

서천화력 발전기 및 제어시스템 모델링

김용학* 김태균* 추진부* 주준영** 송석하**
한국전력공사 전력연구원* 한국전력거래소**

Power Generation Unit Modelling in Thermal Power Plant

Kim Yong-Hak* Kim Tae-Kyun* Choo Jin-Bu* Joo Joon-Young** Song Seok-Ha**
Korea Electric Power Research Institute* Korea Power Exchange**

Abstract - This paper provides the procedure to derive model parameters from the field tests. Since the accuracy of power system analysis depends on the accuracy of models used to represent the generation units, the reliability of power system analysis could be affected by parameters used in those models. The objective of this paper is to validate and update the models. So the field test had performed for thermal units and adjusting the variables to match with the measured values derived their model parameters. And the model parameters are verified by comparing the variables between models.

석용 데이터를 확보하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다. 즉, 정확한 안정도 해석용 데이터를 이용하여 계통해석을 실시함으로써, 계통운영시 보다 정확히 계통운영의 여유를 확보할 수 있으며, 이는 결국 계통운영 비용의 절감을 유도할 수 있을 것으로 기대된다.

1. 서 론

전력수요 증가에 따른 발전공급의 증가로 우리나라 전력계통의 전력수송 밀도는 급속하게 증가하고 있다. 특히, 전력계통이 대규모화, 루프화 되면서 과거에는 경험하지 못하였던 선진국형 전압안정도와 미소신호안정도 문제의 출현 가능성이 높아지고 있다. 우리나라 전력계통은 1980년 후반, 태풍에 의한 송전선로 붕괴로 야기된 계통 불안정현상을 경험한 이후로, 계통계획 및 운용계획 수립시 정확한 계통모의를 위해, 과거 10여 년간 실제 발전기 특성이 정확히 나타날 수 있도록, 발전기 및 제어계에 대한 현장시험 수행을 통해서 제어계 설비의 수학적 모델링을 구하고 있다. 향후 대규모 원자력 전원설비의 원격지 집중과 765kV 장거리 송전계통이 도입되는 대전력 수송시대는 계통의 안정운동을 위하여 발전기 및 여자시스템의 적정 제어능력 검증과 제어능력 한계에 대한 정확한 데이터 확보가 매우 중요한 것으로 예상된다. 이와 같은 발전기 및 제어계에 대한 모델링과 최적 튜닝은 GE를 중심으로 미국과 유럽의 전력설비 제작회사에서 주로 수행하고 있다.

2. 발전기 모델정수 유도 및 결정

서천화력 1호기는 246.0MVA의 설비용량으로 GE의 사이리스터를 사용한 정지형 여자시스템이다. 서천화력 1호기의 설비제원은 표 1과 같다.

표 1 서천화력 1호기 설비제원

	설 명
발전기	정격 설비용량 : 246.0 MVA, 0.85 PF 정격 단자전압 : 20,000 Vac 정격 단자전류 : 7,101 Aac PT비 : 21,000/120 Vac CT비 : 8,000/5 Aac SCR : 0.55 속도/극수/Teeth : 3,600rpm/2pole/80EA(4800pulse) 제작처 : GE(1978년)
여자시스템	여자방식 : 직접여자방식 모델명 : P PSCR 정격계자전압 : 375 Vdc 정격계자전류 : 1,231 Adc(FULL LOAD) 498 Adc(NO LOAD) Ceiling 전압 : Vdc 부여자기(Pilot Exciter) / 여자용 변압기(PPT) 형식 : PMG / 3,600 rpm 정격전압 : 20,000 / 600 Vac 제작처 : GE
터빈-조속기	형식 : 직렬배열형, 재생/제열/복수형 모델명 : (D-EHC형, 2000년 교체) 용량 : 200,000 kW Droop : 5.0 % 부하감발율 : 1.0 MW/분 제작처 : GE
주변압기	용량 : 219/245.0 MVA, Y Δ결선 전압 : 20.0 / 154.0 kV TAP NO. 1차 2차 1 161.700kV 2 157.850kV 3 154.000kV 4 150.150kV 5 146.300kV %Z : 11.25 %
PSS	모델명 : 有, 미운전(미튜닝) 입 력 : Δw 제작처 :

전력계통이 점차 증대되면서 계통 불안정현상이 발생함에 따라 정밀 계통해석을 위한 정밀 모델링은 매우 중요한 것으로 대두되고 있다. 전력계통 고장시 수반되는 발전기 동요현상은 전력계통 전반에 영향을 줄뿐만 아니라 발전기 역시 저주파 진동현상에서 비롯된 축비틀림 모멘트를 받게 되고 송전선로 재폐로시 공진용력을 받게 되어 발전기 출력 및 전압 등이 지속적으로 진동하여 발전기 안정운전을 위협하고 있다. 정밀 계통해석을 위해서는 발전기의 전기적인 특성(d-q축 임피던스, 시정수, 포화특성 등), 기계적인 특성(관성모멘트, 입력에너지 등 특성 등), 제어계(조속기, AVR 및 PSS 등)의 동동 특성을 정확하게 측정된 후, 이들의 특성을 가장 정확히 나타내는 수학적 모델의 선정 및 정수 결정이 필요하다.

발전기 特性試驗은 정상상태 발전기 임피던스를 유도하기 위한 V-curve시험, 포화계수를 유도하기 위한 무부하포화곡선시험, 여자계 정수를 결정하기 위한 AVR

특히, 경쟁체제의 전력시장 환경에서는 과거에 비하여 비정상 운전시 전력계통 제어의 신속성과 유연성이 떨어지고 계통의 안정도 여유가 감소될 전망이다. 그러므로 우리나라 전력계통의 안정도 평가 및 향상과 신뢰도 확보를 위하여 발전기 및 제어계에 대한 정확한 안정도 해

스텝업/다운시뮬 그리고 발전기 시정수 및 임피던스를 결정하기 위한 2회의 부하차단 시험으로 이루어졌다. 측정시험시 측정된 신호는 PT, CT, 계자전압, 계자전류, 축속도신호 그리고 2개의 조속기 신호들이며, PC를 기본으로 하는 데이터 취득시스템인 DSM장비에 의해서 모든 측정 데이터가 동시에 디지털로 取得되었다. 저장된 측정된 데이터는 아래 절과 같이 정수를 유도하는데 사용된다. 단, 계자전류는 계측장비의 적절한 측정범위를 벗어나 수기에 의한 측정값을 사용한다.

표 2는 부하차단전의 초기조건을 보여준다. 발전기 모델 정수 유도방법은 deMello의 부하차단 방법을 개념으로 하여 절차에 따라서 유도하였다. 서전화력 1호기는 3600rpm의 2극 원통형 발전기로서 발전기 모델은 PSS/E의 GENROU 모델이 적당하다. 그리고 아래에서 결정되는 모든 발전기 모델 정수는 GENROU 모델에 맞게 결정된다.

표 2 부하차단 초기조건

	P (MW), Q(MVAR)	단자전압	부하각	AVR Mode
부하차단#1	23.479MW,-7.6291Mvar	19.186kV	10.53	AVR
부하차단#2	20.525MW,-7.2486Mvar	19.133kV	8.07	MVR

2.1 무부하 포화계수 결정

발전기 모델 GENROU 모델에서는 2개의 무부하 포화계수 S(1.0)과 S(1.2)를 요구한다. S(1.0)은 단자전압이 1.0 pu 때의 포화계수이며 S(1.2)는 단자전압이 1.2 pu때의 포화계수이다. 무부하 포화시험에서 측정된 데이터는 그림 1과 같으며 측정된 데이터를 보간하여 포화곡선을 유도하면 그림 1과 같다. 그림 1로부터 2개의 포화계수를 유도하면 아래와 같고 발전기 단자전압을 1.0 pu로 하는 공극선에 대한 기본 계자전류는 506.808 ADC로 결정된다.

$$s(1.0) = 0.0934913 \quad s(1.2) = 0.226660$$

$$Ifd_base = 463.477Adc, AFNL = 506.808Adc$$

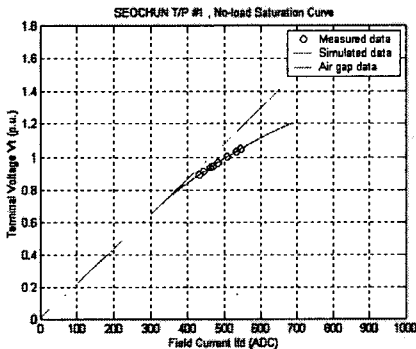


그림 1 서전화력 1호기 무부하포화곡선

2.2 발전기 시정수 및 임피던스 결정

발전기 시정수 및 임피던스(리액턴스) 결정은 AVR이 동작하지 않은 일정여자(Constant field voltage)방식인 DC 모드에서 부하차단된 표 2의 부하차단 #2 조건을 이용하여 결정한다. 먼저 부하차단 #2의 부하차단전의 초기조건을 이용하여 각각의 횡축, 직축 전류를 계산하면 아래와 같다.

$$I_t = \frac{\sqrt{(P^2 + Q^2)}}{V_t} = 0.0884852p.u.$$

$$\phi = \cos^{-1}\left(\frac{P}{I_t V_t}\right) = 19.4512 \text{ deg, leading}$$

$$I_d = 0.0884852 \times \sin(8.07^\circ - 19.4512^\circ) = -0.0174612$$

$$I_q = 0.0884852 \times \cos(8.07^\circ - 19.4512^\circ) = 0.0867452$$

발전기 개방 시정수와 임피던스 유도 및 결정은 측정된 단자전압에서 속도성분을 제거한 후의 단자자속(Terminal flux)만 이용하여 정수를 결정한다. 이와 같이 분리된 직축 자속으로부터 deMello가 제안된 방법에 따라 먼저, 횡축 차과도(Subtransient) 임피던스(X''_q)와 횡축 동기 임피던스(X_q)를 아래와 같이 결정할 수 있다. 여기서 계산된 횡축 동기 임피던스는 포화된 값이므로 V-curve시험 데이터를 이용하여 정확한 값을 결정하기로 한다. 다음으로 개방 차과도 시정수(Tqo'')와 개방 과도시정수(Tqo') 그리고 횡축 과도 임피던스(Xq')를 차과도 성분과 차단전의 정상상태 성분을 제거한 횡축 자속으로부터 결정할 수 있다.

$$Xq(\text{sat}) = 1.53855 \quad Xq' = 0.703680 \quad Xq'' = 0.195672$$

$$Tqo' = 0.771081 \quad Tqo'' = 0.0698968$$

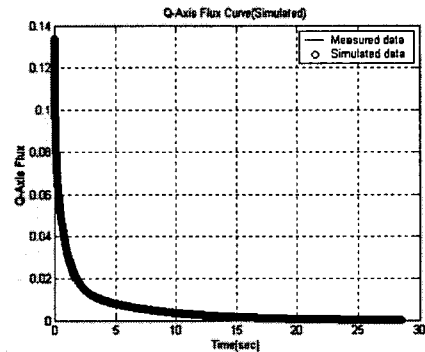


그림 2 측정된 횡축분 단자자속과 계산된 횡축분 단자자속

직축분 성분만 있는 단자자속으로부터 직축 임피던스와 시정수를 횡축에서 계산하는 방법과 같이 결정한다. 유도된 직축 개방 과도 시정수값은 3.79078sec 이지만, 계자전압이 과도상태시에도 일정해야 하나 측정된 데이터는 값이 변동하므로 실제 측정된 계자전압을 이용하여 더 정확한 값으로 결정한다. 누설 리액턴스는 0.159로 제작처 제공값을 적용한다.

$$Xd(\text{sat}) = 1.50063 \quad Xd' = 0.385612 \quad Xd'' = 0.236013$$

$$Tdo' = 3.79078 \quad Tdo'' = 0.0284082$$

2.3 발전기/터어빈 관성계수 결정

서전화력 1호기의 발전기 관성계수는 2회의 부하차단시 측정된 주파수 변화분으로부터 유도하였다. 여기서, 결정되는 발전기 관성계수는 발전기 관성뿐만 아니라 터어빈의 관성까지 고려되는 값이다. 부하차단에서 유도된 관성계수는 아래의 수식과 같으며 최종 결정된 값은 유도된 2개의 관성계수의 평균값으로 결정한다. 부하차단전에는 전기적 출력(Pe)과 기계적 출력(Pm)이 균형이 이루어져 가속력(Pa)는 영(zero)이 된다. 그러나 부하차단 후에는 전기적 출력은 바로 영으로 가고 기계적 출

력은 응동 시정수가 큰 관계로 그 값을 유지한다고 볼 수 있다. 따라서 부하차단후에는 가속력과 기계적 출력 값이 같다. 결정된 H는 2회의 부하차단에서 유도된 관성계수 값을 평균한 값이다.

$$H = \frac{\Delta P_a}{2 \frac{d\omega}{dt}}$$

부하차단 #1 (23.479MW) H = 2.93414

부하차단 #2 (20.525MW) H = 3.08148

결정된 관성계수, H = 3.00781

2.4 정상상태 동기 임피던스 결정

정상상태 동기 임피던스 결정은 측정된 V-curve 데이터를 이용하여, 측정된 정상상태를 가장 잘 표현하는 값으로 임피던스를 결정하였다. 정상상태 초기조건 출력 P(MW), 무효출력 Q(MVAR), 그리고 단자전압 Vt가 주어지면 발전기 모델로부터 계자전류와 부하각을 계산할 수 있다. 이 계산된 값을 측정된 계자전류와 부하각을 비교하여 동기임피던스 Xd와 Xq를 결정하는 것이 가능하다. 동기 임피던스 Xd와 Xq는 계자전류와 부하각에 서로 연관관계가 있으므로 두 정수를 최적화 변수로 잡고, 측정된 계자전류와 부하각과 계산된 계자전류와 부하각을 목적함수로 하는 최적화 식으로 정식화할 수 있다. 표 3과 같이 측정된 값과 계산된 값을 최소로 하는 두 개의 동기 임피던스 값은 아래와 같다. 단, 계자전류는 매우 낮은 전압범위에서 측정장비를 통하여 측정되므로 측정시 발생하는 측정 오차를 고려하여 수기에 의해 측정된 값을 사용한다. 결정된 두 값은 앞에서 계산된 값과 차이를 보여준다.

$$X_d = 1.78530 \quad X_q = 1.51150$$

표 3 서천화력 1호기 V-Curve 측정 및 모의결과

Vt (kV)	PG (MW)	QG (MVar)	측정된 Ifd(Adc)	계산된 Ifd(Adc)	% 오차	측정된 부하각	계산된 부하각	오차 (deg)
20.930	194.742	126.087	1185.105	1184.647	0.039	29.726	30.615	-0.889
20.613	198.015	101.958	1116.933	1116.516	0.037	32.892	33.774	-0.882
19.938	201.207	50.702	983.671	977.010	0.677	40.593	41.566	-0.973
19.357	200.051	4.994	876.619	862.994	1.554	48.833	50.170	-1.337
21.012	150.452	130.358	1115.468	1125.786	-0.925	23.469	24.171	-0.702
20.647	149.948	100.927	1011.824	1025.675	-1.369	26.339	26.920	-0.581
20.066	151.700	51.752	861.525	869.019	-0.870	32.922	33.379	-0.457
19.365	148.972	0.548	714.274	712.364	0.267	42.022	42.619	-0.597
19.312	148.164	3.331	702.867	699.850	0.429	42.776	43.381	-0.605
20.946	99.931	127.870	1049.810	1053.020	-0.306	16.168	16.815	-0.647
20.639	100.982	101.495	953.049	957.543	-0.472	18.407	18.872	-0.465
20.008	99.395	49.158	763.787	766.127	-0.306	23.601	23.745	-0.144
19.348	100.416	0.007	604.437	596.495	1.314	32.163	31.999	0.164
19.251	100.886	-6.797	584.791	575.175	1.644	33.834	33.627	0.207
20.827	52.399	118.402	976.148	977.936	-0.183	8.661	9.369	-0.708
20.634	51.449	100.463	903.834	908.878	-0.558	9.333	9.926	-0.593
19.974	50.336	50.800	707.440	712.828	-0.762	12.286	12.514	-0.228
19.315	48.973	0.777	513.323	513.533	-0.041	17.421	16.948	0.473
19.221	48.735	-5.856	487.171	486.651	0.107	18.381	17.792	0.589

3. 여자계 모델정수 유도 및 결정

정지형 여자시스템은 여자용 전원으로 발전기 단자전압 및 전류 페이저의 합성분으로 표현되는 발전기 내부 값을 사용한다. 서천 T/P #1의 여자시스템의 제작처 공급 모델은 EXST3이다. 제작처 공급 모델 정수를 초기 값으로 하여 결정된 여자시스템 모델 정수는 아래와 같다. 또한 발전기 직측 계자 시정수(Tdo')의 결정은

AVR 스텝 응답시험으로 운전모드를 전환하는 방법으로 측정된 데이터로부터 결정하였다. 즉, MVR Mode(수동 모드)에서 AVR Mode(자동모드)로의 모드전환시 측정된 계자전압과 발전기 단자전압이 PSS/E로 모의된 값에 일치하도록 발전기 직측 계자 시정수를 결정하였다. PSS/E 프로그램에서 적당한 여자시스템 모델은 그림 3과 같은 "EXST3"로 결정할 수 있다. 모델정수의 결정은 정지형 여자를 사용하므로 트랜스듀서, 시정수, 이득을 결정하였다. 그림 4는 측정된 발전기 단자전압을 입력하여 계산된 계자전압을 나타낸다. 모델 정수 결정은 측정된 단자전압(Vt)과 계자전압(Efd)을 동시에 모의될 수 있는 값으로 결정하였다.

결정된 Tdo' = 10.55943 sec

결정된 EXST3 모델 정수

TR	VIMAX	VIMIN	KJ	TC	TB
0.020	0.200	0.200	200.0	1.000	3.050
KA	TA	VRMAX	VRMIN		
8.500	0.400	0.725	0.000		
KG	KP	KI	EFDMAX	KC	
1.000	4.800	0.000	4.1000	0.100	
XL	VGMAX	THETAP			
0.000	4.1000	0.000			

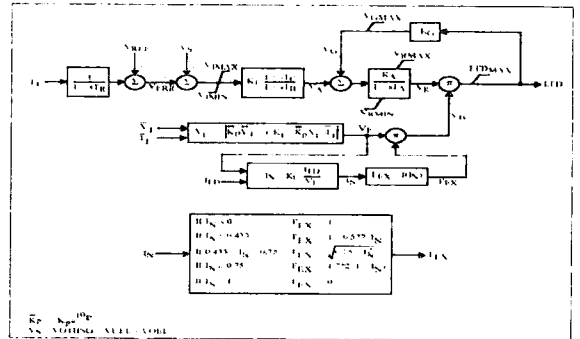


그림 3 여자시스템 모델 "EXST3"

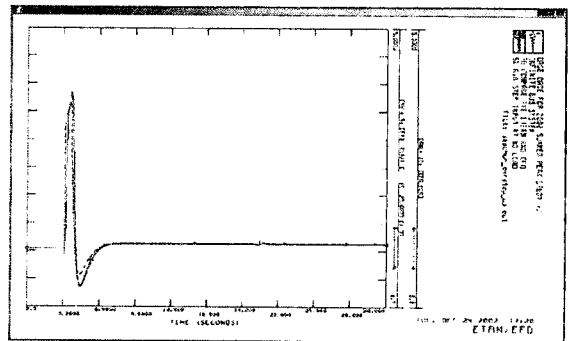


그림 4 무부하 모드전환시 측정/모의된 계자전압 비교

4. 조속기/터빈 정수 유도 및 결정

화력의 터빈/조속기 모델로는 HP, IP 그리고 LP를 표현할 수 있는 IEEE11 모델이 적당하다. 실제 조속기/터빈 제어와 동적 행동은 각각의 부하조건 상황에 따라서 다르며 보일러 제어와도 밀접한 관계를 갖는다. 그리고 IEEE11과 같은 낮은 주파수대의 안정도용 모델은 발전기가 정격부하에서 운전되고 있으며 보일러

의 압력은 일정하다는 가정을 전제로 하고 있다. 이 모델에 대한 제어정수의 유도 및 결정은 제작처 제공의 데이터나 IEEE Working Group Report에서 권고하는 값들을 참조해서 결정하였다.

$K = 20.0$ (Droop, 5.0%)

$T1 = T2 = 0.0$

$U_0 = 0.1$ pu/s (Opening)

$U_c = -0.2$ pu/s (Closing)

$P_{max} = 221.4/246.0 = 0.9000$ (최대부하)

$P_{min} = 73.8/246.0 = 0.3000$ (30% 부하)

$T3 = 0.10$ Sec (Servo motor)

$T4 = 0.3$ sec (Chamber)

$T5 = 7.0$ sec (Reheater)

$T6 = 0.4$ sec (Crossover)

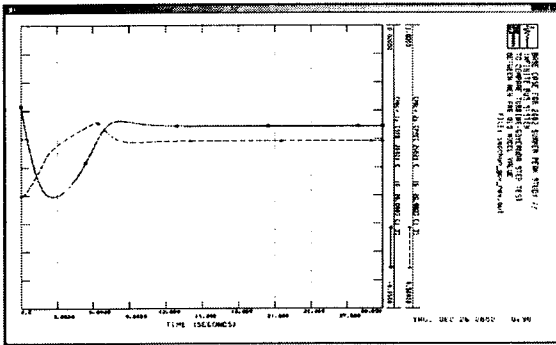


그림 5 조속기 시스템 모의 결과(Pmech=10%)

5. 결 론

서천화력 1호기 특성시험에서 측정된 데이터를 분석하여 PSS/E의 안정도용 발전기/제어계 정수를 결정하였고, 실측데이터와 비교하여 檢證하였다. 기존의 발전기 데이터는 제작처에서 공급한 값으로 실제 측정된 발전기 특성을 나타내지 못한 반면에, 결정된 신규모델은 발전기 제어계 측정시험시 측정된 데이터와 보다 근접함을 확인하였다. 제어시스템을 포함한 발전설비에 대한 모델 및 정수를 결정하기 위해서는 정상상태 및 동특성 측정 시험을 수행함으로써 각각의 발전설비의 특성을 측정하였다. 발전기 모델 및 정수는 무부하포화곡선, V-곡선 및 부하차단시험 결과로부터 각각의 정수를 결정하였고, 여자시스템은 AVR Step 시험 결과로부터 모델 및 모델 정수를 결정하였다. 결정된 AVR/여자기 모델과 정수는 측정된 결과로부터 유도되었기 때문에 기존의 모델과 달리 실제 응동에 가깝게 모의할 수 있다. 또한, 기존의 조속기/터빈 모델과 정수는 매우 간략한 모델에 전형적인 값을 갖나 결정된 모델과 정수는 실제자료와 측정된 응동 특성을 기초로 결정되었다.

결론적으로 본 논문에서는 현재 운전중인 발전기 및 제어계에 대한 특성시험을 수행하고 모델 및 모델정수를 결정함으로써 안정도 해석용 데이터의 정밀성을 향상시킬 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] P. Kundur, "Power System Stability and Control," McGraww-Hill, 1994

- [2] F. P. de Mello, J. R. Rebeiro, "Derivation of Synchronous Machine Parameters from Tests," IEEE Trans., PAS Vol. PAS-96, 1977
- [3] F.P. de Mello, et al, "Determination of Synchronous Machine Electrical Characteristics by Test," IEEE Trans., PAS, Vol. PAS-102, 1983
- [4] L.N. Hannett and J.W. Feltes, "Derivation of Generator, Excitation system and Turbine Governor Parameters from Test," 1993
- [5] M. Namba, J. Hosoda, S. Doi, M. Udo, "Development for Measurement of Operating Parameters of Synchronous Generator and Control Systems," IEEE Trans., PAS, Vol. PAS-100, 1981
- [6] F. P. de Mello, L. H. Hannett, "Validation of Synchronous Machine Models and Derivation of Model Parameters from Test," IEEE Trans., PAS, Vol. PAS-100, 1981