고급공정제어를 이용한 화력발전소 보일러 마스터 제어루프의 개발과 최적제어구현에 관한 연구

임건표*, 김호열**, 김병철***
한전전력연구원*, 한전전력연구원**, 한전전력연구원***

A Study of the Dvelopment and optimum control of the Boiler Master Control Loop by using A Advanced Process Control

Geonpyol Lim*, Hoyol Kim**, Byoungchul Kim***
KEPRI*, KEPRI**, KEPRI***

Abstract - 화력발전소 보일러의 각종 공정은 대부분 비례·적분·미분 제어기에 의해 제어되어 왔다. 이러한 비례·미분·적분 제어기의 최적튜닝은 공정에 있어 가장 중요한 부분 중 하나라고 할 수 있다. 또한 보일러 제어는 다중의 입력과 루프로 구성되어져 있어 이를 튜닝하기가 어려워 현재까지의 최적튜닝은 튜닝전문가의 숙련도에 의해 결정되어져 왔다. 본 논문에서는 고급공정제어기(Advanced Process Control, APC)를 개발하는 과정과 이를 이용해 최종적으로 보일러 제어기에서 제어하고자 하는 대상에 대한 응답특성을 간단한 튜닝을 통해 구현하는 과정에 대하여 설명하고 그 결과를 시뮬레이터를 통해 시험함으로써 검증해 보이고자 한다.

1. 서 론

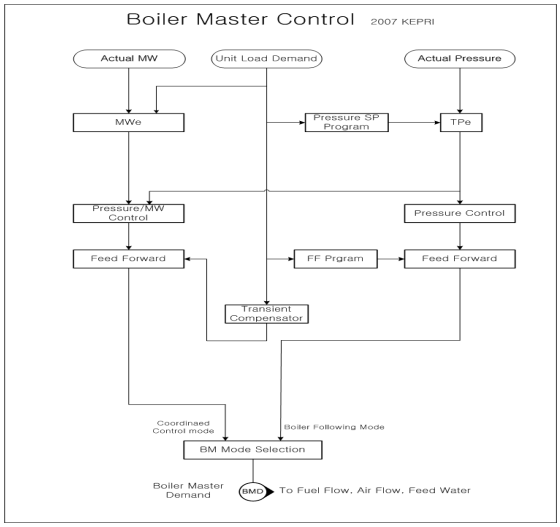
최근 전세계적인 연료비 급등과 국내 전력거래시장 운영에 따른 수익과 관련하여 발전소의 최적 운전이 더욱 절실해짐에 따라 자동제어의 중요성이 한층 더 커지고 있다. 지금까지의 발전소 주제어기는 여러 가지 입력신호들을 이득과 함수발생기 등을 통해 비례·적분·미분 제어하는 루프로 구성되어져 왔다. 이러한 제어루프의 구성은 다양한 입력신호가 서로 얽혀 상호 영향을 주고 여러 가지 함수와 변수들로 조합되어 최종출력을 내는 구조로 되어 있다. 최적의 출력제어를 위해서는 복잡한 제어 루프를 튜닝하기 위해 장기간의 시운전과 전문기술이 필요하며 경험이 풍부한 튜닝전문가의 조정이 필요하다.

이 논문에서는 상당수의 입력신호와 복잡한 제어루프를 간략하게 구성하고 튜닝한 고급공정제어기를 이용한 제어루프에 관해 기술하고 시뮬레이터에 의한 검증결과를 통해 이에 대한 실용성을 보이고자 한다.

2. 본 론

2.1 고급공정제어기 적용전의 보일러 마스터 제어로직

이 논문에 적용한 보일러 마스터 제어로직은 차세대 대용량 화력발전소를 제어하기 위해 개발한 것이다. 보일러 마스터 제어로직은 주증기 압력과 발전소의 부하인 전력요구신호(Unit Load Demand) 등을 입력신호로 하여 모델링 되어졌다. 이러한 보일러 마스터 제어로직의 최종출력은 연소공기, 연료, 급수제어 마스터의 주신호로 작용한다.

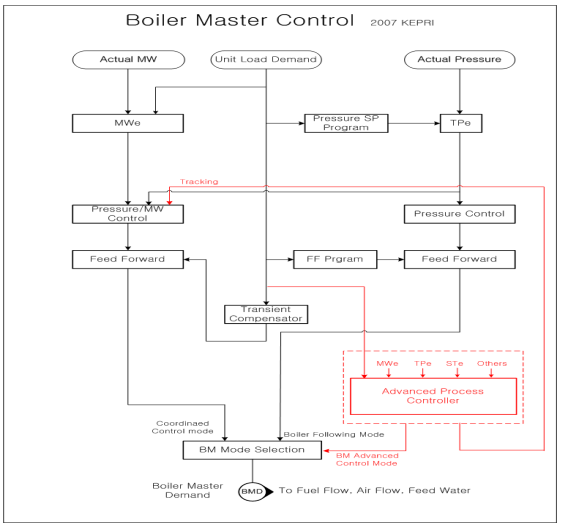


<그림 1> 보일러 마스터 제어로직도

전력요구신호는 전력거래소나 발전소 운전원에 의해 발생하며 이 신호는 실제 발전기 출력 및 보일러 출구 주증기 압력과 비교해 오차를 발생한다. 또한 실제 발전기 출력의 과도응답을 보상하기 위한 피드포워드 신호를 발생하는 데도 사용한다. 보일러 터빈 협조제어 모드(Coordinated Control Mode, CC mode)에서는 발전기 출력과 보일러 출구 증기압력과의 오차를 각각 미리 선정된 비율로 합산한 것을 위에서 언급한 발전기 출력과도응답보상 피드포워드 신호로 적용하여 비례·미분 제어기의 출력을 만들어 낸다. 반면 보일러 추종 모드(Boiler Following Mode)에서는 보일러가 터빈응동에 따른 주증기 압력변화를 보상하기 위해 주증기 압력의 오차만을 전력요구 신호에서 발생한 피드포워드 신호를 적용해 비례·적분 제어 출력을 만들어 낸다.

2.2 고급공정제어기를 적용한 보일러 마스터 제어로직

그림 2와 같이 고급공정제어기는 기존의 보일러 마스터 제어로직을 경유하지 않고 기존의 입력신호들 중 전력요구신호와 주증기압력신호 등을 입력신호로 하여 또하나의 제어모드(고급공정제어모드, Advanced Process Control Mode, APC mode)를 형성한다.



<그림 2> 고급공정제어기를 적용한 보일러마스터 제어로직도

그림 3과 같이 고급공정제어기는 전력요구신호로부터 주증기 압력을 제어하기 위한 보일러 마스터의 피드포워드 신호를 만들어 내기 위해 저속 키커(Slow Kicker)와 고속 키커(Fast Kicker), 퍼지파이어(Fuzzifier)를 사용한다.

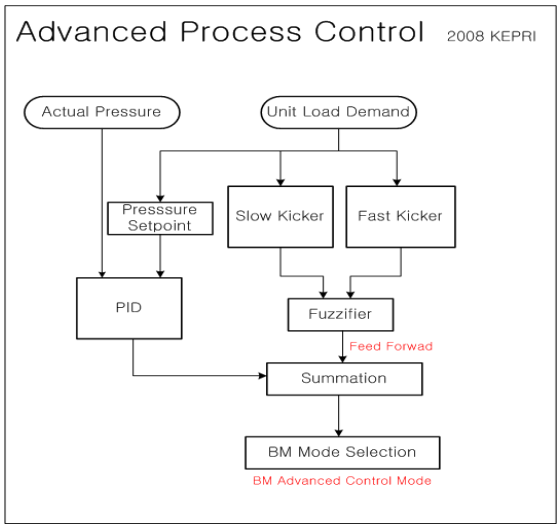
두개의 키커는 전력요구신호를 받아 주증기 압력을 제어하기 위한 느린응답과 빠른 응답을 내보내며 퍼지파이어는 키커의 두 출력을 미리 정해준 비율로 선택해서 내보내게 된다. 여기에 사용한 비례·적분 제어기는 전력요구신호에 따른 주증기 압력설정치와 실제 주증기 압력을 입력신호로 하여 최종출력인 보일러 마스터 신호에 아주 작은 비율로 피드백작용을 한다. 퍼지파이어 출력은 보일러 마스터에 대한 피드포워드 신호로서 아주 큰 비율로 작용한다.

고급공정제어기에 사용한 키커의 모델식은 다음과 같이 표현된다.

$$y(t)+a_1y(t-1) = b_0u(t-d)+b_1u(t-1-d)$$

d는 시간지연, a, b는 계수, u(t), y(t)는 입력과 출력함수이다. 본 논문에

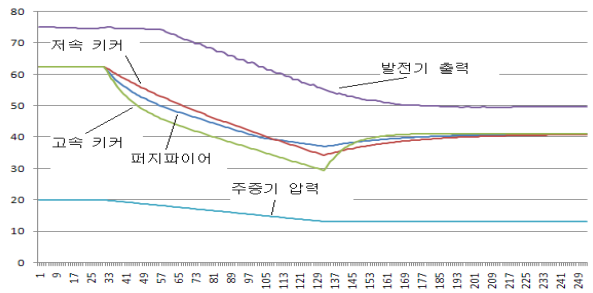
서는 이러한 모델식을 만들어 내기 위해 매트랩(Matlab)을 사용하였다. 고급공정제어기를 적용하기 이전의 보일러 마스터 제어기는 발전소 주기기 설계내용을 기반으로 튜닝하였다. 튜닝이 완료된 후 보일러 마스터와 주증기 압력, 발전기 출력 등에 대한 범프시험(Bumo Test)과 램프시험(Ramp Test)을 통해 운전 데이터를 3초 단위로 취득하였다. 이 결과를 이용하여 키커에 사용할 전달함수를 매트랩을 이용해 얻어냈다. 매트랩을 통해 얻어낸 키커에 사용할 전달함수는 시뮬레이터에 읽어들여 부하시험을 통해 최종튜닝을 했다.



〈그림 3〉 고급공정제어기 로직도

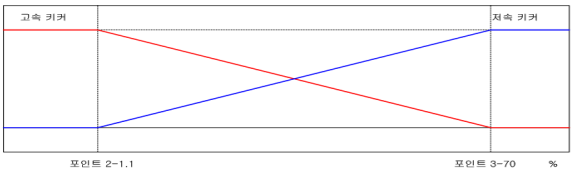
2.3 모의 실험 및 결과

키커의 전달함수를 구하는 과정에서 a_1, b_0, b_1의 파라미터 값은 저속키커와 고속키커가 각각 -0.995, 2.0, 01.99005와 -0.967216, 6.5, -6.467216이었으며, 그림 4는 키커와 퍼지파이어의 응답을 나타낸 그래프이다.



〈그림 4〉 키커 및 퍼지파이어 응답

키커의 응답은 퍼지파이어에 의해 그림 5와 같은 비율로 선택되어 출력된다. 포인트 2, 3에 대한 파라미터 값은 1.1과 70이다.



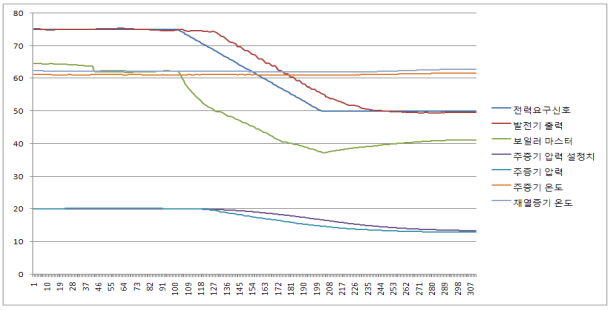
〈그림 5〉 퍼지파이어 선택비율

전력요구신호를 이용한 주증기 압력 설정치와 실제 주증기 압력신호를 입력신호로 갖는 비례·적분 제어기의 각각의 상수는 발전기 출력 100, 75, 50%에 대해 각각, 1, 0.8, 0.5/450, 450, 600이며 시뮬레이션을 통해 얻을 수 있었다. 비례·적분 제어기와 키커 및 퍼지파이어를 조합해 그림 3과 같이 고급공정제어 루프를 구성하였다. 제어루프가 기존의 루프에 비해 간단하고, 튜닝 포인트 수가 적어 현장에서 사용하기가 용이하며 현장환경의 변화에 따라 누구나 튜닝이 가능해졌으며, 아래와 같이 시험결과 또한 더 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

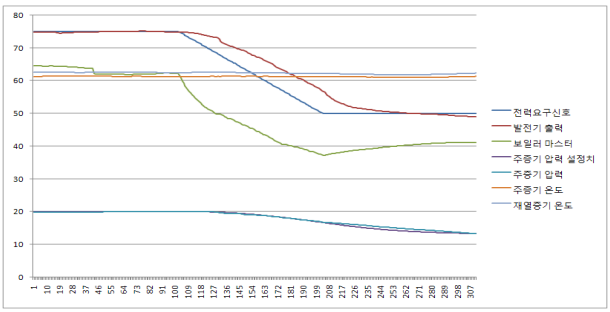
발전기 출력 100, 75, 50, 75, 100%순으로 같은 조건에서 고급공정제어 모드와 보일러·터빈 협조제어 모드 각각의 자료를 취득·비교했다. 대표적인 예로 변화율이 더 심한 75에서 50% 출력으로 변화할 경우의 결과를 표 1, 그림 6, 7에 나타냈다. 주증기 온도와 압력을 기준 내로 잘 유지하면서 전력요구신호에 대한 발전기 출력 변화에 있어 더 좋은 결과를 얻을 것을 알 수 있다. 그림 7은 고급공정제어기를 적용하기 이전의 응답을 나타내는 것으로 주증기 온도와 압력을 기준 내로 유지하고 있으나 전력요구신호에 대한 발전기 출력의 변화율이 더 느린 것을 알 수 있다.

〈표 1〉 부하시험 결과 자료

75 → 50% 부하 시험		기준	APC mode	CC mode
발전기 출력	언더 슛(MW)	5	6.08	10.8
	변화율(%/min)	5	3.4	3.1
주증기 온도 편차		±8℃	3.86/-1.93	0.71/-2.75
재열증기 온도 편차		±8℃	4.16/-3.63	1.9/-5.11



〈그림 6〉 고급공정제어기를 이용한 보일러 마스터 응답



〈그림 7〉 고급공정제어기를 적용하기 전 보일러 마스터 응답

3. 결 론

본 논문에서는 앞으로 건설할 차세대 대용량 화력발전소에 대한 시뮬레이터를 이미 설계된 주기기 자료에 기반한 응답특성을 얻도록 튜닝한 결과로부터 운전 데이터를 취득하였다. 그 결과를 이용하여 고급공정제어기를 모델링하였으며, 그 응답특성이 기존보다 더 좋은 시험결과를 보여주었다. 모델링 결과를 이용한 부하시험과 튜닝을 통해 각종 전달함수와 파라미터 변수를 최적의 응답상태로 조정하고, 실제 적용가능성을 확인하였다.

앞으로 그 결과와 여러 가지 추가적인 시험을 통해 실제적용이 확실한 제어기를 구축할 예정이다.

[참 고 문 헌]

[1] 이주현, 이찬주, "화력발전소 보일러 제어루프의 시뮬레이션에 관한 연구", 대한전기학회, 868-870, 1999

[2] Katsuhiko Ogata, "Discrete-Time Control Systems", Prentice Hall, 2/E, P75-173, 1994