

# 가스터빈 발전기의 자동 출력제어 회로와 출력신호 피이드백 회로의 필터 사용 효과에 관한 연구

김종안, 최인규 (전력연구원)

## The effect of use of a 1st order time delay in the MW control loop in a gas turbine generator and the simulation results

Shin Yoon-Oh, Choi In-Kuy (KEPRI)

### 요약문

본 논문에서는 국내에서 운전 중인 한 가스터빈 출력제어 회로의 구성을 살펴보고 현장에서 취득한 자료를 근거로 하여 가스터빈의 모델과 제어기의 조정, 그리고 MW 신호 피이드백 회로에 필터의 사용 효과를 시뮬레이션을 통해 살펴보았다. 전력계통의 주파수가 가스터빈 출력제어계의 시상수에 비해 상당히 빠르게 변하므로 자동 주파수 추종을 할 경우 제어계가 쉽게 불안정해진다. 이 출력제어계의 MW 피이드백 회로의 1차지연 요소를 사용하면 안정성 향상에 좋은 효과가 있으며, 이 지연요소의 시상수를 크게 할수록 안정도는 더 향상되며 Open Loop의 특성을 보이게 된다. 그러나, 주파수 추종운전이 아닌 운전원의 출력 증감발 요구에는 시간지연 없이 응답을 하여야 하므로 적절한 설정을 할 필요가 있다.

가스터빈의 연료제어 계통을 포함한 출력제어계에 순수 시간지연 요소가 없으면 피이드백 회로에 1차지연 요소를 사용하지 않는 것이 더 좋은 출력제어 응답을 나타낸다. 그러나 실제 모든 가스터빈에는 다소 시간지연 요소를 포함하고 있으므로 일반적으로는 피이드백 회로에 시간지연 요소를 사용하므로써 안정성을 향상시킬 수 있다.

### 1. 서론

전기는 현재 실용적으로 저장이 불가능하기 때문에 생산과 소비가 일치해야 하는 특성을 갖고 있다. 전기의 주파수는 전기의 소비와 공급의 균형 상태에 따라 시시각각 변동을 하며, 현대의 고품질 전기사용 수용가의 욕구를 만족시키기 위해서는 일정 주파수 유지가 매우 중요하다. 따라서

전기사업자는 주파수를 일정히 유지시키기 위해 다양한 형태의 노력을 하고 있으나, 단기간의 전기의 수요를 예측하는 것은 매우 어려운 실정이다. 각 발전소에서는 발전기 출력 제어회로에 전력계통의 주파수를 입력으로 하여 주파수 일정제어를 도모하고 있다. 즉, 주파수가 정격인 60Hz를 벗어나면 이 편차의 크기에 비례하고 방향이 반대인 발전기 출력제어가 되도록 하는 주파수 추종제

어를 하고 있다. 보통 이 제어회로에는 발전기의 실제출력인 MW 신호를 피이드백 받아 사용하고 있는데 이 신호에는 상당한 크기의 잡음이 포함되며, 주파수의 추종성을 향상시킬 목적으로 제어기의 이득을 높이면 쉽게 불안정해지는 경향을 갖고 있다. 여기서는 국내에서 운전 중인 한 가스터빈 출력제어 회로의 구성을 살펴보고 현장에서 취득한 자료를 근거로 하여 가스터빈의 모델과 제어기의 조정, 그리고 MW 신호 피이드백 회로에 필터의 사용 효과를 살펴보고자 한다.

## 2. 본론

### 2.1 터빈 출력의 주파수 추종제어 운전

계통 주파수의 목표치 내 유지는 양질의 전력 공급의 중요한 요소 중 하나이다. 따라서 각 발전소에서는 전력계통 주파수를 일정히 유지하도록 발전기 출력을 제어하고 있는데, 그 추종성의 양부에 대한 평가 요소는 발전기 출력의 주파수와의 대칭성과 속도 조정율의 크기가 된다.

### 2.2 주파수 출력의 주파수와의 선대칭성

주파수가 정격인 60 Hz를 벗어나 편차가 발생하면 이 편차의 크기에 비례하고 주파수와 방향이 반대가 되도록 발전기 출력제어가 이루어지는데, 이 때 주파수 편차에 대응하는 출력의 주파수 대칭성이 양호한 국내 한 발전소의 운전 자료를 통해 보면 아래 그림과 같다.

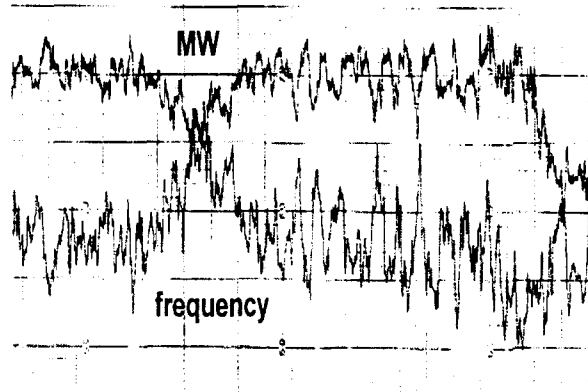


그림 1. 대칭성이 양호한 주파수 추종 운전

### 2.3 속도조정율

주파수 편차의 크기에 비례하여 응동하는 출력의 크기를 나타내는 속도 조정율의 정의는 다음과 같다.

$$speed\ regulation = \frac{\frac{\Delta frequency}{60}}{\frac{\Delta MW}{base\ load}} \times 100\%$$

### 2.4 주파수 추종운전 회로 구성

발전기가 정상적으로 송전선로에 연결되어 운전 중일 때 전력계통의 주파수와 터빈의 운전속도 (RPM)는 항상 일치한다. 따라서 터빈을 정격속도인 3600 RPM으로 일정하게 유지하는 제어회로에 의해 터빈의 실제속도가 Set Point(3600RPM)와 비교되어 그 편차(Speed Error)로 터빈-발전기의 출력을 제어하는 운전이 이루어지며, 이 운전 형태가 주파수 추종(Governor Free) 운전이다.

### 2.5 가스터빈 출력제어 프로세스 주파수 특성

가스터빈 실제 출력제어계를 간단한 블럭선도로 그리면 그림 2와 같다. 그림 3은 전달함수로 표시한 블럭선도이다.

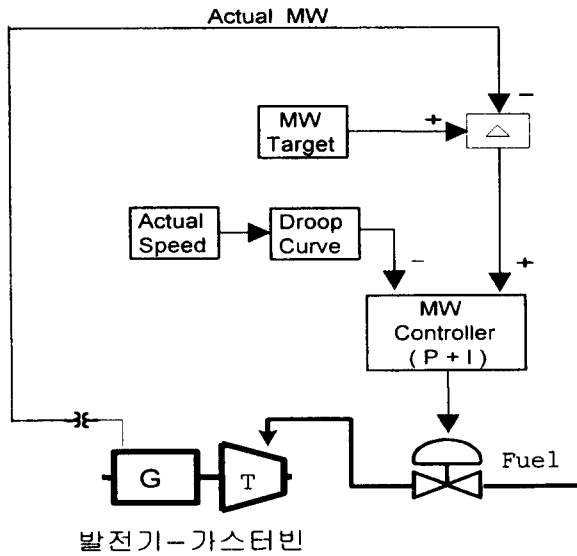


그림 2. 가스터빈 발전기의 출력제어 루프 구성

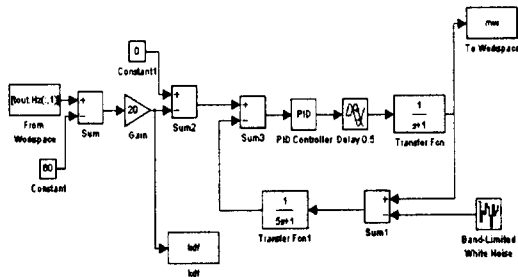


그림 3. 가스터빈 출력제어계의 전달함수 표시

가스터빈 정상 운전 중 출력제어계에 다음 그림 4에서와 같은 난조 현상이 수 차례 발생한 실적이 있었다.

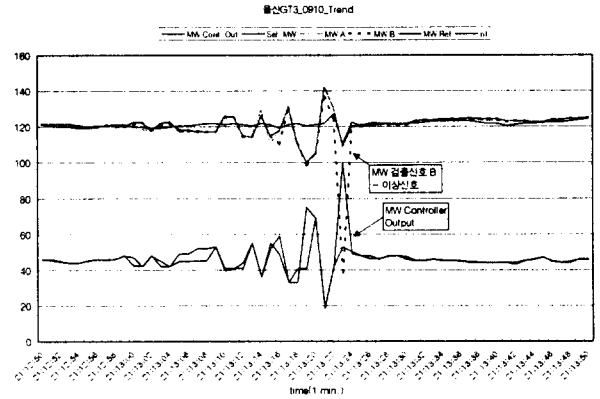


그림 4. 가스터빈 출력제어계의 불안정 현상

출력제어의 난조 발생의 원인은 몇 가지를 들 수 있으나 가장 유력한 원인은 PI 제어기의 이득 값이 상당히 높다는 것이다. 왜냐하면 이득을 높이고 난 후 난조 현상이 집중적으로 발생하였으며, 반대로 이득을 줄인 후에는 난조 현상이 사라졌기 때문이다.

PI 제어기의 이득을 증가시킨 이유는 가스터빈 출력의 주파수 추종성을 향상시키기 위한 목적이었으며, 이득을 감소시키면 주파수 추종성이 불량해진다.

### 2.6 PID 제어기 구조

가스터빈 연료제어 시스템의 PID 제어기 구조는 다음과 같다.

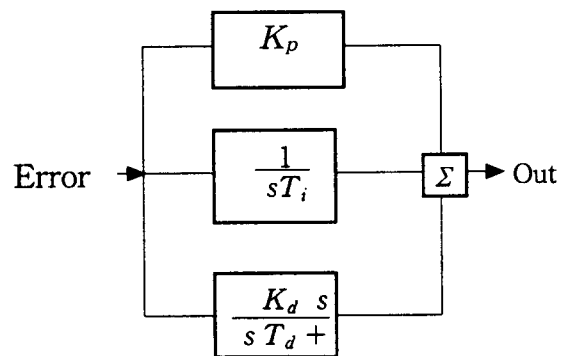


그림 5. 제어기의 구조

여기서,  $K_p$  =비례이득

$T_i$  =리셋시간

$K_d$  =미분이득

$T_d$  =미분Rate

Error = Set Point - Process

Variable

$K_d$ 를 0으로 설정하여 미분기능을 사용하지 않고 있으므로 제어기 동작의 계산식은 아래와 같다.

$$Out = (K_p \times Error) + \frac{1}{T_i} \int Error dt$$

이 가스터빈에서 속도조정율을 설정하는 기능은 그림2에서의 Droop Curve이며. 이 Curve는 144 RPM/185MW로 설정되어 있으며, 이는 속도조정율 정의 식에 의해 4%로 계산된다. 그러나 실제 가스터빈 운전 중 나타난 속도조정율은 10% 부근으로 설정값 4%와는 큰 차이가 있었다(이 때 PI 제어기의 파라미터는 Default 값인  $K_p=0.55$ ,  $T_i=40$ 초 이다.).

그래서 해당 발전소에서는 속도조정율을 당초 목표치인 4%를 유지하기 위해서 PI 제어기의  $K_p=3.0$ ,  $T_i=25$  정도로 조정을 하여 운전을 해봤으나 그림 4와 같은 불안정 현상이 발생하기 시작하였다.

속도조정율이 실제 운전 중 설정치를 달성하지 못하는 것은 계통주파수 변동이 터빈발전기 출력 제어계의 시상수에 비해 매우 빠르기 때문이며, PI 제어기의 Tuning으로 속도조정율을 향상시킬 수 있다. 그러나 제어기 파라미터 조정에 의한 속도조정율 향상은 제어계의 안정도 감소와 나아가 가스터빈의 수명 단축을 초래하므로 여러 가지 요소를 모두 고려하여 최적 값이 결정되어야 한다. 여러 운영 요소를 고려한 출력 제어계의 구성과

설정에는 여러 가지 시험이 필요하다.

## 2.7 가스터빈 출력제어 루프 비교

국내 운전 중인 가스터빈의 공급사는 3~4개 정도이며 기본적으로 출력제어 루프 구성은 비슷하나, 구체적인 요소를 살펴보면 상당히 다르다. 아래 그림 6과 그림 7의 모델은 실제 운전 중인 가스터빈 제어 루프이며, 서로 간의 차이는 MW 피드백 회로에 1차 지연요소가 있다는 것이다. 그림 8의 모델B인 경우 실제 운전에서 속도조정율과 제어계의 안정도가 매우 양호하게 운전 실적을 보이고 있다.

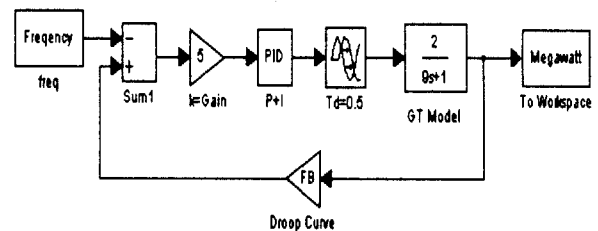


그림 6. 가스터빈 출력제어 모델 A

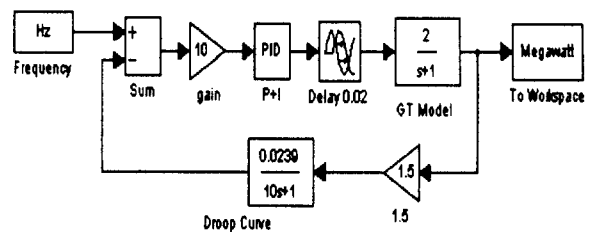


그림 7. 가스터빈 출력제어 모델 B

## 2.8 MW 피드백 사용효과 시물레이션

가스터빈 모델 A의 MW 피드백 사용효과를 관찰하기 위해 여러 가지의 시물레이션을 하였다.

가스터빈 모델과 PI 제어기의 파라미터  $K_p=4.0$ ,  $T_i=40$ 초를 일정히 유지하고 Matlab을 이용하여

시뮬레이션한 결과는 다음 그림 8과 그림 9와 같이 나타났다.

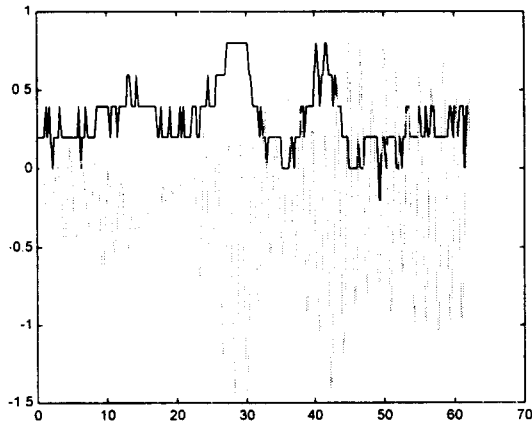


그림 8. 1차지연 요소를 사용하지 않은 경우

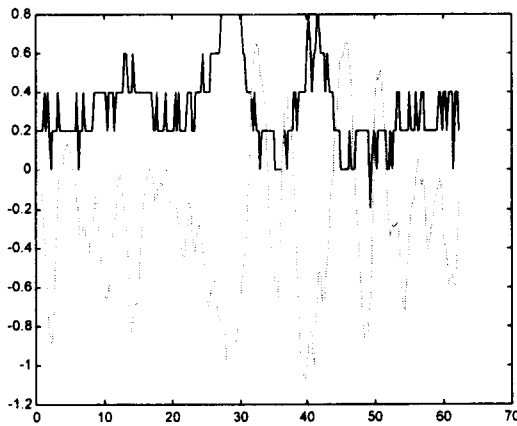


그림 9. 1차지연 요소를 사용한 경우

결과를 보면 피이드백 회로에 1차 지연 요소를 추가한 모델이 우수한 상태를 보였다. 이는 전력 계통의 주파수가 가스터빈의 출력 제어계의 시상수에 상당히 빠르게 변하기 때문이다. 피이드백 회로의 1차지연 요소의 시상수를 크게 할 수록 안정도는 더 향상되며 Open Loop의 특성을 보이게 된다. 그러나, 주파수 추종운전이 아닌 운전원의

출력 증감발 요구에는 시간지연 없이 응답을 하여야 하므로 적절한 설정을 할 필요가 있다. 그림 9에서는 1차 지연요소의 시상수를 3초로 하였다.

참고로 실제 가스터빈의 연료제어계통을 포함한 응답에 순수 시간지연 요소(그림 6, 7에서  $\text{Delay}=\text{Td}$ )가 0이면 MW 피이드백 회로에 1차지연 요소를 사용하지 않는 것이 더 좋은 출력제어 응답을 나타냈다.

그러나 실제 모든 가스터빈에는 다소 시간지연 요소를 포함하고 있으므로 일반적으로는 피이드백 회로에 시간지연 요소를 사용하므로써 안정성을 향상시킬 수 있다고 판단된다.

### 3. 결 론

전력계통의 주파수를 일정히 유지하기 위해서 발전소 가스터빈에서는 주파수 추종운전을 하고 있다. 그러나 가스터빈 출력제어계의 시상수에 비해 전기 주파수가 상당히 빠르게 변하므로 자동 주파수 추종을 할 경우 제어계가 쉽게 불안정해진다. 이 출력제어계의 MW 피이드백 회로의 1차지연 요소를 사용하면 안정성 향상에 좋은 효과가 있다는 것을 시뮬레이션을 통해 살펴 보았으며 실제 일부 가스터빈에는 적용되어 운전 중에 있다. 그러나 가스터빈 출력제어계에 순수 시간지연 요소가 없으면 피이드백 회로에 1차지연 요소를 사용하지 않는 것이 더 좋은 응답이 나타나므로 먼저 가스터빈의 모델을 정확히 파악해야 한다. 그러나 실제 모든 가스터빈에는 다소 시간지연 요소를 포함하고 있으므로 피이드백 회로에 시간지연 요소를 사용하므로써 안정성을 향상시킬 수 있다고 할 수 있다. 향후 이 결과를 가스터빈 발전소

실제 현장에 적용하여 증명하고자 한다.

[ 참고문헌 ]

- [1] 울산화력 가스터빈 운전 및 제어회로도, 1997,  
Westinghouse
- [2] 서인천 복합 가스터빈 주파수 추종성 향상을  
위한 기술지원 보고서, 1998, 전력연구원.