

발전기 출력의 계통주파수 추종성 향상에 관한 연구

김종안, 변승현, 김은기
전력연구원

A Study on Improvement of the Speed Regulation in a Gas Turbine Control

J.A.Kim, S.H.BYUN, E.G.Kim
Korea Electric Power Reserch Institute

Abstract - 전력계통의 주파수는 전력의 수요와 공급량의 평형상태에 따라 수시로 변동하며, 각 발전소에서는 이 주파수를 입력 신호로 사용하여 발전기의 출력을 제어하고 있다.

본 논문에서는 국내에서 운영하고 있는 한 개스터빈 발전소의 터빈제어 시스템을 모델로 하여 주파수 추종성에 영향을 미치는 파라미터들을 분석하고, 시뮬레이션을 통해 주파수 추종성을 향상시키기 위한 방안을 제시하였으며, 현장에 적용한 결과를 통해 제안된 주파수 추종성 향상방안의 타당성을 검증하였다.

1. 서 론

계통 주파수의 목표치 내 유지는 양질의 전력공급의 중요한 요소 중 하나이다. 따라서 각 발전소에서는 전력계통 주파수를 일정히 유지하도록 발전기 출력을 제어하고 있는데, 그 추종성의 양부에 대한 평가는 속도 조정율의 크기가 기준이 된다. 발전기 출력의 계통주파수 추종성은 발전기를 구동하는 개스터빈의 연료 제어시스템의 성능에 따라 좌우된다. 주파수가 정격인 60 Hz를 벗어나 편차가 발생하면 이 편차의 크기에 비례하고 주파수와 방향이 반대가 되도록 발전기 출력제어가 이루어지는데, 이 때 응답하는 출력의 크기, 주파수와 대칭성 그리고 응답의 신속성 3 가지가 주파수 추종성을 평가하는 주요 척도가 된다.

본 논문의 고찰 대상인 개스터빈의 연료제어 루프에는 속도조정율이 4.2%로 설정되어 있었으나 실측 자료는 7~8% 정도로 전력계통의 요구 수준인 5%를 크게 벗어나고 있었다.

본 논문에서는 속도조정율을 향상시키는 방안을 제시하기 위하여 개스터빈 연료제어 루프와 제어 루프의 파라미터들을 분석하였고, 시뮬레이션을 하여 구한 향상 방안을 현장에 적용하여 속도조정율을 5%대로 향상시킨 실적에 대한 타당성을 보이고자 한다.

2. 속도 조정율 제어 루프

본 논문에서 모델로 선정된 개스터빈의 속도 조정율의 제어 로직은 그림 1과 같다.

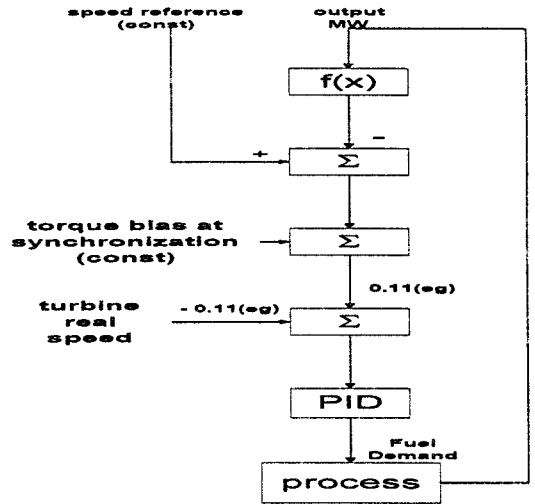


그림 1. 속도조정율 제어 로직 구성도

계통 주파수(그림 1에서는 turbine real speed)가 변동하면 PID 제어기의 입력에 영향을 주고, 제어기 출력은 터빈에 들어가는 연료량을 증감시켜 발전기 출력을 변하게 한다. 발전기 출력의 계통 주파수 추종성을 나타내는 속도 조정율의 정의는 다음과 같다.

$$\text{speed regulation} = \frac{\frac{\Delta \text{frequency}}{60}}{\frac{\Delta \text{MW}}{\text{base load}}} \times 100\% \quad (1)$$

식 (1)으로 정의되는 속도 조정율에 영향을 주는 파라미터들의 기능을 그림 1에서 살펴보면 다음과 같다.

1) 드롭함수 $f(x)$: 실제 발전기 출력을 회전수로

변환해주는 함수로서 실제적인 속도조정이 여기에 설정된다.

2) Error Gain (eg) : PID 제어기의 입력 단에 들어가는 Error의 이득으로서, P gain, I gain, D gain 이 같은 크기로 동시에 영향을 받게된다

3) PID 제어기 : 실제 계통 주파수(turbine real speed)와 목표 주파수(Reference) 비교하여 그 차이(Error)를 입력으로 하여 연산을 행하고, Fuel Demand 신호를 발생시킨다.

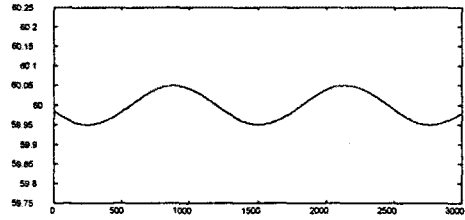


그림 2. 입력으로 사용한 계통 주파수

3. 시뮬레이션

속도 조절에 영향을 미치는 파라미터들의 효과를 관찰하기 위해 설정한 시뮬레이션 모델은 실제 운전 데이터에 근거해서 시상수 9.5초, 시간 지연 0.5초, 이득 2.17을 갖는 1차 모델로 가정하였다. Error Gain (eg)은 발전소 실제 설정치 인 0.11로 고정하였으며, 입력인 계통 주파수 신호로는 사인파로 하여 시뮬레이션 하였다. 모델로 선정된 개스터빈의 설비 용량은 105.23[MW]이다.

3.1 드롭 함수 f(x)의 기능 및 효과

3.1.1. 드롭함수 f(x)의 기능

발전기 출력 제어계가 정상상태에 있었다고 가정하고, 그 상태에서 계통 주파수가 변하면 PID 입력인 Error 크기에 비례하여 발전기 출력이 변한다. 발전기 출력 변동의 크기는 f(x)에 설정된 기울기에 따라 결정되므로 이 기울기를 작게 할수록 발전기 출력 변동 폭이 커지고 속도 조절은 향상된다.

드롭 함수 f(x)의 기울기는 아래 표와 같이 되어있으며 이 때의 속도 조절은 다음과 같다.

X(MW)	Y(rpm)
-7	-16
4.5	0
130	180.72
150	209.52

실제 출력은 4.5-130MW 사이이므로 그 때의 속도 조절을 계산해보면 $\frac{(180.72-0)}{(130-4.5)} \times \frac{105}{3600} \times 100 = 4.2\%$

f(x)에 설정되어 있는 속도조정이 실제 터빈 운전 상황에서 나오지 않는 원인으로는 첫째, PID 제어기의 Tuning 부족과 둘째, 계통주파수의 변동이 출력 제어계의 시상수에 비해 너무 빠른 것으로 분석되었다.

원하는 속도 조절을 gf를 얻기 위해서 f(x)의 입력 X 값 130에 대한 Y 값을 구하는 식을 구해보면 다음과 같다

$$Y = \frac{gf * 6.0 * 6.0 * 125.5}{105.0} \quad (2)$$

시뮬레이션에서 사용한 파라미터 값들은 $K_p = 4.5$, $T_i = 10$, 샘플링 주기는 0.1s로 하였다.

3.2.2 드롭함수 f(x)의 효과

드롭함수의 Y 값만 변경시키면서 시뮬레이션 하였을 때의 결과를 정리하면 표 1과 같다.

표 1. 드롭함수 기울기 변화에 따른 속도 조절율

Y	Δf	ΔMW	속도 조절율
180.72	0.1	2.0	8.35
137.69	0.1	2.21	7.53
116.18	0.1	2.34	7.13

드롭 함수의 기울기 변경에 따른 속도 조절율의 효과를 살펴보면 드롭 함수의 기울기가 낮아짐에 따라서 속도 조절율이 개선됨을 알 수 있다.

3.2. PID 제어기의 구조와 각 파라미터의 효과

3.2.1. PID 제어기의 구조

모델로 한 개스터빈 연료 제어 시스템의 PID 제어기 구조는 다음과 같다. 여기서, K_p =비례이득

T_i =리셋시간

K_d =미분이득

T_d =미분Rate

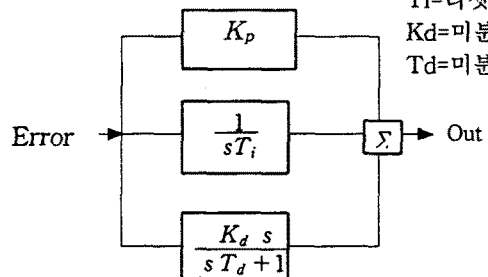


그림 3. PID 제어기의 전달함수 표현

현재 운용 중인 제어기는 PI 기능만 사용하고 미분기능 쓰지 않고 있으므로 위의 전달함수로 표현된 PI 제어기를 디지털 PI 제어기로 구현하면 다음과 같은 형태가 된다.

$$Out(KT) = K_p \times e(KT) + \frac{T}{T_i} \times \sum_{h=0}^K \left[\frac{e(h-1)T + e(hT)}{2} \right]$$

where T : Sampling time

본 제어루프에서 필요한 제어기의 동작모드를 살펴보면 계통 주파수의 증분 변화에 대해서 제어기

의 출력은 감소해야 하므로 필요한 동작모드는 Indirect이다.

3.2.2 PI 파라미터(Kp, Ti)의 효과

비례대(Proportional Band:PB)는 제어기 출력의 100% 변화를 유발하기 위해서 측정치(Process Variable)가 설정치로부터 얼마나 벗어나야 하는가에 대한 % 비로써 정의된다. PB와 Kp와의 관계, 속도 조정율의 정의, 그리고 실제 계통주파수의 변동 주기를 근거로 하여 시뮬레이션한 결과에 의하면 4.2%의 속도 조정율을 얻기 위한 PI제어기의 Kp 값이 6.01로 나타났다.

적분시간 Ti의 단위는 seconds/repeat이며, reset 모드의 제어 출력이 비례 모드와 같게 되는데 걸리는 시간을 의미한다. 시뮬레이션 결과 Ti 값의 변화가 Kp 값의 변화보다 더 민감하게 제어루프의 안정도에 영향을 끼치는 것으로 나타났다.

PI 파라미터들을 변경시키면서 시뮬레이션한 결과 나타난 속도조정율을 정리하면 다음 표 2와 같다.

표 2. PI 파라미터 변화에 따른 속도 조정율

Kp	Ti	Y	Δf	ΔMW	속도 조정율
4.5	10	180.72	0.1	2.0	8.35
6.1	10	180.72	0.1	2.25	7.39
6.1	10	116.18	0.1	2.74	6.09
6.1	100	116.18	0.1	2.55	6.54

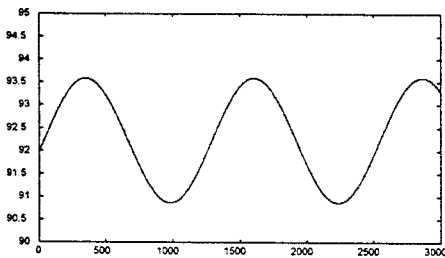


그림 4. Kp = 6.1, Ti = 10에서의 프로세스 응답(Y:116.18)

PI 제어기 파라미터 변경에 따른 효과를 살펴보면, Kp 값 증가와 Ti 값을 감소시킴으로써 속도 조정율을 향상 시킨다는 것을 알 수 있다. 그러나 속도 조정율의 향상은 제어계의 안정성 감소와 터빈의 수명 감소를 수반하게 된다. 그러므로 터빈 운전의 신뢰성과 경제성이 확보되는 범위 내에서의 속도 조정율 최적 값을 구해야 한다.

4. 현장 시험 결과

시뮬레이션을 통해 얻은 결과를 현장에 적용하였으며, 먼저 드롭함수 기율기를 최초 180.72에서 116.18로 낮춤으로써 속도 조정율을 7.42%에서 6.8%로 개선할 수 있었다. 그리고, 개스 터빈 출력 제어루프의 안정성을 확보하기 위해 제어기의 적분

시간 Ti를 10초에서 15초로 조정하였고, Kp 값을 시뮬레이션에서 구한 6.0까지 올림으로써 속도조정율을 5.82%까지 개선시킬 수 있었다. 현장 실험 결과는 표 3과 같으며, 연속기록지를 이용하여 취득한 실험결과는 그림 5와 같다. 그림에서 주파수의 칸 단위는 0.01Hz이며, 출력은 0.5MW이다.

표 3. 현장 실험 결과(시험 부하대 : 80 - 100MW)

구 분	Kp	Ti	속도조정율
튜닝전	4.5	10	6.8
튜닝후	5.3	15	6.37
	6.0	15	5.82

드롭 함수 기율기	MW	rpm
	4.5	0
	130	116.18

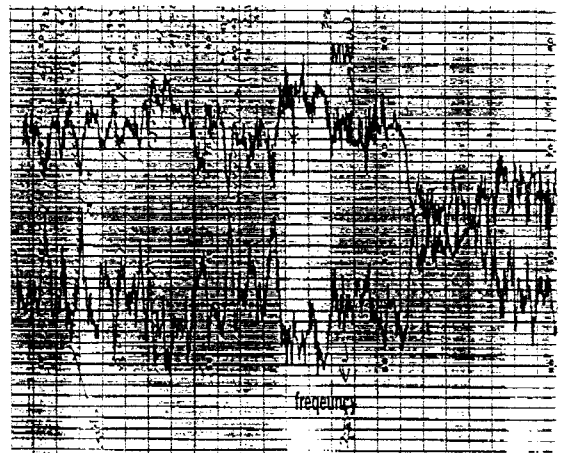


그림 5. 현장 실험 레코드 데이터(출력과 계통 주파수)
K=6.0, Ti = 15sec, Y:116.18

5. 결론

터빈제어 로직에 설정되어 있는 속도조정율이 실제 운전 중 달성되지 못하는 것은 계통주파수 변동이 터빈발전기 출력제어계의 시상수에 비해 매우 빠르기 때문이며, PI 제어기의 Tuning으로 속도조정율을 향상 시킬 수 있다. 그러나 지나친 속도 조정율향상은 터빈의 수명 단축과 제어계의 안정도 감소를 가져오므로 발전소 운영의 여러 가지 중요한 요소를 모두 고려하여 최적 값이 결정되어야 한다. 여러 운영 요소를 고려한 출력 제어계의 구성에 관한 지속적인 연구가 필요하다.

[참 고 문 헌]

- [1] Benjamin C. Kuo, "Automatic Control Systems", Prentice-Hall, 1991
- [2] Katsuhiko Ogata, "Discrete-Time Control Systems", Prentice-Hall, 1987
- [3] Westinghouse WDPF Instruction Manual