

고유치감도 해석에 의한 전압안정도의 상정사고 선택

송성근* 남해곤* 심관식** 문영환*** 최흥관*** 남궁재용***
전남대* 서남대** 전기연구소***

Contingency Selection Using Eigen-Sensitivity Analysis for Voltage Stability.

S. G. Song* H. K. Nam* K. S. Shim*** Y. H. Moon*** H. K. Choi*** J. Y. NamKung***
Chonnam National University* Seonam University** KERI***

Abstract - The Eigen analysis in large power system provides much useful information that is not got in nose curve. The branch participation factor is not quantitative information and is an indirect method calculating incremental change in branch reactive loss. But the Eigen sensitivity analysis to each mode is direct and provides quantitative information but this method because of needing much time is used in large power system.

In this paper the Hessenberg method is used to obtaining dominant eignvalues and corresponding eigenvectors of Jacobian matrix. Ranking the critical contingencies is done by computing the Eigen sensitivity of each dominant eignvalues for changes of each line. The proposed algorithm is tested on the New England 30-bus system and KEPCO system in the year of 2000, which comprises of 791-bus and 2500-branches.

1. 서론

근대의 전력계통에서는 위상각 안정도 문제를 중점적으로 연구하여 PSS등의 안정화 장치의 발달로 위상각 안정도 문제는 어느 정도 극복되었다. 그러나 최근 세계의 전력회사들이 전압 문제에 기인한 대형 정전사고나 저전압 현상을 경험하였고, 전압안정도 문제가 계통 운용 및 계획시 가장 제약이 심한 요소로 대두됨에 따라 전압안정도 문제에 관한 관심이 증가되었다. 이와 같은 상황에서 EPRI에서 VSTAB이 개발되었다[1]. VSTAB에서는 Jacobian 행렬의 고유치중 좌반평면에 있거나 원점부근의 고유치를 선택적으로 계산하고 모선, 선로, 발전기 참여율을 계산하여 각각을 모선, 선로, 발전기에 대한 전압안정도 측면에서의 상정사고 선택의 지표로 사용하고 있다. 그러나 선로 참여율과 발전기 참여율은 각 부하 모선에 관심 있는 고유치의 우고유벡터 성분만큼의 무효전력을 투입하였을 때 각 선로에서 발생하는 무효전력 손실의 증가분과 발전기 무효전력의 출력 변환분에 대해 각각의 가장 큰 변화분으로 정규화 한 값으로 각 선로나 발전기에 대해 정량화된 값을 제공하기보다는 비례적인 값을 제공하며, 모선 참여율과는 달리 모든 부하모선에 우고유벡터 만큼의 무효전력을 투입하여 계산하는 간접적인 방법을 택하고 있다.

본 논문에서는 VSTAB에서 사용하는 선로 참여율의 간접적이며 정량화된 지표를 제공해줄 수 없다는 단점을 보완하고, 전압안정도 측면에서의 선로 상정사고 선택을 위하여 각 선로의 임피던스 변화에 대한 고유치감도를 사용하였다. 또한 선택적인 Jacobian 행렬의 고유치를 계산하기 위하여 Hessenberg 법을 사용하였다[5]. 이상의 알고리즘에 대한 정확성과 대규모 계통에의 적용을 확인하기 위하여 시험계통인 New-England 30모선 계통과

한전계통에 알고리즘을 적용하여 보았다.

2. Jacobian 행렬의 선형해석

2.1 전압안정도 해석을 위한 Jacobian 행렬

모선전압과 모선 어드미턴스 행렬의 요소를 다음과 같이 정의한다.

$$E_i = |E_i| e^{j\theta_i} \tag{1}$$

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \tag{2}$$

이때 각 모선에 주입되는 무효, 유효전력의 식을 미소 변화에 대하여 다음 선형식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta Q \\ \Delta P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{QV} & J_{Q\theta} \\ J_{PV} & J_{P\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E \\ \Delta \theta \end{bmatrix} = J_A \begin{bmatrix} \Delta E \\ \Delta \theta \end{bmatrix} \tag{3}$$

이때의 ΔE 는 $\Delta|E|/|E|$ 로 편의상 위와 같이 표현하였으며, 위 식의 Jacobian 행렬 J_A 는 확대 Jacobian 행렬 (Augmented Jacobian Matrix, AJM)이라 한다. 전압불안정 현상은 무효전력 수급불균형이 가장 중요하고 유효전력이 전압안정도에 미치는 영향은 미소하므로, 유효전력의 수급균형이 이루어진 상태 하에서 전압불안정 현상을 해석한다. 즉, $\Delta P = 0$ 이라 가정할 수 있고 이때 전압과 무효전력의 관계는

$$\Delta Q = [J_{QV} - J_{Q\theta} J_{PV}^{-1} J_{P\theta}] \Delta E = J_R \Delta E \tag{4}$$

$$J_R = J_{QV} - J_{Q\theta} J_{PV}^{-1} J_{P\theta} \tag{5}$$

이다. 이때 J_R 은 축약 Jacobian 행렬 (Reduced Jacobian Matrix, RJM)이라 하며 전압에 대한 모선 무효전력의 감도를 의미한다. 위의 식 (4)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta E = J_R^{-1} \Delta Q \tag{6}$$

이때 J_R^{-1} 은 모선에서의 무효전력에 대한 전압의 감도를 의미한다. 모든 고유치 연산을 위해서는 스파시티 (sparsity) 기법을 사용하기 위해 식 (5)의 RJM을 사용하지 않고 식 (3)의 AJM을 사용한다.

2.2 Jacobian 행렬의 고유치 및 고유벡터

전압안정도 해석시 필요한 Jacobian 행렬의 고유치도 미소신호 안정도 해석의 경우와 같이 모든 고유치와 고유벡터가 필요하지 않고 좌반평면이나, 영점 부근의 일부분의 고유치와 고유벡터만이 필요하므로 본 논문에서는 이미 문헌[5]에서 제시한 Hessenberg 법을 사용하여 고유

치와 고유벡터를 선택적으로 계산하였다.

3. VSTAB의 선로 참여율(BrPF)(1,2,4)

모선의 무효전력의 변화분을 다음과 같이 정의 할 때

$$\Delta Q^{(i)} = v_i \quad (7)$$

각 모선의 전압과 각도의 변화분은 다음과 같다.

$$\Delta E^{(i)} = \frac{1}{\lambda_i} v_i \quad (8)$$

$$\Delta \theta^{(i)} = -H^{-1} N \Delta E^{(i)} \quad (9)$$

이와 같은 계통조건하에서 선로 k 에 대한 i 번째 모드에 대한 선로 참여율은

$$P_{ki} = \frac{\Delta Q_{lossk}^{(i)}}{\max(\Delta Q_{lossT}^{(i)})} \quad (10)$$

위와 같이 정의된다. 즉 선로 참여율(BrPF)값이 큰 선로는 무효전력부하 변화에 무효전력을 많이 소비하거나, 중부하로 운전되고 있는 선로라 할 수 있다. 그러므로 전압 불안정 현상을 방지하기 위해 조치를 강구해야하는 선로라 할 수 있다.

4. Jacobian 행렬의 선로 고유치감도

확대행렬의 1, 2차 고유치감도와 고유벡터감도는 문헌 [3]에서 상세하게 기술되어 있으므로 본 논문에서 Jacobian 행렬의 선로 서셉턴스 성분에 대한 감도행렬 ($\Delta J_A / \Delta b_{ij}$)만을 기술한다.

모선 어드미턴스 행렬의 요소는 위의 식 (2)와 같이 표현할 수 있으며, 일반적으로 선로의 저항성분은 인덕턴스 성분에 비해 무시할 수 있을 정도로 작으므로 모든 전계 과정에서는 저항성분을 무시한다. 이 경우 모선 어드미턴스 행렬의 대각, 비대각의 서셉턴스 요소는 각각 다음과 같이 표현된다.

$$B_{ij} = -b_{ij} \quad (11)$$

$$B_{ii} = b_{ii} + \sum_{j \neq i} b_{ij} \quad (12)$$

위의 식에서 b_{ij} 는 모선 i 와 j 사이의 모든 선로 서셉턴스 성분이며 b_{ii} 는 모선 i 에 열결되어 있는 shunt 값을 나타낸다. 위의 식을 b_{ij} 에 대해 편미분 하면

$$\frac{\partial B_{ii}}{\partial b_{ij}} = 1, \quad \frac{\partial B_{ij}}{\partial b_{ij}} = -1 \quad (13)$$

$$\frac{\partial^2 B_{ii}}{\partial b_{ij}^2} = \frac{\partial^2 B_{ij}}{\partial b_{ij}^2} = 0 \quad (14)$$

이와 같고, 이를 이용해 Jacobian 행렬의 선로에 대한 1차 감도 행렬을 계산하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial J_A}{\partial b_{ij}} = \begin{bmatrix} \alpha & E_C & \vdots & -E_S & E_S \\ E_C & \beta & \vdots & -E_S & E_S \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ -E_S & -E_S & \vdots & -E_C & E_C \\ E_S & E_S & \vdots & E_C & -E_C \end{bmatrix} \quad (15)$$

위의 식에서

$$\alpha = E_C - 2 |E_i|^2 \quad (16)$$

$$\beta = E_C - 2 |E_j|^2 \quad (17)$$

$$E_C = |E_i| |E_j| \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (18)$$

$$E_S = |E_i| |E_j| \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (19)$$

위의 감도행렬을 이용하여 선로에 대한 Jacobian 행렬의 감도 ($\Delta \lambda_i / \Delta b_{ij}$)를 계산할 수 있으며, 이 고유치감도가 큰 선로는 그 선로의 임피던스의 변화에 대해 전압 안정도 문제를 발생시킬 수 있는 모드가 많이 변화한다는 의미로 앞의 VSTAB의 BrPF와 같이 취약선로를 선정할 수 있으나, 간접적인 방법이 아닌 직접 고유치의 변화를 계산하는 것이며 또한 각 선로가 고유치에 미치는 영향이 비례적인 값이 아닌 정확한 수치로 제공된다.

5. 시험계통 결과

5.1 New-England 30모선 계통

이 계통은 전압안정도 해석을 위해 문헌[1]에서 사용한 시험계통으로 이 계통에 Jacobian 행렬의 고유치를 본 논문에서 사용된 선형해석 프로그램인 Hessenberg 법을 사용하여 계산한 결과는 표 1과 같다. 계산결과 VSTAB의 고유치 및 선로 참여율에 일치하였으며, 표 2는 계산된 고유치중 광역모드에 해당하면서도 원점에 가장 가까운 λ_1 에 대한 선로 리액터를 100%변화시킨 경우의 고유치감도의 계산 결과 및 실제 고유치의 변화분이다.

표 1 New-England계통의 고유치 및 모선 참여율

29.369(λ_1)		41.175(λ_2)		60.035(λ_3)		61.712(λ_4)	
Bus	Parti.	Bus	Parti.	Bus	Parti.	Bus	Parti.
27	0.1957	12	0.9654	9	0.3717	9	0.4369
17	0.1562	13	0.0081	26	0.1331	26	0.1192
18	0.1472	27	0.0069	27	0.1296	27	0.1085
15	0.0983	11	0.0043	15	0.0643	15	0.0698
26	0.0876	26	0.0040	8	0.0585	28	0.0574
16	0.0823	14	0.0039	28	0.0582		
24	0.0799						
3	0.0490						

표 2 고유치 λ_1 의 선로 감도적용 결과

λ_1 의 감도적용 결과		$\Delta \lambda$	VSTAB	
Branch	SOES		Rank	BrPF
16 - 19	-2.4074	-2.6512	3	0.9067
2 - 3	-2.1229	-2.4560	2	0.9434
25 - 26	-1.7824	-1.9047	6	0.4657
21 - 22	-1.6702	-2.0865	1	1.0000
3 - 18	-1.4198	-1.6664	5	0.4867
23 - 24	-1.3616	-1.4545	9	0.2515
16 - 17	-1.0328	-1.2722		
26 - 27	-0.9508	-1.3696		
26 - 29	-0.8454	-0.8772	4	0.9036
13 - 14	-0.7669	-0.8817		
4 - 5	-0.7593	-0.8639		
14 - 15	-0.7320	-0.8172	10	0.2371

SOES = 2차 고유치감도 계산 결과, $\Delta \lambda$ = 실제 고유치 변화분

표 2에서 감도 계산에 의한 고유치 변화분 추정치와 실제 고유치의 변화분의 값이 거의 일치함을 확인 할 수 있으며, VSTAB의 결과 중 감도 계산결과로 확인 할 수 없는 선로 15-16, 17-27번 선로에 대한 실제 고유치의 변화분은 -0.09619, -0.14481로 실제 이 두 선로는 이 고유치에 많은 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

5.2 한전계통에 적용결과

2000년 한전계통은 215-기, 791-모선 1575-선로로 구성되어 있고, 전체 부하는 38,927 MW로 부하는 일정 MVA로 모의되었다. 본 논문에서 이 계통데이터를 사용한 목적은 대규모 전력계통에 제안된 알고리즘을 적용해 보기 위한 하나의 benchmark 계통으로 사용한 것이지만 한전계통에 대한 어떤 결론을 내고자 하는 것이 아님을 첨언한다. 본 논문의 모든 수치적 계산은 P-II 400MHz 개인용 컴퓨터에서 실행하였으며, 이동점을 원점으로 하고 10개의 고유치를 계산한 경우 3.7초가 소요 되었으며 각 고유치마다 1차 고유치감도계산 후 1차 감도 최고치의 20%에 해당하는 모든 선로의 2차 고유치감도를 계산하는 데는 다소의 차이는 있으나 모두 2.5초 이내에 계산되었다.

한전계통에 대한 원점 부근의 고유치와 각 고유치의 선로 참여율은 표 3과 같으며 표에서 알 수 있듯 고유치 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_4, \lambda_5$ 는 주암과 강릉지역의 지역 모드이므로 두 모드는 관심의 대상이 아니며 고유치 λ_3 과 λ_6 중 원점에 보다 근접한 λ_3 에 대해 고유치감도 계산을 하였다. 표 4는 고유치 λ_3 의 선로 고유치감도 결과 중 변압기 모선이 아닌 경우만을 크기 순으로 선택하고 선택된 선로에 대한 리액턴스 100% 변화에 대한 2차 감도 계산결과와 실제로 선로의 리액턴스를 변화 한 경우의 고유치 변화율을 나타낸 것으로 이 모드의 경우 모선 참여율에서는 모두 154kV 모선이 선택되었으며, 선로 고유치감도 계산에 의해 선택된 선로는 모두 345kV 선로가 선택되었다.

표 4 고유치 λ_3 의 선로 감도적용 결과

Mode	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆
SOES of λ_3	-0.0640	-0.0386	-0.0345	-0.0314	-0.0215	-0.0194
$\Delta\lambda_1$	-0.0415	-0.0301	0.0397	-0.0050	-0.0179	-0.0014
$\Delta\lambda_2$	-0.0225	-0.0120	-0.0078	-0.0029	-0.0096	-0.0004
$\Delta\lambda_3$	-0.1085	-0.0756	0.0278	-0.0545	-0.0384	-0.0249
$\Delta\lambda_4$	-0.0467	-0.0923	0.0010	-0.0403	-0.0566	-0.0209
$\Delta\lambda_5$	-0.0251	-0.0417	-0.0028	-0.0662	-0.0329	-0.0377
$\Delta\lambda_6$	-0.0091	-0.0052	-0.0240	-0.0401	0.0005	-0.0254

L1 : 영광NP#1 - 신광주3, L2 : 신강진3 - 신광주3, L3 : 신김계3 - 영광NP#1, L4 : 신포항3 - 서매구3, L5 : 신남원3 - 신광주3, L6 : 신경산3 - 신울산3

표 3 한전계통의 고유치 및 모선 참여율

1.24445(λ_1)		1.45247(λ_2)		1.75344(λ_3)		2.45632(λ_4)		2.61873(λ_5)		2.85355(λ_6)	
Bus	Parti.	Bus	Parti.	Bus	Parti.	Bus	Parti.	Bus	Parti.	Bus	Parti.
주암-#1G	0.4375	주암-#1G	0.5000	주암-#2G	0.0517	강릉-#1G	0.1567	강릉-#1G	0.1706	철원	0.0412
주암-#2G	0.4375	주암-#2G	0.5000	주암-#1G	0.0517	강릉-#2G	0.1567	강릉-#2G	0.1706	포천6	0.0348
주암HP	0.0102			부안	0.0174	속초	0.0255	강릉HP	0.0199	포천	0.0345
고흥	0.0038			고창	0.0167	간성	0.0245	속초	0.0182	동두천6	0.0220
				엄다6	0.0163	강릉HP	0.0233	횡계	0.0174	동두천	0.0218
				엄다	0.0163	양양	0.0228	양양	0.0168	강릉-#2G	0.0179
				목포	0.0161	횡계	0.0210	간성	0.0166	강릉-#1G	0.0179
				정주	0.0159	강릉6	0.0145	강릉6	0.0112	대청-#2G	0.0092
				북항	0.0152	강릉	0.0144	강릉	0.0112	대청-#1G	0.0092
				영광원전	0.0149	엄다6	0.0108			청평-#3G	0.0070

표 4에서 $\Delta\lambda$ 는 $L_1 \sim L_6$ 의 6개의 선로의 리액턴스 값을 실제로 100% 변화한 경우의 각 고유치의 변화량이다. 세번째 선로 L_3 의 리액턴스를 100% 증가시킨 경우에 있어서는 고유치의 변화량과 선로 고유치감도의 결과가 맞지 않고 있다. 이는 선로의 리액턴스 값을 변화시킨 경우 섭진강 발전기가 Q-limit에 걸리게 되어 새로운 2개의 모드가 생성되기 때문이며, 그 이외의 모든 선로들에 대해서는 감도의 결과와는 수치적으로 다소의 오차는 있으나 순위에는 변화 없으며 그 변화분도 거의 일치함을 알 수 있다. 표 3과 4의 모드해석 결과 전압안정도 문제가 되는 지역은 호남지역이며 문제가 되는 선로는 이 지역에 근접한 345kV 선로들임을 알 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 전압안정도 측면에서의 선로 상정사고 선택을 위하여 Jacobian 행렬의 고유치에 대한 선로 고유치감도를 제시하였으며, 제안된 알고리즘의 신뢰성을 확인하기 위해 시험계통으로 New-England 30모선 계통에 적용하였으며, 개발된 프로그램의 대규모 계통에의 적용을 확인하기 위해 한전계통에 적용하였다.

제안된 알고리즘을 시험계통에 적용하여 본 논문에서 제안된 알고리즘이 VSTAB의 BrPF를 사용하여 상정사고를 선택하는 것보다 우수함을 확인하였으며, 791-모선과 1575-선로 구성된 한전계통에 적용하여 10개의 고유치와 한 고유치에 대한 고유치감도 계산시 소요되는 시간이 약 6초 정도로 계산 시간 면에서도 아주 우수함을 확인하였다.

앞으로 개발된 프로그램의 보다 많은 시험계통에의 적용과 부하의 증가에 따라 적용할 수 있는 프로그램 개발이 이루어져야 할 것이다.

[참고문헌]

- [1] EPRI, Voltage Stability/Security Assessment and On-Line Control, Vol. 1-Vol. 3, Final Report, TR-101931, 1993.
- [2] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill Book Company, New York, 1994.
- [3] H. K. Nam, K. S. Shim, Y. G. Kim, K. Y. Lee, "A New Eigen-Sensitivity Theory of Augmented Matrix and Its Applications to Power System Stability Analysis", Accepted for publication in IEEE Transaction on Power System, Paper # PE-464-PWRS-0-02-1999.
- [4] B. Gao, G. K. Morison, P. Kundur, "Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis", IEEE Trans. on Power System, Vol 7, No. 4, pp. 1529-1542, 1992.
- [5] 남해관, 송성근, 심판식, 문채주, 김동준, 문영환, "대규모 전력계통의 미소신호 안정도 해석을 위한 Hessenberg 법", 대한전기학회 논문지 A, Vol 49A, No. 4, pp 168-176, 2000, 4.