

미분기 질량흐름에 대한 모델링 및 파라미터 식별

이형란*, 신용환*, 장은승*, **이순영***, 신취범*
경상대학교*

Modeling and Parameter Identification of Pulverizer Mass Flow

Xinlan Li*, Yong-Hwan Shin*, Eun-Seong Jang*, Soon-Young Lee*, Hwi-Beom Shin*,
Gyeongsang National University*

Abstract - In this paper, the coal mass flow of the pulverizer used in the coal-fired power plants is modeled in view of the controller design rather than the educational simulator. The coal mass flow is modeled by reinvestigating the mass balance models physically. To identify the model parameters, the Matlab Simulation Tool is used with the data gained from a plant database. It can be seen that the simulated model outputs are well matched with the measured ones.

1. 서론

오늘날 분산제어 시스템(DCS: Distributed Control System)이 화력발전소에 도입되어 모델링과 제어에 대한 새로운 연구 결과를 실제 구현할 수 있게 되었다. 현재까지 스티븐도 제어, 부하 압력제어와 수위 제어 등에 많은 연구가 이루어져왔다. 반면 미분기에 대한 모델링과 제어에 대한 연구는 매우 저조한 편이다. 이로 인해 미분기의 열악한 성능 때문에 전력 부하 추종 성능이 떨어지고 정기적인 발전기 shut down의 원인으로 보고되고 있다. 석탄의 특성, 마모 등 모델링하기 어려운 부분 때문에 그 동안 미분기에 대한 관심이 저조한 것으로 보인다. 미분기를 정확히 모델링 및 제어를 한다면 석유를 원자재로 하는 화력발전소의 동특성과 유사하게 제어할 수 있다[1,2].

일반적으로 미분기를 시간지연이 있는 1차 시스템으로 모델링을 해왔다[3,4]. 단일 입력-단일 출력에 대한 구조에서 단위계단 응답 또는 주파수 응답으로 미분기를 모델링하고 파라미터 값을 구하였다. 좀 더 발전된 방법은 질량 모델과 열 평형모델로부터 조금 복잡한 모델 구조를 만들어 파라미터를 구한 모델이다[2].

이러한 모델링 방법은 미분기의 물리적인 현상을 잘 묘사하지 못하다는 단점을 갖는다. 기동, 정지 등 동작 모드에 따라 다른 파라미터를 사용하고, 질량 모델과 출구 온도모델이 서로 독립되어 있다. 따라서 현장에 직접 그 결과를 응용하기 어렵다.

본 논문에서는 미분기 질량 흐름을 제로명하여 물리적으로 의미가 있는 모델 구조를 선정하고, 또한 물리적 의미를 적용하여 파라미터를 추정할 때의 초기치 선정 방법에 대하여 고찰하였다. Matlab의 System Identification tool을 이용하여 미분기의 비선형 모델의 파라미터를 추정하였으며 실제 운전 파형과 제시한 모델에 의한 파형을 비교하여 타당성을 검증하였다.

2. 질량 모델링

그림 1은 미분기가 정상 운전할 때의 질량 평형 모델에 대한 개념을 나타낸다.

미분기 안에서 석탄 질량 M_c 와 미분탄의 질량 M_{pf} 으로 구분하여 입력되는 석탄 질량흐름 W_c 와 출구로 나오는 미분탄 질량

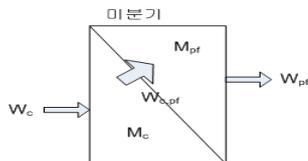


그림 1. 미분기의 질량 평형 모델

흐름 W_{pf} 의 질량 평형관계로부터 다음 식을 유도할 수 있다.

$$\frac{dM_c}{dt} = W_c - k_c M_c \quad (1)$$

$$\frac{dM_{pf}}{dt} = k_c M_c - W_{pf} \quad (2)$$

여기서 M_c 와 M_{pf} 의 단위는 kg이고, W_c 와 W_{pf} 의 단위는 kg/s이다. k_c 는 석탄이 미분탄으로 단위 시간당 변환되는 비율을 나타내며 단위는 1/s이다. 출구로 나가는 미분탄 질량흐름 W_{pf} 는 미분기 내의 미분탄 질량과 일차공기의 압력차 ΔP_{pa} 에 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_{pf} = k_{pf} \Delta P_{pa} M_{pf} \quad (3)$$

여기서 ΔP_{pa} 의 단위는 mmH20이고, k_{pf} 는 비례 상수로 1/s·mmH20이다.

미분기의 입구와 출구 사이의 압력차 ΔP_{mil} 은 일차공기의 압력차에 비례하고, 미분기 내의 석탄 질량과 미분탄 질량에 관계되고 동특성을 고려하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{d\Delta P_{mil}}{dt} = -k_{mil} \Delta P_{mil} + k_{ppf} M_{pf} + k_{pc} M_c + k_{ppa} \Delta P_{pa} \quad (4)$$

여기서 k_{mil} 은 시정수의 역수이고 단위는 1/s이다.

위의 식들을 정리하면 다음과 같은 질량에 대한 상태 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dM_c}{dt} = -k_c M_c + W_c \quad (5)$$

$$\frac{dM_{pf}}{dt} = k_c M_c - k_{pf} \Delta P_{pa} M_{pf} \quad (6)$$

$$\frac{d\Delta P_{mil}}{dt} = -k_{mil} \Delta P_{mil} + k_{ppf} M_{pf} + k_{pc} M_c + k_{ppa} \Delta P_{pa} \quad (7)$$

상태 변수는 미분기 내 석탄 질량, 미분탄 질량과 압력차 등 3개이고, 입력은 석탄 질량흐름 W_c [kg/s]와 일차공기 압력차 ΔP_{pa} [mmH20]이다. 측정하는 출력은 미분기 내의 압력차 ΔP_{mil} 이다.

위 질량 모델의 파라미터는 k_c , k_{pf} , k_{mil} , k_{pc} , k_{ppf} , k_{ppa} 등 6개가 있으며 모두 추정해야 할 변수이다. 또한 상태변수 M_c , M_{pf} 의 초기값도 추정해야 한다. 추정은 입/출력 실험 파형과 파라미터 추정알고리즘을 통해 이루어진다. 이를 위해 다음의 정상상태 모델이 파라미터 추정의 초기값 선정에 긴요하게 사용된다.

$$k_c M_c = W_c \quad (8)$$

$$W_c = k_{pf} \Delta P_{pa} M_{pf} \quad (9)$$

$$\Delta P_{mil} = (k_{pc} M_c + k_{ppf} M_{pf} + k_{ppa} \Delta P_{pa}) / k_{mil} \quad (10)$$

이 모델은 3개의 상태변수 가운데 ΔP_{mil} 을 측정할 수 있어 앞서 서술한 모델보다 올바른 추정의 판단이 수월하다.

3. 파라미터 추정 및 모델 검증

질량 모델에서 추정할 파라미터는 $k_c, k_{pf}, k_{pc}, k_{ppf}, k_{mpd}, k_{pa}$ 등 6개이고, 상태변수 $M_c, M_{pf}, \Delta P_{mpd}$ 의 초기값도 추정해야 한다. 정상상태에서 미분기 내에 존재하는 석탄 량과 미분탄의 량을 분리하여 추정하기 어렵다. 그러나 그림 2에서처럼 기동 시 먼저 석탄이 약 17 T/H로 입력되고 약 30초 후에 미분탄이 발생하기 시작하여 약 10분 동안 미분탄 질량흐름이 증가하여 입력되는 석탄 질량흐름과 같게 된다. 따라서 정상상태에서 미분기 내에 존재하는 석탄 량과 미분탄 량의 합은 그림에서 두 그래프의 사이의 면적에 해당하며, 대략 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$M_c + M_{pf} = \frac{1}{2} \cdot 17 [T/H] \cdot \frac{1}{6} [H] = 1.42 [T] \quad (11)$$

상태변수의 초기 값은 질량의 합이 위의 식에 근사한 값으로 설정하고, 매개 변수 압력차 ΔP_{mpd} 는 대략 미분기 내의 압력차보다 작은 값으로 선정한다.

1) 미분기 기동 시

미분기 기동시 6시간 동안의 데이터를 사용하였다. 데이터의 샘플링은 1초 간격으로 수집하여 각 변수 당 21600 개의 데이터가 있다. 그림3은 추정된 파라미터에 의한 시뮬레이션 파형과 측정 파형을 초기 2시간 동안 비교한 것이다. 미분기 압력차에 대한 파형이 측정 파형과 매우 유사하며 적합도가 93.2 %이다.

2)미분기 정지 시

그림 4는 미분기 정지 시 6시간 동안의 데이터를 이용하여 파라메타를 추정하여 파형을 비교한 결과이다. 석탄의 입력질량흐름과 미분탄의 출력 질량흐름이 잘 맞고 있음을 알 수 있다.

3) 미분기 정상상태 변동 운전 시

그림 5는 미분기가 정상상태에서 큰 폭의 변동이 발생한 경우이며 90분 동안의 동작 상태이다. 입, 출력 간의 편차가 비교적 작게 나타남을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 미분기의 석탄 질량흐름을 모델링하였다. 미분기를 물리적으로 재조명하여 의미 있는 질량흐름 모델을 선정하였으며, 파라미터 추정 시의 초기치 선정 방법에 대하여 고찰하였다. 또한 Matlab의 System Identification Tool과 실제 발전소에서 취득한 데이터를 이용하여 모델의 파라메타 값을 추정하였다. 이렇게 구해진 모델과 실제 운전 파형을 비교하여 본 모델의 타당성을 입증하였다.

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

[참 고 문 헌]

- [1.] 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.
- [2.] 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.
- [3.] H. Cao, G. Q. Si, Y. B. Zhang, and L. X. Jia, "A weighted distance-based interpolation fuzzy logic controller for ball mill pulverizing system," in *International Journal of Computers Syst. and Signals*, vol. 9, no. 1, pp. 18-30, 2008.
- [4.] N. Majdaldin, K. Marzieh, A. Javad, "Parametric identification of input-delay systems with unknown time delay", in *Proc. 26th Chinese Control Conf.* pp. 246-250, July 2007.

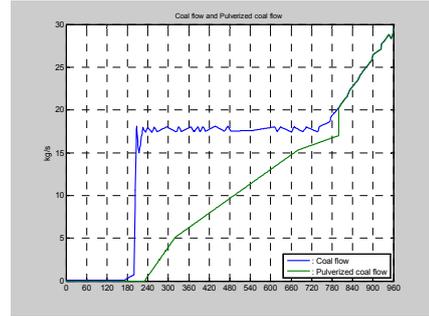


그림 2 기동 시 석탄 질량흐름과 예측된 미분탄 질량흐름

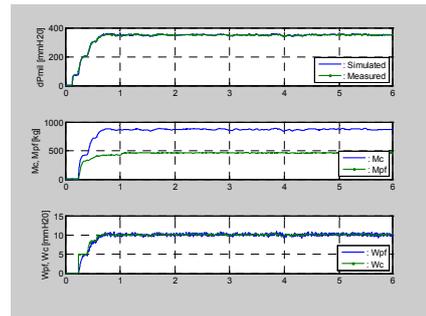


그림 3. 기동 시 측정 파형 및 모델 파형

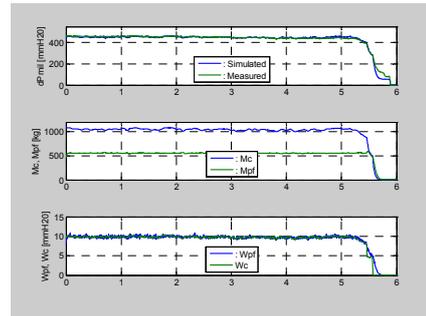


그림 4. 정지 시 측정 파형 및 모델 파형

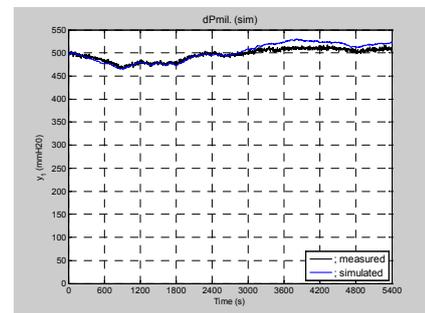


그림 5. 정상상태 변동에서 압력차에 대한 측정 파형 및 모델 파형