

**고급공정제어 알고리즘을 이용한 1000MW급 차세대화력발전소 시뮬레이터 개발**

오기용\*, 임건표\*, 김호열\*  
한국전력공사 전력연구원\*

**Simulator Development of 1000MW Class Ultra Super Critical Coal-Fired Power Plant with Advanced Process Control Algorithm**

Ki-Yong Oh\*, Geon-Pyo Lim\*, HoYol Kim\*  
Korea Electric Power Research Institute(KEPRI)\*

**Abstract** - Even though efficiency of coal-fired power plant is proportional to operating temperature, increasement of operating temperature is limited by a technological level of each power plant components. It is an alternative plan to increase operating pressure up to ultra super critical point for efficiency enhancement. It is difficult to control in that pressure within safety guideline that many unexpected phenomena are happen because that region is highly nonlinear region. In this paper, Advanced process control algorithm, ARX and Fuzzifier, is introduced. Then power plant control logics applied Unit Step Optimizer, which is combination of ARX and Fuzzifier are proposed. Its performance is tested and analyzed with design guide line.

**1. 서 론**

우리나라는 꾸준한 경제성장과 지속적인 전력수요 증가로, 전력 수요 공급을 위하여 지속적인 발전소 건설이 필요하다. 특히 우리나라 전기 생산 용량의 절반이상을 차지하는 석탄 화력발전소는 저렴한 발전단가에 기인하여 지속적인 건설이 요구되고 있으나, 급격히 증가하는 석탄 수입 비용, 신규 건설입지 확보의 어려움 및 발전 과정 중 생기는 황산화물(SOx) 및 질소산화물(NOx)과 같은 환경오염 물질 배출 등의 문제로 신규 발전소 건설이 쉽지 않다. 미국, 일본, 유럽 등 선진국에서는 이러한 단점을 보완하기 위하여 대용량·고효율·환경친화형 1000MW급 초초임계압 화력발전(Ultra Super Critical Coal-Fired Power Plant)에 대한 연구가 지속적으로 시행되었으며, 현재 일본, 유럽에서는 상용화되어 운영되고 있다.

초초임계압 발전이란, 보일러 내부 증기의 동작 압력 및 온도가 상승하면 발전 효율이 증가함에도 불구하고 내구성 및 비용 문제로 내부 증기 동작 압력 및 온도 상승에 한계를 갖는 것을 보완하기 위하여 보일러 내부 증기 압력 동작점을 초초임계압 상태까지 상승시켜 발전하는 것을 말한다. 효율을 1% 상승시키면 1000MW 기준으로 연간 소모되는 석탄은 5000~6000톤 감소하며, 이에 따른 원가절감 및 공해 물질 감소로 전력 산업 구조 개편에 의해 경쟁체제 유도로 경제성이 우수한 발전 시스템이 선호하는 발전사를 만족시키는 동시에 교도의정서 시행 등으로 최근 전력시장에 요구되는 환경친화적 대용량 고효율 발전에 대한 시대적 요구에 부응할 수 있다.

본 연구에서는 대용량·고효율·환경친화형 1000MW급 초초임계압 화력발전의 제어로직을 설계하였으며, 용량 증가로 안정성 및 신뢰도가 감소하는 것을 방지하기 위하여 기존 발전소에서 사용하는 PID 제어기 및 고급공정제어 알고리즘(Advanced Process Control Algorithm)을 적용하였다. 또한 기존에는 운전원의 발전소 운전 기술 훈련 및 숙달을 위하여 발전소 건립 후, 발전소를 기반으로 구축하였던 모사실험기를 발전소 제어로직 설계 검증용으로 발전소 건축 전 선행 구축하여 고급공정제어 알고리즘이 적용된 제어로직을 검증하였다.

**2. 1000MW급 차세대화력발전소 시뮬레이터**

**2.1 1000MW급 초초임계압 발전소 기본 자원 및 특징**

본 연구에서 개발 중인 초초임계압 화력발전소는 전격출력 1024MW, 최대 출력 1100MW로 설계되었다. 고온재료의 개발 현황, 경제성과 국내 발전설비 제작사의 기술수준 등을 고려하여 증기 압력은 265kg/cm<sup>2</sup>, 주증기 온도는 613℃, 재증기 온도는 624℃로 선정하였으며, 이에 따라 초초임계압 석탄 화력 발전소는 효율이 45%에 근접하는 고효율 발전소로 설계되었다. 보일러 및 터빈 등의 특징은 표1과 같다. 출력 증·감시 주증기 및 재열증기 온도 변화는 선행 초임계압 발전소와 동일하게 부하 고정시 ±3℃, 30%~40%NR ±12℃, 50%이상 ±8℃, step change 50%이

상 ±10℃, GOV Free ±8℃로 선정하였다

**<Table 1> Design Feature of 1000MW Class Power Plant**

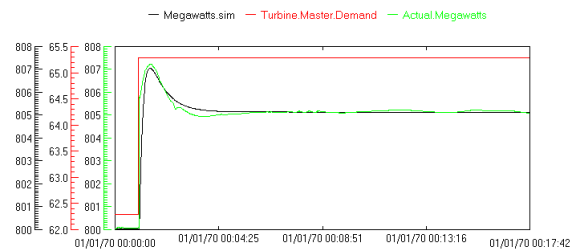
Steam Condition	Main steam : 265kg/cm <sup>2</sup> , 610℃ Reheat steam : 265kg/cm <sup>2</sup> , 621℃
Steam Generator	Once through, Single Reheat, Balaced Draft
Turbine	TC4F with above 45' LSB 1100MW Capacity@VWO Condition
Generator	1.222MVA Capacity 2 poles, 3600 rpm, 30kV

**2.2 제어로직 설계**

위에서 언급한 바와 같이 초초임계압 발전소는 출력 증·감시 초임계압 발전소와 동일한 허용기준을 적용하였다. 기존 발전소와 비교하여 고온·고압의 상태에서 동일한 시간에 출력 변동폭은 증가하였으므로 출력 증·감시 시스템이 쉽게 불안정해질 수 있으며 온도, 압력등과 같은 여러 가지 요소의 변화폭도 증가한다. 그러므로 단순히 제어 입력과 실제 값과 오차를 가지고 제어를 수행하는 PID제어기만을 가지고는 초임계압 발전소와 동일한 기준 범위 내에서 운전을 수행하기 힘들다. 그러나 각 요소의 변화 기준을 완화하면 보일러 튜브 등 모든 기계 시스템에 부하를 주게 되어 각 기계 부품의 열적 피로 누적 및 파손을 야기하며 개별 부품의 수명 단축 및 전체 발전소의 수명 단축으로 운영 유지비가 증가하는 단점이 있다. 본 연구에서는 ARX(Auto Regressive with eXogeneous input)와 Fuzzifier로 구성된 고급공정제어기법(APC)을 제어로직에 적용하여 초임계압 발전소와 동일한 온도 변화 범위 내에서 작동하는 것을 목표로 하였으며 이를 통하여 안정성 향상 및 최적 성능을 구현하였다.

**2.2.1 ARX(Auto Regressive with eXogeneous input)**

ARX 알고리즘은 시스템의 동특성 전달함수로서, 단위 계단 입력에 대하여 각 시스템의 동특성을 시간 영역에서 측정 한 후, 이를 기반으로 시스템의 차수를 선택하고 곡선 적합 방법을 이용하여 설계하였다. Boiler Master Demand, Feedwater Master Demand 및 Turbine Master Demand 3개 입력에 대한 Megawatts, Throttle Pressure 및 Superheater Temperature 3개 출력의 동특성 함수를 구축하였으며 Fuzzifier와 함께 사용할 두 개의 ARX는 출력 전력을 기반으로 시스템의 응답을 관측하며 설계하였다. 각 시스템의 동특성을 파악할 때는 다른 부분의 영향을 배제하기 위하여 동특성 파악을 하는 부분을 제외하고는 다른 부분은 일정한 값으로 고정시켜 놓았으며, ±3%의 출력 변화에 대하여 수행하였다.



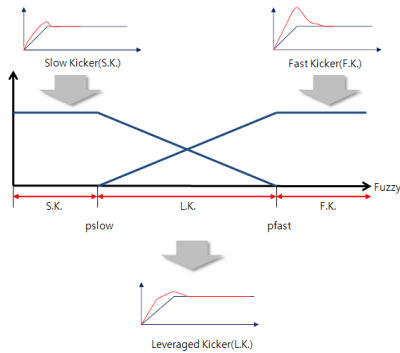
**<Figure 1> Unit Step Response of Turbine Master and Megawatts**

Turbine Master Demand 입력에 대한 Megawatts 출력 응답 변화의 동특성을 함수로 표현하니 식(1)과 같이 2차 함수 형태로 표현되며

Figure 1과 같이 실제 값과 우수하게 일치하는 것을 확인할 수 있다. 나머지 모델도 동일한 방법을 사용하여 동특성 함수를 설계하였으며, 설계 시 제어로직은 복잡해지나 물리적인 의미를 찾을 수 없는 다차수 함수 설계를 지양하고 4차 이하의 함수로 설계 하였다.

$$\frac{MW(s)}{TM(s)} = \frac{1.7(70s+1)e^{-2s}}{(10s+1)(40s+1)} \quad (1)$$

### 2.2.2 Fuzzifier



<Figure 2> Unit Step Optimizer

초임계압 발전소 운전모드<sup>(2)</sup>는 보일러 추종 운전 방식(Boiler Following Mode), 터빈 추종 운전 방식(TBN Following Mode) 및 보일러-터빈 협조제어 방식(Coordinate Mode) 3가지 종류이지만, 초초임계압 발전소에서는 고급공정제어 알고리즘을 적용한 단위 계단응답 최적화 운전 방식(Unit Step Optimizer Mode)이 추가되었다. Figure 2에서 상단의 두개의 전달함수는 느린 응답 및 빠른 응답을 갖는 두개의 전달 함수 ARX이다. Fuzzifier는 다중 ARX를 Fuzzy 로직<sup>(1)</sup>을 기반으로, 최적 제어 성능 구현을 위하여 사용되며, 본 연구에서는 2개의 ARX를 사용하여 최적 성능을 구현하였다. Figure 2의 Fuzzifier 로직에서 S.L.은 응답성 및 수렴성은 느리지만 과도응답 오차는 적은 응답함수로 선정하며, F.K.는 응답성 및 수렴성이 빠르지만 과도응답 오차는 큰 응답함수를 선정한다. 응답함수 수를 증가시켜 다양한 전달함수를 사용하면 로직은 복잡해지지만 성능 향상은 크지 않으며, 두 개의 응답함수의 경계점 위치 선정이 더욱 중요하다. 본 연구에서는 하한점은 30, 상한점은 150으로 선정했으며, 이 때 최적의 성능이 나오는 것을 확인할 수 있었다. 또한 두 경계점 사이의 값은 식(2)와 같이 응답성이 다른 두 개의 함수의 조합을 사용하였다. 식(2)에서 Diff는 자동급전 지령신호(Automatic Dispatch System)와 Unit 부하 요구 신호(Unit Load Demand) 사이의 차이이다.

$$L.K. = \left| \frac{\text{Diff} - \text{pfast}}{\text{pfast} - \text{pslow}} \right| S.K. + \left| \frac{\text{Diff} - \text{pslow}}{\text{pfast} - \text{pslow}} \right| F.K. \quad (2)$$

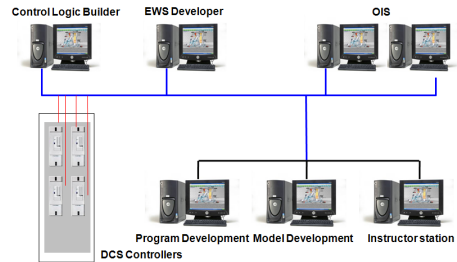
### 2.2.3 시뮬레이터 제작 및 모사 실험 결과

<Table 2> Simulator Hardware Construction

Hardware	Quantity
DCS Controller Unit	6 SET
DCS DI, DO, AI, AO Module	1 SET
Process Control Logic Builder workstation	1 SET
Instructor Station workstation	1 SET
EWS Developer workstation	1 SET
OIS workstation	2 SET
Model Development workstation	1 SET
Program Development workstation	1 SET

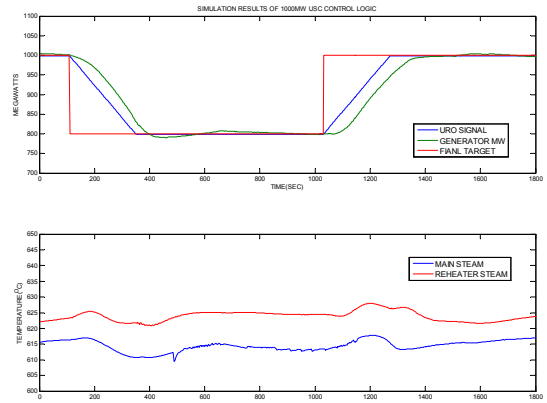
모사실험기는 Table 2와 같이 6개의 DCS 제어기와 DCS 디지털 및 아날로그 입출력 단자 및 7개의 워크스테이션으로 구성되었다. DCS 제어기는 가장 발전소 모델 서버로부터 필요한 공정 값을 받은 후, 내부 플래쉬 메모리에 입력되어 있는 제어 로직을 가지고 공정 값들을 계산한다. 모델 개발 워크스테이션은 차세대 화력발전소 가상 모델을 저장하며 발전소 공정값들을 계산하고 DCS 제어기와 이 값들을 통신으로 주고받는다. EWS 개발 워크스테이션은 DCS 제어기, 엔지니어링 및 운전화면을 지원한다. 공정제어로직 구축 워크스테이션은 공정제어 로직을 개발하며 이것을 DCS 제어기와 통신하여 전송한다. OIS 워크스테이션

은 운전자가 실제 발전소와 같이 모사실험기를 운전 가능하도록 구축하였으며 이를 통하여 운전자가 모의 운전을 통하여 발전소 운전 방법을 연습 및 숙달할 수 있다. 모사실험기의 개요는 Figure 3과 같다.



<Figure 3> Schematic Diagram of Simulator

위에서 언급한 모사실험기로 차세대화력발전소 제어로직 검증 실험을 수행하였다. Figure 4는 1000MW에서 800MW로 출력을 감소한 후 다시 1000MW로 출력을 증가한 결과이다. 생산되는 전력의 오버슈트는 1000MW에서 800MW로 감소시킬 때는 4.33MW이며 800MW에서 1000MW로 증가시킬 때는 4.33MW로 매우 작은 것을 관찰할 수 있다. 최대/최소 주증기 온도는 617.74°C/609.52°C이며, 최대/최소 재열증기 온도는 627.96°C/620.82°C로, 기준과 비교할 때 주증기는 +4.74°C/-3.48°C 재열증기는 +3.96°C/-3.18°C이다. 이는 설계 기준을 만족할 뿐만 아니라 기존의 발전소 주증기/재열증기 온도변화와 비교할 때에도 큰 폭으로 감소하였다. 다른 요소들도 허용 범위 내에서 안정적으로 동작하는 것을 관찰할 수 있었다.



<Figure 4> Simulation Results

### 3. 결 론

본 연구에서는 1000MW급 차세대화력발전소 제어로직 및 검증용 모사실험기 구축에 대해 소개하였다. 차세대화력발전소는 큰 부하 변화로 설계 허용 기준을 부합하며 안정적으로 작동하는 것이 어렵기 때문에 고급공정제어 알고리즘 적용을 제안하였다. 고급공정제어 알고리즘은 ARX 및 Fuzzifier로 구성된다. 고급공정제어로직이 적용된 제어 로직을 구축한 모사실험기에서 모사실험을 수행하였으며 설계허용기준내에서 안정적으로 작동하는 것을 관찰할 수 있었다.

### [참 고 문 헌]

- [1] F.A. Alturki, A. Abdennour, "Design and simplification of adaptive Neuro-Fuzzy inference controllers for power plants", Electrical Power and Energy Systems, 21, 465-474, 1999
- [2] 김호열, 김병철, "차세대 화력발전 기술개발 5차년도 종합진도보고서", 전력연구원, 5, 8-12, 2007
- [3] Bernard Friedland, "CONTROL SYSTEM DESIGN(An Introduction to State-Space Methods)", 238, 2005

### ACKNOWLEDGMENTS

This work has been financially supported by R-2002-1-011-2-02 from Power R&D Program of ETEP(Electric power Technology Evaluation & Planning Center)