

# 실시간 전력계통 해석기술



김 옹 학 | 한전전력연구원 책임연구원

## 1. 실시간 해석의 필요성

# 전력

계통은 다양한 구성요소가 복잡하게 구성되어 있는 거대한 시스템이다. 즉, 발전소, 변전소 및 수용가 등과 각각의 구성요소를 연계하는 발전설비, 송전설비, 변전설비, 배전설비 및 변환설 등이 있다. 즉, 전력계통은 인간이 만든 최대 규모의 시스템으로써 동작 메카니즘을 수학적으로 모델링하고 분석하는 경우에, 기존의 비실시간 계통해석 기술은 실제의 전력설비와 달리 간략화한 수학적 모델을 사용함에 따라 실제의 현상과 다소 차이가 발생할 수 있어 결국에는 해석결과의 신뢰성을 저하시킬 수 있다.

그러나, 국내산업의 정밀화 및 전력의 사용형태의 고급화에 따른 고신뢰성과 고품질성의 전력이 산업과 사회 환경에 미치는 영향성이 증가함에 따라, 계통해석 결과의 신뢰성 확보를 위해서는 실제의 전력설비를 그대로 이용하거나 정밀한 수학적 모델을 실시간으로 해석하는 실시간 계통 해석 기술의 중요성이 증대되고 있다. 따라서, 실시간 전력계통 해석기술은 전 세계적으로 국가적인 핵심 고유기술로서 전력산업의 환경 변화 등과 같은 새로운 패러다임에 대응하여 국가의 산업발

전력계통은 인간이 만든  
최대 규모의 시스템

전과 생활수준의 향상이라는 측면에서 반드시 보유해야 할 필수적인 기술이다.

또한, 우리나라의 전력산업은 계통계획 및 운영, 발전, 송전, 배전, 그리고 판매에 이르기까지 모든 분야를 수직적으로 운영하던 체계에서 4차 산업혁명에 대응하기 위한 수평적인 운영체제로 변모하고 있다. 이에 따라 국가의 전력 기간망의 안정적 운영이라는 문제가 그 어느 때보다도 강조되고 있으며, 궁극적으로 전력계통의 정확한 진단을 위한 고도의 정밀한 계통해석 기술이 필요하기 때문에, 우리나라의 전력계통과 같은 대규모 계통에서 적용이 가능한 실시간 계통해석 기술이 강력하게 요구되고 있다.

특히, 대규모의 발전단지 및 대용량의 송전이 고려되는 전력망이 계획되면서 HVDC(High Voltage Direct Current), FACTS(Flexible AC Transmission System) 등의 새로운 전력설비가 도입됨에 따라 전력공급의 안정화는 결국에 높은 신뢰성의 확보 요구에 직면할 것이다. 즉, 기존의 비실시간 계통해석 기술을 사용하면 성능검증 등의 실증시험이 어렵고 간략화 모델사용에 따른 해석결과의 신뢰성이 상대적으로 낮다. 따라서, 이러한 문제를 해결하고 전력공급 안정화를 위해서는 대규모 전력계통의 정밀한 해석과 신기술에 대한 사전 실증시험

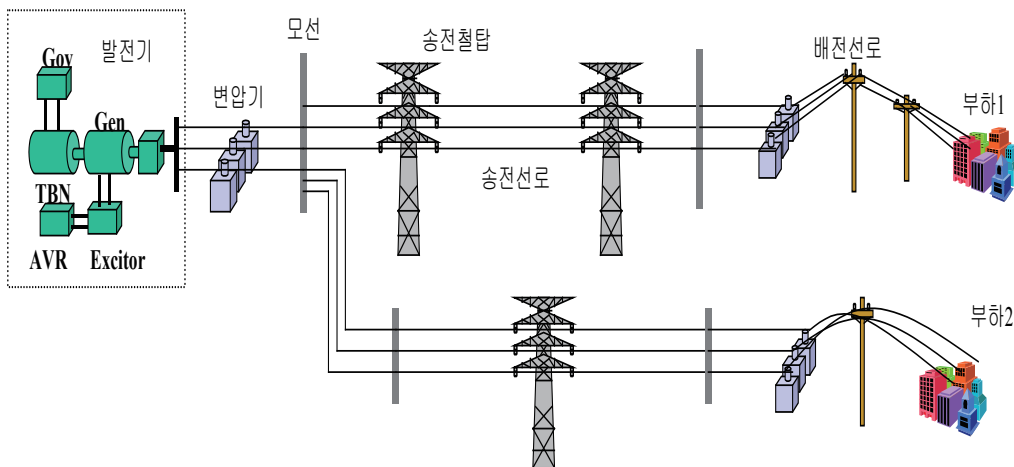


그림 1. 실시간 계통해석시 상세 모델링

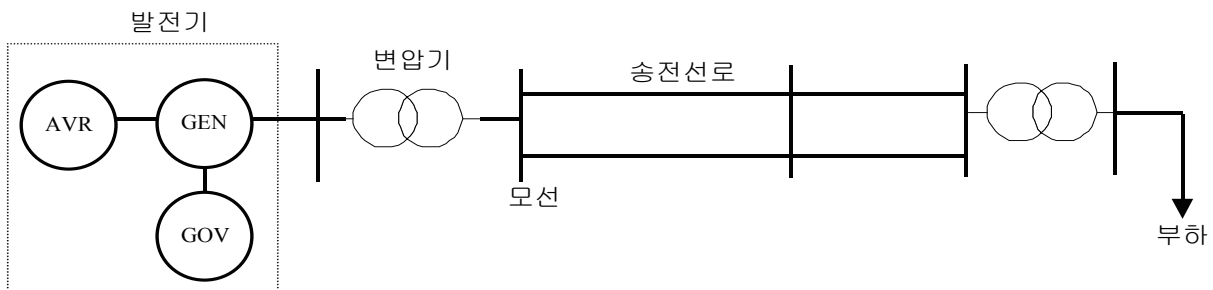


그림 2. 비실시간 계통해석시 간략 모델링

(Closed Loop Control)이 가능한 실시간 전력계통 해석기술과 시뮬레이터가 필요하다.

이에 전력계통의 제반현상을 모의하기 위하여 실시간 기반의 전력계통 시뮬레이터가 요구되었기 때문에, 한국전력공사 전력연구원(이하, 전력연구원)은 고성능의 연산장치와 병렬처리 기법을 이용한 세계 최대 규모이면서 동시에 연산시간이 가장 빠른 고속의 디지털 전력계통 시뮬레이터(KEPS, KEPCO Enhanced Power System Simulator)를 개발하여 운영하고 있다.

## 2. 계통해석의 중요성

앞에서 기술한 바와 같이 산업의 발달과 생활수준의 향상으로 전력의 사용량은 지속적으로 증가하고 있으며, 무정전의 안정적인 전력공급을 포함한 전력품질에 대한 요구도 동시에 증가하고 있다. 그러나, 사회·환경적인 문제 등으로 인하여 새로

운 발전소 및 송전선로 등의 신설 제약을 받고 있어 하나의 발전단지에 다수의 발전기를 수용하는 등 발전단지의 대규모화와 이러한 대규모 발전단지로부터 전력의 수요지까지 대용량의 전력수송이 불가피 하지만, 전력계통의 신뢰도를 확보하기 위하여 발전단지 및 송전선로에서 제약운전이 요구되고 있다.

따라서, 전력계통의 규모가 지속적으로 증가하고, HVDC, FACTS 등의 새로운 전력설비가 도입됨에 따라 계통구성과 운영이 복잡해져 안정적인 계통운영에 어려움이 예상되고 있으며, 이러한 상황은 더욱 심화될 것이다. 이와 같은 상황에 효과적으로 대처하기 위해서는 전력계통에서 발생하는 제반현상에 대해 정확한 이해도, 계통해석 능력과 실제계의 전력설비 기반의 교육훈련을 통해 운전원의 능력을 배양할 필요가 있다. 또한, 전력분야에서 실시간의 계통해석, 고조파해석, 발전기 축진동해석 및 고속용 제어기 등의 운전특성과 성능검증이 중요한 문제가 될 것이다.

현재, 상기와 같은 다양한 계통현상 또는 문제를 해소하기 위해 비실시간 전력계통 해석 툴인 PSS/E(Power System Simulator for Engineering), EMTP(Electromagnetic Transient Program) 및 DSA(Dynamic Security Assessment) 등이 사용되어 전력계통의 제반현상을 해석하고 있으나, 이러한 툴은 포괄적이고 연속적인 계통해석이 어렵고, 계통모의에 장시간 소요됨에 따라 높은 정밀도의 계통해석은 불가능하며, 특히 HVDC, FACTS 등 전력설비의 고속·정밀제어와 계통연계의 실증 시험이 불가능하다.

따라서, 이와 같은 한계를 극복하면서 기존의 전력계통 해석 툴과 상호 보완적으로 사용될 수 있는 실시간 전력계통 해석 툴로서 전력계통 시뮬레이터가 전력연구원을 비롯하여 세계적으로 많은 전력사 및 연구기관에 도입되어 활용되고 있다. 이는 발전기, 송전선, 변압기, 부하 및 각종 제어시스템 등의 전력설비로 구성되는 전력계통에서 전자기적(Electromagnetic) 과도현상, 전기기계적(Electromechanical) 과도현상 및 지역간 저주파 진동 또는 상대적으로 장시간의 전압불안정 현상 등을 기존의 비실시간 모의와 달리 전력계통에서 발생하는 현상을 그대로 실시간으로 모의실험이 가능하다는 것에서 비롯한다.

*전력계통은 동적환경 하에서  
운용되는 대규모의 비선형 계통*

### 3. 계통해석 툴(Tool)

최근의 전력계통은 전력수요의 증가와 함께 대규모화 되고 있으며, 새로운 기술의 다양한 제어시스템, 보호시스템 및 부하구조와 그 특성이 매우 빠르게 변동하기 때문에 점차적으로 복잡화 되고 있다. 즉, 전력계통은 동적환경 하에서 운용되는 대규모의 비선형 계통으로써 많은 전력설비의 동작특성과 응답시간에 영향을 받고 있으며, 전력계통에 존재하는 다양한 구성 요소간의 복잡한 상호 작용으로 인하여 발생하는 현상을 정확하게 예측하거나 해석하기가 매우 어렵다. 또한, 대부분의 전력계통에 발생하는 고장은 운전원이 곧바로 대처하기 어려운 매우 짧은 시간의 현상이므로 전력설비나 전력계통의 안정성을 저하시킬 수 있다.

2003년 8월에 발생한 미국 북동부와 캐나다에 걸친 대규모 정전사태는 피해 주민과 전력이라는 관점에서 최대 규모의 정전이었으며, 미국 에너지성에 따르면 약 60억\$의 경제적인 피해가 발생했다고 한다. 이와 같은 대규모 정전의 피해를 최소화하기 위해서는 무엇보다도 전력계통을 강인하게 보강하거나 실시간 제어와 해석기술의 정확성을 높이는 것이다. 전력계통에서 발생할 수 있는 다양한 현상을 신속하고 정확하게 해석하는 것은 운전원이 적절한 대응을 가능하게 하여 대규모 정전에 따른 경제적 손실을 회피할 수 있다.

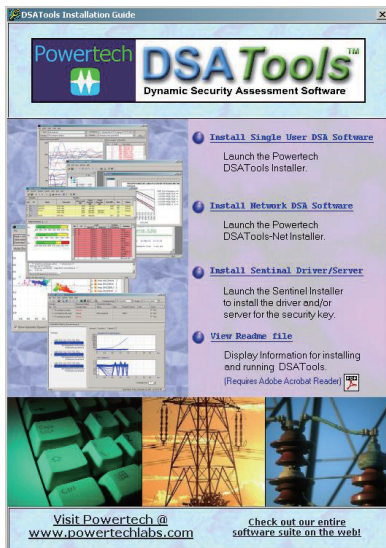


그림 3. DSA Tools (Powertech Labs Inc.)



그림 4. 전력계통 시뮬레이터 (전력연구원)

이러한 목적으로 전력계통의 축소모형을 이용하는 최초의 전력계통 시뮬레이터가 TNA (Transient Network Analyzer) 로써, 1930년부터 운영되기 시작하였고 주로 전기기계적 과도 현상의 해석에 사용되었다. 현재는 전력계통 구성요소를 디지털화한 디지털 전력계통 시뮬레이터가 운영되고 있으며, 실시간 해석기술의 발전과 더불어 해석의 대상과 알고리즘 및 사용되는 플랫폼 등에 따라 다수의 계통해석 툴이 개발되었다.

전력계통은 발전설비, 송전설비, 변전설비 및 배전설비로 구성

현재, 전력연구원에서 사용하는 대표적인 전력계통 해석 툴로는 PSS/E, DSA 등이며, EMTD(EMTDC)와 RSCAD(RTDS)는 전자기 과도현상의 해석에 사용되는 해석 툴이다. 전력계통은 발전설비, 송전설비, 변전설비 및 배전설비로 구성되며, 전력설비가 고장이 발생하면 건전한 다른 전력설비에 영향을 주지 않고 적정하게 차단하고 보호하기 위한 보호시스템이 있다. 이와 같이, 복잡하고 거대한 전력계통에서는 발생하는 현상도 매우 다양하여 시간영역의 대역폭도 매우 넓으며, 대부분의 현상은 복잡한 요소간의 상호작용과 비선형적 특성을 갖는 요소가 많다. 따라서, 전력계통의 다양한 현상을 해석하는 경우, 전력공학 이론을 기반한 정성적이고 정량적인 분석을 위해서 전력ICT 기술을 접목한 실시간 전력계통 해석 툴이 필수적이다.

전력계통에서 발생하는 현상에는 뇌 서지( $\mu\text{sec}$ ) 현상, 60Hz 3상 교류회로(msec) 현상, 발전기 안정도(sec) 현상 및 전력조류 또는 주파수 제어(min) 등이 다양한 시간영역에 걸쳐 그 현상이 발생하고 있다. 또한, 해석대상이 되는 다양한 현상에 따라 수학적 모델링에서 고려해야 하는 구성요소와 규모가 달라질 수 있기 때문에, 시간영역에서 요구되는 모델링의 규모와 상이한 현상에 대해서 동시에 적용할 수 있는 전력계통 해석 툴은 없으며 각각의 현상에 적합한 해석방법을 필요로 하고 있다. 전력계통 해석 툴은 실시간으로 연산하는 시뮬레이터(H/W), 비실시간으로 연산하는 프로그래밍(S/W)으로 분류한다.

실효치 해석 프로그램

실효치 해석 프로그램은 전력계통의 각각의 구성요소(발전기, 송전선로, 변압기, 부하 및 제어요소

등)를 수학적 모델로 표현하고 전기적인 현상을 수치해석을 통해서 전력계통의 동특성과 비실시간 현상을 해석한다. 즉, 실효치 기반의 조류계산, 주파수해석 등과 같은 정상상태 해석과 전기적 현상의 시간변화 등과 같은 과도현상 해석을 하는 것이다. 여기서, 과도현상은 전력계통에서 고장발생시 발전기의 전력동요 등이 나타나는 sec~수십sec 단위의 시간영역이다.

순시치 해석 프로그램

순시치 해석 프로그램은 서지, 돌입전류(변압기), 전력전자설비(HVDC, FACTS) 등의 과형 기반의 해석에 사용되며, 실효치 해석과 비교하여 매우 짧은 연산시간(time step)을 설정하므로 해석규모는 작아지며  $\mu\text{sec}$ ~수sec 단위의 시간영역이다.

디지털 시뮬레이터

디지털 시뮬레이터는 수학적 모델의 연산을 복수의 연산장치(CPU)로 병렬 처리함으로써 실제현상과 동일한 시간영역에서 실시간으로 해석할 수 있기 때문에, 입·출력용 인터페이스 장치를 통해 실제 전력설비와 연계한 모의가 가능하다. 전력계통의 규모가 증가함에 따라 연산장치(CPU)의 수를 증가시켜 대규모 계통을 모델링 가능하지만, 투자비가 계통의 규모에 비례하여 증가하기 때문에 일반적으로 한정된 규모의 계통을 대상으로 한다. 하지만, 최근에 이와 같은 한계를 극복하기 위해 전력계통 시뮬레이터와 실효치 분석 프로그램을 연계한 하이브리드(Hybrid) 기술이 개발되고 있다.

아날로그 시뮬레이터

아날로그 시뮬레이터는 수학적 모델을 연산하는 것이 아니라 전력계통의 구성요소(발전기, 송전선로, 변압기, 부하 등)를

계통해석 Tool	전력조류	전력동요	전압안정도	직류설비	고조파	제어블럭	발전기축진동	비고
DSA	○	○	○	○		○	○	실효치 해석 프로그램
PSS/E	○	○	○	○				
EMTP	○	○		○	○	○	○	
EMTDC	○	○		○	○	○	○	순시치 해석 프로그램
RTDS	○	○		○	○	○	○	
Opal-RT	○	○		○	○	○	○	디지털 시뮬레이터

축소모델로 연계시켜 각종 전기적인 현상의 동특성을 해석한다. 그러나, 대규모 전력계통의 모델링이 어려워 간략화된 소규모 계통을 대상으로 한다.

#### 4. 실시간 전력계통 시뮬레이터

대규모 전력계통의 실시간 해석을 위해서는 전력계통 시뮬레이터 및 운용기술과 그 외에도 전력계통DB, 전력설비 모델링 및 데이터변환 전처리 등의 핵심기술을 확보해야 한다. 전력연구원은 2002년에 최초로 RTDS(Real Time Digital Simulator) 26랙을 도입하였고, 2016년에 RTDS 34랙으로 증설함으로써, 2027년 계획DB의 전체 전력계통을 동시에 수용할 수 있도록 하였다. 특히, KEPS는 실시간성을 갖고 있으며, 여기서 실시간 의미는 실계통 운전조건을 반영하여 출력조건을 지속적으로 발생시켜 연산하는 전력계통의 해석 알고리즘을 의미한다. 즉, KEPS는 실시간으로 전력계통을 모의하기 때문에 전력계통의 제어·보호설비에 직접적으로 연계한 운영이 가능하다. 예를 들면, KEPS는 HVDC 또는 FACTS 등의 새로운 전력설비의 제어기 또는 보호계전기 등의 성능시험(HIL, Hardware In the Loop)에 활용이 가능하다.

따라서, KEPS를 이용한 성능시험은 다른 시험방법에 비해 더욱 상세하게 모의될 수 있다. 사용자가 전력설비를 실계통에 도입될 때, 발생할 수 있는 심각한 상태 또는 고장을 경험하도록 할 수 있으며, 또한 사용자의 인터페이스와 관계없이 자동으로 동작할 수 있기 때문에 다양한 성능시험을 반복적으로

수행할 수 있고, 각각의 성능시험에 대한 전력설비의 응답특성을 상세하게 제공한다는 장점을 갖고 있다. 이와 같은 실시간 KEPS를 활용한다면,

- 국내개발 또는 신규 도입되는 전력설비의 성능검증
- 전력ICT 기반의 전력계통 감시·제어용 S/W 개발 및 검증
- 차세대 전력기술과 신전력설비 개발 및 검증
- 국가간 전력망 연계를 위한 수퍼그리드 기술개발 등

#### 5. 기대효과

현대 산업사회에서 필수적인 전력은 경제·산업의 발전, 국민생활의 향상 및 국가의 발전에 큰 영향을 미치기 때문에, 전력을 발전, 수송 및 배분하는 전력계통의 안정성은 무엇보다도 중요하다. 실제로 미국, 캐나다, 유럽 및 일본에서 대규모의 정전이 발생했을 때, 공장의 가동중지 외에도 지하철, 교통 신호 등 정지로 인한 교통대란, 공항의 기능정지 및 국민생활의 불편 등 사회 전반에 끼친 악영향은 헤아릴 수 없을 정도로 막대했다.

결국, 고품질의 전력을 안정적으로 공급할 수 있는 계통운영은 고도화된 경제·산업 사회의 필수 요소이며, 이를 위하여 대규모 전력계통의 실시간 해석기술을 확보함으로써, AC/DC의 실계통과 동일한 환경하에서 다양한 성능 및 검증시험을 수행하고, 동시에 AC/DC의 실계통을 보다 정밀하게 모사하여 해석결과의 신뢰성을 높이는 것이 필요하다.

특히, 국가간 전력망 연계(동북아 수퍼그리드)를 추진하는

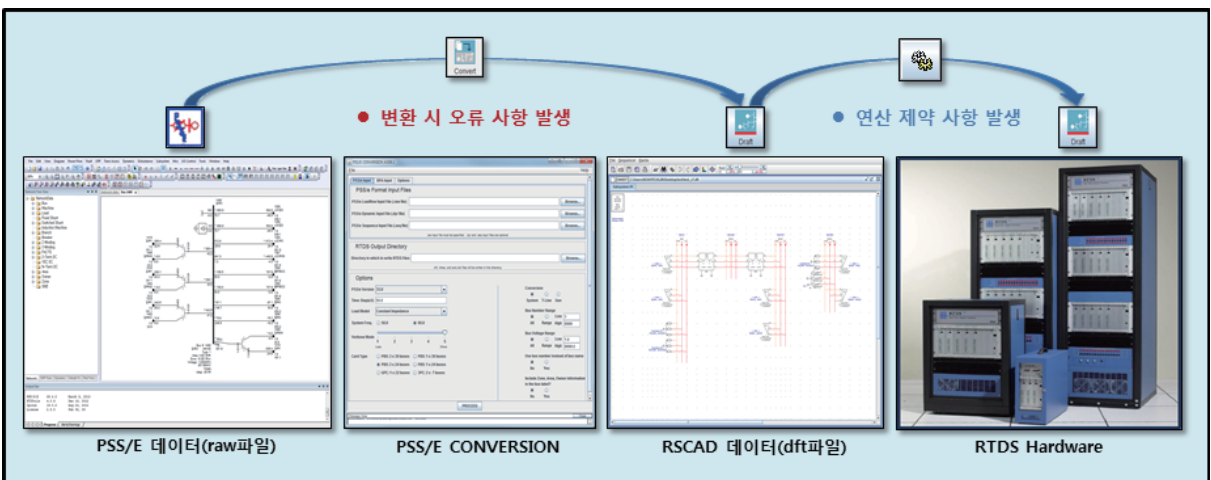


그림 5. 전력계통 시뮬레이터 데이터 변환

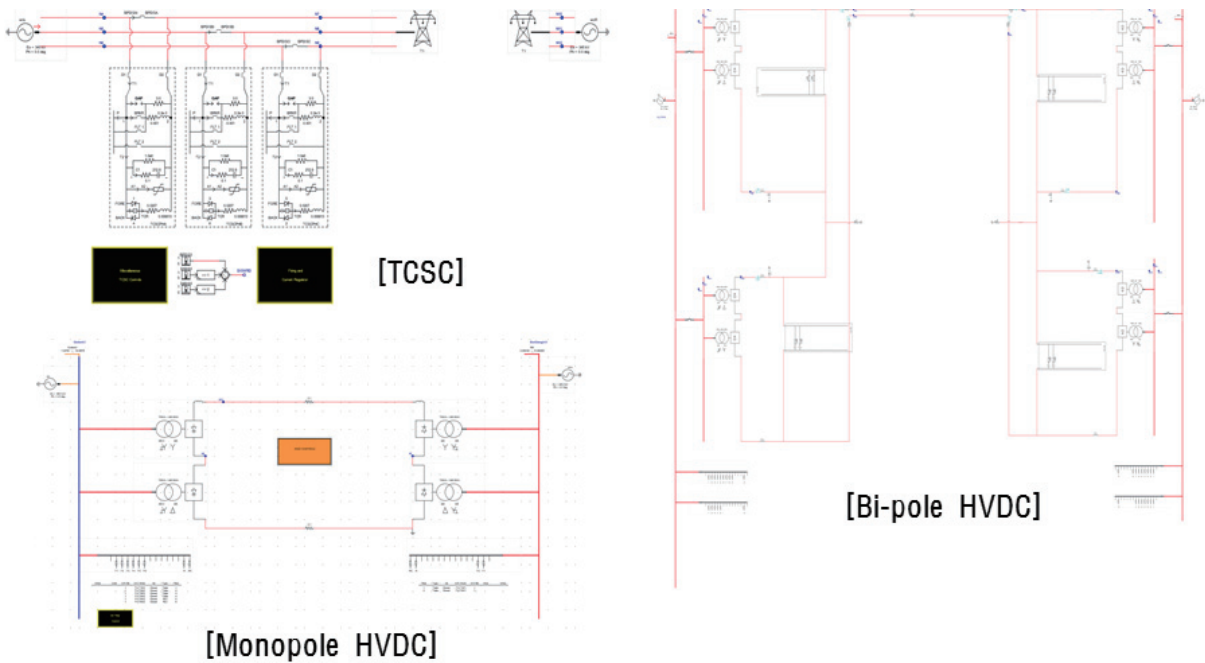


그림 6. HVDC, FACTS 상세 모델링

경우에, 국가간 전력망 연계계통에 대한 실시간(시뮬레이터)과 비실시간(프로그램)의 해석을 통해 그 결과를 상호 보완함으로써, 사업의 투자비 절감 또는 발생 가능한 문제점 등을 사전에 도출하여 적절한 대책을 수립함으로써 전력공급의 안정화를 도모할 수 있다.


KEPS는 전력계통의 실증설비로서 송·변전, 배전뿐만 아니라, 발전 및 부하까지 전계통을 모의할 수 있다. 또한, 전력연구원은 세계 최초로 대규모 전력계통의 실시간 해석기술을 확보함으로써, 새로운 전력기술 또는 전력설비의 개발, 전력설비의 실증시험 및 계통운전원 등의 교육·훈련을 수행하고 있으며, 현재도 국내 전력산업의 발전을 위한 산·학·연 공동연구의 장을 제공하고 있다. 또한, 전력연구원이 보유하고 있는 대규모 계통의 실시간 해석기술은 해외의 전력기술과 비교하여 기술적 우위를 차지하고 있어 우리나라 전력기술의 새로운 변화를 주도하고 있다.

KEPS를 활용하면 전력계통에서 발생 가능한 각종 현상을

모의실험 및 분석하고 대책을 수립함으로써, 지속적으로 대규모화 및 복잡화 되는 전력계통의 안정운동을 도모할 수 있고, 초고압 계통, HVDC 및 FACTS 등 신기술의 실계통 적용을

검토함으로써, 신기술 도입과 적용 타당성을 실계통과 동등하게 분석할 수 있다. 또한, 계통 운전원의 교육·훈련을 통해 계통운영의 역량을 확보하고, 전력계통의 모델링과 전력설비의 시험기술 등을 확보함으로써

전력기술의 자립에 기여할 수 있다.

KEPS를 활용하면 보다 정밀하고 포괄적인 계통해석 및 전력설비 시험을 통해 대규모의 정전고장을 사전에 방지함으로써, 사회적·경제적 이득의 증가뿐만 아니라, 국가간 전력망 연계, HVDC, FACTS 등을 포함하는 전력계통의 최적화가 가능할 것이다. KEPS의 활용에 따른 전력기술의 축적과 전력계통의 고장방지 효과, 정밀한 전력계통의 해석, 전력설비의 실증 시험 및 엔지니어의 교육·훈련 등으로 기대편익이 증가할 것으로 기대하고 있다. 

*KEPS를 활용하면 지속적으로  
대규모화 및 복잡화되는 전력계통의  
안정적 운영이 가능*