

현장 측정에 근거한 열병합 발전 시스템의 제어, 보호 해석용 EMTDC 모델 수립

(EMTDC Model Development for Control & Protection Analysis of Co-Generation System based on On-site Characteristic Tests)

김학만* · 신명철

(Hak-Man Kim · Myong-Chul Shin)

요 약

열병합 발전 시스템이 급속히 보급되고 있으며, 대부분 계통 연계형으로 운전될 것으로 예상되며 안정된 계통의 운용을 위해서 연계 계통과의 보호, 제어 해석을 위한 모델이 요구된다. 본 논문에서는 열병합 발전 시스템의 제어, 보호 해석용 EMTDC 모델을 현장 계측에 근거하여 수립하였다. 그리고 특성 시험을 통하여 모델의 파라미터 정정을 하였으며 수립한 EMTDC 모델을 실 현장 시스템에 적용하여 계통 고장에 대해서 제어, 보호 등의 동특성 해석을 수행하였다. 그리고 시뮬레이션 결과를 검토하여 제시한 모델의 타당성을 보였다.

Abstract

Co-generation systems have been spreading rapidly over the past 10 years in Korea and most of these systems are interconnected with electric power systems. However, better control and protection models are still needed for analysis of these systems to ensure stable operation with the grid. This paper proposes improved EMTDC models for control and protection analysis of grid-connected co-generation systems. Through on-site characteristic testing, the models were developed and the model parameters were determined. The models were applied to a field co-generation system, and analysis of control and protection was performed showing a good match to the simulation results.

Key Words : co-generation EMTDC model, on-site characteristic test, control & protection analysis

1. 서 론

우리나라의 급속한 경제 발전으로 인해 전력 수요가 급증하고 있으며, 이에 따라 전원 설비, 송전 선로 등이 건설되고 있다. 그러나 환경 문제에 대한 인식이 높아지면서 발전 및 송전 선로의 건설을 위한 부지 확보가 심각한 문제로 대두됨에 따라, 에너지 절

* 주저자 : 한국전기연구원 융합기술연구단 선임연구원
Tel : 031-420-6134, Fax : 031-420-6139
E-mail : hmkim@keri.re.kr
접수일자 : 2006년 4월 7일
1차심사 : 2006년 4월 12일
심사완료 : 2006년 4월 19일

약 및 대체 에너지 개발이 새로운 관심 분야로 떠오르고 있다. 이와 함께 규제 완화에 의한 전기 사업자의 다양화 및 분산 전원에 의한 송전 용량의 감소도 전력 수송의 문제를 해결하는 방법으로 해외에서는 많은 연구가 진행되어 왔다.

특히 열병합 발전 시스템은 전력과 열을 동시에 생산하여 에너지종합효율이 85[%]되는 고효율 발전 원으로써 아파트단지, 상업용 건물, 대형 산업체 단지 및 전력회사의 대용량 발전단지로 적용 용도에 따라서 다양한 수십 [kW]급에서 수십만 [MW]급에 이르는 다양한 용량으로 구성되며 전력의 안정 공급 및 신뢰도 유지, 질적인 향상 및 경제성 유지를 위해서는 전력회사와의 연계가 불가결하다. 이 경우 계통이 정상일 때 전압·주파수에의 영향, 전원의 기동·정지 내지 사고 시 계통 운용에의 영향, 또는 반대로 전력계통에서 사고가 발생했을 때 열병합 발전 시스템의 거동과 그 계통에의 영향 등으로 문제가 생길 가능성이 있으므로 계통을 연계할 때는 확실하고 적절한 대응을 해야 한다.

따라서 본 논문에서는 열병합 발전 시스템의 제어, 보호 해석을 목적으로 전자계 과도해석용 프로그램인 EMTDC의 모델을 현장 계측에 근거하여 수립하였다. 그리고 특성 시험을 통하여 모델의 파라미터 정정을 하였으며 수립한 EMTDC 모델은 현장 시스템에 적용하여 계통 고장에 대한 동특성 해석을 수행하여 제시한 모델의 타당성을 보였다.

2. 열병합 발전 시스템의 현장 계측

본 논문에서 열병합 발전 시스템의 현장 계측을 이용하여 열병합 발전 시스템의 해석용 모델을 개발하기 위하여 실측에 이용한 열병합 발전 시스템은 I사의 2호기에 대해서 수행하였으며, 발전기를 회전시키는 원동력은 디젤엔진이며 사용되는 연료는 경유이다. 그리고 여자시스템은 brushless type이고, 조속기는 우드워드사의 디지털 PI제어기를 사용하고 있다. 그리고 동기발전기는 저속의 도시바 14극 돌극형 발전기가 사용되고 있다. 모델과 파라미터 선정은 그림 1의 절차와 특성 시험을 이용하여 결정하였다.

대상발전기 모델 파라미터 유도는 F.P deMello의

부하차단에 의한 시험방법과 유도방법[1]을 기본으로 해서 유도하며, 사용된 발전기 모델은 "GENSAL[2]"을 이용하였다. "GENSAL"의 전달함수 블록도는 그림 2와 같다. 그림 2의 발전기 모델 "GENSAL"에 대한 모델정수 유도는 측정된 포화특성 시험, 부하차단시험, V-Curve시험 데이터를 이용하여 다음과 같이 유도하였다.

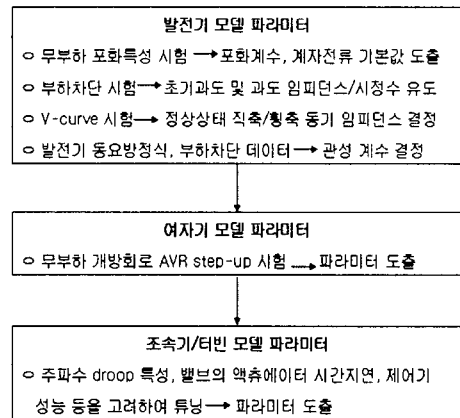


그림 1. 파라미터 결정 절차
Fig. 1. Procedure of parameter decision

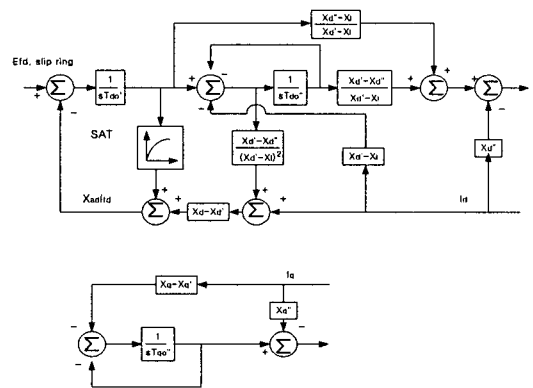


그림 2. 돌극형 발전기 모델 'GENSAL'
Fig. 2. Salient-pole type generator model 'GENSAL'

그림 2의 "GENSAL"의 모델정수 입력으로 사용되는 포화계수를 측정 데이터를 이용하여 무부하 포화곡선을 계산하고 다음과 같이 포화계수와 계자전류 기본 (base, p.u. 값으로 계산하기 위한 값)값을 결정하였다.

$$S(1.0) = 0.3558$$

$$S(1.2) = 0.6865$$

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

발전기 모델의 초기과도(subtransient)와 과도(transient)상태시의 발전기 임피던스/시정수결정은 부하차단 시 단자자속의 변화로부터 유도하였는데, 직축 부하조건에서 차단된 측정된 데이터를 이용하고, 발전기 정수를 유도하면 아래와 같다. 유도방법은 앞에서 언급한 바와 같이 문헌[1]에 의거하였다.

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

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

횡축분 발전기 정수 결정은 고정자 전류가 횡축전류만 흐르는 조건에서 차단된 발전기 단자자속을 이용하여 결정하는데, 부하차단 조건과 유도된 횡축분 정수는 다음과 같다.

부하차단 조건 : 587 [kW], -69.5 [kVar],
 $V_t=6.5732$

유도된 파라미터 : $X_q=0.43, T_{qo}''=0.0470$

그리고 직축/횡축 동기 임피던스 값은 최적화 기법을 이용하여 측정된 계자전류와 모의된 계자전류 값의 목적함수가 최소가 되는 직축/횡축 동기 임피던스 값을 다음과 같이 선정하였다. 여기서 누설 임피던스는 대표적인 값 $X_l=0.150$ 으로 설정하였다.

결정된 동기 임피던스 : $X_d=1.5735, X_q=0.8346$

누설 임피던스 : $X_l=0.150$ (가정한 값)

발전기 관성계수 결정방법은 식 (1)의 발전기 동요방정식(swing equation)과 측정된 부하차단 데이터를 이용하여 유도 결정된다.

$$2H \frac{d\omega}{dt} = P_{mech} - P_{elec} = Pa(\text{가속력}) \quad (1)$$

관성계수 H를 결정하기 위해서 587[kW]에서 부

하 차단된 데이터를 이용하여 관성계수를 결정한다. 부하차단후의 가속력(Pa)은 기계적 토크와 같으면 이 값은 전기적 출력 587[kW]와 동일하다. 주파수 변화분은 차단직후의 주파수의 기울기 값이다. 이 두 값을 이용하여 관성계수 H를 계산하면 아래와 같이 H=1.71이다. 최종 결정된 L사 디젤엔진 발전기 2호기에 대한 발전기 정수는 표 1과 같다.

관성계수(Machine Base : 7.375 MVA) :

$$H = \frac{\Delta P_a}{2 \frac{d\omega}{dt}} = \frac{0.587/7.375}{2 * 0.02329} = 1.71 \quad (2)$$

표 1. 결정된 'GENSAL' 모델 파라미터
 Table 1. 'GENSAL' model parameters determined

파라미터	파라미터값	파라미터	파라미터값
T_{do}'	0.741	X_q	0.8346
T_{do}''	0.0465	X_d'	0.410
T_{qo}''	0.0470	X''	0.252
H	1.71	X_l	0.150
D	0.00	S(1.0)	0.3558
X_d	1.5735	S(1.2)	0.6865

(BASE MVA = 7.375[MVA])

L사 2호기의 여자시스템은 brushless type으로 IEEE에서 brushless 여자시스템에 적합하다고 추천하는 "IEEEEX2" 모델을 이용하였다.

IEEEEX2 모델정수 결정은 무부하 개방회로 AVR 스텝업 시험을 이용하여 표 2의 파라미터를 유도하였다. 여기서 여자기의 포화는 일반적으로 권고되는 값을 이용하였다.

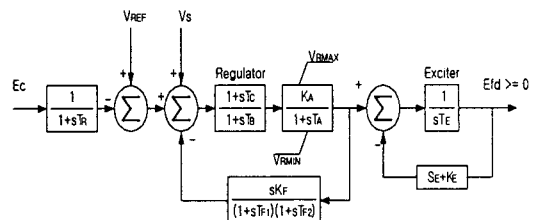


그림 3. IEEE brushless 여자기/AVR 모델 'IEEEEX2'
 Fig. 3. IEEE brushless Exciter/AVR model 'IEEEEX2'

연장 측정에 근거한 열병합 발전 시스템의 제어, 보조 해석용 EMTDC 모델 수립

표 2. 결정된 'IEEEX2' 모델 파라미터
Table 2. Determinated 'IEEEX2' model parameters

파라미터	파라미터값	파라미터	파라미터값
T_R	0.015	T_E	0.250
K_A	250.0	K_F	0.0
T_A	0.015	T_{F1}	1.0
T_B	20.0	T_{F2}	1.0
T_C	1.00	E_1	3.0
V_{RMAX}	4.00	$S(E_1)$	0.30
V_{RMIN}	-4.00	E_2	4.50
K_E	1.00	$S(E_2)$	0.800

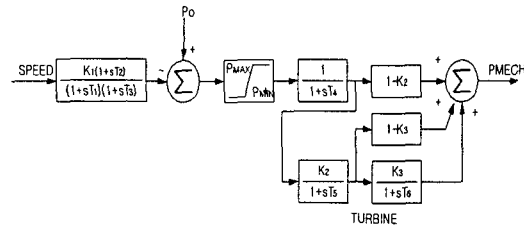


그림 4. IEEE Standard 'IEESGO' 조속기/터빈 모델
Fig. 4. IEEE Standard 'IEESGO' governor/turbine model

표 3. 결정된 'IEESGO' 모델 파라미터
Table 3. Determinated 'IEESGO' model parameters

파라미터	파라미터값	파라미터	파라미터값
T_1	0.01	K_1	17.69
T_2	0.10	K_2	1.0
T_3	0.05	K_3	0.0
T_4	0.65	P_{MAX}	0.85
T_5	0.05	P_{MIN}	-0.2
T_6	0.00		

L사 터빈 시스템은 디젤엔진이며 조속기는 우드 워드의 디지털 PI형 조속기이다. 조속기/터빈은 그림 4의 "IEESGO"를 이용하여 L사 조속기/터빈 시스템의 특성이 나오도록 표 3과 같이 결정하였다. K_1 의 결정은 측정된 주파수의 드롭 특성으로부터 계산되었으며, T_4 와 T_5 는 밸브의 엑츄에이터 시간지연특성이 나오도록 설정했고, T_1 , T_2 그리고 T_3 는 제어기의 성능특성이 나오도록 튜닝하였다. P_{MAX} 값은 기계

기본값 7.375 MVA의 85[%]에 해당되는 값으로, 발전기가 출력할 수 최대 발전량을 가정한 것이다.

3. EMTDC 모델

2장에서 유도한 모델과 파라미터를 이용하여 전력 시스템 해석용 프로그램인 EMTDC에서 모의할 수 있도록 그림 5의 EMTDC용 열병합 발전시스템의 모델을 개발하였다. 여기서 동기기 모델은 EMTDC에서 제공되는 모델을 이용하여 도출한 파라미터를 입력하였고 여자기와 터빈/조속기는 EMTDC모형을 개발하였다.

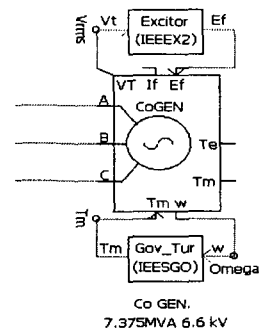


그림 5. EMTDC 열병합 발전시스템 모델
Fig. 5. EMTDC Cogeneration system model

그림 5의 각 모듈별로 나누어 보면, EMTDC의 여자기 모델은 그림 6과 같고 단자전압을 입력으로 하여 여자전압 EFD를 출력한다.

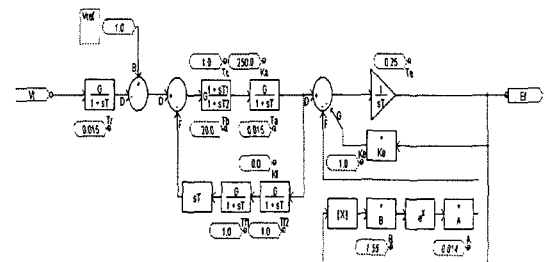


그림 6. EMTDC 'IEEEX2' 모델
Fig. 6. EMTDC 'IEEEX2' model

터빈/조속기의 모델은 그림 7과 같고 각속도를 입력으로 하여 기기의 토크를 출력한다.

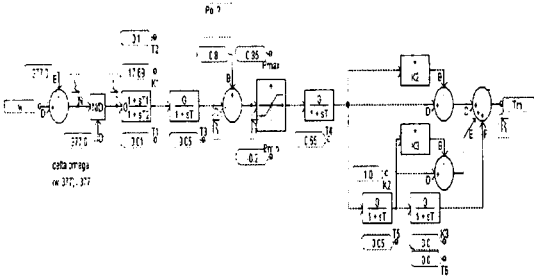


그림 7. EMTDC 'IEESGO' 모델
Fig. 7. EMTDC 'IEESGO' model

4. 적용 연구

3장에서 개발한 EMTDC용 열병합 발전시스템의 모델을 이용하여 실제 L사의 열병합 발전 시스템 계통에 적용하여 계통 고장에 대한 동특성을 검토하였다.

대상 시스템은 그림 8과 같다. 전력회사와 22.9 [kV] 선로로 연계되어 있으며, 6개의 열병합 발전기와 병렬로 연결되어 있다. 각 발전기에는 과전류 계전기가 설치되어 있다.

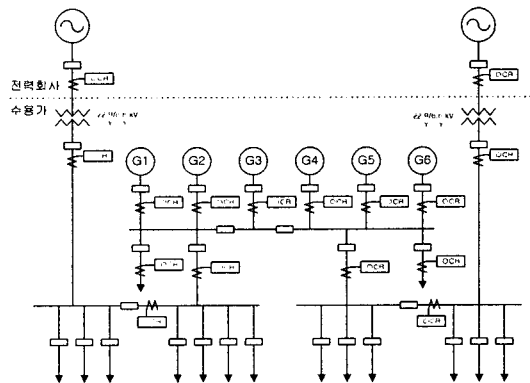


그림 8. 테스트 시스템
Fig. 8. Test system

이를 EMTDC로 모의하기 위해 발전량의 총량의 두 배인 85.4 [MW]의 부하를 설정하였다. 발전기 제어계 모델 파라미터는 2장에 기술된 것을 이용하였다. 그리고 EMTDC로 모의한 과전류 계전기의 동

작 특성을 보이기 위해 시뮬레이션 시작 15초 후에 발전기 G1의 a상에 지락 고장을 발생시켰다. 과전류 계전기의 설정 값은 1.4[kA], 시간 지연 40[msec]이며, 한시특성을 반영하였다. 모의에 이용하기 위해서 개발한 EMTDC의 과전류 계전기는 그림 9와 같다. 그림 8의 테스트 시스템은 개발한 EMTDC 모델을 이용하여 그림 10과 같이 EMTDC 상에서 구현된다.

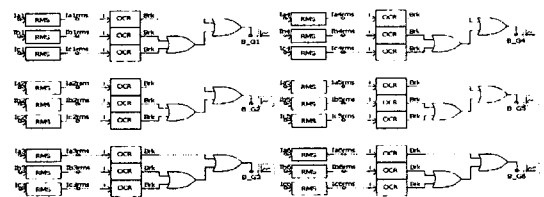


그림 9. EMTDC 과전류 계전기 모델
Fig. 9. EMTDC over-current relay model

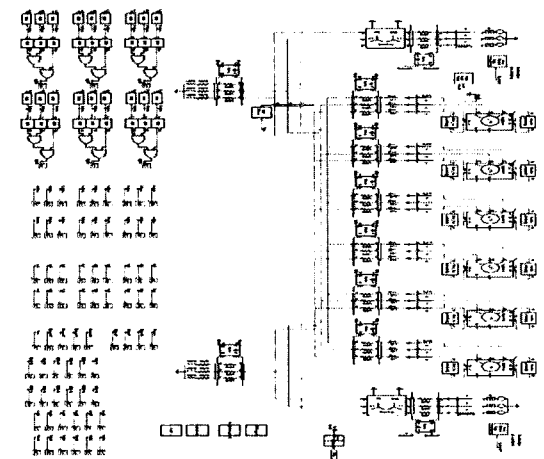


그림 10. EMTDC 모델로 구성된 테스트 시스템
Fig. 10. Test system composed by EMTDC model

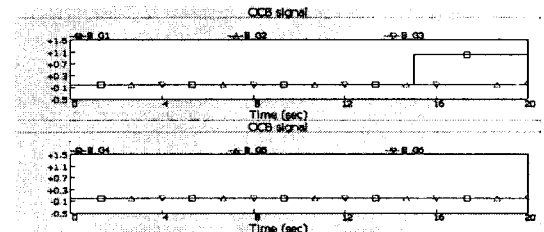


그림 11. 과전류 계전기 동작 신호
Fig. 11. Trigger signal of over-current relay

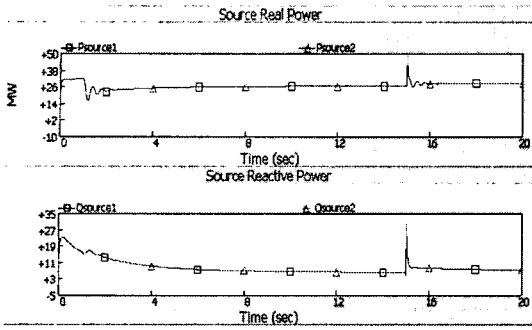
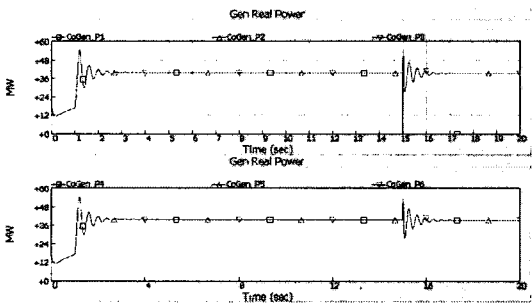
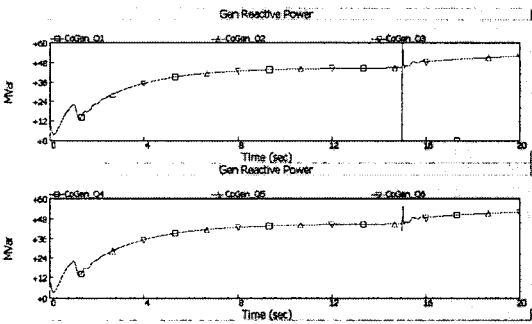


그림 12. 전원 측에서 공급되는 유효전력 및 무효전력
Fig. 12. Real and reactive power supplied from source



(a) 유효전력
(a) Real power



(b) 무효전력
(b) Reactive power

그림 13. 전원 측에서 공급되는 유효전력 및 무효전력
Fig. 13. Real and reactive power supplied from source

그림 11은 각 발전기의 과전류 계전기의 동작 신호를 나타낸 것이다. 15초에서 G1의 a상에 지락 고장을 발생시켜 발전기 G1의 차단기를 동작시키는 신호가 발생하며 나머지 발전기의 차단기 신호는 발

생하지 않는다.

그림 12는 시뮬레이션 기간 동안 전력회사로부터 수전하는 유효전력과 무효전력을 나타낸 것이다. 15초에 발전기 G1이 차단되어 과도 상태가 발생하고 안정된 후 전력회사에서 공급되는 전력이 조금 상승하는 것을 볼 수 있다.

그림 13은 각 발전기에서 공급하는 유효전력과 무효전력을 나타낸 것이다. 발전기 G1의 전력이 15초 후에는 과전류 계전기의 동작으로 차단됨을 볼 수 있다.

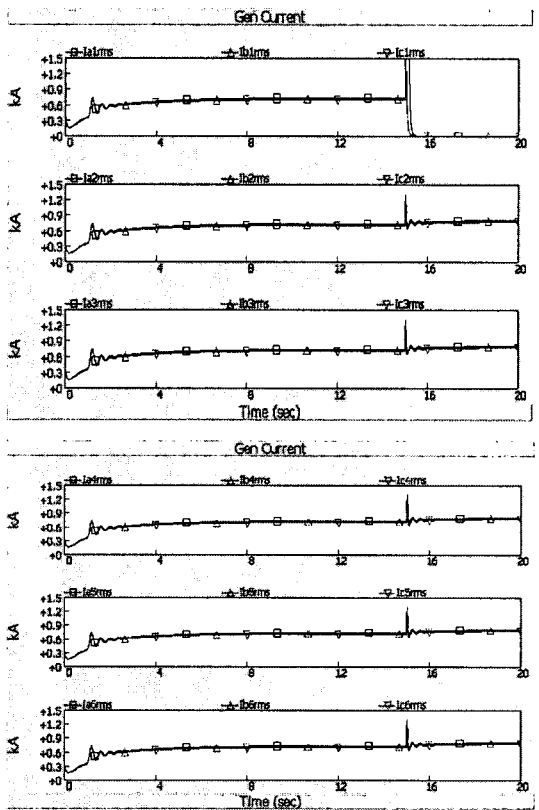


그림 14. 각 발전기들의 실효치 전류
Fig. 14. RMS currents of generators

그림 14는 각 발전기의 각상에 흐르는 전류의 실효값이다. 과전류 계전기는 설정 값 1.4[kA], time delay 40[msec]에서 동작하므로 G1의 a상을 제외한 나머지 전류는 1.4[kA]에 도달하지 않으므로 차단기가 동작하지 않았다.

그림 15는 부하들의 소비전력을 나타낸 것이다.

15초에서 발전기 G1의 차단으로 모선전압이 감소하여 소비전력이 감소하나 안정된 후 소비전력이 회복됨을 볼 수 있다.

그림 16은 발전기의 부하각을 나타낸 것으로 G1의 차단기 동작 후 다른 발전기들은 다시 안정화되는 것을 확인할 수 있다.

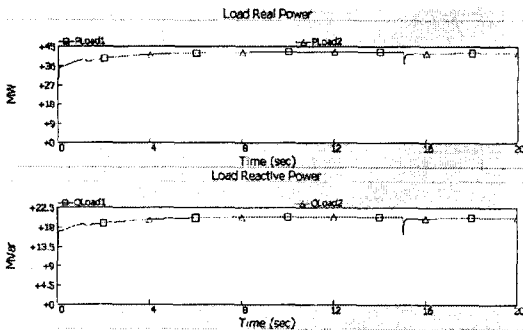


그림 15. 부하 전력
Fig. 15. Load power

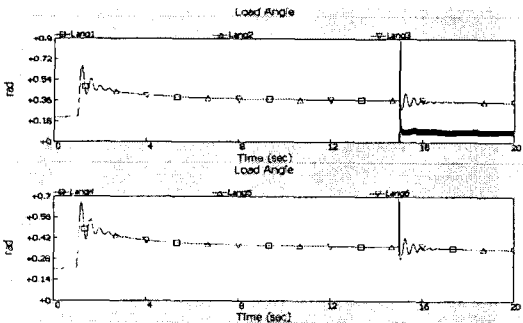


그림 16. 각 발전기들의 부하 각
Fig. 16. Load angles of generators

앞의 시뮬레이션 결과로부터 G1의 지락 고장에 대해서 열병합 발전 시스템의 동특성이 잘 반영됨을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

현재 열병합 발전 시스템이 급속히 보급되고 있으며, 대부분 계통 연계형으로 운전될 것으로 예상된다. 따라서 안정된 계통의 운용을 위해서 연계 계통과의 보호, 제어 해석을 위한 모델이 요구된다.

이런 목적으로 EMTDC가 널리 이용되는 해석 프

로그램으로, 본 연구에서는 열병합 발전 시스템의 계통 연계 시 보호, 제어 해석을 위한 EMTDC 모델을 개발하였다. EMTDC 모델은 현장 계측에 의거하여 수립하였고 모델의 파라미터 또한 현장 특성 시험을 통하여 설정하였다. 그리고 개발한 모델을 이용하여 실 현장 열병합 발전 시스템의 데이터에 근거하여 적용 연구를 수행하였고, 시뮬레이션 결과 지락 고장에 대해서 열병합 발전 시스템의 동특성이 잘 반영됨을 확인할 수 있었다.

개발된 열병합 발전 시스템 모델은 계통 연계형 열병합 발전 시스템의 안정도, 보호 및 협조, 제어 전략 수립 등에 활용될 것으로 기대된다.

본 논문은 산업자원부에서 시행한 전력 산업 인프라 구축 지원 사업으로 수행된 논문입니다.

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] Siemens, Digital Simulator PSS/E User Manual.
- [3] F.P. de Mello, L.N.Hannett, "Representation of Saturation in Synchronous Machines", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PARS-1, No-4, pp.8-18, 1986.
- [4] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, Inc., New York, 1994.

◆ 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.

신명철 (申明澈)

1947년 4월 3일생. 1970년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 1978년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1975~1978년 충북대학교 전기공학과 교수. 2005년 대한전기학회 회장. 1978년~현재 성균관대학교 정보통신공학과 교수. 성균관대학교 부총장.