

500MW급 석탄화력발전소 보일러 급수펌프 유량 제어기 개발

논 문
59-9-24

The Development of Feed-Water Flow Controller of Boiler Feed-Water Pump in 500MW Class Coal-Fired Power Plant

임 건 표[†] · 최 인 규^{*} · 박 두 용^{**} · 정 태 원^{***} · 김 건 중^{***}
(Geon-Pyo Lim · In-Kyu Choi · Doo-Yong Park · Tae-Won Jeong · Gun-Jung Kim)

Abstract - The boiler feed-water pump controllers which can be applied to 500MW class coal fired power plants was developed. The validity of the developed controllers was shown via the applied test result in a power plant. It is expected that the developed controllers are used to retrofit the existing controllers that have surpassed their expected service life and have limited spare parts, and contributes to the stable operation of plants. Based on the collected data and analysis, new control schemes were developed and implemented during the overhaul period in the new control systems. During normal operation, feed water could be supplied to the boiler with the capability of the 1600t/h flow without any problems in automatic mode of controllers. In this study, the feed-water pump controllers were developed successfully. In addition, it is expected that the developed controllers can make the plant operation more stable and can be applied to a lot of power plants.

Key Words : Feed-water pump, Controller, Power plant

1. 서 론

본 논문은 발전소 증기발생기인 보일러에 물을 공급하는데 필요한 보일러 급수펌프 유량제어기가 구형 아날로그 제어시스템이어서, 노후화 된 이를 디지털 제어시스템으로 교체하였는데, 교체한 디지털 제어시스템을 어떻게 설계하고 개발했는지를 작성한 것이다. 또한 디지털 제어시스템을 현장에 적용하였는데, 만족한 결과를 얻었다.

개발 대상인 500MW급 석탄화력발전소는 2009년 현재 우리나라 발전설비 전체용량 70,353MW 중 약 15%인 11,000MW를 담당하고 있다. 500MW급 석탄화력발전소의 기계설비는 설계수명이 30년 이상으로 여전히 사용연한 내에서 운전이 가능하나, 제어설비는 내용수명이 12년으로 이미 사용연한을 초과하여 주기적인 정비와 교체를 시행하여 왔다. 이 제어설비는 제작시기가 70년대 말에서 80년대 초에 개발된 제품을 발전소 건설시 설치·운영함으로써 기능 저하 및 고장증가로 운용비용이 증가하고 있다. 또한 제작사의 생산중단으로 예비품 확보가 곤란하여 유지정비가 어려운 현실이며, 제어기의 이중화 또는 삼중화를 고려하지 않아 고장시 바로 급수제어계통이 정지되는 문제점을 안고 있다. 실례로 2007년 11월 500MW 석탄화력발전소에서 정지사

고가 발생하였는데, 기존 제어기가 데이터 저장 및 분석, 자기진단, 경고 기능 등이 없어 아무런 경보나 사전 징후 없이 밸브가 모두 닫혀 급수펌프가 정지하는 사고가 발생하였다. 이를 계기로 디지털 제어시스템 개발이 필요하게 되었으며 타발전소에서도 본 연구결과를 현장설비에 적용 중에 있다.

이처럼 국내 전력공급의 큰 비중을 차지하고 있는 500MW급 석탄화력발전소의 급수펌프 유량제어기가 설비 노후화와 유지정비 비용 급등, 투자비 축소 등으로 해결해야 할 사안들이 많아지고 있는 반면, 제어기술은 급속도로 발전하여 설비를 개조하는데 시간이 단축되고 비용이 저하하므로, 경제성과 운영효율이 좋아지는 측면에서 제어시스템의 교체가 필요하게 되었다.[1]

2. 보일러급수펌프 계통

보일러 급수펌프 계통은 그림 1과 같이 각 펌프가 500MW 발전시 공급해야 하는 급수량의 55%를 공급할 수 있는 가변속 터빈구동 펌프(Boiler Feed Water Pump Driven by Turbine, BFPT) 두 대와 30%를 공급할 수 있는 모터구동 펌프 한 대로 구성된다.[2]

모터구동 펌프는 기동 및 비상용으로 사용하며 이 논문에 관련된 부분은 가변속 터빈구동펌프 두 대에 관한 것이다.

가변속 터빈구동 급수펌프는 외부로부터 공급받은 증기회 그림 2의 3번 저압증기 유량제어밸브에 의해 유량을 조절하여 속도를 조절한다. 그림 2의 1번은 서보 밸브, 2번은 파일럿 밸브, 4번은 고압증기 유량제어밸브, 5번은 급수펌프 제어기, 6번은 디지털 원격 드라이버를 나타낸다.[3]

고압증기 유량제어밸브는 저압증기 유량제어밸브로 제어

* 정 회 원 : 한전전력연구원 선임연구원
** 정 회 원 : 한전전력연구원 책임연구원
*** 정 회 원 : 충남대학교 교수
† 교신저자, 정회원 : 한전전력연구원 선임연구원
E-mail : kepcolim@kepcoco.kr
접수일자 : 2010년 4월 12일
최종완료 : 2010년 8월 16일

할 수 없는 시점이 되면 캠에 의해 열리는 기계적 제어 밸브이므로 제어용 프로그램이 필요하지 않아 본 논문에서는 제외하였다.

3. 프로그램 설계

프로그램은 급수 주제어기로부터 각 펌프에 대한 제어 요구 신호인 속도 설정값을 입력받아 저압증기 유량제어밸브, 파일릿 밸브, 서보 밸브를 제어하는 부분이다. 프로그램은 자동 및 수동 모드 선택 프로그램, 기동 및 정지 프로그램, 속도 추종 프로그램, 원격 속도 설정 프로그램, 속도 목표값 선택 프로그램, 속도감시 프로그램, 증기유량 제어밸브 프로그램, 증기유량 제어밸브 위치감시 프로그램 등 총 20개 프로그램으로 구성하였다.

본 논문은 20개의 프로그램 중 자동제어와 급수펌프 보호용 정지 프로그램 부분 등 세 개의 프로그램에 대한 것이다. 프로그램에는 기존에는 없는 계측기 상태 감시 및 다중화, 건전한 계측기의 자동 선택, 각종 경보, 자동수동 모드 선택, 피드포워드 기능, 가변 비레이드 및 적분시간 등의 기능도 추가하였다.

제어기는 기존의 비레이드, 적분시간을 이용할 수 있는 비례·적분·미분 제어기를 사용하였다. 스미스 예측기, 무어 분석 예측기, 달린 알고리즘 등의 사용을 고려했으나, 밸브 동작에 데드 타임이 거의 없어 사용효과가 없고, 메모리를 차지하고, 조정이 어렵고 장시간이 소요되므로, 경제적으로 사용가치가 낮아 사용하지 않았다.[4] 또 퍼지 제어도 300MW 화력발전소 드럼 수위 제어에 시도하기 위해 모의 실험을 한 예는 있으나 여전히 시험단계로 발전소의 멀티루프에 적용하기 위해서는 많은 튜닝요소와 그 요소들의 변화에 따른 체계적인 분석이 필요한 수준이므로 발전소 여건상 장시간 시험 조정이 어려워 사용하지 않았다.[5][6]

개발한 프로그램은 오베이션 시스템에 설치한 후 현장에서 무부하 시험과 부하시험을 통해 오베이션 시스템과 서보 위치제어기를 조정하여 실제로 발전소에 적용하였다. 처음부터 부하시험으로 실제 급수를 공급하면서 제어기를 조정할 경우 급수 제어가 보일러 압력과 온도, 터빈으로 공급하는 증기유량에 직접적인 영향을 주어 발전소가 정지할 수 있으므로, 급수를 공급하지 않고, 밸브를 동작시키는 유압공급설비만 정상화하여 밸브를 조정하는 무부하 시험을 먼저 시행하였다.[7]

4. 보일러 급수펌프 제어기 프로그램 개발

4.1 제어 프로그램

기존 제어기에서는 우드워드 505와 디지털 원격 제어기의 액정 및 터치패드를 통해 비레이드와 적분시간을 조정하는 기능만이 있었으며, 신호감시, 데이터 저장 등의 프로그램이 없었다. 또한 보일러 제어 시스템에서 자동, 수동, 기동, 정지, 속도 설정값 신호만을 수신하였다.

그림 3은 보일러 급수펌프 제어기와 서보위치제어기 구성도이다. 본 논문에서는 전체 20개 프로그램 중 그림 3에 나타나 있는 전체적인 밸브제어 흐름과 관련되고 차후 제어변수 조절을 위해 필요한 자동제어 프로그램인 증기유량 제어 밸브 프로그램 및 파일릿 밸브 프로그램, 급수펌프 보호 역할을 하고 있는 속도제어계통 고장 및 과속도 정지 프로그램을 다루었다.

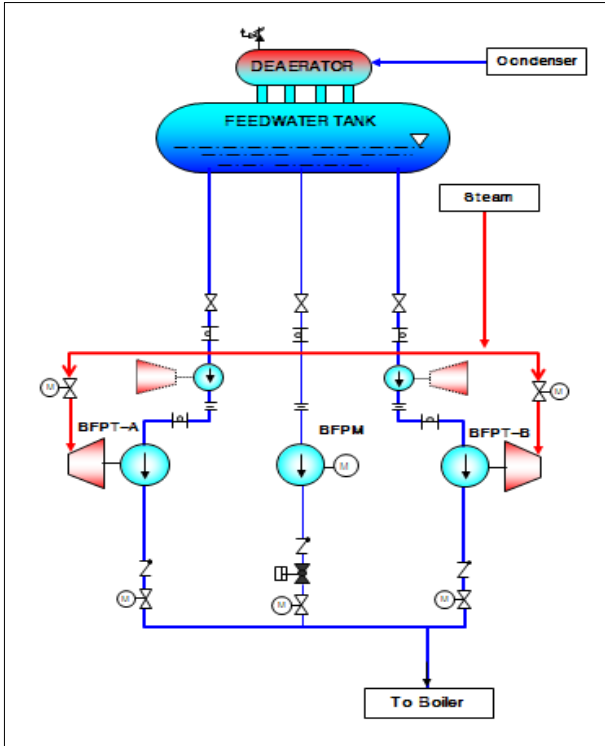


그림 1 보일러 급수펌프 계통
Fig. 1 Feed water pump system

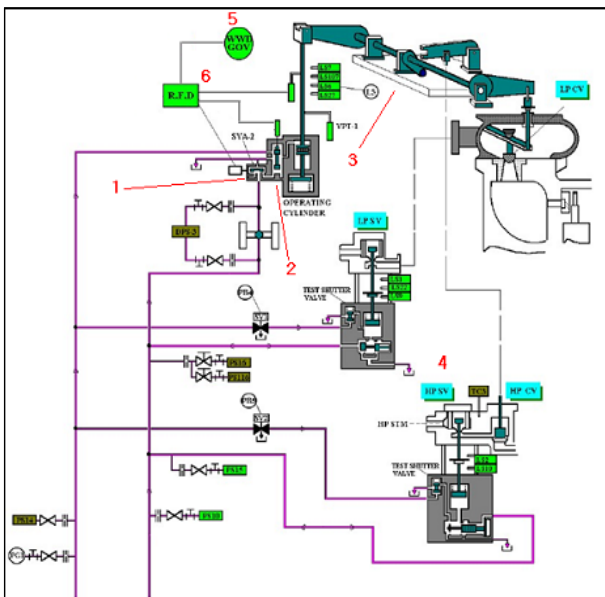


그림 2 급수펌프 밸브 계통의 제어 구성
Fig. 2 The control configuration of feed water pump valve system

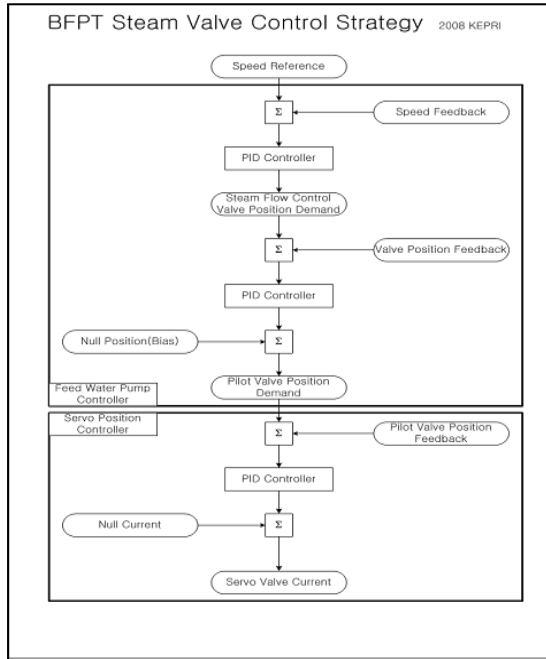


그림 3 보일러 급수펌프 제어기 및 서보위치제어기 구성
Fig. 3 Boiler feed water pump and servo position controllers

제어변수는 증기유량 제어밸브 프로그램의 속도 오차에 대한 비례적분 제어기 가변 및 고정 비례이득과 적분시간, 비례적분 제어기 속도오차 조정, 파일럿 밸브 프로그램의 증기유량제어밸브 위치 설정값과 위치 귀환신호간 오차에 대한 비례적분 제어기 비례이득과 적분시간, 비례적분 제어기 위치오차 입력변환에 의한 피드포워드 기능의 바이어스, 파일럿 밸브 중립점, 서보위치제어기의 비례이득, 중립점 전류이다.

4.1.1 속도 제어 프로그램

그림 4는 속도 설정값으로부터 급수펌프 증기유량 제어밸브 위치 설정값 신호를 제어하는 프로그램을 설명한 순서도이다. 기존의 선형 가변 위치 전송기는 감시용으로만 사용하도록 했으며 새로 설치한 두 대는 위치 전송기 선택 프로그램에서 각각의 이상여부를 점검하고 정상적인 신호를 선택해 입력되도록 하였다. 또한 전송기의 이상 유무를 경보하여 고장발생 즉시 원인 파악 및 조치가 가능하도록 하였다. 증기유량 제어밸브 위치 귀환신호는 급수펌프의 안정적인 운전을 위한 최소 유량인 2,300rpm 이상에서는 유량증가에 따라 적절한 동작을 위해 비례이득과 적분시간을 가변하여 설정하고 조정할 수 있다. 반면 급수펌프 기동시 급수펌프 속도 귀환신호가 2,300rpm 이하인 경우에는 안정운전을 위해 비례이득 및 적분시간을 고정하였다.

가변 비례이득은 증기유량 제어밸브 위치가 50% 이하일 경우 6으로 설정하고, 유량이 급속히 증가하는 50% 이상에서 100%까지는 직선상에서 증가해 100%에서 20으로 설정하였다. 이는 유량이 증가할 경우 충분한 동작이 가능하도록 조절하기 위한 것이다. 가변 적분시간은 증기유량 제어밸브 위치 전제구간에서 6초로 설정하였다. 2,300rpm 이하인 경우 펌프 최소유량보다 적은 유량을 제어하므로 불안정

한 범위를 최대한 빠르게 제어하기 위해 비례이득은 10, 적분시간은 5초로 초기 설정하였다.

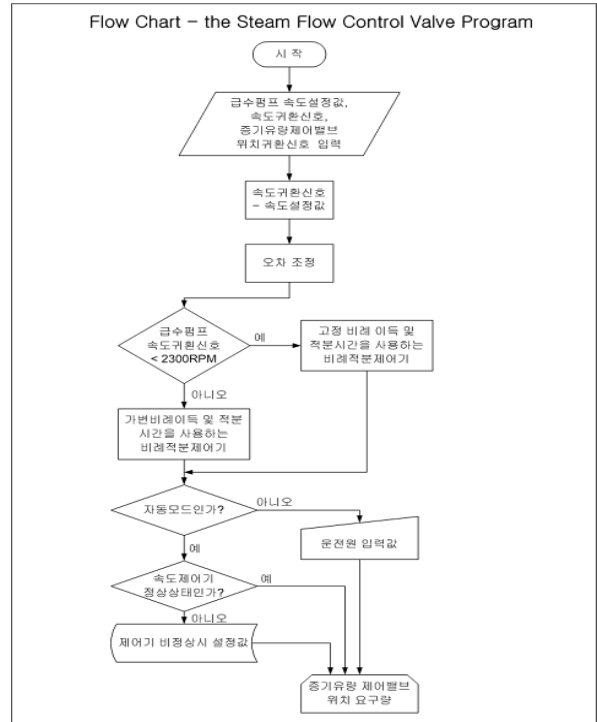


그림 4 증기유량 제어밸브 프로그램 순서도
Fig. 4 The steam flow control valve program flow chart

급수펌프 속도 귀환신호는 속도센서 4개가 전송한 속도신호의 정상여부를 확인해 정상신호의 평균값을 사용한다. 기존에는 속도 이상여부를 감시하는 프로그램이 없었으나 개발한 프로그램에는 속도센서 이상여부, 속도센서간 신호편차 정보, 센서 이상시 평균값 계산에서 제외 등의 프로그램을 추가하였다. 또한 속도귀환신호는 속도 설정값과 오차를 계산해 그 결과를 비례적분 제어기에 입력하기 전 속도에 따른 증기유량 제어밸브의 동작을 조정할 수 있도록 입력값의 크기를 변환할 수 있는 오차조정 모듈을 설정하였다.

오차에 대한 비례적분 제어기 출력은 자동수동 전환기가 자동 모드일 경우 다음 기능블록으로 전달되며 수동 모드일 경우에는 운전원이 입력한 값 또는 수동모드로 전환되는 순간의 최종 저장값을 전달한다. 자동수동 전환기는 계속 새로운 입력값을 저장하고 다른 값이 입력될 경우 저장값을 갱신하며 운전원 단말기에 저장된 현재값을 지시하도록 설정하였다.

급수 주제어기가 정지하면 속도제어가 불가능하므로 자동수동전환기 출력 대신 속도제어 불가능조건 만족시 출력하도록 설정한 증기유량 제어밸브 위치 설정값 "0"을 출력하여 급수펌프가 정지되도록 하였다.

4.1.2 파일럿 밸브 제어 프로그램

그림 5는 증기유량 제어밸브 위치 설정값으로부터 파일럿 밸브 위치 설정값을 제어하기 위한 프로그램을 설명한 순서도이다.

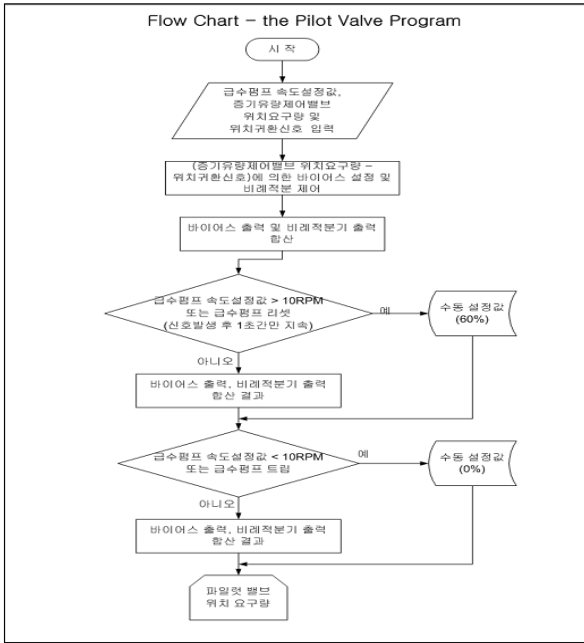


그림 5 파일럿 밸브 프로그램 순서도
Fig. 5 Pilot valve program flow chart

증기유량 제어밸브 위치귀환신호와 위치 설정값은 비례적분 제어기로 입력되며 비례득과 적분시간을 조정하였다. 증기유량 제어밸브 위치귀환신호와 위치 설정값간의 오차를 계산한 결과는 비례적분제어기 출력을 예상한 바이어스를 설정하는데 사용하며 설정값은 비례적분 제어기 출력과 합산한다. 바이어스는 파일럿 밸브 위치 설정값에 대한 피드포워드 기능을 한다.

바이어스 설정값 중 증기유량 제어밸브의 위치귀환신호와 위치 설정값간의 오차가 없는 경우 설정값은 파일럿 밸브 중립점으로, 급수펌프 속도가 설정값과 일치해 증기유량 제어밸브가 현 상태를 유지하는 지점이다. 중립점을 적절히 설정하지 않을 경우 파일럿 밸브가 요동하게 되며 요동이 심할 경우에는 발산하게 되어 유량제어가 불가능하게 되므로 시험 및 조정을 통해 최적 위치를 설정하였다.

급수펌프가 리셋되거나 급수펌프 속도 설정값이 10rpm 이상이 되면 1초간의 펄스 신호가 한번 발생하여 파일럿 밸브 위치 설정값은 기동 초기나 리셋을 위한 파일럿 밸브 위치 설정값인 60%로 설정하였다. 이는 중립점 근처로 밸브를 동작시켜 갑작스런 동작으로 인한 흔들림을 방지하고 기동을 준비하기 위해 설정하였다. 급수펌프는 기동시 급수펌프에 연결된 터닝기어를 10rpm 미만으로 회전시켜 예열을 하는데, 예열이 완료되면 10rpm으로 속도를 올리고, 이때 터닝기어는 정지하고 증기를 이용하여 회전을 하게 된다. 급수펌프가 리셋되거나 급수펌프 속도 설정값이 10rpm 이상이 되어 1초간 펄스 신호가 나가고 난 뒤, 또는 급수펌프 속도 설정값이 10rpm 이하이거나 급수펌프 리셋 신호가 없으면 비례적분 제어기 출력과 바이어스 설정값을 합산한 결과가 다음 기능블록으로 전달된다.

이렇게 결정된 신호는 급수 주제어기가 정지하면 속도제어가 불가능하게 되므로 속도제어 불능조건 만족시 출력하도록 설정한 파일럿 밸브 위치 설정값 "0"이 출력되어 급수

펌프가 정지하도록 하였다.

파일럿 밸브 위치 설정값은 서보위치제어기로 입력되어서 서보 밸브 코일 여자 요구량을 결정한다. 파일럿 밸브 위치 설정값은 오베이션 시스템에서 4~20mA 전류신호로 전송되어서 서보위치제어기에 입력된다.

4.1.3 속도제어계통 고장 및 과속도 방지

그림 6은 급수펌프 속도제어계통 고장 및 속도제어 불능에 의한 과속도 상황 발생시 급수펌프를 정지하여 보호하기 위한 프로그램이다.

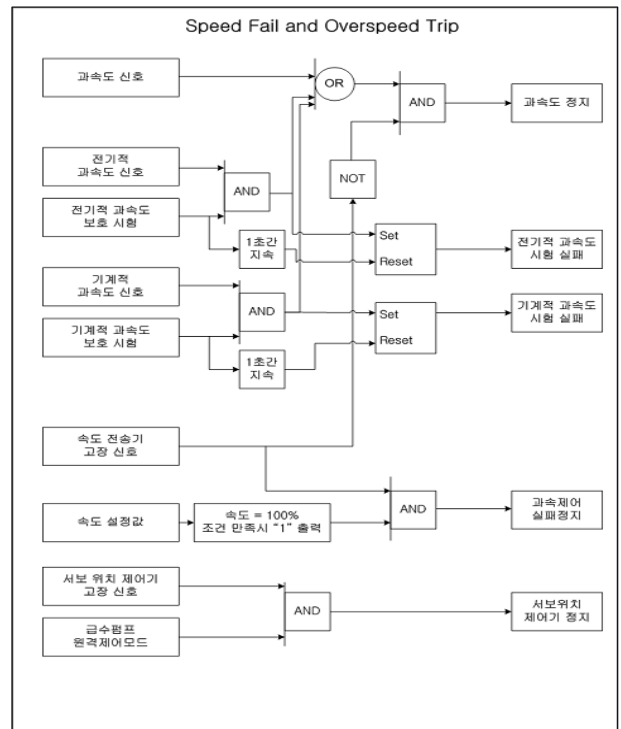


그림 6 속도제어계통 고장 및 과속도 방지 프로그램
Fig. 6 Speed fail and overspeed trip program

실제 급수펌프 속도가 속도 감시 프로그램의 과속도 설정값 6,207rpm 이상이 되면 과속도 신호가 발생한다. 과속도 신호는 전기적 과속도 시험 중 전기적 과속도 검출장치로부터 과속도 신호가 발생하거나, 기계적 과속도 시험 중 기계적 과속도 검출장치로부터 과속도 신호가 발생하는 경우에도 발생한다. 과속도 신호는 속도 전송기 고장신호가 없는 경우 곧바로 과속도 정지 신호를 발생하여 급수펌프가 정지한다. 과속도 시험 중 과속도 검출장치에 의해 과속도가 검출되면 시험이 실패하게 된다. 과속도 신호가 사라지고 과속도 보호시험을 다시 시행하면 1초간 지속된 펄스 신호가 발생하여 기계적 과속도 시험 실패 경보가 리셋 된다.

전기적 과속도 신호는 6,207rpm이며, 전기적 과속도 신호에 의한 급수펌프 정지가 실패할 경우 기계적 과속도 신호에 의해 급수펌프를 정지시키는 데 6,300rpm으로 설정하였다.

속도 전송기가 고장 난 상태에서 급수 주제어기가 급수유량을 증가시키기 위해 급수펌프 속도 설정값을 계속 올리면 속도 설정값이 100%까지 올라갈 경우가 발생하는 데 이때

제어실패로 급수펌프가 정지한다.

급수펌프 제어가 원격제어 모드 상태에서 서보위치제어기로부터 고장신호가 발생하면 서보위치제어기 정지 신호가 발생하고 급수펌프가 정지한다.

5. 시험 및 조정

5.1 급수펌프 제어변수 설정

제어변수 조정 위치는 그림 7 회색부분과 같다.

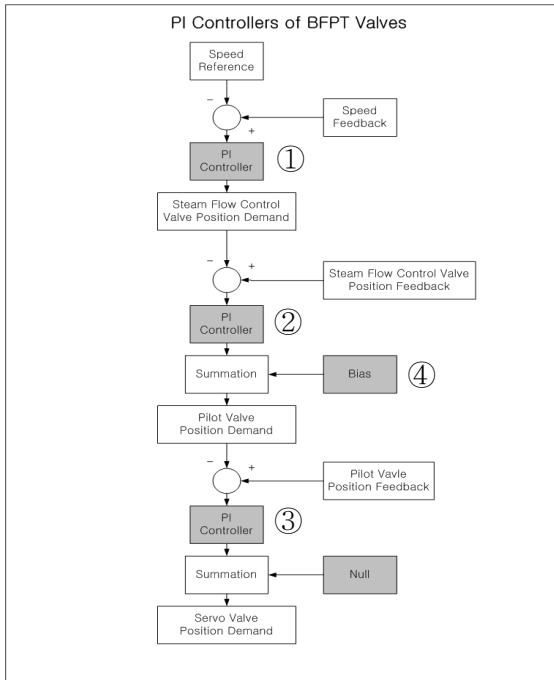


그림 7 PI 급수펌프 밸브 제어기
Fig. 7 PI controllers of BFPT Valves

유량제어루프가 상당히 빠르고 자주 노이즈를 발생하므로 비례동작은 크고 적분동작은 적게 해서 루프 전체의 안정성을 향상시켰으며, 급수펌프 A, B의 비례이득과 적분시간 초기 설정값은 기존 값을 참고하여 표 1과 같이 설정하였다.

표 1 비례이득(P) 및 적분 시간(I, sec)(그림 7)

Table 1 Proportional gain(P) and integral time(I, sec)(Fig. 7)

구 분		① 비례적분제어기 (2,300rpm 기준)		비례적분 제어기	비례적분 제어기
		이하시	이상시		
BFPT-A	P	10	6	0.08	50
	I	5	6	60	0.2
BFPT-B	P	10	6	0.09	60
	I	5	6	60	0.25

그림 7의 ④ 급수펌프 A, B 제어기 바이어스는 표 2와 같이 설정하였다.

표 2 바이어스(파일럿 밸브 위치설정값 피드포워드, %)

Table 2 Bias(Pilot valve demand feedforward, %)

구분	위치귀환신호 - 위치설정값	급수펌프-A 바이어스(④)	급수펌프-B 바이어스(④)
1	-100	65.9	67
2	-50	66.15	67.25
3	0	66.4	67.5
4	50	66.65	67.75
5	100	66.9	68

제어 시스템 교체 후 밸브 유압계통을 정상화하여 실제로 밸브를 구동하여 최초 동작상태를 확인하였다. 증기유량 제어밸브 위치 설정값을 단말기에서 직접 수동으로 변경하면서 서보 밸브, 파일럿 밸브, 증기유량 제어밸브의 응답상태를 확인하였으며, 증기유량 제어밸브의 위치 설정값 대비 위치 귀환신호가 급수펌프 A, B 각각 약 3~62%, 35% 적게 나타나 제어범위를 벗어나고 오차가 발생하였다. 또한 리셋 시 증기유량 제어밸브가 100%까지 열렸다가 닫히는 현상도 발생하였다.

급수펌프 A, B 증기유량 제어밸브 초기 조정을 하였다. 계단응답 시험을 하면서 그림 7의 ① 비례적분 제어기 비례이득 및 적분시간을 변경한 후 동작상태를 확인해서 제어기 조정을 시행하였다.

급수펌프 A의 경우 밸브 개방시 밸브 위치 설정값에 도달하는데 지연이 발생하여 적분시간을 시행착오법으로 60에서 20으로 조정하여 시험한 결과 그림 8과 같이 지연발생이 줄어들고 양호한 결과를 얻을 수 있었다.[8]

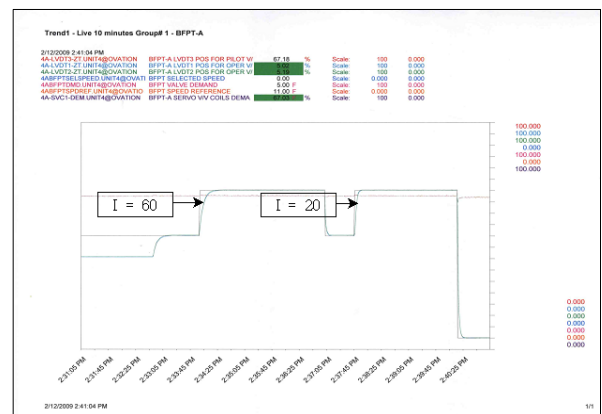


그림 8 파일럿 밸브 적분시간 조정 후 결과

Fig. 8 The result by adjustment of integration time of pilot valve

급수펌프 A/B 모두 조정을 통해 밸브 제어가 가능하게 되어 부하시험을 실시하였다.

5.2 급수펌프 제어기 부하시험

부하시험 및 조정은 그림 9와 같이 발전소 기동시 증기유량 제어밸브에 실제 증기를 공급하면서 제어 시스템의 제어 상태를 확인하고 조정하였다. 계통 병입 전에는 보일러 급수를 공급하는 상태에서 운전원이 원격 제어로 속도 설정값

을 주고 시험 조정하였으며, 계통 병입 후에는 운전 및 제어가 안정된 상태가 되면 전체 제어를 자동제어모드로 전환하여 시험하였다. 전체 자동제어모드에서는 속도 설정값이 발전소 최상위 신호로부터 발생하여 실제 급수펌프의 속도 귀환신호와의 오차를 최적의 상태로 제어하는지를 점검하고 조정하였다.

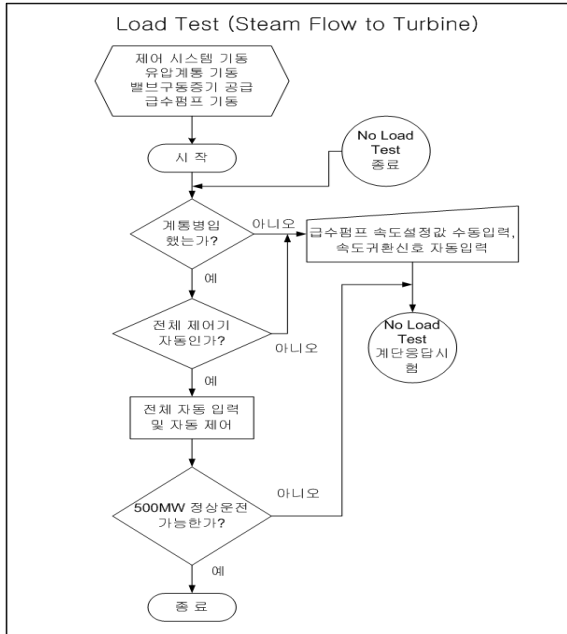


그림 9 부하시험 순서도

Fig. 9 Load test(steam flow in control valve)

계통병입 전 급수펌프 A의 경우 그림 10과 같은 결과를 나타냈다.

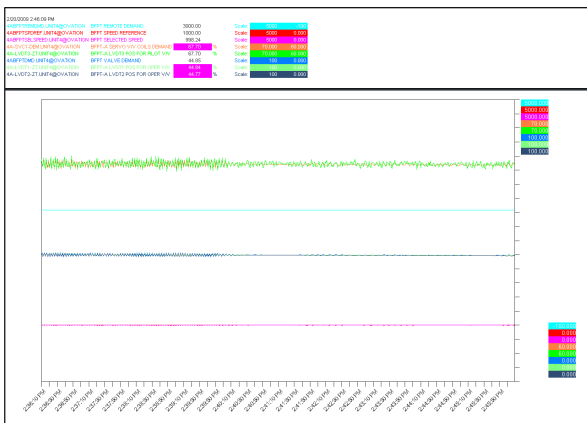


그림 10 계통병입 전 급수펌프 A 부하시험 및 조정

Fig. 10 Load test and adjusting of BFPT-A before synchronization

그림 10의 청색 유량제어밸브 위치 설정값과 녹색 위치 귀환신호가 4~5%의 요동을 하고 있다. 계통병입 전 급수펌프 A에 의해 급수를 보일러로 가압하는 경우 무부하시 설정한 비레이득이 상대적으로 커 조정이 필요하였다. 그림

10 중간부분 이후는 유량제어밸브의 비레이득을 줄여 요동을 제거한 결과이며, 조정한 결과는 표 3과 같다.

표 3 급수펌프 A 증기유량 제어밸브 비레이득 조정

Table 3 Proportional gain of BFPT-A steam flow control valve

구 분	조정 전		조정 후		
	2,300rpm 기준		2,300rpm 기준		
	이하시	이상시	이하시	이상시	
BFPT-A	P	10	6	8	5

급수펌프 B의 경우에도 급수펌프 A와 마찬가지로 그림 11과 같이 계통병입 전 유량제어밸브가 45~68% 범위에서 심하게 요동하였다.

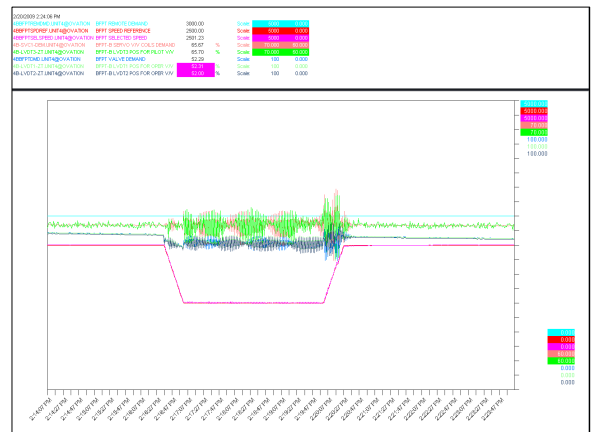


그림 11 계통병입 전 급수펌프 B 부하시험 및 조정

Fig. 11 Load test and adjusting of BFPT-B before synchronization

그림 11과 같이 급수펌프 A보다 심하게 요동이 발생했으며 이로 인한 파일럿밸브 요동도 함께 증가하였다. 그림 12 뒷부분은 비레이득 조정을 통해 요동을 제거한 결과이며 조정한 내역은 표 4와 같다.

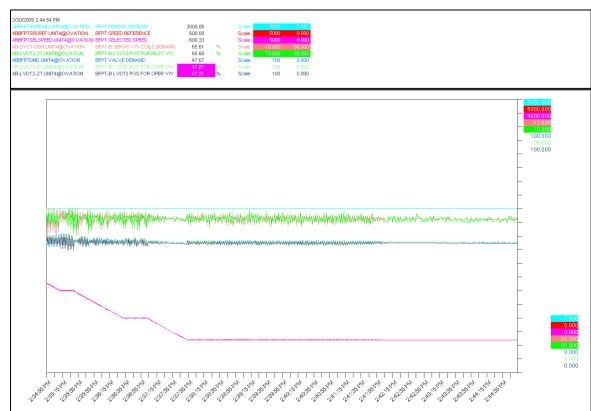


그림 12 계통병입 전 급수펌프 B의 부하시험 및 조정 결과

Fig. 12 The result of load test and adjusting of BFPT-B before synchronization

표 4 급수펌프 B 증기유량 제어밸브 비레이득

Table 4 Proportional gain of BFPT-B steam flow control valve

구 분		조정 전		조정 후	
		2,300rpm 기준		2,300rpm 기준	
		이하시	이상시	이하시	이상시
BFPT-B	P	10	6	6	5

계통 병입 전 부하시험 및 조정을 한 후 계통 병입 후 시험을 하였다. 계통 병입 후에는 보일러 과열기 및 재열기 온도 저감을 위해 급수펌프 중간단과 출구측에서 급수를 각각 최고 200t/h, 100t/h 가량 취출해 사용하며 압력 및 온도 변화로 인한 급수 주제어기 제어 요소 또한 급변하게 된다. 계통 병입 전 급수는 보일러로 공급되던 급수가 가열과정을 거쳐 다시 급수펌프로 순환되며, 계통 병입 후 보일러 온도가 올라가면 급수는 보일러 과열기 입구에서 모두 포화증기가 되고 과열기 입구의 온도로부터 급수 주제어기가 급수유량을 설정하므로 기동시 제어 요소 변화가 심하게 된다. 이러한 요소들이 계통병입 후 유량제어 밸브 요동을 유발하는 원인으로 작용한다.

급수펌프 A의 경우 계통병입 후 속도 설정값에 대한 귀환신호 응답상태는 그림 13 및 표 5와 같았다.

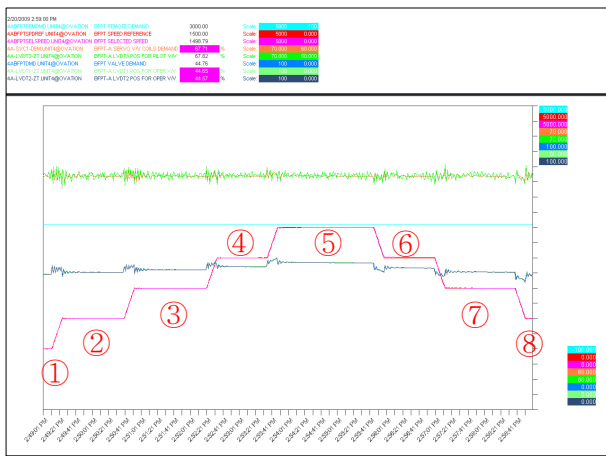


그림 13 계통병입 후 급수펌프 A 부하시험 및 조정

Fig. 13 Load test by speed error of BFPT-A after synchronization

표 5 계통병입 후 급수펌프 A 부하시험 및 조정시 속도 오차(rpm)

Table 5 Speed error of load test of BFPT-A after synchronization(rpm)

구 분	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
속도 설정값	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	2,500	2,000	1,500
속도 귀환신호	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000	2,500	1,500	1,500

속도 변화시 유량제어 밸브가 요동했으며 유량제어밸브의 요동으로 과열기밸브가 이를 제어하기 위해 요동하였다. 계통병입 전에 조정한 유량제어 밸브의 비레이득을 조정하여 요동 현상을 제거했으며 비레이득 조정 내용은 표 6과 같다.

표 6 계통병입 후 급수펌프 A 증기유량 제어밸브 비레이득 조정

Table 6 Proportional gain of BFPT-A steam flow control valve

구 분		조정 전		조정 후	
		2,300rpm 기준		2,300rpm 기준	
		이하시	이상시	이하시	이상시
BFPT-A	P	8	5	5	4

급수펌프 B의 경우 계통병입 후 속도 설정값에 대한 귀환신호 응답상태는 표 7 및 그림 14와 같이 나타났다.

표 7 계통병입 후 급수펌프 B의 부하시험 및 조정시 속도 오차(rpm)

Table 7 Speed error of load test of BFPT-B after synchronization(rpm)

구 분	①	②	③	④	⑤	⑥
속도 설정값	1,000	1,500	2,000	2,500	2,000	1,500
속도 귀환신호	1,000	1,500	2,000	2,500	2,000	1,500



그림 14 계통병입 후 급수펌프 B 부하시험 및 조정

Fig. 14 Load test by speed error of BFPT-B after synchronization

급수펌프 A와 마찬가지로 속도 변화시 유량제어 밸브가 요동하였다. 급수펌프 A에 비해서는 아주 적은 폭이지만 3~4% 가량의 유량제어밸브 요동으로 서보 밸브가 이를 제

어하기 위해 요동하였다. 계통병입 전에 조정한 유량제어 밸브의 비례이득을 조정하여 요동 현상을 제거했으며 비례이득 조정 내용은 표 8과 같다.

표 8 급수펌프 B 증기유량 제어밸브 비례이득 조정
Table 8 Proportional gain of BFPT-B steam flow control valve

구 분		조정 전		조정 후	
		2,300rpm 기준		2,300rpm 기준	
		이하시	이상시	이하시	이상시
BFPT-B	P	6	5	5	4

부하시 발전기 최대출력에서 최종시험 및 조정을 하였다. 지금까지는 급수펌프 제어기에서 속도 설정값을 수동으로 입력하거나 급수 주제어기에서 운전원이 속도 설정값을 수동 입력하였다. 급수 주제어기가 상위 신호인 보일러 주제어기 신호를 받아 제어하기 위해서는 급수 주제어기와 보일러 주제어기를 모두 자동모드로 절체해야 한다. 또한 최상위 신호인 전력요구신호를 받아들이기 위한 자동발신신호 모드(Automatic Dispatch Signal Mode)로 절체를 해야 최종적으로 전력요구신호에 따른 급수 유량 설정값을 결정하고 제어하게 된다. 이러한 상태가 되면 전력요구신호로부터 발전소 최상위 제어기는 보일러와 터빈을 운전해야 하는 주증기 압력과 발전기 출력 설정값을 결정한다. 이 설정값에 따라 보일러 주제어기는 공기, 급수, 연료 설정값을 결정하고, 급수 유량 설정값으로 급수 주제어기에서 급수펌프 속도 설정값을 결정한다. 이 설정값은 급수펌프 제어기로 입력되어 밸브를 제어하게 된다. 즉 이전의 시험 및 조정에서는 급수펌프 제어기는 자동모드였으나 급수 주제어기는 수동모드로 제어하면서 조정을 시행한 것이다. 최종시험 및 조정에서는 제어기 전체를 자동모드로 설정한 결과를 점검하였다.

500MW 발전소의 경우 초임계압, 아임계압 등 주증기 압력에 따라 차이가 있으나 출력 500MW에서의 급수유량은 1600t/h 정도로 운전 된다. 출력 30% 정도인 150MW에서 급수펌프 A, B 각각 3,000rpm 정도로 운전되는 상태에서 급수펌프 A를 자동운전 모드로 절체한 뒤 출력을 증발하면서 급수 1,300t/h를 초과한 후 급수펌프 B를 자동으로 절체하고 500MW, 1,600t/h까지 운전상태를 확인하였다. 그림 15는 급수펌프 A를 자동으로 절체한 상태에서 급수펌프 B를 자동으로 절체하기 전 운전 상태이다.

그림 16은 급수펌프 A, B 모두 자동모드, 보일러 주제어기 자동모드, 전력요구신호 자동발신신호 모드인 상태에서 급수펌프 운전상태를 나타내고 있으며 출력 500MW, 급수유량 1,600t/h 상태에서 급수펌프 A는 4,750rpm, 급수펌프 B는 4,713rpm으로 정상적인 운전 상태를 보였다.

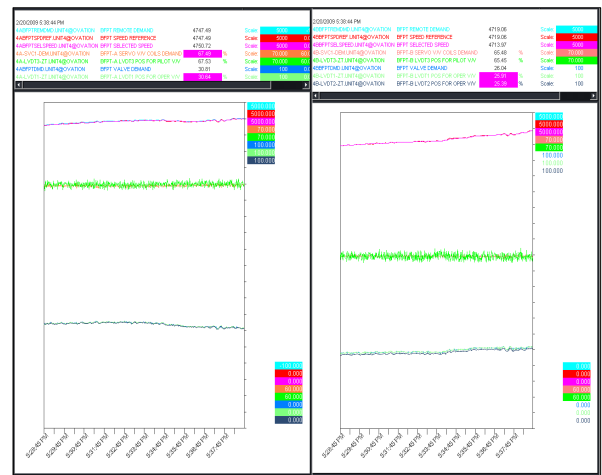


그림 16 모든 제어기가 자동모드인 상태에서의 운전 결과
Fig. 16 Operation result in auto mode of all controllers

5.3 결과

제어 루프 자체에서는 동적인 시간지연이나 선행이 없으며 구성요소의 변화에 대한 입력이 바로 출력으로 나타난다. 그러나 많은 실제의 요소들은 동적인 지연특성을 나타내며 제어밸브, 센서 등에서 이러한 특성을 나타내므로 제어기 조정을 통해 이러한 요소들을 제거하였다. 특히 유량을 제어하는 루프는 압력과 밸브의 위치 변화에 따라 유량이 급속도로 변하며 전체적인 동적특성이 밸브에 전적으로 의존하며 펌프 진동 및 난류에 의한 고주파 노이즈가 발생할 수 있다. 따라서 이 공정에서는 상대적으로 비례이득은 크나 적분시간은 줄였으며 미분동작을 사용하지 않았다.[9] 이러한 결과로 빠른 적분동작을 얻을 수 있었으며 진동을 제거할 수 있었다. 초기 조정시 계단응답시험을 통한 시행착오 방식을 통해 안정성을 고려한 조정을 하였다. 비례동작에 의한 적절한 과도응답과 적분동작에 의한 정상상태 읍셋 제거가 가능하였다. 시험을 하는 동안 동작지연이 발생하지 않고, 유량제어의 경우 작고 높은 주파수의 노이즈가 발생하는데 이러한 경우 미분동작이 적합하지 않으므로 미분동작을 추가하지 않고 비례적분 제어기만을 구성하였다.[10][11] 또한 미분동작의 경우는 조정에 장시간이 소요되고, 빈번히 조정을 해야 최적의 상태를 유지할 수 있으나,[12] 발전소는

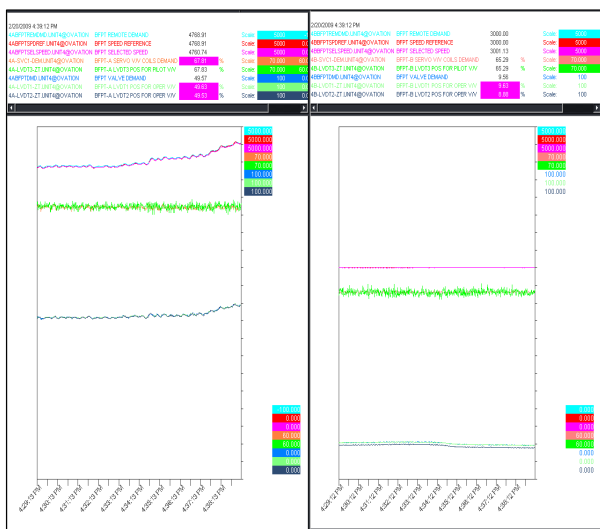


그림 15 급수펌프 A 자동운전, 급수펌프 B 수동운전시 결과
Fig. 15 Operation result of BFPT-A in auto mode and BFPT-B in manual

조정을 하기 위한 정지기간에 시간당 수천만 원의 발전 손실이 발생하고 적절한 조정 기간을 갖지 못할 경우 오히려 시스템이 불안정해질 수 있는 단점을 갖고 있어 제외하였다.

유량제어밸브 비례적분제어기의 비레이득과 적분시간 초기 설정시 비레이득이 커 지속진동이 있었으며 조정 후에도 밸브 위치 설정값과 위치 귀환신호간 오차 급증시 진동이 발생하였다. 밸브 진동은 급수유량의 진동으로 이어지고 바로 보일러 주증기 압력에 진동을 유발해 발전기 출력이 흔들리는 결과를 초래한다. 이러한 진동을 제거하기 위해 비례 이득을 줄이는 과정에서 오차가 완전히 없어지지 않는 오프셋이 발생하였다. 비례동작의 한계인 오프셋을 제거하기 위해 적분동작을 추가하여 시간을 조정하였다. 증기유량 제어밸브 제어기, 파일럿 밸브 제어기, 서보 밸브 제어기 각각의 최종조정결과는 표 19와 같으며 2,300rpm 이상에서의 증기유량 제어밸브의 튜닝결과를 식으로 표현하면 급수펌프 A는 식 (1)과 같다.

$$K_p(e + \frac{1}{T_i} \int_0^t edt) = 4(e + \frac{1}{6} \int_0^t edt) \quad (1)$$

2,300rpm 이상에서의 가변비레이득은 초기에 설정한 가변 비레이득과 같은 기율기로 조정하였다.

표 9 비레이득 및 적분시간의 최종조정 결과

Table 9 Final tuned proportional gain(P) and integral time (I, sec)

구 분		증기 유량 제어밸브 제어기 (2,300rpm 기준)		파일럿 밸브 제어기		서보 위치 제어기
		이하	이상	설정값	중립점 (%)	
BFPT-A	P(Kp)	5	4	0.08	60	50
	I(Ti)	5	6	20		0.2
BFPT-B	P(Kp)	5	4	0.09	60	60
	I(Ti)	5	6	60		0.25

6. 결 론

본 연구수행을 통해 국내에 설치된 500MW급 석탄화력발전소 22기에 적용할 수 있는 급수펌프 제어기를 개발하였다. 이번 연구결과를 계기로 사용수명을 초과하여 운영 중인 제어기를 대체할 수 있게 되었으며, 석탄화력발전소의 안정적인 설비운영에 일조를 하게 되었다.

계획예방정비 기간 중 파일럿 밸브 스톱 교체 및 조정 과정에서 스톱의 중립점이 변경되어 밸브를 조정하였으나 여전히 개도에 오차가 발생하여 파일럿 밸브 중립점을 조정하여 정상화하였다.

급수펌프 A, B 리셋시 밸브가 100%까지 열리는 현상이 발생하였는데 이것은 파일럿 밸브 초기 설정값이 중립점보

다 크게 설정되어 있어 생긴 결과로 설정값을 조정하여 정상화하였다. 또한 급수펌프 A 증기유량 제어밸브 응답에 지연이 있어 파일럿 밸브 제어기의 적분시간을 줄여 속응성을 개선하였다. 계통병입 전 급수펌프 무부하 시험을 통해 조정을 실시하고 계통병입 후 원격제어 상태에서 급수펌프 유량제어밸브의 비레이득을 조정해 부하가 걸린 상태에서 밸브 제어특성을 최종적으로 조정하고 마무리하였다.

급수제어계통을 비롯한 전 계통을 자동모드로 절환한 상태에서 발전소가 최대출력을 내는 동안 급수제어 계통을 원활하게 제어해 급수유량 1,600t/h을 정상적으로 공급함으로써 제어기 개발 및 발전소 기동을 성공적으로 마무리하였다.

이로써 수명연한을 초과하여 운전 중인 석탄화력발전소 급수펌프 제어 시스템 개발을 성공적으로 마무리하고 차후 타발전소에도 확대·적용할 수 있는 기반을 마련하였으며 설비의 신뢰성 향상과 안정적인 운영이 가능할 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

- [1] 송성일, 정창기, 김종안, 최인규, 우주희, “원전터빈 디지털 제어시스템 개발 최종보고서”, 전력연구원, pp. 1-5, 2003.
- [2] 한국전력기술주식회사, 한국중부발전주식회사, “보령 화력 7,8호기 시운전지침서”, pp. 7-1~7-77, 2007.
- [3] 보령훈련원 “보령3~6호기 모의화력 운전실무”, 한국중부발전주식회사, pp. 94-105, 2001.
- [4] 박영철, “튜닝과 제어”, 한국계측제어기술교육센터, pp. 63~70, 180~190, 2007.
- [5] 이주현, “화력발전소 보일러 드럼수위의 디지털 제어에 관한 연구” 홍익대 석사학위 논문, pp. 36, 1999.
- [6] 변승현, “화력발전소 보일러 드럼 수위 퍼지 제어”, 한전전력연구원, pp. 3, 1996.
- [7] 이주현, “화력발전소 보일러 제어루프의 시뮬레이션에 관한 연구”, 대한전기학회, pp. 868-870, 1999.
- [8] 임건표, 최인규, “삼천포화력 제4호기 보일러 급수펌프 조속기 제어설비 기술지원 보고서”, 한전전력연구원, pp. 8-15, 2009.
- [9] 김호열, 김병철, “USC 제어로직 Tuning 및 성능시험 보고서”, 전력연구원, pp. 125-143, 2009.
- [10] Astrom, K.J, “Automatic Tuning of PID Controllers”, Instrument Society of America, pp. 1~8, 1988.
- [11] Shinsky, F.G, “Process Control System Application, Design and Tuning”, McGraw-Hill, pp. 3~5, 133~135, 1988.
- [12] Agee, Lance “Application of the Modular Modeling System to Control System Design and Tuning”, EPRI, pp. 13-18, 1986.

저 자 소 개



임 건 표 (林 建 杓)

1972년 11월 3일생. 2010년 충남대 전기공학과 대학원 졸업. 현재 한전전력연구원 선임연구원.

Tel : 042-865-5603

E-mail : kepcolim@kepco.co.kr



최 인 규 (崔 仁 圭)

1967년 1월 26일생. 2004년 충남대 전기공학과 대학원 졸업. 현재 한전전력연구원 선임연구원.

Tel : 042-865-5605

E-mail : choiik@kepco.co.kr



박 두 용 (朴 斗 用)

1956년 3월 25일생. 1991년 한밭대 전기공학과 졸업. 현재 한전전력연구원 책임연구원.

Tel : 042-865-5642

E-mail : papiyon@kepco.co.kr



정 태 원 (鄭 泰 媛)

1948년 1월 28일생. 1984년 연세대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 충남대 전기공학과 교수

Tel : 042-821-5653

E-mail : twjeong@cnu.ac.kr



김 건 중 (金 建 中)

1953년 2월 12일생. 1985년 서울대 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 충남대학교 전기공학과 교수

Tel : 042-865-5659

E-mail : kjkim@cnu.ac.kr