

1000MW 보일러 프로세스의 모델링과 데이터 추출 및 시뮬레이션

박두용
전력연구원

Simulation and Data Sampling Modelling for 1000MW Boiler Process

Doo-yong Park
KEPRI (Korea Electric Power Research Institute)

Abstract - Maximum power consumption was up to 6,228kW in the summer of 2007 due to steady development of industry as well as increased demand of individual. Twenty Fossil-Fired Thermal Power Plant for 500MW were underconstructed at present. KEPRI(Korea Electric Power Research Institute) manage 'Development of Advanced Fossil-Fired Thermal Power Generation System' project to construct high efficient power plant of 1000MW capacity for preparing increased demand of power.

Design of control logic and data sampling were explained and high efficient control logic was simulated in detail in 'The Development of Next Generation Power Plant Instrument and Control System' (sub-project of 'Development of Advanced Fossil-Fired Thermal Power Generation System' project).

1. 서 론

산업의 발전과 개인의 편리한 에너지 사용량의 꾸준한 증가로 2007년 하계기간에 최대전력수요도 6,228만 kW에 달하였다. 국내 표준화력발전소는 500MW용량으로 20여기가 건설되어 운영중이며, 꾸준히 증가하는 전력수요량에 대비하여 고효율 대용량인 1,000MW 용량의 발전소 건설기술을 목표로 "차세대 화력발전기술 개발" 연구과제를 전력연구원 이 총괄기관으로 수행중에 있으며, 세부과제인 "차세대 화력발전 제어계통 설계기술 개발" 과제로 연구하고 있는 제어조직의 설계와 시뮬레이션을 통하여 데이터를 샘플링하고 제어기를 설계한 내용을 설명하고자 한다.

2. 본 론

USC 보일러 제어는 운전원이 연속적으로 발전소를 운전함에 있어서 모든 운전 조건하에서 안전하고 신뢰성 있으며, 발전소의 경제적인 운영을 목표로 설계한다. 또한 초초임계압, 판류형 변압 운전용 보일러로서 기저부하 운전 및 부하추종 기능을 동시에 가지는 자동운전이 수행되도록 설계한다. USC 제어시스템은 25% 이상에서 전자동운전이 가능한 제어조직이 필요하다. 이것은 대단히 어려운 목표인데 일부 제어 Loop는 저부하에서 자동제어범위 밖에 있기 때문이다. 과거에 이러한 Loop는 수동 Mode로 전환해야 했지만 현대의 Digital 제어에서는 프로그램 제어와 Interlock으로 이러한 것을 전자동 운전 범위에서 커버할 수 있다.

자동제어시스템에서 중요한 다른 요소의 하나는 운전의 편의성이다. 운전의 편의성에서 가장 먼저 다루어지는 것은 HMI로서 USC Control에서도 여전히 높은 중요성으로 설계될 예정이다. 또 다른 하나는 운전 Mode로서, 자동/수동제어 Mode 이외에도 보다 상위의 레벨에서 그룹제어를 수행하는 것인데 보조기의 Group Control과 Unit의 자동 기동/정지 (APS: Automatic Plant Start/ Stop Control)를 통하여 Plant 전자동화(Total Plant Automation)와 증기 온도 제어부분에서는 다변수제어 (MIMO: Multi-input, Multi- Output)를 지원하는 MPC(Model based Predictive Control)를 적용하는 전략을 사용하여 증기온도의 제어성능 향상을 도모한다.

2.1 모델기반 예측제어기 기본 설계

1000MW급 보일러 제어를 목표로 보일러의 설계데이터를 반영한 제어대상물 모델링하였다. 실제 USC급 보일러 모델이 완전히 확정되지 않았지만 설계 데이터가 많이 반영된 APESS USC 보일러 모델을 대상으로 선정하여 향후 USC 보일러 설치가 완료후 적용가능한 프로세스 모델링 알고리즘을 개발하였다.

2.1.1 보일러 프로세스 모델링

대용량 발전소는 ADS지령이나 운전원이 지령하는 ULD에 의해 발전소의 최종 출력부하가 결정된다. 발전소의 단위기기들은 간단한 열역학적 모델로 표현이 가능하나, 전체 보일러 모델은 상당히 복잡한 MIMO시스템이다. 즉 단위기기들의 동적거동은 고차의 비선형 미분방정식으로 표현되며, 상호 많은 비선형적 상관관계를 지니고 있다. 이는 특정 단위기기의 비선형성 반영뿐만 아니라, 상호 연계되어 있는 기기들간의 관계까지도 모델링 범위도 포함시켰다. 아래 그림은 보일러 전체를 나타내었다. USC급 보일러 모델링을 위해 4개의 프로세스(Air/Flue gas, Pulverizer, Water/ Steam, Turbine/Generator)로 구분하여 표현하였다. 각각의 프로세스를 보다 세분화하여 총 19개의 서브시스템으로 나누고 신경망 알고리즘을 이용하여 모델링하였다.

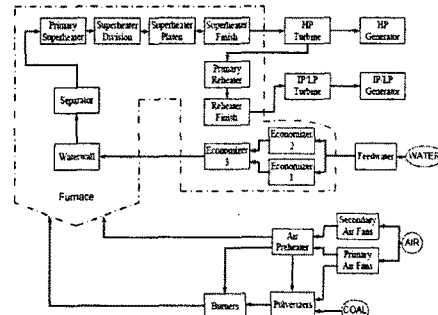


그림 1. 1000MW급 발전소 모델링 서브시스템

2.1.1.1 물/증기 모델

수벽내 물과 증기의 분포는 화로에서 공급되는 열에너지에 의존한다. 판류형 보일러는 수관벽의 출구증기는 기수분리기를 거쳐 과열기 서브시스템으로 공급되는데, 여기에는 총 8개의 열교환기가 있다. 즉, 절탄기1, 절탄기2, 수관벽, 1차 과열기, 2차 과열기, 3차 과열기, 1차 재열기, 2차 재열기이다. 본 연구에서는 각각의 열교환기는 엔탈피와 온도, 압력, 유량의 입출력으로 모델링 된다. 특히, 과열기와 재열기 서브시스템은 유체온도 제어를 위한 제어입력을 각 1개씩 가진다. 아래 그림은 열교환기에 대한 일반적인 구조를 나타내었다.

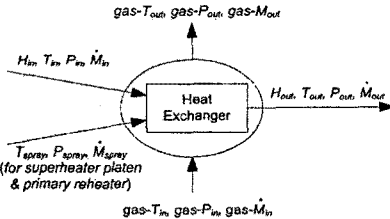


그림 2. 열교환기 일반적인 모델링

2.1.1.2 공기/배기가스 모델

공기/배기가스 모델의 주요역할은 출력요구에 대한 화로압력을 유지하기 위한 배기가스 배출과 공기 공급이다. 유도된 draft fan은 공기 예열기를 거쳐 화로로부터 고온의 배기가스를 스택으로 배출시킨다. 게다가 고온의 공기가 화로와 미분기에 공급된다. 공기/배기가스 모델은 온도, 압력, 유량으로 모델링되며, 1차공기 서브시스템은 팬압력 배인을 위한 제어입력을 가진다. Forced draft fan과 induced draft fan은 각각 공기와 배기가스 통과를 위한 블레이드 피치에 대한 제어입력을 가진다. 아래 그림은 공기/배기가스 시스템의 서브시스템을 나타내었으며, 공기 서브시스템은 1차공기, forced draft fan, induced draft fan, 공기 예열기로 구성되어 있다.

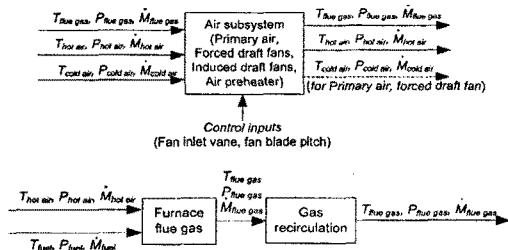


그림 3. 보일러 내부 단위기 모델링과 제어입력

2.1.1.3 터빈/발전기 모델

터빈발전기는 열에너지를 전기적 에너지로 변환시키는 역할을 하며, 본 연구에서는 중, 저압터빈을 일체화시켜 모델링하였다. 각 터빈은 제어밸브

(조속기, 중간밸브)에 따른 제어입력을 가지며, 아래 그림과 같다.

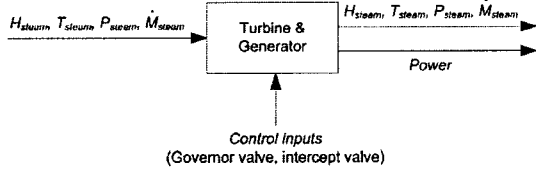


그림 4. 터빈/발전기 모델링

2.2 APESS S/W로 보일러 데이터 추출

보일러 프로세스 모델을 신경망을 통해 학습시키기 위한 기초 데이터로써 APESS내 모델의 출력값을 추출하였으며, 추출하기 위한 도면내 변수는 실 적용시 수정이 가능하다.

2.2.1 신경망 학습과 시뮬레이션 결과

각각의 서브시스템을 표현하기 위한 신경망은 각기 다른수의 은닉층 뉴런을 통해 여러 차례 학습을 수행하게 된다. 신경망 출력과 목표값의 Mean Squared Error방법을 사용하는 학습 비용함수는 각기 다른 수의 뉴런들과 상호비교후 최적으로 결정된다. 뉴런의 최적개수는 입, 출력 데이터패턴과 함께 각 서브시스템의 입, 출력 개수에 많이 의존한다. 그러므로, 학습성능을 향상시키기 위해서는 적은 입, 출력 개수를 갖는 서브시스템은 많은 수의 뉴런을 가지게 된다.

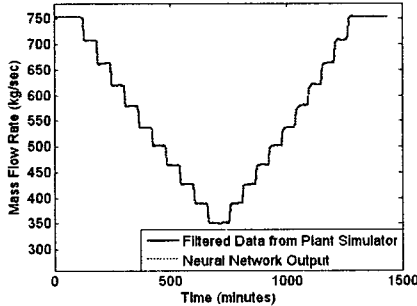


그림 5. 최종 과열기 Mass Flow Rate 신경망 학습결과

이렇게 선정된 신경망 구조를 통해 학습시키기 위해서는 많은 계산시간이 필요하므로 2개 파트로 분리하여 학습시켰다. 신경망 학습을 위한 epoch 수는 75로 선정하여 수행하였는데, 평균 25epoch부근에서 10-6이하의 에러를 나타내며 학습이 양호하게 수행되었다.

각각의 서브시스템을 학습시키고 난 후, 보일러 전체의 동적거동을 표현하기 위해 세부모델들을 통합해야 한다. 이렇게 만들어진 모델을 NNCM (Neural Network Combined Model)이라고 하며, NNCM에는 Primary/Secondary Air와 Feedwater는 각각의 서브시스템과 상호연결이 되지 않았다. 이는 다른 서브시스템으로부터의 영향이 크지 않기 때문이다. 아래 그림은 통합프로세스 모델상의 서브시스템 출력과 실제값과의 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

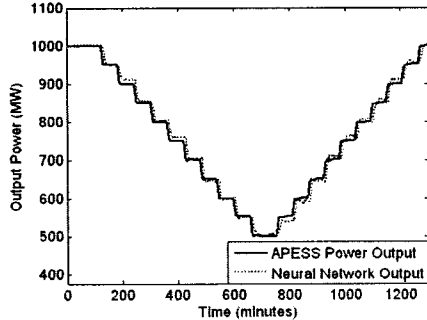


그림 6. 발전출력

2.3 모델기반 예측제어기 설계

신경망을 통해 얻어진 제어대상, 즉 USC 보일러에 대한 운전중의 동적 거동을 예측하여 1Step 앞선 제어입력을 구하는 모델기반 예측제어기를 기본설계하였다. 모델의 크기에 따른 계산시간이 과다함으로써 발생하는 실 적용시 문제점을 개발단계에서 방지하고자 오프라인 학습기능을 추가하였으며, 계산시간 단축을 위한 많은 기술이 사용되었다.

2.3.1 기본설계

MPOC(Modified Predictive Optimal Controller)는 단위제어기로서의 성능

은 단일 입, 출력방식의 PID 제어기보다 우수하다. 그러므로, MPOC와 Reference Gov.를 이용하여 각 요구치에 대한 최적값의 영역을 탐색하고, 각각의 구속조건에 대한 비용함수를 최소화 하는 목표값을 각 로직에 전달하기 위한 알고리즘을 개발이 필요하다. 목표발전량을 나타내는 ULD가 Reference Gov.의 입력으로 들어가고, 내부의 PSO(Particle Swarm Optimization)기법에 의한 최적해 영역을 탐색하여 유도된 적절한 주증기온도, 압력값의 설정값이 앞먹임, 뒤먹임제어기의 입력으로 전달되어 발전소의 운전을 담당하게 된다. 발전소의 출력은 뒤먹임 제어기로 다시 입력되어 부하변동을 야기하는 출력변수들을 정규화 시키고, 보상하여 발전소로 제어력되는 구조이다.

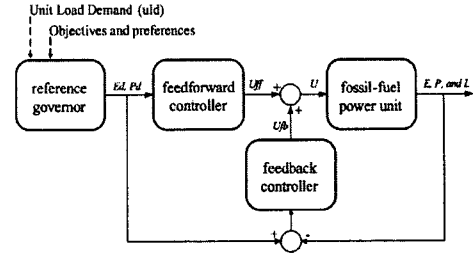


그림 7. 모델기반 예측제어기 설계 개념도

2.4 JTOPMERET를 이용한 모델 검증

보일러 모델은 보일러 설계실에서 제공된 GA 및 성능설계 자료를 기준으로 JADE의 JTopmeret 를 이용하여 모델링 하였다. 보일러 모델을 구성하는 상세제통은 아래와 같다.

- Spiral/vertical wall water tubes
- Superheaters and sprays
- Water separators and drain tank
- Reheaters (flue gas side)
- Economizers
- Boiler recirculation
- Air preheaters (flue gas side)
- FD fans

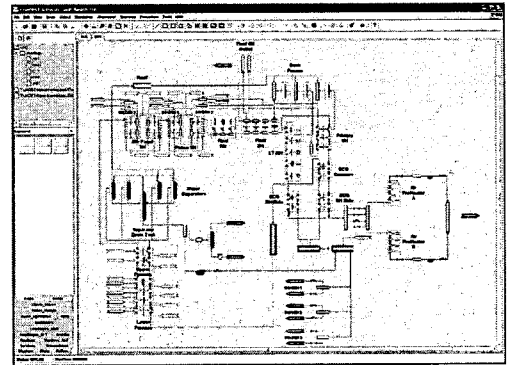


그림 8. 보일러 프로세스 모델검증

8번 급수가열기 후단에서 시작하는 보일러 프로세스의 급수는 절단기(3개의 요소로 구성됨)를 지나 4개의 열슬리브를 통한 열전달이 일어나는 수벽(4개)과 과잉공기부의 열슬리브에 의한 수벽(2개)으로 전달된다. 기수분리기를 지난 급수는 Roof와 후부 전열면을 통과하고 1차 과열기(Primary Super Heater), 2차 과열기(Pendent SH), 3차 과열기(Platen SH), 4차 과열기(Final SH)를 지나면서 265Bar 및 623℃의 증기를 발생한다. 화로에서 발생한 연소열은 열 슬리브를 통하여 증발기와 열전달이 이루어진다. 보일러 출구에 위치하는 가스덤퍼를 통과한 연소가스는 공기예열기를 지나 IDF (Induced Draft)팬을 거쳐 대기로 방출된다.

3. 결 론

“차세대 화력발전 기술개발”은 초초임계압 관류보일러로 출력 1000 MW, 과열기 온도 610℃, 재열기 온도 621℃, 압력 265kg/cm²로 출력 및 효율이 기존 초임계압보다 높게 연구되고 있으며 향후 발전설비에 실증적용을 목표로 연구 중에 있다. 관류보일러는 드림이 없으므로 증발부 내부의 증발량로 지점이 변화한다. 보일러 증발량은 드림형에서는 연료 투입량에 따라 결정되었으나 관류형은 급수유량에 따라 결정된다. 만약 급수유량을 일정하게 하고 연료 투입량을 증가시키면 포화영역이 이동하여 과열부의 길이가 상대적으로 길어져 보일러 출구의 증기온도가 상승한다. 즉 연료투입량의 변화는 증발량에 영향을 주지 않는다. 아직 국내에 적용실적이 없는 1000MW급 보일러의 설계와 이를 운용할 제어로직의 설계는 많은 기술적인 어려움이 있다. 따라서 보일러 프로세스의 모델링과 데이터를 추출하고 시뮬레이션으로 검증하는 방법으로 제어로직을 설계하고 검증하고 있으며, 과제 종료시까지 시험과 시뮬레이션 검증작업을 계속 수행하고 있다.

[참고 문헌]

- [1] 김호열, 박두용, “차세대 제어계통 설계기술개발 진도보고서”, 2007