

## 계통 안정도 모의를 통한 전력계통의 무력화 방안

### The Incapacitation Method of Power System Assessing Transient Stability Index and Voltage Drop/Rise Duration Index

임재성\*      강현구\*      김택원\*      문승일\*      임완권\*\*  
 Jae-Sung Lim    Hyun-Koo Kang    Taek-Won Kim    Seung-Il Moon    Wan-Khun Lim

#### Abstract

When assailing some area, it is important to consider targeting power system. This paper describes effective method that power networks are incapacitated based on assessing TSI and VDI. For this, we compose realistic scenario and analyze the simulation results in a view of stability. The simulation results show the destruction effects when occur the contingency in the specified area. To perform this process, the simulation tool PSS/E and DSAT are used.

Keywords : Power System Stability(전력시스템 안정도), Rotor Angle Stability(위상각 안정도), Voltage Stability(전압 안정도), Transient Stability Index(과도안정도 지수), Voltage Drop/Rise Duration Index(전압 안정도 지수)

#### 1. 서론

최근 여러 국가의 전력산업에서 경쟁체제 및 규제 완화가 도입됨에 따라 전력 계통의 효율적 운전에 대한 사회적 요구가 급격히 증대되고 있다. 이에 따라 각국에서는 신뢰도 기준을 적정 수준으로 유지하고, 비상시에 대해서는 적절한 대응조치를 마련하여 계통 운영의 안전도를 확보하는 방안을 마련하기 위해 노력하고 있다.

하지만, 점차 산업이 발달함에 따라 전력 계통은 규모나 복잡성 측면에서 매우 고도화되고 있다. 따라서

최근에는 계통의 안정적인 운영이 매우 중요한 문제로 부각되었고 세계 여러나라에서는 핵심설비를 안정적으로 동작시키려는 노력을 기울이고 있다.

최근 핵심 설비의 고장, 수목접촉 등으로 인한 송전선로의 사고 때문에 전체 계통에 정전이 유발되는 사례가 보고되고 있고, 이와 같은 광역정전 발생시 전력을 공급받는 수많은 산업 설비 및 국가 기반 시설에 심각한 영향을 줄 수 있다.

본 논문에서는 광역정전 등 전력 계통 무력화를 달성하기 위한 효율적인 방안을 제시하기 위해 전력 시스템 계통 해석 도구인 PSS/E와 DSAT을 이용하여 표적 전력 계통을 분석하고 계통 내의 주요 보호 대상 지점을 상정하였다. 그 후 해당 지역에 발생할 수 있는 여러 가지 상정사고 모의를 통한 고장 계산 및 안정도 시뮬레이션을 수행하여 특정고장이 전력 계통에 미치는 파급 영향을 분석하는 연구를 진행하

† 2009년 4월 26일 접수~2009년 9월 17일 게재승인

\* 서울대학교(Seoul National University)

\*\* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 임재성(jslstar16@powerlab.snu.ac.kr)

었다.

## 2. 이론해석

### 가. 전력계통의 안정도

안정도는 이러한 입력의 변동이나 외란이 발생했을 때, 전기기계적인 동요가 감소하여 주어진 운전 조건으로 되돌아오거나 새로운 운전 조건에서 안정적으로 운전을 할 수 있는지 여부를 나타내는 성질을 말한다.

안정도 해석 방법은 동특성에 결정적인 영향을 미치는 변수를 기준으로 발전기 위상각 안정도(과도안정도, 미소신호안정도), 전압 안정도(과도전압안정도, Long Term 전압안정도)로 나뉜다. 즉, Fig. 1과 같이 발전기에 관련된 동특성이 주로 영향을 미치는 경우는 위상각 안정도(Rotor Angle Stability)로, 그리고 부하의 동특성이 주로 영향을 미치는 경우는 전압 안정도(Voltage Stability)로 나누어서 해석한다<sup>[1]</sup>.

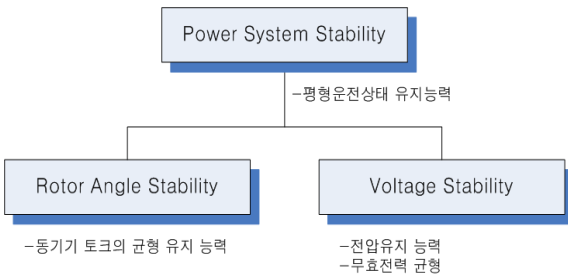


Fig. 1. 전력계통 안정도의 구분

#### 1) 위상각 안정도(Rotor Angle Stability)

위상각 안정도는 계통에 포함되어 있는 모든 발전기들이 동기화를 유지할 수 있는 능력을 말한다. 이러한 위상각 안정도 여부를 판단하기 위해서는 발전기들 사이에 걸리는 전력과 위상각의 관계를 확실하게 알아야 한다.

발전기와 부하의 내부 임피던스, 모선의 임피던스의 합을  $X_T$ , 발전기  $E_G$ 와 부하  $E_M$ 라고 하면, 모선을 통해 흐르는 조류는 다음과 같은 식으로 설명할 수 있다.

$$P = \frac{E_G E_M}{X_T} \sin \delta \quad (1)$$

여기서  $\delta$ 는 발전기와 부하의 위상차를 의미하며, 발전기의 위상각이 부하의 위상각보다  $\delta$ 만큼 앞서 있다는 것을 뜻한다. 조류는 이와 같이 위상이 앞서 있는 곳에서 위상이 뒤쳐진 곳을 향해서 흐르게 된다.

이러한 위상은 결국 발전 동기기의 rotor angle과 관련이 있는 값이다. 위의 식을 이용해서 위상차에 따른 조류의 크기를 그려보면 Fig. 2와 같다.

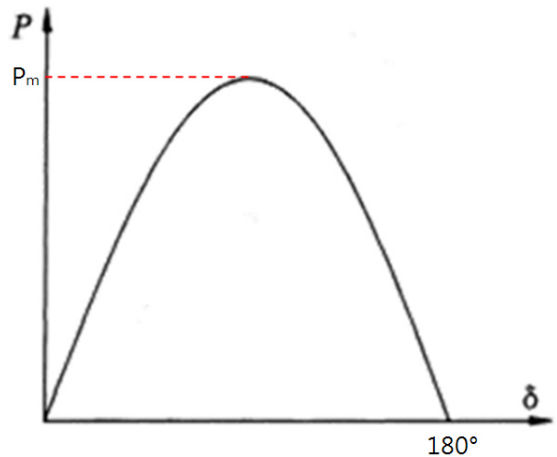


Fig. 2. 전력-상차각 특성 곡선

위의 그림에서 볼 수 있듯이 위상차가  $0^\circ \sim 90^\circ$ 일 때 계통은 안정된 상태를 유지한다. 즉, 계통이 안정된 상태에서는 위상차가 증가하면서 발전기의 발전량이 증가하고 조류가 증가하게 된다. 그러나 안정 한계인  $90^\circ$ 를 넘어갈 경우에는 위상차가 증가하면 조류가 감소하게 됨으로써 계통이 불안정 상태가 된다. 이 경우 발전기의 탈조현상이 발생하면서 발전기가 계통으로부터 분리된다. 발전기 탈락이 발생하면 결국 계통 주파수가 불안정해지고 전력 수급 불균형이 커지게 된다. 이는 계통의 전압을 급격히 떨어뜨림으로써 해당 계통에 정전이 발생할 수 있다<sup>[2,4]</sup>.

#### 2) 전압 안정도(Voltage Stability)

앞에서 살펴본 전력 계통의 안정도는 발전기 입/출력 간의 불균형에 때문에 발생하는 송전선로의 송/수전단 전압 상차각의 동요에 의거한 전력의 불안정 현상을 대상으로 한 것이었다. 하지만, 전력 계통이 거대해지면서 실제로 장거리 송전선의 수전단 전압의 이상 저하라든지 무효 전력 부족에 의한 전압 저하

는 이른바 전력 계통의 전압 안정성 문제의 중요성도 매우 커졌다. 특히 일정 토크의 유도 전동기나 전력용 콘덴서의 개폐로 전압 조정을 하고 있는 전력 계통에서는 앞에서 언급한 현상이 발생할 수 있다<sup>[3]</sup>. 즉, 전압 안정도는 전력계통에 연결된 발전기들이 각자의 유효전력 출력하계를 넘지 않고 계통전압을 유지할 수 있는 정도를 말한다.

나. DSAT에서의 전력 안정도 판별

앞에서 살펴본 전력 계통 안정도는 본 논문에서 사용한 컴퓨터 시뮬레이션 도구인 DSAT에서 확인할 수 있다. 특히, DSAT에서는 전력 계통의 과도 시의 순시적인 전력 계통 안정도를 판단하기 위해 여러 가지 지수들이 제공되고 있다. 제공되는 지수중 앞서 살펴본 전력 안정도의 대표적인 위상각 안정도와 전압 안정도는 각각 과도안정도 지수와 전압안정도 지수를 통해 확인할 수 있다.

1) 과도안정도 지수(Transient Stability Index)

시스템의 변동이 일정한 형태를 따라 이루어진다는 사실에 기인하여 시스템의 과도상태 안정도를 논하는 것이 과도안정도 지수이다. 이 지수를 이용하여 발전기의 탈조가 얼마나 일어났는가를 확인할 수 있다.

과도안정도 지수  $\eta$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\eta = \frac{360 - \delta_{\max}}{360 + \delta_{\max}} \times 100 \quad -100 < \eta < 100 \quad (2)$$

위의 식 (2)에서  $\delta_{\max}$ 는 외란이 발생한 후의 계통 내의 발전기들 사이의 위상각차 중 가장 큰 값을 의미한다. 그러므로  $\eta$ 가 양수이면 안정된 상태, 반대로 음수이면 불안정한 상태를 의미한다.  $\delta_{\max}$ 의 정의는 Fig. 3과 같이 설명될 수 있다.

여기서 살펴본  $\eta$  값을 통해, 전력 계통의 안정도 중 발전기의 회전기 위상과 관련된 위상각 안정도의 안정 여부를 판단할 수 있다. 즉,  $\eta$  값이 0보다 작은 값을 가지면 해당 계통 내의 임의의 발전기 두 개 사이의 위상차가 360° 이상 벌어진 것을 의미하며, 이럴 경우 계통 내의 전력 수급에 불안정이 유발되어 발전기들의 탈조 현상 등 위상각 안정도가 급격히 떨어져 해당 지역의 대정전이 발생한 가능성이 높아진다.

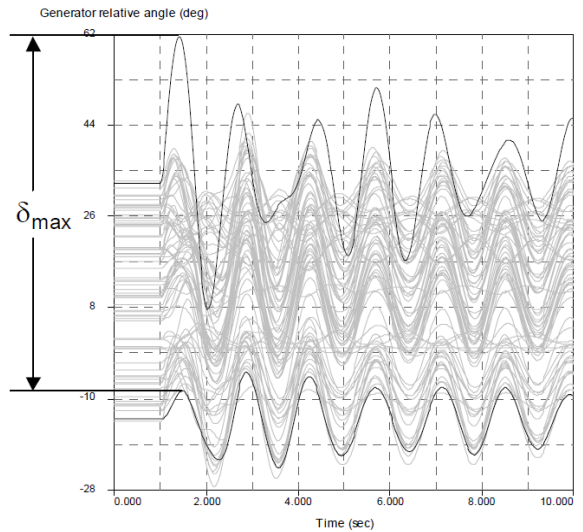


Fig. 3. 과도안정도 지수의 위상차

2) 전압 안정도 지수(Voltage Drop/Rise Duration Index)

DSAT에서 제공되는 지수 중에서 전압 안정도와 밀접한 관련이 있는 것은 전압 안정도 지수이다. 이 지수는 전력 계통의 컴퓨터 시뮬레이션 중 과도상태에서의 전압이 허용범위 안에서 운전되는지를 판단하는 기준이 된다. 또한 이 지수를 이용하여 저전압이 얼마나 지속되는지도 확인할 수 있다. 전압 안정도 지수 ( $T_{Vdrop}/T_{Vrise}$ )의 정의는 아래 Fig. 4와 같다.  $T_{Vdrop}$ 과  $T_{Vrise}$ 의 기준은 각 계통 상태나 운영자에 따라 다르지만, 일반적으로 0.8 p.u. 즉, 정격 전압 레벨의 80% 수준에서 0.4초 이상 운전되면 저전압으로 판단하여 해당선로를 계통과 분리시키는 저전압 계전기가 동작한다.

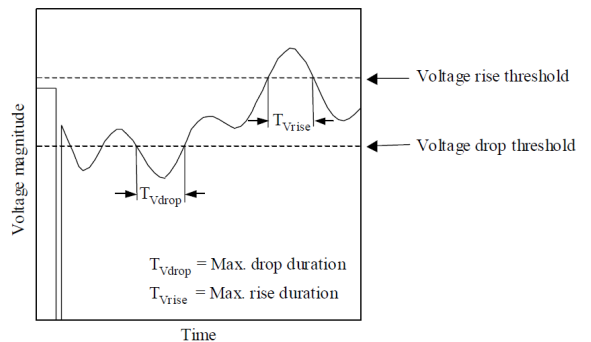


Fig. 4. 전압안정도 지수의 정의

본 논문에서는 사고 시 저전압이 발생하는 경우를 위주로 모의를 하였기 때문에 여기서는  $T_{Vdrop}$  만 고려한다.

### 3. 실험방법

본 논문에서 구성한 모의 시나리오의 대상 계통은 2007년 한전에서 만든 한국 전력계통 데이터를 선택했다. 모의 시나리오의 기본이 될 대상 계통의 주요 설비의 수는 다음 Table 1과 같다.

Table 1. 대상계통의 주요 설비의 수

전력기기	수량(개)	송전선로	수량(개)
발전기(모선)	240	765kV	7
부하	784	345kV	205
부하 모선	748	154kV	1490

효율적인 전력 계통 무력화 방안을 제시하기 위해 본 논문에서는 전력 시스템 계통 해석 도구인 PSS/E 또는 DSAT을 이용하여 표적 전력 계통 내의 주요 보호 대상 지점을 상정하여, 해당 지역에 발생할 수 있는 여러 가지 상정사고 모의를 통한 안정도 시뮬레이션을 수행하고, 이 시뮬레이션한 결과를 바탕으로 사고에 의한 해당지역의 파급효과를 분석하였다. 앞에서 설명한 일련의 과정을 다음 Fig. 5의 알고리즘으로 표현하였다.

보통 대상계통을 무력화시킬때 발전소 및 기기의 직접적인 공격을 가하기는 쉽지 않다. 그러므로 본 논문에서는 송전선로를 대상으로 하는 상정사고를 선정하여 연구를 진행하였다. 154kV 송전선은 계통에 일부 고장이 발생해도 우회공급이 가능하도록 환상망으로 구성되어 있기 때문에 동시 다발적인 사고가 아닌 이상, 대상 계통에 큰 영향을 주지 못한다. 또한 보통 계통을 구성할 때는 N-1 상정사고를 대비하여 구성하기 때문에 한 선로가 사고가 발생했을 시에는 계통에 크게 영향을 미치지 못한다. 그러므로 345kV 이상 병행선로 사고를 중심으로 시나리오를 모의하였다.

본 연구에서 각 지역의 상정사고 파급효과를 분석한 결과 사고 파급영향이 비슷한 선로들을 찾을 수 있었다. 그러므로 비슷한 파급효과를 갖고 있는 선로

들을 지역별로 묶어서 Zone으로 설정하였다. 총 4개의 Zone으로 나누었고, 각각의 Zone에서의 사고파급효과를 분석하였다.

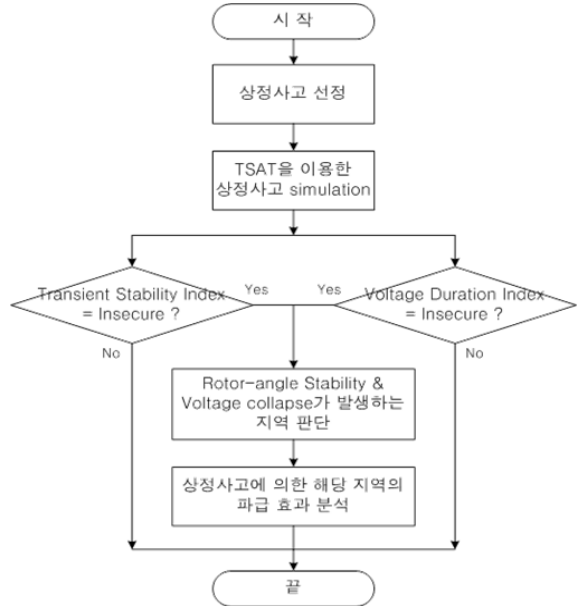


Fig. 5. 시나리오 분석 과정

### 4. 결과 및 해석

총 117개의 사고를 모의한 결과 49개의 경우에서 TSI기준으로 불안정 하였다. VDI의 경우를 보면 31개의 경우 저전압이 지속되는 것을 확인하였다. TSI기준으로 불안정한 경우에 전부가 VDI의 기준으로도 불안정한 것을 알 수 있다. 발전기의 탈조가 일어나면서 충분한 전력이 공급되지 못하여 계통의 전압이 떨어지기 때문이다. 하지만 VDI기준만을 보면 TSI의 기준으로는 안정적인 경우도 많이 있다. 이와 같은 경우는 발전기의 탈조는 일어나지 않지만, 지속적인 저전압으로 인해 계통의 전압붕괴 현상이 예상된다. 그 결과 저전압지역의 선로가 탈락 되면서 해당지역의 정전 사고가 예상된다.

다음의 Fig. 6을 보면 Zone A에 포함되어 있는 선로 중 서인천~신부평 선로사고시 서인천 ST, 서인천 GT, 한화 GT, 경인 #2 ST등 51개의 발전기가 탈락된다는 사실을 확인할 수 있다. 이와 같이 많은 발전기가 탈락된 이유는 발전기 단지 내에 여러 개의 발전

기가 있기 때문이다. 발전단지가 탈락되게 되면 단지 내에 있는 발전기 전부가 탈락되기 때문에 많은 발전기가 탈락된다. Fig. 6의 모션 전압 그래프를 보면 많은 발전기의 탈락으로 많은 발전기들이 VDI의 기준인

0.8 p.u. 밑으로 내려와 있다는 사실을 확인할 수 있다. 결국 넓은 지역에 저전압 현상이 발생하여 사고가 난 지역 근처의 선로들이 계통과 분리될 것이 예상되며 사고난 지역은 정전이 예상 된다. Fig. 7에서

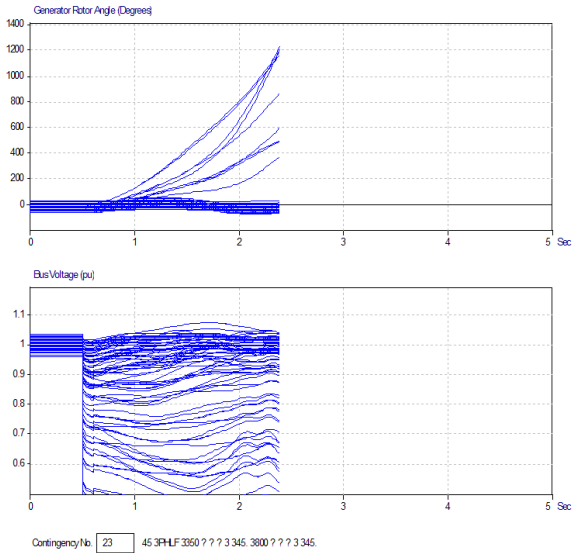


Fig. 6. Zone A 상정사고 : 서인천~신부평(345kV) 사고시 발전기 angle 및 모션 전압

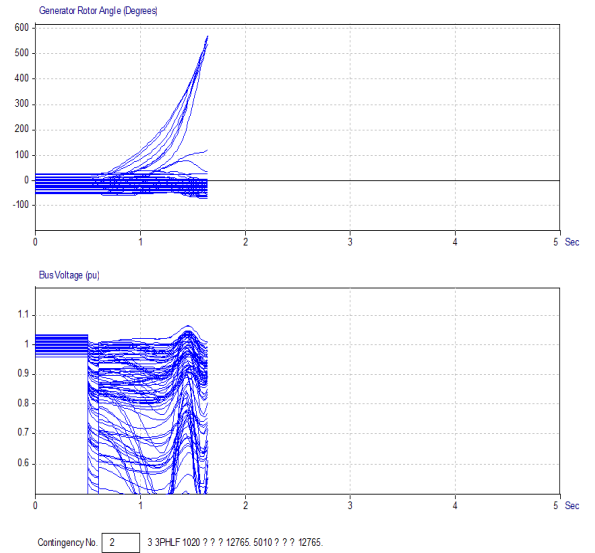


Fig. 8. Zone B 상정사고 : 신가평~신태백(765kV) 사고시 발전기 angle 및 버스 전압

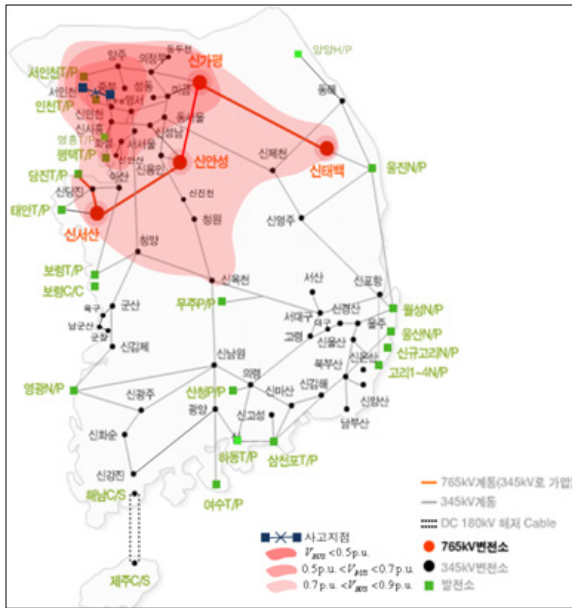


Fig. 7. Zone A 상정사고 : 서인천~신부평(345kV)의 사고파급 효과 등고선도

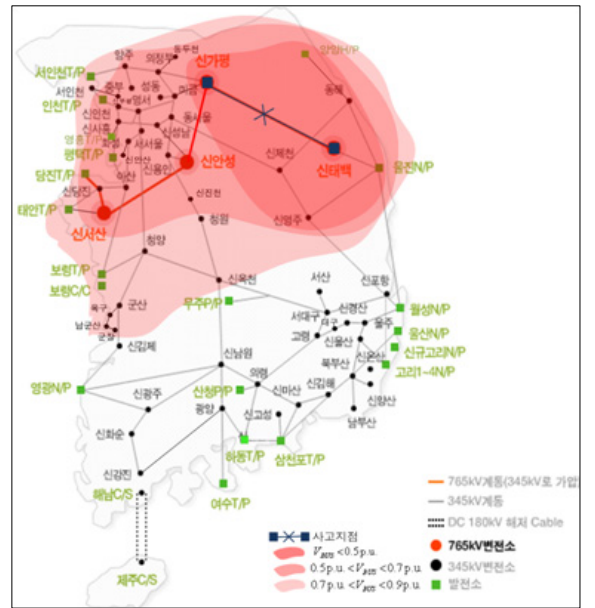


Fig. 9. Zone B 상정사고 : 신가평~신태백(765kV)의 사고파급 효과 등고선도

인천~신부평 선로사고에 의한 주변 과급 효과가 나타나었다. 이 사고과급 효과 등고선도에서 사고가 난 지점과 가까운 곳에서는 사고의 영향이 크지만 멀어질수록 사고의 영향은 작아진다는 사실을 확인할 수 있다.

위의 Fig. 8을 보면 Zone B에 포함되어 있는 선로 중 신가평~신태백 선로사고시 강릉GT, 동해GT, 서인천GT 등 16개의 발전기가 탈락된다는 사실을 확인할 수 있다. 신가평과 신태백을 이어주는 765kV 선로를 통하여 강원도에서 수도권으로 많은 조류가 흐르는데 이 선로가 제거되면서 지역의 부하보다 발전량이 많아지기 때문에 발전기의 탈락이 연속적으로 발생하게 된다. 또한 이 선로사고의 과급효과를 확인해 보면 남한의 절반정도에 영향을 줄 정도로 매우 위험한 사고이기 때문에 사고발생시 보호기기가 제대로 작동하지 않거나 늦게 작동된다면 전국에 정전사고가 일어날 수도 있다.

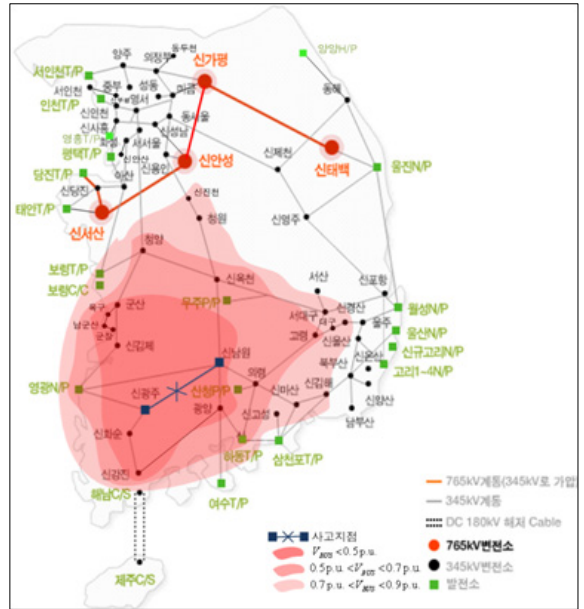


Fig. 11. Zone C 상정사고 : 신남원~신광주(345kV)의 사고과급 효과 등고선도

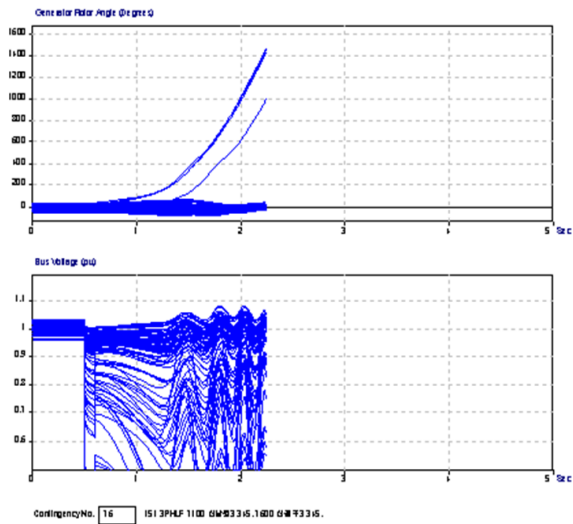


Fig. 10. Zone C- 상정사고 : 신남원~신광주(345kV) 사고시 발전기 angle 및 버스 전압

Fig. 10을 보면 Zone C에 포함되어 있는 선로 중 신남원~신광주 선로사고시 섬진강, 영광GT 등 총 6개의 발전기 탈락이 발생한다는 사실을 확인할 수 있다. 이 선로에 흐르는 조류량은 765kV 선로의 약 10% 정도 밖에 안되지만 사고 하나로 남서부지방 전지역에 영향을 끼친다. 결국 계통의 강인도도 사고의 과급효과에 많은 영향을 끼친다.

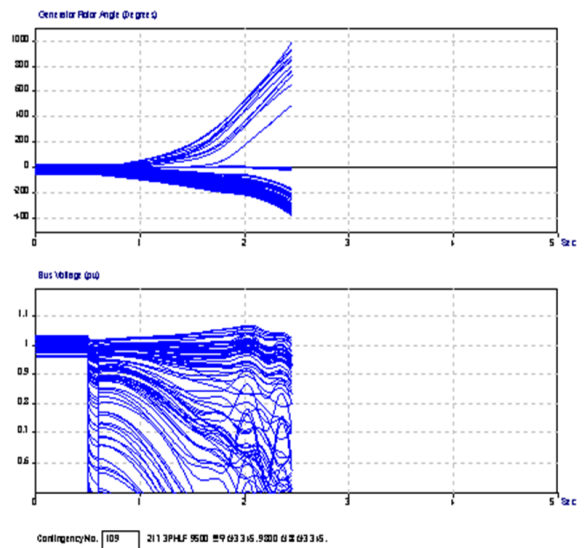


Fig. 12. Zone D 상정사고 : 북부산~신울산(345kV) 사고시 발전기 angle 및 버스 전압

마지막으로 Fig. 12를 보면 Zone D에 포함되어 있는 선로 중 북부산~신울산 선로사고시 고리, 부산GT, 영남GT, 월성 등 25개의 발전기가 탈락한다는 사실을 확인할 수 있다. Fig. 13의 사고과급 효과 등고선도를



효과 평가 업무 전산화 사업(UE085065GD)으로 수행되었습니다.

### Reference

- [1] 한전 전력연구원, “고정밀 전력설비 모델링 및 교육 훈련시스템 개발”, 산업자원부, pp. 4장 1~3, 2007.
- [2] R. Bergen, Vijay Vittal, “Power Systems Analysis”, Prentice Hall, pp. 538~553, 2006.
- [3] Prabha Kunder “Power System Stability and Control”, McGrawhill pp. 22~36, 1993.
- [4] P. Kunder, G. K. Morison, L. Wang “Technique for On-Line Transient Stability Assessment and Control”, Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE Vol 1, pp. 46~51, Jan. 2000.