

발전용 최적 Soot Blowing 시스템 개발

김성호* · 정해원* · 육심균*

The Development of Optimal Soot Blowing System for Power Plant

Sung Ho Kim, Hae Won Jung and Sim Kyun Yook

Key Words : soot blower(슈트 블로어), optimal algorithm(최적 알고리즘), ANFIS(adaptive neural-network fuzzy inference system, 적응 신경망 퍼지 추론 시스템)

Abstract

SBOS(Soot blower Optimum System) analyzes the accumulated fouling rate of a coal-fired boiler plant at short intervals, compares it with a reference data, and determines the optimal time of soot blowing. In this paper, ANFIS algorithm which is an optimal algorithm to detect variation of boiler performance with time, updating the reference data and to eliminate the effects of noise in field signal is used to clean heating surface and to reduce steam needed to blow the soot.

1. 서론

석탄을 연료로 사용하는 보일러의 경우, 보일러 가동이 시간이 지남에 따라 석탄의 연소 후 발생하는 재가 보일러 튜브 표면에 점진적으로 침착되어 열전달을 저하시키게 된다. 그로 인하여 보일러 전체 효율과 부하율이 감소하는 결과를 초래한다. 이러한 현상을 방지하기 위하여 보일러 내부의 증기를 이용해 재를 주기적으로 제거하여 보일러 성능을 일정하게 유지하며 운전하고 있으나 Soot Blower의 증기가 보일러 내부로 Blowing 될 때 일시적으로 보일러 효율의 감소를 초래한다.

현재 발전소에서 침착된 재를 제거 방법은 침착된 재의 양이나 Soot Blower 운전에 사용되는 증기의 영향을 고려하지 않고, 정해진 시간에 따라서 보일러 수벽과 튜브 번들에 일괄적으로 Soot Blower를 작동시키는 방법을 사용하고 있다. 이 방법은 보일

러의 효율이 전혀 고려되지 않은 상황에서 재를 제거하기 위한 증기가 과도하게 소비기 때문에 일정 시간동안 보일러 온도와 효율이 감소되는 문제점을 초래한다. 따라서 침착된 재로 인한 보일러 손실과 Soot Blower 운전에 따른 보일러 손실을 최소화하기 위해서는 각 열교환기의 오염된 그룹을 예측하고, 그 결과에 의해 결정된 그룹의 Soot Blower만을 운전하는 Soot Blower 제어 알고리즘의 개발이 필요하다. Soot Blower를 최적으로 운전하기 위하여 보일러의 상태 정보와 플랜트 필드 신호들을 받아들여 보일러 성능 기준 데이터베이스와 비교하여 보일러 내부에 침착된 재의 정도를 예측하고, 보일러 성능 기준 데이터베이스의 운전 결정 기준값에 따라 최적의 동작 명령을 결정하는 알고리즘을 개발하였다.

2. Optimal Soot Blowing System

2.1 Soot Blowing System

Soot Blower는 크게 Wall Blower와 Long Blower로 나누어진다. 전자의 경우 보일러

* 두산중공업 기술연구원 시스템진단/제어연구팀

Furnace 에 위치하여 Furnace Water Wall 부분에 침착된 재를 제거하는데 사용되고, 후자의 경우 과열기, 재열기, 절탄기 그리고 공기에열기 등에 위치하여 튜브 번들에 침착된 soot 를 제거하는데 사용된다. 본 시스템은 태안 화력 발전소 #5/6 의 Soot Blower 에 적용되었다. 태안 화력 발전소 #5/6 보일러는 286kg/cm²g 의 증기를 시간당 1,475,600kg 발생하는 초임계 압 관류형 석탄연소형 보일러이다. Fig.1 은 태안 화력 발전소 #5/6 에 설치된 Soot Blower 의 구성을 나타낸다.

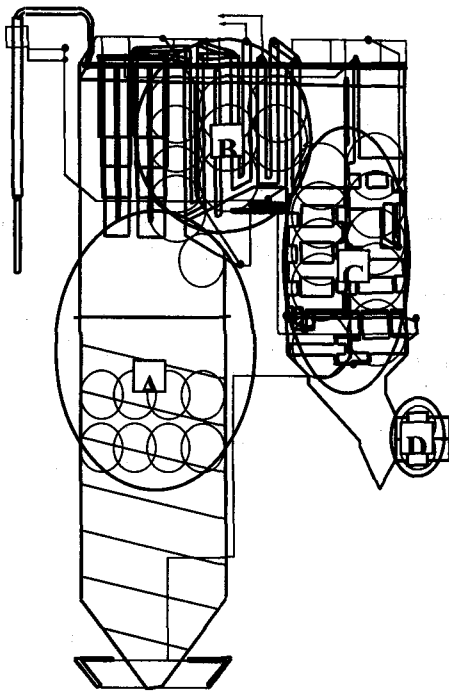


Fig. 1 Overview of Soot Blower of Taean PP

Table. 1 Specification of Soot Blower of Taean PP

Group	No of SB	Location
A	34, Short	Furnace Water wall
B	18, Long	Platen SH, FSH,FRH
C	20, Long	Primary SH, Economizer
D	4, Long	Gas Air Heater

Soot Blower 는 A, B, C 그리고 D 의 4 개 그룹으로 나누어져 운전되고, 각 그룹의 위치와 운전되는 Soot Blower 개수를 Table.1 에 나타내었다.

상기 보일러의 경우 Furnace 내부와 Platen Super Heater, Final Super Heater 의 경우 Slagging 에 의해서, Final Reheater, Primary Super Heater, Primary Reheater, Economizer 의 경우 Fouling 으로 인해 Soot 가 침착된다.

2.2 Optimal Soot Blowing System

Optimal Soot Blowing System 은 보일러 내부를 4 개의 그룹으로 나누고, 각 그룹의 보일러 내부 상태값을 통하여 오염정도를 판단하여 Soot Blower 의 운전 시기를 결정한다. 다음을 오염도를 파악하는데 필요로 되는 주요 요소들이다.

- Furnace exit gas temperature
- 과열기/재열기 입/출구 온도/압력, 증기량
- 절탄기 입/출구 온도/압력, 증기량
- Gas Air Heater 입/출구 온도
- 연료성분 / 과잉 공기량

2.2.1 하드웨어 구성 및 운전 모드

Optimal Soot Blowing System 은 Fig.2 와 같이 구성되어 있다. 보일러 오염도 파악을 위해 필요한 필드 신호들은 DCS(distributed control system)를 통하여 입력되고, Soot Blower 의 운전 상태 파악을 위해 필요한 신호들은 Soot Blower 제어 PLC 에서 DCS 를 거쳐 입력된다. DCS 와 Optimal Soot Blowing System 은 RS-422 인터페이스로 연결된다.

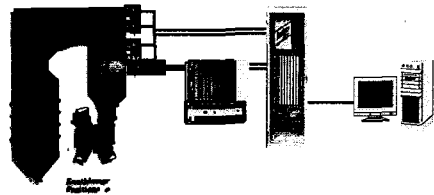


Fig. 2 Configuration of Optimal Soot Blowing System

Optimal Soot Blowing System 은 Fig.3 과 같이 두 가지 모드로 운전된다.

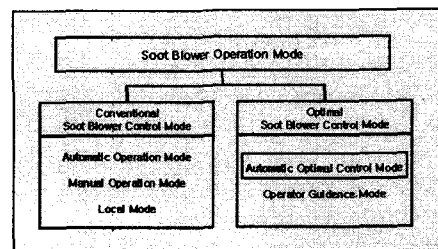


Fig. 3 Soot Blower Operation mode

기존의 Soot Blower 운전을 포함하는 Conventional 제어 모드와 Optimal Soot Blowing 운전을 포함하는 Optimal 제어모드로 나누어져 운전된다. Soot Blower 는 운전자가 보일러 상태 및 운전 환경에 따라 DCS 에서 선택적으로 운전을 하게 된다.

2.2.2 소프트웨어 구조

DCS 로 부터 입력된 신호들은 HMI(Human Machine Interface, InTouch) 시스템을 통하여 운전자를 위해 모니터링 되고, 동시에 본 시스템에 내장된 데이터베이스(MS ACCESS)에 저장된다. Optimal Soot Blowing 시스템 제어 프로그램은 데이터베이스로부터 이러한 신호들을 받아, 프로그램 내부에 새로운 데이터베이스(Core DataBase)를 생성하고 성능 계산을 실행하여 각 그룹별 오염도를 판단한다. 오염도 계산 후 soot blowing 실시 여부가 판정되면, 아래와 같은 보일러 상태에 따른 Soot Blower 운전 허용 조건을 확인하게 된다.

- 보일러 부하 30%NR 이상 : 허용
- Trottle Pressure 83 Kg/cm²g 이상 : 허용
- Startup/ Shutdown 동작 : 불가
- Runback 동작 : 불가
- MFT(Master Fuel Trip), FCB(Fast Cutback) : 불가
- Mill 운전 대수가 변한 경우 : 불가
- Soot Blow Steam Pressure Trouble : 불가

상기와 같은 조건을 만족하면 soot blowing 실시 명령을 데이터베이스에 기록하고 HMI 를 통하여 DCS 로 전달한다. Fig.4는 Optimal Soot Blowing System 의 Data Flow 를 나타낸다.

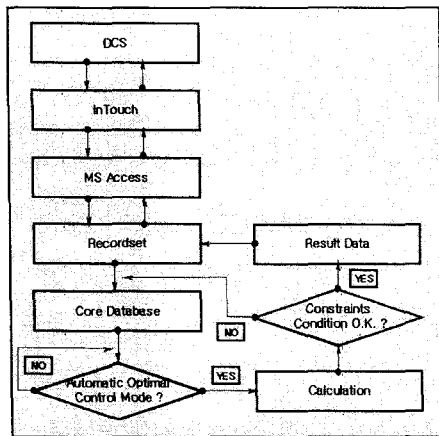


Fig. 4 Data flow of Optimal Soot Blowing System

3. Optimal Soot Blowing 제어프로그램

3.1 제어프로그램

제어프로그램은 C++ Language 로 작성되어 Soot Blowing System 이 Automatic Optimal Mode로 선택 되어질 경우에 동작하도록 프로그램 되어져 있다. 그리고 각 그룹의 조건에 따라 개별적으로 제어하도록 구성되어져 있으며, Fig.5 처럼 데이터베이스와 연결시켜주는 부분과 각 그룹의 오염도를 산출하는 부분으로 나누어진다. Soot Blower 운전 허용 조건을 확인 후 오염도 산출 결과에 따라 순차적으로 해당 그룹의 Soot Blower 가 운전될 수 있도록 구성하였으며, 각 그룹의 운전 순서는 A, B, C 그리고 D 의 순서로 진행된다.

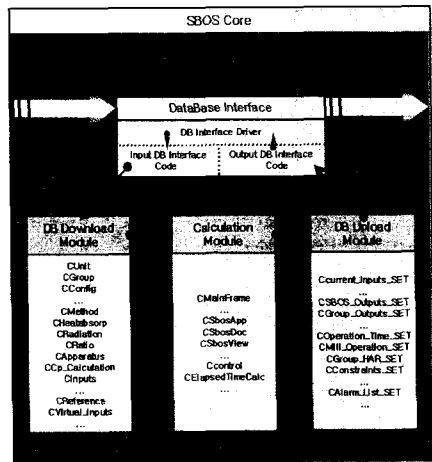


Fig. 5 Control Core Flow

3.2 그룹별 오염도 산출 기준

오염도는 각 그룹의 보일러 내부 상태에 따라 다음과 같이 3 가지로 분류한다.

- 정상상태
- 오염도 100% 상태
- 오염도 0% 상태

오염도 판정기준이 되는 요소들은 다음과 같다.

- A 그룹
 - Nose 출구 포화온도(Thnose)
 - 화로 수열 비율
 - FEGT(furnace exit gas temperature)
- B 그룹
 - Final Reheater Inlet Gas Temp

- 화로수열량에 대한 B 그룹수열비율
- C 그룹
- Economizer 수열비율
- D 그룹
- Gas Air Heater Efficiency

오염도 판단에 큰 영향을 미치는 FEGT 값의 경우 펄드로부터 온도를 측정하는 방법[2]과 성능계산을 통하여 예측하는 두가지의 방법이 있다. 본 논문에서는 온도 측정 센서 설치등의 어려움으로 후자를 이용하여 추정하였다.

3.3 ANFIS

플랜트 펄드 신호에는 무시할 수 없는 노이즈가 존재하게 되고 이로 인해서 플랜트의 상태가 boundary를 벗어나지 않은 때에도 blowing command가 발생할 수 있다. 이러한 영향을 없애기 위해서 ANFIS(adaptive neural-network fuzzy inference system)을 blowing command 결정 알고리즘에 적용하였다. Boundary를 갱신하는 알고리즘은 각 그룹의 특성과 플랜트로부터 취득되는 데이터의 종류등을 고려하여 보일러의 출구 온도를 이용하는 방법과 각 그룹의 온도나 열흡수율의 변화폭을 최대화시키는 방법을 개발하였다.

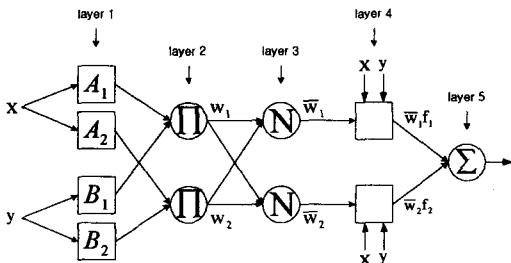


Fig. 6 Equivalent ANFIS (type-3)

Fig.6은 입력이 두개인 type-3 ANFIS이다. 각 입력에는 소속 함수가 연관되어 있고 따라서 Input Space는 퍼지 Subspace로 나누어져 있다. 각각의 Subspace는 퍼지 if-then rule로 표현되어있다.

4. 모사

4.1 모델링

제한한 방법의 신뢰성을 검증하기 위해 Tnose, FEGT에 대한 2가지 모델을 선정하여 모사하였으

며 soot 침착 주기는 침착시간 12시간과 blowing 시간 0.33시간을 고려하여 12.33시간으로 가정하였다.

4.1.1 Tnose 모델

Fig.7은 A 그룹의 첫 번째 기준인 Tnose의 모델 응답을 나타낸다. Soot가 시간이 지남에 따라 침착되는 상태에서는 설계 데이터베이스에서 Blowing 후의 값인 425.2°C에서 점차적으로 감소하여, 재 침착 주기인 12시간 후에 blowing 전의 값인 416.6°C로 감소하는 경향을 따르도록 하였다. 그리고, 운전 명령이 실행되면, A 그룹의 Blowing 주기인 0.33시간동안 Blowing 전의 값인 416.6°C로부터 Blowing 후의 값인 425.2°C로 급격히 변하는 경향을 따르도록 하였다. 여기에 노이즈가 첨가되어 Fig.7의 특성을 지니도록 모델링을 하였다.

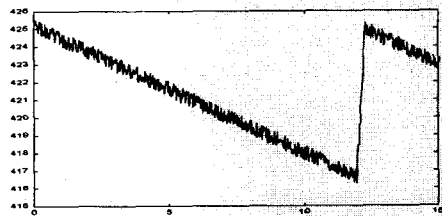


Fig. 7 Characteristic of Group A Tnose Model

4.1.2 FEGT 모델

Fig.8은 재가 침착됨에 따라 값이 증가하는 A 그룹 FEGT가 Blowing 후의 값인 1104.9°C로부터 점차 증가하기 시작하여 soot 침착 주기인 12시간 후에 Blowing 전의 값인 1204.9°C로 변하는 경향을 나타낸다. Blowing 상태에서는 Blowing 주기인 0.33시간동안 1204.9°C에서 1104.9°C로 변하는 경향을 따르도록 모델링을 하였다.

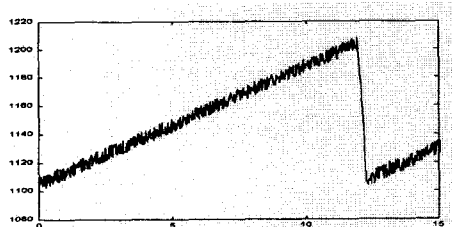


Fig. 8 Characteristic of Group A FEGT Model

4.2 모사 방법에 따른 결과

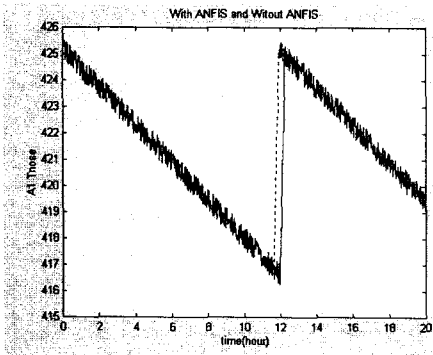


Fig. 9 Simulation Result of Those of Group A

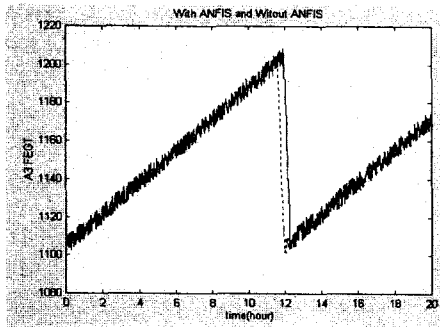


Fig. 10 Simulation Result of FEGT of Group A

Fig.9에서 A 그룹 Those에 대해 ANFIS를 사용하여 Blowing을 결정한 경우와 사용하지 않고 boundary를 넘어가면 Blowing을 하도록 한 경우를 비교하였다, Fig.10은 A 그룹 FEGT에 대해 Fig.9와 같은 조건에서 비교한 것이다. ANFIS를 적용하였을 경우가 실선으로, ANFIS를 적용하지 않고 데이터베이스의 Boundary를 넘어가면 무조건 Blowing을 시킨 경우가 점선으로 나타내어진 것이다. Fig.9와 Fig.10에서 볼 수 있듯이 ANFIS를 사용한 경우가 그렇지 않은 경우보다 더 늦게 Blowing을 수행하고 있음을 알 수 있다. ANFIS를 처음에 학습시킬 때, 노이즈의 영향을 줄일 수 있도록 학습을 시켰기 때문이다. 즉, A 그룹의 경우 세 개의 기준이 있는데 이중에서 두 개의 기준은 Boundary에서 떨어져 있지만, 하나의 기준에 노이즈가 작용하여 Boundary를 넘기게 되면, ANFIS를 사용하지 않은 경우에는 Blowing을 해 버리기 때문에 적당한 Blowing이 이루어지지 않았다. 그러나 ANFIS를 사용한 경우, 이러한 상황에서 Blowing이 이루어지지 않도록 학습을 시켰기 때

문에 운전 명령을 보류한 후 세 개의 데이터를 종합하여 Blowing 경계를 넘었다고 판단이 되면 운전 명령을 보내게 되는 것이다.

B 그룹은 모든 설계 데이터베이스가 A 그룹의 FEGT의 값에 따라서 변하게 된다. 그래서 A 그룹의 FEGT가 변함에 따른 boundary 계산과 ANFIS를 사용한 경우와 이러한 영향을 고려하지 않은 경우의 비교를 Fig.11과 Fig.12에 나타내었다. FEGT의 변화에 따른 데이터베이스의 변화를 고려한 경우에는 규칙적이지 않고, A 그룹의 상태와 온도의 변화에 따라 Blowing 시기가 결정되는 것을 볼 수 있다.

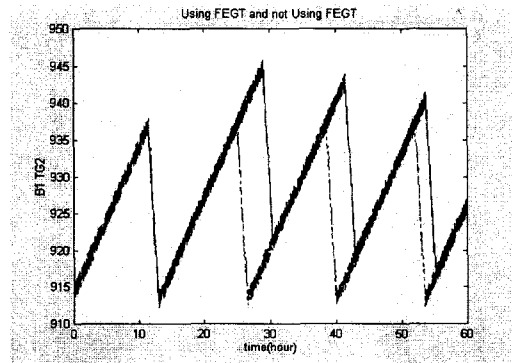


Fig. 11 Simulation Result of TG2 of Group B by FEGT

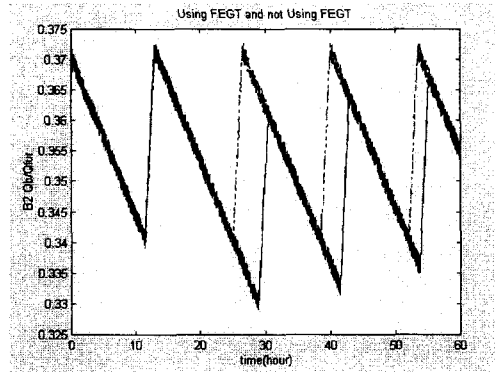


Fig. 12 Simulation Result of Duty of Group B by FEGT

5. 결론

보일러의 효율을 높이기 위해서 보일러 내부 상태 정보와 필드 신호들을 취득하여 설계 데이터베이스를 기본으로 한 운전 명령 결정 알고리즘을 개발하였다. 설계 데이터베이스에서 정해진 운전

명령 결정 Boundary를 초기에 받아들여서 이를 이용하여 Blowing 가부를 결정하도록 하였다. 하지만, 플랜트 필드신호에 포함된 노이즈 영향을 없애기 위해서 ANFIS을 운전 명령 결정 알고리즘에 적용하였다. ANFIS의 자기학습기능을 이용하여 Off-line으로 플랜트에서 발생할 수 있는 많은 경우에 대해서 학습을 시켜, 학습된 결과를 시뮬레이션에 적용하여 타당성을 검증하였다.

또한, 시간이 지남에 따라 계속된 운전으로 인한 플랜트 피로의 증가, 부식등으로 인한 보일러 노후화로, 설계 및 초기 상태의 보일러 성능 데이터베이스가 실제 플랜트의 특성 많은 차이를 보일 것이라 예상되기 때문에 운전 명령 결정 boundary를 갱신하는 알고리즘을 개발하여, 이러한 부분에 대해서 능동적으로 대처하도록 하였다. Boundary를 갱신하는 알고리즘은 각 그룹의 특성과 플랜트로부터 얻을 수 있는 데이터의 종류를 고려하여 두 가지를 개발하였다.

- 보일러의 출구 온도를 이용하는 방법으로 전체 보일러의 효율의 변화를 최대화시키는 방향으로 갱신하는 알고리즘

- 각 그룹의 온도나 열흡수율의 변화폭을 최대화시키는 알고리즘

첫 번째 방법은 보일러의 출구와 가까운 그룹에 적용시키는 것은 신뢰성이 높지만, 상대적으로 화로에 가까운 그룹의 운전 명령 결정 boundary의 갱신에 적용하기에는 타당성이 많이 떨어진다. 그래서, Blowing을 시킴 후의 상승 또는 감소하는 각 그룹의 온도나 열흡수율의 센서값을 이용하는 수밖에 없다. 이 방법은 Blowing이 끝나는 시점이 각 그룹의 청정 상태에 접근하도록 boundary를 갱신시켜주는 방법이다.

개발된 알고리즘을 실제 플랜트에 적용하기 전에 시뮬레이션을 이용하여 타당성을 검토하였다. 플랜트 모델은 실제 필드의 데이터가 아직 입수되지 않은 관계로, 보일러 설계 데이터베이스를 이용하여 미리 정해진 재 침착 주기동안 서서히 각 그룹의 온도나 열흡수율이 변하다가 Blowing을 시켜주면 각 그룹의 Blowing 주기동안 설계 데이터베이스에서 얻을 수 있는 차이만큼 변하도록 하였다. 실제 플랜트의 운전 시에는 화로의 온도제어가 계속 행하여지고 있고, 프로세스 응답의 비선형성, 각 그룹간의 상호 연관성 등의 영향으로 모사된 모델이 실제 플랜트의 특성을 충분히 반영하지 못한 것은 분명하다. 하지만, 개발된 알고리즘의 타당성과 개발한 프로그램의 검증으로는 충

분한 결과를 얻을 수 있었다. 실제로 플랜트에 적용시키기 전에 모사를 위한 모델을 실제 플랜트의 운전 데이터를 바탕으로 하여 재 수행하여 개발한 알고리즘과 프로그램의 검증이 요구된다.

참고문헌

- (1) Evans G. W., Karowski, "Application of fuzzy set methodologies in industrial Engineering", Amsterdam, Oxford, 1989
- (2) Zimmermann H. J. "Fuzzy Set Theory and its applications", Second Edition, 1991
- (3) "Sootblower Optimization and Control Using the BOILERWATCH-Acoustic Pyrometer" Scientific Engineering Instruments, Inc.
- (4) "CEOS" System Description. BERGMANN GmbH, 1995
- (5) T. Ohki. S. Ohishi, "Development of Adaptive Control System for Boilers Using Various Coal Type" IHI engineering Review, Apr. 1995