

화력 발전용 드럼 보일러-터빈 시스템의 모델링에 관한 연구

김우현*, 문운철**
 중앙대*, 중앙대**

A Study on Thermal Power Plant Drum Boiler-Turbine System Modeling

Woohun Kim*, Un-Chul Moon**
 Chung-Ang University*, Chung-Ang University**

Abstract - In recent year there has been an increasing interest in the dynamic simulation of complex systems. This study uses a large-scale forty-seventh order fossil fuel power plant. Twenty-three state variables are associated with the physical processes and twenty-four state variables associated with the control system. The plant model is expected to predict all dominant effects in a steady and transient state. In this study, the power plant model is reorganized into four subsystems, each with its controller, and the four connected to each other through a manager, which is a fifth part to the system. The four parts of the unit are the boiler system, steam turbine system, condenser system, and feedwater system.

1. 서 론

발전의 형태는 여러 가지가 있는데, 원자력 발전은 전력 수요의 고정 부분인 기저 부하를 주로 담당하고, 화력 발전은 점차 수요 변동에 의한 변동 부하를 충족하도록 운전되고 있다. 따라서 원자력 발전은 일정한 출력을 안정적으로 유지하기 위한 제어가 주종을 이루고 있으며, 화력 발전은 이에 부가하여 부하 변동에 기민하게 대응하기 위한 노력과 운전 상태의 잦은 변화에 따른 효율 감소를 극복하고 계통 주파수를 유지하려는 노력이 이루어지고 있다.[1]

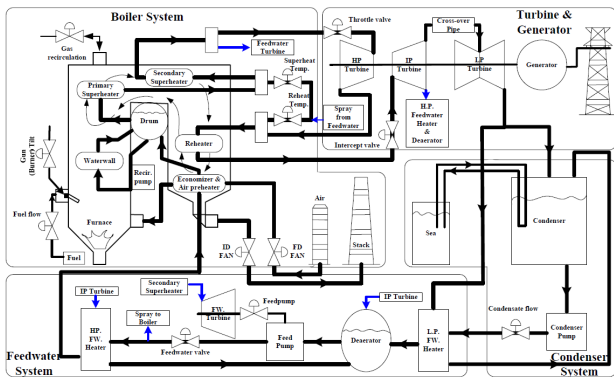
이전부터 경제적, 기술적, 안정적 요구에 따라 보일러 제어를 중심으로 많은 발전을 해왔으며, 앞에서 설명한 이유로 화력 발전의 제어의 중요성은 더욱 높게 부각되었다.

본 논문에서는, 차후 연구하고자 하는 화력 발전소 제어기와 연결되어 실시간으로 보일러를 모사할 수 있는 시뮬레이터 모델을 제작하고 그것의 핵심이 되는 드럼형 보일러-터빈 시스템의 모델링에 관한 과정 및 결과를 제시한다.

2. 본 론

2.1 보일러 개요

본 논문에서 다루고자 하는 대상은 600MW 드럼형 유류 보일러-터빈 시스템으로서, 그 구조를 그림 1에 나타내었다. 또한 전체 보일러 모델을 보일러 시스템, 터빈-발전기 시스템, 복수기 시스템, 급수기 시스템의 4개의 하위 시스템으로 구분하였다.



<그림 1> 600MW 드럼형 유류 보일러 모델

2.1.1 보일러 시스템

보일러 시스템은 드럼, 강수관과 순환 펌프, 수냉벽과 화로, 1차 과열

기, 2차 과열기, 재열기, 과열 저감기1, 과열 저감기2, 절탄기, 공기 예열기, 압입 송풍기, 유인 송풍기의 12개 모듈로 나누어, 그 물리적 구조를 13개의 비선형 상태 방정식과 대수 방정식으로 나타내었다.

급수펌프를 통해 가압된 물은 보일러 시스템에서 절탄기로 보내지며, 절탄기에서 가열된 급수는 드럼으로 들어간 뒤 강수관을 통해 노 하위 헤더에 모인다. 이때 6개의 순환 펌프가 필요로 하는 물의 흐름을 제공한다. 하위 헤더에 모인 물은 그 후 수냉벽을 상승하며 가열되어 물과 수증기의 혼합체 상태로 드럼으로 유입된다. 증기는 드럼 내부의 분리를 거쳐 1차 과열기, 2차 과열기를 거쳐 고압 터빈으로 공급된다. 이 때, 과열기 증기 압력은 2415 psia, 온도는 1460 °R이다. 고압 터빈을 통과한 1180 °R의 증기는 재열기로 보내지며, 1460 °R로 상승되어 중압 터빈으로 보내진다. 과열 저감기는 증기 온도를 조절하기 위해 사용되며, 2차 과열기와 재열기 앞에 위치한다.

공기는 2개의 압입 송풍기에 의해 공급되어, 공기 예열기에서 예열되어 노 내로 공급되고, 노 내에서 연소가스가 되어 수냉벽에 열을 공급한다. 그 후 1차과열기, 2차 과열기, 재열기에 열을 공급한 후 보일러를 빠져나와 절탄기 및 공기 예열기에 열을 공급한다. 마지막으로는 2개의 유인 송풍기를 이용하여 노 내의 압력을 유지하며, 연소가스를 외부로 배출한다.

2.1.2 터빈-발전기 시스템

터빈-발전기 시스템은 조속 밸브, 증기실, 고압 터빈, 조절 밸브, 중압 터빈, 크로스오버 관, 저압 터빈, 발전기 8개 모듈로 나누었으며, 그 물리적 구조를 4개의 비선형 상태 방정식과 대수 방정식으로 나타내었다.

터빈은 고압 터빈, 중압 터빈, 저압 터빈 3 부분으로 구성된다. 2차 과열기로부터 공급된 증기는 조속 밸브를 거쳐 고압 터빈의 증기실로 공급된다. 그 뒤 증기는 고압 터빈을 거쳐 재열기로 공급된다. 재열기를 통해 다시 가열된 증기는 조절 밸브를 통해 중압 터빈에 공급된다. 이 중 일부는 급수를 가열하기 위해 추출되어지며 나머지는 크로스오버 관을 거쳐 저압 터빈으로 공급된다. 각 터빈은 동축상에 연결되어 있으며, 증기로부터 기계적인 동력을 생성한다. 그 동력으로 발전기를 통해 전력이 생성된다.

2.1.3 복수기 시스템

복수기 시스템은 복수기와 복수펌프 2개 모듈로 나누었으며, 그 물리적 구조를 1개의 비선형 상태 방정식과 대수 방정식으로 나타내었다.

저압 터빈을 빠져나온 증기는 복수기로 공급되어, 냉각수에 의해 응축되어, 복수 펌프를 통해 저압 급수 가열기로 공급된다.

2.1.4 급수 시스템

급수 시스템은 저압 급수 가열기, 탈기 급수 밸브, 탈기, 급수 펌프, 급수 밸브, 고압 급수 가열기 6개 모듈로 나누었으며, 그 물리적 구조를 5개의 비선형 상태 방정식과 대수 방정식으로 나타내었다.

복수 펌프를 거쳐 공급된 응축된 물은 저압 터빈으로부터 공급된 증기에 의해 가열되어 탈기 급수 밸브를 통해 탈기로 공급된다. 공급된 물은 탈기에서 기체가 분리되고, 급수 펌프와 급수 밸브를 통해 고압 급수 가열기로 공급된다. 2차 과열기 증기 일부가 추출되어 급수 터빈에 사용되어, 급수 펌프가 동작한다. 고압 급수 가열기로는 중압 터빈에서 추출된 증기 중 일부가 사용되어 급수를 가열한다. 급수는 다시 절탄기로 보내지며, 보일러 시스템으로 공급되는 순환 과정이 되풀이 된다.

2.2 보일러 모델링

본 연구에서는 보일러의 각 부분에 질량 평형식, 에너지 평형식, 운동량 평형식을 적용하고 얻어진 각 식들을 종합하여 상태 방정식 및 대수 방정식으로 구성된 드럼형 유류 보일러의 수학적 모델을 설계하였다.

2.2.1 시스템 모델의 가정

보일러 모델 개발의 주요 목적중의 하나는 드럼형 보일러-터빈 시스템 전체 계통의 모사 및 부분별 제어기 설계를 위한 동적 모델을 얻는데 있다. 따라서 보일러 모델은 모든 계통의 물리적인 상관관계를 잘 묘사해야만 한다.

그러나 발전소 보일러와 같은 대규모의 시스템을 모두 구현하는 것은 현실적으로 매우 복잡하므로, 집중 매개변수를 통해 시스템 모델의 개념적 간략화 및 수식 전개상의 다음의 가정이 필요하다.

- 집중 매개변수 모델로 충분히 특성 표현이 가능하다.
- 압력에 의한 밀도의 변화는 무시 가능하다.
- 드럼, 복수기, 탈기기에서 물과 증기는 포화 평형상태에 있다.
- 관이나 튜브에서의 마찰은 모든 구간에서 일정하다.
- 유체의 물리적 특성은 모든 직교면에 대해서 균일하다.
- 열교환기내의 연소가스, 관, 냉각수의 축방향 열전달은 무시한다.
- 화로내의 압력 변화에 의한 연소 가스의 동특성은 무시한다.
- 열교환기의 튜브에서 열량 흐름 및 유체 흐름은 모든 직교면에 대해 균일한 값을 갖는다.

2.2.2 질량 평형식

유체의 질량 평형식은 질량보존의 법칙으로부터

$$V \frac{dR_{out}}{dt} = W_{in} - W_{out} \quad (1)$$

과 같이 나타낸다. 즉, 검사체적내로 들어오는 유체의 질량 흐름과 나가는 질량 흐름의 차는 검사체적 내부의 질량 축적률과 같다.

여기서, V 는 부피, R_{out} 은 출구 유체 밀도, W_{in} 은 입구 질량 흐름, W_{out} 은 출구 질량 흐름을 나타낸다.

2.2.3 에너지 평형식

유체 및 관에서의 에너지 평형식은

$$M \frac{dH_{out}}{dt} = W_{in} \times H_{in} - W_{out} \times H_{out} + Q - W \quad (2)$$

으로 나타내며, 검사체적 내로 유입되는 에너지 흐름과 나가는 에너지 흐름의 차는 검사체적 내부의 에너지 축적률과 같다는 열역학 제 1법칙을 나타낸다.

여기서, M 은 유효질량, H_{out} 은 출구 엔탈피, H_{in} 은 입구 엔탈피, W_{in} 은 입구 질량 흐름, W_{out} 은 출구 질량 흐름, Q 는 입력 열량, W 는 한일을 나타낸다.

2.2.2 운동량 평형식

운동량 평형은 유체의 흐름이 교류이기 때문에 이론적인 식으로는 풀기가 어렵다. 따라서 운동량 평형식은 저장된 운동량의 변화비에 따른 실험식을 이용한다.

$$P_{in} - R_{out} = f \frac{W^2}{R} + \frac{L \times R \times g}{g_c} \quad (3)$$

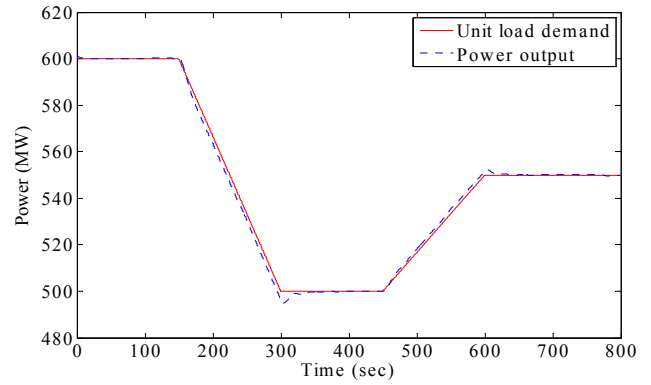
여기서, P_{in} 은 입구 압력, P_{out} 은 출구 압력, f 는 마찰 계수, R 은 유체 밀도, W 는 질량 흐름, L 은 입구로부터 출구까지의 높이, g 는 중력 가속도, g_c 는 중력상수를 의미한다.

2.3 모의실험 결과

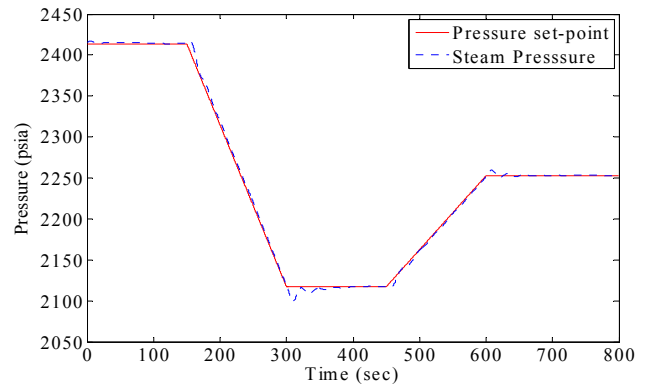
제시된 600MW 드럼형 유류 보일러 모델을 바탕으로, 부하 요구 전력을 변경하는 모의실험을 실시하였다. 각 구간 별 부하 요구 전력과, 고압 터빈에 공급되는 증기압력, 과열기와 재열기의 증기온도의 설정값은 표 1에 나타내었다.

<표 1> 부하 요구 전력 변동 및 설정값

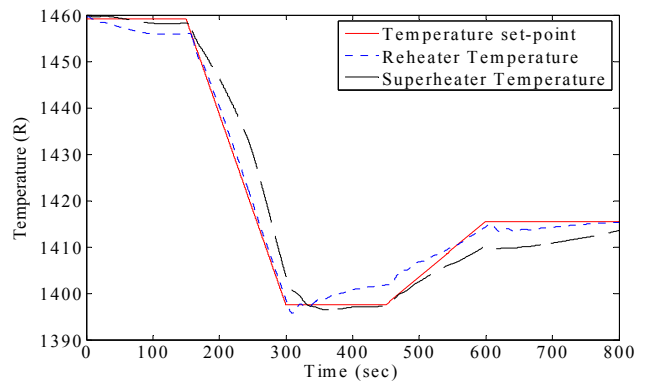
구간	시간	부하 요구 전력	증기 압력	증기 온도
1	0~150초	600MW 유지	2415 psia 유지	1460 °R 유지
2	150~300초	100MW 감소	297 psia 감소	63 °R 감소
3	300~450초	500MW 유지	2118 psia 유지	1397 °R 유지
4	450~600초	50MW 증가	135 psia 증가	19 °R 증가
5	600~800초	550MW 유지	2253 psia 유지	1416 °R 유지



<그림 2> 부하 요구 전력 변동에 따른 부하 변화



<그림 3> 부하 변화에 따른 증기 압력 변화



<그림 4> 부하 변화에 따른 증기 온도 변화

3. 결 론

본 논문에서는 600MW 화력 발전소용 드럼형 유류 보일러의 실시간 시뮬레이션 모델을 설계하였으며, 부하 요구 전력을 변경하는 모의실험을 실시하였다. 모의실험 결과 600MW 화력 발전소 드럼형 보일러의 실제 Data에 대해 만족할 만한 정확성을 나타내는 것을 확인 하였다.

본 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (과제번호: 2010-0025555)

[참 고 문 헌]

[1] 한국 과학 기술원, “발전소 제어용 디지털 계장 제어 시스템 개발 (최종보고서)”, 1990