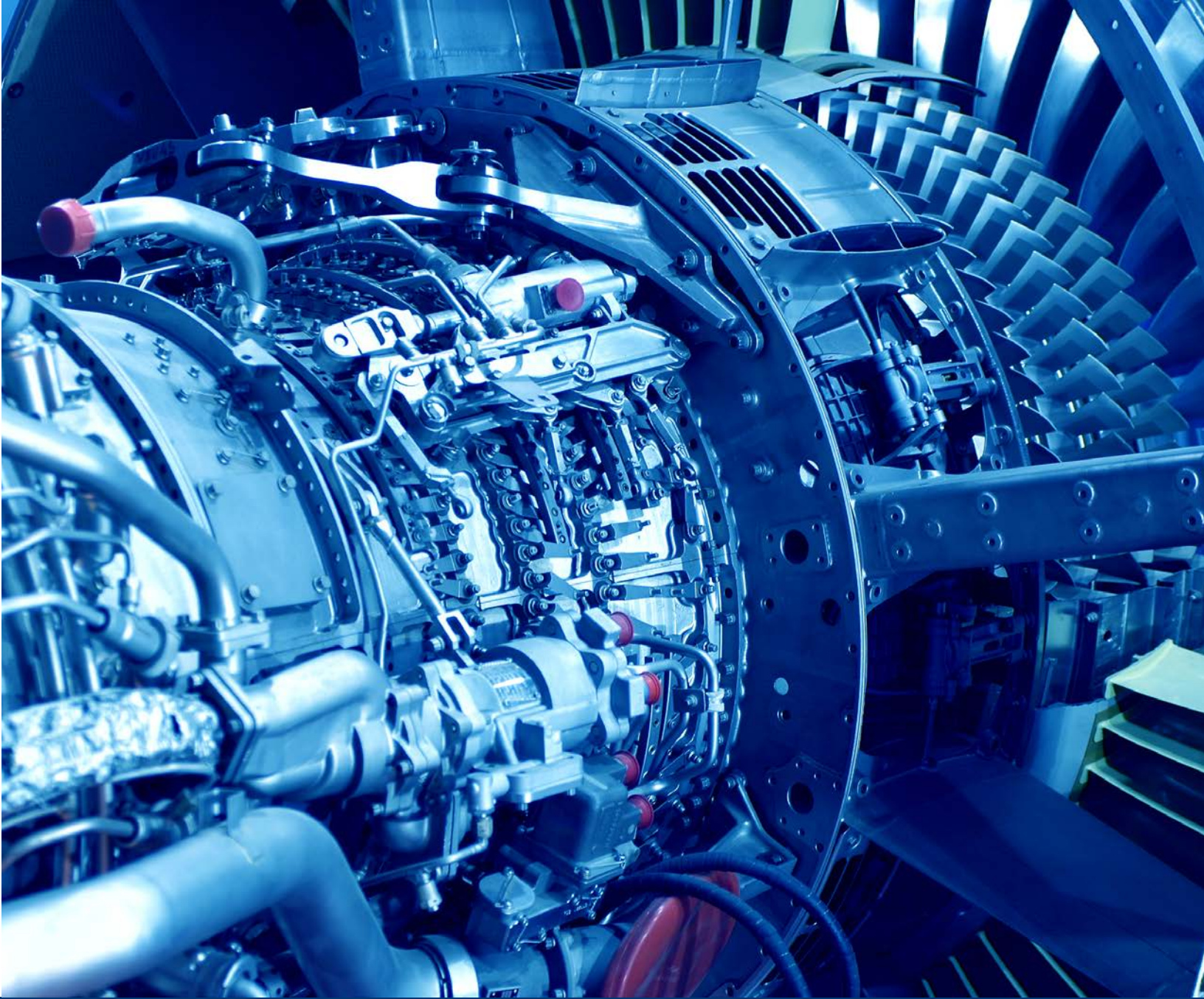




백서

FADEC 시스템의 하드웨어-인-더-루프 테스트: 피커링 인터페이스와 OPAL-RT 테크놀로지스의 공동 솔루션



목차

개요	3
FADEC이란?	3
EEC, DEC, 또는 FADEC	3
FADEC 시스템의 작동 방식	4
입력	4
출력	5
통신 버스	6
FADEC 및 동력 생성	6
실시간 임베디드 시스템	7
HIL 기술을 통한 FADEC 시스템의 설계 및 검증	7
FADEC 시스템에 대한 HIL 시뮬레이션에 필요한 것은 무엇인가?	8
실시간 시뮬레이션	9
온도 센서 시뮬레이션	10
부하(저항) 시뮬레이션	11
위치/변위 시뮬레이션	11
데이터 통신 멀티플렉싱	12
디스크리트 입출력 시뮬레이션	12
스트레인 및 압력 센서 시뮬레이션	13
신호 브레이크아웃 및 오류 삽입	13
시스템 통합 및 제어	14
요약	17
피커링 인터페이스 소개	18
OPAL-RT 테크놀로지스 소개	18

개요

Full Authority Digital Engine Control (FADEC) 시스템은 최신 상업용 및 군용 항공기에 사용되는 복잡하고 안전에 중요한 임베디드 제어기로, 엔진 성능의 모든 측면을 제어합니다. 다양한 실제 조건에서 FADEC 시스템의 기능을 검증하기 위해, 하드웨어-인-더-루프 (HIL, Hardware-in-the-Loop) 시뮬레이션은 강력하고 효율적이며 인증 가능한 검증 전략을 제공합니다.

이 백서에서는 피커링과 OPAL-RT 테크놀로지스가 공동으로 개발한 HIL 솔루션을 소개합니다. OPAL-RT의 실시간 시뮬레이션 및 턴키 테스트 벤치 분야의 리더십과, 피커링의 정밀 신호 스위칭, 센서 시뮬레이션, 시험기기에 대한 전문성이 결합되어, 포괄적인 FADEC 검증을 위한 강력하고 확장 가능하며 인증 가능한 환경을 제공합니다.

FADEC이란?

Full Authority Digital Engine Control (FADEC) 시스템은 엔진 파라미터와 제어 작동을 실시간으로 감독하여 최적의 성능, 연료 효율성, 조종사 작업량 감소, 시스템 신뢰성 향상을 보장합니다.

많은 엔진 OEM 제조사들이 자사 제품에 FADEC을 널리 채택하고 있습니다. 예를 들어, [Rolls-Royce](#)는 (Eurofighter Typhoon에 동력을 공급하는) EJ200 엔진, Trent 엔진 제품군, Sikorsky S-76 등 헬리콥터에 사용되는 M250 터보샤프트 엔진 등에 FADEC을 적용하고 있습니다.

기계적 복잡성을 최소화하고 항공기 항공전자 장치와의 통합을 개선함으로써, FADEC는 유지보수성과 장기적인 성능을 향상시킵니다. 엔진에 대한 모든 권한을 보유한 만큼, DO-178C 및 DO-254를 포함한 엄격한 인증 표준을 충족해야 하며, 이는 HIL 시뮬레이션과 같은 견고한 개발 및 검증 전략의 필요성을 더욱 강조합니다.

피커링과 OPAL-RT의 협업은 실시간 시뮬레이션, 고급 센서/부하 에뮬레이션, 통신 버스 검증, 견고한 시스템 통합을 결합한 완전하고 확장 가능한 HIL 테스트 플랫폼을 제공합니다. 이 솔루션은 FADEC 개발을 가속화하고 시스템 신뢰성을 향상시키며, 항공우주 산업의 최고 수준의 인증 기준 준수를 보장합니다.

EEC, DEC, 또는 FADEC

엔진 제어 시스템 간의 차이점을 이해하면 포괄적인 테스트의 필요성이 더욱 명확해집니다.

- **전자식 엔진 제어 장치(EEC)**는 주로 아날로그 회로를 사용하여 입력 및 출력을 관리합니다.
- **디지털 엔진 제어 장치(DEC)**는 프로세서를 통합하여 제어 작업을 디지털 방식으로 수행하지만, 엔진에 대한 권한은 제한적입니다.
- **FADEC**는 모든 작동 파라미터에 대한 디지털 모니터링 및 명령을 통합하여 엔진 성능을 완전히 자율적으로 제어할 수 있습니다.

여기서 논의되는 접근 방식은 FADEC에 중점을 두고 있지만, EEC 및 DEC 시스템에도 광범위하게 적용할 수 있습니다.

FADEC 시스템의 작동 방식

FADEC 시스템은 방대한 입력 신호를 지속적으로 모니터링하고, 조종석에서 오는 명령을 수신하며, 항공기의 다른 시스템과 통신하고, 출력을 구동합니다. 이제 FADEC 시스템의 각 인터페이스 유형을 살펴보겠습니다.

입력

FADEC 시스템은 다음과 같은 다양한 센서와 입력을 지속적으로 모니터링합니다:

- 배기 가스 온도(EGT)
- 컴프레서 입구 압력
- 연소기 온도 센서
- 터빈 냉각 공기 온도 센서
- 총 공기 온도(T2) 센서
- 공기 밀도 센서
- 공기 흡입 압력 센서
- 컴프레서 방전 센서
- 연료 시스템 압력 센서
- 공기 및 연료 유량 센서
- 샤프트 속도 센서
- 엔진 케이스 진동 센서
- 오일 내 금속 검출기

다른 입력은 조종석에서 이루어지며, 특히 엔진 시동 및 스로틀 제어가 대표적입니다.

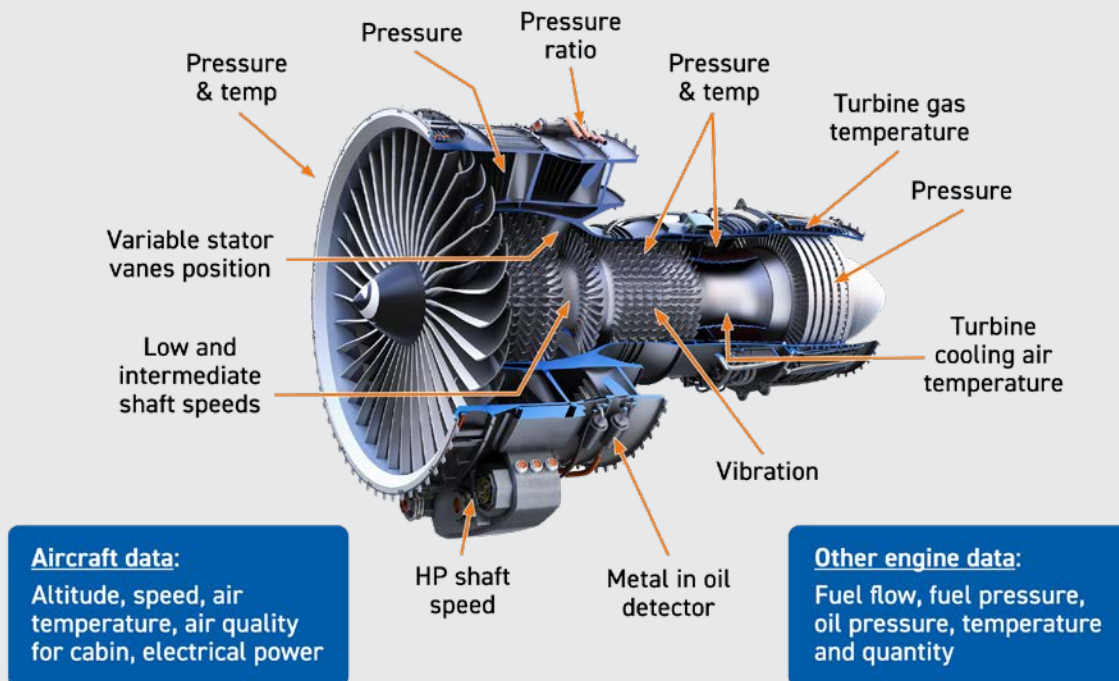


그림 1 - 엔진에서 전달되는 데이터 개략도

FADEC 시스템은 아날로그 및 디지털 신호를 다 수신합니다. 아날로그 입력은 전압 또는 전류(임의 전류 또는 산업 표준 4-20mA) 형태이며, 디지털 입력에는 펄스 폭 변조(PWM) 신호도 포함될 수 있습니다.

출력

FADEC 시스템의 출력 중 다수는 전기 신호를 기계적 운동으로 변환하는 액추에이터를 구동합니다. 이를 통해 변환된 기계적 운동은 예를 들어 밸브의 위치를 조정하는 데 사용될 수 있습니다.

액추에이터는 대부분 엔진에 직접 장착됩니다. 예를 들어, 액추에이터 구동식 연료 계량 밸브는 연소실로 유입되는 연료량을 조절하고 컴프레서 블리드 밸브는 이륙, 상승, 순항 등 비행 단계에 따라 엔진 내 공기 압력을 조절합니다. 착륙 시에는 역추력장치(Thrust Reverser)가 항공기의 감속을 지원하는데, FADEC는 엔진의 추력 방향을 변경하여 제동을 보조하는 유압 액추에이터를 제어합니다.

일반적으로 추가 설치되는 액추에이터에는 배기 가스 출력을 조절하기 위해 배기 흐름 영역을 조정하는 가변 영역 노즐(VAN) 액추에이터가 포함될 수 있습니다. 이 조절 기능은 추력을 최적화하고 연료 효율을 높이며 소음을 저감하는 데 도움을 줍니다. 또 다른 예로는 전력 수요에 따라 터빈 블레이드의 각도를 조정하는 터빈 블레이드 위치 액추에이터가 있습니다. 이러한 액추에이터는 엔진 성능을 향상시키고 효율성을 높이며, 부품의 과도한 마모를 줄여줍니다.

또한, 액추에이터를 구동하지는 않지만 FADEC의 중요한 출력으로 점화 시스템이 있습니다. 이 시스템은 엔진 시동 시점에 점화 플러그를 적절히 작동시켜 원활하고 제어된 시동이 이루어지도록 합니다.

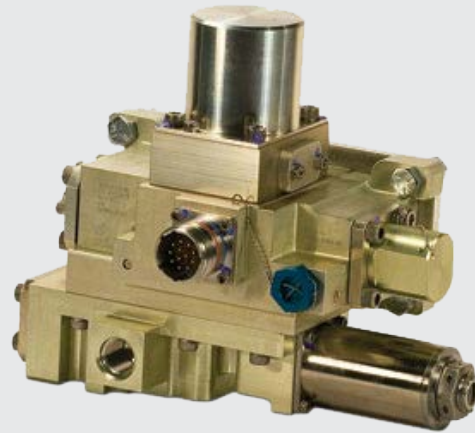


그림 2 - 전기유압식 4방향 연료 계량 서보, 압력 보상 바이패스 밸브, 파일럿 작동 솔레노이드, 차단 밸브를 하나의 통합 패키지로 결합한 JASC 연료 계량 밸브(FMVA) 조립체.

출처 = <https://jasc-controls.com/fuel-metering-valve/>

한편, FADEC 시스템은 종종 업계 표준 4-20mA 아날로그 통신 프로토콜을 사용하여 센서 및 액추에이터와 통신합니다.

FADEC의 실시간 입출력 상호작용의 복잡성과 다양성으로 인해 OPAL-RT의 실시간 시스템과 피커링의 입출력 에뮬레이션을 활용한 HIL 시뮬레이션은 완벽한 검증 전략이 될 수 있습니다.

Communication Buses통신 버스

FADEC 시스템 인터페이스 버스에는 항공 분야에서 널리 사용되는 ARINC 429 및 ARINC 664 Avionics Full-Duplex Switched Ethernet(AFDX)이 포함됩니다. 이러한 버스를 통해 FADEC 시스템과 조종석 디스플레이, 입출력 모듈, 비행 관리 시스템(FMS) 또는 기타 서브시스템과 같은 다른 항공 전자 시스템 간에 데이터를 전송할 수 있습니다. 이더넷과 CAN 버스도 널리 사용되는 버스입니다.

MIL-STD-1553버스는 주로 군용 플랫폼에 사용됩니다. 이 버스는 FADEC와 항공기 내 다른 시스템 간의 실시간 양방향 통신을 위해 일부 상업용 플랫폼에서도 사용되기도 합니다. 시스템 모니터링 및 제어를 위한 항공기 내 중요한 통신에 사용되는 경우가 많습니다.

경우에 따라 FADEC와 다른 시스템 간에 보다 기본적인 버스가 사용되기도 합니다. 여기에는 RS-232(일반적으로 낮은 속도와 최대 50피트의 단거리 통신에 사용되며, 송신기와 수신기를 사용한 지점 간 통신에 적합)와 보다 더 견고한 성능을 제공하는 RS-485(최대 4,000피트의 장거리 및 멀티포인트 통신용으로 설계되어 여러 장치 공유 가능)가 포함됩니다.

HIL 시뮬레이션에서는 이러한 버스를 정확하게 재현해야 합니다. OPAL-RT는 실시간 인터페이스를 통해 해당 프로토콜을 지원하며, 피커링은 차동 신호 라우팅 및 오류 삽입 모듈로 시스템을 보완합니다. 이 두 솔루션을 함께 사용하면 작동 및 오류 조건에서 통신 동작을 완벽하게 검증할 수 있습니다.

FADEC 및 동력 생성

FADEC는 충분하고 안정적인 동력 생성을 보장하여 기체의 전기, 유압, 공압 및 기계 시스템을 지원합니다. 엔진 효율을 최적화하고 안전하고 신뢰할 수 있는 동력 공급을 보장함으로써, FADEC는 항공기의 전체 전력 시스템을 관리하고 운전 안전성 및 성능을 향상시키는 데 핵심적인 역할을 합니다.

FADEC는 항공기의 변화하는 전력 요구에 맞춰 엔진 출력을 조정하고 엔진 부하를 관리하여, 과부하나 저출력 없이 항공기의 전기 시스템에 충분한 전력을 안정적으로 공급할 수 있도록 합니다.

FADEC에 의해 안내되는 효율적인 전력 관리는 연료 효율을 개선하고 항공기의 전기 및 기계 시스템에 더욱 안정적이고 일관된 전력을 제공합니다.

또한 FADEC 시스템은 시스템 고장 시에도 엔진이 적절한 출력을 유지하도록 하는 안전 기능을 갖추고 있습니다. 예를 들어, 한 개의 엔진이 고장 나더라도 FADEC는 전력을 재분배하거나 성능을 관리하여 나머지 시스템이 정상적으로 작동하도록 돕고, 항공기가 조종 가능한 상태를 유지할 수 있도록 지원합니다.

FADEC는 전력 분배 시스템과의 통신을 통해 항공기 구조 내 다양한 시스템에 전력이 할당되는 방식을 세밀하게 조절함으로써 과부하를 방지합니다.

효율적인 전력 제어는 연료 소비를 절감하고 과부하를 방지하며 운전 안전성을 향상시킵니다. HIL 시뮬레이션은 이러한 동적 특성을 재현하여 FADEC 개발자가 다양한 부하 조건에서 엔진 반응을 안전하고 신뢰성 있게 검증할 수 있도록 합니다.

실시간 임베디드 시스템

FADEC는 본질적으로 실시간 시스템으로, 중요한 센서 입력 및 액추에이터 명령에 대한 결정론적 응답을 요구합니다.

OPAL-RT의 실시간 시뮬레이션 플랫폼은 **RTLinux**와 같은 강력한 실시간 운영 체제에서 실행되어 FADEC의 타이밍 요구사항을 정확히 모델링하고 테스트할 수 있도록 보장합니다. 이 시스템은 항공우주 응용 프로그램에 필요한 정확한 응답 시간, 동시성 관리, 복잡한 멀티태스킹을 지원합니다.

실시간 HIL 시뮬레이션은 타이밍 문제를 조기에 탐지하고 FADEC가 항공우주 산업의 엄격한 타이밍 및 안전 기준을 충족할 수 있는지 검증합니다.

HIL 기술을 통한 FADEC 시스템의 설계 및 검증

하드웨어-인-더-루프(HIL)는 하드웨어 입출력과 컴퓨터 제어 테스트 시스템을 사용하여 시스템의 실시간 작동 조건을 에뮬레이션하는 기술입니다.

FADEC 시스템 또는 ECC, DEC, 또는 기타 항공기 시스템의 개발을 위해 HIL은 시험 대상체에 입력 조건을 줍니다. 이 기술은 DUT가 입력에 따른 예상되는 모든 신호의 출력 및 응답 특성을 재현하고, DUT의 출력에 에뮬레이트된 부하를 가하며, 통신 채널을 통해 DUT와 인터페이스함으로써 이를 구현합니다.

HIL 솔루션은 일부 시나리오에서 실제 엔진 테스트에 대한 의존도를 제거하여, 엔지니어들이 개발 초기 단계에서 하드웨어 및 소프트웨어 통합 문제를 조기에 식별할 수 있도록 합니다. 이는 FADEC 시스템 및 유사 항공우주 기술의 비용을 줄이며, 시장 출시 시간을 단축합니다.

HIL 시뮬레이션의 이점은 다음과 같습니다:

- 비용 절감. 시뮬레이션 기술을 활용해 FADEC 반복 설계를 평가하면 프로토타입(및 실제 테스트 장비)의 수가 줄어듭니다.
- 개발 초기 단계에 테스트를 수행하면 버그가 설계 흐름의 후속 단계로 확산되기 전에 식별하고 수정할 수 있어 시간(및 추가 비용)을 절감할 수 있습니다.
- 안전성(및 추가 비용 절감). 고도 비행 또는 극한 온도 조건과 같은 실제 환경 조건에서 운영되는 것을 장비 손상 위험이나 환경 시험 챔버 임대 비용 없이 검증할 수 있습니다.
- 오류 주입. 오픈 회로 및 쇼트 회로로 인한 신호 손실, 응답하지 않는 하드웨어(예: 동작이 멈춘 액추에이터) 및 손상된 데이터(예: 손실된 데이터 패키지)와 같은 다양한 오류 상황을 인위적으로 도입하는 기법입니다. 이러한 오류 상황을 물리적으로 재현하는 것보다 시뮬레이션으로 구현하는 편이 훨씬 용이합니다. 예를 들어, 고전압 환경과 같이 위험이 수반되는 테스트 조건에서는 더 안전합니다.
- 플랫폼의 다른 구성품(예: 센서 모듈)은 아직 개발 단계에 있어 FADEC에 직접 연결할 수 없을 수 있습니다. 그러나 구성품들의 의도된 특성은 이미 파악되어 있으므로, 모델링/시뮬레이션이 가능합니다.

위의 이점들 외에도 HIL은 부분 테스트를 가능하게 합니다. 예를 들어, 엔진 온도 관리를 위한 소프트웨어 모듈을 개발하는 하위 팀이 있다고 가정해 보겠습니다. 이 팀은 터빈 및 압축기 동작, 연료 및 기류, 열역학적 및 역학적 파라미터 등을 포함한 엔진 동역학 모델이 탑재된 컴퓨터에 연결된 테스트벤치에 온도 관련 모든 하드웨어를 연결하여 테스트할 수 있습니다.

OPAL-RT의 실시간 시뮬레이션 플랫폼은 엔진의 열역학, 유체역학, 제어 논리에 대한 정확한 모델을 제공하며, 피커링의 시뮬레이션 및 오류 삽입 하드웨어는 센서 입력, 액추에이터 부하, 오류 조건을 재현합니다. 이 공동 솔루션은 반복 가능하고 안전하며 비용 효율적인 환경에서 조기 검증, 오류 삽입, 부분 및 전체 시스템 검증, 엄격한 인증 테스트를 가능하게 합니다.

HIL 시뮬레이션은 FADEC 시스템 개발을 별도의 작업으로 분할할 수 있도록 하여 매우 효율적입니다. 이는 하위 팀들이 상대적으로 독립적으로 작업할 수 있기 때문입니다(즉, 다른 하위 팀들이 작업을 완료할 때까지 기다릴 필요가 없습니다).

FADEC 시스템의 검증에 있어 추적성은 특히 규제가 엄격한 산업에서 핵심입니다. HIL 시스템 소프트웨어는 스크립트화된 테스트 케이스와 시퀀스로 구성되어 있으며, 모든 테스트의 결과를 기록할 수 있습니다. 또한, 실제 부하로는 쉽게 측정하기 어려운 여러 측정 값을 에뮬레이션된 부하에서 얻을 수 있습니다.

또한, 모든 내용을 기록할 수 있으므로 테스트 조건과 절차를 재현하여 FADEC 시스템의 향후 업그레이드를 검증할 수 있습니다. 본질적으로 HIL 테스트는 제품 설계의 무결성을 개발 과정에서 효율적으로 검증하는 방법입니다. 이는 설계가 발전함에 따라 이루어지는 수정 사항을 포함합니다.

FADEC 시스템에 대한 HIL 시뮬레이션에 필요한 것은 무엇인가?

HIL 환경의 핵심은 테스트 관리 및 실행을 담당하는 호스트 컴퓨터와 환경 및 엔진 동작 모델을 포함한 실시간 컨트롤러로 구성됩니다. 또한, [FADEC 시스템의 작동 방식](#)에서 논의된 모든 요소의 시뮬레이션/에뮬레이션한 다양한 입력, 출력 및 인터페이스가 함께 구성됩니다.

브레이크아웃 박스(BOB, Breakout Boxes)는 HIL 시스템의 필수적인 구성 요소로, 오실로스코프 연결과 같은 테스트 및 측정을 위해 신호에 대한 편리한 수동 접근을 제공하고 오류 삽입을 용이하게 합니다.

OPAL-RT는 실시간 시뮬레이션 및 벤치 통합을 제공하며, 피커링의 모듈형 하드웨어는 필요한 다양한 센서 및 부하 시뮬레이션을 포괄적으로 지원합니다.

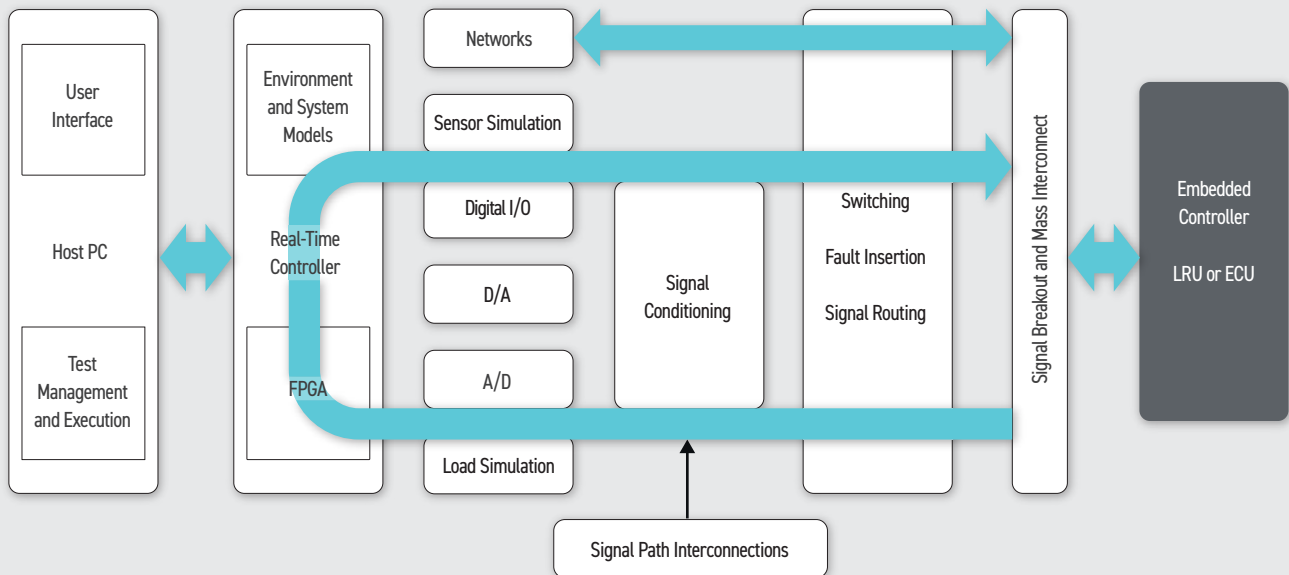


그림 3 - HIL 테스트 시스템의 아키텍처

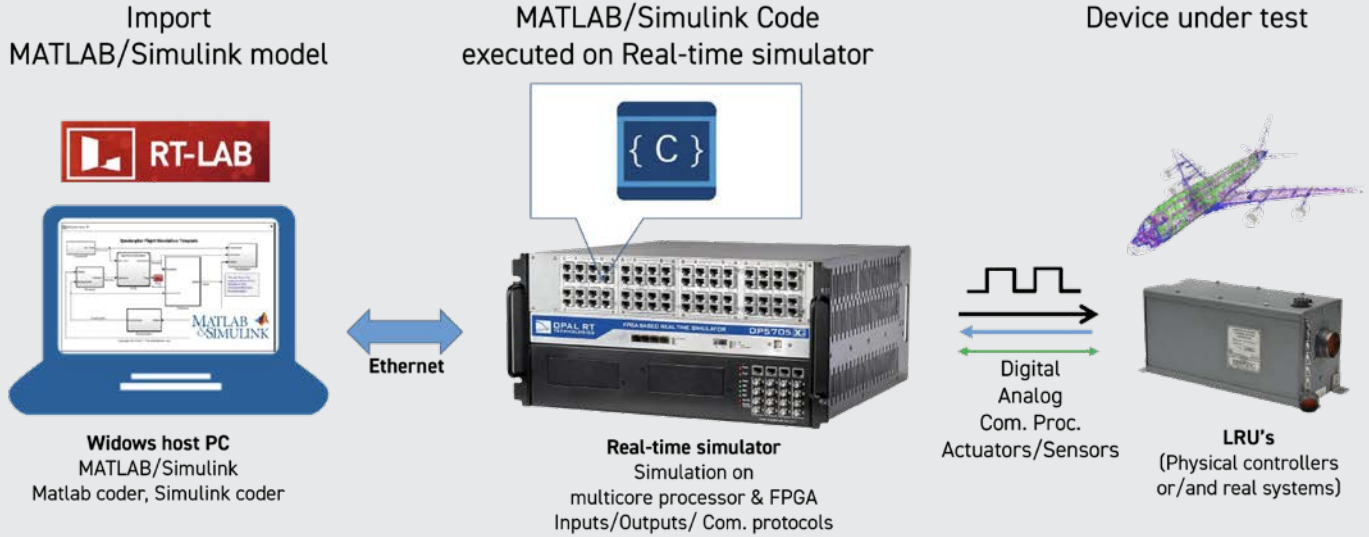


그림 4 - OPAL-RT의 HIL 솔루션 개요

실시간 시뮬레이션

OP5707XG와 같은 OPAL-RT의 실시간 플랫폼은 엄격한 시간 제약 조건 하에서 복잡한 열역학적 및 기계적 엔진 모델을 시뮬레이션하기 위한 강력하고 확장 가능한 환경을 제공합니다.

이 플랫폼은 FPGA-기반 입출력 처리를 지원하며, 피커링의 PXI 기반 또는 LXI 기반 시뮬레이션 모듈과의 연결을 가능하게 합니다.



그림 5 - OPAL-RT OP5707XG는 Intel® Xeon® 프로세서, 최대 16 GB RAM, 250 GB SSD, 4개의 이더넷 포트(1 Gbps 2개, 10 Gbps 2개), USB 3.2 포트, HDMI 및 VGA 출력, 그리고 1 마이크로 초 미만의 실시간 시뮬레이션을 위한 Virtex®-7 FPGA를 탑재

이 플랫폼에는 이더넷 포트 4개(1 Gbps 2개, 10 Gbps 2개), USB 3.2 Gen 2 Type-A 포트 2개, HDMI 및 VGA 비디오 출력이 모두 포함되어 있습니다. 또한 시스템에 Xilinx® Virtex®-7 FPGA가 통합되어 있어 최소 145ns의 시간 간격으로 실시간 시뮬레이션을 지원합니다.

온도 센서 시뮬레이션

열전대 및 RTD 센서를 포함한 엔진 온도 센서는 FADEC 작동에 필수적인 역할을 합니다.

피커링은 열전대 및 RTD 센서를 정밀하게 시뮬레이션할 수 있는 PXI 모듈을 공급하며, 비선형성, 기준 온도 및 오류 조건 등이 적절히 반영되도록 보장합니다.

이를 통해 실제 엔진 없이도 FADEC 시스템이 정상 및 극한 열 조건 모두에서 검증될 수 있도록 합니다.

열전대 시뮬레이터로는 피커링의 41-761 모듈이 있으며, 이 모듈은 8, 16, 24, 또는 32개의 독립된 출력 채널을 제공하며, 출력 범위는 $\pm 100\text{mV}$ 까지이며 정확도는 $0.1\% \pm 5\mu\text{V}$ 입니다.

RTD 센서는 열전대보다 더 정확한 측정 장치가 될 수 있으며, 엔진에 장착될 수도 있습니다. 하지만 이 센서는 온도 범위가 제한적이라, 공기 흡입 온도 측정 등에 사용됩니다. 다양한 유형의 RTD 센서를 정확하게 시뮬레이션 할 수 있는 시뮬레이션 모듈이 제공되며, 대부분의 경우, 아래 그림과 같이 프로그램 가변 저항을 사용하여 필요한 범위/분해능을 달성합니다:

피커링 PXI 모듈은 RTD, 열전대, 스트레인 게이지 및 압력 등 여러 중요한 엔진 센서를 고도의 정확성으로 오류 삽입 기능과 함께 시뮬레이션 합니다. 이 기능은 실제 센서를 사용하지 않고도 다양한 현실적인 시나리오에서 FADEC의 작동을 검증할 수 있도록 합니다.

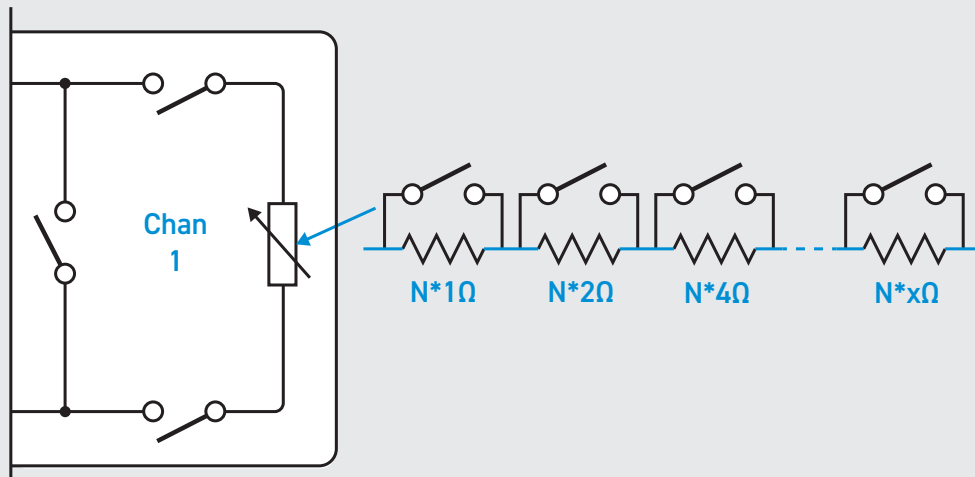


그림 6 - RTD 시뮬레이터 채널을 단순화하여 묘사한 그림. 사다리 회로에서 일부 저항을 우회하고 다른 저항을 포함함으로써 여러 가지 저항 값을 구현할 수 있지만, 범위와 분해능 사이에는 반비례의 조건이 있으므로 상세한 검토가 필요.

예를 들어, [피커링 PXI RTD 시뮬레이터 제품군\(40-263\)](#)에는 PT100, PT500 또는 PT1000 RTD를 최대 24 채널까지 시뮬레이션할 수 있는 모듈 종류가 있으며, -150°C 부터 $+850^{\circ}\text{C}$ 범위에서 0.1% 정확도 및 0.03°C 미만의 시뮬레이션 온도 분해능을 지원합니다.

부하(저항) 시뮬레이션

부하 저항은 다양한 조건 하에서 FADEC에 의한 전기적 특성을 시뮬레이션합니다.

피커링 프로그램 가변 저항 모듈은 통합된 오픈 회로 및 쇼트 회로 오류 시뮬레이션과 함께 다양한 저항 값을 시뮬레이션하며, 개발자가 현실적인 동적 부하에 대한 시스템 응답을 검증할 수 있도록 합니다. 이 점에서, [PXI 정밀 프로그램 가변 저항기](#)는 최대 15W까지 처리 가능한 중전력 모듈과 함께 2mΩ까지의 분해능과 0.03%까지의 정확도를 제공합니다.

위치/변위 시뮬레이션

엔진의 주요 움직이는 부품인 연료 밸브와 압축기 블레이드 등은 다음과 같은 방법으로 모니터링됩니다:

- LVDT (Linear Variable Differential Transformer: 선형 가변 변위 변환기)
- RVDT (Rotary Variable Differential Transformer: 회전 가변 변위 변환기)
- 리졸버

피커링 PXI 시뮬레이션 모듈은 이러한 트랜스듀서를 정확히 재현하여 HIL 테스트 중 FADEC에 필수적인 위치 피드백을 제공합니다.

피커링 [LVDT, RVDT, 리졸버 시뮬레이터 모듈 \(41/43-670\)](#)은 최대 4개의 बैं크 구성이 가능하며, 각 बैं크는 5-선 또는 6-선 VDT/리졸버 출력 1채널 또는 공통 여기 신호를 사용하는 4-선 LVDT/RVDT 2채널을 시뮬레이션 할 수 있습니다. 이를 통해 모듈 당 최대 5-선 또는 6-선 4채널, 또는 4-선 8채널 시뮬레이션이 가능합니다. 또한, 고속 모델은 최대 130krpm의 리졸버 출력 속도 시뮬레이션을 지원합니다.



그림 7 - 피커링 인터페이스 PXI/PXIe 15W 프로그램 가변 저항 모듈은 0.125Ω 단위로 프로그래밍이 가능하며, 제품에 따라 1Ω에서 395kΩ까지의 저항 값을 지원.



그림 8 - The LVDT, RVDT, 리졸버 모듈 (41/43-670)은 공통 여기 신호를 사용하여 최대 5-선 또는 6-선 VDT/리졸버 4개, 또는 4-선 LVDT/RVDT 8개를 시뮬레이션.

데이터 통신 멀티플렉싱

ARINC 429, MIL-STD-1553, CAN 및 AFDX와 같은 통신 버스는 FADEC 시스템과 다른 항공 시스템 간에 중요한 데이터를 전송합니다.

피커링의 고대역폭 차동 멀티플렉서 및 오류 삽입 모듈은 이러한 데이터 트래픽 신호를 투명하게 라우팅할 수 있어, FADEC 시스템의 통신 인터페이스가 실제 부하 및 오류 조건 하에서 정확히 검증되도록 보장합니다.

[PXI 데이터 통신 멀티플렉서\(40-736A-001\)](#)는 소프트웨어 제어를 통해 차동 쌍 32개, 듀얼 차동 쌍 16개, 쿼터 차동 쌍 8개를 스위칭할 수 있도록 구성할 수 있습니다. 이더넷 어플리케이션을 지원하기 위해, 설계에는 Tx와 Rx 쌍을 교차하여 이더넷 크로스오버 케이블의 효과를 시뮬레이션할 수 있도록 하는 스위칭 네트워크가 포함되어 있습니다.



그림 9 - PXI 데이터 통신 멀티플렉서(40-736-001)는 최대 32개의 차동 쌍 신호 스위칭을 지원하며, 이더넷 크로스오버 시뮬레이션을 간소화.

디스크리트 입출력 시뮬레이션

스위치, 릴레이 및 간단한 상태 표시기와 같은 디스크리트 신호는 FADEC 시스템 작동에 필수적입니다.



그림 10 - 디지털 신호 생성 및 감지를 위해 설계되었으며, 오류 보호 기능을 갖춘 테스트 분야에 적합한 산업용 디지털 입출력 제품군.

[피커링 PXI 디지털 입출력 모듈](#)은 디스크리트 디지털 신호를 신뢰성 있게 에뮬레이션하며, HIL 테스트 중 동적으로 제어되어 FADEC 응답을 검증합니다. 이 모듈은 높은 밀도(최대 128개 입력 또는 64개 출력 채널), 확장된 전압 범위(최대 300V 입력 또는 60V 출력), 전류 범위(최대 2A 출력), 프로그램 가변 입력 논리 임계값을 제공하며, 모두 PXI 및 PXIe 형식으로 제공됩니다.

스트레인 및 압력 센서 시뮬레이션

압력 측정값은 엔진 제어에 필수적입니다.

[피커링 PXI 전류 출력 모듈](#)은 4-20mA 트랜스듀서 및 센서 신호를 시뮬레이션하며, 오픈 회로 및 쇼트 회로와 같은 오류를 유도할 수 있는 기능을 갖추고 있습니다. 이를 통해 FADEC 시스템의 압력 감지 및 반응 시스템을 완전히 검증할 수 있습니다. 또한 피커링은 PXI 스트레인 게이지 시뮬레이터도 공급하며, 균형 브리지 구성에서 스트레인 및 압력 센서를 모두 정확하게 에뮬레이션할 수 있습니다.

신호 브레이크아웃 및 오류 삽입

오류 삽입은 시스템의 안전성과 이중화 전략을 검증하는 데 필수적인 역할을 합니다. 피커링 [모듈형 브레이크아웃 시스템\(Modular Breakout System, MBOS\)](#)은 OPAL-RT와 공동 개발한 시스템으로, 수동 브레이크아웃 박스의 기능에 자동화 오류 삽입 유닛의 유연성이 결합된 형태입니다.

이 시스템은 다양한 PXI 오류 삽입 모듈을 수용할 수 있으며, 이를 통해 FADEC 시스템과 시뮬레이션 환경 간의 전기적 인터페이스에서 자동으로 동적 오류를 직접 삽입할 수 있습니다. 오픈 회로, 쇼트 회로, 교차 연결 등 다양한 오류 유형을 안전하고 체계적으로 도입할 수 있습니다.



그림 11 - 아날로그 출력 전류 루프 시뮬레이터(41/43-765-004)는 최대 4개의 16비트 디지털-아날로그 컨버터(DAC)로 구성되어 있으며, 각 DAC는 4개의 전류 출력을 생성할 수 있습니다.



그림 12 - FIU 새시를 BoB에 플러그인 모듈을 통해 직접 연결함으로써 케이블링을 최소화하여 더 컴팩트하고 신뢰성 있는 설계가 가능해지며 신호 무결성이 향상.

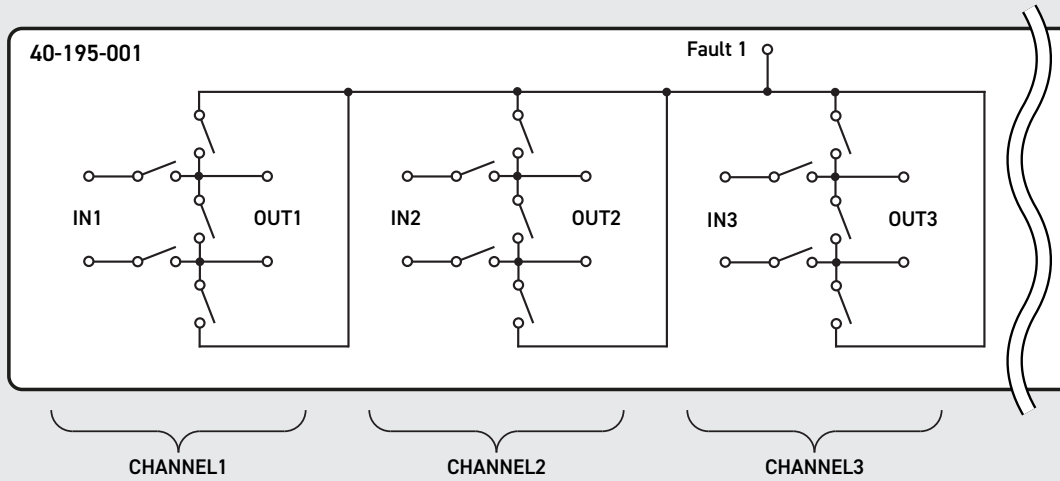


그림 13 - 채널 1은 센서 출력(IN1)과 FADEC 입력(OUT1) 사이의 오픈 회로, 쇼트, 또는 오류 시뮬레이션 가능.

IN1은 센서에서 나오는 보완 쌍 신호일 수 있으며, OUT1은 해당 전압을 기대하는 FADEC의 입력일 수 있습니다. 채널 1은 두 신호의 구성 요소 중 하나 또는 둘 다를 개방 회로로 만들 수 있도록 제어될 수 있습니다. 또한 두 신호를 서로 단락시키거나 “고장 버스”(예를 들어 0V로 설정되어 지면 단락을 모방할 수 있음)에 단락시킬 수 있습니다.

시스템 통합 및 제어

성공적인 HIL 시뮬레이션은 강력한 시스템 통합을 요구합니다.

OPAL-RT는 다음과 같은 완전히 통합된 벤치를 제공합니다:

- 실시간 시뮬레이션 컴퓨터
- 입출력 확장 유닛
- 맞춤형 케이블 하네스 및 인터페이스 박스
- 완전한 추적성 확보 및 자동화 보고 시스템 구축

피커링 스위칭, 시뮬레이션 및 시험기기 모듈은 표준/맞춤형 케이블링 및 상호연결 액세서리와 함께 PXI 및 LXI 표준을 통해 원활하게 통합되며, OPAL-RT의 실시간 제어 프레임워크와도 완전히 호환됩니다. 이를 바탕으로 고객은 DO-178C 및 DO-254와 같은 항공우주 인증 요구사항을 충족할 수 있는 턴키 HIL 테스트 시스템을 제공받을 수 있습니다.

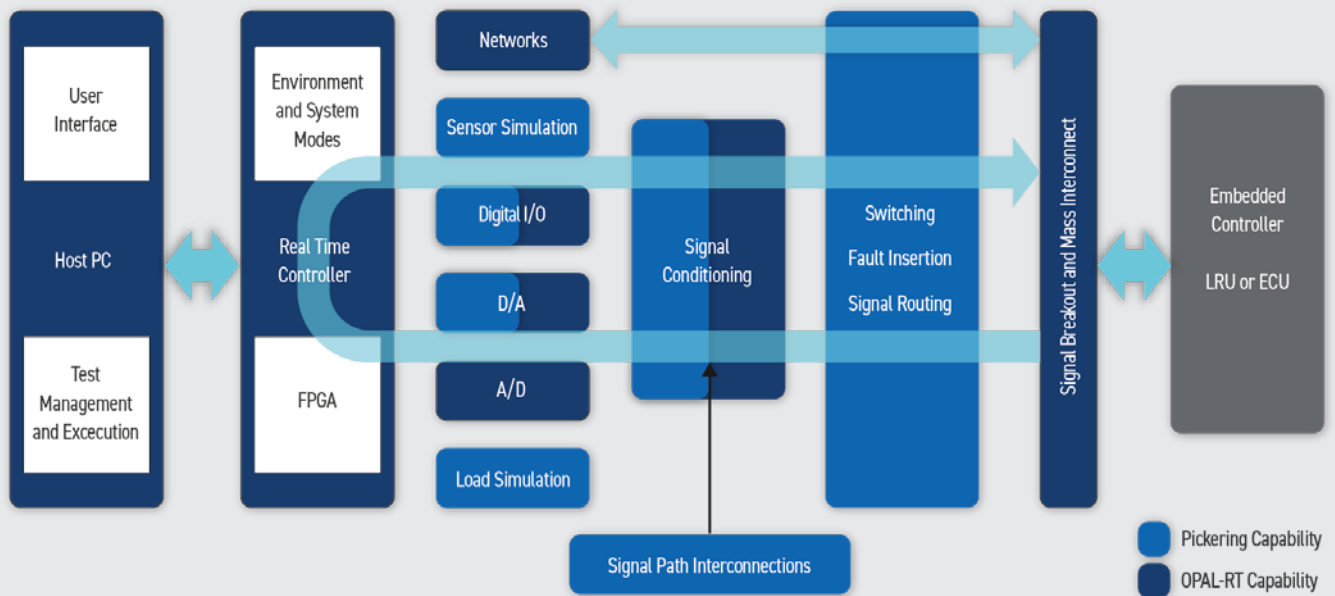


그림 14 - 이 상세도는 완전한 HIL 시뮬레이션 환경을 보여주고 있습니다. 연한 파란색은 피커링 인터페이스에서 제공하는 요소를, 짙은 파란색은 일반적으로 OPAL-RT에서 제공하는 구성 요소를 나타냅니다. 두 회사의 보완 기술이 결합되어 통합적이고 견고한 HIL 솔루션을 형성합니다.

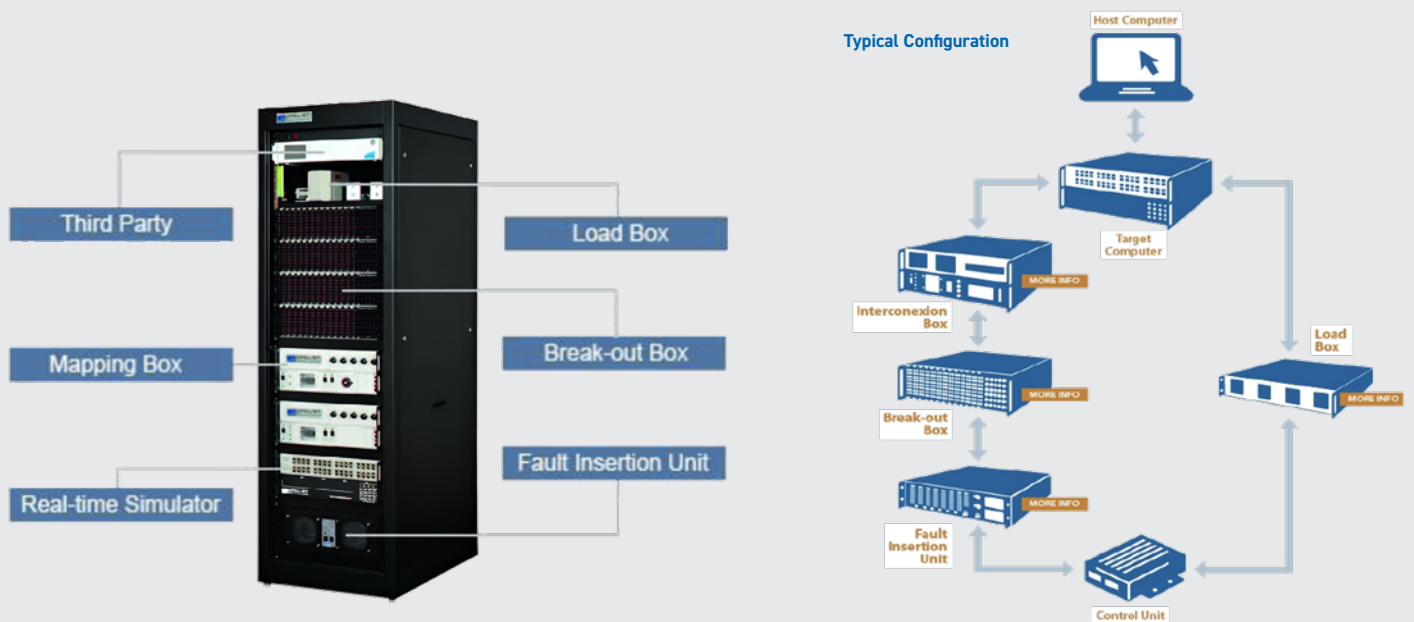


그림 15 - OPAL-RT의 턴키 솔루션은 기본설계검토(PDR, Preliminary Design Review), 상세설계검토(CDR, Critical Design Review) 및 공장인수테스트(FAT, Factory Acceptance Test)를 수행합니다.

OPAL-RT는 터키 항공우주 테스트 벤치 분야에서 입증된 경험을 바탕으로, 실시간 시뮬레이션 플랫폼과 피커링 하드웨어 모듈 간의 원활한 통합을 보장합니다.



그림 16 - OPAL-RT의 테스트 벤치는 FADEC뿐만 아니라 모든 액추에이터, 밸브 및 센서도 테스트할 수 있도록 완전히 맞춤형으로 설계될 수 있습니다.

각 OPAL-RT 테스트 벤치에는 최소 하나 이상의 최첨단 실시간 시뮬레이터가 포함되며, 고객의 사양에 맞게 당사 전문가들이 정밀하게 설계한 맞춤형 매핑 박스와 케이블 하네스를 통해 테스트 대상 장치에 연결됩니다. 추가적인 테스트 맞춤화 및 편의성을 위해, 오류 삽입 장치(FIUs), 부하 박스, 브레이크아웃 박스(BOBs), 센서 시뮬레이터, 프로그램 가변 저항 등을 포함하는 다양한 OPAL-RT 및 제3자 시스템이 있을 수 있습니다. 모든 테스트 벤치는 출하 전 전기 안전 기준을 충족하도록 인증됩니다.

OPAL-RT의 OP8600 상호연결 유닛(또는 매핑 박스)은 고객의 요구사항에 완전히 맞춤화될 수 있는 신호 라우팅 및 신호 컨디셔닝을 지원합니다.

OP5707XG 등의 OPAL-RT의 실시간 시뮬레이션 플랫폼은 복잡한 열역학 및 기계적 엔진 동작을 최소 145ns의 타임 스텝으로 정밀하게 모델링할 수 있어, 항공우주 분야에서 요구되는 엄격한 타이밍 및 안전 기준을 충족합니다.

요약

FADEC 시스템은 열악한 환경에서 작동하도록 설계된 고도의 복잡성을 지닌 필수 안전 임베디드 시스템입니다. 하드웨어-인-더-루프(HIL) 시뮬레이션은 이러한 환경을 재현하여 엔지니어가 실제 엔진 동작, 센서 입력, 액추에이터 출력을 기반으로 시스템 반응을 테스트할 수 있도록 하며, 완전 가동하는 물리적 엔진이 없어도 검증이 가능합니다.

HIL 환경을 통해 엔지니어들은 FADEC 알고리즘, 구성 및 파라미터를 효율적으로 테스트하고 개선할 수 있습니다. 이 반복적인 프로세스는 실제 엔진에서 테스트하는 것보다 빠르게 진행되기 때문에, 개발 주기 초기에 하드웨어 및 소프트웨어 통합 문제를 조기에 식별할 수 있게 해줍니다. 문제를 조기에 해결함으로써 팀은 후기 단계에서의 변경으로 인한 시간과 비용을 절감할 수 있습니다.

HIL 시뮬레이션은 위험하고 비용이 많이 드는 실제 엔진 테스트에 대한 의존도를 최소화합니다. 엔진 동작을 시뮬레이션 함으로써 극한 상황이나 오류 조건을 안전하게 테스트할 수 있는 제어된 환경을 제공합니다. 하드웨어에서 재현하기 어렵거나 위험하거나 비용이 많이 드는 시나리오도 가상으로 테스트하여, 실제 오류 조건에서 FADEC 시스템이 적절히 반응하는지를 검증할 수 있습니다.

또한, HIL 시뮬레이션은 테스트 및 결과에 대한 상세한 기록을 생성함으로써 규제 준수를 지원합니다. 이러한 기록은 필수적인 추적성을 제공하며, 시스템이 제어된 환경에서 반복 가능하게 철저히 테스트되었음을 입증합니다.

OPAL-RT와 피커링의 협력을 통해 실시간 시뮬레이션, 고급 센서/로드 에뮬레이션, 통신 버스 검증, 그리고 견고한 시스템 통합을 결합한 완전하고 확장 가능한 HIL 테스트 플랫폼이 제공됩니다. 이 솔루션은 FADEC 개발을 가속화하고 시스템 신뢰성을 향상시키며, 항공우주 산업의 최고 수준의 인증 기준 준수를 충족시킵니다.

자세한 정보는 pickeringtest.com/HIL 및 opal-rt.com/hardware-in-the-loop/에 있습니다.



피커링 인터페이스 소개

피커링 인터페이스는 전자 테스트 및 검증에 사용되는 모듈형 신호 스위칭 및 시뮬레이션을 설계 및 제조합니다. 항공우주 및 필수 안전 분야에 중점을 둔 당사의 PXI 및 LXI 기반 시스템은 탁월한 유연성, 성능, 장기 수명을 제공합니다. 또한 시스템 통합을 간소화하기 위한 표준 및 맞춤형 상호연결 제품도 함께 제조합니다.

OPAL-RT 테크놀로지스 소개

OPAL-RT는 항공우주, 자동차 및 전력 시스템 분야에서 실시간 시뮬레이션 및 하드웨어-인-더-루프(HIL) 솔루션의 세계적인 선두주자입니다. OPAL-RT의 터키 항공우주 벤치는 전 세계 수천 시간의 운영을 통해 검증되었으며, 맞춤형 실시간 시뮬레이션 플랫폼, 고신뢰성 입출력 시스템 및 강력한 테스트 자동화 도구를 통합하여 FADEC과 같은 핵심 제어 시스템의 규제 준수, 안정성, 혁신을 보장합니다.

직영 영업 및 지원 사무소

Pickering Interfaces Inc., USA
Tel: +1 781-897-1710 | e-mail: ussales@pickeringtest.com

Pickering Interfaces Ltd., UK
Tel: +44 (0)1255-687900 | e-mail: sales@pickeringtest.com

Pickering Interfaces Sarl, France
Tel: +33 9 72 58 77 00 | e-mail: frsales@pickeringtest.com

Pickering Interfaces GmbH, Germany
Tel: +49 89 125 953 160 | e-mail: desales@pickeringtest.com

Pickering Interfaces AB, Sweden
Tel: +46 340-69 06 69 | e-mail: ndsales@pickeringtest.com

Pickering Interfaces s.r.o., Czech Republic
Tel: +420 558 987 613 | e-mail: desales@pickeringtest.com

Pickering Interfaces, China
Tel: +86 4008-799-765 | e-mail: chinasales@pickeringtest.com

Pickering Interfaces, Malaysia
e-mail: aseansales@pickeringtest.com

남아프리카 공화국, 네덜란드, 뉴질랜드, 대만, 대한민국, 말레이시아, 벨기에, 베트남, 싱가포르, 스페인, 이스라엘, 이탈리아, 인도, 인도네시아, 일본, 중국, 캐나다, 태국, 튀르키예, 필리핀, 호주에 지역 영업 에이전트가 있습니다.

Pickering, Pickering 로고, BRIC, BIRST 그리고 eBIRST는 피커링의 상표입니다. 이외의 모든 상호와 제품명은 소유자 또는 소유업체의 상표 또는 등록상표입니다. 본 자료에 포함된 정보는 요약된 것이며 예고 없이 변경될 수 있습니다.