

# 현장 계측을 통한 산업용 열병합 발전설비 모델 파라미터 결정

(Model Parameter Determination of Industrial Co-generator Model Parameters through Filed Measurement)

김학만\*

(Hak-Man Kim)

## 요 약

본 논문에서는 열병합 발전시스템의 특성 실험으로 구한 실측데이터를 이용하여 발전시스템의 모델 파라미터를 결정하는 기법을 제안하였고 이에 대한 타당성을 입증하였다. 제안한 모델은 발전기, 여자시스템, 터빈/조속기를 주로 다루었다. 도출된 파라미터의 타당성을 검토하기 위해서 실측값과 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 시뮬레이션 결과를 실측결과와 일치함을 확인하였습니다.

## Abstract

This paper presents a method for the derivation of model parameters of a co-generation system using data measured through on-site generator characteristic testing and validates its model parameters. Dynamic models such as generator, excitation system, and turbine/governor are mainly dealt in this paper. For the purpose of validation of derived model parameters, the measured results are compared with simulation results. The comparisons between measured results and simulation results show good match.

Key Words : DG, Co-Generator, Model Parameter, On-Site Characteristic Testing, Validation Of Model Parameters

## 1. 서 론

열병합 발전 시스템은 전력과 열을 동시에 생산하여 에너지중합효율이 85[%]되는 고효율 발전원으로 아파트단지, 상업용 건물, 대형 산업체 단지 및 전력회사의 대용량 발전단지로 적용용도에 따라서 다양한 수십[kW]급에서 수십만 [MW]급에 이르는 다양

한 용량으로 구성되어 있다.

대형 산업체 단지에서는 소비되는 전력을 대형 전력회사인 한전에서 수전 받을 뿐만 아니라 자체적으로 열병합 발전설비를 갖추고 운전하고 있다. 이것은 전력계통에서 임의의 사고가 발생하여 전력공급이 불가능 할 때, 산업체 단지의 중요부하를 감당하여 손실을 최소화 하기 위함이며, 또한 정상시는 전력요금을 절약하는 경제적인 이유도 가지고 있다. 또한 산업체 단지의 성격에 따라서 평상시 보일러에서 발생하는 열을 이용하여 열 부하에 공급하기도 한다. 소규모의 자가 발전시스템은 대형 전력계통에

\* 주저자 : 한국전기연구원 전력연구단 선임연구원  
Tel : 031-420-6180, Fax : 031-420-6009  
E-mail : hmkim@keri.re.kr  
접수일자 : 2007년 9월 27일  
1차심사 : 2007년 10월 8일  
심사완료 : 2007년 10월 18일

## 연장 계측을 통한 산업용 열병합 발전설비 모델 파라미터 결정

비해 그 규모가 미약하므로 계통의 임의의 사고 시, 동작하는 보호 계전기의 정정, 중요부하를 보호하기 위한 부하차단 전략 등은 자가 발전시스템의 안정도를 결정하는데 매우 중요하다. 이러한 임의의 사고 시를 상정하여 안정도 해석하기 위해서는 발전시스템의 정확한 모델링과 그 파라미터 결정이 요구된다.

본 논문에서는 열병합 발전시스템에 대한 모델 파라미터를 실측 데이터를 이용하여 전기와 관련 파라미터를 유도하는 방법을 제안한다. 실측에 이용된 발전시스템은 L사의 열병합 발전시스템으로서 현장 테스트를 통하여 열병합 발전기의 파라미터를 도출한다. 또한 도출된 파라미터의 타당성을 검토하기 위해서 실측값과 시뮬레이션 결과를 비교하며, 비교 결과 실측결과와 근접한 우수한 결과를 확인하고자 한다.

## 2. 테스트 열병합 발전시스템 사양

테스트 발전시스템인 L사의 발전기/제어계 모델 파라미터 결정을 위해서 시험된 L사의 발전시스템에 대한 설비사양은 표 1과 같다. 발전기를 회전시키는 원동력은 디젤엔진이며 사용되는 연료는 경유이다. 그리고 여자시스템은 brushless 여자시스템이고,

조속기는 우드워드의 디지털 PI제어기를 사용하고 있다. 그리고 동기발전기는 저속의 도시바 14극 돌극형 발전기가 사용되고 있다. 발전기 파라미터 결정 절차는 그림 1과 같으며 측정장비는 미국 PTI사의 DSM을 이용하였다.

표 1. 테스트 열병합 발전시스템 사양  
Table 1. Specification of test co-generation system

설비	설 명	비 고
발전기	상수 : 3 극수 : 14극 용량 : 7375[KVA] 회전수 : 514[RPM] 정격전압 : 6,600[V] 정격전류 : 646[A] 역률 : 0.8 여자전압 : 265[V] 계자전류 : 177[A]	돌극형 발전기
여자기	극수 : 12 용량 : 75[KVA] 회전수 : 514[RPM] 정격전압 : 225[V] 정격전류 : 193[A] 여자전압 : 55[V] 계자전류 : 16.2[A]	Brushless 여자시스템
PMG	극수 : 12 정격용량 : 3[KVA] 회전수 : 514[RPM] 정격전압 : 80[V] 정격전류 : 22[A] 주파수 : 51.4[Hz]	영구자석 발전기
조속기	원동기 : 디젤 엔진	PID 제어

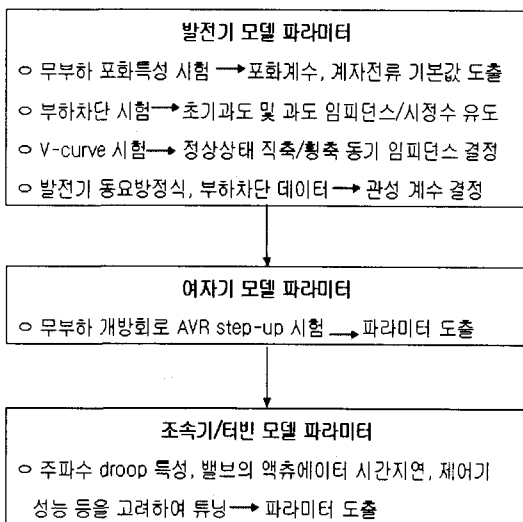


그림 1. 파라미터 결정 절차  
Fig. 1. Procedure of parameter decision

## 3. 발전시스템 모델 파라미터 유도

테스트 발전시스템 모델 파라미터 유도는 F.P deMello의 부하차단에 의한 시험방법과 유도방법[1]을 기본으로 해서 유도하며, 사용된 발전기 모델은 미국 PTI사의 PSS/E의 돌극형 발전기 모델인 "GENSAL"[2]을 이용하였다. 그리고 "GENSAL"의 전달함수 블록도는 그림 2와 같다.

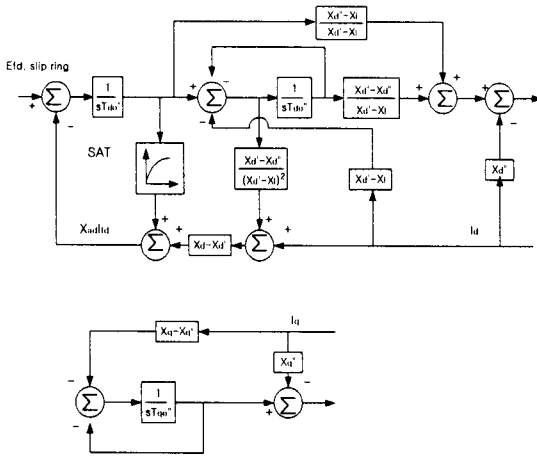


그림 2. 돌극형 발전기 모델 'GENSAL'  
Fig. 2. Salient-pole type generator model 'GENSAL'

그림 2의 “GENSAL”에 대한 모델 파라미터 유도는 측정된 포화특성시험, 부하차단시험, V-Curve 시험 데이터를 이용하여 다음과 같이 유도하였다.

### 3.1 무부하 포화 계수 유도

그림 2의 발전기 모델 “GENSAL”의 파라미터 입력으로 사용되는 포화계수를 측정된 표 2의 데이터를 이용하여 무부하 포화곡선을 계산하여 외삽법과 보간법을 이용하여 그래프로 나타내면 그림 3과 같다. 얻어진 무부하 포화곡선으로부터 포화계수와 제자전류 기본 값을 결정하면 아래와 같다.

$$S(1.0) = 0.3558, S(1.2) = 0.6865$$

$$I_{fdbase} = 3.0877[\text{Adc}]$$

### 3.2 초기 과도 및 과도 임피던스/시정수 유도

발전기 모델의 초기과도(subtransient)와 과도(transient)상태시의 발전기 임피던스/시정수결정은 부하차단시 단자자속의 변화로부터 유도할 수 있다. 부하차단 전의 발전기 운전조건은 발전기 고정자 전류가 직축 또는 횡축전류만 흐르는 조건이어야만 한

표 2. 무부하 포화곡선 시험 결과  
Table 2. No-load saturation curve test results

Freq.(Hz)	Vab(kV)	ifd([Adc])	Act_s(Vdc)	Vcb(kV)
60.03	5.82	3.30	1.56	5.86
60.03	5.94	3.43	1.55	5.98
60.03	6.26	3.82	1.56	6.30
60.04	6.60	4.20	1.55	6.63
60.02	6.66	4.30	1.57	6.70
60.03	6.72	4.35	1.55	6.75
60.02	6.77	4.42	1.57	6.81
60.04	6.84	4.52	1.55	6.88
60.03	6.90	4.58	1.55	6.94
60.03	6.96	4.64	1.55	7.00

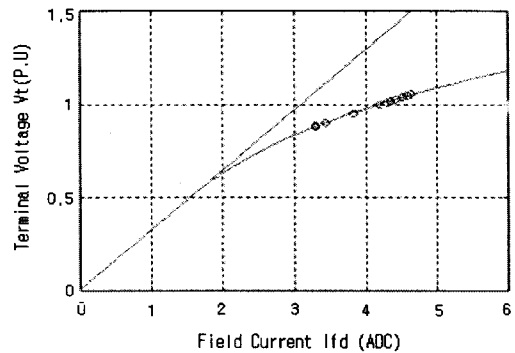


그림 3. 무부하 포화곡선  
Fig. 3. No-load saturation curve

다. 고정자 전류가 직축분의 성분이 가질 조건은 유효출력이 제로이어야 하며, 무효전력은 부하차단후의 단자전압상승을 막기 위해서 보통 진상운전으로 둔다. 먼저 직축 발전기 임피던스와 시정수를 계산하기 위해서 직축 부하조건에서 차단된 측정된 데이터를 이용하고, 발전기 파라미터를 유도하면 아래와 같다. 유도방법은 앞에서 언급한 바와 같이 문헌[1]과 같다.

직축 부하차단 조건 : 단자전압 6.57[kV],  
-80[kVar], 0.0[kW]

유도된 파라미터 :  $X_d=1.28, X_d''=0.252, X_d'=0.410,$   
 $T_{d0}'=0.761, T_{d0}''=0.0465$

연장 계측을 통한 산업용 열병압 발전설비 모델 파라미터 결정

그림 4는 유도된 직축분 발전기 파라미터를 이용하여 부하차단시 측정된 단자자속(단자전압에서 주파수 변화분을 제거함)을 모의한 것이다. 측정된 값(노이즈가 많은 자속)과 모의된 값(노이즈가 없는 자속)이 거의 동일함을 알 수 있다.

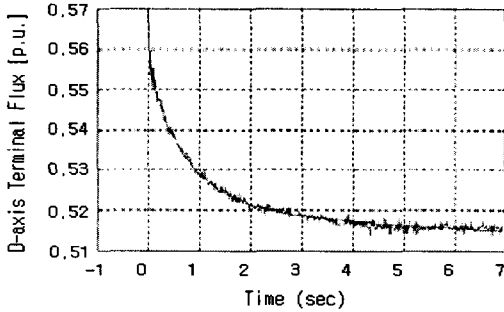


그림 4. 무부하 포화곡선  
Fig. 4. No-load saturation curve

횡축분 발전기 파라미터 결정은 고정자 전류가 횡축전류만 흐르는 조건에서 차단된 발전기 단자자속을 이용하여 결정한다. 본 논문에서는 횡축분 파라미터 유도를 위한 부하차단은 대략 횡축분 고정자 전류가 지배적인 조건인 유효전력과 무효전력의 비가 10:1정도의 조건에서 차단된 단자자속을 이용하여 유도하였다. 부하차단 조건과 유도된 횡축분 파라미터는 다음과 같다.

부하차단 조건 : 587[kW], -69.5[kVar],  $V_t=6.5732$   
유도된 파라미터 :  $X_d=0.43$ ,  $T_{q0}''=0.0470$

그림 5는 위 운전조건에서 차단된 후의 단자자속을 모의한 것이다. 모의된 값(+표시)과 측정된 단자자속값(-표시)이 거의 동일함을 알 수 있다.

3.3 정상상태 직축/횡축 동기 임피던스 결정

표 3과 같이 정상상태에서 측정된 V-curve 시험 데이터를 이용하면, 앞에서 결정된 정상상태 직축/횡축 동기 임피던스( $X_d$ ,  $X_q$ )를 더 정확하게 결정할

수 있다. 앞에서 부하차단시 유도된 동기 임피던스는 저부하에서 유도된 값으로 정격운전 상태에서의 발전기의 포화특성 등을 제대로 반영되지 못하는 특징이 있다. 여기서는 누설 임피던스를 대표적인 값  $X_l=0.150$ 으로 설정하였다.

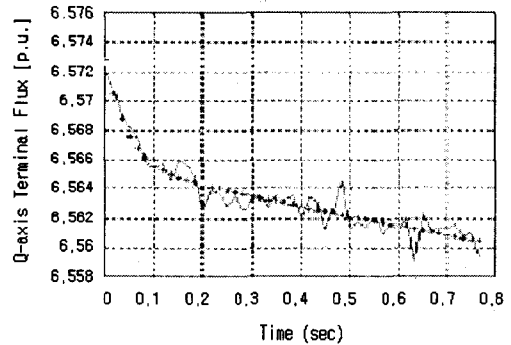


그림 5. 직축 파라미터 유도 및 검증  
Fig. 5. d-axis parameter derivation and validation

표 3. 부하 곡선 시험 결과  
Table 3. Load curve test results

Freq ([Hz])	Vab ([kV])	P ([MW])	Q ([MVAR])	Ifd ([Adc])	Act ([Vdc])	Vcb ([kV])
60.007	6.519	1.466	0.091	4.326	2.943	6.587
59.961	6.595	1.499	1.145	5.454	2.946	6.662
59.996	6.690	1.967	2.074	6.492	3.208	6.755
59.990	6.616	2.030	1.050	5.382	3.226	6.681
59.996	6.522	2.013	0.092	4.440	3.229	6.589
59.949	6.561	2.569	0.593	5.160	3.550	6.626
60.010	6.657	2.449	1.578	6.084	3.466	6.727
59.962	6.695	3.020	2.029	6.696	3.825	6.764
59.947	6.605	3.023	1.096	5.730	3.851	6.669
59.951	6.509	3.002	0.078	4.806	3.809	6.574
59.961	6.560	3.469	0.581	5.442	4.103	6.624
59.965	6.637	3.476	1.515	6.330	4.116	6.704

표 4와 같이 측정된 계자전류를 최적으로 모의할 수 있는 값은 아래와 같다. 사용된 해석기법은 최적화 기법이며, 결정된 값은 측정된 계자전류와 모의된 계자전류값의 목적함수가 최소가 되는 직축/횡축 동기 임피던스 값이다.

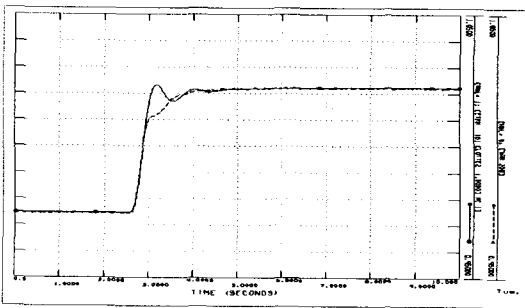


연장 계측을 통한 산업용 열병압 발전설비 모델 파라미터 결정

값을 이용하여 측정된 발전기 단자전압 스텝업 시험을 모의하면 그림 7과 같다.

표 6. 결정된 'IEEX2' 모델 파라미터  
Table 6. Determinated 'IEEX2' model parameters

파라미터	파라미터값	파라미터	파라미터값
TR	0.015	TE	0.250
KA	250.0	KF	0.0
TA	0.015	TF1	1.0
TB	20.0	TF2	1.0
TC	1.00	E1	3.0
VRMAX	4.00	S(E1)	0.30
VRMIN	-4.00	E2	4.50
KE	1.00	S(E2)	0.800



(- : simulation voltage, -- : measured voltage)

그림 7. 무부하 개방회로 AVR 스텝업 시험시 발전기 단자전압

Fig. 7. Terminal voltage during no-load open circuit AVR step-up test

5. 조속기/터빈 모델 파라미터 유도

L사 터빈 시스템은 디젤엔진이며 조속기는 우드워드의 디지털 PI형 조속기로 본 논문에서는 그림 8의 화력기 조속기/터빈 모델 "IEESGO"를 이용하여 L사 조속기/터빈 시스템의 특성이 나오도록 결정하였으며 결정된 모델 파라미터는 표 7과 같다.

그림 9는 무부하 개방회로시 조속기 스텝업 시험시 측정된 주파수 편차를 모의한 것으로, 모의된 주파수 편차(실선: -)와 측정된 주파수 편차(단선: --)가 대체적으로 잘 일치하고 있다.

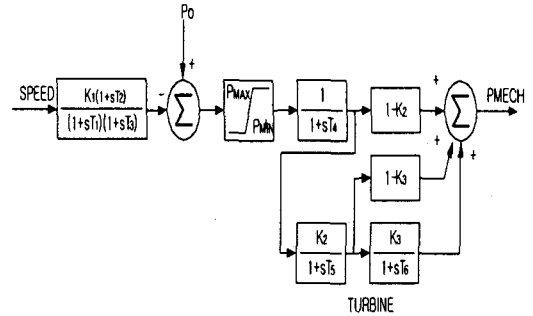
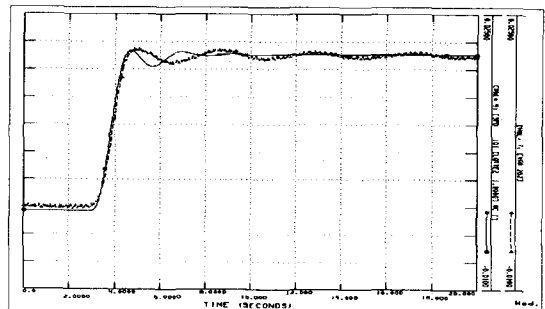


그림 8. IEEE Standard 'IEESGO' 조속기/터빈 모델  
Fig. 8. IEEE Standard 'IEESGO' governor/turbine model

표 7. 'IEESGO' 모델 파라미터  
Table 7. 'IEESGO' model parameters

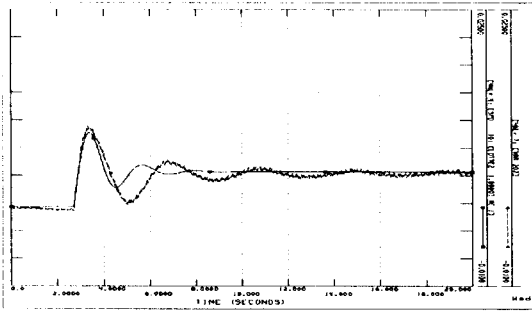
파라미터	파라미터값	파라미터	파라미터값
T1	0.01	K1	17.69
T2	0.10	K2	1.0
T3	0.05	K3	0.0
T4	0.65	PMAX	0.85
T5	0.05	PMIN	-0.2
T6	0.00		



(- : simulated freq. deviation, -- : measured freq. deviation)

그림 9. 무부하 개방회로 조속기/터빈 스텝업 시험  
Fig. 9. No-load open circuit governor/turbine step-up test

그림 10는 부하차단후의 주파수 편차 변화를 모의한 것으로, 모의된 주파수(실선: -)와 측정된 주파수(단선: --)이 잘 일치함을 알 수 있고, 부하차단 직후의 초기 주파수 편차 변화는 두 개가 거의 일치하고 있어 유도된 관성계수 H가 정확함을 확인할 수 있다. 또한 두 개의 주파수가 정상상태로 수렴시 잘 일치함으로 드롭(drop)을 표현하는 파라미터  $K_1=17.69$ 를 검증할 수 있다.



(-: simulated freq. deviation, --: measured freq. deviation)

그림 10. 부하차단(587(kW)) 후 주파수 편차  
Fig. 10. Frequency deviation after load shedding 587(kW))

## 6. 결 론

본 논문에서는 측정된 발전기 특성시험데이터를 이용하여 테스트 발전시스템에 대한 모델 파라미터 값들을 신뢰성 있는 값으로 유도하였고, 여자기 모델 파라미터는 무부하 개방회로 AVR 스텝시험에서 측정된 단자전압을 모의하는 값으로 모델 파라미터를 결정하였다. 조속기/터빈 모델 파라미터 유도는 이 시스템 적당한 PSS/E 프로그램 내부 모델이 없는 연유로 화력기 모델인 "IEESGO"를 모델을 이용하여 테스트조속기와 터빈 성능특성이 나오도록 튜닝하였다. 유도된 모델 파라미터는 측정된 무부하 개방회로 조속기 스텝시험과 부하차단시 주파수 편차특성을 모의하여 검증하였다.

이와 같이 본 논문은 유도된 테스트 발전 시스템

모델 파라미터 결정은 측정된 데이터를 이용하여 유도하였으며, 측정된 값과 비교하여 그 모델 파라미터 값들 검증하였다. 따라서 본 논문에서는 유도된 결정된 모델 파라미터 값을 이용하면, 신뢰도 있는 자가 발전시스템의 안정도 해석이 가능하므로 보다 정확한 보호 계전기 정정이나 임의의 사고 시의 효과적인 부하차단 전략수립이 가능하다고 판단된다.

## References

- [1] F.P. de Mello, J.R.Rebeiro, "Derivation of Synchronous Machine Parameters from Tests", IEEE Trans. PAS Vol. PAS-96, pp.1211-1218, 1977.
- [2] PTI, Digital Simulator PSS/E 24 User Manual.
- [3] F.P. de Mello, L.N.Hannett, "Representation of Saturation in Synchronous Machines", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRS-1, No-4, pp.8-18, 1986.
- [4] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, Inc., New York, 1994.
- [5] P. Sauer and M. Pai, "Power System Dynamics and Stability", Prentice Hall, 1998.
- [6] H.B. Karayaka, A. Keyhani, G.T. Heydt, B.L. Agrawal and D.A. Selin, "Synchronous Generator Model Identification and Parameter Estimation from Operating Data", IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 18, pp. 121-126, 2003.

## ◆ 저자소개 ◆

### 김학만 (金學萬)

1966년 2월 11일생. 1991년 성균관대 공대 전기학과 졸업. 1993년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국전기연구원 융합기술연구단 선임연구원.