

축소형 5KVA 동기발전기 AVR/PSS 강건한 제어정수 설계 및 튜닝

김동준\* 문영환 김태균 신정훈  
전기연구소 전력연구원

Design and Tuning of Micro 5KVA Machine's AVR/PSS Robust Control Parameters

D.J. Kim Y.H. Moon T.K. Kim J.H. Shin  
KERI KEPRI

**Abstract** - This paper describes the guideline of design and tuning of practical Micro 5KVA machine's digital AVR/PSS control parameters by using the computer models and testing on-line AVR step test of laboratory simulator under the no-load or load conditions. The suggested procedures can be also applied to the large scaled machine's AVR/PSS control parameter tuning in KEPCO system.

미세 튜닝하였다.

1. 서 론

대형 전력계통에 댐핑 토오르크를 제공하는 방법 중에서 가장 경제적이고 효과적인 방법은 발전기 자동전압제어시스템인 AVR에 보조신호를 제공하는 전력계통안정화장치(Power System Stabilizer, 이하 PSS)를 설치하는 것이다. 발전기에 PSS를 설치함으로써 계통전반에 나타나는 광역 모드(inter-area mode)의 전력동요를 감쇄시킬 수 있으며, 지역 모드(local mode)에서는 댐핑 토오르크 부족에 의한 발전기의 송전 전력제한을 완화시킬 수 있다. 최근 각광 받고 있는 FACTS 설비는 송전선로의 용량증가와 광역모드의 제동 등에 탁월한 성능을 발휘할 수 있지만, PSS에 비해 설치비용이 최소 수백 배인 관계로 송전선로의 병목현상이 발생하는 곳에 주로 20%이상의 송전용량증가를 주목적으로 설치 운전 또는 계획되고 있다.

본 논문은 실험실용 축소형 5KVA 동기발전기의 AVR/PSS 제어정수 튜닝을 위하여, 먼저 디지털 PI형 AVR 정수를 실제 무부하 AVR 스텝시험을 통하여 튜닝하고 모델정수를 추출 결정하였다. 그리고, 결정된 발전기/여자시스템 모델을 이용하여 디지털 PSS의 위상보상정수를 설계하였다. 모델에서 결정된 PSS 제어정수는 실제 디지털 PSS에 입력하고 축소형 동기발전기가 운전 중에 AVR 스텝시험을 통하여 PSS가 있는 경우와 없는 경우를 비교하여 설계된 제어정수의 유효성을 확인하였다. 이와 같이 본 논문은 불확실성이 강한 현장 적용의 AVR/PSS의 제어정수 설계 및 튜닝에 대해서 유용한 지침을 제시하였다.

2. 여자시스템 모델정수 결정 및 검증

본 절에서는 전기연구소의 5KVA 시뮬레이터에 설치되어 있는 디지털 PI-AVR 정수를 실제 AVR 스텝시험을 이용하여 튜닝하고, 측정된 데이터로부터 모델정수를 유도하는 것에 대해서 설명한다.

2.1 실제 디지털 PI-AVR 정수 튜닝

전기연구소에 있는 축소형 5KVA 시뮬레이터(동기발전기)의 모델은 그림 2.1과 같은 돌극기 형태이며, 이 발전기에 대한 모델 정수는 표 2.1과 같다. 이 모델 정수는 발전기 특성시험에 의해서 유도한 값이며, 계자시정수는 측정된 파형과 정확히 맞추기 위해서 여러 번

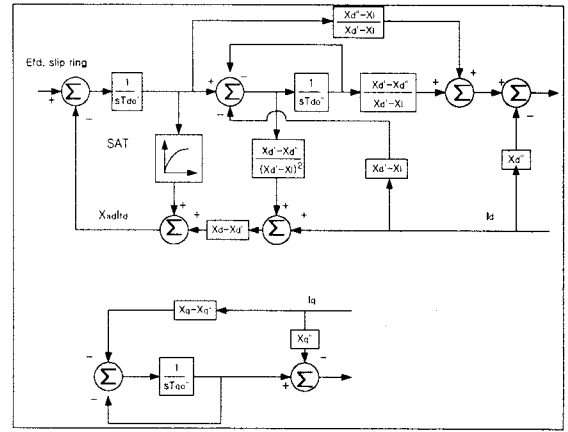


그림 2.1 돌극형 발전기 모델 "GENSAL"

표 2.1 결정된 발전기 모델정수

발전기 정수	정수 값	비고
$T_{do}'$	0.841 sec	계자시정수
$T_{do}''$	0.04906 sec	
$T_{ao}''$	0.05356 sec	
H	4.790	관성계수
D	0	
$X_d$	1.2258	
$X_o$	0.9417	
$X_d'$	0.3364	$X_o'' = 0.3159$
$X_d'' = X_o''$	0.2570	$X_d'' = 0.2045$
$X_l$	0.1500	누설 리액턴스
S(1.0)	0.3952	포화계수
S(1.2)	0.7586	

축소형 시뮬레이터에 사용되고 있는 여자시스템은 정지형 여자를 사용하며, AVR은 다목적 용도로 사용할 수 있도록 디지털 PI-AVR로 되어 있다. 정속도 무부하 상태에서 축소형 시뮬레이터의 디지털 AVR의 PI 제어정수결정은 AVR 스텝응동 특성이 양호하게 나오는 값으로 결정할 수 있다. 튜닝된 디지털 AVR 정수는 P=I=3.0로 반복 튜닝 결정되었다. 이와 같이 모델을 이용하지 않고 현장에서 AVR정수를 반복해서 결정해야 하는 이유는, 실제 사용되고 있는 정지형 여자의 이득이 얼마인지 알 수 없고 설정되는 공학적인 PI값(=3.0)이 정확히 어떤 pu값으로 변환되는지 알 수 없기 때문이다. 따라서 실제 PI정수를 반복 튜닝해서 단자전압과 계자전압의 행동이 가장 양호한 값을 보여주는

값으로 결정해야 한다. 그림 2.2는 실제 축소형 시뮬레이터와 디지털 여자시스템을 두고 결정된 AVR의 PI 정수에 의해서 무부하 AVR 스텝시험을 한 것이다.

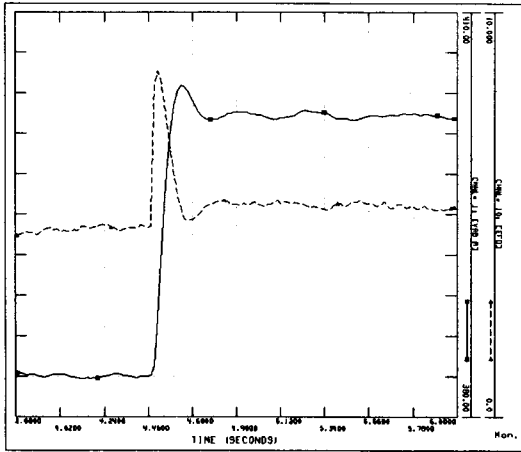


그림 2.2 무부하 개방회로 AVR 스텝시험 측정결과 (- : 단자전압, -- : 계자전압)

### 2.2 여자시스템 모델 정수 유도

그림 2.3은 축소형 시뮬레이터의 여자시스템에 적당한 PSS/E의 EXPIC1 모델을 보여주고 있다. 그림 2.3의 유도된 여자시스템 모델 정수는 표 2.2와 같다. 여자시스템 모델에서 사용된 정수는 트랜스듀서 시정수와 PI제어 이득 값만 사용했으며 나머지 값들은 동작하지 못하도록 하여 측정된 응답이 나오도록 하였다.

모델 EXPIC1에서의 이득  $K_A$ 는 측정된 무부하 스텝시험 단자전압/계자전압이 근사하게 나오는 값,  $P=I=17.0pu$ 값으로 유도 결정되었다. 이득  $K_A=17.0pu$ 은 AVR의 이득 약  $3.0pu$ 값과 여자의 이득  $pu$ 값이 곱해서 나온 값이며, 여자의 이득은 약  $6.0pu$  정도로 추정된다. 그림 2.4는 표 2.1의 발전기 모델 데이터와 표 2.2의 여자시스템 모델 정수 값을 이용해서 무부하에서 AVR 스텝시험 모의된 단자전압과 계자전압이 모의된 값과 실제 시험에서 측정된 값이 서로 근사함을 알 수 있다. 다소의 차이는 상세히 모델링 되지 않은 부분과 소자의 비선형성에 그 원인이 있다.

만약 여자의 이득이 약  $6.0pu$ 값이라는 것을 미리 알고 있었다면, 실제 디지털 AVR의 PI 정수의 결정은 모델을 통해서 미리 결정 가능하고 실제 축소형 발전기에서 시험을 통해서 확인할 수 있었을 것이다.

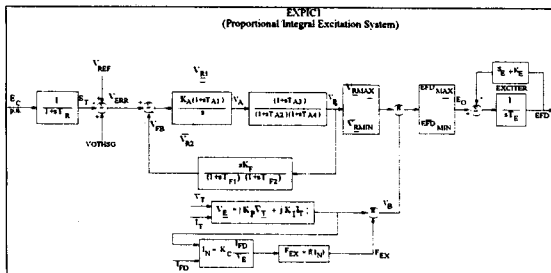


그림 2.3 PI-AVR을 갖는 여자기 모델 EXPIC1

표 2.2 EXPIC1 모델 정수 값

정수	정수 값	정수	정수 값
$T_R$	0.040	$T_{F2}$	1.0
$K_A$	17.0	$E_{FDMAX}$	5.0
$T_{A1}$	1.0	$E_{FDMIN}$	-5.0
$V_{R1}$	5.0	$K_E$	0.0
$V_{R2}$	-5.0	$T_E$	0.0
$T_{A2}$	0.0	$E_1$	3.0
$T_{A3}$	0.0	$SE_1$	0.0
$T_{A4}$	0.0	$E_2$	4.5
$V_{RMAX}$	5.0	$SE_2$	0.0
$V_{RMIN}$	-5.0	$K_P$	0.0
$K_F$	0.0	$K_I$	0.0
$T_{F1}$	1.0	$K_C$	0.0

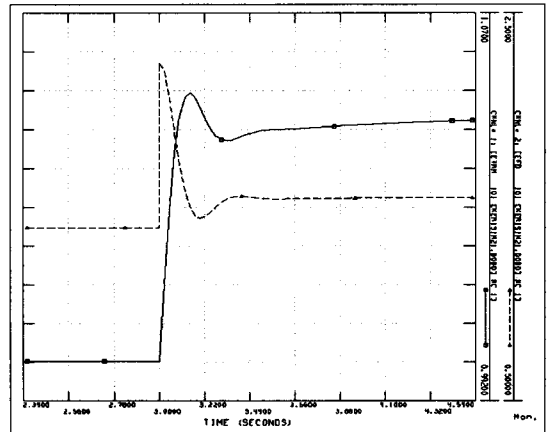


그림 2.4 무부하 개방회로 AVR 스텝시험 모의의 (- : 단자전압, -- : 계자전압)

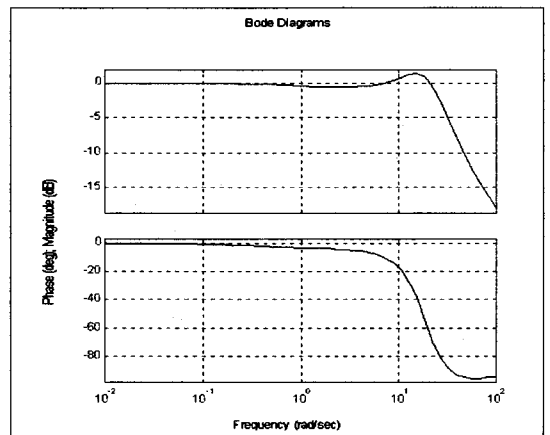


그림 2.5 무부하 전압 페루프 주파수 특성

그림 2.5는 AVR/PSS 튜닝 프로그램<sup>(1)</sup>과 결정된 발전기와 여자시스템의 모델정수를 이용하여 무부하 전압제어 페루프 주파수 특성을 살펴본 것이다. 크로스오버 주파수가 대형 발전기보다 다소 크게 나타남을 보여 준다. 이것은 발전기 계자 시정수가 대형기에 비해서 작고, 여자시스템의 이득이 다소 큰 값을 갖기 때문이다. 크로스오버 주파수에서의 위상마진은 대략  $120^\circ$  정도로 양호함을 알 수 있다.

### 3. 디지털 PSS 제어정수 설계

본 절에서는 디지털 PSS인 브라질 REIVAX사의 모델명 PWX-600 PSS에 대해서, 축소형 시뮬레이터와 디지털 여자시스템에 맞는 PSS 제어정수를 AVR/PSS 튜닝 프로그램을 이용해서 위상보상 정수를 설계하는 것에 대해서 기술한다.

#### 3.1 발전기-여자기-계통 위상지연 함수(PGE)

그림 3.1은 PWX-600 PSS의 모델 블록도를 보여주고 있다. 이 PSS는 발전기 출력과 발전기 단자전압 주파를 입력으로 하여 합성된 가속력을 사용하여  $\pm 10Vdc$ 의 PSS 제어신호를 발생시킨다. PSS 제어정수 결정 중에서 가장 중요한 것은 위상보상이다. 위상보상은 문헌에서<sup>[2]</sup>와 같이 발전기와 여자기 그리고 전력계통이 가장 큰 위상지연이 발생할 수 있는 운전점에서  $20^\circ \sim 40^\circ$  정도의 부족보상으로 설정하면 효과적인 보상이 된다.

그림 3.2은 가장 큰 위상지연 발생할 수 있는 운전점인 역률이 1.0이고 발전기 출력이 5KW이며, 계통이 강계통(strong system)인 경우, PSS가 없는 상태에서의 PGE(Power system-Generator-Exciter)함수의 위상지연을 보여주고 있다. 이때 PGE 함수의 계산은 AVR/PSS 튜닝 프로그램<sup>(1)</sup>을 사용하였다.

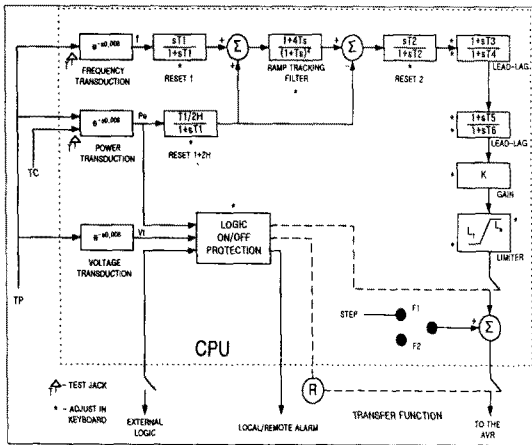


그림 3.1 PWX-600 PSS 제어 블록도

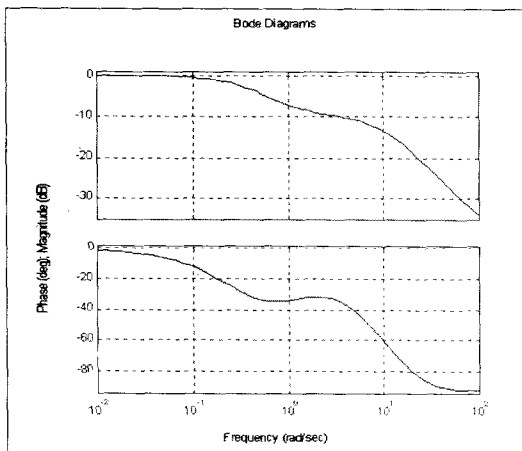


그림 3.2 부하시(5KW) PGE 함수 주파수 특성

#### 3.2 PSS를 통한 PGE 함수의 위상지연 보상

그림 3.3은 설계된 PSS 제어정수에 의해서 그림 3.2의 PGE 함수의 위상지연을 보상한 것으로,  $1 \sim 10rad$  정도의 관심영역 주파수대에서 위상보상은 약  $20^\circ$  정도로 위상이 부족보상 되었음을 보여준다.

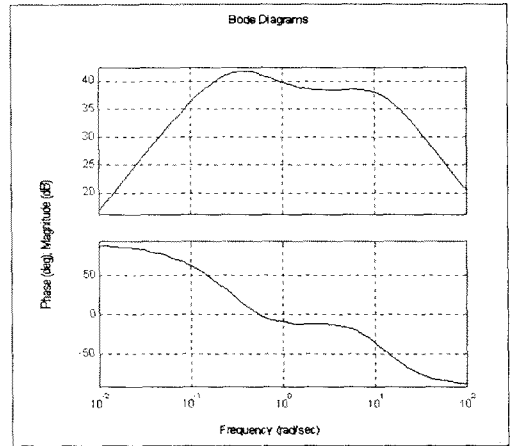


그림 3.3 부하시 PGE\*PSS 전달함수 주파수 특성

그림 3.3의 PGE함수의 위상보상을 위한 PSS 제어정수는 표 3.1과 같다. 현장에서의 PWX-600 PSS의 제어정수 튜닝은 오직 이득정수  $K$ 만 수행하게 된다. 이와 같이 PSS 위상보상은 이득결정과 달리 계통의 정밀한 모델링이 먼저 요구된다. PSS 이득 결정은 시스템의 안정성을 고려해서 적절한 값으로 하거나, 여자기 모드의 불안정이 발생하는 점에서 이득마진이 10db 정도로 행해지는 것이 보통이다.

표 3.1 PWX-600 PSS 모델 정수 값

정수	정수 값	비고
$T_1$	3.0	Reset 시정수
$2H$	9.58	
$T$	0.10	Ramp Tracking Filter 시정수
$T_2$	3.0	Reset 시정수
$T_3$	0.15	위상보상 시정수
$T_4$	0.10	위상보상 시정수
$T_5$	0.15	위상보상 시정수
$T_6$	0.10	위상보상 시정수
$L_0$	0.10	상한 리미터
$L_1$	-0.10	하한 리미터
$K$	15.0	이득

### 4. On-Line AVR 스텝시뮬

설계된 PSS의 제어정수의 유용성을 검증하기 위해서 축소형 시뮬레이터의 디지털 여자시스템에 설계된 제어정수가 입력된 PWX-600 PSS를 연결하고 on-line상에서 디지털 AVR의 기준신호 입력에 단자전압을 약 4% 정도 상승도록 하였다. 이때 발전기는 약 2.2kW를 출력하고 있었다. 그림 4.1은 PSS가 있는 경우와 없는 경우의 발전기 출력동요를 보여준다. PSS가 있는 경우 댐핑이 잘 됨을 알 수 있다. 그림 4.2의 PSS가 없는 경우의 발전기 출력을 DFT 분석하면, 그림 4.3과 같이 약 0.77Hz의 전력동요가 지배적으로 나타났다. 위상보상 설계시 폭 넓은 전력동요모드에 대해서 댐핑 토오크

가 제공되도록 정수를 결정했기 때문에 이와 같이 0.7Hz대의 낮은 주파수에서도 댐핑 토오크를 제공한다.

그림 4.4은 PWX-600 PSS에서 DC 전압인  $\pm 5V$  전압신호를 출력하고 있다. 출력된 DC 전압은 바로 디지털 여자시스템의 AVR 보조신호로 입력되어 단자전압을 변화하게 한다.  $\pm 5V$  DC PSS 전압신호는 디지털 여자시스템 내부에서 다시 pu값으로 변환하도록 계산된다. 그림 4.5는 PSS가 있는 경우와 없는 경우의 변화된 단자전압을 보여주고 있다.

댐핑 토오크의 크기 정도는 PSS의 이득 값  $K_s$  결정에 따라 크게 좌우되며,  $K_s$  결정은 실제 PSS 성능시험 시에서 시스템에 악영향을 주지 않도록 보수적인 값으로 튜닝되어 진다. 그리고 본 논문에서 사용되는 위상보상 시정수 값들의 결정은 모델을 통해서만 결정되며, 실제 PSS 성능시험에서는 튜닝되지 않은 고정된 값이 된다. 따라서 효과적인 PSS 위상보상 정수결정을 위해서는 발전기/여자시스템의 모델 정확도가 매우 요구된다.

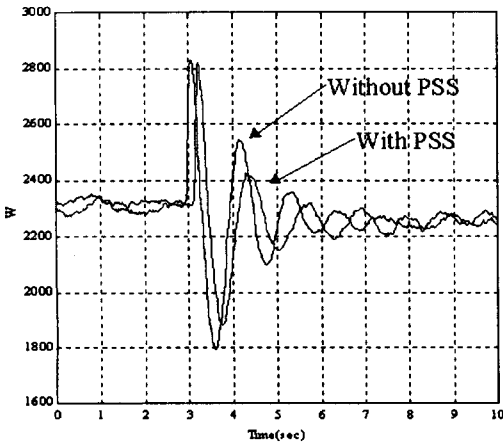
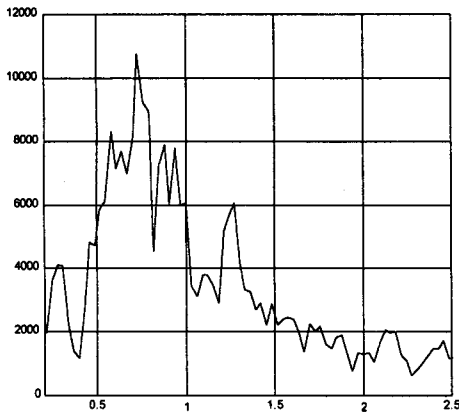


그림 4.1 PSS가 있는 경우와 없는 경우의 발전기 출력동요



주파수 (Hz)  
그림 4.2 PSS가 없는 경우 그림 4.1의 발전기 출력을 DFT 분석결과

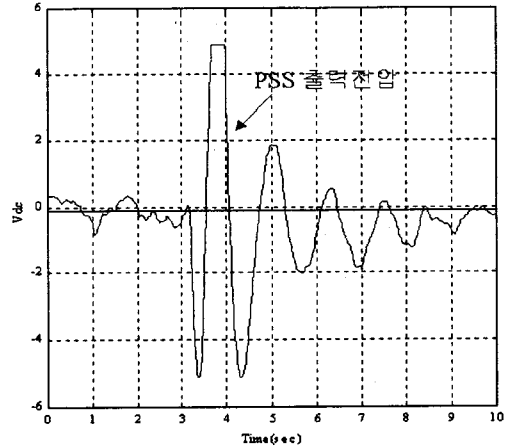


그림 4.3 PWX-600 PSS의 출력전압

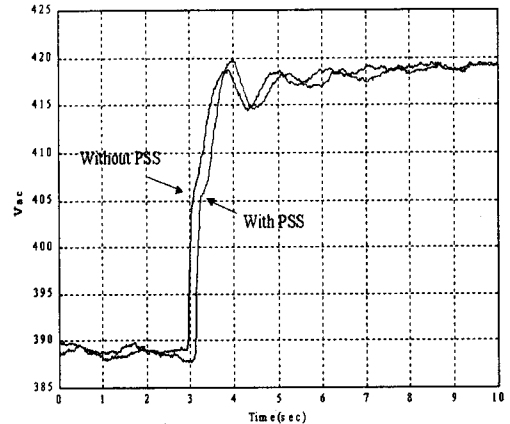


그림 4.4 AVR 스텝시험시 PSS가 있는 경우와 없는 경우의 단자전압 변동

## 5. 결 론

본 논문은 실험실용 축소형 5KVA 동기발전기의 AVR/PSS 제어정수 튜닝을 통하여 불확실성이 강한 현장 적용의 AVR/PSS의 제어정수 설계 및 튜닝에 대해서 유용한 지침을 제시하였다.

현재 진행중인 연구는 시스템에 악 영향을 주지 않도록 현장에서 최적 PSS 이득  $K_s$  결정과 지락사고 같은 큰 사고시 과도상태에서 동기화 토오크를 저하시키지 않도록 하는 리미터 설계 및 비선형 로직에 대해서 연구 중에 있다.

## (참 고 문 헌)

- [1] 김동준, 문영환, 김태균, 신정훈, " 대형계통 AVR/PSS 제어정수 튜닝을 위한 PWRSTAB 프로그램 개발", 대한전기학회 춘계학술대회논문지, 1999
- [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