

PSS 입력신호에 따른 이득여유 연구

김동준 문영환  
한국전기연구소

김태균 신정훈 김용학  
한전전력연구원

A Study of the Gain Margin in Accordance with the PSS Inputs

Dong-Joon Kim Young-Hwan Moon Tae-Kyun Kim Jeong-Hoon Shin Yong-Hak Kim  
KERI KEPRI

**Abstract** - This paper proposes a guideline of choosing the optimum stabilizer input considering the gain margin of power system stabilizer between the optimum stabilizer gain and the allowable maximum stabilizer gain in accordance with the five inputs, such as generator shaft speed, bus frequency, electrical power, accelerating power and bus terminal voltage. The local mode damping and exciter mode damping are considered with increasing the stabilizer gain to determine each gain margin of the inputs.

중요 동요모드를 보여준다. 고유벡터를 통해서 이 모드를 구별하면, 하나는 1.844 Hz의 여자기(exciter)모드이고 하나는 1.719 Hz인 지역(local)모드이다. 여자기 모드는 충분한 댐핑을 갖고 있지만, 이 지역모드는 그 댐핑이 아주 작다. 따라서 송전선로가 약하게 연계되어 있는 경우, 쉽게 불안정하게 되므로 이 계통은 PSS에 의한 댐핑이 매우 필요하다고 볼 수 있다.

1. 서 론

최근 세계 전력회사들은 환경문제, 경제성문제 등에 의한 송전선로 확장의 어려움으로 전력계통을 안정도 여유(security margin)가 거의 없는 운전조건에서 운전토록 하고 있다. 더불어, 전력회사들은 최대의 전력을 수송 가능도록 하면서 안정도 향상을 도모할 수 있는 TCSC, STATCOM, SSSC 그리고 UPFC 등의 FACTS 설비를 송전선로에, 혹은 PSS를 발전기에 설치하거나 설치하는 것을 고려하고 있다. 이러한 전력계통 안정화 제이기 중 가격에 비해 성능이 탁월한 제이기는 발전기의 AVR에 보조신호를 입력하는 PSS이다.

초기 PSS 입력신호로는 발전기 축속도가 많이 사용되어 왔었다. 그러나 발전기 축속도를 입력으로 하는 PSS는 발전기의 축진동에 의한 필터설계가 필수적이었고, 필터에 의한 위상지연으로 그 성능이 다소 저하되었다. 다음으로 사용된 PSS는 모션 주파수를 이용하는 PSS와 발전기 출력을 입력으로 하는 PSS 등이 개발되어 세계 여러나라에서 사용되어 오고 있다. 최근에는 가속력 추정할 수 있는 알고리즘의 개발과 이것을 계산할 수 있는 혁신적인 디지털 기술에 의해서 가속력을 입력으로 하는 PSS가 개발되었다. 이러한 신호들을 입력으로 하는 PSS 성능은 PSS 이득 값 결정에 따라 큰 영향을 받는다. 본 논문은 5개의 PSS 입력신호( $\omega, f, P_e, P_a, V_t$ )에 따른 PSS 이득여유를 고유치 해석과 과도안정도 해석을 통해서 고찰하고 최적 PSS 입력신호에 대한 지침을 제시하였다.

2. 계통 모델링과 PSS 위상 보상

2.1 계통 모델링

PSS 입력신호에 따른 이득여유를 고찰하기 위해서 그림 1과 같이 송전선로 임피던스를 0.2 p.u.를 갖는 강건한 계통인 1기 무한계통<sup>(4)</sup>을 사용하였다. 주어진 발전기 모델정수는 직축에 댐핑권선이 한 개, 횡축에 댐핑권선이 2개인 고차 모델로, PSS/E의 원통형 모델인 GENROU 모델과 부합한다. 여자기 모델은 DC형으로 PSS/E 모델인 그림 2의 IEEE1을 선택할 수 있고, 발전기 모델정수와 여자기 모델정수는 아래의 부록과 같다. 계통선형화 행렬은 PSS/E 다이나믹 모델을 선형화한 AVR/PSS 튜닝 프로그램<sup>(5)</sup>을 이용하여 계산하였다.

표 1은 계통선형화 행렬로부터 PSS가 없는 경우의 고유치 해석을 보여준다. 표 1의 고유치 결과는 2개의

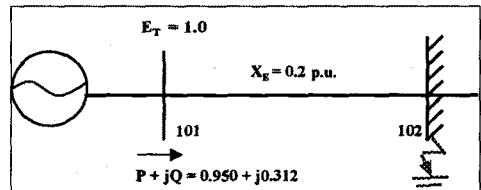


그림 1 1기 무한 모션 계통도 (100MVA)

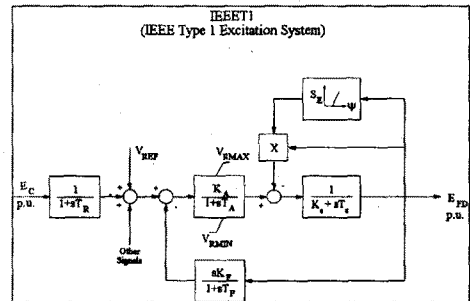


그림 2 여자기 모델 IEEE1

표 1 PSS가 없는 경우 고유치 계산결과

모드	Real	Imag	Hz	비고
1	-100.395	0.000	0.000	
2	-29.127	0.000	0.000	
3,4	-25.128	±11.589	1.844	여자기모드
5,6	-351	±10.799	1.719	지역모드
7	-1.907	0.000	0.000	
8	-948	0.501	0.0801	
9	-948	-0.501	0.0801	

2.2 PSS 위상보상

사용된 PSS 모델은 그림 3과 같은 PSS/E의 IEEE1 모델이며 PSS/E로 고유치 해석결과를 시간영역에서 검증하는 것이 가능하다. PSS 위상보상에 사용된 정수<sup>(6)</sup>는 부록과 같다. 이 PSS 모델정수는 송전선로 임피던스가  $X_e=0.8p.u.$ 인 취약계통에서 계통-발전기-여자기(이하 PGE)에서 발생한 위상지연을 관심주파수(0.1Hz-2.0Hz) 범위내에서 완전보상 하도록 결정된 정수이다. 본 논문에서 사용된 송전선로가  $X_e=0.2p.u.$ 인 강

계통에서는 PGE의 위상지연은 더 크게 되어, PGE(s) · PSS(s) 위상 특성은 그림 4처럼 관심주파수 영역에서 부족보상으로 된다. (이때 사용된 PSS 이득은  $K_s=1.0$  이다.) 따라서 본 논문에서 사용하는 그림 1의 계통 운전 조건에서는 PSS가 PGE 위상지연을 관심주파수 영역에서 부족보상으로 하기 때문에 이 주파수 영역에서는 양의 댐핑 토오크뿐만 아니라 미약하나마 양의 동기화 토오크를 제공하게 된다. 사용된 PSS 위상보상 정수는 실제 계통에 적용하는 데는 다소 고려가 필요하지만 본 연구의 PSS 이득여유 결정에는 무리가 없다.

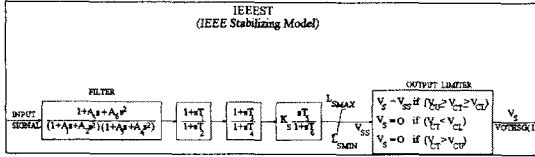


그림 3 PSS 모델 IEEEST

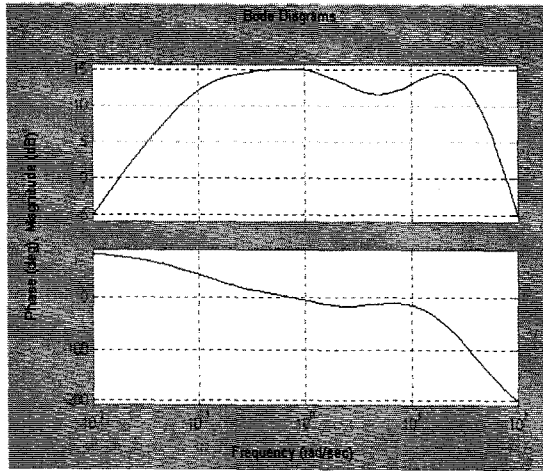


그림 4 PSS(s) · PGE(s) 주파수 특성

### 3. PSS 입력신호에 따른 이득여유

#### 3.1 발전기 속도( $\omega$ )를 입력하는 PSS $\omega$

앞의 위상보상 정수를 갖고 발전기 속도( $\omega$ )를 입력으로 하는 PSS인 경우, PSS 이득  $K_s$ 의 변화에 대해서 두 중요 모드의 변화는 표 2와 같다. 여자기모드가 불안정으로 가는 최대 이득은  $K_s=38.0$  이다. 지역모드와 여자기모드의 댐핑율이 같은 이득에서 최적의 이득<sup>(2)</sup>을 결정하면 이 값은  $K_s=9.5$ 이 되고, 이득여유는 약 12db가 된다. 그러나 실제 계통에 투입되는 발전기 속도형 PSS $\omega$ 는 축전동 필터를 반드시 고려해야 하기 때문에 이득여유는 이보다 더 작은 값을 갖게 된다.

설계된 발전기 속도형 PSS의 성능을 고찰하기 위해서 시간영역 과도안정도 프로그램인 PSS/E를 이용하여 이 PSS를 검증하였다. 그림 1의 모선 102에 3상 단락사고를 발생시키고, 4 싸이클 후 제거하는 것으로 하여 그림 5와 6과 같은 응답을 얻었다. 그림 5는 PSS의 이득이  $K_s=0.0$ 인 경우,  $K_s=9.5$ 인 경우 그리고  $K_s=38.0$ 인 경우의 전력동요를 보여준다. 전력동요의 댐핑은 PSS가 없는  $K_s=0.0$ 인 경우보다 PSS가 있는 경우가 현저하다. 그러나 그림 5는 이득이  $K_s=38.0$ 이나  $K_s=9.5$ 인 경우나 똑같이 전력동요 댐핑을 보여준다. 이것은 0.1~0.1p.u. 값을 갖는 PSS의 리미터 때문에 기인한다.

그림 6은 AVR의 보조신호로 들어가는 PSS의 출력신호를 보여준다. 최대이득  $K_s=38.0$ 인 경우는 출력신호가 댐핑이 되지않고, 고유치 해석과 같이 제어모드가 불안정함을 보여준다.

표 2 PSS $\omega$  이득변화에 따른 모드 댐핑을 변화

이득 ( $K_s$ )	지역모드 (댐핑율)	여자기 모드 (댐핑율)	비고
0.0	-0.351+j10.799 (0.033)	-25.128+j11.589 (0.908)	
9.5	-4.688+j9.778 (0.432)	-9.561+j19.779 (0.435)	최적 이득
38.0	-5.267+j4.953 (0.728)	-0.054+j31.259 (0.002)	최대 이득

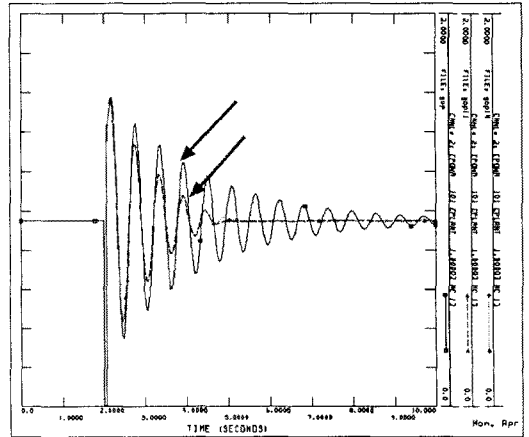


그림 5 상정사고시 전력동요 ( $P_c$ )  
(모선 102 3상 단락사고 후, 4 싸이클에 제거)

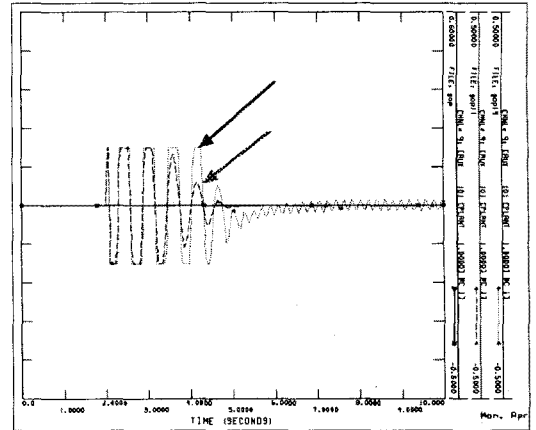


그림 6 3상 단락 사고시 PSS 출력신호(PSS $_{out}$ )

#### 3.2 발전기 모선주파수( $f_b$ )를 입력으로 하는 PSS $f$

발전기 모선 주파수를 입력으로 하는 PSS인 경우 이득변화에 대한 두 모드 변화는 표 3과 같다. 사용된 정수는 부록의 위상보상 정수와 같다. 표 3는 축속도 PSS보다 모선주파수를 입력으로 하는 PSS의 이득여유가 4.4db로 보다 적고, 댐핑율도 적음을 보여준다. PSS/E를 이용한 과도안정도 해석에서도 이러한 결과를 고찰할 수 있다. 모선주파수를 입력으로 하는 PSS의 이득 튜닝은 일반적으로 취약계통에서 수행함으로 표 4와 같이 송전선로  $X_e=0.8$  p.u. 조건에서<sup>(4)</sup> 이득변화에 대한 모드의 댐핑율을 계산하였다. 표 4로부터 최대이득과 이득여유는 표 3보다 더 작음을 알 수 있어, 주파수를 입력으로 하는 PSS 성능은 앞 절의 축속도를 입력으로 하는 PSS 성능보다 미약함을 알 수 있다.

표 3 PSS<sub>r</sub> 이득변화에 대한 모드변화(X<sub>c</sub>=0.2)

이득(K <sub>s</sub> )	지역모드 (댐핑율)	여자기 모드 (댐핑율)	비고
5.0	-1.206+j10.803 (0.111)	-12.905+j28.484 (0.413)	
9.0	-1.853+j10.533 (0.173)	-5.453+j30.342 (0.177)	최적이득
15.0	-2.487 + j9.924 (0.243)	2.794 + j31.034 (-0.090)	최대이득

표 4 PSS<sub>r</sub> 이득변화에 대한 모드변화(X<sub>c</sub>=0.8)

이득(K <sub>s</sub> )	지역모드 (댐핑율)	여자기 모드 (댐핑율)	비고
0.0	0.735+j5.969 (-0.122)	-24.295+j9.304 (0.934)	
7.10	-0.198+j5.781 (0.034)	-1.063+j30.218 (0.035)	최적이득
7.57	-0.254 + j5.751 (0.044)	-0.012 + j30.215 (0.000)	최대이득

3.3 가속력 (P<sub>a</sub>)를 입력으로 하는 PSS<sub>P<sub>a</sub></sub>

앞의 위상보상을 그대로 사용하기 위해서 PSS 제어기 블록 중 sT<sub>5</sub>를 제거하였다. 이때, 표 5는 가속력을 입력으로 하는 PSS의 이득변화에 대한 두 모드의 변화를 보여준다. 이득여유와 최적이득에서의 댐핑율은 앞의 축속도를 입력으로 하는 PSS와 같음을 알 수 있다. 그러나 가속력을 입력으로 하는 PSS는 축진동 필터가 따로 필요하지 않으므로 위상지연이 없어 축속도를 입력으로 하는 PSS보다 더 성능이 우수하다고 할 수 있다. 그러나 이러한 PSS는 가속력을 직접 측정할 수 없다는 이유로 초기에는 불가능하였지만, 최근 가속력을 추정할 수 있는 계산 알고리즘과 이것을 계산할 수 있는 혁신적인 디지털 기술에 의해서, 가속력을 입력으로 하는 PSS가 개발되어 적용되고 있다.

표 5 PSS<sub>P<sub>a</sub></sub> 이득변화에 따른 모드변화

이득(K <sub>s</sub> )	지역모드 (댐핑율)	여자기 모드 (댐핑율)	비고
16.1	-4.736+j9.702 (0.439)	-9.417+j19.923 (0.427)	최적이득
50.0	-5.314+j5.575 (0.690)	-1.774+j29.255 (0.061)	
64.5	-5.267+j4.947 (0.729)	-0.034+j31.282 (0.001)	최대이득

3.4 발전기 출력 (P<sub>g</sub>)를 입력하는 PSS<sub>P<sub>g</sub></sub>

발전기 출력을 입력으로 하는 PSS는 기계적 출력이 일정하다면 표 5과 같은 결과를 얻을 수 있다. 그러나 수력기처럼 원동기의 저주파 기계적 동요모드가 있는 경우 원하지 않은 PSS 출력제어가 될 수 있다.

3.5 모션 전압(V<sub>t</sub>)을 입력하는 PSS<sub>V<sub>t</sub></sub>

발전기 단자전압을 입력으로 하는 PSS는 현대 전력계통에서는 거의 쓰이지 않는다. 발전기 단자전압을 쓸 경우, PSS는 계통에 관심영역 주파수에서의 댐핑을 제공하는 대신 전압제어루프의 영향을 쉽게 받아 표 6처럼 다른 제어모드가 불안정 할 수 있다.

표 6 PSS<sub>V<sub>t</sub></sub> 이득변화에 대한 모드변화

이득(K <sub>s</sub> )	지역모드 (댐핑율)	여자기 모드 (댐핑율)	기타 불안정 모드	비고
1.0	-0.362+j10.799 (0.033)	-25.634+j11.249 (0.916)	-0.001 (1.0)	
5.0	-0.404+j10.805 (0.037)	-29.358+j9.257 (0.954)	0.399 (-1.0)	불안정 발생

4. 결 론

본 논문은 PSS의 입력으로 사용될 수 있는 5가지 신호에 대해서 고유치 해석을 통하여 PSS 최적이득과 최대이득 사이의 이득여유를 연구하였다. 그리고 PSS 입력 중 가속력을 입력으로 하는 PSS가 가장 효과적인 성능을 발휘할 수 있음을 확인하여 최적의 PSS의 입력신호에 대한 지침을 제시하였다. 그러나 가속력을 이용한 PSS는 축진동에 대한 필터가 필요 없고 다른 PSS 입력보다 보다 큰 이득여유를 제공하지만 가속력을 직접 측정할 수 없는 관계로 가속력을 추론해서 계산할 수 있는 신뢰도 있는 알고리즘이 필요로 한다. 현재, 전력연구원과 전기연구소는 가속력을 이용한 PSS 알고리즘을 공동연구개발 중에 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] F.P. Demello and C.Concordia, Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control, IEEE Trans., Vol. PAS-88, April 1969, pp. 316-329
- [2] E.V.Larsen and D.A.Swan, Applying Power System Stabilizers, Parts I, II and III, IEEE Trans., Vol. PAS-100, June 1981, pp. 3017-3046
- [3] P.Kundur, D.C. Lee and H.M. Zein El-Din, Power System Stabilizers for Thermal Units Analytical Techniques and On site Validation, IEEE Trans., Vol. PAS-100, Jan. 1981, pp. 81-85
- [4] EPRI Final Report, " Frequency Domain Analysis of Low-Frequency Oscillations in Large Electric Power Systems", Voll, 1982
- [5] 김동준, 문영환, 김태균, 신정훈, " 대형계통 AVR/PSS 제어정수 튜닝을 위한 PWRSTAB 프로그램 개발", 대한전기학회 춘계학술대회논문지, 1999
- [6] 남해근, 임성호, 심관식, " PSS를 이용한 전력계통의 미소신호안정도 향상 PART II", 대한전기학회 논문지, 제44권, 제11호, 1995

부 록

표 A 발전기모델 정수 (100MVA)

정수	정수값	정수	정수값
X <sub>d</sub>	1.75	X'' <sub>d</sub>	0.24
X' <sub>d</sub>	0.285	T' <sub>do</sub>	5.2
X'' <sub>d</sub>	0.24	T'' <sub>do</sub>	0.011
X <sub>1</sub>	0.14	T' <sub>oo</sub>	1.96
X <sub>o</sub>	1.68	T'' <sub>oo</sub>	0.053
X' <sub>o</sub>	0.47	H(D)	3.0 (0.0)

표 B 여자기 모델정수

정수	정수값	정수	정수값
K <sub>A</sub>	400	K <sub>E</sub>	1.0
T <sub>A</sub>	0.02	S <sub>1 (5.65)</sub>	0.50
V <sub>RMAX</sub>	7.3	S <sub>2 (7.30)</sub>	0.82
V <sub>RMIN</sub>	-7.3	K <sub>F</sub>	0.03
T <sub>E</sub>	0.8	T <sub>F</sub>	1.0

표 C PSS<sub>w</sub> 모델 위상보상 정수

정수	정수값	정수	정수값
T <sub>1</sub>	0.198	T <sub>5</sub>	10.0
T <sub>2</sub>	0.0198	T <sub>6</sub>	10.0
T <sub>3</sub>	0.198	Lsmax	0.1 p.u.
T <sub>4</sub>	0.0198	Lsmin	-0.1 p.u.