

白皮书

使用 Simulink 加快数控电力 变换器设计的 10 个方法

10 个方法的摘要

1.同时对模拟和数字元件进行仿真.....	3
2.自动执行频域中的控制器分析和调节.....	6
3.仿真控制算法以改进电能质量.....	7
4.检验各种操作条件下的故障检测、模式逻辑和调度控制.....	8
5.检验电力变换器在较大电气系统内的工作情况.....	10
6.在处理器上验证控制代码而不损坏电气系统硬件.....	12
7.生成控制代码进行实时测试.....	12
8.开发电气系统的实时仿真.....	13
9.利用您的模型生成用于微处理器、FPGA 或 ASIC 的代码.....	14
10.重用现有项目中的手写代码.....	15

简介

进行电力变换器数字控制的设计时，首先要建模和仿真各种电源和变换器负载、被动元件（如电阻器和电容器）与主动元件（如功率晶体管）等物理对象，以及调节电压和满足严苛设计要求所需的反馈和调度控制算法。

通过自动执行任务和消除硬件集成错误，使用 Simulink® 进行仿真可完成手工编码无法做到的事情。利用系统级的建模和仿真，您可以：

- 开展权衡研究和优化分析，达到成本与性能的平衡
- 利用您的模型生成 C/C++ 和 HDL 代码
- 通过实时仿真验证您的设计，并向软件工程师递交可用于生成算法代码

在这里我们提供 10 个被广泛证明的方法，帮助您使用 Simulink 进行系统级的仿真，改进电力变换器数字控制器设计流程。

1. 同时对物理和算法元件进行仿真

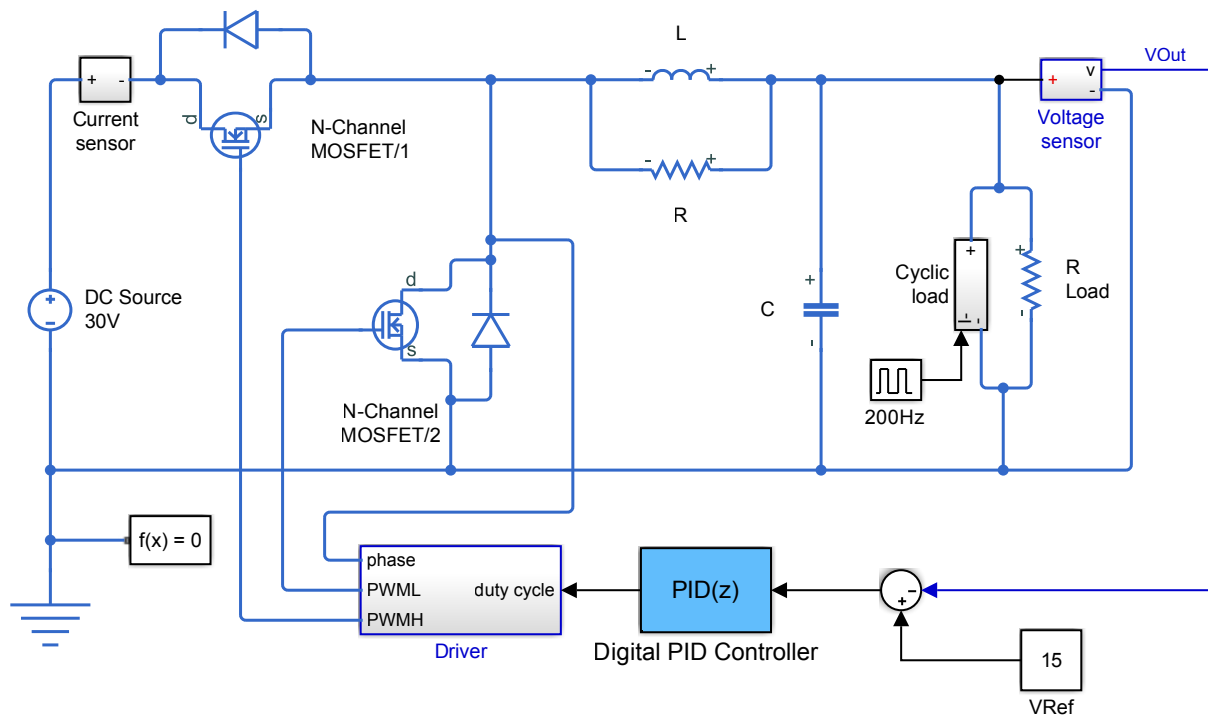
在电力变换器数字控制的设计中，首先必须将控制算法表达为离散或数字函数，将主动和被动元件等物理模型表达为连续或模拟模型，然后才能使用仿真。

利用这个模型您可以评估不同的变换器配置，探索不同开关频率的效果，理解元件热特性如何影响变换器的效率。模型可以包含不同逼真程度上的元件变体，让您从简单的线性模型形式开始，然后发展到复杂的非线性模型。您还可以在模型中包括与传感器和驱动器相关的延迟，将它们对反馈控制器的影响纳入考虑范围。

当您运用自动化优化方法，可以很容易实现主动和被动元件之间以及在这些元件与控制器之间进行成本和性能权衡。SPICE 电路仿真器对于开发电路很有必要，但它既不能很好地处理数字控制设计部分，也无助于评估控制器与电路之间的设计权衡。

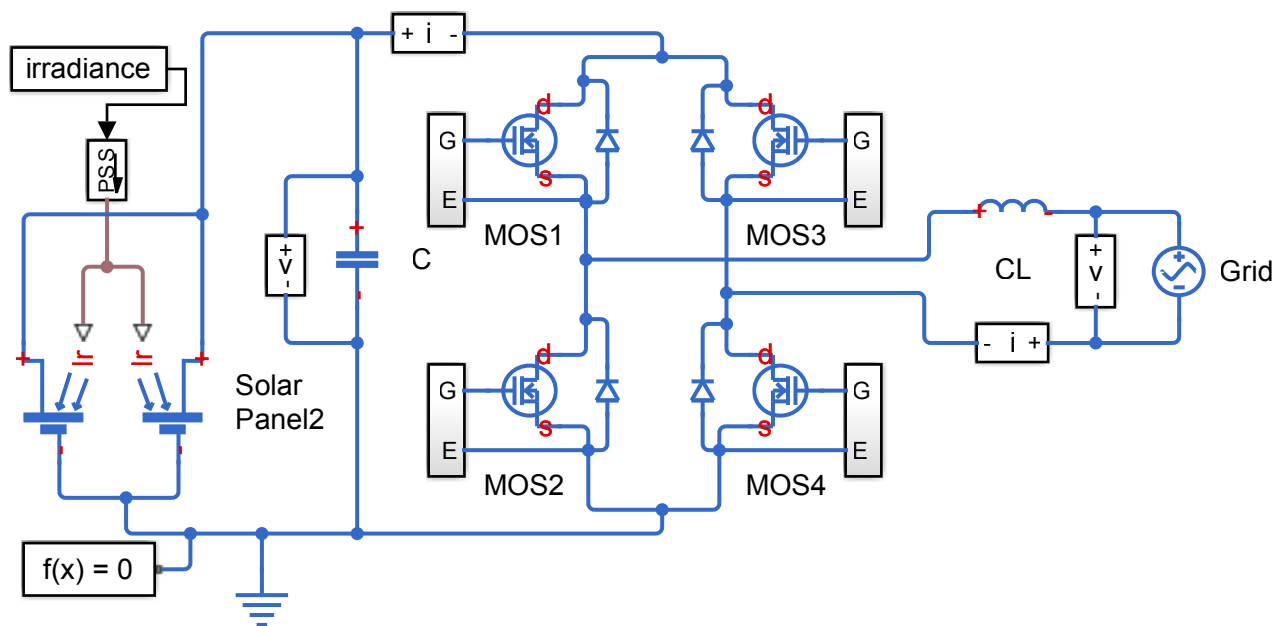
“利用 Simscape Electrical 可以更轻松地建立全电网模型，对实际系统进行模拟。现在我们能测量各种元件间的电压降，更深入地洞察整个系统的电能质量。”

— Lockheed Martin 猎户座首席电力系统分析师 Hector Hernandez



开关电源的 Buck 变换器模型，将 30V 直流电源转换为 15V 直流电源。

在使用 SPICE 电路仿真器开始详细的电路设计前，使用 Simulink 可以对数字控制算法和模拟电路一起建模。视所需控制方案的复杂程度不同，对象模型的精确度要求也会随之改变。在一些情况下，模型可能由平均值元件构成。在其他情况下，比如，当控制器取决于暂态行为时，可能需要对更复杂的行为建模。



用于研究单级式太阳能变换器效率的模型。尝试示例。

使用 Simulink 和 Simscape 元件，您可以借助预置模块或自定义模块对被动和主动等物理元件进行建模和仿真。由于能够同时对模拟和数字元件进行仿真，您可以运用优化方法或 Monte Carlo 分析，自动计算元件参数值和控制器增益，从而满足时域和频域的约束条件。通过将元件建模为平均值元件、理想的开关元件或非线性晶体管，您可以改变模型的逼真度，还可以加入热特性模型，从而帮助您了解开关的效应和传导损耗。

“一个单元花费数千美元，能够提供 250 千瓦的功率输出— 如果管理不当，该功率足以造成严重的损坏。我们在硬件上进行测试之前，在 Simulink 中通过仿真来检验我们的控制算法，从而减小风险。”

— 新西兰 ABB 高级研发工程师 Robert Turner 博士

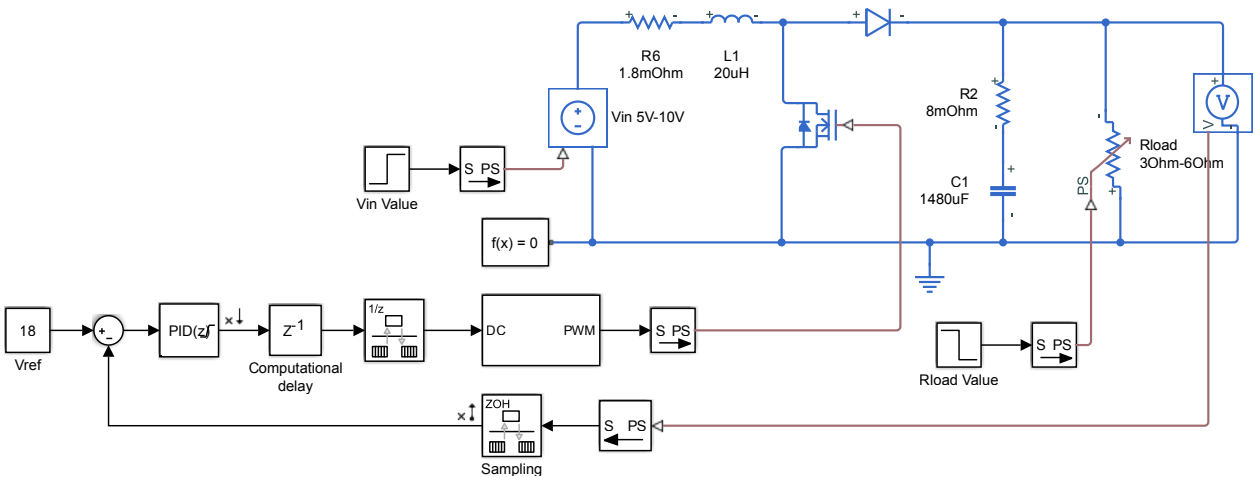
了解更多

- » [使用 Simulink 开发直流-直流变换器控制 - 系列视频](#)
- » [洛克希德-马丁公司使用多域动力系统模型对猎户座飞船的任务进行仿真 - 用户案例](#)
- » [太阳能变换器 - 示例](#)
- » [ABB 使用基于模型的设计加速实现大规模、并网的逆变器产品 - 用户案例](#)

2. 自动化分析和调节控制器频域特性

频域分析是开发满足要求（如交叉频率、稳定裕度和所需的闭环性能）的控制器的基本步骤。电力变换器通常在多变的输入电压和输出负载间工作，而且在行为上可从近乎线性变化到高度非线性。频域分析可帮助您分析功率级模型，并调校使其能在各种工况下稳定运行。

使用 Simulink，您可以结合任何控制策略对电力变换器电路、电源和负载的行为进行建模和仿真。在对算法进行编码和硬件测试之前，就能设计和评估不同的控制架构。Simulink 支持浮点和定点计算以及连续时间（模拟）、离散时间（数字）、混杂（混合信号）和任何规模的多采样率系统。



15V 到 25V 电压输出的 Boost 变换器。尝试示例。

您可以使用 Simulink 中的控制设计工具来调节控制器增益，实现增益调度的控制器，开发分层反馈和前馈控制回路，从而确保您的控制器保持稳定的功率输出。

通过 Simulink 可以计算包括开关效应的非线性仿真模型的频率响应。您可以使用交流扫描分析方法或通过从测量的输入输出数据识别线性模型来计算频率响应。

一旦有频率响应可用，便可以使用波特图或根轨迹图上的交互式地调节控制器增益。或者，也可以指定带宽和稳定裕度等设计要求，然后使用自动调节方法计算所需的增益。可以使用 Simulink 中的自动调节功能，同时调节多个回路，比如在调节电流模式 Boost 变换器的级联结构。而且，您可以自动执行调节过程，计算频率响应并调节不同操作条件下的控制器增益，以便实现增益调度控制器。

了解更多

» [参见使用频率响应数据的 Boost 变换器设计示例（并在 Simulink 中试用）](#)

3. 仿真控制算法以改进电能质量

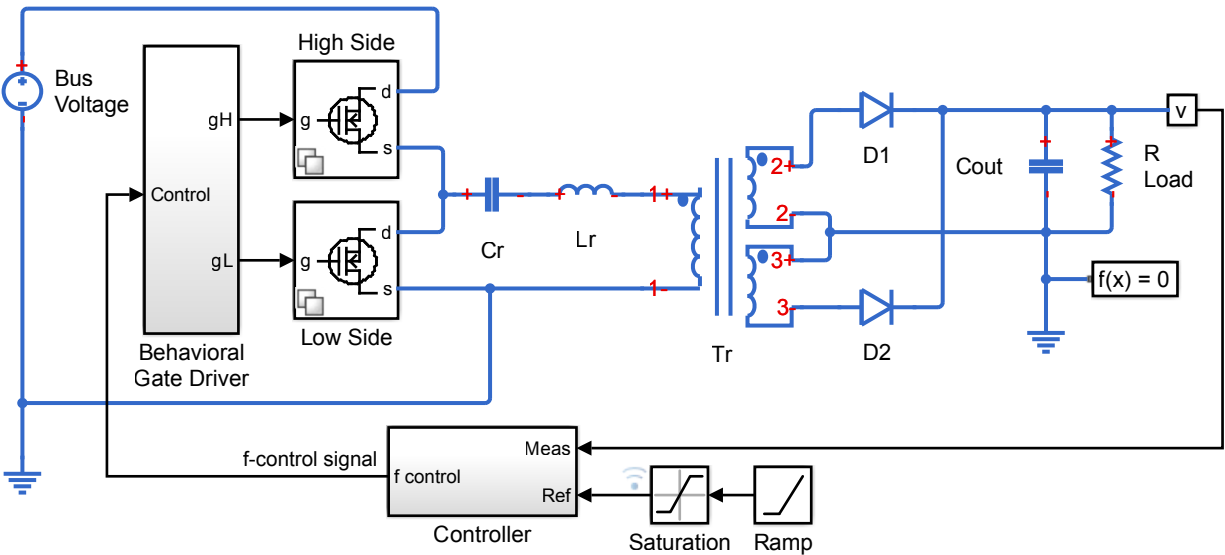
IEC 61000 和电力变换器的其他监管标准对注入的谐波电流施加限制，并指定最小功率因数，从而帮助增加实际功率利用率，提高电网效率。常使用有源级（如开关模式电力变换器）来修正功率因数，并将 AC 干线和负载端的总谐波失真降低到指定级别。

对于某些应用来说，有源级的数字控制比模拟控制更可取，因为可实现输入电流波形的定制，以有助于保持低损耗，同时将功率因数提高到所需的值。闭环控制具有在有多变输入电压和负载情况下保持较高电能质量的优势，而且能够实现复杂的模式逻辑，在轻负载、峰值电压和其他边界条件下管理所需的开关方案。

在对一个环境中电力变换器的组合模拟和数字行为进行仿真时，您能看到控制算法如何与被动和主动元件进行交互。这种可见性有利于在对硬件进行测试之前开展器件选型、电路拓扑和开关方案设计等工作。您能够研究各种输入和输出条件、不稳定区域和故障对控制系统的影响，通过建模和仿真进行设计、分析和迭代式改进，逐步推动设计的前进。

“我们的系统工程师能在 MATLAB 和 Simulink 中非常快速地对 AC 800PEC 控制器的调节软件进行编程、仿真和验证。此方法显著缩短了开发时间且大大减少了偏离需求和定义的情况。”

— ABB Fritz Wittwer



DC-DC LLC 电力变换器。Simulink 中 Controller 模块使用积分控制，实现输出 $V_{out_nominal}$ 的闭环控制。尝试示例。

上述模型包含电力电子开关的两个变种：具有非线性特征的 MOSFET 精确模型和使用具有理想开关、体二极管和输出电容的分段线性的抽象版本。抽象版本提供非常相似的行为和较快的仿真。

通过在 Simulink 中对您的控制算法、电子元件、电源和负载进行建模，您可以将数字控制算法与模拟设备仿真相结合，探索不同的控制策略和电路拓扑，同时分析跨电力变换器的整个操作空间范围的电能质量。在各种不同输入和输出条件下仿真和调节控制器，能够在硬件测试开始时提高设计达到预期表现的概率，从而最大限度地减少硬件迭代次数。

了解更多

- » [ABB 加速功率电子控制器的应用控制软件开发 - 用户案例](#)
- » [有功功率因数修正 \(7:39\) - 视频](#)

4. 检验各种操作条件下的故障检测、模式逻辑和调度控制

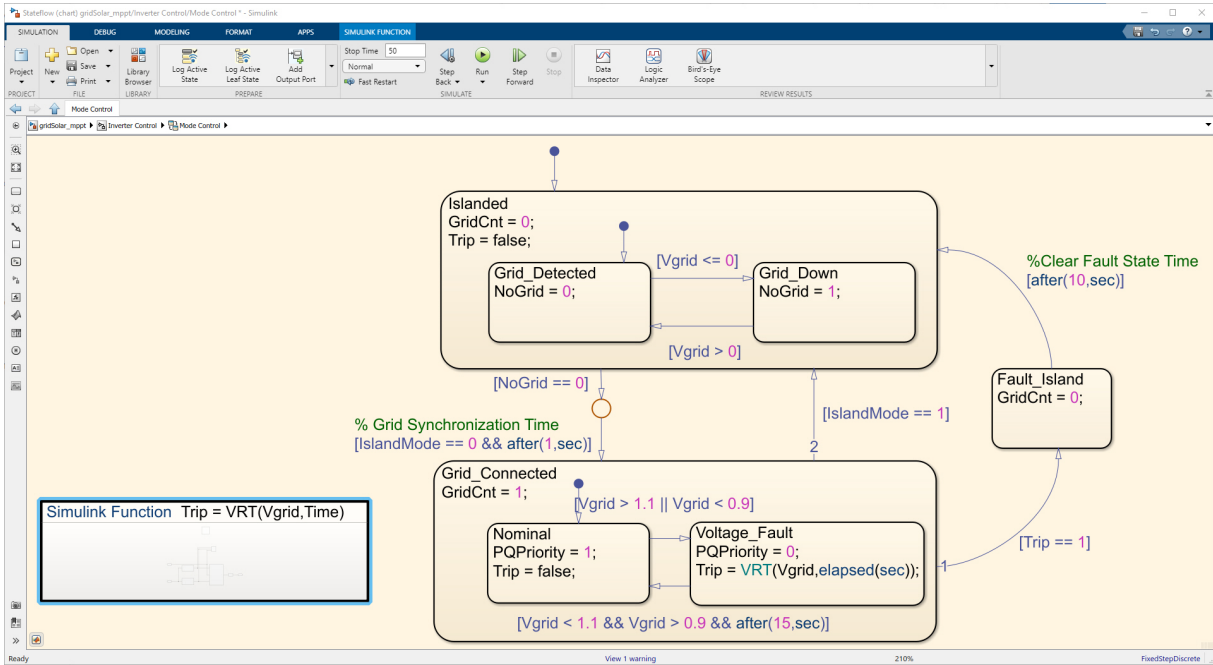
调度和故障检测软件在电力变换器出现故障和异常时保护电力变换器。通过测试电力变换器制造故障让变换器运行在不正常状态来验证该软件，通常既不现实也不安全，此类测试具有损坏昂贵测试系统的风险。同样，如果只靠代码测试工具，您的测试方案达不到 100% 代码覆盖的话，则可能遗漏故障点。

通过 Simulink 可对您的控制策略以及电力变换器内各种电子器件进行建模和仿真。模型中，您可以改变电源电压，调节负载电流，创建任何元件的故障情况，通过这种方式，您可以在进行硬件测试之前验证控制策略。

在 Simulink 和 Stateflow® 内，您可以使用状态转换图、流程图、状态转换表和真值表对调度逻辑建模并进行仿真，针对您的变换器对事件、基于时间的条件以及外部输入信号的反应方式进行建模。采用这种图形方法，可以避免编写、分析和调试复杂的内嵌条件和逻辑表达式。

“Stateflow 中的顶层状态机对于故障处理逻辑特别有帮助。当我们在子状态中有故障时，我们向顶层状态机添加一条线，Stateflow 就可以保证每次都能正确处理。”

— Alstom Han Geerligs



Stateflow 中用于并网光伏逆变器低电压穿越 (LVRT) 的调度逻辑模型。

通过模型仿真，可以执行条件覆盖和功能测试，自动确定能确保代码覆盖范围的测试。这样一来，便能够验证您的调度控制，确保电力变换器即使在异常条件下也能安全工作。

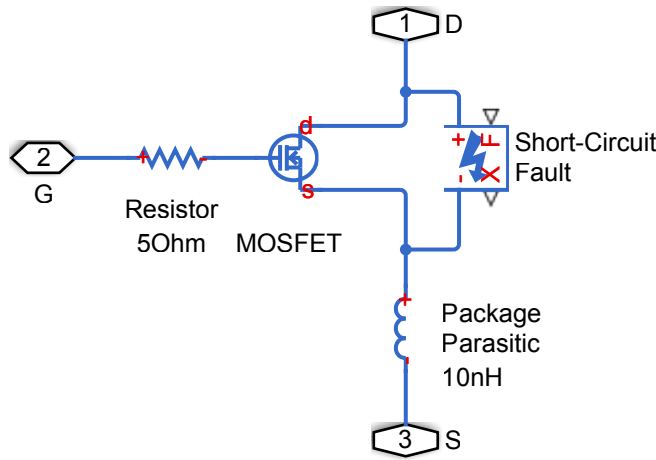
使用测试序列和断言功能，可以对仿真结果设定合格和不合格准则，如绝对和相对容差、极限、逻辑检查以及时态条件。Simulink 支持使用蒙特卡罗分析和参数扫描功能对可变子系统 and 元件参数进行寻优。

此外，许多 Simulink 和 Simscape™ 库模块具有故障功能，您不一定需要修改您的模型来测试故障检测算法。您可以在电路中创建现实的故障情形，用来验证控制器中模式逻辑是否正常。对元件模型增加热特性，让您能够针对过热条件的保护进行测试。

通过仿真对电力变换器进行测试，可以缩短产品认证时间。使用这种方法能够帮助公司通过产品认证测试，他们在第一次或第二次尝试时便通过了。

“使用 Simulink，我们能够在认证之前精确仿真的认证测试内容。因此，我们首次便获通过了认证，节省了 6 至 9 个月的时间。”

— Danfoss Jens Goberson



对电力变换器中的 MOSFET 施加故障验证保护动作是否正常。尝试示例。

了解更多

- » [Alstom 为安全关键型的电力变换器控制系统生成产品级代码](#) - 用户案例
- » [对 PWM 驱动的液压伺服机构建模](#) - 示例
- » [Buck 变换器故障仿真](#) - 示例
- » [Danfoss 采用基于模型的设计加快电力电子控制系统的开发](#) - 用户案例

5. 检验电力变换器在大型电气系统内的工作情况

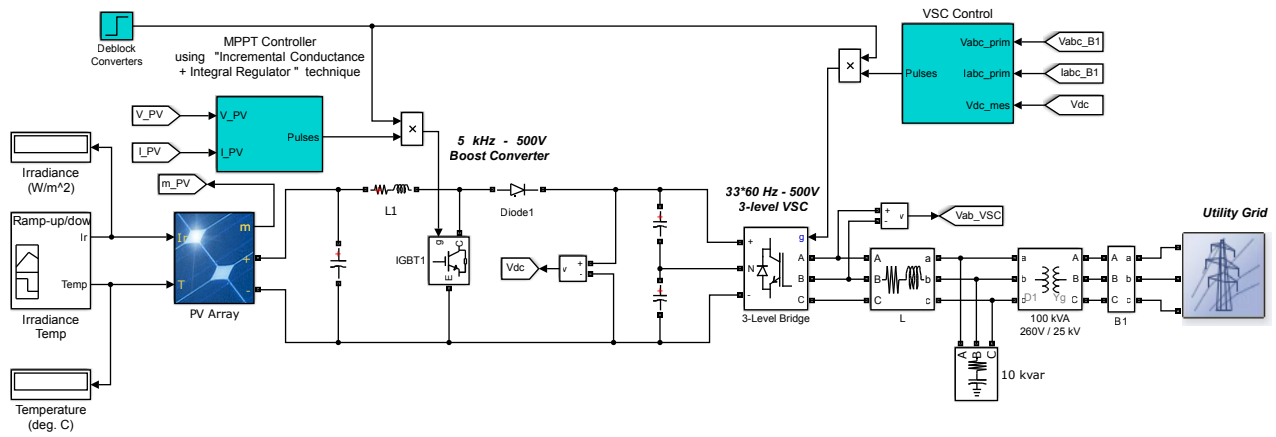
电力变换器通常是大型电气系统的一部分，所以有必要了解变换器与这个较大系统的相互作用如何影响整个系统。依靠硬件测试或 SPICE 仿真来了解这种相互作用通常不现实。一方面，使用硬件原型进行测试是一种昂贵的查找设计错误的方法，成为一种反复试错的练习。另一方面，SPICE 仿真模型虽然对于电路仿真有效，但对于较大的动态电气系统（如微电网、常规和可再生能源以及燃料电池和电池存储系统）则发挥不了作用。

Simulink 从以下四个方面帮助您检验电力变换器在大型电气系统中能否达到预期。

第一，Simulink 和 Simscape Electrical 包含预置电气元件和系统（如电机、电机驱动器、电网设备、电源和负载）的可修改库。具有各种逼真度（从理想操作到非线性操作）的基本电气元件与进行物理元件建模的 Simscape 语言相结合，可以构建满足您的项目特定的仿真逼真度和速度要求的模型。

“Simscape Electrical 使我们能够对断电开始时电网上发生的频率变化进行建模和仿真。我们在 MATLAB 和 Simulink 中开发了控制算法，可快速响应这些变化，并使用我们的 Simscape Electrical 模型运行闭环仿真，确保这些算法能保证太阳能发电系统在高密度区域内安全运行。”

— OMRON Masao Mabuchi



通过 DC-DC Boost 变换器和三相三电平 VSC 连接到 25-kV 电网的 100-KW 阵列的详细模型。尝试示例。

第二，Simulink 支持与其他软件协同仿真，包括 SPICE 电路仿真器。您可以在 Simulink 中开发控制器的数字控制，在 SPICE 中开发模拟电路元件。通过协同仿真，您可以使用非线性电路（比如电路元件中的寄生电容或电感）检验控制器。

第三，通过 Simulink 可以从模型中生成能够集成到其他仿真软件中的代码。在 Simulink 中完成电力变换器控制器的设计和测试后，您可以生成代码并将其集成到能够运行 C/C++ 代码的任何其他软件，包括 PSCAD、RSCAD 或某些 SPICE 电路仿真器。

第四，Simulink 支持自定义模块库，第三方硬件和软件公司能够开发自己元件的库，利用这些库重复利用已有工作。

“我们的客户要求我们使用 PSCAD/ EMTDC 环境进行动态性能和瞬态分析研究，以前我们需要在 PSCAD 中重写我们的模型并进行长达数月的集成。我们的专家与 MathWorks 咨询工程师合作，使用 Embedded Coder 重用我们的现有 MATLAB 和 Simulink 模型，使我们能够在大约五分钟内实现功能变化。”

— Alstom Grid Anthony Totterdell

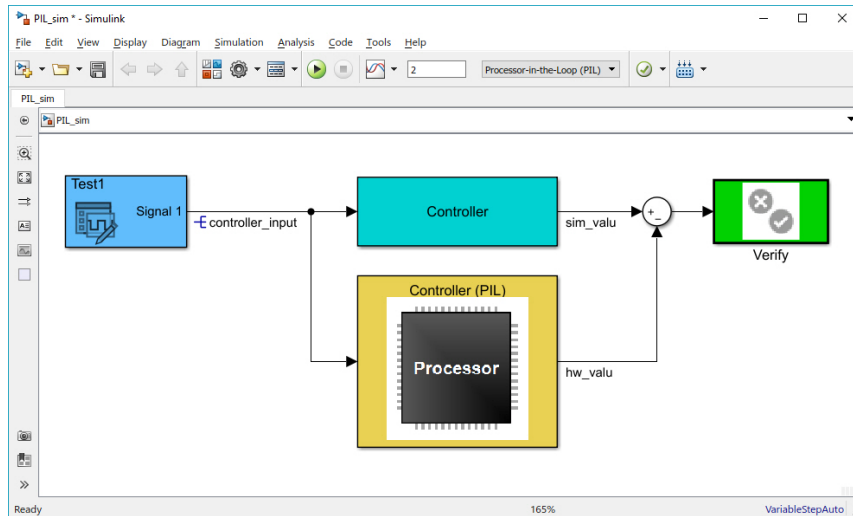
了解更多

- » [OMRON 开发太阳能逆变器防孤岛控制的算法 - 用户案例](#)
- » [Alstom Grid 使用基于模型的设计方法开发高压直流传输控制系统 - 用户案例](#)
- » [Simulink 中的微控制器和 FPGA 硬件支持 - 硬件支持](#)

6.在处理器上验证控制代码避免损坏电气系统硬件

当我们完成了代码设计后，将进行第一次在硬件中的测试。如果代码有错误，表现不符合预期，则需要修正。如果错误十分严重，也许会损坏硬件，需重新更换硬件。

Simulink 可以从控制算法中生成 C/C++ 和 HDL 代码，实现处理器在环 (PIL) 仿真。C/C++ 或 HDL 代码在微处理器或 FPGA 上运行，与此同时，设备使用电气系统在 Simulink 模型中一步步地执行，降低了在控制器代码初始评估过程中损坏硬件的风险。PIL 仿真虽然不是实时仿真，但却是以真实代码运行的，可让您在各种条件下检验控制代码，并有信心在实际系统上一经部署便可正确执行。



PIL 仿真通常将代码编译并放到目标硬件运行，测试模型元件与目标代码的一致性。

了解更多

» [自定义 ARM Cortex A 目标硬件: 处理器在环](#) (4:39) - 视频

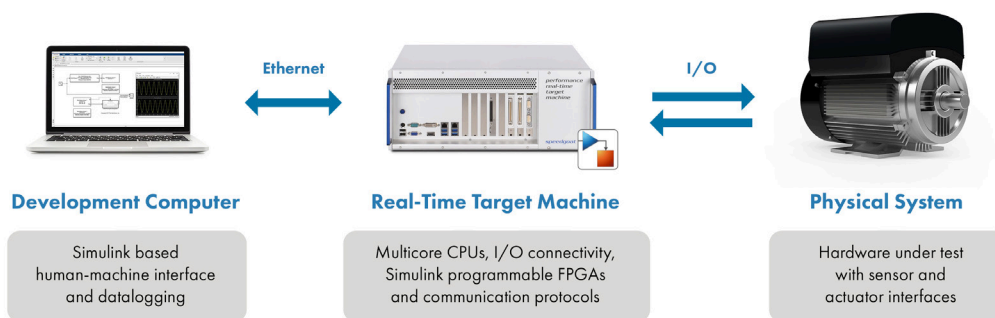
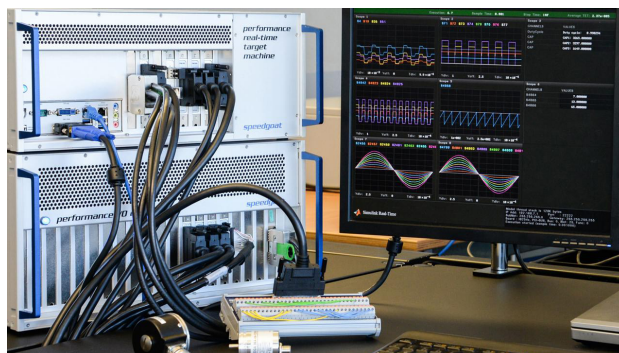
7.生成控制代码进行实时测试

在硬件测试过程中，对控制器代码进行更改十分耗时且有风险。手动修改代码、重新编译，然后将其部署到微处理器或 FPGA 也需要花费很长时间，如果您是控制算法开发者，依赖软件或硬件工程师做出更改，则可能需要更长时间。根据所需更改的程度，还要面临向实现的代码中引入一些新问题的风险。

“从设计模型到实时软件的过渡非常快，这要归功于 MATLAB 和 Simulink 与 Speedgoat 之间的完全兼容。”

— SuperGrid 电力变换器团队负责人 Piotr Dworakowski

作为替代方案，您可以使用 Simulink，生成控制算法代码并布置到专用硬件上作快速原型，将计算机与测试硬件用高速 I/O 进行连接。采用这种方法的优势之一在于确认没有引入其他问题情况下，通过运行仿真模型验证对控制器的更改。另外一个优势在于直接从模型中生成代码，并在目标计算机上运行代码，因而消除了手工编码和任何相关的延迟。



使用 Simulink Real-Time 的典型实时仿真与测试环境。

了解更多

» [SuperGrid Institute: 面向未来超级电网的高效而紧凑的电力变换器 - 用户案例](#)

8. 开发电气系统的实时仿真

硬件原型是静态的，难以快速修改，而且无法随时针对电力变换器最终运行的电气系统进行测试。由于与设计偏离过大，存在较大的风险。这种限制还会导致电力变换器设计发展缓慢。

Simulink 可以利用电力变换器及其所属系统（包括电源和负载）中的仿真模型生成 C/C++ 和 HDL 代码。在硬件原型测试前，您可以使用硬件在环 (HIL) 仿真，对物理部分进行实时仿真，测试控制器代码的实时执行。因此，您可以提前找到并纠正错误，从而避免损坏昂贵且难以更换的硬件原型。而且，您可以在包含电力变换器的电气系统中通过实时仿真来测试控制代码。

“使用基于模型的设计，我们能够进行持续的验证和确认，而无需等到电力电子控制单元的所有开发全部完成。”

— Microsemi Shane O'Donnell

了解更多

- » [电力电子系统的硬件在环 \(HIL\) 仿真 \(26:07\) - 视频](#)
- » [多电飞机电力电子设备的实时仿真与测试 - 文章](#)

9. 从模型生成用于微处理器、FPGA 或 ASIC 的代码

如果您放弃仿真，选择直接从控制算法手工编写 C/C++ 或 HDL 代码，则会面临引入错误的风险，这些错误在软硬件集成测试过程中才会表现出来，届时诊断和解决错误有可能造成项目延期。

首先，在硬件测试之前，无法验证算法能否如预期运行，您无法了解这些测试过程中检测到的错误来源于控制算法本身还是其他因素。其次，手动编写算法代码可能引入转译或解释错误。

在 Simulink 中通过仿真验证您的控制器模型后，可以直接从这些模型中生成代码，从而避免上述问题。您可以生成用于微处理器的优化且稳定的 C/C++ 代码，或者生成用于 FPGA 编程或 ASIC 原型开发的 HDL 代码。自动代码生成消除了手动算法转译错误，并且产生 C/C++ 和 HDL 代码与 Simulink 中已验证的算法具有一致性。通过尽可能完整的状态模拟和故障条件下验证仿真您的控制算法，提高您代码的可靠性，使您对您的代码更加有信心。

如果以后的硬件测试表明需要更改算法，您只需在您的仿真模型中修改算法，重新运行仿真测试用例来验证算法更改的正确性，然后生成经过更新的新代码。所有生成的 C/C++ 和 HDL 代码都完全可移植，并具有一系列选项对其进行优化，Simulink 模型与代码双向可追踪，帮助您进行代码审查与故障诊断。

“使用基于模型的设计，我们开发人员的工作效率轻松提高了十倍。通过仿真和代码生成，我们能快速更改设计，并消除了编码中的人为错误。我们的算法通常在第一次就顺利通过，所以，不再需要浪费很长的开发周期来调试代码。”

— Robert Turner 博士, ABB 高级研发工程师

“Simulink 有助于系统架构师和硬件设计人员进行沟通。就像一种共用的语言，我们能够交换知识、构想和设计。Simulink 和 HDL Coder 使我们能够专注于开发算法和通过仿真改善设计，而不是检查 VHDL 语法和编码规则。”

— Marcel van Bakel, 飞利浦健康

了解更多

- » [自动生成控制器代码并在嵌入式处理器上实现 \(5:00\) - 视频](#)
- » [ABB 使用基于模块的设计加速实现大规模、并网的逆变器产品 - 用户案例](#)
- » [飞利浦健康开发用于 MRI 系统的智能数字 RF 电力子系统 - 用户案例](#)

10. 重用现有项目中的手写代码

您的电力变换器设计也许需要沿用前一代产品的某些方面。如果您在使用数字控制，对于电路和代码而言的确如此。如有时候，您想要重用或修改的手写旧代码没有很好地存档，或参与开发的同事已离职。对于现有代码的不确定性可能导致您无法采用，即使可能完全适合您的项目。这样一来别无选择，只有开发新代码，即便重用旧代码可以节省时间和成本。

使用 Simulink，可将现有手工编码的 C/C++ 函数（比如设备驱动程序、查找表以及一般函数和接口）集成到新设计的模型中。然后，您可以使用在 Simulink 中开发的新功能，在完整的模型中对旧代码进行仿真，并进行必要的更改，确保现有代码在新设计内无缝衔接。

“我将旧代码集成到模型中，所以我知道我在使用真实算法进行仿真。这些相同的算法还被生成的代码非常规整地调用。”

— Lotus Engineering Roger Tudor

了解更多

- » [使用 Legacy Code Tool 集成 C 函数](#) - 产品文档
- » [Lotus Engineering 开发控制系统软件来减少柴油机排放](#) - 用户案例

后续步骤

下一步，加快您的电力变换器控制项目。

浏览：[Simulink 电力电子控制设计](#)

下载：[电力电子控制的试用软件](#)

快速入门：[咨询服务](#)