

# 전력계통안정화장치(PSS)의 개발 및 실계통 튜닝절차(하)

추진부 한전전력연구원 전력계통연구실 수석연구원  
 신정훈 한전전력연구원 전력계통연구실 선임연구원  
 김태균 한전전력연구원 전력계통연구실 선임연구원

### 3. 실계통 PSS 파라미터 튜닝 절차

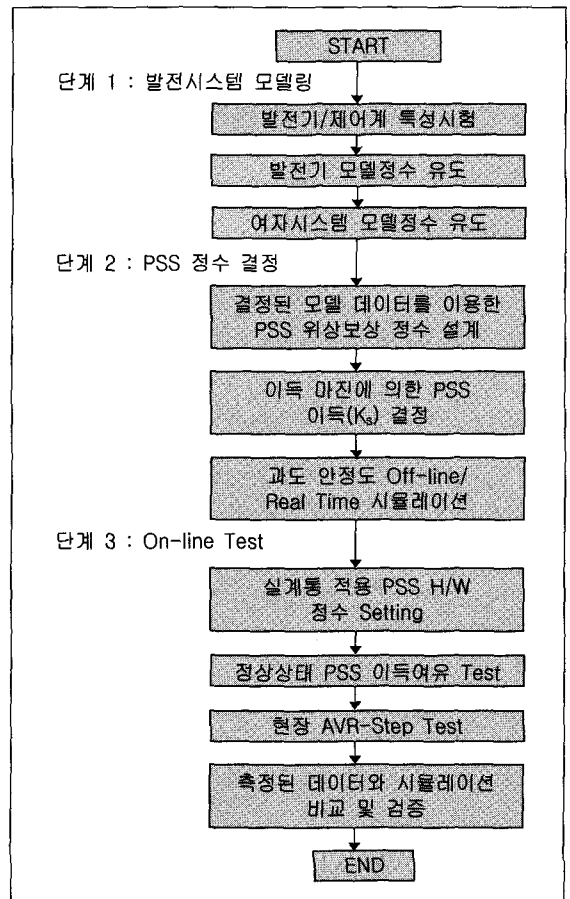
실계통 PSS 파라미터 튜닝 방법은 그림 11과 같다.

#### ■ 발전시스템 모델링(단계 1)

단계 1에서는 먼저 발전기 특성시험에 의한 발전시스템 모델과 그 정수들을 결정한다. 모델과 그 정수는 제작처 제공 모델과 정수를 사용할 수 있으나 이것은 실제 시스템을 재현하는데 오차 가능성을 크게 한다. 특히, 동요 주파수를 결정하는데 중요한 역할을 하는 발전 시스템의 관성계수와, 여자시스템의 응답 특성을 결정하는 발전기 개방 직축 과도시정수( $T_{do}'$ ), 그리고, 자동전압조정기(Automatic Voltage Regulator, 이하 AVR)의 과도 이득감소(Transient Gain Reduction, 이하 TGR) 이득은 발전 시스템 모델링에 있어 매우 정확해야 한다.

#### ■ PSS 정수결정(단계 2)

단계 2에서는 결정된 발전시스템 모델과 정수를 이용하여 Off-line으로 PSS의 제어정수를 결정한다. PSS의 제어정수 중 제일 먼저 튜닝해야 할 값들은 위상보상 시정수이다. 이 위상보상 시정수들은 발전기와 여자시스템



〈그림 11〉 실계통 PSS 파라미터 튜닝 절차

에서 발생하는 위상지연을 보상하도록 튜닝한다. PSS 위상보상 시정수들을 튜닝할 때는 주파수 응답특성을 통해서 결정한다. 본 연구에서 PSS 튜닝을 위해서 개발한 프로그램은 전력 시스템을 선형화한 PWRSTAB(PoWeR STABilizer) 프로그램이며, 이 PWRSTAB 프로그램은 PSS의 제어정수를 튜닝하기 위해서 개발된 프로그램으로서, 500차 이하의 중소형 시스템에서 고유치 분석과 주파수 응답특성을 분석할 수 있다.<sup>(6)</sup> 위상 보상은 식 (2.1) 과 같이 PSS(s) 전달함수가 PGE(s) (Power Generator Excitation, PGE) 위상지연을 관심영역 주파수대에서 영 근처가 되도록 위상보상 시정수를 결정한다.<sup>(2,7,8)</sup>

$$\frac{\Delta P_{elec}}{\Delta \omega} = PSS(s)PGE(s) \quad (2.1)$$

여기서,

$\Delta P_{elec}$  : 발전기 전기적 출력

$\Delta \omega$  : 발전기 축 속도(Speed)

$\Delta PSS(s)$  : 다중-입력 PSS의 전달함수

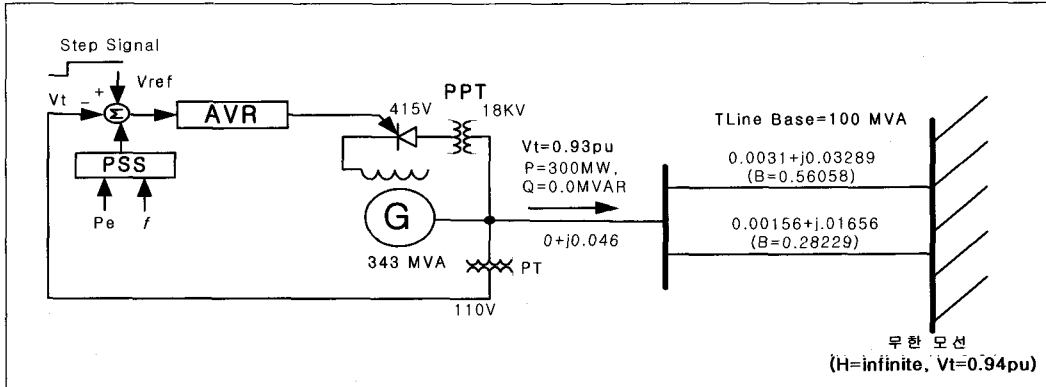
$\Delta PGE(s)$  : 시스템-발전기-여자기 전달함수

다중-입력 PSS의 위상보상 방법은 서로 다른 입력을 갖는 두 개의 PSS로 생각하고 위상보상 정수를 결정한다. 현재 일반화된 다중-입력 PSS는 발전기 단자 주파수( $f_b$ )와 발전 출력(Electric Power,  $P_e$ )을 입력으로 사용한다. 각각의 PSS는 발전기 단자 주파수를 입력으로 하는 PSS<sub>f</sub>와 발전기 출력을 입력으로 하는 PSS<sub>p</sub>로 생각할 수 있다. 이때, 주의해야 할 사항은 발전기 단자 주파수를 입력으로 하는 PSS<sub>f</sub>는 단자 주파수의 위상이 발전기의 속도(Speed)와 위상관계가 동일하다고 가정할 수 있지만, 발전기 출력( $P_e$ )을 입력으로 하는 PSS<sub>p</sub>는  $P_e$ 가 발전기 속도에 비해서 90° 앞서 있다. 따라서, PSS<sub>p</sub>의 위상보상 시정수를 튜닝할 때는 이점을 고려해야 한다. 한 가지 더 주지해야 할 사실은 전기적 특성에 대한 주파수 특성을 얻고자 하는 것이므로 발전기 관성(H)은 무한대

로 설정해야 한다. 그렇지 않은 경우, 전기·기계적 모드까지 포함된 결과가 나오게 되어 분석하기가 용이하지 않다. 다음으로 결정하는 정수는, PSS의 이득정수,  $K_s$ 이다. 결정된 다중-입력 PSS의 위상보상 시정수와 계통 선형화 프로그램을 이용하여 이득  $K_s$ 을 증가시키기에 따라 고유치 값 변화를 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. 이득  $K_s$  결정은 지역모드와 제어기 모드의 댐핑률을 고려해서 잠정적으로 결정한 후, 시간영역에서 모의하여 검증한다. 이와 같이 선형해석에서 결정된 다중-입력 PSS 정수는 PSS/E와 같은 과도안정도 프로그램이나 RTDS (Real Time Digital Simulator)와 같은 실시간 시뮬레이터를 이용하여 검증한다.

### ■ On-line Test(단계 3)

단계 3에서는 현장에서 발전시스템에 설치되어 있는 PSS에 결정된 PSS 정수를 세팅하고, 성능시험을 통하여 최종 PSS 이득  $K_s$ 를 결정한다.  $K_s$ 의 이득여유 확인은 정상상태에서 이득  $K_s$ 를 영에서부터 조금씩 증가하면서 발전기 출력과 계자전압 등에 이상 진동이 발생하는가를 확인한다. 그리고, 될 수 있으면 시뮬레이션했었던 최대 값 근처까지  $K_s$ 를 증가시켜서 이득 여유(Gain Margin)와 정상 상태에서 이상이 없음을 확인한다. 정상상태에서 이상이 없으면, AVR 스텝시험을 통하여 PSS가 있는 경우와 없는 경우의 전력 댐핑 정도를 확인하고, 최종적으로 PSS 이득  $K_s$ 을 결정한다. 마지막으로는 성능시험에서 측정된 데이터를 단계 2에서 결정된 정수와 off-line 과도 안정도 프로그램을 이용하여 성능시험 상황을 모의하여 측정된 결과와 비교하고, 결정된 PSS 제어정수를 최종 검증한다.



〈그림 12〉 무주양수 2호기 계통구성도

#### 4. 튜닝절차 실계통 적용 및 현장시험

앞서 기술된 PSS 튜닝 절차를 무주 양수 2호기의 PSS 개발품에 적용하여 그 유효성을 확인하였다. 본절에서는 튜닝절차를 실계통에 적용하고, PSS 개발품의 실계통 성능시험 및 평가에 대해 기술한다.

##### 가. 발전시스템 모델링

그림 12는 무주 양수 #2에 PSS 개발품의 성능시험시 사용하는 계통도이다. 개발된 PSS는 DSP 기술을 기반으로 하는 디지털 다중-입력 PSS로 발전기 단자 주파수와 출력을 입력으로 하고 있으며, 계통에 설치할 목적으로 개발된 PSS이다. 무주 양수는 2기의 발전 시스템으로 구성되어 있으며 실제 현장시험시에 1호기는 정지해 있었다. 사용된 송전선로 데이터는 한전에서 사용되고 있는 안정도용 DB를 참조하여, 무주 발전소와 연결되어 있는 두 개의 송전선로만 모델링하였다. 또한, 성능시험시의 발전기 운전조건은 PSS 튜닝 계통조건에 따라, P = 300.0MW, Q = 0.0MVA인 정격운전 출력에서 역률은 1.0으로 운전하고 있다고 상정하였다. 이때의 발전기 단자전압과 무한모선 전압은 각각 0.93pu와 0.94pu로 계산

된다. 아래에서는 무주 양수 2호기의 발전시스템 모델정수에 대해서 기술하고자 한다.

발전기 모델정수와 여자시스템 모델 정수는 표 2, 표 3과 같다. 결정된 모델정수는 발전기 특성시험에 의해서 측정된 결과로부터 결정된 정수값이다.

〈표 2〉 결정된 무주 양수 2호기 발전기모델 정수(343MVA)

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

〈표 3〉 무주 양수 2호기 여자시스템 모델 EXST1 정수

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

〈표 4〉 무주 양수 2호기 조속기/터빈 모델 정수(HYGOV)

정수	정수 값	정수	정수 값
R	0.063	G <sub>max</sub>	1.0
r	0.130	G <sub>min</sub>	0.0
T <sub>r</sub>	5.025	T <sub>w</sub>	1.044
T <sub>f</sub>	0.025	A <sub>t</sub>	1.272
T <sub>g</sub>	0.50	D <sub>turb</sub>	0.5
±V <sub>ELM</sub>	0.2	q <sub>nl</sub>	0.214

〈표 5〉 무주 P/P 2호기 튜닝된 PSS 정수(PSS2A)

정수	정수 값	정수	정수 값
T <sub>w1</sub> , T <sub>w2</sub> , T <sub>w3</sub>	2.00	n	1
T <sub>w4</sub>	0.0(bypass)	M	4
T <sub>7</sub>	2.0	K <sub>s1</sub>	15.0
K <sub>s2</sub>	0.163 (T <sub>w</sub> /2H)	T <sub>2</sub> , T <sub>4</sub>	0.02
K <sub>s3</sub>	1.000	T <sub>1</sub> , T <sub>3</sub>	0.12
T <sub>10</sub>	0.440	L <sub>MAX</sub>	0.10
T <sub>9</sub>	0.110	L <sub>MIN</sub>	-0.10

나. PSS 모델 정수 결정

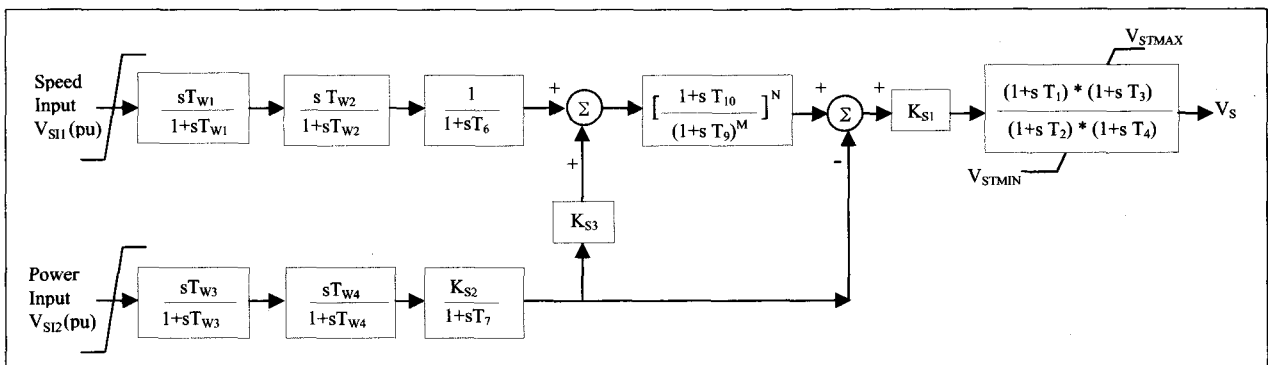
성능 시험될 PSS 개발품의 모델은 과도 안정도 프로 그래밍 PSS/E의 내부모델 “PSS2A”와 거의 구성도가 같다. 그림 13은 두 가지 입력 값을 갖는 다중-입력 PSS 모델 “PSS2A” 모델을 보여주고 있다. 여기서 사용하는 두 가지 입력신호는 발전기 단자 주파수와 발전기 출력신 호이다. 앞에서 언급한 튜닝절차에 따라서 시행착오로 결 정하면, “PSS2A” 모델정수는 표 5와 같다. 표 5의 Washout 시정수 값 T<sub>w</sub>는 지역모드에 댐핑 특성이 더욱 향상되도록 2.0sec로 설정하였다. Washout 시정수가 크 면 클수록 저주파 동요에 민감하게 되어 안정도 여유를 희생시킬 수 있다. 표 5의 정수 n과 M은 일반적으로 사 용되고 있는 값으로 설정하였으며, T<sub>1</sub>~T<sub>4</sub>, 그리고 T<sub>9</sub>

와 T<sub>10</sub>는 주파수특성이 나오도록 시행 착오법으로 결정 하였다. PSS 출력 제한 정수 L<sub>max</sub>와 L<sub>min</sub>은 보수적인 관 점에서 제한폭이 ±10%가 되도록 하였다.

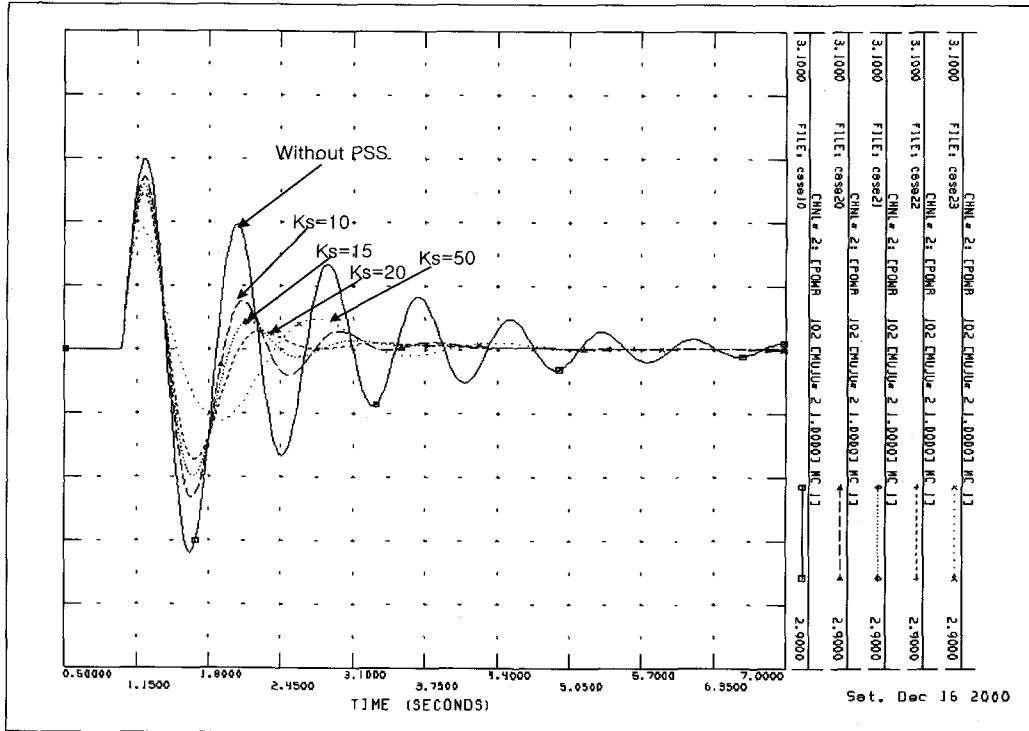
다. 시간영역 과도 안정도 시뮬레이션

무주 양수 전력 시스템 모델, 유도된 전력 시스템 모델 과 정수, 그리고 앞에서 결정된 PSS 정수를 이용하여 시 간 영역 과도 안정도 해석을 수행할 수 있다. 사용된 과도 안정도 프로그램은 PSS/E 프로그램이며, 이 프로그램을 이용하여 현장에서 시험될 것으로 예상되는 PSS 개발품 의 성능시험을 시뮬레이션하면 아래와 같다.

■ 300MW 2% AVR Step 시험



〈그림 13〉 다중 입력을 갖는 PSS2A 모델



〈그림 14〉 300MW 출력에서의 2% AVR 스텝시험 시뮬레이션

인 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 스텝으로 인가하는 것이다. 각각의 PSS 이득은 아래와 같다. 뒤에서 언급하겠지만, 실제 현장에서 수행된 AVR 스텝 시험은 2%가 아닌 3% 스텝으로 실시되었다.

- 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 :  $K_s = 50.0$

모의결과를 보면 PSS의 이득이 증가할수록 발전기 출력의 댐핑정도는 증가하나, 이득이  $K_s = 50pu$ 인 경우는

그 댐핑정도가 앞의 값  $K_s = 20.0pu$ 인 경우보다 더 적음을 알 수 있다. PSS 모델정수( $K_s$ ) 결정시 사용한 고유치 해석결과와 같이 이득이 증가할수록 지역모드의 댐핑정도가 증가하다가 어느 값부터 감소하는 것을 나타낸다. 따라서, 그림 14의 시간영역 모의 결과는 고유치 계산결과와 일치하고 있다.

#### 라. PSS 개발품의 현장적용 시험

앞에서 결정된 PSS 제어정수를 이용하여 2000년 12월에 국내 최초로 순수 국내기술진에 의해서 개발된 디지털 형식의 PSS 개발품을 시험하였다. 기 결정된 PSS 제어정수를 입력하고, 발전기가 300MW 근처 운전시에 PSS 개발품의 스위치를 on하여 작동하였다. 먼저, 이득여유가 충분한지를 확인하기 위해서 300MW 정상상태에서

PSS 이득을 30pu까지 점차 증가시켜 이상 진동이 없는가를 확인하였다. 이득 증가에 대해서 특별한 이상이 없음을 확인한 후, PSS가 없는 경우와 PSS가 있는 경우에서 AVR 스텝시행을 수행하여 측정된 결과로부터 설치된 PSS 개발품에 의한 전력동요 댐핑 정도를 아래와 같이 분석하였다. 측정장비는 DSM(Dynamic System Monitor)을 사용하였으며, 이 장비는 60Hz로 RMS 값을 계산하여 여러 채널의 값을 PC에 동시 저장한다.

■ 300MW 운전, 3% AVR Step 시험

PSS의 성능시험은 AVR의 Summing 점에 3% 스텝 업/다운 시험을 인가하여 인위적으로 작은 전력동요를 발생시켜 시험하였으며 시험 현장 사정상 아래와 같은 3가지 경우에 대해서만 성능시험을 제한하였다. PSS 성능 시험시, 계통 운전 사정상 앞에서 상정한 운전조건인 역률 1.0 조건으로 맞추기는 어려웠으며, 무효 출력은 약 50MVar가 출력하고 있었고 PSS 성능 시험시 1호기는 정지해 있었다.

-AVR 스텝 시험 Case

Case 1 : 300MW 운전시,

Without PSS( $K_s = 0.0$ )

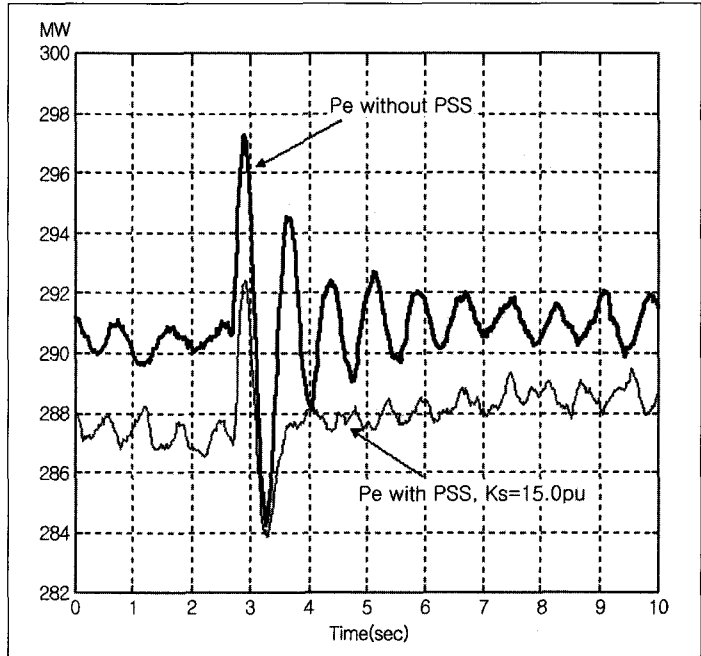
Case 2 : 300MW 운전시,

With PSS( $K_s = 10.0$ )

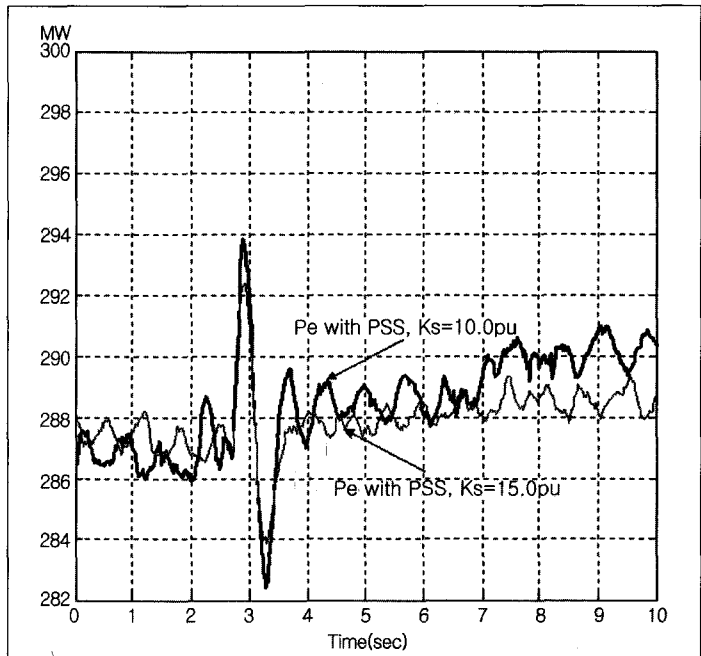
Case 3 : 300MW 운전시,

With PSS( $K_s = 15.0$ )

AVR 스텝시험시 측정된 전력동요는 국내기술진이 개발한, PSS 개발품이 있는 경우와 PSS가 없는 Case 1보다 전력동요 댐핑에 우수함을 보였다. 여기서는 AVR 스텝 업/다운



〈그림 15〉  $K_s=15.0pu$ 와 w/o PSS 인 경우의 측정된 전력동요( $P_e$ ) 비교

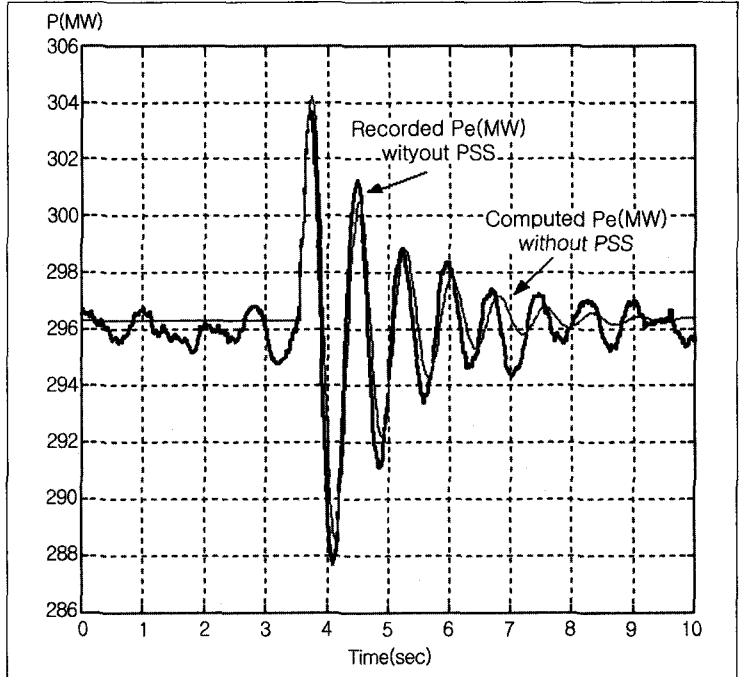


〈그림 16〉  $K_s=15pu$ 인 경우와  $K_s=10pu$ 인 경우의 측정된 전력동요 비교

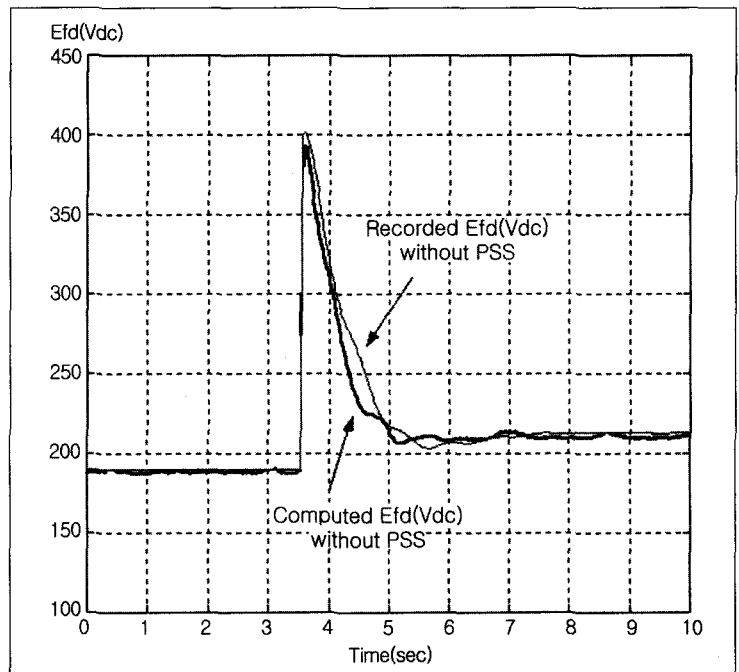
시의 측정결과 중 스텝 업 시험시에 측정된 결과에 대해서만 비교한다. 그림 15는 앞에서 제안된 PSS 정수 값을 갖는 Proto PSS가 있는 Case 3와 PSS가 없는 Case 1의 전력동요를 비교한 것이다. Case 1의 3% AVR 스텝 업 시험시는 전력동요가 오래 동안 지속되고 있으나, Case 3의 경우는 2파부터는 전력동요가 현저하게 줄어들고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 앞의 현장 시험 전에 시뮬레이션된 결과와 동일하다. 그림 16은 PSS의 이득이  $K_s = 10pu$ 인 경우 (Case 2)와,  $K_s = 15pu$ 인 경우 (Case 3)의 3% AVR 스텝 업 시험시 전력동요를 비교한 것이다. 시뮬레이션 결과와 같이  $K_s$  이득이 큰 경우가 전력댐핑 정도가 큼을 보여준다.

**마. 모델 정수의 재검증**

실제적인 다중-입력 PSS의 정수 결정에 있어서 마지막 단계는 PSS 성능시험시 측정된 데이터를 모의하는 것이다. 이와 같이 현장에서 측정된 시험을 다시 모의함으로써 사용된 계통 모델, 발전 시스템 모델, 그리고 사용된 PSS 모델 정수를 재검증할 수 있다. 현장에서 측정된 시험을 재현하기 위한 과정은 다음과 같다. 먼저, 현장에서의 시험과 동일한 조건으로 유효전력, 무효전력, 그리고 발전기 단자전압을 정상상태에서 조류계산으로 수립시킨다. 이때, 발전기의 측정 전압과 무효전력을 수립시키기 위해서 무한모션의 전압을 조정한다. 그리고, 3%에 해당되는 값을 여자시스템 모델 "EXST1"의



〈그림 17〉 PSS 없는 경우 측정된  $P_e$  결과와 모의된  $P_e$  결과 비교

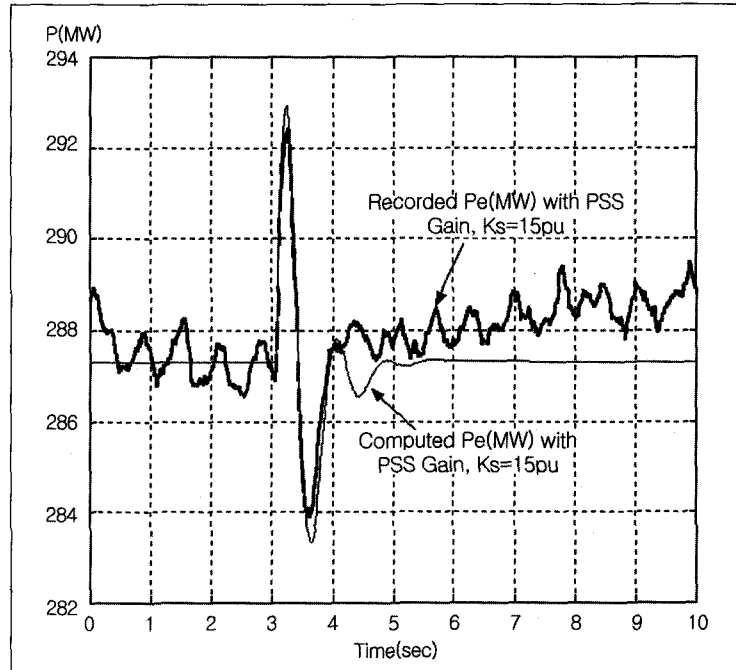


〈그림 18〉 PSS 없는 경우 측정된  $E_{fd}$  결과와 모의된  $E_{fd}$  결과 비교

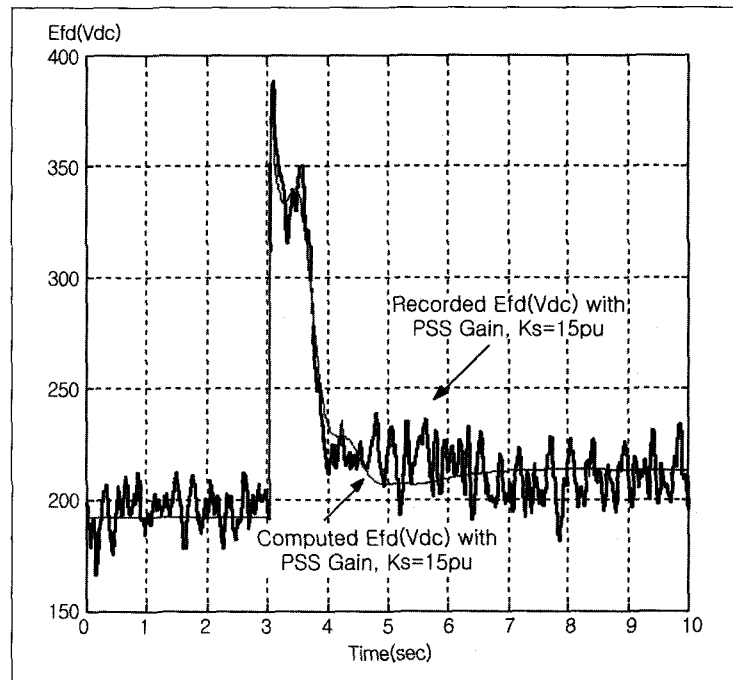
Summing점에 측정된 시간과 같은 시점에 인가한다. PSS가 없는 경우의 3% AVR 스텝 업 시험을 모의한 결과는 그림 17, 18 과 같으며, 이 두 그림은 또한 측정된 결과 도 보여주고 있다.

그림 17은 모의 발전기 출력과 측정된 발전기 출력을 비교하고 있다. 모의 발전기 출력의 동요 주파수와 댐핑 정도는 측정된 발전기 출력의 동요주파수, 댐핑 정도와 거의 일치하고 있다. 약간의 차이는 실 계통의 미소외란에 기인한 것으로 판단된다. 그림 18은 발전기 계자전압으로 측정된 값과 모의 값을 나타내고 있으며, 두 값은 거의 일치하고 있다. 모의 결과와 측정 결과를 비교하는 그림 17과 그림 18로부터 모델링된 무주 양수 인근 계통, 발전기 모델 정수, 그리고 여자시스템의 모델정수들을 재검증 할 수 있다.

그림 19와 그림 20은 PSS가 있고 이득이  $K_s=15pu$ 일 때, 3% AVR 스텝 업 시험의 모의 결과를 실측정 값과 비교한 것이다. 그림 19는 발전기 출력을 비교하고 있으며, 모의 값과 측정 값의 전력동요 주파수와 진폭 등이 서로 일치하고 있음을 보여준다. 다소의 차이는 실계통에서 끊임 없이 발생하는 작은 외란에 기인한 것으로 판단된다. 그림 20은 측정된 발전기 계자전압과 모의 계자 전압을 나타내는 것으로, 전력 시스템에서 중요시하는 2Hz 이내의 주파수 영역에서는 두 개의 결과가 거의 동일하다. 이와 같이 현장시험에서 측정된 PSS가 있는 경우를 모의함으로써, 현장시험 전에 결정된 다중-



〈그림 19〉 PSS 없는 경우 측정된  $P_e$ 와 모의된  $P_e$  결과 비교



〈그림 20〉  $K_s=15pu$ 인 경우 측정된  $E_{fd}$ 와 모의된  $E_{fd}$  비교



입력 PSS 모델 정수가 무주 양수 #2에 효과적인 댐핑 토크를 제공하고 있음을 재검증할 수 있다. 또한, 제안된 다중-입력 PSS 튜닝방법이 매우 효과적임을 확인할 수 있다.

## 5. 맺음말

본 연구는 속응 여자방식의 아날로그 AVR에 적용할 디지털 PSS를 개발함과 동시에 전체 계통의 안정화 효과를 극대화시키기 위한 안정도 해석 Tool을 개발하고 이를 이용한 최적 제어/튜닝기술을 확보하는 당초의 목표를 완수하였다. 국내 최초로 개발된 PSS는 우리 나라의 Analog AVR 방식 발전기의 표준이 되도록 IEEE 규격과 추천사항에 부합하는 세계 최고 수준의 성능이 되

도록 구현하였다. 특히, 개발된 범용 Digital PSS는 상품화가 가능하도록 필요한 모듈구성과 운전환경, 보호 및 진단기능 등을 선정하여 최선의 시스템이 되도록 설계 제작하였다. 아울러 개발된 PSS의 적용을 위하여 필수적으로 요구되는 제어 알고리즘의 개발과 최적 튜닝 절차를 개발하였다.

개발된 최종 실제품은 실시간 전력계통 시뮬레이터(RTDS)를 이용하여 제어기의 성능을 완벽하게 평가, 공인시험을 거쳐 무주양수 1/2호기에 적용, 현재 연속운전중에 있다.

본 PSS 시험시 사용된 실시간 전력계통 해석용 시뮬레이터(RTDS)의 활용성 제고는 과학기술부 주관 2001년 국가지정연구실사업에 의하여 지원을 받고 있습니다.

## 참고 문헌

- (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, etc, "발전기 제어계통 안정화 장치용 하드웨어 개발", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2001년 7월 18-20, pp131~133
- (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 토크 특성분석", 대한전기학회 논문지 제48권 제9호, 1999.9
- (8) 신정훈, 김태균, 김동준, 문영환, 백영식, "PSS 튜닝을 위한 기본 연구, PART II: PSS 실계통 최적 정수 선정을 위한 튜닝 기법", 대한전기학회 논문지, 제49권 제7호, 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, pp813~816