兼顾了全数字仿真和物理动模的优点，是仿真测试里的一个重要手段。基于 eHS 的 FPGA 的硬件在环仿真具有仿真步长小、建模简单方便、接口延时小等优势，可以满足电力电子系统高精度、快速仿真的需求。论文以四组 T 型三电平的光伏逆变器并联为仿真对象，验证了该方法的有效性及其可靠性。

参考文献

- [1]周皓. 三电平光伏并网逆变器拓扑结构及控制策略的研究 [博士]: 北京科技大学; 2015.
- [2]陈凯. 分布式光伏并网发电系统控制技术研究: 电子科技大学; 2015.
- [3]张兴, 余畅舟, 刘芳, 李飞, 徐海珍, 汪杨俊, et al. 光伏并网多逆变器并联建模及谐振分析[J]. 中国电机工程学报. 2014.(03):336-45.
- [4]何国锋. 多逆变器并联系统若干关键问题研究 [博士]: 浙江大学; 2014.
- [5]王成山, 丁承第, 李鹏, 王智颖, 林盾, 邢峰. 基于 FPGA 的光伏发电系统暂态实时仿真[J]. 电力系统自动化. 2015.39(12):13-20.
- [6]Bachir TO, Dufour C, Bédanger J, Mahseredjian J, David JP. A fully automated reconfigurable calculation engine dedicated to the real-time simulation of high switching frequency power electronic circuits[J]. Mathematics & Computers in Simulation. 2012.91(3):167-77.
- [7]Dufour C, Cense S, Bédanger J. An induction machine and power electronic test system on a field-programmable gate array[J]. Mathematics & Computers in Simulation. 2016.130:112-23.

通讯作者

谭伟，上海科梁信息工程股份有限公司，wei.tan@kelaingtek.com, Tel:18521039931