

인터넷 정보

RTDS 홈페이지 소개

박 인 권

(RTDS Technologies Inc, Winnipeg, Canada)

1. 서론

전자기 과도현상(Electromagnetic Transient: EMT) 해석 기법은 발전, 송전 및 배전계통의 시뮬레이션과 연구에 광범위하게 사용된다. RTDS 시뮬레이터는 "실시간" EMT 시뮬레이션을 구현할 수 있는 도구이다. 실시간이라는 의미는

기대하거나/요구되는 응답시간에 따라서 다양한 방법으로 해석될 수 있다. 전력계통에서 "실시간 시뮬레이션"은 모든 필요한 계통망 계산을 완료하는데 소요되는 시간이 선택된 시뮬레이션 시간 간격(일반적으로 50 μ S 이하)를 초과할 수 없다는 것을 의미한다.

과거에는 실시간 시뮬레이션 연구를 수행하기 위해서는 아

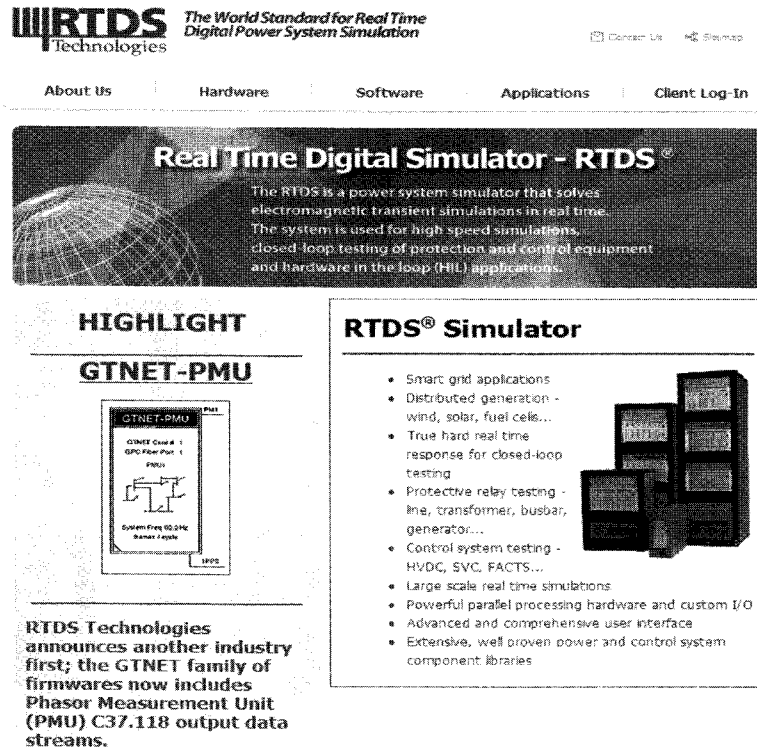


그림 1 RTDS 홈페이지

날로그 시뮬레이터를 사용하였다. 아날로그 시뮬레이터에서는 저항, 인덕터, 커패시터 등의 축소된 피동형 소자를 사용하여 실제의 전력계통 소자의 전기적 특성을 표현하였다. 연구 대상이 되는 계통 모델을 구성하기 위하여 개별적인 소자 모델을 배열하거나 상호 연결하였다. 아날로그 전원 모델과 발전기 모델이 실제의 계통 주파수에서 동작했기 때문에, 아날로그 시뮬레이터는 선천적으로 실시간에서 작동하였다.

아날로그 시뮬레이터에 더하여, 컴퓨터 기반의 전자기 과도 현상 시뮬레이션 소프트웨어(비 실시간)가 다년간 이용되어 왔으며, 전력계통 현상의 해석 방법의 하나로써 오래 동안 인정되어 왔다. 그야말로, EMTF, ATP 및 PSCAD 같은 현대적인 전자기 과도현상 소프트웨어의 모델링 능력은 전력계통을 대단히 상세하게 구현할 수 있다. 디지털 시뮬레이션 소프트웨어는 개별적인 전력계통 소자를 표현하는 수학적 모델에 의존하며, 그래서 사용자는 해석할 전체적인 전력계통을 구성하기 위하여 이들 소자 모델을 상호 결합할 수 있다.

전자기 과도현상 전력계통 시뮬레이션 소프트웨어에 적용되는 가장 일반적인 해법은 Dommel Algorithm이다. 이 Algorithm에서 적분 trapezoidal rule은 전력계통의 node 방정식으로 부터 얻는 적분방정식을 대수방정식으로 변환하는데 사용된다. Trapezoidal rule의 적용은 연속적인 해석 보다는 시간적인 이산 순간에만 해석이 연산될 것을 필요로 한다. 연산 순간들 사이의 시간은 시간 간격(Time step)으로 알려져 있고 Δt 로 표시한다.

전력계통 모델을 표현하는 모든 방정식은 개별 timestep마다 계산되어야 한다. 큰 규모의 복잡한 전력계통 모델은 단 하나의 timestep을 계산하는 데에는 현대적인 컴퓨터로도 수 초의 시간이 걸린다. 이러한 경우에, 시뮬레이션이 non real time(비 실시간) 또는 오프라인(off-line)으로 동작한다고 말한다. 그러나, 만약 컴퓨터가 단일 timestep동안에 요구되는 계산을, timestep보다 작거나, 같은 측정 시간 이내로 연속적으로 수행할 수 있다면, 그 시뮬레이션은 실시간으로 작동한다고 말한다. RTDS 시뮬레이터는 연속적인 견고한 실시간(continuous hard real time) 시뮬레이션을 달성하기 위하여 특수한 하드웨어와 소프트웨어를 결합한 일종의 컴퓨터 이다. 시뮬레이션이 견고한 실시간으로 진행되고 있을 때에 실제의 보호장치와 제어장치를 거기에 삽입하거나(또는 연계할) 수 있고 그 장치들을 시뮬레이션 해석에 포함시킬 수 있다.

2. 주요적용 분야

RTDS 시뮬레이션 시스템은 최초로 소개된 이후 전력 산업 분야에 광범위하게 적용되고 있다. RTDS 시뮬레이터는 대표적으로 다음 분야에 사용되고 있다.

2.1 전력전자 (Power Electronics) 연구

가. HVDC - 재래식 계통 및 VSC 기반의 제어방식

- 1) 계통 설계
- 2) 폐회로(Closed-loop) 제어계통 설계 및 검증 시험
- 3) AC 계통의 영향 연구
- 4) 2 단계 및 3 단계 Level과 Modular Multi-level Converter(MMC)를 포함한 VSC 기반의 제어방식

나. FACTS - SVC, TCSC, STATCOM, UPFC, SSSC, etc.

- 1) 계통 설계
- 2) 폐회로 (Closed-loop) 제어계통 설계 및 검증 시험
- 3) AC 계통의 영향 연구
- 4) 2 단계 및 3 단계 Level과 Modular Multi-level Converter(MMC)를 포함한 VSC 기반의 제어방식

다. 전동기 운전 장치 (Motor Drives)

- 1) 폐회로(Closed-loop) 제어계통 설계 및 검증 시험
- 2) 설정 가능한 변환장치 모델 및 망의 형태 (Configurable Converter Models and Topologies)

2.2 Smart Grid 연구

가. 아래와 같은 신재생에너지 기술의 검토 및 통합 연구

- 1) 완전한 변환 시스템을 가진 이중역자발전기 (DFIG) 및 영구자석동기기(PMSM)를 포함한 다양한 형태의 풍력발전기
- 2) 태양광(Solar)
- 3) Flywheel
- 4) 축전지 저장(Battery Storage)
- 5) 계통망에 대한 자동차(Vehicle to Grid)
- 6) 설정 가능한 변환장치 모델 및 망의 형태 (Configurable Converter Models and Topologies)

나. 새로운 운용 전략과 보호계통의 조사 연구

다. 새로운 통신 프로토콜(IEC 61850)에 대한 조사연구 및 협조검토

라. Microgrid와 분산전원(DG)에 관한 연구

마. Microgrid 운영 시스템의 연구

바. PMU(Phasor Measurement Unit) 기반의 광역 계통 연구

사. 자동화 계통 시험

2.3 PHIL (Power Hardware in the Loop) 연구

가. 전력 변환 시스템의 해석 및 시험

나. 정지형 전자기기(Solid state switch, Solid state Transformer, etc.)의 해석 및 시험

다. Air conditioner와 같은 동적 부하특성의 시험

라. 고조파 발생 부하의 시험

- 마. 풍력(Wind), 태양광(PV), 연료전지(Fuel Cell) 시스템과 같은 물리적인 분산전원(DG)의 해석 및 시험
- 바. 고온 초전도 기기(케이블, 고장전류제한기, 에너지저장장치)의 해석 및 시험
- 사. 전력 장치의 시험
 - 1) 기계적인 시험
 - 2) 전기적인 시험

3. RTDS 의 전력전자 응용 분야

3.1 FACTS devices modeling and simulation

가. STATCOM system

ABB의 SVC Light system을 포함한 최근의 EAF (Electric Arc Furnace) 보상 장치 project에서 시험과 비교 평가를 수행하였다. EAF는 처치하지 않으면 전력품질에 심각한 훼손을 초래하는 몇 가지 교란의 근원이다. 주된 도전은 전력망에 크고 급속한 전압 동요를 초래하는 무효전력 소비의 대규모 통계적인 변동이다. Flicker(즉, 조명 장치 급에서 성가신 깜박거림 현상)라고 알려진 현상은 선천적으로 무효전력의 변동에 연관된다. 고급 수준의 flicker 퇴치를 달성하기 위해서는 ABB의 VSC 기반의 SVC Light 같은 속응성 FACTS 장비를 사용할 필요가 있다.

이 기술은 또한 EAF 운용에 수반하여 공통적으로 발생하는 불평형의 감소에도 매우 효과적이다.

비교를 위하여 설치된 EAF는 전압을 산업용 급인 35kV로 강압시키는 160MVA 변압기를 통하여 220kV 계통으로 연계되었다. 140MVA 정격의 EAF는 164Mvar의 SVC

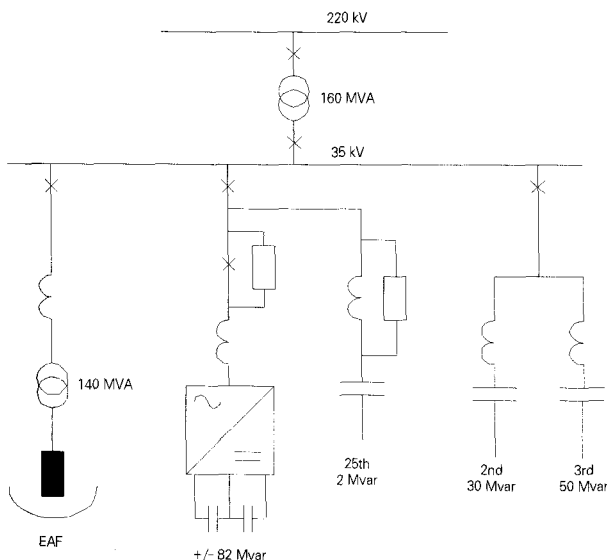


그림 2 EAF 와 SVC Light 의 단선 결선도

Light로 보상하였다. SVC Light 시스템은 +/-82 Mvar의 3-level VSC와 총용량 82Mvar의 3개의 filter로 구성하였다. 구성된 상세 내용은 아래의 그림 2에 제시하였다.

나. VSC-HVDC system

Conventional multi-level system

VSC 기반의 converter들이 더욱 유행하고 광범위하게 응용되면서 전력 분야 기술자들이 그 장치들을 적용하는 것을 지원하기 위하여 새로운 도구와 기법이 개발되고 있다. Off-line simulation tool들과는 다르게 실시간 시뮬레이터는 물리적인 control system과 연결할 수 있으며, 시뮬레이션되고 있는 계통과 closed-loop방식으로 연결하여 실제의 하드웨어 조작이 가능하도록 한다. 이 장점은, 실시간 시뮬레이션을 통해서만 얻을 수 있으며, 실제의 제어계통과 보호계통이 전력 계통에 설치되기 전에 성능과 기능을 검증할 수 있는 결정적인 방법이다. 현장에서는 일으키기 어렵거나 불가능한 사고의 써나리오와 운용 조건들을 실시간으로 시뮬레이션 하고 정밀하게 조정하여 제어시스템과 보호시스템의 동태를 검증

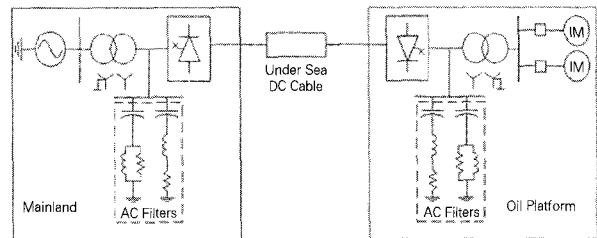


그림 3 정유공장에 설치된 Induction Motor에 전력을 공급하기 위한 VSC 기반의 HVDC 개념도

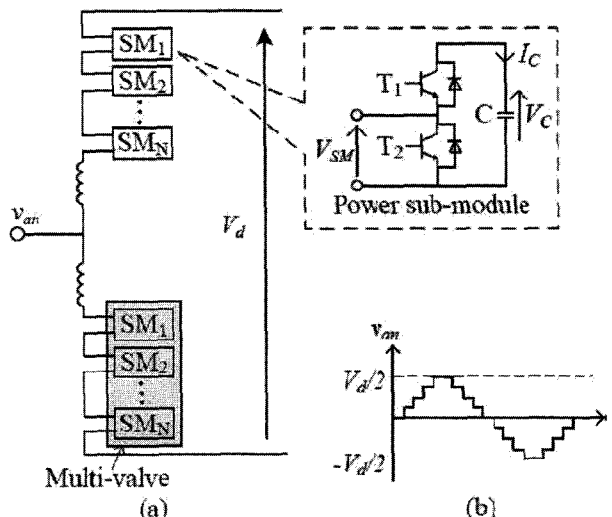


그림 4 MMC Stack의 동작 원리

할 수 있다.

VSC 기반의 HVDC scheme을 제작하는 유명한 제조회사들 중 하나의 회사에서, 과거에는 VSC 기반의 HVDC 장비의 control에 대한 공장시스템시험(FST: Factory System Test)을 수행하기 위하여 analogue-hybrid로 된 실시간 시뮬레이터를 사용하였다. 그러나, 수년 동안, 그 제작회사는 전통적인 HVDC scheme의 control에 대한 FST를 수행하기 위하여 Real Time Digital Simulator(RTDS)에 의존했다. RTDS Simulator의 효율성과 유연성으로 인하여 VSC 기반의 HVDC의 FST에 RTDS를 시범적으로 사용하는 가능성이 대두되었다. 이러한 움직임은 RTDS Simulator가 이미 3-level STATCOM의 closed-loop control system 시험에 대하여 사용되어 왔다는 사실로 인하여 더욱 탄력을 받았다.

RTDS Simulator는 전력회사 계통으로부터 약 200km 이상 떨어져 있는 해상 정유시설에 전력을 공급하는 최근의 project에 시범적으로 사용하였다. 신기술에 의한 에너지 효율 증가와 환경에 대한 영향을 감소했기 때문에 해상 발전소가 더 이상 필요치 않게 되었고 이 project에는 HVDC 송전이 선정되었다.

Inverter의 낮은 단락비 때문에 해상정유공장 project에는 VSC 기반의 HVDC가 요구되었다.

정유 공장의 부하, 약 80MW는 현대적인 VSC 기술에 잘 부합되었다. 나아가서, VSC 기반의 scheme의 PWM firing

은 전통적인 thyristor 기반의 HVDC scheme에 비하여 정유 공장에 설치되는 filter의 물리적인 크기를 최소화 하도록 하였다.

다. MMC(Modular Multi-level Converter) system

MMC(즉, Modular Multi-level Converter)는 converter system의 반쪽 leg를 조립할 수 있도록 적응할 수 있는 동일한 단위 module로 구성되어 있다. 개별 단위 module은 아래 그림에서 보는 바와 같이 두 개의 IGBT 스위치와 하나의 DC capacitor로 구성되어 있다. 이 기법은 Voltage Source Converter 기반의 HVDC system에서 최신 기술의 집합점이 되고 있다.

개별 sub module의 스위치를 제어함으로써, 다단계의 ac 파형을 생성할 수 있다. 만약 적응된 sub module의 숫자가 커지면, 합성된 파형은 매우 낮은 고조파 성분을 포함한 많은 불연속 level을 갖게 되고 결과적으로 filter의 필요성을 없게 된다. MMC 기술에서 핵심적인 개념은 각각의 sub module에 대한 capacitor 전압의 평형이다. 개별 sub module에 대하여 일정한 전압을 유지하도록 개별 sub module에 대한 gating pulse가 생성된다. 그러므로 이러한 topology에는 capacitor 전압 평형 algorithm이 필요하게 된다. RTDS의 simulation library에서 MMC 소자 모델은 하나의 multi-valve를 표현하는 것으로서 RTDS Technologies

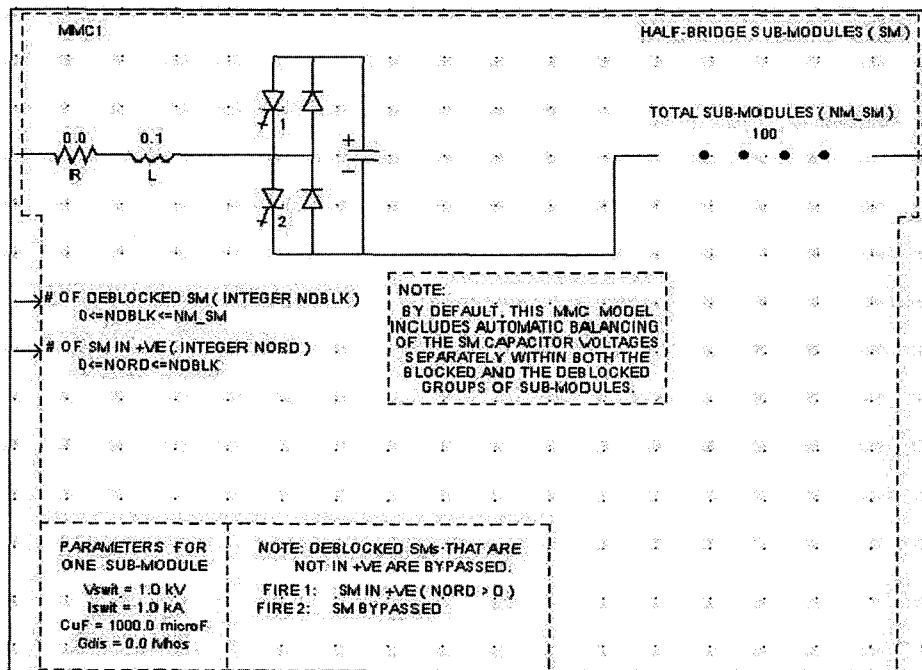


그림 5 RTDS 라이브러리 소자 모델

에서 개발한 module이다. 각각의 multi-valve에서 sub module의 숫자는 1에서 640개 까지 조정할 수 있다. Controller가 결정해야 할 것은 deblocked(active)되는 sub module의 숫자와, deblocked되는 sub module의 숫자, 그리고 얼마나 많은 module이 turned on(T1 on, T2 off) 되도록 할 것인가이다. 만약 turned off(T1 off, T2 on) 되면 그 sub module은 bypass된다. module은 그림 5 와 같다.

예를 들면, 120KV DC bus(+/- 60 KV)에서, 개별 multi-valve내의 sub module 숫자가 100개 이면 각각의 phase unit는 200개의 sub module을 포함한다. 보완적인 규칙이 지켜져야 하며, 만약 상위 multi-valve에서 60개의 sub module이 turned on된다면, 하위 multi-valve에서 60개의 sub module이 turned off(40 개 turned on) 되어야 한다. 그러므로 항상, 하나의 phase unit에서 100개의 sub module이 on 상태가 되어야 한다.

3.2 Power-Hardware In-The-Loop(PHIL) applications

실시간 시뮬레이션의 전통적인 응용은 제어장치 또는 보호 장치의 hardware in the loop simulation과 시험에 초점을 맞추어 왔다. 이러한 구성에서는, simulation으로부터 얻는 계측 값에 관한 정보와 외부의 hardware controller에 의하여 주어지는 제어 명령만이 simulation platform과 controller hardware 사이에 교환되었다. 통상적으로 그 정보는, +/-10V(전압) 또는 0-20mA(전류)와 같은 낮은 수준의 analog 전압/전류의 형태이다. 유사하게 hardware

controller(또는 보호계전장치)로부터의 명령은 통상적으로 TTL(0-5V) 범위에 속하는 gating 신호의 형태이다. 시뮬레이터의 실시간 작동은 controller가 그 입력에서 상응하는 신호를 실시간으로 검출할 수 있게 하고, 하드웨어 뿐만 아니라 소프트웨어까지 포함된 controller의 본질적인 closed loop 형태의 평가를 가능하게 한다.

근래에, HIL의 개념은 실제의 대 전력 장비 까지 시험 장치 구성의 일부로 포함시키는 단계로 까지 확대되었다. 유도전동기와 같은 외부 전력 장비를 운전하기 위하여, 실시간 simulation으로부터 나오는 출력을 적절한 수준으로 증폭할 수 있게 되었다. 이러한 환경에서는 현실 세계의 시험 대상물의 반응을 평가할 수 있게 되었다. Simulation과 외부 전력 하드웨어를 실시간으로 loop 상태를 유지하면서, 계측된 값은 실시간 simulation에 입력 신호로서 보내지게 된다. 아래의 그림은 이러한 실험적인 PHILS 구성의 하나의 사례를 보여 준다.

이 시스템 구성은 현실 세계의 선박 추진 시스템을 실시간 시뮬레이션과 연계하여 시험하기 위하여 준비되었다. 이 시뮬레이션에서 실제의 추진용 전동기를 제외한 선박의 전기 시스템은 RTDS 를 이용하여 simulation 하였다. 추진용 전동기(정격 용량 5 MW)는 simulation 출력으로부터 제어 받는 대전력 증폭기(정격 용량 5 MW)를 사용하여 simulation과 연계되었다. 현실 세계 장치의 응답을 실시간 시뮬레이션에 적절히 반영하기 위하여 전압 및 전류와 같은 실제의 계측 신호들이 실시간 시뮬레이션과 연계되었다. 추진용 전동기의 부하는 동력계(dynamometer)를 통하여 접속

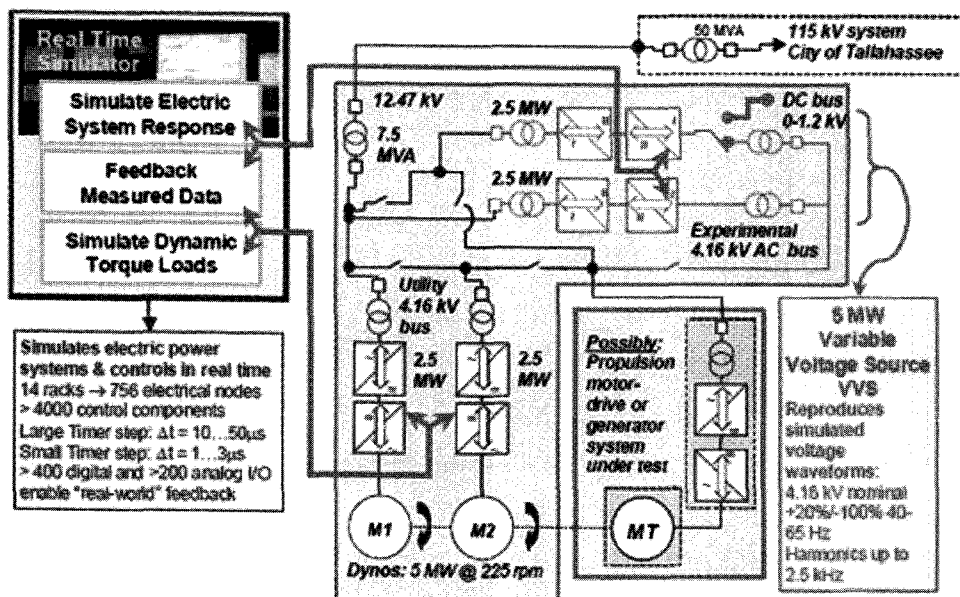


그림 6 CAPS 5MW의 HIL 시험설비의 결선도

되었다. Dynamometer에 적절한 torque 명령을 인가함으로써, 추진용 전동기는 선박의 dynamics와 해상 상태를 반영하면서, 부하 상태에 노출될 수 있게 된다. 진술한 바와 같은 시스템 구성을 이용하여 매우 현실적인 환경에서 실제의 추진 시스템을 시험하였다. 또한, 이러한 시험 환경은 사용자나 연구원에게 실제의 시스템에서는 불가능했던 극단적인 시스템 상황을 적용할 수 있는 기회를 제공하였다.

또 하나의 PHILS 시험 사례는 분산전원의 영역이다. 분산전원과 관련된 하나의 주제는 power conditioning 시스템의 적절한 시험과 관련된다. Power conditioning 시스템은 PV (Photo Voltaic) 및 풍력 발전 시스템과 같은 분산전원(DG: Distributed Generations)과 3상 AC 전력계통 사이에 삽입된다. 종래에는, Power conditioning 장비의 시험은 피 시험대상을 평가하기 위하여 고정된 수준의 전압 또는 전류를 인가하는 정적인 형태의 시험에 국한되었다. 그러나, 이러한 장비들이 현실 세계의 적용에서는 계통 사고와 다른 종류의 이례적인 상황을 포함한 다양하고 색다른 상황에 노출될 것이다.


대부분의 경우에 이러한 이례적인 계통 상황은 복잡한 계통 dynamics를 수반하게 된다. RTDS를 사용함으로써 시험대상이 실제의 배전계통에 설치되었을 때 당면할 상황에서의 시험을 가능케 한다. 이러한 새로운 시험 방법은 한국 내의 RTDS 사용자⁵⁾에 의하여 성공적으로 실증되었다.

4. 맺음말

전력전자 장비에 대한 실시간 시뮬레이션의 도전은 지속되어 왔으며 그러한 전력전자 시스템에 적용된 물리적인 제어기를 상세하게 검증하고 시험할 수 있게 하는 해법이 개발되었다. 광범위한 소자들을 구현할 수 있는 RTDS의 융통성이 성공적인 시험을 완수하는 열쇠가 된다. 서로 다른 switching

상태를 표현하기 위한 저장된 matrix 접근방법을 적용함으로써 실제의 converter에 부합되도록 조정된 switching 손실을 가진 고정된 topology의 2-level VSC bridge를 창작하는 것이 가능하게 되었다.

이 기법은 VSC-HVDC 시스템과 풍력발전 시스템을 포함한 다양한 전력전자 장비를 모델링하는데 성공적으로 적용되었다. 이러한 simulation에는 일반적으로 3μs이하의 simulation timestep이 적용된다. "small timestep" 해석의 추가적인 장점은 전력전자 장비의 포함 여부에 관계없이 매우 밀접하게 결합된 시스템을 소화할 수 있다는 점이다.

RTDS simulator의 효과적인 응용으로 인하여 VSC-HVDC 시스템 및 STATCOM 시스템과 같은 실제의 대 전력 정격의 장비를 설치하고 시운전 하는 작업이 진척되고 있다. 실시간 시뮬레이션의 새로운 응용 분야인, Power Hardware in Loop(PHIL)은 현실적인 전력 수준의 환경에서 전기 기기 같은 실제의 전력 하드웨어를 시험하는 것을 가능하게 한다. 이러한 응용은 전기 기계와 power conditioning system과 같은 power level의 하드웨어를 시험하는 신 기법을 촉진하였다. 

〈 필 자 소 개 〉



박인권(朴仁權)

1995년 연세대 전기공학과 졸업. 1997년 동대학원 졸업(석사). University of Manitoba Ph.D Candidate 2011. 1997년~2002년 LS산전 연구원. 2002년~현재 RTDS Technologies Inc.