

화력 발전소 보일러 드럼 수위 퍼지 제어

Fuzzy Control of Drum Level of Boiler in Thermal Power Plant

° 변 승 현, 박 두 용, 김 은 기

전력연구원 기술센터 (Tel: 865-5577; Fax: 865-5104; E-mail: little@hanbit.kepri.re.kr)

Abstracts : The control objective of drum level of boiler in thermal power plant is to maintain drum level at constant setpoint regardless of disturbance such as main steam flow. The initial response of the drum level loop process is in a direction opposite to the final response. The drum level loop shows inverse response when the power is changed abruptly. We adopt fuzzy controller using knowledge base considering system dynamics for controlling drum level. Finally, the simulation result using the digital simulator for boiler system in Seoul Power Plant Unit 4 shows the validity of fuzzy controller.

Keywords : Drum level, Inverse response, Fuzzy controller

1. 서 론

한 나라의 기간 산업으로서 중요한 역할을 차지하는 전력산업은 사회의 발전과 더불어 증가되는 전력 소비량과 양질의 전력 요구에 의해 지속적으로 발전되고 있다. 전력 수요에 대해서 양질의 전력을 안정적으로 공급하기 위해서는 발전소를 효율적으로 운용하는 것이 매우 중요하다.

우리나라의 경우 화력 발전은 수요 변동에 의한 변동 부하를 추종하도록 운전되고 있으며 부하 변동에 기민하게 대응하기 위한 운전이 주종을 이루므로 잦은 운전 상태의 변화에 따른 보다 능동적인 운용이 중요하다. 오래전부터 경제적, 기술적, 안정적 그리고 적용 요구에 따라 보일러의 설계기법과 개선되어진 제어 기법이 결합되면서 보일러 제어 시스템은 많은 발전을 해왔다. 보일러 제어 시스템은 1905년 수동 조작하는 압력 조정기와 급수 조정기를 갖춘 최초의 보일러 제어기의 출현과 더불어 발달하여 1950 ~ 60년대의 중앙 집중식의 제어 시스템이 이루어져 중앙 제어반의 판넬을 통하여 전체 시스템을 관리할 수 있게 되었다. 그리고 최근에는 마이크로 프로세서의 발달과 더불어 분산 제어 시스템이 개발되어 전체 시스템을 서브 시스템으로 나누어 제어가 이루어지고 있다. 이렇듯 화력발전의 효과적인 운용을 위해서는 화력 발전에서 천연에너지를 열에너지로 변환해서 터빈에 일정한 압력과 온도의 증기를 공급하는 보일러 시스템의 효과적인 운용이 중요하다고 볼 수 있다.[2][3]

한편, 드럼 수위의 제어는 보일러 시스템의 효율적인 운용을 위해서 중요한 위치를 차지하고 있다. 드럼 수위의 제어의 목적은 드럼 수위를 외란에 관계없이 항상 설정치로 유지하는 것이다. 정상 운전 중에는 드럼의 중앙 이하 부분에는 물이 차 있고, 상부에는 증기가 차 있으나 만일 수위가 너무 높아지면 carry over 현상이 발생하며 반대로 너무 낮으면 드럼 하부의 과열 및 튜브의 손상을 초래하여 대사고를 유발하게 되므로 드럼 수위는 항상 정상으로 유지해야 한다.[4] 그런데 드럼 수위의 동특성은

급수량, 주증기량, 연료량의 변화에 대한 초기의 응답이 최종 응답에 역방향으로 작용하는 역 반응을 보인다. 이런 시스템 특성을 보이는 드럼 수위 루프에 대해서 퍼지 제어를 적용하여 드럼 수위를 제어하고자 한다.

2절에서는 대상 시스템인 보일러 드럼 수위 모델에 대해서 기술하고, 3절에서는 드럼 수위 제어를 위해 구성된 퍼지 제어기에 대해서 설명하고, 4절에서는 서울화력 4호기 보일러 시뮬레이터를 대상으로한 모의 실험 결과를 통해 퍼지 제어기의 효율성을 살펴보고, 5절에서는 결론 및 추후과제를 기술하고자 한다.

2. 대상 보일러 모델

대상 시스템인 서울화력 4호기 발전소 보일러 플랜트의 모델은 변수들 사이의 인과 관계를 기본적인 계산 응답의 결합체로 표현하는 신호 흐름도를 이용한 Klefenz의 보일러 모델[1]을 기본으로 하여 현장의 운전자에 의해 수시로 기록된 자료를 통해 각 블록의 계수를 조정해 얻은 모델[5]을 이용하였다. 보일러 모델은 제어기에 맞추어 여러 개의 서브 시스템으로 나누어 질 수 있는데 여기서는 드럼 수위 동특성에 대해서만 살펴보기로 하겠다.

수위 동특성에 관한 등가적 보일러는 (그림 1)과 같다. 급수는 급수 펌프에 의해 절단기로 공급되며 절단기에서 예열된 후 드럼으로 공급된다. 그러면 드럼에 공급된 급수와 증발기를 거친 증기로 인해 드럼 내부는 물과 증기의 혼합체로서 증기 방울이 큰 부피를 차지하고 있다. 그런데 급수의 온도는 드럼 안에 있는 증기방울과 물의 혼합체보다 낮다. 따라서 급수율이 증가하는 초기에는 순간적으로 드럼내의 증기 방울이 응축되고 이 때문에 일시적인 수위 저하 현상(Shrink 현상)을 보인다. 이후 일정시간 뒤에 수위는 다시 급수에 비례하는 증가를 보인다. 마찬가지로 연료량의 증가는 증기발생을 증가시켜 일시적으로는 증기방울이

많아져 수위가 상승하고(swell 현상), 점차 증발량에 의한 수위 감소가 나타나게 된다. 또 부하가 변화하면 드럼 내부의 압력이 변화하여 증기 기화에 영향을 주어 드럼수위가 조금 변화하였다가 점차로 부하 변화에 반비례하게 된다. 이러한 드럼 수위의 원인에 대한 결과의 일시적인 반대현상을, 'Shrink and Swell 현상'이라고 한다. 이러한 특성을 고려해서 신호 흐름도를 구성하면 (그림 2)와 같다.

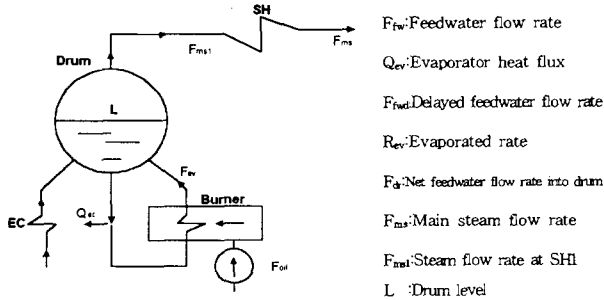


그림 1. 드럼 수위 동특성에 대한 등가적 보일러
Fig 1. equivalent boiler for drum level dynamics

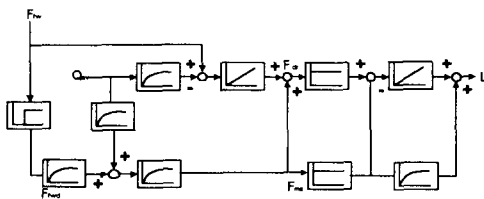


그림 2. 드럼 수위 동특성 신호 흐름도
Fig 2. Signal flow diagram of drum level dynamics

3. 퍼지 제어기

급수 제어는 증기량, 급수량, 드럼 수위를 제어기의 입력으로 이용하는 3요소 제어로서 보일러 드럼에 보내는 급수를 제어한다. 급수 제어의 기능은 유출되는 증기량과 같은 급수량을 공급하고, 드럼 수위를 설정치에 일정하게 유지하는 것이다. 3요소 제어 구조에서는 드럼 수위를 외란에 관계없이 항상 설정치로 유지하는 것이 제어의 목적이다.

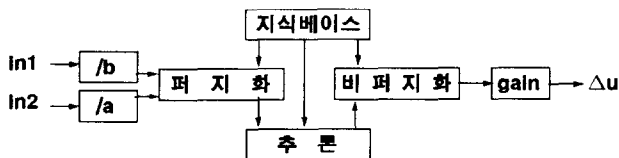


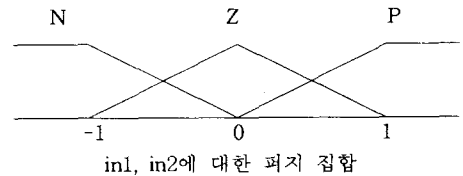
그림 3. 퍼지 제어기의 구성
Fig 3. Fuzzy Controller

퍼지 제어기의 구성은 (그림 3)과 같다. 본 제어기의 제어 입력은 드럼 수위 오차와 현재의 출력을 고려한 주증기량과 급수량과의 차로 구성되어 진다. 퍼지 제어기의 입력은 다음과 같다.

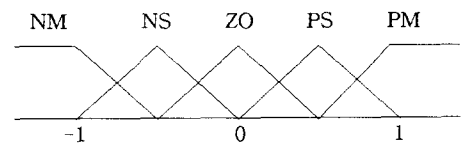
$$in1 = 50 - L, in2 = F_{ms} - F_{fw} - f(\text{출력})$$

(L : 드럼수위, F_{ms} : 주증기량, F_{fw} : 급수량)

퍼지 전진부와 후진부에서 이용되어진 드럼 수위 오차와 현재의 출력을 고려한 주증기량과 급수량과의 차에 대한 퍼지 집합은 전체 집합이 (그림 4)와 같이 [-1, 1]로 정규화 되어져 있다. 퍼지 제어기의 입력단에는 각 입력 변수에 대해서 입력 변수를 퍼지 집합에 대응시키는 scaling factor(a,b)가 있으며, 출력단에는 제어기 출력을 위해서 정규화된 비퍼지화된 값에 대한 gain이 있어서 퍼지 제어기의 출력을 담당한다.



in1, in2에 대한 퍼지 집합



Δu에 대한 퍼지 집합

그림 4. 퍼지 집합

Fig 4. Fuzzy Set

본 제어기에서 드럼 수위의 시스템 특성을 고려해서 적용시킨 규칙은 (표 1)과 같다.

표 1. 퍼지 규칙

Table 1. Fuzzy Rule

in1 \ in2	N	Z	P
N	NM	NS	ZO
Z	NS	ZO	PS
P	ZO	PS	PM

4. 모의 실험

4.1 실험 환경

사용된 실험 환경은 OIS/EWS 기능을 담당하는 호스트 컴퓨터로서 SUN 워크 스테이션을 이용하였고, 공정 제어를 위해 핵심이 되는 모듈로는 모듈 자체에 네트워크를 위한 이더넷 (ethernet) 포트를 내장하고 있으며 고속의 연산 기능을 가진 CPU 30을 사용하였다. 그리고 서울화력 4호기 발전소 보일러 시스템을 디지털로 구현한 시뮬레이터로서도 CPU 30이 이용된다. CPU 30은 VME BUS에 인터페이스 되어서 전체적으로

SUN 시스템이 네트워크를 통해 정보를 주고 받게 된다. 또 실시간 운영 체제인 Vxworks 관련 화일은 LAN을 통해 가져다가 RAM에 올려놓고 프로세서 모듈에서 실시간 목적을 위해 이용한다. 실험 시스템 구성도는 (그림 5)와 같다.

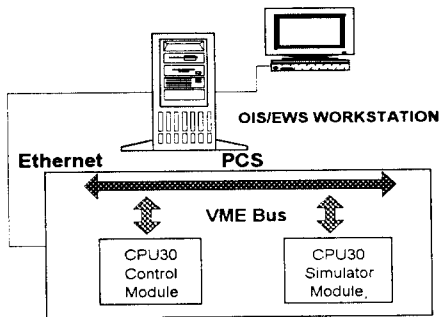


그림 5. 실험 시스템 구성도

Fig 5. Configuration of experiment system

4.2 실험 내용

드림형 보일러의 시뮬레이터를 대상으로 위에서 기술한 실험 환경하에서 3절에서 설명한 퍼지 제어기를 출력 75%의 정상 운전 중에서 분당 3%의 출력 상승율로 출력을 100%까지 올렸다가 다시 75%로 내렸을 경우의 드림 수위 제어를 하고자 한다.

그런데 대규모의 공정 제어의 형태는 다중루프로 이루어진다. 따라서 대규모의 공정 제어를 위해서는 제어기 구성에 있어서 모듈화에 의해 확장성을 가지면서 복잡한 시스템 구성을 용이하게 해주는 것이 필요하다. 이것을 가능하게 하는 것이 configurable controller이다. configurable controller는 기능 서브루틴이라고 할 수 있는 기능 블록을 결합함으로써 구성된다. 이 때 각 기능 블록 내의 구조를 알 필요가 없으며, 단지 그 입력, 출력, 기능을 이해하면 된다. 기능 블록들은 기능 코드(function code)들로 표현되는데 기능 코드는 기능 블록들 사이의 입출력 관계와 내재된 계수들을 사용자가 쉽게 이해할 수 있도록 아스키 문자로 표현한 것이다. 기능코드로 된 configuration 파일은 타겟 프로세서가 이해할 수 있도록 c 언어로 변환한다음 타겟 프로세서에 맞는 크로스 컴파일러를 통해 기계어로 바뀐 후 제어 모듈에 다운로드 된다. 기능코드의 표현방식은 다음과 같다.[2]

블록번호 블록변수 = 기능코드이름(입력포트들: 파라미터값들)

본 모의 실험에서 이용한 퍼지 제어기의 기능코드는 다음과 같다.

제어출력 = flectwo(in1,in2,ff,tr,ts:nof1,nof2,nou,a,b,g,ruleset)

- in1 : 입력변수 1
- in2 : 입력변수 2
- ff : feedforward 신호
- tr : 트랙 신호
- ts : 트랙 스위치
- nof1 : in1의 퍼지 집합의 갯수
- nof2 : in2의 퍼지 집합의 갯수

- nou : Δu (제어량)의 퍼지 집합의 갯수
- a : in1의 scaling factor
- b : in2의 scaling factor
- g : Δu (제어량)의 gain
- ruleset : nof1 \times nof2의 규칙의 나열

4.3 실험 결과

모의 실험에서 이용된 제어기 파라미터는 다음과 같다.

Sampling Time = 250 ms

Fuzzy : a = 2.0, b = 4.5, gain = 3.0

모의 실험에서 사용된 드림수위 제어 루프에 대한 기능코드는 다음과 같다.

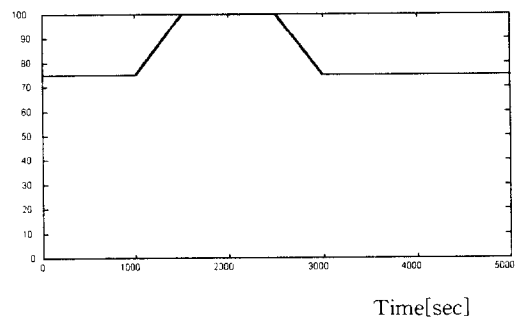
```

! < 2 > Level Loop
9 = ain( ; 0, 0, 2) !-----Fms
53 = msc( ; 50.0)
56 = ain( ; 0, 2, 4) !-----L
60 = msc( ; 0.0)
62 = mss( ; 0)
63 = msc( ; 1)
65 = msc( ; 50.0)
66 = sumII(65, 56;1.0, -1.0) !----- in1
67 = ain( ; 0, 2, 6) !-----Ffw
68 = sumII(9, 67;1.0, -1.0)
69 = msc( ; 75.0)
70 = sumII(69, 63;0.1594, -7.94)
71 = sumII(68, 70;1.0, -1.0) !----- in2
72 = flectwo(66, 71, 60, 60, 62; 3,3,5,2,0,4,5,3,0,0,1,2,1,2,3,2,3,4,
.....)
77 = aout(72; 0, 1, 4) !-----BFPa
78 = aout(72; 0, 1, 5) !-----BFPb

```

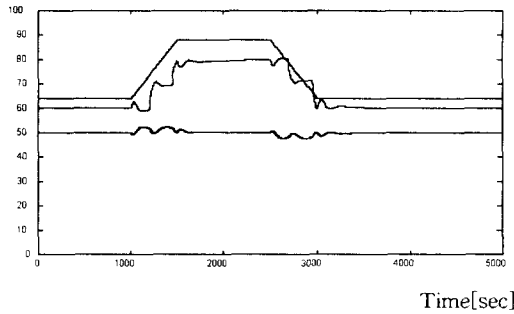
위의 기능 코드를 이용한 모의 결과는 (그림 6)과 같다. 출력의 급격한 증감발에도 드림 수위가 큰 오버슈트나 언더슈트없이 제어가 됨을 볼 수 있다. 결과에서 단위는 % 단위이며, BFPa는 급수 제어 조작량을 나타낸다.

PWR[%]

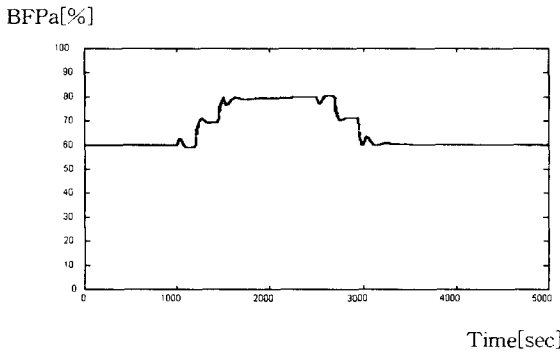


(a) 출력 변화

[%] . : 드림 수위, - : 급수량, - : 주증기량



(b) 주증기량, 급수량, 드림수위 변화



(c) 급수 제어 조작량 변화

그림 6. 실험 결과

Fig 6. Experiment Result

5. 결론 및 추후과제

본 논문에서는 초기의 응답이 최종 응답에 역응답을 보이는 드림 수위 루프에 대해서 퍼지 제어를 적용하고, 서울화력 4호기 보일러 시스템을 모사한 시뮬레이터를 이용한 모의 실험을 통해 그 효용성을 보였다.

실제 분산제어 시스템과 같은 멀티루프 제어기로 운전되고 있는 대규모 플랜트에 적용할 수 있기 위해서는 퍼지 제어기의 많은 튜닝 요소와 튜닝 요소의 변화에 따른 체계적인 분석이 요구된다.

참 고 문 헌

[1]Gunter Klefenz, "Automatic Control of Steam Power Plants", Hartmann & Braun AG. Minden, Bibliographisches Institut, Zurich, 1986

- [2] "발전소 제어 시스템용 고급 제어 알고리즘 및 고장 진단 퍼지 전문가 시스템 개발", 중간보고서, 한국전력공사, 1993
- [3] "분산 제어 시스템의 고장 대처 기능 및 제어 언어의 구현", 최종보고서, 한전 기술 연구원, 1993
- [4] "서울 화력 4호기 운전 조작 설명서", 한국전력공사, 서울화력 발전소, 1983
- [5] 김재선, "신호 흐름도를 이용한 화력 발전소 드림형 보일러 시뮬레이터의 개발에 관한 연구", 한국과학기술원, 석사학위논문, 1990