



# 과도안정도 해석기술

송석하 · 정응수

(한국전력거래소)

## 1. 서론

전력계통의 정상상태(Steady state)는 계통내의 어떤 지점에 있어서도 전압 및 주파수가 허용 범위 내에 유지되고 유, 무효전력이 평형을 이루고 있는 상태를 말한다. 정상상태에서도 부하는 계속 변동하며 이와 동시에 발전기 출력의 증감을 조정하여 안정된 상태를 유지해 가는 것이다.

그러나 전력계통의 규모가 커지고 복잡화되어 매우 넓은 지역에 분포되어 있으며 발전, 송변전 설비 등 수많은 구성요소가 유기적으로 운전되므로 고장 및 외란(송전선로 고장, 발전기 또는 대형부하 탈락 등)이 필연적으로 존재하게 된다.

따라서 정상상태의 운전뿐 아니라 발전력이나 부하의 급격한 변동과 송전선 탈락 등에 따르는 계통의 동적인 안정성을 유지하는 것은 중요한 문제가 된다. 일반적으로 안정도를 논할 경우 동적인 안정성을 이야기하며 특히 AC 계통의 중요 요소인 동기 발전기들이 외란 후에 동기(In Step 또는 Synchronism)상태를 유지할 수 있는가 하는 것이 고전적인 의미의 안정도 문제로 다루어져 왔다.

초기의 안정도 문제는 계동력이 부족하여 발전기 출력이 hunting하는 형태로써 송전망이 덜 복잡하여 국부적인 것이었으며, 이는 주로 발전기에 제동권선을 설치하여 해결하였다. 계통이 점점 복잡하게 연결되고 부하가 증가하여 송전선은 점점 중부하로 운전되게 되었으며, 1950~1960년대에 이르러 과도안정도 문제가 중요한 관심사로 등장하였다. 이 때부터 고속도 고장제거 및 속응성 여자기 기술개발을 통하여 문제 해결을 해왔으나 아직도 중요한 관심사로 남아 있다.

또한 전자소자를 이용한 속응성 제어기의 사용에 따른 Negative Damping의 문제가 대두되어 지역간 Oscillation 이 상대적으로 중요성을 얻고 있다.

앞에서 언급한 안정도 문제를 실제 전력계통에서는 어떻게 분석하고 대책을 수립하는지에 대하여 살펴보고자 한다.

## 2. 과도 안정도의 이해

### 2.1 과도안정도 구분

안정도는 정태안정도(Steady State Stability), 과도안정도(Transient Stability)로 구분하며, AVR 및 조속기 등이 갖는 제어효과까지도 고려한 동태안정도(Dy-namic Stability)를 포함해서 계통의 과도 안정도 문제를 취급하는 것이 일반적이다.

- ① 고유 과도안정도 : 발전기 제어계의 자동제어효과를 고려하지 않고 발전기 과도임피던스(X'd)의 배후전압이 일정한 것으로 가정
- ② 동적 과도안정도 : 발전기의 돌극성, 계자쇄교자속 변화, 제어계의 자동제어 효과, 보호계전기 동작특성, 부하전압 및 주파수 특성 등을 고려

### 2.2 과도안정도 개요

과도안정도는 송전선로 고장, 발전기 또는 대규모 부하의 탈락 등에 의한 외란이 일어났을 때 과도적인 조건에서 동기운전을 유지할 수 있는 전력계통의 특성을 말한다. 즉 과도적인 상태에서의 전력-상차각 특성을 시간 요소까지 고려하는 것이다.

정상시의 운전상태에서는 발전기와 원동기(Prime mover)의 입출력이 같지만, 외란에 의해서 계통의 평형상태가 깨지게 되면 발전기와 원동기간의 입출력에 차가 생기고 이차에 비례해서 회전자가 가속 또는 감속하게 된다. 그 결과 운전상태는 외란 전의 평형상태로부터 새로운 평형상태에 도달하게 되나 실제로는 각각의 발전기나 원동기는 관성을 지니고 있기 때문에 새로운 평형점을 중심으로 해서 상차각이 동요하게 된다. 이때 상차각의 크기가 과도안정 극한 전력 이상의 불안정 범위에 들어가면 발전기는 동기를 잃고 탈조하게 된다.

종래 과도안정 극한전력은 정태안정 극한전력의 140~150%정도로 보았으나 최근에는 고속도 계전기 및 차단기가 개발됨으로써 과도안정극한전력은 정태시의 170~180%까지 높은 것으로 보게되었다. 과도안정도에서 계통이 안정한가

불안정한가의 판별은 보통 외란 발생 후 약1~2초 이내에 결정된다. 이것은 실제의 기기에서 제1차 동요가 안정될 때까지의 주기가 대체로 1초 정도로 되기 때문이다.

2.3 과도안정도에 영향을 미치는 요소

- 발전기 증부하 운전정도
- 고장시의 발전기 출력(고장형태 및 고장위치)
- 고장제거 시간
- 고장후 송전계통의 리액턴스
- 발전기 자체 리액턴스(리액턴스가 낮을 수록 Peak Power 증가, 초기 회전자 각도 감소)
- 발전기 관성(관성이 클수록 위상각 변화율이 작고, 고장 초기 운동에너지 축적 감소)
- 발전기 내부 전압크기(발전기 계자의 여자에 따라 다름)
- 계통측의 전압크기

2.4 과도안정도 기본 이론

2.4.1 전력-상차각 동요

그림 1과 같이 직축 과도리액턴스  $X'_d$ 의 발전기가 변압기 리액턴스  $X_t$ , 송전선 1회선당 리액턴스  $X_1$ 을 통하여 무한대 모선에 접속되어 있을 때  $X'_d$  발전기 내부전압  $E'$ 를 일정한 것으로 하면 2회선 운전시의 발전기 출력  $P_1$ 은

$$P_1 = \frac{E' \cdot V_R}{X_1} \sin \delta$$

단,  $X_1 = X'_d + X_t + X_1/2$

$\delta$  : 발전기 내부전압의 위상각

$V_R$  : 무한대 모선전압

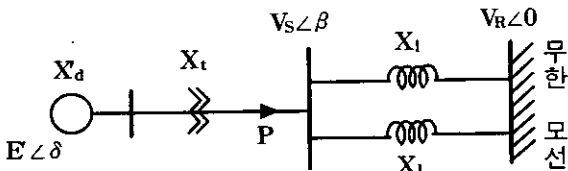


그림 1. 1기 무한모선 계통

송전선 1회선 차단시 발전기 동요를 살펴보자.

- 발전기의 초기 운전상태를 출력  $P_{10}$ , 위상각  $\delta_0$ 인 a점으로 하며 이때 발전기 내의 손실을 무시하면 발전기 기계적 입력  $P_M$ 은  $P_M = P_{10}$
- 1회선 차단후의 발전기 출력  $P_2$ 는  $E'$ ,  $V_R$ 을 일정하다고 하면

$$P_2 = \frac{E' \cdot V_R}{X_2} \sin \delta \text{로 표시된다.}$$

여기서  $X_2 = (X'_d + X_t + X_1) > X_1$

$P_2$ 는 그림 2와 같이 된다.

- 1회선 차단 직후에는 회전자의 관성에 의해 내부 위상각은 변화하지 않기 때문에 출력은 a점에서 b점으로 급격히 감소되며 회전자에 작용하는 가속력( $P_a$ )에 의해 b

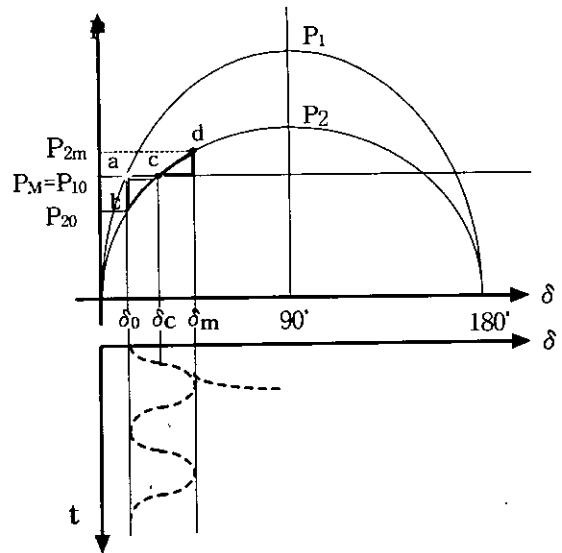


그림 2. P-δ 곡선

점에서 c점으로 이동

- c점에서 가속력은 영으로 되지만 회전자 관성에 의해 위상각  $\delta$ 는 더 증가하여 c점에서 d점으로 이동하며 회전자는 감속되고  $\delta$ 의 증가속도는 점차 감소
- 이러한 과정을 반복하게 되며 이를 시간영역으로 표시하면 <그림 2>와 형태가 된다.

그러나 실제계통에서는 발전기 제동효과에 의해서 진동이 감쇄되어 점차 안정하게 된다.

2.4.2 등면적법(Equal Area Criteria)

그림 1의 1기 무한대 계통에서 고장에 의한 1회선 차단시의 과도안정도 한계를 등면적법에 의해 판정해보자. 전력-상차각 곡선은 아래 그림 3과 같이 된다.

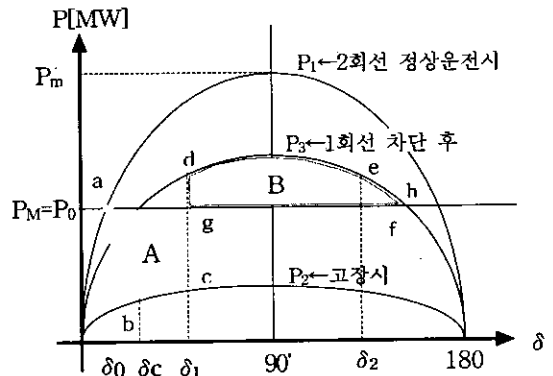


그림 3. 등면적법

- 고장 계속중의 가속에너지(면적 A)가 고장 제거후의 감속에너지(면적 B)보다 크게 되는 경우에는 상차각이 계속 증가되어 발전기는 입출력의 평형을 유지할 수가 없어 탈조에 이르게 된다.
- 즉, 고장 발생에서 제거시간 사이의 과도 안정도는 면적

A와 B의 상호관계에 따라 달라지며, 가속에너지(면적  $abcg$ ) = 감속에너지(면적  $ghed$ )일 때가 과도안정도 한계로 된다.

- 등면적법은 2기 이하의 계통 또는 2기 계통으로 등가화할 수 있는 계통의 안정도를 판정하기 위한 개념으로 가장 오래 사용된 형태이다.  
이는 직접법의 한 유형으로 과도기간의 전력계통 동특성을 운동에너지와 위치에너지를 상호변환으로 해석하는 기법이다. 하지만 3기 이상의 다기계통에는 직접 적용하기가 불가능하다.

### 2.4.3 안정도 해석기법

전력계통의 과도안정도 해석은 초기 값을 알고 있는 상태에서 비선형 미분방정식을 풀어내는 것이라 할 수 있으며, 크게 수치적분법(Numerical intergration method)과 직접법(Explicit method)으로 대별된다. 수치적분법에는 Euler법, Runge Kutta법(R-K) 등이 있다. 직접법에는 에너지함수법, Lyapunov법, 등면적법 등이 있다.

또한 선형, 비선형 구분없이 사용할 수 있는 기법으로 수치적분법인 단단계법(Step by Step)이 널리 사용되며 이는 외란에 대한 시간 영역의 진동파형을 매 단계마다 적분하는 방법이다.

- 수치적분에 의한 해석 방법은 많은 계산량과 시간을 필요로 하며 단기 계통운영에서 접하게 되는 안정도 해석과, 중장기 계획 측면에서 반복 모의 계산으로 수많은 대안을 검토하는데 한계가 있으며, 안정의 정도를 판단하기 위한 임계고장제거 시간(CCT) 등은 반복적인 계산에 의해 가능하나 많은 경험의 필요하므로 이러한 정보를 얻기가 어려운 면이 있다.
- 이에 대한 대안으로서 직접법인 에너지 해석기법이 부각되었으며, 이는 과도기간의 전력계통 동특성을 과도에너지와 임계에너지의 상호 변환 가능여부에 따라 안정도를 해석하는 것으로 계통이 외부로부터 유입된 에너지를 흡수하여 다른 형태의 에너지로 변환시킬 수 없는 경우 발전기는 평형을 잃고 계통에서 분리되는 것으로 판정하는 것이다. 이는 과도적인 물리현상을 이해하는데 장점을 가지나 보호장치 동작 등을 고려한 복잡한 변화 과정을 에너지함수를 사용하여 정확하게 표현하기가 어렵다. 직접법의 적용에 있어 많은 연구성과가 이루어졌음에도 불구하고 모델링의 한계, 계산기법의 신뢰도 저하 등이 아직 실용화의 장애로 남아 있다.
- 이상적인 방법으로는 에너지 계산법을 기존의 시간영역 모의에 함께 사용하는 것이다. 이는 안정도 마진을 계산함으로써 시간영역 모의의 능력을 향상시키고 안정도 한계를 결정하는데 필요한 노력을 최소화시킬 수 있을 것으로 생각된다.

### 2.4.4 과도안정도 해석 상용 Tool

컴퓨터 응용기술의 비약적인 발전으로 과거와는 비교할 수 없을 정도로 보다 구체적이고 정밀한 계산이 가능하며,

다양한 해석도구를 사용하여 정밀도를 향상시키는 물론 결과에 대한 검증이 한층 용이해졌다고 할 수 있다.

우리 나라에서는 1980년대부터 PTI사의 PSS/E (Power System Simulator/Engineering) 프로그램을 도입하여 전력계통해석 업무에 활용하고 있으며, 해석도구의 다양화 추세에 맞추어 EUROSTAG, PSAPAC, RTDS 등을 도입하여 과도안정도 해석에 사용하고 있다.

- PSS/E(Power System Simulation for Engineering)  
미국 PTI사에서 1976년 개발하였으며, 전력조류 계산, 안정도 해석, 등가화기능, 고장계산 OPF 등 정적, 동적 계통 현상 해석에 널리 사용된다. 전력계통 계획을 위한 해석 및 다양한 계통조건 해석에 적합하나 새로운 모델의 추가가 용이하지 않다.  
과도안정도 해석시 적용하는 기법으로는 미분방정식의 수치 해법을 원용한 단단계법(Step by Step)을 사용하고 있다. 이 방법은 계통에 외란이 발생하는 경우 연속적으로 변화하는 물리적인 양을 아주 미소한 시간 영역에서 계단적으로 변화하는 것으로 가정하여 각 단계마다 미소변화를 축차 계산하는 방식을 사용하고 있다.
- EUROSTAG  
프랑스 EDF 및 벨기에 TRACTEBEL사가 공동 개발하였으며, 전력 조류계산, macro language 및 그래픽 환경을 이용한 모델링, 고유치 계산, 임계, 고장제거 시간(CCT) 계산, 온라인 대화형 Dynamic모의, 제어계 모의 기법의 다양성, 중장기 과도 안정도 계산 등 우수한 기능을 가지고 있다.
- PSAPAC(Power system Analysis Package)  
미국의 Powertech Labs 사에서 개발하였으며 전력 조류 계산, 과도·중기 안정도, 미소신호 안정도 및 전압안정도 해석과 계통축약 기능을 제공한다. 전력계통 계획을 위한 해석 및 다양한 계통조건 해석에 적합하며 새로운 모델의 추가가 용이하다. S/W 운용에 전문적인 지식을 요하므로 연구용으로 적합하다.
- RTDS(Real Time Digital Simulator)  
캐나다의 RTI 사에서 개발하였으며 다양한 계통조건에서의 조류계산, 과도안정도, 축진동, 전압안정도, 중장기 안정도 해석 등을 On-line 또는 Off-line으로 모의 할 수 있다. 전력거래소(한전)는 RTDS를 도입하여 한전 전력연구원(대전)에 설치하였으며 이를 이용한 다양한 해석업무에 활용하고 있다.
- 이외에도 국내에 도입된 CYME 프로그램 또는 학계에서 자체 개발된 다양한 프로그램이 활용되고 있는 것으로 알려져 있다.

## 3. 실계통 해석

### 3.1 안정 유지기준

계통해석시 우리나라 계통에는 다음과 같은 안정유지기준을 적용하고 있다.



- 고장종류 : 3상 단락 또는 1선 지락고장
- 고장지속시간 : 6 cycle
- 고장제거시간 : 5~6 cycle 이내
  - 345kV 이하 계통 : 6 cycle
  - 765kV 계통 : 5 cycle
  - 차단 실패 : 설비별 동작시간 10~20 cycle
- 가공 송전선로 고장시는 재폐로 실패 고려
  - 재폐로 시간 : 0.4~3초
- 상정고장기준
  - 단일고장
  - 2중고장
  - 다중 고장
  - 과도안정도 해석시는 발전소와 관련된 병행 2회선 송전선로의 1회선 또는 1Route(2회선) 고장 및 재폐로 실패 조건을 적용
- 과도안정도 해석시 부하특성은 간략하고 단순한 ZIP 모델을 사용하고 있으며 '적정 부하모델 연구결과물' 토대로 계절, 지역, 시간대별 부하특성을 고려하여 적용.

### 3.2 실계통 검토사례

'345kV 신당진~신용인T/L 최초 가압(2001.6.21)'을 위한 실계통 검토결과를 소개하고자 한다.

- 검토목적 : 345kV 신당진~신용인 #1T/L 가압시 계통에 미치는 영향을 최소화하기 위한 가압방안 수립 및 선로 고장시 안정성 평가

- 해석Tool : PSS/E(Ver. 27)
- 계통상황
  - 2001년 6월 운전계통(계통수요 : 37,200MW)

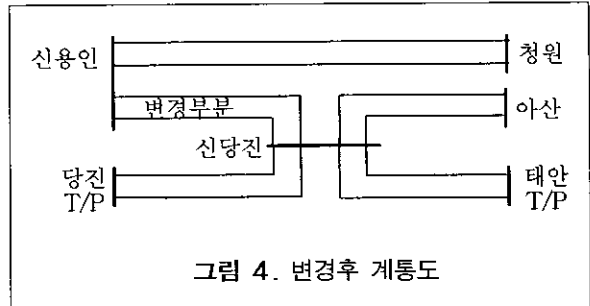
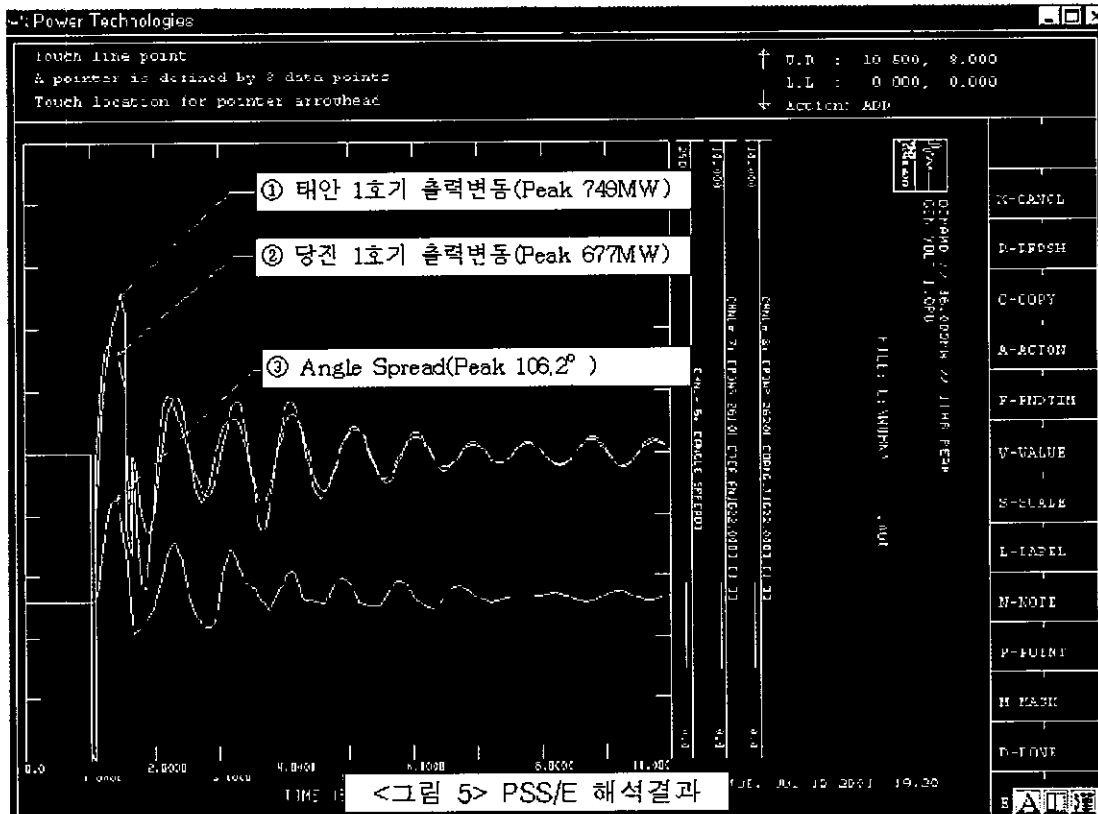


그림 4. 변경후 계통도

- 검토내용 및 현장 실측결과 비교
  - 가압방향 : 신당진S/S
    - 신용인측에서 가압시 선로전압 상승 과다
    - 신당진S/S는 발전단측에 인접하여 전압조정 가능
    - Loop 투입시 발전기 충격 최소화
  - 선로 가압시 전압 및 위상각

구분	모선 전압(kV)			총전류류(A)	위상차(도)
	신당진	신용인	선로측		
모의값	351	355	358	200	23
실측값	350	354	359	184	23.6



- 과도 안정도 계산결과 <그림 5>
  - 신당진~신용인T/L 2회선이 정지하는 경우 안정한 것으로 판단됨
  - ①,②는 외란이 발생하는 경우 발전기의 출력 변화를 보여주며 태안화력 1호기(①)가 당진화력 1호기(②)보다 불안정한 것을 알 수 있다.
  - ③의 Angle Spread는 고장후 계통내에서 위상각이 가장 앞선 발전기와 가장 뒤진 발전기의 위상각차를 표시하며 안정, 불안정의 지표로 사용된다.

○ 검토결과 종합  
가압시 전압, 위상각 등의 해석결과는 현장 실측치와 비교해 볼 때 매우 정확한 것으로 나타났으며, 그림 5에서와 같이 선로고장시에도 계통 최대 위상각차가 106.2°로 안정한 것을 알 수 있다.

3.3 고장파급방지 시스템

우리나라 계통에서는 대단위 전원단지 인출 송전선로 1루트 고장으로 단지내 전 발전기들이 동기탈조될 우려가 있을 경우, 계통 안정운동을 위해 해당 송전선로 고장을 감지하여 일부 발전기를 최단 시간내 차단하는 '고장파급방지 시스템'을 설치하여 운영하고 있다.

여기서는 태안, 당진화력발전소에 설치된 고장파급방지 시스템을 소개 하고자 한다.

- 과도 안정도 검토조건
  - 발전기 운전대수 : 9대(태안 5, 당진 4)
  - 고장지속시간 : 6 cycle  
(계전기 및 차단기 동작시간 각 3 cycle)
- 상정고장 : 병행 2회선 선로 1Route 고장 및 재폐로 실패 조건
- 불안정시의 발전기 차단시간  
불안정한 경우는 고장 발생시간부터 발전기를 차단시키는 시간이 짧을수록 안정화되며, 차단이 필요한 발전기 대수를 줄일 수 있다.
  - 차단기 접점을 이용 : 계전기, 차단기 동작시간 6 cycle 및 보조계전기 동작, 신호 전송시간 3 cycle을 적용(150ms)
  - 계전기 접점을 이용 : 계전기 동작시간 3 cycle 및 보조계전기 동작, 신호 전송시간 3 cycle을 적용(100ms)  
(차단기 동작시간을 줄일 수 있음)

○ 과도안정도 모의결과

구분	고장선로	발전기 운전대수	안정도	안정대책 (차단시간)
주간	신당진-아산	9	불안정	3대차단(150ms)
		8	불안정	1대차단
	신당진-신용인	9	안정	-
심야	신당진-아산	9	불안정	3대차단(100ms)
		8	안정	1대차단
	신당진-신용인	9	안정	-

- 과도 안정도 모의 결과에서 볼 수 있듯이 신당진-신용인T/L 상정고장시 어느 경우에도 안정함을 알 수 있음
- 신당진T/L(신당진-아산)의 경우는 발전기를 3대 차단하는 경우 안정
- 주간과 심야의 경우를 비교해 보면 심야조건이 과도적으로 불안정하여 고장발생후 100ms 이내 발전기를 3대 차단하여야 안정되며 발전기 차단시간을 가능한 최대로 짧게하지 않으면 4대를 차단시켜야 안정된다는 결론을 얻을 수 있다.

○ 고장파급방지 시스템 구성

고장파급방지 시스템의 하드웨어 구성은 다음 사항을 고려하여 설치한다.

- 주간과 심야의 발전기 차단에 필요한 시간이 다르므로 심야 운전조건에서 안정 가능한 기준에 적합토록 차단 시간을 결정
- 신당진T/L 고장에 따른 계전기, 차단기의 동작은 신당진 변전소에서 감지가 가능하므로 태안, 당진발전소의 발전기 차단을 위해서는 신호를 전송할 수 있는 설비 필요
- 발전기 예방정비 등 운전대수 변경에 따른 조건을 고려하여 발전기 차단대수를 변경 가능
- 이상의 구비조건을 만족하는 시스템을 그림 6과 같이 구성하였다.

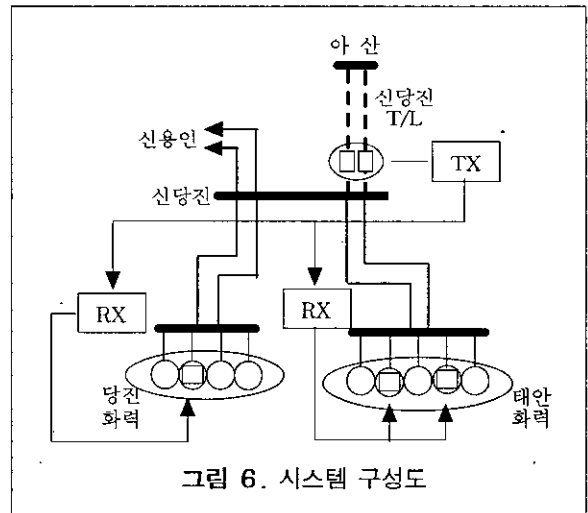


그림 6. 시스템 구성도

○ 고장파급방지 시스템 개선방향

우리 나라 계통에서 울진원자력, 당진·태안, 평택화력 발전소 등의 경우는 송전선로 2회선이 동시 정지시 안정화를 위하여 발전기를 차단토록 설비가 구성되어 있으나, 시스템구성을 위한 시간과 비용이 필요하고 다양한 운전조건을 고려할 수 없는 단점이 있다. 따라서 전력계전기 등의 조합형을 사용하여 하드웨어적인 융통성의 한계를 극복하고 운전조건의 다양성을 최대한 반영할 수 있는 방법을 개발시켜 나가야 할 것이다.



## 4. 안정도 향상대책

과도 안정도는 아주 짧은 시간에 결정되므로 고장발생 후 조치는 불가하다. 따라서 충분한 검토를 통하여 사전에 여러 가지 대책을 강구하여야 하며 다음과 같은 안정화 대책을 생각할 수 있다.

### 4.1 운영측면

- 고장파급방지 시스템
- 사전에 발전기 출력 저감운전(산불, 악천후 등 비상시)

### 4.2 설비측면

- 계통의 직렬리액턴스 감소대책
  - 발전기, 변압기의 리액턴스 감소
  - 선로의 병행회선을 증가, 복도체 사용
  - 직렬콘덴서 설치
- 전압변동의 억제
  - 속용 여자방식 채용
  - 계통의 연계
  - 중간 조상방식 채용
- 계통에 주는 충격의 경감
  - 적당한 중성점 접지방식 채용
  - 고속도 차단방식 채용
  - 제페로 방식의 채용
- 고장시의 전력변동 억제
  - 속용성이 우수한 조속기 채용
  - 제동저항 삽입

## 5. 과도안정도 해석추세

### 5.1 실시간 해석

On-line을 이용한 실시간 해석으로 실제계통 운전 조건에 맞는 다양한 검토 수행 및 안전성 예측 가능

### 5.2 신개념 설비 해석기술

HVDC, FACTS 등 전력전자 소자를 이용한 신개념 설비의 모델링 및 최적화된 해석기술 확보 필요

### 5.3 안전도 여유의 평가

전력산업 규제완화로 계통의 안전도 위주에서 경제성이 중요하게 부각되면서, 객관적인 기준 및 자료에 의한 정밀한 해석 결과 및 안전도 여유 평가의 필요성이 증대되고 있음

## 6. 결 론

부하가 증가함에 따라 전력계통은 앞으로도 더욱 확장되고 복잡해질 것이며 이에 따른 송전제약 요소도 많아질 것으로 생각된다. 이러한 계통의 안정은 물론 제약이 최소화되도록 운영하여 전력시장의 투명하고 공정한 거래질서를 확립하는 것이 중요한 과제라 할 수 있다. 적정 여유 확보와 경제성의 최대한 보장을 이라는 상충된 이해를 조화롭게 풀어가기 위해서는 계통해석의 정밀도 향상이 더욱 중요성을 가지게 될 것이다. 따라서 해석의 정밀도를 좌우하는 요인이자 할 수 있는 데이터의 검증 및 신뢰성 확보를 위한 노력이 절실히 요구되고 있다. 아울러 업무특성에 맞는 다양한 해석Tool을 확보하여 최적화된 해석결과를 바탕으로 안정적인 계통운영이 될 수 있도록 부단한 노력을 기울여야 할 것이다.

### 참고문헌

- [1] P. Kundur 'Power System Stability and Control' EPRI
- [2] John J. Grainger 외 'Power System Analysis' 1994 McGraw-Hill
- [3] '에너지 함수를 이용한 전력계통의 과도안정도 평가 연구' 1990 한전 전력연구원
- [4] '전력계통 안정도 정밀해석을 위한 적정 부하 모델에 대한 연구' 2001 한전 전력연구원
- [5] '전력시장 운영규칙' 2001 한국전력거래소
- [6] '전력시장 운영규칙 세부운영기준' 2001 한국전력거래소
- [7] 송길영 '신편 전력계통공학' 1999 동일출판

## 저 자 소개



### 송 석 하 (宋 錫 夏)

1953년 10월 3일생. 1981년 한양대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 발송배전기술사, 현재 한국전력거래소 계통기술처 계통해석팀장.



### 정 응 수 (鄭 應 秀)

1964년 1월 18일생. 1986년 해사 졸업. 1991년 한국전력공사 입사. 2000년 전력계통공학과정(GE). 현재 한국전력거래소 계통기술처 계통해석팀 과장.