

측정에 의한 울진 원자력 1호기 PSS 모델링 연구

김동준 문영환 전동훈 김태균
한국전기연구소 전력연구원

A Study of PSS Modelling of Ulchin Nuclear Plant Unit #1 by AVR Step Test

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

Abstract - This paper deals with the PSS modelling of Ulchin N/P Unit #1 by utilizing the recorded data from AVR step test. In addition to it, the recorded results obtained from the AVR step test with PSS running and without PSS running are not only compared each other on the time domain but they are also analyzed with FFT on the frequency domain; the desirable effect of running PSS in Ulchin N/P Unit #1 is examined. Finally, the derived PSS model parameters lead to good matches between simulation results and recorded data.

사용 변압기)를 이용한 여자시스템을 사용하고 있다. 울진 원자력 1/2호기의 일반적인 설비사양은 아래와 같다.

- 시설용량: 1100 MVA · 정격전압 : 22.0 KV
- 역률: 0.9 · 회전수(RPM) : 1800
- SCR: 0.59 · 여자방식: Brushless 여자방식
- 제작처: Althom

1. 서론

최근 몇 년 국내 전력계통의 안정도 분석에 의한 결과는 울진 원자력발전소의 안정도가 상대적으로 매우 취약한 것으로 해석되어 오고 있고^{[2],[3]}, 개별적인 동요측정결과^[4]도 안정도 해석의 결과를 뒷받침 해주고 있다. 이러한 이유로 울진 원자력 발전소의 3/4호기에 대한 EX-2000(GE사) 여자시스템의 PSS 튜닝작업이 GE 기술자에 의해 2000년 7월에 완료되었다. 동시에 1/2호기에 대해서는 그때까지 설치되어 있는 여자시스템에 대한 내부 PSS의 기능유무가 불명확하기 때문에, 1호기에 대해서만 국내 기술진에 의해서 실제 통과 연계중인 부하 운전중에 AVR 스텝시험에 의한 PSS 기능유무시험이 별도로 수행되었다. 이 PSS 기능유무를 위한 AVR 스텝 시험을 통하여 측정된 데이터는 울진 원자력 1호기가 양호하게 PSS 기능을 하는 것을 보여주고 있었다.

본 논문은 울진 원자력 1기에 대한 PSS 기능유무 시험에서 측정된 데이터와 제작처 제공의 데이터를 이용하여 울진 원자력 1호기의 발전기, 여자시스템 그리고 PSS 모델과 모델정수를 연구하였다. 모델링된 울진 원자력 1호기의 PSS 모델 정수는 PSS 기능유무 시험 시 측정된 데이터를 잘 재현하여 그 모델 정수뿐만 아니라 발전기와 여자시스템 모델 정수의 유효성을 확인하였다.

2. 본론

2.1 여자시스템 모델정수 결정

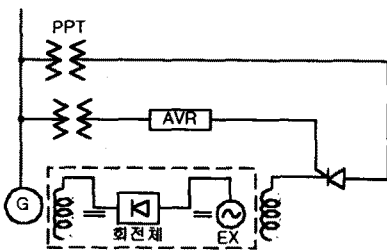


그림 1 울진 원자력 1/2호기 여자시스템 단선도 (Brushless excitation system)

울진 원자력 1/2호기의 여자시스템의 구성도는 그림 1과 같다. 그림 1과 같이 여자시스템은 Brushless 여자시스템이며, 부여자기로는 일반적으로 사용하는 PMG 대신에 PPT(여

2.1.1 여자시스템 분석 및 모델링

여자시스템의 제작처 제공 AVR 제어 블록도는 그림 2와 같다. 북미에서 사용하고 있는 제어시스템과는 달리 복잡한 것처럼 보이나, 기본적인 전압 제어특성은 같다. 발전기 단자전압의 주 제어방식은 PI 제어 방식이며, AVR의 전압제어루프 PI 제어블록 앞단에 Lead-lag 전달함수가 삽입되어 있다. 이 Lead-lag 전달함수는 발전기와 여자기에서 발생하는 위상지연을 보상하는 전달함수로서 PSS의 위상보상회로의 기능과 동일하다. 그림 2에는 발전기 최대전압(V_{max})과 최소전압(V_{min})을 제한하는 루프, 부하각(δ)을 이용해서 최대 부하각 제한하는 루프, 그리고 여자기 여자전류(i_{fd})를 이용해서 과여자전류를 제한하는 루프 등의 제한루프가 있다.

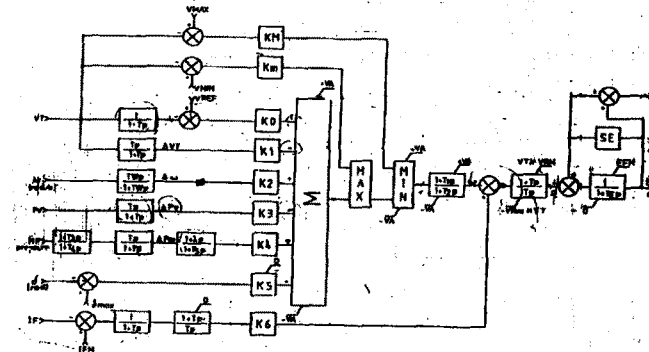


그림 2 제작처 제공 여자시스템 모델 블록도

그림 2의 제한루프를 제외한 다른 루프들은 이득 K_0, K_1, K_2, K_3, K_4 에 의해서 PSS 신호로 선택적으로 사용된다. 이득 K_0 는 발전기 단자전압을 제어하는 주제어루프의 이득이며 반드시 영 이상의 값을 갖도록 설정되어진다. 나머지 K_1, K_2, K_3, K_4 는 전력동요 평평을 주는 PSS의 입력신호의 이득이라고 생각할 수 있다. 현재, 발전기 속도(Speed)의 이득을 나타내는 K_2 는 자료조사결과 거의 영인 값으로 저항이 연결되어 있으며, 발전기 출력(P)와 HP 입력의 이득 K_3 와 K_4 는 같은 값으로 영이 아닌 값으로 설정되어 있다. 따라서, 현재 운전중인 울진 원자력 1/2호기의 PSS는 가속력을 사용하는 PSS라고 생각할 수 있다. 그러나, 원자력인 경우 기계적 토크가 거의 일정함으로 기계적 토크를 나타내는 HP 입력은 거의 일정하여 주 PSS 입력신호는 발전기 출력(P)이며, 발전기 출력을 입력으로 하는 PSS로 다음 절에서 울진 원자력 1/2호기의 PSS를 모델링 할 수 있다. 그리고 울진 원자력 1호기의 PSS가 가속력을 입력으로 하는 PSS로 선택되어 있기 때문에 발전기 단자전압을 입력으로 하는 PSS는 K_1 이 영인 값으로

설정되어 동작하지 않을 것으로 판단된다.

그림 2의 합성된 가속력을 입력(P_e , HP 압력)하는 PSS의 동작과정을 보면, 먼저 발전기 출력(P_e)과 HP의 압력신호가 Washout회로를 거쳐 저주파수 신호를 제거한 후 이득 K_3 , K_4 을 통해서 Summing point에서 가속력으로 합성된다. 합성된 가속력은 Lead-lag회로를 거치면서 발전기와 여자시스템에서 발생하는 위상지연을 보상되고 여자기와 발전기를 통해서 댐핑 토오크를 제공한다. 이러한 과정은 일반적인 PSS 기능과 같다. 다만, 일반적인 PSS와 달리 Lead-lag(T_{A3}) T_{A2} , $T_{A4}=0.0$) 회로가 주 전압제어루프에 삽입되어 있는 것이 틀리다. 이와 같이 Lead-lag회로가 주 전압제어루프에 직렬로 연결될 경우, 과도상태시의 AVR의 과도이득(Transient Gain)이 크게 되며, 실제 약 2.0Hz 대의 여자기 모드가 측정된 시험결과에 관찰되었다.

그림 3은 울진 원자력 1호기에 적당한 "EXPIC1" 여자시스템 모델이다. 이 모델은 그림 2의 PSS 블록과 제한루프(과전압, 저전압, 여자전류 등)를 제외한 발전기 단자전압 주제어 루프만 모델링 된다. PSS 블록은 다음절에서 PSS/E의 "IEEST" 모델로 모델링할 것이다.

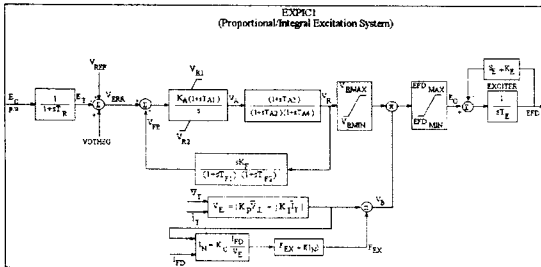


그림 3 울진 원자력 1호기 여자시스템에 적당한 모델 "EXPIC1"

2.1.2 부하시(100MW) 5% AVR 스텝시험

PSS를 모델링 하기 전에 먼저, 표1과 같은 기 결정된 발전기와 여자기 시스템의 모델정수를 검증하기 위해서, PSS가 운전 중지인 상태에서 발전기가 100MW 출력시 측정된 5% AVR 스텝 시험을 모의하였다. 구성된 울진 원자력 발전소의 인계계통과 한전 무한모선 계통은 그림 4와 같다. 계통 데이터는 울진 원자력 3/4호기인 경우 기준에 유도된 발전기 정수를 사용했으며⁽⁹⁾, 송전선로는 한전에서 사용중인 계통 데이터를 사용하였다. AVR 시험시 발전기 운전조건은 1호기를 제외한 나머지 발전기들이 정격운전을 하고 있었다

표 1 울진 원자력 1호기 모델정수

발전기 모델	원동형 (1100.0 MVA)			
	T_{do}'	5.60	X_{d1}	1.642
	T_{do}''	0.097	X_{d1}'	0.451
	T_{qo}'	0.840	X_{q1}'	0.470
	T_{qo}''	0.070	X_{q1}''	0.321
	H	5.50	X_1	0.232
	D	0.0	S(1.0)	0.064
	X_d	1.786	S(1.2)	0.2946
여자 시스템 모델	EXPIC1			
	T_R	0.05	T_{F2}	0.000
	K_A	4.00	E_{FDMAX}	7.00
	T_{A1}	5.00	E_{FDMIN}	0.00
	V_{R1}	9999.0	K_E	1.00
	V_{R2}	-9999.0	T_E	0.458
	T_{A2}	0.046	E_1	3.000
	T_{A3}	0.458	$S_E(E_1)$	0.010
	T_{A4}	0.0	E_2	4.500
	V_{RMAX}	7.00	$S_E(E_2)$	0.800
	V_{RMIN}	7.00	K_P	0.000
	K_F	0.00	K_I	0.000
	T_{F1}	0.100	K_C	0.000

그림 5은 발전기 출력시(100 MW) 5% AVR 스텝시험을 모의한 것이다. 이때 PSS 출력은 100 MW 같은 저부하 시에는 신호가 차단되어 PSS가 동작하지 못한다. 그림 5은 이때의 발전기 출력을 잘 모의하고 있다. 모의된 발전기 출력은 측정된 발전기 출력과 댐핑 정도나 동요 크기 등이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 실제 측정된 발전기 출력은 광역모드(0.65Hz), 지역모드(0.8Hz~1.3Hz), 그리고 미확인 저주파 모드(0.1Hz 대) 등의 여러 모드가 중첩되어 나타나며, 모의된 발전기 출력은 간단한 계통으로 모의했기 때문에 지역모드만 모의된다. 이러한 이유로 모의된 발전기 출력은 측정된 파형과 다소의 차이를 보여줄 수 있다. 다음 절의 PSS가 있는 경우와 없는 경우의 AVR 스텝시험 시 측정된 발전기 출력동요를 FFT분석을 통해서 이러한 사실을 더 자세히 고찰한다.

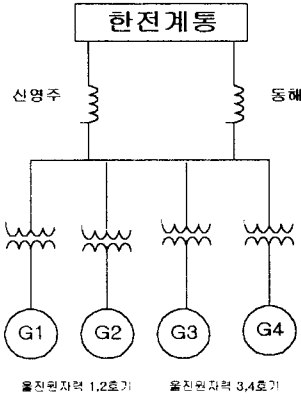


그림 4 울진 원자력 발전소 인계 송전선로 및 한전 무한 모선 계통도

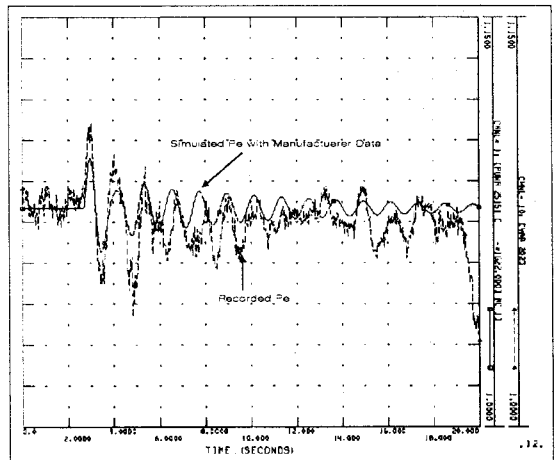


그림 5 운전출력 100 MW에서 5% AVR 스텝시험 시 측정된 출력(P_e) 결과와 시뮬레이션 된 출력(P_e) 비교

2.2 PSS 모델정수 결정

울진 원자력 1호기 여자시스템의 정상적인 PSS 기능동작 여부를 판별하기 위해서 정격부하의 50%인 450MW에서 PSS 신호가 있는 경우와 없는 경우에 2% AVR 스텝시험을 하였다. 측정된 결과는 PSS 신호가 있는 경우가 신호가 없는 경우보다 전력동요 댐핑이 크게 나타났다. 본 절에서는 먼저 PSS 신호가 있는 경우와 없는 경우에 대하여, 측정된 파형을 가지고 FFT분석을 통하여 PSS에 의해서 어떤 모드들이 현저하게 감쇄되었는지 고찰하였고, 다음으로 측정된 파형을 일치하게 하는 PSS 모델 정수를 유도하였다.

2.2.1 측정된 발전기 출력 파형 FFT 분석

그림 6은 울진 원자력 1호기가 출력 450 MW에서 PSS신

호가 있는 경우와 없는 경우에 실시된 2% AVR 스텝시험 시 측정된 전력동요 보여주고 있다. AVR 스텝신호는 두 경우에 대해서 똑같이 약 2.0% 스텝신호를 AVR의 Summing Point에 인가하였다.

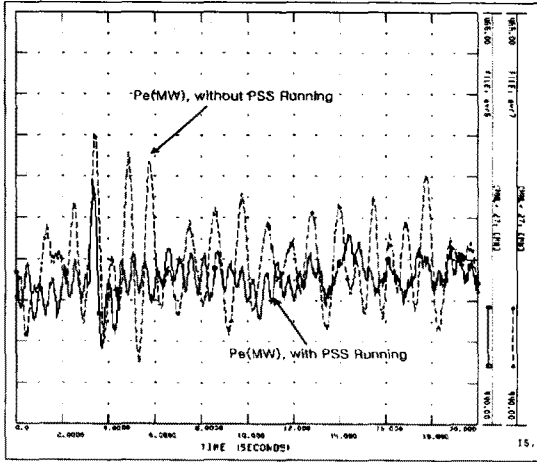


그림 6 부하시(450 MW) PSS가 있는 경우와 없는 경우의 2% AVR 스텝시험 (발전기 출력(P_e) 비교)

PSS 신호가 있는 경우가, PSS 신호가 없는 경우보다 전력동요 댐핑이 현저함을 그림 6을 통해서 알 수 있다. 그림 6의 측정된 발전기 출력 파형을 FFT(Fast Fourier Transformation, 이하 FFT) 분석을 하면 그림 7과 8과 같다. 그림 7은 그림 6의 PSS 신호가 없는 경우의 발전기 출력을 FFT 분석한 것이다. PSS 출력신호가 없는 경우의 발전기 출력은 그림 7과 같이 다중의 모드를 포함하고 있다: 0.65 Hz의 광역모드(Inter-area Mode)와 울진 발전소 전체에서 나타나는 0.8Hz~1.3Hz의 지역모드(Local Mode), 그리고 크기가 작은 2.0Hz대의 여자기 모드(Exciter Mode)가 있다. 지배적인 모드는 그 크기가 가장 큰 지역모드이다. 지역모드는 0.75Hz, 0.85Hz, 1.0Hz, 1.2Hz, 1.33Hz 등의 5개의 모드이나, 0.75Hz와 0.85Hz를 한 개의 모드로 보면 4개의 울진 원자력 발전소에서 나타나는 지역모드가 된다. 0.65Hz의 광역모드는 서해안 발전기군과 동요하는 모드이다. 2.0Hz대의 여자기 모드는 다른 모드들과는 상대적인 크기가 큰 관계로 무시할 수 있을 정도로 작게 나타나고 있다.

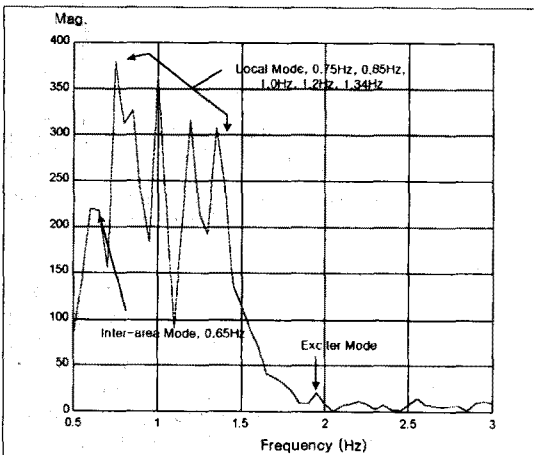


그림 7 그림 6의 PSS가 없는 경우의 발전기 출력(P_e) FFT 분석

그림 8은 PSS 신호가 있는 경우의 전력동요를 FFT 분석

한 것이며, 나타난 모드는 0.65Hz의 광역모드, 한 개의 0.8Hz의 지역모드, 그리고 여자기 모드 등이 있다. PSS 신호가 없는 경우와 비교하면 지역모드의 댐핑이 탁월함을 알 수 있다. 광역모드는 사라지지는 않았지만, PSS 신호가 없는 경우보다 그 크기가 다소 줄었음을 알 수 있다. 이러한 이유는 광역모드인 경우 발전기 군들끼리 동요하는 모드이므로 이 모드를 사라지게 하기 위해서는 관련된 모든 발전기에 PSS를 설치해야만 그 효과가 있다. 여자기 모드인 경우 PSS가 없는 경우보다 그 크기가 다소 크게 나타났지만, 그림에서 보여주는 크기는 상대적인 크기이므로 여자기 모드가 보다 나쁘다고 말할 수 없다. 실제, PSS 신호가 있는 경우가 없는 경우보다 측정된 파형은 여자기 모드의 댐핑이 더 있는 걸로 나타난다.

울진 원자력 1호기의 PSS 시험 결과를 요약하면, 현재 운전중인 울진 원자력 1호기의 PSS 기능은 PSS 신호가 없는 경우보다, 측정된 결과로부터 지역모드 전력동요 댐핑에 탁월하다고 말할 수 있다.

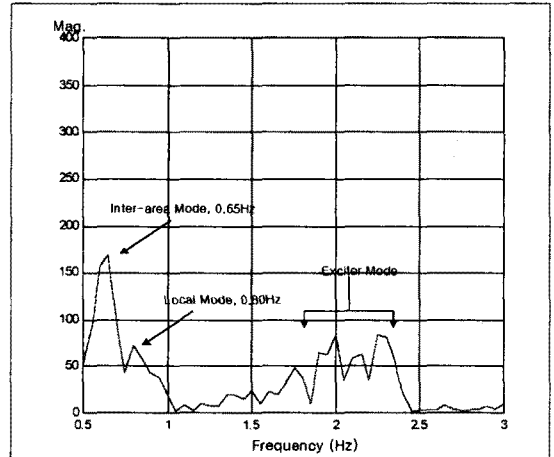


그림 8 그림 6의 PSS가 있는 경우의 발전기 출력(P_e) FFT 분석

2.2.2 울진 원자력 1호기 PSS 모델 정수 결정

울진 원자력 1호기 PSS 모델은 그림 9와 같은 "IEEEST" 모델로 결정할 수 있다. 실제 울진 원자력 1호기의 PSS는 합성된 가속력(발전기 출력, 기계적 토오크 혹은 HP 압력)을 입력으로 하는 PSS이지만, 조속기 기능이 거의 없고 일정 출력에서 운전하기 때문에, 발전기 출력을 입력으로 하는 PSS로 모델링이 가능하다. 앞 절의 제작처 제공의 모델 블록도에 따라 튜닝된 정수는 이득 K_s 와 Washout 시정수 T_5 와 T_6 그리고 상·하한 정수 L_{smax} , L_{smin} 이다. Washout 시정수는 제작처 값인 5.0 Sec로 결정하였으며, 상·하한 값은 ± 0.1 pu로 가정하였다. 측정된 파형과 가장 잘 일치하게 하는 중요한 정수는 이득 K_s 의 결정이다. 튜닝되어 결정된 값은 -1.0 pu이다.(발전기 출력신호를 입력으로 하는 PSS인 경우 이득은 부의 값을 가져야 하며, 그 값은 발전기 속도(Speed)를 입력으로 하는 PSS의 이득 값보다 2H(H=5.50)배 만큼 작다) 결정된 "IEEEST" PSS 모델 정수는 아래와 같다.

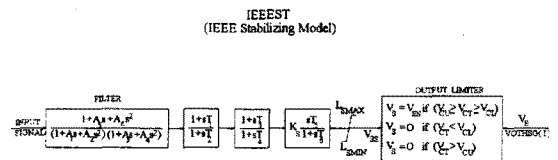


그림 9 울진 원자력 1호기 PSS 모델 "IEEEST"

표 2 결정된 울진 원자력 1호기 PSS 모델 "IEEEST" 정수

정수	정수 값	정수	정수 값
입력	P_e	T_3	1.00
A_1	0.0	T_4	1.00
A_2	0.0	T_5	5.00
A_3	0.0	T_6	5.00
A_4	0.0	K_S	-1.0
A_5	0.0	L_{SMAX}	0.10
A_6	0.0	L_{SMIN}	-0.10
T_1	1.0	V_{cu}	0.0
T_2	1.0	V_{cl}	0.0

그림 10은 PSS가 있는 경우 앞 절에서 사용된 측정된 출력동요 결과와 모의된 결과를 보여준다. 모의된 결과는 AVR에서 2% 스텝이라는 왜란이 발생 후, 출력동요가 바로 댄핑됨을 알 수 있다. 측정된 발전기 출력과 모의된 결과의 다소의 차이는 두 가지로 생각할 수 있다: 첫째, 축소된 계통에서 모의할 수 없는 0.65Hz의 광역모드가 가장 중요한 원인이다. 사용된 울진 원자력 인근계통과 한전 무한모선에서는 지역모드만 모의될 뿐, 광역모드에 대해서는 모의가 불가능하다. 둘째로, 실제 계통에서는 정상상태에서라도 항상 작은 왜란이 발생되고 있기 때문에, 지속적으로 동요크기가 아주 작더라도 존재한다. 이러한 작은 왜란은 노이즈 수준의 왜란을 발생하고 안정도 모의해서 재현할 수 없는 여자기 모드를 발생한다.

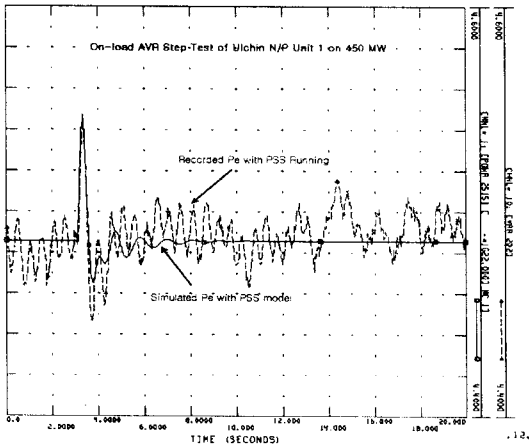


그림 10 운전출력 450 MW에서 PSS 운전 중, 2% AVR 스텝시험 시 측정된 출력(P_e)와 시뮬레이션된 출력(P_e) 비교

3. 결론

울진 원자력 1/2호기의 PSS 기능동작 여부를 판별하기 위한 AVR 스텝시험을 통하여 측정된 데이터로부터 울진 원자력 1호기의 PSS는 지역모드에 대해서 탁월하게 전력동요를 댄핑하고 있음을 FFT 분석결과를 통하여 확인하였다. 지역모드에 비해서 댄핑 정도가 작지만 0.65Hz 대의 광역모드와 2.0Hz 대의 여자기 모드에 대해서도 PSS 신호가 있을 경우가 PSS 신호가 없을 경우보다 동요정도가 더 적었다. 기 결정된 발전기/여자시스템 모델을 이용하여, 450 MW에서 PSS 기능동작 시험 시 측정된 2% AVR 스텝시험 결과를 잘 모의하는 PSS 모델 "IEEEST" 모델정수를 결정하였다. 결정된 PSS 모델 "IEEEST" 모델정수는 PSS 신호가 있을 시 측정된 발전기 출력(P_e)을 잘 재현하였다.

향후, 국내의 전력동요 문제 중에서 가장 중요한 문제로 대두될 것으로 보이는 광역모드에 대한 PSS 위치선정, 이에 따른 발전소에 PSS 설치 및 최적의 PSS 정수 튜닝 등의 연구가 더 필요할 것으로 판단된다.

(참고 문헌)

- [1] E.V.Larsen and D.A.Swann, "Applying Power System Stabilizers : Parts I, II, and III", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, 1981
- [2] "발전기 제어계통 안정화장치(PSS) 개발연구", 중간보고서, 한전전력연구원, 한국전기연구소, 1999.1
- [3] 남해곤 외, "대규모 전력계통의 미소신호 안정도 해석을 위한 Hessenberg법", 대한전기학회 논문지, 2000, 4월, 제 49권 제4호
- [4] 김동준, 문영환, 윤용범, 김용학, "DFT 알고리즘을 이용한 한전 대형발전기에서 측정된 시간영역 데이터 측진동 분석", 대한전기학회 2000년 5월 25일, 춘계학술대회
- [5] IEEE Std 421.5-1992, "IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies"
- [6] 한국전력공사, "전력계통 안정도 해석용 발전기 제어계 모델 결정에 관한 연구" 최종보고서, pp434~439, 1996. 10
- [7] 김동준, 문영환, 김태관, 신정훈, "PSS 튜닝을 위한 기본 연구, Part I : 계통 운전조건에 대한 토오크 특성분석", 대한전기학회 논문지 제 48권 제 9호, 1999.9
- [8] 김태관, 신정훈, 김동준, 문영환, 백영식, "PSS 튜닝을 위한 기본 연구, Part II : PSS 실계통 최적 정수 선정을 위한 튜닝기법", 대한전기학회 논문지 제 49권 제7호, 2000. 7
- [9] 전력연구원, 한국전기연구소, "울진 원자력 3호기 특성시험에 의한 발전기/제어계 정수 유도", 2000.6