

고유치감도를 이용한 과도안정도의 상정사고 해석법의 개발

심관식* 남해곤** 김용구** 송성근** 문채주***
 * 서남대학교 ** 전남대학교 *** 목포대학교

Contingency Analysis of Transient Stability Using Eigen-Sensitivity

Kwan-Shik Shim* Hae-Kon Nam** Yong-Ku Kim** Sung-Geun Song** Chae-Ju Moon***
 * Seonam University ** Chonnam National University *** Mokpo National University

Abstract - This paper presents a new method for contingency selection of the transient stability. Contingency ranking in transient stability is done by estimating the change in the imaginary part of electro-mechanical oscillation mode, which represents modal synchronizing coefficient. And the change in the imaginary part is obtained by applying eigen-sensitivity theory of augmented matrix to linear system model.

The proposed algorithm was tested for New England System and compared the results with PSS/E dynamic simulation.

2.1 확대행렬과 고유치문제

전력계통에서 계통상태방정식은 x 를 상태변수 벡터 그리고 v 와 u 를 각각 모션전압 벡터와 입력벡터라 할 때, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{x} = A_G x + B_G v + U_G u \quad (1)$$

$$0 = -C_G x + Y v \quad (2)$$

이 식을 확대계통상태방정식(augmented system state equation)으로 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{\tilde{x}} = \tilde{A}\tilde{x} + \tilde{U}\tilde{u} \quad (3)$$

여기에서

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} A_G & B_G \\ -C_G & Y \end{bmatrix} \quad (4)$$

행렬 \tilde{A} 를 확대행렬이라 정의한다. 이 행렬은 전력계통 특성상 매우 스파스하므로 안정도해석의 모든 연산에 이 행렬을 사용하는 것이 효율적이다.

확대행렬을 사용한 확대계통상태방정식의 고유치문제는 확대행렬의 좌우고유벡터를 각각 \tilde{w}_i, \tilde{v}_i 라 하면 이들은 다음과 같이 정의한다.

$$\tilde{A} \tilde{v}_i = \lambda_i \tilde{B} \tilde{v}_i \quad (5)$$

$$\tilde{A}^T \tilde{w}_i = \lambda_i \tilde{B} \tilde{w}_i \quad (6)$$

여기서 \tilde{A} 는 부분행렬 A_G, B_G, C_G, Y 로 구성되어 있으며 \tilde{B} 는 대각선 요소에 상태변수의 수만큼 1을 가지고 있고 나머지 대각선 요소에 0을 가지고 있는 행렬이다. 즉 I_x 를 상태변수 x 의 차원과 같은 단위행렬이라면 행렬 \tilde{B} 는 다음과 같다.

$$\tilde{B} = \begin{bmatrix} I_x & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.2. 확대행렬의 고유치감도

확대행렬의 1, 2차 고유치감도와 고유벡터감도는 문헌 [1]과 [2]에서 다음과 같이 정의하였다.

1차 고유치감도

1. 서 론

고유치계산법과 함께 고유치감도 해석은 전력계통의 안정도 해석에 매우 유용하게 이용할 수 있는 다양한 정보를 제공함으로써 인하여 많은 문헌에서 응용하고 있다. 그러나 지금까지 주로 축약행렬에 대한 고유치감도를 사용하고 있어서 대규모 계통에 적용하는데 한계가 있다.

이 논문의 저자는 확대행렬의 고유치감도이론을 제안 하였는데 [1-4], 이 알고리즘은 대규모계통에 적용할 수 있는 실질적인 기법으로 미소신호안정도와 전압안정도의 해석 적용하여 매우 좋은 결과를 얻은 바 있다. 특히 선로리액턴스에 대한 고유치감도를 이용하여 미소신호안정도와 전압안정도에 가장 취약한 선로를 선택하였다.

전력계통의 계통상태행렬에서 고유값 허수부는 동기화 토크계수에 종속적이다. 이로부터 고유치 허수부의 변화는 동기화토크의 계수 변화의 영향을 반영하고 있다. 선로정수에 대한 고유치감도에서 특정 선로의 정수가 변화할 때, 고유치 허수부의 변화를 알 수 있으므로 이를 이용해서 과도안정도 상정사고 해석의 지표로써 사용할 수 있다.

대규모계통에서 각 발전기 군은 고유진동주파수를 가지고 있다. 따라서 각각의 고유진동주파수에 대한 고유치감도를 계산해서 동기화토크 변동률을 계산할 수 있다. 이 동기화토크 변동률은 각 선로의 리액턴스 변화가 특정발전기의 동기화 토크에 끼치는 영향을 나타내고 있으므로 다기계통에서 발생하는 과도안정도 상정사고 지표로써 사용할 수 있다.

이 논문에서는 확대행렬의 고유치감도 알고리즘을 New England 계통에 적용하여 과도안정도 상정사고 해석의 지표를 얻었다. 그리고 PSS/E의 결과와 비교 검증함으로써 제안한 이론과 알고리즘에 의해서 얻어진 지표가 과도안정도 상정사고 해석에 사용될 수 있음을 확인하였다.

2. 확대행렬과 고유치감도(1-4)

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial K} = \tilde{w}_i^T \frac{\partial \tilde{A}}{\partial K} \tilde{v}_i \quad (8)$$

2차 고유치감도

$$(9)$$

1차 고유벡터 감도

$$(\tilde{A} - \lambda_i \tilde{B}) \frac{\partial \tilde{v}_i}{\partial K} = -\tilde{M} \tilde{v}_i, \quad (10)$$

$$\tilde{w}_i^T \tilde{B} \frac{\partial \tilde{v}_i}{\partial K} = 0 \quad (11)$$

여기서

$$\tilde{M} = \frac{\partial \tilde{A}}{\partial K} - \frac{\partial \lambda_i}{\partial K} \tilde{B}$$

그리고 \tilde{w}_i, \tilde{v}_i 는 확대행렬의 좌우고유벡터이다.

1차 고유벡터감도는 식 (10)과 (11)을 연립하여 유일하게 결정할 수 있다. 위 방법은 관심 있는 모드의 고유벡터와 그 감도만으로 2차 고유치 감도계산을 수행할 수 있고, 따라서 대규모 계통의 감도해석을 가능하게 하는 중요한 의미를 가진다.

3. 고유치감도와 동기화토크 변동률

각 발전기는 고유한 진동주파수를 가지고 있는데 선로 리액턴스와 진동주파수 그리고 동기화 계수, 고유치감도 사이의 관계는 그림 1의 1기 무한모선계통을 이용하여 보일 수 있다.

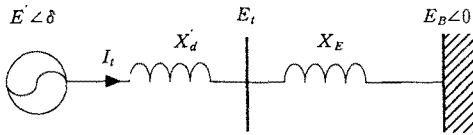


그림 1. 1기 무한모선 계통

발전기 모델은 고전모델 사용하고 고정자 저항을 포함한 모든 저항은 무시할 때, 전기적토크는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = \frac{E' E_B}{X_T} \sin \delta \quad (12)$$

여기에서 $X_T = X_d + X_E$ 이고, 이 식을 선형화 하면,

$$\Delta T_e = \frac{\partial T_e}{\partial \delta} \Delta \delta = \frac{E' E_B}{X_T} \cos \delta_0 \Delta \delta \quad (13)$$

이 식으로부터 동기화토크계수 K_S 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$K_S = \frac{E' E_B}{X_T} \cos \delta_0 \quad (14)$$

따라서 기호 Δ 를 생략하고 동요방정식을 나타내면 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$s^2 \delta + \frac{K_D}{2H} s \delta + \frac{K_S}{2H} \omega_0 \delta = \frac{\omega_0}{2H} T_m \quad (15)$$

이 방정식의 특성방정식과 고유값은

$$s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2 = 0 \quad (16)$$

$$\lambda = -\zeta \omega_n \pm j \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (17)$$

$$= -\frac{K_D}{4H} + j \sqrt{K_S \frac{\omega_0}{2H} - \left(\frac{K_D}{4H}\right)^2}$$

여기서 비제동고유주파수와 제동비는

$$\omega_n = \sqrt{K_S \frac{\omega_0}{2H}} \quad (18)$$

$$\zeta = \frac{K_D}{2\sqrt{2K_S H \omega_0}} \quad (19)$$

동기화토크 K_S 가 증가함에 따라서 비제동고유주파수는 증가하고 제동비는 감소한다. 일반적으로 ζ 는 그 크기가 작기 때문에 이를 무시하면 고유값을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\lambda = -\frac{K_D}{4H} + j \sqrt{K_S \frac{\omega_0}{2H}} = \sigma + j \omega_d \quad (20)$$

이 방정식의 고유치의 실수부는 제동계수 K_D 에 의존함을 알 수 있고, 허수부는 동기화토크계수 K_S 에 종속적임을 알 수 있다. 그러므로 고유치의 허수부와 동기화토크계수는,

$$K_S = \frac{2H}{\omega_0} \omega_d^2 \quad (21)$$

결국 동기화토크 계수는 고유치의 허수부의 제곱과 비례관계가 성립하므로 동기화계수와 고유주파수의 변화량 사이에는 다음관계가 성립한다.

$$\Delta K_S = \frac{2H}{\omega_0} (2\omega_d \Delta \omega_d + \Delta \omega_d^2) \quad (22)$$

그리고 2차 항을 무시하면, 동기화토크 변동률은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$S_n = \frac{K'_S - K_S}{K_S} = \frac{\Delta K_S}{K_S} = \frac{2\Delta \omega_d}{\omega_d} \quad (23)$$

여기에서 $\Delta \omega_d$ 는 저주파진동모드의 허수부 변화량으로 고유치감도에 의해서 계산된다. 즉, 선로리액턴스에 대한 고유치감도 계산에서 고유치의 허수부의 변화를 알 수 있고 이를 이용해서 동기화토크 변동률 S_n 를 계산할 수 있다. 그리고 동기화토크 변동률은 동기화토크의 변화를 나타내므로 과도안정도의 상정사고 지표로써 사용할 수 있다.

이 개념은 모드 변환(modal transformation)에 의해 다계통으로의 확장될 수 있다. 다계통에서 각 발전기 군은 고유한 진동주파수를 가지고 있다. 각각의 진동모드에 대한 선로리액턴스 고유치감도에서 동기화토크 변동률을 계산할 수 있다. 이 동기화토크 변동률은 각 선로의 리액턴스 변화가 특정발전기의 동기화토크에 미치는 영향을 나타내고 있으므로 다계통에서 발생하는 과도안정도 상정사고 선택에 지표로 사용할 수 있다.

4. 결 과

이 논문에서 제안한 알고리즘을 New England 계통

에 적용하고 그 결과와 PSS/E의 결과를 비교하였다. New England 계통에서 2회선 운전중이라 가정할 때, 2회선 중 1회선이 탈락되어도 과도안정도에는 큰 영향이 없었다. 그래서 New England 계통의 모든 선로리액턴스를 2배로 증가한 상태에서 고유치감도와 동기화토크 변동률을 계산하고 PSS/E의 시뮬레이션을 수행하였다.

각 진동모드에서 선로의 리액턴스에 대한 고유치감도는 표 1에 나타내었다. 그리고 고유치감도로부터 계산한 동기화토크변동률은 표 2에 나타내었다.

표 1에서 NSOES는 선로리액턴스에 대한 고유치감도에서 정규화한 2차 고유치감도의 허수부를 나타내고 있다. 즉 이 값은 2회선 선로 중 1회선이 탈락하였을 때, 고유치 허수부의 변화를 나타내고 있다. 표 1과 2에서는 3개의 진동모드만 나타내었는데, 다른 모드에 대한 동기화토크 변동률이 매우 작기 때문에 생략하였다. 표 2에서 S_{lv} 는 동기화토크 변동률을 의미하고 이것은 표 1에서 고유치감도의 허수부로부터 식 (33)을 사용하여 계산한 값이다.

그리고 표 1과 2에서 30번 이상인 모선번호는 모두 발전기모선이고 여기에 연결된 선로의 고유치감도는 변압기 리액턴스에 대한 고유치감도를 나타낸다. 각 진동모드에 대해서 변압기 리액턴스에 대한 고유치감도는 각 발전기의 속도참여율(speed participation factor)과 그 순위가 같은 결과를 산출하였는데 이의 원인은 향후 해석해야 할 연구로 이 논문에서는 각 모드에 대한 속도참여율은 나타내지 않았다.

동기화토크 변동률이 가장 큰 선로는 모드 1에서 선로 26-29, 26-28 그리고 모드 2에서 16-19, 모드 3에서 16-19 선로들이다. 따라서 이 선로들을 과도안정도에 취약한 선로들로 선택할 수 있다. 동기화토크 변동률에 의해서 선택된 선로들에 대해서 대규모 전력계통 해석 프로그램인 PSS/E를 이용하여 시뮬레이션하였다. 그리고 그 결과를 그림 2-4에 나타내었다.

그림 2는 정상상태로 운전 중에 선로 26-29에 1선 지락사고가 발생하였을 때, 0.03초 동안 사고를 모의한 경우로 38번 발전기의 위상각만이 발산함을 알 수 있다. 이것은 선로 26-29에 동기화토크 변동률이 -0.266으로 선로들 중에서 가장 큰 값을 가지고 있고 모드 1에 가장 큰 속도참여율을 가지고 있는 발전기는 38번이기 때문이다. 그리고 그림 3에서는 선로 26-28에서 1선 지락사고가 발생하였을 때, 0.05초 동안 사고를 모의한 경우로 이때는 38번 발전기의 위상각만이 발산한다. 선로 26-29과 마찬가지로 선로 26-28에 대해서 모드 1에 가장 큰 속도참여율을 가지고 있는 발전기가 38번이기 때문이다.

선로 16-19에서는 고장지속시간이 0.06초일 때, 31, 32번 발전기의 위상각이 발산함을 그림 4로부터 알 수 있다. 모드 3에서 16-19의 동기화토크 변동률 S_{lv} 가 큰 값을 가지고 있는 반면에 발전기 34, 35, 36번의 위상각이 발산하지 않는 것은 이 발전기에 연결된 변압기 리액턴스의 동기화토크 변동률이 작기 때문일 것으로 생각된다.

표 1. 각 모드에 대한 2차고유치감도와 취약선로

Mode 1		Mode 2		Mode 3	
-0.377+j3.569		-0.259+j4.143		-0.281+j5.215	
Line	NSOES	Line	NSOES	Line	NSOES
29-38	-0.930	06-31	-1.395	16-19	-0.569
26-29	-0.475	10-32	-0.865	20-34	-0.463
26-28	-0.365	16-19	-0.302	23-36	-0.372
26-27	-0.248	14-15	-0.294	22-35	-0.300
17-27	-0.233	13-14	-0.173	21-22	-0.226
28-29	-0.205	15-16	-0.141	23-24	-0.192

표 2. 각 선로에 대한 동기화토크 변동률

Mode 1		Mode 2		Mode 3	
-0.377+j3.569		-0.259+j4.143		-0.281+j5.215	
Line	S_{lv}	Line	S_{lv}	Line	S_{lv}
29-38	-0.521	06-31	-0.674	16-19	-0.218
26-29	-0.266	10-32	-0.418	20-34	-0.178
26-28	-0.204	16-19	-0.146	23-36	-0.143
26-27	-0.139	14-15	-0.142	22-35	-0.115
17-27	-0.130	13-14	-0.084	21-22	-0.087
28-29	-0.114	15-16	-0.068	23-24	-0.074

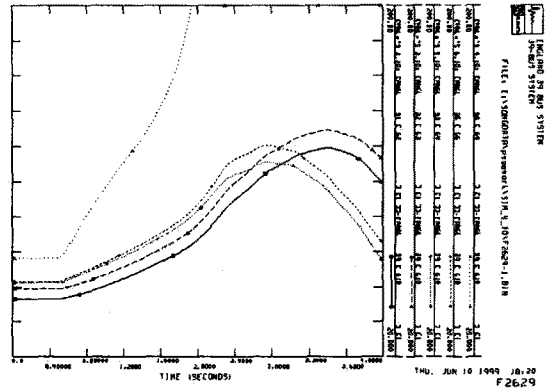


그림 2. PSS/E 결과 (선로 26-29)

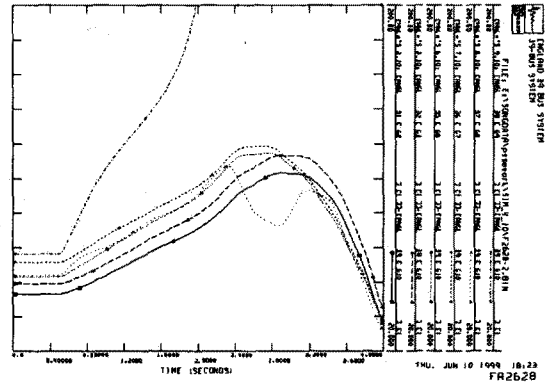


그림 3. PSS/E 결과 (선로 26-28)

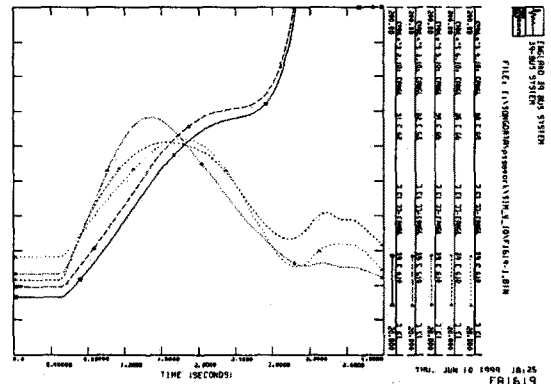


그림 4. PSS/E 결과 (선로 16-19)

5. 결 론

이 논문에서는 확대행렬의 고유치감도를 이용하여 새로운 과도안정도의 상정사고 해석법을 제안하였다. 계통 상태행렬의 고유값 허수부의 변화가 동기화토크의 계수 변화의 영향을 반영하고 있으므로 고유치 허수부의 변화로부터 과도안정도 상정사고의 지표인 동기화토크 변동률을 계산하였다.

고유치 허수부의 변화는 선로정수에 대한 고유치감도로부터 얻을 수 있다. 그러므로 특정 선로에 대한 고유치 변화를 계산하고 이들을 이용해서 동기화토크 변동률을 계산할 수 있으며 이로부터 과도안정도 상정사고 해석의 지표를 얻을 수 있다.

제안한 확대행렬의 고유치감도를 이용한 과도안정도 상정사고 해석 알고리즘을 New England 계통에 적용하여 과도안정도 상정사고 해석의 지표를 얻었다. 그리고 PSS/E의 결과와 비교 검증함으로써 제안한 이론과 알고리즘에 의해서 얻어진 지표가 과도안정도 상정사고 해석에 사용될 수 있음을 확인하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] H.K.Nam, Y.G.Kim, K.S.Shim, K.Y.Lee, A New Eigenvalue Sensitivity Theory of Augmented Matrix and Its Applications to Power System Stability Analysis, IEEE Trans., PE-464-PWRS-0-02-1999, 게재승인
- [2] 남 해곤, 심 판식, 김 용구, 확대행렬의 고유치감도 이론과 전력계통 안정도해석에의 응용 PART I : 확대행렬의 고유치감도 이론, 대한전기학회 논문지, 1998. 12
- [3] 남 해곤, 심 판식, 김 용구, 확대행렬의 고유치감도 이론과 전력계통 안정도해석에의 응용 PART II : 미소신호 안정도 해석에 응용, 대한전기학회 논문지, 1998. 12
- [4] 남 해곤, 심 판식, 김 용구, 확대행렬의 고유치감도 이론과 전력계통 안정도해석에의 응용 PART III : 전압안정도 해석에 응용, 대한전기학회 논문지, 1998. 12
- [5] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill Book Company, New York, 1994.