

터빈-발전기 조속기의 동특성 시험시스템 개발에 관한 연구

A study on the Turbine-Generator Governor Dynamic Characteristic Testing System

최 형 주* · 이 흥 호†
(Hyung-Joo Choi · Heung-Ho Lee)

Abstract - The grid frequency is controlled cooperatively by the governor of the Turbine-Generator and the automatic generation controller(AGC) of the KPX(Korea Power Exchange). It is a basic requirement that the reliability of the governor is verified to enhance the power system stability but it is not easy to confirm the response characteristics of the governor because all generators are operated in the grid system that has the constant voltage and frequency. Therefore, it is necessary to study a new test method in order to examine the governor dynamic characteristic in the similar fault conditions. A study has shown that it is verified to simulate the turbine-generator power control system, the governor response characteristic under limited conditions and contribution of AGC with the gas turbine generator simulation model as well as demonstrate the dynamic response of the governor with the developed governor dynamic characteristic tester based on digital controller while the turbine-generator is connected to the grid system. This tester is constructed by the built-in functions of the turbine-generator main controller. In this treatise, the theoretical background, development method and the results of both simulations and demonstrations are described as another way to verify the turbine-generator governor dynamic characteristics.

Key Words : Generator governor dynamic tester, Automatic generator controller, Power system stability

1. 서 론

전기에너지에 대한 의존도는 계속하여 증가하는 추세이지만 1996년 7월 2일 발생한 미국의 서부계통에서 대형 정전 사고와 2003년 9월 14일 동부계통에서 발생한 정전사고 등의 계통붕괴 사고로 인한 피해는 천문학적 규모에 달하고 있다. 우리나라에서도 2003년 4월 24일 영광원자력이 일시 정지되고 계통과급으로 인근 화력발전소가 계통에서 탈락되면서 주파수가 과도하게 저하되는 사고가 발생하였다. 특히 주파수가 회복되는 시점에서 일부 발전기의 출력이 오히려 감발되어 계통이 불안정하게 되는 심각한 문제점이 나타났으며, 주요 원인은 발전기 조속기의 응답 불량으로 기력발전기의 출력제어밸브 제한운전(VPL: Valve Position Limit)과 가스터빈 발전기의 온도제한 운전으로 추정되었다[1].

발전사별 수익경쟁으로 인한 발전기 출력 상향운전으로 인한 순동예비력 저하와 계통운영 보조서비스의 낮은 기여도는 잠재적인 계통불안정 요인으로 전력거래소에서는 발전기 调速機의 동작과 속응성에 대한 신뢰도 검증을 요구하고, 발전기 출력 응답량을 수시로 시험하여 규정치보다 낮은 발

전에 대해 서비스 비용을 감액하는 등 서비스 비용의 현실화를 통해 계통 기여도에 대한 차등화를 도모하고 있다. 또한 계통운영 보조서비스 이행 여부, 발전기 조속기의 동작 신뢰도 검증 및 주파수 회복시점에서 발전기 출력이 감발된 정확한 원인을 확인하기 위해 모든 발전소에 계측 장비를 설치하고 특성자료를 취득하였다. 그러나 발전기는 전압과 주파수가 일정하게 유지되는 무한대 모선에 연계되어 운전되므로 고장상황과 유사한 조건에서 조속기의 응답 특성을 확인하기는 쉽지 않다. 따라서 조속기 동특성의 신뢰도 확인을 위한 새로운 시험 방법이 필요하게 되었다.

전력계통 광역정전 사고를 계기로 발전기 제어계의 신뢰도를 검증할 수 있는 새로운 방안에 대한 연구를 목표로 선정하고, 전력계통 불안정 요인을 확인하는 방안으로 터빈-발전기 제어계 안정도, 조속기 응답 특성, 발전기 출력제한 특성, AGC 시스템의 계통 기여도와 AGC Frequency Bias Factor 영향을 모의 시험하였다. 또한 발전기가 계통에 연계되어 운전되고 있는 상황에서도 과도 고장 상황과 유사한 조건으로 발전기 조속기 동특성과 AGC 협조제어 특성을 실증 시험하는 방안으로서 디지털 기반의 조속기 동특성 시험 시스템을 개발하고 실증시험을 통해 계통 불안정의 주요 원인을 규명하게 되었다. 여기서 발전기 제어계 응답 특성에 대한 모의시험 결과와 조속기 동특성 시험 시스템의 개발 방법, 시스템 구축 사례 및 실증시험 결과 분석에 대한 연구 결과를 기술하였다.

* 정 회 원 : 한국중부발전(주) 차장
충남대학교 전기공학과 박사과정

† 교신저자, 중신회원 : 충남대학교 전기공학과 교수
E-mail : leehh@cnu.ac.kr

접수일자 : 2012년 5월 1일

최종완료 : 2012년 9월 11일

2. 본 론

2.1 전력계통 광역정전 사례

2.1.1 주파수 급변 사례

우리나라 전력계통에서 주파수가 급변한 사례는 2003년 4월 24일 발생한 영광 1호기와 울산복합 #2 블럭 발전기가 불시정지(1,460MW) 되면서 저주파수 계전기가 동작되어 54개의 배전선로(D/L: Distribution Line)가 자동으로 부하 차단되고 당시 계통부하 37,600MW 중 공급지장 전력이 217MW가 발생하였다[1].

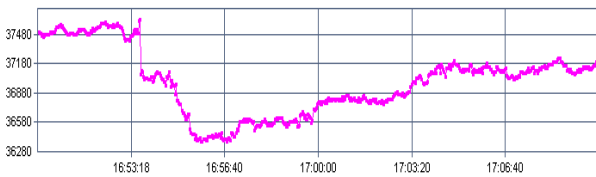


그림 1 계통 유효전력 변동 추이
Fig. 1 Trends of the Grid Active Power

주파수는 영광 1호기 불시정지로 59.97Hz로 저하되었고, 1분 22초 후에 울산 복합발전기가 계통과급으로 비상정지 되면서 59.29Hz까지 낮아졌다. 그러나 계통에 연계된 대부분의 발전기 출력이 오히려 감소되어 결국 최저 주파수 58.84Hz까지 급감 하였다[1].

표 1 계통 주파수 변동 이력
Table 1 Records of the Grid Frequency

시간	주파수(Hz)	내 용
0 초	59.97	영광 1호기 Trip (-980MW)
14 초	59.55	G/F & AGC 응동 (+415MW)
20 초	-	주파수 과다저하로 AGC Trip
1분 22초	59.29	울산#2블록 Trip (-480MW)
1분 50초	58.84	최저주파수 도달
"	-	UFR 동작으로 부하차단 (217MW)
5분 40초	59.06	급전지시로 출력증발
9분 40초	59.73	수력/양수 기동 (+1,968MW)

영광 1호기 발전기가 비상정지 되고 14초까지는 계통전력이 증가되었지만, 14초 이후 감발량이 증가하여 순 증발량은 지속적으로 감소되었고, 1분 50초 이후 9분 40초까지 발전기 총 출력은 고장전보다 오히려 감소되어 나타났다. 주파수가 회복되는 과정중 출력이 감발된 발전기는 기력발전기 11기와 복합발전기 24기로 총 35기에 달한다[1].

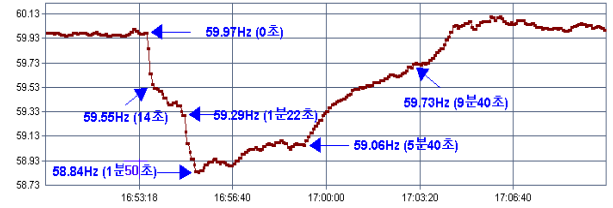


그림 2 계통 주파수와 전력 변동 추이
Fig. 2 Trends of the Grid Frequency and Net Power

표 2 계통 주파수와 전력 변동 이력
Table 2 Records of the Grid Frequency and Net Power

구 분	14초	1분 22초	1분 50초	5분 40초	9분 40초
주파수	59.55	59.29	58.84	59.06	59.73
증 발	520.50	727.38	624.47	470.64	1325.20
감 발	104.84	543.23	582.73	832.16	1346.53
순증감발	415.66	184.15	41.74	-361.52	-21.33

2.1.2 발전기 출력변화

주파수 저하 후 기력발전기는 약 30만kW 정도 출력이 급상승하여 5분 36초 동안 약 190~300MW 이상 지속하였으나, 1차 약 380MW(16:59:10~17:03:10), 2차 약 400MW(17:04:16~17:06:10)에 걸쳐 출력이 감발하였다. 복합발전기는 초기 약 170MW까지 급상승하여 1분 26초 동안 약 170~190MW 이상 지속되었으나, 1차 약 440MW(16:54:42~16:59:08), 2차 약 270MW(16:59:30~17:06:10) 출력이 감발하였다.

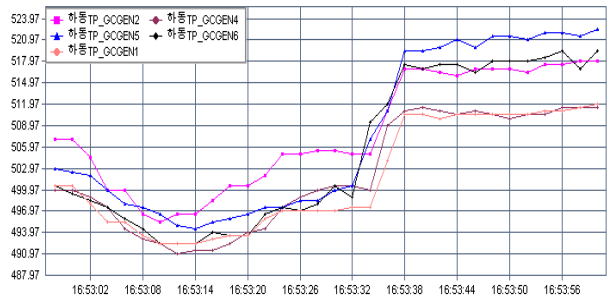


그림 3 하동 화력발전소 출력특성
Fig. 3 Active Power of the Ha-Dong T/P

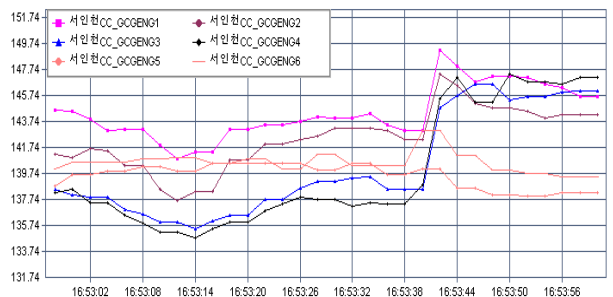


그림 4 서인천 복합 화력발전소 출력특성
Fig. 4 Active Power of the SDe-Incheon C/C

반면, 원자력 발전기는 과도한 출력변화를 방지하기 위해 일반적으로 출력제한(Load Limit) 모드로 운전되고 있어 출력변화는 크지 않았다.

보령 복합발전기는 가스터빈과 증기터빈이 복합운전(CC: Combined Cycle)을 하고 있으며, 주파수가 저하되는 초기 상황에는 발전기 출력이 증가하였고 곧 이어 발전기 출력이 감소되는 현상이 확인되었다[1].

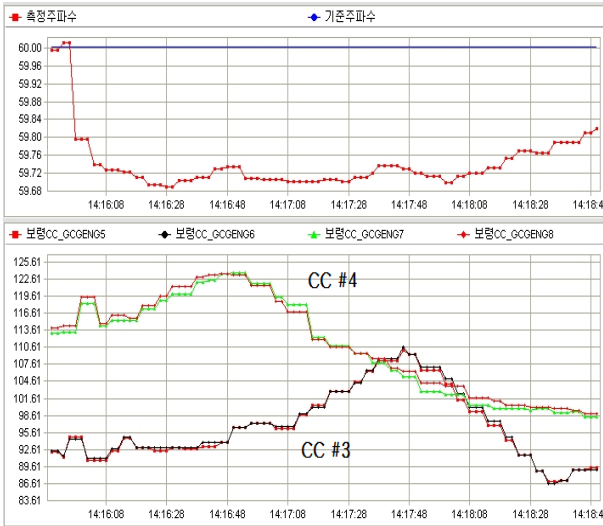


그림 5 보령 복합 화력발전소 발전기 출력특성
Fig. 5 Generator Active Power of the Boryung C/C

2.2 발전기 조속기와 AGC 모의시험

2.2.1 조속기 동특성 모의시험

가스터빈 발전기 출력 제어시스템을 그림 6과 같이 GAST 모델을 적용하여 MATLAB Simulink를 사용하여 모의시험 하였다[2][3].

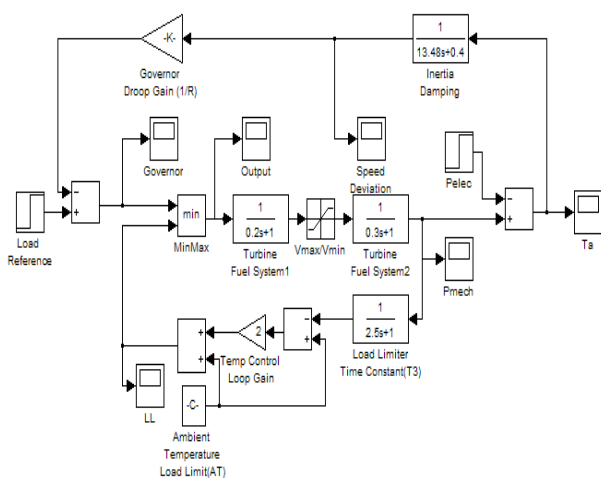


그림 6 가스터빈 Simulink
Fig. 6 Gas-Turbine Simulink

각종 파라미터는 발전기/제어계 특성시험 및 모델정수 도출 자료를 적용하고 모의시험 하였다[4][5][6].

표 3 GAST 모델 파라미터

Table 3 GAST Model Parameter

Parameter	Description	GT11
H	Inertia Constant	6.740
R	Governor Droop	0.054
T ₁	Fuel System Lag Time Constant1	0.200
T ₂	Fuel System Lag Time Constant2	0.300
T ₃	Fuel System Lag Time Constant3	2.500
L _{Max}	Load Limit	0.854
K _T	Temperature Control Loop Gain	2.000
V _{Max}	Maximum Value Position	0.879
V _{Min}	Minimum Value Position	0.100
D _{Turb}	Turbine Damping	0.200

부하의 자기제어특성(D=0.2)을 적용한 가스터빈 개루프 전달함수는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다[7][8].

$$KG(s)H(s) = \frac{K}{(13.48s+0.4)(1+0.2s)(1+0.3s)} \quad (1)$$

$$= \frac{K}{0.8088s^3 + 6.764s^2 + 13.68s + 0.4}$$

여기서, K=1/R 이며, 특성방정식은 다음과 같다.

$$1 + KG(s)H(s) = 1 + \frac{K}{0.8088s^3 + 6.764s^2 + 13.68s + 0.4} = 0 \quad (2)$$

$$0.8088s^3 + 6.764s^2 + 13.68s + 0.4 + K = 0 \quad (3)$$

Routh-Hurwitz 행렬을 통한 K의 범위는

s ³	0.8088	13.68
s ²	6.764	0.4+K
s ¹	$\frac{91.723 - 0.8088K}{6.764}$	0
s ⁰	0.4+K	0

여기서, $b_1 = \frac{a_{n-1}a_{n-2} - a_n a_{n-3}}{a_{n-1}}$, $b_2 = \frac{a_{n-1}a_{n-4} - a_n a_{n-5}}{a_{n-1}}$

$c_1 = \frac{b_1 a_{n-3} - a_{n-1} b_2}{b_1}$, $c_2 = \frac{b_1 a_{n-5} - a_{n-1} b_3}{b_1}$

s¹ 행으로 부터 K는 113.41보다는 작거나 s⁰ 행으로 부터 -0.4보다 커야한다. 따라서 제어시스템의 안정도를 위한 K의 양수 값은 K < 113.41으로 20logK = 41.1[dB]로 계산된다. 조속기 속도조정율은 R=1/K이므로 R > 0.00882이 된다.

s² 행에 K=113.41을 대입하여 보조 방정식 6.764s² + 113.41 = 0

으로 부터 해를 구하면, $s = \pm j4.095$ 이 된다. 즉 $R = 0.00882$ 일 때 $j\omega$ 축 위에 한 쌍의 극점이 얻어지며, 근 궤적이 선도의 좌반부에 위치하고 있어 안정된 특성이 확인된다.

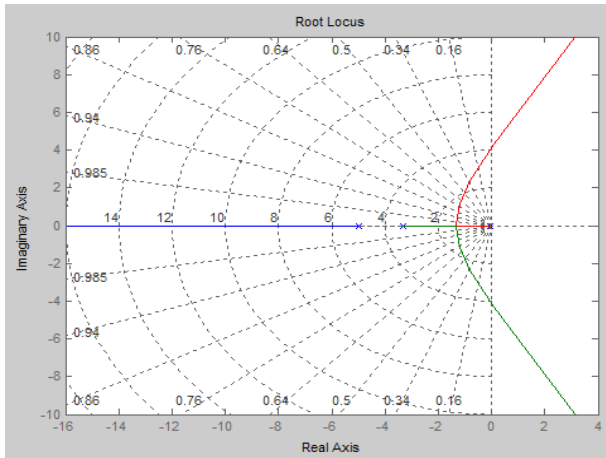


그림 7 근 궤적
Fig. 7 Root-locus plot

주파수 응답특성을 보여주는 보드(Bode) 선도에서는 크기 응답에서 이득여유 41.1dB, 4.11rad/sec와 위상여유 112°, 0.0679rad/sec가 계산되고, 모두 양의 여유를 가지고 있어 연소계통과 조속기를 포함한 보령복합 가스터빈의 발전기 출력제어 시스템은 안정된 제어특성을 가지고 있다[7][8].

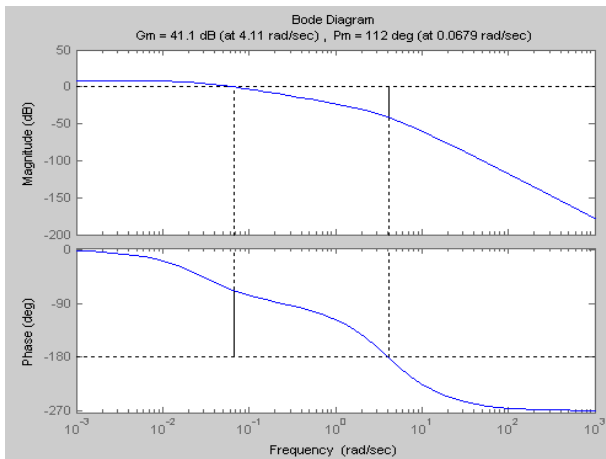


그림 8 보드선도
Fig. 8 Bode curve

부하 변화(ΔP_L)에 대한 주파수 편차($\Delta\omega$)의 페루프 전달 함수는 식(4)와 같다[8].

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\omega(s)}{-\Delta P_L(s)} &= T(s) = \frac{(1+0.2s)(1+0.3s)}{(13.48s+0.4)(1+0.2s)(1+0.3s)+1/0.054} \\ &= \frac{0.06s^2+0.5s+1}{0.8088s^3+6.764s^2+13.68s+18.92} \end{aligned} \quad (4)$$

단위 입력에 의한 정상상태 주파수 편차는 식(5)로부터 30MW 부하 변화에 대한 정상상태 주파수 편차는 식(6)과 같이 얻어진다[8].

$$\Delta\omega_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s\Delta\Omega(s) = \frac{1}{18.92}(-0.2) = -0.010571pu \quad (5)$$

$$\Delta f = (-0.010571)(60) = 0.634Hz \quad (6)$$

부하 20% 변동에 따른 조속기의 응답특성은 그림 9, 10과 같이 제한회로 후단에서는 안정되어 있으나 정상상태 주파수 편차는 계산 결과와 같이 정상적으로 발생하고 있다.

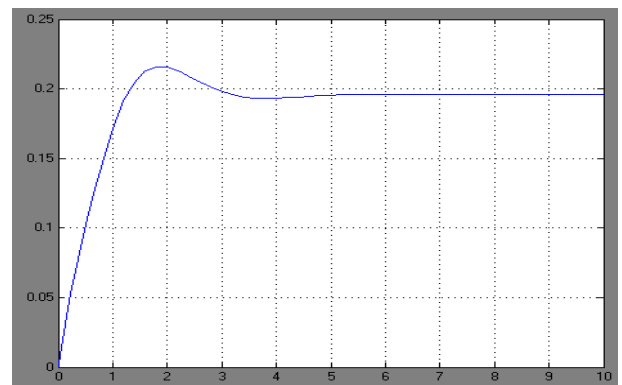


그림 9 제한회로 후단 조속기 출력
Fig. 9 Governor Output After Limiter

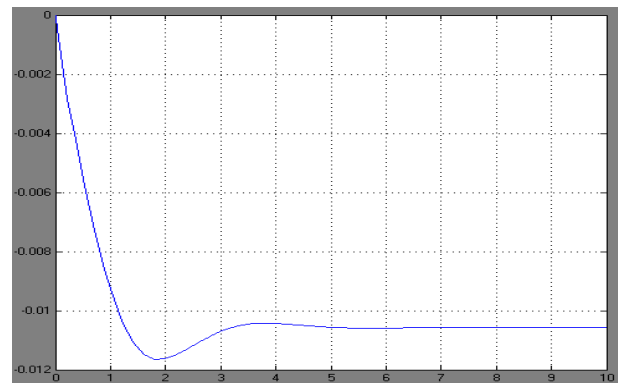


그림 10 정상상태 속도 편차
Fig. 10 Steady-state Speed Error

주파수에 대한 가스터빈 발전기의 출력 변화는 조속기의 속도조정을, 연료연소 계통의 시정수, 터빈-발전기 관성 모멘트, 터빈 댐핑 및 대기온도에 따른 출력제한의 영향을 받는다.

과도한 부하변동시 가스터빈 발전기 출력제한 특성의 영향을 확인한 결과 그림 11과 같이 제한회로 전단 조속기 출력은 지속적으로 상승하고 있으며, 그림 12에서는 제한회로의 영향으로 출력이 다소 저하되기는 하지만 일정하게 유지되고 출력이 감소되는 현상은 나타나지 않는다.

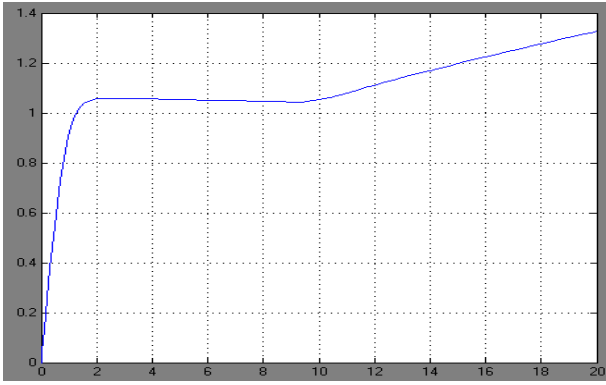


그림 11 제한회로 전단 조속기 출력
Fig. 11 Governor Output Before Limiter

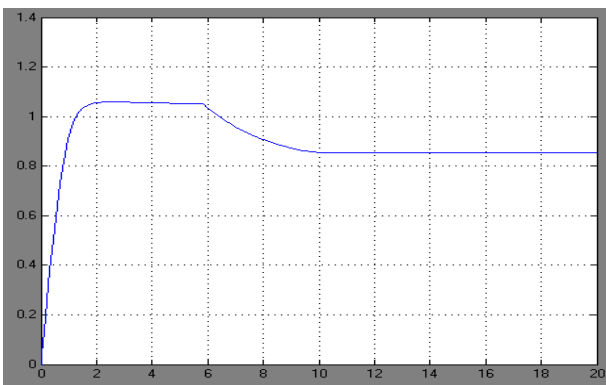


그림 12 제한회로 후단 조속기 출력
Fig. 12 Governor Output After Limiter

2.2.2 AGC 모의시험 결과

경사속도 특성의 조속기(Droop)는 부하의 주파수 감도로 인해 정상 상태에서 주파수 편차는 발생한다. 편차 없이 계통 주파수로 복원하기 위해서는 보조적인 제어동작이 필요하게 되며, 기존 조속기 시스템의 리셋 또는 적분 기능이 추가된 그림 13과 같은 제어 동작이 필요하다[4][5].

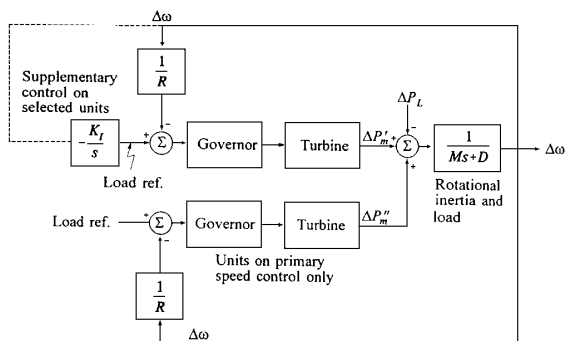


그림 13 조속기와 AGC 조합시스템
Fig. 13 Governor and AGC Combination System

추가된 자동발전제어(AGC)의 설치 목적은 설정된 발전기의 출력을 조정하여 주파수를 규정된 정상 값으로 편차를

없애고, 지역 간 전력을 교환하는 부하-주파수 제어 (LFC: Load-Frequency Control) 기능과 운영비용을 최소로 하는 최적의 경제적인 전력분배에 있다. 그러나 AGC는 기본적인 속도제어 기능을 갖는 조속기의 응답특성 보다 매우 늦은 동작특성을 가지므로 과도한 출력이 변동하는 고장이나 비상시에는 AGC는 바이 패스(By-pass)되고 조속기 동작 이후 주파수 안정을 위한 용도로 사용된다.

AGC의 특성을 확인하기 위해 기존의 조속기 시스템인 GAST 모델에 추가하여 그림 14와 같이 구성하였다[7].

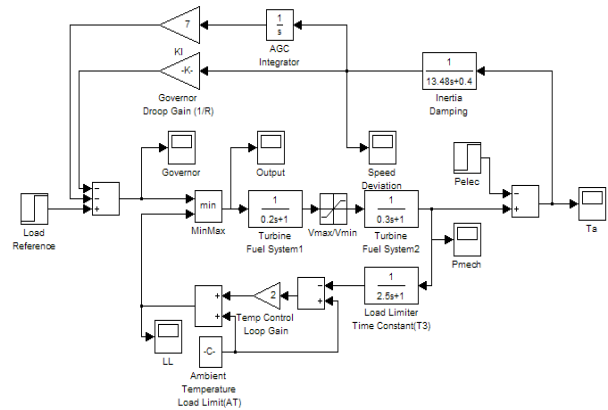


그림 14 GAST와 AGC의 Simulink
Fig. 14 The Simulink of the GAST and AGC

터빈-발전기 파라미터는 조속기 단독 시험시 적용된 GAST 모델의 설정치를 적용하고 AGC 적분기의 적분계수 ($K_I=7$)와 부하의 자기제어 특성($D=0.2$)을 적용하여 페루프 전달함수를 식(7)과 같이 구 할 수 있다[7].

$$\frac{\Delta\omega(s)}{-\Delta P_L(s)} = T(s) = \frac{s(1+0.2s)(1+0.3s)}{s(13.48s+0.4)(1+0.2s)(1+0.3s)+7+s/0.054}$$

$$= \frac{0.06s^3 + 0.5s^2 + s}{0.8088s^4 + 6.764s^3 + 13.68s^2 + 18.92s + 7} \quad (7)$$

부하 20% 변동에 대한 조속기의 응답 특성은 그림 15, 16과 같이 수렴의 형태로 매우 안정적인 동작이 확인된다[7].

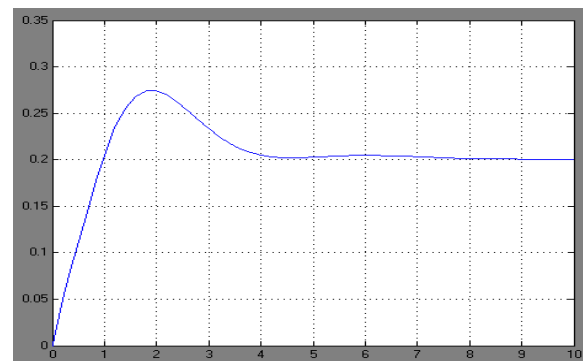


그림 15 제한회로 후단 조속기 출력
Fig. 15 Governor Output After Limiter

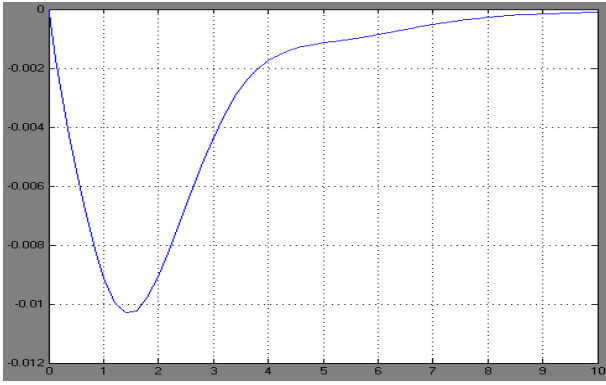


그림 16 속도 편차 특성
Fig. 16 Speed deviation Characteristic

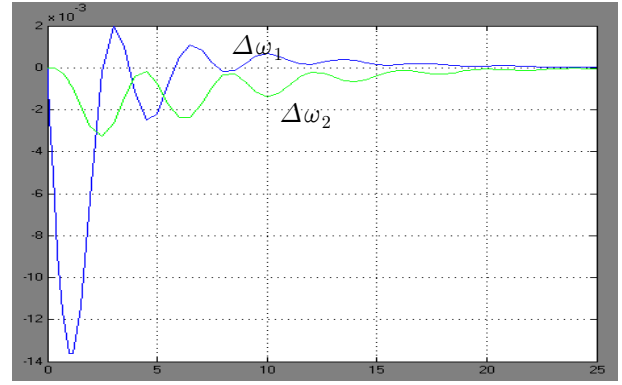


그림 19 속도 편차 특성
Fig. 19 Speed deviation Characteristic

2.2.3 Frequency Bias Factor 영향

두 지역에 위치한 발전기에 추가된 AGC의 주파수 Bias Factor의 영향을 그림 17과 같이 모의시험 할 수 있다[7].

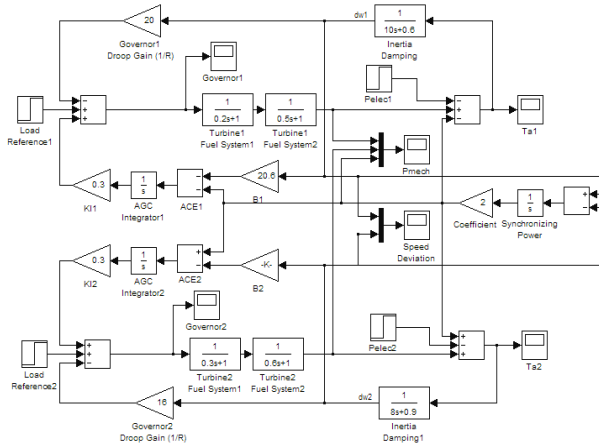


그림 17 연계된 시스템의 AGC Simulink
Fig. 17 AGC Simulink of the associated system

한 지역에서 발생한 20% 부하변화에 두 지역에 위치한 발전기의 기계적 출력과 주파수 편차는 그림 18, 19와 같다.

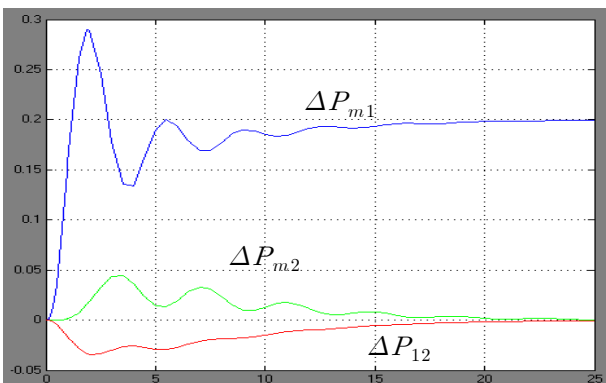


그림 18 기계적 출력 특성
Fig. 18 Mechanical Output Characteristic

그러나 각 지역의 주파수 Bias Factor가 조속기 속도조정율(R)과 부하의 자기제어 특성(D)에 따른 주파수 응답특성보다 2배 높게 설정되면 그림 20과 같이 주파수 편차($\Delta\omega_2$)는 두 배 빠르게 조정되지만, 동요 현상은 크게 나타난다.

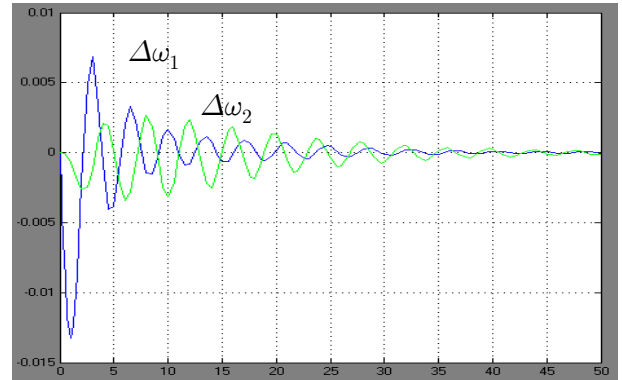


그림 20 Bias Factor 높을 때
Fig. 20 Bias Factor at high

반면, 주파수 Bias Factor가 각 지역의 주파수 응답특성보다 상당히 작은 값으로 설정하게 되면 그림 21과 같이 두 지역에 위치한 전력계통 모두 주파수 편차 회복에 많은 시간이 소요된다.

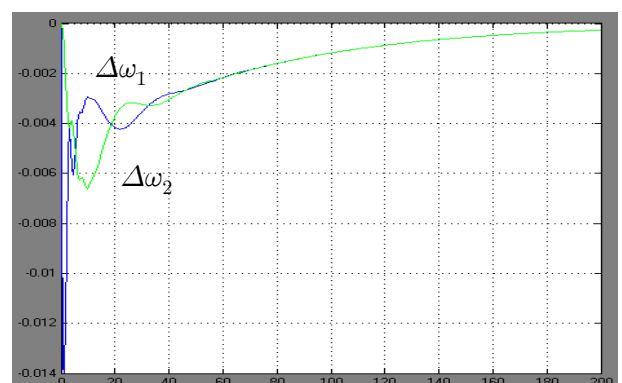


그림 21 Bias Factor 낮을 때
Fig. 21 Bias Factor at low

2.3 발전기 조속기 동특성 시험시스템 개발

2.3.1 개발이론

발전기 조속기의 동특성을 확인하는 방법으로 디지털 조속기의 경우에 계통에 연계되어 운전 되고 있는 발전기의 출력제어계에 임의 주파수 파형을 입력함으로써 발전설비의 시정수를 포함한 발전기 조속기의 응답특성을 동적으로 측정할 수 있다.

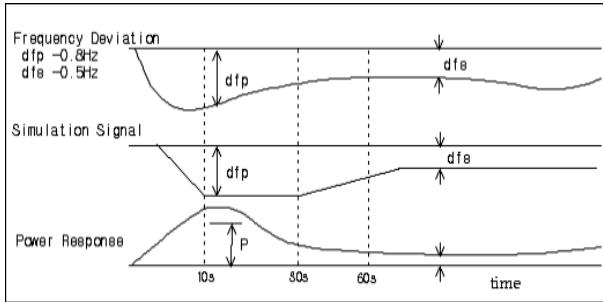


그림 22 주파수 저하시 출력변화 모델
Fig. 22 Output characteristic model when frequency falls

이와 같이 시험하기 위해서는 가상 모의 파형을 공급연료 제어밸브 제어계에 입력(①) 하거나 경사속도 조정기 전단에 입력(②)하는 방법이 있다.

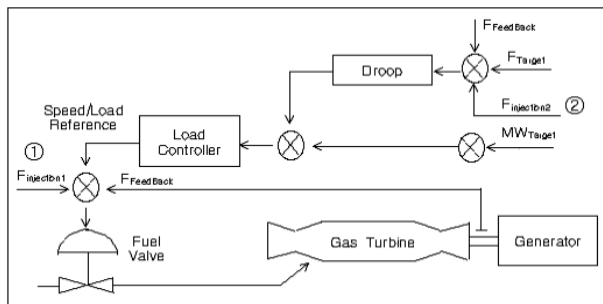


그림 23 모의 주파수 신호의 입력 방법
Fig. 23 Input method of the simulated frequency signal

2.3.2 개발방법

발전기 출력제어(load controller)의 경사속도 조정기 전단에 가상 모의파형을 입력하는 방안이 출력변화의 안전성이 높으므로 이 방식으로 개발 방향을 선정하고 ABB사의 제어 시스템(Procontrol P13/42)에 조속기 동특성 시험시스템을 개발하여 적용하였다. 개발 방법은 기존제어시스템에 내장된 기본함수(basic function)를 사용하였다.

과도 주파수 파형은 시지연을 갖는 두 개의 분할된 파형을 서로 조합하여 만들 수 있으므로, 2개의 적분기가 필요하다. 첫 번째 적분기에서 설정된 시간 동안 주파수 편차를 증가시켜 파형(dF_1)을 생성하고, 두 번째 적분기에서 설정된 시간 동안 증가된 주파수 편차 만큼 다시 감소되는 파형(dF_2)을 생성한다. 따라서 생성된 과도 주파수 파형은 계통

주파수(F)에 모의 주파수 파형(dF_a)을 차감한 값이 된다.

$$F = F - dF_a \quad (8)$$

적분기는 내장 함수 중 적분함수(SWI)를 사용한다. 적분기의 동작특성은 그림 24와 같이 출력(A_1)은 상한치(OG)와 하한치(UG)로 제한되고, EUT 신호가 로직 '0'이 되면, 적분시간(TY_1)으로 입력(E_1)을 추종하며, 로직 '1'이 되면 적분시간(TY_2)로 입력(E_1)을 추종한다[9].

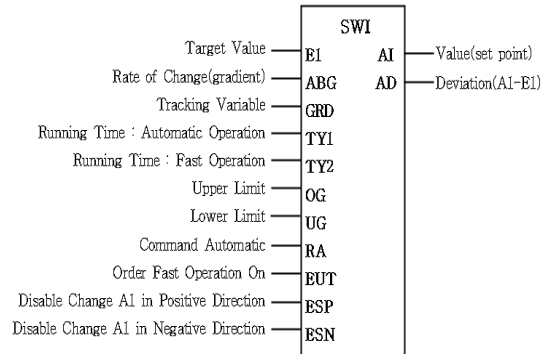


그림 24 적분함수(SWI)
Fig. 24 Integral Function(SWI)

따라서 적분기를 사용하면 적분시간(TY_2) 동안 입력(E_1) 신호가 선형적인 아날로그 신호로 출력(A_1)되므로 다양한 파형을 만들 수 있다. 모의 주파수 파형(dF_a)은 두개의 적분기를 통해 식(9)와 같이 생성된 두 개의 신호를 차감하여 생성할 수 있다.

$$dF_a = (dF_1 - dF_2) \quad (9)$$

과도 주파수 파형을 일정시간 유지하여야 하므로 첫 번째 모의 주파수 파형이 생성되고 일정시간 후에 두 번째 모의 주파수 파형이 생성될 수 있도록 내장 함수 중 타이머 함수(ESV)를 사용한다.

그림 25는 타이머 함수 기능으로 입력(E_1) 신호가 설정시간(T) 이상 유지되면, 디지털 신호가 출력(B)되므로 시간이 지연된 출력을 얻을 수 있다. 설정 시간은 0.01초에서 69분 까지 가능하도록 기능을 제공하고 있다[9].

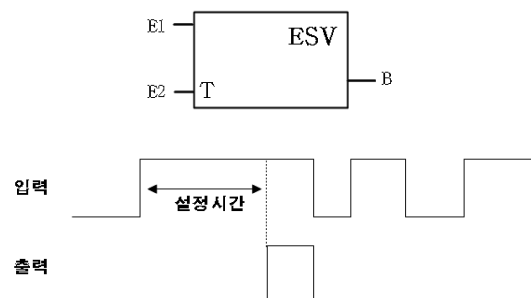


그림 25 타이머 함수(ESV)
Fig. 25 Switch On-delay Function(ESV)

타이머가 동작 시점은 첫 번째 적분기의 동작이 완료된 직후가 되어야 하므로 적분기 출력신호가 일정 값 이상 될 때를 감지하기 위해 그림 26과 같이 경계함수(GOG)를 사용한다.

이 함수의 기능은 입력(X)이 설정 값(L) 보다 크게 되면 출력($X > L$)에 로직 '1'의 디지털 바이너리 신호가 발생한다. 여기서, 히스테리시스(HYS: Hysteresis)는 입력(X)이 설정 값(L) 부근에서 난조 할 경우 출력이 로직 '0'과 '1'을 반복하게 되므로, 이를 방지하기 위해 입력(X)이 설정 값(L)을 초과하면 출력에 로직 '1'이 발생하지만 입력(X)이 저하될 때는 설정 값(L)과 히스테리시스(HYS)를 더한 값보다 더 작아져야만($X = L - HYS$) 출력이 로직 '0'이 발생하게 된다[9].

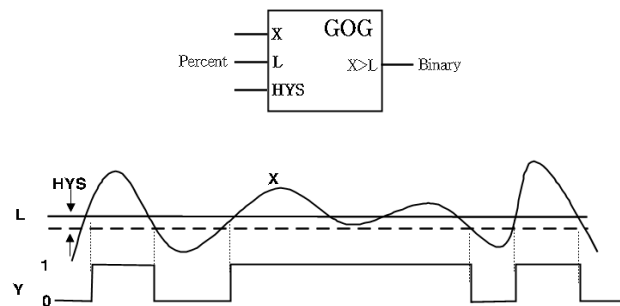


그림 26 경계함수(GOG)
Fig. 26 Threshold Max Function(GOG)

적분기에 생성된 파형을 제어시스템에서 사용할 수 있는 신호로 변환하기 위해서는 내장 함수 중 덧셈/곱셈 함수(SMU: Adder Multiplying Function)를 사용한다. 이 함수는 그림 27과 같이 입력($E_1 \dots E_n$)에 가산 벡터(K)가 곱하여 출력($A0$)을 얻는다[9].

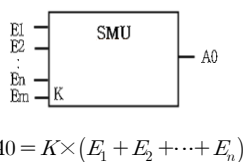


그림 27 덧셈/곱셈 함수(SMU)
Fig. 27 Adder Multiplying Function(SMU)

생성된 두개 파형을 차감하기 위해 덧셈/뺄셈 함수(ADS)를 사용한다. 이 함수는 입력($X_1 \dots X_n$)을 모두 합산하여 출력(Y)되며, 입력이 (-)이면 뺄셈 함수가 된다[9].



그림 28 덧셈/뺄셈 함수(ADS)
Fig. 28 Adder/Subtract Function(ADS)

적분기에서 생성된 파형은 SMU와 ADS 함수를 사용하여 식(10)과 같이 모의 주파수 파형을 얻을 수 있다. 여기서 상수(C_1, C_2)는 측정된 속도신호의 크기와 주파수 신호와의

배율을 맞추기 위해 적용된 상수이다.

$$dF_a = (dF_1 - dF_2) = (K_1 \times C_1 \times C_2) - (K_2 \times C_1 \times C_2) \quad (10)$$

- 여기서, K_1 : 첫 번째 적분기 출력신호
- K_2 : 두 번째 적분기 출력신호
- C_1 : 기준치리신호에 대한 속도신호의 비율
- C_2 : 회전속도에 대한 기준치리신호의 비율

시험기를 구동시키기 위해서는 스위치 절환 함수(UMS)를 사용한다. 이 함수는 그림 29와 같이 선택신호(S_2)을 사용하여 입력(E_1, E_2)을 선택하여 출력(B)을 얻으므로 적분기 입력 값을 설정하거나 시험 시스템의 출력을 제어하는 용도로 사용할 수 있다[9].

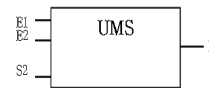


그림 29 스위치 절환함수(UMS)
Fig. 29 Changeover Switch Analog Function(UMS)

다양한 함수를 조합하여 조속기 동특성 시험 시스템의 알고리즘은 그림 30과 같이 구현 할 수 있다.

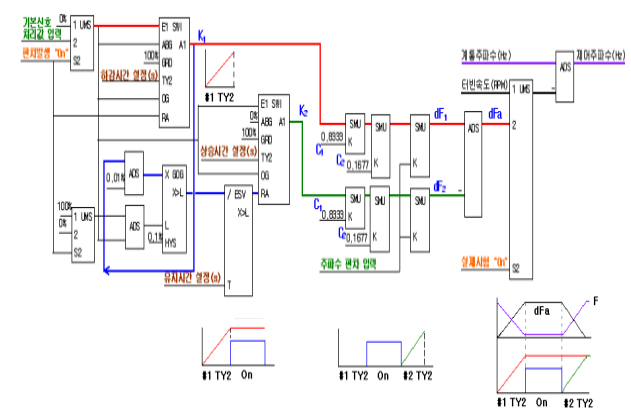


그림 30 디지털 기반 조속기 동특성 시험시스템 개발로직
Fig. 30 Governor dynamic test system development based on digital logic

시험 시스템은 스위치 절환함수(UMS)로 구동하며 첫 번째 적분기(SWI)에 입력된 신호가 적분시간(하강시간) 동안 선형적인 출력(K_1)이 신호 환산 계수(C_1, C_2)를 거쳐 주파수 편차(dF_1) 신호가 발생한다. 첫 번째 적분기의 출력이 최고치에 도달하면 경계함수(GOG)의 동작으로 타이머(ESV)가 구동 된다. 타이머의 설정시간(유지시간) 동안 첫 번째 적분기에서 발생한 주파수 편차(dF_1) 신호는 변화되지 않는다.

타이머 설정시간이 경과되면 두 번째 적분기(SWI)를 구동하게 되고 적분시간(상승시간) 동안 선형적인 출력(K_2)이 신호 환산 계수(C_1, C_2)를 거쳐 주파수 편차(dF_2) 신호가 발생

된다. 이 신호는 첫 번째 적분기에서 출력된 주파수 편차 (dF_1) 신호와 차감되어 결국 편차가 '0'이 되므로 초기 상태로 주파수가 복귀하게 된다. 즉, 조속기 동특성 시험시스템은 2개의 적분기를 사용하여 모의 주파수 과형을 만들 수 있으며, 첫 번째 적분기에서 입력된 주파수 편차를 설정된 하강시간 동안 감소시키고, 일정시간 유지되며, 두 번째 적분기에서 설정된 상승시간 동안 감소된 주파수 편차 만큼 다시 증가시키는 방법으로 구현된다.

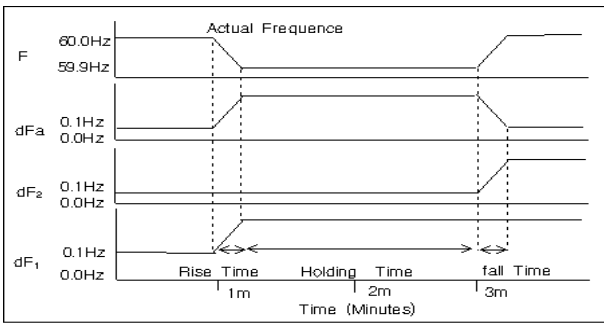


그림 31 조속기의 동특성 시험시스템 동작특성
 Fig. 31 Characteristics of the governor dynamic test system

다음은 실제 발전기 제어시스템에 조속기 동특성 시험시스템을 구현한 결과이다.

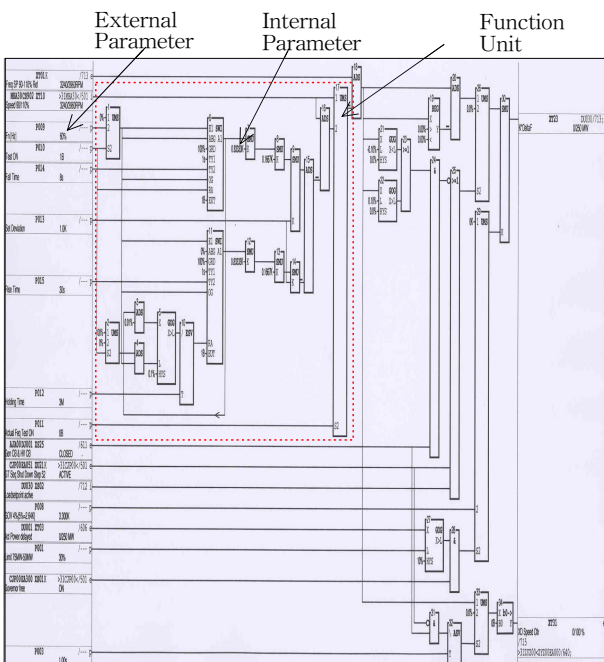


그림 32 조속기의 동특성 시험시스템 적용
 Fig. 32 Application of the governor dynamic test system

시험절차는 그림 33에 나타난 블록다이어그램(Block Diagram)과 같이 발전기 출력이 변화되는 실제시험 이전에 시험시스템의 출력 신호를 차단하고 과도한 동작을 사전에 검증할 수 있는 자체 진단 모의시험 기능을 갖추고 있다.

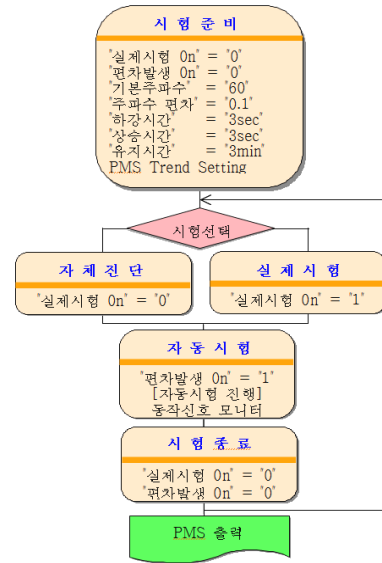


그림 33 시험시스템 시험절차
 Fig. 33 Test procedures of the system

시험시스템은 발전기가 계통에 연계되어 운전되는 상황에서 조작이 가능하고 일련의 시험과정은 자동으로 진행된다. 기준 신호처리 값으로 '60'을 설정한다. 이 값은 주파수와 시간의 분할 형태가 같아 적분기의 동작시간을 실시간으로 일치시킬 수 있다. 여기에 적용된 모든 제어시스템 내장 함수의 정밀도는 소수점 이하 4자리까지 보장하므로 제어시스템의 오차 범위 이내에서 정밀도를 확보할 수 있다.

2.4 조속기 동특성 시험시스템 실증시험

2.4.1 조속기와 AGC의 협조제어 특성

주파수가 변동되는 최초에 부하의 자기제어특성과 터빈-발전기의 관성정수로 초기 주파수 변화를 억제하고 그 이상 범위를 벗어난 변동에 대해서 발전기의 조속기가 동작된다. 조속기만으로 부족한 출력은 AGC의 동작으로 주파수를 회복하는 협조제어를 한다[10].

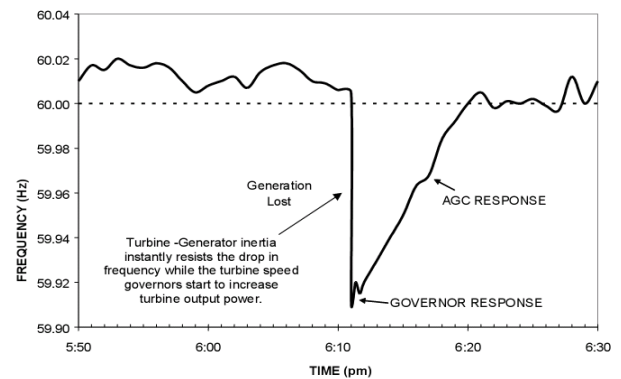


그림 34 조속기와 AGC의 협조제어 특성
 Fig. 34 Cooperative characteristics of the governor and AGC

따라서 조속기의 동작 신뢰도를 확인하기 위해서는 AGC를 정지하고 시험하여야 하고, AGC가 운전되고 있는 상태에서는 조속기와의 협조제어 특성이 동적으로 검증될 수 있다. 또한 조속기 동작중 AGC가 On/Off 되는 운전 조건에 대한 발전기 조속기의 동작 영향을 확인할 수 있다.

2.4.2 실증시험 결과

발전기 정상 운전중 조속기 동특성 시험시스템을 실증 시험한 결과 주파수 변동에 따른 발전기 출력특성이 그림 35와 같이 확인되었다.

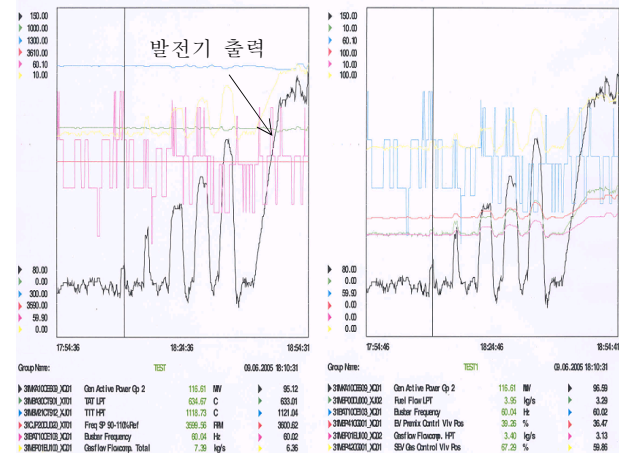


그림 35 조속기의 동특성 시험결과
Fig. 35 The results of the dynamic characteristics

주파수 편차를 0.1Hz 단위로 5회에 걸쳐 변화시켜 시험한 결과 발전기 정격출력 136MW 대비 최대 31MW 까지 출력이 상승되어 정격출력 대비 증가분($\Delta P/P_N$)과 주파수 변화분($\Delta f/f_N$)의 비율인 조속기의 속도조정율은 4.4%로 계산된다.

주파수의 작은 변화나 발전기의 출력 응답량이 적은 130MW의 고출력에서의 출력 변화는 제한적이므로 속도조정율 계산의 의미는 없다.

표 4 발전기 출력특성 결과
Table 4 The results of the generator output characteristics

기준출력 (MW)	주파수 (Hz)	설정시간 (sec)			응동량 (MW)	증가량 (MW)	속도조정율 (%)
		하강	유지	상승			
90	59.9	1	60	1	97	7	19.4
	59.8	4	180	10	103	13	10.4
	59.7	8	180	30	108	18	7.5
	59.6	8	180	30	114	24	5.6
	59.5	8	180	30	121	31	4.4
130	59.9	1	60	1	135	5	27.2
	59.8	4	180	10	136	6	22.6
	59.7	8	180	30	136	6	22.6
	59.6	8	180	30	136	6	22.5

2.4.3 실증시험 결과분석

(1) 발전기 출력변화 시험결과

발전기의 출력제한 요소로 기력발전기는 발전기 출력이 급격히 증가될 때 출력 조절밸브의 과도한 개방으로 인해 터빈 계통에 습증기가 유입되어 기계적인 손상을 방지할 목적으로 밸브 제한치(VPL)를 설정하고 있으며, 복합발전기의 경우에는 연소실과 터빈날개 등 고온부품의 허용온도 이내로 유지하기 위해 발전기 출력은 고압터빈의 입구온도에 의해 식(11)과 같이 연소온도, 압력 및 대기온도에 제한된다. 그러나 주파수 신호와 관계하여 발전기 출력을 저하시키는 요소는 없다.

$$TIT = (TAT_{avg} \times A) + \left(\frac{P_{Comp}}{P_{LPT}} \right) \times B + (T_{at} \times C) + D \quad (11)$$

여기서,

- TIT : Turbine Inlet Temperature of HP Turbine
- TIT_{avg} : TIT HPT Average Temperature (24 sensors)
- P_{comp} : Pressure after Compressor
- P_{LPT} : Combustor Plenum Pressure
- T_{at} : Ambient Temperature
- A, B, C, D : Percent constants

주파수가 급격히 변화될 때 발전기 출력이 응답하지 못한 주요 원인으로 기력발전기의 VPL과 복합발전기의 연소 온도 제한으로 최초 추정되었으나 실증시험 결과에서는 발전기의 최대 출력 상황에서 주파수가 변화될 때 그림 35의 다섯 번째 출력 파형과 같이 일정한 출력 범위를 유지하고 있었으며, 출력제한 특성에 대한 모의시험 결과와 같이 출력이 감소되는 현상은 나타나지 않았다.

(2) 조속기 응답특성 시험결과

발전기 조속기의 초기 응답특성은 다소 지연되어 나타났으며, 속도조정율이 기본 값 5%보다 높은 4%의 경우에도 크게 개선되지는 않았다. 그러나 다섯 차례 시험결과 모두 주파수 저하 대비 발전기 출력은 증가하므로 조속기의 지속적인 동작 안정성은 양호한 것으로 검증되었다.

가스터빈 발전기에 적용된 DEH(Digital Electro Hydraulic) 조속기는 아날로그 하이브리드(Analog Hybrid)를 통해 터빈 밸브 액추에이터를 제어하는 마이크로프로세서를 사용한 디지털 제어시스템이다. 조속기 동작은 소프트웨어로 구현된 제어 함수를 사용하여 상당히 높은 유연성을 제공하고, 터빈 속도 제어함수는 4~5%의 속도조정율을 설정할 수 있다. 또한 조속기 응답은 0.03초 정도로 매우 빠르고 노이즈 제거용 필터와 작은 주파수 변화로 인한 조속기의 난조를 방지하는 부동대(Dead band)가 최대 0.06%까지 설정된다.

발전기 출력조정을 위한 입력 요소로서는 발전기 출력, 주파수 및 터빈 속도가 있으며, 발전기 출력 제어를 위한 요소는 압축기 전단에 설치된 3단의 가변가이드 베인(VIGV: Variable Inlet Guide Vane)을 통한 연소공기량 제어와 2단

계로 구성된 연소계통인 기동 및 저부하용 파이롯(Pilot) 버너(EV: Environment Burner)와 저 NOx 연소를 위한 프리믹스(Premix) 버너(SEV: Sequential Environment Burner)에서 연료량을 제어한다.

발전기의 조속기(Speed-Droop) 신호는 연소공기량과 연료량을 제어하기 위한 부하-주파수 제어시스템에 입력되도록 그림 36과 같이 구성되어 있다[9].

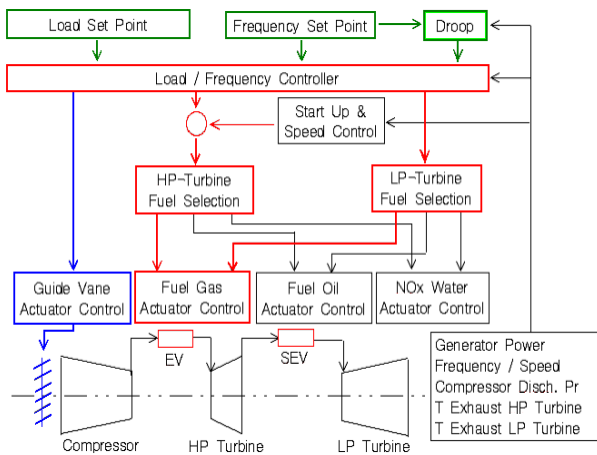


그림 36 가스터빈 출력제어 시스템
Fig. 36 Output control system of the Gas Turbine

발전기 출력의 응답 특성은 연소계통의 시정수와 관계되며, 그림 37과 같이 하나의 배관으로 연료가 공급되고 제어되는 방식(Annular Type)에 비해 여러 배관으로 연료를 분배되는 방식(Silo Type)이 더 높은 응답특성을 갖는다.

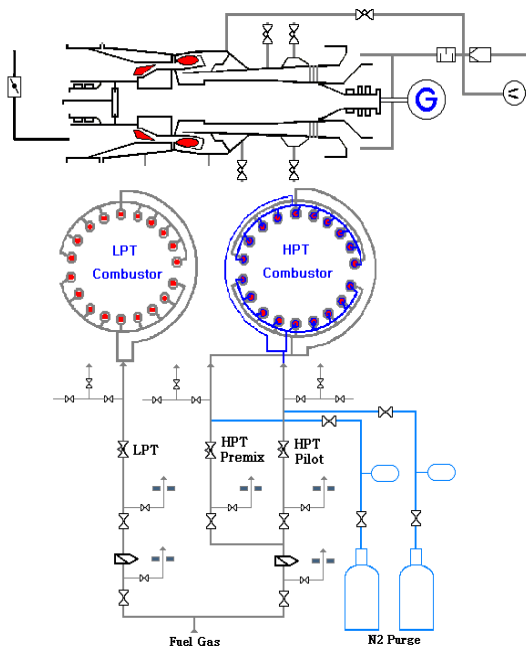


그림 37 가스터빈 연소계통
Fig. 37 Combustion System of Gas Turbine

보령 복합발전기의 경우 발전설비의 안정성을 고려한 증기터빈의 출력 제어계의 램프(Ramp) 지연회로와 그림 37과 같이 연료공급이 단일 계통으로 구성되어 있어 연소설비의 시정수에 따른 결과로 조속기의 속도조정을 증가에도 초기 응답 특성이 일정하게 나타나는 것으로 분석된다.

(3) 조속기와 AGC의 협조제어 시험결과

조속기와 AGC와의 협조제어 특성시험 결과에서는 발전기 출력 증발량에 큰 차이가 있는 이상 현상이 나타났다. AGC가 정지된 상태에서 주파수 0.2Hz 저하시 조속기 동작에 의한 발전기 출력은 12MW/37s로 급증발 되었지만 AGC가 운전될 때에는 발전기 출력은 분당 7MW로 완만한 상승이 확인되었다.

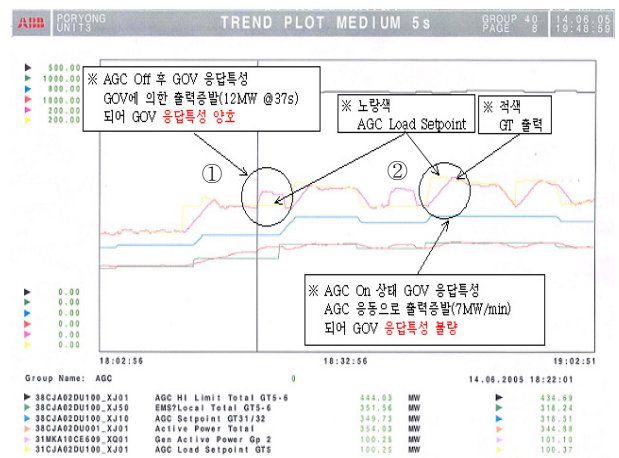


그림 38 AGC 특성
Fig. 38 Characteristic of the AGC

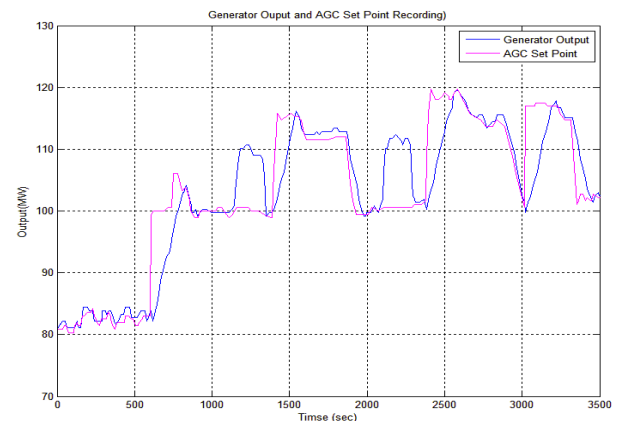


그림 39 발전기 출력과 AGC 설정 기록
Fig. 39 Recording of the Generator output and AGC set-point

이와 같은 출력 변화량은 조속기 동작 없이 순수한 AGC의 동작에 따라 가스터빈 발전기의 출력 증발량의 결과와 같다.

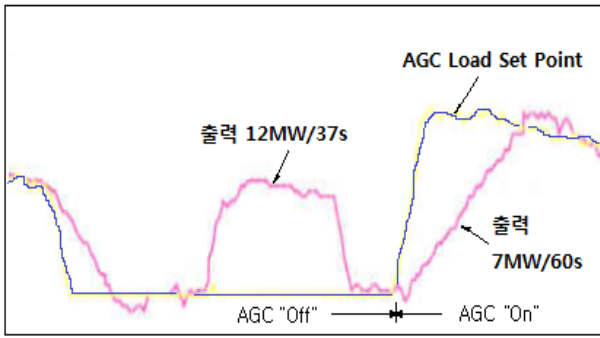


그림 40 조속기와 AGC의 협조제어 결과
 Fig. 40 The results of the cooperative control

주파수 0.4Hz 변화 시 발전기의 출력 변화량을 곡선 적합한 결과 AGC가 Off 되고 조속기가 동작될 때 기울기가 3배 이상의 높은 것으로 확인되었다.

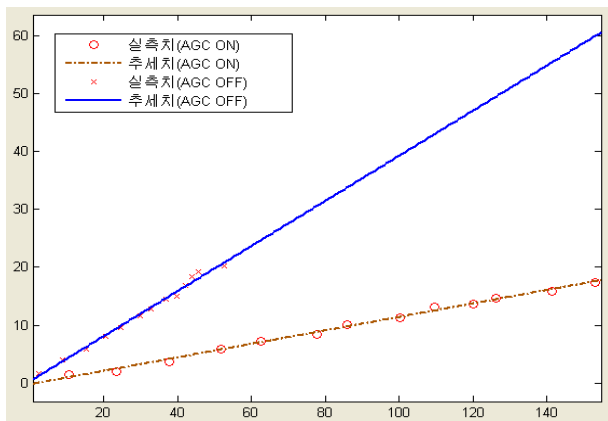


그림 41 발전기 출력 비교
 Fig. 41 Comparison of the Generator output

특히 조속기에 의해 발전기의 출력이 상승하는 시점에 AGC를 On하는 경우에는 발전기 출력이 다시 감소되는 현상이 그림 42, 43과 같이 나타났다.

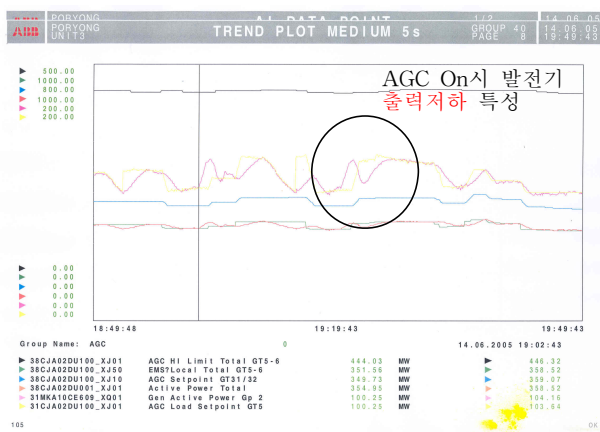


그림 42 AGC에 의한 발전기 출력
 Fig. 42 The generator output by AGC

이러한 현상은 조속기 동작에 우선하여 발전기의 출력 제어를 AGC가 선점하여 나타난 현상으로 분석된다.

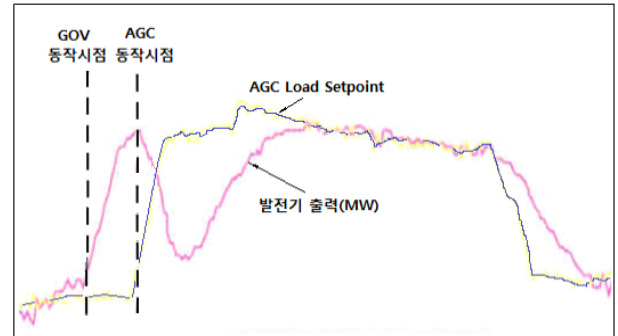


그림 43 AGC에 의한 발전기 출력 영향
 Fig. 43 The impact of the generator output by AGC

주파수의 과도편차 0.45Hz가 발생하면 AGC는 블록킹 (Blocking) 되도록 설정되나, 과도 발생 초기 블록킹 시점이 부적합 하거나 주파수 회복 시점에 블록킹이 해제되어 조속기에 의해 발전기 출력이 계통에 충분히 반영되지 않은 상태에서 발전기 출력 제어를 선점하는 경우 또는 AGC에 피드백(Feedback)되는 발전기의 현재 출력이 실시간으로 반영되지 않을 때 AGC는 조속기가 동작되기 이전의 발전기 출력을 목표치로 추종하게 되므로 조속기에 의해 증발된 출력을 저하시키는 결과를 초래하게 된다.

따라서 AGC의 비정상 동작에 의해 광역정전 발생시 다수의 발전기의 출력이 주파수 회복시점에 오히려 저하된 주요 원인으로 분석된다.

해결 방안으로 모의시험에서 확인된 바와 같이 AGC의 동작 조건을 전력계통 여건에 적합한 설정치로 제어 변수가 최적화 되어야 하고 발전기 출력이 실시간으로 AGC에 반영되도록 개선하면 근본적으로 문제가 해소될 것으로 판단된다.

3. 결 론

전력시스템의 대형화로 인한 광역정전 또는 전력계통 붕괴로 인한 막대한 피해 상황을 고려하면, 터빈-발전기 조속기 시스템의 동작 신뢰도 검증과 AGC의 협조제어 특성을 확인하는 것은 매우 중요하며, 계통 안정도를 위한 기본적인 요구사항이기도 하다.

새로운 시험방법으로 개발된 조속기 동특성 시험시스템은 고장시 주파수와 유사한 주파수 파형을 생성하도록 설계되어 있으며, 시험을 진행하기 전에 동작 상태를 검증할 수 있도록 자체 진단 기능도 갖추고 있다. 동작 알고리즘과 설계 구조는 기존 제어시스템이 내장하고 있는 함수를 사용하므로 최소 비용으로 쉽게 구현될 수 있고, 제어시스템의 오차 한계 이내에서 정밀도를 가지며, 발전기 개별로 디지털 기반의 조속기 동특성 시험시스템을 구축 할 수 있다. 특히 발전기가 계통에 연계되어 정상적으로 운전되고 있는 상황에서 시험이 가능하므로 전력계통의 운전특성을 반영하여 발전설비의 시정수를 포함한 조속기의 동특성에 대한 검증이

가능하다.

가스터빈 발전기 제어시스템에 조속기 동특성 시험시스템을 설치하고 실증시험을 시행한 결과 매우 성공적으로 시험시스템이 동작하였으며, 과도 주파수 변화에 따른 발전기 조속기의 동작 신뢰도를 검증하고, AGC와 조속기의 협조제어 특성도 확인 할 수 있었다.

개발된 시험시스템의 시험결과로부터 조속기의 지연 동작이 발생한 원인으로 발전설비의 단일 연료계통에 의한 시정수로 분석되었고, 과도 상황시 AGC의 비정상 동작으로 인해 발전기 출력이 저하된 원인을 규명함으로써 최초로 의심되었던 발전설비의 여러 출력 제약요소의 관계를 명확히 하고 부차적인 조치나 잔존 문제로 인한 재발 가능성을 없애고 근본적으로 문제를 해소하기 위한 대책 강구에 집중하는 기회가 되었다.

국내에서 처음으로 시도된 디지털 제어시스템을 기반으로 하는 발전기 조속기의 동특성 시험시스템은 유사 기종에 단기간에 쉽게 구축 할 수 있다. 궁극적으로 전력계통 안정도 향상에 기여하기 위해서는 모든 발전기의 조속기에 대한 신뢰도 검증과 최적 운영에 필요한 다양한 제어요소에 대한 상관 분석이 필요하며, 이를 위해 다기종 제어시스템에 조속기 동특성 시험시스템을 구체적으로 적용할 수 있는 방안에 대한 지속적인 연구가 요구된다.

참 고 문 헌

[1] Korea Power Exchange, "Analysis reports on the frequency decrease", 1-42p, 2003.4
 [2] MathWorks "SimPowerSystems For Use with Simulink, User's Guide"
 [3] PSS/E-29 "Program Operation Manual Volume II"
 [4] Song, K.Y. "Power System Engineering" Dong-il, 1999
 [5] Kunder, Prabha, "Power System Stability and Control", Mc Graw-Hill, 191-197p, 1994
 [6] Korea Electrotechnology Research Institute "Incheon CAPP #1 Model Parameter Determination and Assesment of Voltage Control Loop on the Characteristic Testes of Generator/Excitation System" , 2006
 [7] Hadi Saadat, "Power Control System " Second Edition, Mc Graw-Hill, 2002
 [8] WILEY Normans NISE "Control System Engineering Forth Edition" 2005
 [9] ALSTOM, "Procontrol P13/42 Control Function Description", 1-100p, 2004.1
 [10] B.J. Kirby, J.Dyer, C.Martinez, Dr. Rahmat A. Shoureshi, R. Guttromson, J. Dagle, "Frequency Control Concerns In The North American Electric Power System", 1-32p, December, 2002.

저 자 소 개



최 형 주 (崔亨柱)

1967년 9월 15일생. 1999년 청운대 전자계산학과 졸업. 2010년 충남대 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 충남대학교 전기공학과 박사과정, 한국중부발전(주) 선임전문원.

E-mail : nimble@komipo.co.kr



이 흥 호 (李興浩)

1950년 10월 28일생. 1973년 서울대 공업교육과(전기전공) 졸업. 1977년 동 대학원 공업교육과 졸업(석사). 1994년 동 대학원 컴퓨터공학과 졸업(박사). 현재 충남대학교 전기공학과 교수.