

실시간 전력계통 해석용 시뮬레이터 기술

*차승태, 조강욱
전력연구원 전력계통연구실

A Real-Time Simulator for Power System Studies

S.T Cha and K.W Cho,
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - As the power systems evolve, they are incorporating increasingly complex control and protection functions. Due to this, utilities are relying more and more on real-time simulators to study complex system interaction problems. This paper addresses some key questions regarding the needs of such simulators and their characteristic features/requirements. In countries like France and Canada, large scale simulators are developed and placed in practical use, and in others are now under development. Following this background, three typical simulators (ARENE, RTDS, HYPER-SIM) will be examined focusing on the purpose, technology and experiences in a real-time simulator. Discussion will be extended to the future issues and potentials of the power system simulation.

1. 서 론

산업의 발달과 생활수준의 향상으로 전력의 사용량은 꾸준히 증가하고 있으며, 무정전의 안정적인 전력공급을 비롯한 전력의 품질에 대한 요구도 함께 증가되고 있다. 그러나, 환경문제의 대두와 NIMBY현상으로 인한 전원입지 및 송전선로 건설의 제약 등으로 한 곳의 전원입지에 다수의 전원을 수용해야 하는 전원의 대규모화, 이러한 대규모 전원으로부터 전력수요지점까지의 대전력 수송 및 전송로의 제약으로 인한 고밀도의 전력수송 등이 요구되어 전력계통 규모는 증대하고 구성은 더욱 복잡해져 안정적인 전력계통의 운용에 많은 어려움이 제기되고 있으며, 이러한 현상은 계속해서 심화될 것으로 예측된다. 이로 인한 상황에 효과적으로 대처하기 위해서는 전력계통에서 발생하는 제반현상에 대한 정확한 이해 및 지식의 축적, 고도의 계통해석 능력의 배양, 현장감있는 훈련을 통한 계통 운용자의 운전능력 배양이 필수적이라 하겠다. 또한, 향후 전력계통분야에서는 실시간 동태현상 해석, 고조파 영향분석, 발전기 축진동 현상, 새로운 보호기기의 응답특성해석, 계통에 나타나는 각종 썬어지 현상해석, 고속용 제어시스템의 응답특성, 신개발 기기(HVDC, FACTS, 디지털 보호계전기, 안정화 제어설비)의 운전특성 분석, 새로 개발 또는 도입되는 각종 S/W의 성능검증 등이 중요한 문제가 될 것이다. 이상에서와 같은 문제를 해결하기 위하여, 현재는, TNA(Transient Network Analyzer)나 비실시간 계통해석 소프트웨어인 PSS/E, EMTP(Electromagnetic Transients Program)등을 이용하여 전력계통 제반 현상을 해석하고 있는데, 이와 같은 방법은 포괄적, 연속적 계통해석이 어렵고 모의에 장시간이 소요됨으로 인하여 광범위하고 철저한 계통해석이 실질적으로 불가능하며, 특히 정교한 제어 및 보호장치의 계통연계 실증시험은 불가능하다. 이상과 같은 한계를 극복하면서 기존의 모의프로그램과 상호보완적으로 사용되는 전력계통 해석

Tool로서 전력계통 해석용 시뮬레이터(Power System Simulator)가 선진국의 전력회사 및 연구소에 도입되어 활용되고 있는데, 이는 발전기, 송전선, 변압기, 부하 및 각종 보호장치 등의 전력 기기 모델로 구성된 모의 전력계통으로서 전력계통 제반현상, 즉 각종 썬어지, 전자기적 과도현상, 전기기계적 과도현상, 지역간 저주파계통 중요현상, 또는 비교적 긴 시정수를 갖는 계통전압 불안정 현상 등을 종래의 비실시간 모의와 달리 계통에서 발생하는 현상 그대로의 실시간(real-time)으로 모의하는 것으로, 연속적, 포괄적, 종합적 계통해석을 가능케 한다. 이러한 전력계통 시뮬레이터는 전력계통 현상의 통계적 연구를 위해 동일한 전력계통 현상의 수많은 모의가 필요한 경우, 고가의 정밀한 직류송전·가변 송전계통 제어설비 또는 새로운 전력기구나 제어장치를 실제계에 연결할 때의 현상을 연구하고자 하는 경우, 수십 μ s에서 수 십분에 걸쳐서 발생하는 전력계통현상 등 넓은 주파수대역의 전력계통 현상의 모의·해석 등을 수행하는 필수적인 장치이며, 실물축소형, 아날로그/하이브리드형, 디지털형 등으로 분류된다. 본 논문에서는 DSP(Digital Signal Processor)나 고성능 병렬컴퓨터(Parallel Computer) 등을 사용하여 정밀도, 신뢰도, 경제성, 편이성 등에서 유리한 디지털형에 대하여 검토하고자 한다.

2. 본 론

본론에서는 실시간 전력계통 해석용 디지털 시뮬레이터의 전체 구성과 원리, 시뮬레이터가 구비하여야 할 H/W 및 S/W적 구조를 비롯하여, 시뮬레이터의 응용범위, 일반적 특징 및 기능에 대한 요구사항을 서술하고, 현재 프랑스, 캐나다 등 외국의 주요 전력회사와 연구소에서 개발 또는 도입하여 사용중인 시뮬레이터 등에 대해서 살펴본다.

2.1. 시뮬레이터 구성 및 원리

아래의 [그림2.1]은 실시간 전력계통 해석용 디지털 시뮬레이터의 구성도를 나타낸다. 디지털형 시뮬레이터는 전력계통에 내재하는 본질적인 병렬성을 이용하여, 다수의 CPU(Central Processing Unit)에 의해 약 50 μ s대의 time step of integration에 의해 독립적으로 동시에 계통 현상을 실시간 연산하면서 외부의 실제 전력기기와의 interfacing을 제공한다. 즉, 장거리 송전선에서 발생하는 계통현상 전파지연(time delay)에 의해 송전선의 전파 시간보다 짧은 시간에 발생하는 송전선 양단의 전기적 현상은 서로 독립적으로 된다. 따라서 과거(하나의 단위계산시간[time step]이전)의 계통 정보를 바탕으로 송전선 양단의 전기적 현상이 독립적으로 계산될 수 있다. 비실시간 순차적 프로그램인 EMTP 모델을 기본으로 병렬처리가 가능하게, 전 계통을 전파 지연에 의해 소 계통(subsystem)으로 구분하여 계산함으로써 실시간 처리를 가능케 한다.

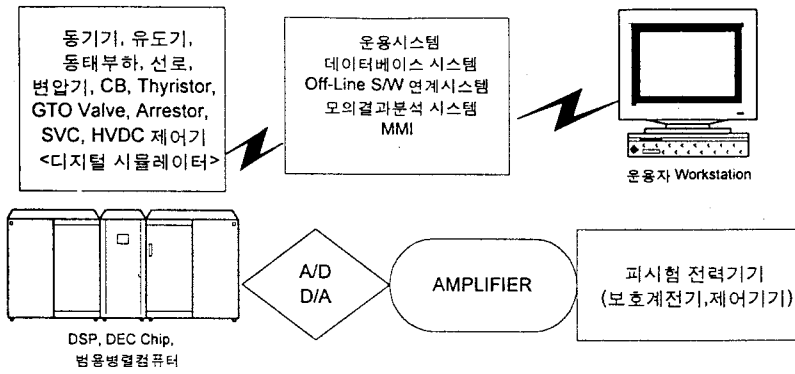


그림 2.1 디지털형 시뮬레이터 하드웨어 구성도

2.2. 시뮬레이터 하드웨어

시뮬레이터를 구성하는 하드웨어는 최소한 다음과 같은 요소가 요구된다.

- 사용되는 컴퓨터 프로세서는 표준화되고 상업적으로 구입가능하여야 한다.
- 병렬처리 컴퓨터의 속도는 고속의 개폐 기능을 포함하는 HVDC, FACTS 등의 과도 특성과 이들의 전력계통 연계 과도특성을 실시간으로 재현할 수 있어야 한다.
- 병렬처리 컴퓨터는 필요에 따라 확장 가능하고, 이에 따라 실시간 특성이 손상되지 말아야 한다.
- 복수의 피시험 전력기기로부터 디지털 또는 아날로그 신호를 시뮬레이터 내의 원하는 전력기기 모델과 주고받을 수 있는 단자를 제공하여야 한다.
- 계통의 각종 현상을 분석하는 S/W를 구비하고 전력계통 응용 기술의 개발을 원활히 수행할 수 있는 EWS 과 전력 계통의 총괄 계통 데이터를 관리하는 File Server를 제공하여야 한다.

2.3. 시뮬레이터 소프트웨어

시뮬레이터를 구성하는 소프트웨어는 최소한 다음과 같은 요소가 요구된다.

- 소프트웨어는 성능향상성(upgradability), 단위성(modularity), 유연성(flexibility), 이식성(portability)등이 있어야 한다.
- 사용자에게 전력계통 구성요소들로부터 전력계통 구성, 파라미터 입력, 연구사례 모의, 모의결과 분석 등을 가능케 하여주는 graphical user interface(GUI) 기능을 제공하여야 한다.
- GUI는 Windows 환경으로 구현되어야 한다.
- 전력계통 구조를 분석하여, 병렬로 처리될 수 있는 분리된 소 작업 단위들을 만들어낼 수 있어야 한다.
- 모든 파라미터들은 모의 대상을 다시 컴파일하지 않은 채 변경될 수 있어야 하며, 전력계통 구조의 변경을 제외한 경우 외에는 재컴파일의 필요가 없어야 한다.
- 컴파일된 시뮬레이션 코드를 프로세서로 읽어들이고, 시뮬레이션을 시작하며, 시뮬레이션 중 전력기기 모델 또는 모의 프로세서의 파라미터를 변경할 수 있는 기능을 제공하여야 한다.
- 대규모 전력계통 모의를 위해 조류계산 프로그램과 시뮬레이터를 초기화시켜주는 프로그램이 시뮬레이터 자체에 내장되어야 한다.
- EMTP 입력형식의 상호 유도결합 가공 송전선로의 상수계산 프로그램을 제공하여야 한다.
- EMTP 입력형식의 지중 케이블의 상수계산 프로그램을 제공하여야 한다.
- 다음의 기능을 수행하는 시뮬레이터 운영 시스템을 제공하여야 한다.

- 전력계통의 구성 및 변경 기능

- 관측용 신호의 선택 기능
- 데이터 취득의 개시 기능
- 시뮬레이션 결과의 온라인 분석 기능
- 시뮬레이션 결과의 통계적 분석 기능

2.4. 시뮬레이터의 응용범위

시뮬레이터는 실시간으로 최소한 다음과 같은 전력계통 현상을 재현할 수 있는 기능이 요구된다.

- AC/DC 전력계통의 일반적인 과도 현상, 동특성, 장시간 동특성 등의 해석
- 전력계통을 매개로 한 복수의 HVDC, FACTS(SVC 등), 보호계전기 등 고속용 장치간의 상호 작용 해석
- 통합적 신규 보호 및 제어 시스템의 설계 및 전력계통에 대한 영향 분석을 위한 폐회로 시험
- 현장 실증시험의 대체
- 다른 계통해석 수단으로부터의 모의결과의 검증
- 운전원 훈련 및 운용 신뢰도 제고

2.5. 시뮬레이터의 일반적 특징 및 기능

시뮬레이터의 일반적 특징과 기능을 살펴보면, 다음과 같다.

- 시뮬레이터는 전자과도현상 해석 알고리즘을 구현한 컴퓨터 프로그램 및 운용, 데이터베이스 관리, 모의결과 분석, 사용자 편의 기능 등을 제공하는 컴퓨터 프로그램과 이러한 프로그램의 실시간 연산을 구현한 고속의 컴퓨터 프로세서들을 채용한 컴퓨터로 구성되어야 한다.
- 시뮬레이터의 전력계통 해석 알고리즘은 상용의 EMTP에서 사용되는 전자과도현상 해석 알고리즘에 근거하여야 한다.
- 대칭 또는 비대칭의 전력계통 조건하에서 최소 0~3kHz의 전력계통 현상을 3상 계통에 대하여 실시간으로 재현할 수 있어야 한다.
- HVDC 제어기, FACTS 제어기 또는 계전기와 같은 실제의 전력계통 장치와 연계할 수 있어야 한다.
- 동태 부하를 포함하는 전력계통 구성요소의 세부 모델을 제공하여야 한다.
- 주 모의대상 시스템에 연계된 주변 시스템의 동적 모델링이 가능하여야 한다.
- 상기의 전 주파수 영역에 걸친 다수의 전기 신호 변수를 관측할 수 있는 대규모이고, 정밀한 데이터 취득 기능을 제공하여야 한다.
- 전력계통 구성, 전력기기의 파라미터, 선택된 모델 등에 관한 정보를 포함하는 통합적 전력계통 데이터베이스를 제공하여야 한다.
- 전력계통 시뮬레이션은 실시간 모의 모드와 비실시간 모의 모드를 제공하고, 양자 모두 동일한 기기 모델을 사용하여야 한다.
- 시뮬레이터는 시스템의 최초 기동시 뿐만 아니라, 운용 중에도 자기 진단 기능을 수행하여야 한다.
- 가능한 한 상업적으로 이용 가능한 H/W 및 S/W를 사용하여야 한다.
- 모든 수리 모델은 단위성(modularity), 유연성(flexibility), 이식성(portability)이 있어야 한다.

○ 대량의 프로세서에 다양한 실시간 전력기기 모델이 구현되므로 전력기기 및 운용 S/W의 단위성은 시뮬레이터의 유지 보수를 위하여 충족되어야 한다.

○ 기능, 성능 및 운용 중에 발생된 변화를 용이하게 반영할 수 있도록 시뮬레이터는 유연성을 띄어야 한다.

○ 컴퓨터와 관련 S/W 기술의 급속히 진보하는 환경하에서, 컴퓨터 H/W의 변화 시에 전력기기 모델의 재설계 등이 요구되지 않도록 전력기기 및 운용S/W의 이식

성이 충족되어야 한다.

2.6. 외국의 시뮬레이터 설치 사례

전력계통 분야의 실시간 디지털 시뮬레이터 개발운영 경험과 전문가를 보유한 실증기술 보유사를 중심으로, 현재 외국에 설치되어 있는 대표적인 시뮬레이터 중에서 프랑스 EDF의 ARENE, 캐나다 RTI사의 RTDS, 및 캐나다 TEQSIM사의 HYPERSIM이 주 분석대상이며, 각 시뮬레이터의 특성을 비교 요약한 것이 [표 2.1]이다.

표 2.1 ARENE, RTDS & HYPERSIM의 비교

	ARENE	RTDS	HYPERSIM
시뮬레이션 알고리즘	EMTP 알고리즘 (C/C++ 언어)	EMTP 알고리즘 (Assembly & C 언어)	EMTP 알고리즘 (C/C++ 언어)
적용연구 분야	보호계전기 계통해석 HVDC 설계	계전기 시험 DC 계통 AC & DC HVDC/SVC	AC 전력계통 전력계통확장 훈련용 HVDC/SVC
프로세서 (병렬컴퓨터)	HP PA-8200 (HP Exemplar X-Class)	NEC 77240DSP OR AD21064 (Rack단위의 Computing Node)	DEC 21164 RISC & AD 2106X DSP (Rack단위의 Computing Node)

2.6.1 ARENE System

ARENE 시뮬레이터는 시뮬레이션 S/W, 시뮬레이션 컴퓨터 및 I/O 시스템 등 3부분으로 구성되었다. 사용하는 시뮬레이션 S/W는 실시간 모의를 위한 시뮬레이션 초기화 프로그램인 IRENE, 실시간 모의 모듈로서 SPP OS상에 실시간 모의환경 구성 및 유지를 하는 MURENE과 상기 두모듈의 구동모듈인 GUI등을 기본으로하여 사용자 편의를 최대한 고려함으로써, 강력하면서도 유연성이 뛰어나며, HP사의 CONVEX SPP-X2200 (Scalable Parallel Processing), PA-8200 200MHz 프로세서 500MFlops 채용)라는 범용 병렬컴퓨터(SPP 고유의 병렬 처리 구조인Crossbar Architecture는 프로세서간의 "Communication Bottleneck"의 문제를 해결한 구조)를 채용, 버스구조와는 달리 대기시간 없이 동시에 데이터를 전송하여, 전력계통 현상의 실시간 구현 및 고속 병렬처리를 가능케 하고 있다. 또한, 광케이블 링크를 활용한 고속 I/O 시스템을 활용하여 시험기기 연계 I/O와 SPP간 고속 통신을 보장하여 시험기기의 실시간 모의 시험을 위한 체계를 구축하였다.

2.6.2 RTDS System

RTDS 시뮬레이터는 범용컴퓨터를 사용한 ARENE과는 달리 특수한 하드웨어(DSP를 내장한 Rack으로 구성된 시뮬레이션 컴퓨터)와 시뮬레이션 S/W(PSCAD) 및 I/O 시스템 등 3부분으로 구성되었다. RTDS S/W 구성을 살펴보면, 응용 S/W 프로그램인 PSCAD를 사용하여, 사용자가 모의 시나리오를 프로젝트 및 케이스별로 파일 관리할 수 있는 파일관리 시스템(File System Management), 윈도우 환경에서 원하는 계통 모델을 쉽게 작성 및 편집할 수 있는 계통 모델 편집 프로그램(DRAFT), 송전선로 분석(T Line), 송전케이블 분석(Cables) 및 시뮬레이션 중 RTDS로부터 원하는

데이터를 취득하여 플로팅 가능케 하는(Uni/Multi Plotting)등으로 구성되어 있다. 시뮬레이션 컴퓨터는 Rack으로 구성되어 있고, 각 Rack은 총 20개의 카드를 장착할 수 있으며 18개의 Tandem Processor Card(NEC 77240 DSP 11MHz 프로세서 22MFlops채용) 또는 Triple Processor Card(AD SHARC 20164 DSP 40MHz(40MIPS) 프로세서 160MFlops채용), 1개의 Inter Rack Card(각 RACK간의 데이터 통신 담당, 6개의 트랜스미터와 1개의 동기 MUX로 구성되는 Transmit Channel과 6개의 Receive Channel이 각 쌍으로 연결되어 있으며 전 이중 전송 방식을 채택하여 물리적으로 2개지만 논리적으로는 하나로 취급되어 고속 전송이 가능토록 설계), 1개의 Workstation Interface Card(워크스테이션 및 일반 Ethernet 네트워크 지원하는 통신카드, 모토롤라 68020 20MHz 메모리 채용, Ethernet 인터페이스, 직렬포트)로 구성되며, 모의할 계통의 규모에 따라 RTDS는 하나 이상의 Rack으로 구성된다. Rack에 장착된 카드는 Backplane으로 연결되어 실시간 연산을 위한 통신 프로토콜을 채택하고 있다. 또한, RTDS의 I/O 시스템은 TPC 및 3PC 보드 마다 입출력 단자를 내장하고 있어서 외부 전력 기기와 1:1 방식으로 데이터 및 신호를 교환한다.

2.6.3 HYPERSIM System

HYPERSIM 시뮬레이터는 시뮬레이션 S/W, 시뮬레이션 컴퓨터 및 I/O 시스템 등 3부분으로 구성되었다. 우선 HYPERSIM의 S/W는 전력계통관련 데이터를 관리하는 Network Database(NDB), 사용자가 네트워크 에디팅, 변수입력, 특정 케이스 모의 및 결과분석 등을 가능케 하는 GUI, 시뮬레이션 대상계통이 그려지고 파라미터 입력이 끝난 후의 시뮬레이션을 담당하는 Power Network Digital Simulation, 이를 운영하는 OS인 OPERSIM등 4개의 주요 부분으로 구성된다. 전력계통 현상의 실시간 구현을 위해 HYPERSIM의 병렬 컴퓨터는 Ethernet 시스템상에서 UNIX 워크스테이션과 DEC Alpha 21164 300MHz 166MFlops RISC칩으로 구성된 마더보드, 2개의 IEEE P1394 보드 및 Analog Devices SHARC 2106X DSP를 기본으로 한 강력한 계산노드 네트워크 형식으로 RTDS 시스템과 유사하게 19' Rack 개념으로 구성되었다. 또한, I/O 시스템은 DEC Alpha 보드의 PCI 버스상에 3개의 통신장치를 이용하여 데이터 및 신호를 교환한다.

3. 결 론

본 논문에서 소개되는 시스템들은 전력계통 계산 알고리즘에 매우 잘 맞도록 특수설계한 다수의 DSP보드나 RISC칩 또는 범용병렬컴퓨터 H/W와, 진보된 병렬처리 기법을 적용, 전력계통 시뮬레이션을 실시간으로 수행하기 위한 최적의 S/W로 구성되어 정확한 계통현상 해석의 기반을 제공한다.

(참 고 문 헌)

- [1] R. Kuffel, "Validating the Real Time Digital Simulator for HVDC Dynamic Performance Studies", ICDS'97, Session XI, p245-250, May 1997
- [2] J.C. Soumagne, "Development of The IREQ Simulator", ICDS'97, Session XI, p31-36, May 1997
- [3] L. Levacher, "A Powerful Graphical User Interface For A Real-Time Digital Transient Network Analyzer", ICDS'97, Session XI, p125-130, May 1997
- [4] Y. Sekine, "Real-Time Simulation of Power System Dynamics", PSCC'93, Volume I, p3-12, Aug - Sep 1993