

제어기 매개변수를 고려한 전력계통의 고유치감도 해석에 관한 연구

권세혁* 노규민^① 김덕영* 김형철*

* : 고려대학교 전기공학과

Eigenvalue Sensitivity Analysis Based on the Structure of System State Matrix

S.H. KWON* K.M. RO^① D.Y. KIM* H.C. KIM*

* : Dept. of Electrical Engineering KOREA UNIVERSITY

ABSTRACT

An approximate method for the dominant eigenvalue of one machine connected to the infinite bus has been suggested. This method is based on combining the traditional eigenvalue sensitivity analysis and the structure of the system state matrix. Numerical examples are presented. This method is considered to be quite useful in the stability analysis for various initial conditions and for adjustment of generator controller parameters.

1. 서론

1기발전기-무한모선계통의 경우 계통상태행렬 A행렬의 구조를 파악하고 이에 근거하여 고유치감도를 계산하는 과정을 고찰하였다. 고유치감도계산에는 임의의 계통파라미터 α 를 미소 조정하였을때, 상태행렬A의 미소변화분 $\partial A/\partial \alpha$ 를 파악하여야 하는데, 본 연구에서는 이를 행렬 구조적으로 파악하고자 하였다.

즉 계통상태행렬의 비영요소만을 발전기 제작회사가 공급한 데이터로부터 대수적으로 직접 계산할 수 있으며, 계통행렬을 여러개의 부분행렬로 분할할 경우 (1)발전기정수만으로 구성할 수 있는 부분행렬, (2)발전기 및 송전선정수만으로 구성할 수 있는 부분행렬, (3)발전기, 송전선정수 및 초기동작점(상태변수) (4)여자계통정수 및 (5)PSS정수등으로 구성할 수 있는 부분행렬로 나눌 수 있음을 보였다. 그러므로 여러개의 서로다른 초기동작점에 대하여 계통행렬을 각각 구성할 경우 또는 계통정수를 바꾼 경우 초기동작점에 관계되는 부분행렬 또는 계통정수와 관계있는 원소만을 제계산하면 된다. [1][2]

본 연구에서는 A행렬을 이루는 원소들의 대수적 표현을 명확히하여 미소변화 가능한 계통정수에 대한 고유치의 편미분(고유치감도계수 : Eigenvalue Sensitivity Coefficients)을 계산하는데 계통상태행렬의 구조를 이용하였으며 수치계산사례를 제시하였다.

2. 고유치감도해석

계통의 제동이 가장 크게 되도록 계통정수를 조절하려면 특정계통정수값을 미소증가시켰을때 계통의 무제동진동모드 또는 계통근에 가장 큰 영향을 미치는 계통정수를 파악할 수 있어야 한다. 고유치감도계수(Eigenvalue Sensitivity Coefficients)는 계통정수에 대한 고유치의 편미분으로 정의된다. 이를 사용하여 다기계통의 고유치해석결과를 이론적으로 해석할 수 있다. 즉 전력계통의 동태를 개선하기 위하여 발전기 제어기의 정수값을 정하는데 고유치감도계수를 사용하자는 것이다.

고유치감도계수를 계산하려면 우선 변화시키려는 계통정수에 대한 계통상태행렬의 미분을 알아야 한다. 계통상태행렬의 원소가 계통정수를 변화시키면 그값이 바뀌게 되는데, 극단적인 경우 행렬원소가 약간 변화할때 고유치가 대폭 변화할 수도 있다. 즉 고유치감도계수가 대단히 큰 경우이다.

계통상태행렬A의 고유치 및 고유벡터의 정의로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$AX_i = \lambda_i X_i \quad (1)$$

$$ATV_i = \lambda_i V_i \quad (2)$$

행렬이 전치되었을때 즉 AT의 고유치는 A행렬의 고유치와 같지만 같은 고유치에 대한 고유벡터는 서로 다르다. X_i 는 행렬 A의 고유치 λ_i 에 대한 고유벡터이고, V_i 는 행렬 AT의 고유치 λ_i 에 대한 고유벡터이다. 식(1)을 계통정수 α 에 대하여 편미분하여 양변에 V_i 와 스칼라적(scalar product)을 취하여 $\lambda_i V_i$ 대신 ATV_i 로 치환하면 식(3)이 되고 이 식을 (X_i, V_i) 로 양변을 나누어주면 결국 식(4)가 된다.

$$\left[\left[\frac{\partial A}{\partial \alpha} \right] X_i, V_i \right] = \left[\frac{\partial \lambda_i}{\partial \alpha} \right] [X_i, V_i] \quad (3)$$

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial \alpha} = \frac{\left[\left[\frac{\partial A}{\partial \alpha} \right] X_i, V_i \right]}{[X_i, V_i]} \quad (4)$$

식(4)를 관찰해보면 고유치감도계수는 수학적으로 스칼라적의 비로 표현할 수 있다. 스칼라적 $[X_i, V_i]$ 는 $X_i^T V_i$ 로 정의한다. [4]

3. 제어계통을 포함한 계통상태행렬의 구조

여자계통 및 전력계통안정기(Power System Stabilizer: PSS)등의 제어효과를 고려할 경우 계통행렬A의 각 비영원소를 직접적으로 계산할 수 있다. 발전기를 상세한 전류모델로 표현하고, 여자를 IEEE Typel로, PSS는 속도변차 입력신호형이라고 가정할때 A행렬을 다음과 같이 4x4블록으로 나타낼 수 있다.

| | | | | | | | | |
|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 전압 | X | X | X | X | X | X | | |
| | X | X | X | X | X | X | | |
| | X | X | X | X | X | X | | |
| | X | X | X | X | X | X | | |
| | X | X | X | X | X | X | | |
| 동요 | X | X | X | X | X | X | | |
| | | | | | | X | | |
| 여자기 | X | X | X | X | X | X | X | |
| | | | | | | X | X | X |
| | | | | | | X | X | X |
| PSS | X | X | X | X | X | X | | X |
| | X | X | X | X | X | X | | X |
| | X | X | X | X | X | X | | X |

그림 1 전류모델의 경우 계통행렬의 블록화된 구조

그림1에서 X 또는 X로 표시되어있는 곳이 비영원소의 위치이다. X는 초기동작점과는 관련이 없는 비영요소를 의미하며, X는 초기동작점에 관련된 비영요소를 의미한다. 계통정수의 변화없이 여러개의 서로 다른 초기동작점에 대한

동태안정도 해석시에는 이들 X표시된 원소만을 다시 계산하면 된다.

위 행렬의 모든 원소는 제작회사 공급데이터 및 초기동작점 계산결과로부터 대수적인 표현이 가능하므로 각 원소가 어떻게 데이터 및 초기동작점과 관련되어지는가를 알 수 있다.

4. 고유치감도공식을 적용한 A행렬의 구조

고유치 감도계수를 구하려면 감도행렬 ($\partial A/\partial \alpha$)를 구하여야 하는데 계통행렬 A의 모든 비영원소를 계통정수 및 초기동작치들의 대수적 표현으로 나타냈으므로 이를 직접적으로 구할 수 있다. 제어기정수중 많은 정수들은 실제적인 제약점 또는 전력계통의 운용상 변화시킬 수 없다. 여기서는 전력계통안정기의 정수들 중에서 K_{QS} , τ_a , τ'_{a1} 및 τ_{Q1} 등은 매우 넓은 범위에서 변화시킬 수 있다고 보았다. 또한 여자계통의 정수들 중에서는 여자계통 안정화 피드백루프의 정수인 K_F 와 τ_F 가 제한된 범위내에서 조절할 수 있다고 보았다. [4]

그림1의 행렬을 블록별로 나누어서 생각하고 $\partial A/\partial \tau_F$ 를 예시하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \partial A \\ \partial \tau_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

여기서

$$B_{33} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega R K_F (S'_E + K_E) / (\tau_E \tau_F^2) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

5. 고유치감도계산의 수치계산에

수치계산으로서 주어진 동작점 및 계통정수에 대한 상태행렬을 구성하고, 이 행렬의 14개의 고유치를 구하여 그중 전기기계적 진동모드와 관련된 고유치(dominant eigenvalue)를 선정하여 제어계통의 매개변수 $\tau_F, K_F, \tau_a, \tau_{Q1}, \tau'_{a1}$ 및 K_{QS} 등 6개를 각각 1%, 5%, 10% 씩 변화시킨 경우 고유치에 미치는 영향을 조사하였다. 즉, 어떤 매개변수의 변화가 고유치에 가장 큰 영향을 미치는가 살펴 보았다. 그리고 이 고유치의 변화율과 더불어 이미 고유치감도(Eigenvalue Sensitivity)공식을 이용하여 얻은 고유치의 변화율을 전자의 방법으로 얻은 고유치의 변화율과 상호 비교 검토한다.

참고문헌[1]의 예제에 있는 초기동작점 및 계통정수를 이용하여 고유치감도 계산예를 보인다. 발전기가 $Re = 0.02$ p.u., $Le = 0.4$ p.u.의 송전선을 통하여 무한모선에 연결되어 있다고 가정한다.

발전기 정수

$L_{AD} = 1.55$ $L_{A0} = 1.49$ $L_d = 1.70$ p.u.
 $L'_q = 1.64$ p.u. $L'_d = 0.245$ p.u. $L''_q = 0.380$ p.u.
 $L''_d = 0.185$ p.u. = L''_q $t_d = t'_q = 0.15$ p.u.
 $\tau'_{d0} = 5.9$ sec $\tau''_d = 0.023$ sec $\tau''_{q0} = 0.075$ sec
 $H = 2.37$ sec $r = 0.001096$ p.u.

발전기출력을 $P=1.0$ p.u., 0.85 P.F.이고 무한모선 전압이 1.0 p.u.일 경우의 초기동작점은 다음과 같다.

초기동작조건

$I_{d0} = -0.91856$ $I_{q0} = 0.40472$ $V_{d0} = -0.80656$
 $V_{q0} = 0.59178$ $\Lambda_{d0} = 0.96764$ $\hat{\Lambda}_{d0} = 0.59987$

이 발전기에 다음과 같은 IEEE Type 1 여자계통과 입력 신호를 $\Delta \omega$ 로 하는 PSS가 설치되어 있다고 했을 때 제어계통 정수들은 다음과 같다.

여자계통정수

$\tau_R = 0.01$ sec = 3.77 p.u. $\tau_E = 0.5$ sec = 188.5 p.u.
 $K_R = 1.0$ $K_E = -0.05$ $\tau_A = 0.05$ sec = 18.85 p.u.
 $\tau_F = 0.715$ sec = 269.55 p.u. $K_A = 40$
 $K_F = 0.04$ $S_E' = 0.3095$

PSS정수

$\tau_Q = 10$ sec = 3770 p.u. $\tau_{Q1} = \tau_{Q2} = 0.0227$ sec = 8.5579 p.u.
 $\tau'_{Q1} = \tau'_{Q2} = 0.568$ sec = 214.136 p.u. $K_{QS} = 1.0$

위에 주어진 계통정수 및 초기동작치로부터 A행렬의 비영원소들의 대수적 표현식에 대입하여 그림 2와 같은 14x14 계통상태행렬을 구하였다.

계통상태행렬의 14개의 고유치를 CTLMAT프로그램으로 계산하여 표1에 나타내었다. λ_8 및 λ_9 이 전기기계적 진동모드에 관련된 진동고유치이다.

표 1 계통상태행렬의 고유치 (: 전기기계적 진동모드)

| | $\lambda = -\alpha \pm j\beta$ | |
|----|--------------------------------|-------------|
| 1 | -35.9243E-3 | -998.103E-3 |
| 2 | -35.9243E-3 | 998.103E-3 |
| 3 | -265.250E-3 | .000000 |
| 4 | -121.577E-3 | .000000 |
| 5 | -132.451E-3 | .000000 |
| 6 | -103.437E-3 | -24.0987E-3 |
| 7 | -103.437E-3 | 24.0987E-3 |
| 8 | -2.67149E-3 | 29.5222E-3 |
| 9 | -2.67149E-3 | 29.5222E-3 |
| 10 | -24.0228E-3 | -9.12716E-3 |
| 11 | -24.0228E-3 | 9.12716E-3 |
| 12 | -1.05823E-3 | -2.19081E-3 |
| 13 | -1.05823E-3 | 2.19081E-3 |
| 14 | -265485E-3 | .000000 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|----|----------|-----------|-----------|----------|-----------|----------|----------|-----------|---------|---------|----------|--------|---------|---------|
| 1 | -36.0620 | -438860 | 14.1420 | -3487.10 | -2547.0 | -1411.30 | 1011.60 | -283140 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 12.4720 | -4.95020 | 76.8550 | 1206.00 | 880.85 | 488.09 | -349.85 | 3.19370 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 22.7760 | 4.35560 | -96.0150 | 2202.40 | 1608.60 | 891.350 | -638.900 | -2.81010 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 3589.70 | 2649.60 | 2649.60 | -36.0620 | 90.0800 | 1025.20 | 1387.70 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | -2505.40 | -2587.40 | -2587.40 | 35.2150 | -123.330 | -1001.30 | -1346.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | -0.1359 | -0.351000 | -0.351000 | -1.38450 | -0.765900 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1000.00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1.3767 | 0 | 0 | 3.3060 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 130.4 | 133.9 | 132.4 | 86.86 | 92.78 | 156.62 | -15.57 | .01699 | -865.28 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -0.077016 | 0 | -3.7098 | .29679 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -2122.0 | -2122.0 | -53.050 | 0 | 0 | 2122.0 |
| 12 | -0.1359 | -0.351000 | -0.351000 | -1.38450 | -0.765900 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -0.26525 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | -3.40050 | -8.78270 | -8.78270 | -34.6430 | -19.1640 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 110.21 | -116.85 | 0 |
| 14 | -8.50870 | -219.760 | -219.760 | -866.840 | -479.530 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2757.8 | -2807.0 | -116.85 |

그림 2 여자계통 및 PSS를 고려한 경우의 계통상태행렬 ($\times 10^{-3}$)

계통행렬의 각 대개변수를 각각 1%, 5%, 및 10%씩 변동했을 때 계통상태행렬을 재구성하여 구한 전기기계적 진동모드와 관련된 고유치를 표 2에 수록하였다. 여자기에서 τ_F 및 K_F 의 두개정수 그리고 PSS에서 $\tau_Q, \tau_{Q1}, \tau'_{Q1}$ 및 K_{QS} 의 네개정수의 변화에 대한 고유치의 변화이다. 여자기정수 τ_F 를 1% 증가시킨 경우 전기기계적 진동모드에 관련된 고유치 λ_9 이 원래의 값인 $-2.67149+j29.5222$ 에서 $-2.66527+j29.5255$ 로 변화하는것을 알수있다. 계통상태행렬의 모든 원소를 대수적으로 표현하였으므로 τ_F 의 변화시 어떤 원소값을 바꾸어야 하는지를 알수 있다.

표 2 계통정수의 변화시 고유치의 변화 ($\times 10^{-3}$)

| 원래 계통의 고유치 $\lambda_9 = -2.67149 + j29.5222$ | | | | | | |
|--|----------|---------|----------|---------|----------|---------|
| 1% 변화 | | 5% 변화 | | 10% 변화 | | |
| | 실수부 | 허수부 | 실수부 | 허수부 | 실수부 | 허수부 |
| τ_F | -2.66527 | 29.5255 | -2.64091 | 29.5376 | -2.61240 | 29.5502 |
| K_F | -2.67831 | 29.5195 | -2.70495 | 29.5085 | -2.73836 | 29.4933 |
| τ_Q | -2.67138 | 29.5223 | -2.67085 | 29.5225 | -2.67025 | 29.5228 |
| τ_{Q1} | -2.66750 | 29.5237 | -2.65126 | 29.5290 | -2.63093 | 29.5350 |
| τ'_{Q1} | -2.68194 | 29.5360 | -2.72305 | 29.5908 | -2.77425 | 29.6600 |
| K_{QS} | -2.67947 | 29.5372 | -2.71139 | 29.5976 | -2.75100 | 29.6738 |

표 3에 고유치 λ_9 에 대응하는 고유벡터 X 및 전치고유벡터 V 를 수록하였다. 고유치감도계수 $\partial \lambda_9 / \partial \alpha$ 를 구하려면 $\partial A / \partial \alpha$ 를 알아야하는데 식(5)에 제시된 $\partial A / \partial \alpha$ 행렬 및 고유벡터로부터 다음과 같이 계산할 수 있다. 여기서는 여자기정수 τ_F 를 1%, 5%, 및 10%를 정상적인 값에서 증가시킨 경우의 감도계산예를 들기로 한다.

$$\frac{\partial A}{\partial \tau_F} \quad (10,8) = \omega R K_F (S_E' + K_E) / (\tau_F^2 \tau_E) = 2.8574 \times 10^{-7}$$

$$\frac{\partial A}{\partial \tau_F} \quad (10,10) = 1 / \tau_F^2 = 1.3763 \times 10^{-5}$$

$$\frac{\partial A}{\partial \tau_F} \quad (10,11) = -\omega R K_F / (\tau_F^2 \tau_E) = -1.1011 \times 10^{-6}$$

(6)

표 3 λ_9 에 대응하는 계통상태행렬의 고유벡터 및 전치고유벡터

| 고유벡터 X | | 전치고유벡터 V | |
|--------------|---------------|--------------|---------------|
| 실수부 | 허수부 | 실수부 | 허수부 |
| .2288421E-1 | -.1950907E-01 | -.2797923E-2 | .4220699E-01 |
| -.2008739E-1 | .1544539E-01 | -.1923349E-2 | .4477748E-01 |
| -.3623008E-2 | .3018617E-02 | -.2663768E-2 | .4241142E-01 |
| -.5537954E-2 | -.7304973E-03 | .5667528E-2 | -.1517201E-02 |
| .1752849E-2 | .7212579E-02 | .6146686E-2 | -.1491722E-02 |
| -.4040386E-3 | -.4490441E-03 | .1000000E+1 | -.2629190E-16 |
| -.1385846E-1 | .1494001E-01 | -.2917122E-2 | .2946751E-01 |
| -.7866016E-2 | -.1793504E+00 | .3912783E-3 | -.8673133E-04 |
| -.1239431E-2 | .1001906E-02 | -.2910161E-3 | .1550098E-03 |
| .8211587E-3 | -.1004476E-01 | .9899741E-3 | .2778206E-02 |
| .1000000E+1 | .6388661E-16 | .3816720E-4 | -.1513233E-04 |
| -.4003246E-3 | -.4529770E-03 | .8846878E-2 | -.1481775E-01 |
| .1906891E-2 | -.3281381E-02 | -.1115583E-1 | .1359152E-01 |
| .2332278E-1 | .4869573E-02 | .5967252E-3 | -.4355236E-03 |

이상의 원소를 제외하고 $\partial A / \partial \tau_F$ 의 다른 모든 원소는 영이다.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial A}{\partial \tau_F} \end{bmatrix} X = 2.8574 \times 10^{-7} \times (-.7866016 \times 10^{-2} - j.1793504) + 1.3763 \times 10^{-5} \times (.8211587 \times 10^{-3} - j.1004476 \times 10^{-1}) - 1.1011 \times 10^{-6}$$

$$= (-1.0920 - j.1895) \times 10^{-6} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial A}{\partial \tau_F} \end{bmatrix} X, V = (-1.0920 - j.1895) \times 10^{-6} \times (.9899741 + j2.778206) \times 10^{-3}$$

$$= 3.2687 \times 10^{-9} \angle -99.773^\circ \quad (8)$$

고유치감도계산공식(4)에 의거 τ_F 에 대한 고유치감도를 계산하면

$$\frac{\partial \lambda}{\partial \tau_F} = \frac{\begin{bmatrix} \frac{\partial A}{\partial \tau_F} \end{bmatrix} X, V}{[X, V]} = (2.3645 + j1.2661) \times 10^{-6}$$

(9)

미소증분량 $\Delta \lambda_9$ 를 계산하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \lambda}{\partial \alpha} \Delta \alpha = (2.3645 + j1.2661) \times 10^{-6} \times (2.6955)$$

$$= (6.3734 + j3.4127) \times 10^{-6} \quad (10)$$

식(9)의 결과값에 τ_F 의 1% 미소변화량 $\Delta \tau_F (2.6955)$ 를 곱하여 구한 식(10)의 결과값을 원시행렬의 고유치 λ_9 에 각각 더한, 즉 고유치감도공식에 의한 고유치를 λ'_9 라 하면 $\lambda'_9 = -2.66512 + j29.5256$ 이 된다.

계통정수 τ_F 의 변화에 따른 고유치 변화를 표 4에 보였다. 그림3에는 복소평면에서 고유치 λ_9 의 변화상황을 정밀계산결과 및 근사계산결과를 비교하였다. 근사계산결과는 $\Delta \tau_F$ 를 크게 할수록 λ_9 에서 28.167°의 방향의 직선상으로 고유치가 움직인다는 것을 알수있다. $\Delta \tau_F$ 가 커질수록 오차가 커진다는 것을 관찰할수 있다.

표 4 τ_F 의 변화에 따른 고유치 λ_9 의 변화 ($\times 10^{-3}$)

| $\tau_F = 269.55$ | $\lambda_9 = -2.67149 + j29.5222$ | |
|-------------------|-----------------------------------|-------------------|
| | 정밀 계산 | 감도에 의한 근사계산 |
| τ_F 1% 증가 | -2.66527+j29.5255 | -2.66512+j29.5256 |
| τ_F 5% 증가 | -2.64091+j29.5376 | -2.63962+j29.5393 |
| τ_F 10% 증가 | -2.61240+j29.5502 | -2.60776+j29.5563 |

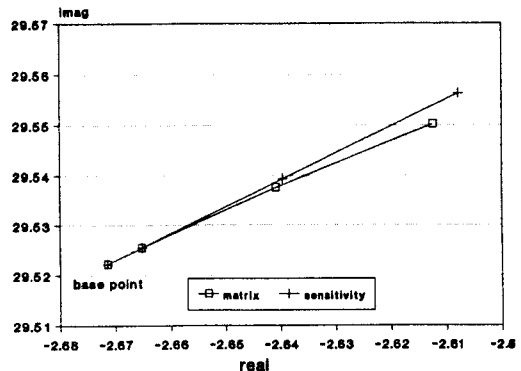


그림 3 τ_F 의 1%, 5%, 10% 변화에 대한 고유치의 변화

그림3에 □기호로 표시된 정밀계산결과는 A행렬을 τ_F 의 변화시 일일히 수정한 다음 고유치계산 프로그램(CITMAT)으로 일일히 계산한 결과이다. 그리고 +로 표시된 근사계산결과는 A행렬의 기본케이스에 대해서 고유치감도법으로 계산된 것이며, 감도계산시 계통행렬의 구조를 최대한 이용하였

으므로 큰 계산부담없이 고유치의 변화를 추정한다는 장점이 있다. τ_F 와 마찬가지로 방법으로 K_F 에 적용한 결과의 그래프는 그림4와 같다. 이를 PSS의 계통파라미터에 적용할수도 있다.

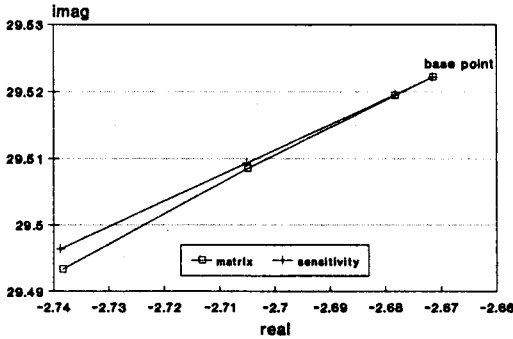


그림 4 K_F 의 1x, 5x, 10x 변화에 대한 고유치의 변화

위와같은 일련의 계산과정을 거쳐 나머지 다섯개의 계통 파라미터의 변화에 따른 감도계수를 이용한 근사고유치 계산 결과와 표 2에 제시된 바와 같이 행렬A를 수정하여 고유치를 구한 정확한 고유치와의 비교를 표5에 보였다.

표 5 $K_F, \tau_a, \tau_{a1}, \tau'_{a1}, K_{qs}$ 의 변화에 따른 고유치의 변화

| 원시행렬의 고유치 $\lambda_0 = -2.67149 + j29.5222$ | | |
|---|---------------------|---------------------|
| | 정밀계산 | 감도에 의한 근사계산 |
| K_F 10x 증가 | -2.73836 + j29.4933 | -2.73877 + j29.4964 |
| τ_a 10x 증가 | -2.67025 + j29.5228 | -2.67009 + j29.5228 |
| τ_{a1} 10x 증가 | -2.63093 + j29.5350 | -2.63077 + j29.5360 |
| τ'_{a1} 10x 증가 | -2.77425 + j29.6600 | -2.77470 + j29.6581 |
| K_{qs} 10x 증가 | -2.75100 + j29.6738 | -2.75172 + j29.6725 |

τ_F 및 K_F 두개를 동시에 미소변화시켰을때의 결과는 τ_F 및 K_F 만을 각각 미소변화시켰을때의 결과와 중첩함을 보였다. τ_F 및 K_F 를 각각 5x 증가시키고 5x 감소시켰을 경우의 고유치 λ_0 를 표6에 나타내었으며 이 결과를 이용하여 실제적으로 그래프화하여 나타내면 그림5와 같다.

표6 τ_F, K_F 각각의 변화와 동시변화에 대한 행렬고유치 결과

| 원시행렬의 고유치 $\lambda_0 = -2.67149 + j29.5222$ | | |
|---|---------------------|-------------|
| | 정밀계산 | 감도에 의한 근사계산 |
| τ_F 5x 증가시 변화량 | 0.03187 + j0.0171 | |
| K_F 5x 감소시 변화량 | 0.03364 + j0.0129 | |
| 중첩시 변화량 | 0.06551 + j0.030 | |
| 정밀계산 고유치 | -2.60834 + j29.5477 | |
| 감도에 의한 근사계산고유치 | -2.60598 + j29.5522 | |

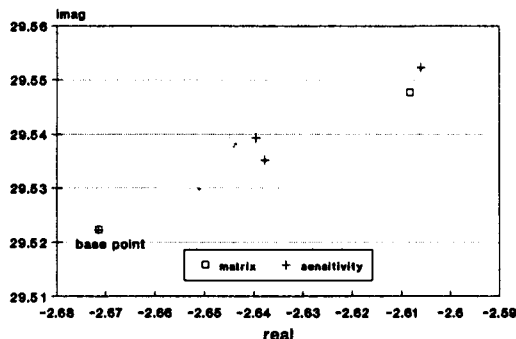


그림 5 τ_F 및 K_F 동시변화시 고유치 λ_0 의 변화

이들 경우를 식 4의 고유치감도공식을 이용했을때의 결과와 비슷함을 그림5를 통해서 알수있다. 앞의 경우에서 PSS계통 파라미터 τ_a 를 추가하여 세개가 동시에 미소변화한 결과는 표7과 같고 이를 그림6에 나타내었다.

표 7 τ_F, K_F, τ_a 각각의 변화와 동시변화에 대한 행렬고유치 결과

| 원시행렬의 고유치 $\lambda_0 = -2.67149 + j29.5222$ | |
|---|---------------------|
| τ_F 5x 증가시 변화량 | 0.03187 + j0.0171 |
| K_F 5x 감소시 변화량 | 0.03364 + j0.0129 |
| τ_a 10x 증가시 변화량 | 0.00140 + j0.0006 |
| 중첩시 변화량 | 0.06691 + j0.0306 |
| 정밀계산 고유치 | -2.60709 + j29.5482 |
| 감도에 의한 근사계산고유치 | -2.60458 + j29.5528 |

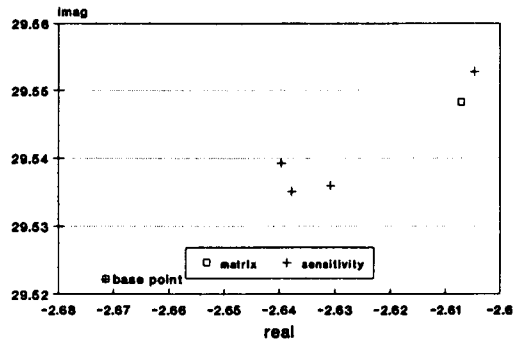


그림 6 τ_F, K_F 및 τ_a 동시변화시 고유치 λ_0 의 변화

미소신호안정도계산시 계통상태행렬 A의 구조를 이용하여, 계통정수의 변동에 따른 고유치의 변화분을 계산할때 이들 계통행렬원소들의 대수적표현식을 알고 있으므로, 간단한 연산으로 고유치를 추정한다는 방법을 제시하였다.

6. 결론

계통상태행렬의 대수적표현을 알고 있으므로 계통 파라미터값이 미소변화하면 행렬의 구조에 근거하여 해당 원소만을 변화시켜줌으로서 $\partial A / \partial \alpha$ 행렬(4절에서 B행렬)을 쉽게 구할수 있다. 수치계산에서 고유치감도공식을 이용한 근사계산에 의한 고유치와 정밀계산에 의한 결과를 비교할때 근사적인 계산을 할수있음을 보였다. 이방법은 1기-무한대선 계통에서 동작점을 여러개로 변화시키거나 또는 여자계통, PSS 및 조속기동의 제어계통정수를 조절하여 주된 고유치의 변화를 알고싶은 경우 매우 유효한 근사계산수단이 되리라 생각된다.

7. 참고문헌

- [1] 권세혁, 송길영, "발전기-무한대선계통의 동태안정도해 석시 A행렬의 구조", 전기학회는문지, 제39권 제1호, pp1-9, 1월, 1990.
- [2] 권세혁, "저차모델계통의 계통행렬의 구조", 전기학회는문지, 제39권 제11호, pp139-145, 11월, 1990.
- [3] P.M. Anderson and A.A. Fouad, "Power System Control and Stability", Iowa State University Press, Ames, Iowa, 1977.
- [4] Nelson Martins, "Eigenvalue Analysis of Multimachine Power Systems", Ph.D. Thesis, The Victoria University of Manchester, September, 1978.