AVR 스텝시험에 의한 울진 N/P 1호기 PSS 모델링 연구

論 文
50A - 8 - 1

A Study of PSS Modeling of *Ulchin* N/P #1 by AVR Step Test

金 東 俊* · 文 英 煥** · 田 東 勳*** · 金 泰 均§
(Dong-Joon Kim · Young-Hwan Moon · Dong-Hoon Jeon · Tae-Kyun Kim)

Abstract - This paper deals with the PSS modeling of *Ulchin* N/P #1 as well as the generator and excitation system modeling by utilizing the recorded data from AVR step test, which has been performed by entering small voltage signal into the AVR summing point. In addition to it, two recorded results obtained from the AVR step test with PSS running and without PSS running have not only been compared each other on the time domain, but also they have been analyzed with FFT analysis on the frequency domain; thus, the desirable effects of running PSS in *Ulchin* N/P #1 on power system have been explicitly confirmed. Finally, the derived PSS model parameters lead to good matches between simulation results and recorded data.

Key Words : PSS model parameters, *Ulchin* N/P #1, AVR step test, time domain, frequency domain, FFT analysis

1. 서 론

최근 몇 년 사이 국내 전력계통의 안정도 분석에 의한 결과는 울진 N/P의 안정도가 상대적으로 가장 취약한 것으로 해석되어 오고 있고[2][3], 개별적인 동요측정결과[4]도 안정도 해석의 결과를 뒤받침 해주고 있다. 특히, 울진 N/P에서 다른 발전소보다 취약한 모드는 광역모드(Inter-area Mode) 뿐만 아니라 지역모드(Local Mode, or Plant Mode)까지 댐핑이 나쁜 것으로 해석된다. 대형 고유치 해석 프로그램에서 계산된 결과[2]는 광역모드인 경우 0.65Hz 대에서 울진 N/P 발전기와 서해안의 대형 발전기가 서로 스윙하며, 지역모드인 경우 0.80Hz대의 모드가 댐핑율이 가장 낮은 걸로 나타나고 있다. 한전계통의 안정적인 계통운영 측면에서 보면, 울진 N/P에 PSS(Power System Stabilizer, 이하 PSS)를 설치하여 운전하는 것은 다른 어떤 조치보다 비용이 적으면서 가장 효과적으로 안정도 여유를 높일 수 있는 방법이 된다.

이러한 이유로 해서, 울진 N/P의 3/4호기에 대한 EX-2000(GE사) 여자시스템의 PSS 튜닝작업이 GE 기술자에 의해 2000년 7월에 완료되었다. 동시에 여자시스템 사양이 다른 1/2호기에 대해서는 그때까지 설치되어 있는 여자시스템에 대한 내부 PSS의 기능유무가 불명확하기 때문에, 1호기에 대해서만 국내 기술진에 의해서 실계통과 연계하여 부하운전 중에 자동전압조정기(Automatic Voltage Regulator, 이하 AVR)의 Summing 점에 약 1.0Vdc 정도의 미소전압신호를 인위적으로 스텝 인가하는 스텝시험에 의한 PSS 기능유무 시험이 별도로 수행되었다. 이 PSS 기능유무를 위한 AVR 스텝 시험을 통하여 측정된 데이터는 울진 N/P 1호기의 여자시스템이 양호하게 PSS 기능을 하는 것을 보여주었고, 울진 N/P 1호기에 대한 PSS 모델 파라미터를 결정하는데 사용되었다.

본 논문은 울진 N/P 1호기에 대한 PSS 기능유무 시험에서 측정된 데이터와 제작처 제공의 데이터를 이용하여 PSS의 성능을 분석했을 뿐만 아니라, 울진 N/P 1호기의 발전기, 여자시스템 그리고 PSS 모델과 모델정수를 연구하였다. 모델링된 울진 N/P 1호기의 PSS 모델 정수는 PSS 기능유무 시험 시 측정된 데이터를 잘 재현하여 그 모델 정수뿐만 아니라 발전기와 여자시스템 모델정수의 유효성을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 여자시스템 모델정수 결정

울진 N/P 1/2호기의 여자시스템의 구성도는 그림 1과 같다. 그림 1과 같이 여자시스템은 Brushless 여자시스템이며, 부여자기로는 일반적으로 사용하는 *PMG* 대신에 PPT(여자용 변압기)를 이용한 여자시스템을 사용하고 있다. 제작처에서 PPT를 사용한 이유는 *PMG*의 계자권선에서 발생하는 시간지연을 제거함으로써 여자시스템의 응동을 빠르게 하기 위함이다. 울진 N/P 1/2호기의 일반적인 설비사양은 아래와 같다.

* 正 會 員 : 韓國電氣硏究院 先任硏究員
** 正 會 員 : 韓國電氣硏究院 責任硏究員 · 工博
*** 正 會 員 : 韓電電力硏究院 先任硏究員
§ 正 會 員 : 韓電電力硏究院 先任硏究員 · 工博
接受日字 : 2001年 1月 30日
最終完了 : 2001年 8月 20日

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

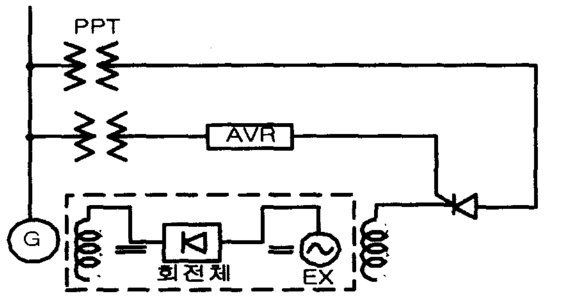


그림 1 울진 N/P 1/2호기 여자시스템 단선도

Fig. 1 Ulchin N/P #1/2 Excitation System

2.1.1 여자시스템 분석 및 모델링

여자시스템에 대한 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 방식이고, AVR의 전압 제어루프 PI 제어블록 앞단에 Lead-lag 전달함수가 삽입되어 있다. 이 전달함수는 발전기와 여자시스템에서 발생하는 위상지연을 보상하는 전달함수로써 PSS의 위상보상회로의 기능과 동일할 것으로 판단된다. 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 제한 루프가 있다

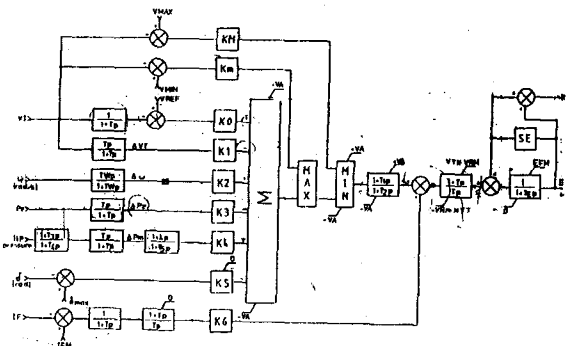


그림 2 제작처 제공 여자시스템 모델 블록도

Fig. 2 Model Diagram of Excitation System form Maker

그림 2의 제한 루프를 제외한 다른 루프들은 이득 K_0, K_1, K_2, K_3, K_4에 의해서 PSS 신호로 선택적으로 사용된다. 이득 K_0는 발전기 단자전압을 제어하는 주제어루프의 이득이며 반드시 영 이상의 값을 갖도록 설정되어진다. 나머지 K_1, K_2, K_3, K_4는 전력동요 댐핑을 주는 PSS의 입력신호의 이득이다. 현재, 발전기 속도(Speed)의 이득을 나타내는 K_2는 자료조사결과 거의 영인 값으로 저항이 연결되어 있으며, 발전기 출력(P_e)과 *HP* 터어빈 압력의 이득 K_3와 K_4는 같은 값으로 영이 아닌 값으로 설정되어 있다. 따라서, 현재 운전중인 울진 N/P 1/2호기의 PSS는 가속력을 사용하는 PSS라고 생각할 수 있다. 그러나, 원자력인 경우 기계적 토오크가 거의 일정함으로 기계적 토오크를 나타내는 *HP* 터어빈 압력은 거의 일정하여, 주 PSS 입력신호는 발전기 출력(P_e)이며, 발전기 출력을 입력으로 하는 PSS로 울진 N/P 1/2호기의 PSS를 모델링 가능하다. 그리고 울진 N/P 1호기의 PSS가 가속력을 입력으로 하는 PSS로 선택되어 있기 때문에 발전기 단자전압을 입력으로 하는 PSS는 K_1이 영인 값으로 설정되어 동작하지 않을 것으로 판단된다. K_5는 발전기 상차각을 제한하는 제어블록으로써 발전기 정상상태에서는 동작하지 않으며, 사고 시 과도 상태에서 발전기 출력이 과도하게 증가하지 않도록 단자전압을 제어한다. K_6를 갖는 제어블록은 여자기 과전류 제한 블록으로써 OXL(Overexcitation Limit)과 같은 동작을 하며 응동속도는 다른 제어 블록에 비해 매우 느리다. K_5와 K_6를 제어블록은 특수한 운전조건에서만 동작하기 때문에 측정된 데이터로 이 두 값을 검증하기는 어려우므로 본 논문에서는 이 모델링을 생략한다.

그림 2의 합성된 가속력을 입력(P_e, *HP* 압력)으로 하는 PSS의 동작과정을 보면, 먼저 발전기 출력(P_e)과 *HP* 압력신호가 Washout회로를 거쳐 DC 성분의 저주파수 신호를 제거한 후 이득K_3, K_4을 통해서 AVR의 Summing 점에서 가속력으로 합성된다. 합성된 가속력은 Lead-lag회로를 거치면서 발전기와 여자시스템에서 발생하는 위상지연을 보상하게 되고 여자기와 발전기를 통해서 댐핑 토오크를 제공한다. 이러한 과정은 일반적인 PSS 기능과 같다. 다만, 일반적인 PSS와 달리 진상 Lead-lag ($T_1>T_2$) 회로가 주 전압제어루프에 삽입되어 있는 것이 차이가 있다. 이와 같이 진상 회로가 주 전압제어루프에 직렬로 연결될 경우, 과도상태시의 AVR의 과도이득(Transient Gain)이 크게 될 수 있고, PSS가 없는 경우는 크게 안정도가 감소할 수 있다.

그림 3은 울진 N/P 1호기에 적당한 여자시스템 모델이다. 이 모델은 그림 2의 PSS 블락과 제한 루프(과전압, 저전압, 여자전류 등)를 제외한 발전기 단자전압 주제어 루프만 모델링 된다. PSS 블록은 아래 절에서 "IEEEST"모델로 모델링할 것이다. 표 1은 기 결정된 발전기/여자시스템 모델 정수를 보여준다. 이 결정된 모델정수는 제작처 제공의 데이터를 대부분 채택하여 결정했으며, 무부하 발전기 개방회로 AVR 스텝시험에서 측정된 데이터와 모의된 결과를 비교하여 검증하였다. 뒤 절에서는 부하운전 중에 AVR 스텝시험을 측정된 값과 계산된 값을 비교하여 정수를 검증하고 있으므로 무부하 시의 시뮬레이션 비교는 생략한다.

최근 국내의 경우 발전기 모델 정수는 특성시험에 의해서 정수가 결정되지만, 원자력 발전기인 경우 안전성을 고려된 운전특수성 때문에 특성시험이 매우 제한적이다. 또한, 울진 N/P의 1호기의 여자시스템은 Blushless 여자시스템이므로 발전기 계자전류와 계자전압을 직접 측정할 수 없어 모델정수를 결정하는데 어려움이 있다. 사용된 발전기 모델 정수는 제작처 제공의 값을 사용했으며, 단지 발전기 포화계수 값은 측정에 의해서 결정했다. 여자시스템 모델정수도 또한 제작처 제공의 값을 대부분 사용하였다. 특히 여자시스템 모델정수 중에서 중요한 정수는 *PI* 정수(K_A, T_{a1})와 Lead 회로 정수(T_{a2}, T_{a3})로 전압제어 특성에 있어서 매우 중요하게 작용

한다. 상수 K_F에 관련된 제어블록은 1호기 여자시스템에서는 없으므로, 0으로 설정하여 동작하지 못하게 했다. 그리고, 여자용 변압기를 나타내는 블록 K_P, K_I, 그리고 K_C 정수들은 제작처 모델에서는 고려하지 않았고, 그 동작특성 효과가 미약하므로 영으로 설정하여 시뮬레이션에 사용된 *PSS/E* 프로그램 내에서 그림 3의 V_B값이 항상 디폴트값인 1.0으로 되게 하였다.

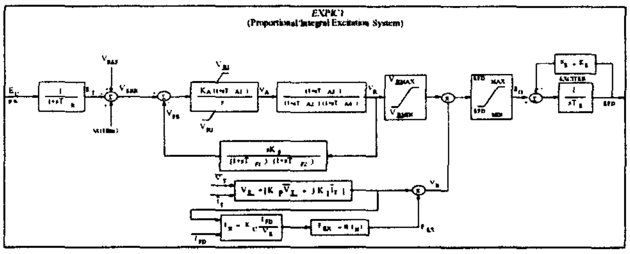


그림 3 울진 N/P 1호기 여자시스템 모델

Fig. 3 Ulchin N/P #1 Excitation System Model

표 1 울진 N/P 1호기 발전기/여자시스템 모델정수

Table 1 Ulchin N/P #1 Model Parameters of Generator/Excitation System

발전기 모델 정수	원통형 (1100.0 MVA)			
	T_{do}'	5.60 s	X_q	1.642
	T_{do}''	0.097 s	X_d'	0.451
	T_{qo}'	0.840 s	X_q'	0.470
	T_{qo}''	0.070 s	X_d''	0.321
	H	5.50	X_l	0.232
	D	0.0	S(1.0)	0.064
	X_d	1.786	S(1.2)	0.2946
여자 시스템 모델 정수	여자시스템 (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	0.00

2.1.2 울진 N/P 1호기 부하시(100MW) 5% AVR 스텝시험

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

그림 5는 발전기 저출력 시(100 MW) 5% AVR 스텝시험을 모의한 것이다. 5% 스텝 입력량은 발전기 전압제어특성을 분석하는데 일반적으로 사용하는 값이다. 그러나, 원자력 발전기가 중부하 운전 중에는 안전한 운전을 중요하게 여기기 때문에 스텝입력 량을 다소 줄일 필요가 있다. 뒤에서 언급할 PSS 기능유무를 확인하는 450MW 스텝시험에서는 계통에 큰 외란을 주지 않도록 스텝입력 량을 2%로 제한하였다. 여기서, 100 MW 같은 저부하 시에는 PSS 출력은 자동적으로 신호가 차단되어 PSS가 동작하지 못한다.

그림 5는 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 저주파대 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 약간의 차이를 보여준다.

그림 6은 5% AVR 스텝시험시의 단자전압(V_t)과 발전기 계자전압(E_{fd})을 모의한 것이다. 여자시스템이 Brushless 형식이라 발전기 계자전압의 측정이 불가능하므로 여자기 계자전류(i_{fd})를 사용하여 모의된 발전기 계자전압과 비교하였다. 이것은 여자기 계자전류 웅동이 발전기 계자전압의 웅동과 거의 일치하기 때문이다. 그러나 측정된 여자기 계자전류와 발전기 계자전압 웅동특성이 같더라도 pu값의 크기는 다르다. 그림 6은 마찬가지로 모의된 결과와 측정된 결과는 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

그림 5, 6에서의 단위는 pu값을 사용했으며, 발전기 출력 기준값은 계통 Base인 100MVA를 기준으로 pu값으로 환산하였다. 아래 절에서는 PSS가 있는 경우와 없는 경우의 AVR 스텝시험 시 측정된 발전기 출력동요를 FFT분석을 통해서 이러한 사실을 더 자세히 고찰한다.

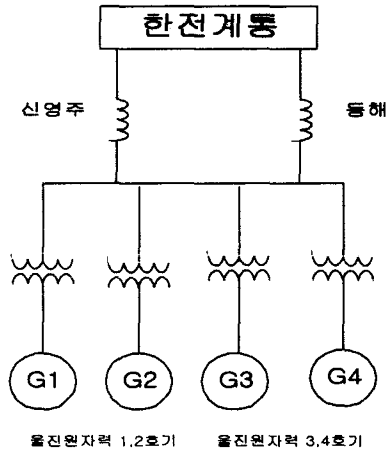


그림 4 울진 원자력 발전소 인근 송전선로 및 한전 무한모선 계통도

Fig. 4 Ulchin N/P and Infinite Bus System

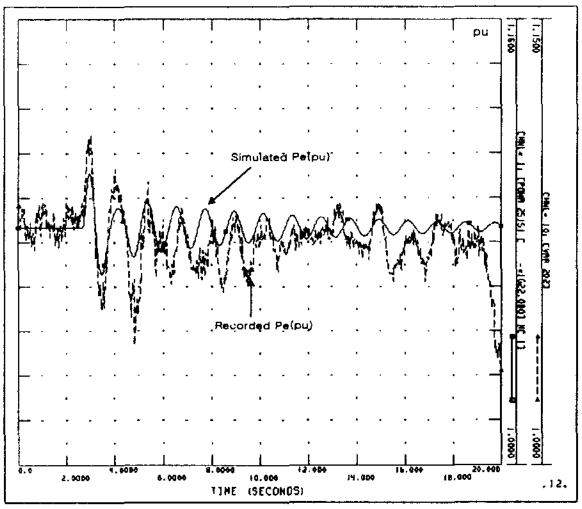


그림 5 울진 N/P 1호기 운전출력 100 MW에서 5% AVR 스텝시험 시 측정된 출력(P_e) 결과와 모의된 출력 비교

Fig. 5 Comparison of Measured P_e pu and Simulated P_e pu on the AVR Step Test (100MVA base)

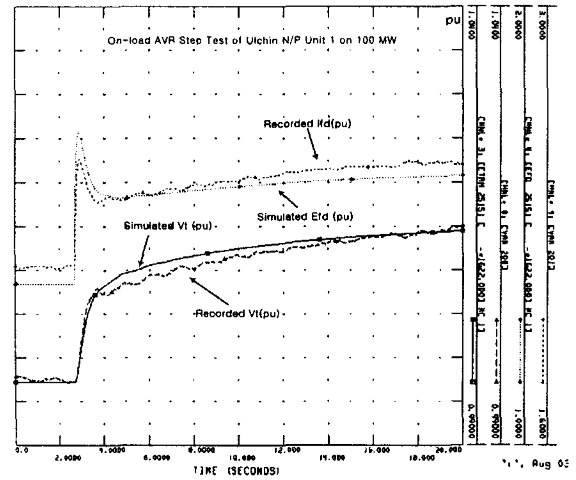


그림 6 울진 N/P #1 운전출력 100MW에서 AVR 스텝시험 시 측정된 결과와 모의된 결과비교(V_t, E_{fd})

Fig. 6 Comparison of Measured Data and Simulation Results on the AVR Step Test (V_t, E_{fd})

2.2 울진 N/P 1호기 PSS 모델정수 결정

울진 N/P 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 FFT분석[4]을 통하여 PSS에 의해서 어떤 모드들이 현저하게 감쇠되었는지 고찰하였고, 다음으로 측정된 파형을 일치하게 하는 PSS 모델 정수를 유도하였다.

2.2.1 측정된 발전기 출력 파형 FFT 분석

그림 7은 울진 N/P 1호기가 출력 450 MW에서 PSS신호가 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 점에 인가하였다.

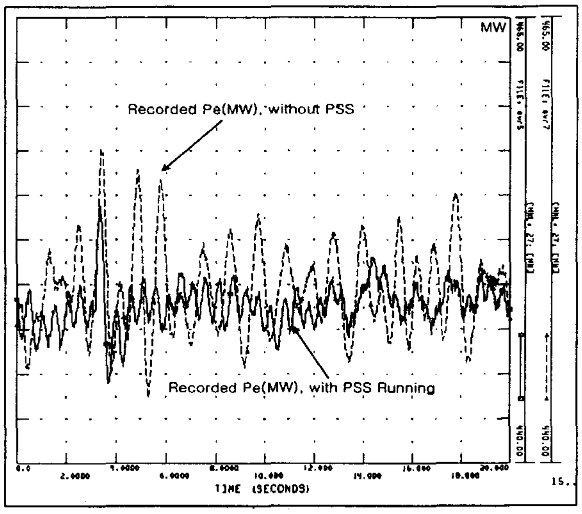


그림 7 울진 N/P 1호기의 PSS가 있는 경우와 없는 경우의 측정된 발전기 출력 비교 (2% AVR 스텝시험)

Fig. 7 Comparison of Measured P_e with PSS and Measured P_e without Pe on the 2% AVR Step Test

PSS 신호가 있는 경우가, PSS 신호가 없는 경우보다 전력동요 댐핑이 현저함을 그림 7을 통해서 알 수 있다. 그림 7의 측정된 발전기 출력 파형을 FFT(Fast Fourier Transformation, 이하 FFT) 분석을 하면 그림 8과 9와 같다. 그림 8은 그림 7의 PSS 신호가 없는 경우의 발전기 출력을 FFT 분석한 것이다. PSS 출력신호가 없는 경우의 발전기 출력은 그림 8과 같이 다중의 모드를 포함하고 있다; 0.65 Hz의 광역모드(Inter-area Mode)와 울진 N/P 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 4대의 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.

여기서 0.65Hz를 광역모드라고 보는 이유는 다음과 같다; 첫째, 간단히 생각하면, 시험 당시 울진 발전소내 운전 중인 발전기는 용량 1000MVA급인 1호기부터 4호기까지 모두 4대의 발전기였다. 따라서, 1호기에서 측정된 파형에 포함되어야 할 전기기계적 지역모드는 4개여야 한다. 그러나 한 개의 모드가 지역모드 주파수대에서 더 발생했다. 한 개의 모드를 더 갖기 위해서는 1000MVA정도의 용량을 갖는 발전기가 울진 원자력 발전소 인근에 발전하고 있어야 하나 그렇치 않다. 이러한 이유로 가장 낮은 모드를 광역모드로 여길 수 있다; 둘째로, 한전계통을 Off-line으로 고유치 분석한 문헌[2],[3]은 0.65Hz대의 광역모드를 확인해주고 있으며, 이 광역모드는

동해안의 울진 원자력발전소를 포함한 발전기 군과 보령 화력발전소를 포함한 서해안 발전기 군이 서로 위상이 반대로 움직이고 있음을 보여준다; 마지막으로, 문헌[10]은 보령화력 1호기 발전단에서 실제 측정된 파형에 0.65Hz의 동요가 있음을 보고하고 있어 광역모드임을 재확인해준다.

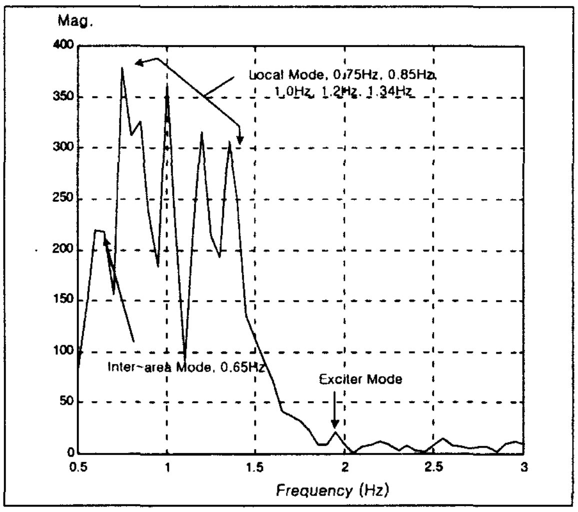


그림 8 그림 7의 PSS가 없는 경우의 출력(P_e) FFT 결과
Fig. 8 FFT Results of P_e without PSS of Fig. 7

그림 9는 PSS 신호가 있는 경우의 전력동요를 FFT 분석한 것이며, 나타난 모드는 0.65Hz의 광역모드, 한 개의 0.8Hz의 지역모드, 그리고 여자기 모드 등이 있다. PSS 신호가 없는 경우와 비교하면 지역모드의 댐핑이 매우 우수함을 알 수 있다. 광역모드는 사라지지는 않았지만, PSS 신호가 없는 경우보다 그 크기가 다소 줄었다. 이러한 이유는 광역모드인 경우 발전기 군들끼리 동요하는 모드이므로 이 모드를 사라지게 하기 위해서는 관련된 모든 발전기에 PSS를 설치해야만 그 효과가 있다.

여자기 모드인 경우는 PSS가 없는 경우보다 그 크기가 다소 크게 나타났다. 이것은 울진 N/P 1호기 PSS가 지역모드에 대해서만 댐핑이 주어지도록 설계되었기 때문이며. 또한 고전적인 PSS에서처럼 지역모드 댐핑율은 이득증가에 비례해서 증가하나 여자기 모드에 대해서는 댐핑율이 감소하는 것과 같다. 그러나 여자기 모드의 댐핑율이 약간 감소했으나, 계통운용에 지장을 줄 정도의 큰 크기는 아니며 수용할 정도로 여겨진다. 그리고 앞에서 언급한 바와 같이 이 여자시스템 독특한 것은 AVR에 진상의 Lead-lag회로가 있다는 것이다. 이것은 PSS의 위상보상 회로의 역할을 한다고 판단되며, 과도 웅동 시 AVR 과도이득이 다소 큰 값을 갖는다. 따라서, PSS 없이 이 여자시스템을 운전할 경우는 안정도가 매우 크게 감소할 수 있다.

울진 N/P 1호기의 PSS 시험 측정결과를 요약하면, 현재 운전중인 울진 N/P 1호기의 PSS 기능은 PSS 신호가 없는 경우보다, 측정된 결과로부터 지역모드 전력동요 댐핑에 매우 우수하다고 말할 수 있다. 울진 N/P가 한전의 과도 안정도와 소신호 안정도에 참여하는 비율은 무시할 수 없을 정도로 크므로 여자시스템이 PSS와 함께 동작하는 경우와 그렇치 않는 경우의 안정도 해석은 매우 현저한 다른 결과를 보여줄 가능성이 크다. 이것에 관한 분석은 본 논문의 범위에 넘기 때문에 생략한다.

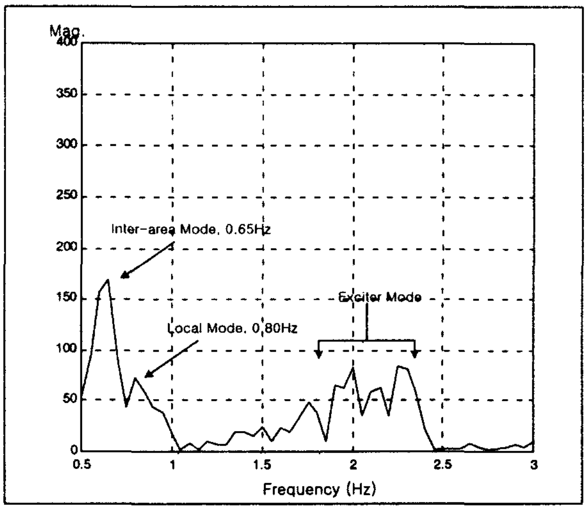


그림 9 그림 7의 PSS가 있는 경우의 출력(P_e) FFT 결과
Fig.9 FFT Result of P_e with PSS of Fig. 7

2.2.2 울진 P/P 1호기 PSS 모델 정수 결정

울진 N/P 1호기 PSS 모델은 그림 10와 같은 "IEEEST" 모델로 결정가능 하다. 실제 울진 N/P 1호기의 PSS는 합성된 가속력(발전기 출력, 기계적 토오크 혹은 *HP* 터어빈 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_s와 Washout 시정수 T_5와 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_s의 결정이다. 튜닝되어 결정된 값은 -1.0 pu이다. 발전기 출력신호를 입력으로 하는 PSS인 경우 이득은 반드시 부의 값을 가져야 하며, 그 값은 발전기 속도(Speed)를 입력으로 하는 PSS의 이득 값보다 2H(H=5.50)배 만큼 작은 관계가 있다. 결정된 "IEEEST" 모델 정수는 아래 표 2와 같다.

표 2 결정된 1호기 PSS 모델 "IEEEST" 정수
Table 2 The determined Parameters of " IEEEST" Model of Ulchin N/P #1

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	Vcu	0.0
T_2	1.0	Vcl	0.0

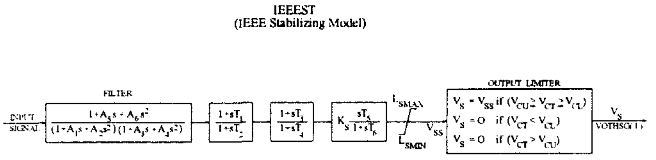


그림 10 울진 N/P 1호기 PSS 모델 "IEEEST"

Fig. 10 Ulchin N/P #1's PSS Model "IEEEST"

그림 11은 PSS가 있는 경우 그림 7의 측정된 출력동요 결과와 모의된 출력동요 결과를 보여주고, 그림 12는 이때의 발전기 단자전압을 측정된 결과와 모의된 결과를 보여준다. 그림 11의 발전기 출력결과의 계산 단위는 pu값이며, Base는 100MVA를 기준으로 하였다. 마찬가지로, 그림 12의 발전기 단자전압의 단위는 pu값이다. 모의된 출력동요 결과는 AVR에서 2% 스텝이라는 외란이 발생 후, 출력동요가 바로 댐핑됨을 보여준다. 그림 11의 측정된 발전기 출력과 모의된 출력의 비교에서 뒤쪽부분의 차이는 다음 두 가지로 여겨진다.

첫째, 축소된 계통에서 모의할 수 없는 0.65Hz의 광역모드가 가장 중요한 원인이다. 그림 11의 측정된 발전기 출력(Recorded P_e)를 FFT 분석한 것이 그림 9이다. 앞의 그림 9는 측정된 파형에 대부분 광역모드가 포함되어 있음을 보여주고 있으며, 또한 PSS에서 의해서 동요크기가 적어진 한 개의 지역모드와 높은 주파수의 여자기 모드를 보여준다. 2Hz대의 여자기 모드도 두 결과 차이점에 대한 하나의 원인으로 생각되나 그 영향은 적다. 사용된 울진 원자력 인근계통과 한전 무한모선에서는 지역모드만 모의될 뿐, 광역모드에 대해서는 모의가 불가능하다.

둘째로, 실제 계통에서는 정상상태에서라도 항상 적은 외란(발전량 또는 부하의 순시적 변동)이 발생되고 있기 때문에, 지속적으로 동요크기가 아주 작더라도 존재한다. 이러한 적은 외란은 소신호 안정도가 가장 낮은 울진 원자력 발전소에서는 그 광역모드의 진폭 크기가 다른 발전소보다 비해 크다. 이러한 적은 외란은 안정도 프로그램 상에서는 모의가 불가능하므로, 그림 11과 같이 뒤 부분에서는 잘 맞지 않고 스텝신호가 들어가는 앞부분만 잘 모의하고 있다.

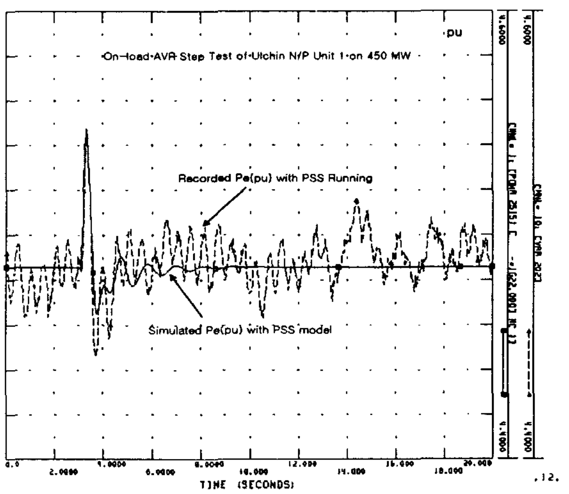


그림 11 450 MW에서 PSS 운전 중, 2% AVR 스텝시험 시 측정 된 울진 N/P #1 출력(P_e)와 모의된 출력 비교

Fig. 11 Comparison of Recorded P_e and Simulated P_e with PSS at the 2% AVR Step Test

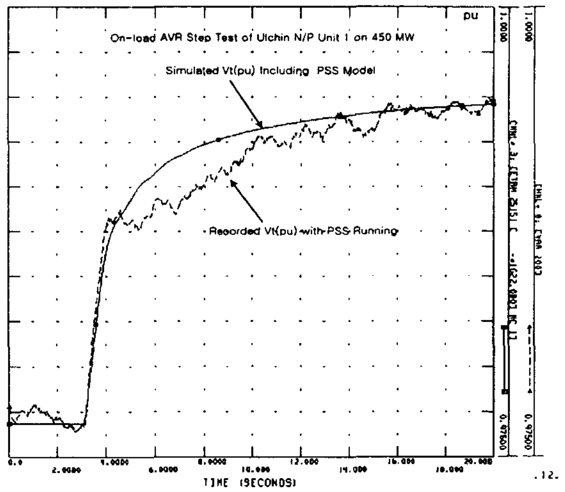


그림 12 450MW에서 PSS 운전 중, AVR 스텝시험 시 측정 된 울진 N/P #1의 단자전압(V_t)와 모의 된 단자전압 비교

Fig. 12 Comparison of Recorded Terminal Voltage and Simulated Voltage with PSS at the 2% AVR Step Test

그림 13와 그림 14은 그림 7의 PSS가 없는 경우의 2% AVR 스텝시험을 모의하여 측정된 결과와 비교한 것이다. PSS가 없는 경우는 그림 13와 같이 전력의 댐핑정도가 매우 약하여 감쇄되고 있으며 동요가 지속적으로 되고 있다. 그림 14은 이때의 단자전압을 비교하고 있다. 그림 13의 측정된 전력동요와 모의된 전력동요의 차이는 앞에서 PSS가 있는 경우에 설명한 두 가지 이유라고 여겨진다. 이와 같이, 전력동요의 댐핑 측면에서 비교된 모의된 결과는 PSS가 있는 경우의 모의된 결과가 PSS가 없는 경우의 모의된 결과보다, 측정된 결과와 같이 전력동요 댐핑에 우수한 결과를 보여준다.

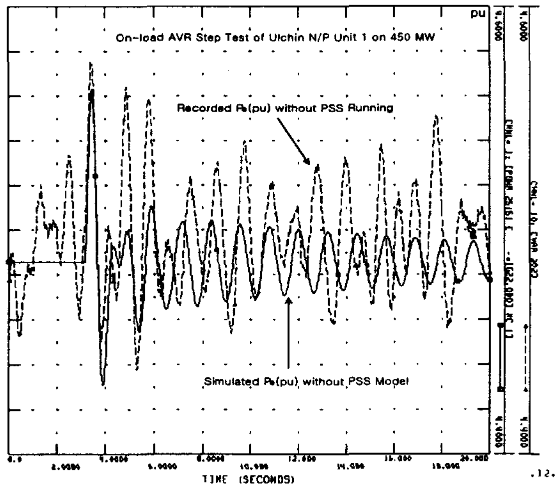


그림 13 450MW에서 PSS 없이 운전 중, AVR 스텝시험 시 측정 된 출력(P_e)와 모의된 출력 비교

Fig. 13 Comparison of Recorded P_e and Simulated P_e without PSS at the 2% AVR Step Test

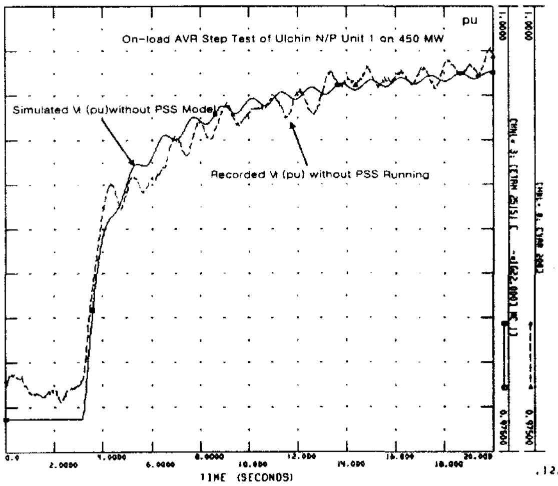


그림 14 450MW에서 PSS 없이 운전 중, AVR 스텝시험 시 측정 된 단자전압(V_t)와 모의된 단자전압 비교

Fig. 14 Comparison of Recorded Terminal Voltage and Simulated Voltage without PSS at the 2% AVR Step Test

3. 결 론

본 논문은 울진 N/P 1/2호기의 PSS 기능동작 여부를 판별하기 위한 1호기 AVR 스텝시험을 통하여 측정된 데이터로부터 울진 N/P 1호기의 PSS는 지역모드(Local Mode)에 대해서 탁월하게 전력동요를 댐핑하고 있음을 FFT 분석결과를 통하여 확인하였다. FFT 분석에 사용된 데이터는 정격출력의 약 50%인 450MW에서 2% AVR 스텝시험에 의해서 측정된 PSS가 있는 경우의 발전기 출력과 PSS가 없는 경우의 측정된 발전기 출력이다. 지역모드에 비해서 댐핑 정도가 작지만 0.65Hz 대의 광역모드(Inter-area Mode)에 대해서도 PSS 신호가 있을 경우가 PSS 신호가 없을 경우보다 동요정도가 훨씬 적었다.

또한, 제작처 제공의 정수를 기본으로하여 결정된 발전기와 여자시스템의 모델정수를 100MW에서 PSS없이 5% AVR 스텝시험에서 측정된 결과를 모의하여 모델 정수의 유효성을 확인하였다. 그리고 검증된 발전기와 여자시스템 모델을 이용하여, 450MW에서 PSS 기능동작 시험 시 측정된 2% AVR 스텝시험 결과를 잘 모의하는 PSS 모델 정수를 결정하였다. 이때 PSS 모델정수는 제작처 제공의 여자시스템 블록도를 고려된 값들이다. 이와 같이 결정된 PSS 모델정수는 PSS 신호가 있을 시 측정된 발전기 출력(P_e)을 잘 재현한다.

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

참 고 문 헌

[1] E.V.Larsen and D.A.Swann, " Applying Power System Stabilizers : Parts I, II, and III", IEEE Trasn. 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, 제49권 제4호

[4] 김동준, 문영환, 윤용범, 김용학, "DFT 알고리즘을 이용한 한전 대형발전기에서 측정된 시간영역 데이터 축진동 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

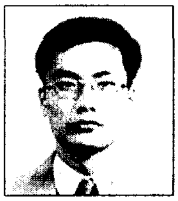
[7] 김동준, 문영환, 김태균, 신정훈, " PSS 튜닝을 위한 기본 연구, Part I : 계통 운전조건에 대한 토오크 특성분석", 대한전기학회 논문지 제 48권 제 9호, 1999.9

[8] 신정훈, 김태균, 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, "울진 원자력 3호기 특성시험에 의한 발전기/제어계 정수 유도", 2000.6

[10] 김동준, 문영환, 윤용범, 김용학, "DFT 알고리즘을 이용한 전력계통 동요모드 확인", 대한전기학회 논문지, 2001, 5월, 제50A권 제5호

저 자 소 개

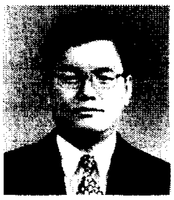


김 동 준 (金 東 俊)

1971년 1월 7일생. 1992년 전남대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 졸업(석사). 현재 한국전기연구소 전력연구단 시스템제어 연구그룹 연구원. 관심분야 : 전압붕괴점 프로그램 개발(CPF법, PoC법), 발전기/제어계 모델링. 디지털 제어, AVR/PSS 정수 튜닝. 디지털 PSS 개발

Tel : 055-280-1318, Fax : 055-280-1390

E-mail : djkim@keri.re.kr



문 영 환 (文 英 煥)

1956년 5월 13일생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 Univ. of Texas (Arlington) 전기공학과 졸업(공박). 현재 한국전기연구소 전력연구단 시스템제어 연구그룹장, 책임연구원. 관심분야 : 발전기/제어계 모델링, HVDC 제어, EMS 프로그램 개발, 전력구조개편, 실계통 AVR/PSS 정수 튜닝, 디지털 PSS 개발

Tel : 055-280-1311, Fax : 055-280-1390

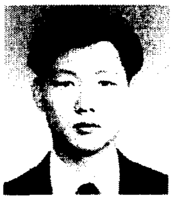
E-mail : yhmoon@keri.re.kr

전 동 훈 (田 東 勳)

1966년 12월 11일 생. 1991년 홍익대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년~현재 충남대 전기공학과 박사과정. 1994년~현재 한전 전력연구원 선임연구원

Tel : 042-865-5833, Fax : 042-865-5844

E-mail : dhjeon@kepri.re.kr



김 태 균 (金 泰 均)

1993년 한양대 대학원 졸업(공박). 1996년 한국전력공사 입사 현재 전력연구원. 전력계통연구실 근무

Tel : 042-865-5831, Fax : 042-865-5844

E-mail : tkkim@kepri.re.kr