

석탄연소발전용 보일러 연료제어 알고리즘 고찰

김종안

한국전력공사 전력연구원

A study on the Fuel Control Algorithm for Coal Fired Boilers of Electric Power Plants

Jong-An Kim

Korea Electric Power Research Institute

Abstract - 보일러 연료제어의 근본 목적은 보일러 입력에너지와 출력 에너지 간의 평형을 유지하는 것이다. 보일러 출력에너지는 유출증기가 가지고 나가는 총 에너지에 해당하고, 입력에너지는 보일러에 공급되는 연료의 연소에 의해 발생하는 열 에너지에 해당한다. 보일러 연료의 공급과 연소제어에는 여러 가지 변수가 상존하고 있으며, 이 변수들의 영향을 잘 반영하여 필요한 연료량을 실시간으로 정확히 제어하는 것이 결코 쉬운과제가 아니다. 석탄연소발전소의 주연료는 당연히 석탄이며 석탄을 입자가 매우 적은 미분탄으로 가공해서 연소하는 '미분탄 연소방식'을 많이 사용한다. 석탄의 공급과 연소에 영향을 미치는 인자로는 도입 탄종 변화에 따른 발열량, 수분함유량, 기타 성분의 변화가 있으며, 미분기 특성 및 성능변화, 연소용 공기 공급상태 변동에 따른 연소상태 변화 등을 들 수 있다. 이 논문에서는 국내 석탄화력 발전소에서 가장 많이 사용하고 있는 전형적인 보일러 연료제어 전략과 알고리즘을 분석하였으며, 여기서 습득한 이론을 바탕으로 내년에는 실제 발전소에 적용할 연료제어로직을 설계할 예정이다.

1. 서 론

보일러 내 연료의 연소에 의해 발생하는 총 열량은 보일러 밖으로 유출되는 물질이 보유하는 총 열량과 일치한다. 보일러 연료제어계에도 물질과 에너지 보존의 법칙이 기본원리로 작용한다. 먼저, 에너지 보존 관점에서 입,출력 에너지 기본관계를 살펴본 다음, 연료제어에 사용되는 구체적인 알고리즘을 설명하고자 한다. 각 부분 별 제어로직의 기능을 통합하여 묶으면, 보일러 연료의 연소에 의해 발생하는 열에너지 양과 보일러에서 생산되어 외부에 공급되는 증기 열에너지 양이 실시간으로 균형을 이룰수 있도록 작용한다는 것을 확인할 수 있다.

2. 본 론

2.1 보일러 입력에너지와 출력에너지 관계

최근의 대형 발전용 보일러의 효율은 약90%정도이며, 연료 연소에 의해 발생하는 총 에너지의 90% 정도가 보일러의 수관 또는 수냉벽(Water-Wall Tube), 증기배관에 전달되고 약 10% 에너지는 외부에 배출되는 손실이 된다. 연료의 연소에 의해 발생하는 열에너지가 입력에너지에 해당되며, 보일러 내 연소에 의해 발생한 총 에너지 중 복사(Radiation) 에너지 형태로 보일러 수관에 전달되는 양이 가장 많고, 그 다음이 연소 가스가 증기관 또는 수관과 접촉하여 전도하는 에너지라고 알려져 있다.

연료 연소열이 보일러 내에서 복사에너지 형태로 전부 열교환이 이루어진다고 가정하면 다음 식(1)로 나타낼 수 있다.

$$A_w (\epsilon_f \sigma_0 T_f^4 - \epsilon_w \sigma_0 T_w^4) = \phi B_f (Q_c + Q_f - G_f) \quad (1)$$

여기서,

- A_w = 수냉벽 열교환 면적(the water-wall surface)
- ϵ_f = 화염의 에너지 방사도(emissivity of the flame)
- ϵ_w = 수냉벽의 에너지 흡수도(absorbivity of the water-wall surface)
- σ_0 = Stefan-Boltzmann constant, $5.67 \times 10^{-8} [W/m^2 \cdot K^4]$
- T_f = 화염의 온도[K]
- T_w = 수냉벽 표면온도[K]
- ϕ = 보일러 화로(Furnace) 효율
- B_f = 연료량[kg/초]
- Q_c = 보일러 화로 내에서 발생하는 열 에너지[kJ/kg]
- Q_f = 연료와 공기와 가지고 들어오는 열 에너지[kJ/kg]
- G_f = 보일러 배출 가스가 가지고 나가는 열 에너지[kJ/kg]

보일러 손실을 무시하면 열에너지 관계식을 다음과 같이 간단히 쓸 수 있다.

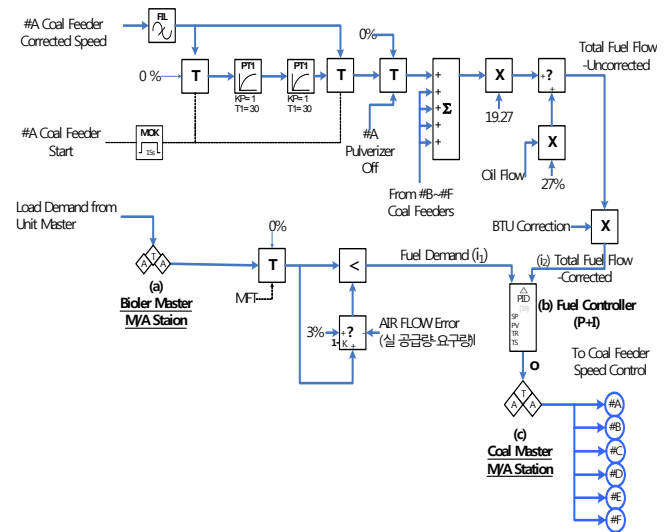
$$Q_c = Q_s + C_b \frac{dP_b}{dt} \quad (2)$$

여기서,

- Q_c = 보일러 화로 내에서 발생하는 열 에너지[kJ/kg]
- Q_s = 보일러에서 나가는 증기가 가지고 나가는 열량 [kJ/kg]
- C_b = 보일러 열축적 계수
- P_b = 보일러 내에 축적되는 에너지 량

2.2 연료 마스터(Coal Master)

발전소 출력설정 신호를 받아 보일러에 요구되는 연료량, 공기량, 급수량 기준신호를 결정하는 일은 보일러 마스터(Boiler Master)가 담당한다. 연료마스터(Coal Master)는 보일러 마스터로부터 연료 요구량 신호를 접수하여 실제 공급되는 연료량이 요구량에 일치시키도록하는 역할을 한다. 다음 그림1은 연료제어시스템의 신호의 흐름을 나타낸 것이다. Load Demand from Unit Master(그림1의 왼쪽 중간부분) 신호가 보일러 마스터를 통과하면 Boiler Fuel/Air Set Point로 되고, 이 신호를 바탕으로 Fuel Demand 신호가 만들어 지는데, 그 전에 Air Flow Cross Limiting (Air Flow Deviation=(Total Air Flow-Air Flow Demand)≤3%) 조건 검증을 거친다. 이는 연소에 필요한 공기량이 연료량 보다 적게되는 상황이 발생되지 않도록 하기 위함이다.



〈그림 1〉 연료제어 알고리즘 개요 및 Coal Master

그림1에서 Fuel Demand(i1)은 피드백 신호인 Total Fuel Flow-Corrected(i2)와 비교되어 양자 간의 차이가 (b) PI제어기 입력으로 들어가며, 이 차이(i1-i2)를 감소시키는 방향으로 PI제어기가 작용하게 된다. Total Fuel Flow-Corrected 신호는 Total Fuel Flow-Uncorrected 신호에 연료의 발열량 보정을 곱한 값이다.

2.3 Total Fuel Flow-Uncorrected

급탄기(Coal Feeder) 회전수에 의해 산출된 연료량을 Feeder Correction Speed라고 하며, 운전되는 모든 급탄기(보통 6대, #A~#F)의 Correction Speed를 합한 후, 이 값에 특정 상수(태안화력#1에서는 19.27%)를 곱하여 Total Coal Flow를 산출한다. Warm up Oil Flow에 특정 상수(태안#1, 27%)를 곱한 값을 Total Coal Flow와 합하여 Total Fuel Flow-Uncorrected 신호를 만든다. Fuel Flow-Uncorrected 신호에 발열량(BTU) 보정을 하면 Total Fuel Flow-Corrected가 된다. 보일러에 공급되는 연료량(Coal Flow)은 급탄기 기동 15초 이후부터 산출되며,

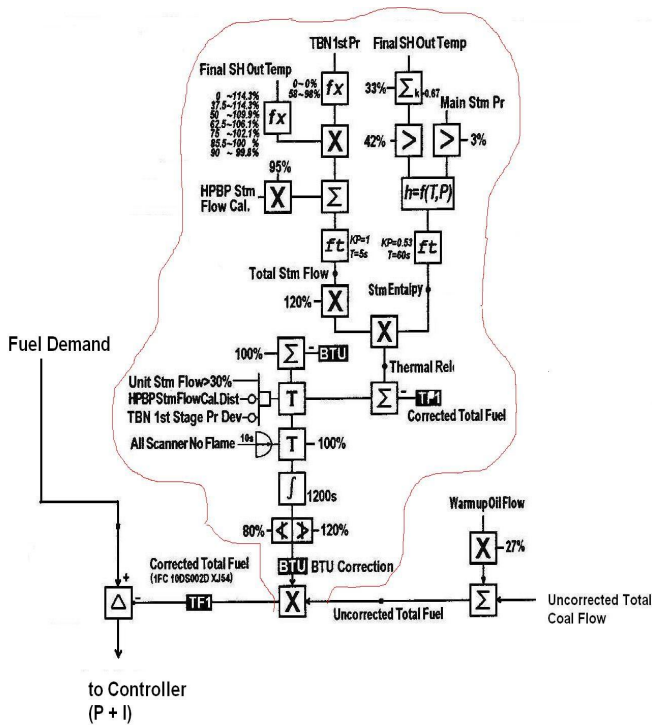
이 15초는 급탄기의 Coal이 보일러 내에 도달되는 데 걸리는 시간(지연 시간)을 적용한 것이다.

2.4 Coal 발열량 보정(BTU Correction)

보일러 주연료인 Coal은 탄종에 따라 구성성분과 발열량이 달라진다. 특히 근래에는 Coal가격이 상승함에 더 저렴한 저 발열량의 Coal을 연료로 사용하는 비율이 증가하고 있다. 현재 연료로 사용하는 Coal의 발열량과 보일러 당초 설계치와 차이가 존재하더라도, 이 발열량 차이를 자동보정하여 보일러 전체 제어계의 안정도를 손상시키지 않도록 하는 것이 발열량 보정(BTU)의 목적이다.

2.4.1 연료 발열량 보정 한계 설정

다음 그림 2에서 실선으로 둘러싼 범위가 연료의 발열량 보정로직이 구현된 범위이며, 총 연료량(Corrected Total Fuel)과 보일러 유출증기 총 열량(=Total Steam Flow× Enthalpy) 차이를 구하여 시간적분하고, 이 적분한 값을 보정계수로 하여 Uncorrected Total Fuel 곱하여 준다. 보정계수의 범위는 보통 0.8~1.2로 설정하는 것이 일반적이나(태안화력 #5~#8, 삼천포화력#5), 태안화력 #1~#4에서는 현재 0.85~1.2를 보정범위 정하여 사용하고 있다.



<그림 2> 연료 발열량 보정 알고리즘(태안화력#1 자료)

2.4.2 엔탈피(Enthalpy) 산출

보일러에서 생산하는 증기의 총열량은 유출증기량 곱하기 증기의 엔탈피로 구할 수 있다. 증기의 엔탈피는 온도와 압력의 함수이며, 국제표준기구에서 발표하는 증기표의 엔탈피를 표준으로 한다. 보통 발전소 디지털 제어시스템에서 증기엔탈피를 산출하는 알고리즘은, 기본적으로 증기 온도와 압력의 2개 입력변수 받아들이어서 내장된 표(Table)를 참조하여 출력을 내는 기능(Function)이다. 예를들면, 온도를 독립변수 x축으로, 압력을 y축 변수로 정하고, x축과 y축 변수로 정의되는 2차원 종속변수인 엔탈피 데이터는 테이블(또는 Array)을 내장시키는 방법으로 구현한다. 국제 표준기구의 증기 엔탈피 표를 기준으로하고 보통 기능을 간단히 하기 위해 보간법(Interpolation)으로 중간 엔탈피를 산출한다.

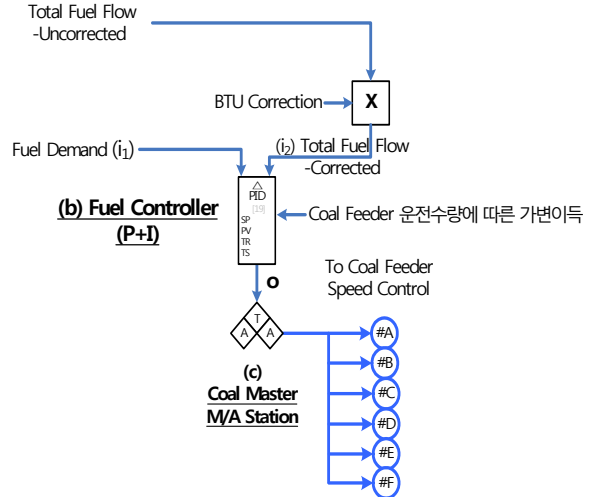
2.5 연료제어기(Fuel Controller)

Fuel Controller는 Fuel Flow 편차(Fuel Demand - Corrected Fuel Flow)를 입력으로하여 PI(Proportional + Integral) 연산을 한 후 급탄기 속도제어 신호를 만들어 낸다(그림 3). 여기 PI제어기의 파라미터 중 이득(Gain, Kp)의 설정은 상수가 아닌 변수로 되어있으며, 태안#1은 다음 그림 5와 같이 급탄기 운전 대수의 상황에 따라 변하는 Variable Gain Kp 곡선을 가지고 있다. 일반적으로 급탄기 운전 수량이 많으면 PI제어기의 Kp가 감소하고, 급탄기 운전 수량이 적으면 Kp가 증가하는 가변이득 제어방식을 모두 사용하고 있다.

2.6 급탄기 속도제어(Coal Feeder Speeder Control)

2.6.1 급탄기 최소 속도

보통 급탄기 용량은 1대당 48.59ton/hr의 Coal량을 미분기에 보낼 수 있는데, 공급량 약 12ton/hr에 해당하는 급탄기 속도 최저한도를 보통 25%인로 설정하여 사용하고 있다. 급탄기를 기동하면 무조건 최소 12ton/hr의 Coal량이 공급되며, 이 25% 설정을 Turn Down Ratio라고 하며 Coal 버너의 연소안정을 위한목적을 갖고 있다.



<그림 3> 연료제어기(Fuel Controller) 역할

2.6.2 속도제어와 기계적인 동력전달 체계

급탄기의 속도제어와 기계적인 동력전달 체계는, 모터 → 가변속 와류 클러치(급탄기 속도제어기능 수행) → 감속기어(Reduction Gear) → Head Pulley → 급탄기 벨트(Belt)이다. 연료제어 피드백 신호인 급탄량(Total Coal Flow)은, 급탄기 속도를 측정하는 속도계 신호에 단위 부피의 Coal 중량 셀의 신호를 보정하여 산출한다.

2.6.3 급탄기 속도제어 인터록

급탄기의 자동운전 중 수동으로 전환되는 경우는 다음과 같으며,
 ○ 운전원이 Push Button 수동절환
 ○ Hot Air Damper 또는 Cold Air Damper가 수동모드
 ○ Pulverizer Switch Gear Disturbance
 ○ Coal Feeder Speed Control 수동모드
 ○ Air Flow Control 수동
 ○ Deviation Limit Maximum(증기열량이 Total Air Flow > 50%)
 수동운전 상태로 절환되면 직전 자동운전 시의 급탄기 속도를 유지하고 이 후 운전원의 수동 명령에 의해 제어된다.

3. 결 론

이상에서 국내 석탄화력 발전소에서 공통으로 적용하고 있는 보일러 연료제어의 기본 알고리즘과 연료발열량(BTU) 보상의 구체적인 알고리즘에 대하여 분석하였다. 연료제어의 목적을 보일러 입력과 출력에너지 간에 실시간으로 평형을 유지하는 것이나, 연료제어계에 작용하는 외란이 많아 안정한 제어를 유지하는 것이 결코 쉬운일이 아닐 것이다. 현재 표준석탄화력의 보일러 제어로직을 설계하는 연구과제를 수행하고 있으며, 한 부분인 연료제어 로직분석 내용을 기술하였다. 향후 이분야의 보다 구체적인 내용과 진보된 제어알고리즘에 관해 연구를 계속하고 결과를 다음 논문에 발표하고자 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] Huai-Chun Zhue 외, "A New Direct Energy Balance Control Concept for PC-Fired Boiler-Turbine Unit Based on Radiation Signal", ISA 17th Annual Joint POWID/EPRI, 권호,2007
- [2] 태안화력발전본부, "모의화력실무반고계", 2007
- [3] 태안화력1~4호기, "보일러 제어로직 도면, 끝.