

박 민 호 *
* 서울대

목 형 수 ** 〇
** 서울대

MODELING OF PRESSURE CONTROL SYSTEM OF BOILER

Min Ho. Park
Seoul Natn'l Univ

Hyung Soo. Mok
Seoul Natn'l Univ

Abstracts - The amount of inflowing Air into the boiler has controlled by manipulating the opening of valve, damper and vane, as fan operated by induction motor operates at constant speed, but these control methods are not efficient. Thus VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) control of fan has selected to improve efficiency and to acquire power savings. Control system of Air Flow is affected by nonlinearity caused by load variation, vane opening, etc. The analysis of control parameter causing nonlinearity is needed to acquire optimal control and excellent transient response. This paper provides modeling of boiler with various load conditions and vane opening, and analysis of this system.

증압 제어 시스템은 증압 제어와 부가적으로 보일러 내부 압력을 일정 수준으로 유지하여야 하며, 보일러 부하변동에 따른 관로 저항의 비선형성의 문제로 인해 제어에 어려움이 따르며 우수한 과도 특성을 얻기 어려운 단점이 있다. 따라서 증압 제어 시스템의 최적 제어를 위해서는 비선형성의 원인이 되는 시스템 제어 변수들에 대한 시스템의 해석이 필요하게 된다. 본 연구에서는 증압 제어 시스템을 채택하고 있는 영월 화력 발전소의 증압 제어 시스템을 플랫폼으로 하여 시스템에 적절한 입력을 가하여 얻은 출력 데이터로부터 대상 시스템의 근사적인 전달함수를 결정하는 실험적 접근법의 시스템 인식을 통하여 보일러 증압 계통의 모델링을 행하였고, 그 결과로부터 시스템의 특성을 해석하고 시뮬레이션을 행하였다.

1. 서론

보일러 증압 계통에서 연소에 필요한 공기를 보일러 내부에 공급하기 위하여 압입 송풍기 (Forced Draft Fan) 와 유인 송풍기 (Induced Draft Fan) 를 설치한 강제 증압 방식이 사용된다. 보일러 내부에 유입되는 연소용 공기량의 제어에는 최근까지도 구동 속도를 일정히 하고 밸브, 덤퍼, 베인 등의 개도를 조절함으로써 제어하여 왔으나 보일러 단위 용량이 대형화됨에 따라 동력 절약 효과에 의한 효율 개선을 위하여 가변속 제어 방식이 채택되고 있는 추세에 있다. 최근 급격히 발달하고 있는 정지형 전력 변환 기술에 힘입어 증압 제어용 팬을 VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) 에 의한 가변속 구동함으로써 기존의 개도 제어 방식보다 효율 및 과도 특성의 개선이 기대되는 바 이에 대한 관심이 커지고 있다.

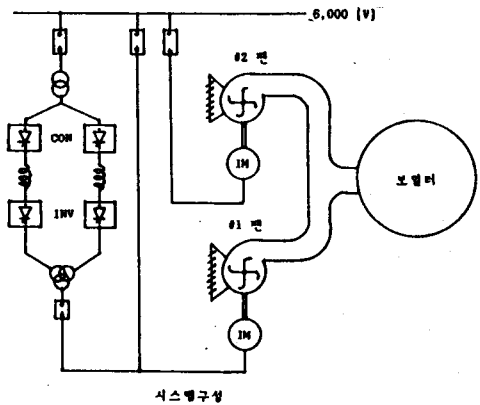


그림 1 영월 화력발전소 증압 제어시스템

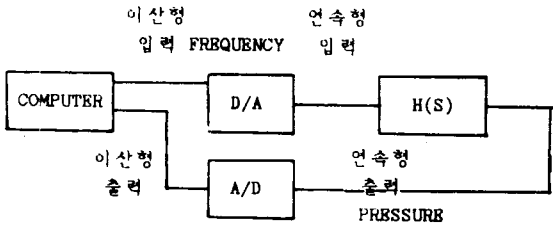


그림 2 계속 시스템 구성도

2. 풍압 제어 계통의 모델링

시스템의 전달함수는 시스템의 이론적인 해석을 통해서 구할 수도 있고 플랜트에 대한 일련의 실험을 통해 추정해 낼 수도 있다. 이를 시스템 인식 (System Identification) 이라 한다. 본 연구의 대상인 화력 발전소의 보일러 풍동 계통에 있어서는 일반적으로 이론적 해석을 통한 시스템 모델의 추정이 매우 어렵기 때문에 실험에 의한 모델링을 행하였다. 즉 실험 데이터로부터 주파수 응답 특성 곡선 (Bode Plot) 을 작성하여 그로부터 모델의 전달함수를 라플라스 형태로 구했고 Z-Transform 하여 이산형 모델을 구성하였다.

시스템 구성은 그림 1, 그림 2 와 같다. 그림 2 에서 H(S) 가 바로 추정하려는 플랜트이고 입력은 주파수, 출력은 풍압이다.

모델링의 방법으로는 펄스 입력을 가하여 그때의 출력을 가지고 해석하는 펄스 테스트가 사용되었고 펄스 테스트 수행시 선행조건에 주의하면서 수행한 시험조건은 표 1, 2 와 같다.

주파수 (Hz)	#1 VANE 개도(%)	#2 VANE 개도(%)	주파수 변동
44	80	80	+3
44	70	80	+3
44	90	80	+3
44	80	70	+3
44	80	90	+3
49	80	80	+3
39	80	80	+3

표 1 병렬 운전시 시험조건

주파수 (Hz)	#1 VANE 개도(%)	#2 VANE 개도(%)	주파수 변동
49	80	-	+3
49	90	-	+3
49	70	-	+3
54	80	-	+3
44	80	-	+3

표 2 단독 운전시 시험조건

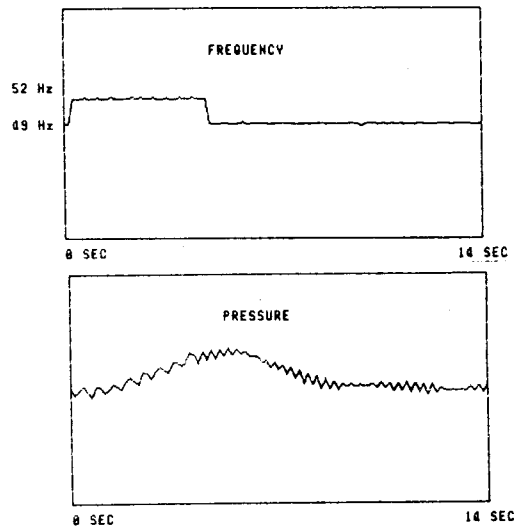


그림 3 펄스 입력과 출력 파형

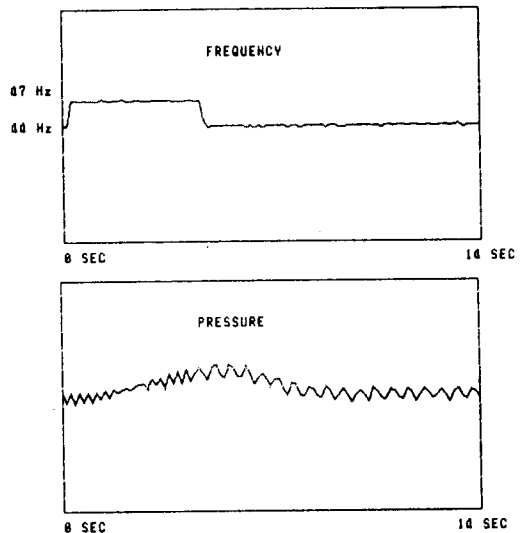


그림 4 펄스 입력과 출력 파형

보일러 풍압 제어 계통의 모델링

표 1,2 에서 나타난 것과 같은 모든 시험중 단독 운전시 주파수 49Hz, #1 Vane 계도 80%, 주파수 변동 +3Hz 의 시험 조건에서의 입,출력 파형과 병렬운전시 주파수 44Hz, #1 Vane 계도 70%, #2 Vane 계도 80%, 주파수 변동 +3Hz 의 시험조건에서의 입,출력 파형은 각각 그림 3,4 와 같다. 입력과 출력의 라플라스 변환치 X(s) 와 Y(s) 는 전달함수 H(s) 와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (1)$$

라플라스 변환의 정의식으로 부터 (1) 식은 (2) 식과 같이 표시된다.

$$H(s) = \frac{Y(t)*EXP(-st)dt}{X(t)*EXP(-st)dt} \quad (2)$$

그림 3,4 로 부터 (2) 식의 적분구간 상한치는 14 sec 가 되고 s 대신에 jw 를 대입하면

$$H(s) = \frac{Y(t)*EXP(-jwt)dt}{X(t)*EXP(-jwt)dt} \quad (3)$$

이 되고 (3) 식은 다시 (4) 식으로 표시된다.

$$H(jw) = \frac{AC + BD}{C^2 + D^2} + j \frac{AD - BC}{C^2 + D^2} \quad (4)$$

이 때 시스템의 이득 AR 과 위상각은 다음과 같이 나타내어 진다.

$$AR = |H(jw)| = \sqrt{[ReH(jw)]^2 + [ImH(jw)]^2}$$

$$= \frac{(AC + BD)^2 + (AD - BC)^2}{C^2 + D^2} \quad (5)$$

$$\phi = \text{ARCTAN} \frac{AD - BC}{AC + BD} \quad (6)$$

위의 (5), (6) 식을 이용하여 주어진 주파수 w 에 대한 A,B,C,D 를 계산한 다음 AR 과 ϕ 를 계산하면 해당 주파수에 대한 응답을 알 수 있다. 이를 w 의 여러 값에 대하여 계산하면 완전한 주파수 응답 특성 곡선을 얻는다. 계산 프로그램 흐름도는 그림 5 와 같다.

이와 같은 과정을 통해 얻어낸 Bode Plot 은 그림 6,7 과 같다. 그림 6,7 에서 알 수 있듯이 전달함수를 (7) 식과 같은

$$H(s) = \frac{Kp*EXP(-\theta d*s)}{Wc*s + 1} \quad (7)$$

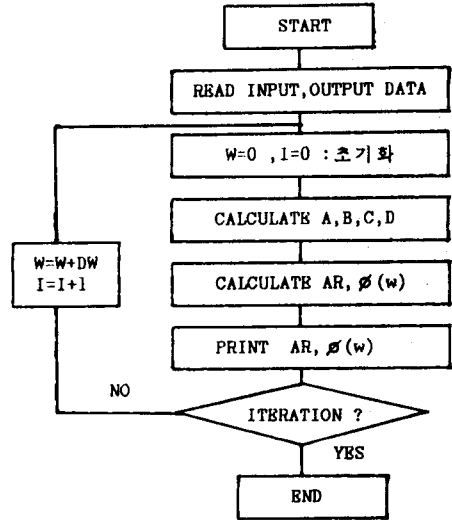


그림 5 프로그램 흐름도

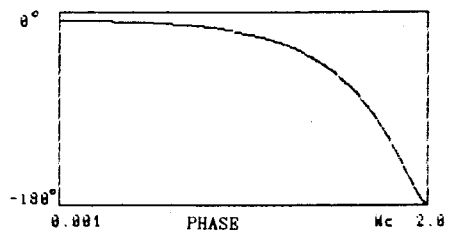
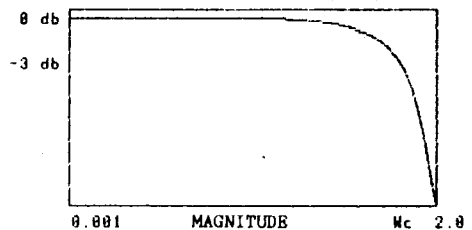


그림 6 주파수 응답 특성곡선

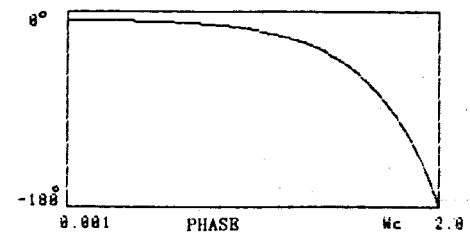
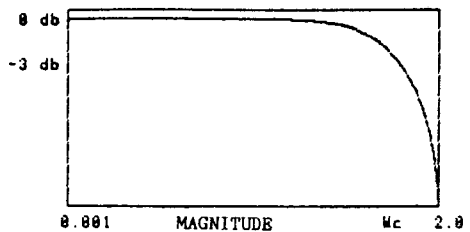


그림 7 주파수 응답 특성곡선

시간 지연을 포함한 1 차 지연으로 근사화 시킬 수 있다. 입력 곡선과 출력곡선에 둘러 쌓인 면적의 비로 부터 Kp 를 구하고 1 차 지연의 corner frequency Wc 는 AR 이 0.707*Kp 되는 지점에서의 주파수이며 Wc 주파수에서의 위상각과 -45° 와의 차이가 시간 지연에 의한 것이므로 이로부터 θd 를 구하였다. 각 시험조건에서 구한 전달함수의 상수들은 표 3 에 나타내었다.

표 3 에서 나타낸 연속형 모델을 (8) 식을 통해 이산형 모델로 바꾼 결과를 표 3 에 같이 나타내었다.

$$H(z) = Z \left[\frac{1 - \text{EXP}(-ST)}{s} * H(s) \right]$$

$$= (1 - 1/z) Z \left[\frac{H(s)}{s} \right] \quad (8)$$

T = 0.14 sec : sampling time

실제 출력 파형과 시뮬레이션을 통한 출력 파형을 그림 8,9 에 나타내었다. 그림 8,9 에서 알 수 있듯이 계산된 출력 파형의 추이가 실제 출력 파형과 같음을 알 수있다.

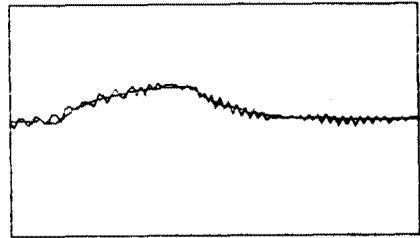


그림 8 단독운전시 49Hz, #1 Vane 개도 80% 에서의 실제 파형과 시뮬레이션 파형

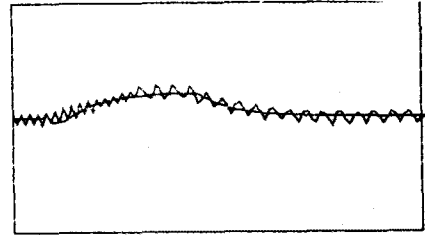


그림 9 병렬운전시 44Hz, #1 Vane 개도 70%, #2 Vane 개도 80% 에서의 실제파형과 시뮬레이션 파형

3. 시스템의 특성 해석

전달함수는 단독운전시와 병렬운전시 그리고 주파수와 Vane 개도에 따라 변화한다는 것을 알 수있다. Vane 의 개도는 전달함수의 극점을 이동시키는 중요한 요소로서 Vane 의 개도가 커짐에 따라 전달함수의 극점은 s-평면상의 왼쪽으로 이동함을 보여준다. 이는 Vane 의 개도가 커질때 종양 rise time 이 짧아 진다는 것, 즉 발리 상승한다는 것을 의미한다. 또 주파수 level 이 상승하면 단독운전, 병렬운전 모두 극점이 원점에 가까와 짐과 DC gain 은 감소함을 보여준다. 각 주파수 level, vane 개도에 따른 시스템의 극점의 변화는 다음과 같다.

주파수 변동 : +3Hz

주파수 (Hz)	#1 VANE 개도(%)	#2 VANE 개도(%)	H(S)	H(Z)
49	80	-	$\frac{3.11e^{-1.9s}}{s+0.75}$	$\frac{0.11}{z^2(2-z, 0.38)}$
49	90	-	$\frac{1.21e^{-1.3s}}{s+0.37}$	$\frac{0.12}{z^2(2-z, 0.37)}$
49	70	-	$\frac{3.33e^{-0.75s}}{s+0.37}$	$\frac{0.13}{z^2(2-z, 0.32)}$
54	80	-	$\frac{3.59e^{-2.0s}}{s+0.75}$	$\frac{0.13}{z^2(2-z, 0.31)}$
44	80	-	$\frac{1.22e^{-1.7s}}{s+0.38}$	$\frac{0.16}{z^2(2-z, 0.37)}$

(a) 단독운전시 각 시험조건에 대한 모델추정

주파수 변동 : +3 Hz

주파수 (Hz)	#1 VANE 개도(%)	#2 VANE 개도(%)	H(S)	H(Z)
44	80	80	$\frac{3.37e^{-1.9s}}{s+0.33}$	$\frac{0.11}{z^2(2-z, 0.38)}$
44	70	80	$\frac{3.33e^{-0.75s}}{s+0.37}$	$\frac{0.17}{z^2(2-z, 0.39)}$
44	90	80	$\frac{1.33e^{-1.3s}}{s+1.14}$	$\frac{0.13}{z^2(2-z, 0.35)}$
44	80	70	$\frac{3.37e^{-1.7s}}{s+0.37}$	$\frac{0.15}{z^2(2-z, 0.34)}$
44	80	90	$\frac{3.37e^{-1.4s}}{s+1.38}$	$\frac{0.11}{z^2(2-z, 0.37)}$
49	30	80	$\frac{3.59e^{-1.9s}}{s+0.45}$	$\frac{0.38}{z^2(2-z, 0.33)}$
39	80	80	$\frac{3.37e^{-1.7s}}{s+1.37}$	$\frac{0.12}{z^2(2-z, 0.36)}$

(b) 병렬운전시 각 시험조건에 대한 모델추정

표 3

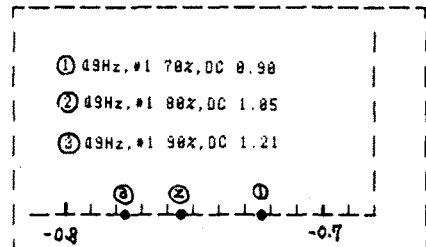


그림 10 단독운전시 VANE 개도에 따른 극점의 변화

보일러 풍압 제어 계통의 모델링

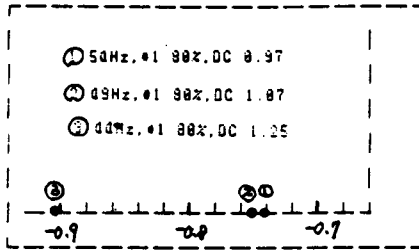


그림 11 단독운전시 주파수에 따른 극점의 변화

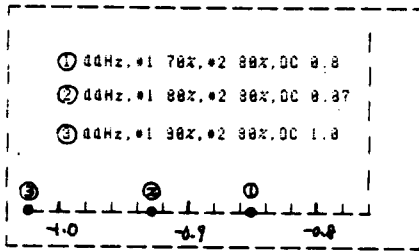


그림 12 병렬운전시 #1 VANE 계도에 따른 극점의 변화

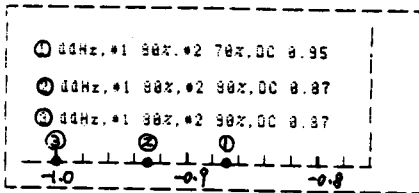


그림 13 병렬운전시 #2 VANE 계도에 따른 극점의 변화

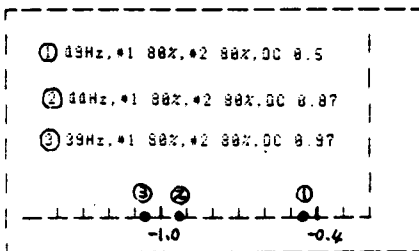


그림 14 병렬운전시 주파수에 따른 근의 변화

4. 결론

본 연구에서는 펄스 테스트에 의한 실험적 접근 방법의 시스템 인식 (System Identification) 을 통한 풍압 제어 시스템의 모델링과 시스템 특성의 해석을 수행하였다. 보일러의 풍압 제어 시스템과 같이 부하변동에 따른 비선형성의 문제로 제어에 어려움이 따르는 곳에서 각 부하별 PI Gain Tuning 과 현대 제어 이론을 시뮬레이션을 통해 적용하여 그 시스템에 알맞는 제어 알고리즘을 선정하는데 이용될 수 있을 것이다.

본 연구의 실험 대상인 영월 화력 발전소의 풍압 제어 시스템의 PI Gain Tuning 결과는 추후 발표할 예정이다.

5. 참고문헌

- 1) P. Eykhoff, System Identification, Jhon Wiley, 1977
- 2) Goodwin & Sins, Adaptive Filtering Prediction and Control, Prentice Hall, 1984
- 3) Pradeep B. Deshpande & Raymond H. Ash, Element of Computer Process Control with advanced control application, Instrument Society of America, 1981
- 4) Ljung L. and T. Soderstrom, Theory and practice of Recursive Identification, MIT Press, 1983
- 5) R. Ortega and R. Kelly, "PID Self-Tuners : Some Theoretical and Pratical Aspects," IEEE Trans. IS, Nov., 1984