백서

전력 전자 제어 설계의 HIL (Hardware-in-the-Loop) 테스트

Simulink 및 Speedgoat 실시간 대상 시스템 사용

MathWorks®

speedgoat

real-time simulation and testing

개요

하이브리드 및 전기 자동차에 대한 수요 증가, 재생 에너지 분야의 발전, 보다 효율적이고 뛰어난 성능의 전기 모터에 대한 여러 업계의 요구로 인해 더욱 복잡한 전력 전자 제어 시스템과 이를 구동하는 임베디드 소프트웨어의 필요가 높아지고 있습니다. WBG 반도체 자재의 도입으로 인해 스위칭 주파수가 더 빨라짐에 따라 이러한 시스템을 위한 임베디드 소프트웨어의 개발이 더욱 까다로워지고 있습니다. 엔지니어들은 이와 같은 문제를 해결하기 위해 폐루프 및 감시 제어 알고리즘의 성능이 능동 및 수동 회로 소자의 전기적 동작을 나타내는 플랜트 모델을 사용하여 평가되는 시스템 레벨 시뮬레이션을 사용합니다.

이 백서에서는 시스템 레벨 시뮬레이션 후, 최종 하드웨어 설계를 고정하기 전 단계인 HIL(Hardware-in-the-Loop) 시뮬레이션을 통한 실시간 테스트라는 엔지니어링 워크플로의 중요한 단계를 집중적으로 살펴봅니다. 태양광 인버터나 모터 드라이브와 같은 전력 전기 기반 시스템에서, HIL 시뮬레이션은 전력원, 부하를 비롯한 전기 시스템의 결정적 모델을 기준으로 시스템의 디지털 제어기를 실시간으로 검증하는 데 사용됩니다. 이 백서에서는 ***Simulink®*** 및 ***Speedgoat*** 실시간 하드웨어 시스템을 사용하여 HIL 시뮬레이션의 다양한 측면에 대해 다룹니다. Simulink는 제어 시스템의 시스템 레벨 시뮬레이션을 위한 데스크탑 소프트웨어로, 실시간 테스트에 사용할 수 있는 C 및 HDL 코드를 생성할 수 있습니다. Speedgoat 실시간 하드웨어 시스템은 ***Simulink Real-Time™***을 사용하여 Simulink 모델에서 코드를 실행할 때 사용되는 컴퓨터입니다.

데스크탑 시뮬레이션에서 HIL 시뮬레이션까지

시스템 레벨 블록 다이어그램 모델을 사용하여 ***Simulink에서 전력 전기 제어 설계***를 수행하면 여러 샘플 레이트에서 동작하는 다중 레벨 피드백 및 감시 제어 알고리즘을 구성할 수 있습니다. 제어하려는 전력 전기 시스템을 모델링할 때는 미리 준비된 소스, 부하 및 회로 소자 라이브러리를 사용하여 Simulink를 기반으로 하는 ***Simscape Electrical™***의 소자를 포함할 수 있습니다(그림 1). 이러한 소자를 수정하거나, 제1원리 또는 테스트 데이터에서 자체 소자를 구축하거나, 다른 시뮬레이션 소프트웨어에서 설계 구성을 가져올 수 있습니다. 설계 목적에 따라 선별적으로 모델 충실도를 높여 시뮬레이션 정확도를 향상시키거나 모델 충실도를 낮춰 시뮬레이션 속도를 개선할 수 있습니다.

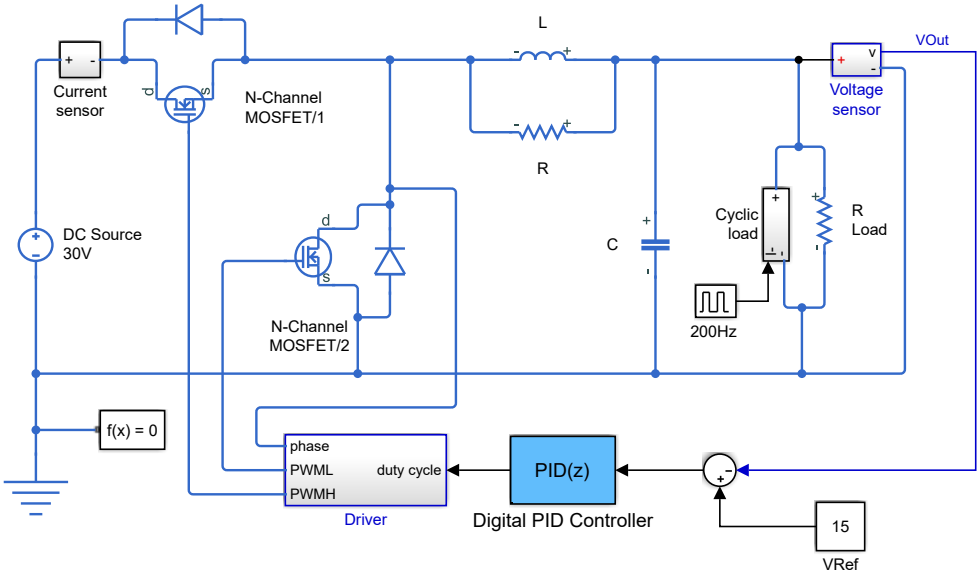

그림 1. 벅 변환기의 Simulink 모델.

"저희는 Simulink와 Simscape Electrical로 구축한 플랜트 모델을 시뮬레이션함으로써, 하드웨어 설계를 완료하기 전에 하드웨어 설계를 개선하고 최적화할 수 있었습니다. 이러한 시뮬레이션을 통해 사전 프로토타입 하드웨어에 대한 여러 번의 반복 제작 과정을 상당수 줄일 수 있었습니다."

— Jakub Vonkomer, VONSCH

» *기사 읽기*

데스크탑 컴퓨터에서 수행하는 시스템 레벨 시뮬레이션은 전력 전기에 손상을 일으킬 수 있는 장애 상황을 비롯한 다양한 시나리오에서 전기 전력 장치와 이를 제어하는 알고리즘 사이의 상호 작용을 확인하기에는 매우 좋은 방법입니다. 그러나 정상 조건 및 비정상 조건 하에 실제 제어기에서 실행되는 임베디드 소프트웨어의 실시간 동작을 검증하는 데는 그다지 효용이 없습니다.

제어기의 실시간 동작을 검증하는 방법 중 하나는 제어 알고리즘의 코드를 손으로 작성하고 컴파일하여 마이크로컨트롤러에 배포한 다음 실제 전력 전기 시스템의 일부로 제어기를 테스트하는 것입니다. 이와 같은 제어기 검증은 항상 수행되어야 하나, 소프트웨어-하드웨어 통합이 완료되는 개발 프로그램의 후반 단계까지 미루어서 모든 실시간 테스트를 수행하는 것은 권장되지 않습니다. 후반 단계에서 검출되는 결함은 수정하기가 더 어렵고 비용도 더 많이 들기 때문입니다.

두 번째 방법은 실시간 컴퓨터에서 실행되는 시스템 모델(플랜트)에 대해 제어기를 검증하는 것입니다. 이러한 HIL 시뮬레이션은 데스크탑 시뮬레이션을 실시간 시뮬레이션으로 확장하는 것으로 볼 수 있으며, 전력 전기 프로토타입 하드웨어에 대한 테스트 준비가 되기 전에도 수행할 수 있습니다.

플랜트와 제어기로 구성된 시스템 모델에서 시작하여, 모델에서 플랜트를 차지하는 부분에서 C 또는 HDL 코드를 생성할 수 있습니다(그림 2). 플랜트 모델에서 생성된 코드는 실제 플랜트 하드웨어의 실시간 동작을 시뮬레이션할 수 있을 만큼 빠른 속도로 코드를 실행하는 실시간 컴퓨터에 구현됩니다. 일례로 ***Speedgoat***의 실시간 대상 시스템은 ***Simulink Real-Time***을 사용해 Simulink에서 생성된 코드를 실행합니다. 이처럼 시스템의 실시간 표현을 확보한 후에는 마이크로 제어기, FPGA 또는 다른 실시간 테스트 시스템에서 실행되는 임베디드 제어 소프트웨어를 테스트할 수 있습니다. HIL 시뮬레이션을 사용하면 결함을 주입하여 악조건에서 안전한 최적의 운영을 유지하는 제어기의 능력을 평가할 수도 있습니다.

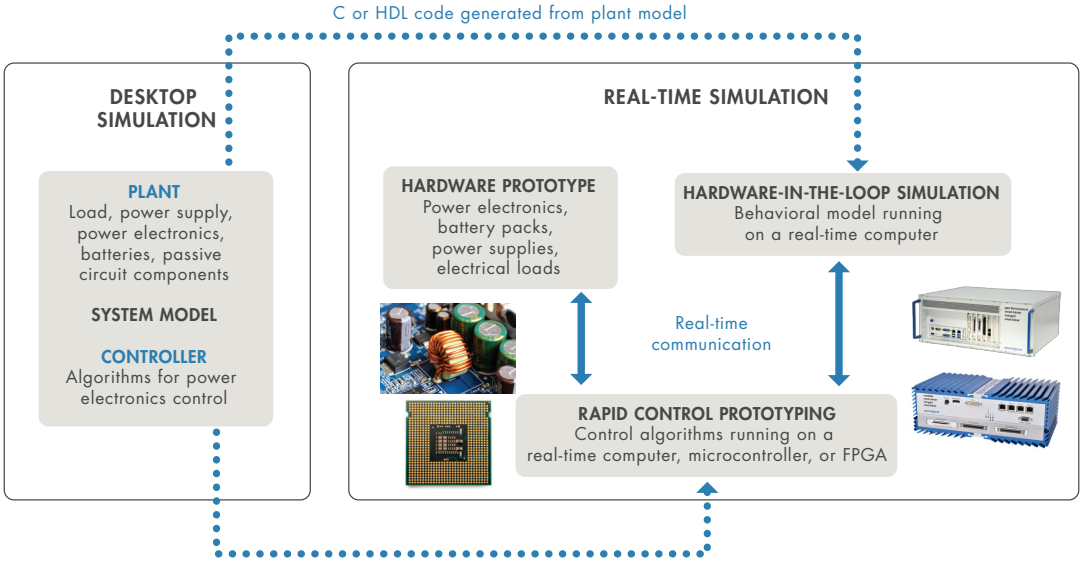

그림 2. 신속 제어 프로토타이핑과 HIL 시뮬레이션을 위해 데스크탑 시뮬레이션 모델에서 생성된 코드 사용.

"Simulink, Simulink Real-Time 및 Speedgoat 대상 하드웨어를 도입한 결과 실제 항공기에 장치를 설치하지 않고도 초기 설계의 응용 분야별 안정성을 확인할 수 있었습니다. 모델 기반 설계를 통해, 전력 전기 제어 장치의 모든 측면이 개발될 때까지 기다리지 않아도 지속적인 검증 및 확인을 수행할 수 있게 되었습니다."

— Shane O'Donnell, Microsemi

» *기사 읽기*

전력 전기 시스템을 위한 HIL 시뮬레이션을 개발할 때는 프로젝트 초반에 시간을 들여 다음과 같은 요인을 고려해야 합니다.

- 시뮬레이션 속도와 모델 복잡도 간의 상호 절충
- 프로세서 및 지연 시간 요구 사항

이러한 요인은 전력 전기 제어 시스템을 모델링하는 방식과 제어기 성능을 검증하는 데 사용할 실시간 테스트 하드웨어를 결정합니다.

시뮬레이션 속도와 모델 복잡도 간의 상호 절충

이를 위한 하나의 출발점으로, 시스템의 안전하고 안정적인 동작을 보장하기 위해 제어기가 응답해야 하는 속도를 고려해 보겠습니다. 그림 3에서는 몇 가지 물리적 시스템과 각각의 응답 시간을 보여줍니다. 여기서 전력 전기 제어기는 일반적으로 마이크로초 또는 그보다 빠른 수준으로 샘플링되어야 함을 볼 수 있습니다. 단, HIL 시뮬레이션에 요구되는 속도는 시스템 모델에서 시뮬레이션해야 하는 동특성에 따라 달라집니다.

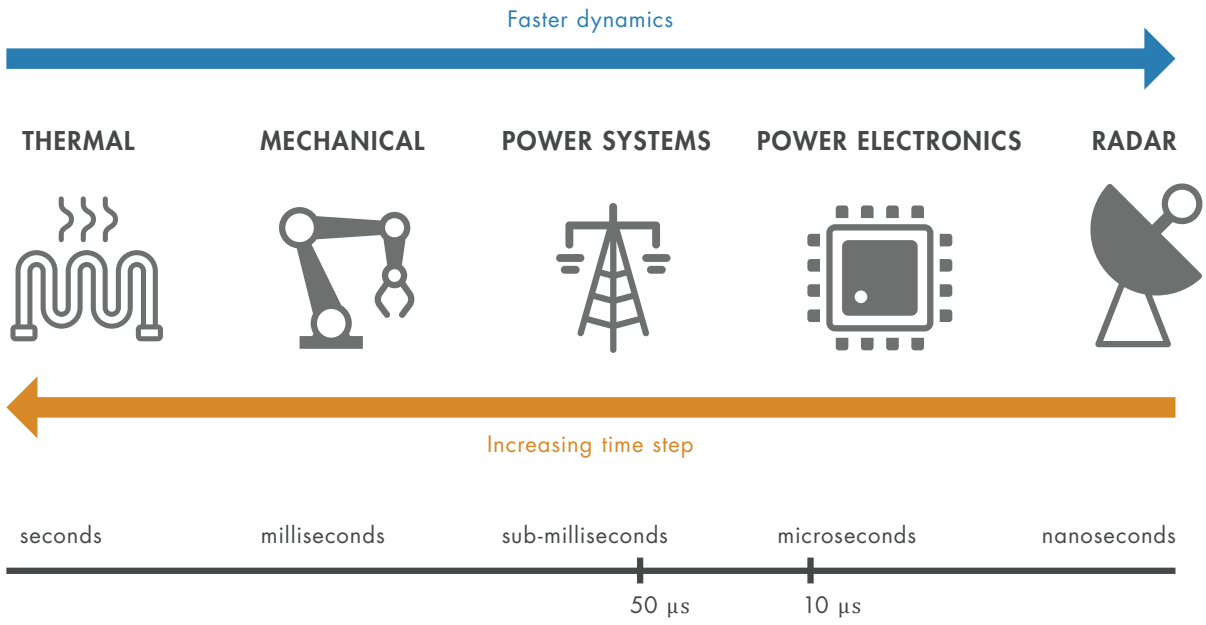

그림 3. 동특성과 시간 스텝의 관계.

일반적으로 보다 단순한 동특성으로 표현되는 모델은 시뮬레이션 속도는 빠르지만, 정확도는 최대화되지 않습니다. 보다 복잡한 동특성을 갖는 모델은 더 느리게 시뮬레이션되나, 실제 전력 전기 동작을 보다 정확하게 표현해 줍니다. Simulink를 사용하면 *다양한 고정 스텝 또는 가변 스텝 시뮬레이션 솔버에서 선택*할 수 있습니다. 데스크탑 시뮬레이션의 경우, 가변 스텝 솔버가 스텝 크기 시간을 조정하여 정확도를 보장해 줍니다. 보다 단순한 동특성을 갖는 모델에서는 가변 스텝 크기가 비교적 커져서 모델의 계산이 더 빨리 이루어질 수 있습니다.

예를 들어, 영구 자기 동기식 모터(PMSM)의 자속기준제어 알고리즘을 설계할 때는 인버터 전력 전기 전압 출력을 전력 트랜지스터 듀티 사이클의 평균값 전압으로 모델링할 수 있습니다. 모터는 집중 파라미터를 갖는 일련의 선형미분방정식으로 모델링할 수 있습니다. 이 시뮬레이션은 스위칭 동작의 영향을 포착하지는 않으나, 정상 동작 조건으로 제어 알고리즘을 조정하고 제어를 테스트하기에는 적합합니다. 이 시뮬레이션은 전력 전기 동작과 PMSM에 대해 보다 간단한 수학적 표현을 사용하므로 전력 전기의 상세한 스위칭과 PMSM의 비선형 모델을 반영하는 모델을 기반으로 한 시뮬레이션보다 빠르게 실행됩니다.

이번에는 모든 전기 손실이 배터리 팩의 충전량을 방전하고 주행 거리를 감소시키는 전기 자동차의 파워트레인에서 PMSM이 사용되는 경우를 가정해 보겠습니다. 이 경우 인버터 모델에 전력 전기 스위칭 동작과 전기 효율에 온도가 미치는 영향을 포함시켜야 할 것입니다. 이에 더해 *JMAG*와 같이 자기 포화도와 로터 및 고정자 간의 공간 고조파를 포착하는, 유한 요소 분석(FEA) 소프트웨어에서 가져온 PMSM의 비선형 모델도 포함해야 할 것입니다. 이 플랜트 모델은 선형 모터 모델과 평균값 인버터를 갖는 모델보다 수학적으로 더 복잡합니다. 그 결과 솔버가 모델에서 기술된 보다 상세한 동특성을 포착하기 위해 스텝을 작게 사용하게 되므로 데스크탑 시뮬레이션이 더 느리게 실행됩니다.

만족스러운 데스크탑 시뮬레이션을 가동했다면 이번에는 실시간 시뮬레이션을 실행할 차례입니다. 즉, 플랜트 모델로부터 실행 가능한 코드를 생성하여 이를 대상 컴퓨터에 배포해야 합니다. Simulink는 실시간 테스트를 위해 *Simulink Coder™*로 C 코드를 생성하고 *HDL Coder™*로 HDL 코드를 생성합니다. 이 코드는 하드웨어 독립적이며, 모든 실시간 하드웨어에 구현할 수 있습니다. *Simulink Real-Time을 Speedgoat 하드웨어와 함께 사용*하면 C 또는 HDL 코드를 대상으로 지정하는 과정이 간소화되고 실시간 테스트의 계측 및 자동화가 쉬워집니다.

> *"Speedgoat 대상 시스템은 어려운 전자기 환경(E = 1V/m)에서 반도체 스위칭을 위한 빠르고 강력한 제어를 제공합니다."*
>
> **— Piotr Dworakowski, SuperGrid Power Converters 팀 리더**

» *기사 읽기*

프로세서 및 대기 시간 요구 사항 충족하기

시스템 동특성의 복잡도는 데스크탑 시뮬레이션의 실행 속도에만 영향을 주는 것이 아니라 HIL 시뮬레이션을 위해 선택하는 하드웨어에도 영향을 줍니다. 실시간 시뮬레이션의 모델 시간 스텝은 실시간 하드웨어의 시스템 지연 시간보다 커야 작업 오버런 오류를 방지할 수 있습니다(그림 4). 시스템 지연 시간은 다음과 같은 두 가지 요인에 따라 결정됩니다.

- 프로세서에서 실행되는 응용 프로그램의 소프트웨어 지연 시간
- 입력 또는 출력 인터페이스의 하드웨어 지연 시간

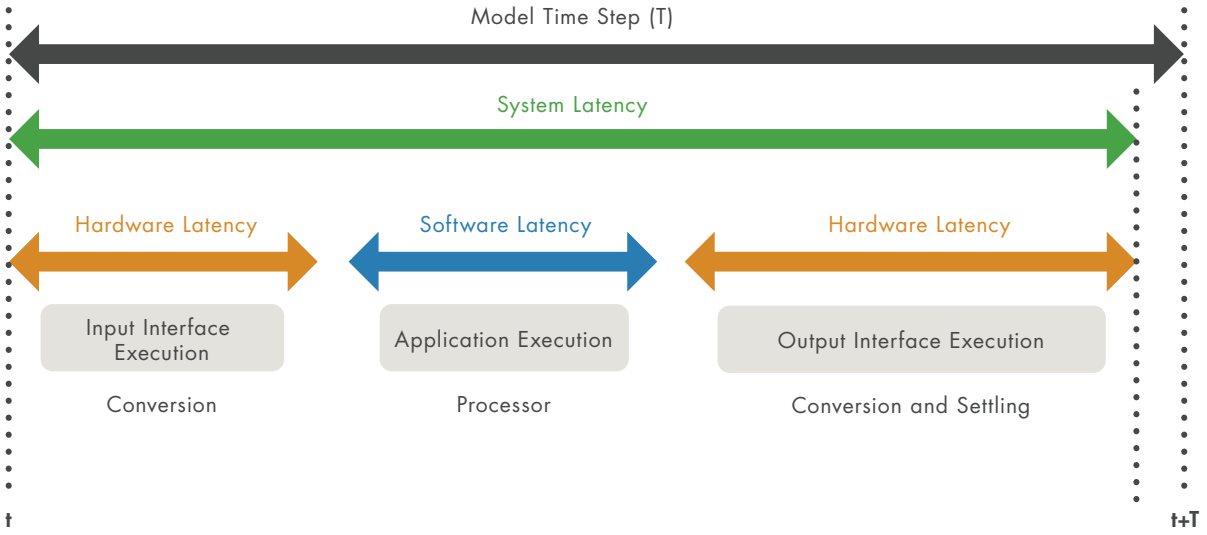

그림 4. 시스템 지연 시간에 영향을 주는 요인.

소프트웨어 지연 시간은 응용 프로그램의 계산 복잡도와 사용된 프로세서의 계산 능력에 의해 결정됩니다. 더 빠른 CPU 또는 FPGA를 사용하고 동시 실행(여러 CPU 코어에서 작업 실행)을 적용하여 소프트웨어 지연 시간을 줄일 수 있습니다. 멀티코어 프로세서와 FPGA를 결합하여 사용하면 느린 동특성을 갖는 서브시스템과 데이터 로깅은 CPU에서 처리하고 빠른 동특성을 갖는 서브시스템과 신호 조건은 FPGA에서 처리하도록 시스템을 분할할 수 있습니다.

전력 전기 스위칭 동작이 포함되었던 앞에 나온 PMSM의 예를 생각해 보겠습니다. HIL 시뮬레이션이 실제 시스템의 예상 스위칭 속도보다 100배 빠른 샘플링 주파수로 실행되도록 보수적으로 설정하는 것이 일반적입니다. 예를 들어, PMSM이 스위칭 주파수 10kHz에 실행된다면 HIL 시뮬레이션은 1MHz 이상에서 실행되어야 스위칭 소자의 영향을 포착할 수 있습니다. 이 주파수에서 실행해야 하는 HIL 시스템이라면 전기 스위칭 동작을 정확하게 표현하기 위해 FPGA 기반 실시간 시스템을 고려하는 것이 좋습니다. FPGA 하드웨어의 시간 스텝은 50마이크로초(20kHz)보다 짧아야 한다는 사실을 경험을 통해 알 수 있지만, 모델 복잡도와 I/O 지연 시간에 따라 CPU 기반 시뮬레이션을 10마이크로초(100kHz)로 사용하는 것이 가능할 수도 있습니다. CPU와 FPGA 중 어느 것을 사용할 것인지에 대한 결정은 모델의 수학적 복잡도와 I/O 채널의 개수 및 유형에 따라 달라집니다. 전력 전기 HIL 시뮬레이션의 경우, 많은 조직에서 스위칭 시스템의 시뮬레이션에 FPGA 기반 시스템을 사용하는 추세입니다. 이 추세는 향상된 제어 시스템 클록 속도로 더 높은 작동 주파수를 지원하기 위해 전력 전기 시스템에서 탄화 규소(SiC) 및 질화 갈륨(GaN) 반도체가 사용됨에 따라 더 강화되고 있습니다.

Speedgoat를 비롯한 대부분의 실시간 하드웨어 공급업체들은 FPGA 기반 시스템과 CPU 기반 시스템을 모두 제공합니다. Speedgoat와 Simulink Real-Time을 사용하면 모델을 분할하고, 분할된 모델의 부분을 여러 CPU 코어에서 (*동시 실행*을 통해) 실행하고, 또 Simulink 프로그래밍 가능한 하나 이상의 FPGA에서 실행할 수 있습니다.

하드웨어 지연 시간은 사용하는 I/O 신호에 따라 결정됩니다. 디지털 I/O는 아날로그 I/O보다 지연 시간이 낮은 경향이 있습니다. FPGA에서는 디지털 I/O의 지연 시간이 1나노초 미만까지 떨어질 수 있는 반면 CPU 기반 시스템에서는 디지털 I/O의 지연 시간이 마이크로초 범위 안에 있습니다. 아날로그 신호 및 통신 프로토콜을 사용할 때는 하드웨어 지연 시간이 아날로그-디지털 변환기(ADC) 기술, 신호 트리거 옵션, 그리고 순차 샘플링이 적용되는 ADC의 경우 측정 대상 채널 개수에 따라 결정됩니다. 수집 속도는 초당 수천 개의 샘플에서 수백만 개의 샘플까지 이를 수 있습니다.

하드웨어 지연 시간은 프로세서와 그 I/O 채널 간의 통신에 의해서도 영향을 받습니다. PCI Express처럼 버스를 통해 I/O와 통신하는 CPU에서 실행되는 전체 스위칭 인버터 및 비선형 모터 모델의 시뮬레이션은 채널 개수에 따라 약 20마이크로초 이상의 시간 스텝으로 실행됩니다. 이 시간 스텝의 일부는 PCI Express 버스와 연관된 하드웨어 지연 시간에 의해 초래됩니다. 반면에 구성 가능한 자체 I/O를 갖는 FPGA에서 실행되는 동일한 응용 프로그램은 버스 지연 시간이 없으며 1마이크로초 수준의 시간 스텝으로 실행됩니다. 또다른 예로, 여러 개의 FPGA를 Aurora 64B/66B 시리얼 통신과 같은 저지연 버스에 연결하면 FPGA와 버스 간의 통신 지연이 1마이크로초 정도 증가합니다.

입출력과 응용 프로그램을 병렬 실행하도록 스케줄링해도 지연 시간을 줄일 수 있습니다. 예를 들어, 아날로그 입력 및 출력에 직접 메모리 액세스(DMA)를 사용하면 모델 실행, 데이터 수집 및 신호 쓰기를 병렬 처리하여 시스템 지연 시간을 크게 단축할 수 있습니다(그림 5).

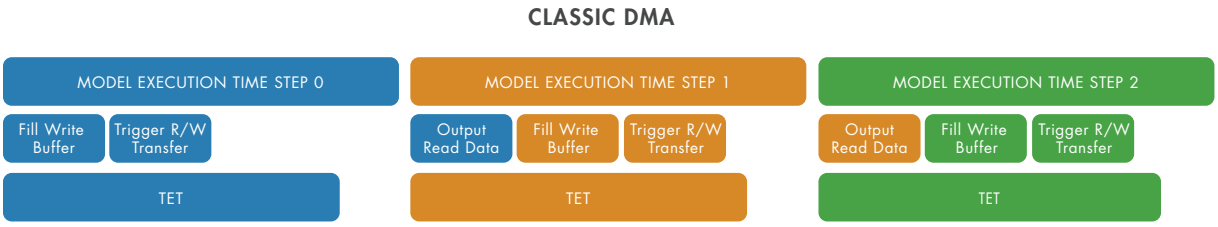

그림 5. DMA를 사용한 모델 및 I/O 전송의 동시 실행.

전력 HIL 시뮬레이션

지금까지는 전력 전기 기반 시스템에서 사용할 제어기의 검증을 위한 실시간 모델 개발에 대한 HIL 시나리오를 주로 살펴보았습니다. 능동 및 수동 회로, 부하 및 공급으로 구성된 플랜트는 대상 컴퓨터에서 실시간 모델로서 실행됩니다. 제어기, 즉 DUT(테스트 대상 장치)는 정상 및 고장 조건에서 테스트되므로 전력 장비를 손상시키지 않고도 대부분의 제어 알고리즘 버그와 문제를 조기에 식별할 수 있습니다. 그림 6에 나와 있는 이러한 유형의 HIL 시뮬레이션을 *제어 HIL*이라고도 합니다. 여기에서 실시간 시스템은 태양(PV) 전지, 인버터 전자 및 그리드를 시뮬레이션하며 실제 플랜트와 동일한 아날로그, 디지털 및 프로토콜 인터페이스를 제공합니다.

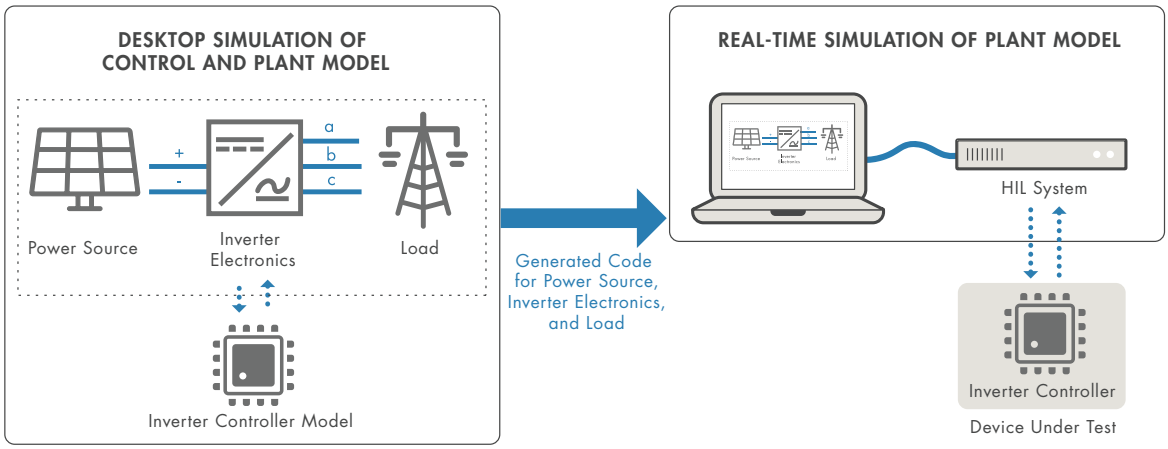

그림 6. 실시간 시뮬레이션을 사용하여 제어기를 테스트하는 제어 HIL.

DUT가 단지 제어기에 불과한 *제어 HIL*과 달리 *전력 HIL*에는 제어기는 물론 하드웨어 소자까지 포함하는 보다 복잡한 DUT가 사용됩니다. 전력 HIL 시뮬레이션에서 DUT는 전력 증폭기를 통해 실시간 시뮬레이션에 연결됩니다.

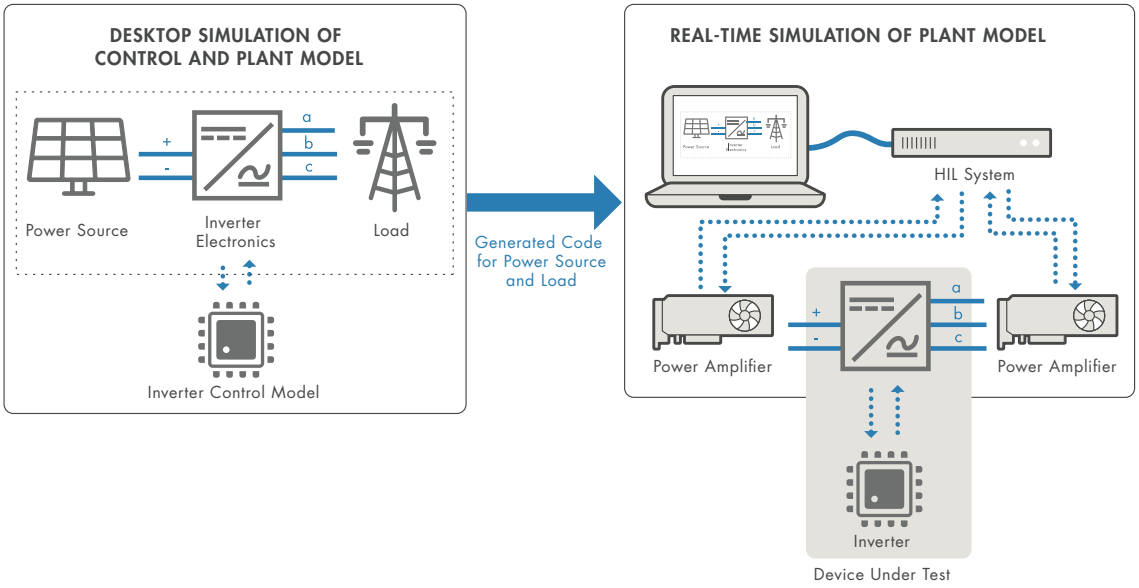

그림 7. 실시간 시뮬레이션과 DUT 사이에 연결된 전력 증폭기를 사용하는 전력 HIL.

그림 7에 나와 있는 전력 HIL 예에서, DUT는 인버터(인버터 전자 및 제어기)를 포함합니다. 인버터 인터페이스는 PV 시스템에 연결된 DC 전압과 전력 그리드에 연결된 3상 AC 전압입니다. 필요한 DC 및 AC 전력 레벨을 제공하기 위해, DUT와 실시간 컴퓨터 사이에 고속 AC 및 DC 전력 증폭기가 연결되어 있습니다. 실시간 컴퓨터는 이 경우에도 PV 시스템과 전력 그리드 연결을 시뮬레이션하여 DC 및 AC 전력 증폭기를 구동하기 위한 고속 신호를 제공합니다.

그 밖의 전력 HIL 응용 분야에는 전기 파워트레인 테스트, 마이크로그리드 에뮬레이션, 배터리 관리 시스템 테스트 등이 있습니다.

HIL 워크플로에서 고려할 사항

전력 전기 제어 설계의 HIL 테스트에 대한 솔루션을 평가할 때는 데스크탑 시뮬레이션에서 실시간 시뮬레이션까지의 전체 개발 워크플로를 고려하는 것이 중요합니다. 그러지 않으면 테스트를 실시하는 시간보다 소프트웨어와 실시간 하드웨어 제품이 연동되도록 설정하는 데 더 많은 시간을 쓸 수 있습니다. 또 다른 중요한 고려 사항은 전력 전기 제어 시스템을 나타내는 시뮬레이션 모델의 충실도입니다. 예를 들어, 시스템 레벨 시뮬레이션 소프트웨어는 피드백과 감시 제어를 위한 총체적인 제어 설계 기능을 제공해야 합니다. 마찬가지로, 전기 모델링 라이브러리는 다양한 수준의 모델 충실도를 포괄하는 구성요소를 제공해야 합니다. 일례로 라이브러리의 IGBT(절연 게이트 양극성 트랜지스터)는 스펙트럼의 한쪽 끝에서 이상적인 동작을 나타내고 반대쪽 끝에서 물리적인 특성을 나타내는 모델 변형을 제공해야 합니다. 마지막으로, 시뮬레이션 모델을 다양한 실시간 하드웨어 대상에 배포하려면 이식 가능한 코드를 생성하는 시뮬레이션 소프트웨어가 필요합니다.

MathWorks와 Speedgoat는 MathWorks를 위한 실시간 운영 체제인 Simulink Real-Time을 공동으로 개발하고 있습니다. 이 긴밀한 협업의 결과로, 데스크탑 시뮬레이션에 사용되는 Simulink 및 Simscape Electrical 모델은 Speedgoat 실시간 대상 시스템을 사용하여 CPU 및 FPGA에서의 실시간 테스트에 재사용할 수 있습니다. Speedgoat 제품은 다음과 같이 전력 전기를 위한 다양한 I/O 연결 및 통신 프로토콜도 제공합니다.

- 고속 아날로그 입력 및 출력
- 광섬유 링크
- 고속 디지털 입력
- EtherCAT, CAN with Flexible Data Rate, PROFINET과 같은 통신 프로토콜

전력 전기 제어 설계의 HIL 테스트를 위한 MathWorks 및 Speedgoat 솔루션에 대해 자세히 알아보려면 *영업 담당자에게 문의*하십시오.

© 2019 The MathWorks, Inc. MATLAB and Simulink are registered trademarks of The MathWorks, Inc. See mathworks.com/trademarks for a list of additional trademarks.
기타 제품 또는 브랜드명은 해당 보유 기업의 상표 또는 등록 상표일 수 있습니다.

11/19