Rayleigh Quotient와 Deflation을 이용한 대형多機전력계통의 고유치 해석

Modal Analysis of Large Scale Multi-Machine Power System using Rayleigh Quotient and Deflation

심 관 식° 남 해 곤
전남대학교 전기공학과

Kwan-Shik Shim° Hae-Kon Nam
Department of Electrical Engineering, Channam National University

Abstract

This paper describes an efficient method of computing any desired number of the most unstable eigenvalues and eigenvectors of a large scale multi-machine power system. Approximate eigenvalues obtained by Hessenberg process are refined using Rayleigh quotient iteration with cubic convergence property. If further eigenvalues and eigenvectors are needed, the procedure described above are repeated with deflation. The proposed algorithm can cover all the model types of synchronous machines, exciters, speed governing system and PSS defined in AESOPS.

The proposed algorithm applied to New England test system with 10 machines and 39 buses produced the results same with AESOPS in faster computation time. Also eigenvectors computed in Rayleigh quotient iteration makes it possible to make eigen-analysis for improving unstable modes.

1. 서론

최근 전력계통에서 심각한 문제로 대두되고 있는 저주파진동의 원인과 대책을 해석하는 미소신호 안정도 해석은 비교적 작은 외란에 긴 시간동안의 계통반응을 해석하므로 상세한 선형모델을 필요로 한다. 계통상태행렬 A가 크기가 매우 크면 고유치해석에 QR법의 사용이 불가능하고, 상태행렬 A를 스파스(sparse) 구조의 각 기기의 상태방정식과 조류계산식을 이용하여 간접적으로 연산처리하는 특수한 알고리즘을 필요로 한다. Martin에 의하면 [2] 미소신호 안정도 해석법은 다음과 같이 크게 두가지로 분류할 수 있다.

<u>One-at-a-time-eigenvalue calculation</u>

1. Inverse iteration Method [2]
2. AESOPS [3]
3. PEALS [4]
4. Newon Raphson Method [6, 7]

<u>Simultaneous Calculation of a Group of Relevant Eigenvalues</u>

1. S-transformed Lanczos Method applied to
   $f(A) = (A+hI)(A-hI)^{-1}$ [8,9]
2. Simultaneous Iterations applied to $f(A)=(A-qI)^{-1}$ [10]
3. Modified Arnoldi Method applied to $f(A)=(A-qI)^{-1}$ [10]

일반적으로 <u>한번에 한개씩 고유값을 계산하는 방법</u>은 고유값을 서로 독립적으로 계산하므로 한 고유값을 구하는 과정에서 얻어진 정보들이 다른 고유값들을 구하는데 이용되지 못하므로 비효율적이고, 사용하는 초기치 부근의 고유치로 수렴하는 특성을 가지므로 한 고유치를 이중으로 계산하거나 어떤 고유값은 전혀 계산하지 못할 가능성을 배제할 수 없다.

관련된 <u>고유값들을 동시에 계산하는 방법</u>은 이러한 단점들을 극복하는 장점이 있지만다음과 같이 개선의 여지가 있다. Lanczos method는 계통행렬을 이중대각행렬로 변환하고 Arnoldi method는 Hessenberg 행렬로 변환하여 고유치를 계산하는데 모두 수치적으로 불안정하여 재직교화(re-orthogonalization) 과정이 필수적이므로 계산시간면에서 비효율적이다. 지금까지 제안된 모든 미소신호 안정도 해석법은 회전자의 위상각을 상태변수로 사용하고 있는데 동기화전력계수(synchronizing power coefficients)가 회전자의 위상차에 의존하므로 이를 상태변수로 사용하는 것이 더 바람직하다.

본 연구는 이미 발표된 논문의[8, 9] 연장선상에서 보다 효율적으로 가장 불안정한 모드(mode)의 순서로 원하는 수만큼의 고유값을 발견하는 통합적인 미소신호 안정도 해석법을 제안하였다. 계통모델은 확대(augmented)행렬 형태로 일반화 하였으며 동기기, 여자기, 조속기의 다양한 모델과 AESOPS에서 정의하였던 다양한 부하 형태 까지도 수용하고 있다. S-변환된 계통상태행렬에 Hessenberg process를[9] 적용하여 구한 근사고유값을 Rayleigh quotients iterations을 이용하여 정확한 값을 계산한 후 만일 더 많은 고유치가 필요하다면, invariant space를 사용하여 계산된 고유치를 제거하고 나머지 고유치만을 포함하는 deflation된 축약 계통상태행렬에 Hessenberg process와 Rayleigh quotients iterations 과정을 다시 적용하여 다시 가장 불안정한 고유치들을 계산한다. Rayleigh quotients iterations에서 계산되는 左右고유백터는 고유치 감도해석(eigen-sensitivity analysis)을 가능하게 한다.

Rayleigh quotient법의 빠른 cubic 수렴특성, Hessenberg process의 수치적으로 안정성 및 deflation은 제안된 방법의 효율성과 신뢰도를 보장한다.

2. 동기기의 선형모델

일반적으로 미소신호 해석에서 개개의 발전기는 기계기준축 좌표에서 선형적으로 나타낼 수가 있는데 다음과 같다.

$$\Delta \dot{x}_j = A_{Gj}\,\Delta x_j + C_{Gj}\,\Delta z_j + B_{Gj}\,\Delta u_j + H_j \Delta \omega_r \qquad (1)$$

이때 Δx_j는 j번째 발전기의 상태변수 백터이고, Δu_j는 입력백터이며, 그리고 Δz_j는 각 기기의 상태변수들과 조류계산식을 연결하는 매개변수 백터로 계통기준축으로 나타낸 모선전압 백터 $(V_{Rj},V_{Ij})^T$와 각 발전기의 기계축으로 나타낸 단자전류 $(I_{dj},I_{qj})^T$만으로 구성된다.

상차각을 상태변수로 취하기 위하여 계통기준축을 기준 발전기(reference machine)의 회전자 위상각으로 취하는데 식(1)에서 $H_j \Delta\omega_r$은 r번째의 기준 발전기의 회전자 위상각과 j번째의 발전기의 회전자 위상각과의 상차각을 상태변수로 취하기 위한것으로, 이때 j번째 발전기의 위상각 상태변수를 다음과 같이 취함에서 발생하는 항이다.

$$\Delta \dot{\delta}_j = \Delta \omega_j - \Delta \omega_r \qquad (2)$$

여기에서 ω_r은 기준 발전기의 회전자속도 나타내고 있다.

3. 계통방정식[8, 9]

계통방정식은 발전기의 단자전압과 전류 사이에 대수적인 관계를 나타내는데, 이것은 크게 발전기 내부전압강하를 나타내는 식과 조류계산식으로 분류할 수 있다.

3.1 발전기 내부전압강하식

기계기준축좌표에서 j번째 발전기의 내부전압강하와 단자전압/전류와 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} E_{qj}' \\ E_{dj}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -X_{daxj} & R_{Aj} \\ R_{Aj} & X_{qaxj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dj} \\ I_{qj} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_{qj} \\ E_{dj} \end{bmatrix} \tag{3}$$

여기에서 X_{daxj}와 X_{qaxj}는 각각 사용하는 발전기 모델에 따라서 결정되는 d,q축 synchronous, transient, subtransient reactances이고, 발전기 내부전압 E_{dj}'와 E_{qj}'는 상태변수인 회전자 쇄교자속의 선형결합으로 표현된다. 여기에서 기계기준축좌표로 표현되어 있는 발전기 단자전압을 계통기준축좌표로 변환한 후 선형화 하면,

$$\begin{bmatrix} -X_{daxj} & R_{Aj} \\ R_{Aj} & X_{qaxj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_{dj} \\ \Delta I_{qj} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos\delta_{jo} & \sin\delta_{jo} \\ -\sin\delta_{jo} & \cos\delta_{jo} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E_{Rj} \\ \Delta E_{Ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta E_{qj}' \\ \Delta E_{dj}' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -E_{djo} \\ E_{qjo} \end{bmatrix} \Delta\delta_j \tag{4}$$

여기에서 ΔE_{Rj}와 ΔE_{Ij}는 계통기준축좌표로 나타낸 발전기 단자전압이다.

3.2 조류계산식

모선 어드미턴스행렬을 사용한 조류계산식을 편의상 발전기모선과 부하모선을 분리하고 선형화하면,

$$Y_{GG}\Delta E_G + Y_{GL}\Delta E_L + \Delta I_{GL} = \Delta I_G \tag{5}$$

$$Y_{LG}\Delta E_G + Y_{LL}\Delta E_L + \Delta I_{LL} = 0 \tag{6}$$

여기에서 I_G, E_G는 계통기준축좌표로 나타낸 발전기의 단자전류와 전압백터이고 E_L은 부하모선 전압백터이다. I_{GL}과 I_{LL}은 각각 발전기모선과 부하모선에서 연결되어 있는 부하에 흐르는 전류이다.

j번째 발전기에 대하여 계통기준축 전류와 기계기준축 전류 사이의 선형화 된 관계식은[8, 9]

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{GRj} \\ \Delta I_{GIj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta_{jo} & -\sin\delta_{jo} \\ \sin\delta_{jo} & \cos\delta_{jo} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_{qj} \\ \Delta I_{dj} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -I_{Ijo} \\ I_{Rjo} \end{bmatrix} \Delta\delta_j \tag{7}$$

비선형부하에 대해서 j번째 부하모선 대한 어드미턴스 행렬을 선형화 하면[3]

$$\begin{bmatrix} \Delta I_R \\ \Delta I_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_1 & -B_1 \\ B_2 & G_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E_R \\ \Delta E_I \end{bmatrix} \tag{8}$$

식(7)와 식(8)을 식(5)-(6)에 대입하고 실수와 허수를 분리하여 정리하면,

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} B_{GG} & G_{GG} \\ G_{GG} & -B_{GG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E_{GR} \\ \Delta E_{GI} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{GL} & G_{GL} \\ G_{GL} & -B_{GL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E_{LR} \\ \Delta E_{LI} \end{bmatrix} \\ &+ blockdiag\begin{bmatrix} B_{2G} & G_{2G} \\ G_{1G} & -B_{1G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{GR} \\ E_{GI} \end{bmatrix} \\ &- blockdiag\begin{bmatrix} \cos\delta_o & -\sin\delta_o \\ \sin\delta_o & \cos\delta_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_d \\ \Delta I_q \end{bmatrix} \\ &= blockdiag\begin{bmatrix} I_{RO} \\ -I_{IO} \end{bmatrix} \Delta\delta \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} B_{LG} & G_{LG} \\ G_{LG} & -B_{LG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E_{GR} \\ \Delta E_{GI} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{LL} & G_{LL} \\ G_{LL} & -B_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E_{LR} \\ \Delta E_{LI} \end{bmatrix} \\ &+ blockdiag\begin{bmatrix} B_{2L} & G_{2L} \\ G_{1L} & -B_{1L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{LR} \\ E_{LI} \end{bmatrix} = 0 \end{aligned} \tag{10}$$

여기서 $blockdiag$는 대각요소로 2×2행렬을 가지고 있는 대각행렬, G와 B는 Y_{BUS}행렬의 실수와 허수성분, B_{2G}, B_{1G}, G_{2G}, G_{1G}은 발전기 모선에 연결된 비선형부하를 식 (8)의 형태로 표현한 행렬의 원소들이고 B_{2L}, B_{1L}, G_{2L}, G_{1L}은 부하 모선에 연결된 비선형부하식을 표현하는 비대칭성 행렬의 원소이다. 이와같이 계통방정식에서 계통기준축 전압을 사용하면 계통방정식을 형성하는데 비교적 계산량이 적고 또한 비선형부하에 대해서도 적용이 가능하다.

3.3 확대계통방정식

n개의 발전기로 구성된 계통에 대해서 식(1), (4) 그리고 식(9)-(10)를 조합하면 계통방정식은 다음과 같다.

$$\dot{x} = A_G x + C_G z + B_G u \tag{11}$$

$$Ez = Fx \tag{12}$$

여기에서 계통상태행렬(system state matrix)은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$A = A_G + C_G E^{-1} F \tag{13}$$

4. Rayleigh quotient iterations [1]

Hessenberg process에 의하여 행렬A의 근사고유값이 계산되었다면, Rayleigh quotient iteration에 의하여 정확한 고유값과 고유백터를 계산할 수 있다.

Rayleigh quotient iteration은 역반복법(Inverse iteration)에서 변화한 것으로 Inverse iteration은 左右 고유백터를 계산하고 이때 Rayleigh quotient는 계산된 左右 고유백터를 이용하여 새로운 근사고유값을 계산한다. 이 과정을 반복하여 근사고유값이 정확한 고유값이 될때까지 계속한다.

이와같은 Rayleigh quotient iteration은 cubic 수렴특성을 가지므로 만일 근사한 고유값만 알고 있다면 아주 효율적으로 빠르게 정확한 고유값을 발견할 수가 있고 더불어 左右 고유백터도 계산한다.

행렬 A의 고유값 λ에 근사한 고유값을 μ_s라 하면 左右 고유백터와 Rayleigh quotient는 다음식으로 부터 계산할 수가 있다.

$$(A - \mu_s I) v_{s+1} = u_s \tag{14}$$

$$(A - \mu_s I)^T q_{s+1} = p_s \tag{15}$$

$$\mu_{s+1} = \frac{q_{s+1}^T A v_{s+1}}{q_{s+1}^T v_{s+1}} \tag{16}$$

$$u_{s+1} = \frac{v_{s+1}}{\max(v_{s+1})} \qquad p_{s+1} = \frac{p_{s+1}}{\max(p_{s+1})} \tag{17}$$

$(A - \mu_s I)$을 삼각분해하면 식(14)와 식(15)의 v_{s+1}과 q_{s+1}를 계산할 수 있고 식(16)으로 부터 새로운 고유치 근사값 μ_{s+1}를 구할 수 있다.

한편 배정도(double-precision)을 사용하지 않고 라운드오프 오차(round-off errors)의 영향을 최소로 하기 위해서는 식(16) 대신 식(18)를 사용하면 된다.

$$\mu_{s+1} = \mu_s + p_{s+1}^T (A - \mu_s I) u_{s+1} \; / \; (p_{s+1}^T \cdot u_{s+1}) \tag{18}$$

이때 $(A - \mu_s I) u_{s+1}$을 단정도(single precision)로 계산하면 상당히 큰 오차가 발생할 수 있으므로 이때는 inner products accumulation을 사용하여 백터 $(A - \mu_s I) u_{s+1}$을 계산한 후에 단정도값을 취하여 다음 계산을 행하면 된다.

확대계통행렬(augmented system matrix)을 사용하면 식(14)-(15)의 역반복법은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} A_G - \mu_s I & C_G \\ -F & E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s+1} \\ w_{s+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_s \\ 0 \end{bmatrix} \tag{19}$$

$$\begin{bmatrix} A_G - \mu_s I & C_G \\ -F & E \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} q_{s+1} \\ x_{s+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_s \\ 0 \end{bmatrix} \tag{20}$$

또한 고유값과 고유백터가 복소수라면 역반복법은 실수들만을 사용해서 연산을 수행할 수 있는데 고유값과 고유백터가 다음과 식과 같이 복소수라 하자.

$$\mu_{s+1} = \alpha_{s+1} + j\beta_{s+1}, \qquad v_{s+1} = vr_{s+1} + j\, vi_{s+1}, \tag{21}$$

$$w_{s+1} = wr_{s+1} + j\, wi_{s+1} \qquad u_{s+1} = ur_{s+1} + j\, ui_{s+1}. \tag{22}$$

그러면 식(19)은

$$\begin{bmatrix} A_G - \alpha_s I & \beta I & C_G & 0 \\ -\beta I & A_G - \alpha_s I & 0 & C_G \\ -F & 0 & E & 0 \\ 0 & -F & 0 & E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} vr_{s+1} \\ vi_{s+1} \\ wr_{s+1} \\ wi_{s+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ur_s \\ ui_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{23}$$

5. 불변부분공간을 이용한 Deflation [1]

Hessenberg process와 Rayleigh quotient iterations에 의하여 고유값 $\alpha + j\beta$와 고유백터 $x + jy$ 계산되었다면 이들 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$A[x,y] = [x,y]\begin{bmatrix} \alpha & \beta \\ -\beta & \alpha \end{bmatrix} \tag{24}$$

일반적으로 m개의 열을 가진 불변부분공간(invariant subspace)을 M이라면

$$AX = XM \tag{25}$$

여기에서 M은 $m \times m$ 행렬이고 만일 Q가 임의의 $n \times m$ 행렬이라면

$$Q^T X = I_m \tag{26}$$

이때 deflation을 수행한 후 새로이 만들어진 행렬을 A_2라 할 때, 행렬 A_2는 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$A_2 = (I - XQ^T)A \tag{27}$$

행렬 A_2의 고유값 중에서 n-m개이 고유값이 행렬A의 고유값과 같으며 불변부분공간 M에 속하는 m개의 고유값은 영으로 변화된다. 만일 J와 U가 $m \times m$ 행렬 이라면

$$Q^T = [J,\ K],\quad X^T = [U,\ V]^T \tag{28}$$

식(27)은 식(29)와 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$\dot{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -VU^{-1} & I \end{bmatrix} A \tag{29}$$

계산의 편리성을 위해서 불변부분공간 X는 $n \times m$ 단위하위삼각행렬(unit lower triangular matrix) T와 $m \times m$ 상위삼각행렬(upper triangular matrix) R의 곱으로 분리하여 표현할 수 있는데 다음과 같다.

$$PX = T\,R \tag{30}$$

여기에서 P는 $n \times n$ 순열행렬(permutation matrix)로 연산과정에서 수치적인 안정성을 유지하기 위한 pivoting행렬인데 $P^{-1} = P^T$ 관계가 성립한다. 이들을 이용하여 식(25)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$(PAP^T)T = T(RMR^{-1}) \tag{31}$$

여기에서 T가 $\bar{A} = PAP^T$의 불변부분공간임을 알 수 있고 $\bar{A}$를 deflation하면

$$\bar{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -VU^{-1} & I \end{bmatrix} \bar{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -VU^{-1} & I \end{bmatrix} PAP^T \tag{32}$$

식(32)에서 $\bar{A}_2$의 불변부분공간은 그들의 처음 m개의 행이 영이고 $\bar{A}_2$를 다시 반복할때는 이러한 형태를 갖는 초기백터 y_0로 부터 다시 시작을 할 수 있다. 모든 y_s는 이러한 형태를 유지할 것이다. 만일 $\bar{A}\,y_s$를 다음과 같이 정의하면

$$\bar{A}\ y_s = \begin{bmatrix} y_{1s} \\ y_{2s} \end{bmatrix} \tag{33}$$

이때 $\bar{A}_2\ y_s$는 $\bar{A}y_s$의 처음 m개의 행을 소거하기 위하여 $\bar{A}y_s$로 부터 T의 열의 배수를 감산함으로써 얻을 수 있는데, T가 단위 하위삼각행렬이므로 쉽게 연산을 할 수 있다.

6. 전체 프로그램의 과정

過程 1 : Hessenberg process에 의한 근사고유값 계산
過程 2 : 역반복법에 의한 고유백터 계산 [식 (14)-(15)]
過程 3 : Rayleigh quotient에 의한 정확한 고유값 계산 [식 (16)]
過程 4 : 정확한 고유값을 이용한 Deflation [식 (32)]
過程 5 : Deflation된 행렬에서 Hessenberg process를 이용하여 근사고유값 계산
過程 6 : 過程3 반복(필요시 過程4-6을 반복)

7. 결과 및 고찰

Rayleigh quotient iterations을 10기 39모선인 New England 시험계통에 적용한 결과는 표1과 같다. 표1에서 "AESOPS"은 AESOPS program에서 구한 고유값이고, "Rayleigh"는 좌측의 초기치를 사용하여 Rayleigh quotients iteration을 행한 결과로 계통상태행렬 A를 식(13)에 의하여 계산하고 IMSL을 사용하여 구한 결과와 동일하다. 또한 "Hessenberg process"는 S-변환된 계통행렬에 Hessenberg process를 이용하여 구한 고유값으로 초기백터의 refinement를 위한 power method의 반복회수는 40회이고 S-변환 상수 h는 6.0이다. 위에서 초기치를 Hessenberg process에서 구한 근사 고유치 값을 사용하지 않고 좀더 부정확한 값을 사용한 것은 Rayleigh quotient iterations의 수렴특성을 보여주기 위함이다.

표1. 계통상태행렬의 고유값

AESOPS		Hessenberg process		Rayleigh의 초기값		Rayleigh	
실수부	허수부	실수부	허수부	실수부	허수부	실수부	허수부
-0.0003	6.9632	-0.00150	6.98319	0.0	7.0	-0.00146	6.98324
-0.2838	3.8403	-0.28379	3.84139	0.0	4.0	-0.28380	3.84139
-0.2606	5.9903	-0.26117	5.99164	0.0	6.0	-0.26120	5.99163
-0.2509	6.3476	-0.25166	6.35773	0.0	6.3	-0.25244	6.35756
-0.2449	6.9842	-0.24810	6.98946	-0.2	6.98	-0.24481	6.98747
-0.2747	7.4470	-0.28552	7.49893	-0.2	7.5	-0.29032	7.49687
-0.3121	8.4770	-0.31042	8.47771	0.0	8.5	-0.31176	8.47796
-0.4040	8.6683	-0.40076	8.66706	-0.2	8.66	-0.40281	8.66878
-0.3648	8.7407	-0.36474	8.73799	0.0	9.0	-0.36550	8.74099

8. 결론

가장 불안정한 모드의 고유치들을 차례대로 발견하기 위하여 계통행렬에서 동기기, 여자기, 조속기, 그리고 다양한 형태의 부하 모델을 포함하는 확대행렬을 생성한 후에 S-변환과 Hessenberg process를 적용하여 근사고유값들을 계산한 후, 계산된 근사고유값에 Rayleigh quotient iteration을 적용하여 정확한 고유치와 左右고유백터를 계산하였고 필요에 따라 deflation을 적용함으로써 존재하는 전 계통의 불안정 모드의 고유치를 누락함이 없이 계산할 수 있는 효율적이고 통합적인 미소신호 안정도 해석방법을 제안하였다.

수치적으로 안정한 Hessenberg process와 빠른 수렴특성을 가진 Rayleigh Quotients iteration의 결합은 빠르고 정확한 결과를 도출했을 뿐만아니라 고유치의 모드 해석 및 감도해석에 기본자료로 이용할 수 있는 左右고유백터를 계산함으로써 앞으로 PSS 및 SVC 설치점 선정, 전압조정기등의 이득조정등 전반적인 계통안정도 향상에 유용하게 적용될 것으로 기대된다.

New England 시험 계통에 적용한 결과, AESOPS program의 결과와 같은 진동모드를 구하여 알고리즘의 정확성을 확인하였으며 전력계통의 안정도 해석에 이용되는 각종 동기기와 제어기를 비롯한 부하모델을 포함하여 실제 대형전력계통에 적용이 가능하다.

참 고 문 헌

[1] J. H. Wilkinson, The Algebraic Eigenvalue Problem, Clarendon Press, Oxford, 1965

[2] N. Martin, "Efficient Eigenvalue and Frequency Response Methods Applied to PowerSystem Small-Signal Stability Studies," IEEE Trans., PWRS-1, Feb., 1986.

[3] EPRI, PhaseII : Frequency Domain Analysis of Low Frequency Analysis Oscillations in Large Power System, Vol. 1 - Vol. 5, Final Report EPRI EL-2348, 1982.

[4] D. Y. Wong, G. J. Rogers, B. Porreta, and P. Kundur, "Eigenvalue Analysis of Very Large Power Sytems," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. PWRS-3, May 1988.

[5] A. Semlyen and L. Wang, "Sequential Computation of Complete Eigensystem for the Study Zone in Small-Signal Stabilty Analysis of Large Power Systems, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. PWRS-3, May 1988.

[6] N. Martins, H. Pinto and L. Lima, "Efficient Method For Finding Transfer Function Zeros Of Power Systems," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. PWRS-7, No. 3, August 1992.

[7] N. Uchida and T. Nagao, "A New Eigen-Analysis Method of Steady State Stability Studies for Large Power Systems : S Matrix Method," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. PWRS-3, No. 3, May 1988.

[8] Hae-Kon Nam, "Modal Analysis of Multi-Machine Power System Using Lanczos Process," KIEE Trans., Vol. 40, No. 10, 1991

[9] 남 해곤, 심관식, "S변환과 Hessenberg Process를 이용한 대형多機전력계통의 고유 치 해석", 대한전기학회 춘계논문집, 제28회, 1993.

[10] L. Wang and A. Semlyen, "Application of Sparse Eigenvalue Techniques to the Small Signal Analysis of Large Power Systems,' Proc. of 1989 Power Industry Computer Application Conference, May 1989.