

모델링 기법을 이용한 석탄화력발전소 발전기 출력제어

임건표*, 김호열**
한전전력연구원**, 한전전력연구원**

The Generating Power Control of Coal-Fired Power Plant using Modeling Method

Geonpyo Lim*, Hoyol Kim**
KEPRI, KEPRI**

Abstract - 자원의 고갈과 각종 환경규제 및 정부의 전력거래 방침 등으로 인해 점점 발전소에서는 전력계통에 대한 신뢰도 및 전기품질을 유지하기가 어려워지고 있다. 발전소의 부하대별 주요 운전 설계값은 효율과 바로 직결되는 사항으로 각 부하별로 온도와 압력 등 운전설계값을 최적의 상태로 유지하는 것은 발전소 수명과 발전효율, 전력거래 등에 있어 중요한 요소들이다. 전력시장에 진입하는 발전소는 전력계통의 갑작스런 불안정 상황이나 전력거래소 요청시 경사변동폭, 출력변동율, 무효전력 출력, 자동발전 제어, 주파수조정량 확보 등을 수행할 수 있어야 한다.

본 논문에서는 고급공정제어기를 이용하여 운전설계값을 효과적으로 제어하면서 기존의 제어로직보다 전력계통상에서 요구되는 발전기 출력을 최대한 신속히 제어하는 과정을 기술하였다. 우선 보일러 마스터와 터빈 마스터, 급수 마스터로 구성된 제어로직을 설계한 뒤 이들 마스터에 대한 발전기 출력, 주증기 압력, 기수분리기 출구온도 각각의 영향을 모델링 기법을 이용하여 적합한 모델을 구했다. 각각의 모델을 고급공정제어기에 적용하고 발전기 출력제어에 대한 기존의 발전소 응답보다 좀 더 효율적이고 실제 적용이 가능한 결과를 얻을 수 있도록 튜닝을 시행했으며 그 과정과 결과를 기술했다.

1. 서 론

1000MW급 차세대 화력발전의 초초임계압 공정은 기존 발전소보다 높은 고온, 고압의 조건임에도 불구하고 높은 효율과 낮은 비용을 기본으로 설계되어져 원하는 제어특성을 얻을 수 있도록 상태변수제어를 포함하는 최신 제어 이론을 개발·적용할 필요성이 커졌다.

이러한 최신제어이론과 튜닝의 필요성에 입각해 여기서는 고급공정제어기(Advanced Process Control, APC)를 개발하는 과정과 그 결과를 시뮬레이터를 통해 검증·비교한 내용에 대해 기술하고자 한다.

2. 본 론

2.1 고급공정제어기를 적용한 제어로직 설계

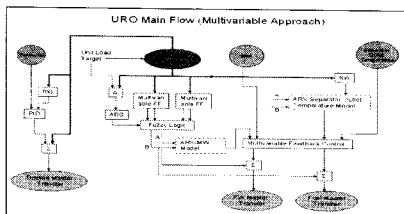
먼저 고급공정제어기를 적용할 제어로직(발전소 응답 최적기, Unit Response Optimizer, URO)을 설계해야 한다. 기본적인 개념은 발전기 출력이 변하는 동안 피드포워드 기능이 대부분의 제어를 담당하고, 제어의 오차나 불확실한 외란은 피드백으로 보상하는 것이다.

2.1.1 1차 설계

최초의 설계 개념은 보일러 추종 형태로 발전기 출력 응답속도가 가장 빠르기는 하지만 보일러 압력제어가 불안정해지는 단점이 있다. 이 로직에서는 보일러 마스터측에 고급공정제어 모델과 퍼지로직 알고리즘을 사용해 비선형의 피드포워드 기능을 주었다. 다음은 터빈 추종 형태로 보일러 압력은 안정적으로 제어할 수 있으나 터빈 마스터가 매우 제한적인 발전기 출력 변화를 발생하게 되는 단점을 가지고 있다.

2.1.2 2차 설계

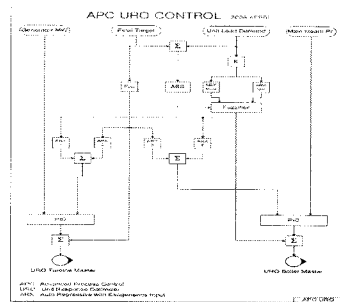
1차 설계에서의 로직은 서로 상충되는 단점을 가지고 있다. 따라서 이를 보완하기 위해 그림 1과 같이 다중변수 피드백 제어 형태(Multivariable Feedback Control)를 구상해 보았다. 입력으로 선택된 두개의 변수는 급수유량과 연료요구량, 출력으로 선택된 변수는 발전기 출력과 기수분리기 출구 증기온도이다. 다중변수 피드백 제어기는 고급공정제어 모델 형태로 적용할 수 있다.



<그림 1> 2차 URO 로직

2.1.3 3차 설계

2차에서 설계한 로직에서도 튜닝과정에서 기수분리기 출구 증기온도로부터의 고급공정제어 모델이 안정적인 마스터 출력을 가져오지 못했다. 이에 최종적으로 그림 2와 같이 전력요구신호를 이용한 응답속도 조절신호와 발전기출력목표값(Unit Load Target) 신호로부터 얻은 보일러 마스터와 터빈 마스터에 대한 주증기 압력과 발전기 출력에 대한 고급공정제어모델을 구성해 최종적인 마스터 신호를 만들어 내기로 했다.



<그림 2> 3차 URO 로직

처음에 고급공정제어 모델 1~4(ARX 1~4)를 제외한 상태로 응답속도를 조절하기 위한 고급공정제어 모델(ARX Slow and Fast)만을 이용해 튜닝을 해 보았으나 발전기 출력별로 양호한 응답을 얻을 수 없었다. 이에 예측 제어모델인 ARX 1~4를 적용하기로 결정하고 최종로직을 확정하여 모델링을 하고 튜닝을 시행했다.

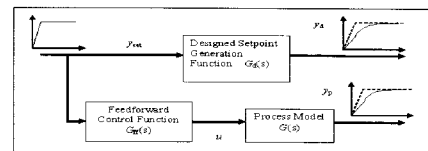
고급공정제어기는 전력요구신호로부터 주증기 압력을 제어하기 위한 피드포워드 신호를 만들어 내기 위해 전력요구신호(Unit Load Demand)와 비례 이득(K) 밑에 저속 키커(ARX Slow)와 고속 키커(ARX Fast), 퍼지파이어(Fuzzifier)를 사용한다. 두개의 키커는 전력요구신호를 받아 주증기 압력과 발전기 출력을 제어하기 위한 느린응답과 빠른 응답을 내보내며 퍼지파이어는 키커의 두 출력을 미리 정해진 비율로 선택해서 내보내게 된다. 퍼지파이어 출력은 ARX1~4 모델의 입력으로 들어가고 보일러와 터빈 마스터 각각의 모델 출력은 합쳐져 비례·적분·미분 제어기의 설정값이 된다. 터빈 마스터측의 비례·적분·미분 제어기의 공정변수는 발전기 출력이며 비례·적분·미분 제어기의 출력은 전력요구신호의 목표치(Final Target)에 의한 터빈마스터 설정치와 합산되어 최종 제어신호를 만들어 내게 된다. 반면 보일러 마스터측의 비례·적분·미분 제어기의 공정변수는 주증기 압력이며 비례·적분·미분 제어기의 출력은 퍼지파이어의 출력과 합산되어 보일러 마스터의 최종 제어신호를 만들어 내게 된다.

2.2 알고리즘의 모델링

고급공정제어에 사용할 알고리즘은 시험자료에 근거한 모델링을 통해 얻게 된다. 시험은 보일러 마스터와 터빈 마스터를 수동으로 절제하여 행하게 된다. 관류형 보일러의 경우는 급수제어계통과 연료 마스터까지도 수동모드로 절제한 후 수행되어야 한다.

2.2.1 키커 모델링

키커는 모델을 기반으로 설계된 피드포워드 기능(Feedforward Function)을 갖는 모듈이다. 그림 3에서 y_{set} 은 전력요구신호, y_d 는 설계된 전력요구신호, G_{ff} 는 피드포워드 전달함수, u 는 피드포워드 출력, y_p 는 예측된 공정의 출력이다.



<그림 3> 키커 모델 설계 개념도

G_d 는 예측 설정값이나 응답의 형태가 아닌 선형전달함수 형태의 전력요구 신호 설정값 발생기로 원하는 응답을 얻기 위한 비례·적분·미분 제어기의 출력과 같은 설정값을 만들어내도록 설계한다. y_p 와 y_d 의 결과가 일치할 경우 다음의 결과를 얻게 된다.

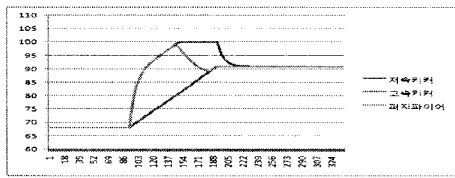
$$G_d(s) = G(s) \times G_{ff}(s) \rightarrow G_{ff}(s) = G_d(s) / G(s)$$

이러한 과정을 거쳐 원하는 속도에 대한 키커의 모델을 얻을 수 있었다. 저속키커 모델의 경우 $G_{slow}(Z)=1$, 고속키커 모델의 경우 다음과 같다.

$$G_{fast}(Z) = \frac{13.195120 - 13.146340Z^{-1}}{1 - 0.951220Z^{-1}}$$

2.2.2 퍼지피어

퍼지피어는 저속키커와 고속키커의 출력을 선택적으로 출력하는 역할을 한다. 저속키커와 고속키커에 대한 실제 피드포워드 전달함수를 퍼지피어를 통한 결과는 그림 5와 같은 결과를 보여주었다. 키커를 조합한 결과를 이용해 발전기 출력에 대한 시험결과를 표1과 같이 얻을 수 있었다.



〈그림 4〉 키커 모델 설계 개념도

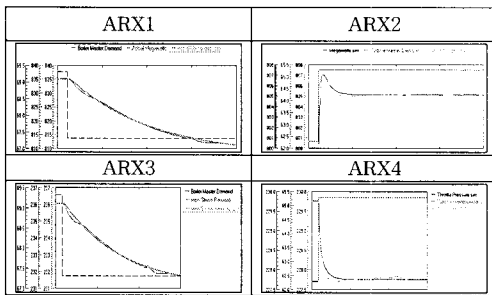
〈표 1〉 퍼지피어에 의한 $G_{ff}(s)$ 와 y_p

응답 속도	피드포워드 출력 ($G_{ff}(s)$, 키커 전달함수)	발전기 출력 (y_p)
조합		

2.2.3 예측제어모델(ARX1-4)

표2는 부하시험결과를 트렌드화한 후 원하는 트렌드로 수정한 결과 및 그 결과에 따른 제어로직 설계와 튜닝에 사용한 최종모델을 얻는 과정에 사용한 그래프이다. 적색은 시험결과, 녹색은 원하는 트렌드로 수정한 결과이다. 원하는 트렌드에 대해 얻은 모델을 URO로직의 ARX1~4에 입력하고 튜닝을 시행했다.

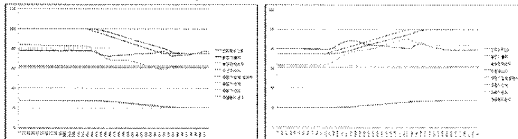
〈표 2〉 예측제어모델(ARX1-4)



2.2 부하시험 및 결과분석

표 3은 1000MW 발전소의 발전기 출력 750에서 1000MW 범위, 출력변동률 5%, 협조제어모드에서의 부하시험결과를 보여주고 있다. 실제 운전중인 500MW 발전소와 비슷한 결과를 보여주고 있다.

〈표 3〉 부하시험(APC 미적용)



〈표 4〉 부하시험(APC 적용)

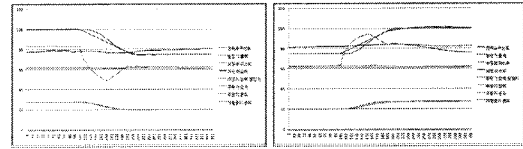
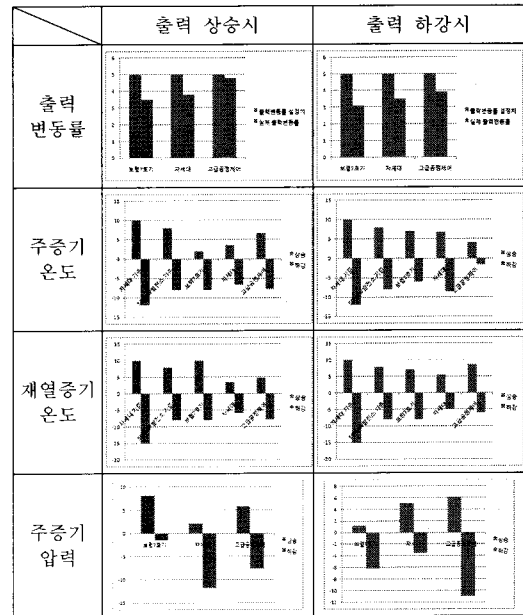


표 5는 출력변동률 5%의 500MW 발전소, 1000MW 협조제어모드 및 고급공정제어모드에서의 시험결과를 보여주고 있다.

〈표 5〉 부하시험 비교



고급공정제어모드로 제어할 경우 출력변동률에 있어서는 현격한 차이를 보이면서 기존설비가 3% 전후인데 비해 4~5%의 우수한 성능을 보여주는 것을 알 수 있다. 이러한 성능을 보이는 데 있어서의 문제는 온도와 압력을 얼마만큼 안정적으로 제어할 수 있는 가이다. 주증기 온도 및 재열증기 온도에 있어서는 기존 500MW 표준석탄화력보다 용량이 두배 정도 되는 발전소를 제어하면서도 차세대 화력발전소의 제어성능기준을 만족함은 물론 제한범위가 더 적은 500MW 표준석탄화력의 기준을 만족함으로써 우수한 제어결과를 보여주는 것을 알 수 있다. 압력에 있어서는 고급공정제어 모드에서 더 많은 변화를 보여주고 있으나 분당 변화율이 급격하지 않기 때문에 발전소 안정운전에 저해가 되지 않으며 또한 그 변화폭이 500MW 표준석탄화력의 기준인 약 15~22kg/cm에 못 미치는 안정된 값을 보여줌으로써 충분히 좋은 결과를 보여주었다.

3. 결 론

이 논문에서는 앞으로 건설할 차세대 대용량 화력발전소를 제어할 로직에 대한 모의시험 및 고급공정제어기를 적용한 결과를 기록하였다. 기존보다 두배 정도 용량이 증가한 발전소를 제어하기 위해서는 기존의 제어방식으로는 성능을 보장할 수 없다는 것을 알 수 있었으며, 또한 기존발전소를 따라가기 어렵다는 것도 알 수 있었다. 이러한 상황을 극복하고 우수한 성능을 발휘하기 위해 고급공정제어기를 적용했으며, 여러번에 걸친 튜닝과 로직 수정, 모델 수정 등을 통해 온도와 압력을 기존 표준석탄화력발전소만큼 안정적으로 유지하면서 발전소의 최종 출력인 발전기 출력을 효과적으로 제어할 수 있는 제어로직을 구현하게 되었다. 이미 설계된 주기기 자료에 기반한 응답특성을 얻도록 튜닝한 결과로부터 운전 데이터를 취득하였다. 그 결과를 이용하여 고급공정제어기를 모델링하였으며, 그 응답특성이 기존 500MW 표준석탄화력발전소와 차세대 화력발전 시험레이터의 협조제어 모드에서의 결과보다 더 좋은 시험결과를 보여주었다. 모델링 결과를 이용한 부하시험과 튜닝을 통해 각종 전달함수와 파라미터 변수를 최적의 응답 상태로 조정하고, 실제 적용가능성을 확인하였다.

[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