1999년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 1999. 7.19-21

대규모 전력계통의 미소신호 안정도 해석을 위한 선형해석 프로그램 개발

송 성근* 남 해곤* 심 관식** 김 용구* 김 동준***
전남대* 서남대** 전기연구소***

Development Of Small Signal Stablility Linear Analysis Program for Large Scale Power System.

Sung-Geun Song* Ha-Kon Nam* Kwan-Shik Shim** Yong-Gu Kim* Dong-Joon Kim***
Chonnam National University* Seonam University** Korea Eletro-technology Research Institute***

Abstract - It is the most important in small signal stability analysis of large scale power systems to compute only the dominant eigenvalues selectively with numerical stability and efficiency. In this paper evoluted linear analysis program, transformed state matrix using Inverse transformation with complex shift and then Hessenberg process and iterative scheme are used to accelerate Hessenberg process, can calculate dominant eigenvalues.

In this paper, The accuracy of this program has been validated against 4-machines 11-bus system and New England 10-machines 39-bus system. Also applied to KEPCO system - about 791-bus 250-machines 2500-branches, got 2568 order state matrix, and calculated two dominant modes. This analysis result equaled to result of EPRI's SSSP program to use commonly, and calculating time is faster.

1. 서 론

대규모 전력계통해석 프로그램으로 많이 사용되는 PTI사의 PSS/E는 비선형해석에 대해서는 아주 우수한 성능을 지니고 있다. 그러나 선형해석에는 축약 상태행렬과 QR법을 이용함으로 해석 범위가 750차로 제한되며, 미소 외란 응답에 의한 상태행렬 구성으로 오차를 포함하고 있어, 대규모 전력계통에 선형해석이 어렵다. 따라서 대규모 계통해석을 위해서는 새로운 선형해석 프로그램 개발이 필요하다.

대규모 전력계통의 미소신호 안정도 해석에서는 상태행렬의 차수가 매우 커 축약상태행렬로의 계산은 불가능하므로, 스파스(Sparse)한 확대상태행렬[1]을 사용하여야 한다. 또한 모든 고유치를 계산하는 것이 불가능하고, 필요하지도 않으므로, 저주파진동에 관련된 몇 개의 지배적 전기기계적 진동모드만을 선별적으로 구하기 위해 전력계통 동적 시뮬레이션 결과를 퓨리에 변환하여 초기 복소수 이동점을 추정하는 복소수 역행렬 변환법을 사용하였다.[2] 또한 본 프로그램에서 사용된 Hessenberg process는 Arnoldi, Lanczos process와 같이 크기가 큰 고유치를 우선적으로 계산하는 특성이 있기 때문에 상태행렬을 변환하여 사용한다. 또한 이 방법에는 유수(residue)가 존재하여 계산된 결과는 근사 고유치이기 때문에, 오차를 허용치 이내로 유지하기 위해서는 반복법[4]을 사용할 필요가 있으며, 선형해석시 필요한 좌 고유벡터 계산을 위해, 근사고유치에 대해서는 2차의 빠른 수렴성을 가진 Rayleigh quotient법을 사용하여 좌·우 모든 고유벡터를 계산할 필요가 있다.

이 논문에서는 위와 같은 알고리즘을 사용하여 선별성 및 계산능력 뛰어난 선형해석 프로그램을 개발하였다. 그리고 개발한 프로그램의 기기모델 및 입력데이터 형식은 PSS/E에 바탕을 두었다.

2.미소신호 안정도 해석의 선형모델

미소신호 안정도 해석을 위한 전체 계통의 구조는 그림 1과 같으며, 미소신호안정도의 관심 시간영역이 5-30초 정도이므로 발전기, 여자기, PSS, FACTS 등의 기기는 상세히 모델링되어야 한다.

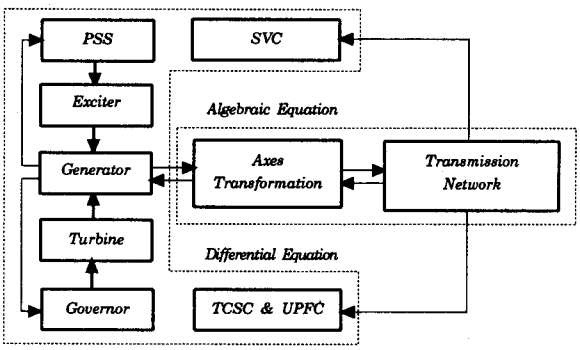

Fig. 1 Structure of the complete power system model.

기기와 관련된 상태방정식과 매개방정식은 다음과 같다.

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

$$\Delta i = C_G \Delta x - Y_G \Delta v \quad (2)$$

여기서 Δx와 Δu는 각각 상태변수 벡터와 입력변수 벡터이며, Δv는 계통기준축(R-I 축)으로 나타낸 모선전압 벡터로 각 기기의 상태변수들과 조류계산식을 연결하는 매개변수 벡터이며 Δi는 계통기준축으로 나타낸 기기들로부터 네트워크에 주입되는 단자전류이다.

그리고 이들 기기들을 연결하는 네트워크방정식은

$$\Delta i = Y_N \Delta v \quad (3)$$

로 정의한다. 식 (1)~(3)을 확대계통상태방정식(augmented system state equation)으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_G & B_G \\ -C_G & Y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_G \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (4)$$

또는

$$\tilde{\dot{x}} = \tilde{A}\tilde{x} + \tilde{B}\tilde{u} \quad (5)$$

여기서 행렬 $\tilde{A}$는

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} A_G & B_G \\ -C_G & Y \end{bmatrix} \quad (6)$$

으로 정의되고 이를 확대계통상태행렬이라 정의하며,

여기서

$$Y = Y_N + Y_G \tag{7}$$

이다.[1]

3. 선형해석 알고리즘

3.1 고유치해석 알고리즘

제동특성이 나쁜 지배적 고유치만을 선별적으로 빠른 시간내에 구하기 위하여 Hessenberg process와 반복 알고리즘을 사용하였으며, 선별성을 높이기 위해 Fourier 변환을 이용한 복소수 역행렬 변환법을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 초기 복소수 이동점을 계통해석시 병행되는 과도안정도 simulation을 10초 정도 수행한 결과를 Fourier 변환하여 구하였다.이에대한 자세한 설명은 이미 무헌[2]에서 자세히 설명하바 있다.

3.2. Rayleigh Quotient 법

위의 알고리즘에 의해 계산된 고유치는 정확한 반면 고유벡터는 그렇지 못하고, 선형시스템 이론에는 좌,우 고유벡터가 필요하므로 근사한 고유치에 대해서는 2차 수렴속도를 갖는 Rayleigh Quotient 법을 이용하여 정확한 좌·우 고유벡터를 구한다.

상태행렬 A의 근사 고유치가 λ_s라 하면

$$(A-\lambda_s I)v_{s+1} = u_s \tag{8}$$

$$(A-\lambda_s I)^T q_{s+1} = p_s \tag{9}$$

$$u_{s+1} = \frac{v_{s+1}}{Max(v_{s+1})} \tag{10}$$

$$p_{s+1} = \frac{q_{s+1}}{Max(q_{s+1})} \tag{11}$$

$$\lambda_{s+1} = \lambda_s + \delta_s \tag{12}$$

여기서

$$\delta_s = \frac{q_{s+1}^T (A-\lambda_s) v_{s+1}}{q_{s+1}^T v_{s+1}} \tag{13}$$

이며, Rayleigh Quotient법의 수렴은 이 값이 허용오차보다 작으면 된다. 그리고 q_{s+1}와 v_{s+1}는 각각 정확한 좌,우 고유벡터이다.

3. 확대행렬의 대수방정식

위와 같은 선형해석을 하기 위해서는 식(14)와 같은 행렬 연산을 반복 적용 해야 한다.

$$x = (A-j\omega I)^{-1} y \tag{14}$$

이 식을 확대행렬을 사용하여 나타내며 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} A_G - j\omega I & B_G \\ C_G & -Y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_r \\ 0 \end{bmatrix} \tag{15}$$

편의상 $A_G - j\omega I$를 A_{GD}라 하고, 이 식의 스파스한 특성을 해치지 않고 계산하는 방법은 다음과 같다.

(a) $Y_{EQ} = Y + C_G A_{GD}^{-1} B_G$을 계산.

(b) $Y_{EQ} z = C_G A_{GD}^{-1} c_r$에서 y를 계산.

(c) $A_{GD} x = c_r - B_G z$에서 x계산.

위의 계산 과정중 Y_{EQ} 계산시 $C_G A_{GD}^{-1} B_G$는 2×2 블럭대각형태이므로 기존의 Y행렬의 스파스한 구조를 손상시키지 않는다[5].

이상과 같은 일련의 과정을 알고리즘으로 표현하면 그림 2와 같다.

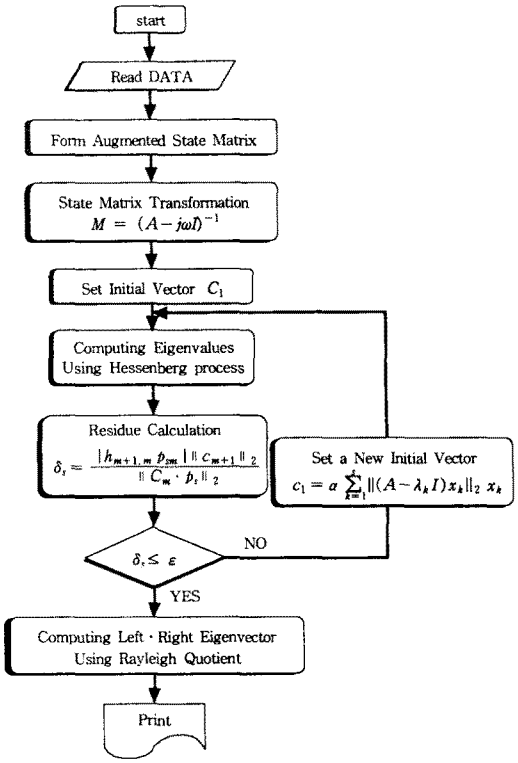

Fig. 2 Block diagram of Program

5. 전력계통에 적용 결과

본 논문에서는 계산하고자 하는 고유값의 개수인 s의 일정배수에서 Hessenberg 행렬의 subdiagonal 값이 작은 경우의 열을 m(s개의 고유값을 구하기 위해 계산해야 될 Hessenberg 행렬의 크기)으로 취하기로 하고, Hessenberg process의 허용오차(ε)를 10e-4, Rayleigh Quotient의 허용오차를 10e-8하여 프로그램을 수행하였다. 아래의 과도안정도 simulation 결과는 발전기모선에서 3상 지락사고를 0.05초간 모의한 것이며, 모든 결과는 P-II 400Mhz 개인용 컴퓨터에서 PSS/E를 사용하였다. 또한 각 기기의 선형 모델은 1기 무한모선을 PSS/E로 모의하여 검증하였으며, 4기 11모선 계통에 대해 다기계통의 적용을 확인 하였다.

5.1 시험 계통에서 선형모델의 정확성 검증

시험 계통의 복소수 이동점 산정에 의한 선택적인 고유치 해석은 이미 문헌 [2]에서 설명한 바 있으므로 시험계통들에 대해서는 프로그램의 정확성 검증을 위해 모든 고유치를 계산하였다. 아래의 표는 모든 고유치중 진동모드에 대한 고유치만을 비교한 것이다. 표 1과 2는 각각 4기 11모선 계통과 New-England 10기 39모선 계통에 대한 본 프로그램과 PSS/E의 선형해석 프로그램의 결과를 비교한 것이다.

표. 1 4기 11모선 계통의 결과 비교

PSS/E 선형해석 결과	Hessenberg의 계산 결과
-18.1224 +22.2750i	-18.1211 +22.2577i
-19.1722 +16.5187i	-19.1690 +16.5014i
-0.6653 + 7.0602i	-0.6667 + 7.0634i
-0.6695 + 7.2619i	-0.6697 + 7.2626i
-0.0025 + 3.8232i	-0.0071 + 3.8209i

표. 2 10기 39모선 계통의 결과 비교

PSS/E 선형해석 결과	Hessenberg의 계산 결과
-0.8931 + 8.8567i	-0.8867 + 8.8454i
-0.8151 + 8.8408i	-0.8030 + 8.8442i
-0.6986 + 8.6638i	-0.7046 + 8.5993i
-0.6268 + 7.6041i	-0.6207 + 7.5698i
-0.0411 + 7.0921i	-0.0532 + 6.9646i
-0.6045 + 7.0288i	-0.5968 + 6.9965i
-0.5231 + 6.4483i	-0.5046 + 6.3137i
-0.5238 + 6.0736i	-0.5117 + 5.9674i
-0.3656 + 3.8851i	-0.3463 + 3.7280i
-1.2455 + 1.6987i	-1.3228 + 1.7174i

표 1.2에서 PSS/E의 결과와 Hessenberg 수행 결과에 다소 차이가 있다. 이는 PSS/E의 선형해석 프로그램이 미소 외란 응답에 의해 상태행렬을 취득하기 때문으로 생각된다.

5.2 2000년 한전계통에 적용 결과

2000년 한전계통에 대해 PSS/E의 시뮬레이션 결과는 그림 3과 같다. 이중 제동특성이 나쁜 결과를 퓨리에 변환 하면 그림 4와 같다.

퓨리에 변환 결과 제동특성이 나쁜 주파수는 0.7 Hz와 1.1 Hz이므로 복소수 이동점은 4.4i와 6.9i가 된다. 이 이동점을 이용하여 고유치를 계산한 결과와, 상용프로그램인 EPRI의 SSSP의 결과 비교는 표 3에 나타나 있다. SSSP의 선형해석 결과는 주파수 0.2 ~ 2Hz에 대해 허용오차 0.5e-2으로 하였으며, 한 주파수당 계산될 고유치의 개수를 5개로 하여 0.12 Hz 씩 이동하면서 계산한 결과 중 진동주파수 부근의 결과만을 추출한 것으로, 15번 계산에 P-II 200MHz 개인용 컴퓨터에서 총 3분 30초 소요 되었으며, 이는 한 주파수 고유치 해석에 14초 정도 소요된 것이다.

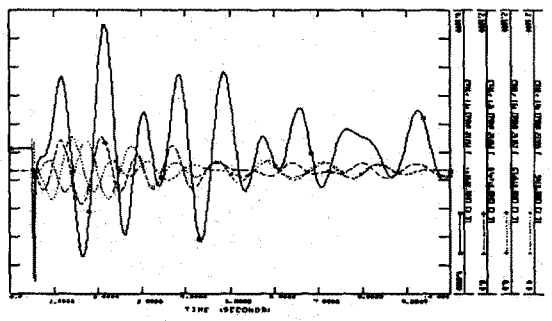

Fig.3 PSS/E result with KEPCO system

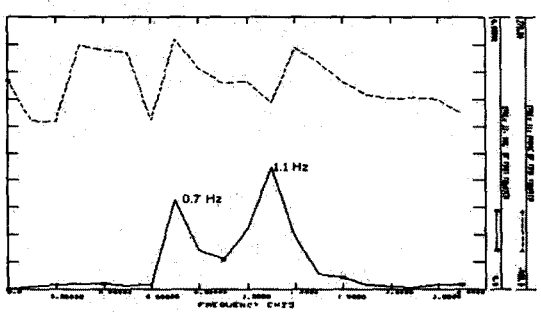

Fig.4 Fourier transformation result with KEPCO system

표. 3 SSSP의 결과와 본 프로그램 결과 비교

SSSP	Shift point 4.4i			Shift point 6.9i		
	Loop	Del	Time	Loop	Del	Time
	0	4.4e-4	6.82	0	6.2e-4	6.37
	Eigenvalue			Eigenvalue		
-0.9987 + 4.2025i	-0.0416 + 4.3365i			-0.2598 + 6.9313i		
-0.9910 + 4.2128i	-0.0309 + 5.4118i			-0.4539 + 6.7853i		
-1.0058 + 4.2532i	-0.9787 + 4.2097i			-0.4632 + 6.6009i		
-0.0964 + 4.8453i	-0.9936 + 4.2228i			-0.3537 + 6.1474i		
-0.0267 + 5.3997i	-1.0024 + 4.2117i			-0.6813 + 7.0216i		
-0.3463 + 6.2437i						
-0.4635 + 6.7540i						
-0.7924 + 6.9232i						
-0.5166 + 7.0624i						

표 3에서 Loop는 반복이론의 반복횟수, Del은 residue norm이며, Time은 계산시간으로 초 단위이다.

위의 결과 SSSP 결과와 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 EPRI의 기기모델과 PTI의 기기모델이 다르기 때문으로 판단되며, 계산 시간에서는 다소 우수함을 알 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 많은 사용자를 확보하고 있는 PSS/E의 입력데이터를 이용하며, 역행렬 변환법과, Hessenberg process에 의해 지배적 고유치만을 선택적으로 계산하는, 대규모 전력계통의 선형해석 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램의 정확성은 1기 무한 모선과, 4기 11모선, 10기 39모선의 테스트 계통에 적용하여 검증 하였으며, 791모선, 250기, 2500개의 선로로 구성된 한전계통 적용, 2568차의 상태행렬을 확대행렬로 구성하여 고유치해석 결과 2개의 제동특성이 불량한 모드가 존재함을 발견하였다. 이 계통의 결과를 상용프로그램인 EPRI의 SSSP의 결과와 비교하여 개발된 프로그램이 정확성 및 계산능력에서 우수함을 확인하였다.

참고문헌

[1] 심관식, "확대행렬의 고유치감도 이론과 전력계통 안정도 해석에의 응용", 전남대학교 박사학위 논문, 1997.

[2] 송성근, 남해곤, 심관식, 문채주, 김용구, "대규모 전력계통 미소신호 안정도 해석을 위한 Hessenberg process의 수렴특성 가속화 방법", 1998년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp 871-874

[3] H.K. Nam, K.S. Shim, and C.J.Moon, "Modal Analysis of Large Scale Power System Using Hessenberg Process", KIEE Trans., Vol. 42, No. 10, 1993.10

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

[5] L. Wang, "Eigenvalue analysis of large power systems", Ph.D. Dissertation, University of Toronto, Wang, 1991.

[6] L.T.G. Lima, L.H. Bezerra, C. Tomei, and N. Martins, "New methods for fast small - signal stability assessment of large scale power systems", PACDYN, Version 3.0 - October 1994.

[7] 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.

[8] 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.