

화력 발전소 드럼수위의 퍼지-PI 캐스캐이드 제어

변승현, 조지용, 김동욱
전력연구원 시스템통신연구소

Fuzzy-PI Cascade Control of Drum Level of Boiler in Thermal Power Plan

S. H. Byun, J. Y. Cho, D. W. Kim
KEPRI, KEPSCO

Abstract - The drum level control is initiated by 1-element manual control, and then the control mode is changed to 1-element automatic control mode. Finally, the drum level control is changed to 3-element automatic control mode by the logic based on pre-defined threshold of main steam flow. In terms of plant automation, the automatic 1-element control mode is required from the start-up of boiler. In this paper, the fuzzy controller is adopted for automatic 1-element control of drum level from start-up. It is suggested that the fuzzy controller is used in 1-element control, and the fuzzy-PI cascade controller is used in 3-element control. Finally, the validity of suggested control scheme is shown via simulation.

한다.

2. 본 론

2.1 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 모델을 기본으로 하여 현장의 운전자에 의해 수시로 기록된 자료를 통해 각 불력의 계수를 조정해 얻은 모델[3]을 이용하였다. 보일러 모델은 제어기에 맞추어 여러 개의 서브 시스템으로 나눌 수 있는데 여기서는 드럼 수위 동특성에 대해서만 살펴보기로 하겠다.

1. 서 론

대부분 화력 발전소의 경우 보일러의 기동시 숙련된 운전원들이 제어반에 디스플레이되는 많은 공정값들과 경험에 기반하여 수동 운전을 하고 있다.

보일러 제어루프 중 하나인 드럼 수위 제어도 기동 초기에는 수동 제어가 이루어지고 있다.

드럼 수위 제어 루프는 처음에는 드럼 수위만을 제어 입력으로 취하는 PI(Proportional Integral) 제어기에 의해 제어가 이루어지다가, 주증기량이 일정량 이상 유지되면 드럼수위가 일정한 설정치를 유지하도록 급수량, 드럼수위, 주증기량에 의한 PI-PI 캐스캐이드 형태의 제어로 전환되어 제어가 이루어진다. 정상운전중의 드럼수위 제어루프는 일종의 다중입력 단일출력(MISO) 시스템으로 볼 수 있다. 특히 기동시에는 수동에 의한 제어가 행해지다가 자동 모드로 전환되어진다. 기동시에는 운전원의 의한 수동 조작에 의해 드럼수위의 제어가 이루어짐을 알 수 있다[1][2].

한편, 컴퓨터에 의한 화력 발전소 자동화 관점에서의 기동 자동화는 운전원의 조작 실수, 기동 절차에 따른 운전의 복잡성을 해결하고 운전원의 의무 감소 등에 그 효과를 발휘할 수 있다[1].

발전기동시부터 자동운전을 위해서는 운전원의 운전 지식을 반영할 수 있는 제어기가 요구되는데, 운전원의 언어로 된 경험 지식을 반영할 수 있는 제어기가 퍼지 제어기이다.

본 논문에서는 기동시에는 퍼지제어기를 채용하고, 정상운전중에는 퍼지-PI 형태의 캐스캐이드 제어기를 채용함으로써, 기동시의 제어에도 자동운전이 이루어지도록 하는 구조를 갖는 제어기를 제안한다. 제어기의 효용성은 발전소 보일러를 모사한 시뮬레이션을 통해 보이고자 한다.

본론에서는 대상 시스템인 보일러 드럼 수위 모델과 드럼 수위 제어기에 대해서 기술하고, 제안하는 제어기 구조에 대해 설명하며, 서울화력 4호기 보일러를 모사한 신호 흐름도 모델을 대상으로 한 모의 실험 결과를 통해 제안한 제어기의 효용성을 살펴보고, 결론을 기술하고자

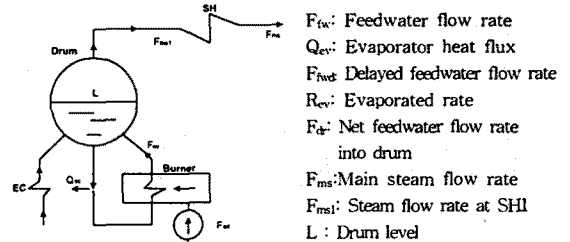


그림 1. 드럼 수위 동특성에 대한 등가적 보일러

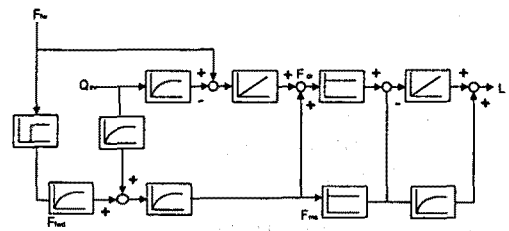


그림 2. 드럼 수위 동특성 신호 흐름도

수위 동특성에 관한 등가적 보일러는 그림 1과 같다. 급수는 급수 펌프에 의해 절탄기로 공급되며 절탄기에서 예열된 후 드럼으로 공급된다. 그러면 드럼에 공급된 급수와 증발기를 거친 증기로 인해 드럼 내부는 물과 증기의 혼합체로서 증기 방울이 큰 부피를 차지하게 된다. 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. 이 일정한 시간 뒤에 수위는 다시 급수에 비례하는 증가를 보인다. 마찬가지로 연료량의 증가는 증기발생을 증가시켜 일시적으로는 증기방울이 많아져 수위가 상승하고(swel 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 2와 같다.

2.2 드럼수위 제어기

드럼수위 제어기의 구성은 그림 3에서 보듯이 크게 1요소 제어와 3요소 제어로 나눌 수 있다. 1요소 제어는 기동시에 이루어지는 드럼수위만을 제어입력으로 취하는 제어를 말하며, 3요소 제어는 정상운전 중에 증기량, 급수량, 드럼 수위의 3요소를 제어기의 입력으로 이용하는 제어를 말한다. 드럼수위의 제어는 보일러 드럼에 보내는 급수를 제어함으로써 이루어진다. 1요소 제어와 3요소 급수 제어의 목적은 드럼 수위를 설정치에 일정하게 유지하는 것이다. 3요소 제어 구조에서는 유출되는 증기량과 같은 급수량을 공급하면서, 드럼 수위를 외란에 관계없이 항상 설정치로 유지하는 것이 제어의 목적이다. 3요소 제어의 경우에는 PI 제어기가 직렬로 연결되어진 cascade 제어기의 구조를 갖는다. 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 유지하여야 한다[4].

cascade 제어기는 단일 루프 제어기에 비해서 내부 루프에서 일어나는 외란이 최종 제어 변수에 영향을 주기 전에 보조 제어기에 의해 보정할 수 있어서 내부 루프에서 일어나는 부하 외란의 효과를 줄이는데 매우 효과적이다. 외부 루프에 비해 내부 루프의 상대적인 속도가 빠르면 빠를수록 내부 루프에서 일어나는 외란의 효과를 억제하는데 더욱 효과적이다[5].

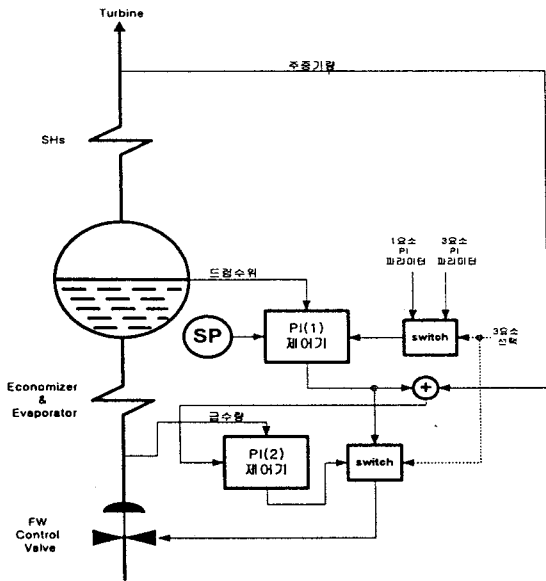


그림 3. 드럼수위 제어기 구조

2.2.1 제어 모드

보통의 상용 제어기에는 수동 모드, 자동 모드, 리모트 모드, 트래크 모드의 4가지 제어 모드가 사용되고 있다. 수동 모드는 제어기의 수학적 계산에 관계없이 운전원의 제어기 조작에 의한 값이 출력되는 모드를 말하며, 자동 모드는 제어기의 수학적 계산 값이 제어기 출력값이 되며, 설정치를 제어기 자신이 발생시키는 모드를 말한다. 리모트 모드는 자동 모드와 비슷하나, 설정치를 외부 기능 블럭으로부터 받아들이는 제어 모드를 말한다. 트래

크는 수동 모드와 비슷하나, 제어기 출력을 다른 기능 블럭으로부터 받아들이는 제어모드를 말한다.

2.2.2 드럼 수위 제어

기동시의 드럼의 수위는 드럼 내의 온도가 상승하면서 처음에는 느리게 증가하다가 시간이 지나면서 급격히 증가하게 된다. 이는 보일러내에 증발기로부터 들어온 증기에 의해 수위가 더 높게 나타나기 때문이다. 또한 물이 끓으면서 수위는 심한 변동을 나타나게 된다[1]. 이러한 이유로 드럼의 수위를 일정하게 유지하기 위해서는 운전원의 경험에 의존할 수 밖에 없다. 따라서 수위 제어는 초기의 1요소 제어에서 수동 모드 운전으로 시작하게 된다. 초기의 1요소 수동 모드 운전은 수위가 어느정도 안정되면, 자동 모드 1요소 제어로 전환되며, 주증기량이 일정량이상 유지되면 자동 모드 3요소 제어로의 전환이 이루어진다. 그림 3의 제어기 구성에서 보듯이, 1요소 제어와 3요소 제어 모두 드럼수위를 입력으로 받아들이는 PI제어기를 이용하고 있지만, 3요소 제어에서만 주증기량을 선행신호로 이용함을 볼 수 있다. 그리고 1요소 제어일 때와 3요소 제어일 때, PI(1)제어기의 PI 파미터 값이 다르게 적용됨을 볼 수 있다[2].

2.3 제안하는 제어기 구조

발전소 자동화에는 터어빈과 보일러의 자동 기동 및 정지 등이 포함되어 있다[1]. 발전소 자동화 관점에서 볼 때, 기동 초기시부터 드럼 수위의 자동 운전이 요구된다. 기동 초기의 드럼 수위의 자동 운전을 위해서는 경험에 의해 이루어지는 수동 운전을 반영할 수 있는 제어기의 채용이 요구된다. 전문가의 지식은 일반적으로 정량적이 아닌 언어적인 표현에 의존하므로, 지식에 불확실성이 내포되고 표현 용어 자체에 애매함이 포함될 수 있다. 따라서 지식 용어 자체의 애매함을 다루기 위해서 애매함을 잘 나타낼 수 있는 퍼지 집합을 이용하여 전문가의 지식을 일반적으로 이용하는 "IF- THEN"형식의 규칙에 의해 표현하고, 지식의 불확실한 처리 방안으로 퍼지 논리를 이용하여 퍼지 집합으로 표현된 지식을 처리할 수 있는 퍼지 제어기의 채용이 적합하다고 볼 수 있다[6]. 3요소 제어의 경우에는 외란에 효과적으로 대응해야 하므로 cascade제어 구조가 바람직하다고 볼 수 있다 따라서 본 논문에서는 초기의 1요소 제어와 3요소 제어에 모두 대응하기 위해서, 그림 4와 같은 Fuzzy-PI 형태의 cascade제어기 구조를 제안한다.

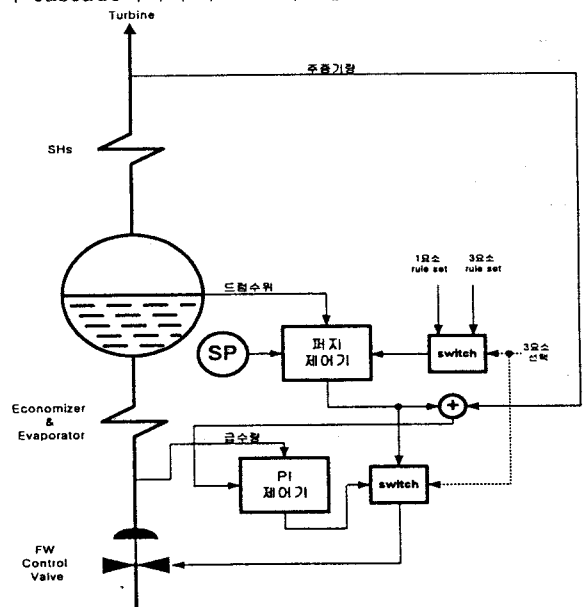


그림 4. 제안하는 드럼수위 제어기 구조

2.4 모의 실험

본 논문에서 제안한 제어기 구조의 효용성을 보여주기 위해 2.1절에서 소개한 드럼형 보일러 시뮬레이터를 대상으로 정상상태에서 3요소 제어에 대한 모의 실험을 하도록 하였다. 대상 모델이 정상 상태를 모사한 관계로 1 요소 제어에 대한 모의 실험은 다루지 않기로 하였다. 1 요소 제어에 대한 기동 퍼지 제어기는 [1]에서 다루고 있다.

2.4.1 모의 실험에서의 제어기

실험하기 전에, 제안한 제어기에서 이용되어지는 PI 제어기의 파라미터와 퍼지 제어기의 퍼지 집합과 규칙을 결정해야만 한다. PI 제어기는 이상적인 PI 제어기를 이용하였다.

$$u = K_c [e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt] \quad (1)$$

디지털 PI 제어기로의 구현은 적분항을 사다리꼴의 합 의 형태로 근사화하고, 속도형 PI 제어기를 채용하였다.

$$\Delta u(k) = K_c [(e(k) - e(k-1)) + \frac{T}{2T_i} (e(k) + e(k-1))] \quad (2)$$

식 2)에서 T는 샘플링 타임이며, 모의 실험에서는 250ms를 샘플링 타임으로 이용하였다. [7]에서 제시한 개선된 Ziegler-Nichols 튜닝 방법을 이용하여, Kc와 Ti를 구하면, Kc = 1.2, Ti = 1.12를 구할 수 있다. 이 값을 PI 제어기의 파라미터로 이용하였다.

퍼지 제어기의 구성은 그림 5와 같다. 퍼지 제어기의 입력은 드럼수위의 오차와 드럼 수위의 변화량으로 다음과 같다.

$$\text{수위 오차} = \text{수위설정치} - \text{수위}$$

$$\text{수위 변화량} = \Delta \text{수위} = \text{수위}(k) - \text{수위}(k-1)$$

제어기의 입력인 공정 변수들은 scaling factor 1, 2에 의해 scaling 되어지며, 비퍼지화된 제어기 출력은 scaling factor 3에 의해 scaling 되어진다. 규칙에 이용되어지는 퍼지 집합은 그림 6, 그림 7에서와 같이 [-1,1]의 전체 집합을 가지도록 정규화 시켜 이용하였다.

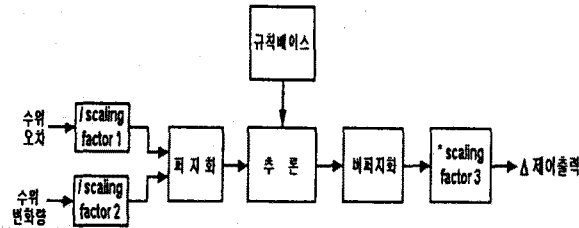


그림 5. 퍼지 제어기의 구성

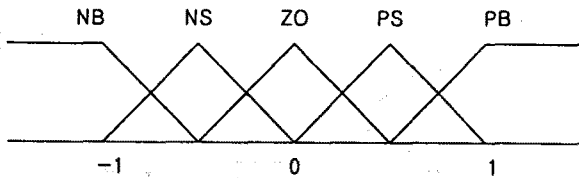


그림 6. 제어 입력인 수위 오차, 수위 변화량에 대한 퍼지 집합

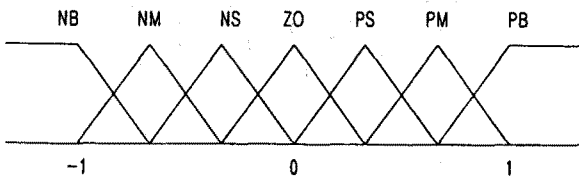


그림 7. 제어출력에 사용된 퍼지 집합

표 1. 모의 실험에서 사용한 퍼지 규칙

DL \ L	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	ZO	ZO	PS	PB	PB
NS	NS	ZO	ZO	PS	PM
ZO	NM	ZO	ZO	ZO	PM
PS	NM	NS	ZO	ZO	PS
PB	NB	NB	NS	ZO	ZO

모의 실험에서 사용한 퍼지 규칙은 (표 1)과 같고, scaling factor들은 정상상태에서의 모의 실험 운전 데이터룰 토대로 취득하여 사용하였으며, 사용한 scaling factor들을 나열하면 다음과 같다.

$$\text{scaling factor1} = 3.0, \text{factor2} = 0.01, \text{factor3} = 0.05$$

2.4.2 모의 실험 결과

앞 절에서 언급한 제어기들과 제어기 파라미터들을 이용하여 출력 75%의 정상 운전 중에서 분당 3%의 출력 상승률로 출력을 90%까지 올렸다가 다시 75%로 내렸을 경우의 드럼수위 제어 결과를 도시하면 그림 8과 같다. 출력의 급격한 증감발에도 드럼수위가 큰 오버슈트나 언더슈트 없이 제어가 이루어짐을 볼 수 있다.

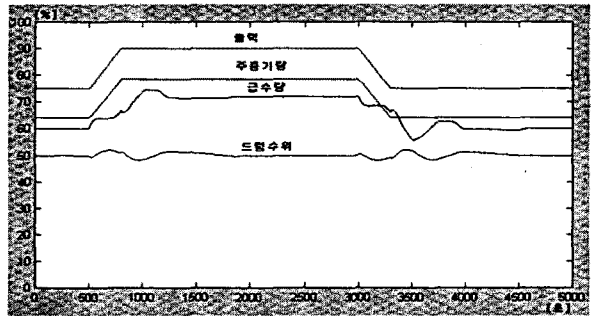


그림 8. 모의 실험 결과

3. 결 론

본 논문에서는 보일러 기동 초기부터 드럼수위의 자동 운전을 위해서 퍼지-PI 캐스케이드 형태의 제어기를 제안하고, 서울화력 4호기 보일러 시스템을 모사한 신호 흐름도 모델을 이용한 모의 실험을 통해 제안한 제어기의 효용성을 보였다.

(참고 문헌)

- [1] 류형근, "퍼지 논리를 이용한 드럼형 보일러의 자동 기동에 관한 연구", 한국과학기술원, 석사학위논문, 1991
- [2] 김은기, 김중안, 김용석, "한림북한 자동제어설비 기술지원 결과 보고서", 전력연구원, TM.S02.F97.277, 1997
- [3] 김재선, "신호 흐름도를 이용한 화력 발전소 드럼형 보일러 시뮬레이터의 개발에 관한 연구", 한국과학기술원, 석사학위논문, 1990
- [4] "서울화력 4호기 운전조작 설명서", 한국전력공사, 서울화력발전소, 1983
- [5] C.C.Hang, et. al, "Relay Feedback Auto-Tuning Cascade Controllers", IEEE transactions on C Systems technology, Vol 2, No 1, March, 1994, pp
- [6] 변승현, "화력 발전소 드럼형 보일러 시스템의 고장 진단을 위한 퍼지 전문가 시스템의 개발", 한국과학기술원, 석사학위논문, 1994
- [7] C.C.Hang, et. al, "Refinements of the Ziegler-tuning formula", IEE Proceedings-D, Vol. 138, March, 1991, pp111-118