

論文
3-3-2

熱併合 發電所用 가스터빈 發電機의 動特性解析에 대한 研究

(A Study on the System Dynamics of Gas Turbine Generator
for Cogeneration Plants)

金 載 哲* · 金 奉 熙** · 趙 炳 旭***
(Jae-Chul Kim · Bong-Hee Kim · Boung-Wook Cho)

요 약

본 논문에서는 열병합발전소로서 가스터빈을 이용하는 경우, 계통분리를 비롯한 각종고장에 따른 발전기 및 계통의 응답특성을 검토하여 가스터빈의 운전방법 및 계통의 안전운전여부를 파악할수 있는 방법에 대하여 검토하였다.

특히 온도제어루프, 가속도제어루프를 비롯한 가스터빈의 제어루프와 Droop 및 등속도 운전과 같은 운전방법을 시뮬레이션에 포함하여 각종 사례연구를 통하여 열병합발전소의 적절한 운전방법을 연구하였다.

Abstract

Recently cogeneration plants which can supply both electricity and heat simultaneously are widely being built in our country. For industries using cogeneration plants, some requirements to protect the generators had to keep up the uninterrupted operations. Used the gas turbine with cogeneration plants, this paper presents a technique to check the operation method of gas turbine and the stability of system by simulating the dynamic response of gas turbine and network under the disturbance such as system separation from utility network. The control loops of gas turbine such as temperature control and acceleration control are included in this paper and the proper operation method of cogeneration plant is investigated by assuming the operation mode such as droop and isochronous mode.

1. 序 論

최근 우리나라에서는 에너지 合理化 政策의 일환으로서 電氣와 熱을 동시에 공급받을 수 있는 열병

*正會員 : 崇實大學校 電氣工學科 助教授

** 正會員 : 現代엔지니어링(株) 勤務

***正會員 : 現代엔지니어링(株) 勤務

합발전소의 건설이 증가하는 추세에 있다. 電力會社로부터 필요한 전력을 공급받아 사용하는 경우와 달리 열병합발전소를 이용하여 所內負荷에 필요한 전력을 공급하는 경우, 自家用發電機의 보호 및 공장의 원활한 운전을 위한 여러가지 대책을 세워야 한다.

電力會社(Utility) 내의 系統 및 전력회사와의 연계 선상에서 발생하는 각종 故障(地絡사고 및 周波數 저하등)이 발생하는 경우, 이에 따른 系統分離(System Separation) 및 負荷遮斷(Load Shedding)에 대한 Logic을 세우는 것이 필수적이다.

본 논문에서는 열병합발전소에서 가스터빈을 이용하는 경우, 연계선상에서의 지락사고 및 전력회사 계통내의 사고로 인하여 주파수가 저하되어 계통이 분리되는 경우에 대하여 발전기 및 계통의 應答 特性을 검토하여 가스터빈의 운전방법 및 계통의 안전 운전여부를 파악할 수 있는 방법에 대하여 검토하였다. 특히, 가스터빈의 경우, 일반적인 증기터빈 또는 Utility와 같은 계통의 발전기와 다른 溫度制御(Exhaust Gas Temperature Control)와 加速度制御(Acceleration Control)와 같은 제어루프를 시뮬레이션에 포함하여 모델링하였으며, 가스터빈의 운전 방법인 Droop Mode와 Isochronous Mode도 고려하여 가스터빈을 전력회사 계통과 병렬로 운전하는 경우와 분리하여 단독으로 운전하는 경우에 대하여 사례 연구를 통하여 적절한 운전방법을 연구 검토하였다.¹⁾²⁾³⁾

2. 동특성 모형

열병합발전소를 포함하는 전력계통을 일반적으로 전력공급회사의 계통과 연결되어 있으며 열병합 발전소의 터빈 및 调速機, 發電機, 勵磁機(AVR & Excitation System) 및 系統保護設備로 구성되어 있다. 따라서 이들 계통에 대한 안정도 해석 및 동특성을 해석하기 위해서는 이들 계통을 구성하는 각기기에 대하여 미분방정식 또는 대수방정식으로 표현되는 수학적 모델을 구성하여야 한다.

동특성 해석에 필요한 주요기기는 다음과 같으며 이들 기기의 상호관계 및 동작원리는 그림 1과 같다.

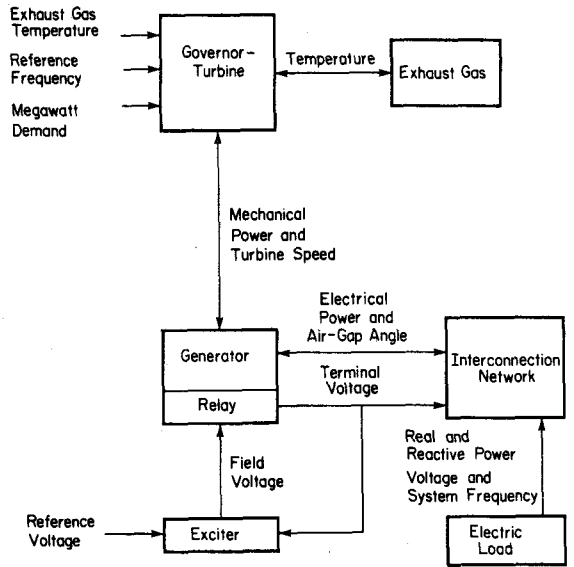


그림 1. 전력계통 기능구성도

Fig.1. Power System Functional Diagram

- 터빈 및 조속기(Turbine & Governor System)
- 발전기
- 여자기(AVR & Excitation System)
- 부하
- 보호시스템
- 전력공급계통(Utility System)

2.1 가스터빈

본 논문에서 사용된 Gas Turbine은 출력용량이 27.9MVA로서 SINGLE CYCLE, SINGLE SHAFT로 구성된 모델을 선정하였으며 사용된 가스터빈의 블럭선도는 그림 2와 같다.

그림 2에서와 같이 가스터빈의 주요 제어설비는 속도제어, 온도제어 및 가속도제어로서 구성되며 각 제어루프의 기능 및 특성은 다음과 같다.

(1) 속도제어루프

속도제어루프는 정격속도(Reference Speed)와 회전자속도의 차이를 입력하여 가스터빈의 출력을 조정하여 터빈속도 및 계통의 주파수를 일정하게 유지시켜주는 역할을 하는 식(2.1.1)의 조속기로서 구성된다.

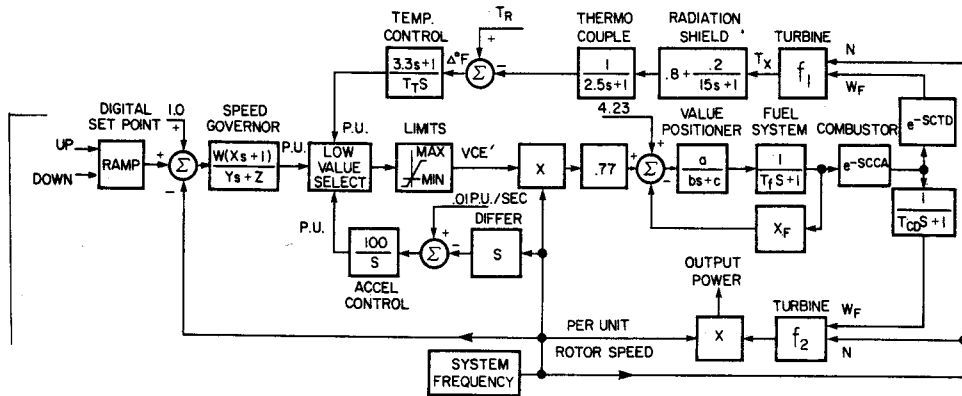


그림2. 가스터어빈 블록선도
Fig.2. Gas Turbine Block Diagram

$$g = \frac{W(\dot{X}S+1)}{Y \cdot S+Z} \quad (1.0-N) \quad (2.1.1)$$

같이 주어진다.

g : Speed Governor out put
N : Rotor Speed (P.U.)
W,X,Y,Z : Speed Governor Transfer function Coefficients

$$T_x = T_R - 390(1 - W_F) + 306(1 - N) \quad (2.1.2)$$

T_x : Turbine Exhaust Temperature in °C
T_R : Turbine Rated Exhaust Temperature in °C
W_F : Per Unit Fuel Flow
N : Per Unit Turbine Speed

가스터빈은 운전방법에 따라 Isochronous Mode 와 Droop Mode로 분류된다. Droop Mode는 일반적으로 대형계통과 병렬로 운전하는 경우 사용되는 방법으로서 정격속도와외의 속도편차에 따른 조속기의 Droop특성에 의하여 출력을 결정하는 방법이다.

식(2.1.1)에서 Droop Mode의 경우 $W = K_D = 1/\text{Droop}$ (Droop Setting이 4%일 경우 $W = 25$), $X = 0$, $Y = 0.05$, $Z = 1$ 로 주어진다.⁴⁾ Isochronous Mode의 경우, 일반적으로 정속도가 유지되도록 터빈의 출력을 조정하는 운전방법으로 식(2.1.1)에서 $W = 30$, $X = 25$, $Y = 0.1$, $Z = 0$ 으로 주어진다.

(2) 온도제어루프

온도제어루프는 일반 증기터어빈에 존재하지 않는 제어설비로서 가스터어빈의 출력이 증가하는 경우 폐가스(Exhaust Gas)의 온도가 급격히 증가하는것을 제어하는 설비이다. 즉 폐가스의 온도를 측정하여 규정온도와의 차이를 이용하여 폐가스온도를 일정범위내 유지하도록 터빈의 출력을 제한하는 제어설비이다.

터빈 출력에 따른 Exhaust 온도는 식(2.1.2)와

(3) 가속도제어루프

가속도제어루프의 설치목적은 가스터어빈의 Start-up 시 전기자의 Acceleration Rate를 제한하여 터어빈을 보호하는 것이다. 정상운전시에는 T/G가 계통으로부터 분리되는 경우와 같이 전기자가 갑자기 가속되는 경우 전기자의 가속도를 일정범위내로 유지시켜주는 역할을 하게된다. 본 논문에서는 전기자의 가속도 제한을 0.1 P.U./SEC로 하여 시뮬레이션 하였다.

(4) 연료계통및 터빈출력특성

전술한 속도, 온도, 가속도의 3개 제어루프의 출력은 3개의 신호중 가장 적은값을 선택하는 Low Value Selector(VCE)와 Limiter를 거쳐 연료계통에 전달되어 가스터어빈에 공급되는 가스의 양을 조절하여 가스터어빈의 출력을 조절하게된다. 가스터어빈의 연료펌프는 터빈의 전기자 속도에 비례하는 속도로 구동되기 때문에 연료계통에 입력되는 신호는 VCE의 Command Signal과 전기자속도의 곱에 비례하

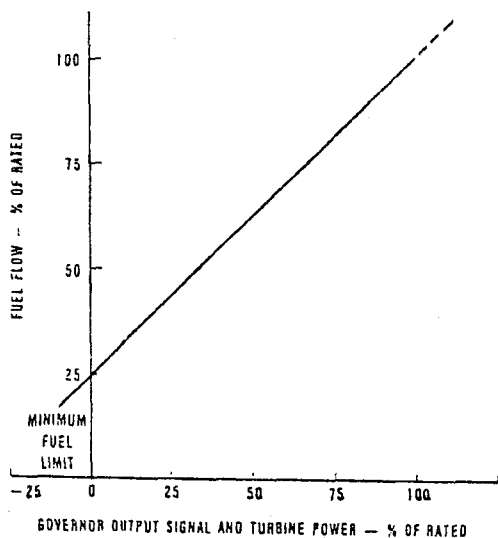


그림3. 조속기 출력신호와 터빈 연료공급과 관계
Fig.3. Relationship between governor output Signal and turbine fuel flow

는 신호로 입력된다.

또한 일반 증기터빈과 달리 그림 3과 같이 무부하 상태에서도 가스터빈 자신을 구동하기 위한 일정비율의 Minimum Fuel Limit(본 논문에서는 23%)를 요구하기 때문에 연료계통에 입력되는 신호는 식(2.1.3)과 같이 조정된다. 또한 터빈의 출력특성은 식(2.1.4)와 같이 표현된다.

$$\text{Fuel Input} = 0.23 + 0.77(\text{VCE}' - N) \quad (2.1.3)$$

VCE' = Per Unit Fuel Command/Per Unit Speed

$$f_z = 1.3(W_F - 0.23) + 0.5(1 - N) \quad (2.1.4)$$

: Turbine Torque

2.2 발전기⁴⁾

발전기 모델은 안정도 연구시 일반적으로 널리 사용되는 2축모델(Two-Axis Model)을 사용하였다. 본 모델은 발전기의 고정자(Stator)와 회전자(Armature)권선에 대한 전압, 전류방정식을 Park's Transformation을 사용하여 d-축(직축)과 q-축(횡축)으로 정리한식으로 식(2.2.1)~식(2.2.4)와 같이 구성된다. (식(2.2.5), (2.2.6)은 전기자의 Swing

표 1. 발전기의 각종수 값

Table 1. Parameter Value for Gas Turbine and Utility System Generator

PARAMETER	DESCRIPTION	GAS TURBINE (27.9MVA)	KEPCO (400MVA)	KEPCO KOUJIV. 100MVA BASE
X _d	d-axis synchronous reactance(sat./unsat.)	196%	52.8	13.2
X _q	q-axis synchronous reactance(sat./unsat.)	180%	52.8	13.2
X' _d	d-axis transient reactance(sat./unsat.)	18.3%	5.28	1.32
X' _q	q-axis transient reactance(sat./unsat.)	18.3%	5.28	1.32
T' _{do}	d-axis transient open circuit time constant	0.67sec	10sec	10sec
T' _{qo}	q-axis transient open circuit time constant	0.05sec	0.7sec	0.7sec
H	inertia constant of turbine and generator coupled	6.91 MW.s/MVA	5 MW.s/MVA	5 MW.s/MVA
D	Damping coefficient	0.0015	0.05	0.05

Equation 임) 또한 본 논문에서 사용된 발전기 임피던스 및 상수값들은 표 1과 같다.

$$V_d = E_d' + (X_q' + X_t) I_q \quad (2.2.1)$$

$$V_q = E_q' + (X_d' + X_t) I_d \quad (2.2.2)$$

$$\dot{E}_d' (V_f - E_q' - (X_d - X_d') I_d) / T_{do}' \quad (2.2.3)$$

$$\dot{E}_q' (-E_d' - (X_q - X_q') I_q) / T_{qo}' \quad (2.2.4)$$

$$\dot{\delta} = \Delta W \quad (2.2.5)$$

$$\Delta \dot{W} = (-D \Delta W + P_m + P_e) / 2H \quad (2.2.6)$$

2.3 여자기(AVR & Exciter System)

본 논문에서는 중·소형 발전기에서 많이 사용되는 Rotating Rectifier Type(IEEE 2 Model)을 사용하였으며 사용된 制御常數의 값과 블럭선도의 구조는 표 2 및 그림 4와 같다.

표 2. 여자기와 자동전압 조정장치의 계수값
 Tabel 2. Coefficient of A.V.R and Excitation System

Parameter	Description	Value
K_A	AVR Gain	400
T_A	AVR Integral Time Constant	0.1
T_R	AVR Input Filter time constant	0.0
K_F	Feedback loop gain	0.03
T_{F1}	Feedback loop time constant	0.2
T_{F2}	Feedback loop time constant	1.0
$V_{R, min}$	AVR lower limiter	-7.8
$V_{R, max}$	AVR upper limiter	7.3
K_E	Exciter constant	1.0
T_E	Exciter time constant	1.0
$S_{E,max}$	Rotating exciter saturation at ceiling at ceiling voltage	0.519
$S_{E,75max}$	Rotating exciter saturation at 0.75 ceiling voltage	0.26

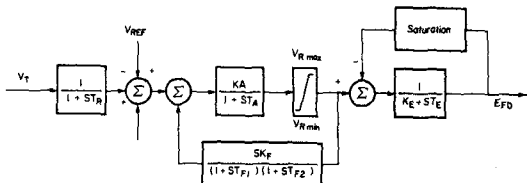


그림4. 여자기와 자동전압 조정장치의 블럭선도
 Fig.4. Block Diagram of AVR and AC Exciter

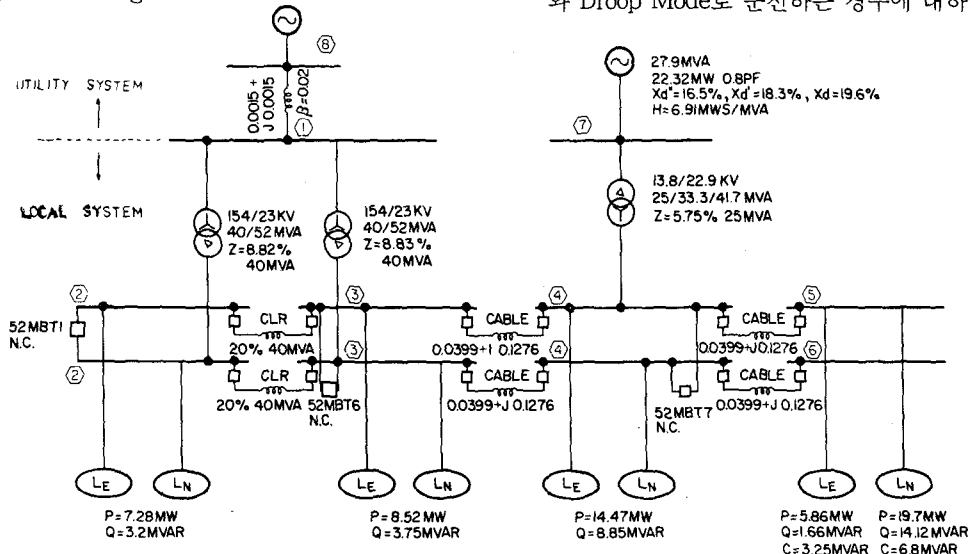


그림5. 샘플 단선 계통도
 Fig.5. Sample Single line Diagram

2.4 電力供給系統(Utility System)

열병합발전소에 대한 安定度解析 및 動特性을 파악하기 위해서는 열병합발전소뿐 아니라, 열병합발전소 계통에 전력을 공급하는 Utility System(예를 들면 한전계통)도 함께 고려하여 모델링하여야 한다. 그러나 본 논문에서는 열병합발전소가 포함된 계통이 관심의 대상이기 때문에 Utility System은 여자계통과 조속기 장치를 고려하지 않고 1기 발전기로 등가화시켜 모델링하였다. 본 논문에 사용된 계통 임피던스 및 상수값들은 표 1과 같다.

3. 사례연구⁵⁾

본 논문에서는 그림 5와 같이 27.9MVA 가스터빈 1기와 Utility System, Local System으로 구성되어 있는 8모선 9선로계통을 사용하였다. 그림의 계통은 母線構造를 2중으로 구성하여 Essential Load와 가스터빈을 發電母線(Generator Bus)에 연결하고 Non Essential Load와 Utility System을 受電母線(Receiving Bus)에 연결하여 Utility System 및 연계선상에서의 사고등으로 인하여 계통이 분리되는 경우, 발전모선과 수전모선을 분리하여 Essential Load의 계속운전이 가능한 계통이다.

본 사례연구에서는 가스터빈을 Isochronous Mode와 Droop Mode로 운전하는 경우에 대하여 Utility

System의 주파수강화와 연계선상에서의 地絡사고와 같은 대표적인 계통분리 조건을 적용하여 계통및 가스터빈의 안전운전여부를 검토하였다. 본 논문에서 실시한 시뮬레이션 조건은 다음과 같다.

- (1) CASE 1: 가스터빈의 운전 Mode를 Isochronous Mode로 하여 0.1초동안 3상지락사고를 인가한후 Utility System으로부터 열병합발전소 계통이 분리되는 것으로 하였으며 발전모선에 연결된 부하량은 발전량과 같은 것으로 하였다.
- (2) CASE 2: 가스터빈의 운전 Mode를 Droop Mode로 하여 Utility System과의 연계선상에 3상지락사고를 인가하고 t=0.2초에 고장을 제거하면서 Utility System으로부터 계통이

분리되는 것으로 하였다. 계통분리시 발전모선과 수전모선이 분리되는 것으로 하였고, 이 경우 발전모선에 연결된 부하량이 가스터빈의 발전량보다 많은 경우를 選擇하였다.

- (3) CASE 3: Utility System 內的 故障로 인하여 계통주파수가 58.5Hz까지 떨어져 이에 따른 영향으로 Utility System으로부터 계통이 분리되는 경우를 시뮬레이션하였다. 본 Case에서는 Case2와 같이 가스터빈의 운전조건은 Droop Mode로 하였으며 발전모선에 연결된 負荷量이 발전량보다 많은 것으로 하였다.

각 Case별 시뮬레이션결과는 그림 6~8과 같다. 그림 6은 Isochronous Mode로 운전하는 경우

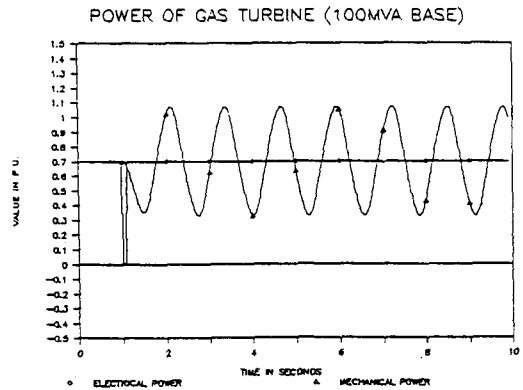
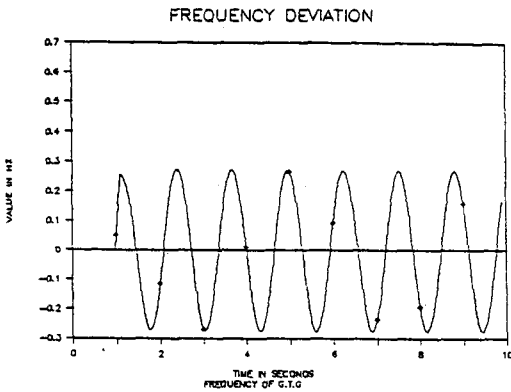


그림6. 사례연구1에 대한 시뮬레이션 결과

Fig.6. Simulation Results for CASE 1

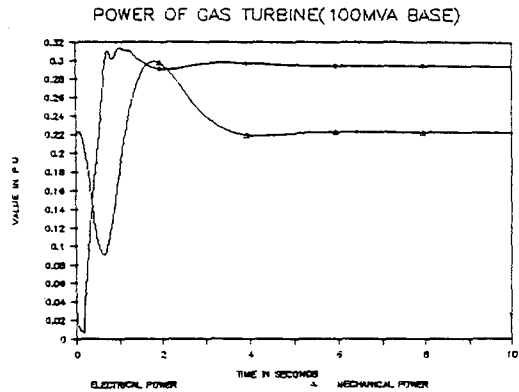
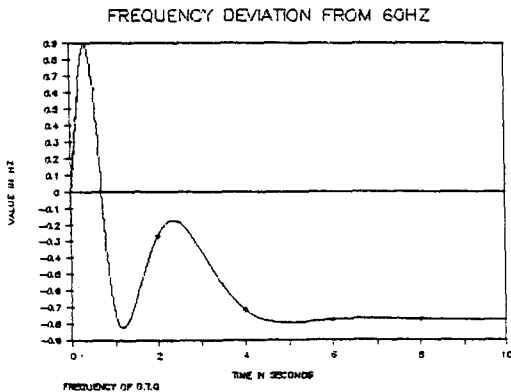


그림7. 사례연구2에 대한 시뮬레이션 결과

Fig.7. Simulation Results for CASE 2

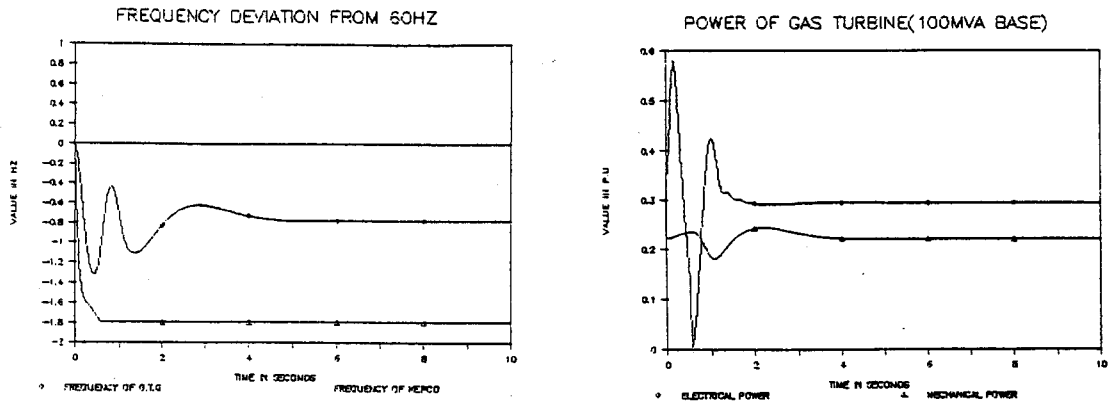


그림8. 사례연구3에 대한 시뮬레이션 결과
Fig.8. Simulation Results for CASE 3

(Case1)에 대하여 가스터빈의 출력변화 및 계통의 주파수변화를 나타내었다. 그림에서와 같이 3상지락 후 계통이 분리되는 경우 계통주파수와 가스터빈의 출력이 수렴되지 않고 Hunting이 계속됨을 보여준다. 이와같이 Hunting이 계속되는 것은 Isochronous Mode의 경우, 조속기의 Large Gain으로 인하여 주파수변화에 의한 터빈출력이 급격히 변동하고 조속기의 출력이 Maximum 또는 Minimum Limit에 계속 위치하게 되어 터빈출력을 계속 Swing하게 되므로 계통의 주파수를 安定化시키지 못하게 된다.

따라서 사고로 인한 계통분리시 가스터빈의 운전 Mode를 즉시 Isochronous Mode로 변화시키는 것은 계통의 안정도를 고려할 경우 매우 위험한 것으로 판단되므로 계통의 주파수가 일정범위내로 안정화되는 것을 파악한 후 運轉 Mode를 변화시키는 것이 妥當하리라 판단된다.

그림 7과 그림 8은 Droop Mode로 운전하는 경우의 시뮬레이션 결과이다.

그림 7은 3相地絡事故後 계통이 분리되는 경우 부하량이 발전량보다 많은 경우(부하량=30MW, 발전량=22.3MW)에 대한 발전기 출력 및 주파수 변화등을 나타내었다. 3상지락사고후 계통이 분리되는 경우, 가스터빈의 출력이 계통분리후 순간적으로 30MW까지 증가하지만 가스터빈의 온도제어루프에 의한 出力制限으로 23MW 부근으로 제한됨을 보여 주고 계통주파수는 발전량 부족으로 인하여 59.2 Hz 부근으로 유지되게 된다.

따라서 주파수 강하에 따른 부하차단(Load Shedding)을 실시하지 않으면 주파수가 60Hz로 회복되지 않게 된다.

그림 8은 Utility System의 주파수가 떨어짐에 따라 계통이 분리되는 경우 발전기 출력 및 주파수변화등을 나타내었다. Case3의 경우도 발전기 출력이 계통분리후 온도제어루프에 의하여 출력이 제한받게 되어 계통주파수가 59.2Hz부근으로 유지됨을 보여 준다. 따라서, Case2와 같이 주파수 강하에 따른 적절한 부하차단을 실시하지 않으면 주파수가 60 Hz로 회복되지 않음을 알수있다.

4. 結 論

본 논문에서는 가스터빈의 각종 제어루프를 포함하여 열병합발전소를 포함한 전력계통에 대한 동특성 및 안정도해석을 가스터빈의 운전 Mode별로 시뮬레이션을 실시하여 다음과 같은 결론을 구하였다.

(1) 단독운전시 일반적으로 사용되는 가스터빈의 Isochronous Mode의 경우, 3상지락사고 또는 계통 분리등과 같은 Large Disturbance시 주파수변화에 따른 터빈운동이 매우 빠르기 때문에 터빈출력을 안정화시키는 것이 불가능하다.

따라서 Utility System과 병렬로 운전하는 도중, 계통사고등으로 인하여 열병합발전소 계통이 분리되는 경우, 주파수가 일정범위내로 안정화시킨후 운전 Mode를 바꾸어야 한다.

(2) 열병합발전소 계통이 Utility System으로부터 분리되는 경우, 발전량과 부하량이 일치하지 않게 되면 발전량부족으로 인하여 주파수 저하등의 문제가 발생하여 정상운전이 불가능해지게된다. 따라서 열병합발전소를 건설하는 경우, 계통분리시에도 안전운전이 가능하도록 주파수 강하에 의한 負荷制限(Load Shedding)장치를 설치해야한다.

(3) 가스터빈의 동특성 모델 구성시 폐가스(Exhaust Gas)의 온도제어루프를 고려하여 모델링함으로써 일반 증기터빈 발전기에서 볼수 없는 대기온도 변화및 폐가스 온도변화에 따른 터빈출력제한 특성을 시뮬레이션 할수 있으며, 반대로 발전출력 변화에 따른 폐가스온도의 변화를 해석하여 폐열가스 보일러의 입력온도변화를 예측할수 있다.

5. 참고문헌

- 1) W.I.Rowen,. "Simplified Mathematical Repr-e-Sentations of Heavy-Duty Gas Turbine," Journal of Engineering for Power Vol. 105. Oct. 1983
- 2) 현대엔지니어링, "Power System Stability Study on Honam Ethylene No.2 Power System," August 1989.
- 3) 현대엔지니어링, "Power System Stability Study

- on Yukong NEP/PEPP Power System," January 1989.
- 4) P.M Anderson & A.A Fauad, "Power System Control and Stability," 1977, The Iowa State University Press
- 5) 서울대학교 생산기술연구소, "전력계통의 동태안정도 계산 프로그램 개발에 관한연구," 1979년 1월
- 6) IEEE Committee Report, "Excitation System Models for Power System Stability Studies," IEEE, Trans. on PAS, Vol. PAS-100, pp.494~509 Feb. 1981.
- 7) IEEE Committee Report, "Dynamic Models for Steam and Hydro Turbines in Power System Studies," IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-92, p.1904~1915, Dec. 1973.
- 8) IEEE Committee Report, "Proposed Excitation System Definitions for Synchronous Machines," IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-88, pp.1248~1258, Aug. 1969.
- 9) Y.M.Park, J.C.Kim, B.W.Cho, B.H.Kim, et al., "Power System Stability Study on KukD-ong Cogeneration plant," HyunDai Engineering Co. LTD., Feb. 1987.