발전소 보일러 급수 주제어 시스템의 개발

논 문

61-3-15

The Development of Boiler Feedwater Master Control System for Power Plant

임 건 표* · 박 두 용** · 김 중 안** · 이 흥 호†

(Gun-Pyo Lim · Doo-Yong Park · Jong-Ahn Kim · Heung-Ho Lee)

Abstract – Almost domestic power plants are being operated by foreign distributed control system. Many Korean power plants are being operated over their lifetime so they need to be retrofitted. So we are developing the distributed control system to solve this problem by our own technique. The simulator was already made to verify the reliability of the algorithms. The unit loop function tests of all algorithms were finished in the actual distributed control system for installation of power plant and their results were satisfactory. The unit loop function tests are for each unit equipment algorithm. So the total operation tests will be made with all algorithms together in the actual distributed control system to be applied to power plant. When the verification through all tests is finished, algorithms with hardware will be scheduled to be installed and operated in the actual power plant. This research result will contribute to the safe operation of the deteriorated power plant and Korean electric power supply as well as domestic technical progress. This entire processes and results for the development are written for the example of boiler feedwater master algorithm out of all algorithms in this paper.

Key Words : Control, Algorithm, Feedwater, Master

1. 서 론

국내 대부분의 원자력, 수화력 발전소는 외국산 분산제어 시스템을 사용하고 있다. 특히 일부의 노후화된 소용량 발전소에서 기존의 아날로그 제어시스템을 국내 디지털 제어 시스템으로 개조하여 사용하고 있다. 외국산 분산제어 시스템을 사용하는 발전소는 수명이 경과함에 따라 제작사로부터의 제품 단종, 업그레이드 등으로 유지정비 비용이 점차 상승하고, 신속한 유지정비 및 자재수급 등 운영전반에 걸쳐 국외기술에 대한 의존이 불가피하여 설비안정운전에도 저해 요소가 되고 있다. 미국, 유럽의 경우와 마찬가지로 국내 발전소도 노후화가 가속화됨에 따라 분산제어설비의 개조 필요성이 더욱 커지고 있다. 국내 IT기술의 성장과 발전소 운영기술의 성장에 걸맞게 분산제어설비를 전면 국산화하여 신규 발전소 건설과 기존 발전소 개조시 국가기간산업인 발전설비를 안정적으로 운영할 수 있는 기반을 마련해 나가야 할 것이다. 또한 최근에 발생한 대규모 정전사고에 대한 예방을 위해서도 국내기술자립을 확보해야 할 것이다.

이에 정부에서는 대용량 석탄화력발전소의 국내기술자립을 위한 국산 분산제어시스템 개발을 추진 중에 있다. 이와

관련하여 본 논문에서는 국내기술로 개발하고 있는 대용량 석탄화력 발전소의 전체 알고리즘 중에서 보일러 급수제어 알고리즘개발 부분을 바탕으로 분산제어시스템 알고리즘의 설계, 국산화 중인 분산제어설비 프로그램 코딩, 국산 분산제어설비를 연계한 시뮬레이터의 개발, 시뮬레이터를 통한 알고리즘의 시험 단계를 거쳐 실제 발전소에 설치운영이 가능하도록 검증한 분산제어시스템 개발에 대하여 기록하였다. 이 급수제어 알고리즘은 전체 알고리즘과 함께 분산제어시스템에 설치하여 종합시험을 완료한 후 대용량 화력발전소를 개조하여 운전하는데 적용할 계획이다.

2. 본 론

2.1 급수 및 증기 계통

화력발전소는 그림 1과 같이 보일러와 터빈으로 구성되어 있으며 이를 제어하기 위한 최상위 제어기로 보일러 주제어기와 터빈 주제어기를 가지고 있다. 보일러 주제어기와 터빈 주제어기를 총칭하여 유니트 주제어기라고 한다. 보일러 주제어기는 보일러에서 필요한 공기, 연료, 급수를 제어하는 각 주제어기에 상위제어 신호를 대보낸다[1].

급수는 보일러에서 적절한 압력과 온도를 가지도록 제어하여 발전소의 전력요구량에 적합한 발전기의 기계적 회전을 생성하는, 터빈을 회전시키는 증기를 생성하는데 사용된다. 발전기의 실제 출력변화에 따라 보일러 최종 과열기의 출구 증기압력이 변하게 되면, 연료 주제어기에 의해 연료량이 보일러 증기 압력에 따라 변하게 된다. 연료량이 변

* 정 회 원 : 한전전력연구원 선임연구원

** 정 회 원 : 한전전력연구원 책임연구원

† 교신저자, 종신회원 : 충남대 전기공학과 교수

E-mail : leehh@cnu.ac.kr

접수일자 : 2011년 9월 13일

최종완료 : 2012년 1월 27일

하면 공기 주제어기에 의해 연소용 공기량이 변하게 되며, 급수 주제어기에 의해 급수유량이 변하게 된다. 이때 급수 유량은 신속하고 능동적인 제어를 위해 관련된 외란에 대해 피드포워드제어를 하게 된다.

그림 1 발전소 전체 구성

Fig. 1 Configuration of the entire power plant

그림 2는 개발 중인 국산 분산제어시스템의 운전원 워크스테이션에 구성된 급수와 증기의 발전소 전체 흐름을 나타내는 화면이다. 그림 1의 급수펌프는 그림 2와 같이 3대(BFPM, BFPT-A, BFPT-B)로 구성되어 있으며 급수제어 알고리즘에서 생성한 급수 주제어기는 급수펌프 후단에서 측정한 급수유량을 제어하기 위하여 급수펌프 회전속도를 제어하는데 사용한다. 급수펌프를 지나는 급수는 펌프 최종단과 중간단에서 보일러의 과열기(Superheater, SH)와 재열기(Reheater, RH) 온도를 저감하기 위한 스프레이(Spray)를 공급하는데도 사용된다. 발전소의 전력요구량에 따라 연료량이 변하면 보일러에서 터빈으로 공급하는 주증기 유량(Main Steam Flow, MSF)이 변하게 되며, 필요한 주증기 유량을 생성하기 위해 급수유량 조절이 필요하게 된다.

그림 2 급수 및 증기 흐름

Fig. 2 Feedwater and steam flow

2.2 알고리즘의 설계

그림 3은 급수제어 알고리즘의 상위 알고리즘인 유니트

주제어기 알고리즘의 개략적인 구성을 나타내고 있다. 발전소 발전기 출력을 제어하기 위한 최상위 신호로 전체 전력계통을 관할하는 곳(대한민국의 경우 전력거래소)으로부터 자동전력요구신호(ADS, Automatic Diapatch Signal)를 받거나 발전소 운전원이 직접 전력요구신호를 입력한다. 이 전력요구신호에 의해 발전소의 보일러와 터빈을 운전제어하기 위한 주신호를 만들게 되는데 이 신호를 각각 보일러 주제어기(Boiler Master)와 터빈 주제어기(Turbine Master)라고 한다. 터빈 주제어기와 보일러 주제어기는 발전기 출력, 보일러 압력을 유지하기 위하여 상호 협조제어(CC Mode Control-Coordinated Control Mode Control)를 한다. 보일러 주제어기는 연료 주제어기(Coal Master), 공기 주제어기(Air Master), 급수 주제어기(FW Master)의 상위신호가 되며 본 논문의 급수제어 알고리즘의 상위 제어기이다.

그림 3 유닛 주제어기 알고리즘의 개략도

Fig. 3 Outline of unit master algorithm

급수 주제어기 알고리즘은 보일러 주제어기 신호를 받아 보일러 행거관(Hanger Tube) 출구온도를 제어하기 위하여 최종적으로 그림 4와 같이 3대의 펌프를 구동한다.

그림 4 급수주제어 알고리즘의 최하위 제어대상 펌프

Fig. 4 pumps controlled finally by feedwater master algorithm

3대의 펌프는 증기터빈구동 급수펌프(BFPT-A, B), 전동기 구동 급수펌프(BFPM)로 구성된다. 그림 2에서 펌프로 가압된 급수는 보일러 수냉벽(Water Wall)을 지나면서 수증기로 바뀌고 행거관 출구를 거쳐 보일러 과열기(SH-Superheater)로 유입된다.

그림 5는 급수제어 알고리즘의 전체구성을 나타낸다. 급수제어 알고리즘의 설계내용을 그림 5를 바탕으로 기술하였다.

그림 5 급수제어 알고리즘 전체구성

Fig. 5 Configuration of the entire feedwater control algorithm

행거관 출구온도 제어(Hanger Tube Outlet Temperature Control)는 관류보일러의 특성상 수연비(Feed Water/Fuel Ratio)제어로 구성하였다. 관류 보일러의 주증기 온도는 급수유량과 연료량의 비율에 따라 균형점이 결정된다[2]. 관류 보일러의 온도제어에 있어 스프레이에 의한 온도제어는 과도상태에서 효과가 빠르나 일시적이어서 스프레이 증가시 급수유량이 감소하게 되어 온도가 재상승 한다. 수연비 제어에 의한 증기온도 제어는 과도상태 및 부하정정 상태에서 지속적인 온도제어 효과를 도모할 수 있다.

수연비 제어에 있어 제어대상 및 지점은 보일러 제작사에 따라 기수분리기 출구 온도 또는 행거관 출구 온도를 기준으로 하며, 본 시스템에서는 행거관 출구 온도를 제어 대상으로 하였다. 이는 증기의 과열도를 확보하고, 최종 과열기 출구 온도제어의 선행제어로 매우 유효하기 때문이다. 행거관을 지난 증기는 곧바로 과열기로 유입되므로 행거관 출구 온도를 제어범위 내로 유지할 필요가 있다. 수연비 제어 로직의 적용 위치 또한 제작사에 따라 연료 제어측에 적용하는 경우도 있으나, 그림 6과 같이 증기온도의 응답 특성이 연료보다는 급수에 의해 더 빠르게 반응함을 감안하여 본 시스템에서는 급수제어측에 두도록 하였다.

그림 6 연료와 급수의 온도에 대한 영향

Fig. 6 Temperature change by fuel and feedwater

행거관 온도 제어 설정값(Hanger Tube Temperature Control Setpoint)의 피드포워드로는 2차 스프레이 전후의 온도차(Sec Spray Temp Deviation), 주증기 유량에 의한 설정값(Set By MSF), 운전원 바이어스(Set Bias)를 사용하였다. 일반적인 피드포워드 형태는 식 1과 같다. u 는 제어변수, v 는 외란, G_v 는 출력에 대한 외란으로부터의 전달함수, G_u 는 출력에 대한 제어변수로부터의 전달함수이다[2][6][7][9].

$$Y(s) = G_u(s)U(s) + G_v(s)V(s) \quad (1)$$

본 제어 알고리즘에서는 2차 스프레이 전후의 온도차, 주증기 유량에 의한 설정값, 운전원 바이어스를 제어변수로 식 2와 같은 형태로 여러 개의 제어변수를 사용하였다. 또한 u_1 , u_2 , u_3 로 행거관 출구온도를 바로 사용하지 않고 행거관 출구증기를 터빈에서 사용하기 위하여 보일러에서 최종적으로 출력되는 주증기 유량, 2차 스프레이 후단 온도를 사용하고, 그 이후에도 발생하는 오차에 대한 운전원 바이어스를 줄 수 있도록 하였다.

$$u_{123} = u_1 + u_2 + u_3 \quad (2)$$

u_{123} 은 식 4의 G_{ff} 를 지난 u 가 PI제어기인 G_u 함수를 거쳐 피드포워드 기능을 하게 된다. 식 3에서 피드포워드 전달함수는 식 4와 같이 얻을 수 있다.

$$U(s) = -\frac{G_v(s)}{G_u(s)}V(s) \quad (3)$$

$$G_{ff}(s) = -\frac{G_v(s)}{G_u(s)} \quad (4)$$

본 시스템에서의 피드포워드는 기존의 피드포워드와는 달리 G_{ff} 와 G_v 가 같은 입력을 사용하지 않는다는 점이다. 또한 출력 Y 에 제어변수로 입력된 주증기 온도에 대한 설정값을 바이어스로 줄 수 있도록 하여 행거관 출구 온도 설정값에 대하여 운전원이 직접 피드포워드를 줄 수 있도록 하였다.

2차 스프레이 전후의 온도차는 1차 과열기 출구 온도(Platen Superheater Outlet Temperature)에 최종 과열기 출

구 온도(Final Superheater Outlet Temperature)를 감한 편차 네 개의 평균을 사용하였다. 주증기 유량에 의한 설정값은 주증기 유량에 따라 16~22℃(4~5.5%)로 그림 7과 같이 설정하여 스프레이를 확보할 수 있도록 하였다. 운전원 바이어스는 -8~8℃(-2~2%) 범위 내에서 입력할 수 있으며 동작시간은 120초로 설정하였다.

그림 7 주증기 유량에 의한 설정값
Fig. 7 Setpoint by main steam flow

세 값은 최종 과열기 스프레이 제어밸브가 3대 이상 자동 모드인 경우 PI 제어기 설정값으로 입력한다. 2대 이상 수동 모드인 경우는 최종 과열기 온도 설정값에 가장 값이 높은 최종 과열기 온도를 감한 온도 오차를 PI 제어기의 설정값으로 입력하여 과열기의 온도 상승으로 인한 발전소 비상정지를 예방하였다[2].

피드포워드 기능을 제한하기 위하여 PI 제어기 출력은 -5~5%로 설정하였다. PI 제어기는 행거관 출구 온도 편차가 -2% 이하, 2% 이상일 때 적분동작이 중지한다.[2] 또한 주증기 유량이 21% 이하이거나 행거관 출구온도제어가 수동모드로 절체되면 PI 제어기 후단의 자동수동 스테이션(M/A Station) 출력인 행거관 출구온도제어 설정값을 추종하도록 하였다.

피드포워드측 자동수동 스테이션은 행거관출구온도 균형 제어용으로 행거관출구온도제어 설정값을 생성한다. 행거관 온도 설정값에는 행거관출구온도 제어신호를 가감한다. 대부분의 제작사는 필요한 총 급수유량 요구신호에 일정 스프레이 비율을 줄여 스프레이를 유도하는 방식으로 스프레이를 확보하나, 본 시스템에서의 행거관출구온도 제어는 스프레이 유량을 상시 확보하기 위하여 과열기 2차 스프레이 전후의 온도 편차를 16~22℃로 유지하도록 하였다. 관류 보일러는 특성상 빠른 증기온도 제어가 요구되는 바, 전체 급수유량 중 일정 비율을 스프레이로 확보하여 상시 주입함으로써 제어의 속응성을 도모한다. 즉 행거관 출구온도 설정값을 높여 스프레이를 유도하는 형식이다.

기동 및 저부하시 행거관 온도 설정값은 보일러 정특성에 의해 최종과열기 온도 설정값에 따라 그림 8과 같이 가감할 수 있도록 바이어스를 구성하였다[2].

그림 8 피드포워드용 바이어스
Fig. 8 Feedforward bias

연료량에 의한 급수 요구신호(Fuel FW Demand)를 입력으로 하여 그림 9와 같이 변환한 행거관 출구 온도 설정값은 피드포워드의 자동수동 스테이션과 최종 과열기 온도 설정값에 의한 바이어스를 합산한다[2].

그림 9 연료량에 의한 행거관 출구 온도 설정값
Fig. 9 Hanger tube outlet temperature setpoint by fuel flow

행거관 출구 온도 설정값은 과열증기가 포화증기로 되는 것을 막기 위해 물의 임계온도인 374.15℃를 고려하여 최소값을 390℃로 설정하였다.(Saturation Limit)

행거관 출구 온도설정값과 실제 행거관 출구 온도간 오차는 PI 제어기로 입력한다. 하단의 자동수동 스테이션이 수동모드로 절체될 경우 자동수동 스테이션의 출력인 행거관출구온도제어 설정값을 추종하도록 하였다.

자동수동 스테이션이 수동모드로 절체될 경우 식 5를 행거관 출구온도 설정값으로 사용한다. FWCS는 급수유량 제어 설정값, BMDM은 보일러 주제어기 요구신호이다.

$$\frac{FWCS+12\%}{BMDM+10\%} \quad (5)$$

자동수동 스테이션은 행거관 출구온도 측정 편차 기준값 이상 발생(Hanger Tube Outlet Temperature Measurement Differential On) 또는 터빈 1단 압력편차 기준값 이상 발생(TBN First Stage Pressure Deviation On) 신호가 들어올 경우 수동모드로 절체한다. 급수 유량 제어가 자동모드로 절체되면 자동모드로 복귀한다. PI 제어기의 상한값(OG)과 하한값(UG)은 보일러 주제어기 요구신호에 보일러 절탄기 급수유량 설정값을 감안 결과를 이용하여 가변적으로 그림 10과 같이 설정하여 운용한다[2].

보일러 주제어기 요구신호 대비 보일러 절탄기 급수유량 설정값(%)

보일러 주제어기 요구신호 대비 보일러 절탄기 급수유량 설정값(%)

그림 10 PI 제어기의 상한값과 하한값

Fig. 10 Upper and lower limit of PI controller

행거관 출구 온도 설정값은 80~120% 범위로 제한하여 보일러 주제어기와 총연료유량의 편차에 곱한 후 수연비 보정신호를 합산한다. 수연비가 80%일 때는 식 (6)과 같이, 수연비가 120%일 때는 식 (7)과 같이 합산하고 그림 11과 같이 보일러 주제어기 요구신호에 따른 보정신호를 합산하면 최종적으로 급수 주제어기 신호를 생성한다[2].

$$(-100\%+80\%) \times 10\% = -2\% \quad (6)$$

$$(-100\%+120\%) \times 10\% = +2\% \quad (7)$$

그림 11 보일러 주제어 요구신호에 의한 보정신호

Fig. 11 Compensation signal by boiler master demand

최종 결정된 급수 주제어기 신호는 총 급수유량에 따라 설정된 값과 비교하여 높은 값을 선택한다. 비교하는 내용은 다음과 같다.

- 총급수유량이 10%일 경우
9%(=180t/h=2000t/h×9%)
- 총급수유량이 5%일 경우
4%(=80t/h=2000t/h×4%)
- 총급수유량이 30%일 경우
22.7%(=454t/h=2000t/h×22.7%)

단, 발전소의 주연료비상정지(Master Fuel Trip) 신호가 발생하고 급수유량 제어 설정값이 30% 미만일 경우는 급수유량 제어 설정값을 추종하여 급수 주제어기 신호와 비교하여 더 높은 값을 선택하도록 하였다.(High Selection)

보일러 하부 나선형 튜브의 금속온도(Spiral Tube Metal Temperature) 평균값이 상승함에 따라 급수유량을 증가시키도록 하여 발전기 출력감발시 등 온도 상승에 의한 나선형 튜브 손상을 방지할 수 있도록 하였다. 나선형 튜브 금속온도 평균값에 따른 보정신호는 그림 12와 같다.

그림 12 나선형 튜브 금속온도에 의한 보정신호

Fig. 12 Compensation Signal by spiral tube metal temperature

자체 제작한 제어로직 표준심볼을 사용하여 최종적인 급수 주제어기 알고리즘을 개발하였으며 그림 13은 그 중 일부이다.

그림 13 표준심볼을 사용한 급수 주제어기 알고리즘의 일부
Fig. 13 The part of feedwater master algorithm by standard symbol

2.3 제어로직 코딩

설계한 급수 주제어기 알고리즘을 비롯하여 타설비의 자동제어로직, 미분기 및 버너 제어로직, 순차제어로직, 터빈제어로직, 발전기 제어로직, 터빈보조설비 제어로직 등 발전소 전체 제어로직 알고리즘을 그림 14와 같이 국산 개발 중인 분산제어설비 하드웨어에서 사용하는 스트라톤(Straton IEC61131-3 개발환경) 프로그램으로 코딩하였다[3]. 코딩한 로직은 모의시험을 하기 전 설계 제어로직과 비교 검토하여 모의시험 중에 발생하는 빈번한 로직수정 작업을 최소화하였다[4].

그림 14 코딩작업을 수행한 급수 주제어기 알고리즘의 일부
Fig. 14 The part of feedwater master algorithm coded

2.4 시뮬레이터의 구성

코딩한 제어로직을 시험하기 위하여 그림 15와 같은 시뮬레이터를 개발하여 이용하였다.

그림 15 시뮬레이터 구성도
Fig. 15 Simulator configuration

시뮬레이터는 발전소 시뮬레이터 모델이 구동되는 시뮬레이션 서버, 다양한 사고상황을 투입하는 강사조작 컴퓨터, 시스템을 정비하고 각종 정보를 관리하기 위한 EWS, 실제 제어실과 같이 운전상황을 감시하고 조작하기 위한 운전정보표시반으로 구성되어 있다[5]. 시뮬레이터의 공정모델은 실행파일인 C++ 알고리즘인 쓰리키마스터(3Keymaster)를 사용하였다. 시뮬레이터에는 실제 발전소에 설치하게 될 제어알고리즘을 설치한 분산제어시스템을 통신을 통해 연결하여 시험할 수 있도록 그림 15의 입출력 신호 랙(IO Rack # 1~3)을 구성하였다. 입출력 신호 랙은 랩뷰(Labview) 프로그램으로 개발된 인터페이스 시스템이다[4]. 분산제어시스템을 시뮬레이터에 연결하면, 시뮬레이터는 실제 발전소와 같이 설비의 공정특성과 제어신호를 발생하여, 개발한 알고리즘을 실제와 같이 시험할 수 있도록 하였다.

2.5 분산제어시스템의 구성

제어모델과 공정모델로 구성된 시뮬레이터에 그림 16과 같이 보일러 분산제어시스템 패널 1 세트, 터빈 분산제어시스템 패널 1 세트로 구성된 실제 패널을 신호선으로 입출력 신호 랙에 연결하였다.

그림 16 시뮬레이터 분산제어시스템 패널
Fig. 16 Distributed control system panel for simulator

분산제어 패널은 위에서부터 프로세스 카드, 전원 장치, 통신카드, 입출력 카드 등으로 구성되어 있다. 프로세스 카드에 설치한 제어로직 알고리즘 부분에 해당되는 제어모델을 시뮬레이터에서 분리하였다. 코딩한 로직은 그림 15의 엔지니어링 워크스테이션(EWS)을 통해 그림 16의 프로세스 카드에 설치한 후 시뮬레이터의 공정모델에 연결하여 실제 발전소 형태로 시험을 하였다[4].

분산제어시스템의 전체구성은 그림 17과 같다. 발전소 모든 현장설비와 패키지 설비의 입출력 신호는 마샬링 패널에 신호선으로 연결된다. 패키지 설비는 제매기, 전기집진기, 회처리 설비, 진동감시설비, 공기압축기 등으로 구성된다. 마샬링 패널에서 각 분산제어시스템 패널로 가기 위해 각 분산제어시스템 패널에 필요한 신호를 마샬링 패널로부터 인터페이스 패널로 모아 연결한다. 분산제어시스템에서 발생한 전동기 등의 기동정지신호는 릴레이 패널을 거쳐 전동기에 전원을 공급하게 된다. 분산제어시스템은 발전소 자동제어를 위한 최상위 제어기, 최상위 제어기로부터 자동 기동 및 정지신호를 받아 각 기기 레벨의 자동운전을 위한 변수 및 순차제어를 수행하는 중간 제어기, 중간제어기로부터 자동기동, 정지, 자동제어 신호를 받아 현장설비 각각을 구동하는 최하위 제어기로 구성된다. 최상위 제어기는 보일러, 터빈, 발전기 등의 현장설비로부터 공정데이터를 수집하여 발전소 자동 기동, 정지, 자동제어에 필요한 운전신호를 중간제어기로 보내는 역할을 한다. 각 기기간의 보호 인터록은 최하위 제어기에서 수행한다. 보일러 분산제어시스템 패널은 자동제어(APC), 미분기 버너제어(MBC), 순차제어(SQC), 보조설비제어(BOP), 기타설비제어(Miscellaneous)로 구분한다. 자동제어 패널은 유닛 주제어기, 공기 주제어기, 연료 주제어기, 급수 주제어기, 통풍설비 제어기, 증기온도 제어기, 기수분리기 레벨 제어기, 고압 및 저압 증기 바이패스 제어기 등으로 각 제어기가 분리되어 있다. 미분기 버너제어 패널은 석탄 제어기, 보일러 퍼지 제어기, 주연료 트립 제어기, 보일러 트립 제어기, 보조연료 제어기, 미분기 운전모드 제어기 등으로 각 제어기가 분리되어 있다. 순차제어 패널은 보일러 증기 및 급수 기동/정지 제어, 보일러 유인통풍기/압입통풍기 기동/정지 제어, 인터록 및 드라이브 제어, 점화기동, 드레인 및 벤트 밸브 제어 등으로 각 제어기가 분리되어 있다. 보조설비제어는 보조증기 압력 및 온도 제어, 복수기 제어, 고압 및 저압 히터 제어, 보조연료 압력 제어, 냉각수 제어, 복수 펌프 제어, 재순환 펌프 제어 등으로 구성되어 있다. 기타설비제어는 고압/저압 히터 드레인/벤트 기동 및 정지 제어, 복수펌프/냉각수 펌프 기동 및 정지, 보조증기 및 추기 계통 기동정지 제어 등으로 각 제어기가 분리되어 있다. 터빈 분산제어시스템 패널은 같은 제어기 세 개를 두어 삼중화로 구성된다. 터빈제어기는 터빈 기동 제어, 터빈 운전모드 선택 제어, 터빈 예열, 터빈 부하제어, 터빈 속도 제어, 터빈 과속도 보호, 터빈 보조 제어, 증기터빈구동 급수펌프 A 제어기, 증기터빈구동 급수펌프 B 제어기, 전동기구동 급수펌프 제어기 등으로 각 제어기가 분리되어 있다. 발전기 분산제어시스템 패널은 자동 전압 제어, 전력 시스템 안정화 장치, 전압/주파수 제어, 부족여자 제한, 과여자 제한, 밀봉오일 시스템, 고정자 냉각 시스템 제어기 등으로 각 제어기가 분리되어 있다. 각각의 분산제어시스템 패널은

입출력 신호를 이중화된 네트워크 통신으로 연계하여 연동하며 정비용 및 운전원 워크스테이션을 통해 시스템을 정비하고 발전소를 운전한다. 각각의 분산제어시스템 패널은 그림 16과 같이 자신의 중앙처리장치(CPU)를 가지며 어느 하나의 분산제어시스템에 문제가 발생할 경우 경보신호를 발생하여 다른 분산제어시스템에 전달함으로써 경보신호를 전달받은 분산제어시스템은 수동으로 절체되거나 출력력을 늘리거나 줄이도록 하여 설비가 안정된 상태로 운전할 수 있도록 분산제어를 한다. 그림 17과 같은 분산제어시스템은 시뮬레이션에 연계하여 전체모의시험을 거친 후 현장에 설치하여 시운전을 통해 최종 운전에 들어갈 계획이다.

그림 17 분산제어시스템 구성도

Fig. 17 Configuration of the distributed control system

2.6 시험

급수주제어기 알고리즘은 다음과 같은 항목으로 구분하여 시험하였다. 행거관 온도 제어 설정값, 행거관 온도제어 자동수동 스테이션, 보일러 주제어기에 의한 급수유량 설정값, 급수유량 최소값 제한, 급수 주제어기 수동 제어, 급수 주제어기의 모드 전환(자동 ↔ 추종/자동 ↔ 수동/수동 ↔ 추종), PI 제어기 등을 각각 시험하고 전체적인 알고리즘의 응답상태를 아래와 같이 행거관 출구온도제어 설정값 수동조절, 급수 주제어기 요구신호 수동조정, 발전소 최상위 신호인 전력요구신호 변경에 의한 급수 주제어기 알고리즘 응답상태를 시험 확인하였다. 시험에 앞서 기본 튜닝을 수행하였다.[7]

그림 18은 발전기 출력 500MW에서 행거관 출구온도제어 설정값의 자동운전 상태와 상한값을 수정한 후 자동수동 스테이션을 수동모드로 절체하여 조정한 시험결과를 보여주고 있다.

행거관 출구온도제어 설정값은 보일러 주제어기에 의한 급수유량 요구신호에 80~120%로 곱하여 영향을 준다. 행거관 출구온도제어 설정값 자동수동 스테이션을 수동모드로 절체한 후 97%에서 105%로 올렸다가 다시 100%로 내렸다. 그 영향으로 보일러 주제어기에 의한 급수유량 설정값과 급수 주제어기 요구신호가 상승하여 급수유량이 증가한 것을

알 수 있다. 자동모드 상태인 상위 신호인 보일러 주제어기 요구신호는 급상승한 급수유량을 줄이기 위해 감소하고 있다. 이후 행거관 출구온도제어 설정값 자동수동 스테이션을 자동모드로 절체하였으며, 급수유량이 발산하지 않고 설정값에 잘 수렴함으로써 안정된 급수제어를 하고 있음을 확인하였다.

그림 18 행거관 출구온도제어 설정값 수동조절에 의한 운전
Fig. 18 Operation by adjusting hanger tube outlet temperature setpoint manually

그림 19는 급수 주제어기 요구신호를 수동으로 조정 한 시험 결과를 보여주고 있다. 행거관 출구온도제어를 수동모드로 절체하면 보일러 주제어기에 의한 급수유량 설정값이 곧바로 변하고, 급수주제어기가 설정된 동작시간에 따라 서서히 감소하였다가 증가하는 것을 확인하였다. 설정된 전력요구신호에 따른 급수유량이 수동으로 변하므로 보일러 주제어기 요구신호가 증가하였다가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 행거관 출구온도제어를 자동모드로 절체하면 보일러 마스터와 편차로 제어 난조가 발생하게 되므로 자동수동 스테이션 절체시 지연동작시간을 설정하였다.

그림 19 급수 주제어기 요구신호 수동 조정에 의한 운전
Fig. 19 Operation by adjusting the feedwater master demand manually

그림 20은 급수 주제어기 알고리즘 전체를 자동모드로 운전하는 상태에서 전력요구신호를 500MW에서 450MW로 감발한 상황이다. 감발하는 상황에서 급수유량이 낮게 감소할 경우 주증기 온도 저하에 영향을 미쳐 보일러 효율을 저하시킨다. 반대로 급수유량이 빨리 감소할 경우 보일러 수냉벽 온도나 주증기 온도가 상승하여 발전소를 정지시킬 수 있다. 이번 출력변동 운전에서는 적절한 운전상태를 보임으로써 설계한 알고리즘이 500MW 석탄화력발전소 급수제어를 충분히 수행할 수 있음을 확인하였다.

그림 20 전력요구신호 500MW→450MW 조정시 급수 주제어기 알고리즘의 응답상태 확인

Fig. 20 Response result of feedwater master algorithm by generator output demand 500 to 450MW

3. 결 론

대부분 외국 분산제어시스템을 사용하고 있는 국내 발전소의 유지보수 비용절감과 안정운전을 위하여 국내기술로 분산제어시스템을 개발하고 있다.

본 논문에서는 급수 주제어기 알고리즘을 대표적 알고리즘으로 소개하였다. 급수 주제어기 알고리즘은 급수가 공급되는 증기관의 온도, 유량 등을 이용한 피드포워드 기능과 급수가 보일러로 처음 공급되는 부분의 온도를 급수유량을 결정하는 비율적인 설정값으로 하여 설계함으로써 그 실용성을 입증하였다. 실제 발전소에 적용하기 위하여 국내기술로 개발한 분산제어시스템과 실제 운전 전 알고리즘의 신뢰성을 검증하기 위하여 개발한 시뮬레이터를 인터페이스하여 설계한 알고리즘을 시험하였다. 기본 튜닝을 통해 실제 적용 가능성과 알고리즘의 기능을 확인하였으며 그 결과가 양호하였다. 추후 전체 알고리즘을 분산제어시스템에 설치하여 시뮬레이터와 연계한 후 정밀튜닝을 시행하고 종합시험을 수행할 계획이다.

본 연구결과는 국내 노후화된 발전소의 안정적인 설비운전과 전력공급 및 국내기술자립에 기여할 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 2007년도부터 지식경제부 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행 중인 연구과제로 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 임건표, “모델 기반의 화력발전소 발전기 출력제어 프로그램 개발”, 대한전기학회, 제59권 제3호, pp.614, 2010
- [2] 임건표, 박두용, 이흥호, “대용량 증기발전기 급수 주제어기 알고리즘의 생성”, 대한전기학회 하계학술논문, CIP21, 2011
- [3] “EWS Logic & Loop Drawing R0”, 두산중공업, pp90, 2011
- [4] 임건표, 김종안, 최인규, 유광명, 이흥호, “The Development of Primary Air Control Algorithm in 500MW Class Coal-Fired Power Plant”, ICIS2011, pp174, 2011
- [5] 서정관, “발전소 시뮬레이터 모델을 이용한 제어시스템 검증”, 한국시뮬레이션학회, pp134, 2009
- [6] Karl J. Åström, Tore Hägglund, “PID Controllers, 2nd Edition”, Instrument Society of America, pp281-283, 1995
- [7] Gregory K. Mcmillan, “Good Tuning : A Pocket Guide”, The Instrumentation, Systems and Automation Society, pp92, 2005
- [8] SAM G. Dukelow, “The Control of Boilers, 2nd Edition”, The Instrumentation, Systems and Automation Society, pp189-207, 1991
- [9] Paul W. Murrill, Ph.D., “Fundamentals of Process Control Theory”, Instrument Society of America, pp157-164, 2000

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@kepcoco.kr

박 두 용 (朴 斗 用)

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

Tel : 042-865-5642

E-mail : papiyon@kepcoco.kr

김 종 안 (金 鍾 安)

1957년 10월 3일생. 1985년 원광대 전자공학과 졸업. 현재 한전전력연구원 책임연구원.

Tel : 042-821-5641

E-mail : jakim@kepri.re.kr

이 흥 호 (李 興 浩)

1950년 10월 28일생, 1994년 서울대 컴퓨터공학과 대학원 졸업(박사), 현재 충남대학교 전기공학과 교수 및 산업대학원 원장

Tel : 042-821-5656

E-mail : leehh@cnu.ac.kr