

석탄화력발전소 보일러 노내압력 제어알고리즘과 분산제어시스템의 개발

The Development of Boiler Furnace Pressure Control Algorithm and Distributed Control System for Coal-Fired Power Plant

임 건 표* · 허 광 범* · 박 두 용* · 이 흥 호†
(Gun-Pyo Lim · Kwang-Bum Hur · Doo-yong Park · Heung-Ho Lee)

Abstract - This paper is written for the development and application of boiler furnace pressure control algorithm and distributed control system of coal-fired power plant by the steps of design, coding, simulation test, site installation and site commissioning test. The control algorithms were designed in the shape of cascade control for two parts of furnace pressure control and induced draft fan pitch blade by standard function blocks. This control algorithms were coded to the control programs of distributed control systems. The simulator for coal-fired power plant was used in the test step and automatic control, sequence control and emergency stop tests were performed successfully like the tests of the actual power plant. The reliability was obtained enough to be installed at the actual power plant and all of distributed control systems had been installed at power plant and all signals were connected mutually. Tests for reliability and safety of plant operation were completed successfully and power plant is being operated commercially. It is expected that the project result will contribute to the safe operation of domestic new and retrofit power plants, the self-reliance of coal-fired power plant control technique and overseas business for power plant.

Key Words : Algorithm, Coal-fired, Control, DCS, Furnace, Power plant, Pressure

1. 서 론

1994년경 국내 최초로 설치된 500MW급 석탄화력발전소를 비롯한 대용량 석탄화력발전소는 현재 국내 총 발전용량의 약 30%를 담당하고 있다. 기계설비는 설계수명이 30년 이상으로 여전히 사용연한 내에서 운전이 가능하나, 제어설비는 내용수명이 12년으로 사용연한을 초과하여 주기적인 정비와 교체를 시행하여 왔다[1]. 제어설비 교체주기는 일반적으로 일본의 경우 13년, 국내의 경우 17년 정도이다. 최근 삼천포 화력발전소에서 외국제품으로 교체를 하였으며, 보령 화력에서도 1개호기 교체를 완료하였다. 여전히 발전소 제어설비는 국외기술로 제작된 분산제어시스템을 사용하고 있다. 이에 유지정비가 외국기술에 상당히 의존적이며, 교체주기가 도래한 현 시점에서도 여전히 외국제품을 사용할 수밖에 없는 현실이다[2].

자동제어시스템은 전력계통의 전력요구에 따라 발전소를 신속하게 제어하고, 각종 설비들의 운전 상태를 감시하여 발전소를 안정적으로 운전하기 위한 핵심적인 역할을 수행한다. 최근 발전소의 대용량화 및 고효율화에 따라 자동제어시스템은 점차 고도화되어 가고 있다. 발전소 자동제어시스

템의 중요성이 점차 부각되고 있으나, 국내에서는 여전히 제어시스템 자체 및 기술을 대부분 외국 선진기술에 의존하고 있다. 이에 발전소 핵심기술의 자립 및 기간산업의 안정적인 운영 측면에서 국가주도로 대용량 석탄화력발전소 분산제어시스템의 하드웨어와 소프트웨어를 연구함으로써 국산화 개발에 성공하였다. 최근까지 국내에서도 제어알고리즘을 개발하여 적용한 예는 빈번이 있었으나 대형 석탄화력발전소에 적용하기 위하여 분산제어시스템의 하드웨어와 소프트웨어를 동시에 개발한 경우는 이번이 처음이다[3][4].

본 논문에서 다루는 대용량 석탄화력발전소 분산제어시스템의 일부인 보일러 노내압력 제어는 보일러 연소공기의 팽창이나 압력으로 발생하는 발전소의 폭발 또는 수축 등의 대형사고로부터 발전소 보일러 자체를 보호하고, 화염으로부터 보일러와 인명을 보호하기 위한 부분이다.[5] 이러한 대용량 석탄화력 발전소 보일러 노내압력 제어용 표준알고리즘을 개발하여, 국산화한 분산제어시스템의 프로그램에 맞게 코딩하여 탑재하고, 자동제어, 시퀀스 제어, 불시비상정지 등을 성공적으로 모의시험한 후, 현장에 설치하여 다양한 시운전을 거쳐 성공적으로 상업운전에 들어간 연구내용을 기록함으로써 전체적인 발전소 제어시스템의 개발과정을 서술하였다[6].

* 정 회 원 : 한전전력연구원 선임연구원

† 교신저자 : 충남대 전기공학과 교수

E-mail : leehh@cnu.ac.kr

접수일자 : 2013년 1월 31일

수정일자 : 2013년 4월 8일

최종완료 : 2013년 8월 12일

2. 본 론

2.1 노내압력 제어계통 개요

화력발전소는 그림 1과 같이 보일러와 터빈으로 구성되어 있으며 이를 제어하기 위한 최상위 제어기로 보일러 주 제어

기와 터빈 주제어기를 가지고 있다. 보일러 주제어기와 터빈 주제어기를 총칭하여 유니트 주제어기라고 한다. 보일러 주제어기는 보일러에서 필요한 공기, 연료, 급수를 제어하는 각 주제어기에 상위제어 신호를 내보낸다[6].

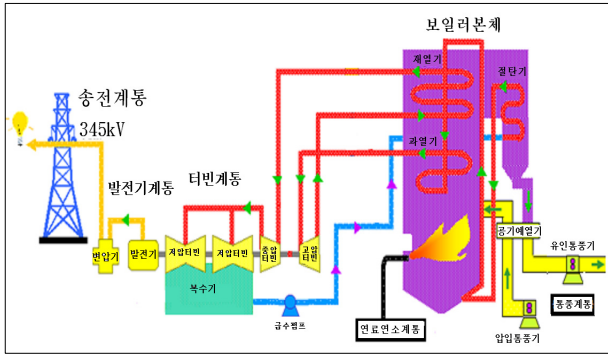


그림 1 발전소 전체 구성
Fig. 1 Entire configuration of power plant

공기는 연료를 건조하고 운반하는 1차공기와 보일러에서 연료를 연소하기 위한 연소용 공기가 있으며, 연소과정에서 보일러 노내압력을 안정적으로 유지하고 배기가스를 배출하기 위한 설비가 유인통풍기이다. 그림 1에서 배기가스는 유인통풍기, 연소용 공기는 압입통풍기로 공급하는데 국내 500MW 표준석탄화력발전소는 그림 2와 같이 축류형 팬을 사용하며 각각 두 대로 구성되어 그림 3과 같이 보일러로 공급된다[6].

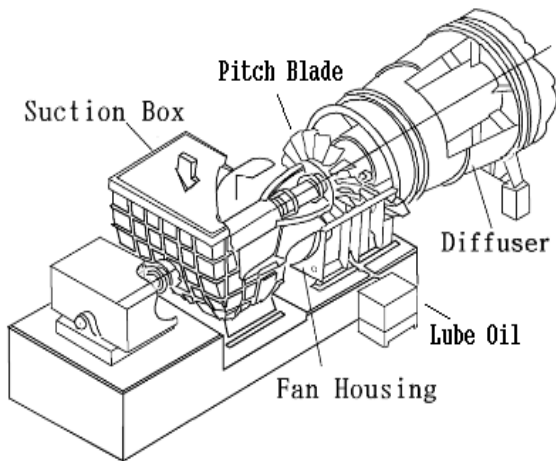


그림 2 축류형 압입통풍기
Fig. 2 Axial forced draft fan

그림 3은 개발 중인 분산제어시스템의 운전원 워크스테이션에 구성한 공기와 배기가스의 발전소 전체 흐름을 나타내는 화면이다. 두 대의 압입통풍기(FDF-A, B)에서 공급하는 연소용 공기는 공기예열기(GAH-A, B)를 지나면서 배기가스의 여열을 이용하여 온도를 높인 후 보일러에서 연료를 연소하는데 사용된 후 다시 공기예열기 배기가스로 배출된다.

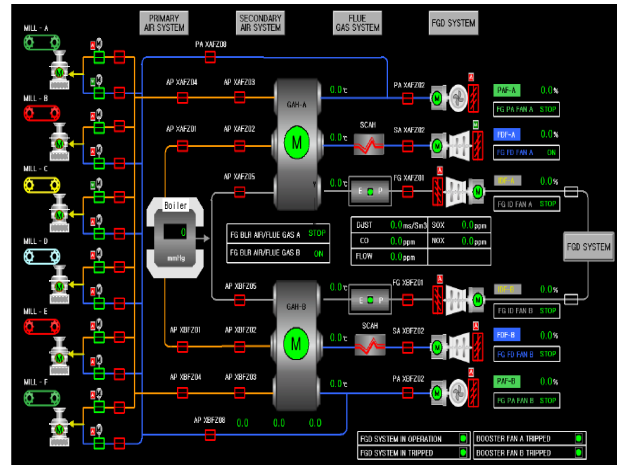


그림 3 공기 및 배기가스 계통도
Fig. 3 Air and flue gas system

2.2 제어 알고리즘의 설계

그림 5와 6은 각각 노내압력 제어 알고리즘, 유인통풍기 동익 제어 알고리즘의 전체구성을 나타낸다. 그림 5와 6의 제어 알고리즘은 현장 제어기와 함께 그림 4의 3단 캐스케이드 제어를 한다[8].

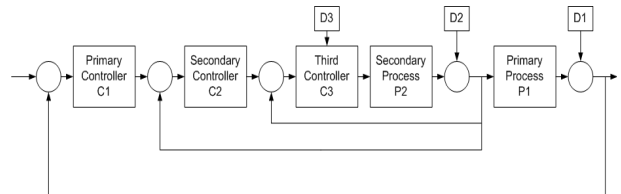


그림 4 캐스케이드 제어
Fig. 4 Cascade control

그림 5가 1차 제어로 그림 4의 C1에 해당되며 프로세스 P1은 노내압력이다. 그림 6은 2차 제어로 그림 4의 C2에 해당되며 프로세스 P2는 유인통풍기 동익위치이다. C3은 현장 동익을 제어하는 전동기 액추에이터 구동용 제어기이며 프로세스는 P2 동익위치이다. 1차제어 외란 D1은 연료량, 공기량, 급수량의 변화, 압력 측정 도압관의 막힘으로 인한 오차 지시 등이고 D2는 액추에이터 고장, 동익 위치치환신호 고장, 동익구동장치 고장 등이며, D3은 구동장치 유격에 의한 동익의 흔들림, 진동에 의한 동익 이동, D2와 같은 설비 고장 등이 해당된다. C2는 C1의 노내압력 제어 요구신호에 따라 동익을 제어하며, C3은 C2의 동익위치요구신호와 실제 동익위치간에 오차가 발생하면 전동기 액추에이터를 구동하여 동익을 움직이는 역할을 한다. 따라서 노내압력은 변하지 않으나 D3에 의해 동익위치가 동익위치요구신호와 오차가 발생할 경우, C2의 출력은 변하지 않으나 C3은 즉시 오차를 제거하기 위하여 전동기 액추에이터 구동용 제어기 출력을 증감한다. 반면 노내압력이 변하여 C2의 출력인 동익위치요구신호가 변하였으나 P2가 변하지 않을 경우 C2는 계속 변하게 된다.

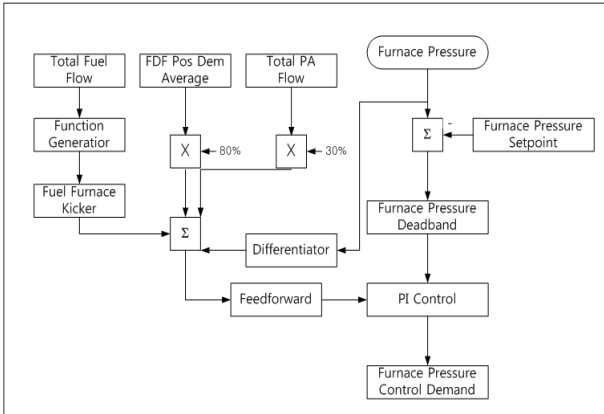


그림 5 노내압력 주제어기 알고리즘 전체구성
Fig. 5 Entire configuration of furnace pressure algorithm

소한 변화에 대한 실질적인 제어가 불가능하므로 노내압력과 노내압력 설정값과의 오차를 입력받아 그림 7과 같이 -1.8~+1.8% 범위 내에서 불감대를 조절하여 설정한다.

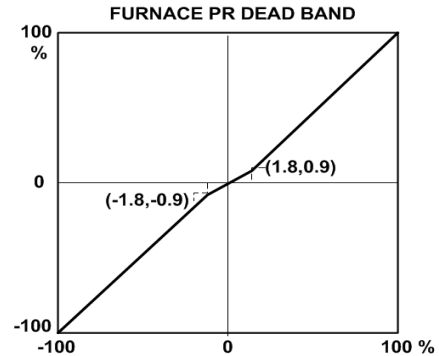


그림 7 노내압력 오차 불감대의 설정
Fig. 7 Deadband Setting of furnace pressure error

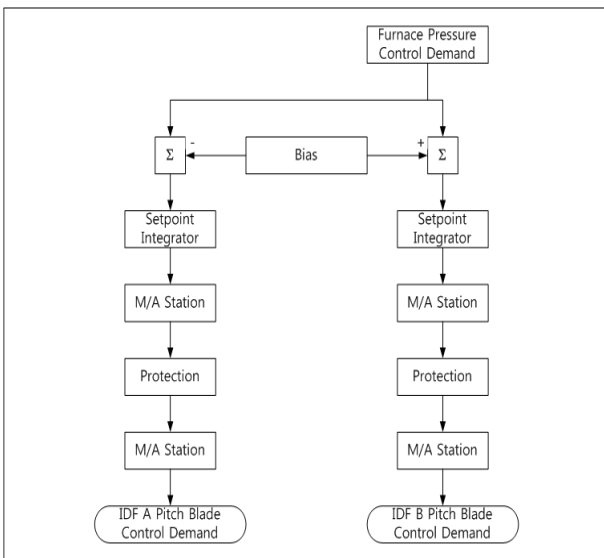


그림 6 압입통풍기 동익 제어 알고리즘 전체구성
Fig. 6 Entire configuration of control algorithm of pitch blade of forced draft fan

노내압력은 -200~200mmH2O 범위로 측정하며, 측정 신호의 고장을 고려하여 세 포인트를 측정하여 평균값을 사용한다. 세 포인트 중 고장이 발생하는 포인트는 자동으로 제외하고 나머지 두 포인트 평균을 사용한다. 두 개 포인트가 고장인 경우 정상적인 하나의 포인트로 제어한다. 세 포인트 중 정상적인 포인트가 없을 경우 미리 정해 놓은 값을 사용하거나 발전소를 비상정지시키도록 한다.

노내압력 설정값은 부압으로 47%인 -12mmH2O로 설정하고, 안전을 고려하여 분산제어시스템 프로그램의 기능블록의 설정값 설정범위를 30~70%로 제한한다. 또한 운전원이 설정값을 35% 이하로 입력할 경우 부압측으로의 과도한 압력 설정을 방지하고 보일러를 보호하기 위해 47%로 재설정된다.

그림 4에서의 각종 외란은 동익의 잦은 동작을 유발하여 액추에이터, 유압장치, 현장의 액추에이터 제어장치인 그림 4의 세 번째 제어기 등의 고장을 발생시킬 뿐만 아니라, 미

노내압력 제어기는 그림 4에서처럼 다양한 외란을 가지고 있다. 이러한 외란에 대하여 노내압력은 순간적으로 보호기준을 벗어날 수 있으므로 외란을 이용한 피드포워드 기능을 사용하여 제어기 속응성을 높일 수 있다. 피드포워드로 사용한 입력은 연료량, 연소용 공기량과 관련된 압입통풍기 동익위치 요구신호, 1차공기유량, 노내압력의 변화율을 그림 5와 같이 적용한다.[5]

연료량에 의한 피드포워드는 그림 8과 같다.

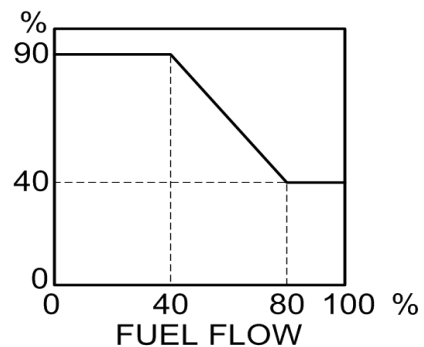


그림 8 연료량에 의한 피드포워드
Fig. 8 Feedforward by fuel flow

그림 8의 출력 신호는 미분기(Differentiator)에서 식 1과 같이 처리된다. 결과는 그림 9와 같다. KP는 비례이득, KD는 미분 이득, T1은 미분시간이다. KP, KD는 튜닝을 통해 설정하며 예를 들어 그림 9와 같이 그림 8의 출력이 시정수 100초로 변한 값을 100%에 대한 출력 7로 설정하여 사용할 수 있다.

$$Output = KP + KD \frac{T1s}{1 + T1s} \quad (1)$$

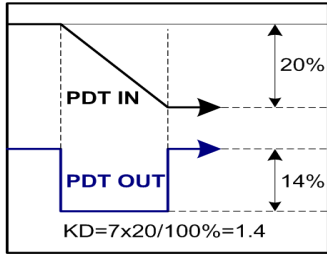


그림 9 미분기
Fig. 9 Differentiator

그림 9의 출력은 그림 10과 같이 변화시켜 최종 결과는 그림 11과 같이 출력된다.

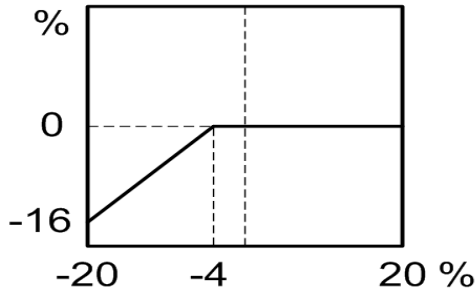


그림 10 연료량 키퍼 변환기
Fig. 10 Function generator for fuel flow kicker

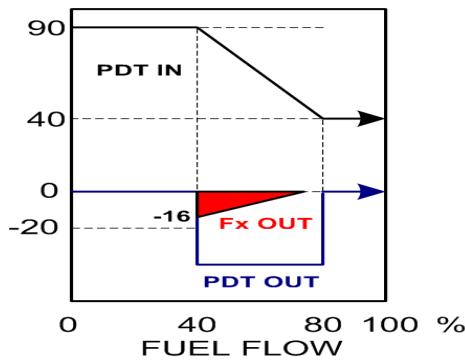


그림 11 연료량 키퍼
Fig. 11 Fuel Flow Kicker

유입통풍기의 연료량 키퍼는 연료에 의한 불시비상정지와 같이 발전소 이상 발생시 연료 급급에 의한 보일러 노의 수축현상을 방지하기 위한 기능을 한다.

압입통풍기 동익위치 요구신호의 평균값에 의한 피드포워드 변환기를 이용하여 구간별로 보다 세밀한 선행신호를 구현할 수 있으나 단순비를 80%를 적용하였으며 추후 시험을 통해 조정한다.

1차공기 충유량에 의한 피드포워드 역시 변환기를 이용하여 구간별로 세밀하게 선행신호를 구현할 수 있으나 단순비

율 30%를 적용하였으며 추후 시험을 통해 조정한다.

자체 노내압력 변화에 따른 미분기를 사용하여 미분 동작을 피드포워드로 사용한다. 이 신호는 미분기에서 식 1 및 그림 9와 같이 처리하되 미분이득과 미분시간은 시험을 통해 조정한다.

지금까지 결정한 노내압력을 제어하기 위한 노내압력 제어 요구신호는 그림 6의 유입통풍기 A, B의 동익위치 요구신호로 사용한다. A, B의 균형을 유지하기 위해 바이어스를 사용하는데 B측은 노내압력 제어 요구신호에 바이어스를 더하고, 반대로 A측은 감하여 균형을 유지한다. 자동 바이어스 운전시 유입통풍기 A, B의 위치 편차에 따라 바이어스가 자동 조절된다. 바이어스 범위는 -5~+5% 범위로 제한한다. 수동 바이어스 모드시 바이어스는 0%로 설정된다. 유입통풍기 A, B 모두 자동모드로 전환되면 60초 후에 바이어스가 자동모드로 절환된다. 유입통풍기 A, B 중 한 대라도 수동 모드이면 바이어스는 즉시 수동모드로 절체한다. 바이어스를 가감한 유입통풍기 A, B의 동익 설정값은 적분기를 거치는데 노내압력의 저하 및 상승으로 인하여 이미 설정해 둔 경보 저점 및 고점을 초과할 경우 적분동작을 중지하도록 설정되어 있다.

노내압력의 저점 및 고점 경보가 발생하는 경우 동익의 개폐동작을 차단한다. 또한 유입통풍기의 체적유량에 따라 동익의 개도 상한값을 제한하여 실속을 방지한다.

유입통풍기 동익위치 제어 요구신호와 동익위치의 편차가 1% 이상시에만 동익이 동작하며, 1% 미만인 경우 현재 위치값을 유지하여 잦은 동작에 의한 설비고장을 방지한다.

2.3 제어로직 코딩

설계한 노내압력 제어 알고리즘의 일부는 그림 12와 같으며, 표준심볼로 제작하여 어느 시스템에도 코딩하여 적용할 수 있도록 하였다. 알고리즘은 자동제어로직, 순차제어로직으로 구성되어 있으며, 표준심볼 로직은 그림 13과 같이 개발 중인 분산제어시스템에서 사용하는 스트라톤(Straton IEC61131-3 개발환경) 프로그램으로 코딩하였다[6][9].

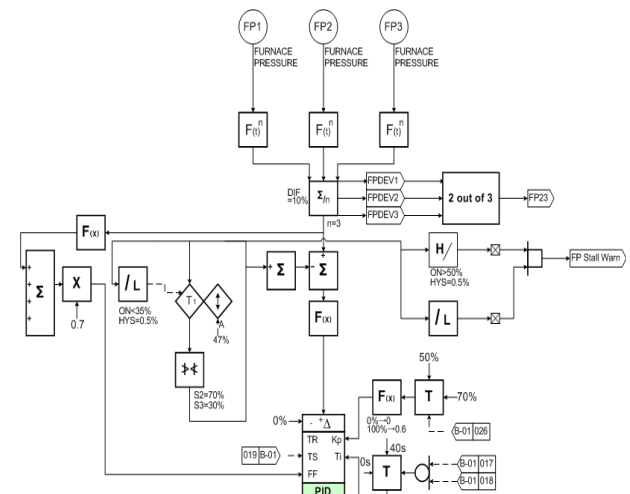


그림 12 표준심볼로 설계한 노내압력 제어 알고리즘의 일부
Fig. 12 Part of furnace pressure control algorithm designed by standard symbols

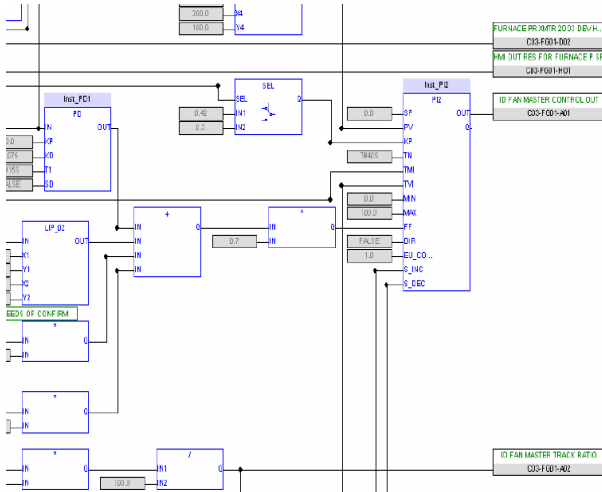


그림 13 코딩작업을 수행한 노내압력 제어 알고리즘의 일부
Fig. 13 Part of coded furnace pressure control algorithm

2.4 시뮬레이터의 구성

코딩한 제어로직을 시험하기 위하여 그림 14와 같은 시뮬레이터를 개발하여 이용하였다[7].

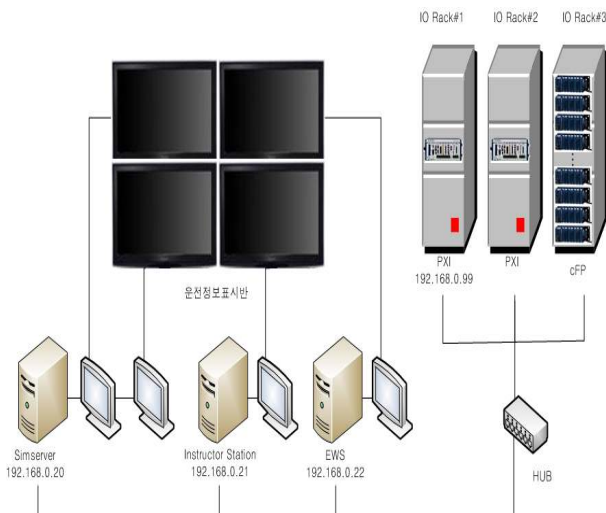


그림 14 시뮬레이터 구성도
Fig. 14 Simulator configuration

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. 시뮬레이터의 공정모델은 실행과일이 C++ 알고리즘인 쓰리키마스터(3Keymaster)를 사용하였다. 시뮬레이터에는 실제 발전소에 설치하게 될 제어 알고리즘을 설치한 분산제어시스템을 통신을 통해 연결하여 시험할 수 있도록 그림 14의 입출력 신호 랙(IO Rack #1~3)을 구성하였다. 입출력 신호 랙은 랩뷰(Labview) 프로그램으로 개발된 인터페이스 시스템이다. 분산제어시스템을 시뮬레이터에 연결하면, 시뮬레이터는 실제 발전소와 같이 설비의 공정특성과 제어신호를 발생하여, 개발한 알고리즘을

실제와 같이 시험할 수 있도록 하였다[6].

2.5 분산제어시스템의 구성

제어모델과 공정모델로 구성된 그림 14의 시뮬레이터에 그림 15와 같이 보일러 분산제어시스템 패널 1 세트, 터빈 분산제어시스템 패널 1 세트로 구성된 실제 패널을 신호선으로 입출력 신호 랙에 연결하였다.

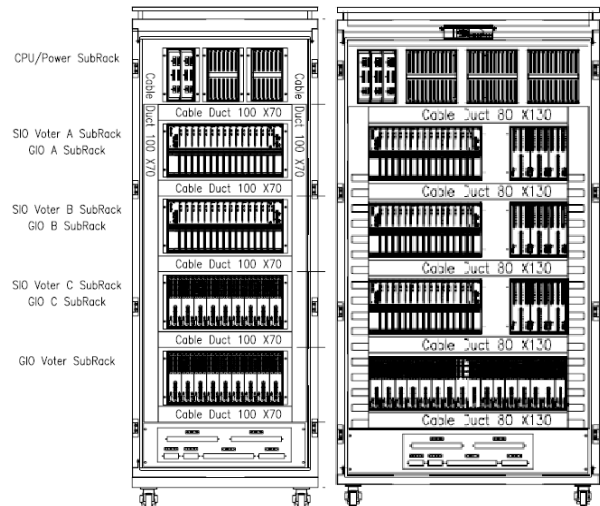


그림 15 시뮬레이터 분산제어시스템 패널
Fig. 15 Distributed control system panel for simulator

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 14의 엔지니어링 워크스테이션을 통해 그림 15의 프로세스 카드에 설치한 후 시뮬레이터의 공정모델에 연결하여 실제 발전소 형태로 시험을 하였다[6]. 각 단위 설비에 대한 모의시험이 끝난 후 발전소에 설치할 분산제어시스템 전체를 시뮬레이터에 연계하여 각 단위설비간의 신호연계를 통한 종합모의시험을 시행하였다.

2.6 모의 시험

노내압력 제어 알고리즘은 다음과 같은 항목으로 구분하여 시험하였다. 노내압력 신호 설정, 노내압력 피드포워드 제어 신호, 노내압력 PI 제어기, 유인통풍기 동익 제어 요구 신호 바이어스, 보호기능 등 그림 5, 6의 각 부분을 개별 시험하고 전체적인 알고리즘의 응용상태를 자동제어로직, 순차제어로직, 출력감발로 구분하여 시험 확인하였다.

그림 16은 그림 6의 유인통풍기 동익제어 요구신호의 바이어스 부분을 시험 한 결과를 보여주고 있다. 압입통풍기 #A, B 중 어느 하나가 수동으로 절체될 경우 바이어스는 운전원이 수동으로 조작할 수 있으며, 5%이상을 줄 경우 ±5% 범위로 제한되어 출력되는지를 확인하였다. #A, B 모두 수동으로 절체될 경우 바이어스가 "0"으로 설정되는지를 확인하였다. 이러한 형태의 시험을 통해 코딩한 결과 및 개발한 기능블록이 제대로 동작하는지 여부, 파라미터 오류 등을 확인하였다[6].

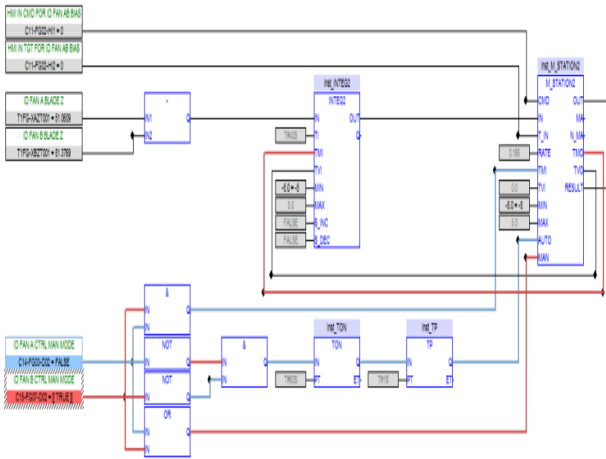


그림 16 자동제어로직 시험 일부(유인통풍기 동역제어 요구신호 바이어스)
 Fig. 16 Part of automatic control logic test(IDF Pitch Blade Control Demand bias)

자동제어로직 시험을 마무리하고 순차제어로직을 시험하였다. 순차제어로직은 유인통풍기 기동, 정지 로직, 동역 구동 작동유 펌프 제어로직, 작동유 히터 제어로직 등으로 구성되어 있다[6].

그림 17과 18은 유인통풍기 기동, 정지 순차제어로직에 의해 유인통풍기가 자동으로 기동하고 정지하는 단계를 정상적으로 완료한 것을 보여주고 있다.

그림 17에서 유인통풍기 #A가 기동하면서 노내압력을 제어하기 위해 #B 동역위치귀환신호가 감소한 것을 볼 수 있다. 유인통풍기 #A가 중간에 순간적으로 개방동작을 하여 추후 시험을 통한 튜닝 또는 시뮬레이터의 조정이 필요한 것으로 보이나, 제어알고리즘에는 문제가 없음을 확인하였다.

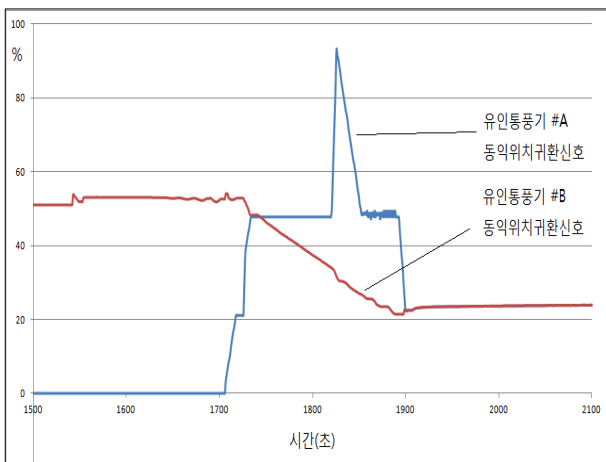


그림 17 유인통풍기 #A 순차제어 기동
 Fig. 17 Start-up by sequence control of induced draft fan #A

그림 18에서는 유인통풍기 #A를 정지하면서 노내압력을 제어하기 위해 #B 동역위치귀환신호가 증가한 것을 볼 수

있다. 이러한 방법으로 모든 순차제어로직 시험을 마무리하여 순차제어로직 설계의 신뢰성을 확인하였다. 튜닝은 전체 분산제어시스템 패널을 시뮬레이터 공정모델과 연계한 후 수행하였다.

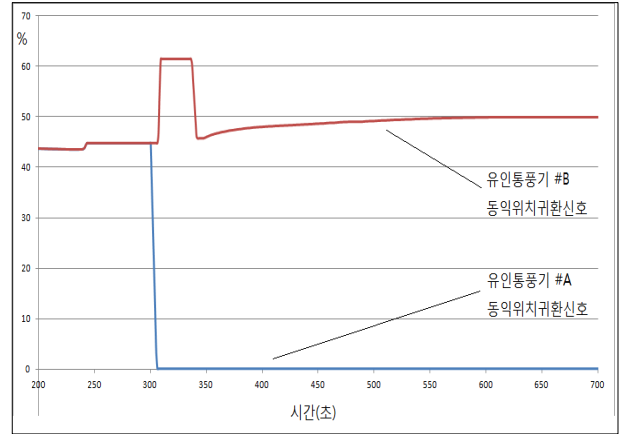


그림 18 유인통풍기 #A 순차제어 정지
 Fig. 18 Stop by sequence control of induced draft fan #A

다음으로 유인통풍기 두 대 중 한 대가 불시에 정지되었을 경우를 시험하는 런백시험을 시행하였다. 통풍기가 불시에 정지될 경우 노내압력의 급상승으로 인하여 보일러 팽창 등의 대형사고가 발생할 수 있다. 따라서 연료를 감소시키면서 터빈을 회전시키는 보일러 주증기 유량을 감소시키게 되는데 이때 남은 한 대의 유인통풍기로 노내압력을 안정적으로 제어할 수 있어야 한다. 그림 19는 유인통풍기 #A의 런백시험 결과를 보여주고 있다.

그림 19에서 유인통풍기 #A가 주진동기 차단기 개방에 의해 불시 정지하는 즉시 유인통풍기 #B 동역이 열리면서 노내압력의 상승을 억제하여 급상승한 노내압력이 감소하는 것을 볼 수 있다.

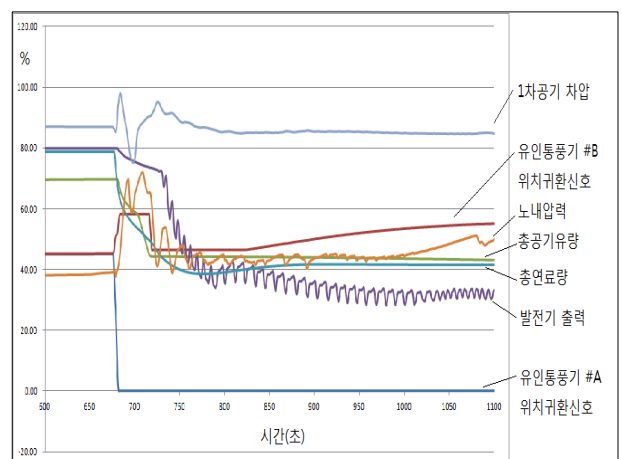


그림 19 유인통풍기 #A 런백시험 결과
 Fig. 19 Runback test result of induced draft fan #A

이때 1차공기 차압과 유인통풍기에 연동되는 압입통풍기에 의한 총공기유량은 적절히 제어하였으나 보일러 노내 압

력은 정압쪽으로 상당부분 상승하여 노내압력을 제어하는 유인통풍기 제어알고리즘을 추후 튜닝을 통해 안정적으로 제어할 수 있도록 해야 할 부분으로 판단하였다. 유인통풍기 #B의 경우도 동일한 시험을 하여 성공적으로 런백시험을 수행함으로써 설계한 노내압력 제어 알고리즘의 건전성과 신뢰성을 확인함으로써 추후 전체설비에 대한 분산제어시스템 연계를 통한 종합모의시험이 가능하게 되었다.

2.7 현장설치

시뮬레이터에서의 모든 분산제어시스템의 단위기기시험과 종합시험을 성공적으로 완료한 후 모든 분산제어시스템을 발전소 현장에 설치하였다. 현장에 설치한 분산제어시스템의 전체구성은 그림 20과 같다. 그림 20의 자동제어패널(APC) 행의 각 시스템은 여러 대의 패널로 구성되어 있다.

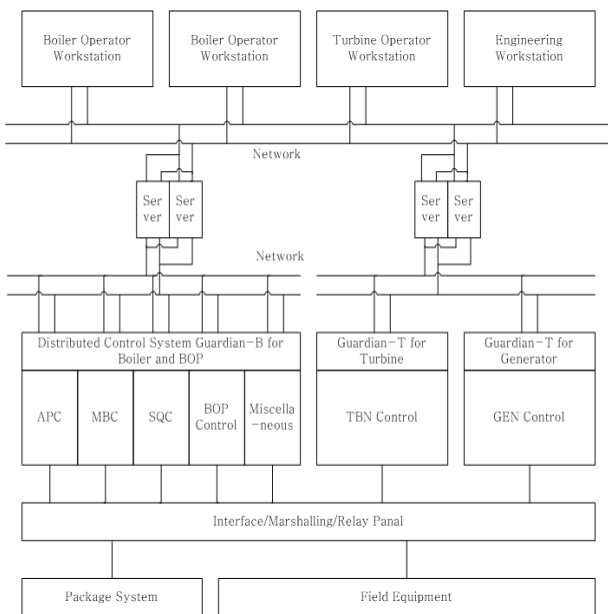


그림 20 분산제어시스템 구성도
Fig. 20 Configuration of the distributed control system

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 분산제어

시스템 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, 증기 온도 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, 점화 기동, 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 구성되어 있다. 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, 부속여자제한, 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 15와 같이 자신의 중앙처리장치(CPU)를 가지며 어느 하나의 분산제어시스템에 문제가 발생할 경우 경보신호를 발생하여 다른 분산제어시스템에 전달함으로써 경보신호를 전달받은 분산제어시스템은 수동으로 절체되거나 출력을 늘리거나 줄이도록 하여 설비가 안정된 상태로 운전할 수 있도록 분산제어를 한다[10]. 그림 20의 분산제어시스템은 시뮬레이션에 연계하여 전체모의시험을 성공적으로 수행한 후 현장에 설치하였으며 시뮬레이션으로 수행한 시험 항목뿐만 아니라 실제 발전소에서 수행하는 단위기기 시운전, 인터록 시험, 평형 통풍 시험(Air Balance Test), 런백시험 등을 거쳐 신뢰성을 확인하였다.

2.8 현장 시험

그림 20과 같이 제어 패널과 워크스테이션 등 모든 분산제어시스템을 실제 발전소에 설치한 후 현장시험을 수행하였다.

그림 3의 공기에열기(GAH) A, B를 기동한 후 유인통풍기와 압입통풍기의 B 체인을 먼저 시퀀스 기동에 의해 순차적으로 성공적으로 기동하였으며, 그림 21과 같이 한 체인 운전 중에도 노내 압력을 정상적으로 유지하고 있다. 그림 21에서 유인통풍기와 압입통풍기의 A 체인을 기동하면서 분산제어시스템 제어 알고리즘의 균형 기능에 의해 A, B 체

인이 연소용 공기 총 유량과 노내 압력을 균등하게 분담하여 운전하고 있다.

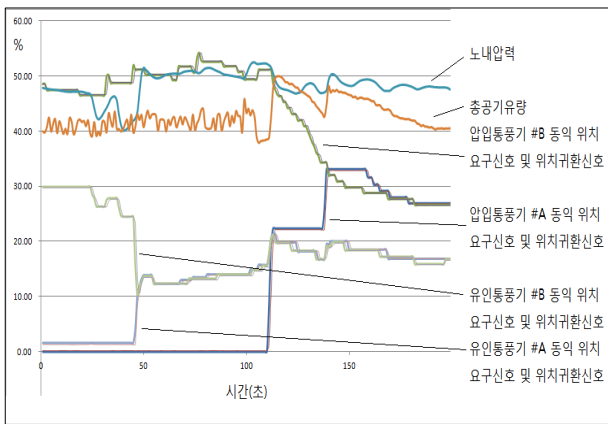


그림 21 평형통풍시험 중 유인통풍기 #B 기동 이후 #A 기동시 운전

Fig. 21 Start-up of induced draft fan #A after start-up of #B during air balance test

그림 22에서 압입통풍기 B 정지시 운전 중인 압입통풍기 A 1대가 총공기유량을 신속히 제어하여 유지하고 있으며 총공기유량 변화로 인한 노내 압력의 변화를 운전 중인 유인통풍기 A, B 2대의 적절한 동작으로 안정범위 내에서 운전하고 있다. 압입통풍기 B 정지 후 동일 체인의 유인통풍기 B를 정지시켰으며 노내압력이 48mmH2O까지만 상승한 후 안정되는 양호한 운전상태를 보여주었다.

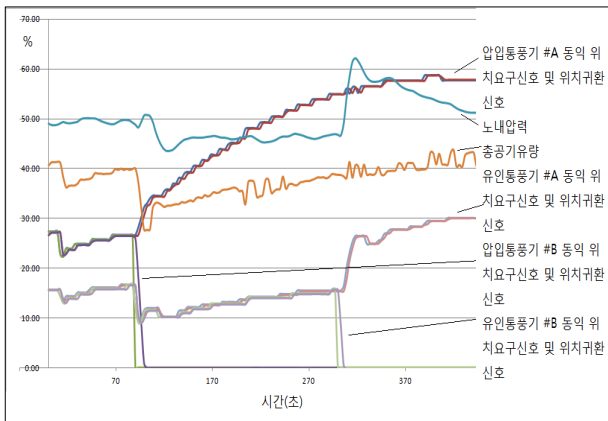


그림 22 평형통풍시험 중 유인통풍기 #B 정지시 #A에 의한 노내압력 운전 상태

Fig. 22 Furnace pressure operation by induced draft fan #A after stop of #B during air balance test

그림 23에서 압입통풍기 및 유인통풍기 A 체인 동역 위치요구신호의 지속적인 변화에 대하여 분산제어시스템, 제어 알고리즘, HMI, 계측기, 액추에이터, 총공기유량, 노내압력 등의 전체 시스템의 정상적 응답상태를 확인함으로써, 양호한 운전상태를 확인하였다.

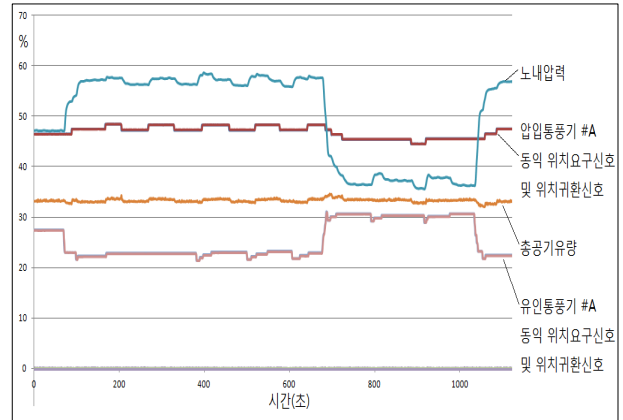


그림 23 압입통풍기 및 유인통풍기 #A 체인 동역 위치요구 신호 지속변화에 따른 응답

Fig. 23 Continuous change of pitch blade position of forced and induced draft fan #A

그림 24는 최초점화시 통풍계통의 응답상태를 나타내고 있다. 보조연료유량이 형성된 두 지점이 점화한 시점이며 점화 이후 유량이 "0"이 된 부분이 소화한 시점이다. 최초 점화시 노내압력이 설정값인 47%에서 58%까지 상승하였으나 유인통풍기 A, B의 응답으로 다시 41%까지 내려간 후 정상화되었다. 정방향으로 44mmH2O, 부방향으로 24mmH2O 요동한 후 바로 설정값으로 수렴하는 것을 확인하였다. 보조연료 유량이 증가하면서 16.2%의 유량 시점에서 유인통풍기 동역 위치가 증가하여 정상적으로 노내압력을 유지하는 것을 확인하였다. 이후 소화과정에서 노내압력의 저하를 적절히 제어하는 것을 확인하였다.

총공기유량은 압입통풍기 A, B 동역의 큰 변화 없이 최소 유량인 20%에서 적절히 유지되고 있다. 두 번의 점화시 유인통풍기와 압입통풍기의 정상적인 응답상태를 확인하였다.

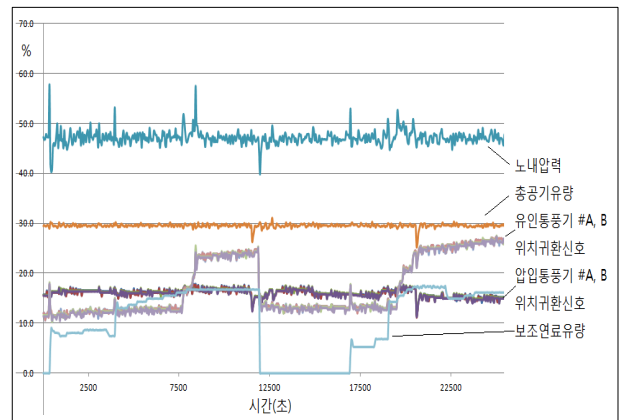


그림 24 보일러 최초점화시 유인통풍기 및 압입통풍기 응답 상태

Fig. 24 Operation of induced and forced draft fan during initial firing of boiler

그림 25는 발전기를 전력계통에 연계시키는 계통병입시 운전상태를 보여주고 있다. 1차공기유량은 총공기유량에 영

향을 미치고 총공기유량을 제어하는 압입통풍기의 운전은 유인통풍기와 연동되므로 1차공기통풍기와 압입통풍기를 유인통풍기와 함께 운전상태를 확인하였다. 계통병입 전에 1차공기통풍기 A, B의 기동으로 1차공기와 노내압력과의 차압의 최소값인 800mmH₂O를 잘 유지하고 있으며, 연료를 공급하는 급탄기 속도에 따른 1차공기와 노내압력과의 차압 설정값의 변화를 1차공기통풍기 A, B가 균형을 적절히 유지하면서 제어하고 있다. 최초 계통병입 후 유인통풍기, 압입통풍기가 노내압력과 총공기유량을 적절히 제어하고 있으나, 1차공기통풍기 입구 베인이 개방될 때 총공기유량이 반대로 감소하는 방향으로 급증했다 정상화되었으며, 반대로 1차공기통풍기 입구 베인이 닫히는 경우는 총공기유량이 반대로 증가하는 방향으로 급증했다 정상화되는 등 1차공기에 따른 총공기유량의 급증감시 노내압력의 변화는 뚜렷이 나타나지 않았으나, 압입통풍기의 동익 위치요구신호 및 1차공기유량 변화에 의한 피드포워드의 영향으로 유인통풍기의 응동이 큰 것을 확인할 수 있었다. 피드포워드 부분은 추후 튜닝을 통해 조정이 필요한 것으로 판단하였다. 출력을 최대 145MW까지 증발했으며, 최대출력 30%이하의 저부하에서는 각 통풍기의 응동이 적절히 이뤄진 것을 알 수 있었다.

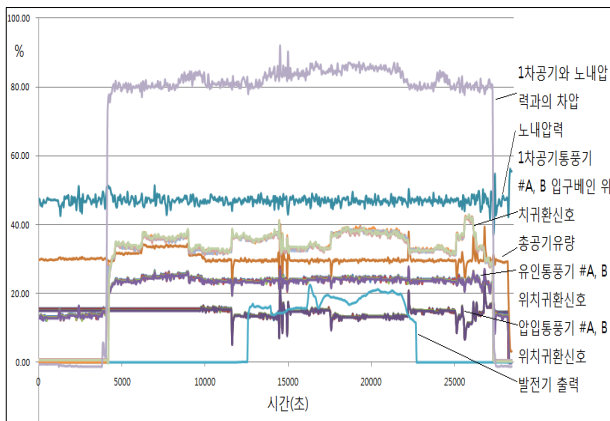


그림 25 최초 계통병입시 유인통풍기 및 압입통풍기, 1차공기통풍기 응동상태

Fig. 25 Operation of induced draft fan, forced draft fan and primary air fan during initial synchronization

그림 26과 같이 500MW 발전기 최대 출력에서 유인통풍기 B를 불시비상정지시켜 발전소 런백시험을 시행했다. 압입통풍기와 1차공기통풍기도 각각 B, A를 불시비상정지하여 런백시험을 시행했다. 유인통풍기 B의 불시비상정지로 노내압력이 120mmH₂O(80%)까지 상승한 후 정상화되었다. 유인통풍기 B 불시비상정지에 의하여 동일 체인의 압입통풍기 B가 불시비상정지되고, 압입통풍기 A의 동익 위치요구신호가 변하여 피드포워드에 의해 유인통풍기 A가 닫히면서 다소 노내압력의 상승폭이 컸으며, 추후 튜닝을 통해 조정이 필요한 것으로 판단하였다.

동일 체인의 압입통풍기 B가 불시비상정지되면서 압입통풍기 A 1대가 정상적으로 총공기유량을 설정값에 따라 적절히 제어하여 안정화되었다. 1차공기와 노내압력간의 차압

은 1000mmH₂O, 680mmH₂O 범위에서 정상화되었다.

결과적으로 유인통풍기 B 불시비상정지에 의한 출력감발시 통풍계통 전체의 응동은 양호한 것으로 확인되었다.

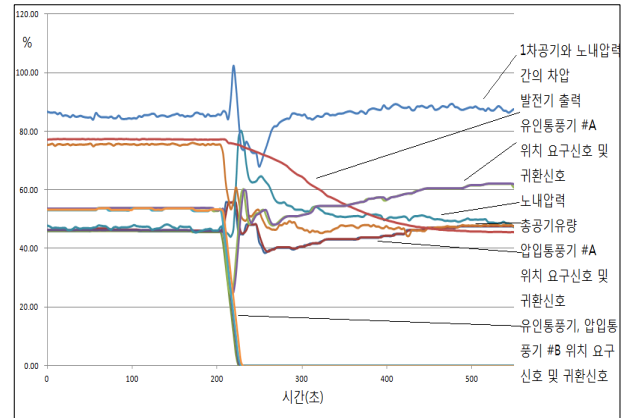


그림 26 유인통풍기 #B 런백시험

Fig. 26 Runback test by induced draft fan #B trip

위와 같이 통풍계통의 단위기기 시운전, 인터록 시험, 평형 통풍 시험, 런백시험 등을 모두 연계하여 시험하고, 피드포워드, 자동모드 조건, 불시비상정지 신호 등의 오류와 튜닝 포인트 등을 확인하여 수정 및 조정을 마무리하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 500MW급 석탄화력발전소 보일러 노내압력 제어알고리즘의 개발과정을 설계, 코딩, 시뮬레이터의 구성, 분산제어시스템의 구성, 모의시험, 현장설치, 현장시험 단계로 기록하였다. 시험단계에서 이미 개발한 500MW급 석탄화력발전소 시뮬레이터를 사용하였으며, 기존 발전소에서 운영할 수 있을 정도의 자동제어, 순차제어, 불시비상정지 등을 시험하여 신뢰성을 확보하였다. 보일러 노내압력 제어 알고리즘은 하나의 분산제어시스템 패널을 구성하며, 다른 분산제어시스템과의 연동을 위하여 많은 신호를 연계하여 수차례에 걸쳐 종합시험을 완료하였다. 신뢰성을 확보한 분산제어시스템은 발전소 현장에 설치하여 현장설비와 연계하여 단위기기 시운전, 인터록 시험 등부터 시작하여 평형통풍 시험, 런백시험 등 각종 운전제어 신뢰성 시험을 통해 설비의 안정성을 검증하였다. 현재 분산제어시스템과 설치한 제어로직 알고리즘을 정상적으로 운영하고 있으며, 10일간의 연속운전을 통해 신뢰성을 검증함으로써, 전력계통에 연계하여 성공적으로 상업운전을 하고 있다[6].

본 연구는 이제까지 외국기술로 제작, 설치되어 왔던 500MW급 석탄화력발전소의 제어알고리즘과 분산제어시스템을 국산화 적용하기 위하여 정부에서 추진한 사업으로서, 성공적으로 완료되어 국내의 신규 및 개조 발전소의 안정적인 운영과 화력발전기술의 국내자립뿐만 아니라 해외 발전소 사업에도 기여할 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 2010년도부터 지식경제부 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행 중인 연구과제로 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 최우성, 송기욱, 김범신, 현중섭, 허재실, “한국 화력 발전설비의 수명평가기준 개발 및 활용”, 대한기계학회 논문집, A권 제34권 9호, pp. 1271, 2010.
- [2] 박두용, 변승현, “국산개발 보일러 디지털 분산제어시스템의 화력발전소 실용화 최초적용”, 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, pp.2156, 2001.
- [3] 임익현, “국산개발되고 있는 500MW급 화력발전소용 통합감시제어시스템”, C&I, pp. 34-45, 2010.
- [4] 문홍주, “발전소 적용을 위한 분산제어시스템의 요건과 현황”, ICASE, pp. 19, 1998.
- [5] G.F.(Jerry) Gilman, “Boiler Control Systems Engineering”, ISA, ISBN 1-55617-907-3, pp. 23-30, 2005
- [6] 임건표, 이흥호, “석탄화력발전소 보일러 연소용 공기 제어 알고리즘의 개발”, 대한전기학회논문지, 제61권, 4호, pp. 153-160, 2012. 12.
- [7] SAM G. Dukelow, The Control of Boilers, 2nd Edition, The Instrumentation, Systems and Automation Society, pp. 215, 1991.
- [8] Paul W. Murrill, Ph.D., Fundamentals of Process Control Theory, Instrument Society of America, pp. 137, 2000.
- [9] 육십균, EWS Logic & Loop Drawing R0, 두산중공업, pp. 81, 2011.
- [10] 임건표, 박두용, 김종안, 이흥호, “발전소 보일러 급수 주 제어 시스템의 개발”, 대한전기학회논문지, 제61권 3호, pp. 447, 2012. 3.

저 자 소 개



임 건 표 (林 建 杓)

2013년 충남대 전기공학과 대학원 졸업 (박사). 현재 한전전력연구원 선임연구원.
Tel : 042-865-5603
E-mail : kepcolim@kepcoco.kr



허 광 범 (許 光 範)

2008년 충남대 기계공학과 대학원 졸업 (박사). 현재 한전전력연구원 책임연구원.
Tel : 042-865-5382
E-mail : kbhur@kepre.re.kr



박 두 용 (朴 斗 用)

1991년 한밭대 전기공학과 졸업. 현재 한전전력연구원 책임 연구원.
Tel : 042-865-5642
E-mail : papiyon@kepcoco.kr



이 흥 호 (李 興 浩)

1994년 서울대 컴퓨터공학과 대학원 졸업(박사), 현재 충남대학교 전기공학과 교수.
Tel : 042-821-5656
E-mail : leehh@cnu.ac.kr