

원자력 발전소용 급수펌프 터빈 속도제어를 위한 밸브 제어계통 시험 및 적용

*우주희, *김종안, *김병철, *최인규, **안병주
*한국전력공사 전력연구원, **삼창기업부설연구소

Valve Position Control for Feed Water Pump Turbine Speed Control of Nuclear Power Plant

* Woo Joo-Hee, * Kim Jong-An, * Kim Byoung-Chul, * Choi In-Kyu, ** Ahn Byung-Ju
* Korea Electric Power Research Institute, ** Sam Chang Enterprise Co.

Abstract - 원자력 발전소용 급수펌프 터빈의 속도제어 시스템을 개조하는데 중요한 요소인 밸브 제어 계통의 구성방법 및 각종 제어 상수를 시험을 통해 미리 파악하여 현장 적용시 발생될 문제점을 해결하고자 한다.

1. 서 론

원자력 발전소용 급수펌프 터빈은 1차계통인 증기발생기에 물을 공급하는 중요한 설비로서 원활한 급수가 이루어지지 않으면 1차측인 원자로의 불안정을 초래할 수 있다. 이를 위해 급수펌프 터빈의 속도제어가 중요한 역할을 담당한다. 적용 대상 발전소의 기존 제어시스템은 장기사용으로 인하여 제어카드의 노후화 및 신뢰성 저하, 예비품 예산 과다소요 및 생산 중단 예상, 단일 제어루프의 고장으로 인한 발전운전의 불안정과 같은 문제점이 상존하고 있다. 이와 같은 이유로 터빈 제어시스템의 성능 개선 필요성이 절실히 요청되고 있어 최선의 디지털 전기식 (DEHC : Digital Electro Hydraulic Control)으로 교체하고자 한다. 이를 성공적으로 수행하기 위해서는 급수펌프 터빈의 속도를 제어하는 최종 결정요소인 밸브 제어계통의 특성을 미리 파악하여 신규 설치되는 제어시스템을 사용하여 현장 적용시 발생될 문제점을 미리 파악하고자 하였다. 기존 시스템의 밸브제어계통은 일반적인 비례 및 적분 제어가 사용되며, 이를 그대로 현장 적용시 발생되는 문제점을 살펴보고, 이를 해결하기 위한 제어 알고리즘을 제시하고 그 결과를 본 논문에서 언급하고자 한다.

2. 본 론

2.1 전체 제어시스템의 구성

제어대상 플랜트의 전체 구성도는 그림 1과 같다. 전류 신호에 의해 서보밸브가 움직이면 Pilot Valve의 개도 변화가 발생되고, Pilot Valve의 개도 변화에 의해 유압 계통의 공급 및 배출되는 경로가 변하여 "Operating Cylinder"의 개도가 변한다. 이에 의해 최종적으로 증기 흐름을 제어하여 급수펌프 터빈의 속도가 제어된다. "Micronet"은 Woodward사의 삼중화 제어기 모델이며, 삼중화된 CPU 모듈과 입출력 모듈 등이 장착되며, 최소 5msec의 제어주기로 급수펌프 터빈의 속도제어를 위해 운전원의 명령 및 타 제어시스템과의 연계 운전을 수행할 수 있는 프로그램이 실행된다. "SPC"(Servo Position Controller)는 Pilot Valve의 위치 제어를 위해 사용되며, Pilot Valve의 개도검출을 위해 1개의 LVDT (Linear Variable Differential Transformer)가 설치되어 있으며 이는 VPT7로 표시되어 있다. "Operating Cylinder" 개도검출을 위해 2개의 LVDT가 설치되어 있으며, 이는 VPT1과 VPT6으로 표시되어 있다.

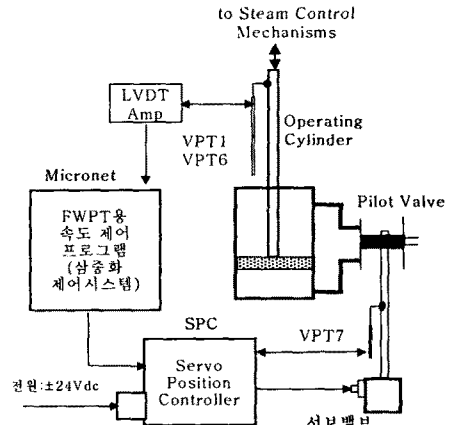


그림 1. 제어 대상 플랜트의 전체 구성도

밸브 제어계통 시험을 위한 제어 개념도는 그림 2와 같다.

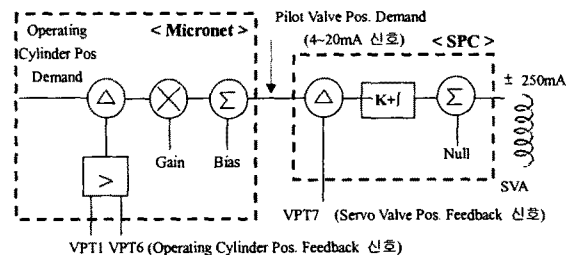


그림 2. 시험을 위한 밸브 제어계통 개념도

전체 제어구조는 Cascade 형태의 제어구조이며, 안쪽 루프는 Pilot Valve의 위치제어가 이루어지며, 바깥쪽 루프는 Operating Cylinder의 위치제어가 이루어진다. Micronet에서 이루어지는 바깥쪽 제어 루프의 최종 목표는 Pilot Valve의 위치 요구신호를 결정하는 것이고, 이는 "Operating Cylinder Pos. Demand"값(운전원이 설정한 FWPT의 속도요구값과 실제 급수펌프 터빈속도에 따라 결정되는 값)과 VPT1 및 VPT6의 신호에 의해 결정된다.

SPC에서 이루어지는 안쪽 제어루프의 최종 목표인 Pilot Valve의 위치 제어이며, 이는 Pilot Valve의 위치 요구신호 및 VPT7에 의해 결정된다. SPC의 내부 기능 개요도는 그림 3과 같으며, 컴퓨터와 통신으로 연결되어 SPC의 각종 설정(예를 들면, PID 제어방식, 개도검출 방식, 밸브위치 Calibration 및 현재 제어상태 감시 등)을 할 수 있다.

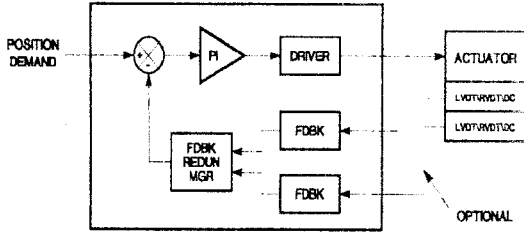


그림 3. SPC 내부 기능 개념도

현장시험을 통해 그림 1의 제어 구성에서 결정되어야 될 항목은 아래와 같다.

- 구성된 제어루프의 타당성 확인
- Micronet
 - 제어루프의 Gain 및 Bias
 - 다중화 시험 결과 확인 등
- SPC
 - 제어루프의 PI Gain 및 Null 전류
 - Pilot Valve의 위치 검출 기능 확인 등

이를 위해 현장 시험한 내용은 다음과 같다.

- SPC만 사용한 Pilot Valve 위치 제어 시험
- 전체 제어 루프에서의 제어 시험
 - 단위 계단 응답시험 및 Ramp 응답시험
 - 정상운전 중일때 한 개의 CPU Fault시 응답시험

2.2 SPC만 사용한 Pilot Valve 위치 제어 시험

전체 제어루프를 시험하기 이전에 미리 안쪽 제어 루프인 Pilot Valve 제어계통을 시험하고 적절한 제어상수를 찾아야 한다. SPC의 VPT7과 서보밸브측 구동전류를 연결하고, 컴퓨터와 SPC간을 Serial 통신으로 연결하여 SPC의 각종 환경을 설정할 수 있는 전용 프로그램 Tool을 사용하도록 구성하였다. 시험 결과 다음과 같은 최적 상수를 구하였다.

- 제어기 설정 : 비례분 동작
- LVDT 여자전압 : 4Vrms, 3kHz
- 전류 범위 : -250mA ~ 250mA
- 중립점 전류 : -21mA
- 최적 비례이득 : 3.0
- 최적 적분이득 : 0.3
- 서보밸브 저항 : 49Ω

2.3 전체 제어 루프에서의 제어 시험

Pilot Valve 제어계통을 위와 같이 조정한 이후 Micronet을 포함한 전체 제어시스템의 성능을 확인하기 위해 그림 1과 같은 구성을 하였다. 원래는 VPT6의 신호도 입력시켜야 하나 현장 여건상 VPT1만 사용하여 구성하였다.

가. 계단 응답시험 결과

Micronet에서의 이득을 0.35로 하여 50%와 80%의 단위계단 응답 시험한 결과 아래와 같은 결과를 보여주고 있다. 이때의 제어 프로그램 전체 실행주기는 20msec로 지정하였다. (이하 모든 그래프는 y축은 % 단위이고, x축은 초 단위이며 수치 1은 0.5초를 나타낸다)

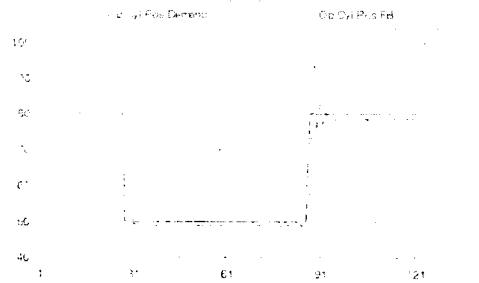


그림 4. 계단 응답시험 결과 (Operating Cylinder 측)

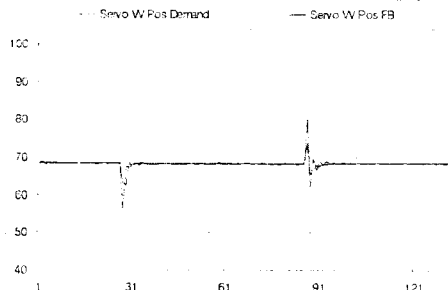


그림 5. 계단 응답시험 결과 (Pilot Valve 측)

나. 정상운전중인 CPU 한개 Fault 발생될 때 위 "가"와 같은 상태에서 CPU 한 개를 임의로 Fault 시켰을 때의 결과를 보여주고 있다. Fault 되는 순간에 0%로 떨어졌다가 나머지 정상인 모듈에 의해 (약 3초 정도 경과 후) 정상상태로 복귀되는 결과를 보여주고 있다.

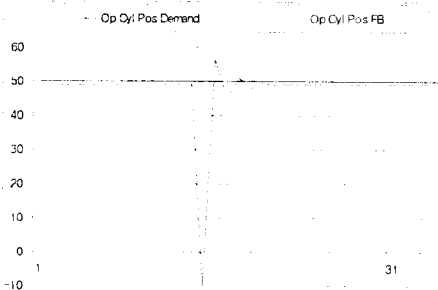


그림 6. CPU Fault시 시험 결과 1(Operating Cylinder 측)

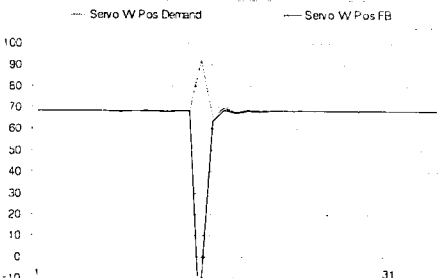


그림 7. CPU Fault시 시험 결과 1 (Pilot Valve 측)

이 실험 결과를 보면 Op. Cylinder 및 Pilot Valve밸브에 급격한 변동이 발생되어 바람직하지 못한 결과를 보여주고 있다.

다. 제어로직 보완 후 시험 결과

위 “나”의 시험결과를 보상해주기 위해 CPU 고장 검출 로직의 실행 주기를 5msec, 밸브제어 루프를 10msec로 단축하였다. 또한 Micronet에서 서보밸브측으로 나가는 출력신호에 상하한 제한기를 추가하여 Pilot Valve의 급격한 변동을 방지하도록 하였다. 아래에 그 시험 결과를 보여주고 있다. 아래의 그림을 보면 CPU 한개 Fault시 49%(정상상태)위치에서 1%정도 떨어짐을 보여주고 있으며(약 1.5초 경과후 정상상태 복귀), Fault 난 CPU가 정상으로 복귀시 약 5%정도 더 떨어졌다가 정상상태로 복귀(약 1.5초 경과후 정상상태 복귀)되는 결과를 보여주고 있다.

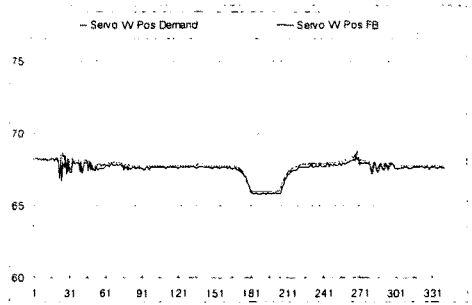


그림 11. 램프 응답시험 결과 (Pilot Valve 측)

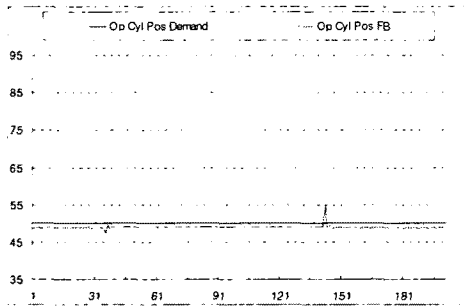


그림 8. CPU Fault시 시험 결과 (Operating Cylinder 측)

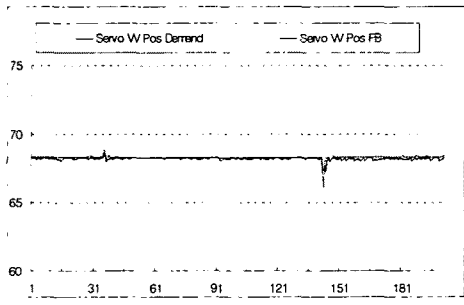


그림 9. CPU Fault시 시험 결과 2 (Pilot Valve 측)

이상의 시험결과를 종합하여 Micronet에서의 최종으로 조정된 제어상수는 아래와 같다.

- 최적 비례이득 : 0.35
- 최적 바이어스 : 68%
- Cylinder High Limiter : 70%
- Cylinder Low Limiter : 66%

라. 램프 응답 시험 결과

위 “다”의 상태에서 정상운전중 많이 제어되는 개도 범위인 0~20% 사이의 램프응답시험을 하였다.

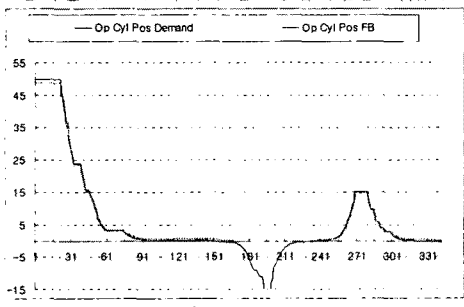


그림 10. 램프 응답시험 결과 (Operating Cylinder 측)

3. 결 론

원자력 발전소용 급수펌프 터빈의 속도제어 시스템을 기존의 아날로그 방식에서 디지털 삼중화 제어시스템으로 개조하기 위해 가장 중요한 밸브제어 기능을 시험하였다. 제어 루프는 Pilot Valve와 Operating Cylinder 위치 제어를 위해 Cascade 형식을 구성하였고 각각은 PI 제어를 사용하였다. 시험을 통해 SPC 측의 PI Gain 및 Null 전류를 구하였고, Micronet측의 Gain 및 Bias를 구한 후 시험하였으며, 비정상 상태 발생시 과도한 신호 변화를 방지하기 위해 Micronet측의 출력신호 요구값에 상하한 제한치를 추가로 구현하여 시험한 결과 양호한 특성을 얻을 수 있었다. 향후 발전소 현장 개조후 시운전시 초기 제어상수로 사용할 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 고리2발전소, 매뉴얼, “급수펌프 터빈 밸브 구동기 정비 및 운전 편람”
- [2] Woodward사, 매뉴얼, “Micronet Digital Control”
- [3] 정창기 외 3명, “원전 Feed Water Pump Turbine 제어시스템 개발”, 전력연구원 중간보고서, 2003