

전력계통의 미소신호안정도 상정사고 해석 (Contingency Analysis for Small Signal Stability of Power Systems)

심관식*·김용구·문채주

(Kwan - Shik Shim · Yong - Gu Kim · Chae - Ju Moon)

요 약

논문에서는 대규모 계통의 미소신호안정도 평가 및 해석을 위해 고유치 감도/perturbation 이론에 근거한 상정 사고 지표를 제안하였으며 이를 실제 계통에 적용한 결과를 기술하였다. 선로정수와 제어기정수에 대한 미소신호안정도 상정사고 지표를 제시하였고 이로부터 심각한 저주파진동 문제를 발생할 수 있는 파라메타들을 선택하였다. 또한 각 발전기의 발전량 증감에 대한 고유치 변화로부터 미소신호안정도 상정사고를 일으킬 수 있는 발전기들을 선택하였다. 이 논문에서는 모든 결과들을 2000년 KEPCO 실계통의 시간영역해석과 비교 검증하여 제안한 미소신호안정도 상정사고 해석법이 정확함을 확인하였다.

Abstract

Contingency analysis is one of the most important tasks encountered by planning and operation of large scale power systems. This paper describes a new contingency analysis methods for small signal security assessment based on the eigen-sensitivity/perturbation of the electromechanical oscillation modes.

The eigen-sensitivity/perturbation with respect to line suceptances and controller parameters can be used to find possible sources of the system instability, and to select contingency for small signal stability. Also, the contingency selection to identify critical generators for MW changes can be obtained by computing the relative movement of the system oscillation modes.

The proposed algorithm has been successfully tested on the KEPCO systems which is comprised of 791-bus, 1575-branch, and program PSS/E

Key Words : small signal stability, contingency analysis, dynamic security assessment, eigenvalue, sensitivity

1. 서 론

최근 전력계통에서는 대규모 외란으로 인한 계통 고장 발생 및 긴급 상태에서 계통의 안전성 확보를 위한 노력의 일환으로 온라인 동적안전도평가 (dynamic security assessment, DSA)에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다[1-7]. 동적안전도 평가는 계통에서 발생할 수 있는 심각한 상정사고를 선택하고 선택된 사고에 대해서 계통안전도 평가 및 안전

* 주저자 : 서남대학교 전기전자공학과 조교수
Tel : 041-539-5573, Fax : 041-539-5514
E-mail : simgong@tiger.seonam.ac.kr
접수일자 : 2003년 3월17일
1차심사 : 2003년 3월25일
심사완료 : 2003년 4월30일

도 한계 마진을 계산하는 것으로 이미 개발된 알고리즘으로는 EEAC(extended equal area criterion)법 [1], SIME(single machine equivalent)법[2-3] 그리고 Powertec에서 개발한 TSAT(transient security assessment tools)[4-5] 등이 있는데, 이 알고리즘들은 주로 과도안전도 평가(transient security assessment, TSA)를 다루고 있다.

과거부터 지속적으로 전력설비 증설과 보강 및 제어기의 적절한 설계와 운용이 이루어지고 있는, 이른바 잘 개발된 현대 전력계통에서는 고성능 여차시스템과 다양한 제어기의 투입으로 저주파진동문제가 자주 발생하고 있고 향후에도 계속 증가할 것으로 예상지만 미소신호안정도 측면에서 상정사고와 안정도 여유를 계산하는 미소신호안정도 평가(small signal security assessment, SSSA)에 대한 연구는 최근 Powertec에서 개발한 SSAT(small signal analysis tools)[9]가 유일하다. SSAT에서는 미소신호안정도 지표로써 계통에 존재하는 회전자위상각 모드에 대해서 가장 작은 제동비(damping ratio)를 이용해서 SSSA를 수행한다. 따라서 SSAT는 주로 고유치해석에 의존하고 있어 대규모 계통의 저주파진동에 대한 다양한 상정사고의 선택은 어렵다. SSSA에 대한 연구보고가 부족한 것은 전력계통에서 발생하는 저주파진동이 많은 변수들에 의해서 영향을 받고, 또한 지역적인문제 뿐만 아니라 광역의 문제들을 포함하고 있어 다양한 상정사고를 고려해야 하므로 그 해석이 어렵기 때문이다.

1996년 8월 발생한 WSCC 계통붕괴사고[10-11]는 선로고장과 저전압 및 발전량 상실에 따른 저주파진동이 전체 계통을 붕괴하게 한 주요 요인으로 문헌 [12]에서 분석하고 있다. 이 계통사고를 통해서 미소신호문제가 전체 계통붕괴를 일으킬 수 있음을 알 수 있고, 미소신호안정도에 대한 상정사고를 체계적으로 해석하고 이에 대한 대책을 수립할 수 있는 SSSA에 대한 알고리즘을 개발할 필요가 있음을 알 수 있다.

전력계통에서 SSSA는 선택된 상정사고에 대해서 저주파진동이 계통의 안전운전을 위협하는가를 판단하고 안정도 여유를 계산하는 것으로 TSA와 마찬가지로 빠르게 미소신호안정도 상정사고를 선

택하는 것이 SSSA의 가장 중요한 과정이다. 이 논문에서는 미소신호안정도에 대한 상정사고를 해석하기 위해서 1) 계통에 존재하는 저주파진동모드의 제동특성을 더욱 나쁘게 하여 계통운전에 중대한 영향을 끼칠 수 있는 선로 고장이나 제어정수를 선택하고, 2) 진동모드의 제동이 계통운전에 문제시 되지 않은 상태에서 임의의 지역의 발전량 변화로 인하여 제동특성이 불량한 진동모드로 변화시킬 수 있는 발전기를 선택하였다.

첫 번째 문제는 존재하는 제동특성이 나쁜 진동모드들에 대한 고유치감도를 통해서 진동모드의 변화를 알 수 있다. 따라서 선로정수나 제어기정수에 대한 고유치감도를 계산하면 저주파진동에 가장 취약한 선로나 제어기정수를 선택할 수 있고 정량적으로 각 진동모드에 끼치는 영향을 파악할 수 있다.

두 번째는 크게 문제가 되는 진동모드가 존재하지 않은 상태에서 계통이 운전되고 있으나, 허수축에 근접한 모드들은 계통환경이 변화하면서 제동특성이 불량한 진동모드로 변화할 수 있다. 발전량 변화에 대해서 허수축 근접 모드들에 대한 고유치 변화를 계산해서 가장 취약한 발전기들의 조합을 미소신호안정도 상정사고에 취약한 발전기로 선택할 수 있다.

이 논문에서는 2000년 한전계통에 대해서 저주파진동을 유발할 수 있는 선로고장이나 제어기정수들에 대해서 미소신호안정도 상정사고를 선택하고, 지역간모드에 대한 발전량변화에 대해서 저주파진동에 취약한 발전기들을 선택하였다. 그리고 모든 결과들을 PSS/E의 시간영역해석과 비교하여 제안한 미소신호안정도 상정사고 선택기법이 정확함을 확인하였다.

2. 선로고장과 미소신호안정도 상정사고

계통의 과도안전도 평가를 위한 TSA에서는 임의의 선로고장에 대해서 임계고장제거시간과 발전기의 동기탈조여부를 판단하고 안정도 여유를 계산한다. 미소신호안정도 평가를 위한 SSSA에서는 저주

파진동을 유발할 수 있는 잠재력을 가지고 있는 선로를 선택하고, 선로고장이 저주파진동 모드에 주는 영향을 계산하여 이로부터 안정도여유를 예측한다.

2.1 고유치감도와 상정사고 지표

선로고장이 저주파진동모드에 주는 영향은 선로 정수에 대한 고유치감도로부터 알 수 있다. 실 계통은 많은 선로로 구성되어 있으므로 초기 취약선로를 선택하는 것이 필요하다. 선로어드미턴스의 감도행렬을 이용한 1차 고유치감도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \lambda_k}{\partial b_{12}} = \Delta w_i \Delta v_r - \Delta w_r \Delta v_i \quad (1)$$

여기에서

$$\Delta w_i = w_{i1} - w_{i2} \quad (2)$$

$$\Delta w_r = w_{r1} - w_{r2} \quad (3)$$

$$\Delta v_i = v_{i1} - v_{i2} \quad (4)$$

$$\Delta v_r = v_{r1} - v_{r2} \quad (5)$$

편의상 모선 1번과 2번 사이의 선로라 가정하여 첨자에 1과 2로 표기하였으며, v_i 와 w_i 는 각각 모선 전압에 대응하는 확대행렬의 좌우고유벡터이다. 그리고 전압의 실수부와 허수부에 대응하여 첨자에 r 과 i 로 나타내었다. 이 식으로부터 선로의 서셉턴스에 대한 1차 고유치감도는 단순히 좌/우고유벡터의 차와 곱의 연산으로 얻을 수 있어 초기 취약선로를 매우 빠르게 선택할 수 있다. 선택된 선로들에 대해서 2차 고유치감도는 문헌 [14]에서 제안한 알고리즘으로부터 얻을 수 있으며, 실계통의 많은 선로들에 대해서 대규모 행렬연산을 하는 것 보다 이와 같은 단순한 산술연산을 수행하는 것이 훨씬 계산과정이 빠르다.

선로고장에 대한 SSSA의 상정사고는 고유치 실수부의 변화로부터 선택할 수 있다. 즉 실수부변화의 크기가 가장 큰 선로가 미소신호안정도에 취약한 선로로 선택할 수 있기 때문에 이 논문에서는 SSSA를 위한 상정사고 지표를 아래와 같이 정의하였다.

$$SSSA_{index1} = real(\Delta \lambda_i) \quad (6)$$

$$SSSA_{index2} = real(\lambda_i) - real(\Delta \lambda_i) \quad (7)$$

여기에서 $real(\lambda_i)$ 는 고유치 실수부를 의미한다. 상정사고 지표 $SSSA_{index1}$ 는 고유치감도에 의해서 추정한 고유치의 실수부변화를 의미하며, $SSSA_{index2}$ 는 진동모드가 허수축에 근접한 정도를 나타내고 있다. SSSA에 대한 상정사고 선택을 위해서는 실수부 크기에 상관없이 판단할 수 있는 $SSSA_{index1}$ 이 편리하고 안정도 여유를 고려할 때는 $SSSA_{index2}$ 를 적용하는 것이 좋다. 이 논문에서는 상정사고 선택을 위해서 주로 상정사고 지표 $SSSA_{index1}$ 을 적용하고 결과를 나타내었다.

2.2 선로에 대한 상정사고선택

선로고장에 대한 SSSA의 상정사고를 선택하기 위해서 이 논문에서는 2000년 한전계통 데이터를 시험계통으로 사용하였는데, 이 계통은 각각 1개씩의 지배적인 지역모드(mode 1: -0.086+j5.55)와 지역간 모드(mode 2: -0.104+j4.425)를 가지고 있기 때문에 지역모드와 지역간모드의 특성을 분석하는 것이 용이하다. 그리고 이 논문에서 사용한 한전계통 데이터가 실제 한전에서 사용되고 있는 제어기를 비롯한 전력기기의 특성을 정확하게 반영하고 있지 못하므로 미소신호안정도에 영향은 실제 결과와 다를 수 있다.

2000년 한전계통의 모든 선로에 대한 모드 1의 고유치감도로부터 상정사고 선택 지표인 $SSSA_{index1}$ 를 계산해서 큰 값들만 표 1에 나타내었다. 표에서 각 값들은 선로 서셉턴스가 각각 50%와 100% 변화할 때의 값들이다. 그리고 NFOES와 NSOES는 각각 1차, 2차 고유치감도에 의한 $SSSA_{index1}$ 를 나타내고 있으며, ratio는 식 (8)로부터 계산한 값으로 비선형성이 얼마나 큰가를 나타내고 있다.

$$ratio = \frac{NSOES - NFOES}{NFOES} \quad (8)$$

즉, 표에서 선로 5150-5600의 ratio가 0.18로 가장 큰 값을 가지고 있는데, 이 선로정수가 변화할 때 고유치 궤적의 비선형성이 가장 크고, 따라서 파라메타가 크게 변화할 때, 더 큰 오차가 포함된다는 것을

전력계통의 미소신호안정도 상정사고 해석

의미한다.

표 1. 선로정수에 대한 상정사고 선택
Table 1. Contingency selection for line parameter

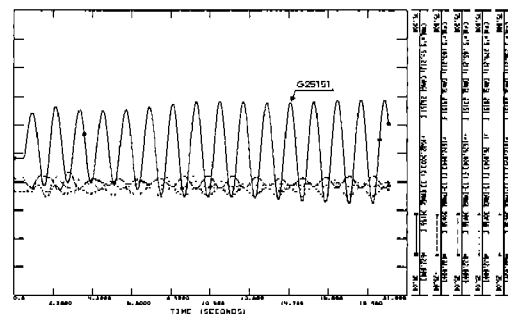
No.	Line No.	SSSA _{index} (100%)		SSSA _{index} (50%)		ratio
		NFOES	NSOES	NFOES	NSOES	
1	1500-5150	-0.04672	-0.04202	-0.02336	-0.02218	0.05
2	5150-5500	-0.03579	-0.02652	-0.01790	-0.01558	0.13
3	5500-8500	-0.02495	-0.02100	-0.01248	-0.01149	0.08
4	2500-5700	-0.01622	-0.01356	-0.00811	-0.00745	0.08
5	5150-5600	-0.01655	-0.01050	-0.00828	-0.00676	0.18
6	5600-5700	-0.01388	-0.01028	-0.00694	-0.00604	0.13

지역모드(local mode)인 모드 1은 울진지역 발전기들이 주로 참여하는 모드이므로 중요 취약선로들로 울진발전기 주변선로들이 선택되었다. 표 1에서 가장 큰 값을 가지고 있는 선로는 1500-5150으로서 쉐턴스가 100% 증가할 때, 즉 선로를 1회선 더 증설할 때, -0.042만큼 좌반면으로 이동한다. 현재 모드 1의 실수부가 -0.086이므로 2회선으로 운전 중인 1500-5150 선로에 고장이 발생할 때, 고유치는 우반면으로 이동할 수 있고 저주파진동을 유발할 수 있음을 예측할 수 있다. 표 1에 있는 다른 선로들도 선로 1500-5150 보다 작은 값을 가지고 있으나 이들 선로고장이 저주파진동 더욱 나쁘게 하는 요인이 될 수 있다.

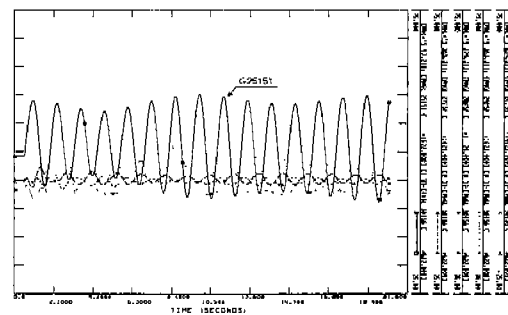
지역모드에 대한 SSSA_{index} 크기가 큰 순서로 PSS/E를 이용하여 시간영역해석을 수행하였고 그 결과는 그림 1에 도식되어 있다. 시간영역해석은 고유치감도의 실수부 크기가 작기 때문에 운전 중인 2회선 모두 탈락시키고 5cycle 후에 고장을 제거한 조건에서 수행하였다. 그 결과 그림 1(a)에 나타난 것과 같이 SSSA_{index}가 가장 큰 선로 1500-5150에 고장을 모의할 때 진폭이 점점 커져 울진지역 발전기들에 제동특성이 나쁘게 변화함을 알 수 있다. 그리고 다음으로 5150-5500선로 순서로 울진지역 발전기에 크게 영향을 주고 있다. 또한 그림으로 도식하지는 않았으나 5150-5600 선로도 크게 영향을 끼치는데 이것은 선로길이가 짧고 울진발전기 모선에 직접 연결되어 있으며 표 1에 나타난 것과 같이 ratio가 커서 비선형성이 강하기 때문이다. 표 1에 나타나

지 않은 2000년 한전계통의 나머지 선로는 2회선 모두 탈락되어도 크게 영향을 주지 않았다. 결과적으로 지배적인 지역모드가 존재할 때, SSSA를 위한 가장 심각한 선로 상정사고 선택은 지역모드 주변의 선로들의 고장으로 국한된다. 또한 WSCC 계통붕괴 사고와 같이 계통에서 발생하는 일련의 연속적인 선로고장은 발전기에 더욱 큰 영향을 줄 수 있는데, 다수의 선로들의 고장에서 표 1에 나타나있는 SSSA_{index}가 큰 선로들의 조합이 더욱 큰 영향을 끼치므로 연속적인 선로탈락에 대한 상정사고도 정량적으로 선택할 수 있다.

지역간모드(interarea mode)에서 선로정수의 변화가 미소신호안정도 상정사고에 얼마나 큰 영향을 주는지 알기 위해서 지역모드를 제거하고 고유치감도를 계산하였다. 울진발전 1-4호기에 PSS를 투입하였을 때, 가장 제동특성이 나쁜 모드는 -0.10504 + j4.42565로 서해안과 동남해안 발전기들이 서로 진



(a) line 1500-5150



(b) line 5150-5500

그림 1. 지역모드에 대한 시간영역해석
Fig. 1. Time simulation for local mode

표 2. 선로정수에 대한 상정사고 선택
Table 2. Contingency selection for line parameter

No.	Line No.	$SSSA_{index1}$ (100%)		$SSSA_{index1}$ (50%)		ratio
		NFOES	NSOES	NFOES	NSOES	
1	4700-6900	-0.00544	-0.00525	-0.00322	-0.00292	0.09
2	6150-6950	-0.00802	-0.00188	-0.00151	-0.00122	0.19
3	6151-6900	-0.00908	-0.00171	-0.00154	-0.00120	0.22
4	8150-8500	-0.00276	-0.00186	-0.00138	-0.00116	0.16
5	1500-5150	-0.00159	-0.00218	-0.00079	-0.00094	-0.19
6	8500-9250	-0.00207	-0.00157	-0.00104	-0.00091	0.12

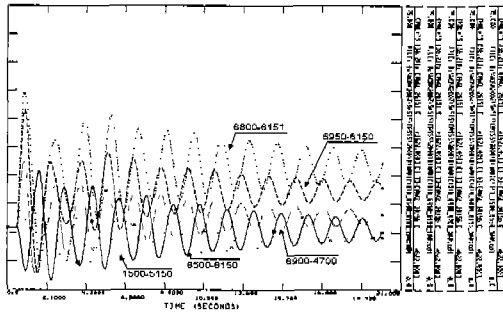


그림 2. 지역간모드에 대한 시간영역해석
Fig. 2. Time simulation for interarea mode

동하고 있는 지역간모드(interarea mode)이다. 이 모드에 대해서 선로정수에 대한 $SSSA_{index1}$ 를 계산한 결과는 표 2에 나타나 있다. 가장 실수부의 변화가 큰 선로는 4700-6900, 6150-6950 순서이고, 지역간 모드에 가장 취약한 선로로 이들 선로를 선택할 수 있다. 선로 4700-6900의 서셉턴스가 100%변화할 때, 고유치 실수부 변화는 -0.00525로 이 선로가 지역간 모드에 가장 큰 영향을 주고 있다. 그러나 지역간 모드의 실수부 -0.105의 약 1/20으로 그 크기가 작기 때문에 직접 저주파진동모드를 유발하지는 않을 것으로 추측할 수 있고, 그림 2에서 이 사실을 확인할 수 있다. 그림 2는 표 2의 각 선로들에 고장을 모의하고 5cycle 후에 고장을 제거한 것으로 보령 1호기의 위상각 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 가장 큰 값을 가진 선로 4700-6900의 고장이나 다른 선로고장에 대한 시간영역해석 결과가 거의 유사하고 제동 특성에는 큰 변화가 없다. 이것은 이들 선로정수 변

화에 대한 $SSSA_{index1}$ 의 크기가 진동모드의 실수부보다 상대적으로 매우 작기 때문에 단일 선로고장이 지역간모드의 저주파진동의 직접적인 요인이 되지 않음을 알 수 있다.

3. 제어정수와 미소신호안정도 상정사고

전력계통에서 제어정수는 미소신호안정도 해석에 중요한 파라메타이다. 따라서 제어기정수들은 $SSSA$ 를 위한 상정사고 선택에 하나의 변수가 될 수 있으므로 이 절에서는 미소신호안정도 상정사고에 제어기 정수들이 주는 영향에 대해서 기술한다.

저주파진동 모드에 크게 영향을 주는 제어정수는 문헌 [13]에서 기술한 AMEP(augmented matrix eigenvalue perturbation)에 의해서 선택할 수 있다. 파라메타 변화에 대해서 고유치 변화를 추정하는 1, 2차 AMEP는 다음과 같다.

$$\Delta\lambda_i^{(1)} = y_i^T E_a x_i \quad (9)$$

$$\Delta\lambda_i^{(2)} = y_i^T E_a \Delta x_i \quad (10)$$

여기에서 y_i, x_i 는 각각 확대행렬(augmented matrix)의 좌/우고유벡터이고, E_a 는 파라메타 변화로 인한 계통상태행렬의 변화를 의미한다. 따라서 제어기정수에 대한 상정사고 지표는 AMEP부터 직접 얻을 수 있다. 식 (11)은 1차 AMEP만 고려한 경우이고, 식(12)는 2차 AMEP까지 고려한 것으로 이를 제어기 정수에 대한 상정사고 지표로 정의할 수 있다.

$$SSSA_{index1} = \Delta\lambda_i^{(1)} \quad (11)$$

$$SSSA_{index1} = \Delta\lambda_i^{(1)} + \Delta\lambda_i^{(2)} \quad (12)$$

한전계통의 모든 여자시스템과 터빈/조속기 제어정수에 대해서 지역모드(mode 1:-0.086+j5.55)의 AMEP로부터 선택한 $SSSA_{index1}$ 중에서 큰 값들만 표 3에 나타내었다. 표에서 RQII는 제어정수를 변화한 후 고유치를 실제 계산한 값이며, 표의 값들은 제

전력계통의 미소신호안정도 상정사고 해석

어정수를 100% 증가한 결과들이다. 울진 원전 여자 시스템의 전압조정기 이득 K_A 를 변화할 때, 지역모드는 가장 크게 변화한다. 울진 2호기(G25152)의 이득을 100% 증가할 때, 고유치는 0.05만큼 우반면으로 이동한다. 지역모드의 실수부가 -0.086이므로 울진지역 발전기의 전압조정기 이득 K_A 증가는 저주파 진동을 더욱 나쁘게 할 것으로 예상할 수 있고, 반면에 여자시스템의 안정화 제한 이득 K_F 의 증가는 제동특성을 향상할 것으로 예상할 수 있다.

그림 3에서 a는 울진 원전 1-4호기의 전압조정기 이득을 50%씩 증가한 상태에서 선로 5150-5500 1회선 탈락으로 고장을 모의한 경우이다. b는 울진 2호기의 전압조정기 이득 K_A 와 안정화제한이득 K_F 를 각각 50%씩 증가한 경우이고 c는 제어정수를 변화하지 않은 상태이다. 그림에서 울진 1-4호기의 전압조정기 이득이 동시에 변화할 때, 가장 크게 저주파

진동이 발생함을 알 수 있고 이는 AMEP의 결과와 정확하게 일치한다. 제어기정수에 대한 상정사고 선택 결과와 시간영역해석에서 여자시스템의 제어정수가 부적절하게 설정된 상태에서 발생한 선로고장은 미소신호안정도 상정사고의 하나의 요인이 될 수 있음을 알 수 있다.

4. 발전량변화와 미소신호안정도 상정사고

전력계통에서 발전량은 비용문제와 직결되는 파라메타로 최적의 발전량 결정은 OPF(optimal power flow)로 결정할 수 있는데, 계통안정도 향상을 위한 발전량 제어는 제한적이다. 안정도측면에서 과도불안정한 계통의 긴급상태(emergency state)때, 비상 제어 수단의 하나로 발전기 트립(trip)이 가능하고 또한 TSA에서는 최대전송전력(total transfer capacity, TTC)을 결정해서 발전량의 증감에 대한 안정도 여유를 계산한다. 계통에서 발전량 변화는 심각한 외란이 될 수 있고 이로 인한 문제는 주로 TTC로부터 계통의 과도안전성을 확보할 수 있기 때문에 SSSA 측면에서 발전량 변화에 대한 계통의 과도불안정문제는 취급하지 않고 지역간 저주파진동을 유발하는 상정사고를 선택한다.

표 3. 제어정수에 대한 상정사고 선택
Table 3. Contingency selection for controller parameters

No.	Gen.	Parameter	SSSA _{index1}		RQII
			$\Delta\lambda_1^{(1)}$	$\Delta\lambda_1^{(1)} + \Delta\lambda_1^{(2)}$	
1	25152	KA	0.061	-0.050	-0.037
2	25151	KA	0.061	-0.050	-0.037
3	25153	KA	0.060	-0.048	-0.038
4	25154	KA	0.060	-0.048	-0.038
5	25153	KF	-0.013	0.012	-0.099
6	25154	KF	-0.013	0.012	-0.099
7	25152	KF	-0.012	0.010	-0.098
8	25151	KF	-0.012	0.010	-0.098

4.1 고유치 해석과 상정사고 지표

2000년 한전계통에 대해서 울진 원전 1-4호기에 PSS를 설치해서 지역모드의 제동특성을 향상시키고 고유치해석을 수행한 결과는 표 4에 나타나있다. 표에는 비교적 허수축에 근접해 있는 모드를 나타내었는데, 각 모드의 우고유벡터를 계산한 결과, 2개의 지역간모드를 산출하였다. 표에서 지역간모드는 IM, 지역모드는 LM으로 나타내었다. 그림 4에는 2개의 지역간모드인 모드 3 (-0.10504+j4.42565), 모드 7 (-0.30521+j7.04257)에 대한 우고유벡터 중에서 큰 값들만 표현하였고, 표 5에는 이들 모드들에 대한 속도참여율(speed participation factor, SPF)을 나타내었다. 우고유벡터에서 모드 3은 고리지역과 보령, 서인천 지역의 발전기들의 위상이 180°차로 서로 진동

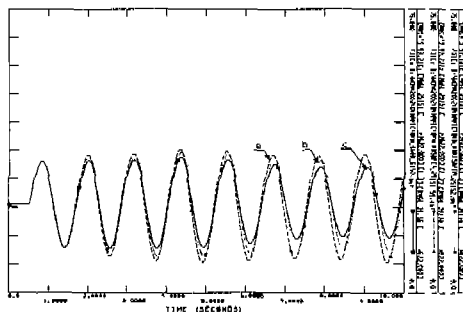


그림 3. 제어정수 변화와 시간영역해석
Fig. 3. Time simulation for variation of control parameter

표 4. PSS 투입 후 한전계통의 고유치
Table 4. Eigenvalues of KEPCO system with PSS

Mode	Eigenvalue	Mode	Eigenvalue		
1	-0.99095+j4.20518	LM	6	-0.52511+j6.85395	LM
2	-0.99497+j4.21827	LM	7	-0.30521+j7.04257	IM
3	-0.10504+j4.42565	IM	8	-0.58318+j7.54998	LM
4	-0.51173+j5.73501	LM	9	-0.59633+j7.83399	LM
5	-0.35971+j6.25769	LM	10	-0.50375+j7.92374	LM

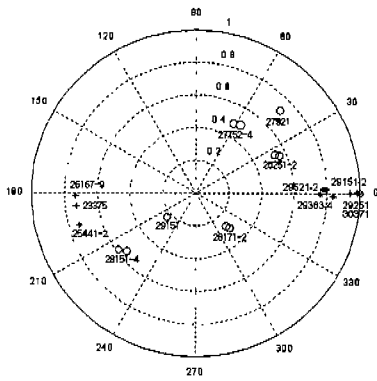


그림 4. 모드 3과 7의 우고유벡터
Fig. 4. Right eigenvector of mode 3&7

표 5. 지역간모드의 속도참여율
Table 5. Speed participation factor of interarea mode

Mode 3			Mode 7		
No.	Magn.	Gen. No.	No.	Magn.	Gen. No.
1	1.00000	29151	1	1.00000	28154
2	0.89902	29152	2	1.00000	28153
3	0.88456	29251	3	1.00000	28152
4	0.88456	29252	4	0.90207	28151
5	0.34635	28154	5	0.71018	27154
6	0.34635	28153	6	0.69825	27153
7	0.34635	28152	7	0.65545	27152
8	0.34173	28151	8	0.63962	27151
9	0.29577	29353	9	0.38840	26251
10	0.29577	29352	10	0.38840	26252

하고 있고, 모드 7은 월성, 고리 지역 발전기들이 영광지역의 발전기들의 위상과 180°차로 서로 진동하고 있음을 알 수 있다. 그리고 표 5에 있는 SPF 결과에서 모드 3은 고리지역 발전기, 모드 7은 월성, 영광 지역 발전기가 지배적인 크기를 가지고 있다. SPF는

제동계수 변화에 대한 모드의 변화를 의미하므로 SPF가 크다는 것은 발전량이 변화하였을 때 그 모드의 제동특성에 영향을 주는 정도로 생각할 수 있다. 그러므로 모드 3에 대해서는 고리지역 발전량 변화가, 모드 7에 대해서는 영광, 월성지역 발전량 변화가 큰 영향을 줄 수 있다.

발전량 변화에 대한 미소신호안정도 상정사고 지표도 앞에서 기술한 것과 같이 고유치변화를 이용하여 얻을 수 있다. 그러나 발전량에 대해서 변화할 수 있는 파라메타들이 적고 또한 운전점이 변화하므로 이 논문에서는 조류계산과 새로운 계통행렬을 구성한 후 계산한 고유치 변화를 발전량변화에 대한 미소신호안정도 상정사고 지표로 이용하였다.

4.2 발전량변화와 상정사고 선택

한 지역의 발전량은 부하 및 다른 지역발전량과 서로 밀접하게 관련되어 있으므로 이에 대한 상정사고는 이들의 모든 조합을 고려해야한다. 따라서 매우 많은 경우 수가 존재하여 상정사고 선택을 불가능하게 한다. 이 논문에서는 미소발전량의 변화는 계통에 큰 영향을 주지 않는다고 가정하고 각 발전기의 출력을 증가한 후 고유치변화를 계산해서 이를 상정사고의 지표로 사용하였다.

표 6과 그림 5는 각각 2개의 지역간모드에 대해서 각 지역발전기의 출력을 5% 증가하고, 고유치 변화를 계산한 결과이다. 표와 그림에서 각 발전기 번호 (Gen. No.)는 동일 지역발전기들 중 첫 번째 발전기 번호만 표시하였다. 발전량 변화에 대해서 각 모드

표 6. 발전량 증가와 고유치 변화(5%)
Table 6. Perturbed eigenvalue for MW variation(5%)

Mode No.	Gen. No.	Mode 3		Mode 7	
		고유치변화량	제동	고유치변화량	제동
1	28151	0.00032+j0.00130	감소	0.01070+0.00117	감소
2	25151	-0.00761+j0.00791	증가	-0.00306+0.00177	증가
3	29151	0.00796-j0.00353	감소	0.00323-0.00417	감소
4	27151	-0.00320+j0.00415	증가	0.02244-0.00108	감소
5	26151	-0.00496+j0.00566	증가	-0.00256+0.00172	증가
6	26251	-0.00000-j0.00002	증가	0.00003-0.00008	감소
7	26101	-0.00344+j0.00424	증가	-0.00178+0.00130	증가

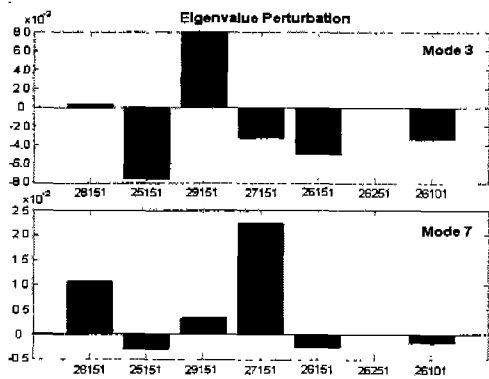


그림 5. 발전량 증가와 고유치 변화
Fig. 5. Perturbed eigenvalue for MW variation

의 실수부는 크게 변화하지 않았다. 가장 크게 변화한 경우는 고리지역 발전기 출력을 증가한 경우로 실수부가 0.00796 증가하였다. 즉 모드 3은 고리지역 발전기(G29151-2, G29251-2)의 출력을 증가하면 고유치가 우반면으로 이동하여 저주파진동 문제를 더욱 악화시킬 수 있다. 한편, 모드 7은 영광지역 발전

표 7. 발전량 변화에 대한 고유치 변화(30%)
Table 7. Perturbed eigenvalue for MW variation(30%)

MW	Mode 3		Mode 7		
	증가	감소	고유치 변화량	제동	고유치 변화량
27151	25151	0.03781-0.04681i	감소	0.26067-0.10573i	감소
	26151	0.03974-0.06316i	감소	0.27260-0.12199i	감소
	28151	-0.01524+0.00309i	증가	0.21491-0.11074i	감소
	29151	-0.04258+0.04046i	증가	0.23986-0.06290i	감소
29151	25151	0.09398-0.12214i	감소	0.02261-0.05109i	감소
	26151	0.08454-0.12799i	감소	0.02600-0.05269i	감소
	27151	0.06150-0.08045i	감소	-0.05558-0.03942i	증가

기(G27151-4) 출력을 5% 증가하였을 때, 고유치가 우반면으로 0.02244만 큼 이동한다. 즉, 모드 7에 대해서 월성, 영광지역 발전기의 발전량 증가는 제동 특성을 더욱 나쁘게 함을 알 수 있다. 그림 5에서 각 모드에 대한 발전량 변화에 대한 영향을 명확히 알 수 있다. 모드 3의 제동특성을 향상하기 위해서는 고리지역 발전량은 감소하고 울진지역 발전량을 증가해야한다. 그리고 모드 7의 제동특성을 개선하기 위해서는 영광, 월성지역 발전량은 발전량을

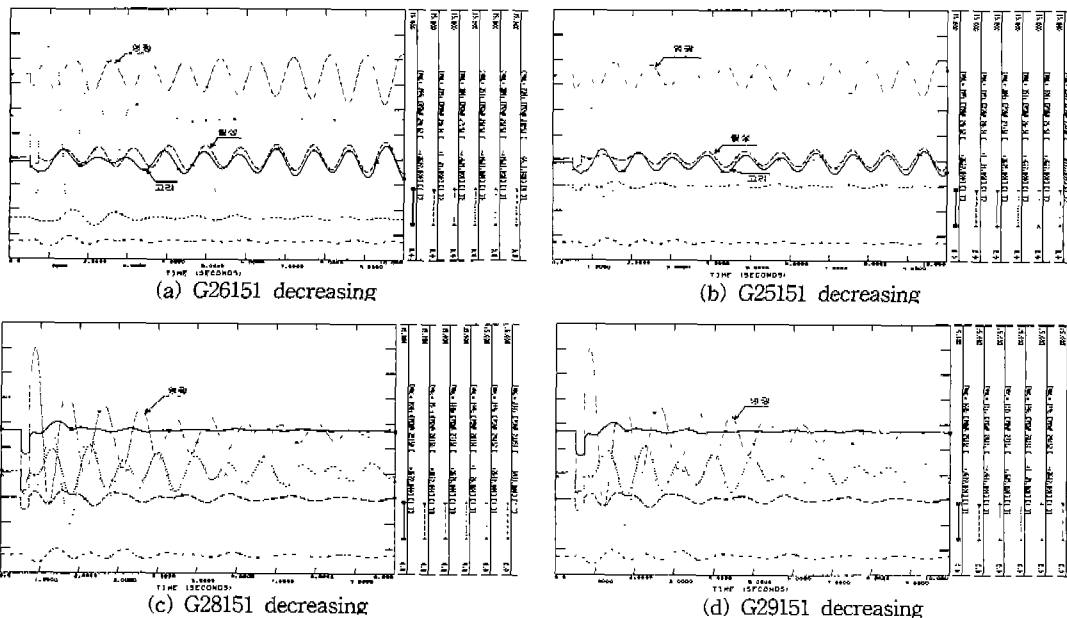


그림 6. 영광지역 발전량 증가와 시간영역해석
Fig. 6. Time simulation and MW increasing of YoungGwang

감소해야한다. 표에 나타나있는 모드 변화는 발전량 5% 증가에 대해서 그 크기가 작으나 임의의 발전기 발전량의 증감이 각 모드에 제동특성에 민감한 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 그리고 발전량의 변화가 클 경우, 제동특성을 더욱 나쁘게 하여 저주파 진동 문제를 유발할 수 있음을 예측할 수 있다.

표 7은 영광(27151)과 고리지역(29151)의 발전량을 30%씩 증가하고 다른 지역의 발전량을 30% 감소한 상태에서 각각 조류계산을 수행한 후, 새로운 운전점에서 고유치 변화를 계산한 것이다. 영광발전(G27151-4)의 30% 발전량증가는 모드 3에 큰 영향을 주지 않는데, 이것은 5% 증가할 때, 실수부가 -0.0032만큼 변화하여 크게 변화하지 않을 것이라는 예상과 일치한다. 또한 표 6에서 영광지역 발전량을 5% 증가하고 울진지역발전량은 5% 감소할 때, 울진지역(G25151-4)이 더 큰 값인 -0.00761이므로 모드 3의 제동특성은 더욱 나빠질 것으로 예상할 수 있는데, 표 7에서 영광지역 30% 증가, 울진지역 30%감소는 실수부를 우반평면으로 0.0378만큼 이동시켜 5%에서의 결과와 일치한다. 이 관계는 다른 발전기들 사이의 관계에서도 성립한다.

고리지역 발전량(29151-2,29251-2)을 30% 증가하고 다른 지역 발전기 발전량을 30%씩 감소하였을 때, 모드 3은 크게 영향을 받는다. 이것은 모드 3에 고리발전기들의 속도참여율이 크고, 발전량 5% 변화에서 모드 3에 고리지역 발전기가 0.00796을 가지고 있어 충분히 예상할 수 있고, 영광지역 발전량의 증가와는 달리 고리지역 발전량의 30% 증가는 모드 3의 변화량을 상당히 크게 한다. 가장 큰 값을 가지고 있는 경우는 고리지역 발전량을 30% 증가하고, 울진지역 발전량을 30%감소 할 때인데, 5% 증가에서 울진과 고리가 각각 -0.00761, 0.00796을 가지고 있어 더욱 제동특성을 감소시킴을 알 수 있다. 나머지 고리-보령, 고리-영광 발전량 증감 사이의 관계도 발전량 5% 증가한 경우와 30%일 때 정확하게 일치한다.

또한 모드 3에서 가장 큰 실수부 변화를 일으키는 것은 고리-울진 발전량 변화로 0.09398 값을 가지고 있다. 모드 3의 실수부가 -0.10504이므로 고리-울진 발전량 변화는 모드 3을 우반평면으로 크게 이동시

켜 저주파 진동을 더욱 나쁘게 할 수 있음을 예상할 수 있다.

모드 7에 대한 결과도 모드 3과 유사하게 발전량 5%의 경우와 비슷한 결과를 얻을 수 있다.

지금까지 기술한 발전량 증감과 미소신호안정도 상정사고에 관계를 확인하기 위하여 PSS/E를 이용하여 시간영역 해석을 수행하였다. 지면 관계상 영광지역 발전량을 30% 증가하고 다른 발전기들의 발전량을 각각 30% 감소한 경우에 대한 시간영역해석 결과만을 그림 6에 나타내었다. 그림 6(a)-(b)에는 영광 발전량을 30% 증가하고 보령과 울진지역 발전량을 각각 30% 감소하고 시간영역해석을 수행한 경우로 앞에서 기술한 모드 7에서 실수부의 변화가 가장 큰 경우와 일치한다. 그림 6(c)-(d)는 월성지역(28151-4)과 고리지역 발전량을 각각 30% 감소하고 시간영역해석을 수행한 한 경우로 울진, 보령 발전량을 감소한 경우보다 고유치 변화가 작으므로 계속 진폭이 커지지 않고 작지만 제동이 이루어지고 있다.

서해안 지역의 발전기나 다른 지역발전기들에 대해서 시간영역해석을 수행한 결과, 지금까지 기술한 결과보다 저주파진동모드의 제동특성에 크게 영향을 주는 경우가 존재하지 않았다.

결과적으로 2000년 계통에서 발전량의 변화가 미소신호안정도 상정사고에 큰 영향을 줄 수 있는 발전기들로는 영광, 고리지역 발전기를 선택할 수 있다. 즉 영광과 고리, 월성 발전기의 발전량을 감소하면 이미 제동특성이 양호한 상태이므로 크게 미소신호안정도에 영향이 없으나 반대로 증가하였을 경우는 미소신호안정도에 나쁜 영향을 줄 수 있다. 가장 심각한 경우는 영광지역 발전량을 증가하고 보령, 울진 발전량을 각각 감소한 경우로 계통에 미소신호안정도 상정사고를 유발하고 있다. 만일 여기에 특정한 선로 탈락은 진동하고 있는 발전기의 탈락을 발생할 수 있어 WSCC 계통과 같이 계통붕괴에 이를 수 있다. 그러므로 발전량의 변화는 미소신호안정도 상정사고를 유발할 수 있고, 이러한 미소신호안정도 상정사고는 발전량변화에 대한 고유치 변화를 계산함으로써 미소신호안정도 상정사고에 취약한 발전기를 선택할 수 있다. 실제적으로 존재하는 저주파진동 문제를 해결하기 위해서 발전량을 제어

하는 것은 적절한 운용이라 할 수 없으나, SSSA를 위한 미소신호안정도 상정사고로부터 잠재적으로 특정 지역발전량의 증감이 저주파진동문제를 유발할 수 있음을 예상하고 계통 계획과 운용을 하면 보다 안정적이고 양질의 전력을 공급할 수 있을 것이다.

5. 결 론

전력계통에서 상정사고 해석은 주로 TSA와 VSA를 위한 상정사고 해석이 주류를 이루고 있고 저주파진동 요인을 찾는 미소신호안정도 상정사고에 대한 연구는 미미한 실정이다. 이 논문에서는 대규모 계통의 SSSA를 위한 미소신호안정도 상정사고 해석 기법과 이를 실제 계통에 적용한 결과를 기술하였다.

이 논문에서는 선로정수와 제어기정수에 대한 미소신호안정도 상정사고 지표로부터 심각한 저주파진동 문제를 발생할 수 있는 파라미터들을 선택하였다. 대규모 계통에서 모든 선로고장이 직접 저주파진동을 유발하는 원인은 되지 않으나 지역모드에 대해서 발전기 모선에 연결된 선로고장이나 제어기 제어정수의 부적절한 설정은 저주파진동을 유발할 수 있음을 확인하였다. 또한 각 발전기의 발전량 증감에 대한 고유치 변화로부터 미소신호안정도 상정사고를 일으킬 수 있는 발전기들을 선택하였다. 이로부터 잠재적으로 특정지역 발전량 변화가 저주파진동을 유발할 수 있음을 예상할 수 있어 미소신호안정도 측면에서 보다 안정적인 계통운용이 가능할 것이다.

이 논문에서는 모든 결과들을 시간영역해석과 비교 검증하여 제안한 미소신호안정도 상정사고 해석법이 정확함을 확인하였고, 실제 계통계획과 안전운전에서 저주파진동 문제에 대한 매우 유용한 도구가 될 것으로 생각된다.

- 감사의 글 -

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구지원(과제번호 : R01-1999-000-00203-0)으로 이루어졌습니다.

References

- [1] Y. Xue, M. Pavella, "Extended Equal-Area Criterion: An Analytical Ultra-Fast Method for Transient Stability Assessment and Preventative Control of Power Systems", Int. J. Electric Power & Energy Systems, Vol. 11, No. 2, 1997.
- [2] Y. Zhang, L. Wehenkel, P. Rousseaux, M. Pavella, "SIME: A Hybrid Approach to Fast Transient Stability Assessment and Contingency Selection", Int. J. Electrical Power & Energy Systems, Vol. 19, No. 3, pp 195-208, 1997.
- [3] D. Ernst, D. Ruiz-Vega, M. Pavella, P. M. Hirsch, D. Sobajic, "A Unified Approach to Transient Stability Contingency Filtering, Ranking and Assessment", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 16, No. 3, pp.435-443, 2001.
- [4] P. Kundur, G. K. Morison, L. Wang, "Techniques for On-Line Transient Stability Assessment and Control", IEEE Power Engineering Society 2000 Winter Meeting, Vol. 4, pp. 46-51, 2000.
- [5] G. K. Morison, H. Hamadanizadeh, L. Wang, "Dynamic Security Assessment Tools", IEEE Power Engineering Society 1999 Summer Meeting, June 18-22, 1999.
- [6] Y. Mansour, E. Vaahedi, A.Y. Chang, B.R. Coms, B.W. Carrett, K. Kemaree, T. Athay, K. Cheung, "B C Hydro's On-Line Stability Assessment (TSA): Model Development, Analysis and Post-Processing", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 10, No. 1, pp. 241-153, 1995.
- [7] Carson W. Taylor, The Future in On-Line Security Assessment and Wide-Area Stability Control, IEEE Power Engineering Society 2000 Winter Meeting, Vol. 4, pp. 46-51, 2000.
- [8] 전영환, "동적안정도 평가 기술 개요," 대한전기학회지, Vol. 50, No. 7, pp 25-29, 2001.
- [9] Powertech, Small Signal Stability Tools(SSAT), User manual, Version 1.2, 2001.
- [10] C. W. Taylor and D. C. Erickson, "Recording and Analyzing the July 2 Cascading Outage," IEEE Computer Applications in Power, Vol. 10, No. 1, pp. 26-30, January 1997.
- [11] 남해곤, 송성근, "새로운 전력계통 운용환경에서의 온라인 동적안정도 평가의 역할," 대한전기학회지, Vol. 49, No. 3, pp 4-1, 2000.
- [12] G. K. Morison, P. Kundur, discussion of reference 12.
- [13] 심관식, 송성근, 남해곤, 김용규, 문재주, "제어기정수에 대한 AMEP와 대규모 전력계통에 미소신호안정도 해석", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp112-115, 2001.
- [14] H. K. Nam, Y. K. Kim, K. S. Shim, K. Y. Lee, "A New Eigen-sensitivity Theory of Augmented Matrix and Its Applications to Power System Stability Analysis", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 15, No. 1, pp.363-369, 2000.

◇ 저자소개 ◇

심관식(沈冠植)

1965년 8월 24일생. 1991년 전남대학교 전기공학과 졸. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸(박사). 1997년~현재 서남대학교 전기전자공학과 조교수.

김용구(金容求)

1969년 12월 29일생. 1995년 전남대학교 전기공학과 졸. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸(석사). 2000년 동 대학원 전기공학과 졸(박사). 2002년~현재 전남대학교 전기공학과 객원교수.

문채주(文彩柱)

1959년 12월 26일생. 1981년 전남대학교 공대 계측공학과 졸. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸(석사). 1994년 동 대학원 전기공학과 졸(박사). 1986년~1997년 한국전력기술주식회사 책임연구원. 1997년~현재 목포대학교 전기공학과 조교수.