

가스터빈 발전기 속도조정을 향상을 위한 제어기 튜닝

신윤오, 김종안
전력연구원

Controller Tuning of a Gas Turbine Generator to Improve Speed Regulation

Y.O.Shin, J.A.Kim
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - It is difficult to determine the controller parameters that we can get optimum response of the controlled process variable. In this paper we investigate the effects of various elements of which a gas turbine MW control loop is consists. And we describe the result of actual adjustment on the parameters of these elements to improve the speed regulation of a gas turbine.

1. 서 론

모든 산업에서 상품의 질을 향상 시키기 위해서는 필수적으로 공급전원의 안정이 필요하며 이를 위해 지속적으로 FACTS 및 Power Quality에 관한 연구가 이루어 지고 있으며, 지역적이고 국부적인 전압의 안정 뿐만 아니라 하나의 계통 전체에 응동하는 주파수의 안정을 위해서도 많은 노력이 이루어 지고 있다. 현재 한국전력에서 주파수 추종성 향상을 위하여 속도조정을 기력발전소는 6%이하, 복합발전소 중 전력용은 4% 열공급용은 5%이하, 수력은 3%이하로 목표치를 설정하여 이의 달성을 위해 노력함으로써 주파수를 $60 \pm 0.1\%$ 이내에서 계통을 유지하여 관련 산업 전반의 생산품질 향상을 위해 노력하고 있다. 본 논문에서는 열병합 복합발전소에서 주파수 추종성 향상을 위한 가스터빈 출력제어 시스템의 제어로직 개입 및 컨트롤 밸브 포지셔너 등의 튜닝으로 열병합 발전소 가스터빈에서 추구하는 속도조정을 5% 이내의 목표치를 달성한 결과에 대해서 고찰을 하였다.

2. 본 론

2.1 제어로직

가스터빈의 대표적인 제어 로직은 그림 1과 같으며, 여기에서 Turbine Real Speed(주파수)가 변동하면 PID 제어기의 변수가 변하며, 제어기 출력에 의해 컨트롤 밸브는 터빈에 들어가는 연료량을 증감발시켜 발전기 출력을 변하게 한다.

X(MW)	Y(rpm)
-7	-14
4.5	0
130	180.72

그림 1의 드롭 함수 $f(x)$ 의 실제 출력은 좌측표에서 처럼 4.5 - 130MW 사이이므로
 그 때의 속도 조정을 계산해보면

$$\frac{(180.72 - 0)}{(130 - 4.5)} \times \frac{100}{3600} \times 100 = 4.0\%$$

 이 로직에서 속도조정은 최초 4.0에 Setting 되었다

그림 2는 RPM 변화로 알아본 속도조정의 변화를 나타내는 그래프로

- 130MW 180 RPM → 4.0 (속도조정율)
- 130MW 150 RPM → 3.32 (속도조정율)
- 130MW 130 RPM → 2.88 (속도조정율)이며

정상상태에서 실제 속도를 비롯한 모든 변수가 고정되어 있다고 가정하고, 그 상태에서 계통 주파수가 변하면 PID 입력인 에러크기에 비례하여 발전기 출력이 변하고,

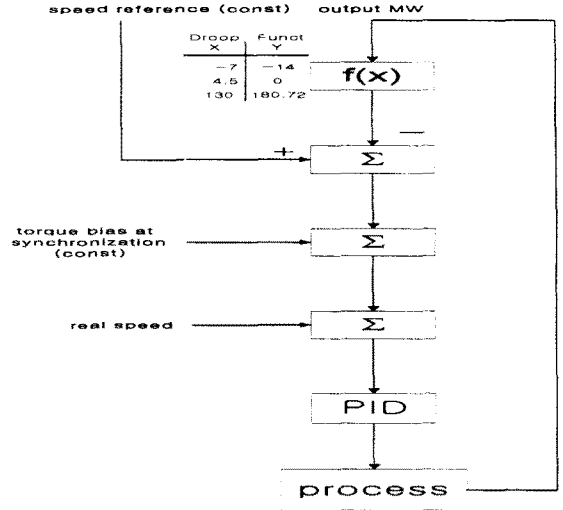


그림 1. 제어 로직

발전기 출력 변동 폭이 $f(x)$ 의 기울기에 따라 결정되므로 $f(x)$ 의 기울기를 작게 하면 할수록 발전기 출력 변동폭이 커져서 속도 조정이 더 좋아짐을 알 수 있다. 단, 이때 현장 설비들은 요구조건에 맞게 충분히 최적화 되어 있어야 한다.

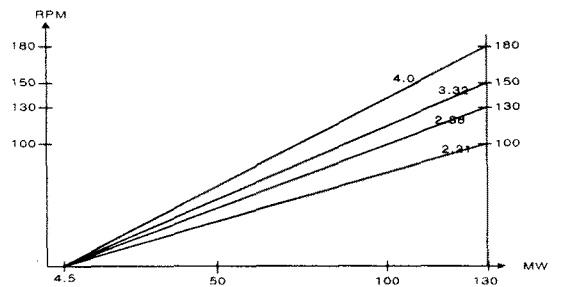


그림 2 RPM 변화에 따른 속도조정율 그래프

2.2 속도조정율 정의

주파수 편차(설정값-실제주파수)의 크기에 비례하여 응동하는 출력의 크기를 나타내는 속도조정율의 산출식은 다음과 같다.

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

- 여기서,
- Speed Regulation : 속도조정율
- Δ Frequency : 어느 순간에서의 주파수 변화 폭

- ΔMW : 주파수 변화에 따른 출력 변화 폭
- Base Load : 발전기 정격 출력이다.

- 타 발전소 도면과 비교 검토
- 주파수 또는 터빈 Speed 신호의 Noise Filtering Function 사용 여부 검토
- Speed Controller PID 설정값 검토

2.3 Bailey Pneumatic Positioner AP4의 Ra

2.3.1 Cam B Linear Relation 특성곡선으로 본 Range Adjustments 효과

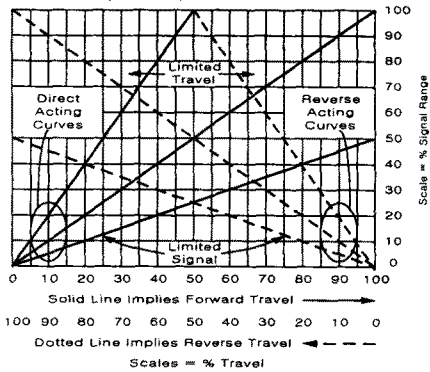


그림 3 Cam B Linear Relation

% Control Signal	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Control System Range(psig)	3.0	4.20	5.4	6.6	7.8	9.0	10.2	11.4	12.6	13.8	15.0

표 1 Control System Range(psig)

포지셔너의 Range를 조정하기 위해 Range ADJ(Spring Clamp)를 Cam Follow Arm을 따라 Cam Roller Assembly 방향으로 Spring Clamp를 움직이면 그림3 에서 Travel Range가 감소하는 방향으로, Pivot Point 방향으로 Spring Clamp를 움직이면 반대의 효과를 얻으며 각 호기의 Spring Clamp 위치를 비교 검토할 필요가 있다. 그림 3 그래프는 기울기가 1일 때 3 ~ 15psig의 신호에 의해 Forward 방향의 밸브의 움직임은 0 ~ 100으로 진행함을 알 수 있고 Reverse 방향의 밸브의 움직임은 100 ~ 0으로 진행함을 알 수 있다. 또한 기울기가 0.5일 때 3 ~ 9psig의 신호에 의해 Forward 방향의 밸브의 움직임은 0 ~ 100으로 진행함을 알 수 있고 Reverse 방향의 밸브의 움직임은 100 ~ 0으로 진행함을 알 수 있으며 그만큼 신호에 대한 Control 밸브의 응답이 빠름을 알 수 있고 9 ~ 15psig 신호에 의해서는 밸브의 Control을 기대할 수 없다. 그리고 기울기가 1.5일 때는 3 ~ 15psig의 신호에 의해 Forward 방향의 밸브의 움직임은 0 ~ 50으로 진행함을 알 수 있고 Reverse 방향의 밸브의 움직임은 50 ~ 0으로 진행함을 알 수 있으며 control 밸브는 50%에서 움직임을 제한된다. 결론적으로 Spring Clamp의 기울기를 1로 보면 Cam Roller Assembly 방향으로 Spring Clamp를 움직이면 기울기를 1 ~ 1.5 방향으로 Setting 할 수 있고 Pivot Point 방향으로 Spring Clamp를 움직이면 기울기를 1 ~ 0.5 방향으로 Setting 할 수 있음을 알 수 있다.

2.3.2 Gain Adjustments 효과

그림4 에서 l_2 의 거리 조정에 의해 출력의 크기는 비례함을 알 수 있으며 거리를 크게 하면 할수록 출력 배압이 높아질수록 Control Valve의 응답이 좋아 지나 너무 커지면 계가 불안해 질 수 있다.

2.4 속도조정을 튜닝을 위한 필요사항

2.4.1 기존 취득 자료(발전소,급전) 및 도면 검토

- 발전소, 급전자료 검토

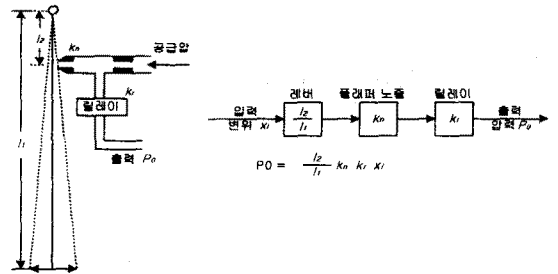


그림4 편위식 계기

2.4.2 현 제어시스템 및 터빈출력 응답특성 측정

연료 공급량 변동 후 터빈출력이 나오기 까지의 시간 지연, Fuel Control Valve의 응답특성 과Speed Controller의 응답특성을 측정 해야한다.

2.4.3 자료 취득 계측기 및 측정 신호 (Input)

Load Target(출력 설정 값), 발전기 출력, 제동주파수 (또는 터빈 RPM), Speed Controller Output, Fuel Demand, 연료 Valve Position, 온도제한 Selector Trigger 등 7개의 측정 대상 신호에 대한 시험자료를 취득하기 위하여 제어시스템에서 모니터링 가능하도록 Trend를 구성한다.

2.4.4 기타

- 동일특성을 가진 여러 호기가 있을 시 Valve Feedback Position을 측정할 수 있는 호기를 선택한다.
- 초기부하를 점검하고 초기부하를 유지하며 터빈을 Temp Control Mode로 운전한 후 부하를 증감발시키며 과도현상의 자료를 취득한다.
- 주파수 추종 성능이 가장 저조한 부하대 에서 역시 과도현상의 자료를 취득한다.

2.5 가스터빈 발전기 속도조정을 향상을 위한 제어 기 튜닝

부전복합 1호기의 Control Valve가 Swing 하고 속도조정이 목표치 이내에 들지않아 이를 개선하기 위해 제어기 Tuning 및 현장 설비 조정 후 나타난 결과를 간단하게 논해 보겠다.

2.5.1 Main Throttle Valve 시험 및 조정

2.5.1.1 Quick Release 시험

그림 5의 Main Throttle Valve의 Quick Release(QR)는 Needle Valve의 조정으로 Valve의 Travel Time을 조정하는데 Setting에 의해 Valve가 Maximum Position에서 Loss of Signal시 즉각 Minimum Position으로 Travel 할 수 있도록, Needle Valve를 조정하여 20 ~ 4mA의 Ramp 신호를 15초 동안 주었을 때는 Vent 되어야 하지만 20초 일 때는 Vent 되지 않게 Setting 해야 하며, Loss of Signal시 Main Throttle Valve를 Quick Close 시키는데 작용하므로 20초 이상에서 QR이 응답 한다면 주파수의 급격한 상승시 QR이 응답할 가능성이 있으며, 이때 밸브가 Swing 할 수 있으므로 시험 후 특성이 변했다면 조정해야 함.

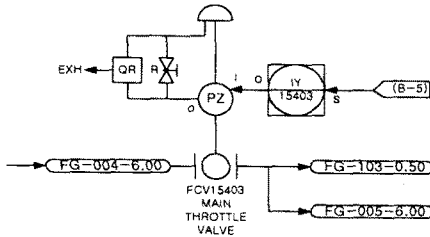


그림 5 Main Throttle Valve Logic

2.5.1.2 Positioner 의 Gain Adjustments 조정

그림4 에서 노즐의 위치를 조정할 수 있는데 1호기에 서 Control Valve의 Swing 현상을 해소하기 위해 노즐의 위치 즉 l_2 의 거리를 적게하는 방향으로 조정하여 배압의 영향을 낮추었음. 이때 주파수 추종능력은 배압에 비례하여 떨어지므로 제어기의 Gain을 조정하여 보상 해야함.

2.5.1.3 PID 제어기의 Kp 파라미터 조정

그림 6은 부천복합 1호기의 PID 제어기 가변 파라미터로써 $f(x)$ 와 Kp_Bias 의 곱에 의해 Kp 가 결정됨을 나타내며 표2 및 그림 7 은 적용된 파라미터 값을 표와 그래프로 비교한 것이며 표3은 Tuning 전후 속도 조정을 비교한 것이다. 또한 그림8, 9는 Tuning 전후의 Trend를 나타낸 것으로 Tuning 전 Control valve가 Swing 할 때 그림 8의 윗 그래프인 출력이 흔들림을 나타내며 Tuning 후 그림 9의 출력 그래프인 윗 그래프가 안정됨을 나타낸다.

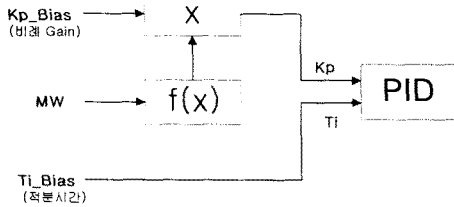


그림 6 PI 제어기 가변 파라미터

		1호기			
		전		후	
R1	S1	0	0.7	0	0.7
R2	S2	50	0.7	50	0.7
R3	S3	70	0.7	70	0.8
R4	S4	75	0.75	80	1.0
R5	S5	80	0.8	90	1.2
R6	S6	100	0.9	100	1.3
R7	S7	120	1.0	120	1.0
R8	S8	150	0.7	150	0.7
R9	S9	0	0	0	0
$f(x)$		4.0		3.5	

표 2 Tuning 전후 Kp 파라미터 비교 표

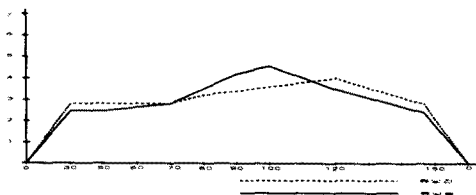


그림 7 1호기 튜닝 전후 파라미터 비교 그래프

호기	출력(MW)	속도조정을		비고
		조정 전	조정 후	
#1	75	5.4	5.0	
	87	6.1	5.0	
	95	6.3	5.2	

표 3 Tuning 전후 속도 조정을 비교

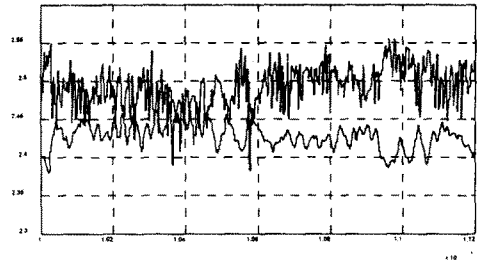


그림 8 Tuning 전 Control Valve Swing 시 75MW에서 10분 Trend

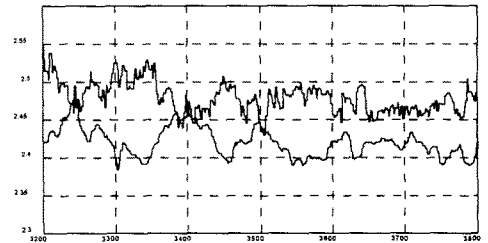


그림 9 1호기 Tuning 후 75MW에서 5분 Trend

3. 결 론

속도 조정을 개선하기 위해서는 첫째 현장기기들이 최적화 되어 있어야 하며 둘째 드롭 함수의 기울기를 낮추거나 Kp 를 크게 함으로써 속도 조정을 개선 할 수 있음을 알 수 있다.

이 때 현장 Control Valve의 Swing 현상이 생길 수 있으므로 이는 드롭 함수의 기울기를 더 낮추거나 Ti 값을 높이거나 Control Valve의 Gain을 조정함으로써 안정성을 유지할 수 있을 것이다. 그러나 너무 좋은 속도 조정은 개스 터빈의 기계 수명을 단축시킬 수 있으므로, 발전소 최적 운전을 위한 속도 조정에서의 운전이 요구된다. 또한 계통사고에 따른 파급으로 발전 정지 가능성이 있으므로 설계 출력 증감발을 허용범위 내에서 속도 조정을 설정하고 주파수 입력 측에 상하한 (High/Low Limit) 기능을 추가하여 터빈 안정 운전을 도모하는 것이 요구된다.

(참 고 문 헌)

- [1] 전력연구원 일산복합 속도조정을 향상을 위한 기술지원 결과보고서 '97.06
- [2] 발전교육원 공기식 계측제어 응용 '94. 09
- [3] 발전교육원 화력발전 이론과 실무 '94. 04
- [4] 원자력교육원 전자 및 계측제어 기초 '91. 10.
- [5] Bailey Production Manual 88-12 (AP4 Pnc Positioner)