

대형 화력발전기 전력계통 안정화장치의 정수선정 기법과 실계통 적용 : PART I-오프라인 해석을 통한 PSS 정수 선정

(A Tuning Method for the Power System Stabilizer of a Large Thermal Power Plant and
Its Application to Real Power System : Part I-Selection of Parameters by Off-line Simulation)

신정훈* · 이재걸 · 남수철 · 최영도 · 김태균

(Jeong-Hoon Shin · Jae-Gul Lee · Su-Chul Nam · Young-Do Choy · Tae-Kyun Kim)

요 약

본 논문에서는 전력계통에서 발생하는 저주파 진동을 억제하여 계통에 댐핑력을 제공함으로써 계통 안정도를 향상시킬 수 있는 전력계통 안정화장치의 정수선정 기법과 현장시험을 통한 성능검증 방법을 제시하였다. 대상 발전기는 우리나라 계통에 설치되어 있는 612[MVA]급 화력발전기이며, 축 속도를 입력으로 하는 아날로그 전력계통 안정화장치를 적용대상으로 하였다. 본 논문에서는 먼저, 오프라인에서 선형 해석 및 고유치 해석을 통하여 최적정수를 선정하는 기법을 제시하고, 시간영역 과도 안정도 해석을 이용하여 선정된 정수를 검증하였다(Part I). 또한, 선정된 전력계통 안정화장치의 성능을 온라인 현장시험을 통하여 최종적으로 검증하였으며, 정수선정 전 후의 오프라인 시뮬레이션 결과와 온라인 시험결과를 비교·분석함으로써, 결정된 모델의 적정성을 확인하였다(Part II). 이를 통하여, 축 속도를 입력으로 하는 PSS의 정수선정 방법과 실 계통 현장시험을 통한 성능검증 방법을 제시하였다.

Abstract

This paper, which consists of two parts, dealt with the parameter tuning of the power system stabilizer for a 612[MVA] thermal power plant in KEPCO system and its validation in field test. In Part 1 of the paper, the selection of parameters such as lead-lag time constants for phase compensation, system gain was optimized by using linear & eigenvalue analyses and they were verified through the time-domain transient stability analysis. In part 2, the performance of PSS was finally verified by the generator's on-line field test. Through the comparisons of simulation results and measured data before and after tuning of the PSS, the models of generator and its controllers including AVR, Governor and PSS used in the simulation are validated and confirmed.

Key Words : Power System Stabilizer, Phase Compensation And Gain, Tuning Of Parameters,
Low Frequency Oscillation

* 주저자 : 한국전력공사 전력연구원 선임연구원

Tel : 042-865-5831, Fax : 042-865-5814, E-mail : kkambo@kepco.co.kr

접수일자 : 2009년 9월 21일, 1차심사 : 2009년 9월 23일, 심사완료 : 2009년 10월 8일

1. 서 론

현재, 세계 대부분의 전력회사는 환경제약과 전력 구조개편에 의한 송전선로 증설의 제한 등으로 인하여 송전선로를 중부하로 운전하고 있어서, 계통의 안정도 여유가 점점 줄어들고 있는 상황이다. 이러한 계통운전 조건에서 대다수의 발전소에서 채용하는 속응성 여자시스템은 계통의 동기화 토크(synchronizing torque)를 증가시켜 과도 안정도(transient stability)를 향상시키는데 큰 역할을 한다. 그러나, 이런 속응성 여자시스템은 계통의 댐핑 토크(damping torque)를 저하시켜 전력계통의 미소 신호안정도에 나쁜 영향을 미친다. 이러한 이유로, 계통의 동기화 토크를 손상시키지 않고 댐핑 토크를 제공하는 보조 제어장치가 요구되는데 이런 장치를 전력계통 안정화장치(Power System Stabilizer : PSS)라 한다[1]. 이 PSS의 출력신호는 발전기 단자 전압 제어신호에 비해서 매우 작지만 여자시스템을 통해서 발전기 단자전압을 간접적으로 제어하며 발전기 회전자속의 속도($p\delta$, 또는 ω)위상과 동상인 전기적 토크를 발생하도록 함으로써, 계통에서 발생하는 저주파 진동(0.1[Hz]~2[Hz])을 감쇠시키는 역할을 한다.

이런 PSS는 전 세계적으로 대부분의 발전기에 설치되어 있는데 특히, 2003년 8월에 발생한 미국 북동부 지역 광역정전 이후, 북미 전기 신뢰도 위원회(NERC)는 송전계통이 취약한 지역에서의 댐핑 제공을 위해 단위용량 30[MVA] 이상의 발전기 또는 75[MVA]를 초과하는 발전기 그룹에 PSS의 의무 설치운영을 추진하고 있으며, 발전기 동특성시험을 포함한 PSS의 정수 재튜닝 시험을 5년 주기로 시행하도록 요구하고 있다[2-4].

우리나라의 경우에도, 2005년 이후, 500[MVA] 이상 발전기에 PSS를 설치, 운영함은 물론, 5년 주기의 성능시험을 의무화하고 있으며[5], 적용 대상 발전기는 점점 늘어날 전망이다.

따라서, 두 개의 논문으로 구성된 본 논문에서는, 상기 PSS 성능시험 적용 발전기를 대상으로, 미튜닝된 PSS 정수(위상보상 시정수)를 오프라인에서 선형해석을 이용하여 최적으로 선정하고, 이를 시간영역

역 과도안정도 해석을 이용하여 튜닝된 PSS의 성능을 검증하였다.

2. PSS의 역할 및 대상 PSS의 특징

2.1 PSS의 역할

댐핑 권선이 없는 2축 발전기 모델과 무한모선으로 구성된 1기 무한모선 계통의 비선형 방정식을 선형화하고, 모델 블록도로 유도하면 그림 1과 같이 표현할 수 있다. 그림 1의 상단 부분은 기계적 스윙 방정식을 선형화한 부분이며, 아래는 계통, 발전기, 그리고 여자시스템을 나타내는 전기적 블록 부분을 나타낸다. 그림 1의 선형화 블록에서, 기계적 특성을 나타내는 블록도를 제외한 후, PSS의 입력신호를 발전기 회전자 속도라 가정하고 PSS 블록을 연결하면 그림 2와 같이 나타낼 수 있다[12].

PSS는 계통-발전기-여자시스템의 전달함수, 일명 PGE(s) 함수에서 발생하는 위상 지연을 우리가 관심 있는 주파수 영역에서 보상해준다. 설계된 위상보상회로 시정수를 갖는 PSS는 회전자의 위상과 동상인 발전기의 전기적 출력을 발생시킬 수 있다.

$$\begin{aligned}
 PGE(s) = \frac{\Delta T_{ep}}{\Delta E_{ef}} \Big|_{\Delta \delta} &= \frac{K_2 K_3 G_{EX}(s)}{1 + sK_3 T'_{d0} + K_6 K_3 G_{EX}(s)} \\
 &= \frac{K_2 K_3 K_A}{(1 + sT_A)(1 + sK_3 T'_{d0}) + K_6 K_3 K_A} \\
 &= \frac{K_2 K_3 K_A}{s^2 T_A K_3 T'_{d0} + (T_A + K_3 T'_{d0})s + K_6 K_3 K_A + 1} \quad (1)
 \end{aligned}$$

식 (1)은 그림 2에서 회전자 속도($p\delta$)와 전기적 토크(Te) 사이에 있는 계통-발전기-여자시스템 전달함수를 나타내며, 이 PGE(s) 전달함수에 의한 위상지연이 만약 PSS에 의해 정확히 보상된다면, 이 전기적 토크는 회전자속도와 같은 위상을 갖는 댐핑 토크와 동일하다. 식 (2), 식 (3)에 PSS의 위상보상을 수식적으로 표현하였다. PSS(s)와 PGE(s)의 전달함수에서 제공되는 댐핑 토크 값을 D_{PSS} 라 하면,

$$D_{PSS} = \frac{\Delta T_{ep}}{\Delta p\delta} = PSS(s)PGE(s) \quad (2)$$

$$PSS(s) = \frac{D_{pss}}{PGE(s)} \quad (3)$$

상기와 같이, 전달함수 PSS(s)는 PGE(s)함수에서 발생하는 위상지연을 보상하여 양의 댐핑 토크를 계통에 제공하게 된다.

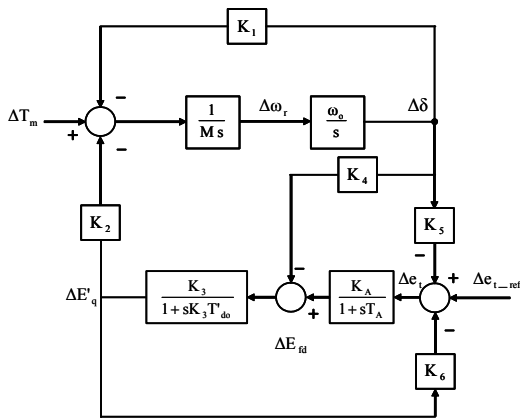


그림 1. 1기 무한모선 선형화 함수 블록도
Fig. 1. Transfer function diagram of a single machine infinite bus system

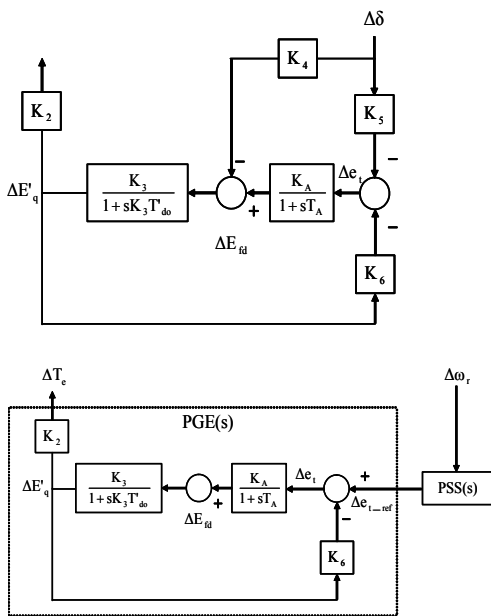


그림 2. PGE(s)와 PSS(s)의 전달함수 블록
Fig. 2. Transfer function diagram of PGE(s) and PSS(s)

2.2 대상 PSS의 특징

대상 PSS는 아날로그 방식의 PSS로서, 터빈/발전기 전변 장착부에 있는 자기흡입 장치와 치차로부터 터빈 회전속도 신호를 입력으로 받는다. 속도신호는 속도 검출 변환기에서 변조되어 속도에 비례하는 출력전압 신호로 변환된다. 이 신호는 적정된 위상천이 특성을 주기 위해 두 개의 진상/지상 증폭기를 통

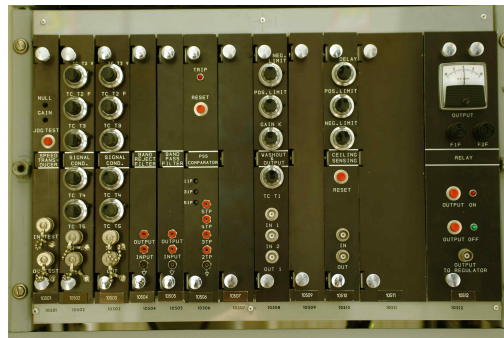


그림 3. 아날로그형 PSS의 외관
Fig. 3. External appearance of an analog-type PSS (GE model)

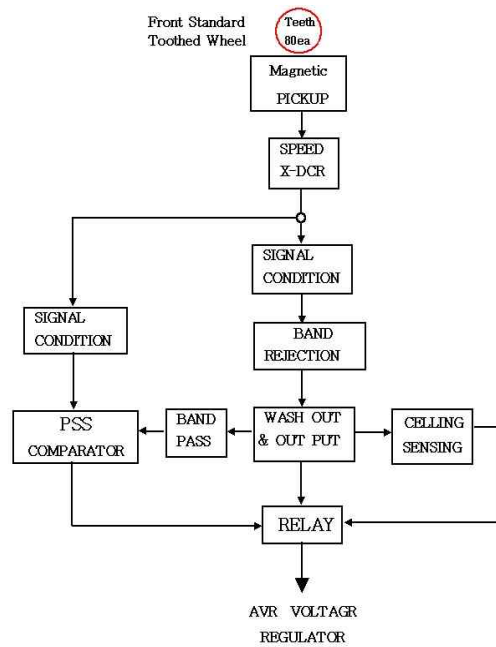


그림 4. PSS 내부 블록도
Fig. 4. Block diagram of the analog PSS

과하게 되며, 축 비틀림 주파수 신호를 감쇠시키기 위해 저주파 필터를 통과하게 된다. 또한, 각 소자들의 편류효과와 느리게 변화하는 계통 주파수 변화에 대한 영향을 제거하기 위한 washout 필터를 거치게 되며, 그 후 제어성을 극대화하기 위해 이득 증폭기를 통과하게 된다. 마지막으로 출력 단에서 발전기 여자시스템에 적정신호를 주기 위한 인터페이스 회로가 있다(그림 4). 그림 3은 아날로그형 PSS(GE)의 외관이며 그림 4는 이 PSS의 내부 블록 다이어그램을 나타낸다.

3. 오프라인 해석을 통한 PSS 정수 선정

대상 PSS는 속도편차($\Delta\omega$)를 입력으로 하는 PSS로써, 표준 IEEE 모델 인 IEEEEST 모델과 일치한다(그림 5). 속도편차를 입력으로 하는 IEEEEST 모델은 터빈회전 속도로부터 신호를 입력 받으므로 입력 신호에 터빈의 고주파 축 진동신호가 포함되어 있으며, 이를 제거하기 위해 5단의 대역제거 필터(band rejection filter)가 내장되어 있다. 이 필터정수는 일반적으로 우리가 관심을 가지고 있는 0.1[Hz]~2[Hz]의 주파수 영역에는 영향을 미치지 않도록 설계되어 있으며, 외부에서 필터정수를 조정할 수 없도록 되어 있으므로 PSS의 정수선정 대상에서는 제외된다. 본 논문에서는 제작사가 제공한 필터의 주파수 응답특성 곡선을 이용하여 결정한 필터정수를 적용하였다. PSS의 정수선정은 일반적으로 본 논문의 2.2절에서 설명한 PGE(s) 전달함수의 위상지연을 보상하기 위한 진-지상 위상보상 시정수($T_1 \sim T_4$)와 이득정수(K_s)이다.

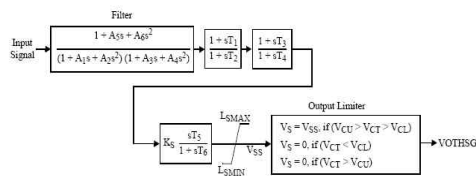


그림 5. IEEEEST PSS 제어블록
Fig. 5. Control Blocks of IEEEEST model

3.1 기존 PSS의 성능분석

발전기 설치시, 제작사가 설정한 PSS 정수는 표 1과 같다. 설치시점과 비교하여 발전기 인근 계통의 정수변화(외부 임피던스) 및 발전기 내부소자들의 정년열화에 의한 발전기의 정수변화(특히, 계자시정수 T_{do}' , 관성정수 H) 등으로 인해 초기 정수 선정시점과는 다른 환경변화가 있었을 것이므로, 초기 선정된 PSS 정수의 적용효과는 유효하지 않을 것으로 판단된다. 따라서, 정확한 PSS 정수의 선정을 위해서는, 발전기 특성 시험을 통해 발전기 및 제어기(여자기, 조속기) 데이터를 현장에서 측정하여, 검증된 정확한 값을 PSS 정수선정을 위한 오프라인 해석에서 사용해야 한다.

표 1. 기존 PSS 정수 입력 값
Table 1. Initial values of the existing PSS

정수명	설정치	정수명	설정치
T1=T3	0.5	Ks	7
T2=T4	0.05	Lsmax	0.1
T5=T6 (washout)	10	Lsmin	-0.1

3.1.1 시간영역에서의 해석을 통한 PSS 성능분석

초기 설정 정수를 가진 PSS의 현재 성능을 분석하기 위하여 발전기 AVR에 2[%]의 스텝신호를 인가하여 외란을 발생시킨 후, 시간영역에서의 효과를 분석하였다. 해석에 이용된 툴은 TSAT(Transient Security Assessment Tool)을 이용하였다. 분석결과, PSS가 없을 때보다 진동이 오히려 악화되어 댄핑력이 더 나빠지는 것으로 나타나 현재의 PSS에 대한 최적 정수선정이 필요한 것으로 분석되었다. 그림 6은 PSS가 없을 때와 표 1의 초기 정수를 가진 PSS를 적용하였을 경우의 발전기 유효출력(MW) 그래프이며, 그림 7은 동일한 경우의 발전기 계자전압(Efd) 그래프이다.

그림 6의 발전기 유효출력 응답 특성을 살펴보면 기존의 PSS는 AVR 2[%] 스텝 외란 인가시, 발생되는 진동 주파수에 대한 댄핑력이 PSS가 없을 때보

다 더 나빠졌음은 물론, 주파수대가 다른 또 하나의 저주파 진동모드를 발생시켜 진동이 신속히 감쇠되지 않고 일정시간 지속되는 것을 볼 수 있다. 이는 PSS 위상보상 시정수가 본 논문의 2.2절에서 설명한 PGE(s) 전달함수의 위상지연을 적절히 보상하도록 설계되지 않았으며, 이득정수 또한, 3[Hz]~5[Hz]대의 여자기 진동모드(excitor mode)를 발생시키도록 부적절하게 설정되었기 때문이다.

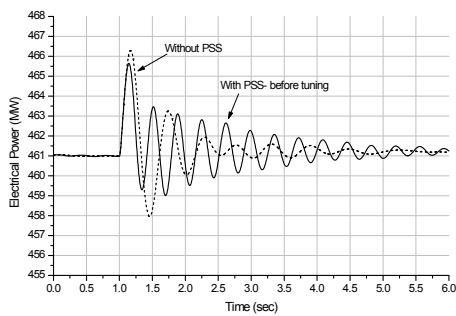


그림 6. AVR 2[%] 스텝신호 인가시 발전기 출력 응답
Fig. 6. AVR 2[%] step response - Active Power

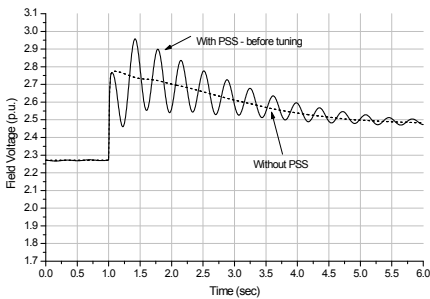


그림 7. AVR 2[%] 스텝신호 인가시 계자전압 응답
Fig. 7. AVR 2[%] step response - Field Voltage

3.1.2 선형해석 및 고유치 해석을 통한 PSS 성능분석

본 절에서는 대상 발전기 및 제어기가 가지고 있는 PGE(s) 전달함수의 위상지연과 기존 PSS(표 1)의 위상보상 특성을 선형해석을 통해 분석하기 위해 대상 발전기와 송전선로를 통해 나머지 전력계통으로 연결된 1기 무한모선 계통을 구성하였다(그림 8). 사용된 발전기 및 제어기 데이터는 부록에 수록하였다.

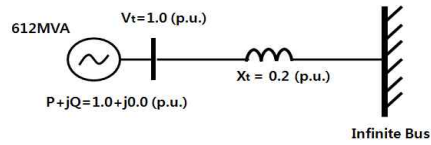


그림 8. 선형해석을 위한 1기 무한모선 계통
Fig. 8. Single machine and Infinite bus system

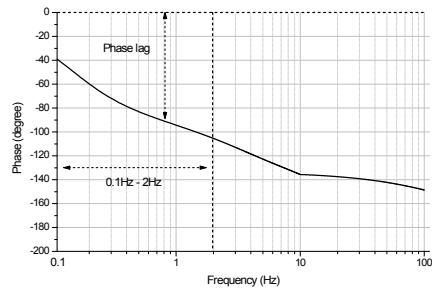


그림 9. PGE(s) 전달함수의 위상지연 특성
Fig. 9. Phase lagging characteristics of PGE(s)

PSS가 없을 때의 PGE(s) 전달함수의 위상지연 특성은 그림 9에서와 같이 대상계통을 선형화하여 여자기 기준전압(ΔE_{ref})에 대한 전기적 토크(ΔT_e) 사이의 주파수 응답특성을 보드선도로 표현하여 나타낼 수 있다. 그림 9에 표시한 PGE(s) 전달함수의 위상특성은 관심을 가지고 있는 0.1[Hz]~2.0[Hz]의 주파수대에서 최대 110[°]까지 위상지연이 나타남을 알 수 있다. 그림 10에 나타난 주파수 응답특성은 PSS가 있을 때의 위상보상 특성 즉, PGE(s) · PSS(s) 전달함수의 주파수 응답특성을 나타낸다.

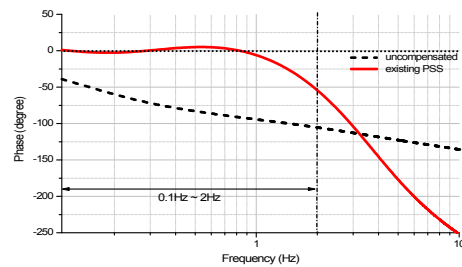


그림 10. 기존 PSS(s)의 위상보상 효과(PGE · PSS)
Fig. 10. Phase compensation effect for the existing PSS

그림 10에서와 같이, 기존의 PSS는 0.1[Hz]~2[Hz] 주파수대에 걸쳐 위상보상 효과를 가지지만, 0.4[Hz]~1[Hz]대에서 과보상 되어 과도 안정도를 훼손할 우려가 있으며, 2[Hz] 부근에서는 보상이 적절히 이루어지지 않음을 알 수 있다. PSS 위상보상 정수의 최적 선정은 보상 후의 PGE(s) · PSS(s) 위상지연이 최대 45°이하가 되도록 선정하며 10~20°정도로 부족 보상함이 적절하다[6-7].

PSS의 이득은 오프라인에서의 고유치 해석을 통하여 여자기 진동모드(제어모드)가 불안정하게 되는 이득의 1/3로 잠정 결정할 수 있으며, 최종적인 이득 정수는 현장시험을 통하여 결정한다. 고유치해석 결과, 기존 PSS의 이득을 계속 증가함에 따라, 0.1[Hz]~2[Hz]에서의 댐핑은 개선되지만 2[Hz]이상의 여자기 진동모드(제어모드)에 대한 댐핑은 이득이 커질수록 점점 나빠져 이득이 20(p.u.)가 되었을 때 고유치가 불안정영역으로 이동하게 된다(표 2). 따라서, 대상 PSS의 이득은 7(p.u.)이하로 선정하여야 한다.

표 2. 이득증가에 따른 제어모드의 댐핑 변화
Table 2. Damping variations according to increasing Ks

구분	Ks=5	Ks=10	Ks=15	Ks=20
주파수 (Hz)	2.12	2.42	2.62	2.78
댐핑(ξ)	0.36	0.13	0.0093	-0.074

3.2 PSS 정수의 최적 선정기법

PSS의 정수 선정은 위상보상 시정수와 이득정수를 대상으로 한다. 위상보상 시정수는 1기 무한대 계통의 발전기-여자기-계통의 전달함수(PGE(s)) 루프에서 발생하는 위상지연을 관심 주파수에서 PSS가 최대한 보상하도록 선정하며, 그 다음으로 적절한 이득정수를 선정한다.

3.2.1 위상보상 시정수의 최적 선정

위상보상 시정수는 PSS 정수 설계시 가장 중요한 부분이며, 여자기 기준점과 발전기 공극 토크 사이

에서 발생하는 위상지연을 보상함을 목적으로 한다. 즉, 그림 5의 IEEEEST 모델 블록 중 2단에 걸친 진·지상블록 $(1+sT_{lead})/(1+sT_{lag})$ 의 시정수를 결정하는 것이다. 먼저, PSS가 없을 때 PGE(s) 루프의 위상지연을 계산한 후, 지역모드 진동 주파수대를 중심으로 최대한 위상보상이 될 수 있도록 위상보상 시정수를 결정하게 된다. 그림 11은 위상보상 시정수(보상중심 주파수)를 변화시켰을 때, PSS가 보상할 수 있는 위상을 나타내며, 그림 9에 나타난 PGE(s) 전달함수의 위상지연과 더해져 지연된 위상을 보상하게 된다.

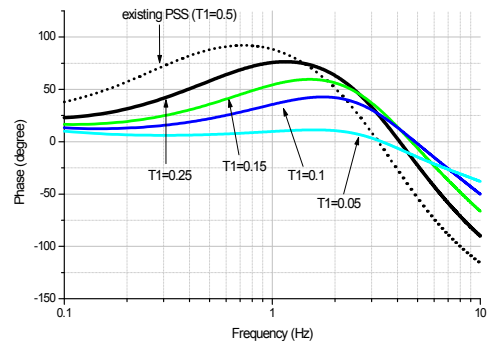


그림 11. 시정수 변화에 따른 PSS(s)의 위상특성
Fig. 11. Phase characteristics of PSS according to the variations of time constants

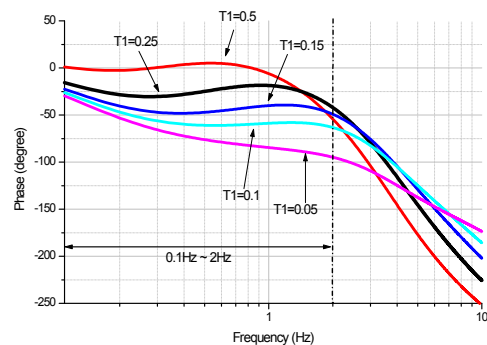


그림 12. 시정수 변화에 따른 PGE(s) · PSS(s)의 위상특성
Fig. 12. Phase characteristics of PGE(s) · PSS(s) according to the variations of time constants

보상된 PGE(s) · PSS(s) 전달함수의 위상을 그림 12에 표시하였다. 그림 12와 같이 시정수 값 변화에 대해 PGE(s) · PSS(s)의 주파수 응답특성을 각각 구하여 결과를 비교함으로써 시정수를 결정할수도 있지만, 최적화기법을 이용하여 이런 과정을 자동화한 프로그램을 이용하면 편리하다.

본 논문에서는 PWRSTAB 프로그램[8]을 사용하여 아래와 같은 사항을 제약조건으로 고려하여 최적정수를 선정하였다. 이때 PGE(s) 함수의 주파수 응답특성을 구하기 위하여 대상 발전기의 관성(H)은 무한대로 두어 기계적 특성에 의한 영향은 배제하였다.

- 최소 댐핑율은 5%의 유지
- 0.4[Hz]~2.0[Hz] 대의 전기 기계적 진동모드 주파수를 고려하여 위상보상 계산
- 최대 과도 이득을 $T_{lead}/T_{lag} = 10$ 으로 설정
- 위상보상 여유는 20[°]로 설정

위상보상 여유는 모든 주파수 범위에서 위상지연 보상치를 정확히 만족시킬 수는 없기 때문에 이를 제약조건으로 둔다. 또한, 계통 조건이 변화함에 따라 위상 특성이 달라지므로, 설계된 PSS가 과보상이 되어 동기화 토오크 성분을 감소시키지 않도록 약간 부족보상이 되도록 위상보상 여유를 설정한다. 본 설계에서는 0.4~2.0[Hz]의 주파수 영역에서 위상보상 여유를 20[°]로 설정하였다. PWRSTAB 프로그램은 상기의 모든 사항을 고려한 최적화 결과를 제공해주며, 선정된 위상보상 시정수는 아래와 같다.

표 3. 최적화기법을 이용하여 선정된 위상보상시정수
Table 3. Time constants for phase compensation

Time Constants	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄
시정수([sec])	0.25	0.025	0.25	0.025

그림 13에 선정된 위상보상 시정수를 적용한 PGE(s) · PSS(s)의 주파수 응답특성을 표시하였다. 기존 PSS의 특성에 비하여, 0.4~2.0[Hz]의 관심 주파수대에서 위상지연이 최대 45[°], 위상보상 여유 20[°]로 적절히 부족보상 되었음을 알 수 있다.

그림 5의 PSS 제어블록 중 washout 시정수 (T₅=T₆)는 PSS 정수선정 대상은 아니며, 일반적으로 2초~10초의 시정수를 가진다. washout 시정수

크기 변화에 대한 영향을 그림 14에 표시하였으며, 그림에서와 같이 관심 주파수대(0.4~2.0[Hz])에서 시정수 크기변화에 대한 위상보상의 영향은 거의 없음을 알 수 있다.

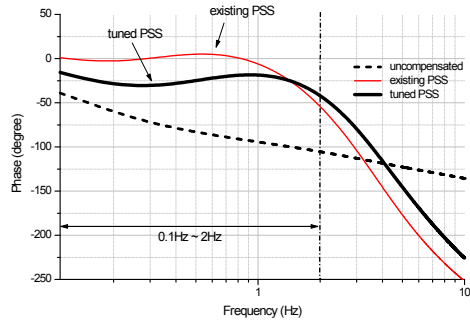


그림 13. PSS(s) 정수선정 전후의 위상보상 효과비교
Fig. 13. Comparison of phase compensation before and after tuning of PSS

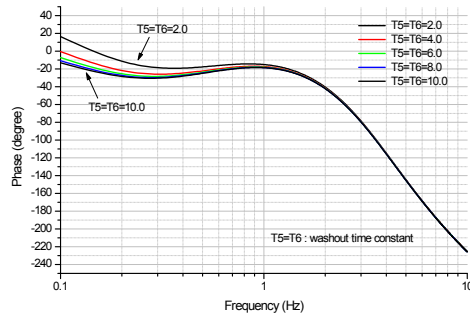
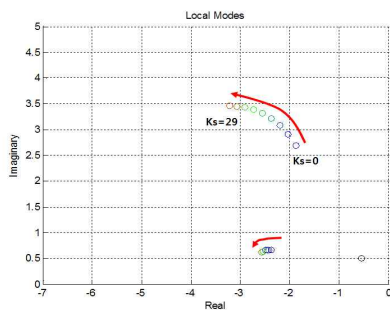


그림 14. washout 시정수 변화에 따른 위상특성 비교
Fig. 14. Comparison of phase compensation according to the variation of washout time constants

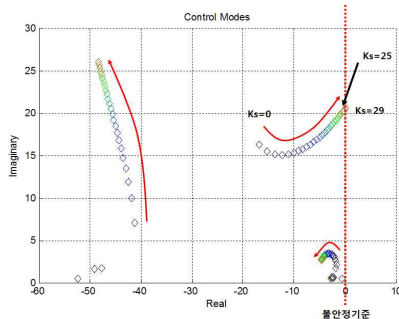
3.2.2 PSS 이득정수의 선정

PSS의 이득정수(IEEEEST 모델 블록중 KS)는 해석적인 방법으로 결정될 수 있지만 실제 PSS가 설치되는 현장에서의 시험을 통하여 최종적으로 이득정수를 결정한다. 그러므로, 본 논문에서는 이득정수를 특정한 하나의 값으로 결정하지 않고 이득정수의 범위를 두어, 이득정수 크기변화에 따른 효과를 분석하였다. 이득정수에 대한 효과는 고유치 해석을 수행한 후, 결과를 근 궤적도(root locus)에 표시하였

다(그림 15). 그림 15에서와 같이, 결정된 위상보상 시정수를 PSS에 입력한 후, 이득 값을 계속 증가함에 따라, 지역모드의 댐핑은 점차 개선됨을 알 수 있으나, 기존 PSS의 고유치 해석 결과와 유사하게 이득이 약 25([p.u.])인 지점에서 제어모드가 불안정하게 됨을 알 수 있다. 본 논문의 3.1절에서 설명한 바와 같이, PSS의 이득정수는 고유치해석에 의해서 결정할 수 있고, 제어모드가 불안정하게 되는 이득의 1/3로 결정한다.



(a) 이득증가에 따른 고유치 궤적(지역모드)
(a) Root locus plot for local mode eigenvalues



(b) 이득증가에 따른 고유치 궤적(제어모드)
(b) Root locus plot for control mode eigenvalues

그림 15. 이득증가에 따른 지역모드와 제어 모드의 고유치 궤적
Fig. 15. Root locus plots for local and control modes

만약, 이득을 아주 크게 하더라도 불안정한 모드가 발생하지 않을 경우는 지역모드의 댐핑율이 제어모드의 댐핑율과 같을 때의 PSS 이득으로 결정하므로, 대상 PSS의 이득은 최대 7~8([p.u.]) 부근인 것으로 추정할 수 있다. 이는 PART2의 논문에 제시한,

현장시험을 통해 최종 결정된 이득 7([p.u.])과 일치한다. 또한, 현장시험 중 이득여유 시험에서의 불안정 발생점 역시 이득 25([p.u.]) 부근인 것으로 분석되어 오프라인에서의 시뮬레이션 결과와 잘 일치하였다.

3.2.3 시간영역에서의 PSS 효과 검증

PSS의 위상보상 시정수와 이득정수의 선정을 완료한 후에는 반드시, 시간영역 과도 안정도 툴을 이용하여 PSS의 효과를 검증해야 하며 특히, 3상 단락 사고 등의 큰 외란에 대해서도 PSS가 계통의 과도 안정도를 손상하지 않고 댐핑력을 제공해야 한다.

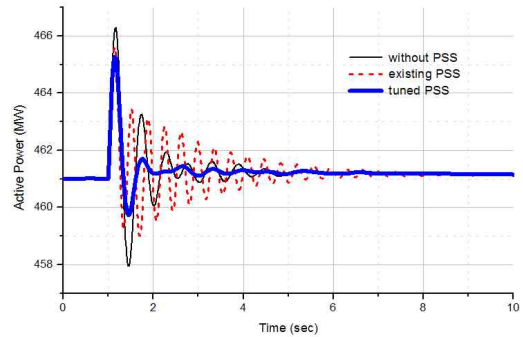


그림 16. AVR 2[%] 스텝신호 인가시 발전기 출력 응답
Fig. 16. AVR 2[%] step response - Active Power (MW)

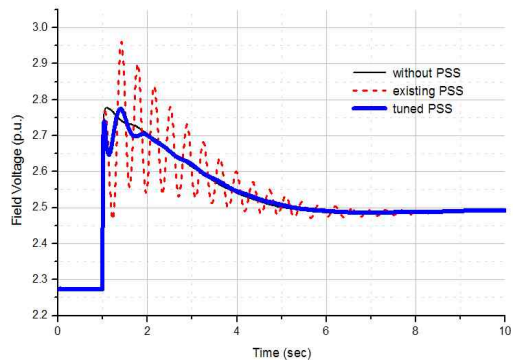


그림 17. AVR 2[%] 스텝신호 인가시 계자전압 응답
Fig. 17. AVR 2[%] step response - Field Voltage

본 절에서는 먼저, 발전기 AVR에 2[%] 스텝신호를 인가하여 계통에 미소외란을 발생시킨 후, 기존의 PSS와 정수선정 후의 PSS 효과를 비교하였다.

그림 16은 1초에 스텝신호를 인가한 후, 발전기의 유효출력 응답을 나타낸 그림으로, 최적정수 선정 후의 PSS가, 발생된 전력동요를 효과적으로 제동함을 알 수 있다. 계자전압은 그림 17과 같이, PSS가 없을 때 보다 약간 훼손되지만, 발전기의 운전에는 큰 영향이 없다. 다음으로는 해당 발전기 모선에 3상 단락 사고를 인가하고, 6 cycle (0.1초) 이후 사고를 제거하여 PSS 효과를 분석하였다. PSS의 이득정수는 기존 PSS와의 효과비교를 위해 7[p.u.]로 설정하였다. 그림 18~19에 표시한 바와 같이 PSS가 없을 때와 비교하여 발전기 출력 및 위상각의 진동이 효과적으로 제동됨을 알 수 있다.

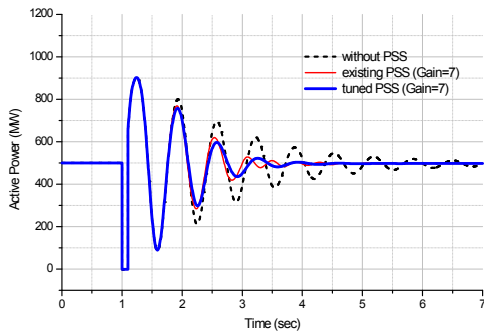


그림 18. 3상 단락사고시 발전기 출력 응답
Fig. 18. Generator responses after 3 phase bus fault- Active Power (MW)

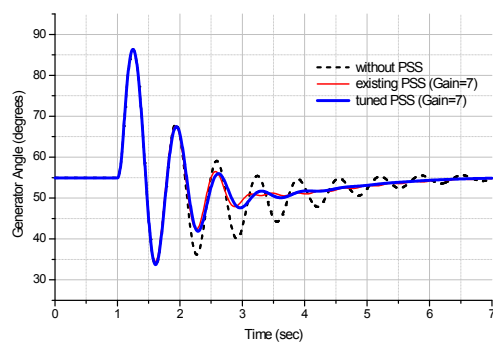


그림 19. 3상 단락사고시 발전기 상대 위상각 응답
Fig. 19. Generator responses after 3 phase bus fault- Relative Angle (degrees)

4. 결 론

총 2개의 논문으로 이루어진 본 PART1의 논문에서는 612[MVA]급 대형 화력 발전기에 설치되어 있는 아날로그 PSS(IEEEEST)를 대상으로, 현재의 성능을 분석하여 PSS 정수 개선정의 필요성을 제안하고 오프라인 시뮬레이션을 통해 대상 PSS의 위상보상 시정수와 이득정수를 최적으로 선정할 수 있는 기법을 제시하였다. 또한, 최적정수 값으로 설정된 PSS가 계통에서 발생할 수 있는 저주파 진동을 효과적으로 감쇠시킬 수 있음을 보임으로써, 오프라인에서 튜닝된 PSS의 효과를 검증하였다. 본 논문의 결과를 요약하면 아래와 같다.

- 대상 PSS는 관심 주파수 대역(0.4[Hz]~2.0[Hz])에서 적절한 위상보상(과보상 및 부족보상)이 되지 않았으며, 이득정수 또한, 적절하게 선정되지 않아, 2.78[Hz]의 제어모드 동요를 발생시킴으로써, PSS 정수 개선정 필요성을 제시하였다.
- PSS 최적정수 선정에 있어서, 먼저 위상보상 시정수는 보상후의 위상지연이 최대 45[°]이하, 10~20[°]정도로 부족 보상되도록 선정하고 최대 과도이득(T_{lead}/T_{lag})은 10이하로 선정하였으며($T_1=T_3=0.25$, $T_2=T_4=0.025$),
- 이득정수는 제어모드가 불안정하게 되는 이득정수(25[p.u.])의 1/3로 선정(7~8[p.u.])하였다.
- 또한, 2[%] AVR 스텝시험 및 3상모선 사고등 외란을 인가하여 정수 최적선정 전, 후 PSS의 댐핑 효과를 시간영역에서 비교, 검증하였다.

PART2에서는 본 논문에서 도출된 정수를 이용하여 온라인 현장 성능시험, 오프라인 시뮬레이션과 현장 성능시험 결과의 비교, 검증 등에 대하여 기술한다.

References

[1] F.P. deMello, C.Concordia, "Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control", IEEE Trans. Vol. PAS-87, June, 1969, pp.316-329.
[2] NERC Standards, Available: <http://www.nerc.com>.
[3] NERC/WSCC Publication doc. Available: <http://www.wecc.biz>.

[4] WSCC Modeling Working Group, "Criteria to determine excitation system stability for PSS in WSCC system", presented at the WSCC Working Group Meeting, San Diego, CA, 1993.

[5] 지식경제부 고시 제2005-11호(2005.1.24), "전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준".

[6] 한국전력공사, "발전기 제어계통 안정화 장치(PSS) 개발 연구" 최종보고서, 2002.3.

[7] 신정훈, 김태균, 김동준, 문영환, 백영석, "PSS 튜닝을 위한 기본 연구, PART II: PSS 실계통 최적 정수 선정을 위한 튜닝 기법", 대한전기학회 논문지, 제49권 제7호, 2000.7.

[8] 김동준, 문영환, 신정훈, 김태균 "PSS 정수튜닝을 위한 전력시스템 미소신호안정도 해석 프로그램", 대한전기학회 논문지 제52권 제5호, 2003.5.

[9] 김동준, 문영환, 김태균, 신정훈, "PSS 튜닝을 위한 기본 연구 PART I: 계통 운전조건에 따른 토크 특성분석", 대한전기학회 논문지 제48권 제9호, 1999.9.

[10] Larsen, E.V. and D.A. Swann, "Applying power system stabilizers, Part I, II, and III", IEEE Trans., Vol. PAS-100, No.6, June, 1981, pp.3017-3046.

[11] P.Kundur, D.C.Lee, H.M.Zein El-Din, "Power System Stabilizers for Thermal Units", Analytical Techniques and On-Site Validation, IEEE Trans. Vol. PAS-100, No. 1, January 1981, pp.184-198.

[12] P.Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, 1994.

○ 조속기/터빈 모델 데이터 : IEEE T1 모델

정수	정수값	정수	정수값
K	20.0	K2	0
T1	0	T5	7.0
T2	0	K3	0.266
T3	0.1	K4	0
Uo	0.1	T6	0.4
Uc	-0.2	K5	0.417
PMAX	0.85	K6	0
PMIN	0.245	T7	0
T4	0.3	K7	0
K1	0.317	K8	0

◇ 저자소개 ◇

신정훈 (申政勳)

1969년 1월 6일생. 1993년 경북대학교 전기공학과 졸업. 1995년 경북대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년 경북대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995년 한국전력공사 입사. 2002년~현재 한국전력공사 전력연구원 선임연구원.
E-mail : kkambo@kepco.co.kr

이재결 (李宰杰)

1976년 8월 19일생. 2002년 인천대학교 전기공학과 졸업. 2004년 인천대학교 전기공학과 졸업(석사). 2004년 한국전력공사 입사 2007~현재 한국전력공사 전력연구원 선임보조연구원.
E-mail : jaelry@kepco.co.kr

남수철 (南守喆)

1978년 7월 18일생. 2001년 고려대학교 전기전자정보공학부 졸업. 2006년 고려대학교 전기공학과 졸업(석사). 2006년 한국전력공사 입사 2006년~현재 한국전력공사 전력연구원 일반연구원.
E-mail : scnam@kepco.co.kr

최영도 (崔泳道)

1973년 11월 2일생. 2000년 명지대학교 전기공학과 졸업. 2002년 명지대학교 전기공학과 졸업(석사). 2005년 한국전력공사 입사 2009~현재 한국전력공사 전력연구원 선임보조연구원.
E-mail : zeroway@kepco.co.kr

김태균 (金泰均)

1964년 11월 28일생. 1986년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1989년 한양대학교 전기공학과 졸업(석사). 1993년 한양대학교 전기공학과 졸업(박사). 1996년 한국전력공사 입사 1996년~현재 한국전력공사 전력연구원 책임연구원.
E-mail : bhebbu@kepco.co.kr

Appendix

○ 발전기 모델 데이터 : 원통형(GENROU)

정수	정수값	정수	정수값
T'do	7.90	Xq	1.4578
T''do	0.043	X'd	0.26
T'qo	0.38	X'q	0.292
T''qo	0.073	X''d	0.2029
H	3.75	Xl	0.15
D	0	S(1.0)	0.2252
Xd	2.1957	S(1.2)	0.4589

○ 여자시스템 모델 데이터 : 정지형 여자기 모델 (EXST3)

정수	정수값	정수	정수값
TR	0.02	VRmin	0.03
VImax	0.2	KG	1.0
VImin	-0.2	KP	4.8
KJ	200	KI	0.0
TC	1.0	EFDmax	5.0
TB	8.0	KC	0.1
KA	8.5	XL	0.0
TA	0.4	VGmax	4.8
VRmax	1.0	THETAP	0.0