

발전기/제어계 특성시험을 통한 제주한림 S/T 모델정수 결정과 전압제어특성 평가

김동준 문영환 이금진 윤용범
한국전기연구원 전력연구원

Cheju Hanlim S/T Model Parameter Determination and Assesment of Voltage Control Loop on the Characteristic Tests of Generator/Excitation System

D.J. Kim Y.H. Moon K.J. Lee Y.B. Yun
KERI KEPRI

Abstract - This paper deals with the determination of generator/exciter model parameters for a Cheju Hanlim steam turbine unit. Using the recorded data from the generator characteristic tests, the model parameters have been derived and verified by comparing the simulation results and recorded data. In addition to it, the closed-loop performance of voltage control on no-load condition has been assessed in the frequency domain by taking advantage of derived generator/exciter model parameters

1. 서 론

최근, 전력계통에서 발생된 대형사고의 재현, 설비 증설을 위한 안정도 검토, 계통운영의 계획, 그리고 실시간 계통 안정도 평가 등을 위해서 발전소의 모델 D/B는 시뮬레이션에서 아주 중요한 역할을 한다. 예로, 1996년에 발생된 북미 서부지역의 계통사고 후의 2년의 댐핑 부족으로 추정되는 계통붕괴는 시뮬레이션을 통한 사고재현에 있어서 발전소의 정확한 모델정수의 중요성을 계통기술자에게 인식하도록 하였다. 그리고 두 번의 계통붕괴사고의 정확한 사고재현과 규명을 위해서 서부지역 위원회(WSCC)에서는 1997년에 10MVA이상의 북미 서부지역의 700 여개의 발전기에 대해서 측정에 의한 발전소 모델데이터를 제출하도록 각 독립 전력 회사에 요구하기까지 하였다.[1]

본 논문은 제주한림 S/T에 대해서 실시된 발전기 특성시험을 통해서 측정된 데이터를 이용하여 발전기 모델정수와 여자기 정수 결정에 대해서 기술한다. 발전기 모델정수 결정 방법은 문헌[2,3]의 방법을 이용하였다. 여자기 정수결정은 이미 결정된 발전기 모델 정수와 제작처 제공의 정수를 초기값으로 사용하여 측정된 단자전압과 계자전압을 아주 정확하게 모의할 수 있는 정수값으로 결정되었다. 결정된 발전기/여자기 모델정수의 검증은 측정된 파형과 모의된 결과를 비교하여 그 유용성을 확인하였으며, 최종적으로 발전기/제어기 모델정수를 이용하여 한림 S/T 발전기의 무부하 페루프 전압제어 특성을 주파수 응답 해석을 통해서 평가하였다.

2.1 제주한림 S/T 시설제원

제주한림 S/T 발전은 두 개(혹은 한 개)의 가스 터 어빈을 돌리고 나오는 잔열을 이용하여 발전을 한다. 따라서, 제주한림 S/T의 기계적출력 결정은 가스 터어빈 운전상태에 따라 결정되며 출력은 거의 일정하다고 볼 수 있다. 표 1은 제주한림 S/T의 설비사항을 보여주고 있으며, 사용하고 있는 여자시스템은 GE의 EX-2000 디지털 여자시스템이다.

표 1. 제주한림 S/T 설비사항

설비	설비사항
발전기	Rated Mva : 50MVA
	Rated Voltage(Vt) : 13.8 KV
	Rated Current(It) : 2,134 KA
	Power Factor : 0.8
	Speed/Poles : 3600rpm/2
여자기	PT 비 : 14,400/120 V
	CT 비 : 3,000/5 A
	Exit Type : Static
	Model Name : EX-2000
	AVR Type : PI
	정격발전기 계자전압 : 125 VDC
	정격발전기 계자전류 : 893 ADC

2.2 발전기 모델정수

2.2.1 발전기 무부하 포화계수 유도

무부하시 정격속도에서 측정된 무부하 포화곡선시험 데이터를 이용하여 그림 1의 air-gap line에서 무부하시의 계자전류 base값과 포화계수를 결정하면 아래와 같다. 특히, 결정된 base 계자전류는 정상상태에서 측정된 계자전류를 p.u.값으로 변환하는데 사용되는 중요한 값 중 하나이다. 본 논문에서 사용되는 발전기 모델은 PSS/E 프로그램의 고차의 원통형 발전기 모델인 "GENROU" 모델이다.

포화계수 : S(1.0)=0.1095 S(1.2)= 0.2500
Base 값 : Ifd_base = 290.3845 (A_{dc})

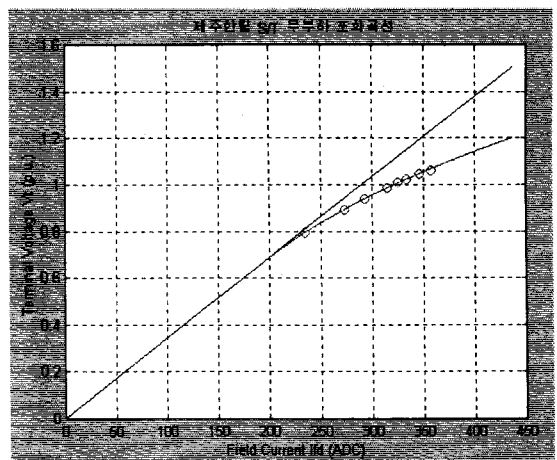


그림 1 제주한림 S/T 무부하 포화곡선

2.2.2 발전기 정수 유도

측정된 부하차단 데이터와 deMello의 부하차단을 통한 발전기 정수결정방법을 이용하여 발전기 정수를 결정하면 표 2와 같다. 그림 2는 부하차단시 측정된 단자자속(V_t/ω)의 응동변화와 유도된 정수에 의한 단자자속 응동변화를 모의한 것으로 잘 일치하고 있다. 이러한 부하차단 후의 그림 2와 같은 과도 응동 특성을 비교함으로써, 결정된 과도/초기과도 시정수와 과도 임피던스(X_d', X_a', X'')의 유효성을 검증할 수 있다.

표 3은 정상상태 부하곡선시험에서 측정된 값과 유도된 정수에 의해 모의된 값을 보여주고 있다. 결정된 직축/횡축 동기 임피던스 X_d 와 X_q 는 최적화 기법을 사용하여 결정된 값으로, 표 2의 측정된 V_t (단자전압), P(MW), Q(MVAR)를 초기조건으로 했을 때 측정된 계자전류와 부하각을 가장 잘 모의하는 값이다. 표 3은 측정된 계자전류와 부하각이 모의된 값과 거의 일치하고 있음을 보여주고 있어, 결정된 발전기 정수는 정상상태에서도 그 유효성을 검증할 수 있다.

관성정수 H는 부하차단 전·후의 전기적 출력 편차(ΔP_e)와 동요방정식을 이용하여 결정된다. 그림 3은 결정된 관성정수 $H=6.35$ 를 이용하여 부하차단시 측정된 주파수 편차(p.u.)와 모의한 편차를 비교한 것으로 거의 일치한다. 여기서 주파수 편차에 대한 모의는, 부하차단후의 기계적 출력의 변동분을 고려하기 위해서 측정된 주파수에서 계산된 기계적 출력데이터를 발전기 모델의 기계적입력에 강제입력하여 시뮬레이션 하였다.

표 2 결정된 한림 S/T 발전기 정수(50MVA)

정수	정수 값	정수	정수 값
T_{do}'	9.50	X_q	1.8382
T_{do}''	0.056	X_d'	0.3210
T_{ao}'	0.95	X_a'	0.6390
T_{ao}''	0.073	X''	0.1880
H	6.35	X_l	0.1650
D	0.00	S(1.0)	0.1095
X_d	2.0851	S(1.2)	0.2500

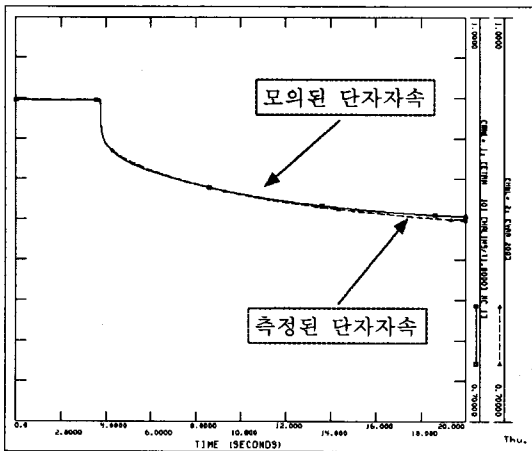


그림 2 결정된 발전기 모델정수를 이용한 부하차단후 측정된 단자자속 모의

표 3 측정된 정상상태 데이터와 모의된 값의 비교 (50MVA, 13.8KV)

Vt(kV)	MW	MVAR	측정된 I_{fd} (A/c)	계산된 I_{fd} (A/c)	% error	측정된 부하각(deg)	계산된 부하각(deg)	오차(deg)
13.43	9.76	3.53	377.61	376.18	0.37	17.21	17.31	-0.10
14.07	9.93	19.17	595.99	589.69	1.05	10.55	10.99	-0.43
13.90	9.96	14.79	532.33	530.75	0.29	11.90	12.32	-0.42
13.69	9.89	9.94	462.63	464.35	-0.37	13.80	14.10	-0.29
13.49	9.86	5.15	397.47	398.63	-0.29	16.33	16.47	-0.14
13.27	9.78	0.25	331.75	331.06	0.20	19.92	19.83	0.09
13.01	9.71	-4.47	270.95	265.77	1.91	25.13	24.80	0.33
13.40	5.03	5.05	379.95	380.20	-0.06	8.99	8.73	0.26
13.99	5.19	19.50	585.98	583.10	0.49	5.41	5.81	-0.40
13.79	5.10	14.77	516.43	517.47	-0.20	6.14	6.47	-0.33
13.59	4.99	9.87	445.65	448.46	-0.62	7.16	7.34	-0.17
13.37	4.97	4.85	372.59	376.72	-1.10	8.71	8.71	-0.00
13.15	4.88	0.37	305.23	311.02	-1.89	10.67	10.37	0.30

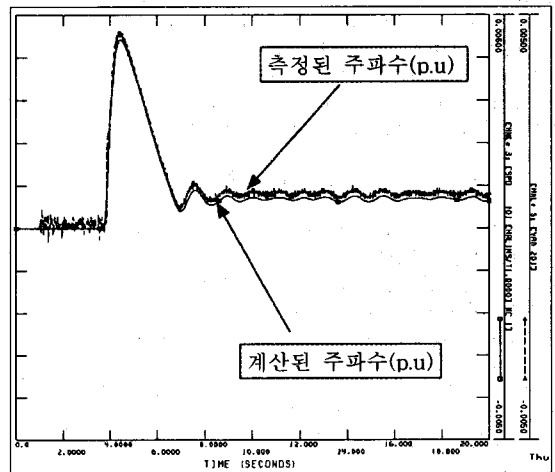


그림 3 결정된 $H=6.35$ 를 이용한 측정된 주파수 편차(p.u.) 모의

2.3 여자계 모델정수 결정 및 전압제어특성 분석

한림 S/T의 여자시스템은 GE사의 EX2000 모델로써 정지형 여자를 채용하며 디지털 AVR을 갖는다. 그리고 이 AVR 제어는 PI형으로 단자전압을 제어하게 된다. 이 여자시스템에 적당한 PSS/E 여자시스템 모델은 EXPIC모델을 선정할 수 있다. 앞에서 결정된 발전기 정수와 AVR 스텝 업/다운시 측정된 단자전압을 이용하여 그림 4의 여자기 모델 EXPIC모델의 정수를 결정하면 아래와 같고, 측정된 AVR 스텝 업/다운시 단자전압과 계자전압을 모의하면 그림 5와 같다. 그림 5는 측정된 단자전압(V_t)과 계자전압(E_{fd}) 그리고 모의된 단자전압과 계자전압이 거의 차이가 없음을 보여준다.

결정된 EXPIC 모델 정수

TR	KA	TA1	VR1	VR2	TA2	TA3	TA4
0.020	22.5	1.0	5.0	-5.0	0.0	0.0	0.0
VRMAX	VRMIN	KF	TF1	TF2	EFDMAX	EFDMIN	
5.0	-5.0	0.0	1.0	1.0	5.0	-5.0	
KE	TE	E1	SE(E1)	E2	SE(E2)	KP	KI
0.0	0.0	3.0	0.0	4.5	0.0	0.0	0.0

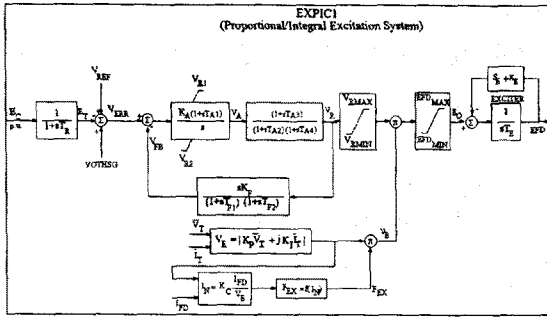


그림 4 PI-AVR을 갖는 여자기 모델 EXPIC

그림 5와 같이 실측된 단자전압, 계자전압 운동을 그대로 재현하는 여자시스템 모델 정수 튜닝은 EXPIC 모델의 필터 시정수 T_R 와 PI 정수 K_A 와 T_{A1} 을 조정하는 것으로 실행되었다. 그 밖의 EXPIC 모델 정수(여자기 부분의 모델을 나타내는 PPT 모델정수와 지상/지연 정수 그리고 안정화회로 정수)들은 무시하여 동작하지 못하도록 값을 설정하였다. 실제, 제작처에서 제안하는 EX-2000 여자기 모델은 최신 IEEE 여자기 모델인 ST4B 모델이다. 그러나, 이 여자기는 정지형 여자기이고 제어형식이 PI 제어라 그 특성을 크게 벗어나지 않으며, 충분히 EXPIC 여자기 모델로 그림 5와 같이 그 특성을 제대로 나타낼 수 있다. 더불어, 그림 5로부터 이 여자시스템의 시간영역상에서 전압제어특성은 양호하다고 판단할 수 있다.

그림 6은 대형 계통 AVR/PSS 튜닝 프로그램인 PWRSTAB[4]에서 유도된 정수들을 이용하여 선형화된 상태행렬을 만들고, Matlab을 이용하여 무부하시의 발전기-여자기의 페루프 주파수 특성을 나타낸 것이다. 이때의 이득여유, 위상여유 그리고 최대 이득 M_p 는 아래와 같고 옆의 괄호 값은 IEEE에서 추천하는 값[5,6]이 된다. 아래와 같이 계산된 값은 IEEE 추천하는 값 범위에 들어가기 때문에, 실제 설정된 AVR 정수는 안정되게 튜닝되어 있음을 판단할 수 있다.

Gain Margin = Inf (≥ 6 db)
 Phasor Margin = 138.11 deg (≥ 40 deg)
 $M_p = 1.1255$ (1.1 ~ 1.6)

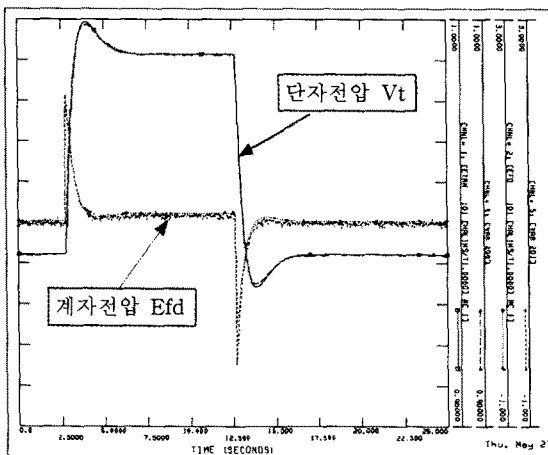


그림 5 유도된 모델정수를 이용한 AVR 스텝시험 모의 (측정된 단자전압과 계자전압을 모의된 값과 비교)

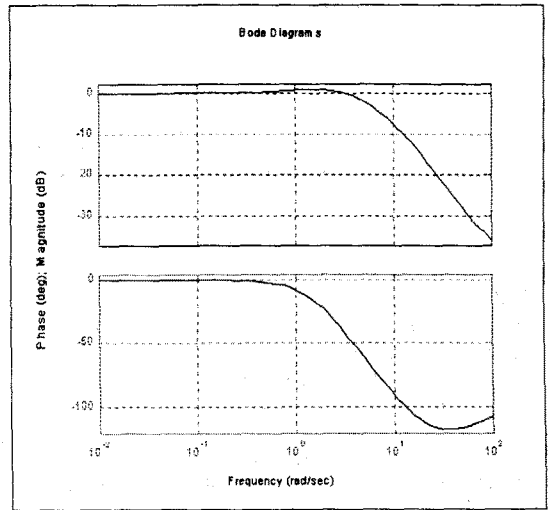


그림 6 무부하 발전기-여자기 페루프 주파수 응답특성

3. 결 론

본 논문은 발전기 특성시험을 통하여 실측된 데이터를 이용하여 제주한림 스텝 터빈 발전기/여자시스템 모델 정수들을 유도하였다. 유도된 모델정수들은 측정된 결과와 모의된 결과를 비교하여 검증하고 그 유용성을 확인하였다. 마지막으로 결정된 발전기/여자시스템 모델정수들을 이용하여 무부하시의 전압제어-페루프에 대한 주파수 해석을 수행함으로써, 시간영역에서뿐만 아니라 주파수 영역에서도 한림 S/T 여자시스템의 전압제어특성이 양호함을 재확인하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] Robert L. Dintelman, "Synchronous Unit Testing and Model Validation in the WSCC", Vol-1, IEEE WM, New York, 1999
- [2] F.P. de Mello, J.R.Ribeiro, " Derivation of Synchronous Machine Parameters from Tests", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-96, No.4, 1977
- [3] D.J.Kim, Y.H.Moon, T.K Kim, J.H Shin, "Derivation of Synchronous Generator Parameters Using Improved Load Rejection Analysis", ICEE'98
- [4] 김동준, 문영환, " 대형계통 AVR/PSS 제어정수 튜닝을 위한 PWRSTAB 프로그램 개발 ", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, 1999. 5
- [5] P.Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, 1994
- [6] IEEE Guide for Identification, Testing and Evaluation of the Dynamic Performance of Excitation Control Systems, IEEE Standard 421.2-1990
- [7] PSS/E Application Guide II, PTI, 1994.
- [8] Y.H. Moon, D.J. Kim, " Derivation of Excitation System Parameters from Large Signal Tests", ICEE'98