

다중-입력 PSS의 실제적인 튜닝 방법과 대형 전력 시스템에의 적용

論 文
51A-7-7

A Practical Tuning Method of Dual-Input PSS and its Application to Large Power System

金東俊*·文英煥**·許眞***·申政勳§·金泰均§§·秋鎭夫§§§

(Dong-Joon Kim · Young-Hwan Moon · Jin Hur · Jeong-Hoon Shin · Tae-Kyun Kim · Jin-Boo Choo)

Abstract - This paper describes the practical tuning method of dual-input PSS and its application to Muju P/P #2 with Proto PSS, which is based on DSP technology and uses both frequency and power. First, the model parameters of generator system used in this paper have been derived from the generator characteristic testing. Then, in the selection of PSS parameters, the Bode plot is plotted in order to tune the PSS's time constants which are able to compensate the phase lagging due to generator and excitation system. In addition, the eigenvalue analysis is also performed for determining a reliable PSS gain, K_s . Finally, the transient stability program has been utilized to verify the safe operation of Proto PSS against the predictable disturbances such as the AVR-step test and generator unloading test. In on-site test, the simulated results have been identically duplicated by implementing AVR step test in Muju P/P #2 with Proto PSS, which has the previously designed PSS parameters.

Key Words : Dual-Input PSS, eigenvalue analysis, frequency response

1. 서 론

전력계통 안정화 장치(Power System Stabilizer, PSS)의 튜닝과 PSS 설계용 적용은 1960대 후반부터[1] 전 세계적으로 연구되어 많은 문헌이 나오고 있다. PSS는 발전기 속도(Speed)와 위상이 같은 전기적 토오크를 발전기와 여자시스템을 통해서 전력 시스템에 제공하는 제어장치이고, PSS 정수 튜닝 기본 개념은 PSS가 발전기와 여자시스템에서 기인하는 위상지연을 보상하도록 PSS 정수를 튜닝하는 것이다. 그러나, PSS 튜닝과 PSS의 설계용 적용은 넓은 영역의 운전조건과 복잡성을 기본적으로 갖고 있는 전력 시스템에 잘 부합해야 하기 때문에 성공적으로 적용하기가 어렵다.

전력 시스템의 복잡성과 넓은 영역의 운전조건에도 불구하고 발전기 출력 또는 속도를 입력으로 하는 단일 입력PSS에 대한 우수한 튜닝 방법이 제안되었고[2][3], 최근 다중-입력(dual-input) PSS가 신뢰도 있는 계통 적용 PSS로 인정받고 있다[4]. 다중-입력 PSS는 일반적으로 발전기 단자 주파수(f_0)와 발전기 출력(P_0)을 입력으로 하며 단일 입력 PSS보다 장점이 많다; 전력 시스템에 보다 넓은 주파수 영역에 전기적 댐핑 토오크를 제공하며, 축전동 모드에 대해서는 상대적으로 민감하지 않다. 그럼에도 불구하고 다중-입력 PSS의 튜

닝에는 여전히 곤란한 문제가 존재한다. 이 PSS는 Ramp-Tracking 필터 같은 고차의 필터를 사용하기 때문에 다중-입력 PSS 정수를 적절하게 설계하는 것이 쉽지 않다.

이러한 다중-입력 PSS 튜닝의 어려운 점을 극복하기 위해서 본 논문은 매우 실제적인 다중-입력 PSS 튜닝방법과 대형 전력시스템 적용에 대해서 기술한다. 제안된 다중-입력 PSS 튜닝 방법은 발전기 특성시험에 의해서 유도된 발전기 시스템 모델정수를 기본으로 하여 주파수 응답특성, 고유치 해석, 그리고 과도안정도 모의를 통하여 PSS 정수를 결정한다. 이와 같이 결정된 PSS 정수는 설계용 PSS 성능 시험에도 모의된 결과와 같은 거의 동일한 결과를 얻을 수 있다.

제안된 튜닝 방법은 무주 P/P 2호기 설치되는 Proto PSS의 성능 시험에 적용하였다. 무주 발전소와 연결된 송전선로를 모델링하고, 선형해석과 과도 안정도 해석을 통하여 Proto PSS 정수를 설계하였다. 시험에 사용된 Proto PSS는 한전전력연구원과 한국전기연구원에서 전력 시스템에 실제 설치할 목적으로 개발 중에 있는 국내 최초 디지털 다중-입력 PSS로 실제품 이전 단계의 준 실제품이고 DSP(Digital Signal Processor) 기술을 기반으로 제작되었다[5].

무주 P/P 2호기 현장시험에서는 3% AVR 스텝 시험을 수행하였고 측정된 데이터로부터 Proto PSS가 동작하는 경우 전력동요 댐핑에 우수하게 작용함을 확인하였다. 현장 시험 후, 시험상황을 상용 과도안정도 프로그램으로 재현하여 사용된 모델정수의 정확성과 튜닝방법의 실효성을 재검증하였다.

2. 다중-입력 PSS 정수 튜닝 방법

다중-입력 PSS 제어정수 튜닝 방법은 그림 1과 같다. 단

* 正會員 : 韓國電氣研究院, 先任研究員
** 正會員 : 韓國電氣研究院, 責任研究員·工博
*** 正會員 : 韓國電氣研究院, 研究員
§ 正會員 : 韓電電力研究院, 先任研究員
§§ 正會員 : 韓電電力研究院, 先任研究員·工博
§§§ 正會員 : 韓電電力研究院, 首席研究員·工博
接受日字 : 2002년 1월 31일
最終完了 : 2002년 5월 13일

계 1에서는 먼저 발전기 특성시험에 의해서 발전시스템 모델과 그 정수들을 결정한다. 모델과 그 정수를 제작처 제공의 모델과 정수로 사용할 수 있으나 이것은 실제 시스템을 재현하는데 오차 가능성을 크게 한다. 특히, 전기기계적 동요 주파수를 결정하는데 중요한 역할을 하는 발전 시스템 관성계수, 여자시스템의 응답 특성을 결정하는 발전기 개방 직축 과도시정수(T_{do}), 그리고 자동전압조정기(Automatic Voltage Regulator, AVR)의 과도이득감소(Transient Gain Reduction, TGR) 이득은 발전 시스템 모델링 함에 있어 매우 정확해야 한다.

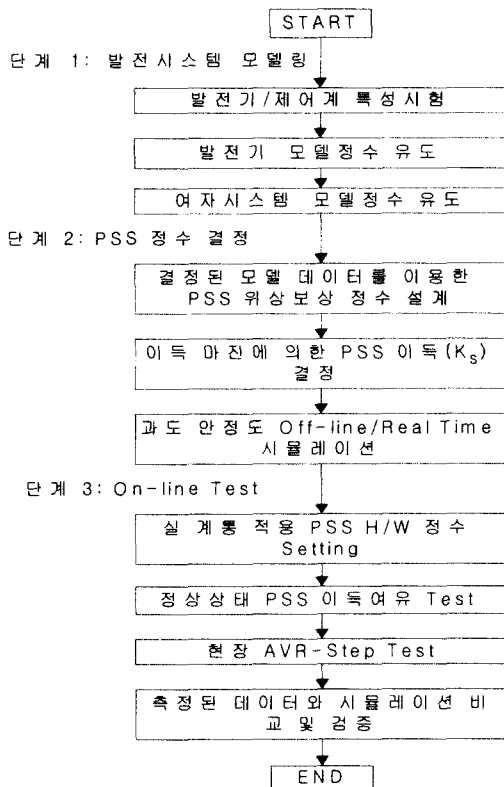


그림 1 다중-입력 PSS 정수 튜닝 방법
Fig. 1 Dual-input PSS Parameter Tuning Procedure

단계 2에서는 결정된 발전시스템 모델과 정수를 이용하여 Off-line상에서 PSS의 제어정수를 결정한다. PSS 제어정수 중 제일 먼저 튜닝해야 할 값들은 위상보상 시정수이다. 이 위상보상 시정수들은 발전기와 여자시스템에서 발생하는 위상지연을 보상하도록 튜닝한다. PSS 위상보상 시정수들을 튜닝할 때는 주파수 응답특성을 통해서 결정한다. 본 논문에서 주파수 응답특성 분석에 사용된 프로그램은 전력 시스템을 정상상태에서 선형화한 PWRSTAB(PoWeR STABilizer) 프로그램이다. 이 PWRSTAB 프로그램은 PSS 제어정수를 튜닝하기 위해서 개발된 프로그램으로써 500차 이하의 중소형 시스템을 고유치 분석과 주파수 응답특성을 분석할 수 있다 [6]. 위상 보상은 식 (1)과 같이 $PSS(s)$ 전달함수가 $PGE(s)$ (Power-Generator-Excitation, PGE) 위상지연을 관심영역 주파수대에서 영 근처가 되도록 위상보상 시정수를 결정하면 된다[2],[7],[8]:

$$\frac{\Delta P_{elec}}{\Delta \omega} = PSS(s)PGE(s) \quad (1)$$

여기서,

ΔP_{elec} : 발전기 전기적 출력

$\Delta \omega$: 발전기 축 속도(Speed)

$\Delta PSS(s)$: 다중-입력 PSS 전달함수

$\Delta PGE(s)$: 전력시스템-동기기-여자기 전달함수

다중-입력 PSS 위상보상 방법은 서로 다른 입력을 갖는 두 개의 PSS로 동일한 위상보상 정수를 갖는다고 생각할 수 있다. 현재 일반화된 다중-입력 PSS 입력신호는 발전기 단자 주파수(f_n)와 발전 출력(Electric Power, P_e)이다. 각각의 PSS는 발전기 단자 주파수를 입력으로 하는 PSS_f 와 발전기 출력을 입력으로 하는 PSS_p 로 생각할 수 있다. 이때, 주의해야 할 사항은 발전기 단자 주파수를 입력으로 하는 PSS_f 는 단자 주파수 위상이 발전기 속도(Speed)와 위상관계가 동일하다고 가정할 수 있지만, 발전기 출력(P_e)을 입력으로 하는 PSS_p 는 P_e 가 발전기 속도에 비해서 위상이 90° 앞서 있다. 따라서, PSS_p 위상보상 시정수를 튜닝할 때는 이점을 고려해서 튜닝해야 한다. 한 가지 더 주의해야 할 사실은 전기적 특성에 대한 주파수 특성을 얻고자 하기 때문에 기계부분인 발전기 관성(H)은 무한대로 설정해야 한다. 그렇지 않는 경우 전기기계적 모드까지 포함된 결과가 나오게 된다. 자세한 위상보상 방법은 문헌 [2],[8]에 자세히 기술되어 있으므로 생략한다.

다음으로 결정하는 정수는 PSS 이득정수, K_s 이다. 결정된 PSS 위상보상 시정수를 그대로 두고 이득 K_s 을 증가시키기에 따라 고유치 값 변화를 고유치 해석 프로그램을 이용하여 분석한다. 특히, 이득 K_s 증가에 따른 지역모드(Local Mode)와 제어기 모드(Control Mode)의 고유치 궤적을 추적하여 두 모드에 대해서 불안정이 나오지 않도록 충분한 이득마진을 두어야 한다. 고적전인 이득 K_s 의 결정은 제어기 모드가 불안정해지는 최대 이득 K_s 를 구한 다음, 이 값에 2/3배 이득여유(Gain Margin 10dB)를 갖는 값으로 결정하였다[2],[9]. 그러나 다중-입력 PSS는 이득 K_s 를 아주 큰 값을 갖더라도 쉽게 제어기 모드가 불안정 영역으로 이동하지 않는다. 이것은 넓은 영역에서 댐핑 토오크를 제공되는 다중 입력 PSS의 특성 때문이다.

본 논문에 이득 K_s 결정은 지역모드와 제어기 모드의 댐핑율을 고려해서 잠정적으로 여러 이득을 상정한 후 상용 과도 안정도 프로그램을 사용하여 모의함으로써 최적의 이득을 결정한다. RTDS(Real Time Digital Simulator)와 같은 EMTP 류의 실시간 시뮬레이터를 이용하면 설치된 다중-입력 PSS의 H/W 기기동작과 제어정수 두 개 모두를 검증할 수 있다.

단계 3에서는 현장 발전시스템에 설치되어 있는 PSS에 결정된 PSS 정수를 Keypad로 입력하고 성능시험을 통하여 최종 PSS 이득 K_s 를 결정한다. K_s 이득여유 확인은 정상상태 운전조건에서 이득 K_s 를 영부터 조금씩 증가하면서 발전기 출력과 계자전압 등에 이상 진동이 발생하는가를 확인한다. 그리고 될 수 있으면 시뮬레이션 했던 최대 값 근처까지 K_s 를 증가시켜서 이득여유와 정상 상태에서 이상이 없음을 확인한다. 정상상태에서 전력동요와 계자전압에 이상이 없으

면, AVR 스텝시험을 통하여 PSS가 있는 경우와 없는 경우의 진력 댐핑 정도를 확인하고 최종 PSS 이득 K_A 를 결정한다. 마지막으로, 성능시험에 측정된 데이터를 단계 2에서 결정된 정수와 상용 과도 안정도 프로그램을 이용하여, 성능시험 상황을 재현하여 PSS 제어정수의 유효성을 최종 검증한다.

다음 절에서는 제안된 튜닝방법을 무주 P/P 2호기에 설치된 디지털 Proto PSS 정수를 튜닝하는 방법과 AVR 스텝시험에 의한 성능시험 결과를 자세히 기술한다.

3. 무주 P/P 2호기 발전 시스템 모델링

그림 2는 무주 P/P #2에 Proto PSS 성능시험 시 예상되는 계통 구성도이다. 무주 P/P는 2기의 발전 시스템으로 구성되어 있으나 1호기 경우는 Proto PSS 성능시험 시 정지하고 있다고 가정한다. 사용된 송전선로 데이터는 KEPCO에서 사용되고 있는 안정도용 DB를 참조하여 무주 발전소와 연결되어 있는 두 개의 송전선로만 모델링 하였다. 또한, 성능시험 시 발전기 운전조건은 PSS 튜닝조건에 부합하는 $P=300.0\text{MW}$ 인 정격운전 출력에서 역률은 $1.0(Q=0.0\text{MVAR})$ 에 두고 운전하고 있다고 가정한다. 이때의 발전기 단자전압과 무한모션 전압은 각각 0.93 pu 와 0.94 pu 로 계산된다.

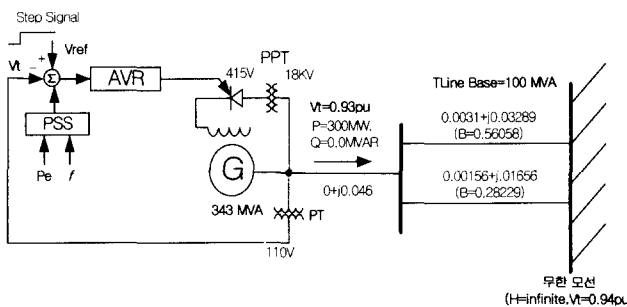


그림 2 무주 P/P 2호기 계통 구성도
Fig. 2 Muju P/P #2's System Diagram

3.1 발전시스템 모델링

실 발전시스템에 Proto PSS를 설치하기 앞서 시뮬레이션하기 위해서 사용된 발전기 모델정수와 여자시스템 모델 정수는 표 1과 표 2와 같다. 결정된 모델정수는 발전기 특성시험에 의해서 측정된 결과로부터 결정된 정수값이다.

여자기 시스템 모델링은 정지형 모델인 "EXST1" 모델을 사용하여 정수를 유도하였으며, 이 결정된 여자기 모델 정수는 무부하 AVR 스텝시험에 측정된 발전기 계자전압 분석에 의해서 계산된 약 61pu 의 TGR [10] 이득이 재현되도록 유도된 값들이다. TGR 이득 계산은 다음과 같다. $TGR = \Delta E'_{fd} / \Delta V_{ref}$, 여기서 $\Delta E'_{fd}$ 는 초기 과도시 계자전압 변동값이다. 이와 같은 TGR 이득 값은 발전기 개방 과도 시정수, T_{do}' 에 4.5배에 해당되는 값으로 적절히 튜닝되어 있다[1]. 자세한 TGR 설명은 본 논문에서는 생략한다.

표 2의 여자기 모델 이득 K_A 는 정상상태시의 DC 이득을

나타내며 정수 유도 시 240 pu 로 가정하였다. 그림 3은 무부하-폐루프 5% AVR 스텝시험 시 측정된 데이터와 결정된 발전 시스템에 의해서 모의된 결과를 비교한 것이다. 모의된 두 개의 단자전압과 계자전압은 측정된 결과와 잘 일치하고 있다.

표 1 결정된 무주 P/P 2호기 발전기모델 정수 (343MVA)

Table 1 Determined Muju P/P #2's Generator Model Parameters

정수	정수 값	정수	정수 값
T_{do}'	13.500 sec	X_q	0.7936
T_{do}''	0.040 sec	X_d'	0.2500
T_{q0}''	0.500 sec	X''	0.184
H	6.120	X_l	0.120
D	0.000	S(1.0)	0.1107
X_d	1.1636	S(1.2)	0.2578

표 2 무주 P/P 2호기 여자시스템 모델 EXST1 정수

Table 2 Muju P/P #2 Excitation Model EXST1's Parameters

정수	정수 값	정수	정수 값
T_R	0.010 sec	T_A	0.000
V_{IMAX}	9999.000	V_{RMAX}	4.600
V_{IMIN}	-9999.000	V_{RMIN}	-4.600
T_C	0.000	K_C	0.000
T_B	0.000	K_F	0.007
K_A	240.0	T_F	0.600

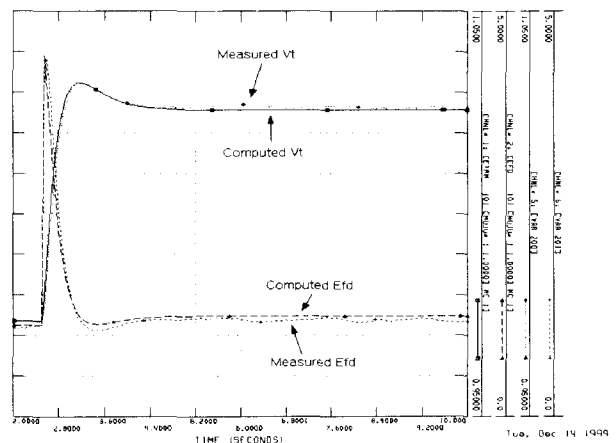


그림 3 무부하-폐루프 5% AVR 스텝 시험 및 모의 비교
Fig. 3 No-load and Closed Loop 5% AVR Step Test Comparison

3.2 조속기/터빈 모델링

다음은 조속기/터빈 모델 정수를 표 3에 보여주며 이 모델 또는 그림 4와 같다. 결정된 정수값은 현장 자료조사와 IEEE

에서 추천된 값으로 결정된 값이다[11]. 이 모델의 사용은 발전소의 급격한 출력 감발에 의한 정지 때를 모의하기 위해서다. 수 십초 이내에 기계적 출력을 급격하게 변동할 수 있는 수력기의 기동 또는 정지 때에 종종 PSS와 연계되어 발전기 단자전압의 큰 스윙을 유도한다. 따라서, Proto PSS가 이러한 운전조건에 잘 대응하는지를 시뮬레이션 할 필요가 있다.

표 3 무주 P/P 2호기 조속기/터어빈 모델 정수 (HYGOV)

Table 3 Muju P/P #2 Governor/Turbine Model Parameters (HYGOV)

정수	정수 값	정수	정수 값
R	0.063	G_{max}	1.0
r	0.130	G_{min}	0.0
T_r	5.025	T_w	1.044
T_f	0.025	A_t	1.272
T_g	0.50	D_{turb}	0.5
$\pm V_{ELM}$	0.2	q_{nl}	0.214

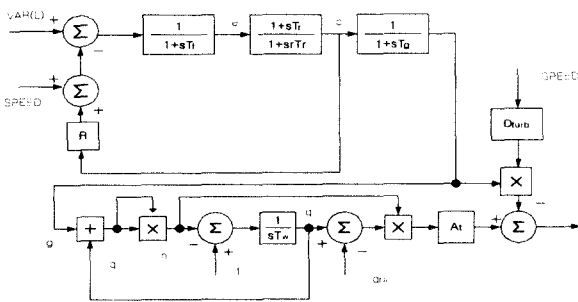


그림 4 수력기 조속기/터빈 모델
Fig. 4 Governor/Turbine model for Hydro

4. Proto PSS 모델 정수 결정

성능 시험될 Proto PSS 모델은 상용 파도안정도 프로그램의 내부모델 "PSS2A" 모델과 거의 구성도가 같다. 그림 5는 두 가지 입력 값을 갖는 다중-입력 PSS 모델 "PSS2A" 모델을 보여주고 있다. 본 논문에 사용하는 두 가지 입력신호는 발전기 단자 주파수와 발전기 출력신호이다. 앞에서 언급한 튜닝절차에 따라서 시행착오로 결정하면, "PSS2A" 모델정수는 표 4와 같다. 표 4에서 Washout 시정수 값 T_{10} 는 지역모드에 더 댐핑 특성이 향상되도록 2.0 sec 로 설정하였다. Washout 시정수가 크면 클수록 저주파 동요에 민감하게 되어 정상상태 안정도 여유를 희생시킬 수 있다. 사용된 값은 문헌 [12]에 있는 정수를 사용하였다.

표 4에서 정수 n 과 M 은 일반적으로 사용되고 있는 값으로 설정하였으며, $T_1 \sim T_3$, 그리고 T_9 와 T_{10} 은 아래 절에서 기술되는 주파수 특성이 나오도록 결정하였다. 결정과정은 먼저, 그림 5에서 위상보상 시정수 T_1, T_3 와 T_2, T_4 의 비는 초기에 10:1로 두고 0.50과 0.05부터 주파수 특성을 검토하였다. 만족하는 특성이 나올 때까지 시정수 값을 줄여 나갔고, 0.10과 0.01에 도달했을 때 원하는 특성이 관찰되어 여기서 다시 미세 튜닝하여 최종값인 0.12와 0.02로 잠정 결정하였다. 이때

T_9 와 T_{10} 은 초기에 0.1과 0.4로 전형적인 값으로 설정했고, 시정수 보상정수가 결정된 후 최종적으로 0.110과 0.440으로 결정하였다. 최종적으로는 고유치 해석을 통해서 결정된 PSS 시정수를 확인한다. 고유치 해석에서 원하는 결과가 나오지 않는다면 다시 PSS 위상보상 시정수를 결정하고 고유치 해석을 해야 한다.

PSS 출력 제한 정수 L_{max} 와 L_{min} 은 보수적인 관점에서 제한폭이 $\pm 10\%$ 가 되도록 하였다. 이 결정된 모델 정수를 이용하여 아래 절에서는 각 입력에 대한 주파수 응답 특성(보드선도)과 이득 마진에 대해서 고찰한다.

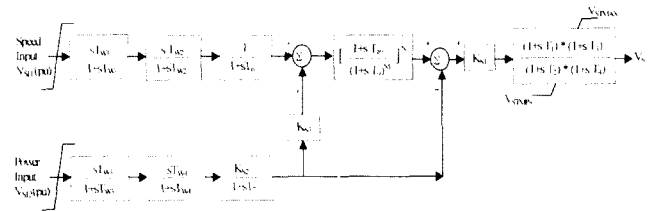


그림 5 다중 입력을 갖는 PSS2A 모델
Fig. 5 Dual-Input PSS2A Model

표 4 무주 P/P 2호기 튜닝된 PSS 정수 (PSS2A)
Table 4 Muju P/P #2 Determined PST Parameters

정수	정수 값	정수	정수 값
T_{w1}, T_{w2}, T_{w3}	2.00	n	1
T_{w4}	0.0 (bypass)	M	4
T_7	2.0	K_{s1}	15.0
K_{s2}	0.163($T_w/2H$)	T_2, T_4	0.02
K_{s3}	1.000	T_1, T_3	0.12
T_9	0.110	L_{MAX}	0.10
T_{10}	0.440	L_{MIN}	-0.10

4.1 주파수 응답 특성(위상보상)

그림 2와 같은 운전조건에서 결정된 모델 정수에 의한 각 입력 주파수 응답특성은 그림 6과 7과 같다. 사용된 프로그램은 앞서 기술한 PSS 튜닝 프로그램인 PWRSTAB과 Matlab 프로그램이다. 사용된 PWRSTAB 버전은 아직 그래픽 기능이 지원되지 않아, 계산된 결과를 Matlab을 이용하여 Bode 선도로 주파수 응답특성을 나타냈다.

위상보상의 가장 최선의 방법은 PGE에서 발생된 위상을 관심 주파수대에서 완전보상(0°)이 되게 하는 것이지만, 현실에서는 이것이 불가능하므로 관심 주파수대에서 위상이 부족보상[10]으로 하고 넓은 주파수대에서 댐핑 토오르가 제공되게 해야 한다. 보상된 부족 위상이 -90° 까지의 주파수대에서는 댐핑 토오르를 제공하므로 이때의 주파수가 큰 값을 갖도록 보상 시정수를 결정하는 것이 중요하다[2],[8]. 그렇지 않은 경우 2Hz이상의 제어기 모드의 댐핑율이 낮아져 PSS 이득을 높게 설정할 수 없다.

그림 6은 발전기 단자 주파수를 입력으로 하는 PSS_j 주파수 응답특성으로서 가장 큰 이득 부분이 0.2~0.6Hz대에 걸쳐 있음을 알 수 있다. 발전기 관성 정수값은 아주 큰 값으

로 설정되어 있기 때문에 PSS와 PGE함수는 개루프(Open-loop)로 구성되며 이득은 아주 큰 값을 갖는다. 그러나 실제로는 폐루프(close-loop)로 구성되면 최대 이득은 0.0 dB 부근의 값을 갖는다. 그림 6에서 표시된 위상이 0~ -90°까지의 주파수대(0.3~0.9Hz)에서는 위상이 부족보상이 되고 효과적인 댐핑 토오르크를 제공하는 범위가 된다.

발전기 출력을 입력으로 하는 PSS_p 주파수 특성은 그림 7과 같이 지역모드와 제어모드가 있는 다소 높은 주파수대인 1.0Hz에서 10Hz까지의 주파수대에 이득이 크게 되어 있음을 알 수 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 발전기 출력을 입력으로 하는 경우 발전기 출력 위상이 발전기 속도에 비해 90° 앞서 있기 때문에 PWRSTAB 프로그램은 이 점을 고려하여 90°를 별도로 상쇄하도록 하였다. 주파수를 입력하는 PSS와 동일하게 그림 7처럼 위상이 -360~-450°까지의 주파수대(1.0Hz~10Hz)에서는 위상이 부족보상이 되고 효과적인 댐핑 토오르크를 제공하는 범위가 된다.

요약하면, 발전기 출력을 입력으로 하는 PSS_p는 지역모드와 제어모드 댐핑 제공에 우수하며, 발전기 단자주파수를 입력으로 하는 PSS_f는 광역모드와 같은 저주파수 모드에 좋은

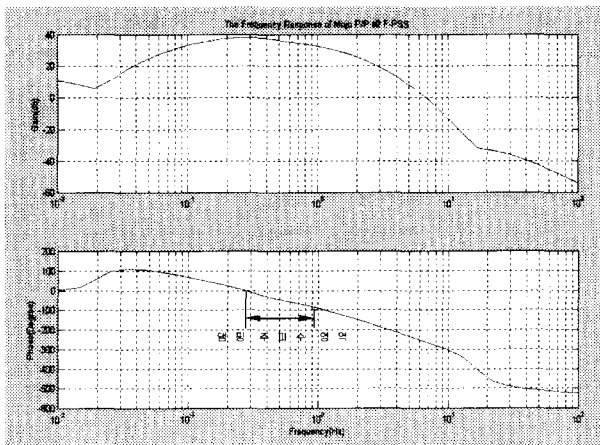


그림 6 주파수를 입력으로 하는 PSS_f 주파수 특성
Fig. 6 Frequency Response of PSS_f Using Frequency

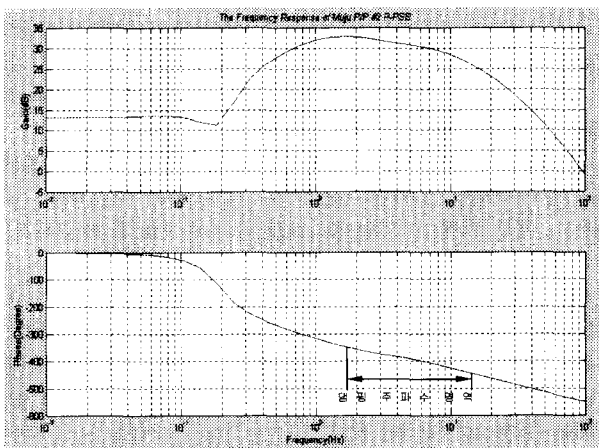


그림 7 P_e를 입력으로 하는 PSS_p 주파수 특성
Fig. 7 Frequency Response of PSS_p Using P_e

댐핑 특성을 갖는다. 결정된 제어정수는 무주 P/P 발전시스템이 페루프를 이루고 동작할 때, 두 개의 PSS 주파수 특성은 중첩이 된다. 이 중첩된 주파수 특성은 0.6Hz~3.0Hz에서 가장 큰 0dB 부근의 이득을 갖고, 효과적인 댐핑 토오르크가 전력시스템에 제공된다. 그 외의 주파수대에서는 이득이 -20dB이하로 효과가 없다.

4.2 고유치 해석을 통한 이득 K_s 결정

이득 결정과 이득여유를 고찰하기 위해서 PSS 모델 "PSS2A" K_s를 증가시켜서 이때의 고유치를 조사하였다. 해석에 사용된 계통은 앞에서 모의된 계통이고, 표 7은 여러 고유치 중 가장 댐핑이 안되는 모드만을 나타내고 있다. 모델링된 전력 시스템은 지역모드와 제어기 모드만 모의되므로 광역모드에 대해서는 해석이 불가능하다. 그러나, 무주 P/P는 한전계통에서 나타나고 있는 광역모드[13]에 큰 참여를 하지 않기 때문에 본 논문에서는 광역모드에 대한 자세한 설명은 생략한다. PSS 효과가 없는 K_s=0.0 인 경우는 지역모드 댐핑율이 매우 작아서 전력동요 댐핑이 잘 되지 않음을 예측할 수 있다.

PSS 이득을 증가시키에 따라 지역모드 댐핑율이 어느 지점까지 계속 증가되다가 K_s가 약 25 pu정도 도달하면 최대 지역모드 댐핑율이 나타나고 이 때부터 K_s를 증가시키면 지역모드 댐핑율이 감소한다. 제어모드인 경우 이득을 증가시키에 따라서 댐핑율은 계속 감소한다. PSS 이득 결정은 현장 시험에 의해서 최종 결정되어야 되지만, 여기서는 잠정적으로 K_s=15 pu로 결정한다. PSS 이득 K_s를 15 pu로 설정한 이유는, PSS 이득을 증가시켜도 지역모드 댐핑율이 크게 향상되지 않고, 제어기 모드 댐핑을 감소율이 더 크게 나타나기 때문이다. 참고로, K_s=100.0 pu로 두고 고유치 해석을 하더라도 고전적으로 나타나는 제어기 모드의 불안정이 나타나지 않았다. 이것은 다중-입력 PSS의 보다 넓은 댐핑 토오르크 유효 주파수 영역 때문이다.

표 7 PSS 이득 K_s 증가에 따른 고유치 변화
Table 7 Eigenvalue Analysis by Increasing K_s

K _s Mode	K _s =0.0 pu	K _s =15.0 pu	K _s =30.0 pu	K _s =50.0 pu
	Local Mode	-0.55±j7.54 (f _d =1.20Hz, ζ=0.07)	-2.46±j6.12 (f _d =0.98Hz, ζ=0.37)	-1.76±j4.33 (f _d =0.69Hz, ζ=0.38)
Control Mode	-	-5.52±j7.43 (f _d =1.18Hz, ζ=0.60)	-5.35±j10.70 (f _d =1.70Hz, ζ=0.45)	-5.42±j12.60 (f _d =2.00Hz, ζ=0.40)

4.3 과도 안정도 시뮬레이션

유도된 무주 P/P 발전 시스템 모델, 송전선로 모델, 그리고 결정된 PSS 정수를 이용하여 과도 안정도 해석을 수행할 수 있다. 상용 과도 안정도 프로그램을 이용하여 현장에서 시험될 것으로 예상되는 Proto PSS 성능시험을 시뮬레이션 하면 아래와 같다.

4.3.1 300MW 정격출력에서 2% AVR 스텝시험

그림 8은 300 MW 정격출력이고 무효전력이 0.0 MVAR인 역률 1.0에서 2% AVR 스텝시험을 PSS 이득 K_s 에 따라 모의한 것이다. 여기서 말하는 2% 스텝시험이란 발전기 단자전압이 2% 변동할 수 있는 작은 직류전압 값을 AVR의 Summing 점에 스텝을 갖는 소신호를 인가하는 것이다. 각각의 PSS 이득은 아래와 같다. 뒤에서 언급하겠지만, 실제 현장에서 수행된 AVR 스텝 시험은 2%가 아닌 3% 스텝으로 시험하였다.

- Case 1 : $K_s=0.0$ (Without PSS)
- Case 2 : $K_s=10.0$
- Case 3 : $K_s=15.0$
- Case 4 : $K_s=20.0$
- Case 5 : $K_s=50.0$

모의된 결과는 PSS 이득이 증가할수록 발전기 출력에 대한 댐핑정도는 증가하나, 이득이 $K_s=50$ pu인 경우는 그 댐핑정도가 앞의 값 $K_s=20.0$ pu인 경우보다 더 작음을 알 수 있다. 이것은 앞에서 기술한 고유치 해석과 같다. 따라서, 그림 8의 시간영역 모의결과는 고유치 계산결과와 잘 일치하고 있다.

PSS의 이득 결정은 미리 설정된 전력동요가 감소하는 댐핑율에 따라서 이득 값을 정할 수 있다. 위상보상이 잘 된 경우, 이득이 크면 클수록 댐핑율은 증가하나 동기화 토오크는 이득에 따라 감소하게 된다. 보통 전력 시스템은 본질적으로 동기화 토오크를 큰 값을 가지고 있기 때문에 어느 정도 희생을 하더라도 문제가 없다.

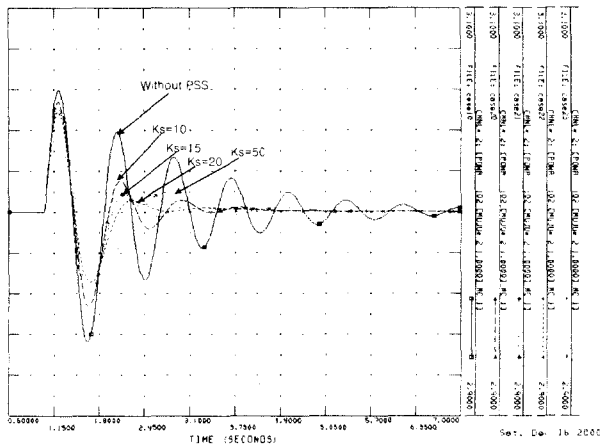


그림 8 300MW 출력에서 2% AVR 스텝시험 시뮬레이션
Fig. 8 2% AVR Step Test Simulation on 300 MW
($K_s=0.0$, $K_s=10.0$, $K_s=15.0$, $K_s=20.0$, $K_s=50.0$)

4.3.2 출력 감발시 다이내믹 응답 특성

앞에서 결정된 튜닝정수는 전력 댐핑에 우수함을 시뮬레이션 결과로부터 고찰하였다. 마지막으로, 수력기에서 튜닝된 PSS 정수가 검증되어야 할 독특한 사항은 발전기 기계적 토오크가 갑자기 급격히 증감발시 나타날 수 있는 발전기 단

자전압의 스윙을 검토하는 것이다. 그림 9는 조속기/터빈모델의 출력 신호를 300MW에서 60MW로 조속기 기준전압을 스텝으로 변화시켰을 때의 시뮬레이션 결과이다.

여기서, 그림 9는 PSS가 있는 경우의 발전기 단자전압 진동폭이 PSS가 없는 경우의 발전기 단자전압 진동폭보다 더 큼을 보여주고 있다. 그러나, PSS가 있는 경우의 발전기 단자전압 최대 진동폭은 약 0.0035 pu에 불과하며, 본 논문에서 수행된 시뮬레이션은 실제 수력 발전기보다 더 가혹한 조건에서 시뮬레이션한 경우로 발전기 기동 및 정지시의 전압스윙 문제에 대해서는 무시할 수 있다.

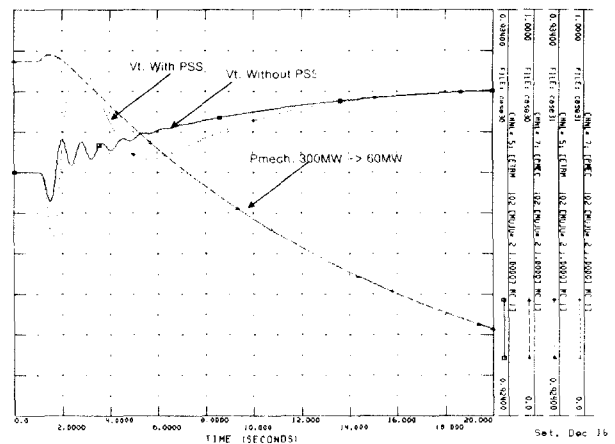


그림 9 출력 감발 시 발전기 단자전압 응답 특성 모의
Fig. 9 Terminal Voltage Response at the Unloading Simulation

5. 무주 P/P #2 현장 Proto PSS 성능시험

결정된 PSS 제어정수를 이용하여 한전전력연구원, 한국전기연구원 그리고 무주양수 담당 직원과 함께 2000년 12월 18일에 국내 최초로 순수 국내기술전에 의해서 개발된 디지털 형식의 Proto PSS를 시험하였다. 기 결정된 PSS 제어정수를 국내 최초 Proto PSS에 시험 전에 입력하고, 발전기가 300MW 근처 운전 시에 Proto PSS를 스위치 온하여 작동하였다. 먼저, 이득여유가 충분한 가 확인하기 위해서 300MW 정상상태에서 PSS 이득을 30 pu까지 점차 증가시켜 이상 진동이 없는 가 확인하였다.

이득 증가에 대해서 특별한 이상이 없음을 확인한 후, PSS가 없는 경우와 PSS가 있는 경우에서 AVR 스텝시험을 수행하여 측정된 결과로부터 설치된 Proto PSS에 의한 전력동요 댐핑 정도를 아래와 같이 분석하였다. 사용된 측정 장비는 DSM(Dynamic System Monitor)를 사용하였으며, 이 장비는 Sampling 속도는 240Hz이며, 60Hz로 RMS 값을 계산하여 동시에 여러 채널 값들을 PC에 데이터를 저장한다.

Proto PSS 성능시험은 AVR의 Summing 점에 3% 스텝 업/다운 시험을 인가하여 인위적으로 작은 전력동요를 발생하여 시험하였다. AVR 스텝입력 장치는 아나로그형식으로 2%대의 입력신호를 발생할 수 없어 3%로 시험하였다. 그리고 계통운전 사정상 아래와 같은 3가지 경우에 대해서만 Proto PSS 성능시험을 제한하였다. PSS 성능시험 시 앞에서

상정한 운전조건인 역률 1.0조건으로 맞추기는 어려웠으며, 무효출력은 약 50MVar가 출력하고 있었다. 이때 무주 P/P 1호기는 정지하고 있었다.

AVR 스텝 시험 Case :

- Case 1 : 300MW 운전 시, Without PSS ($K_s=0.0$)
- Case 2 : 300MW 운전 시, With PSS ($K_s=10.0$)
- Case 3 : 300MW 운전 시 With PSS ($K_s=15.0$)

AVR 스텝시험 시 측정된 전력동요는 개발된 Proto PSS가 동작하는 경우가 PSS가 없는 Case 1보다 전력동요 댐핑에 우수함을 보였다. 그림 10은 Case 3과 PSS가 동작하지 않은 Case 1의 전력동요를 비교한 것이다. Case 1의 3% AVR 스텝 업 시험 시는 전력동요가 오래 동안 지속되고 있으나, Case 3인 경우에는 전력동요가 2초부터는 그 동요가 현저하게 줄었음을 알 수 있다. 이러한 결과는 현장시험 전에 시뮬레이션 된 결과와 동일하다. 그림 11은 PSS 이득이 $K_s=10$ pu인 Case 2인 경우와, $K_s=15$ pu인 Case 3인 경우의 3% AVR 스텝 업 시험시의 전력동요를 비교한 것이다. 시뮬

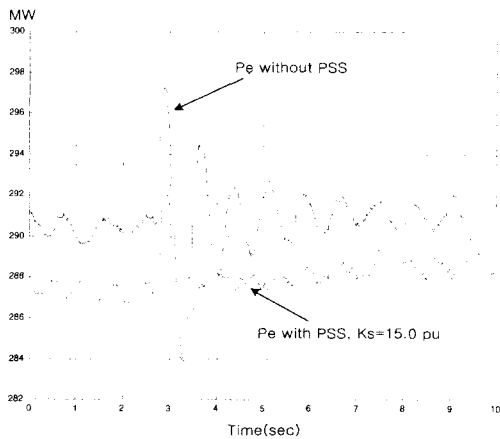


그림 10 $K_s=15.0$ 와 $K_s=0.0$ 에 대한 측정된 P_e 비교
 Fig. 10 Comparison of Power Oscillation with PSS ($K_s=15.0$ pu) and without PSS ($K_s=0.0$ pu)

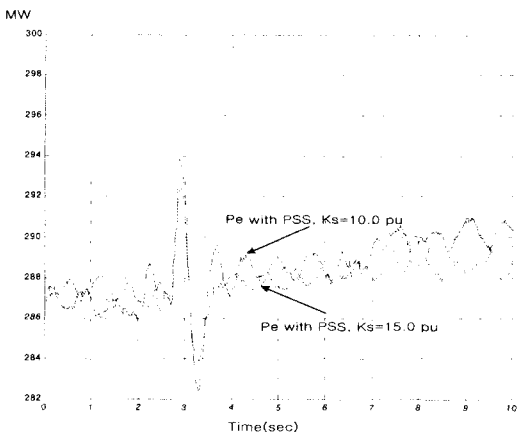


그림 11 $K_s=15$ 인 경우와 $K_s=10$ 인 경우 측정된 P_e 비교
 Fig. 11 Comparison of Power Oscillation with $K_s=15.0$ pu and $K_s=10.0$ pu

레이션 결과와 같이 K_s 이득이 큰 경우가 전력댐핑 정도가 큼을 보여준다.

6. 측정된 PSS 성능시험 재현

마지막 단계는 PSS 성능시험 시 측정된 데이터를 모의하여 재현하는 것이다. 현장에서 측정된 시험을 상용 과도 안정도 프로그램을 이용해서 재현함으로써 사용된 계통 모델, 발전 시스템 모델, 그리고 사용된 PSS 모델 정수를 재검증할 수 있다. 측정된 3% AVR 스텝업 현장 시험결과를 본 절에서는 모의한다.

6.1 PSS가 동작하지 않은 경우 모의($K_s=0.0$)

측정된 결과를 재현하기 위해서 현장에서 측정된 똑 같은 조건으로 유효전력, 무효전력, 그리고 발전기 단자전압을 정상상태에서 조류계산으로 수립시키고 3%에 해당되는 값을 "EXST1"의 Summing점에 측정된 시간과 같은 시점에 인가하였다. PSS가 없는 경우의 3% AVR 스텝 업 시험을 모의한 결과는 그림 12와 그림 13 같으며, 이 두 그림은 측정된 발전기 출력과 측정된 발전기 출력을 비교하고 있다.

모의된 발전기 출력 동요 주파수와 댐핑 정도는 측정된 발전기 출력 동요주파수와 댐핑 정도와 거의 일치하고 있다. 약간의 차이는 실 계통에서 항상 발생하고 있는 작은 외란에 기인한다. 그림 13은 발전기 계자전압에서 측정된 값과 모의된 값을 나타내고 있으며, 두 값은 거의 일치하고 있다. 그림 12와 그림 13으로부터 모델링된 무주 P/P 인근 계통, 발전기 모델 정수, 그리고 여자시스템 모델정수들을 검증할 수 있다.

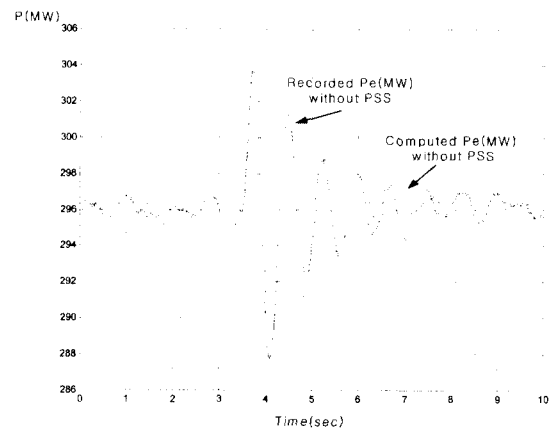


그림 12 $K_s=0.0$ 인 경우 측정된 P_e 와 모의된 P_e 비교
 Fig. 12 Comparison of Recorded P_e and Computed P_e without PSS ($K_s=0.0$)

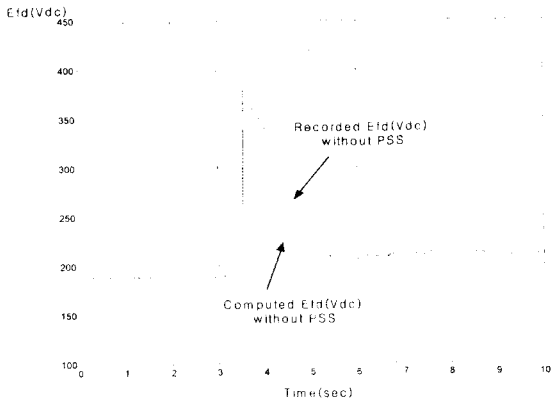


그림 13 $K_s=0.0$ 인 경우 측정된 E_{fd} 와 모의 결과 비교
 Fig. 13 Comparison of Recorded E_{fd} and Computed E_{fd} without PSS ($K_s=0.0$)

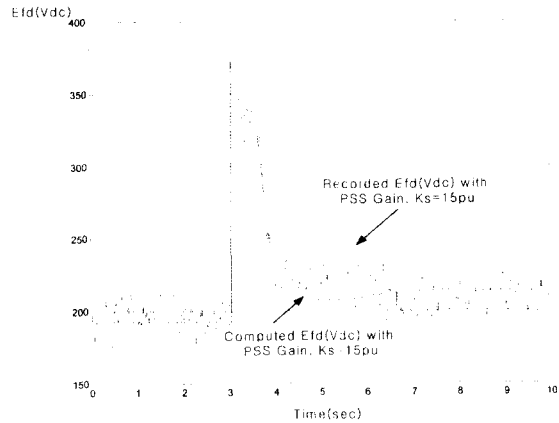


그림 15 $K_s=15$ pu 인 경우 측정된 E_{fd} 와 모의된 E_{fd} 비교
 Fig. 15 Comparison of Recorded E_{fd} and Computed E_{fd} with PSS, $K_s=15$ pu

6.2 PSS가 있는 경우 모의

그림 14와 15는, PSS가 있고 $K_s=15$ pu 일 때, 3% AVR 스텝 업 시험을 모의한 결과를 측정된 값과 비교한 것이다. 그림 14는 발전기 출력을 비교하고 있으며, 모의된 값과 측정된 값 전력동요 주파수와 진폭 등이 서로 일치하고 있음을 보인다.

그림 15는 측정된 발전기 계자전압과 모의된 계자전압을 나타내고, 전력 시스템에서 중요시 하는 2Hz 이내의 주파수 영역에서는 두개의 결과가 거의 동일하다. 측정된 계자전압에서 보여주고 있는 2Hz 이상의 높은 주파수는 Proto PSS에서 비정상적으로 발생하는 노이즈 때문이다. 이러한 노이즈 원인은 Proto PSS의 AD/DA 컨버터 문제에서 발생하였으며 최종 실제용 PSS에 대해서는 성능이 우수한 컨버터로 교체하여 문제를 해결하였다.

이와 같이 현장시험에서 측정된 PSS가 있는 경우를 모의함으로써 현장시험 전에 결정된 다중-입력 PSS 모델 정수가 무주 P/P #2기에 효과적인 댐핑 토오르크를 제공하고 있음을 재검증할 수 있다.

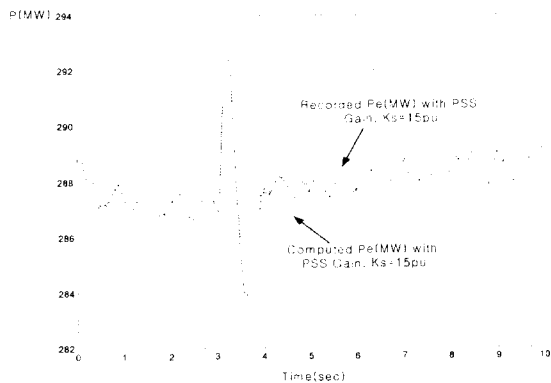


그림 14 PSS 없는 경우 측정된 P_e 와 모의된 P_e 비교
 Fig. 14 Comparison of Recorded P_e and Computed P_e with PSS, $K_s=15$ pu

7. 결 론

본 논문은 실제적인 다중-입력 PSS 튜닝방법과 대형 전력 시스템 적용에 대해서 기술하였다. 제안된 실제적인 다중-입력 PSS 튜닝 방법은 발전기 특성시험에 의해서 유도된 발전기 시스템 모델정수를 기본으로 하여, 주파수 응답특성, 고유치 해석, 그리고 과도안정도 시뮬레이션을 통하여 다중-입력 PSS 정수를 결정한다. 제안된 튜닝 방법은 무주 P/P 2호기에 Proto PSS의 성능 시험에 적용하여 효과적으로 전기기계적 동요를 댐핑하는 것을 확인하였다. 본 논문의 결과를 요약하면 아래와 같다:

- 1) 발전 시스템 실제 응답과 실 계통 동요현상을 재현하고 다중-입력 PSS 정수를 설계하기 위해서는 정확한 발전기 시스템 모델정수가 필요하다. 따라서 현장 발전기 특성시험에 의해서 측정된 데이터로부터 결정된 발전기 시스템 모델 정수를 사용하는 것이 매우 중요하다.
- 2) 제안된 선형 해석과 과도 안정도 해석 방법을 통해 다중-입력 PSS 모델 정수를 결정하는 것은 매우 실제적이고 정확한 정수값을 결정할 수 있다. 주파수 영역 해석과 고유치 해석을 통해서 결정된 다중-입력 PSS 정수는 과도 안정도 모의에서도 동일한 결과를 확인할 수 있으며, 실 계통 적용에서도 모의결과와 동일한 측정결과를 얻을 수 있다.
- 3) 다중-입력 PSS는 유효 댐핑 토오르크 주파수 영역이 넓기 때문에 단일-입력 PSS 보다 이득 K_s 값을 크게 설정할 수 있고, 0.6Hz~3.0Hz대의 주파수영역에서 댐핑 토오르크를 효과적으로 전력시스템에 제공할 수 있다.

이와 같이 본 논문은 제안된 다중-입력 PSS 튜닝방법이 대형 전력 시스템에 매우 효과적인 적용 가능성을 확인하였다. 향후 연구는 광역모드를 고려한 국내 계통 다중-입력 PSS 튜닝연구가 더 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

[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] 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

[3] 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

[4] F.P. de Mello, L.N. Hannett, J.M. Undrill, "Practical Approaches to Supplementary Stabilizing form Acceleration Power", IEEE, Trans., Vol. PAS-97, September/October 1978, pp. 1515-1522

[5] 김춘경, 김국현 "발전기 제어계통 안정화 장치용 하드웨어 개발", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2001년 7월 18-20, pp. 131-133

[6] 김동준, 문영환, 김태균, 신정훈, "대형계통 AVR/PSS 제어정수 튜닝을 위한 PWRSTAB 프로그램 개발", 대한전기학회 춘계학술대회 논문지, 1999.5

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

[8] 신정훈, 김태균, 김동준, 문영환, 백영식, "PSS 튜닝을 위한 기본 연구, PART II: PSS 실계통 최적 정수 설정을 위한 튜닝 기법", 대한전기학회 논문지, 제49권 제 7호, 2000.7

[9] P.Kundur, M.Klein, G.J. Rogers, and M.S. Zywno, "Application of Power System Stabilizers for Enhancement of Overall System Stability", IEEE Trans., Vol. PWRS-4, May, 1989, pp. 614-629

[10] P.Kundur, Power system Stability and Control, MacGraw-Hill, 1994, pp. 813-816

[11] 한국전력공사, "전력계통 안정도 해석용 발전기 제어계 모델 결정에 관한 연구", 최종보고서, 1996.10

[12] S.Venkataraman, A. Murdoch, KEPCO Seolnchon Project: EX2000 Excitation System PSS Tuning-Computer Models and Analysis, GE-PSED, April 11, 1997.

[13] 남해곤, 외, "대규모 전력계통의 미소신호 안정도 해석을 위한 Hessenberg법", 대한전기학회 논문지, 2000, 4월, 제49권 제4호

[14] J.S. Czuba, L.N. Hannett, J.R.Willis, "Implementation of Power System Stabilizer at the Ludington Pumped Storage Plant", IEEE Trans., Vol. PWRS-1, No.1, February 1980

[15] 김동준, 문영환, 전동훈, 김태균, "AVR 스텝시험에 의한 울진 N/P 1호기 PSS 모델링 연구", 대한전기학회 논문지, 제50A권, 제8호, 2001.8

[16] 김동준, 문영환, 김용학, 윤용범, "DFT 알고리즘을 이용한 전력계통 동요모드 확인", 대한전기학회 논문지, 제50A권, 제5호, 2001.5

[17] 김춘경, 김국현, "PSS Hardware 설계와 개발", 산학연 전력기술 WORKSHOP: 전력계통안정화장치 및 계통해석 DataBase, 한국전기연구소, 2000.12.1

저 자 소 개

김 동 준(金東俊)

전기학회 논문지 제 49A 7권 참조
Tel : 055-280-1318, FAX : 055-280-1390
E-mail : djkim@keri.re.kr

문 영 환(文英煥)

전기학회 논문지 제 49A 7권 참조
Tel : 055-280-1311, FAX : 055-280-1390
E-mail : yhmoon@keri.re.kr

허 진(許眞)

전기학회 논문지 제 49A 9권 참조
Tel : 055-280-1315, FAX : 055-280-1390
E-mail : jinhur@keri.re.kr

신 정 훈(申政勳)

전기학회 논문지 제 50A 7권 참조
Tel : 042-865-5833, FAX : 042-865-5844
E-mail : jhshin@kepri.re.kr

김 태 균(金泰均)

전기학회 논문지 제 49A 7권 참조
Tel : 042-865-5831, FAX : 042-865-5844
E-mail : tkkim@kepri.re.kr

추 진 부(秋鎭夫)

전기학회 논문지 제 50A 5권 참조
Tel : 042-865-5830, FAX : 042-865-5844
E-mail : jbc@kepri.re.kr