



德国列车平稳准时的要诀： GE Vernova的能源转换与HIL仿真



GE VERNOVA

应用领域

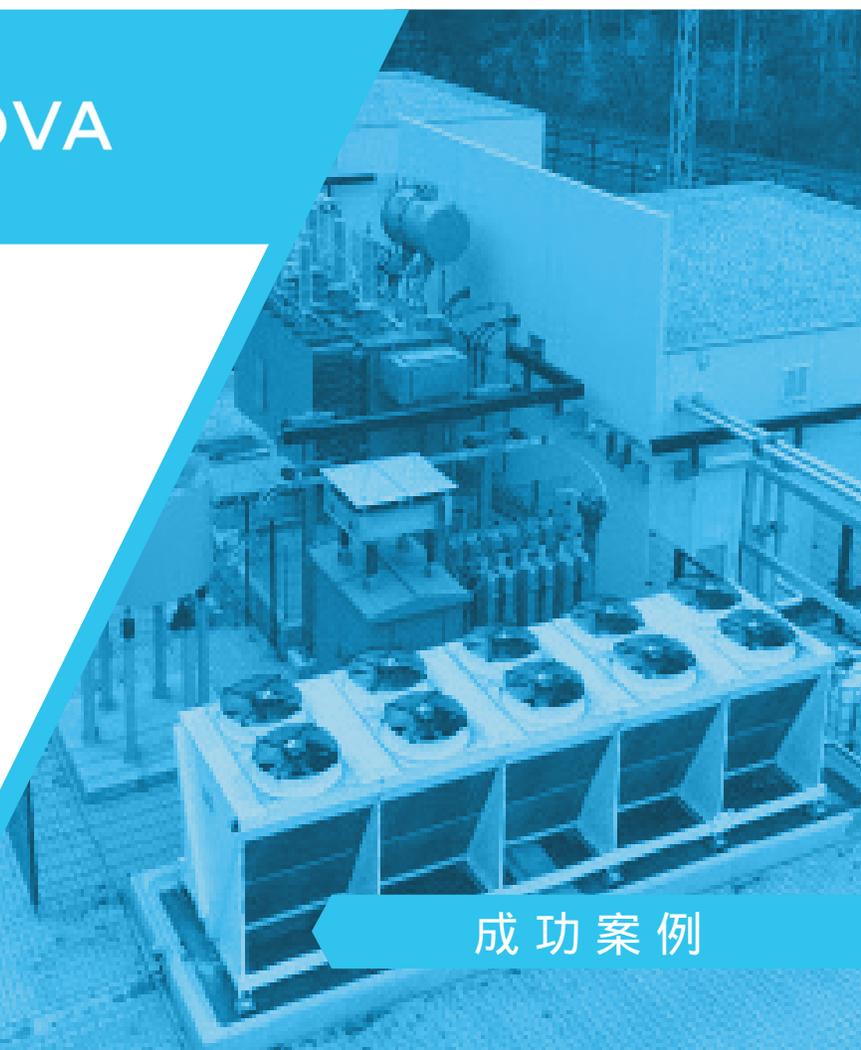
- 轨道交通

相关产品

- RT-LAB
- eHS | 基于FPGA的电力电子工具包

仿真类型

- 硬件在环 (HIL) 仿真



成功案例



前言

迈向绿色革命

在全球绿色能源革命的大背景下，GE Vernova 示范了作为大型公司如何**兼顾去碳化目标和可持续发展前瞻性布局**。GE Vernova (NYSE: GEV) 源自通用电气，专注于加速能源转型，旨在实现全球电气化同时降低碳排放。GE Vernova在全球140个国家布局了**12条业务线**（如下图所示），核心业务主要包括**研究、管理、建立和运营数字化托管的可再生能源和碳减排业务**，以及各种类型的研发实验室。

GE Vernova 为全球电力生产贡献了高达30%的份额，在推动未来能源多样化发展方面发挥了重要作用。GE Vernova在**50多个国家**安装了**54,000多台**风力涡轮机，并在**尖端科研项目**上投资高达**10亿欧元**。

GE VERNOVA 的12大业务线

陆上风电

- 7GW陆上风电场将碳排放密度降低了1g/kWh;
- 改造工程延长了老旧风电场的寿命，并提高了其容量系数。

海上风电

- 5GW海上风电场将碳排放密度降低了1g/kWh;
- 更高的容量系数，使每单位容量产生更多的电量 (TWh, 太瓦时)。

LM 风电

- 风电叶片技术对提高容量系数至关重要;
- 两段式风电叶片减少了物流运输及相关的间接碳排放。

水力发电

- 效率升级提高了零碳水电的发电量 (TWh, 太瓦时);
- 抽水蓄能项目增加了可再生能源的多样性。

天然气发电

- 每年8万吨/年 (MTPA) 的碳捕集利用与封存 (CCUS) 可将碳排放密度降低1g/kWh;
- 8GW调峰电厂升级为使用100%氢气燃料，可将碳排放密度降低1g/kWh。

核能

- 3GW小型模块化反应堆 (SMR) 可将碳排放密度降低1g/kWh;
- 通过更换燃料和延长使用寿命可提供更多的无碳电力 (TWh, 太瓦时)。

能源转换

- 加速实现核心工业应用的去碳化进程;
- 离网型微电网为偏远地区 (如港口、海上浮式生产储油轮和矿山) 提供低碳解决方案。

电网解决方案

- 为高比例可再生能源接入电力系统提供必要的扩展性、稳定性和灵活性;
- 为并网微电网构建具有韧性和低碳化的分布式孤岛运行。

蒸汽发电

- 升级/延长核电站寿命，为美洲地区以可再生能源为主的工业设施提供电力支持;
- 为全球客户提供一流的服务，包括帮助客户实现煤电转型。

数字化

- 其软件旨在:
- 构建安全、清洁的能源网络;
 - 加快向零碳、低碳能源转型;
 - 通过效率洞察减少排放和浪费。

太阳能和储能解决方案

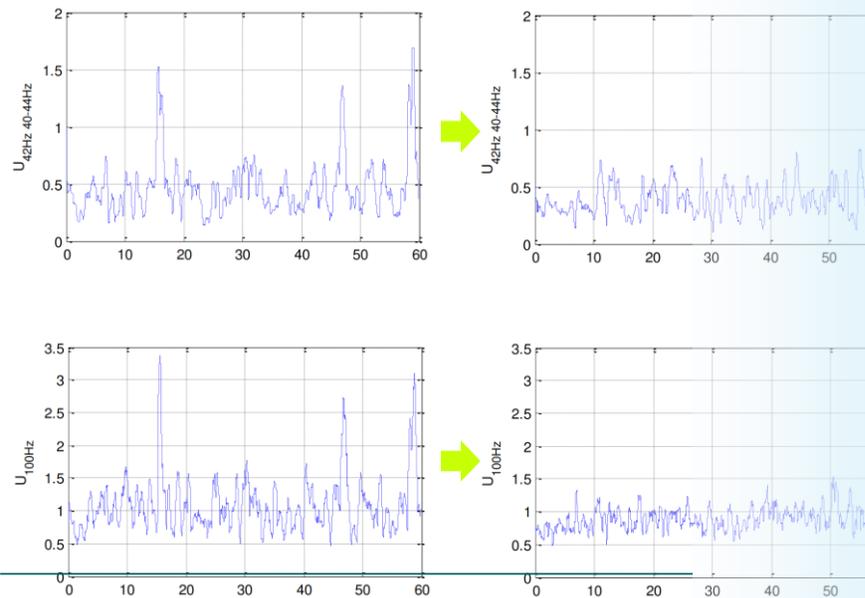
- 电池和混合能源系统可延长可再生能源的调度时间，可有效减少对于化石燃料发电的短期依赖;
- 更换燃料和延长使用寿命可提供更多的无碳电力 (TWh, 太瓦时)。

金融服务

- 融资和税收权益保障是零碳项目的关键推动因素;
- 项目开发和碳货币化方案对早期碳捕集示范试点至关重要。

Before

After



“有人问我是否做过这个项目的成本效益比分析，我认为最重要的其实是项目快速并准确的交付。无论是从预算还是合规性方面来看，硬件在环仿真器的投入都十分必要。”

——Dominik Hofmeyer
驱动控制、工程和技术部门经理
GE Vernova

HIL用例

HIL测试平台功能丰富，应用案例广泛

所有功率换流器都依赖于先进的控制器，而所有这些控制器都必须使用HIL平台进行**设置、测试和再测试、支持以及维护**。GE Vernova通过其柏林办事处共运营着 **20 个 10 千伏试验台**，其中包括 3 个电机试验台、4 个高压试验台、2 个大电流试验台和 11 个低压试验台。

此外，GE Vernova还能够为客户提供以下**三类独立的专业HIL应用服务**：

1



数字孪生

为客户现场设置提供固定不变且精确的数字副本（由模型、控制器和实时仿真器组成），以便能够在问题出现之前和出现当下及时发现、诊断、纠正和重新测试问题。

2



回归测试

在进行升级或更改时，重新测试以确保这些修改不会影响客户设备的正常运行，或以此确认是否需要进一步的配置和测试。

3



工厂验收测试

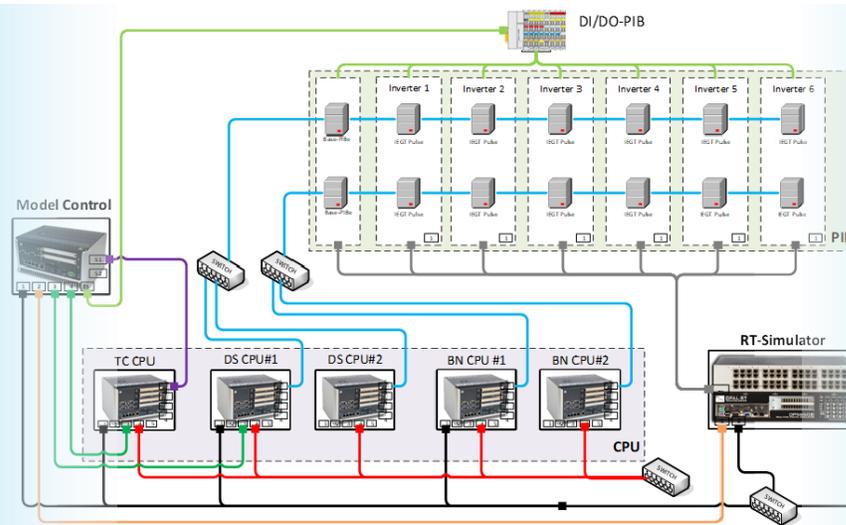
在处理客户购买、升级或安装的项目时，必须针对特定的基准需求进行测试，以证明所承诺的所有功能均达到交付标准。

测试

架空线路供电弓中压静态频率换流器测试

德国列车精准平稳运行的背后，是千万个工程师的努力和付出，GE Vernova能源转换工程师们也是其中的一员。

GE Vernova的堆叠式换流器MV7308由6个换流器组成，每个换流器的功率为19 MVA，开关频率为150 Hz，且至少由5个嵌入式CPU控制器和14个FPGA控制器所控制，共计116路模拟输入和126路IGBT发射信号。但高度复杂的控制器结构需具备强大的硬件和电子测试能力，OPAL-RT仿真系统性能强劲、可扩展性高，且均经过现场验证，能够满足该项目的严苛需求。



电磁兼容 (EMC) 测试

在德国，电磁兼容性是联邦铁路局（负责管理列车的政府机构）进行安全认证的主要内容之一。电磁兼容 (EMC) 测试的主要目的是确保列车检测系统不会产生超出特定水平的电磁干扰、保证列车系统设备具备较高水平的抗干扰能力。

以往，通常采用实际列车进行EMC测试，该测试过程耗时且昂贵，需要提前一年规划。因此，越来越多的客户尝试通过使用输出电压代替列车牵引电流的测量值，以简化整个测试流程。然而，在15千伏的接触网上谐振频率的计算极限可低至几伏，因此测量需要达到极高的精度要求，需结合200kHz的采样频率、多个滤波器和基于窗口的RMS计算（包含重叠）来实现，以上过程均需要在实时仿真器中建模。

德国（以及许多其他国家）对运输系统的可靠性和安全性监管严格，一旦发现故障，必须立即现场诊断和修复，且不允许出现列车停运。



“我们进行控制器改造的通用做法是：尽可能保证改造前后得到相同的表现，以保证我们已经获取的来之不易的认证。”

——Dominik Hofmeyer
GE Vernova

当性能指标出现尖峰值时...

当性能指标出现尖峰时，工程师们需在10天内执行诊断步骤，使其恢复正常运行。

诊断步骤依次执行如下：

诊断步骤

- 1** 在HIL系统中复现该尖峰；
- 2** 分析异常产生的根本原因；
- 3** 实施修复并进行回归测试；
- 4** 现场测试。
* 在现场各设备系统固定之前完成，若不通过HIL进行测试，将耗时且昂贵。

利用HIL仿真器，以上所有步骤可在10天内完成；反之，采用离线模拟方式则需半年以上的时间。

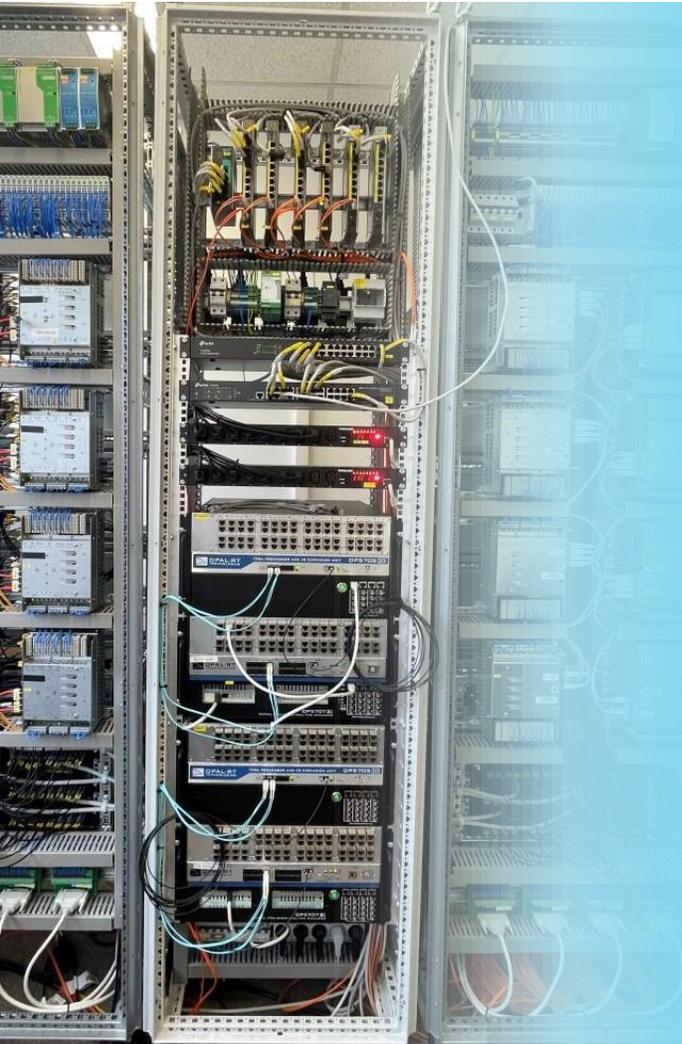
项目成果

HIL仿真助力GE Vernova开发流程优化

硬件在环（HIL）仿真作为变革性解决方案得到了GE Vernova的认可。HIL的实施显著**提高了GE Vernova及时识别和解决问题的能力**，能够帮助项目团队迅速定位现场问题的根本原因，极大地缩短了解决问题的时间，在规定的10天时间内完成问题修复。

将新测试集成到回归测试流程中，这是团队从HIL仿真中获得的新知识和新见解。该方法不仅**强化了产品开发生命周期**，而且具有**前瞻性**，可确保在潜在问题影响最终用户之前将其解决。该项目经验有着重要的借鉴意义，有助于**建立一个强大而可靠的产品开发战略**。

此外，HIL仿真的成功还带动了GE Vernova越来越多的项目，HIL测试需求随之**迅速增加**。需求激增从另一个角度证明了HIL仿真已成为控制开发和产品全生命周期中**不可或缺的组成部分**。



“基于HIL仿真系统，我们测试的类型和数量将不再受限。当然，其作用不止于此。面对潜藏的、未知的问题，HIL仿真系统能够帮助我们快速复现问题，进而厘清方向。”

—— Dominik Hofmeyer
GE Vernova

