

전력계통 실시간 시뮬레이션 기술

1. 개요

전력 수요의 증가와 함께 전력계통은 대규모화되고, 전력계통의 보다 나은 경제성과 신뢰성 확보를 위한 새로운 제어·보호 기기들의 투입에 의해 전력계통은 더욱 복잡화되고 있다. 작은 외란에도 다양한 비선형 현상들이 나타나는 대규모 전력계통의 해석은 기존의 해석적인 방법으로는 한계가 있고, 전력계통 현상의 시뮬레이션에 의한 해석이 그 대안이 될 수 있다. 복잡한 전력계통을 효율적으로 해석할 수 있는 전력계통 시뮬레이션은 컴퓨터의 발달과 전력계통 모델링 기술의 발달로 그 유용성이 더욱 커지고 있다.

1970년대에 개발된 EMTP[1][2] (Electromagnetic Transients Program)로 디지털 컴퓨터를 이용한 전력계통 과도현상의 해석[3]이 보편화되었으나 EMTP를 포함하는 여러 비실시간 시뮬레이션 프로그램들은 1초 동안의 현상을 모의하는데 수 분 내지 수 시간을 요구하게 되어 실제 제어·보호 기기의 closed-loop 시험을 불가능하게 한다. 따라서, 전력계통에서 발생하는 현상을 실시간으로 모의할 수 있는 실시간 시뮬레이터의 필요성이 대두되었고 TNA (Transient Network Analyzer)와 같은 축소된 전력계통 모형을 이용한 아날로그 형 시뮬레이터가 전력계통의 전자기 과도 현상을 실시간으로 해석하는데 사용되어 왔으며, 점차 아날로그와 디지털화된 부분을 동시에 채용한 하이브리드형으로 발전되어 왔다. 비약적인 디지털 컴퓨터 기술의 발달로 전력계통 구성 요소들이 디지털화된 디지털 형 시뮬레이터가 개발되었다.

현재 전력계통의 실시간 해석은 디지털 컴퓨터에 기초한 디지털 형 시뮬레이터와 아날로그/하이브리드 형 시뮬레이터에 의한 것으로 대별되며 제 2장에서 두 시뮬레이터의 장·단점을 비교하였다. 제 3장은 실시간 시뮬레이션의 정의 및 개요를 다루고 있으며, 제 4장에서는 실시간 시뮬레이션을 위한 디지털 시뮬레이터의 H/W & S/W 구성 요건을 기술하였다. 실시간 시뮬레이터에 의한 해석 사례를 보인 제 5장과 결론을 담은 6장으로 본 논문은 구성되어 있다.

2. 아날로그 시뮬레이터 vs. 디지털 시뮬레이터

전력계통의 실시간 시뮬레이션을 위해 사용되어 왔던 실물 축소형 아날로그 시뮬레이터에 범용성과 확장성을 보완하기 위해 전력계통 디지털 모델이 추가된 하이브리드 형 시뮬레이터와 현재 비약적인 컴퓨터 기술의 발달로 실시간 시뮬레이션이 가능해진 디지털 시뮬레이터를 다양한 관점에서 비교한 내용이 표 1에 정리되어 있다. 표 1에 언급한대로 아날로그/하이브리드 형은 기술성과 안정성을 고려할 때 신뢰받는 형식이지만 큰 경제적인 부담으로 인해 그 사용이 제한되며, 설치 및 유지 보수에 대한 상대적인 저 비용과 용이성이 장점인 디지털 형은 time-step에서의 제약 등이 존재하지만 컴퓨터 응용 기술의 발전으로 이 같은 문제점들이 개선되어 가는 미래의 기술이라 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 디지털 형 실시간 시뮬레이터에 관한 내용을 기술하고자 하며, 디지털 형 시뮬레이터에

필수적인 전력계통 요소들의 모델링에 관한 내용은 참고 문헌 [4-11]을 참조할 것을 권한다.

3. 실시간 시뮬레이션

3.1 정의

실시간 시뮬레이션[13-15]은 1초 동안의 계통 응답을 정확하게 1초 안에 계산하는 것을 의미하며, 이를 위해서 디지털 시뮬레이터는 정해진 time-step마다 전력계통 상태를 결정하는데 필요한 모든 계산을 마쳐야 한다.

3.2 Time-step

디지털 시뮬레이터에서 중요한 정수 중 하나는 시뮬레이션 time-step이며, 연속적인 실시간 운용을 위해서는 매 time-step 마다 전력계통 모델을 나타내는 모든 방정식들에 대한 계산이 완료되어야 한다. 전력계통 규모가 커지고 그에 따라 많은 기기들이 추가됨에 따라 더 많은 방정식을 정해진 time-step안에 풀기 위하여 방정식의 병렬 특성을 이용하여 데이터를 처리한다. 즉, 연산은 독립적으로 각 프로세서에서 계산을 진행하고 새로운 time-step이 시작될 때 마다 동기화가 이루어진다.

표 1. 디지털 형 시뮬레이터와 아날로그/하이브리드 형 시뮬레이터의 비교

	0-4000 Hz (> 50 μ sec)	0-2000 Hz (> 100 μ sec)
해석 범위 (Time-step)	0-4000 Hz (> 50 μ sec)	0-2000 Hz (> 100 μ sec)
모델 계통	같은(확장용이)	같은
손실	쉽게 표현 가능	손실 보상 필요
재결선	아주 빠름	느림(수 일 소요)
GUI	입출력 모두	출력만 가능
대규모 계통 실시간 해석	가능	불가능
전력기기 모델링 및 유연성	-time step, A/D & D/A 변환 지연에 의한 고주파 특성 모의 제약 -회로결선, 손실 보상 등의 문제 없음 -한 프로세서가 다양한 표현으로 계통구성	-소형화, 배선저항, 접점저항, 기기온도 특성영향 우려 -경년변화/제작가격별 허용오차 존재 -제한된 모델기기 숫자 내에서 계통 구성
모의계산 정도 결정 요소	-컴퓨터 time step에 의존 -time step ∝ 컴퓨터 기술 발전	-기기/미선형소자 모델 자체에 의존 -모델 정도 향상에 한계 내재
수치 모델링	필요	불필요
수치적 안정성	수치 진동 현상 등의 불안정성 존재	안정함
기술성	개선중	검증된 기술
사용자 정의 제어	가능	제한적
요구 공간 (30기 기준)	보통 규모 (100평 이상)*	대규모 필요 (300평 이상)*
비용 (30기 기준)	저 비용 (100억원 정도)*	고 비용 (500억원 정도)*

* 규모 및 비용은 1998년 기준

어진다. 각 시뮬레이터 간의 데이터 송수신 역시 병렬로 이뤄지고, 시뮬레이션에 대한 time-step은 구성된 전력계통 모델에서 가장 많은 계산이 요구되는 부분에 의해 결정된다. 대규모 전력계통의 시뮬레이션을 위해서는 많은 수의 시뮬레이터가 필요하게 되며 실시간 시뮬레이션 기능이 훼손되지 않게 추가된 시뮬레이터가 접속되며, 이는 각 시뮬레이터가 독립적으로 동작하고 다른 시뮬레이터와는 공동으로 시뮬레이션되는 전력계통 요소에 관련한 데이터 만이 교환되기 때문에 여러 개의 시뮬레이터를 추가하더라도 이러한 데이터의 전송에 따른 시간 추가 외에는 time-step에서의 변동은 없게 된다. RTDS (Real Time Digital Simulator) 12개 rack으로 구성된 일본 Chugoku 전력 회사의 자료(18기 계통)를 바탕으로 매 연산 종료 시 발생하는 데이터 교환 시간이 일정하지 않고 가장 시 지연이 큰 프로세서의 데이터 교환 시간을 기준으로 time-step이 결정되는 예를 표 2에 나타내었다. 표 2에 나타낸 대로 11번 Rack의 14번째 프로세서 (11/14)가 통신 1부터 통신 3까지의 시간을 소진하므로 전체 time-step을 결정하는 요소가 되고, 예제 계통의 전체 time-step은 64.515 μ sec가 된다.

표 2. Time-step 소진표

	0								
시작	0	↓							
연산1	21.35	↓							
통신1	8.75	↑	↓						
연산2	4.52		↓	↓	↓				
통신2	2.625			↑	↓	↓			
연산3	13.645				↑	↓	↓		
통신3	11.625						↑		
Slack	2.0								
전체시간	64.515								

3.3 Closed-loop 시험 (16-19)

실시간 시뮬레이션의 경우 시뮬레이션이 연속적인 실시간으로 진행되기 때문에 사용자가 각종 제어기와 보호 기기 등과 같은 실제 기기들을 접속하여 시뮬레이터에 의해 만들어진 신호가 외부 접속 기기로 실시간으로 전달됨으로써 외부 기기가 실제 전력계통에 접속되어 있는 것과 같은 시험이 가능하다. 또한 외부에 접속된 제어/보호 기기들의 신호가 시뮬레이터로 실시간 피드백됨으로써 외부 기기에 의한 전력계통에서의 영향이 정확하게 해석될 수 있으며, 이는 전력계통의 경제적이고 신뢰성있는 운용을 위해서는 필수적으로 요구된다. 디지털 시뮬레이터인 RTDS에 의한 제어/보

호 기기들의 closed-loop 시험에 대한 간략한 개념도가 그림 1에 나타나있다

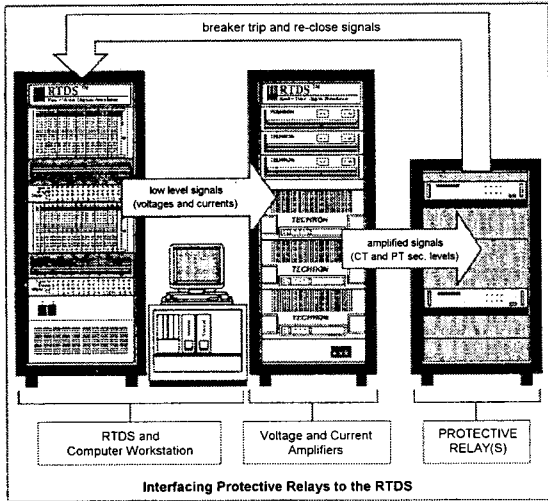


그림 1. Closed-loop 시험 개념도

4. 디지털 실시간 시뮬레이터 H/W & S/W 구성

4.1 H/W 구성(13)(17)

디지털 시뮬레이터의 H/W 구성은 아날로그 시뮬레이터와는 달리 범용컴퓨터를 사용하거나 특수한 H/W (DSP를 내장한 rack으로 구성된 시뮬레이션 컴퓨터)로 구성되어 있다. 본 논문에서는 독립된 rack의 집합으로 시뮬레이터를 구성하는 RTDS의 H/W 구성에 관해 알아보려고 한다. RTDS H/W의 구성을 살펴보면, 각 rack은 총 20개의 카드를 장착할 수 있으며 15개의 Tandem Processor Card (NEC 77240 DSP 11MHz 22MFLOPS 프로세서 채용하여 노드단위로 병렬 연산 수행) 보드, 3개의 Triple Processor Card (AD SHARC 20164 DSP 40MHz 160MFLOPS 프로세서 채용하여 고성능 연산 수행) 보드, 1개의 Inter Rack Communication Card (각 rack간의 데이터 통신 수행) 보드 및 1개의 Workstation Interface Card (Motorola 68020 20MHz 메모리 채용하여 워크스테이션 및 일반 Ethernet 네트워크를 지원하는 통신 카드 역할을 하며 운영자 워크스테이션과 RTDS간 인터페이스를 전담) 보드로 구성되며, 시뮬레이션할 계통의 규모에 따라 RTDS가 하나 이상의 rack으로 구성될 경우 이에 따른 실시간 특성의 손상이 없도록 되어 있다. Rack에 장착된 카드는 backplane으로 연결되어 실시간 연산을 위한 통신 프로토콜을 채택하고 있으며 고속의 개폐 기능을 포함하는 HVDC, FACTS 등의 과도 특성과 이들의 전력계통 연계 과도특성을 실시간으로 재현할 수 있도록 구성되어 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.

4.2 S/W 구성(13)(17)

다수의 발전기, 변압기, 송전선로 등으로 구성되는 전력계통은 미분 방정식과 차분 방정식으로 표현이 되며, 시뮬레이터는 전력계통에서 발생하는 수 μs 에서 수 십 초의 시정수를 갖는 다양한 현상을 해석할 수 있어야 한다. 전체 계통에 대한 실시간 시뮬레이션의 구현을 위해서는 전기 현상의 전파에 존재하는 독립성을 이용한 병렬 계산이 필요하다. 즉 특정 지점 (A)에서 t 시각에 발생한 현상은 전파시간 τ 를 갖는 송전선로로 연결된 다른 지점(B)에서는 τ 시간 후인 $t + \tau$ 시각에 그 현상에 의해 영향을 받게 된다. 그러므로, t 시각 상에서 본다면 A 지점과 B 지점은 서로 독립적이고, 전력계통의 제 현상을 나타내는 미분 방정식을 시간의 수치 적분에 의해 풀 때 time-step이 전파속도 (τ) 보다 작을 경우 A에 관련된 미분 방정식과 B에 관련된 미분 방정식을 각기 독립적 또는 병렬적으로 구하고 서로 필요한 정보를 τ 시간 내에 전달하여 풀 수 있다. RTDS S/W 구성을 살펴보면, 전력계통에서 발생하는 각종 현상을 실시간으로 재현할 수 있도록 기존의 EMTP 및 EMTDC 알고리즘을 채용하였고, EMTDC와 RTDS의 사용자 인터페이스를 제공하는 그래픽 도구로서 PSCAD를 사용하여 사용자가 모의 시나리오를 프로젝트 및 케이스별로 파일 관리할 수 있는 파일 관리시스템(File Manager) 모듈, 윈도우 98, 95, NT/유닉스 환경에서 원하는 모의 계통 모델을 쉽게 구성 및 편집할 수 있는 회로구성모듈 (DRAFT), 송전선로 (T-LINE)와 케이블 (CABLE)의 선로정수를 해석하는 모듈, 프로그램 실행 모듈 및 시뮬레이션 중 EMTDC와 RTDS로부터 원하는 데이터/모의결과를 취득하여 그래프로 출력하는 다중그래프 생성 모듈 (MULTI-PLOT) 등으로 구성되어 있다. RTDS의 S/W 구성 예가 그림 2에 나타나있다.

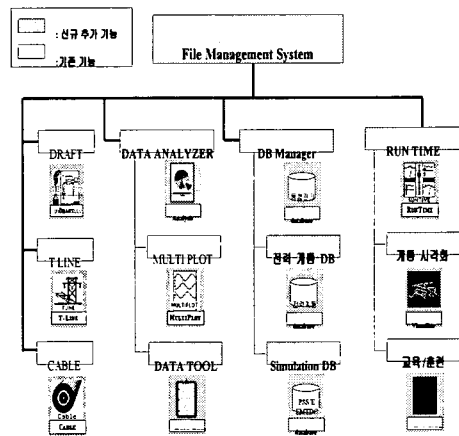


그림 2. RTDS S/W 구성 예

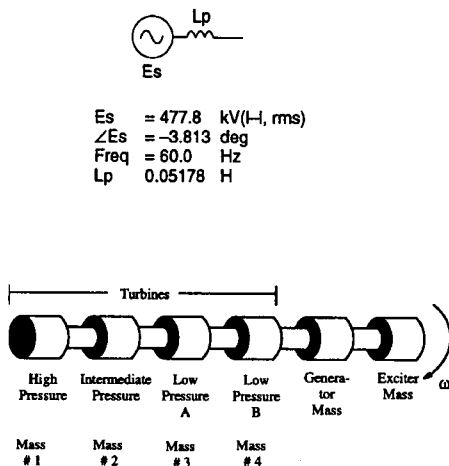
5. 실시간 시뮬레이션에 의한 해석 사례

IEEE에서 Sub-Synchronous Resonance의 연구를 위한 Benchmark용으로 배포한 모델[20]에 대한 RTDS 시뮬레이션 결과를 EMTDC를 통한 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 발전기는 6개의 관성체로 이루어진 그림 3의 등가모델로 표현되며 결과는 그림 4-6에 나타내었다. 그림 4는 A상에서의 발전기 전류를 나타낸 것이며, 그림 5와 6은 각각 LPA와 LPB사이의 축과 발전기와 여자기 사이의 축에 걸리는 토크를 나타낸다. 이 같은 결과로부터 실시간 시뮬레이터에 의한 시뮬레이션 결과가 비실시간 프로그램 EMTDC에 의한 결과와 거의 일치함을 알 수 있고, 실시간 시뮬레이터에 의해 계통의 정확한 특성이 실시간으로 시뮬레이션 될 수 있음을 입증하였다.

다음 사례 연구의 목적은 짧은 송전선로를 모델링하는 실시간 디지털 시뮬레이터를 평가하기 위한 것이다. 그림 7에 나타낸 모델 계통의 33kV 영역은 충전전류를 고려하지 않는 등가의 정상 임피던스만으로 모델링되는 짧은 송전선으로 구성되어 있으며, 일반적으로 축

정된 33kV 선로의 임피던스에 따르면 이 값에 해당하는 송전선로의 길이는 대략 2에서 6km까지이다. 실시간 디지털 시뮬레이션은 송전선의 진행과 모델을 이용함으로써 가능해 지는데, 진행과 모델을 사용할 경우 계통을 수치적으로 분할할 수 있게 되어 병렬로 대규모 계통을 모의할 수 있게 되는 것이다. $50\mu\text{sec}$ 의 time-step을 적용한다면 송전선로의 최소길이는 15km가 되며, 이 길이는 진행과가 가공 송전선을 따라 time-step 내에 도달하는 최소거리이다. 따라서 이 사례는 짧은 송전선을 가진 대규모 계통의 실시간 디지털 시뮬레이션의 검증용으로 사용될 수 있다. 시뮬레이션 결과(그림 8)는 RTDS 시뮬레이터의 수행결과와 EMTDC 프로그램의 결과를 비교했다. 시뮬레이션의 결과는 준 정상상태의 조건에 매우 민감하기 때문에 실제 결과에서도 다소 차이를 보였으며, 이 차이점은 EMTDC의 발전기 모델 중 조속기와 터빈 모델에 긴 시정수를 사용한 것에서 기인한 것으로 시뮬레이터가 전력계통의 실시간 동특성 해석에 사용될 수 있음을 입증하였다. 이 계통은 4개의 RTDS rack에서 117개의 NEC77240 DSP(59개의 TPC 카드)를 사용해서 실행되었고, 첫 번째 rack에서 36개(모두 사용), 두번째에서 32개, 3번째에서 32개, 4번째에서 17개를 사용하여 $61.85\mu\text{sec}$ 의 time-step으로 실행되었다.

Source / System Equivalent Parameters



Inertia Constants		Shaft Spring Constants	
Turbine #1	= 0.0929 sec	Turbine #1→#2	= 7277 p.u.
Turbine #2	= 0.1556 sec	Turbine #2→#3	= 13168 p.u.
Turbine #3	= 0.8587 sec	Turbine #3→#4	= 19618 p.u.
Turbine #4	= 0.8842 sec	Turbine #4→gen	= 26713 p.u.
Generator	= 0.8685 sec	Gen→Exciter	= 1064 p.u.
Exciter	= 0.0342 sec		

Turbine Torque Sharing	
Turbine #1	= 0.30 p.u.
Turbine #2	= 0.26 p.u.
Turbine #3	= 0.22 p.u.
Turbine #4	= 0.22 p.u.

그림 3. 발전기 모델 및 데이터

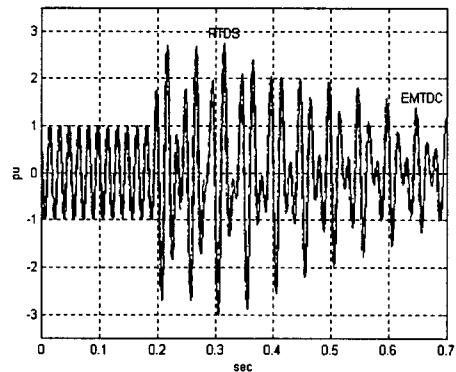


그림 4. 발전기 A상에서의 전류

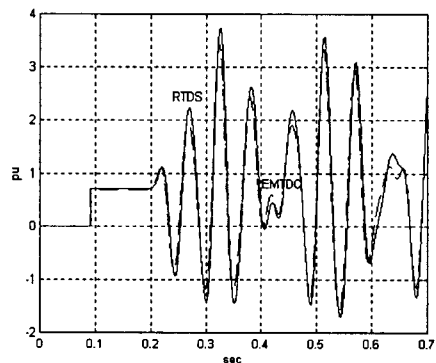


그림 5. LPA-LPB 축의 토크

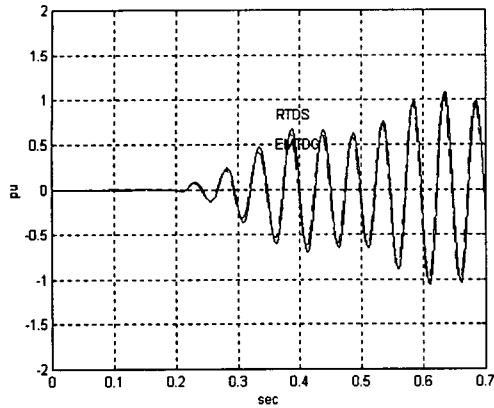


그림 6. 발전기-여자기 축의 토크

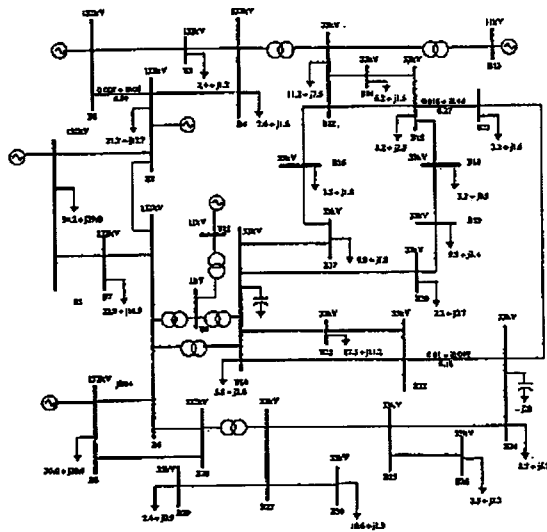


그림 7. 시험 계통(IEEE 30모선 계통)

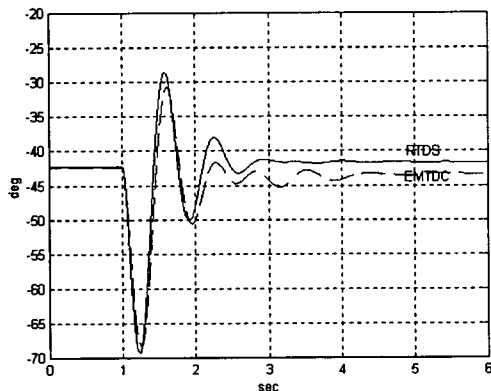


그림 8. 모선 2번 발전기의 상대적 위상각

6. 결론

전력계통에서 발생하는 전자기 과도현상부터 전기 기계적 동특성까지 실시간으로 모의하여 전력계통의 실시간 해석을 가능하게 하는 실시간 시뮬레이터에 대한 개요 및 구성 요소와 사례 연구를 통한 실시간 시뮬레이터의 유용성을 보였다. 실시간 디지털 형 시뮬레이터의 효율적인 활용을 위해서는 실시간 모의에 충분한 정도의 전력계통 모델링과 전력계통 데이터베이스의 구축, 그리고 대규모 계통의 동특성 해석을 위한 등가 축약 계통 구성에 관한 연구가 요구된다.

참고문헌

- [1] H.W. Dommel, "Digital computer solution of electromagnetic transients in single and multi-phase networks", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 88, no. 2, pp. 734-741, April 1969.
- [2] H.W. Dommel, Electromagnetic Transients Program Reference Manual (EMTP Theory Book), Bonneville Power Administration, Portland, 1986.
- [3] "Digital Simulation of Electrical Transient Phenomena", A. Phadke (ed.), IEEE Tutorial Course, Course Text 81 EHO173-5-PWR
- [4] J.R. Marti, "Accurate modeling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 101, no. 1, pp. 147-155, January 1982.
- [5] T. Noda, N. Nagaoka and A. Ametani, "Phase domain modeling of frequency-dependent transmission lines by means of an ARMA model", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 11, no. 1, pp. 401-411, January 1996.
- [6] A. Ametani, "A general formulation of impedance and admittance of cables", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 99, no. 3, pp. 902-910, May/June 1980.
- [7] V. Brandwajn, H.W. Dommel and I.I. Dommel, "Matrix representation of three-phase n-winding transformers for steady-state and transient studies", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 101, no. 6, pp. 1369-1378, June 1982.
- [8] A. Narang and R.H. Brierley, "Topology based magnetic model for steady-state and transient studies for three-phase core type transformers", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 9, no. 3, pp. 1337-1349, August 1994.

[9] F. de Leon and A. Semlyen, "Simple representation of dynamic hysteresis losses in power transformers", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 10, no. 1, pp. 315-321, January 1995.

[10] IEEE Working Group on Surge Arrester Modeling, "Modeling of metal oxide surge arresters", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 7, no. 1, pp. 302-309, January 1992.

[11] A.S. Morched, J.H. Ottevangers and L. Marti, "Multi-port frequency dependent network equivalents for the EMTP", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 8, no. 3, pp. 1402-1412, July 1993.

[12] T.L. Maguire and A.M. Gole, "Digital simulation of flexible topology power electronic apparatus in power systems", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 6, no. 4, pp. 1831-1840, October 1991.

[13] R.P. Wierckx, "Fully Digital Real-Time electromagnetic transients simulator", IERE (International Electric Research Exchange) Workshop, Caen, France, March 1992.

[14] J.R. Marti, L.R. Linares, "Real-time EMTP-based transients simulation," IEEE Trans. on Power Systems, vol.9, no. 3, pp. 1309-1317, August 1994.

[15] J.R. Marti, L.R. Linares, R. Rosales, and H.W. Dommel, "OVNI: A full-size real-time power system simulator", ICDS(International Conference on Digital Power System Simulators), Montreal, Canada, May 1997.

[16] D. Brandt, R. Wachal, R. Valiquette and R. Wierckx, "Close loop testing of a joint VAR controller using a digital real-time simulator", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 6, No. 3, August 1991.

[17] P.G. McLaren, R. Kuffel, R. Wierckx, and J. Giesbrecht, "A real time digital simulator for testing relays", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 7, no. 1, pp. 207-213, January 1992.

[18] H. Duchon, M. Lagerkvist, R. Kuffel, R.P. Wierckx, "HVDC simulation and control system testing using a real-time digital simulator", ICDS(International Conference on Digital Power System Simulators), College Station, USA, April 1995.

[19] H. Irokawa, M. Fujita, H. Konishi, and Y. "Development of an external controller for a real-time digital simulator", ICDS(International Conference on Digital Power System Simulators), Montreal, Canada, May 1997.

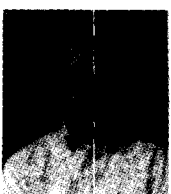
[20] "First Benchmark model for computer simulation of SubSynchronous resonance", IEEE Trans., vol. PAS-96, no. 5, September/October 1997.

제 자 소개



장길수(張吉洙)

1967년 10월 26일생. 1991년 고려대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 Iowa 주립대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1997년-98년 Iowa 주립대 근무. 현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통 연구실 선임연구원.



차승태(車乘台)

1970년 2월 19일생. 1992년 Illinois 공대 전기과 졸업. 1997년 연세대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년-95년 대우전자 영상연구소 근무. 현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통 연구실 일반 연구원.



윤용범(尹用範)

1958년 9월 28일생. 1984년 부산대 전기공학과 졸업. 1986년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1996년 MIT Visiting Scientist로 근무. 현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원.



이금진(李金辰)

1964년 7월 24일생. 1990년 중앙대 전기공학과 졸업. 현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원.



송석하(宋錫夏)

1953년 10월 3일생. 1981년 한양대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실 책임연구원.