

## 한전 실 계통의 상정사고 모의가 가능한 과도 안정도 해석 프로그램 개발

박정수, 장길수, 신정훈\*, 김태균\*  
고려대학교 전기공학과, 한전전력연구원\*

### Development of Transient Stability Analysis Program for KEPCO System

Jungsoo Park, Gilsoo Jang, Jeonghoon Shin\*, Tae-Kyun Kim\*  
Dept. of Electrical Engineering, Korea Univ., KEPRI, KEPCO

**Abstract** - 경쟁적 전력 환경 하에서 계통해석은 신뢰성과 객관성을 전제로 수행되어야 하며, 이를 위해서는 계통해석 시 정확한 데이터를 사용하는 것뿐만 아니라, 계통의 특성에 맞는 적합한 계통해석 툴을 사용하는 것이 중요하다. 그러나 현재 과도안정도 해석에 있어, 국내에서는 해외에서 개발된 상용 패키지를 주로 사용하고 있으며, 전적으로 해외의 상용 프로그램을 이용한 해석에 의존하고 있다. 따라서 우리나라의 전력계통에서 발생하는 다양한 현상을 종합해석 할 수 있는 프로그램을 개발, 한전, 한국전력거래소, 발전회사, 연구소 및 학계가 공히 사용함으로써, 전력계통 해석 결과의 신뢰도를 제고할 필요가 있다. 이러한 요구에 의하여 국내 전력계통에 대하여 보다 효율적인 과도 안정도 해석이 가능한 프로그램을 개발하였다.

#### 1. 서 론

과도 안정도는 급격한 외란에 따라 계통에 과도현상이 발생하더라도 다시 안정 상태로 회복하여 동기 운전이 계속 지속 될 수 있는 정도를 의미한다. 전력계통 내에서 급격한 외란에 의한 사고의 파급은 계통보호면에서 심각한 문제를 일으킬 수 있으므로 과도안정도 해석 프로그램은 안전한 계통운영 및 계획을 위해서 필수적이다.

그러나 국내의 전력계통 해석 프로그램은 이론의 증명을 위한 소규모 프로그램 개발이 주류를 이루고 있으며, 한전 실 계통의 해석이 가능한 수준의 프로그램 개발은 거의 이루어지지 않고 있었다. 따라서 알고리즘 개발과 이론적인 측면에서는 상당한 성과를 이루고 있으나 대형 프로그램의 개발에는 기술적 격차가 상당히 크며, 실무에서 사용되고 있는 프로그램은 대부분 수입에 의존하고 있는 실정이다.

전력 산업의 구조개편으로 인하여 전력 해석 소프트웨어의 수요가 급증하고 있는 시점에서 그 동안 국내외에서 수행된 연구 성과를 바탕으로 대부분 수입에 의존하고 있는 계통 해석 프로그램을 국산화하여 경제적 부담을 감소시키고, 계통 해석 기술의 국제적 경쟁력을 확보하여, 계통 해석 기술의 저변화 및 고급화를 도모해야 할 필요성에 따라 한전 실 계통의 상정사고 모의가 가능한 과도 안정도 해석 프로그램이 개발하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 과도 안정도 해석 알고리즘

아래 그림 1은 과도 안정도 해석에 적용되는 전력 계통 모델의 일반적인 구조이다. 과도 안정도 해석 알고리즘에서 위 그림 1의 동기 발전기, 여자기 시스템, 조속기들과 같은 동적 기기들(Dynamic Device)은 미분 방정식으로 표현되며, 정적 부하를 포함한 송전 네트워크는 대수 방정식으로 표현 된다. 계통의 동적 기기들은 다음 식

(1)과 같은 1차 미분 방정식으로 나타내어지고 정적 부하와 송전 네트워크는 다음 식 (2)과 같은 대수 방정식으로 나타내어진다.[1]

$$\dot{x} = f(x, V) \quad (1)$$

$$I(x, V) = YV \quad (2)$$

위 식 (1)과 (2)에서 변수  $x$ 는 계통의 동적 기기들의 상태 변수들의 실수 벡터(State Vector)이고, 변수  $V$ 는 계통에 있는 모선들의 복소(Complex) 전압 벡터(Bus Voltage Vector)이다. 변수  $I$ 는 각 모선에 설치된 발전기에서 주입 전력과 각 모선의 부하에서 소비되는 전력을 등가화 한 복소 주입 전류 벡터(Current Injection Vector)이다.  $Y$ 는 정 임피던스 부하를 포함하는 계통의 송전 네트워크를 나타내는 복소 어드미턴스 행렬(Admittance Matrix)이다. 따라서  $x$ 의 차원(dimension)은 계통에 설치된 동적 기기들의 숫자와 형태에 의존적이며  $I$ 와  $V$ ,  $Y$ 는 전체 계통의 모선 숫자에 의존적이다.

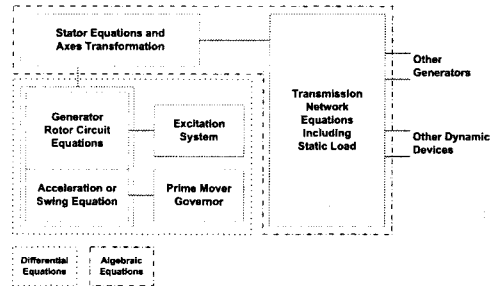


그림 1 과도 안정도 해석을 위한 전력계통 모델 [1]

과도 안정도 해석을 위한 시 모의 알고리즘에서 매 시간 단계마다 수치적분 기법에 의해 위 식 (1)의 상태 변수들이 업데이트 되고 이 상태 변수들에 의해 식 (2)의 주입 전류들이 결정되어 모선 전압 벡터  $V$ 가 업데이트 된다. 이렇게 계산된  $V$ 는 다음 시간 단계에서 식 (1)에 적용되어 상태 변수 계산에 이용된다.

##### 2.2 과도 안정도 해석 프로그램의 구조

아래 그림 2는 개발된 과도 안정도 해석 프로그램의 기본 구조를 나타낸 것이다. 개발된 과도 안정도 해석 프로그램은 전력 조류 계산 데이터와 동적 모델 데이터로 Shaw Power Technologies, Inc.(구 PTI)의 PSS/E 프로그램의 raw 파일과 dyr 파일을 입력받도록 개발되었다. 이 외에 상정사고와 같은 시뮬레이션 시나리오가 지정된 스위칭 데이터와 감시하고자 하는 계통 변수들을 지정하는 모니터링 데이터는 별도의 컨트롤 파일을 이용하여 입력되도록 하였다.

이렇게 입력된 입력 전력조류 계산 데이터와 동적 데이터를 이용하여 계통의 각 상태 변수와 대수 변수들의 초

거값(Initial Condition)이 계산된다. 이 초기값들은 위 식 (1)과 (2)의 시 모의 알고리즘에 적용되어 시간에 따른 계통 변수들의 변화량을 계산하게 된다.

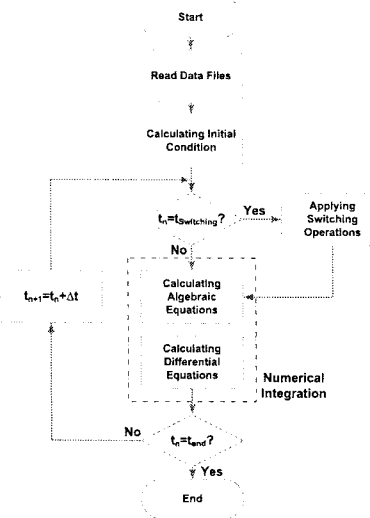


그림 2 과도 안정도 해석 프로그램의 알고리즘

위 식 (1)의 상태 변수들의 변화를 계산하기 위해서는 수치적분 기법이 사용된다. 개발된 과도 안정도 해석 프로그램에서는 4차 Runge-Kutta 기법(4th order Runge-Kutta Method)이 이용되었다. 4차 Runge-Kutta 기법은 아래 식 (3)과 같이 매 시간 단계마다 4개의 각기 다른 변수의 변화량을 계산하여 오차를 수정한다.[2]

$$x_{n+1} = x_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)\Delta t \quad (3)$$

$$k_1 = f(t_n, x_n)$$

$$k_2 = f\left(t_n + \frac{1}{2}\Delta t, x_n + \frac{1}{2}k_1\Delta t\right)$$

$$k_3 = f\left(t_n + \frac{1}{2}\Delta t, x_n + \frac{1}{2}k_2\Delta t\right)$$

$$k_4 = f(t_n + \Delta t, x_n + k_3\Delta t)$$

부하 모델은 정부하(Static Load) 모델 중 한전 실 계통의 상정사고 모의에서 가장 일반적으로 사용되는 ZIP 다항식 모델로 적용 가능하도록 하였다. 이 부하 모델은 다음 식 (4), (5)와 같이 표현된다.[1]

$$P = P_0 \left[ p_1 \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 + p_2 \left( \frac{V}{V_0} \right) + p_3 \right] \quad (4)$$

$$Q = Q_0 \left[ q_1 \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 + q_2 \left( \frac{V}{V_0} \right) + q_3 \right] \quad (5)$$

$$p_1 + p_2 + p_3 = 1.0$$

$$q_1 + q_2 + q_3 = 1.0$$

위 식 (4)와 (5)에서 아래 첨자 0는 해당 변수의 초기 동작 상태에서의 값을 의미한다. 각 항은 전압에 의존적이며 전압 변화의 제곱에 비례하는 부분은 정임피던스(Constant Impedance, Z), 전압 변화량에 비례하는 부분은 정전류(Constant Current, I), 전압 변화량에 영향을 받지 않는 부분은 정전력(Constant MVA, P or Q) 부하를 의미한다.  $p_1 \sim p_3$ ,  $q_1 \sim q_3$ 는 각 부하 부분의 비율을 나타내는 계수이다.

위 식 (4)와 (5)의 ZIP 모델에서 정전류(I)와 정전력(P) 부분은 저전압에서 정임피던스(Z)로 특성이 변화한다. 이와 같은 저전압에서의 부하 특성 또한 고려되어 모델링 되었다.

### 2.3 개발된 과도 안정도 해석 프로그램의 성능

개발된 과도 안정도 해석 프로그램은 기본적으로 한전 계통 규모의 실 계통에 대하여 과도 안정도 해석이 가능한 규모로 설계되었다. 그에 따라 최대 350개의 발전기와 2000개의 모선을 가진 대규모 계통의 상정사고 모의가 가능하도록 하였다.

그리고 발전기와 여자기, PSS(Power System Stabilizer), 그리고 조속기 모델들은 2010년 한전 계획 계통을 기준으로 계통에 설치된 모든 종류의 설비들을 모델링 하였다. 2010년 한전 계획 계통에 설치된 모델들은 표 1과 같다.

표 2 과도 안정도 해석 프로그램의 동적 모델들

|    | 발전기    | 여자기    | PSS    | 조속기    |
|----|--------|--------|--------|--------|
| 1  | GENROU | EXAC1  | IEEEST | GAST   |
| 2  | GENSAL | EXAC1A | PSS2A  | GAST2A |
| 3  |        | EXAC3  | PTIST1 | HYGOV  |
| 4  |        | EXST1  |        | IEEEG1 |
| 5  |        | EXST2  |        | IEEEG3 |
| 6  |        | EXST3  |        | IEESGO |
| 7  |        | ESST4B |        | TGOV1  |
| 8  |        | EXPIC1 |        |        |
| 9  |        | IEEET1 |        |        |
| 10 |        | IEEET3 |        |        |
| 11 |        | IEEEX1 |        |        |
| 12 |        | IEEEX2 |        |        |
| 13 |        | IEEX2A |        |        |
| 14 |        | SCRX   |        |        |

### 2.4 시뮬레이션 결과 비교

개발된 과도 안정도 해석 프로그램의 정확성을 검증하기 위하여 Shaw Technologies, Inc.의 PSS/E, 그리고 Powertech의 TSAT에 동일한 계통 데이터와 상정사고를 적용하여 그 결과를 비교하였다.

검증에 사용된 계통 데이터는 2010년 한전 계획계통 데이터이며 상정사고는 6600 신곡선 3 ~ 6801 청양3S 사의 1회선 345kV 선로에 3상 선로 사고이다. 상정사고는 0.5초에 적용되었으며 0.2초간 지속된 후 해당 선로가 제거되는 시나리오를 적용하였다. 기준 발전기는 29351 울산-#4G로 설정하였다.

Rotor Angle of 27151영광#1G

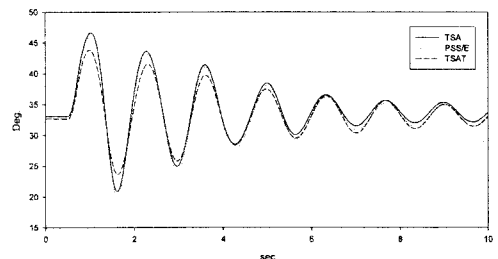


그림 3 발전기의 상대적 위상각 (27151 영광#1G)

위 그림 3은 27151 영광#1G 발전기의 상대적 위상각을 나타낸 그림이다. 위 그림에서 TSA가 개발된 과도 안정도 해석 프로그램의 시뮬레이션 결과이다. 이 그림에서 볼 수 있는 것처럼 10초까지 시뮬레이션 결과가 PSS/E, TSAT과 유사한 결과를 보여주고 있음을 알 수 있다. 이와 동일한 시뮬레이션 결과들 중에서 아래 그림 4는 계통에 설치되어 있는 여자기 중 23471 한화ST#1 발전기에 설치된 IEEET1 여자기의 출력(여자기의 계자 전압, EFD)을 나타낸 그래프이며 그림 5는 25151 울진#1G

발전기에 설치된 IEEEEST PSS의 출력 신호를 나타낸 그래프이다. 마지막으로 그림 6은 25446 소양-#1G 발전기에 설치된 조속기의 출력(발전기의 기계적 입력, PМЕCH)를 나타낸 그래프이다.

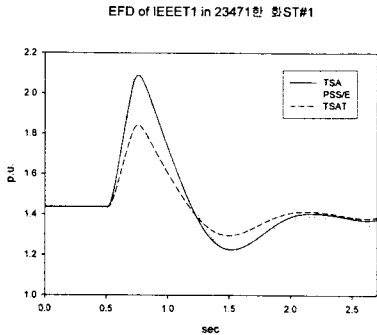


그림 4 여자기 계자 전압

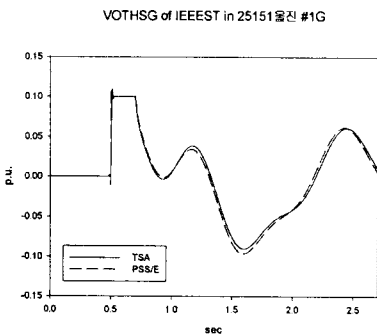


그림 5 PSS의 출력 신호

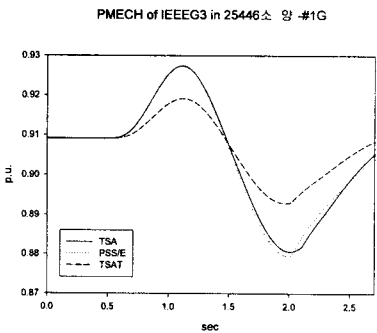


그림 6 조속기의 출력(발전기의 기계적 입력)

이 그림들에서 볼 수 있는 것처럼 시뮬레이션 결과가 상용 프로그램과 유사하게 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. 특히 개발된 과도 안정도 해석 프로그램이 가장 일반적으로 사용되는 PSS/E의 시뮬레이션 결과에 TSAT 보다 더 유사하게 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 아래 그림 7, 8은 47280 D여천 모선 부하의 유효 전력과 무효 전력 변화량을 나타낸 그림이다. 시뮬레이션에서 위 식 (4), (5)의 부하 계수는  $p_1=0.35$ ,  $p_2=0.13$ ,  $p_3=0.52$ ,  $q_1=0.56$ ,  $q_2=0.08$ ,  $q_3=0.36$ 으로 설정하였다. 이 그림들에서 볼 수 있는 것처럼 대수 변수들로 구성된 부하 모델들의 결과 또한 상용 프로그램인 PSS/E와 유사하게 나타나고 있다.

PLOAD in 47280D여 천

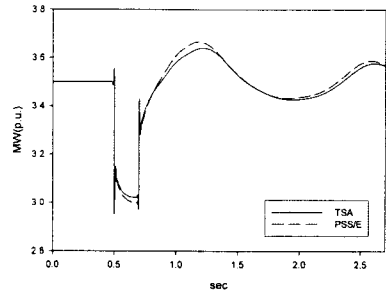


그림 7 47280 D여천 부하의 유효전력

PLOAD in 47280D여 천

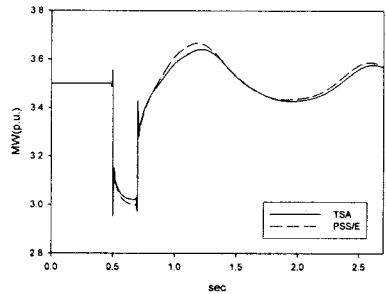


그림 8 47280 D여천 부하의 유효전력

### 3. 결 론

본 연구의 결과는 우리 기술로 충분히 외국 상용프로그램에 버금가는 계통 해석 프로그램을 개발할 수 있다는 것을 보여주고 있다. 그러나 아직 외국에서 개발된 상용 프로그램과 비교하여 모델 라이브러리의 양이 많이 부족하고 다양한 계통에 적용하여 그 신뢰성을 검증해야 하는 문제점들이 있다. PSS/E와 같은 해외에서도 사용 가능한 우수한 과도 안정도 해석 프로그램을 개발하기 위해서는 앞으로 이러한 연구에 대한 지속적인 관심과 투자가 필요할 것이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Kundur, Power System Stability and Control, New York : McGraw-Hill, 1994.
- [2] Steven C. Chapra, Raymond P. Canale, Numerical Methods for Engineers with Software and Programming Applications, Fourth Edition, McGraw-Hill, 2002.