

분산제어와 발전소 시스템

황 재 호

(대전공업대 전자과 전임강사)

1. 발전소 분산제어의 당위성

대규모 시스템제어는 그 복잡성을 적절히 취급하는 데서부터 비롯된다.

그 복잡성이란 아래의 세가지로 요약되는 바.

- Dimensionality
- Uncertainty & Nonlinearity
- Information Structure Constraints

이 세가지중 Dimensionality란 시스템의 차수가 고차가 되며 고차의 다변수로 취급해야함을 의미한다. 시스템이 다변수(Multivariable)가 되고 시스템의 파라메타가 전 시스템에 분포하게 되면 이의 모델링 및 구조분석은 전체를 하나의 다변수 함수로 취급하든지, 물리적으로 동일한 특성을 갖는 부시스템들로 분할하여 각 부시스템들에 대해 수학적 모델링을 행하고 그 후에 상호 연결하는 방식을 채택해야 한다. 흔히 대규모 시스템으로 구별되는 계통, 발전 플랜트, 교통 시스템등은 그 시스템 특성에 맞게 적절히 모델링 작업을 진행해야 된다. 특히 발전 플랜트의 모델링은 전력계통이나 교통시스템과는 달리 전체를 하나의 다변수로 하여 제어를 구성하는 것은 부분적으로는 가능하나 총괄적인 제어를 구성하기는 현실적으로 어려우므로, 시스템을 물리적으로 분할하여 주된 Subsystem과 종속되는 Subsystem들로 각 부 시스템을 구성한 후 전체 구조를 결정하고 제어기 역시 주된 Subsystem과 종속되는 Subsystem단위로 구성하여 제어명령이 주된 제어

신호에 모두 종속되도록 함이 필요하다. 이에 대해서는 다시 논하기로 한다.

두번째로 불확실성 내지는 비선형인데, 규모가 작은 시스템의 경우는 이와같은 특성들의 한계 및 비선형성등을 미리 분석하여 적절한 제어기 구성을 할 수 있으나 시스템이 대규모화 되고 더우기 발전 플랜트처럼 각 상태변수들이 다른 상태변수와 관계가 밀접한 경우는 불확실성과 비선형성은 전체 시스템으로 파악되어 제어기를 구성할 시 전체의 불확실성이나 비선형성을 고려한 종합적인 접근이 상당히 어렵게 된다. 결국 이와같은 문제들도 각 부시스템 단위로 구조화하여 자체에서 이성질을 해결하고 응답의 속응성을 개선하는 제어기를 구성한 후 각 부시스템 사이를 연결하는 상호 연결함수들을 정량적으로 선정함이 필요하다.

세번째로 시스템을 구조화 함에 여러 제한 조건이 들어가게 되어 그 제한 조건 내에서 모든 시스템 분석과 제어기 설계가 이루어진다.

이상에서 제시한 복잡성때문에 대규모 시스템은 전체를 하나의 구조로 해석하기 보다는 물리적으로 동일한 성격을 지닌 각 부시스템으로 나누는 비집중화 기법이 도입된다. 문제는 이러한 대규모 시스템을 여러개의 부시스템들로 어떠한 기준에 의해 나누며 그 부시스템들을 상호 연결했을 때 그 연결함수를 어떻게 구하느냐 하는 것이다. 무엇을 기준으로 부시스템들로 분할하느냐 하는 것은 결국, 분할 알고리즘을 찾는 것으로 이는 물리적 특성과 수학적

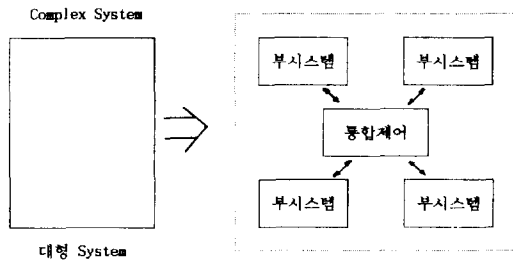


그림 1. 비집중화 제어의개념도

기법에 의하여, 이와같이 분할된 각 부시스템들을 구조적으로 분석하여 제어가 접속시 가장 효과적인 모델과 제어 알고리즘을 구하게 된다. 이 말은 제어기를 구성했을때 대상 시스템의 차수를 최대한도로 줄이며 강인성 문제를 해결토록 제어기를 접속함을 의미한다. 즉 분할된 각 부시스템들은 독립적일 취급하며 전체적인 제어 문제는 적절한 방법을 통해 접속, 해결토록 함이다. 이러한 방식이 대형 시스템을 해석, 제어함에 있어서 powerful한 기법으로 등장하고 있다.

그림 1에 이와 같은 아이디어를 나타내고 있다.

이러한 접근은 아래와 같은 몇가지 원칙에 의해 수행된다.

- ① 전체 대형 시스템을 물리적으로 그 특성대로 분할 한 후 분할된 각 부시스템들을 모델링하여 해석 가능한 구조로 만든다.
- ② 각 부시스템들은 서로 독립적으로 안정도나 제어 문제를 담당한다.
- ③ 그후 각 부시스템들이 서로 접속되었을 때의 영향을 고려하여 분할시 문제를 해결할 수 있는 총괄제어 기법으로 조화를 이루게한다.

- Information Channel
- Controller Configuration

접근 방법으로서 다음 몇가지가 고려된다.

- ① Complex 시스템에서는 내적 내지는 외적 특성을 deterministic하다든지 stochastic향으로 자세히 규명할 수 없다.
 - ② 구조화나 비구조화의 근본적인 불확실성은 부시스템들에 존재한다.
- 이에 따라 각 부시스템들의 강인성 뿐만 아니라 연결, 통합되었을 때의 전체 시스템의 강인성 문

제를 해결해야 되는 것으로 귀착된다.

강인성 문제가 확대될 것인가, 개선될 것인가, 약화될 것인가하는 그 정도는 정량적으로 제시될 수 있어야 한다.

③ 신뢰성 문제가 대두

위와 같은 요건에 따라 불확실성(Unpredictable structural perturbation)이나 부시스템들에서의 Controller failure가 전체 시스템에 미칠때 신뢰성이 보장되어야 한다.

즉 한 부시스템의 이상 상태가 다른 연결된 부시스템으로 과급되는 것을 최대한 방지해야 한다. 이 문제는 바로 비집중화 제어의 신뢰성 문제로서 강인성과 함께 중요한 요소로 고려된다.

④ 전산 제어에 의해 비집중화 제어가 가능해야 한다.

- Reliance on Computer Power
- 저렴한 가격에 의한 high-performance Control
- “Distributed parallel computing with highly reliable low-cost multiprocessor architectures”

⑤ 총괄 제어 방식(Synthesizing Control Law)의 전제

- Decentralized information structure constraints

2. 발전소 분산제어 방식

발전소 제어는 크게 나누어 다변수제어와 분산제어 방식으로 구분된다. 다변수제어는 발전소를 하나의 시스템으로 놓고 전체 상태를 고려한 제어 방식으로 부분적으로는 사용가능할지 모르나 거의 채택되어 있지 않고 대부분은 분산제어 방식에 의한다. 발전소 분산제어는 아날로그제어방식이 도입된 이미 오래전부터 사용되어 왔으며 그 기술 역시 상당한 수준에 도달해 있다. 근래에 들어와 제시되는 여러 형태의 컴퓨터에 의한 분산제어 방식은 종래의 발전소 제어 방식을 구체화 내지는 개선 시킨것으로 제어에 있어서의 기본구조는 거의 같다. 디지털 컴퓨터의 보급에 따라 아날로그 전자회로에 의존하던 제어에서 탈피하여 컴퓨터에 의한 부분, 전체 제어가 가능해짐에 따라 기존 방식에서는 어려웠던 각종 데이터 교환, 분석, 최적화 등이 이루어지면서 발전소 제어는 다종다양한 제어 방식을 도입, 보조기기 주기에 이르는 전체 기기들의 제어, 상태감시, 진

단, 분석 등을 행할 수 있게 되었다.

발전소 분산제어가 실제 발전소 제어를 운용하는 사람에게서는 생소한 것이 아님은 주지의 사실이다. 왜냐하면 제어 대상인 시스템의 기본 구도가 이미 분할, 연결된 형태에서 접근하기 때문이다. 분산제어란 기존 제어방식을 근거로 대규모 시스템의 각 부시스템별로의 분할, 제어기 구성, 각 부시스템간의 신호 통신, 통합감시제어시스템의 통합화로 진행되는 일련의 제층구조제어의 형태를 갖는다. 문제는 디지털 기술도 필요하겠지만 전체 시스템을 물리적으로 분할, 분할된 부시스템 특성을 분석, 적절한 제어 형태를 적용하는 것은 물론이며 각 부시스템 사이의 필요한 물리적 신호들을 계측하든지 관측기 등을 이용하여 추정하는 문제, 신호 상호 연결시 신호변환 그리고 각 부시스템을 총괄 감시하는 감시제어시스템에 들어갈 다양한 알고리즘과 소프트웨어등이 수반되어야 하며 여기에 추가로 실제 운전및 제어를 한 경험등이 있을 때에 비로소 가능하다는 점이다. 아래에 발전소 분산제어의 개략적인 기본 개념을 설명한다.

2.1 다변수 제어 방식

보일러를 하나의 Complex Structure로 놓고 전체 변수들에 대한 optimal입력을 계산하는 방식으로서 이론적으로는 접근이 가능할지 모르나 현실적으로는 불가능하다. 왜냐하면 Complex Structure Model 자체가 보일러를 집중 정수라고 생각한데서 출발했기 때문에 또한 비선형성과 불확실성 내지는 perturbation과 전체의 물리적 Dynamics변화를 고려치 않았기 때문에 전체 안정도 해석도 의미가 없다.

2.2 분산 제어 방식

물리적으로 동일한 특성을 지닌 부시스템별로 Loop제어를 실시하고 부시스템들을 서로 상호연결시키는 최적 연결 기법을 고안 총체적인 효과적 분산제어가 이루어지도록 함.

여러개의 독립된 부시스템에 대해 각 부시스템은 모두 최적 제어 한다고 가정하고 상호연결에서 한 Loop의 조건은 다른 Loop의 optimal control constraint로서 작용하는데 이 constraint는 영향을 주는

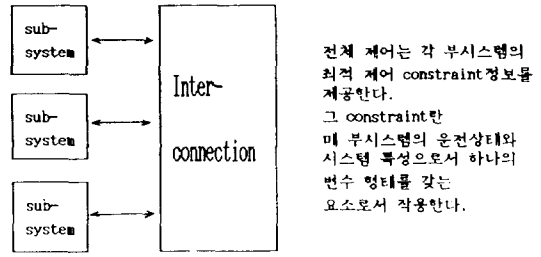


그림 2. 분산제어 방식

부시스템의 출력이나 상태변수, 동작조건의 함수로 주어지며 유동적이다.

각 부시스템의 Control Action이 제한 조건으로 작용한다.

각 부시스템마다 어떤 제어 방식을 채택하느냐에 의해 상호 연결 방식이 달라진다. 이때 전체 안정도를 고려하여 각 부시스템들을 접속해야한다.

현재 사용되는 PID제어 방식의 경우는 각 부시스템들의 상태변수가 다른 부시스템의 선형 신호나 Reference cascade 제어로서 작용한다.

2.3 현재의 발전소 보일러 제어 방식

프로세스 성격에 따른 개별 Loop를 채택하고 있다.

- 전체적인 Loop : 전체 보일러를 하나의 입출력 단위로 보고 부하 요구에 따른 보일러 출력을 제어, 기준치 제어
- 개별 Loop : 전체 Loop의 상태변수들을 근간으로 세부 독립 Loop별로 제어가 시행 ; 설정치 제어
- 상호 연결 시스템

현재로는 상태회환으로 보완된 이득 조정과 function Generator $[f(x)]$ 를 사용하며, 이때 최적 이득 조정이 되어 있지 않으면 개별 Loop의 안정도 뿐만 아니라 전체 Loop의 안정도에도 영향을 미친다.

최적 이득 조정은 상호 연결 출력 신호가 개별 Loop에서는 오차 신호로 인식되므로 실제 오차가 발생하는 시간 지연과 크기가 고려된 가운데 조정되어야 한다. 이는 대상 프로세스의 분명한 성격 규명에 의해서만 가능하다.

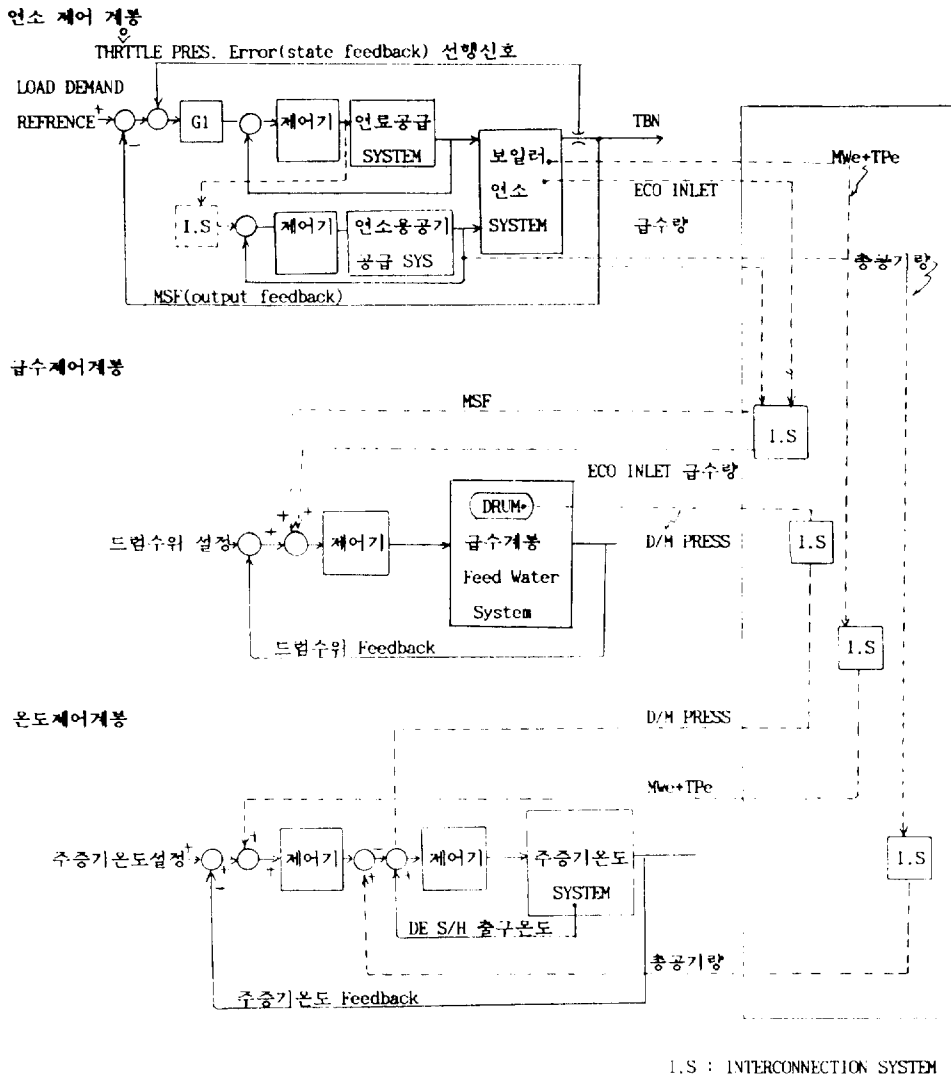


그림 3. 화력발전소 보일러 분산제어의 개념도(예)

즉, 대상 시스템의 Structure, Time delay, 다른 Loop와의 연관성등이 고려된 최적 이득 조정이 이루어져야 한다.

그림 3은 현재 화력발전소에서 통용되고 있는 분산 제어의 개념도를 보이고 있다. 주된 제어 방식은 PID제어와 선형 제어 및 부분적인 상태 궤환 제어로서 선행 신호와 상태 궤환 신호는 다른 부시스템의 상태변수를 측정함의의하며 상호 연결 함수는 경험에 의한 함수 설정에 의해 결정된다.

3. 분산제어시 급수, 온도, 연소 시스템 상호 연결항의 물리적 성격

3.1 급수 제어

3.1.1 Optimal Gain설정(정성적 해설)

부하 증가 요구에 의해 → 주증기 제어 밸브가 열리고 TPE(Trottle Pressure Error)의 감소는 → 연소 계통을 자극하여 → 연료를 더 많이 공급, 연소케 하며 → 부하요구와 주증기량의 차는 연소계통을 더

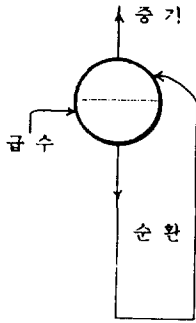


그림 4. 보일러급수 시스템

육 자극, 더 많은 연료가 노내에서 연소한다 → 보일러 드럼은 먼저 증기가 빠져 나갔으므로 수위가 떨어지고 → 제어계통은 (증기량-급수량)을 검출하여 급수 밸브를 열게 된다. (이때 optimal gain tuning이 필요) → 그러면 보일러 노내 연소에 의해 증기와 물의 순환이 가속되어 더 많은 증기를 발생 → 전체 수위의 변동을 가져온다. → 즉 과도상태에서는 (증기량-급수량) 선행 신호와 수위 오차 신호가 서로 조화를 이루며 오차를 검출하여 제어한다.

: (증기량-급수량)값의 적절한 gain의 설정은 증가된 증기량(ΔQ_s)을 물로 환산($\Delta Q_s * \text{비체적}$)한 값이 드럼 수위로 환산했을때 그 Δ 만큼 보상할 정도의 급수를 증가시키는 양으로 검하여 밸브 개도량에 따른 급수량 변화분이 함께 계상된 값이다. 여기다가 연료증가에 기인하는 순환력 증가가 낳는 증기 발생 비율의 과도 상태가 함수적으로 곱해져야 한다.

optimal gain

$$K = \Delta Q_s * p * \frac{1}{k} * f(\sigma)$$

ΔQ_s : 증기량-급수량

p : 증기의 비체적(증기의 체적을 물로 환산했을 때의 물의 체적)

k : 급수 조절 밸브 개도 특성 기울기

$f(\sigma)$: 연료 증가에 기인하는 증가 발생 비율 순환력에 의해 보충되는 증기량은 빠져 나가는 증기량을 항상 추종한다.

급수 제어의 시간 지연은 조절 밸브 개폐에 따른 최종 드럼까지 걸리는 시간+급수가 증기로 되는데

걸리는 시간(연소 시간 포함)

$$TD_{FW} = T_L + T_I + T_F$$

T_L : 도착시간

T_I : 급수가 증기로 변하는데 걸리는 시간

T_F : 연소시간(연료가 버너까지 가서 노내에 주입되는 시간 포함)

여기서 구한 optimal gain K에 의해 이 급수 제어를 시행할 때 독립 Loop 할때와는 다른 제어 알고리즘상의 변화가 일어난다.

예를 들어 최적 제어하는 경우 평가함수 자체에 K는 변화를 일으키고 최적 입력 U가 영향을 받고 전체 안정도에도 변화를 일으킨다.

PID 제어는 위의 식에 의해 계산되나 다른 제어기를 구성했을 때는 전체 프로세스의 변화 지령인 이 K에 의해 Control Action이 달라진다.

3.2 온도 제어

온도 제어란 터빈에 공급되는 주증기의 온도가 일정하게 유지되도록 — 어떠한 부하 변화나 perturbation 하에서도 — 하는 것으로서 부하변동과 연소 상태 변동에 대해 민감하게 동작하며 또 그리하도록 해야 한다.

보일러에서의 증기 온도 제어란 엔탈피 변화를 의미하는 것이 아니기 때문에 (엔탈피 변화가 아니라 엔탈피 분배이다) 온도변화는 제한된 범위 내에서만 가능하다. 그러나 격심한 온도변화는 터빈 입구 에너지 입력과 시스템 에너지 평형에 치명적인 영향을 미치므로 어떠한 경우든지 일정하게 유지되어야 한다.

상호 연결 함수는 세가지 요소를 연소 계통과 급수 계통으로부터 받아오며 부하 Reference변동은 필연적으로 연소 계통과 급수 계통에 perturbation을 동반하기 때문에 부하 변동은 TPE(Throttle Pressure Error)와 주증기 제어 밸브 개폐에 따른 급수 계통의 변동인 드럼 pressure로서 감지하여 선행 요소로 사용하며 연소 계통의 변동은 보일러로 공급되는 연소용 공기 총량의 변화로 감지되어 DE S/H의

선행 제어 요소로 사용한다.

Interconnection functions

- 총 공기량 $K_a(t) : f(x)$
- MW+TPE $K_b : K$
- D/M Pressure $K_c(t) : f(x)$

1) MWE-TPE : $K_b(t)$

이 신호는 연소 제어계에서 MW변동과 그에 따른 터빈 제어계의 증기 조절 밸브 개폐를 신속히 검출하여 이를 선행 신호로 사용함으로 전체 Loop의 변동을 감지 미리 Error를 발생시켜 신속한 대응을 하도록 한다.

($K_b(t)$ 의 정상적 고찰)

① MW Reference 변동에 의한 온도 변화의 추이

$$K_b'(t) = g(t) + D(t)$$

$g(t)$: 온도 변동/Reference 변동

$D(t)$: Reference 변동에 따른 온도 변동의 Time Delay

MW Reference-TBN MW output : 入力 요소 : Δ MW (or MWe)

$$\dot{T}_s = f(MWe, t)$$

MWe가 入力요소로 작용하여 그 Response로서 주증기 온도 변동을 시험하여 그 전달함수를 구하고 모델링 시행

그에 따라 $K_b(t)$ 를 구하여 출력(MW) 변화에 대응되는 선행 제어를 시도케 함

② BLR MASTER 신호를 발생시키는 터빈 주증기 제어 밸브 개폐에 따른 TPE의 변화는 종국적으로 보일러 노내의 연소 변동을 가져오므로 연소변동은 주증기 온도 변화를 유발한다.

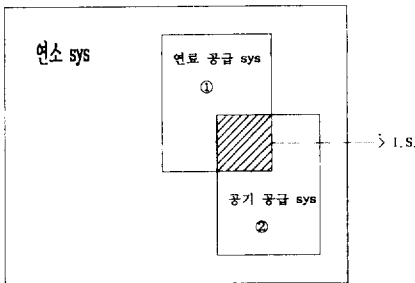


그림 5. 연소제어

TPE 변화 → 연소 제어 계통 동작 → 보일러 노내 온도 분포 변동 → 온도 변동(에너지 balance를 이루기 위한 시스템 내부의 에너지 분포의 불균형)

대류, 전도, 복사열에 의한 과열기 증기온도 변화

$$K_b''(t) = g'(t) + D'(t)$$

$g'(t)$: BLR 노내의 에너지 분포의 불균형에 의해 얻어지는 함수 ← 정량적으로는 산출이 거의 불가능하며 정성적으로만 가능하다.

$D'(t)$: 온도 변화가 나타나는 Time Delay 요소 = 연소 제어 동작 시간 + 연소 시간 + 복사 내지는 대류열 전달에 걸리는 시간 + gas온도가 증기 온도변화에 미치는 시간

2) $K_c(t)$, DRUM PRESSURE/ $K_a(t)$ 총 공기량

이 두 신호는 MW Reference 변동 결과로 야기된 연소 상태를 감지하여 증기 온도 제어 subsys인 (Minor Loop) DE S/H 출구 온도를 유지 시켜 주기 위한 것이다. 이 제어된 DE S/H 출구 온도는 제어된 주증기 온도 오차 신호의 Reference가 되어 소위 cascade제어를 가능하게 한다.

결국 $K_c(t)$, $K_a(t)$ 는 단순한 gain보다는 비선형 함수로 결정되며 이 비선형 함수는 연소 계통의 상태 변수, 보일러 입력(공기량, 과잉 공기는 증기 온도를 떨어뜨린다. 완전 연소관련) 변동이 온도 변화에 영향을 미치므로 앞에서 설명했던 보일러 노내의 에너지 분포 불균형에 의해 자연 비선형 함수가 되기 마련이다.

이 $K_c(t)$ 와 $K_a(t)$ 는 실측에 의해서만 가능하다. (전달 함수를 구하는 것)

* 출력 변화에 따른 파라메타의 변동과 비선형은 바로 상호연결함수를 결정하는 주된 요소가 된다. 즉 상호연결 함수의 결정은 제어기를 포함한 전체 Loop sys의 특성 변화에 의존한다.

이것을 과연 무엇으로 결정하며 상호 연결 함수를 구할 것인가는 Liner time Varying SYS인 경우는 상수인 gain K와 전달 함수에 의하나 Nonlinear Time Varing이 되면 그 변화의 함수로 잡아야 한다.

3.3 연소제어

연소제어는 3개의 단위 Loop로 구성된다.

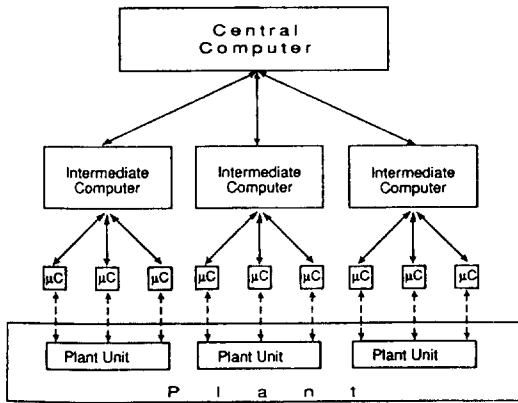


그림 6. 분산제어시스템 기본 구성도

4. 마이크로프로세서에 의한 분사제어 시스템

근래 몇년간 디지털 기술에 힘입어 분산제어시스템은 급속한 발달을 하여왔다. 디지털기술은 플랜트 제어의 효과와 제어시스템 신뢰도 향상에 크게 기여하였고 이에 힘입어 현재 대규모 시스템은 거의 디지털 기술에 의해 제어시스템을 구축하고 있는 실정이다. 디지털 기술은 바로 마이크로프로세서에 의한 제어라고 해도 과언이 아닌데 이는 종래의 아나로그 방식을 대체하면서 보다 큰 효과를 가져옴으로 여러대의 마이크로프로세서를 사용한 디지털 분산제어를 가능케 하였다.

아래에 마이크로프로세서에 의한 분산제어를 할 경우 여러가지 장점을 소개하면

- (1) 하드웨어면에 있어서 종래의 아나로그나 시퀀스 디지털 및 PLC보다 적은 규모로 더 큰 효과를 올릴 수 있으며 설치 장소를 축소할 수 있어 경제적인 면에서 유리하다.
- (2) 자기 진단 기능을 갖는다.
- (3) 조작자가 CRT앞에서 키보드에 의한 다양한 운전, 데이터 분석 등을 행할 수 있다.
- (4) 한 조작자가 여러 기능을 수행함으로 불필요한 인력을 줄일 수 있다.
- (5) 유지, 보수면에서 재래의 방법보다 훨씬 유리하다.
- (6) 제어의 신뢰도가 향상된다.

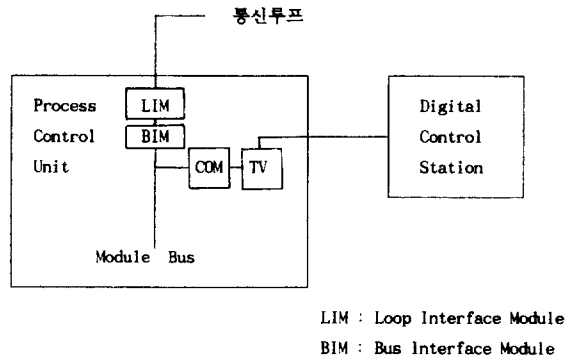


그림 7. Single PCU System

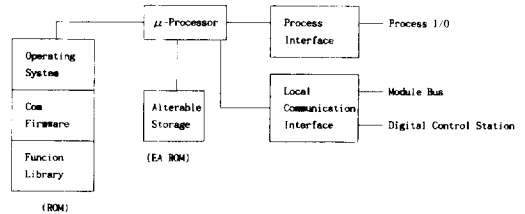


그림 8. Controller Module 구성(예)

4.1 디지털 분산 제어 시스템의 기본 구성

분산제어시스템은 아래의 기본적인 세가지 기본으로 구성된다.

- 제어 시스템 구성(Control System Architecture)
- 신호통신 시스템 구성(Communication System Architecture)
- 조작자 인터페이스 기능(Operator Interfacing Capability)

플랜트내의 부시스템(Plant Unit) 제어는 마이크로프로세서에 의한 제어와 데이터를 취득 및 전송하기 위한 시스템으로 구성되어있고 컴퓨터 인터페이스 장치에 의해 상호 정보를 교환한다. 중앙 컴퓨터에는 조작자에 의해 운전 가능하도록 CRT와 키보드와 연결되어 종합 감시 제어가 가능하다. 하나의 부시스템 제어시스템(PCU, Process Control Unit)을 아래 그림 7에 보였다.

(1) 제어 시스템 구성(Control System Architecture)

제어시스템은 각 부시스템별 제어와 시퀀스제어를

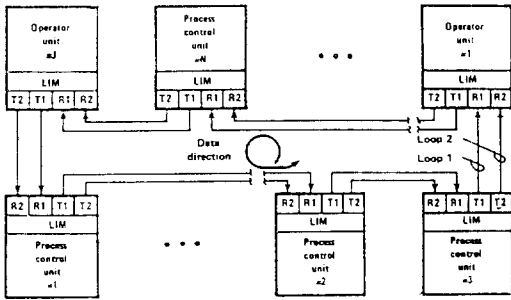


그림 9. 통신 루프의 구성도

수행하며 이에 수반되는 각종제어 기능(예 PID, Predictor, High-Low Limit ……)과 논리식(OR, NOT, AND ……) 등이 하나의 함수들로 주어지며 그림 8에서 보는바와 같이 인터페이스 장치와 통신 루프 등을 통하여 중앙제어감시시스템이나 다른 부 시스템과 연결된다.

(2) 신호통신 시스템 구성(Communication System Architecture)

신호통신은 앞의 그림 7에서 볼 수 있는 바와 같이 PCU내부 BUS인터페이스와 루프 인터페이스로 구성된다. 이러한 통신은 한시스템 내부의 BUS를 통한 정보교환 뿐만 아니라 시스템 사이의 정보교환을 담당하며 500Kilobits/초에 달하는 정보를 전송한다. 발전소에서는 이러한 통신케이블을 2중으로 포설하여 통신의 신뢰성을 높이고 있다. 아래 그림 9에 예를 보이고 있다.

(3) 조작자 인터페이스 기능(Operator Interfacing Capability)

조작자가 분산제어시스템의 상태를 감시하고 키보드나 그밖의 장치등을 통하여 시스템 제어, 정보 입수, 분석 처리, 현재 운전 상태를 감시하기 위해 이러한 인터페이스 기능을 갖춘 설비가 있게 되며 이 설비는 종래의 배전반 개념을 바꾸어 놓았다. 감시, 제어하는 대상 시스템들이 무수히 많으므로 조작자 인터페이스는 중앙 제어실에서 뿐만 아니라 현장에서도 직접 조작할 수 있도록 되어 있다.

5. 발전소 시스템의 계층구조적 접근

5.1 계층구조의 기본 구성과 보일러의 최적 부하 선정 개요

보일러 부하 선택은 매부하시의 효율을 감안하여 정상상태 모델보다는 연속적으로 보일러 운전을 행하는 실시간에서 매순간마다의 최적상태를 가져야 한다. 보일러 부하가 최적상태를 유지한다는 의미는 각 부제어시스템을 통솔하는 중앙제어시스템에서 그 부하운전에 필요한 연소량, 공기량, 노내압, 증기 온도 및 압력 수위등을 결정하여 상호 연결 작용을 통하여 각 부제어시스템의 제어입력들을 결정토록 지시함이다. 그 기본제어량은 보일러 연소효율과 각 상태량의 안정도 유지를 고려하여 결정되며 각 부제어시스템은 그에 상응하는 제어 상태를 갖게 된다. 중앙제어 시스템의 컴퓨터는 보일러 부하 증감발시 각 부제어시스템으로부터 현재 상태의 정보를 입수하여 보일러 고효율 운전 에 필요한 제어 입력들을 실시간대에서 계산하여 그 계산값을 각 부제어시스템의 기준치로 내려 보냄으로 총체적인 부하제어가 이루어지도록 한다. 이러한 중앙제어 시스템 중앙감시제어시스템(Supervisory control System)이라고도 불리는데 부하배분과 최적 운전 상태의 기록들을 내장하고 있으며 감시, 제어, 자료분석, 자료출력 등의 기능을 수행한다. 분산제어란 그 자체로서 여러 개별제어 시스템들을 갖고 있기 때문에 중앙감시 컴퓨터에서는 각 개별 시스템(부제어시스템)이 소요하는 제한치를 포함한 제어 입력, 최적화작업 제어 전략 등을 이미 내장된 여러 알고리즘들에 의해 결정하여 내려보내게 된다. 각 부제어시스템이 필요로 하는 정보는 자체의 입출력 데이터(이 데이터는 부제어시스템 스스로 취득한다.) 뿐만 아니라 다른 부제어시스템의 운전상태, 입출력 데이터 및 전체 운전제어 상태 등도 필요로 함으로 아래와 같은 두가지 정보 형태를 갖는다.

- 다른 부제어시스템들간의 공동 운전 에 필요한 데이터
(Cogeneration make/buy decision data)
- 상호연결제어시 주고 받아야 할 데이터
(Tie line control buy/shed decision data)

이러한 요구는 반드시 충족되어야 하는데, 앞에서 설명하였듯이 분산제어를 보일러에 채택한 이유가 보일러시스템은 각 부시스템들로 나누어 개별 루프로 제어를 하나 실제로는 하나의 커다란 비선형 시변 다변수 시스템이기 때문이다.

예를 들어 과열기나 재열기 온도제어 단위루프를

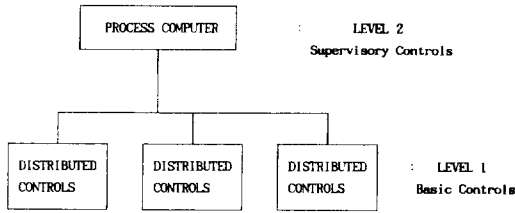


그림 10. Supervisory Controls in Process Computers

구성하였다 하여, 대상으로 하는 온도 시스템이 다른 제어시스템과 무관하지 않고 비록 시스템 입력으로서 과열저감기 입력 수량과 출력으로 출구 온도가 되지만 실제적으로는 연소, 급수 루프로부터 오는 영향이 일종의 외란 요소로 작용하기 때문에 연소나 급수제어의 상황이 온도제어에 정보를 적용하여 원활하고 효과적인 온도 제어가 이루어진다. 즉 분산 제어란 편의상 개별적으로 루프들을 나누어 제어를 행하나 실질적으로는 각 부시스템간 상호의존적이 된다. 이와 같은 형태는 각 단위루프 제어가 컴퓨터에 의해 이루어질때 더욱 큰 효과를 나타낸다. 각 컴퓨터제어시스템에서주어진 구조아래 제어가 수행되고 중앙 감시 제어 컴퓨터에 의해 종합, 상호보완 내지는 연결이 이루어지면 각 컴퓨터에 내재된 제어, 감시, 자기진단, 분석, 최적화 등의 각종 알고리즘과 소프트웨어에 의해 총체적인 제어가 이루어질 수 있다. 이점이 컴퓨터에 의해 분산제어를 수행했을 때가 종래의 재래식 계층구조(hierarchical approach)제어보다 뛰어난 효과를 보이는 이유가 된다.

5.2 계층구조제어의 여러가지 형태

이하에 현재까지 사용되어온 발전소의 계층구조제어 형태를 설명한다.

(1) 프로세스컴퓨터에 의한 감시제어방식

근래까지 많이 사용되어온 분산제어방식으로 기본적인 제어로서 각 부시스템별로 분산제어를 실시하고 프로세스컴퓨터에 의해 감시제어, 제한제어(Constraint Control) 및 부하배분을 수행한다. 이 방식은 한개의 프로세스컴퓨터에 의해 모든 수준의 제어기능들을 수행해야 함으로 많은 부담을 지게 되고 또한 계산 시간이 길고 이를 탈피하기 위해서는

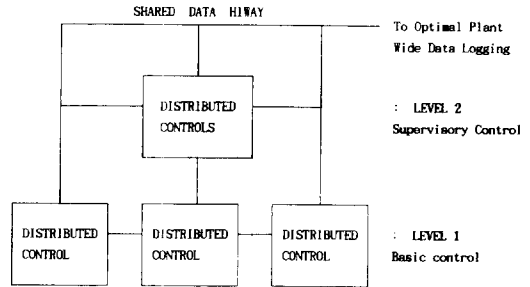


그림 11. 분산제어에서의 감시제어

여러개의 프로세스컴퓨터를 사용해야 한다는 단점을 가졌다.

(2) 개선된 다중레벨 분산제어

이 방식은 앞의 방식보다 다소 개선된 형태로서 그림 11과 같은 구조를 갖는다.

각 개별제어시스템의 제어 상태와 상태변수 상황이 부시스템 사이 및 감시제어시스템과 연결되어 종합적인 제어, 정보교환, 데이터 수집 분석 처리를 행할 수 있는 형태이다. 이때 한개의 발전소를 분산 제어하는 경우 각 개별시스템은 온도, 급수, 연소 등의 개별 루프 단위로 진행되었고 여러개의 보일러들을 계층구조로 제어할 때는 각 보일러의 입출력 값, 현재 보일러 상태들이 포함되어 서로를 연결하면서 명령의 수수와 데이터 처리, 최적 부하 배분 등을 미리 선정된 알고리즘에 의해 수행된다.

이러한 계층구조적 제어형태는 DDC(Digital Distributed Controllers)라 불리워지기도 하는데, 장점으로서 아래의 두가지 중대한 기능을 갖는다.

- 신속하고 다양한 계산 및 데이터 처리 능력
: 가감승제, 근사화된 선형함수 발생, 저가/고가 선택기능 등
- 논리 및 시퀀스 처리 능력
: AND, OR, NOT, Time Delay 기타 논리식의 처리
- 파라메타 Auto-tuning 및 Gain scheduling
: 과거, 현재의 데이터에 의한 분석처리
- 각종 제어 기능
: Digital PID, 선행제어, Cascade 제어, 추종 및 예측제어 기능

5.3 분산제어시스템의 마이크로프로세스 자동화

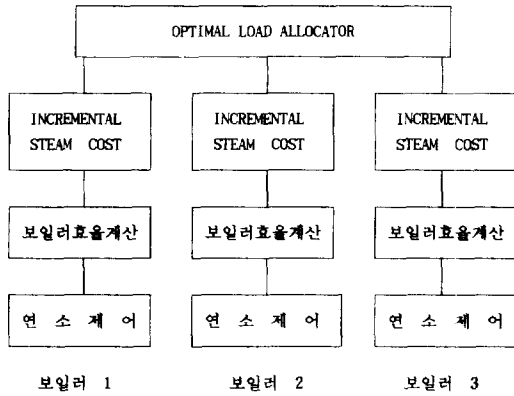


그림 12. Basic and Supervisory Boiler Load Control in Distributed Controls

발전소 분산제어의 계층구조적 접근에 의해 각 개별시스템간의 종합감시제어가 이루어지며 이를 컴퓨터에 의해 처리함으로써 여러가지 장점을 가지고 있다. 그 장점 가운데 가장 큰 것은 시스템 운영시 발생하는 위험을 분산, 내지는 신속한 대응으로 감시제어의 신뢰성을 높일 수 있다는 점이다. 마이크로프로세스(MPU, Microprocessor Unit)에 의해 조정되는 각 부시스템의 감시제어는 어느 한 MPU 고장시 보조 MPU에 의해 Back-up되든지 그렇지 않다 하더라도 전체 부시스템 사이 및 상위레벨의 정보교환은 통신에 의해 수행되는데 이 통신시스템의 고장시 개별시스템은 자체적으로 제어를 수행하고 있었으므로 사고의 파급에 의한 전체시스템의 고장을 막을 수 있다. 그림 12는 계층구조방식에 의한 여러대의 보일러 부하배분 제어를 보이고 있다.

그림 12에서 알 수 있듯이 각 보일러의 여러 루프 제어는 분산되어 처리되며 각 보일러 연소제어는 최적부하배분기(Optimal Load Allocator)에 의해 이루어짐을 알 수 있다. 이때 연소상태의 최적화는 이미 다른 통신채널을 통하여 급수나 온도 및 보조기기 제어가 진행되고 있음은 물론이다. 이와같이하여 개별적으로 그리고 종합적으로 상응하는 상황처리가 된다.

5.4 계층구조 분산제어 방식에서의 보일러 부하 배분 방식

앞에서 언급하였듯이 분산제어 방식에서 보일러 부

하배분이란, 증기의 단가를 낮추고 효율을 극대화한다는 원칙아래 각 보일러 분산 연소제어시스템의 입력(연료량, 연료종류)을 결정함이다. 이러한 부하배분에는 아래의 두가지 방식이 있다.

- Model-based efficiency Calculation
- On-line State-space Variable Technique

(1) 보일러 연소모델에 의한 효율계산(Model Based Efficiency Calculation)

이 방식은 분산제어에서 종래에 행하던 방식으로 연소 모델을 2차 정도로 근사화 시켜놓고 이 모델에 의해 보일러 증기단가나 효율을 계산하여 부하를 배분한다. 이렇게 2차로 근사화시키는 것은 모델이 간단하다는 점과 계산시간을 단축하고 취급하기 쉽다는 점이 있는 반면에 모델과 실제 시스템과의 차이로 빚어지는 전체 오차가 커진다는 단점이 있다. 이러한 모델오차는 모델을 2차로 근사화 시켰다는 것과 보일러 파라메타가 운전이나 시간에 따라 변한다는 데에 기인한다.

(2) 실시간 보일러 상태 추정방식(On-line State-space Variable technique)

이는 Kalman-Bucy Filters와 같은 알고리즘을 사용하여 상태공간에서 모델을 계속 Update시키면서 최적 배분 계산을 진행한다. 모델을 실시간에서 Update시켜야 함으로 시스템 입출력 및 운전상태 등의 다양한 데이터를 필요로 한다. 이와같이 함으로 매순간의 효율과 부하배분율이 정해진다.

다음은 보일러 효율 계산 방식으로서 다음의 두가지 방식이 있다.

- 입출력 방식 : 보일러로 들어가는 급수, 연료, 증기의 엔탈피와 보일러에서 생성되어서 나오는 증기의 엔탈피를 측정하여 계산
 - 열손실 방식 : 보일러에서 불완전 연소, 연소가스 온도손실 등의 열손실들을 측정하여 효율을 계산
- 두방식중 열손실 방식이 입출력 방식보다 오차가 적은 것으로 알려져 있다.

이상에서 설명한 보일러 부하배분방식은 모두 보일러 정상상태에서 다른 것이며 부하기준치가 변하는 과도상태에서는 실시간 보일러 상태추정인 경우도 시간지연이 지나 열평형에 도달할 때까지 이전 값을 갖고 있다.

5.5 최적 보일러 부하 배분 방식

6. 결 론

이제까지는 발전소 분산제어의 당위성과 적용, 운용면을 고찰하였다. 대규모시스템인 발전소 제어는 오래전부터 다양한 방식에 의해 발전되어 왔으며 근래에 들어 계층 구조에 의한 분산 제어 방식이 디지털 기술의 급속한 발달에 힘입어 서서히 실용화되고 있으며 국내에서도 점차로 도입되고 있는 실정이다. 분산제어가 이렇게 발전소에 도입됨은 이러한 제어 기법이 이미 오래전부터 아나로그 제어에서 사용되어온 바이며 발전소 특성에 맞기 때문이다. 그러한 이유로 종래의 아나로그나 시퀀스 설비를 모두 철거하고 분산제어 설비로 대체하더라도 대상시스템의 기본 골격이 크게 변하는 것은 아니기 때문에 앞에서 제시한 여러 기능면에서 새로 설치되든지 아니면 개조가 가능하다. 문제는 분산제어 시스템에 들어갈 제어의 여러 기능을 어떻게 보완 발전시키느냐 하는 것으로 기존에 사용되던 PID주종의 제어에서 탈피하여 현대 제어의 알고리즘을 실용화함으로 고효율, 고신뢰의 안정한 제어를 수행케함이 필요하다 하겠다.

참 고 문 헌

- [1] Wayne H. Smeallie, "Microprocessor-Based Distributed Control Systems in the Modern Power Plant." Bailey Control Company
- [2] Dragoslav d. Siljak, "Decentralized Control of Complex Systems." Mathematics In Science and Engineering Vol. 184, 1991
- [3] T.N.Matsko, W.H.Moss, T.J.Scheib, "Optimal Boiler Load Allocation in Distributed Control." Bailey Control Company
- [4] Dobrivoje Popovic, Vijay P.Bhalkar, "Distributed Computer Control for Industrial Automation." Marcel Dekker Inc, 1990
- [5] Mohammad Jamshidi, "Large-Scale Systems." Series Vol. 9, 1983



황재호(黃載皓)

1956년 4월20일생. 1982 아주대 전자공학과 졸업
1990년 서울대 대학원 전기공학과 박사과정수료

1982~92년 한전기술연구원 선임연구원
현재 대전공업대 전자공학과 전임강사

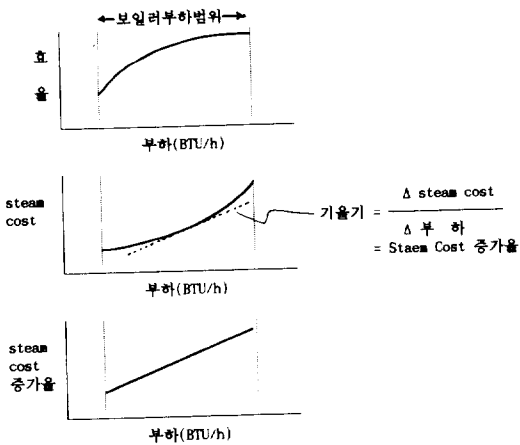


그림 13. 보일러 효율, steam cost, steam cost 증가율

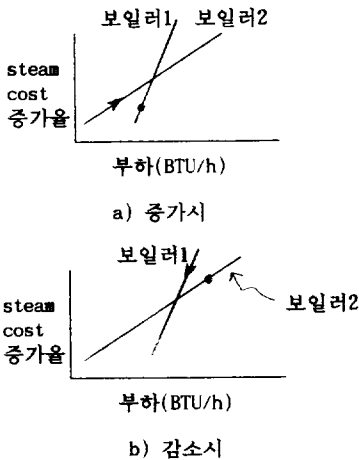


그림 14. 최적 보일러 부하 배분

여러 보일러가 계층구조제어로 운용되는 경우 최적 보일러 부하 배분은 각 보일러의 효율, steam cost, steam cost의 증가율로서 결정된다. 각 요소들의 계산은 앞에서 이미 설명한 방식에 의하며 그 결과 내를 그림 13에 보이고 있다.

계층구조제어시 각 보일러는 그림 13과 같은 나름대로의 특성을 갖고 있으며 최적 부하 배분은 이중 steam cost 증가율에 의해 결정된다. 그림 14에 그 방식을 기술하였다. 그림에서 알 수 있듯이 보일러 부하 증가는 steam cost 증가율이 낮은 보일러 상태로 증가시키며, 내릴 때에는 steam cost 증가율이 높은 보일러 상태로 감소시킨다.