

미분기 출구온도 모델링 및 파라미터 식별에 관한 연구

울운봉*, 박수용* 신휘범*, **이순영***
경상대학교*

Modeling and Parameter Identification of Pulverizer Outlet Temperature

Yun-Peng Li*, Soo-Yong Park*, Hwi-Beom Shin*, Soon-Young Lee*
Gyeongsang National University*

Abstract - In this paper, the outlet temperature of the coal mill is modeled by reinvestigating the heat balance models physically. The archived data from a plant database are utilized for identifying the model parameters. It can be seen that the simulated model outputs are well matched with the measured ones. It is also expected that the proposed model is useful for the controller design.

1. 서론

화력 발전소의 보일러 시스템은 시변 비선형 특성을 지니는 여러 장치들이 매우 밀접하게 연관되어 동작하는 복잡한 계통이다. 이러한 장치들 중에서도 과열기, 재열기, 미분기 등과 같은 시간 지연 시스템 들은 그 특성상 정확한 제어가 어렵고 긴 시간지연으로 인하여 전체 시스템의 효율 및 안전에 큰 영향을 미치게 된다. 큰 폭의 부하 변화와 엄격해진 환경제약 등으로 인하여 더욱 정밀한 제어가 요구되고 있는데 반하여 이들 시간지연 시스템의 모델링과 제어에 대한 연구는 미비한 실정이다.

미분기 출구 온도를 모델링 하는데 있어서 기존의 연구들은 미분기 몸체, 미분기 내의 석탄과 공기의 온도가 같다는 가정 하에 열평형 방정식을 세워 미분기 온도 모델을 구하였다. 이 경우 기동 시 등 과도상태에서는 실제 과형과 모델에 의한 과형이 잘 일치하지 않는다[1-4]. 실제로 미분기의 동작을 고려하면 이러한 가정에는 무리가 있다. 가열된 일차공기가 미분기에 입력된 후 미분탄과 함께 출구까지의 온도 분포를 보면 지수함수 형태로 온도가 출구온도로 급강하함을 알 수 있다. 즉 뜨거운 공기가 미분기에 들어가 미분탄과 기체-기체 온도 교환에 의해 1 [m]의 거리 안에서 거의 출구온도로 떨어진다. 따라서 기존의 방법처럼 미분기 전체를 하나의 열 질량으로 보기는 어렵다.

이에 본 연구에서는 이러한 기술적인 사항을 고려하여 미분기 몸체와 내용물인 석탄과 미분탄 부분으로 분리하여 열평형 모델을 나타내었다. 또한 실제 발전소에서 취득한 데이터를 이용하여 Matlab의 System Identification Tool을 이용하여 구해진 모델의 파라메타 값들을 추정하였다. 이렇게 구해진 모델과 실제 운전 과형을 비교하여 본 모델의 타당성을 확인하였다.

2. 출구온도 모델링

출구 온도는 미분탄 출구관에서 미분탄의 온도로 측정된다. 그림 1은 미분기를 미분기 몸체와 내용물인 석탄과 미분탄 부분으로 분리하여 고려한 열평형 모델을 나타낸다. 롤러, 분쇄판 등 내부 구조물의 질량은 미분기 몸체와 같게 생각한다. 미분기 내에서 선회하는 미분탄과 석탄에 대한 열평형을 다음과 같이 표현할 수 있다.

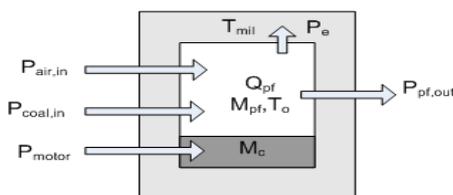


그림 1. 미분기의 열평형 모델

$$C_{cpf} M_{cpf} \frac{dT_o}{dt} = P_{air,in} + P_{coal,in} + P_{motor} - P_e - P_{pf,out} \quad (1)$$

여기서 T_o 는 미분탄의 온도 [°C]를 나타내고, M_{cpf} 와 C_{cpf} 는 미분기 내의 석탄과 미분탄 질량 [kg]과 등가 비열 상수 [kJ/kg·K]를 나타낸다. P_{motor} 는 석탄을 분쇄하기 위한 판과 롤러를 회전하는데 필요한 전동기 출력 [kW]을 나타내고, 전동기 전류 [A]로 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{motor} = C_{mot} I_{mot} \quad (2)$$

여기서 C_{mot} 은 롤러 전동기의 일이 열로 변환되는 일률 상수 [kW/A]를 나타낸다. 예열된 일차 공기, 수분을 포함한 석탄, 미분탄에 의한 일률 $P_{air,in}$, $P_{coal,in}$, $P_{pf,out}$ [kW]는 다음과 같이 각각 나타낼 수 있다.

$$P_{air,in} = C_a W_a T_{in} \quad (3)$$

$$P_{coal,in} = C_c W_c T_{rc} \quad (4)$$

$$P_{pf,out} = C_{acm} (W_a + W_{pf}) T_o \quad (5)$$

여기서 C_a , C_c 와 C_{acm} 은 일차공기, 석탄과 미분탄의 비열 상수 [kJ/kg·K]이고, W_a , W_c 와 W_{pf} 는 일차공기, 석탄과 미분탄의 질량흐름 [kg/s]이다. 정상상태에서 W_{pf} 는 W_c 와 같다. T_{in} 과 T_{rc} 는 일차공기의 입구와 야외 석탄의 온도 [°C]를 각각 나타낸다. 미분탄의 열이 미분기 몸체로 전도되는 일률 P_e [kW]는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_e = k_e (T_o - T_e) \quad (6)$$

여기서 k_e 은 공기와 수분이 섞인 미분탄과 미분기 몸체 사이의 열전도 상수 [kW/K]이고, T_e 는 미분기 몸체의 온도를 나타낸다.

위의 식들을 정리하면 미분기의 온도 방정식을 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$C_{M_{pf}} \frac{dT_o}{dt} = C_a W_a T_{in} + C_c W_c - C_{acm} (W_a + W_{pf}) T_o + C_{mot} I_{mot} - k_e (T_o - T_e) \quad (7)$$

여기서,

$C_{M_{pf}} = C_{cpf} M_{cpf}$: 석탄과 미분탄의 등가 열 질량 [kJ/K]

W_a, C_a : 일차공기의 질량흐름 [kg/s]와 비열 상수 [kJ/kg·K]

$C_{cm} = C_c T_{rc}$: 석탄의 비열 상수×석탄 온도 [kJ/kg]

C_{acm} : 미분탄의 등가 비열 상수 [kJ/kg·K]

W_c, W_{pf} : 석탄과 미분탄의 질량흐름 [kg/s]

I_{mot} : 롤러 전동기 전류 [A]

C_{mot} : 롤러 전동기의 열로 변환되는 일률 상수 [kW/A]

k_e : 미분탄과 미분기 몸체 사이의 열전도 상수 [kW/K]

T_e : 미분기 몸체의 온도 [°C]

일차공기의 질량흐름 W_a 와 온도 T_{in} , 석탄의 질량흐름 W_c , 전동기 전류 I_{mot} 등 4개의 입력 데이터에 대한 출구온도 T_o 의 응답

곡선으로부터 6개의 파라미터 CM_{mf} , C_a , C_{cm} , C_{acm} , C_{mot} , k_c 를 Matlab의 파라미터 추정 방법으로 추정한다.

3. 파라미터 추정 및 모델 검증

물리적인 관찰에 의해 만들어진 이론적인 미분기의 온도에 대한 모델링의 타당성을 확인하기 위해 화력발전소의 정상운전 동안의 다음 조건에서 운전한 동작 파형을 사용하여 시뮬레이션 하였다.

1) 미분기 기동 시

미분기 기동 시 6시간 동안의 데이터를 사용하였다. 데이터의 샘플링은 1초 간격으로 수집하여 각 변수 당 21600개의 데이터가 있다. 데이터 수가 방대하여 파라미터 추정 시 10초 간격으로 데이터를 샘플링하여 사용하였다. 추정된 파라미터에 의한 시뮬레이션 파형과 측정 파형을 비교한 결과를 그림 2에 나타내었다. 두 파형이 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

2) 미분기 정지 시

그림 3은 미분기 정지 시 6시간 동안의 데이터를 이용하여 파라미터를 추정하여 파형을 비교한 결과이다. 이 경우에도 측정 파형과 모델 파형이 잘 일치되고 있음을 알 수 있다.

3) 미분기 정상상태 변동 운전 시

그림 4는 미분기가 정상상태에서 큰 폭의 변동이 발생한 경우이며 90분 동안의 동작 상태이다. 이 경우 두 파형 사이의 오차가 비교적 크게 나타나고 있으나 파형의 형태를 비교적 잘 추종하고 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 미분기의 출구온도를 모델링하였다. 미분기 전체를 하나의 열 질량으로 취급하지 않고 미분기 몸체와 내용물인 석탄과 미분탄 부분으로 분리하여 열평형 모델을 나타냄으로써 물리적으로 의미 있는 모델을 구할 수 있었다. 또한 실제 발전소에서 취득한 데이터를 이용하여 Matlab의 System Identification Tool을 이용하여 모델의 파라미터 값들을 추정하였다. 이렇게 구해진 모델과 실제 운전 파형을 비교하여 본 모델의 타당성을 확인하였다.

본 연구는 한국서부발전(주)의 지원에 의하여 기초전력연구원 (관리번호 : 08311)주관으로 수행된 과제임.

[참 고 문 헌]

- [1]. J. L. Wei, J. Wang, and Q. H. Wu, "Development of a multisegment coal mill model using an evolutionary computation technique," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 22, no. 3, pp. 718-727, Sept. 2007.
- [2]. Y. G. Zhang, Q. H. Wu, J. Wang, G. Oluwande, D. Matts, and X. X. Zhou, "Coal mill modeling by machine learning based on onsite measurement," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 17, no. 4, pp. 549-555, Dec. 2002.
- [3]. G. Zhou, J. Si, and C. W. Taft, "Modeling and simulation of C-E deep bowl pulverizer," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 15, no. 3, pp. 312-322, Sept. 2000.
- [4]. P. F. Odgaard, B. Lin, and S. B. Jorgensen, "Observer and data-driven-model-based fault detection in power plant coal mills," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 23, no. 2, pp. 659-668, June 2008.

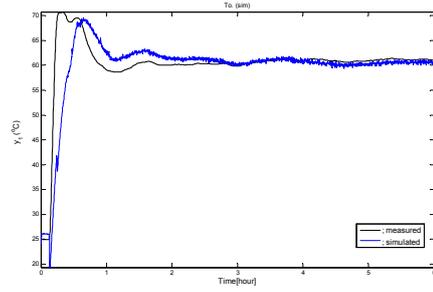


그림 2. 기동 시 미분기 온도 측정파형 및 모델 파형

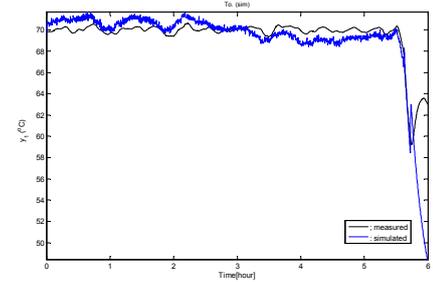


그림 3. 정지 시 미분기 온도 측정파형 및 모델 파형

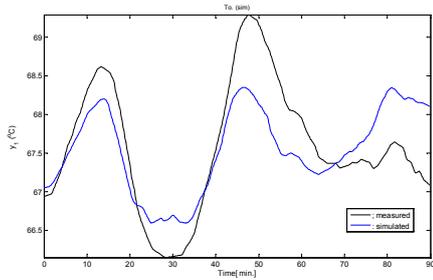


그림 4. 정상상태 변동 시 온도 측정파형 및 모델 파형