

발전용 증기 터빈의 디지털 조속기 시스템 설계 및 적용에 관한 연구

전 일 영* · 김 윤 식**

A Study on the Design and Application of a Digital Governor System for Steam Turbines in Power Plants

Il-Young Jeon* · Yoon-Sik Kim**

Abstract

This thesis aims at developing of a digital governor system for the steam turbine generator of the Buk-Cheju Thermal Power Plant of KEPCO. The steam turbine generator of the Buk-Cheju Thermal Power Plant is modelled. Real input and output signals are acquired from the steam turbine generator and the parameters of the model are estimated using input output data, the model adjustment technique and a genetic algorithm. Since the acquired signals are contaminated noises, a IIR digital filter is designed eliminate noises.

As a hardware platform, a triple modular system which is fitted 32-bit microprocessor of Motorola company to perform the digital governor system is used. Various functional logic blocks which execute algorithms of the governor system are developed. The parameters of the PID controller algorithm in the speed control block is tuned on the basis of the estimated model.

A set of computer simulation works as same operation mode of the steam turbine generator are performed with the tuned PID parameters to demonstrate the effectiveness of the developed governor system.

* 한국해양대학교 전기공학과 석사과정

** 한국해양대학교 전기공학과 교수

제 1 장 서 론

현재 발전소에서 사용되어지는 증기 터빈에는 다양한 종류의 조속기들이 사용되고 있다. 본 연구에서는 이러한 터빈의 제어 시스템의 설계를 디지털 조속기로 적용하기 위한 기본적인 구조를 설계하였고, 북제주 화력발전시스템으로부터 실측 데이터를 얻었고, IIR 디지털 저역통과 필터를 설계하여 계측된 신호로부터 잡음을 제거하였다. 신호 처리된 데이터와 유전알고리즘을 이용하여 모델의 매개변수를 추정하였고, 추정된 모델에 근거하여 PID 알고리즘을 동조하였다. 또한 디지털 조속기가 가져야할 기본적인 기능을 수행할 수 있도록 시스템 알고리즘을 개발하였다. 개발된 시스템 알고리즘으로 제어계를 구성하고 여러 운전 모드에서 시뮬레이션을 실시한 결과, 출력이 목표치에 정상편차 없이 잘 추종하고, 전부하 운전 중 부하탈락에도 주어진 요구조건을 만족하므로 그 유효성을 확인할 수 있었다.

제 2 장 기계유압식 및 전자식 조속기

2.1 기계유압식 조속기 및 속도 감응기구

일찍이 증기 엔진이나 풍차나 수차와 같은 것들이 발명되면서부터 동력이나 속도를 자동으로 제어하기 위한 기계적인 설계가 시작되었었다. 이러한 설계의 형태 중 가장 두드러지고 먼저 개발된 것이 원심력을 이용하여 속도를 측정하는 것으로 플라이 볼(Fly-Ball)이 개발되었다.

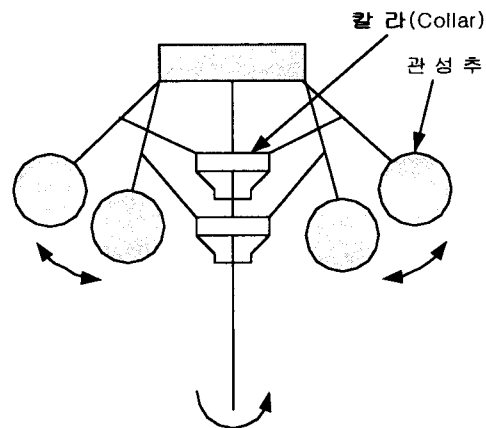


그림 2.1 플라이 볼 조속기의 속도 감응 기구

2.2 전자식 조속기 및 속도 감응기구

전자식 조속기의 가장 기본적인 속도의 측정 방법은 상기한 센서나 발전기에서 나오는 주파수를 측정하는 것이다. 빠른 회전을 하는 원동기일수록 큰 직류전압을 가지게 되고 이 전압이 원동기의 실제의 속도를 나타내게 된다.

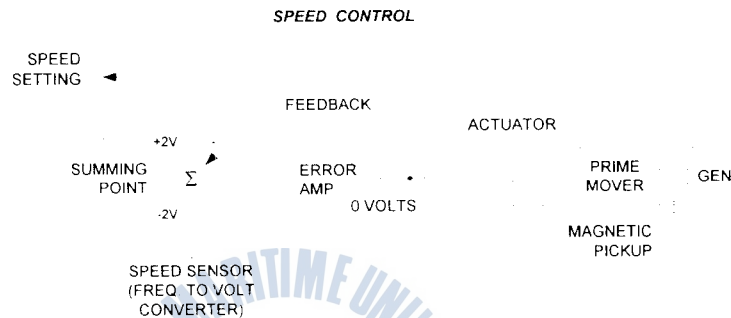


그림 2.7 전자식 조속기의 속도제어 블록 다이어그램

제 3 장 제어대상의 모델링

속도제어 알고리즘은 속도 측정용 센서로부터 신호를 받아 이를 목표치(회전수 설정치)와 비교하여 그의 편차에 따른 PID 동작을 하며, 부하제어 알고리즘은 부하변동에도 불구하고 희망 유효전력을 계속적으로 출력하기 위하여 동작한다.

3.1 제어대상의 모델링

실제의 시스템을 제어하기 위한 제어알고리즘을 구성하기 위해서는 시스템의 동특성을 수학적 모델로써 나타낼 필요가 있고 여기에 나타난 수학적 모델은 일반적으로 알려진 제어대상의 수학적 모델이고 실제의 적용의 문제에 있어서는 개별적으로 제어대상의 모델의 구조를 먼저 알고 모델의 매개변수 값을 실제 터빈을 운전하며 적절한 동특성을 얻도록 조작한다.

액츄에이터 입력 단에서 회전속도까지의 제어대상을 동작점 부근에서 선형모델을 얻고, 이를 요약하고 블록선도로 표시하면 그림 3.3과 같다.

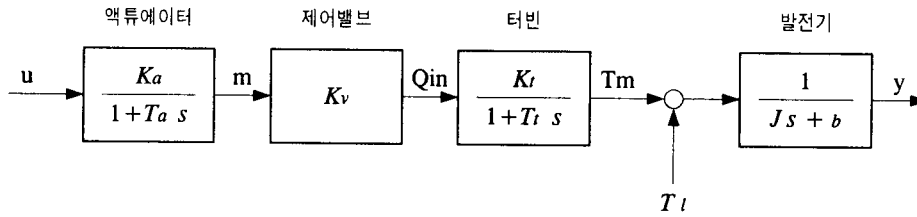


그림 3.3 제어대상의 블록선도

그림 3.3의 블록선도로부터 제어대상의 입출력 관계는 다음과 같이 표시된다.

$$Y(s) = \frac{K_a K_v K_t}{(1 + T_a s)(1 + T_t s)(b + Js)} U(s) - \frac{1}{(b + Js)} T_l(s) \quad (3.1)$$

식 (3.1)로부터 제어입력에서 출력 회전수까지의 전달함수는 다음 식과 같이 표시된다.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_0}{s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3} \quad (3.2)$$

3.2 입출력 신호계측 및 필터링

시스템 모델의 구조와 차수를 결정한 후, 매개변수들을 추정하기 위하여 실험적 방법으로 입출력 신호를 실제 제주도 한국전력 북제주 화력 발전소에서 운전되고 있는 증기터빈 발전기의 무부하 상태에서 취득하였다.

매개변수를 추정할 때 상당한 크기의 잡음을 포함하는 신호를 직접 사용하는 것은 추정의 성능을 저하시키는 요인이 되므로 측정 신호로부터 잡음을 제거하기 위하여 IIR 디지털 저역통과 필터를 설계하였고 IIR 디지털 필터의 전달함수는 식 (3.4)와 같이 얻어진다.

$$H(z) = \frac{d_1 + d_2 z^{-1} + d_3 z^{-2} + d_4 z^{-3} + d_5 z^{-4}}{c_1 + c_2 z^{-1} + c_3 z^{-2} + c_4 z^{-3} + c_5 z^{-4}} \quad (3.4)$$

식 (3.4)로부터 회전수 신호를 필터링하기 위해 쓰여진 필터방정식은 다음과 같다.

$$\hat{y}(k) = c_2 \hat{y}(k-1) + c_3 \hat{y}(k-2) + c_4 \hat{y}(k-3) + c_5 \hat{y}(k-4) + d_1 y(k) + d_2 y(k-1) + d_3 y(k-2) + d_4 y(k-3) + d_5 y(k-4) \quad (3.5)$$

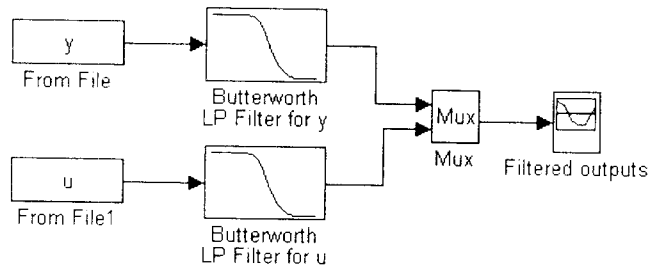


그림 3.6 입출력 신호를 필터링하기 위한 블록선도

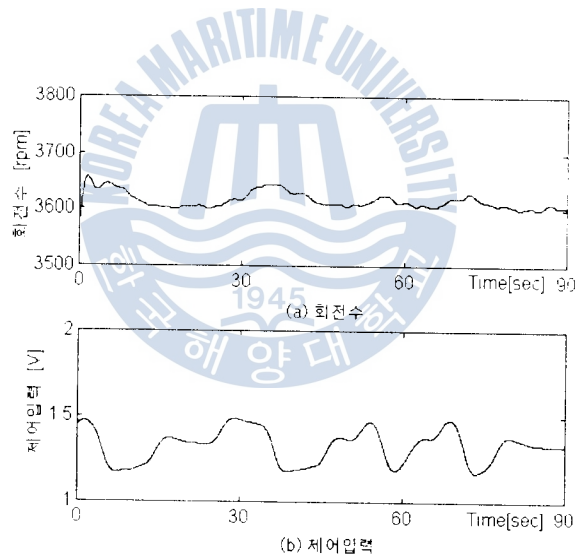


그림 3.7 매개변수 추정에 사용된 입출력 데이터 (필터링 후)

3.3 유전알고리즘을 이용한 매개변수의 추정

계측된 입력 신호를 조정모델에 인가하였고, 유전알고리즘은 시스템 출력과 모델의 출력 차가 최소가 되도록, 즉 모델의 동특성이 시스템의 동특성에 가까워지도록 계속적으로 모델의 매개변수를 조정하게 된다.

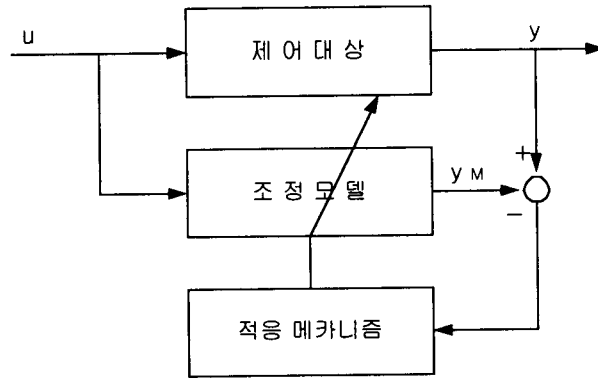


그림 3.9 제어대상의 매개변수의 추정 구성도

모의실험 결과 추정치로 $\hat{a}_1 = 2.51$, $\hat{a}_2 = 4.64$, $\hat{a}_3 = 0.04$, $\hat{b}_0 = 0.08$ 를 얻을 수 있었다.

3.4 추정된 모델의 검증

모델의 매개변수를 추정하는 문제에 못지 않게 추정된 모델의 유효성을 검증하는 과정 또한 중요하다. 그림 3.11는 추정된 모델의 유효성을 확인하기 위하여 실제 시스템과 모델의 출력을 비교한 것이다.

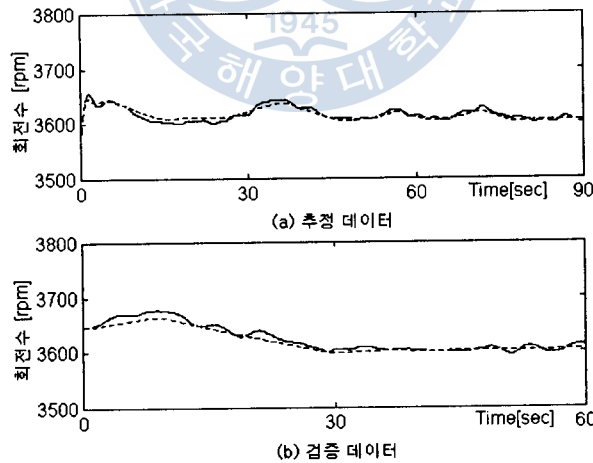


그림 3.11 실제 시스템과 모델의 출력

추정된 모델로부터 계단응답을 얻는 시뮬레이션을 실시하여 북제주 화력발전시스템의 제어대상 시정수는 약 2 [min]임을 확인할 수 있었다.

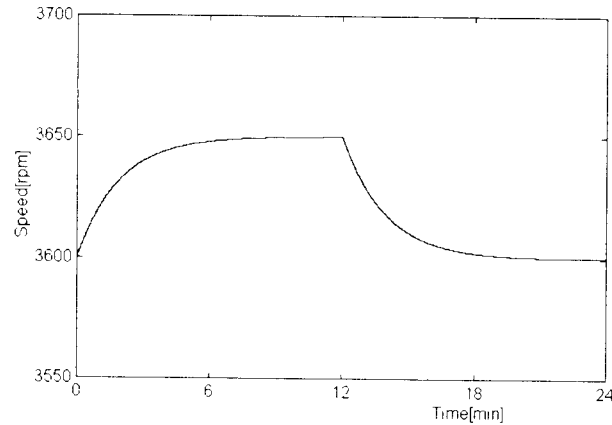


그림 3.12 제어대상 모델의 계단응답

제 4 장 디지털 조속기 시스템 설계

4.1 속도제어 시스템의 구조

여기에 나타난 알고리즘은 속도의 설정 값과 현재의 속도를 비교하여 속도의 오차를 PID 제어를 통하여 제어의 출력을 액츄에이터로 전달하는데, 피드백의 요소로서 유효전력 검출용 센서를 이용하여 발전기의 출력을 피드백하거나 증기터빈의 연료의 조정변의 변위를 피드백 할 수 있도록 되어 있다.

4.2 디지털 조속기 시스템의 하드웨어

본 논문에서는 디지털 조속기 시스템의 하드웨어로서 모토롤라사의 32비트 마이크로 프로세서인 MC68EC040을 CPU로 탑재하고 있다. 하드웨어의 전체적인 구조는 내고장성의 삼중화 방식을 채택하고 있다.

4.3 디지털 조속기의 알고리즘

전체적인 제어신호 및 입출력 신호의 흐름은 우측에서 좌측으로 흘러가도록 구성되었고 속도제어 알고리즘을 수행하는 내부의 블록들의 종류로 Speed Signal Fault Override 로직, Start-Stop 로직, Speed Pickup Fail 로직 등이 있다.

제 5 장 속도제어 알고리즘의 동조 및 시뮬레이션

5.1 PID 제어기 알고리즘 및 동조

$$u(t) = K_P \left\{ e(t) + \frac{I}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right\} \quad (5.1)$$

5.1.1 릴레이 피드백에 의한 PID 매개변수의 동조

PID 제어기의 세 매개변수 값을 적절히 선택하는 과정을 동조(Tuning)라 한다. PID 동조는 크게 개루프의 스텝 응답특성과 폐루프의 주파수 응답특성에 의한 방법으로 분류할 수 있다. 전자는 스텝 응답곡선으로부터 매개변수를 얻고 이로부터 PID 매개변수를 동조하게 되며, 후자는 폐루프 상태에서 비례 동작만으로 제어를 행하고, 제어계의 주파수 특성에 관한 정보를 이용하여 동조하는 방법이다.

회전수 설정치와 실제 회전수 사이의 오차를 $e(t) = y_r(t) - y(t)$ 라 하면 릴레이 제어기는 다음과 같이 동작한다.

$$u(t) = \begin{cases} +d, & e(t) > 0 \\ -d, & e(t) < 0 \end{cases} \quad (5.4)$$

본 연구에서는 추정된 모델로부터 PID 매개변수를 얻기 위하여 그림 5.1의 릴레이 피드백 시스템을 구성하였다

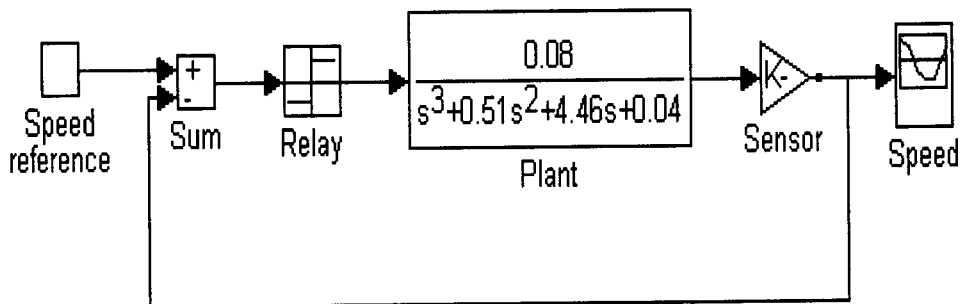


그림 5.1 릴레이 피드백 제어시스템

5.2 디지털 조속기의 시뮬레이션

여기서는 개발된 시스템 알고리즘의 동작상태를 점검하고 또한 그 성능을 파악하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였다.

PID 매개변수 : $K_P = 0.06$, $T_I = 2.0$, $T_D = 0.5$

제어대상 : $a_1 = 2.51$, $a_2 = 4.64$, $a_3 = 0.04$, $b_0 = 0.08$

제 6 장 결 론

본 논문에서는 북제주 화력 발전소의 터빈 속도제어 시스템을 대상으로 디지털 속도 제어 시스템을 설계하고 제어대상으로 모델링 하였으며, 설계된 디지털 속도제어 시스템은 그 유효성의 검증을 위하여 시뮬레이션을 행하였고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 디지털 속도제어 시스템을 개발하는 과정에서 제어 알고리즘의 실제 적용이 가능한 세부사항까지 도면으로 나타내었고, 실제 발전소에서 운전되고 있는 증기터빈의 데이터를 측정하고 유전 알고리즘을 이용하여 매개변수들을 추정하여 제어대상을 평가해 보았다.
2. 디지털 속도제어 시스템의 속도제어 알고리즘의 전체적인 기능과 세부적인 기능까지 지정하여 중·소형 용량의 증기터빈 발전기에 직접 적용이 가능하도록 제작하였다.
3. 디지털 속도제어 시스템의 세부구조를 설계하면서 내부적으로 사용 되는 기능 블록 및 로직들을 모두 라이브러리로 만들어 금후의 다른 시스템의 제작 및 적용의 경우 문서화 및 알고리즘의 타당성 검토에 소비되는 시간이 현저히 줄어들 것으로 예상된다. 이러한 구조를 이용하여 시스템 내부의 변수를 다양하게 변경할 수 있고, 발전소 현장의 터빈조건이 변경되어도 손쉽게 시스템의 기능을 변경시킬 수 있는 장점을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. 정태한, Control of Prime Mover Speed, 한국전력공사 정비기획실, 1997.
2. 천행춘, "중속디젤 기관의 디지털 가바나 설계를 위한 툴 개발에 관한 연구", 한국

- 해양대학교, 석사학위논문, 1997.
3. Ron Platz, Steam and Gas Turbine Control Retrofits, Woodward Governor Company TechTalk No. 83407.
 4. 김희철, 蒸氣 터어빈, 一中社, 1979
 5. ASME PTC 20.1-1997, Speed and Load Governing Systems for Steam Turbine-Generator Units, American Society of Mechanical Engineers, 1997

