

제어기정수에 대한 AMEP와 대규모 전력계통에 미소신호안정도 해석

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

Small Small Signal Stability Analysis by AMEP for Controller Parameter

K. S. SHIM*, S. G. SONG**, H. K. NAM**, Y. G. KIM**, C. J. MOON***
 * Seonam univ. ** Chonnam national univ. *** Mokpo national univ.

Abstract - Eigenvalue perturbation theory of augmented system matrix(AMEP) is a useful tool in the analysis and design of large scale power systems.

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

Key words : small signal stability, augmented matrix, eigenvalue, eigenvector, perturbation theory

1. 서 론

최근 전력계통 해석에서 계통상태행렬에 대한 고유치 해석을 많이 적용하고 있다. 따라서 파라메타 변화에 대한 고유치 변화 추정 기법 또한 필수적이 계통 해석 및 설계 도구 중 하나가 되었고, 실제로 많은 연구에서 적용하고 있다. 현재는 고유치 감도에 의해서 추정고유치를 계산하는 방법이 주류를 이루고 있다.

고유치 perturbation은 특정 행렬 요소가 변화할 때, 고유치 변화를 추정하는 기법으로 문헌 [1]에서는 수학적 관점에서 1, 2차 고유치 perturbation에 대해서 상세하게 전개하고 있다. 그러나 계통상태행렬은 그 차수가 크고, 스파스한 특성을 이용해야 하므로 문헌 [1]에 기술된 모든 계통상태행렬의 고유벡터를 필요로 하는 고유치 perturbation 이론을 적용할 수 없다.

이 논문의 저자들은 확대행렬에 대한 고유치 감도이론과 고유치 perturbation 이론을 제안하였는데 [2], 확대행렬에 의한 고유치감도는 계통상태행렬의 스파스한 특성을 유지하므로 대규모 계통에 적용이 가능한 매우 실용성이 큰 알고리즘이다.

실제 계통은 매우 다양한 종류의 동기기 및 여자기 등의 제어기 모델로 구성되어 있으므로 고유치감도 계산에서 필요한 각 제어기 파라메타에 대한 감도행렬을 각각 구성해야 하기 때문에 많은 시간과 노력을 요구한다. 따라서 이 논문에서는 감도행렬의 구성이 필요치 않는 문헌 [2]에서 제안한 확대행렬의 고유치 perturbation 이론(augmented matrix eigenvalue perturbation, AMEP)을 대규모 계통에 적용한 결과를 기술하였다.

실제 계통에서 사용되고 있는 여자기, 터빈/조속기의 파라메타에 대한 AMEP를 계산하였고, 그 결과 지역모드와 지역간 모드가 미소신호안정도에 주는 영향을 파악할 수 있었다.

AMEP는 각 제어기에 대한 모드 변화를 정량적이 값으로 제공하므로 계통해석에서의 모델 불확실성이나 설정된 파라메타의 신뢰성 판단에 매우 중요한 역할을 할 것이다.

2. 전력계통의 선형모델과 AMEP 이론

전력계통의 발전기와 제어기, 네트워크 모델을 미소변화에 대해서 선형화 한 후, 동기기를 포함한 각종 기기의 모델과 부하를 포함한 네트워크 모델을 분리해서 나타낸 행렬을 확대행렬이라 한다 [2]. 즉 확대행렬은 다음과 같이 4개의 부분행렬로 구성되어 있다.

$$A_a = \begin{bmatrix} A_G & B_G \\ -C_G & Y \end{bmatrix} \quad (1)$$

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

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

$$A_a x_i = \lambda_i B_a x_i \quad (2)$$

$$A_a^T y_i = \lambda_i B_a y_i \quad (3)$$

확대행렬의 고유치 문제로부터 고유치감도에 대한 식을 얻을 수 있다 [2]. 이 논문에서는 AMEP 이론에 대해서는 간단히 기술하고, AMEP 알고리즘을 실제계통에 적용한 결과를 중심으로 기술한다.

고유치감도나 고유치 perturbation은 특정 파라메타의 변화로 인한 행렬의 고유치변화를 추정하는 것이다. 적용분야나 파라메타에 따라서 선택적으로 두 방법을 적용해야 한다. 소규모 계통해석을 포함한 대부분의 경우에 고유치감도에 의한 고유치변화 추정이 계산시간이나 알고리즘의 효율성 등을 고려할 때 효율적이다. 고유치 perturbation은 행렬 요소의 대부분이 변화해서 고유치감도에 의해서 오차발생이 크거나, 모델이 복잡해서 감도행렬의 구성이 어려울 때, 특히 실제계통에서와 같이 감도행렬을 구성하기 위해서는 많은 노력이 필요하고 또한 알고리즘도 복잡할 때, 매우 유용한 알고리즘이다.

대규모 전력계통에 고유치 perturbation을 적용하기 위해서는 스파스한 특성을 유지하는 확대행렬을 사용해야 한다. 확대행렬의 고유치 perturbation, 즉 AMEP의 이론에 대해서 문헌 [2]에 자세히 기술되어 있으므로 이 논문에서는 AMEP에 대한 결과 수식만 간단히 기술한다.

행렬을 구성하는 임의의 정수가 변화하여 행렬 A가 새로운 행렬로 변화하면 고유치와 고유벡터의 변화는 먹 급수로 나타낼 수 있고, 고유치/우고유벡터 perturbation은 이 먹급수로부터 유도된다. 여기에서 우고유벡터는 대규모 계통에는 적용하기 부적절한 형태, 즉 모든 계통행렬의 고유치를 필요로 한다. 문헌 [2]에서는 작고

유벡터와 우고유벡터 perturbation의 곱은 우고유벡터들이 서로 직교하므로 0이 되는 특성을 이용해서 선형연립방정식으로 좌/우고유벡터의 perturbation을 계산하는 방법을 제시하고 있다.

이 방법은 확대행렬에 대해서도 동일하게 적용할 수 있고, 1차 및 2차 AMEP는,

$$\Delta\lambda_i^{(1)} = y_i^T E_a x_i \quad (4)$$

$$\Delta\lambda_i^{(2)} = y_i^T E_a \Delta x_i \quad (5)$$

여기에서 x_i , y_i 각각 확대행렬의 우고유벡터와 좌고유벡터이다. 이 식들은 파라메타가 변화할 때, 고유치 변화로 1차 AMEP 보다는 1, 2차 AMEP를 합한 고유치 추정이 더 정확하고 특히 파라메타의 변화에 대해서 고유치 제곱이 비선형성이 강할 때는 2차 AMEP를 포함해야 한다.

3. 한전계통에 적용

이 논문에서는 2000년 peak 시 한전계통의 데이터를 사용하여 개발한 AMEP의 알고리즘을 검증하고 실 계통의 모든 제어기 제어정수에 대한 AMEP를 계산하였다. 이 계통은 215기, 791모선, 1575선로로 구성되어 있는 대규모 시스템으로 총 부하는 38,927MW이고 확대행렬의 차수는 4240이다.

고유치를 계산한 결과, 2개의 지배적 진동모드를 계산하였는데, 하나는 0.89Hz의 울진 지역모드(모드 1: $-0.08617+j5.55808$)이고 다른 하나는 보령, 태안, 서인천 등 서해안발전기와 고리, 월성 등 동남해안 발전기가 서로 180°의 위상차를 가지고 진동하고 있는 0.71 Hz의 지역간 모드(모드2: $-0.10414+j4.42496$)이다.

이 논문에서는 한전계통과 같은 대규모 계통에 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 한전계

통의 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 파라메타들은 실제 결과와 다를 수 있음을 밝힌다.

데이터에 주어진 주요 발전기의 여자기와 터빈 모델은 표 1과 같고 각 모델에 대한 블록선도는 문헌 [3]에 나타나 있다.

표 2는 한전계통의 모드제어기에 대해서 지역모드인 모드 1($-0.08617+j5.55808$)에 대한 AMEP를 계산한 결과로 모든 값은 파라메타를 100% 변화한 것이다. 표에서 NFOEP는 1차 AMEP를 정규화 한 값이고, NSOEP는 2차 AMEP를 정규화 한 값으로 이들로부터 지역모드에 가장 크게 영향을 주는 발전기와 파라메타를 선정할 수 있다. 먼저 가장 큰 AMEP는 울진 #1-4호기의 전압조정기 이득 KA를 변화할 때, 고유치 실수부가 0.06100 변화한다. 즉 지역모드에 대해서 울진 발전기의 여자기 이득이 민감하게 영향을 주고 있음을 알 수 있고 이는 모드 1이 울진지역에 국한되는 지역모드이기 때문에 충분히 예상할 수 있는 결과이다. 만일 울진 #1호기의 이득을 100% 증가하면 고유치는 우반면으로 이동하여 실수부 추정치는 -0.02517 이 된다. 즉 이득의 증가는 지역모드의 제동특성은 더욱 나쁘게 함을 알 수 있다. 이것은 울진 #1호기의 이득만을 조정할 결과이고 나머지 울진 #2-4호기의 이득을 동시에 조정하면 고유치를 우반평면으로 이동시켜서 제동능력을 상실할 수 있으며 반대로 전압조정기 이득을 감소할 경우는 제동특성을 향상시킬 수 있다.

지금까지는 AMEP가 가장 큰 여자기시스템 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. 그리고 이 연구에서 사용한 여자기시스템의 데이터에서는 TGR 블록의 시정수들이 0으로 설정되어 있어 이 논문에서는 이를 고려하지 않았다.

표 2에서 2번째로 지역모드에 큰 영향을 주는 파라메타는 여자기시스템의 안정화 개환 이득 KF로 울진 #3호기의 KF가 100% 변화할 때, 모드 1의 실수부는 -0.01326 만큼 좌반면으로 이동한다. 즉 안정화 개환 이득의 증가는 제동특성을 향상시킨다. 그러나 전압조정기 이득에 대한 AMEP보다 크기가 훨씬 작고, 모드 1

표 1. 주요 발전기의 제어기모델

Gen. No.	여자기시스템	터빈/조속기
25151 울진-#1G	IEEX2A	IEEEG1
27151 영광-#1G	EXAC1	IEEEG1
28151 월성#1	SCRX	IEEEG1
29151 고리-#1G	IEEX2A	IEESGO
23351 서인천G9	EXST2	GAST
23356 서인천ST10	EXAC1	TGOV1
23451 인천-#1G	IEEET1	IEEEG1
26101 태안#1	EXST1	IEEEG1
26151 보령-#1G	EXST1	IEEEG1
26165 보령GT#8	EXAC1	TGOV1
26201 당진#1	EXST1	TGOV1
27751 하동#1	EXST1	TGOV1
29321 울산-#1G	IEEET1	IEEEG1
30151 삼천포#1	IEEET1	IEEEG1

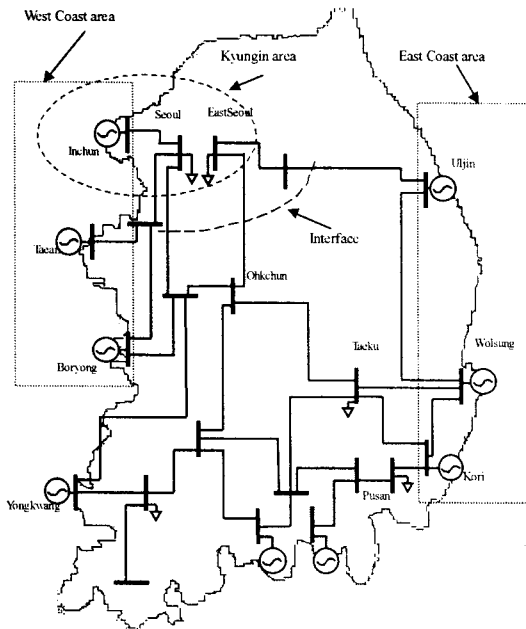


그림. 1. 한전계통의 간단한 계통도.

표 2. 한전계통의 지역모드에 대한 AMEP 결과

Machine	Parameter	NFOEP	NSOEP	Gen .
EXCITER	KA	0.06100+j0.00202	-0.01195+j0.02279	25152(울진-#2G)
		0.06100+j0.00202	-0.01195+j0.02279	25151(울진-#1G)
		0.06096+j0.00299	-0.01264+j0.02287	25153(울진#3)
		0.06046+j0.00295	-0.01256+j0.02259	25154(울진#4)
		-0.00187+j0.00672	-0.00122-j0.00406	25622(영동-#2G)
	KF	-0.01326+j0.01910	0.00038-j0.00791	25153(울진#3)
		-0.01316+j0.01895	0.00037-j0.00784	25154(울진#4)
		-0.01224+j0.01892	-0.00005-j0.00746	25152(울진-#2G)
		-0.01224+j0.01892	-0.00005-j0.00746	25151(울진-#1G)
		0.00292-j0.00228	-0.00097-j0.00061	25622(영동-#2G)
	TA	-0.00021-j0.00337	-0.00026-j0.00172	25152(울진-#2G)
		-0.00021-j0.00337	-0.00026-j0.00172	25151(울진-#1G)
		0.00018+j0.00004	0.00009+j0.00002	25622(영동-#2G)
	TF	0.00811-j0.00811	0.00016-j0.00259	25153(울진#3)
		0.00805-j0.00804	0.00016-j0.00257	25154(울진#4)
		0.00760-j0.00811	0.00001-j0.00248	25152(울진-#2G)
0.00760-j0.00811		0.00001-j0.00248	25151(울진-#1G)	
0.00055+j0.00017		0.00031+j0.00007	25632(영월-#2G)	
Governor	T1	0.00170-j0.00020	0.00081-j0.00024	25153(울진#3)
	T1	0.00168-j0.00019	0.00080-j0.00024	25154(울진#4)
	T1	0.00162-j0.00016	0.00077-j0.00022	25152(울진-#2G)
	T1	0.00162-j0.00016	0.00077-j0.00022	25151(울진-#1G)
	KC	-0.00115+j0.01800	-0.00010-j0.00044	25152(울진-#2G)
	KC	-0.00115+j0.01800	-0.00010-j0.00044	25151(울진-#1G)
	KC	-0.00094+j0.01898	-0.00011-j0.00046	25153(울진#3)
	KC	-0.00091+j0.01873	-0.00011-j0.00046	25154(울진#4)
	KC	-0.00042+j0.00113	0.00000-j0.00004	25627(동해#2)
	KC	-0.00042+j0.00113	0.00000-j0.00004	25626(동해#1)
	KC	0.00027+j0.00035	-0.00000+j0.00000	25622(영동-#2G)

표 3. 한전계통의 지역간모드에 대한 AMEP 결과

Machine	Parameter	NFOEP	NSOEP	Gen .
EXCITER	KA	0.00656+j0.00755	-0.00506+j0.00092	29252(고리-#4G)
		0.00656+j0.00755	-0.00506+j0.00092	29251(고리-#3G)
		0.00607+j0.00336	-0.00287+j0.00116	29151(고리-#1G)
		0.00483+j0.00416	-0.00349+j0.00069	29152(고리-#2G)
		0.00220+j0.00778	-0.00243-j0.00008	28154(월성#4)
		0.00220+j0.00778	-0.00243-j0.00008	28153(월성#3)
		0.00220+j0.00778	-0.00243-j0.00008	28152(월성#2)
		-0.00150+j0.00063	0.00123-j0.00100	27153(영광-#3G)
		-0.00147+j0.00075	0.00116-j0.00109	27154(영광#4)
		-0.00147+j0.00069	0.00117-j0.00103	27151(영광-#1G)
	KF	-0.00441+j0.00002	0.00158-j0.00053	29252(고리-#4G)
		-0.00441+j0.00002	0.00158-j0.00053	29251(고리-#3G)
		-0.00393+j0.00073	0.00175-j0.00092	29152(고리-#2G)
		-0.00339+j0.00070	0.00123-j0.00061	29151(고리-#1G)
	TA	0.00062-j0.00070	0.00013-j0.00048	29522(삼랑진2G)
		0.00062-j0.00070	0.00013-j0.00048	29521(삼랑진1G)
		-0.00049-j0.00059	-0.00029+j0.00001	30154(삼천포#4)
		-0.00049-j0.00059	-0.00029+j0.00001	30153(삼천포#3)
	TF	0.00211+j0.00046	0.00049-j0.00017	29252(고리-#4G)
		0.00211+j0.00046	0.00049-j0.00017	29251(고리-#3G)
		0.00196+j0.00007	0.00052-j0.00023	29152(고리-#2G)
		0.00170+j0.00003	0.00037-j0.00018	29151(고리-#1G)
		0.00087-j0.00002	0.00040-j0.00016	30152(삼천포#2)
	Governor	KC	-0.00061+j0.00174	0.00001-j0.00003
KC		-0.00061+j0.00174	0.00001-j0.00003	26151(보령-#1G)
KC		-0.00059+j0.00162	0.00001-j0.00003	26104(태안#4)
KC		-0.00059+j0.00162	0.00001-j0.00003	26103(태안#3)
KC		-0.00059+j0.00162	0.00001-j0.00003	26102(태안#2)
KC		-0.00059+j0.00162	0.00001-j0.00003	26101(태안#1)
KC		-0.00029+j0.00503	-0.00001-j0.00010	29252(고리-#4G)
KC		-0.00029+j0.00503	-0.00001-j0.00010	29251(고리-#3G)

의 실수부인 -0.086 과 비교해도 그 크기가 작기 때문에 제환이득은 지역모드에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 나머지 파라메타인 전압조정기 시정수 TA, 안정화 제환 시정수 TF에 대한 AMEP는 모두 무시할 수 있을 만큼 작다. 여자시스템에서 다른 시정수와 이득에 대한 AMEP를 계산하였으나 모두 크기가 작아 표에 나타나지 않았다.

그리고 표 2에는 터빈/조속기 파라메타가 미소신호안정도에 주는 영향을 파악하기 위하여 계산한 AMEP의 결과도 포함되어 있는데, 가장 큰 실수부를 가지고 있는 파라메타는 올진 #3호기의 조속기 시정수 T1으로 그 값은 0.0017 이다. 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.

표 3은 지역간 모드인 모드 2에 대한 AMEP를 계산한 결과로 모든 값은 파라메타를 100% 변화한 것이다. 가장 큰 AMEP는 고리 #3-#4호기의 전압조정기 이득 KA를 변화할 때, 고유치 실수부가 0.00656 변화한다. 같은 여자시스템의 파라메타에 대해서 지역모드에 대한 가장 큰 값이 0.061 이었던 것을 고려하면 여자시스템이나 터빈/조속기 계통의 파라메타는 지역간모드에 대해서 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

4. 결 론

이 논문에서는 특정 파라메타 변화에 대한 고유치 변화를 추정하는 AMEP 이론을 실제 계통에 적용한 결과를 기술하였다.

대규모 계통을 구성하고 있는 제어기들은 다양한 모델로 표현되므로 계통 상태행렬의 감도행렬을 구하는 것은 매우 복잡하고 많은 시간을 필요로 한다. 이런 난점을 극복하기 위해서 개발한 AMEP는 수식적인 감도행렬을 구성하지 않기 때문에 대규모 계통의 차수에 제한 없이 쉽게 응용할 수 있고 정확성도 높다.

제한한 AMEP 알고리즘을 한전계통의 제어기 파라메타에 응용한 결과, 지역모드와 지역간모드에 대한 변화를 정확하게 추정하여 알고리즘의 정확성을 확인하였다. 지역모드에 대해서 올진발전기의 전압조정기 이득이 가장 민감하게 영향을 주고 있고 다른 제어기 파라메타는 크게 영향을 주지 않음을 확인하였다. 그리고 지역간모드에 대해서는 제어기 파라메타가 크게 영향을 주지 않음을 확인하였다.

실 계통의 제어기 파라메타에 대한 AMEP를 계산한 결과 파라메타들이 미소신호안정도에 절대적인 영향을 주는 즉 선형모델의 오류나 부적절한 파라메타의 입력 등은 존재하지 않았다. 이와 같이 AMEP의 결과는 정량적인 값은 제공하므로 모델의 불확실성이나 주어진 데이터의 신뢰성 등을 판단할 수 있어 계통해석에 유용하게 응용될 수 있다.

현재까지 저자들은 고유치 변화를 추정하는 알고리즘으로 전력계통의 적용대상과 해석하고자 하는 안정도에 따라서 확대행렬의 고유치 감도(AMES), 확대행렬의 고유치 perturbation(AMEP), 선택적인 고유치감도 기법, 동기화토크변동률 등의 알고리즘을 일관성 있게 개발하여, 과도/전압/미소신호안정도 해석에 다양하게 응용하였으며 이 논문에서 기술한 AMEP로 대규모 계통의 제어기정수에 대한 추정고유치 계산함으로써, 계통 해석에 필요한 고유치감도의 대부분 중요 알고리즘을 개발하였다.

[참 고 문 헌]

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

377-392
 [2] 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, 2000. 3
 [3] PTI, PSS/E manual, Program Operation Manual, Volume II, 2000.
 [4] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill Book Company, New York, 1994.
 [5] F. Luis Pagola, Ignacio J. Perez-Arriaga, George C. Verghese, "On Sensitivities, Residues and Participations: Applications to Oscillatory Stability Analysis and Control". IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 4, No. 1, 1989.