

증기터빈 제어계의 전기-유압 신호 컨버터의 특성과 제어기 조정

김종안 · 정창기
한국전력공사 전력연구원

Electro-Hydraulic Converter and Tuning of the Controller

KIM JONG AN · JUNG CHANG KI
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - The performance of the electro-hydraulic servo control mechanism and the electronic servo controller in the steam turbine control system affect greatly upon overall system performance. We have successfully carried out a retrofit project of a 200MW steam control system recently. Here we introduce some acquired knowledge and experience about the servo control system which we actually configured in the project.

1. 서 론

화력발전소 동기 발전기를 구동하는 증기터빈의 속도와 출력제어는 유압으로 동작되는 액추에이터와 이 것과 기계적으로 연결된 증기량 조절밸브가 보통 사용된다. 보일러에서 생산되어 터빈으로 들어가는 증기량을 조절함으로써 무부하(발전기 계통 병입 전) 시에는 터빈의 속도를, 부하운전(계통병입 후) 시에는 출력을 제어할 수 있다. 근래의 터빈 제어시스템은 거의 전기-유압 서보 시스템을 사용되며, 신호 흐름 경로를 보면 먼저 제어시스템에서 나오는 전기 신호가 서보밸브에서 유압으로 변환되고 이 유압에 따라 위치가 변하는 액추에이터가 터빈 증기 조절밸브 개도를 변화시키는 순서로 되어있다.

전기신호를 산출하는 서보 제어기 기능과 이 전기신호를 유압신호로 변환시키는 전기-유압 서보밸브의 동작특성, 그리고 유압 액추에이터 동작특성이 증기터빈 전체 제어응답에 큰 영향을 미치게 된다. 이 논문의 내용은 기존 200MW급 아날로그 증기터빈 제어시스템을 디지털 시스템으로 개조하고 여기에 실제 적용한 사례를 바탕으로 서보제어계 특성을 분석하고 운전 결과를 정리한 것이다.

2. 본 론

2.1 전기-유압 서보 시스템의 구성

증기터빈에는 터빈의 회전속도와 출력을 제어하기 위한 증기량 조절 밸브(Main Steam Control Valve)가 구비되어 있으며, 이 조절 밸브는 유압 구동 액추에이터에 기계적으로 연결되어 있다. 액추에이터의 위치제어는 전기-유압 서보 밸브와 서보밸브에 전기신호를 내보내는 서보 제어기(Servo Controller)를 통해 이루어진다(그림 1 참조).

액추에이터의 변위는 Position Transducer (Linear Variable Differential Transducer, LVDT)로 검출하여 피이드백 신호가 되고, 이 신호가 서보 제어기 입력신호(Command Signal)와 비교되어 서로 차이(Error)가 있으면 Error가 0이 되는 방향으로 서보 제어기가 동작을 한다. 그림 1에서 서보 제어기는 PID 연산기능과 비교기능(Command Signal 대 Feedback Signal 비교), LVDT Excitation 및 Signal Condition 기능 그리고 기타 부가적인 기능을 포함하고

있다.

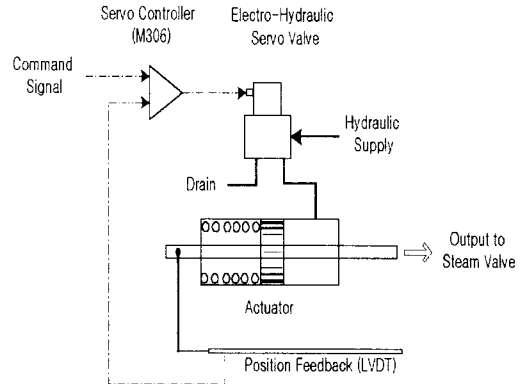


그림 1. 전기-유압 서보제어 시스템 구성도

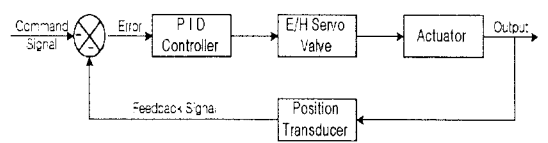


그림 2. 서보 제어계 기본 블럭선도

2.2 서보 제어기(Servo Controller)

서보 제어기에 포함된 주요 기능은, ①비교기(Command Signal 대 Feedback Signal), ②PID Controller, ③LVDT Modulator/Demodulator ④ Current Driver 등이며, 제작사 별 세부기능에는 차이가 많다. 입력신호(Command Signal)와 Feedback Signal의 차이 즉, Error가 PID Controller가 증폭되고 최종 출력단에서는 전류(mA) 신호로 변환되고 서보 밸브 코일에 흘러 들어간다. 전류 신호의 크기는 보통 수 십~수 백 mA 수준이며, 설치되어 있는 서보밸브의 정격전류와 맞게 설정한다. 우리가 실제 사용한 서보밸브의 정격전류는 57mA였다. PID 제어기 기능 중 I(Integral) 기능은 유압 액추에이터 종류에 따라서 취사 선택한다. 즉, 액추에이터 동작 속도가 서보전류의 크기에 비례하면 이 액추에이터는 적분형으로서 이 형식에는 I(적분) 기능을 사용하지 않고, 액추에이터 위치가 서보전류의 크기에 비례하여 결정되면 이를 비례형이라고 하고 적분 기능을 사용할 수 있다. 우리가 적용한 발전소의 터빈은 액추에이터가 적분형으로서, Servo Controller에서는 P(비례) 기능만 사용하였으며 액추에이터의 속응성이 좋아 상당히 높은 P 이득(Gain)에서도 만족할 제어 안정성을 유지하였다.

2.3 서보밸브

서보 밸브는 서보제어기로 부터 나오는 미약한 전기 신호를 받아들여 고압유 유량으로 변환시키고 이 유체를 액추에이터로 보내 큰 힘으로 터빈 증기량 제어밸브를 움직인다. 서보 밸브에 고압유를 공급하기 위한 별도 펌프가 연속 운전되고 있으며 110kg/cm² 정도 압력을 유지한다. 적은 전류의 신호를 큰 힘의 유압으로 변환시키는 서보밸브를 사용함으로써 터빈의 유입 증기량을 신속·정확히 제어할 수 있게된다. 우리가 사용한 서보밸브는 서보전류와 제어유량과의 다음 관계를 갖고 있다.

$$서보밸브의\ 제어유량\ Q_L = KI \sqrt{P_V}$$

여기서, K : 서보밸브 계수

I : 입력전류

P_V : 서보밸브 압력강하

P_V가 일정하다면 제어유량 Q는 입력전류에 정비례하나, 우리가 사용한 액추에이터는 위치에 따라 스프링 압축력이 다르고 이와 평형을 이루는 액추에이터 실린더 유압이 달라지므로, 펌프 공급 유압이 일정하다고 가정하여도 P_V가 일정하게 되지는 않는다.

2.4 유압 액추에이터(Actuator)

서보밸브에서 나오는 고압 유체가 액추에이터 실린더의 한 쪽으로 유입되면 이 유압이 스프링 압축력과 평형을 이루는 곳에서 머무르게 된다. 따라서 서보 밸브가 유체를 많이 보내오면 액추에이터 변위가 크게 변한다. 아래 그림 3은 동작원리와 등가 블록(함수)을 나타낸 것이다. 이 액추에이터는 적분형으로서 고압유 유입량을 시간 적분하여 단면적으로 나누면 총 이동 거리가 된다.

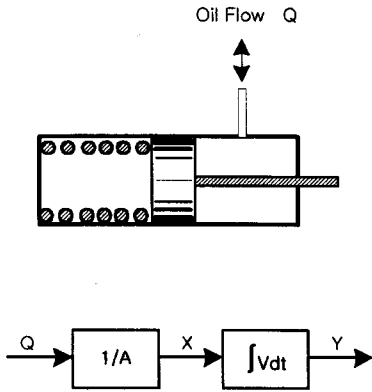


그림 3. 유압 액추에이터 및 등가 블록

등가블럭에서는 다음 관계가 성립한다.

$$Q = K(\text{비례상수}) \times \text{서보전류}$$

$$X = Q \div A$$

$$Y = \int X dt$$

여기서, Q : 단위 시간 당 서보밸브 통과 유량

A : 액추에이터 피스톤 단면적

X : 단위 시간 당 액추에이터 이동 거리

Y : 액추에이터의 이동 거리

2.5 Position Transducer(LVDT)

액추에이터의 현재 위치를 검출하여 전기신호로 변환하는 LVDT는 중간에 탭이 나있는 고정형 코일과 움직이는 자성체 봉으로 구성되어 있다(그림 4 참조). 코일 양끝 a-c에 일정한 주파수와 교류 전압(2.05kHz, 4.5Vac, 70mA max.) Excitation Power를 인가하면, 자성체 봉의 위치에 따라 단자 a-b와 b-c간의 전압이 직선적으로 변한다. 자성체 봉의 위치에 따라 코일 구간의 임피던스가 크게 달라지기 때문이다. 교체 전 아날

로그 제어시스템 사용했던 LVDT를 그대로 사용하였으며, Excitation Source 공급 및 Signal Conditioning 기능은 모두 Servo Controller 모듈에 수용되어 있다. 기존 아날로그 설비에서 공급한 Excitation은 3kHz, 10Vac이었으나 새로 설치한 디지털 설비에서는 2.05kHz, 4.5Vac로서 상호 주파수와 전압 차이가 상당히 있었으나 신호 검출 및 기타 기능에 문제가 없어 전체적으로 상태 양호하였다. LVDT 개조 및 현장 적용 시 고려해야 할 사항을 보면 다음과 같다.

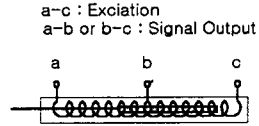


그림 4. LVDT의 구조

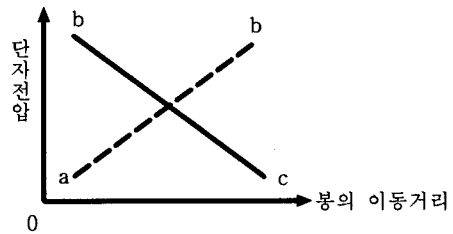


그림 5. LVDT 단자간 전압 변화

○ 대개의 LVDT Excitation Source로는 싸인파를 사용한다. 완전한 정현파가 아니라도 Total Harmonic Distortion이 2~3%이면 별 문제가 없다. 그러나 직류 성분은 LVDT 성능에 영향을 많이 미치므로 거의 존재하지 않아야 한다. LVDT는 동작 원리가 기본적으로 변압기와 같으므로 Excitation으로 구형파나 삼각파를 사용해서는 안되며, 이 경우 선형성 및 감도 저하, Overshoot 발생, 온도 증가 등의 문제가 나타난다.

○ LVDT는 1차 측인 일정한 크기의 전압 Excitation과 위치에 따라 변하는 2차 측 저압의 크기를 비교하여 상대 위치를 검출하는 장치이며, Excitation 전압이 변하면 당연히 2차 측 전압도 같은 비율로 변한다. 한편, Excitation 주파수가 10% 변한다면 2차 측 전압은 1% 정도 영향을 받는 것으로 자료가 나와 있다. Excitation Source 발생 장치 요건 중 안정적인 전압 유지가 가장 중요하며, 근래는 디지털 기술을 이용하여 안정적인 전압의 구형파를 발생시킨 후 이 신호를 필터링 또는 적분하여 싸인파를 발생하는 기법을 많이 사용한다.

2.6 서보 제어기 Tuning

서보 제어기 제작사 추천에 따르면 Gain 조정을 한계 감도법 즉, Oscillation이 발생할 때 까지 Gain을 증가시켰다가 Oscillation이 소멸되는 상태에서 멈추도록 하였는데 실질적으로 유압 액추에이터의 응답이 빨라서 큰 값의 Gain에서도 진동은 쉽게 발생하지 않고 안정한 응답을 보였다.

2.6.1 P Gain 3에서의 액추에이터 응답

서보 제어기 입력신호(Command Signal)를 25% 스텝 증가시킨 후의 액추에이터 응답(Command Signal 25% → 50%로 스텝 증가시킨 후의 응답, 그림 6, P Gain 3)을 보면 시정수는 약 20초 정도이고, 서보전류 Peak 값은 45mA를 기록하였다(별도의 100% 스텝 응답 자료에서는 시정수 20초, 서보전류 Peak는 58mA였음).

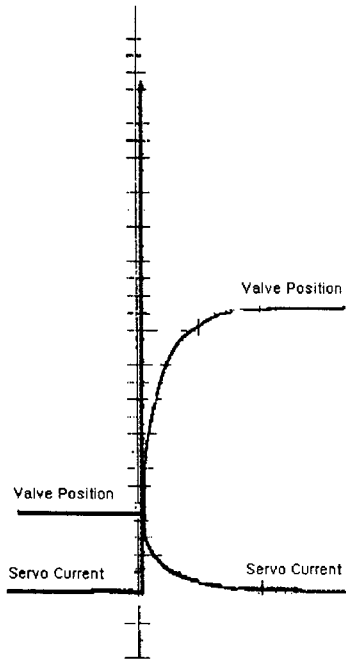


그림 6. P Gain 3에서의 응답

Servo Controller의 입력신호(Command Signal)의 변동에 대응하여 증기밸브를 신속히 제어하는 Slave 제어기 역할을 만족하는 조건에서 본다면 Gain 3으로도 충분하였다.

2.6.2 P Gain 6에서의 액추에이터 응답

그림 7은 같은 크기 25% 스텝응답이나 Gain은 6으로 증가시킨 후의 응답이다. 시정수는 5~6 초 정도로 단축되었으며 서보전류 Peak 치는 54mA를 보였다.

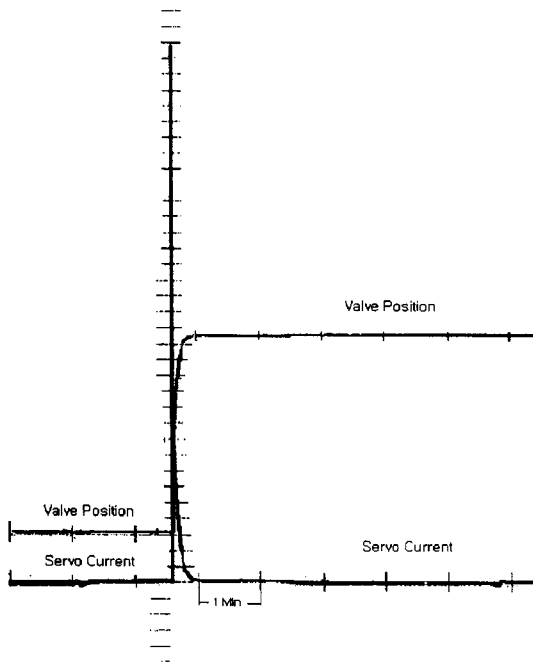


그림 7. P Gain 6에서의 응답

3. 결 론

실제 증기 터빈 속도와 출력제어에 사용된 일반적인 구성과 각 부분들의 동작 특성과 응답을 살펴 보았다. 복잡한 신호 처리는 마이크로 프로세서를 이용한 프로그램으로 구성하였고 여기서 나온 신호를 서보제어기의 입력 신호가 된다. 서보제어기에서는 디지털 시스템으로 부터 입력 신호를 받고 또한 유압 액추에이터의 위치 신호(LVDT Feedback Signal)를 받아 서로의 차이를 연산 증폭한 후 액추에이터를 구동함으로써 원하는 위치를 유지할 수 있게 된다.

터빈 운전은 디지털 시스템에 들어있는 복잡한 제어 프로그램에 의해서 이루어지지만 최종단에서 이 신호를 증폭처리하는 서보제어기, 서보밸브, 액추에이터 등의 동작이 신속 정확하지 않으면 원하는 제어성능을 만족시킬 수 없다. 우리가 사용했던 전기-유압 서보제어 계통의 성능은 프로그램에서 오는 신호를 소화시키는데 충분하였고 이 구성을 미리 위해 여러가지 시험과 자료수집을 하였다.

서보 제어기에서는 P Gain만을 사용하였으며, 유압 액추에이터의 동작이 신속하여 이 Gain을 크게 설정할 수 있었으나 서보밸브에 연속 흐르는 전류를 일정 값 이내로 유지하기 위해 3 정도로 설정하였다.

LVDT Excitation의 전압과 주파수는 기존 설비와 상당한 차이가 있었으나 별문제가 없었으며, 안정한 전압, 주파수를 공급이 사용에 전제조건이라 하겠다.

각 설비별로 좀더 자세한 특성과 제어신호에 대한 응답에 대해서 계속 연구, 분석하고 다음 기회에 그 내용을 소개하고자 한다. 끝.

【참 고 문 헌】

- (1) Moog 社, "Servo Systems Catalog" 1997
- (2) Jackson Szczybak, "LVDT Basics" 1997