

원전 소외 전력 계통 과도안정도해석 프로그램 개발

주요표*, 오성현*, 최장홍**, 오성균**, 김건중**
*한국원자력안전기술원, 충남대학교
**한국원자력안전기술원, 충남대학교

A Development of Transient Stability Analysis Program of NPPs Offsite Power System

O.P.Zhu, S.H. Oh, J.H. Choi, S.K.Oh, K.J. Kim
Korea Institute of Nuclear Safety, Chungnam National University

Abstract - 국내 원전 소외 전력 계통과 실제 계통 대상과도 안정도 해석은 대형 해석프로그램인 PSS/E 등에 의존하여 해석해왔으나, 규제 관점에서 보수적인 과도 안정도를 해석할 수 있는 간이 프로그램을 개발하여, 규제 요건 적합성 여부를 확인할 수 있게 하였다. 본 프로그램은 원전 전력계통에 적용되는 품질요건을 적용하지 않는 제어기에 대하여 신뢰를 두지 않았으며, 송전망 보호 계통-보호계전기 및 차단기-에 의존하여 3상 평형 단락 고장 조건 과도 안정도를 해석한 결과, 과도적인 안정도 판별에 적합함을 확인하였다. 가혹한 송전망 조건 아래 원전 발전기의 고장제거 지연시간에 대한 민감도 분석을 통하여 취약한 원전 부지 및 원전 발전기를 확인할 수 있다.

1. 서 론

미국 원자력 규제위원회(US-NRC)는 소외전력이 원전 안전성에 미치는 영향에 대하여 관련 규제 요건을 제시하고, 미국 원전 사업자로부터 원전 소외 전력이 송전망의 조건에 따라 변화하였으므로, 최초 허가 받은 최종안전성 분석보고서(FSAR)의 가정과 해석결과가 현재에도 유효한지 여부를 재 분석하도록 요구한 바 있다. 그 결과, 몇 개 원전에서는 전력조류로 인한 문제점과 과도 안정도 상에 문제점이 확인되었다[1][2][3][4][5]. 이러한 결과는 전력 시장 구조 개편으로 인하여 과도한 전력 조류가 집중되기 때문에 생긴 사례이다.

국내 원전의 경우, 최초 운영허가를 받은 이후에 커다란 송전망의 변화가 있었으나, 원전의 소외전력 안정도 분석내용을 정기적으로 관련 허가 문서에 반영하도록 하는 규제 요건의 미비로 관련 FSAR내용이 적합하게 개정되지 않고 있다. 원전 소외 전원 상실은 안전에 중대한 영향을 미칠 수도 있으므로, 원전 허가 단계에서 적합하게 원전이 중요한 부하로써 취급되도록 송전계통 운영과정에서 적합한 비상운전 계획을 수립하고 있는 것으로 알려져 있다.

과도 안정도 분석에 제어기의 효과를 감안하여 실제 계통을 대상으로 모형화하는 경우, 발전기의 상태변수 만 2,000개 이상 필요하나, 보수적 규제측면에서 제어기 변수를 제외시키면 1/10개로 줄어든다. 이 때 타당한 결과를 얻을 수 있는 지 본 연구를 통하여 입증하였다. FSAR 요건은 5Hz를 기준으로 3상 단락 사고 제거 지연을 가정한다. 발전기들이 관성 에너지에 따라 운전 중 상호 동요하다가 고장이 제거되었을 때, 평형상태를 회복할 수 있는 지, 1주기 동요곡선만 가지고 안정도를 판별할 수 있도록 하였다.

2. 과도 안정도의 정식화

2.1 과도 안정도의 가정

규제 목적상 선3화 된 제어기의 동적보상효과에는 신뢰를 두지 않았다. 느리고 작은 미소신호에 대한 안정도를 대상으로 하여 섭동이론을 적용한 전달함수는 급격하고 대규모적인 외란-3상단락사고-에 대하여 성립되지 않기 때문에 30Hz정도의 과도 기간에는 효과적인 해를 수치적으로 구할 수 있다고 가정하였다.

2.1.1 발전기의 일정 기계력

5Hz 이내에서 조속기 동작으로 인하여 첫 동요 곡선이

영향을 받지 않는다고 보수적으로 가정하여 해석기간 동안 조속기 효과를 고려하지 않는다[6][7]. 월성2,3,4호기 터빈출력제어기인 Mark V는 송전망 부하전력과 발전출력을 비교하여 전력불균형(power load unbalance)에 의하여 작동하여 원자로출력의 단계감발 및 증기방출제어를 수행하고 있으나, 보수적인 관점에서 고장상태를 가정한다.

2.1.2 계통 권선의 계동력

1-2Hz동안만 작용하는 차과도시정수와 차과도 리액턴스에 포함된 계동권선의 효과를 고려하지 않는다[7].

2.1.3 일정 계자 자속 및 유기기전력

전력안정과 설비와 연계된 여자는 계자자속을 신속하게 증가시켜 과도기간 중/후에 유기기전력을 증가시켜 안정도를 향상시키도록 설계되었다. 그러나, 최적 제어점 설정등 선로 조건에 따른 현장 tuning을 신뢰할 수 없으므로 이를 무시한다.

2.2 부하모형 및 발전기 과도리액턴스 변환 모형

부하의 정적 모형을 전압에 대한 지수 모형으로 가정하면 아래식과 같다[8][9].

$$P_L = A V_L^a + B V_L^b \quad (1)$$

여기서 a,b는 전압의 지수이고, A,B는 비례상수이다.

표 1. 일정 Z,I,P 모형의 지수

	일정 Z	일정 I	일정 P
a	2	1	0
b	2	1	0

지수모형은 일정Z, 일정I, 일정P 모형으로 표1과 같이 지수가 정해진다. 위 부하의 모형에 따라 과도 상태의 첫 동요 곡선은 영향을 받게 된다.

지수가 2인 일정Z 모형은 전압변화에 가장 민감하고, 단락 고장 중 단자전압이 급격히 감소하여 전송전력 P_E 도 전압의 제곱에 비례하여 감소하므로, 일정 I 또는 일정 P 모형보다 동요곡선이 크게 변화하게 된다. 따라서 다음에 유도하는 일정 등가 부하 임피던스 모형이 지수 모형 중 가장 보수적인 해석이다.

태보난 등가회로에 따라 부하는 그림1와 같이 수동 회로망을 구성된다. 일정 수동부하등가 어드미턴스는 아래식으로 구할 수 있다.

$$Y_{Di} = \frac{S_i^*}{V_i} \frac{1}{V_i} = \frac{P_i^{spec} - jQ_i^{spec}}{V_i^{calc}} \frac{1}{V_p^{calc}} = \frac{P_i^{spec} - jQ_i^{spec}}{|V_i|^2} \quad (2)$$

여기서 부하 등가 어드미턴스는 대략요소에만 포함되고, 상점자 spec은 전력조류계산 시 지정값, calc는 부하모형에 대하여 전력조류계산으로 얻은 값이다.

이 때 발전기 과도 리액턴스도 대각 행렬에 포함시켜 전체 수동 회로망을 구성한다.

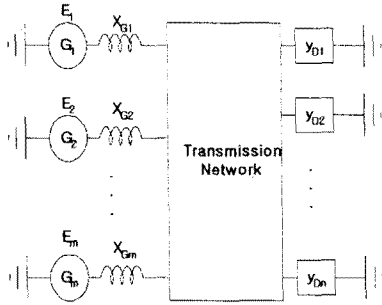


그림1. 부하 등가 어드미턴스

2.3 Kron 모션 축약과 전류선형 대수 방정식

발전기 단자전압모선과 부하 모선은 모두 등가 어드미턴스로 변환되었기 때문에 수동 선로망 모션에서의 전류(모선에 연결된 모든 선로전류의 합)는 0이다. 다만 발전기만 전류인 I_M 으로 작용하므로, 전체 계통의 전류 선형 대수 방정식은 아래 식과 같다.

$$\begin{bmatrix} I_M \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Y_{MM}] & [Y_{MN}] \\ [Y_{NM}] & [Y_{NN}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{E}_M \\ \dot{V}_N \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 M은 N모선에 추가된 발전기의 수, N은 선로망의 원래 모션수이다. 위 식으로부터 유기기전력을 제외한 각 모션의 전압을 소거하여 Kron 축약 어드미턴스 행렬을 다음식으로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{I}_M &= \{ [Y_{MM}] - [Y_{MN}] \cdot [Y_{NN}]^{-1} \cdot [Y_{NM}] \} \dot{E}_M \\ &= [Y_{reduced}] \cdot \dot{E}_M \end{aligned} \quad (4)$$

2.4 3상단락고장 및 고장제거

3상단락사고시 송전 계통에는 다음과 같은 변화가 발생한다. i모선에 i-k 선로에 의한 $y_F = \infty$ 의 어드미턴스 부하가 발생하고, i모선 접지로 인하여 전압도 $V_i = 0$ 로 된다. 3상 단락 사고를 보호계전기가 감지하여 차단기를 동작시켜 고장 선로를 분리한다. 차단기가 동작하면 어드미턴스 행렬은 다음과 같이 변화한다. i모선에 yF의 부하 어드미턴스를 제거하면, i모선이 접지에서 비접지로 전환되고, 전압은 $V_i \neq 0$ 로 다시 회복된다. i모선에 연결된 선로들의 반대편 모션의 부하 어드미턴스가 선로로 환원된다.

2.5 발전기 전기 출력의 변화: 전류 대수 방정식

수동 회로망에 고장이 발생하거나, 차단기가 동작하여 회로망 조건이 변경되면, 수동 회로망의 어드미턴스는 아래 식과 같이 변화된다.

$$[\dot{Y}] = [\dot{Y}_T] + [\dot{Y}_D] + [\dot{Y}_{fault}] \quad (5)$$

여기서 하첨자 T는 원래 송전망, D는 부하등가회로, fault는 고장 중/후의 변화를 뜻한다. 계통 어드미턴스가 변화되면, 전류원에 의한 발전기 전류는 식(3)와 같은 수동 회로망 선형 대수 방정식으로 구해진다. 구해진 발전기 복소 전류와 발전기 복소 유기기전력으로 발전기의 출력을 수동 회로망 조건에 의하여 아래 식으로 구할 수 있다.

$$\dot{P}_E = \text{Real}(\dot{E}_G \cdot \dot{I}_G) \quad (6)$$

2.6 부하각의 변화: 동기기 동요 미분 방정식

고장 기간 중 또는 고장 제거 후 상차각(δ)은 아래식으로 주어진 간이 원동형 동기기 동요 미분 방정식(swing differential equation)에 의한 미분 방정식의 해와 같다.

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_0 - \omega = \Delta\omega$$

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{\omega_0}{2H} (P_M - P_E) = \frac{\pi \cdot f_0}{H} (P_M - P_E) \quad (7)$$

여기서 $H(\text{sec})$ 는 동기기 관성정수, P_M 은 원동기의 기계적 출력으로 초기 전기 출력값을 고장 기간 중 일정하게 유지한다. P_E 는 계통의 어드미턴스 상태에 의존하는 발전기의 전기적 출력이고, f_0 는 계통의 정격 주파수이다. 동기기 동요 비 선형 미분 방정식은 Runge-Kutta 수치해법에 따라 구한다[10]. 이때 미분방정식의 수치해법을 위한 상태 변수의 초기값은 다음과 같이 설정된다.

- ① 각속도 변화분(angular velocity) $\Delta\omega$: 초기값은 0
- ② 부하각의 변화(power angle) 초기값: $\delta_0 = \delta_G$

초기조류계산의 결과로부터 유기기전력은 아래식으로부터 복소 유기기전력의 절대값인 전압크기와 유기기전력의 부하각을 초기값 $\delta_0 = \delta_G$ 으로 구할 수 있다.

$$\dot{E}_G = \dot{V}_G + j \cdot \dot{I}_G \cdot X_G = |\dot{E}_G| \angle \delta_G \quad (8)$$

전력 동요 미분방정식에서 Δt 시간 이후의 부하각이 결정되면, 부하각으로 유기기전력의 복소값을 재계산한다.

3. 사례연구

3.1 실계통 운전 조건: 2000년 하계첨두예상 부하

2000년 실계통 예상 첨두 부하 조건에서 전력 조류계산 입력자료는 다음과 같다. 부하 모션은 345kV 70개, 154kV 498개, 발전모션은 212개, 기준 모션은 삼천포 화력 6호기이고, 지선은 1,528개(선로 차단 62개). 변압기는 295개, 연결 부하량은 613개이다. 2000년 하계 첨두 부하시 예상 발전량은 39,960MW 및 13,144MVAR이고, 첨두 부하량은 39,753MW 및 18,384MVAR이며, 선로 손실은 총 유효 발전량의 0.5% 정도이다. 초기 전력 조류계산 자료 및 조류해는 과도 상태의 초기 입력 값이 된다.

3.2 모의 계산결과

원전 A부지의 3번 발전기 고장 제거 시간 지연 변화에 따른 동요곡선은 아래그림과 같다. 3상단락 고장을 3.4호기 상단 모션에서 전력조류가 가장 큰 선로에 대하여 모의하였다. A 지역은 1,2호기가 한 모션, 3,4호기가 다른 한 모션에 연결되어 있다. 1,2호기는 12Hz에도 안정하였으나, 3,4호기 중 3호기가 가장 취약하였으나 9Hz에도 과도적으로 안정하였다.

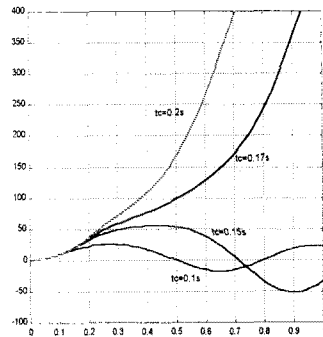


그림2. A지역 3호기 동요곡선

B지역은 1,2,3,4호기가 같은 모션에 연결되어 있고, 고장 조건은 가장 전력조류가 큰 선로를 선택하여 3상 단락 사고 후 고장을 제거시키기 위하여 선로를 분리시켰다. 가장 취약한 발전기는 1호기이고 9Hz 고장제거지연시간에 대하여 과도적으로 안정하였다.

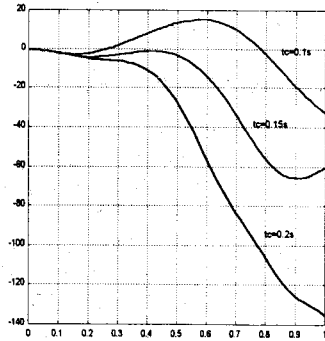


그림3. B지역 1호기 동요곡선

C지역 모선의 구성은 1,2,3,4호기가 하나의 모선에 연결되고, 모선 상단 선로중 전력 조류가 1089.5+j50.8로 4개 원전 부지 중 가장 큰 전력조류가 있는 선로에 3상단락사고를 상정하였다. 가장 취약한 1호기의 경우, 고장지연시간이 4.8Hz에서는 과도 안정하고, 5.1Hz(0.085초)에서 탈조하나 2,3,4호기는 5.4Hz에서 과도적으로 안정하다.

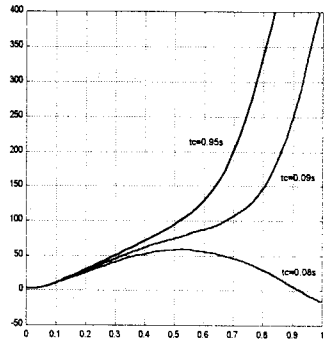


그림4. C지역 1호기 동요곡선

지역별 대상 고장 모선의 전력조류 $P+jQ$, H 정수 (1/2/3/4호기) 및 과도 리액턴스 x'_d (1/2/3/4)는 아래와 같다.

- A지역: 522+j120, H (6.5/ 6.05/ 5.4/ 5.4), x'_d (0.39/ 0.37/ 0.34/ 0.34)
- B지역: 779+j157, H (5.01/ 6.63/ 6.63/ 6.63), x'_d (0.41/ 0.36/ 0.36/ 0.36)
- C지역: 1089.5+j50.8, H (5.32/5.32/4.81/4.81), x'_d (0.31/ 0.31/ 0.43/ 0.43)
- D지역: 686+j99.5, H (5.5/ 5.5/ 4.17/ 4.17), x'_d (0.45/ 0.45/ 0.43/ 0.43)

D지역은 원전 4개 발전소가 같은 모선에 연결되었고, 고장은 가장 전력조류가 큰 모선에서 3상단락사고를 상정하였다. 고장제거 지연시간 7.2Hz에서 1,2,4호기는 과도 안정하나, 취약한 3호기는 6Hz를 넘어서면 탈조된다.

3.3 토의

가장 취약한 것으로 보이는 C지역은 전력 조류가 다른 지역에 비하여 전력조류집중현상이 나타나고, H 정수가 4.17 및 4.8로 다른 발전소에 비하여 상대적으로 적어, 동요 곡선에서 4.8Hz에 탈조되는 것을 확인할 수 있겠다. 그러나, FSAR 요건으로 성능이 확인된 보호계전기 지연동작시간 1Hz, 차단기 동작 지연시간 2Hz, 여유분 2Hz를 감안하면, 타 발전기에 비하여 여유도가 충분하지 못하다.

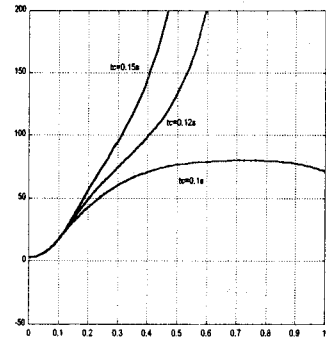


그림5. D지역 3호기 동요곡선

3. 결 론

원전 전력계통의 설계요건 및 규제 요건에 따라 이를 평가할 수 있는 보수적인 가정과 논리를 적용하여 규제목적의 송전망 과도 안정도 간이 해석 프로그램을 개발하였다. 실제통 조건에서 원전 주변의 송전선 단락 사고를 상정사고로 가정하여 원전 발전기들이 과도 안정성이 보장되는지를 개발된 프로그램으로 확인한 결과, FSAR요건을 초과하는 중대한 과도 안정도 문제점이 발견되지 않았다.

FSAR에서 가정한 5Hz(고장제거 지연시간)이내에는 대부분 원전 발전기가 과도 안정되는 것이 확인되었으나, 발전소별로 송전망 조류 및 조건이 다르므로, 일부 발전기는 과도 안정도에 대한 여유도가 적은 것을 고장 제거 지연시간에 대한 민감도 분석을 통하여 발견하였다.

실제 발전기는 제어기동작으로 안정도를 향상시키므로, 본 연구 결과보다 더욱 좋은 결과를 얻을 수 있을 것이다. 이와 같은 보수적인 가정으로 계산된 안전 여유도에 대한 발전기별 민감도를 분석할 수 있는 성능지표를 발견하는 것이 향후 과제가 된다.

[참고문헌]

- [1]US-NRC, Information Notice 1998-07, "Offsite Power Reliability Challenges from Industry Deregulation", 1998
- [2]U.S-NRC, Information Notice 1995-37, "Inadequate Offsite Power System Voltages during Design Basis Events", 1995
- [3] US-NRC, Information Notice 200-06, " Offsite Power Voltages inadequacies ", 2000
- [4]US-NRC, "Information on Staff Actions to Address Electric Grid Reliability Issues", SECY 97-246, 1997
- [5]US-NRC, "Effect of Electric Power Industry Deregulation on Grid Reliability and Reactor Safety", SECY 99-129, 1999
- [6]Glenn Stagg and Ahmed El-Abiad, "Computer Methods in Power System Analysis", McGraw Hill, 1968
- [7] Edward Wilson Kimbark "Power System Stability", Reprint, IEEE Press, 1995
- [8] Kundur et al. "Simulation of non-linear dynamic response of interconnected synchronous machines, Part I & II", IEEE Trans., PAS, Vol. 91, p.2069-2077, 1972
- [9] C. Concordia and S. Ihara, "Load Representation in Power Stability Studies" IEEE Trans. VOI. PAS-101, p.969-977, 1982
- [10]William H Press, Saul Teukolsky, et al , "Numerical Recipes in C. The Art of Scientific Computing," 2nd Ed, Cambridge Univ. Press,1992