

**발전량 변화와 미소신호안정도 상정사고 해석**

심관식<sup>\*</sup>, 송성근<sup>\*\*</sup>, 문채주<sup>\*</sup>, 김용구<sup>\*</sup>, 남해곤<sup>‡</sup>  
<sup>\*</sup>서남대학교, <sup>\*\*</sup>프로컴시스템, <sup>†</sup>목포대학교, <sup>‡</sup>전남대학교

**Contingency Analysis of Small Signal Stability for MW Changes**

K.S.SHIM, S.G.SONG, C.J.MOON, Y.G.KIM, H.K.NAM  
 Seonam Univ., Procom system, Mokpo Univ., Chonnam Univ.

**Abstract** - This paper describes a new contingency analysis methods for small signal security assessment based on the eigenvalue perturbation.

The eigenvalue perturbation with respect to MW changes can be used to find possible sources of the low frequency oscillation, and to select contingency for small signal stability.

The proposed algorithm has been successfully tested on the KEPCO systems.

**1. 서 론**

최근 전력계통에서는 대규모 외란으로 인한 계통고장 상태에서 계통의 안전성 확보를 위한 노력의 일환으로 온라인 동적안전도 평가(on-line dynamic security assessment, DSA)에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다[1-5]. 동적안전도 평가는 계통에서 발생할 수 있는 심각한 상정사고를 선택하고 선택된 사고에 대해서 계통안전도 평가 및 안전도 한계 마진 계산하는 것으로 이미 개발된 알고리즘으로는 EEAC(extended equal area criterion)법[1], SIME(single machine equivalent)법[2-3]등이 있다.

잘 개발된 현대 전력계통에서는 고성능 여자시스템과 다양한 제어기의 투입으로 저주파진동문제가 자주 발생하고 있다. 이러한 저주파진동문제를 해석하는 미소신호안정도에 대한 해석은 주로 선형해석법에 의존하고 이에 대한 많은 연구결과와 알고리즘들이 상용화되었다. 그러나 미소신호안정도 측면에서 상정사고와 안정도 여유를 계산하는 미소신호안전도 평가(small signal security assessment, SSSA)에 대한 연구는 미흡한 실정으로 최근 Powertec에서 개발한 SSAT(small signal analysis tools)[6]가 유일하다. SSAT에서는 미소신호안정도 지표로써 계통에 존재하는 회전자 위상각모드에 대해서 가장 작은 계동비(damping ratio)를 이용해서 SSSA를 수행한다. 전력계통에서 발생하는 저주파진동은 많은 변수들에 의해서 영향을 받고, 또한 지역적 문제뿐만 아니라 광역의 문제들을 포함하고 있어 SSSA에서는 다양한 상정사고를 고려해야 한다.

전력계통에서 SSSA는 선택된 상정사고에 대해서 저주파진동이 계통의 안전운전을 위협하는가를 판단하고 미소신호측면에서 안정도 여유를 계산하는 것으로 과도안전도 평가와 마찬가지로 빠르게 미소신호안정도 상정사고를 선택하는 것이 SSSA의 가장 중요한 과정이다. 이 논문에서는 미소신호안정도에 대한 상정사고를 해석하기 위해서 진동모드의 계동이 계통운전에 문제되지 않은 상태에서 임의의 지역의 발전량 변화로 인하여 계동특성이 불량한 진동모드로 변화시킬 수 있는 발전기를 선택하였다.

계통에 크게 문제가 되는 진동모드가 존재하지 않은 상태에서 계통이 운전되고 있으나, 허수축에 근접한 모드들은 계통환경이 변화하면서 계동특성이 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.

전력계통에서 발전량은 비용문제와 직결되는 파라메타로 계통안정도 향상을 위한 발전량 제어는 과도불안정한 계통의 긴급상태 때, 비상제어 수단의 하나로 발전기 트립(trip)과 같이 제한적이다. 계통에서 발전량 변화는 심각한 외란이 될 수 있고 이로 인한 문제는 주로 최대전송전력계산으로부터 계통의 과도안전성을 확보할 수 있기 때문에 SSSA 측면에서 발전량 변화에 대한 계통의 과도불안정문제는 취급하지 않고 저주파진동을 유발하는 상정사고를 선택한다.

이 논문에서는 발전량변화에 대한 미소신호안정도 상정사고 선택 기법을 한전계통에 적용, 저주파진동에 취약한 발전기들을 선택하였다.

**2. 미소신호안정도 상정사고**

**2.1 상정사고 지표**

미소신호안정도 상정사고 지표로 고유치를 계산하여 얻을 수 있는, 계동비(damping ratio)나 고유치 변화를 선택할 수 있다. 이 논문에서는 상정사고 지표로 고유치 변화를 이용하였다. 계통에서 각 발전기의 발전량이 변화하면 다른 지역 발전량을 동시에 변화하거나 또는 다른 지역 부하의 증감이 있어야 한다. 따라서 모든 발전량과 부하 변화 사이의 경우 수는 매우 많아 이들을 모두 고려하는 것은 어렵다. 이 논문에서는 특정 발전기의 미소발전량의 변화는 다른 지역에 영향을 주지 않는다고 가정하고 미소 발전량 변화에 대한 고유치 변화를 계산하여 이를 상정사고 지표로 이용하였다.

**2.2 시험 계통과 고유치 해석**

임의의 지역 발전기들이 지배적인 지역모드에 참여율이 높으면 그 지역 발전기들의 발전량 변화에 대한 계통의 영향을 파악하기 어렵다. 이 논문에서는 2000년 한전계통에 대해서 올진 원전 1-4호기에 PSS를 설치해서 지역모드의 계동특성을 향상시킨 후 미소신호안정도 상정사고를 해석하였다. PSS를 투입한 후 고유치를 계산한 결과, 비교적 허수축에 근접해 있는 다음과 같은 2개의 지역간모드를 계산하였다.

- Mode A :  $-0.10504 + j4.42565$
- Mode B :  $-0.30521 + j7.04257$

이들 모드들에 대한 우고유벡터와 속도참여율을 계산한 결과, 우고유벡터에서 모드 A는 고리지역과 보령, 서인천 지역 발전기들의 위상이 반대로 서로 진동하고 있고, 모드 B는 월성, 고리 지역 발전기들이 영광지역 발전기들과 서로 진동하고 있다. 그리고 속도참여율에서 모드 A는 고리지역 발전기, 모드 B는 월성, 영광지역 발전기가 지배적인 크기를 가지고 있다. 속도참여율은 제동계수 변화에 대한 모드의 변화를 의미하므로 이것이 크다는 것은 발전량이 변화하였을 때, 제동특성이 향상되거나 감소하는 것에 상관없이 그 모드의 제동특성에 영향을 주는 정도로 생각할 수 있다. 그러므로 모드 A에 대해서는 고리지역 발전량 변화가, 모드 B에 대해서는 영광과 월성 지역 발전량 변화가 큰 영향을 줄 수 있다.

### 2.3 발전량변화와 상정사고 선택

지역간모드 A와 B에 대해서 각 지역발전기의 발전량을 0.05pu 증가하고 계산한 고유치 변화를 표 1과 그림 1에 나타내었다. 표와 그림에서 각 발전기 번호는 동일 지역발전기들 중 첫 번째 발전기 번호만 표시하였다. 발전량 변화에 대해서 각 모드의 실수부는 크게 변화하지 않았다. 가장 크게 변화한 경우는 고리지역 발전기 출력을 증가한 경우로 실수부가 0.00796 증가하였다. 즉 모드 A는 고리지역 발전기의 출력을 증가하면 고유치가 우반면으로 이동하여 저주파진동 문제를 더욱 악화시킬 수 있다. 반면에 모드 B는 영광지역 발전기출력을 0.05pu 증가하였을 때, 고유치가 우반면으로 0.02만큼 이동한다. 즉, 모드 B에 대해서 월성, 영광지역 발전기의 발전량 증가는 제동특성을 더욱 나쁘게 함을 알 수 있다. 그림 1에서 각 모드에 대한 발전량 변화에 대한 영향을 명확히 알 수 있다. 모드 A의 제동특성을 향상하기 위해서는 고리지역 발전량은 감소하고 울진지역 발전량을 증가해야한다. 그리고 모드 B의 제동특성을 개선하기 위해서는 영광, 월성지역 발전량은 발전량을 감소해야 한다.

표 2는 영광과 고리지역의 발전량을 0.3pu씩 증가하고 다른 지역의 발전량을 0.3pu 감소한 상태에서 각각 조류계산을 수행한 후, 새로운 운전점에서 고유치 변화를 계산한 것이다.

고리지역 발전량을 0.3pu 증가하고 다른 지역 발전기 발전량을 0.3pu 감소하였을 때, 모드 A는 크게 영향을 받는다. 이것은 모드 A에 고리발전기들의 속도참여율이 크고, 발전량 0.05pu 변화에서 모드 A에 고리지역 발전기가 0.00796을 가지고 있어 충분히 예상할 수 있고, 영광지역 발전량의 증가와는 달리 고리지역 발전량의 0.3pu 증가는 모드 A의 변화량을 상당히 크게 한다. 가장 큰 값을 가지고 있는 경우는 고리지역 발전량을 0.3pu 증가하고, 울진지역 발전량을 0.3pu 감소할 때인데, 0.05pu 증가에서 울진과 고리가 각각 -0.0076, 0.0079를 가지고 있어 더욱 제동특성을 감소시킬 수 있다. 나머지 고리-보령, 고리-영광 발전량 증감 사이의 관계도 발전량 0.05pu 증가한 경우와 0.3pu일 때 정확하게 일치한다.

또한 모드 A에서 가장 큰 실수부 변화를 일으키는 것은 고리-울진 발전량 변화로 0.09398 값을 가지고 있다. 모드 A의 실수부가 -0.10504이므로 고리-울진 발전량 변화는 모드 A를 우반평면으로 크게 이동시켜 저주파 진동을 더욱 나쁘게 할 수 있음을 예상할 수 있다.

모드 B에 대한 결과도 모드 A과 유사하게 발전량 0.05pu의 경우와 비슷한 결과를 얻을 수 있다. 영광지역 발전량의 증가는 모드 B의 제동특성을 감소시키는 데, 특히 영광지역 발전량을 0.3pu 증가하고 보령지역

표 1. 발전량 증가와 고유치 변화

Table 1. Eigenvalue variation for MW change

No.	Gen. No.	Eigenvalue variation	
		Mode A	Mode B
1	28151	0.00032+j0.00130	0.01070+0.00117
2	25151	-0.00761+j0.00791	-0.00306+0.00177
3	29151	0.00796-j0.00953	0.00323-0.00417
4	27151	-0.00320+j0.00415	0.02244-0.00108
5	26151	-0.00496+j0.00566	-0.00256+0.00172
6	26251	-0.00000-j0.00002	0.00003-0.00008
7	26101	-0.00344+j0.00424	-0.00178+0.00130

표 2. 발전량 변화에 대한 고유치 변화

Table 2. Eigenvalue variation for MW change

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

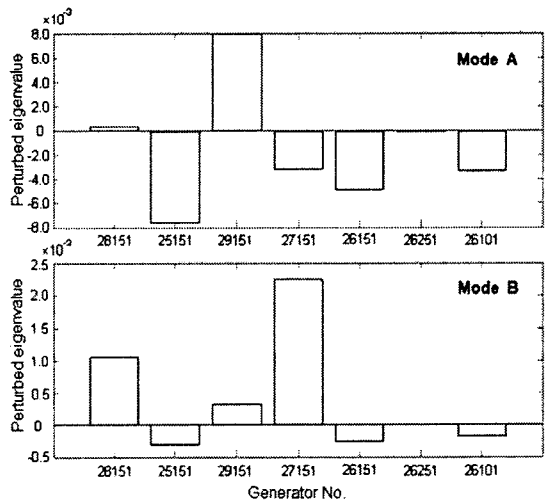


그림 1. 발전량 증가와 고유치 실수부의 변화

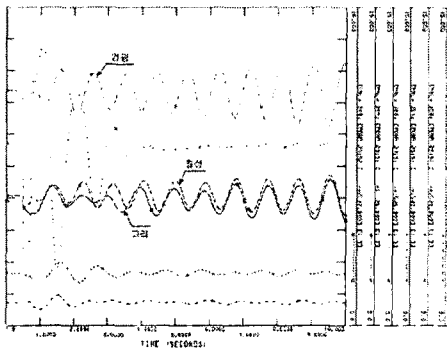
Fig. 1. Eigenvalue variation for MW increase

발전량을 0.3pu 감소할 때, 가장 미소신호안정도 문제가 심각하다. 표 1에 나타나있는 0.05pu 발전량 증가에서 모드 B는 영광, 월성, 고리지역 발전량을 증가하면 제동특성이 나빠진다. 특히 영광 발전량이 0.05pu 증가할 때, 모드 B는 0.02244만큼 우반면으로 이동하고 다른 발전기들의 발전량변화는 모드 B에 크게 영향을 주지 않기 때문에 영광지역 발전량 증감은 모드 B에 지배적인 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 표 2에서 영

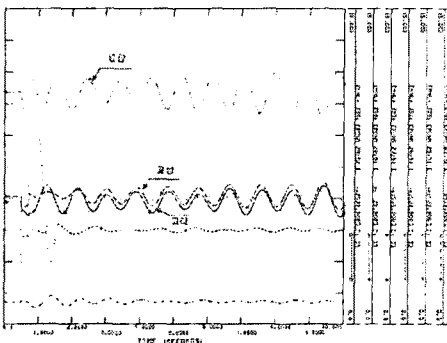
광지역 발전량을 0.3pu 증가하고 보령, 울진 지역 발전량을 0.3pu 감소할 때, 모드 B의 제동특성은 가장 크게 영향을 받고 이것은 0.05pu에서의 결과와 일치한다.

지금까지 기술한 발전량이 증가하거나 감소할 때, 고유치 변화로부터 선택한 미소신호안정도 상정사고에 선택을 검증하기 위하여 PSS/E를 이용하여 시간영역 해석을 수행하였다. 그림 2에는 영광지역 발전량을 0.3pu 증가하고 다른 발전기들의 발전량을 각각 0.3pu 감소한 상태에서 시간영역해석을 한 결과들이다. 그림 2(a)-(b)에는 영광 발전량을 0.3pu 증가하고 보령과 울진지역 발전량을 각각 0.3pu 감소하고 시간영역해석을 수행한 경우로 앞에서 기술한 모드 B에서 실수부의 변화가 가장 큰 경우와 일치한다. 즉, 영광발전량을 증가하였을 때, 제동특성이 나빠진 경우로 이것은 앞에서 기술했던 고유치변화에서 영광지역의 발전량 증가가 고유치를 우반면으로 가장 크게 이동시키므로 예측한 결과와 같다. 그림에서 영광, 월성 지역 발전기의 출력이 가장 심하게 진동하고 있는데, 이것은 속도참여율의 결과에서 영광과 월성 발전기가 모드 B에 가장 지배적으로 참여하기 때문이다.

결과적으로 2000년 계통에서 발전량의 변화가 미소신호안정도 상정사고에 큰 영향을 줄 수 있는 발전기들은 영광, 고리지역 발전기를 선택할 수 있다. 즉 영광과 고리, 월성 발전기의 발전량을 감소하면 이미 제동특성이 양호한 상태이므로 크게 미소신호안정도에 영향이 없으나 반대로 증가하였을 경우에는 미소신호안정도에 나쁜 영향을 줄 수 있다.



(a) G26151 decrease



(b) G25151 decrease

그림 2. 영광지역 발전량 증가와 시간영역해석  
Fig. 2. Time simulation and G27151 MW increase

### 3. 결 론

전력계통에서 상정사고 해석은 주로 과도안정도 평가를 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 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.

제안한 미소신호안정도 상정사고 해석법을 시간영역해석 결과와 비교하여 그 정확함을 확인하였고, 실제 계통 계획과 안전운전에서 저주파진동 문제에 대한 매우 유용한 도구가 될 것으로 생각된다.

#### [참 고 문 헌]

- [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] Powertech, Small Signal Stability Tools(SSAT), User manual, Version 1.2, 2001.
- [7] PTI, PSS/E manual, Program Operation Manual, Volume II, 2000.