

지역모드 제동을 위한 고유치 감도와 PSS 설계

송성근* 남해곤* 심관식** 김용구*
전남대학교* 서남대학교**

Design of Power System Stability for Local Mode Using Eigen-Sensitivity

S. G. Song* H. K. Nam* K. S. Shim** Y. G. Kim*
Chonnam national university* Seonam university**

Abstract - The Eigen-Sensitivity theory at full system is used to supplement drawback of the existing PSS gain tuning methods in this paper. Hessenberg method is used to linear analysis. This proposed method is successfully tested on KEPCO 2003 off-peak power system to improve local mode. The designed PSS at 2003 off-peak system is installed in 2003 peak system to improve robustness.

2. 고유치 감도 이론 (4)

행렬 A 의 고유치와 좌, 우고유벡터를 λ_i, w_i^T, v_i 라하고, 행렬 A 를 구성하는 임의의 정수 K 가 ΔK 만큼 변화한 경우 행렬 A 가 E 만큼 변화한다고 가정하면 다음과 같은 식이 성립한다.

$$(A + E)(v_i + \Delta v_i) = (\lambda_i + \Delta \lambda_i)(v_i + \Delta v_i) \quad (1)$$

이때 고유치 변화분은

$$\begin{aligned} \Delta \lambda_i &= \frac{\partial \lambda_i}{\partial K} \Delta K + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 \lambda_i}{\partial K^2} \Delta K^2 + \dots \\ &= \Delta \lambda_i^{(1)} + \Delta \lambda_i^{(2)} \dots \end{aligned} \quad (2)$$

이와 같으며 식의 $s_i^{(1)}$ 와 $s_i^{(2)}$ 는 다음 식에 의해 계산된다.

$$\Delta \lambda_i^{(1)} = w_i^T E v_i \quad (3)$$

$$\Delta \lambda_i^{(2)} = w_i^T E \Delta v_i \quad (4)$$

$$(A - \lambda_i I) \Delta v_i = (\Delta \lambda_i I - E) v_i \quad (5)$$

위의 식 (5)의 $(A - \lambda_i I)$ 는 특이 행렬로 식을 풀 수 없으므로 좌고유벡터와 우고유벡터 감도가 직교한다는 아래 식을 이용해 선형연립방정식 해법에 의해 1차 고유벡터 감도를 계산한다.

$$w_i^T \Delta v_i = w_i^T \sum_{k=1, k \neq i}^n \alpha_{ki} v_k = 0 \quad (6)$$

3. PSS 설치지점 선정 및 설계

PSS의 설치지점 선정과 설계문제에 대해서는 이미 많은 논문이 발표된바 있으므로 본 논문에서는 이에대한 간단한 과정만 언급하기로 한다.

3.1 PSS 설치지점 선정

PSS의 설치지점 선정 방법으로는 Speed Participation Factor(SPF)와 Transfer Function Residue(TFR) 방법 등이 있으나 SPF의 경우 상태행렬만을 이용한 값으로 입출력 행렬이 포함되어 있지 않아 PSS의 제어효과를 정확하게 반영하지 못하는 단점이 있고, TFR의 경우 모든 발전기에 대해 계산해야 한다는 단점이 있으나, 본 논문에서는 보다 간편한 SPF를 PSS 설치지점 선정 방법으로 사용하였다.

1. 서 론

현대 전력계통은 원거리 송전에 의한 고리액턴스화와 중부하로 운전되고 있으며 이로 인한 0.2~2 Hz 대의 저주파 진동 문제가 대두되고 있다. 실제 선진국 여러 나라에서 저주파 진동에 의한 계통사고가 보고되고 있다. 저주파 진동에 제동력을 제공할 수 있는 방법으로는 여자 시스템에 각속도와 동상의 전기적 출력을 제공해주는 보조신호를 줌으로서 댐핑을 제공하는 PSS가 가장 많이 사용되고 있으며 그 효과도 많은 문헌들에서 보고되고 있다. PSS 위치선정 방법에는 여러 방법이 있으나 그중 Speed Participation Factor(SPF)와 Transfer Function Residue(TFR)방법이 정확도 면에서 우수하나 TFR의 경우는 모든 발전기에 대해 계산해야 한다는 단점 때문에 SPF 방법이 주로 사용되며 논문에서도 SPF를 이용하여 PSS 설치지점을 선정하였다.

PSS를 설계하는 과정은 크게 위상보상과 PSS 이득 결정과정으로 나뉜다. 위상보상 과정은 PSS가 각속도와 동상인 요소를 발전기 전기적 출력에 제공 해줄 수 있도록 PSS의 진상-지상 보상기의 전달함수를 결정하는 과정으로 이 과정은 de Mello에 의해 제안된 1기 무한모선에서의 방법을 사용한다. 이득 결정과정은 현재 1기 무한 모선에서 결정[1]하는 방법과 전체 시스템에 대해 결정[2]하는 방법이 있으나 1기 무한모선에서의 방법은 가정에 의한 결정이라는 단점이 있고, 전체 시스템에서의 결정법은 계산 시간 및 복잡성 때문에 세밀한 이득 결정이 불가능하다는 단점이 있다. 이에 대해 본 논문에서는 두 가지 이득 결정방법의 단점을 보완하기 위해 고유치 감도 이론에 의한 Mode tracking 방법을 제안하였다. 본 방법은 전체 시스템에서 특정 모드에 대한 근궤적을 그리는 방법으로 특정 모드에 대해서만 적용할 수 있어 계산 시간이 짧으며, 이득을 세밀하게 변화시킬 수 있다는 장점과 전체 시스템에서의 이득 결정과정으로 가정이 포함되지 않는다는 장점이 있다.

제안된 방법을 실제 2003년 비첨두 부하계통에 대해 PSS를 설계하였으며 강인성 확인을 위해 설계된 PSS를 부하 조건 및 투입 발전기 대수가 틀린 2003년 첨두 부하에도 적용하였다.

3.2 PSS 설계조건

PSS 설계를 위한 1기 무한모선의 조건은 문헌 [3]에서 제시한대로 계통-발전기-여자기간의 전달함수(PGE)의 위상지연이 가장 많이 일어나는 조건인 단위 출력에 단위 역률과 외부 리액턴스가 0.2인 조건하에서 PSS 설계를 수행하였다.

$$P_e = 1.0 + 0.0i, X_e = 0.2 \quad (7)$$

논문에서 사용한 PSS 모델은 가속력 적분방식인 PSS2A PSS 모델을 사용하였으며, 이 모델의 이득 및 위상보상 전달 함수는 다음과 같은 2개의 진상-지상 보상회로와 이득으로 구성되어 있다.

$$PSS(s) = K_s \frac{1 + s k_1 T_1}{1 + s T_1} \frac{1 + s k_2 T_2}{1 + s T_2} \quad (8)$$

3.3 위상 보상

PSS에 의해 보상된 PGE함수의 위상은 저주파 진동모드 영역인 1~10 (rad/sec)에서 위상지연이 45° 이내로 유지하기 위해 위상 보상 목표치를 20~30°로 하여 최소자승 오차법을 적용하여 식(8)의 k 와 T 를 결정하였다. 최소자승 오차법에 의해 계산된 변수 k 와 T 의 허용범위는 각각 1~10, 0.01~0.99로 하였다.

3.4 이득결정

3.4.1 1기 무한모선에서의 이득결정

1기 무한 모선에서의 이득 결정은 근계적을 이용하여 아래의 기준에 의해 결정하였다.

- 지역모드에 더 이상의 제동특성을 향상시키지 못할 때의 이득.
- 제어모드가 나빠지기 시작하는 이득의 1/3값.
- 지역모드의 damping ratio와 제어모드의 damping ratio가 같아지는 이득.

3.4.2 고유치 감도에 의한 이득결정

1기 무한 모선에서 결정된 이득을 기준으로 하여 전체 계통에서 고유치 감도 계산을 통하여 최적 이득을 다시 결정한다. 이때 1기 무한 모선의 이득 결정 방법 중 두 번째 방법에 의해 결정된 이득을 감도 계산에 의해 결정될 수 있는 이득의 최대값으로 하였다.

4. 한전계통 적용

논문에서 사용된 모든 선형해석 프로그램은 본 실험실에서 개발한 것이며 모드해석은 Hessenberg법을 사용하여 계산하였다.

PSS 설계는 2003년 비침두 부하 계통 데이터를 이용하였으며 설계된 PSS의 강인성을 확인하기 위해 2003년 침두 부하에 같은 PSS를 투입하여 보았다. 2003년 비침두 부하시 투입된 발전기는 65기, 총 부하 3000만kW, 모선수 900개로 구성되어 있으며, 침두시에는 222기가 투입되고 전체 부하는 약 4700만kW이다.

2003년 비침두 부하시의 계통에 대한 각속도 1~10 (rad/sec) 내의 모드 해석 결과는 표 1과 같다. 고유치 해석결과 미소신호 문제가 심각하게 나타나고 있으나 이는 실제 그렇다는 것이 아니며, 본 데이터는 2003년에 대한 예상 데이터일 뿐만 아니라 PSS가 투입되어 있지 않는 상태이므로 실제 한전데이터와는 다소 차이가 있을 수 있다.

모드해석 결과 SPR이 0.8이상으로 제동특성이 나쁜 모드는 모두 7개가 있었으며 각 모드에 대한 고유벡터 결과는 표 1과 같다. 표로부터 울진 지역이 가장 심각함을 볼 수 있다.

표 1. 2003년 미소신호 안정도 해석 결과

Eigenvalues	Type	Group1	Group2
0.2838 + 4.9604i	I	영광	울진, 당진, 태안, 보령 안양
-0.0319 + 5.0261i	I	고리, 월성	서해안 지역
-0.0970 + 6.1069i	P	영광 5-6	영광2-4
0.3292 + 6.3606i	I	울진	당진, 보령, 태안, 안양
-0.0694 + 7.7274i	P	울진 1	울진 3-4
-0.0736 + 7.7917i	P	울진 3	울진 4
-0.1040 + 7.8274i	P	울진 2	울진 3-4

표 2. 모드해석 결과

Mode	Eigenvector		SPF	Bus name
	Mag.	Pha.		
0.3292+6.3606i	1.000	-0.00	0.100	울진#1
	0.988	2.98	0.085	울진#4
	0.988	2.98	0.085	울진#3
	0.731	1.83	0.068	울진#2
-0.0694+7.7274i	1.000	0.00	0.318	울진#1
	0.498	-172.25	0.068	울진#4
	0.498	-172.25	0.068	울진#3
	0.229	160.75	0.018	울진#2

본 논문에서는 앞에서 언급한 바와 같이 PSS 설치지점 선정은 SPF를 계산하여 그 값이 큰 발전기로 하였다. 2003년 비침두 부하시 PSS투입 발전기로는 울진, 영광, 고리 등이 선정되었으며 이중 논문에서는 지역모드성이 강한 울진 지역에 PSS 투입하였다. 본 논문에서는 울진 1호기에 PSS 투입과정만을 기술한다.

표 1의 고유치 결과 중 울진 1호기와 연관된 모드는 광역모드 0.2838 + 4.9604i, 0.3292 + 6.3606i과 지역모드 -0.0694 + 7.7274i가 있으며, 세 모드에 대한 SPF결과 0.2838 + 4.9604i모드에서의 울진 1호기의 값이 작게 나와 본 논문에서는 두 모드 0.3292 + 6.3606i과 -0.0694 + 7.7274i에 대해서만 기술하기로 한다. 이 두 모드의 우고유벡터와 SPF값은 표 2이며 SPF결과 울진 1호기에 PSS를 투입한 경우 지역모드에 영향이 광역모드에 영향보다 월등히 클것으로 예상된다.

4.1 위상보상

PSS의 투입 전의 PGE함수의 위상지연과 PSS 진상-지상 보상회로에 의해 보상된 PGE함수의 위상지연은 그림 1과 같다. 위상 보상은 보상 후 위상지연이 각속도 1~10(rad/sec)에서 30°가 되도록 최소자승 오차 방법에 의해 진상-지상 보상회로의 정수 k 와 T 를 결정하였다. 위상보상 후 위상지연이 1~10(rad/sec)에서 약 0~45°를 유지함을 그림에서 확인 할 수 있다.

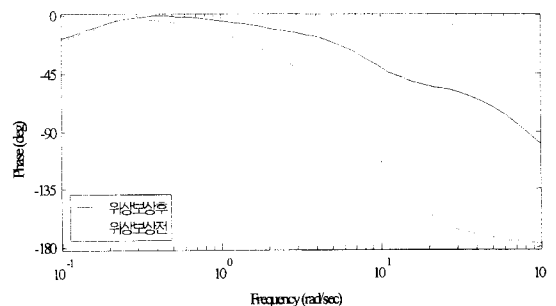


그림 1. 울진 1호기(25151)의 보상 전, 후 위상지연

4.2 1기 무한모선에서의 이득 결정

그림 2는 앞의 위상보상에서 결정된 정수 $k=9.1$ 과 $T=0.01$ 을 이용하여 PSS의 이득 변화에 따른 근궤적을 보여 준다. PSS 이득을 증가함에 따라 지역모드에 대해서는 위상변화가 거의 없이 제동특성을 향상시키고 제어모드는 악화시킴을 볼 수 있다. 그러나 PSS 이득이 13 이상에서는 제동 특성을 거의 향상시키지 못하므로 PSS의 이득을 13으로 결정한다.

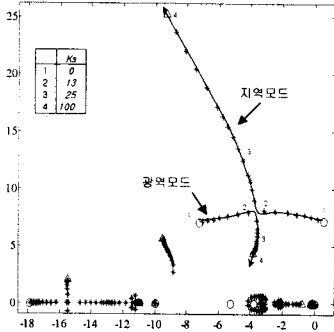


그림 2. 이득 K_S 변화에 대한 모드 궤적

4.3 전체 시스템에서의 이득 결정

표 2의 두 모드에 대한 전체 시스템에서의 고유치 감도이론에 의한 mode tracking을 이용해 PSS 이득을 0에서 20까지 변화시킨 경우의 근궤적 결과는 그림 3과 같다. mode tracking 결과 지역모드에 대해서는 제동 특성의 향상이 두드러지나 광역모드에 대해서는 그렇지 못함을 확인 할 수 있다. mode tracking 결과 PSS의 임계값은 15이나 문헌 [1]에서 언급한 바와 같이 PSS 투입에 따른 주파수 변화를 10% 이내로 하기 위해 PSS의 최적 이득을 14로 결정하였으며, 결과는 1기 무한모선의 결과 13과 거의 같다.

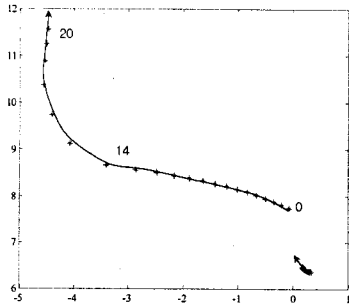


그림 3. Mode tracking 결과

1기 무한모선에서 어떠한 제어모드도 PSS 이득 증가에 따라 불안정해지지 않으므로 전체 시스템에서의 최적 이득을 PSS 최종이득으로 결정하고 식 (8)의 PSS 전달 함수는 다음과 같이 결정된다.

$$PSS(s) = 14 \frac{1+s0.091}{1+s0.01} \frac{1+s0.091}{1+s0.01}$$

위의 전달함수를 이용하여 PSS/E를 이용 비선형 해석을 위해 PSS2A모델을 사용하였으며 PSS의 진상-지상 블록과 이득을 제외한 나머지 상수값은 문헌 [1]의 값을 사용하였다.

위와 같은 방법으로 올진 지역의 다른 발전기들에 PSS를 설계하였다. 설계된 PSS를 2003년 비첨두 및 첨두 부하에 적용하여 비선형 해석 수행하였으며, 각각 신속전에 3상 모션사고를 3Cycle동안 모의하였다. 시뮬레이션 결과 그림 4와 5에서 볼 수 있듯 설계된 PSS가

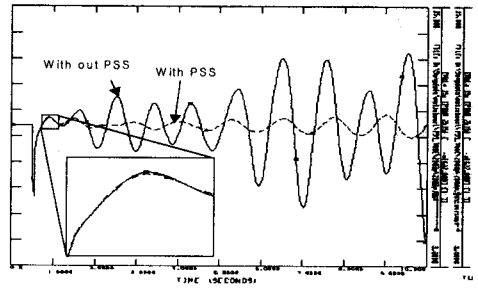


그림 4. 2003 비첨두 부하시의 비선형 해석 결과

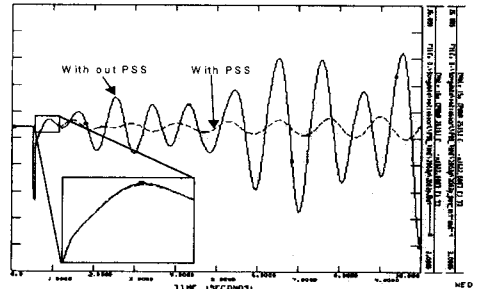


그림 5. 2003 첨두 부하시의 비선형 해석 결과

효과적이며 첫 번째 swing에서 PSS가 없는 경우에 비해 첨두치가 증가하지 않으므로 과도안정도면에 설계된 PSS가 나쁜 영향을 끼치지 않음이 확인된다.

5. 결론

본 논문에서는 기존의 PSS이득 결정과정들의 단점을 보완하기 위해 고유치 감도 이론을 적용한 mode tracking 방법으로 전체 시스템에서 PSS 이득 결정 방법을 제안하였으며 제안된 방법을 실제 계통인 2003년 비첨두 부하에 적용 결과가 1기 무한모선에서의 결과와 같음을 확인하였다. 설계된 PSS의 강인성을 확인하기 위해 동일한 PSS 모델을 2003년 첨두 부하에도 적용 강인성을 확인하였다.

향후 제안된 방법을 지역모드 뿐만 아니라 광역모드에 의 적용을 시도해 보아야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2001년에 기초전력공학공동연구소 지원에 의하여 이루어진 연구입니다.

(참 고 문 헌)

- [1] 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, Dec. 1999
- [2] P. Kundur, M. Klein, G.J. Rogers, M.S. Zynwo, "Application of Power System Stabilizers for Enhancement of Overall System Stability", IEEE Trans. PWRs-Vol 4, No. 2, pp. 614-623, May. 1989.
- [3] 김동준, 문영환, 김태균, 신정훈, "PSS 튜닝을 위한 기본 연구 Part I : 계통 운전조건에 대한 토오크 특성 분석", 대한전기학회 논문지, 48 A권, 9호, 1999.9
- [4] H.K. Nam, Y.K. Kim, K.S. Shim, K.Y. Lee, "A New Eigen-Sensitivity Theory of Augmented Matrix and It's Applications to Power System Stability Analysis", IEEE Trans. PWRs-Vol 15 No. 1, Feb. 2000 pp. 363-369
- [5] 남해곤, 송성근, 심판석, 문채주, 김동준, 문영환, "대규모 전력계통의 미소신호 안정도 해석을 위한 Hessenberg 법", 대한전기학회 논문지 A, Vol 49A, No. 4, pp 168-176, 2000, 4.