

대규모 전력계통의 실시간 해석 및 응용

신정훈, 김태균, 윤용범, 추진부
한국전력공사 전력연구원

Real-time Analysis of Large Scale Power Systems Using KEPS

Jeong-Hoon Shin, Tae-Kyun Kim, Yong-Beum Yoon, Jin-Boo Choo
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - 본 논문에서는 한전 전력연구원에서 개발한 전력계통 해석용 시뮬레이터(이하 KEPS)를 이용하여 대규모 전력계통을 실시간으로 해석하는 방법 및 그 결과를 제시하고자 한다. KEPS는 캐나다 RTI사에서 개발한 RTDS(Real-Time Digital Simulator)를 근간으로 하는 대규모 디지털 실시간 시뮬레이터로서 총 26랙으로 구성되어 있으며 대규모 전력계통을 $50\mu\text{sec}$ \sim $70\mu\text{sec}$ 의 타임스텝으로 계산할 수 있는 전력계통 전자기 과도현상 모의해석 장치이다. 본 논문에서는 KEPS를 이용하여 한전의 2000년 계통을 실시간으로 해석하고, 전력계통 안정화장치(PSS), 계전기등 외부기기를 실시간으로 해석, 검증한 결과를 소개하기로 한다.

1. 서 론

전력수요의 증가와 함께 전력계통은 대규모화되고 있을 뿐만 아니라 전력계통 운용의 경제성과 신뢰성 확보측면에서 FACTS(Flexible AC Transmission System) 등과 같은 새로운 기능의 제어·보호기들이 계속적으로 설치, 운전되고 있어 이의 효율적 운용기술은 새로운 과제로 부각되고 있다. 또한, 전력이너지 운용에서의 경쟁시장 도입으로 인하여 기존의 계통운용 체제에 많은 변화가 예상되고 있어 이에 대한 능동적 기술개발이 산학연을 중심으로 활발히 진행되고 있다. 위와 같은 전력수급 및 운용에 관한 환경변화로 인하여 전력설비의 운전점이 점차 한계용량에 근접하는 등 전력계통 운용제약은 더욱 심화되고 경제적·안정적 전력공급에 대한 사회적 관심은 더욱 높아질 전망이다. 이에 대한 기술적 대책으로는 정확한 전력수요 예측을 바탕으로 한 적기의 전월설비 확보, 그리고 이의 효율적 운용을 통한 고품질의 전력공급으로 대별할 수 있는데 그 기본이 되는 기술이 전력계통 해석기술이다.

발전설비, 송·변전설비, 그리고 배전설비로 구성되는 전력계통은 특성상 전국에 분산, 노출되어 있어 사고의 가능성을 배제할 수 없을 뿐만 아니라 일단 사고가 발생한 경우 전력계통에 나타나는 현상은 고장조건이라든지 주변의 제어·보호기기 특성에 따라 그 현상이 다양하게 나타나게 된다. 이와 같은 전력계통 현상을 효과적으로 해석하기 위하여 각 전력설비를 대상시간 및 주파수 등으로 구분하여 수식적으로 모델링하고 이를 수치해석적으로 컴퓨터에 의하여 계산함으로써 계통해석을 수행하게 된다. 또한, 새로운 성능의 제어·보호기기를 개발 또는 도입하여 전력계통에 설치, 운전코자 할 때, 실제 전력계통을 대상으로 시험을 하는 경우 대규모 정전이나 기존 운전설비의 트립(Trip)과 같은 위험이 있으므로 이에 대한 대체수단으로 전력계통 시뮬레이터가 세계 주요전력회사 및 관련연구소, 전력기기 제작사에서 사용되고 있다[1,2]. 국내에서도 학계 및 연구소, 산업체를 중심으로 PSS/E와 같은 전력계통 해석프로그램과 시뮬레이터를 자체개발 또는 도입하여 소규모 전력계통 해석이나 보호기기 실험에 활용하고 있는 단계이다. 이와 관련하여 한전전력연구원에서는 한전계통의 HVDC, SVC

운전 및 FACTS개발을 시점으로 하여 고도의 전력계통 해석기술 확보를 통한 전력환경변화에의 능동적 대처, 국내외에서 개발되는 각종 보호·제어기기의 실증시험, 그리고 계통 운전원의 교육·훈련과 전력계통 기반기술 축적을 목표로 최근 실시간 전력계통 해석 시뮬레이터를 개발완료하고 운전을 개시하였다. 이에 본 논문에서는 KEPS를 이용하여 대규모 전력계통을 해석하는 절차와 결과 및 전력계통 안정화장치(PSS), 계전기등의 외부기기 성능시험등을 소개하기로 한다.

2. KEPS를 이용한 대규모 전력계통 해석 절차

KEPS(KEPCO Enhanced Power system Simulator)를 이용하여 대규모 전력계통을 해석하기 위해서는 몇가지 선행되어야 할 중요한 작업이 있다. 26개의 RTDS 랙(rack)으로 구성된 KEPS가 가지는 하드웨어적인 한계(랙당 7모선)와 $50\mu\text{sec}$ \sim $70\mu\text{sec}$ 의 타임스텝을 가지도록 하는 실시간 시뮬레이션 제약으로 인해 대규모 전력계통의 축약이 필수적이다. 또한, KEPS를 이용하여 대규모 전력계통을 모의하기 위한 데이터 입력이 방대한 작업이며 데이터 입력에 인적실수를 유발할 수 있으므로, 한전을 포함한 북남미 전력회사에서 널리 사용되고 있는 오프라인 계통해석 프로그램인 PSS/E등과 같은 입력 데이터를 자동 변환함이 필요하며, 이 데이터 변환은 전체 계통을 자동으로 랙 분할(rack-allocation)하는 기능을 포함하여야 한다. 이에 본 절에서는 KEPS의 응용프로그램으로 현재까지 개발된 계통축약 프로그램과 데이터 변환 프로그램 등을 이용하여 대규모계통을 해석하는 절차를 제시한다.

2.1 케이스 관리 프로그램

케이스 관리 프로그램은 계통 종합 데이터베이스를 중심으로 인터페이스를 통하여 연결된 각종 프로그램 즉, 계통축약 프로그램, 시각화 프로그램, 데이터 변환 프로그램, RTDS, EMTDC, PSS/E, EUROSTAG, PSAPAC 등의 기동 및 입/출력된 케이스를 저장, 관리함으로써 시뮬레이션에 관련된 초기 설정치, 시퀀스 및 결과 등을 통합 관리, 운영하는 초기 인터페이스 프로그램으로 모듈관리, 검색, 통신, 로깅기능을 제공한다.(그림 1)

2.2 계통축약 프로그램

계통축약 프로그램은 각 발전기의 coherency가 고려된 발전기 그룹을 규정한 후, 발전기의 관성정수, MVFA, 참여율 등 몇가지 요소를 고려하여 사용자가 선정한 발전기들을 하나의 등가 발전기로 통합하며, 정적 축약은 사용자가 정한 선로의 전파정수(travelling time)를 기본으로 하여 PSS/E의 IPLAN 기능을 단순히 이용하였다.(그림 2)

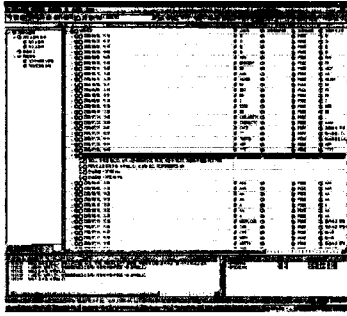


그림 1. 케이스 관리 프로그램

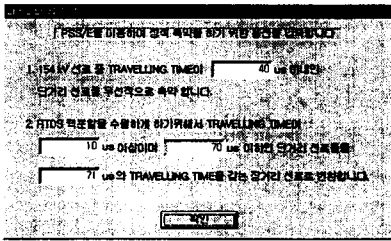
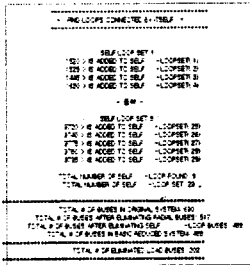


그림 2. 계통축약 프로그램 (정적축약 부분)

2.3 데이터 변환 프로그램

축약계통이 완성된 후, 원 계통과의 동특성 비교가 검증되면 KEPS에서 시뮬레이션 가능하도록 입력 데이터를 자동 변환하여야 하며, 이는 PSS/E, EMTDC 모델 간의 동가화를 위한 각종 파라미터 계산 및 생성, 대규모 계통 모의를 위한 부계통(sub-system) 분할(랙분할) 기능을 포함한다. 랙 분할은 해당 모선수(7개) 및 랙간 IRC(Inter Rack Communication) 연결을 고려하여 전력계통의 여러 가지 구성 요소들을 어느 랙에 구성할 것이며, 어떻게 연결할 것인가를 결정, RTDS로 모의 가능한 계통을 구성하는 것으로 데이터 변환 프로그램은 이를 고려하여 자동으로 랙분할 및 RTDS 입력파일을 생성한다.(그림3)

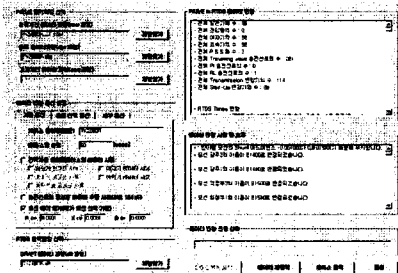


그림 3. 데이터 변환 프로그램

그림 4는 KEPS를 이용한 대규모 전력계통의 전체 해석 절차를 나타낸다.

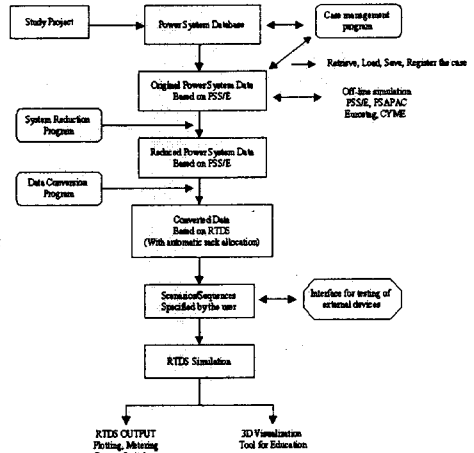


그림 4. KEPS를 이용한 대규모 전력계통 해석 절차

3. KEPS를 이용한 실시간 시뮬레이션 사례

본 절에서는 KEPS를 이용한 실시간 시뮬레이션 사례로서 2000년 대규모 한전계통의 과도안정도 해석 결과와 전력연구원에서 자체개발한 전력계통 안정화장치(PSS)의 현장설치 전 성능시험, 계전기 응용시험 등 외부기기 성능시험 방법 및 결과를 제시한다.

3.1 2000년 대규모 한전 계통의 실시간 해석

해석 대상계통은 2000년 대규모 한전계통으로써 원계통이 모선 수 779, 발전기 177기, 변압기 326대, 총 발전량 38,359MW로 PSS/E 입력데이터를 근간으로 구성된 계통이다. 앞 절에 제시한 등가 축약 프로그램을 이용하여 원 계통의 동 특성을 충분히 반영하여 축약된 계통은 모선수 295, 발전기 88대, 변압기 202대이며 총 발전량은 원 계통과 동일하다.

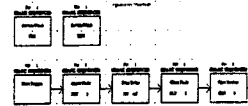
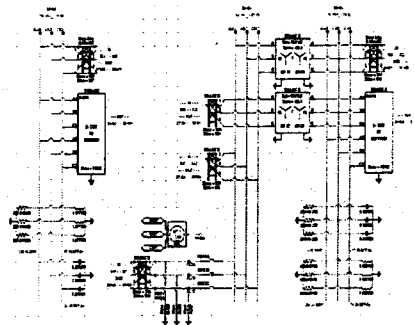


그림 5. 변환된 드래프트 파일 (고장 시퀀스 포함)

축약계통은 3PC로 구성된 RTDS에서 총 26락을 사용하여, 계통 행렬 실시간 연산을 위한 모선수 제약(7모선 - TPC 기준)을 두배로 늘이는 2개의 네트워크 솔루션을 이용하여 구성되었으며 시뮬레이션 타임시스템은 68 μ s로 정확한 해석 결과를 도출하였다. 그림 5는 축약계통이 변환된 RTDS 드래프트 파일이며 과도 안정도 해석을 위한 고장 시퀀스가 포함되어 있다.

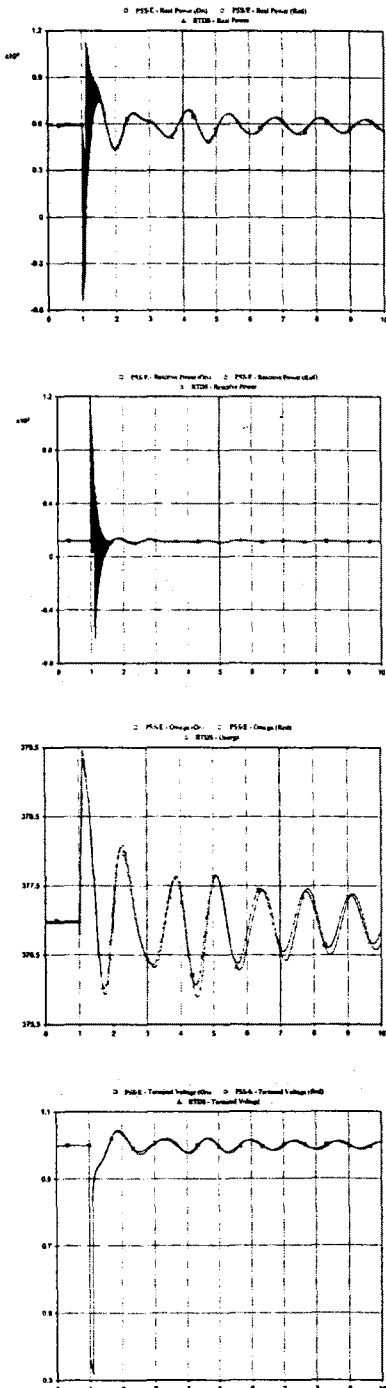


그림 6. 고리 #2 발전기의 응답 특성 (유효전력, 무효전력, 단자전압, 위상각)

그림 6은 신김제-군산간 345kV 선로에 3상 단락사고를 낸 후, 제거했을 때 고리 #2 발전기의 응답 특성을 나타낸 그림이다. 결과의 비교를 위하여 원계통, 축약계통의 PSS/E 결과와 RTDS 변환 후의 시뮬레이션 결과를 동시에 나타내었다. 그림에서와 같이 모든 변수에 있어서 3가지 경우의 결과가 거의 일치하는 것으로 미루어 계통축약 및 실시간 시뮬레이션이 정확하다는 것을 알 수 있다.

3.2 전력계통 안정화장치(PSS)의 성능시험

본 절에서는 무주 양수 발전소에 설치될 디지털 전력계통 안정화장치(PSS) 개발품을 현장설치 전 KEPS를 이용하여 성능시험 한 사례이다. 앞절에 사용한 2000년 한전 대규모 계통을 이용하여 PSS 개발품의 파라미터 튜닝, 적정 동작 등을 확인하도록 한다. 본 시험은 전력 증폭기를 사용하여 PSS입력 신호인 전압 110V, 전류 5A 크기(현장의 CT, PT 신호레벨)를 그대로 재생함으로써 현장과 동일한 시험환경을 제공한다. 그림 7은 시험을 위한 전체 결선도 및 신호레벨을 표시한 그림이다. KEPS 내부에서 계산된 디지털 신호를 5V 크기의 아날로그 신호로 내 보낸 후, 전력 증폭기를 이용하여 설치 크기를 재생, 개발된 PSS로 입력되고 이 신호에 의해 발생하는 PSS 출력 제어신호가 다시 단위 큐비클에 부착된 A/D 변환기를 거쳐 구성된 모의계통으로 다시 피드백(feedback)되는 폐루프(Closed-Loop) 제어 시험이다.

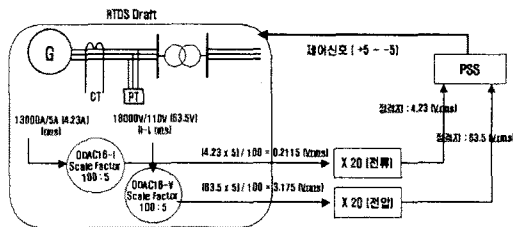


그림 7. PSS 페루프 시험을 위한 결선도

그림 8은 PSS 페루프 제어시험을 위한 계통 구성과 무주양수 발전소 인근 모선(신옥전)에 3상 단락사고를 낸 후 제거하여 PSS의 응답 특성 및 효과를 보기 위한 계통도(드래프트)이다.

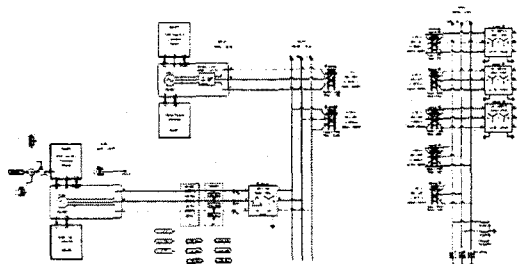


그림 8. 외부 PSS 신호의 연결도와 고장인가 위치

그림 9는 대규모 계통의 동특성을 실시간으로 유지하면서, 개발된 PSS의 성능을 입증한 시험결과이다. 고장 제거 후 PSS가 있을 때와 없을 때의 댐핑특성이 현저히 차이가 남으로써 PSS의 성능이 우수하다는 것을 알 수 있으며 이는 기 실시한 현장시험 결과와도 일치한다. 이미 알려진 바와 같이, PSS의 동작은 미소신호 안정도를 향상시키면서 동시에 초기 단자전압을 미소하게 회복시킨다는 것을 그림 9의 두 번째 결과에서 알 수 있다.

실제 우주양수 발전기에 투입될 PSS는 2기이며 향후 KEPS를 이용, 우주양수 1, 2호기에 PSS 개발품을 동시, 설치하여 두 제어기간의 인터랙션, 파라미터 튜닝 등을 시뮬레이션 할 계획이다.

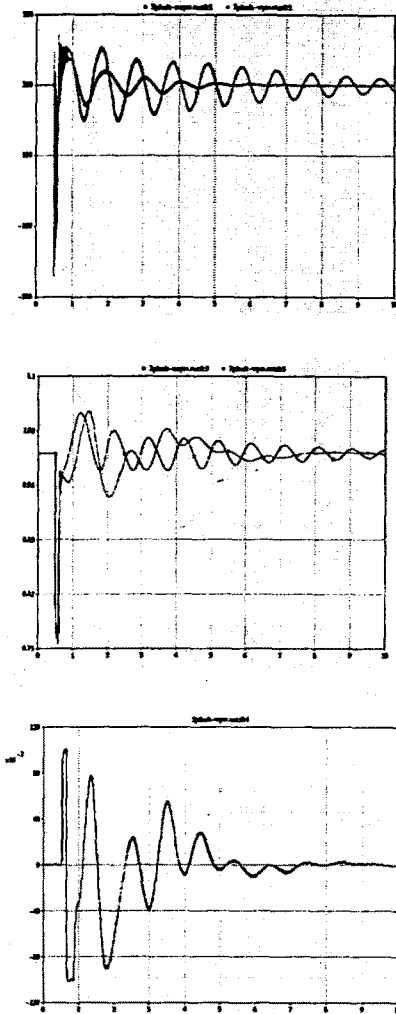


그림 9. PSS 개발품의 응답 특성 (발전기 출력, 단자전압, PSS 출력제어신호)

3.3 보호 계전기 페루프 응답시험

본 절에서는 RTDS 1락을 사용하는 샘플계통을 이용하여 계전기의 페루프 응답특성을 모의하도록 한다. 3.2절에 제시한 페루프 시험은 피드백 되는 신호가 아날로그 신호인데 반하여 본 절에서의 시험은 계전기 접점을 On/Off 하는 디지털 신호가 피드백 신호로 사용된다. 이를 위해서는 큐비클에 부착된 디지털 신호 입력력 패널을 이용하여 이진 디지털 신호를 입력 받아야만 한다.

RTDS를 이용한 보호 계전기의 폐회로 시험은 RTDS로부터 출력되는 계통신호(대상선로의 전압, 전류신호)가 계전기로 입력되고 계전기의 출력신호(트립신호, 재폐로 신호)가 다시 폐회로로 구성된 계통으로 입력되는 양방향의 신호가 RTDS에 요구된다. 폐회로 신호는 고장상태에 대한 계전기의 초기응답과 함께, 계전기의 동작상태에 따른 계통의 응답을 알 수가 있다. 또한, 여러 가지 장치들을 폐회로에 연결하여 보호계전 방법, 스킴

(scheme)등을 시험할 수 있다. 계전기 신호를 계통으로 피드백 받기 위해서는 계통의 과도응답이 실시간으로 계속 발생되어야 한다. 전력계통의 알고리즘 연산이 실시간으로 계산되어야 함은 물론이고(실지 1분동안의 시간이 1분동안의 시뮬레이션 시간과 같아야 한다) 그 1분 동안의 모든 시간구간(time step, $50\mu\text{sec}$)에 대해 실시간 연산이 수행되어야 한다.(실지 $50\mu\text{sec}$ 와 동일하게)

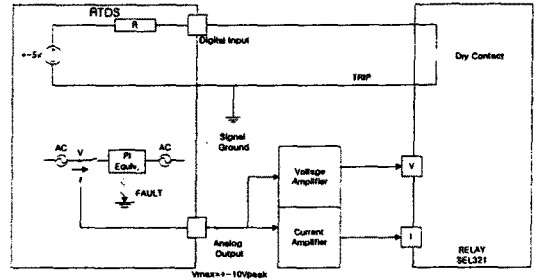


그림 10. RTDS와 계전기와와의 연결을 위한 블럭도

본 시험에서 사용할 계전기 시험방법은 페루프 시험(closed-loop test)으로써 계전기의 출력신호(트립신호)를 RTDS 입력으로 피드백 하여, 구성된 계통의 차단을 동작시키게 된다. 이를 위해서는 계전기 출력 디지털 신호를 RTDS 디지털 입력단자로 연결하여야 하며 이 때 디지털 입력 패널을 이용한다. 디지털 입력 패널로 입력된 신호를 구성한 계통에서 인식하기 위해서는 디지털 입력 포트를 이용하는데, 이 때 입력된 신호가 0.1의 값을 가진 디지털 데이터임에 주의한다.(입력 신호가 인가되었을 경우, 0V를 표시(0)하며 그렇지 않을 경우 5V(1)가 인가되어 진다) 본 시스템에서 사용하는 디지털 입력은 총 6개로 Ta, Tb, Tc,(Trip 접점 3개) Ra, Rb, Rc(리클로징 접점 3개)를 사용한다.

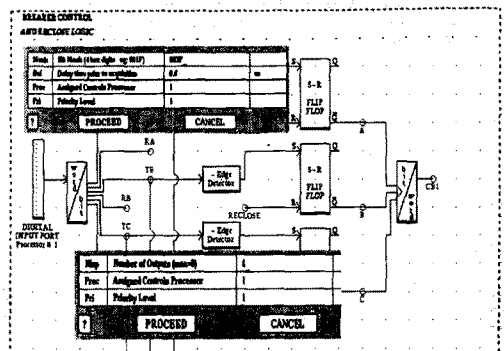


그림 11. 디지털 Input Port. WORD TO BIT 변환블럭과 연결된 차단기 투입/개방 제어블럭(드래프트)

해석 대상계통은 발전기 1대, 변압기 1대와 무한모선으로 구성된 계통으로 송전선로 모델(Tline)과 Faulted Line 모델을 이용, 사고지점을 이동시켜 가며 시뮬레이션 할 수 있도록 하였으며 동시에, 고장시 발전기의 다이내믹 특성을 관찰 할 수 있도록 구성하였다.(그림 12) 또한, 제어블록을 이용하여 여러 가지 고장을 모의할 수 있도록 하였다. 본 절에서는 시스템의 응답 특성에 관한 구체적인 내용은 생략하기로 하고 고장시 계전기의 응답(입출력)이 어떻게 효과적으로 모니터링 되는지에 초점을 맞추기로 한다. 계전기의 입력이 되는 CT, CVT의 2차측 값이 ODAC16의 입력이 되게 구성하였으며, 고장인가시 C1 노드전압이 Zero-

crossing 되는 시점에서 트리거 되게 하였다. 그림 13은 고장인가시 디지털 입력을 이용하여 얻은 계전기의 트립신호를 이용, 차단기가 동작한 상황을 타임차트로 표시하고 있다.

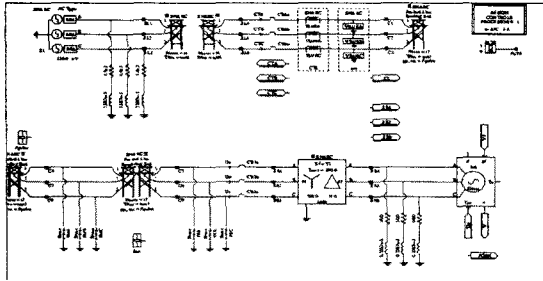


그림 12. 계전기 시험을 위한 해석대상 계통(드래프트)

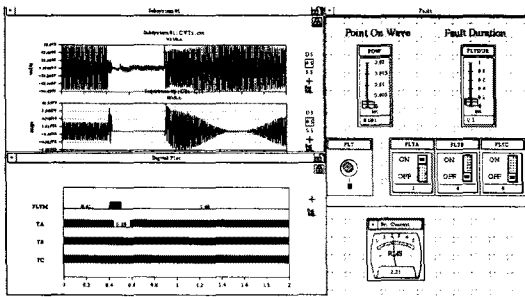


그림 13. A상 고장인가시의 계전기 동작 및 차단기 동작 상태 모니터링 (왼쪽하단의 차트, 적색 Bar)

4. 결론

본 논문은 한전 전력연구원이 개발한 전력계통 해석용 시뮬레이터(KEPS)를 이용하여 대규모 전력계통의 동적 시뮬레이션, 외부 제어기기의 폐루프 제어시험 등 KEPS 적용사례에 대하여 기술하였으며 이를 통하여 KEPS의 정확성 및 우수성을 검증하였다. 또한, 초전도 응용기기 등 KEPS를 이용하여 실제 시험이 곤란한 새로운 제어기 및 신기술 기기 등을 시험할 수 있는 다양한 적용기법을 계속 개발 할 계획이며 Eurostag, CYME, PSAPAC 등과 호환 가능한 데이터 변환 프로그램 및 계통 축약 프로그램을 지속적으로 개발하여 완벽한 사용자 편의환경을 제공할 예정이다. KEPS는 또한 RTDS 교육을 위한 교육 프로그램, 웹기반 전력계통 교육 프로그램, 계통현상 시각화 프로그램등을 갖추고 있어 산학연 연계를 통한 전력계통 기술인력의 교육 및 양성에도 기여를 하리라 생각된다. 아래는 KEPS의 주요 수행업무를 요약하였다.

- 전력계통 계획 및 안정운용 방안 검토 지원
- 전력감시제어 설비 성능검증 및 평가
- 수용가 전력품질 해석
- 소규모/지역계통 단독 운전방안 및 정전계통의 복구 방안 수립지원
- HVDC, SVC, FACTS 등 고성능 제어장치의 개발 및 검증 지원
- 보호계전기, 초전도 안정화장치, 연료전지 등 효과 및 문제점 분석지원
- 전력계통 종합 데이터베이스 유지·보수
- 전력계통 기술습득, 운용기술 향상 및 훈련 지원

(참 고 문 헌)

- [1] 전력계통 시뮬레이터 설치를 위한 기본계획 수립연구, KRC-91S-J03, 1993.9, 한전기술연구원
- [2] 전력계통 해석용 시뮬레이터 개발 및 설치, '99전력연-단 706, 1999.11, 한전전력연구원
- [3] 운용법, 추진부, "한전의 전력계통 시뮬레이터 개발 및 해석센터 구축", 대한전기학회지, '00.3
- [4] 전력계통 시뮬레이터 교육보고(3), TM, 2000.12, 한전전력연구원
- [5] 발전기 제어계통 안정화장치(PSS) 개발 2차년도 중간보고서, TM, 2000.2, 한전전력연구원
- [6] Y.B.Yoon, G.S.Jang, S.T.Cha, J.Lee, Overview of the Development and Installation of KEPCO Enhanced Power System Simulator, *Proceeding of the third International Conference on Digital Power System Simulators*, May 1999
- [7] P.Kundur, *Power System Stability and Control*, Electric Power Research Institute(EPRI), Power System Series, McGraw Hill Inc., 1994
- [8] H.W. Dommel, Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single and Multiphase Networks, *IEEE Transactions on Power Apparatus and systems*, Vol. PAS-88, No.4, April 1969
- [9] PTI, *Digital simulator PSS/E22*, 1993