

보령 T/P 6호기 PSS 모델링과 검증

최홍관* 김동준* 문영환* 김용학** 윤동범**
 한국전기연구원* 전력연구원**

PSS Modeling and Cerification for #6 Generator of Boryong T/P

H.K. Choi*, D.J. Kim*, Y.H. Moon* Y.H. Kim**, Y.B. Yoon**
 K E R I* K E P R I**

Abstract - It studied modelling about employing analog PSS in domestic 500MW grade standard thermoelectric power plant in this paper. Modeling and parameters were verified by simulation of PSS response characteristics measured in AVR step examination and using power plant system model parameters decided by generator characteristics test. Through this PSS modelling research, contributed in domestic electrical power system small signal stability as that do modelling to be possible exact analysis of power system.

1. 서 론

국내 전력시스템 소신호 안정도 향상을 위해서 PSS 튜닝과 위치선정은 매우 중요하다. 그 중에서 보령화력 발전소의 중요성이 동해안 발전기 군과 동요하는 상대발전소라는 이유로 최근의 문헌에서 발표됨으로서 부각되고 있다. 본 논문은 국내 500MW급 표준 화력 발전시스템에서 채용하고 있는 아날로그 PSS에 대해서 모델링 연구를 하였다. 발전기 특성시험에 의해서 결정된 발전시스템 모델정수를 이용하여, 부하시 AVR 스텝시험에서 측정된 PSS 응답특성을 모의하여 모델링하고 결정된 정수를 검증하였다.

2. 본 론

2.1 개요

보령 T/P #6의 설비 사양은, 발전기 용량이 612MVA이며 정격전압은 22.0kV이다. 사용되고 있는 여자시스템은 GE사의 직접여자방식이다. PSS/E 모델은 발전기인 경우 원통형모델인 'GENROU' 이고, 여자시스템 모델은 'EXST3' 이며, 조속기/터빈 모델은 일반적인 활력기 모델인 'IEEEG1' 모델로 정할 수 있다. PSS 모델 정수결정을 위해서 운전중인 PSS를 On, Off 한 후 AVR 스텝 시험을 하여 PSS 모델정수를 결정 하였다.

2.2 발전기 모델정수 유도

2.2.1 무부하 포화곡선

발전기 모델에서 2개의 무부하 포화계수 S(1.0pu)과 S(1.2pu)가 필요로 하고, 이는 무부하 포화시험(제자전류에 대한 전기자 전압)에서 측정된 데이터를 바탕으로 하여 포화곡선을 유도하였다. 무부하 포화곡선으로부터 포화계수를 구하면 아래와 같고 발전기 단자전압을 1.0pu로 하는 공극선에 대한 기

본 제자전류값은 아래와 같이 1681 ADC로 결정된다.

- S(1.0)=0.2055, 1.0pu=22.0kV (1)
- S(1.2)=0.4236, 1.2pu=26.40kV (2)
- I_{fd}_BASE:1.681.415A (3)

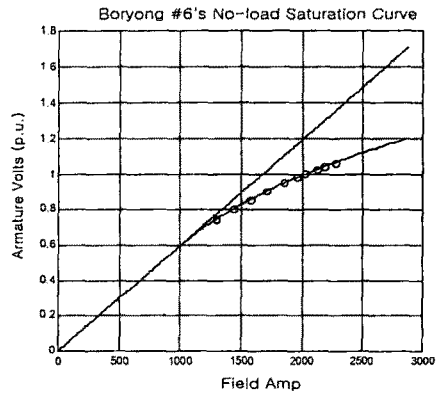


그림 2.1 무부하 포화곡선

2.2.2 직축/횡축 시정수와 임피던스 결정

부하차단 중 MVR 모드인 수동모드에서 차단된 데이터를 이용하여 유도하였다. 부하차단 전의 발전기 유효출력, 무효출력, 부하가 그리고 발전기 단자전압들을 살펴보면 아래와 같다.

Vt=21.845(0.993pu), P=54.78(0.0895 pu)
 Q=40.08(0.0655 pu), δ_i=6.195°
 Base : 612.0 MVA, 22.0 KV

위의 값들을 이용해서 차단 전의 발전기 단자전류를 계산할 수 있고, 측정된 부하각과 역률각으로부터 횡축 성분 단자전류와 직축 성분 단자전류를 계산할 수 있으며, 최종적인 임피던스와 정수는 다음과 같다.

$$X_d = 1.30 \quad X'_d = 0.208 \quad X''_d = 0.382 \quad (4)$$

$$T''_{d0} = 0.0476 \text{ sec} \quad T'_{d0} = 0.816 \text{ sec} \quad (5)$$

같은 방법으로 직축 성분만 있는 단자자속으로부터 직축 임피던스와 시정수를 계산하면, 그 시정수와 임피던스는 아래와 같다.

$$X_d = 0.876 \quad X'_d = 0.224 \quad X''_d = 0.177 \quad X'' = 0.193$$

$$X_l = 0.134 \quad (6)$$

$$T''_{d0} = 0.044 \text{ sec} \quad T'_{d0} \approx 3.086 \text{ sec} \quad (7)$$

정상상태의 동기 임피던스의 결정은 측정된 V-curve 데이터와 지금까지 구한 발전기 정수를 이용하여, 측정된 정상상태를 가장 잘 표현하는 값으로 정확한 결정한다. 동기 임피던스 X_d 와 X_q 는 계자전류와 부하각에 서로 관련이 있으므로 두 변수를 최적화 변수로 하여, 측정된 계자전류와 부하각, 계산된 계자전류와 부하각을 목적함수로 하는 최적화 식으로 정식화하여 계산하면 동기 임피던스 값은 다음과 같다.

$$X_d = 1.9395 \quad (8)$$

$$X_q = 1.4755 \quad (9)$$

표 2.1 V-Curve시험 측정 결과와 모의 결과 비교

kV	I_{fd_mea}	I_{fd_sim}	%error	Angle _{mea}	Angle _{sim}	Error
22.06	3947.58	3947.54	0.00	38.32	38.47	0.15
21.76	3726.87	3720.14	0.18	41.46	41.67	0.21
21.54	3595.36	3590.18	0.14	43.77	44.02	0.25
21.17	3377.47	3375.79	0.05	48.54	48.97	0.42
22.27	3584.70	3587.69	0.08	30.11	30.16	0.05
21.93	3276.46	3273.04	0.10	33.36	33.36	0.00
21.67	3069.40	3074.46	0.16	36.33	36.33	0.00
21.33	2816.20	2839.19	0.81	40.33	40.44	0.11
21.27	2770.14	2792.69	0.81	41.21	41.35	0.13
22.40	3295.99	3282.73	0.40	21.12	21.05	0.06
22.03	2925.19	2906.91	0.63	23.48	23.31	0.17
21.72	2640.95	2640.77	0.01	26.39	26.15	0.24
21.39	2347.48	2371.74	1.02	29.96	29.67	0.29
21.24	2220.48	2257.36	1.63	31.83	31.59	0.24
22.50	3070.13	3038.38	1.05	8.43	8.59	0.16
22.16	2675.40	2631.33	1.67	9.63	9.67	0.04
21.86	2363.20	2329.85	1.43	10.71	10.61	0.11
21.54	2018.07	2004.95	0.65	12.23	11.91	0.32
21.39	1854.09	1849.76	0.23	13.05	12.59	0.46

2.2.3 발전기/터어빈 관성 계수 결정

발전기 관성계수는 두 번의 부하차단 시 측정된 주파수 변화분으로부터 계산하며, 결정되는 발전기 관성계수는 발전기 관성은 물론 터어빈 관성까지 포함된 값이다. 최종결정된 값은 유도된 두 개의 관성계수 값의 평균값으로 $H=3.66$ 으로 결정된다.

부하차단 2회 [P = 54.60, 54.22 (MW)]

$$H = \frac{\Delta P_a}{2 \frac{d\omega}{dt}} = 3.72pu, \quad 3.60pu \quad (10)$$

이상과 같은 방법으로 결정된 최종 발전기 모델 정수는 다음과 같다.

표 2.2 발전기모델 정수(BASE:612.0, Genrou)

T'D0	T''D0	T'Q0	T''Q0	H	DAMP	XD
7.70	.044	.82	.048	3.66	.00	1.9395
XQ	X'D	X'Q	X''D	XL	S(1.0)	S(1.2)
1.4755	.2240	.3820	.1930	.1340	.2055	.4236

2.3 여자시스템 모델 정수 결정

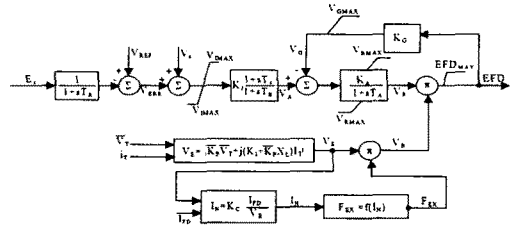


그림 2.2 여자시스템 모델 'EXST3'

여자시스템의 모델정수 결정은 그림 2.2의 제작처 제공의 여자기 모델과 모델정수를 기본으로 하여, 앞에서 결정된 발전기 모델정수와 특성시험시 측정된 AVR 스텝 시험을 사용하여 모델 정수를 튜닝, 결정하였다. 구한 모델 정수는 측정된 데이터와 비교하여 검증하였다. 표 2.3은 결정된 EXST3모델 정수를 보여주며 그림 2.3은 측정된 무부하 스텝시험 결과와 결정된 정수를 활용하여 PSS/E로 모의한 결과와 비교한 것이다. 모의된 단자전압과 계자전압이 측정된 단자전압과 계자전압 결과와 일치하고 있음을 알 수 있다.

표 2.3 여자 시스템 모델 정수

TR	VIMAX	VIMIN	KJ	TC	TB	KA	TA	VRMAX	VRMIN
.02	.200	-.200	200.	1.	8.	8.5	.4	1.00	.030
KG	KP	KI	EFDMAX	KC	XL	VGMAX	THETAP		
1.00	4.80	.0	5.000	.10	.0	4.800	.00		

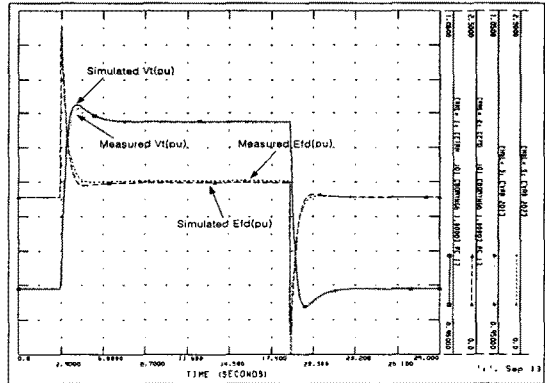


그림 2.3 결정된 여자시스템 모델 정수 검증

2.4 조속기/터어빈 모델 정수 결정

화력이 터어빈/조속기 모델로는 그림 2.4의 IEEEG1 모델이 적당하다. 발전기가 정적부하에서 운전되고 있으며 보일러의 압력은 일정하다는 가정을 전제로 하고 있다.

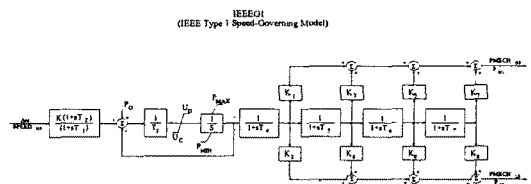


그림 2.4 조속기/터어빈 모델 "IEEEG1"

이 모델에 대한 제어정수 결정은 등급의 화력발전소에서 이미 결정된 모델정수 값들을 참조하였다. Droop은 자료에 기록된 값 5%로 결정하였다. 그림 2.5는 결정된 조속기/터어빈 모델정수를 검증하기 위해서 PSS/E 프로그램에서 조속기 스텝시험을 모의한 결과이다.

표 2.4 조속기/터빈 모델 정수

K	T1	T2	T3	UO	UC	PMAX	PMIN	T4	K1
20.0	.0	.0	.10	.10	-20	.8415	.2450	.30	.317
K2	T5	K3	K4	T6	K5	K6	T7	K7	K8
.0	7.0	.266	.0	.40	.417	.0	.0	.0	.0

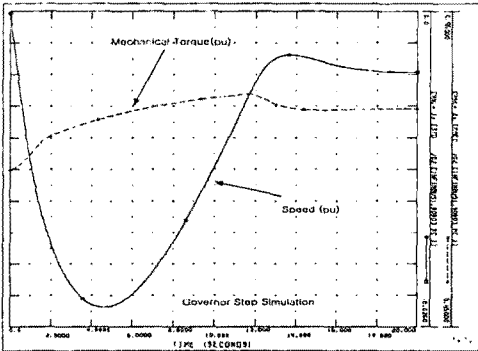


그림 2.5 PSS/E의 조속기 스텝(GSTEP) 모의 결과

2.5 PSS 모델정수 결정

보령 화력 6호기는 아날로그 PSS가 AVR에 부착되어 운전하는 형태이다. 또한 3, 4, 5호기도 동일한 형태이며, PSS의 모델은 그림 2.6과 같은 'IEEEEST' 모델이다. 입력신호는 축에서 나오는 발전기 속도(Speed)를 사용하고 있고, 아날로그 PSS의 구성은 축진동 모드를 제거하기 위한 축진동 필터와 2단의 위상보상회로가 있으며, 최종단에서 이득과 Washout 회로가 있다. 또한 부가적으로 보호회로가 있으며, 축진동 모드가 아주 크게 활성화 되는 경우는 시스템의 안정도를 고려하여 PSS가 자동적으로 출력신호를 발생하지 않는다. 그러나 이러한 보호회로는 PSS 모델 'IEEEEST' 모델에서는 고려하지 않는다. PSS 모델 정수 결정을 위한 AVR 스텝시험은 발전기 출력이 약 200MW인 운전점에서 PSS를 Off한 상태에서 AVR에 2% 스텝신호를 인가했고, 또 PSS를 On하여 다시 AVR에 2% 스텝신호를 인가하여 시험하였다.

결정된 PSS 모델 정수는 표 2.5와 같다. 대부분의 모델 정수는 제작처 제공의 모델 정수를 사용했으며, PSS 이득(Ks)만 측정 결과와 모의된 결과를 비교하여 Ks=5.0으로 결정하였다.

IEEEEST
(IEEE Stabilizing Model)

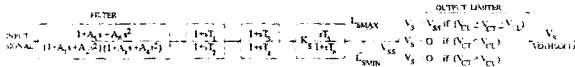


그림 2.6 PSS 모델 "IEEEEST"

표 2.5 결정된 PSS 'IEEEEST' 모델 정수

A1	A2	A3	A4	A5	A6	T1	T2	T3
0.061	0.0018	0.0	0.0	0.0	0.0	0.250	0.025	0.250

T4	T5	T6	Ks	LsMAX	LsMIN	Vou	Vcl
0.025	10.00	10.00	5.0	0.10	0.10	0.0	0.0

그림 2.7은 PSS Off 시 2% AVR 스텝시험시 측정된 결과와 결정된 모델 정수를 적용한 PSS/E에서 모의된 결과를 비교하고 있다. 그림 2.8은 PSS가 On 일 때 2% AVR 스텝시험시 측정된 출력과 모의된 발전기 출력을 비교하고 있다. 결과를 살펴보면 PSS가 Off시 때 보다 댐핑이 더 잘되고 있고, 모의된 결과와 측정된 결과가 잘 일치하고 있다. 실제 측정된 데이터에 어떠한 지역 진동 모드가 있는가는 다음에서 FFT 분석으로 고찰한다.

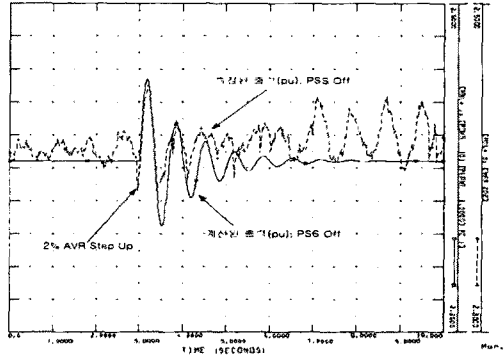


그림 2.7 AVR 스텝시험 결과와 PSS OFF 모의 결과

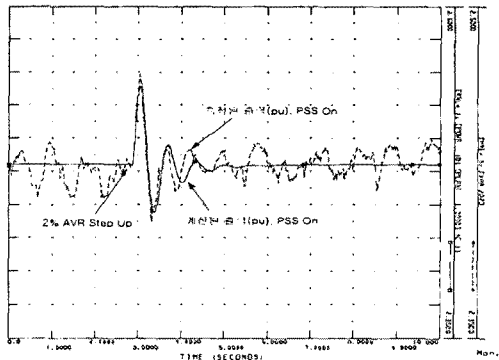


그림 2.8 AVR 스텝시험 결과와 PSS On 모의 결과

2.6 FFT 분석 및 검증

그림 2.9는 PSS가 On 일때와 Off 시에 측정된 발전기 출력(Pe)을 FFT 기법으로 분석한 것이며, 이 그림으로부터 FFT 분석된 발전기 출력에 여러 모드가 있음을 알 수 있다. PSS가 Off된 상태에서의 여러 모드 중 가장 댐핑이 안되는 모드는 1.3Hz 대의 모드임을 알 수 있으며, 이 모드는 보령화력 6호기의 발전기 모드라고 판단된다. 그러나 PSS가 On일 때의 이 1.3Hz대의 모드는 거의 사라짐을 고찰할 수 있다. 이것은 운전중인 아날로그 PSS가 이러한 발전기 모드에 대해 댐핑을 제공하여 이 발전기 모드의 감쇄에 효과적으로 동작하고 있음을 알 수 있다. 결국, 현재 운전중인 보령 화력 6호기의 PSS는 정상적으로 잘 동작하고 있으며, 특히 발전기 모드(1.3Hz)에 대해서 효과적으로 댐핑을 제공하고 있음이 측정결과와 모의 결과로 확인 되었다.

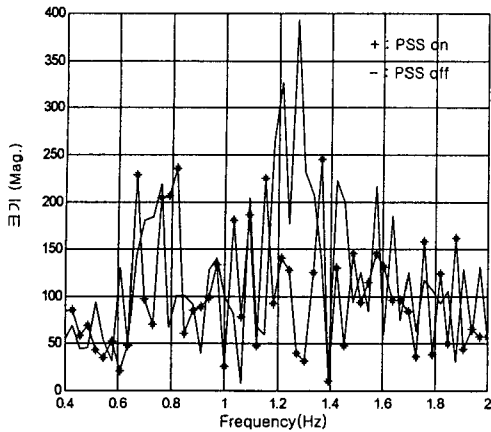


그림 2.9 PSS On/Off 시의 발전기 출력(Pe) FFT 분석결과
(+ : PSS/On, - : PSS/Off)

3. 결 론

이상과 같이 보령 화력 6호기 발전기 특성시험에서 측정된 데이터를 분석하여 PSS/E의 안정도용 발전기/제어계 정수를 결정하였고, 실측데이터와 비교하여 검증하였다. 결정된 발전기, 여자기, 그리고 조속기 모델과 정수는 측정된 결과로부터 유도되었기 때문에 제작처에서 제공하는 기존의 모델과 달리 실제 응동에 가깝게 모의할 수 있었다. 또한, PSS 모델 정수결정을 위해서 운전중에 시행된 2% AVR 스텝시험을 사용하였고, 이때 측정된 데이터를 이용하여 신뢰도 있는 PSS 모델정수를 결정하였다. 이러한 모델정수를 바탕으로 PSS/E를 이용하여 모의하고 실측한 결과와 비교 분석하여 검증하였다. 이와 같이, 본 논문은 국내 500MW 표준 화력발전소에서 채용하고 있는 보령 화력 6호기 아날로그 PSS에 대해서 정확한 계통해석이 가능하도록 모델링하여 국내 전력시스템 소신호 안정도에 기여하였다.

(참 고 문 헌)

- [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] 한국전력공사, "전력계통 안정도 해석용 발전기 제어계 모델 결정에 관한 연구" 최종보고서, pp434-439, 1996. 10
- [3] F.P.de Mello, J.R Rebeiro, "Determination of Synchronous Machine Parameters from Tests," IEEE Trans. PAS Vol. PAS-96, July/Aug. 1977, pp.1211-1218
- [4] M.Namba, J.hosoda, S. Doi, and M.Udo, "Development for Measurement of Operation Parameters of Synchronous Generator and Control Systems"
- [5] IEEE Std 421.5-1992, "IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies"
- [6] 김동준외 3명, "PSS 튜닝을 위한 기본 연구, Part I : 계통 운전조건에 대한 토오크 특성분석", 대한전기학회 논문지 제 48권 제 9호, 1999.9
- [7] 신정훈외 4명 "PSS 튜닝을 위한 기본 연구, Part II : PSS 실계통 최적 정수 선정을 위한 튜닝기법", 대한전기학회 논문지 제 49권 제7호, 2000.7