

초초임계압 보일러의 제어전략

박두용\*, 신영진

한국전력공사 전력연구원 수화력발전연구소 I&C그룹

Control Strategy of Ultra Super Critical Pressure Boiler

Dooyong Park\*, Youngjin Shin

Korea Electric Power Research Institute, Power Gen. Lab.

**Abstract** - 현재 산업자원부 전력산업 연구개발사업 연구과제로 진행 중인 차세대 초초임계압 화력발전 설계와 관련하여 본 논문은 보일러 제어시스템의 계층적 구조와 기능에 대해 논한다. 제어시스템의 기본 요건인 통합 제어시스템을 구현하기 위해 본 논문은 어떤 종류의 정보가 통합 제어시스템과 이것을 구성하는 하부 구조의 제어시스템 사이에 요구되는지 논한다. 또한 초초임계압 발전소의 제어 운전 모드의 구성과 각 운전 모드에서의 제어 전략을 논한다. 본 논문은 그 중 가장 중요하게 취급되는 자동플랜트 제어(Automatic Plant Control, APC)의 구성에 중점을 두며 이러한 자동 플랜트 제어는 이미 언급된 제어시스템의 계층적 구조와 정확하게 부합되도록 설계되어 진다. 현 초초임계압 보일러의 제어 전략에서는 하부 구조의 제어시스템은 상부 구조의 제어시스템에서 전달되는 목표치와 함께 다른 계층 혹은 동일 계층의 다른 제어시스템 상태와 출력 중 필요한 것을 모두 종합하여 필요한 제어 목표치를 설정하고 이에 의해 제어를 하도록 되어 있으나, 초초임계압 보일러의 제어 전략은 계층적 구조의 개념에 부합하도록 항상 상위 계층의 제어시스템 출력으로부터 필요 목표치를 설정하도록 설계하고 있다.

1. 서 론

화력발전소의 제어를 위해 가장 기본적인 것 또한 세부 제어조직의 설계를 위해 최우선되는 제어전략은 보일러의 설계 개념을 준수하는 범위에서 대부분 다양한 설계 업체 혹은 제어시스템의 공급 업체에 의해 설계가 진행되는 까닭에 동일한 보일러 설계를 갖는 발전소끼리도 서로 다른 설계 개념과 기동 절차를 갖는다. 또한 현재 발전소는 발전을 위한 보일러, 터빈, 발전기 별로 서로 다른 제어시스템을 갖고 있으며 탈황 설비와 같은 보조 설비의 제어시스템은 기존의 제어시스템과 완전히 분리되어 운전되고 있다. 현재 한국전력공사에서는 산업자원부의 전력산업 연구개발사업 연구과제로 증기 압력 265 bar, 최종 증기 온도 610 °C를 갖는 1000MW 출력의 초초임계압 화력발전소 설계과제를 수행중이다. 초초임계압 화력발전소는 기저부하용으로 설계되며 더불어 부하 추종 능력도 갖도록 설계되어진다. 현재 국내에 존재하지 않는 초초임계압 화력발전소의 보일러 제어를 위해서는 초임계압 화력발전소의 제어 전략이 갖는 단점을 보완하는 새로운 형태의 제어 전략과 또한 통합된 제어시스템이 설계되어야 한다.

본 논문은 화력발전소에서 사용되는 모든 종류의 제어시스템이 연결된 통합 제어시스템에 대해 설명한다. 또한 통합 제어시스템의 계층적 구조와 이에 의한 계층적 구조를 갖는 제어 전략에 대해 설명한다.

2. Integrated Control and Management System (ICMS)

화력발전소 제어시스템에는 기본적으로 보일러, 터빈, 발전기 제어를 위한 주 제어시스템으로 구성되어 있다. 또한 전기집진기, 배가스 탈황설비와 같은 보조 설비의 제어시스템을 추가적으로 갖는대 대부분의 경우 이러한 보조 설비의 제어시스템은 주 제어시스템과는 별도로 설치되고 또한 별도로 운영된다. 하지만 오늘날 화력발전소의 운전 개념은 한 명의 운전자에게 의해 화력발전소의 모든 상황 감시와 제어를 통한 발전소 운영을 목표로 하는 One-man 제어를 구현하는 것이 추세이므로, 이러한 현상에서 운전자는 인적 오류의 가능성을 최소화하기 위해 감시와 제어에 있어 추가적인 판단 시스템의 도움을 받는다. 운전자의 결정 상황에 도움이 되는 이러한 판단 시스템은 전 화력발전소 프로세스에 걸쳐 필요한 운전 정보를 취득하기 위해 화력발전소에 존재하는 모든 제어시스템으로부터 필요한 정보를 전달받을 수 있는 방법을 요구한다. 또한 운전자뿐만 아니라 운영 계층에서의 의사 결정을 돕기 위해 발전소 운전과 정비와 관련된 일련의 모든 행위를 계획하고 감독할 목적으로 발전소 관리 시스템 및 최적화 도구 등의 시스템이 도입되는 것 역시 현재 발전소 운영의 추세이다. 따라서 한때는 보일러 시스템의 운전만을 위해 사용되던 제어시스템이 이제는 직간접적으로 화력발전소 전체의 운전과 제어에 영향을 미칠 수 있는 상황을 요구되고 있다. 결국 보일러, 터빈, 발전기의 주 제어시스템과 모든 보조 제어 설비의 시스템 및 운영 관리 도구까지 물리적으로 연결되어 통합 제어시스템(ICMS : Integrated Control and Management System)을 구성한다.

모든 제어시스템의 통합과 기능을 단일 시스템으로 통합하는 것은 비용의 급격한 상승을 초래한다. 비록 모든 제어시스템이 통합되기는 하지만 발전소 운전자가 화력발전소의 운전과 관련하여 모든 세부 프로세스의 모든 운전 정보가 필요한 것이 아니므로 실제로는 운전과 제어를 위해 필요한

최소한의 정보만이 전달되면 충분하다. 따라서 화력발전소의 모든 시스템에서 생성되는 정보에 대한 평가 필요하다. 기본적으로 화력발전소의 운영을 위해 필요한 최종 목표치는 일반적으로 보일러 주 제어시스템에서 생성되므로 제어시스템의 일차적 책임은 보일러 제어시스템이 전담하도록 한다. 운전자 및 제어에 대해 필요한 정보를 제공하기 위해 모든 시스템은 네트워크로 연결되어야 한다. 터빈과 보일러 및 기타 보조 설비 중 자체적인 제어를 갖고 이를 통해 일차적인 제어가 이루어지는 설비에 대해서 필요한 정보는 주 제어시스템으로부터 전해지는 목표치와 반대로 주 제어시스템으로 전달되는 비상 신호 및 보호 신호만이 네트워크를 통해 전달될 필요가 있다.

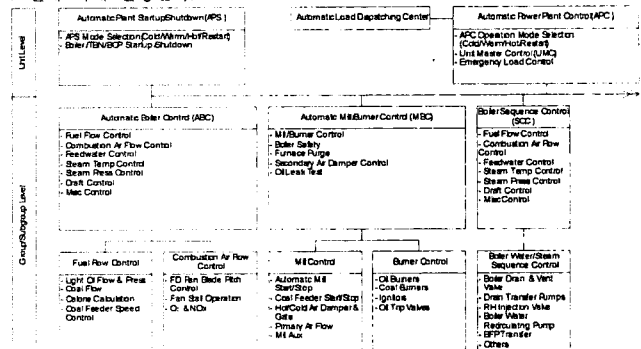
실제 발전소에 설치되는 제어시스템의 하드웨어 및 네트워크 Topology에서 이미 언급된 계층적 구조를 가질 필요는 없다. 제어시스템은 다음에 설명된 계층적 구조의 제어 전략에 의해 시스템 내에서의 기능적 위치가 결정된다. 모든 시스템은 네트워크에서 제어시스템 계층이 일시에 정지하는 것을 막을 수 있고 또한 정지된 시스템이 전체 시스템에 영향을 끼칠 수 없도록 고립시킬 수 있는 구조를 갖도록 모든 방법을 동원해 설계되어야 한다는 기본적인 가이드라인을 가지고 설계한다.

3. Control Hierarchy

<그림 1>은 차세대 초초임계압 화력발전소의 제어 전략을 구성을 위한 계층적 구조를 나타내었다. 제어 전략의 계층적 구조와 그것들이 위치에 따라 이를 수용하는 제어시스템의 통합 제어시스템 내 계층적 위치를 결정한다. 제어전략의 계층은 크게 3단계로 구성된다. 1) the unit level, 2) the group and subgroup level, 3) the drive level의 3단계로 구성되되 각 계층 구조 내부에 위치하는 모든 제어시스템은 개념적으로는 동등한 위치가 된다.

Unit level은 가장 상층부의 계층으로 화력발전소 전반에 걸친 목표치를 결정한다. 여기에서 결정되는 목표치는 화력발전소의 제어시스템 내 하부 구조 제어기들에 영향을 미친다. Unit level은 Automatic Plant Control (APC), Automatic Process Start-up/Shutdown (APS) 등의 기능적 블록을 포함한다. APC는 다음 계층에 존재하며 보일러, 터빈, 발전기의 모든 제어 행위를 부분적으로 담당하는 제어시스템의 행위를 감독하기 위한 제어시스템으로 이 블록은 기존의 주 제어시스템과 동일한 역할을 한다. APS는 화력발전소의 기동과 정지를 자동화하기 위한 것으로 다음 하부 구조의 SQC에서 실제로 행해지는 단위 기기에 대한 기동과 정지 및 이를 위한 조건의 판단 등을 감독하기 위한 제어시스템이다.

Group and subgroup level는 상부 Unit level에서 결정된 목표치를 기초로 실제 대부분의 제어 행위를 시행하는 계층이다. Group and subgroup level은 Automatic Boiler Control (ABC), Turbine Control Group (ATC), Sequential Control group (SQC), Balance Of Plant (BOP) 등으로 구성되는데 이러한 세부 구성 요소는 ABC는 보일러의 제어에 대해 관련하며 ATC는 터빈의 제어에 대해 관련하는 것과 같이 각 제어시스템의 기능적 요건에 의해 결정된다.



<그림 1> 제어시스템의 계층적 구조

이 계층에서 고려하여야 할 것은 실제로 Group and subgroup level 내부의 많은 제어시스템이 독립적으로 운전되지 않는다는 것이다. 임의의 제어시스템은 자기 역할의 제어 행위를 하기 위해 떨어져 있는 다른 제어시스템으로부터 필요한 정보를 전달받을 필요가 있다. 그러나 이를 모두 수용하기 위해서는 Group and subgroup level 내부의 제어시스템이 실제로 통합 제어시스템의 계층적이며 또한 동일 Level 이내에서 수평이 되도록 하는 개념과 상충될 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 많은 제어시스템에서 공통적으로 요구되고 사용되는 Throttle Pressure Set Point, Fuel Calory 와 같은 제어시스템을 별도로 구성하도록 한다. 이러한 공통적인 신호를 요구하는 제어시스템은 공통 제어시스템으로부터 필요한 정보를 취득하도록 하며 이를 위해 필요 제어시스템과 연결되지 않도록 구성한다. 이러한 공통 로직 혹은 보상 로직(Compensation Logic)은 설계의 계층적 개념을 손상하지 않도록 계층의 상위 구조에 위치된다.

다음 하부 구조는 Drive level로 이 계층은 실제의 단위 기기를 구동하고 감시하기 위한 계층이다. 실제 설계되는 제어로직에서 Drive level의 제어시스템은 단위 기기를 위한 Drive Logic으로, 동일한 구조의 제어로직이 반복적으로 나타나며 반복적으로 사용되는 제어로직의 설계를 위해 Big Block 혹은 심플 형태의 다계층 구조 제어시스템이 실제로 적용된다. 따라서 Drive level은 하나의 계층 구조이지만 내부에 또 다른 계층 구조를 갖는 구조이다.

#### 4. OPERATION MODE and UNIT MASTER CONTROL

1000MW의 출력을 갖는 기저 부하용 화력발전소는 경제성과 함께 발전시스템의 안정성을 갖는 것이 필요하다. 이것은 기계적 혹은 전기적 문제가 발생할 경우 그러한 문제를 발전 시스템으로부터 고립시키는 것이 가능하다면 주어진 조건 내에서 운전이 가능하여야 한다는 것을 의미한다. 현재 국내의 화력발전소는 일반적으로 협조제어 모드(Coordinate Mode), 보일러 추종 모드(Boiler Following Mode), 터빈 추종 모드(Turbine Following Mode)와 수동 운전 모드(Manual Mode)를 이용해 운전된다. 각각의 운전모드는 보일러 제어시스템의 운전 모드와 터빈 제어시스템의 운전 모드 상단에 의해 조합되어 결정된다. 그러나 화력발전소에 안정성을 부여하기 위해서는 이 보다 많은 수의 운전 모드를 구현할 필요가 있다. 이렇게 추가적으로 구성되는 운전 모드는 급수 우선 모드(Feedwater Priority Mode), 연료량 우선 모드(The Fuel Priority Mode) 및 연소용 공기 우선 모드(Air Priority Mode) 등이 포함될 수 있다. 이러한 부가적인 운전 모드는 화력발전소의 출력을 결정하는 주요 요소인 연소용 공기, 연료 및 급수 시스템의 운전 상태에 의해 분류된다.

급수 우선 모드는 급수의 유량에 의해 다른 모든 제어시스템의 목표치가 결정되는 운전 모드이다. 제어시스템 계층 구조 전체를 감시하는 Unit level의 제어시스템은 급수계통의 이상 유무에 의해 운전 모드를 자동으로 선택하며 이 때 결정되는 화력발전소 전체의 목표치는 현재 공급되는 급수량에 의해 제한된다. 같은 원리로 연료량 우선 모드에서 발전기출력의 목표치는 연료량에 의해 결정된다. 이 때 사용되는 연료량은 현재 사용되는 연료의 칼로리를 표준 설계값으로 변환된 후 사용한다. 연소용 공기 우선 모드는 연소용 공기 및 이송용 공기를 공급하는 1,2차 공기 계통의 유량과 온도에 의해 발전기출력 목표치를 결정한다. 연료량 우선 모드와 마찬가지로 현재 공급되는 공기의 유량과 온도 역시 표준값으로 변환되어 사용된다.

이러한 부가적인 운전모드는 제어시스템에 의해 운전자 지시와 관계없이 강제적으로 결정될 수 있으며, 혹은 운전자의 목적에 의해 정상상황에서 선택될 수 있다. 이러한 부가적인 운전 모드는 화력발전소에서 단위 기기의 이상 정지등 비상 상황시 발전시스템을 정지하지 않고 제한된 출력 범위에서 안정적으로 운전할 수 있도록 해준다. 현재 화력발전소의 주요 단위 기기가 2열 구성으로 한 개의 열이 최대 부하의 50%를 담당할 수 있도록 설계되므로 부가적인 운전 모드에서 제한되는 최대 발전소 출력은 50% 이내로 결정될 것이다.

#### 5. OTHER CONTROLLER in HIERARCHY

설계되는 제어전략은 Boiler Master, Fuel Flow Control, Air Flow Control, Feedwater Control, Furnace Pressure Control, Throttle Pressure And Deviation Control, Turbine Master, Turbine Safety, Turbine Startup/Shutdown, Turbine Load Control, Turbine Auxiliary System Sequence, BFPT(Boiler Feedwater Pump With Turbine) Control와 같은 세부 제어시스템을 포함한다.

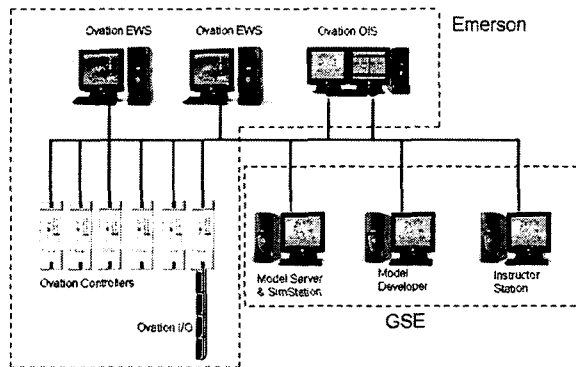
보일러 마스터는 보일러 부분의 제어시스템을 감독하는 부분으로 하부에 위치하는 연료 제어, 연소용 공기 제어, 급수 제어, 로내압 제어, 증기압 제어, 증기 온도 제어 등을 위해 목표치를 제공한다. 상부 구조의 보일러 마스터는 따라서 모든 제어시스템으로 전달되는 정보를 이용할 필요가 있으며 이 때 하부의 제어시스템으로 전달되는 목표치는 모든 운전 조건을 고려하여 변환하여 결정된 목표치여야 한다. 따라서 이미 언급한 바와 같이 공통 제어시스템은 필요에 공급하는 모든 정보를 표준으로 변환한 값으로 바꾸어야 한다. 보일러 마스터와 마찬가지로 터빈 마스터는 하부의 Turbine Safety, Turbine Start-Up/Shutdown, Turbine Load Control, Turbine Auxiliary System Sequence, BFPT Control 등을 위한 목표치를 제공한다. 일반적으로 터빈의 제어시스템은 주 제어시스템과는 별도의 공급자에 의해 설치되므로 이러한 세부의 제어는 주 제어시스템에서 감시할 필요가 없으며, 보일러와 터빈의 출력을 동일하게 유지하기 위해 필요한 비상신호 등의

안전 관련 신호만을 제어시스템 밖으로 제공하게 된다.

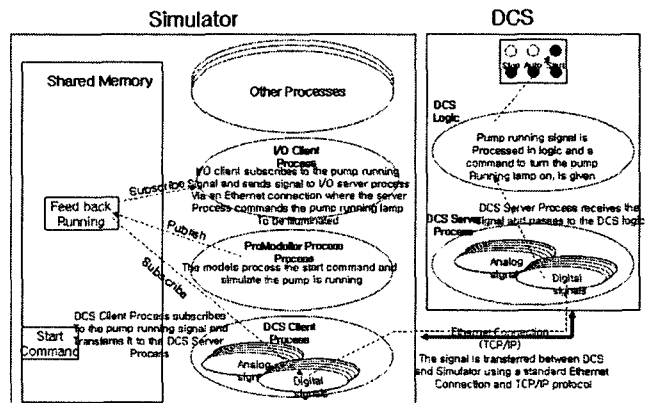
완성되는 제어전략은 MBC(Mill Burner Control), BOP(Balance of Plant), SQC(Sequence Control) 등을 포함하여야 한다. 제어 전략의 이 부분은 프로세스의 설계와 상당히 밀접한 관계를 갖는 것으로 연구 과제의 현재 단계에서는 이 부분의 확정 시점까지 보류되어 있다.

#### 6. SIMULATOR for USC BOILER CONTROL LOGIC

초초임계압 보일러의 제어전략을 구상하고 설계하여 제어로직을 완성하려면 제어로직을 모의할 시뮬레이터가 필요하다. 이번에 개발하는 1000MW급 보일러 제어로직을 모의하기 위해서 제어시스템 일부와 시뮬레이션용 프로그램으로 구성하는 스태플레이터드 시뮬레이터를 구매하였다. 이 시뮬레이터는 발전소에서 운영할 제어로직의 주요 부분을 실제의 DCS 제어기에서 동작하도록 하고 보일러 모델링은 프로그램으로 하는 시스템으로서 국내 최대발전소 용량인 영흥화력에서 사용하는 DCS인 Ovation 시스템과 원자력분야에서도 사용하는 GSE 사의 프로그램을 주축으로 구성하였다. 모의 시험할 차세대 제어로직은 연구하고 있는 제어전략을 반영하여 2007-2008년도에 집중적으로 시험할 예정이며, 현재는 기존발전소의 제어로직을 모의하고 장단점을 도출하기 위한 준비 단계에 있다. <그림 2>는 시뮬레이터 구성도와 <그림 3>은 시뮬레이터와 DCS의 어플리케이션 프로그램을 수행하기 위한 인터페이스를 구조를 나타내었다.



<그림 2> SIMULATOR CONFIGURATION



<그림 3> APPLICATION PROGRAMMING INTERFACE

#### 7. 결 론

주중기 압력과 온도가 265 bar와 610℃의 증기조건 및 1000MW Unit 출력을 갖는 초초임계압 보일러의 제어를 위한 통합 제어시스템의 제어전략을 개발중에 있다. 초초임계압발전소인 차세대 화력발전소 통합 제어시스템과 제어전략은 기본적으로 발전소에서 개별적으로 운영하고 있는 모든 단위시스템을 연결하여 필요한 정보를 상호 취득할 수 있도록 설계하고 있으며, 이러한 기능을 증속시키기 위해서는 제어시스템이 계층적 구조를 가져야 한다. 향후 지속적인 연구를 통하여 현 시점에서 통합 또는 보류중인 단위 시스템의 설계가 완성되면 구매한 스태플레이터드 타입의 시뮬레이터를 통해 제어로직의 계층적 개념설계와 이에 의해 개발되는 제어로직을 모의 시험하여 제어성능이 입증되면, 차세대 화력발전기술개발 과제와 성과물과 접목하여 1000MW급 발전소가 건설되고, 이에 따라 국내에서 건설되던 500MW급 표준화력이 국내 전력계통 용량증대로 앞으로는 1000MW급 표준화력으로 변경될 수 있는 계기가 될 것으로 생각한다.

#### [참고 문헌]

- [1] Sam G. Dukelow, The Control of Boilers, ISA, pp136, 1999
- [2] 김호열, 박두용, 신영진 "차세대 제어계통 설계기술 개발보고서" 2006