

제어기정수에 대한 고유치 PERTURBATION과 대규모 전력계통의 미소신호안정도 해석

論 文

51A-11-6

Eigenvalue Perturbation for Controller Parameter and Small Signal Stability Analysis of Large Scale Power Systems

沈冠植* · 宋成根** · 文彩柱*** · 李奇盈§ · 南海鯤§

(Kwan-Shik Shim · Sung-Gun Song · Chae-Ju Moon · Ki-Young Lee · Hae-Kon Nam)

Abstract - This paper presents a novel approach based on eigenvalue perturbation of augmented matrix(AMEP) to estimate the eigenvalue for variation of controller parameter. AMEP is a useful tool in the analysis and design of large scale power systems containing many different types of exciters, governors and stabilizers. Also, it can be used to find possible sources of instability and to determine the most sensitivity parameters for low frequency oscillation modes.

This paper describes the application results of AMEP algorithm with respect to all controller parameter of KEPCO systems. Simulation results for interarea and local mode show that the proposed AMEP algorithm can be used for tuning controller parameter, and verifying system data and linear model.

Key Words : augmented matrix, eigenvalue perturbation, eigenvalue sensitivity, small signal stability, power system

1. 서 론

전력계통 해석에서 고유치해석은 계통상태행렬의 고유치를 계산하는 것으로 이미 다수의 상용소프트웨어가 개발되어 있고 전압안정도나 미소신호안정도에 해석에 자주 이용되고 있다. 그리고 파라메타 변화에 대한 고유치 변화 추정 기법을 고유치감도(eigenvalue sensitivity)라 하는데, 이를 계통 해석 및 설계에 적용한 연구결과들도 자주 보고 되고 있다[1-5].

고유치감도와 같이 고유치 perturbation은 특정 행렬 요소가 변화할 때, 고유치 변화를 추정하는 기법으로 문헌 [6]에서는 수학적 관점에서 고유치 perturbation에 대해서 상세하게 전개하고 있다. 그러나 전력계통의 계통상태행렬은 그 차수가 크고, 스파스(sparse)한 특성을 이용해야 하므로 상태행렬의 모든 고유벡터를 필요로 하는 고유치 perturbation 이론을 적용할 수 없다. 문헌 [3]에서 제안한 확대행렬에 대한 고유치 감도이론은 계통상태행렬의 스파스한 특성을 유지하므로 대규모 계통에 적용이 가능한 실용적인 알고리즘이다.

고유치감도나 고유치 perturbation 이론은 시스템 파라메

타의 변화에 대한 고유치 변화를 추정하는 방법으로 적용분이나 파라메타에 따라서 두 방법 중에 보다 효율적인 기법을 선택, 적용해야 한다. 소규모 계통해석을 포함한 대부분의 경우에 고유치감도에 의한 고유치변화 추정이 계산시간이나 알고리즘의 복잡성 등을 고려할 때 효율적이다. 고유치 perturbation 이론은 1) 행렬 요소의 대부분이 변화해서 고유치감도에 의해서 오차발생이 클 때, 2) 여러 개의 제어정수를 동시에 변화할 때, 3) 모델이 복잡해서 감도행렬의 구성이 어려울 때, 특히 실제 계통에서와 같이 감도행렬을 구성하기 위해서는 많은 노력이 필요하고 또한 알고리즘도 복잡할 때, 매우 유용한 알고리즘이다.

실제 대규모 계통은 매우 다양한 종류의 동기기와 여자기, 터빈/조속기 등의 제어기 모델로 구성되어 있다. 그리고 고유치감도 계산에서는 각 제어기 파라메타에 대한 감도행렬을 필요로 하므로 각 제어기에 대한 감도행렬 생성과 계산에 많은 시간과 노력을 요구한다. 따라서 이 논문에서는 감도행렬의 구성이 필요치 않고 특정 고유치와 고유벡터만을 필요로 하는 확대행렬의 고유치 perturbation(augmented matrix eigenvalue perturbation, AMEP) 이론과 이를 대규모 계통에 적용한 결과를 기술하였다.

이 논문에서는 지역모드와 지역간모드가 각각 1개씩 존재하고 있는 2000년 한전계통과 다수의 진동모드가 존재하고 있는 2003년 한전계통에서 사용되고 있는 모든 여자기, 터빈/조속기, PSS 제어정수에 대한 AMEP를 계산하였고, 제어기들이 지역모드와 지역간 모드가 주는 영향을 파악하였다.

이 논문에서 제안한 AMEP는 각 제어기에 대한 모드 변화를 정량적인 값으로 제공하므로 계통해석에서의 모델 불확실성이나 계통운전에 있어서 설정된 파라메타의 신뢰성 판단에 매우 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

* 正會員 : 西南大 工大 電氣電子工學科 助教授 · 工博

** 正會員 : 프로컴시스템 · 研究員

*** 正會員 : 木浦大 工大 電氣工學科 助教授 · 工博

§ 準會員 : 全南大 工大 電氣工學科 碩士課程

§ 正會員 : 全南大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2002年 4月 29日

最終完了 : 2002年 9月 11日

2. 수학적 배경

2.1 전력계통의 선형모델

전력계통의 발전기와 제어기, 네트워크 모델을 미소변화에 대해서 선형화 한 후, 동기기를 포함한 각종 기기의 모델과 부하를 포함한 네트워크 모델을 분리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta \dot{x} = A_g \Delta x + B_g \Delta v + U_g \Delta u \quad (1)$$

$$0 = C_g \Delta x - Y \Delta v \quad (2)$$

여기에서 변수 x 와 u 는 각각 상태변수벡터와 입력변수벡터이고, v 는 모션전압을 계통기준축으로 나타낸 실수전압벡터이다.

이와 같이 상태방정식과 대수방정식으로 이루어진 선형모델은 스파스(sparse)한 4개의 부분행렬로 구성된 확대행렬로 나타낼 수 있다.

$$\Delta \dot{\bar{x}}_a = A_a \Delta x_a + U_a \Delta u_a \quad (3)$$

확대행렬의 구조는 스파스한 행렬구조를 유지하므로 전력계통 해석에 필요로 하는 모든 연산에 확대행렬을 사용하는 것이 유리하며 특히 많은 연산을 필요로 하는 고유치/고유벡터 계산에는 이와 같은 확대행렬을 이용한 연산과정이 필수적이다.

확대행렬을 사용한 상태방정식의 고유치문제는 확대행렬의 좌우고유벡터를 각각 y_i, x_i 라 할 때, 다음과 같이 정의한다.

$$A_a x_i = \lambda_i B_a x_i \quad (4)$$

$$A_a^T y_i = \lambda_i B_a y_i \quad (5)$$

여기에서 행렬 B_a 는 대각선 요소에 상태변수의 수만큼 1을 가지고 있고 나머지 요소에 0을 가지고 있는 행렬이다.

2.2 확대행렬의 고유치 PERTURBATION

대규모 전력계통에 고유치 perturbation 이론을 적용하기 위해서는 스파스한 특성을 유지하는 확대행렬을 사용해야 한다. 축약행렬의 고유치 perturbation과 선형연립방정식에 의한 해법에 대해서 문헌 [3]에 자세히 기술되어 있으므로 이 논문에서는 확대행렬의 고유치 perturbation(augmented matrix eigenvalue perturbation, AMEP)에 대해서 상세히 기술한다.

식 (1)-(2)에서 각 부분행렬들을 수식 전개의 편의상, $A_g = A_{11}$, $B_g = A_{12}$, $C_g = A_{21}$, $Y = -A_{22}$ 라하고, 확대행렬 A_a 가 제어기 파라메타 변화로 새로운 확대행렬 A'_a 으로 변화하였을 때, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_a = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}, \quad A'_a = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} + \Delta A_{11} & A_{12} + \Delta A_{12} \\ A_{21} + \Delta A_{21} & A_{22} + \Delta A_{22} \end{bmatrix} \quad (6)$$

확대행렬의 perturbed 행렬 E_a 는,

$$E_a = A'_a - A_a = \begin{bmatrix} \Delta A_{11} & \Delta A_{12} \\ \Delta A_{21} & \Delta A_{22} \end{bmatrix} \quad (7)$$

로 나타낼 수 있다.

그리고 $A = A_{11} - A_{12} A_{22}^{-1} A_{21}$ 으로 표현되는 축약행렬과 새로운 축약행렬 A' 사이에는,

$$\begin{aligned} A' &= A'_1 - A'_1 (A'_{22})^{-1} A'_{21} \\ &= (A_{11} + \Delta A_{11}) - [(A_{12} + \Delta A_{12})(A_{22} + \Delta A_{22})^{-1}(A_{21} + \Delta A_{21})] \\ &= A + E \end{aligned} \quad (8)$$

와 같은 관계가 성립한다. 임의의 파라메타가 미세하게 변화할 때,

$$(A_{22} + \Delta A_{22})^{-1} \approx A_{22}^{-1} - A_{22}^{-1} \Delta A_{22} A_{22}^{-1} \quad (9)$$

이므로 축약행렬의 perturbed 행렬 E 와 확대행렬의 perturbed 행렬 E_a 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E = M E_a N^T \quad (10)$$

여기에서 행렬 M 과 N 은 각각 다음과 같다.

$$M = [I : -A_{12} A_{22}^{-1}] \quad (11)$$

$$N = [I : -A_{22}^{-1} A_{21}] \quad (12)$$

그러므로 행렬 E 의 좌측에 좌고유벡터를 곱하고, 우변에 우고유벡터를 곱한 후 정리하면, 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$w_i^T E v_i = w_i^T M E_a N^T v_i = y_i^T E_a x_i \quad (13)$$

이 관계로부터 행렬 E 의 좌측이나 우측에 각각 좌우고유벡터의 perturbation을 곱해도 성립하므로 다음 식을 얻을 수 있다.

$$w_i^T E \Delta v_i = y_i^T E_a \Delta x_i \quad (14)$$

$$\Delta w_i^T E v_i = \Delta y_i^T E_a x_i \quad (15)$$

그러므로 $w_i^T E v_i$ 와 $w_i^T E \Delta v_i$ 가 각각 축약행렬의 1차 및 2차 고유치 perturbation이므로 AMEP는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta \lambda_i^{(1)} = y_i^T E_a x_i \quad (16)$$

$$\Delta \lambda_i^{(2)} = y_i^T E_a \Delta x_i \quad (17)$$

고유치변화는 1차 항만 고려할 때, $\Delta \lambda_i = \Delta \lambda_i^{(1)}$ 이고, 2차 항까지 고려하면 $\Delta \lambda_i = \Delta \lambda_i^{(1)} + \Delta \lambda_i^{(2)}$ 로 계산할 수 있다. 파라메타의 변화 $\pm 100\%$ 범위에서 1차 AMEP 보다는 2차 AMEP를 포함한 고유치 추정이 더 정확하고 특히 고유치 궤적이 비선형성이 강할 때는 2차 AMEP를 포함해야 한다.

2.3 확대행렬의 고유벡터 PERTURBATION

특정한 고유치와 고유벡터를 사용하여 확대행렬의 고유벡터의 perturbation을 계산하기 위해서는 선형연립방정식의 해법을 도입하여야 한다. 파라메타가 변화하면, 식 (4)의 고유치 문제는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(A_a - \lambda_i B_a) \Delta x_i = (\Delta \lambda_i B_a - E_a) x_i \quad (18)$$

이 식에서 λ_i 가 상태행렬의 정확한 고유치이므로 행렬 $(A_a - \lambda_i B_a)$ 는 특이행렬이 된다. 따라서 식 (18)에서 선형연립방정식 연산을 수행하여 Δx_i 를 계산할 수 없다. 이와 같은 행렬의 특이성 문제는 고유벡터의 직교 조건으로부터 얻어지는 $w_i^T \Delta v_i = 0$ 과 식(18)을 연립하여 풀면 극복할 수 있고, 우고유벡터의 perturbation Δx_i 를 유일하게 결정할 수 있다.

3. AMEP의 알고리즘 구성

특정 모드에 대한 AMEP를 계산하기 위해서는 계통상태 행렬의 구성과 진동모드 계산이 선행되어야 한다. 이 논문에서는 Hessenberg법과 역반복법(RQII법)을 이용하여 AMEP에 필요한 진동모드와 좌우고유벡터를 계산하였다. AMEP 알고리즘의 구성은 다음과 같다.

- step 1 : 조류계산 및 기기, 계통 데이터 입력
- step 2 : 선형모델을 이용해서 확대행렬 구성
- step 3 : 특정모드의 고유치/고유벡터 계산
- step 4 : 제어기 파라메타 선택
- step 5 : 새로운 확대행렬 생성 및 perturbed 행렬 E_a 생성
- step 6 : 식 (16)-(18)로부터 확대행렬에 대한 고유치 및 고유벡터 perturbation 계산

4. 사례연구

이 논문에서는 2000년 침두부하시 한전계통의 데이터와 2003년 비침두부하시 한전계통의 데이터를 사용하여 개발한 AMEP의 알고리즘을 검증하고 실 계통의 여자시스템, 터빈/조속기, PSS의 모든 제어정수에 대한 AMEP를 계산하였다. 이 논문에서는 한전계통과 같은 대규모 계통의 다양한 제어기 파라메타에 대해서 감도행렬을 형성하지 않고 고유치 변화를 예측하고, 특정한 제어기 파라메타가 미소신호안정도에 주는 영향을 정량적으로 파악할 수 있는 AMEP 알고리즘을 실 계통에 시험하기 위하여 한전계통의 데이터를 이용한 것으로 현재 사용되고 있는 제어기 파라메타 설정의 적절성을 판단하고자 한 것은 아니다. 또한 데이터에서 주어진 모델들이 실제 한전에서 사용되고 있는 제어기 모델들의 특성을 정확하게 반영하고 있지 못하므로 미소신호안정도에 영향을 주는 파라메타 등은 실제 결과와 다를 수 있음을 밝힌다.

4.1 2000년 한전계통에 적용

이 계통은 215기, 791모선, 1575선로로 구성되어 있는 대

규모 시스템으로 중요한 발전설비와 부하만 표시한 간단한 단선도는 그림 1에 나타나있으며 총 부하는 38,927MW이다. 데이터에 주어진 주요 발전기의 여자기와 터빈 모델은 부록 A.1에 나타나있고, 각 모델에 대한 블록선도는 문헌 [7]에 나타나 있다.

확대행렬의 차수가 4240차인 이 계통에 지배적 진동모드만을 선별적으로 계산하는 Hessenberg법을 적용한 결과, 1개씩의 지배적인 지역모드와 지역간모드를 계산하였다.

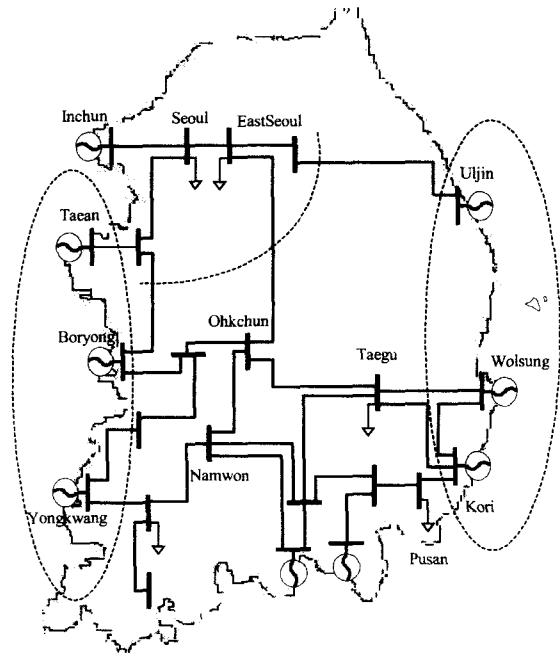


그림 1 한전계통의 간단한 계통도.

Fig. 1 Simplified diagram of KEPCO systems.

- Mode 1 : $-0.08617 + j5.55808$ (0.89 Hz)
- Mode 2 : $-0.10414 + j4.42496$ (0.71 Hz)

모드 1은 울진 지역에 국한된 지역모드로 울진 발전기에 PSS를 설치하여 제동특성을 크게 개선할 수 있다. 그리고 모드 2는 보령, 태안, 서인천 등 서해안발전기와 고리, 월성 등 동남해안 발전기가 서로 180°의 위상차를 가지고 진동하고 있는 지역간 모드이다.

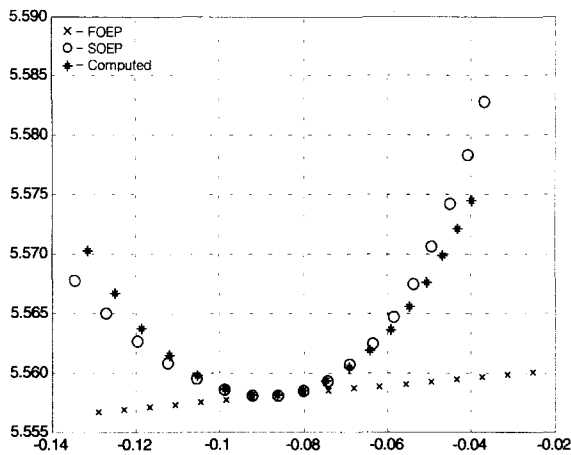
4.1.1 여자시스템과 조속기 제어정수에 대한 AMEP

한전계통의 모든 여자시스템과 터빈/조속기 제어정수에 대해서 모드 1과 2의 AMEP를 계산한 결과들 중에서 큰 값들만 표 1에 나타내었다. 표에서 FOEP, SOEP는 각각 식 (16)과 (17)로부터 계산한 1차, 2차 AMEP를 의미하고 RQII는 제어정수를 변화한 후, 직접 고유치 계산 프로그램으로부터 계산한 값이다. 또한 표에 각 값들은 제어정수를 100% 증가한 결과들이다. 그리고 EXC와 GOV는 각각 여자시스템과 조속기를 의미하며 동일 모선에 연결된 동일한 제어기의 제어정수에 대한 AMEP는 유사한 값을 가지고 있어 표에서는 생략하였다.

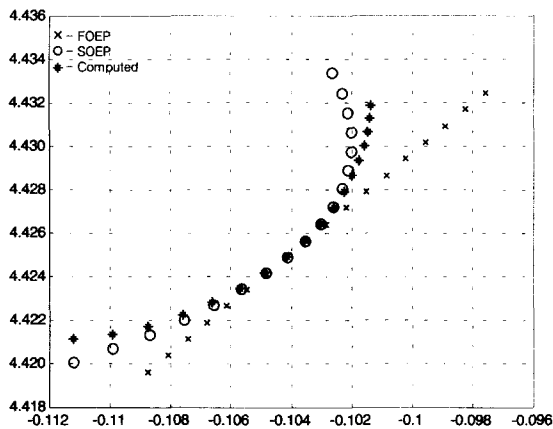
제안한 AMEP의 정확성을 검증하기 위하여 계산된 AMEP로부터 추정된 고유치와 실제 제어정수를 변화하면서 고유치 계산 프로그램을 이용하여 계산한 고유치의 궤적을 그림 2에 나타내었다. 그림 2(a)는 모드 1에서 가장 큰 AMEP를 가지고 있는 KA(25152)를 10%씩 변화하면서 그린 것이며, 그림 2(b)는 모드 2의 KA(29252)를 10% 변화하면서 그린 것이다. 모든 범위에서 2차 AMEP가 1차보다 정확함을 알 수 있다.

표 1 여자시스템과 조속기 제어정수에 대한 AMEP 결과
Table 1 AMEP results for exciter and governor parameters

Mode	Gen.	Parameter	FOEP	SOEP	RQII
1	25152	EXC(KA)	0.061+j0.002	-0.012+j0.022	-0.037+j5.582
	25153	EXC(KF)	-0.013+j0.019	0.001-j0.007	-0.099+j5.569
	25153	EXC(TF)	0.008-j0.008	0.000-j0.002	-0.077+j5.547
	25153	GOV(T1)	0.002-j0.000	0.001-j0.001	-0.083+j5.557
	25152	GOV(KC)	-0.001+j0.018	-0.000-j0.001	-0.067+j5.575
2	29252	EXC(KA)	0.007+j0.007	-0.005+j0.001	-0.102+j4.433
	29252	EXC(KF)	-0.004+j0.000	0.002-j0.001	-0.106+j4.424
	29252	EXC(TF)	0.002+j0.000	0.001-j0.001	-0.101+j4.425
	26152	GOV(KC)	-0.001+j0.001	0.000-j0.000	-0.104+j4.426



(a) Mode 1



(b) Mode 2

그림 2 제어정수 변화에 대한 고유치 궤적
Fig. 2 Eigenvalue loci for parameter variation

표 1의 모드 1에서 올진 #1-4호기의 전압조정기 이득 KA를 변화할 때 AMEP가 가장 크다. 즉 지역모드인 모드 1에 대해서 올진 발전기의 전압조정기 이득이 민감하게 영향을 주고 있음을 알 수 있고 이는 모드 1이 올진 지역에 국한되는 지역모드이기 때문에 충분히 예상할 수 있는 결과이다. 만일 올진 #1호기의 이득 KA를 100% 증가(320)하면 고유치는 우반면으로 0.049만큼 이동하여 실수부 추정치는 -0.037이 된다. 즉 이득의 증가는 지역모드의 제동특성은 더욱 나쁘게 함을 알 수 있다. 이것은 올진 #1호기의 이득만을 조정한 결과이고 나머지 올진 #2-4호기의 이득을 동시에 조정하면 고유치를 우반면으로 이동시켜서 제동능력을 상실할 수 있으며 반대로 전압조정기 이득을 감소할 경우는 모드 1의 제동특성을 향상시킬 수 있다.

표 1에서 두 번째로 모드 1에 큰 영향을 주는 파라메타는 여자시스템의 안정화 궤환 이득인 KF로 안정화 궤환 이득의 증가는 제동특성을 향상시키고 반대로 시정수의 증가는 제동특성을 나쁘게 한다. 전압조정기 이득에 대한 AMEP보다 크기는 작지만, 모드 1의 실수부 -0.086의 1/7배이므로 올진 #1-4호기 여자시스템의 안정화 궤환 루프만 적절하게 설계해도 모드 1의 제동특성을 크게 개선할 수 있음을 알 수 있다. 여자시스템의 다른 시정수와 이득에 대한 AMEP를 모두 계산하였으나 모두 크기가 작아 표에 나타내지 않았다.

지금까지 AMEP가 가장 큰 여자시스템 이득의 증가가 지역모드에 주는 영향에 대해서 기술하였는데, 여자기 이득을 크게 하는 것은 과도안정도 향상 측면에서는 바람직하다. 그러나 전술한 바와 같이 미소신호안정도 측면에서는 나쁜 영향을 줄 수 있다.

표 1에는 터빈/조속기 파라메타가 미소신호안정도에 주는 영향을 파악하기 위하여 계산한 AMEP의 결과도 포함되어 있는데, 가장 큰 실수부를 가지고 있는 파라메타는 올진 #3호기의 조속기 시정수 T1이다. 그러나 앞에서 기술한 전압조정기 이득에 대한 AMEP의 결과와 비교하면 그 크기가 매우 작아서 조속기 모델의 시정수나 이득은 미소신호안정도에 크게 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

지역간 모드인 모드 2에 대해서 고리 #4호기의 전압조정기 이득 KA를 변화할 때, AMEP는 가장 크다. 모드 1에서 가장 큰 AMEP가 0.049였던 것을 고려하면 여자시스템이나 터빈/조속기 계통의 파라메타는 지역간모드에 대해서 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

4.1.2 PSS 제어정수에 대한 AMEP

고유벡터로부터 모드 1은 올진 지역의 발전기가 주로 영향을 주는 지역모드이고, 모드 2는 서해안과 동남해안 발전기들이 참여하는 지역간 모드임을 알 수 있다. 이들 모드의 제동특성은 PSS를 설치해서 개선할 수 있는데, 이 논문은 PSS를 제어정수에 대한 AMEP를 계산하는데 그 목적이 있으므로 PSS 설치지점이나 설계방법은 기술하지 않는다. 다만 위상보상법으로 설계한 PSS를 올진, 영광, 고리발전기에 투입하고 PSS 제어정수에 대한 AMEP를 계산하였다. 투입한 PSS 모델은 PSS2A로 설계한 PSS 데이터와 블럭선도는 부록 A.3에 있다. 2000년 한전계통에 PSS를 투입한 후 제동특성은 크게 개선되어 가장 제동특성이 나쁜 모드는 다음과 같다

- Mode 3 : $-0.29646+j6.19523$ (0.98 Hz)
- Mode 4 : $-0.25439+j6.36416$ (1.01 Hz)

이 모드들에 대해서 투입된 모든 PSS의 이득과 시정수에 대해서 AMEP를 계산하였는데 그 결과는 표 2에 나타나있다. 표 2의 값들은 각 파라메타를 50% 변화한 상태에서 계산한 결과로 모드 3, 4에 대해서 PSS 시정수 TS1이 가장 민감한 영향을 준다. 다른 울진발전기에 설치된 PSS 정수에 대한 AMEP도 표 2와 유사하여 표에는 나타나지 않았다.

PSS 제어정수에 대한 AMEP는 PSS 설계에 유용하게 이용될 수 있다. 위상보상범으로 PSS 설계할 때, 1기 무한모선으로 이득과 시정수를 결정하고 전체 계통에 대해서 이득을 증가하면서 고유치 궤적을 그려 최적이득을 결정하게 된다. 이때 전체 계통에 대한 고유치 궤적은 이득에 대한 AMEP를 이용해서 보다 정확하게 계산할 수 있다. 또한 기존에 설치되어 운전 중인 PSS 제어정수나 PSS와 FACTS 기기의 협조제어 문제에 적용할 수 있다. 그리고 관심 있는 모드에 PSS 이득이나 시정수가 영향을 주는 정도를 알 수 있어 계통 운용자는 보다 정량적인 판단과 선택을 할 수 있다.

4.2 2003년 한전계통에 적용

이 계통은 65기 발전기와, 900 모선으로 구성되어 있는 총 부하 30000MW인 2003년 비첨두 부하시 한전 계통이다. 이 계통 데이터에 주어진 주요 발전기의 여자시스템과 터빈 모델은 부록 B.1에 나타나있고, 각 모델에 대한 블록선도는 문헌 [7]에 나타나 있다.

이 계통에 대한 고유치 해석 결과는 표 3에 나타나 있다. 표에서 IM은 지역간모드를 의미하고 PM은 플랜트모드 나타낸다. 고유치 해석 결과, 미소신호안정도 문제가 심각하게 나타나고 있는데, 이것은 이용한 데이터가 2003년에 대한 예상 데이터일 뿐만 아니라 PSS가 투입되어 있지 않는 상태이기 때문에 나타난 결과이고 실제와는 다소 차이가 있을 수 있다.

가장 문제가 되는 모드는 고유치의 실수부가 양수인 모드 1과 모드 4로 이들 모드에 대한 고유벡터에서 크기가 큰 값들만 그림 3에 나타내었다. 그림 3(a)에서는 영광발전기들이 울진 및 서해안 발전기들과 서로 진동하고 있으며, 그림 3(b)에서는 울진 발전기들이 당진을 비롯한 서해안 발전기들과 서로 진동하고 있음을 알 수 있다.

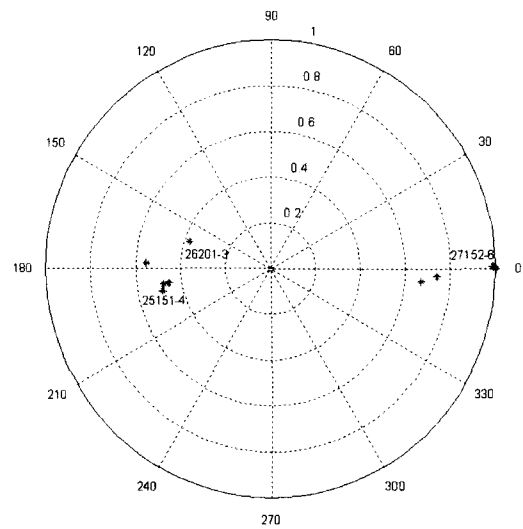
표 2 PSS 제어정수에 대한 AMEP 결과
Table 2 AMEP results for PSS parameters

Mode	Gen.	Parameter	FOEP	SOEP	RQII
3	25151	KS(21.00)	$-0.033+j0.017$	$0.017-j0.015$	$-0.318+j6.204$
		TS1(0.198)	$-0.027-j0.008$	$0.008+j0.009$	$-0.316+j6.192$
		TS2(0.114)	$0.013+j0.007$	$0.005+j0.002$	$-0.272+j6.207$
4	25152	KS(21.00)	$0.031+j0.009$	$-0.021+j0.001$	$-0.237+j6.429$
		TS1(0.198)	$-0.022+j0.044$	$0.001-j0.008$	$-0.275+j6.402$
		TS2(0.114)	$0.014-j0.016$	$0.002-j0.008$	$-0.237+j6.333$

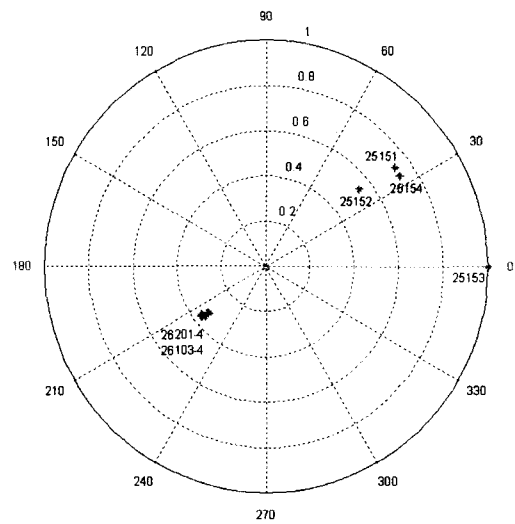
표 3 2003년 한전계통의 고유치

Table 3 Eigenvalues of KEPCO systems in the year 2003

Mode	Eigenvalues		Participating Generators	
1	$0.2809+j4.9486$	IM	영광 2-6	울진1-4, 서해안G
2	$-0.0301+j5.0242$	IM	서해안G	고리N, 울산
3	$-0.0967+j6.1075$	PM	영광 5-6	
4	$0.2562+j6.2574$	IM	울진 1-4	서해안G
5	$-0.0757+j7.7365$	PM	울진 1	울진 2-4
6	$-0.1040+j7.8274$	PM	울진 2	울진4



(a) Mode 1



(b) Mode 4

그림 3 지역간모드의 우고유벡터
Fig. 3 Right eigenvector of interarea mode

4.2.1 여자시스템과 조속기 제어정수에 대한 AMEP

이 논문에서 2003년 비침투부하시 모든 진동모드에 대한 AMEP를 계산하였으나 가장 문제시되는, 고유치 실수부분이 양수인 모드 1과 모드 4의 AMEP 결과만 기술한다. 표 4에는 여자시스템 제어정수에 대한 모드 1, 모드 4의 AMEP를 나타낸 것으로 FOEP, SOEP는 각각 1, 2차 AMEP를 의미하고 RQII는 파라메타를 변화한 후 계산한 고유치이다.

표 4의 모드 1에서 영광 #5-6호기 여자시스템의 안정화 제한 이득과 시정수를 변화할 때, 모드 1은 가장 영향을 크게 받는다. 2차 AMEP에서 영광 #5호기(27155)의 안정화 제한 이득 KF를 100% 증가하면 고유치 실수부는 -0.02만큼 좌반면으로 이동하고 시정수 TF에 대해서는 0.05만큼 우반면으로 이동한다. 모드 1의 실수부 0.28에 대해서 TF의 AMEP는 1/6배로 각각 제어정수에 대한 영향은 작다. 그러나 영광 #2-6호기의 여자시스템의 안정화 제한 루프를 적절하게 설계하면 모드 1의 제동특성을 상당히 개선할 수 있음을 알 수 있다. AMEP로부터 2003년 계통이 불안정한 주요 원인 중에 하나는 영광발전기의 여자시스템의 안정화루프에 기인함을 알 수 있다.

모드 4에는 울진발전기들이 주로 참여하고 있는 모드로 #1-2호기의 여자시스템 모델은 EXPIC1, #3-4호기는 EXST1 모델로 모의하고 있다. EXPIC1 모델은 전압조정기에 비례적분제어 회로와 진상보상기를 내장하고 있다. 울진 #1호기의 여자시스템 모델인 EXPIC1에 대한 블록선도와 데이터는 부록 B.2에 나타나있다.

울진 #1호기(25151)의 적분이득 KA를 100% 증가하면 고유치 실수부는 -0.133만큼 좌반면으로 이동하고 비례이득과 적분이득의 비인 TA1에 대해서는 -0.131만큼 이동한다. 그러므로 모드 4는 울진 #1-2호기 PI제어기 적절한 설계만으로 제동특성 크게 개선할 수 있음을 알 수 있다.

표 4 여자시스템과 조속기 제어정수에 대한 AMEP 결과
Table 4 AMEP results for exciter and governor parameters

Mode	Gen.	Parameter	FOEP	SOEP	RQII
1	27153	KF(0.06)	-0.053-j0.027	0.043+j0.028	0.271+j4.949
	27154	KF(0.06)	-0.053-j0.027	0.043+j0.028	0.271+j4.949
	27155	KF(0.06)	-0.069-j0.055	0.069+j0.060	0.260+j4.953
	27156	KF(0.06)	-0.069-j0.055	0.069+j0.060	0.260+j4.953
	27153	TF(2.00)	0.022+j0.018	0.009+j0.008	0.313+j4.975
	27154	TF(2.00)	0.022+j0.018	0.009+j0.008	0.313+j4.975
	27155	TF(2.00)	0.037+j0.035	0.013+j0.016	0.332+j5.001
	27156	TF(2.00)	0.037+j0.035	0.013+j0.016	0.332+j5.001
4	25151	KA(3.74)	-0.065+j0.157	-0.098-j0.100	0.122+j6.314
	25152	KA(3.74)	-0.062+j0.120	-0.081-j0.125	0.161+j6.252
	25151	TA1(13.0)	-0.039+j0.156	-0.092-j0.104	0.123+j6.309
	25152	TA1(13.0)	-0.065+j0.118	-0.025-j0.126	0.165+j6.249

4.2.2 PSS 제어정수에 대한 AMEP

위상보상법으로 설계한 PSS를 울진 발전기 #1-4호기, 고리 발전기 #1-4호기, 영광발전기 #2-6호기에 투입하고, PSS 제어정수에 대한 AMEP를 계산하였다. 투입한 PSS 모델은 PSS2A로 이 모델의 블록선도는 부록 A.3에 도식되어 있다. 그리고 위상보상법으로 설계한 PSS 데이터는 부록 B.3에 나타나있고 최적이득을 결정하지 않은 데이터이다. 2003년 한전계통에 PSS를 투입한 후, 제동특성은 크게 개선되어 가장 제동특성이 나쁜 모드는 다음과 같다.

- Mode 7 : $-0.59588+j5.05331$ (0.80 Hz)
- Mode 8 : $-0.49403+j5.33977$ (0.85 Hz)

이 모드들에 대해서 투입된 PSS의 이득과 시정수에 대해서 AMEP를 계산하였는데, 그 결과는 표 5에 나타내었다. 표의 값들은 각 파라메타를 50% 변화한 상태에서 계산한 결과로 영광 발전기 #2호기, #6호기의 PSS 이득에 대한 AMEP가 가장 크다. 영광 지역의 다른 발전기에 설치된 PSS 정수에 대한 AMEP도 이 결과와 유사하여 표에는 나타내지 않았다.

다수의 진동모드가 존재하는 2003년 비침투부하시 한전계통은 적절하게 설계된 PSS 투입으로 제동특성이 크게 개선된 상태이다. 그러므로 PSS의 최적이득이나 시정수 결정에 AMEP의 결과들이 크게 영향을 주지는 않으나 앞에서 기술한 것과 같이 전체시스템에 대한 고유치체적으로부터 최적 이득결정에 유용하게 이용할 수 있다.

그리고 AMEP는 다수의 파라메타가 동시에 변화해도 계산에 큰 부담이 없으므로 이미 운전 중인 여러 대의 PSS 이득을 동시에 튜닝할 때, 특히 지역모드의 안정성을 유지하면서 지역간 모드의 제동특성 개선을 위한 최적 이득결정에 유용하게 이용할 수 있다.

표 5 PSS 제어정수에 대한 AMEP 결과
Table 5 AMEP results for PSS parameters

Mode	Gen	Parameter	FOEP	SOEP	RQII
7	27156	KA(21.0)	-0.119+j0.012	0.010+j0.000	-0.701+j5.065
		T1(0.232)	-0.050-j0.060	-0.001+j0.003	-0.648+j4.936
		T2(0.033)	0.000+j0.009	0.000+j0.002	-0.533+j5.036
	27152	KA(21.0)	-0.099+j0.006	0.009+j0.010	-0.683+j5.069
		T1(0.317)	-0.057-j0.051	-0.006+j0.004	-0.660+j5.007
		T2(0.032)	0.000+j0.007	0.000+j0.002	-0.594+j5.063
8	25152	KA(21.0)	0.021-j0.049	-0.003+j0.006	-0.474+j5.297
		T1(0.198)	0.032-j0.004	-0.001-j0.002	-0.464+j5.332
		T2(0.114)	-0.013-j0.001	-0.004+j0.000	-0.513+j5.340
	29151	KA(21.0)	0.025+j0.050	0.000-j0.030	-0.472+j5.370
		T1(0.476)	-0.004+j0.050	0.022-j0.010	-0.485+j5.376
		T2(0.048)	0.005-j0.003	0.001j-0.001	-0.486+j5.334

5. 결 론

이 논문에서는 대규모 계통의 여자시스템, 터빈/조속기, PSS 제어정수 변화에 대한 고유치 변화를 추정하는 AMEP 이론과 실제 계통에 적용한 결과를 기술하였다.

대규모 계통을 구성하고 있는 제어기들은 다양한 모델로 표현되므로 상태행렬의 감도행렬을 구하는 것은 매우 복잡하고 많은 시간을 필요로 한다. 이 논문에서 제안한 AMEP는 감도행렬을 구성하지 않기 때문에 대규모 계통의 차수에 제한 없이 쉽게 응용할 수 있고 정확성도 높다.

제안한 AMEP 알고리즘을 한전계통의 제어기 파라메타에 적용한 결과, 지역모드와 지역간모드에 대한 변화를 정확하게 추정하여 알고리즘의 정확성을 검증하였다. 지역모드에 대해서 여자시스템의 제어정수들이 가장 민감하게 영향을 주고 있고, 터빈/조속기 제어정수는 크게 영향을 주지 않음을 확인하였으며, 지역간모드에 대해서 각 제어기의 파라메타의 영향은 지역모드보다 상대적으로 작은 값을 가지고 있음을 알 수 있었다.

대규모 계통에서 다수의 진동모드가 혼재해 있는 상황에서 AMEP는 가장 영향을 크게 끼치는 제어기 파라메타를 선택할 수 있기 때문에 정확한 저주파진동 요인을 찾을 수 있고, 또한 정량적인 값을 제공하므로 모델의 불확실성이나 주어진 데이터의 신뢰성 등을 판단할 수 있어, 계통해석에 유용한 도구가 될 것으로 생각된다.

감사의 글

이 연구는 한국과학재단 특정기초연구지원(과제번호:R01-1999-000-00203-0)과 한국전력공사의 전력기술기초연구비 지원(과제번호:00-중-04)으로 수행되었음.

참 고 문 헌

[1] M. J. Gibbard, N. Martins, J. J. Sanchez-Gasca, N. Uchida, V. Vittal, L. Wang, "Recent Applications of Linear Analysis Techniques", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 16, No. 1, pp154-162, 2001.

[2] K. W. Wang, C. Y. Chung, C. T. Tse, K. M. Tsang, "Multimachine Eigenvalue Sensitivities of Power System Parameters", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 15, No. 2, pp741-747, 2000.

[3] H. K. Nam, Y. K. Kim, K. S. Shim, K. Y. Lee, "A New Eigen-sensitivity Theory of Augmented Matrix and Its Applications to Power System Stability Analysis", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 15, No. 1, pp363-369, 2000.

[4] I. A. Hiskens, J. V. Milanovic, "Locating Dynamic Loads which Significantly Influence Damping", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 12, No. 1, pp255-261, 1997.

[5] L. Xu, S. Ahmed-Zaid, "Tuning of Power System Controllers using Symbolic Eigensensitivity Analysis

and Linear Programming", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 10, No. 1, pp314-322, 1995.

[6] J. H. Wilkinson, The Algebraic Eigenvalue Problem, Clarendon Press, Oxford, pp. 377-392, 1965.

[7] PTI, PSS/E manual, Program Operation Manual, Volume II. 2000.

[8] A. Murdock, S. Venkataraman, R.A. Lawson, W.R. Person, "Integral of Acceleration Power Type PSS Part 1 - Theory, Design, and Tuning Methodology", IEEE Trans. EC, Vol 10, No. 4, pp. 1658-1663, 1999

[9] 金東俊, 文英煥, 田東勳, 金泰均, "AVR 스텝시험에 의한 울진 N/P 1호기 PSS 모델링 연구", 대한전기학회논문지, 제 50권, 8호, pp. 351-357, 2001.

[10] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill Book Company, New York, 1994.

부 록

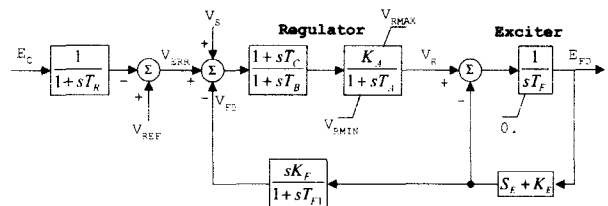
A. 2000년 한전계통의 주요 모델과 데이터

A.1 주요 발전기의 제어기모델

Gen. No.	여자시스템	터빈/조속기
25151 울진-#1G	IEEX2A	IEEBG1
27151 영광-#1G	EXAC1	IEEBG1
28151 월성#1	SCRX	IEEBG1
29151 고리-#1G	IEEX2A	IEESGO
23351 서인천G9	EXST12	GAST
26101 태인#1	EXST1	IEEBG1
26151 보령-#1G	EXST1	IEEBG1
26201 당진#1	EXST1	TGOV1
30151 삼천포#1	IEET1	IEEBG1

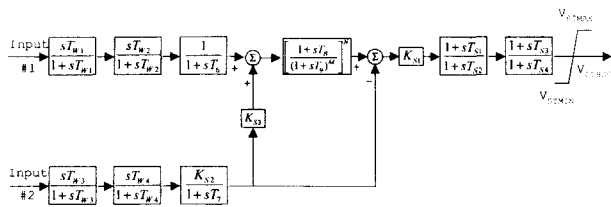
A.2 여자시스템(IEEX2A) 데이터와 블록선도

BUS	TR	KA	TA	TB	TC	KE
25151	0.01	160	0.02	0.00	0.00	1.00
TE	KF	TF1	E1	SE1	E2	SE2
0.80	0.05	1.00	458	1.50	6.10	1.75



A.3 PSS 모델(PSS2A)과 데이터와 블록선도

Generator	KS	TS1	TS2	TS3	TS4
25151-25154	14	0.317	0.032	0.317	0.032
27151-27154	14	0.229	0.044	0.229	0.044
29151-29252	14	0.317	0.032	0.317	0.032



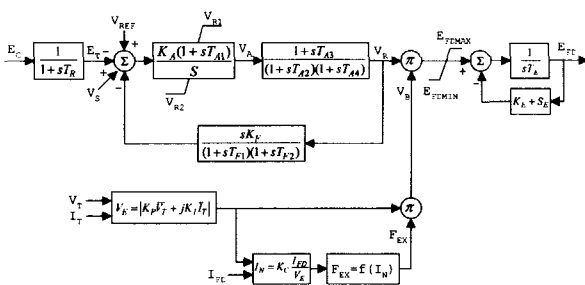
B. 2003년 계통의 주요 모델과 데이터

B.1 주요 발전기의 제어기 모델

Gen. No.	여자시스템	터빈/조속기
25151 울진-#1G	EXPIC1	IEEEG1
25151 울진-#3G	EXST1	IEEEG1
27151 영광-#1G	EXAC1	IEEEG1
27151 영광-#3G	IEEET1	IEEEG1
28151 월성#1	SCRX	IEEEG1
29151 고리-#1G	IBEX2A	IEESGO
23351 서인천C9	EXAC1	GAST
26101 태인#1	EXST3	TGOV1
26151 보령-#1G	EXST1	IEEEG1
26201 당진#1	EXST3	TGOV1

B.2 여자시스템(EXPIC1) 데이터와 블럭선도

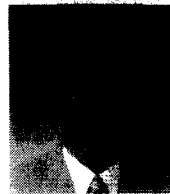
BUS	TR	KA	TA1	TA2	TA3	TA4
25151	0.0	1.87	6.5	0.68	7.0	0.0
VRMAX	VRMIN	KF	TF1	TF2	Ke	Te
7.0	-7.0	0.0	0.1	0.0	1.0	0.458
E1	SE1	E2	SE2	KP	KI	KC
3.0	0.01	4.5	0.8	0.0	0.0	0.0



B.3 PSS 모델과 데이터와 블럭선도

Generator	KS	TS1	TS2	TS3	TS4
25151-25152	15	0.174	0.117	0.174	0.117
25153-25154	15	0.152	0.066	0.152	0.066
27152-27153	15	0.211	0.021	0.211	0.021
27154-27156	15	0.156	0.022	0.156	0.022
29151-29152	15	0.317	0.032	0.317	0.032
29251-29252	15	0.352	0.035	0.352	0.035

저 자 소 개

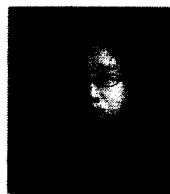


심관식 (沈冠植)

1965년 8월 24일생. 1991년 전남대학교 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1997년~현재 서남대학교 전기전자공학과 조교수

Tel(Fax) : 063-620-0298

E-mail : simgong@tiger.seonam.ac.kr



송성근 (宋成根)

1975년 9월 16일생. 1998년 전남대 공대 전기공학과 졸업. 2000년 동대학원 졸업(석사). 현재 프로컴시스템 근무

Tel : 062-530-0745



문채주 (文彩柱)

1959년 12월 26일생. 1981년 전남대학교 공대 계측공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1986년~1997년 한전기술 책임연구원. 1997년~현재 목포대학교 전기공학과 조교수

Tel : 061-450-2466

E-mail: cjmoon@chungkye.mokpo.ac.kr



이기영 (李奇盈)

1979년 9월 17일생. 2001년 서남대 전기전자공학과 졸업. 현재 전남대 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : 062-530-0745



남해근 (南海鯨)

1950년 10월 16일생. 1975년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 Univ. of Houston 졸업(석사). 1986년 Univ. of Texas at Austin 졸업(공학). 1975년-1978년 한국전력 원자력건설부 근무.

1986년-1988년 한국전기연구소 근무. 1988년-현재 전남대 전기공학과 교수

Tel : 062-530-1745, Fax :062-530-1749

E-mail : hknam@chonnam.chonnam.ac.kr