

대규모 원전 건설에 따른 과도 안정도 해석 · 신고리1호기 중심

주운표, 김복렬, 이상근, 오성균, 김건중
 한국원자력안전기술원, 충남대학교

Transient Stability Analysis on Nuclear Power System - Shin Kori 1 Unit

O.P.Zhu, B.K.Kim, S.K.Lee
 Korea Institute of Nuclear Safety

P.S.Oh, K.J.Kim
 Chungnam National University

Abstract - 본 논문에서 개발된 TSDAP(Transient Stability Dynamic Analysis Program)을 이용하여 신고리1호기 건설에 따른 과도 안정도 해석을 수행하였다. 개발된 TSDAP과 PSS/E프로그램을 비교하여 프로그램의 유용성을 입증하였고, 2011년 765kV 건설지면에 따라 임시로 운용되는 345kV 송전망의 과도 안정도를 살펴 보았다.

1. 서 론

원전소외전력계통의 신뢰도는 원자력안전에 중요한 영향을 미친다. 특히 소외전원상실로 인한 사건이 노심손상빈도에 큰 영향을 미치고 있는 것으로 분석되어왔다. 대규모 원전건설(부지당 5기이상의 원전)로 인하여 소외전력계통과 관련하여 다음과 같은 설비 개선이 최근에 이루어졌다.

- 고장전류의 증가로 인하여 4기 이상 원전부지(고리, 월성, 영광, 울진)에 2호기 공유 스위치야드 연락송전선의 분리 운전
- 과도안정도 향상을 목적으로 울진 및 영광 원전부지 스위치야드에 고장파급장치 운영
- 회전식 여자계통을 정지형 고속응답방식의 여자기로 교체

신고리1호기 송전계통인 765kV 송전선 건설지연으로 인하여 임시적으로 345kV 송전선로를 운영해야 신고리1호기 시운전이 가능하게 되었다. 신고리 1호기 운영허가와 관련하여 임시적으로 운영하는 소외전력계통에 대한 심사과정에서 검토한 과도안정도 해석을 자체 개발한 TSDAP으로 모의하고 PSS/E프로그램의 결과와 비교한다.

2. 송전계통의 모형

2.1 부하등가 어드미턴스 모형

과도 안정도 해석을 위하여 초기조건으로 전력조류의 해는 상세히 구하나, 고장조건에서의 전력조류는 간략화하여 부하등가어드미턴스 모형을 이용하여 구하게 된다[1]. 이 때 부하의 형태에 따라 ZIP 모형을 사용하면 전력방정식은 아래 식과 같이 전압의 함수로 표현할 수 있다.

$$P_L + jQ_L = AP|V_L|^a + jBQ|V_L|^b \quad (1)$$

여기서, 전압지수 a와 b는 부하형태에 따라 표1에 제시하였고, A와 B는 부하조건에 따른 할당 값으로 표2에서 P-I-Z값으로 제시하였다.

표 1. 일정ZIP모형의 지수

	Constant Z	Constant I	Constant P
a	2	1	0
b	2	1	0

ZIP모형의 부하조건은 과도안정도해석 결과인 동요곡선에 영향을 크게 미칠 수 있는 것을 모의계산결과를 통해서 확인하였다. 부하등가 어드미턴스는 아래의 (2)식

으로 변환되고, 이는 다시 (3)식의 전류방정식에 사용된다. 여기서 y_{Di} 는 대각행렬의 어드미턴스, 상첨자 *는 절댓값, 하첨자는 모션번호이다. 전류원은 M개의 발전기번호, N은 송전모션번호를 뜻한다.

$$y_{Di} = \frac{S_i^*}{V_i^* V_i} = \frac{P_i^{pss} - jQ_i^{pss}}{V_i^{pss} V_i} = \frac{P_i^{pss} - jQ_i^{pss}}{|V_i|^2} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_M \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{MM} \\ \dot{Y}_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{E}_M \\ \dot{V}_N \end{bmatrix} \quad (3)$$

(3)식은 Kron의 축약방법에 의하여 (4)식으로 변환할 수 있다.

$$I_M = ([Y_{MM}] - [Y_{MN}] \cdot [Y_{NN}]^{-1} \cdot [Y_{NM}]) E_M \quad (4)$$

2.2 3상 평형단락고장과 고장제거

고장감지계전기과 차단기 동작시간을 고려하여 고장제거시간(Fault Clearing Time: FCT)은 0.1초로 설정한다. 과도 기간동안 어드미턴스는 (5)식으로 변환된다. 여기서 하첨자 T는 송전선 어드미턴스, L은 부하 등가 어드미턴스, fault는 고장어드미턴스로 무한대값을 취하고, 모션의 전압은 0이다.

$$[Y] = [Y_T] + [Y_L] + [Y_{fault}] \quad (5)$$

2.3 과도안정도 모형

발전기와 여자제어기의 고장자, 회전자 등요방정식은 Park변환식을 통해서 DQ 좌표변환이 이루어진다. 이와 같이 표준 IBBB여자의 제어정수값을 PSS/E에 입력할 수 있도록 한다. 이러한 처리과정은 그림1과 같다.

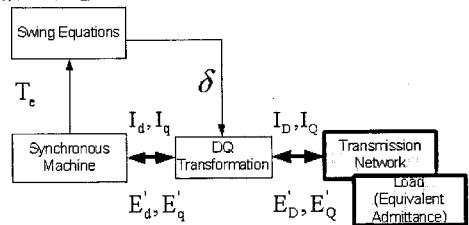


그림1. TSDAP프로그램의 입출력처리과정

3. 과도안정도 프로그램(TSDAP)의 구성

과도안정도 동적해석프로그램(TSDAP)은 PSS/E의 입력자료를 그대로 이용하도록 구성한다. 초기 전력조류계산으로 초기값을 받고, 간략화된 계통대수방정식과 발전기동요 미분방정식을 순환적으로 반복하여 계산하는 흐름의 일부를 그림2에 예시하였다. 여기서 δ 는 발전기의 부하각, ω 는 각속도, 하첨자 s는 동기속도, H[sec]는 관성정수, T_M 은 발전기의 기계적인 토오크, T_E 는 전기적인 토오크, T_{damp} 는 제동토오크이다.

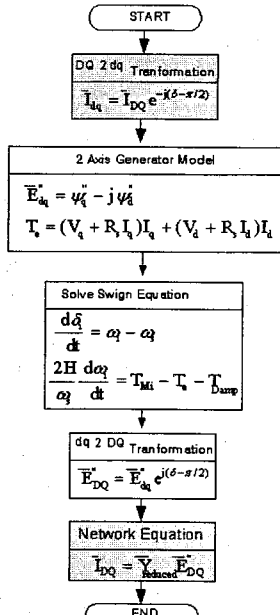


그림2. TSDAP 흐름도

동요미분 방정식은 Runge-Kutta 알고리즘[3][4]을 이용하여 풀었다. 동요방정식의 초기조건인 초기 각속도 변화율은 $\Delta\delta_0 = 0$ 이고, 초기 발전기부하각은 동기속도로 운전되고 있다고 가정한다.

4. 모의 계산을 통한 사례연구

식(1)에서 표시한 A, B값은 2011년 예상 침투부하조건에서 P-I-Z 부하형태의 비율로 표2와 같이 가지게 된다고 가정한다. 표3에서 2011년 침투부하관련 송전망 예상 운영상태를 발전량, 부하량, 손실량으로 보였다.

표 2. 2011 Peak 부하조건에서의 부하조건(A, B 할당값)

	P[%]	Q[%]
Constant Power(P)	51	26
Constant Current(I)	14	29
Constant Admittance(Z)	35	45

표 3. 2011 Peak 부하시 발전, 부하, 손실

	Generation	load	losses	shunt/charging
P[MW]	6,5671	6,4691	979	0
Q[MVar]	1,4662	2,9848	2,4522	21,111

표4에서는 사례 1.2 조건을 표시하였고, 이는 그림4에서 보이는 고리 및 월성 부지의 소외전력망 구성에서 확인할 수 있다.

표 4. 2가지 사례연구의 고장조건

	Case 1	Case 2
Faulted Bus Number	9250	9250
FCT (Fault Clearing Time)	0.1 sec	0.1 sec
Line Removed	9250-9700, 9250-9701	9250-8150

그림3의 고리2발(9250)모선에서 신포항3 변전소까지 가는 송전선은 그림4의 월성1발 모선까지 가는 송전선과 비교하면 용량에서 큰 차이가 난다. 신고리1호기의 발전전력을 송전하는 765kV 송전선로 건설의 지연으로 소외전력망 구성을 그림4와 같이 한시적으로 운영하게 되며, 과도안정도 분석을 위한 2가지 고장조건은 별표로, 임시 345kV 송전선은 굵은 실선으로 표시하였다.

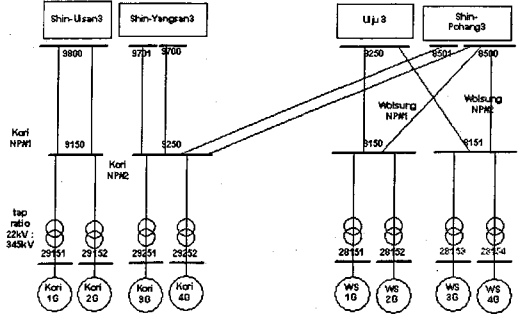


그림 3. 2008년 고리 및 월성 원전부지의 소외전력망 구성

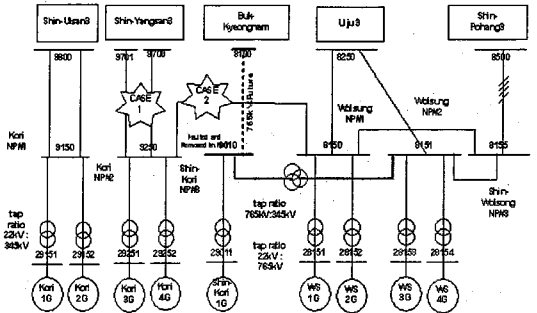


그림 4. 2011년의 고리 및 월성원전 부지 소외전력망 예상구성과 고장사례 2가지

5. 모의계산결과와의 검토

5.1 ZIP 부하조건에의 효과

일정 100% 임피던스, 전류, 전력조건에서 과도안정도 계산결과를 그림5에서 보였다. 점선은 고리3호기의 발전기(모선29151), 굵은 실선은 신고리1 호기(모선29011) 동요곡선이다. 모의결과, ZIP관련 문헌[2]에서 일정 임피던스 부하가 일정 전력부하로 변경될 때, 안정도 한계값이 감소한다고 기술한 것과 일치하는 경향을 보이고 있다. 그림5-1은 고장조건1에서 100% 일정 임피던스부하 형태를 취한 결과이고, 그림 5-2는 같은 조건에서 일정 전류부하 형태를 취한 것이다. 100% 일정 전력부하 형태를 취할 때 안정도 결과는 매우 나쁘게 나온 것을 그림 5-3(PSS/B모의결과)에서 확인할 수 있다. 고장조건1은 고리2발(9250)모선과 신양산 변전소 2개모선(9700, 9701)을 단락접지고장 후 제거한 조건이다.

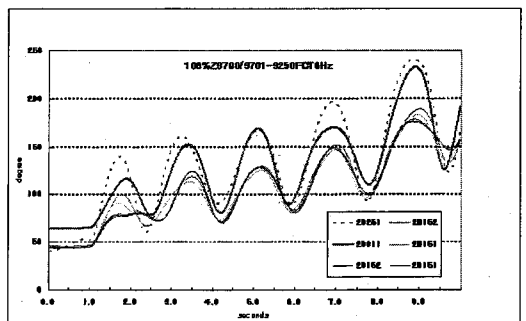


그림 5-1. 고장조건1에서 100% 임피던스부하일때 동요곡선

5.2 개발된 TSDAP프로그램의 검증

고장조건1에서 표2의 부하조건으로 TSDAP와 PSS/B 모의 결과를 그림6-1과 그림6-2에서 보였다. 2개의 송

전선이 상설되므로 고리3호기(29151)발전기가 불안정한 것으로 보인다. 모의결과는 동등한 과도안정도 특성을 보인다.

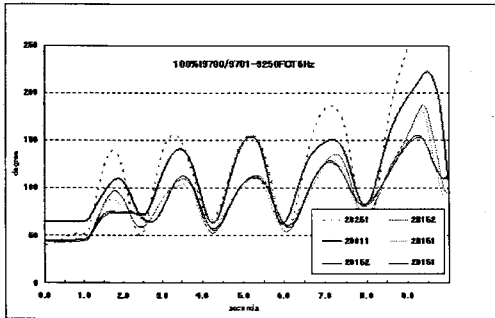


그림 5-2. 고장조건1에서 100% 전류 부하일때 TSDAP동요곡선

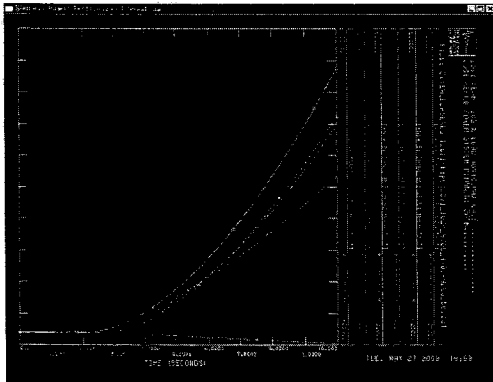


그림 5-3. 고장조건1에서 100% 전력부하일때 동요곡선(PSS/E)

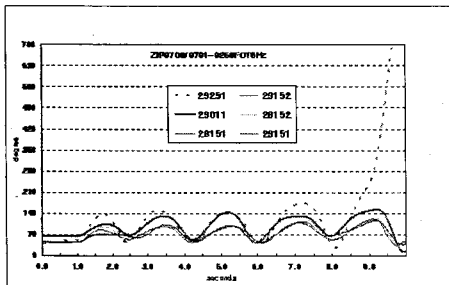


그림 6-1. 고장조건1에서 2011년 첨두부하시 TSDAP모의결과

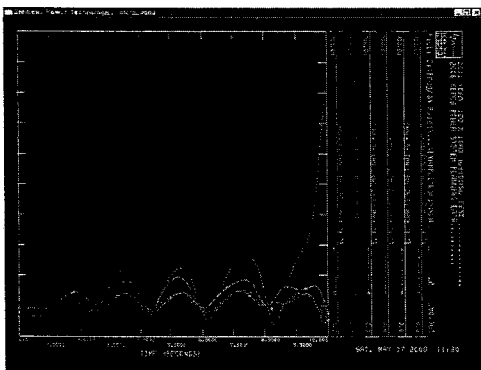


그림 6-2. 고장조건1에서 2011년 첨두부하시 PSS/E 모의결과

그림7-1과 그림 7-2는 고장조건2으로 TSDAP와 PSS/B로 각각 모의한 결과이다. 송전선 1개 차단이므로

과도안정도는 두 가지 모두 동등한 안정 특성을 보인다.

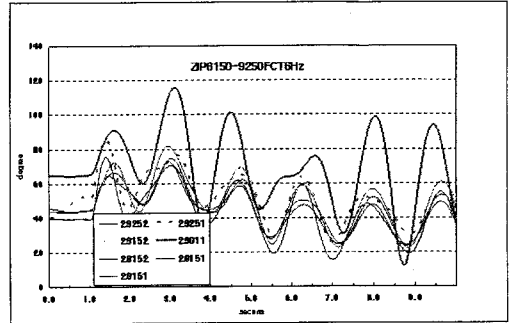


그림 7-1. 고장조건2에서 2011년 첨두부하시 TSDAP모의결과

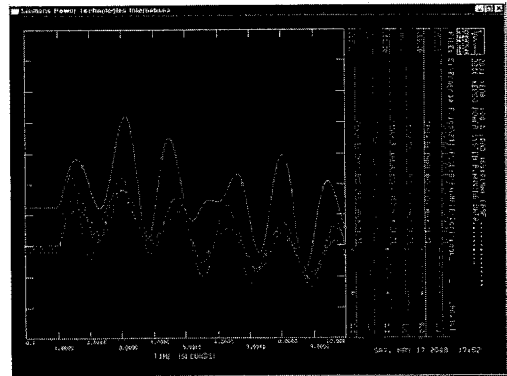


그림 7-2. 고장조건2에서 2011년 첨두부하시 PSS/E 모의결과

6. 결 론

제안한 TSDAP 프로그램은 고전적인 과도안정도 해석 프로그램^[1]을 바탕으로 ZIP부하의 특성과 제어기특성을 부분적으로 반영한 프로그램이다. PSS/B의 입력자료를 그대로 사용하는 이점이 있지만, PSS/B 버전업에 따른 호환성이 없다. 고장사례 2가지로 검증결과, PSS/B와 동등한 모의결과를 보이고 있음을 확인하였다. 또한 ZIP의 효과를 확인하는 과정에서 가장 민감한 발전기를 쉽게 확인할 수 있었다. 향후 개선사항은 PSS/B와의 호환성이라고 하겠다.

[참 고 문 헌]

- [1] O.P.Zhu et al "The Development of Simulation Program for Transient Stability Analysis of Transmission Power System: Nuclear Major System", International Conference on Electrical Engineering, Lotte Jeju Hotel, July 7-11, 2002, Proceeding Vol. 1, pp.75-85.
- [2] C. Concordia and S.Ihara, "Load Representation in Power Stability Studies", IEEE Trans. Vol.PAS-101, pp.969-977, 1982
- [3] Glenn Stagg and Ahmed El-Abiad, "Computer Methods in Power System Analysis", McGraw Hill, 1968
- [4] William H Press, Saul Teukolsky, et al, "Numerical Recipes in C, The Art of Scientific Computing", The 2nd Ed, Cambridge Univ. Press, 1992