

模块化多电平换流器 (MMC) 硬件在环自动化测试

西门子能源利用OPAL-RT的硬件在环仿真方案，实现FACTS（柔性交流输电系统）和HVDC（高压直流输电系统）中MMC控制软件的自动化和加速测试。

Grid Solutions: 柔性交流输电与高压直流系统技术领航者

作为西门子能源旗下业务部门，Grid Solutions致力于为全球输配电领域持续开发尖端技术并提供解决方案。通过提供涵盖产品、系统及服务的完整解决方案组合，Grid Solutions始终走在提升全球电网效率、可靠性与可持续性发展的最前沿。

Grid Solutions的核心业务聚焦于可再生能源与电网的无缝整合，专注于开发和支持可再生能源并网解决方案，包括能够精准预测及控制风电场与光伏电站发电量的创新系统，从而确保电网的稳定性与运行效率。



柔性交流输电系统 (FACTS)

柔性交流输电系统 (Flexible AC Transmission Systems, FACTS) 是应用于电力输配电领域的电力换流器系统，旨在提升电网的稳定性与运行效率。



高压直流输电 (HVDC)

高压直流输电 (High-Voltage Direct Current, HVDC) 是一种能实现长距离高效电力传输的技术，同时也可用于不同国家之间的电网互联与电力交换。

利用自动化测试技术保障FACTS & HVDC系统的换流器控制质量

由先进的模块化多电平换流器 (MMC) 提供技术支撑的柔性交流输电系统 (FACTS) 与高压直流输电 (HVDC) 系统，是高压输电中电力潮流控制的核心设备。MMC承担的功能至关重要，行业对其控制功能的质量与可靠性提出了极高要求。此外，换流器控制软件还需具备灵活性，以适配不同的工程项目与输电线路的差异化需求。

因此，在控制器软件开发过程中，在不同项目场景下基于真实硬件的测试对于早期故障检测至关重要。为此，开发一套易用性强、具备自动化测试功能的硬件在环 (HIL) 测试平台，对提升测试效率而言必不可少。

项目需求

该HIL测试平台所用仿真器应满足以下要求：

- ✓ 可兼容现有Simulink被控对象模型
- ✓ 为换流器仿真提供亚微秒级 (时间步长 $<1\mu s$) 的性能保障
- ✓ 配备与控制硬件匹配的接口

针对不同项目的换流器控制软件需求进行全面测试，同时要求仿真器的物理模型保持高度灵活性，能够快速适配各类项目配置与参数。此外，需将测试平台与仿真器集成至GitLab CI/CD工作流中，以实现测试流程自动化执行——新的软件版本可自动完成测试，开发者能即时获取功能正确性的反馈，确保系统持续满足设计要求。OPAL-RT仿真器不但能够满足上述技术要求，还可以深度适配现有开发流程与工具链。

OPAL-RT的一大优势是与MATLAB/Simulink的无缝集成，这让我们能在熟悉的开发环境中完成仿真软件的搭建。得益于其团队提供的专业支持，我们不仅快速掌握了仿真器的使用方法，还共同开发出了符合实际需求的解决方案。

Frank Schuhmann
西门子能源集团高级开发工程师

发挥 eHS (OPAL-RT基于FPGA的电力电子工具包) 优势

首先, 需要对现有物理模型 (由 Simulink 构建) 及电路模型 (由 Simscape Specialized Power Systems 构建) 进行适配, 确保其能在仿真器上无缝运行。通过与OPAL-RT德国当地团队的紧密协作, 项目团队快速识别并实施了必要的修改, 成功实现物理模型在OPAL-RT仿真器上的快速集成。

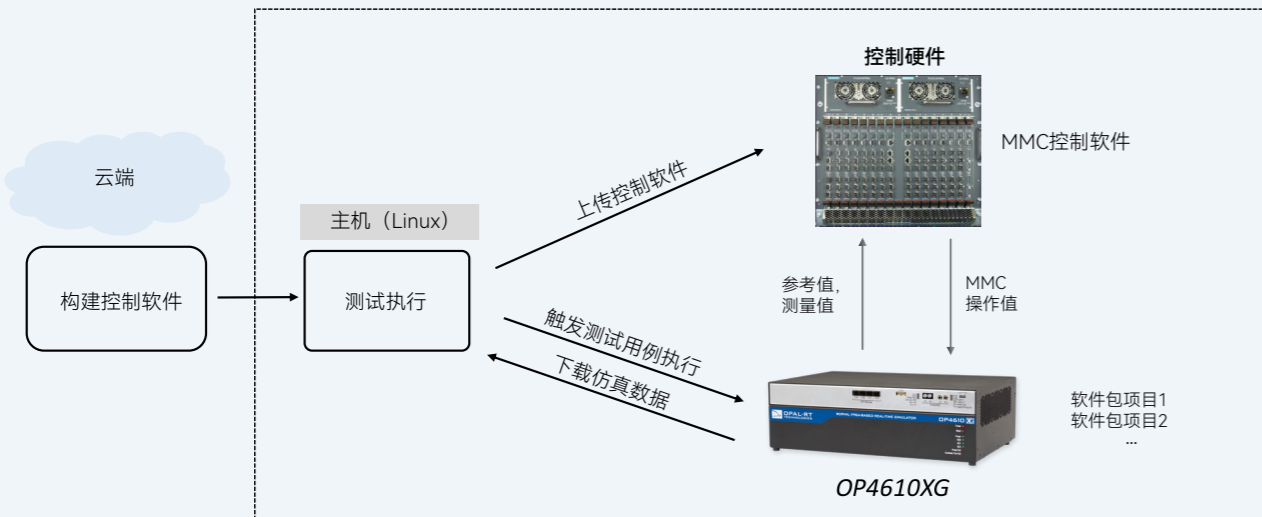
功能特性

- ✓ eHS求解器: 支持电路模型在FPGA上运行, 执行速度小于1微秒, 性能出色, 无需耗时的FPGA编译过程。
- ✓ 基于Simulink的控制算法: 在仿真器CPU上运行, 仿真步长10us。

基于RT-LAB Python API的自动化测试

为支持物理模型的多配置与参数设置, 我们通过自动化流程生成包含对应模型文件的多个软件包并部署至仿真器。每个软件包均包含三大核心组件: 完整生成的仿真器模型、测试序列以及控制测试执行的Python脚本。

依托RT-LAB的Python API, 可实现仿真器软件包生成的全流程自动化。



与GitLab CI/CD workflow集成



由集成到GitLab CI/CD workflow中的Linux主机触发, 固件和控制软件被加载至控制硬件, 随后直接在仿真器上执行包含测试用例的对应软件包。最终, 从主机下载记录的数据, 并在MATLAB/Simulink中完成测试标准验证。

因此, 可以在每次GIT提交后执行针对FACTS和HVDC系统MMC控制定义的测试用例, 具体执行方式可根据开发流程的需求, 选择在合并操作执行前自动执行, 或通过手动触发执行。

借助OPAL-RT的技术, 我们仅需稍加修改就能够将现有的Simscape Specialized Power Systems模型迁移至FPGA。OPAL-RT的eHS求解器无需深入了解FPGA知识即可使用, 我们得以快速将测试平台集成至CI/CD workflow中。

Alexander Sinn
西门子能源集团高级开发工程师



借助OPAL-RT仿真技术，推动MMC控制软件测试升级

通过与OPAL-RT的成功合作，西门子能源实现了Simulink物理模型与仿真器的快速集成。此外，借助OPAL-RT基于FPGA的电力电子工具包eHS，西门子能源得以轻松发挥FPGA技术的性能优势，在硬件在环（HIL）环境中完成建模工作。

由OPAL-RT仿真器驱动的HIL测试平台，支持在实际控制硬件上对MMC控制软件开展全面测试。测试用例直接在仿真器上执行，可脱离主机操作系统独立运行——这一特性使西门子能源能够采用Linux操作系统，不仅简化了与GitLab CI/CD工作流的集成流程，更为未来借助Docker容器实现自动化部署奠定了基础。

通过该方案，西门子能源换流器控制开发团队在每次软件更新后，均可即时获得HIL测试平台的反馈，既能确保功能完整性，又可自动验证执行时间等性能指标。



FRANK SCHUHMANN



ALEXANDER SINN

借助该测试台，我们能够及早发现控制软件与硬件固件之间的各类问题。这意味着我们可以在问题影响执行中的项目乃至最终客户之前，就将其妥善解决。

该测试台还能够确保所有控制功能在不同处理核心间顺畅运行。我们同时会密切监控执行时间，及早发现性能延迟，并通过优化调整提升运行效率。这对新功能开发提供了极大助力。

Frank Schuhmann
西门子能源集团高级开发工程师

关于OPAL-RT

北京欧泊实时技术有限责任公司是加拿大欧泊实时技术有限公司 (OPAL-RT TECHNOLOGIES, 简称OPAL-RT) 的中国分公司。OPAL-RT成立于1997年, 是电气、机电和电力电子系统开放式实时数字仿真器和硬件在环 (HIL) 测试设备的全球领跑企业。自成立至今, OPAL-RT赢得了全球超过2000个客户的信任, 其中不乏世界500强公司、公共事业机构、大学和研究中心等。

OPAL-RT在实时仿真和硬件在环 (HIL) 测试技术方面持续领跑, 将并行、分布式计算和成熟商业化技术集成在一起。我们的核心软件RT-LAB和HYPERSIM, 能够快速开发适合实时仿真的模型, 帮助客户降低成本、缩减预算。

OPAL-RT还开发了专门用于精确仿真电力电子系统和电网的数学求解器和模型。RT-LAB和OPAL-RT的求解器及模型与先进的FPGA I/O和处理板集成, 为RCP和HIL测试提供了完整的解决方案。

实时仿真让梦想家们将创新灵感化为现实。OPAL-RT致力于为工程师和科研工作者们提供经济适用的先进实时仿真技术, 帮助他们加速开发更好的产品, 实现更可靠的能源转换。



扫码关注
实时仿真前沿资讯一手掌握



北京办公室:
北京市朝阳区东三环中路20号楼4层04内546室
Tel: +86 10 66116880

南京办公室:
江苏省南京市雨花台区证大喜马拉雅J1008室