

DOI: 10.7667/PSPC171723

永磁直驱风机的小步长硬件在环仿真研究

朱谷雨¹, 王致杰¹, 邹毅军², 谭伟², 刘琳²

(1. 上海电机学院, 上海 201306; 2. 上海科梁信息工程股份有限公司, 上海 200233)

摘要: 随着风电并网规模不断增大, 主动配电网的动态电压稳定性和动态供电质量问题日益突出。永磁直驱风机的动态特性与电网交互作用对电力系统稳定存在重要影响, 风电场中越来越多的开关器件给风机并网控制策略的验证带来了新的挑战。基于 RT-LAB 平台采用 FPGA 实时仿真器, 搭建了永磁直驱风机的硬件在环仿真平台, 实现了永磁直驱风机的亚微秒步长实时仿真, 为直驱风机的控制策略验证及优化提供了一种快速有效的验证方法。仿真结果证明了小步长硬件在环仿真方法的有效性。

关键词: 永磁直驱风机; 硬件在环; FPGA; RT-LAB

Research on HIL simulation of direct-driven permanent magnet synchronous generator

ZHU Guyu¹, WANG Zhijie¹, ZOU Yijun², TAN Wei², LIU Lin²

(1. Shanghai Dianji University, Shanghai 201306; China;

2. Shanghai Kelian Information Engineering Company, Shanghai 200233, China)

Abstract: With the increasing scale of new energy grid, active power distribution network dynamic voltage stability and dynamic power supply quality control and other issues become increasingly prominent, the interaction between the dynamic characteristics of the permanent magnet direct-drive permanent magnet synchronous generator and the power grid has important influence on the stability of the power system. More and more switching devices in the wind farm have brought new challenges to the control strategy of the fan. Based on the RT-LAB platform, this paper implements the real-time simulation of the sub-microsecond step of the permanent magnet direct drive fan by using FPGA real-time simulator, which provides a fast and effective verification method for the verification and optimization of direct drive fans. Finally, the simulation results demonstrate the effectiveness of the small step hardware in-loop simulation method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477099).

Key words: permanent magnet direct drive wind turbine; HIL; FPGA; RT-LAB

0 引言

随着可再生能源的开发利用, 新能源并网规模不断增大, 新能源并网产生的问题日益凸显。风力发电因成本较低、技术较为成熟, 在能源资源日益稀缺、气候环境进一步恶化的现状下, 已成为最具经济前景的可再生能源技术, 得到了迅猛的发展^[1-2]。

直驱型永磁同步风力发电机组 (Permanent Magnetic Synchronous Generator, PMSG) 得到越来越多的应用和关注。其变速风电机组具有效率高、噪声小、发电机组结构简单及维护工作量小等特点^[3-4], 运行特性明显优于定速机组。近年来, 我国新疆某地区以直驱风电机组为主的风电基地, 在附近

没有串补的情况下, 并入交流电网时出现了次同步振荡现象, 严重影响了电网的安全运行和并网风电机组的有效控制。因此, 有必要对直驱风电场并入交流电网的次同步振荡等问题展开深入研究^[5-6]。

在分析此类问题及对并网风电机组控制策略的验证时, 软硬件仿真是一种常用的有效手段。

目前永磁直驱风机的离线暂态仿真方法已较为成熟, 但该方法无法实现对被控对象实时控制的模拟, 因而仅适用于控制系统的原理性验证; 而在线实时暂态仿真方法能有效模拟对被控对象的实时控制, 可对控制器设计的有效性直接进行验证, 目前仍是一项充满挑战性的工作。硬件在环 (Hardware in Loop, HIL) 仿真作为一种典型的在线实时暂态仿真方法, 逐渐成为保护设备调试、控制器设计、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。在仿真中，电力电子器件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^[7]。常规的基于 CPU 架构的实时仿真平台已经很难满足对其仿真精度的要求。

本文给出了一种基于现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)的小步长硬件在环仿真方法^[8-11]。该方法可以实现亚微秒级的仿真步长，一方面在相同时间内可实现更多次数值迭代计算，提高对实际物理对象的模拟精度，另一方面可有效减小步长内开关器件动作、模拟器件状态更新、保护阈值触发等的延时，能对控制器设计实现更准确的验证。并给出了电力电子器件小步长硬件在环仿真的实现方法，并将其应用到了永磁直驱风机上，仿真结果验证了该方案的有效性。

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

传统实时仿真设备基于 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^[12-13]。然而传统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限制在数十微秒，甚至更大，很难适应分布式发电等电力电子应用领域^[14-15]。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延迟，从而造成仿真结果与实际结果不符^[16]。

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。由于 FPGA 编程复杂，需要考虑不同的时序问题，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便^[17-18]。随着 FPGA 计算资源密度越来越高、成本逐渐降低以及 IP 核的日益丰富与完善，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 为 CPU 仿真平台与 FPGA 仿真平台的对比。

表 1 基于 CPU 与 FPGA 的仿真平台对比

Table 1 Simulation platform comparison based on

CPU and FPGA		
项目	CPU	FPGA
算法实现形式	软件	硬件
算法执行方式	串行	并行
实时代码生成	较快	非常慢
仿真步长/ μs	10~100	0.2~1

1.2 基于 eHS 的 FPGA 仿真技术

eHS 即 electrical Hardware Solver，是由 OPAL-RT 基于 FPGA 开发的一种针对电力电子高速实时仿真的浮点型模型解算技术^[19-22]。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，消除了 FGPA 硬件语言描述的门槛，可以极大地方便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 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。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。仿真步长越小时，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，将仿真步长尽可能优化。

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等效为电感和电容，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，如图 1 所示。

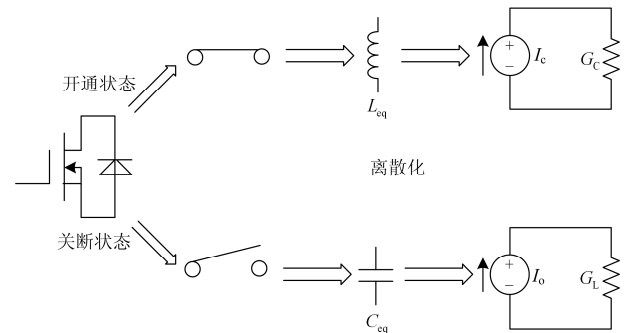


图 1 开关的不同状态等效示意图

Fig. 1 Equivalent diagram of different state of switch

对于开关导通状态有

$$L_{eq} \frac{dI_{Leq}}{dt} = V_{Leq} \quad (1)$$

采用隐式欧拉法，对式(1)进行离散化处理，可得

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

令

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

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

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

式中

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

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

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

即

$$\begin{cases} L_{eq} = \frac{\Delta t}{G_S} \\ C_{eq} = \Delta t \cdot G_S \end{cases} \quad (8)$$

式中: Δt 为 FPGA 的仿真步长, 通常为几百纳秒; G_S 为一个可以调整 IGBT 等效特性的可调参数。若上式满足, 即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 硬件有充分的了解, 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。如图 2 所示: RT-LAB 通过 eHS 将模型参数传输给 FPGA, eHS 仿真算法可以依据 Simulink 模型、PLECS 模型或者 PSIM 模型按照一定规则直接下载到高精度的 FPGA 仿真器中解算, 在解算器上进行硬件在环仿真。基于 FPGA 的硬件

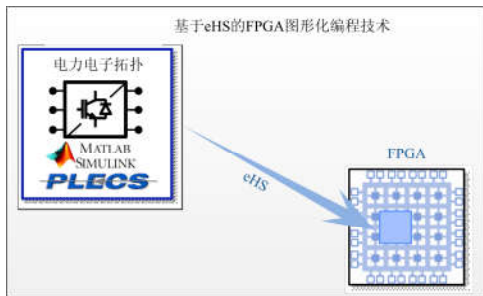


图 2 图形化 FPGA 建模方式
Fig. 2 Graphical FPGA modeling

在环仿真接口延时大约为 $2 \mu s$, 小于采用基于 CPU 的硬件在环仿真数十个微秒的接口延时。充分结合了图形化建模与 FPGA 可重构技术的优势, 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。

基于 eHS 仿真技术, 研究人员可摆脱 FPGA 硬件知识及软件编程语言的束缚, 方便地使用 FPGA 硬件平台, 开展仿真研究。该平台的主要优势如下:

(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。

(2) 无需 HDL 编程经验, 方便开发人员专注所关心的算法研究。

(3) 可在线修改 IGBT 状态、阻容等电器元件参数, 实时观察运行结果的动态变化, 给仿真研究带来极大的方便。

(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 基于永磁直驱风机的硬件在环仿真平台

2.1 系统组成

基于 eHS 的永磁直驱风机的亚微秒硬件在环仿真平台的结构图和实物图分别如图 3 和图 4 所示。

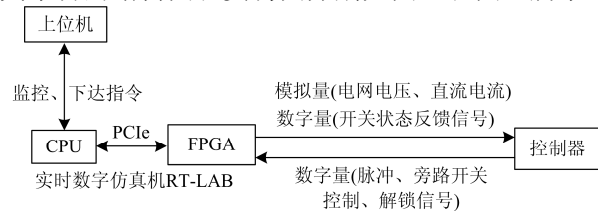


图 3 基于 eHS 的硬件在环永磁直驱风机仿真平台结构图

Fig. 3 Simulation platform structure of PMSG based on eHS hardware-in-the-loop



图 4 基于 eHS 永磁直驱风机硬件在环仿真平台实物图

Fig. 4 Simulation physical map of direct-drive wind turbine based on eHS hardware-in-the-loop

仿真平台主要由 OPAL-RT 公司的 OP5600 和 OP5607 组成, 在上位机 Matlab/Simulink 中建立 FPGA 仿真模型和 CPU 仿真模型, 通过软件将模型分别下载到仿真设备的 CPU 和 FPGA 中。FPGA 模型是逆变器并网的主拓扑结构, 利用 FPGA 的高速性可以较为真实地模拟 IGBT 和断路器的运行特性, 使得仿真结果更加精确。在 CPU 模型中经过相应的设置, 能够将 CPU 模型和 FPGA 模型关联起来, 从而可以通过上位机进行数据监控和指令下达。控制器将 IGBT 和断路器的开关量传输至 FPGA 模型中, FPGA 模型将测量到的电压和电流, 以及断路器的状态反馈信号传给控制器进行采样, 整体运行过程如图 3 所示。

2.2 永磁直驱风机模型开发

采用 RT-LAB 软件开发永磁直驱风机模型, 主要分以下步骤:

① 确认永磁直驱风机的拓扑结构, 并统计所需的输入输出信号, 搭建仿真模型。

永磁直驱仿真模型的拓扑结构如图 5 所示。

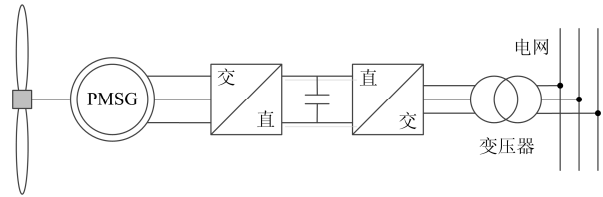


图 5 永磁直驱风机模型的拓扑结构
Fig. 5 Topological structure of PMSG model

由图5可知, 永磁直驱风机硬件在环系统所需开关包括网侧两组PWM开关12个、直流侧制动开关1个、直流侧升压整流开关3个, 共16个开关。状态反馈信号包括网侧空开状态反馈3个、预充电接触器状态反馈3个、变流器运行状态反馈1个、变流器使能状态反馈1个, 共8路信号。测量的电压电流信号有网侧三相电压和三相电流6路、两组变流器交流侧三相电流6路、直流母线正负电压2路、升压电流电流信号3个、整流电压1个, 共18路。

根据以上所需的测量量搭建相应的仿真模型, 如图6所示, 需要根据一定的规则对模型中的器件进行命名, 从而实现模型中的信号与I/O端口配置信号的对应关系。

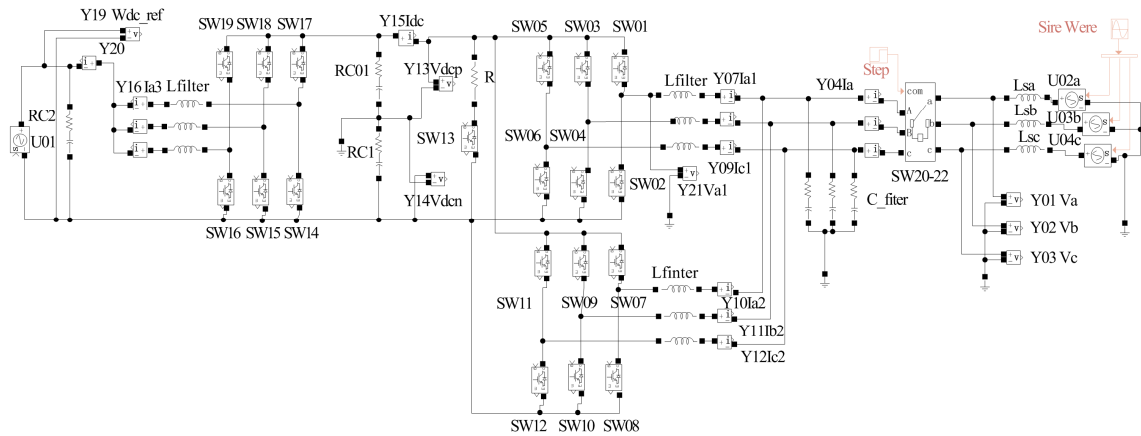


图 6 永磁直驱风机仿真模型
Fig. 6 Simulation model of PMSG

② 确定永磁直驱控制器与仿真机之间的接口位置及个数。

永磁直驱风机控制器模型是通过FPGA仿真机箱中的IO板卡接口与真实的控制器相连接, 包含的变量为开关控制信号接口、状态反馈信息接口、测量信号接口三部分。

开关控制信号接口设计。开关控制信号由风机厂家提供, 而实际的数字量输入接口(Digital Input, DI)为前 16 路有效, 为了方便接线以及开关信号对应清晰, 设计接口对应关系为 2A-P1-DI 中的 1-16 路分别对应机侧变流器 PWM 开关、网侧变流器

PWM 开关、直流侧制动开关以及直流升压电路开关状态反馈信号接口的设计。由于一个接触器的 3 路信号相同, 因此只需获得一个接触器反馈信号中的一路即可, 因此只需输出 4 个状态反馈信号。

测量信号的接口设计。测量信号由FPGA提供给风机控制器, 图7为FPGA仿真机箱中配有的I/O接口, 共采用了1块数字量输入板卡, 1块数字量输出板卡, 2块模拟量输出板卡。

③ 根据接口情况配置BIN文件

BIN文件是作为I/O端口设置的配置文件, I/O板卡放置位置确定后, 相对应的I/O接口类型即确定

了。根据图7所示的FPGA的I/O端口连接位置,可以得到其相应的BIN文件,如图8所示,文件中详细定义了每个端口的大小范围,以及相应的I/O端口类型,从而方便与外接设备进行连接。

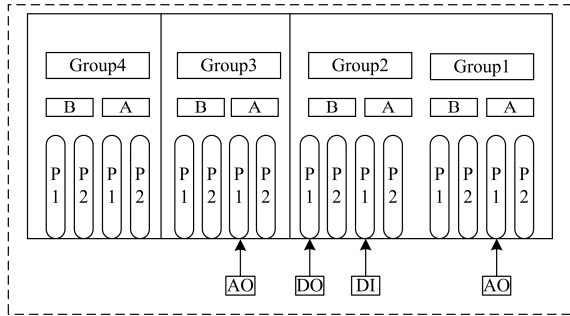


图 7 永磁直驱风机硬件在环仿真接口对应关系

Fig. 7 Interface correspondence of PMSG in HIL simulation

文件(F)	编辑(E)	格式(O)	查看(V)	帮助(H)		
DataIn13	TSDO	2	B	3	-1	32
DataIn14	DO	2	B	4	8	1
DataIn14	PWMO	2	B	4	8	64
DataIn14	TSDO	2	B	4	-1	32
DataIn15	AOMR	1	A	NA	NA	NA
DataIn21	AOMR	3	A	NA	NA	NA
LoadIn1	eHS1	5	A	NA	-1	32
LoadIn4	AOMR	1	A	NA	-1	32
LoadIn5	DOSel	2	B	1	1	2
LoadIn6	DOSel	2	B	2	1	2
LoadIn7	DOSel	2	B	3	1	2
LoadIn8	DOSel	2	B	4	1	2
LoadIn9	PWMO	2	B	1	8	64
LoadIn10	PWMO	2	B	2	8	64
LoadIn11	PWMO	2	B	3	8	64
LoadIn12	PWMO	2	B	4	8	64
LoadIn13	DISel	2	A	1	1	2
LoadIn14	DISel	2	A	2	1	2
LoadIn15	DISel	2	A	3	1	2
LoadIn16	DISel	2	A	4	1	2
LoadIn22	AOMR	3	A	NA	-1	32

图 8 BIN 配置文件

Fig. 8 BIN configuration file

④ 采用 RT-LAB 搭建仿真模型: 通过 eHS 的解算模块调用该模型, 如图 9 所示, 即可完成永磁直驱风机对象的 FPGA 建模。最后进行硬件接线, 将仿真对象输入输出与控制器进行交互, 即可建立永磁直驱风机的 FPGA 硬件在环仿真。

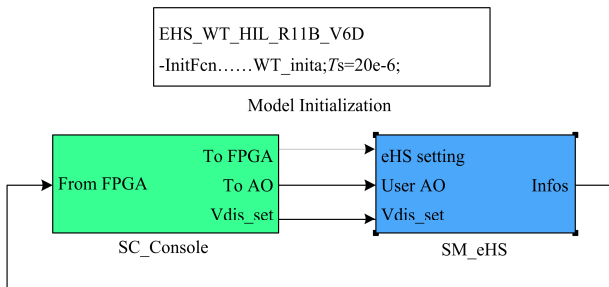


图 9 永磁直驱风机eHS模型

Fig. 9 eHS model of PMSG

3 仿真验证

设置仿真参数为 $R=0.001 \Omega$, $L_{inv}=0.12 \text{ mH}$, $L_f=0.04 \text{ mH}$, $C=100 \mu\text{F}$ 。进行基于 FPGA 的 eHS 硬件在环仿真, 其中电压基准值为 311 V、功率基准值为 1.5 MW。

稳态下的并网电压电流波形如图 10 所示, 其中有功功率给定为 1.35 MW, 无功功率给定为 0.15 MW, 功率波形如图 11 所示。由图 11 可知, 在稳态下, 永磁直驱风机并网系统能够按照给定功率运行, 证明了并网控制器稳态下的有效性。

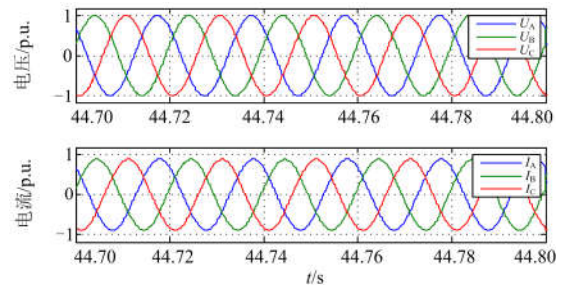


图 10 永磁直驱风机正常并网稳态波形

Fig. 10 Steady state waveform of PMSG

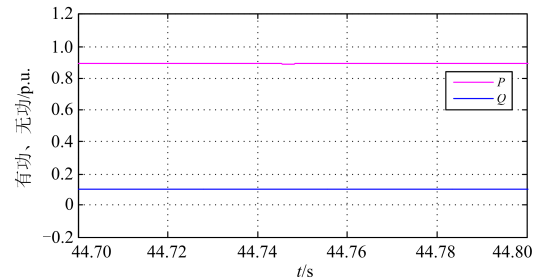


图 11 永磁直驱风机正常并网稳态有功无功波形

Fig. 11 Active and reactive power waveform of PMSG in steady state

为测试并网控制器的动态响应, 在仿真运行中, 使得电网电压跌落 80%, 持续时间为 583 ms, 图 12、图 13 给出了 eHS 硬件在环仿真结果, 从仿真结果

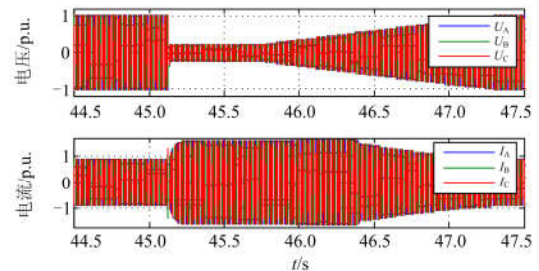


图 12 永磁直驱风机低压穿越波形

Fig. 12 Waveform permanent magnet direct drive fan low voltage ride through

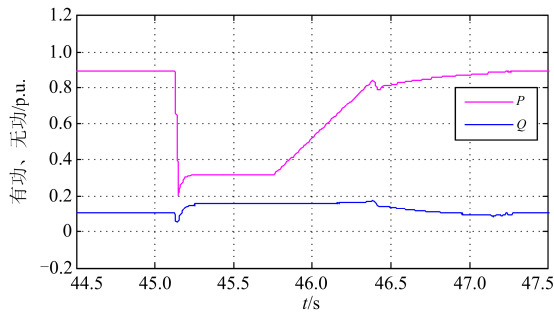


图 13 永磁直驱风机低压穿越有功无功波形

Fig. 13 Active and reactive power waveform of PMSG in low voltage ride through

可以看出：在电网跌落后，直驱风机系统的有功输出降到了 0.2 p.u.附近，提供了约 0.1 p.u.的无功支撑。在电网电压恢复时，以一定的速率进行了有功恢复，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。

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 FPGA 的 eHS 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，可以满足风电并网系统高精度、高速仿真的需求。论文以永磁直驱风机为仿真对象，验证了该方法的有效性。

参考文献

- [1] 李明节, 于钊, 许涛, 等. 新能源并网系统引发的复杂振荡问题及其对策研究[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1035-1042.
LI Mingjie, YU Zhao, XU Tao, et al. Study of complex oscillation caused by renewable energy integration and its solution[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1035-1042.
- [2] 陈磊, 刘永奇, 戴远航, 等. 电力电子接口新能源并网的暂态电压稳定机理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 16-21.
CHEN Lei, LIU Yongqi, DAI Yuanhang, et al. Study on the mechanism of transient voltage stability of new energy source with power electronic interface[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 16-21.
- [3] 张谦, 李凤婷, 蒋永梅, 等. 提高直驱永磁风机低电压穿越能力的控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 62-67.
ZHANG Qian, LI Fengting, JIANG Yongmei, et al. Comprehensive control strategy for improving low voltage ride through capability of permanent magnet synchronous generator[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 62-67.
- [4] 张冲, 王伟胜, 何国庆, 等. 基于序阻抗的直驱风电场次同步振荡分析与锁相环参数优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 1-10.
ZHANG Chong, WANG Weisheng, HE Guoqing, et al. Analysis of sub-synchronous oscillation of full-converter wind farm based on sequence impedance and an optimized design method for PLL parameters[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 1-10.
- [5] 谢小荣, 刘华坤, 贺静波, 等. 直驱风机风电场与交流电网相互作用引发次同步振荡的机理与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2366-2372.
XIE Xiaorong, LIU Huakun, HE Jingbo, et al. Mechanism and characteristics of subsynchronous oscillation caused by the interaction between full-converter wind turbines and AC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2366-2372.
- [6] 徐凯. 双馈风力发电系统硬件在环测试平台设计实现[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
XU Kai. Doubly-fed wind power system hardware-in-the-loop test platform design and implementation[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- [7] 王成山, 丁承第, 李鹏, 等. 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.
WANG Chengshan, DING Chengdi, LI Peng, et al. FPGA-based real-time transient simulation of photovoltaic generation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12): 13-20.
- [8] 王琛, 孟建辉, 王毅, 等. 含多种分布式电源的直流微电网硬件在环[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 147-153.
WANG Chen, MENG Jianhui, WANG Yi, et al. Design and implementation of hardware in-the-loop simulation system for DC microgrid with multiple DG units[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 46(9): 147-153.
- [9] 孙刚, 时伯年, 孙谦浩, 等. 基于 RT-LAB 的柔性直流配电保护系统的硬件在环测试[J]. 南方电网技术, 2016, 10(4): 24-29.
SUN Gang, SHI Bonian, SUN Qianhao, et al. RT-LAB based HIL test for protection system of MMC based DC distribution network[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(4): 24-29.
- [10] 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 & Computers in Simulation*, 2012, 91(3): 167-77.
- [11] DUFOUR C, CENSE S, BÉLANGER J. An induction machine and power electronic test system on a field-programmable gate array[J]. *Mathematics & Computers in Simulation*, 2016, 130: 112-23.
- [12] MORREN J, PIERIK J, DE HAAN S W H. Inertial response of variable speed wind turbines[J]. *Electric Power Systems Research*, 2006, 76(11): 980-987.
- [13] CHINCHILLA M, ARNALTES S, BURGOS J C. Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2006, 21(1): 130-135.
- [14] LALOR C, MULLANE A, O' MALLEY M. Frequency control and wind turbine technologies[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2005, 20(4): 1905-1913.
- [15] JENKINS E J N. Comparison of the response of doubly fed and fixed-speed induction generator wind turbines to changes in network frequency[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2004, 19(4): 800-802.
- [16] 赵爽, 刘飞, 孙健军, 等. 基于改进 PR 控制器的新能源并网检测平台设计[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(16): 119-124.
ZHAO Shuang, LIU Fei, SUN Jianjun, et al. Parameter design of testing platform for new energy grid connected devices based on improved PR controller[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(16): 119-124.
- [17] 董建政, 李征, 蔡旭. 基于 RT-LAB 的双馈风电场动态建模[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(7): 83-89.
DONG Jianzheng, LI Zheng, CAI Xu. Dynamic modeling of wind farm with doubly-fed induction generators based on RT-LAB[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(7): 84-89.
- [18] 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, November 28-December 1, 2005, Kuala Lumpur, Malaysia: 1646-1651.
- [19] 于亚男, 金阳忻, 江全元, 等. 基于 RT-LAB 的柔性直流配电网建模与仿真分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(19): 126-129.
YU Yanan, JIN Yangxin, JIANG Quanyuan, et al. RT-LAB based modeling and simulation analysis of flexible DC distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(19): 126-129.
- [20] HAZRA S, SENSARMA P. Vector approach for self-excitation and control of induction machine in stand-alone wind power generation[J]. *IEEE Transactions on Renewable Power Generation*, 2011, 5(5): 397-405.
- [21] 马保怀, 冯秋实, 许丽. 基于 FPGA 的单端法行波故障测距装置的研究与实现[J]. *陕西电力*, 2016, 44(7): 44-48.
MA Baohuai, FENG Qiushi, XU Li. Research and implementation of terminal method based on FPGA[J]. *Shaanxi Electric Power*, 2016, 44(7): 44-48.
- [22] 程丹, 黄新波, 朱永灿, 等. 变电站电容型设备在线监测系统设计与应用[J]. *广东电力*, 2016, 29(4): 55-61.
CHENG Dan, HUANG Xinbo, ZHU Yongcan, et al. Design and application of online monitoring system for substation capacitive equipments[J]. *Guangdong Electric Power*, 2016, 29(4): 44-48.

收稿日期: 2017-11-24; 修回日期: 2018-08-20

作者简介:

朱谷雨(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化。E-mail: 691730425@qq.com

(编辑 许威)