

발전플랜트의 다단계 분산제어기 설계

Design of a Decentralized Multilevel control for Thermal Power Plant

*이 은호, 김 석우, 김 우성, 김 영철

충북대학교 전자공학과(Tel:0431-61-2475; Fax:0431-272-2475;E-mail: yckim@cbucc.chungbuk.ac.kr)

Abstract For the purpose of the good tracking to variable load demands of the thermal power plant, a decentralized multilevel control(DMC) scheme is presented. It is applied to the drum type boiler-turbine system which is simplified from Boryung T/P #1,2 model[4]. A linearized model is decomposed into three subsystems by means of linear transformation. Then the DMC based on such subsystem is designed. Simulation using Matlab-Simulink shows that the proposed algorithm works very well to the large step change of power demand.

Keywords DMC

1. 서론

화력발전소의 보일러-터빈 시스템의 제어 방식에는 대규모 다변수 제어기법을 적용하는 집중제어방식과 각 기능별로 여러개의 부시스템(subsystem)으로 분할하여 개별제어 및 총괄제어를 조합한 분산제어방식(decentralized control)으로 대별된다. 그러나 전자의 경우 한 부분의 고장이 전체 시스템에 영향을 줄 수 있는등 신뢰도 면에서 불리하여 주로 분산제어방식이 많이 연구되고 있다. 또한, 근래에 개발된 고성능 마이크로프로세서와 계측기술의 발달로 이들을 이용한 컴퓨터분산제어방식의 연구가 더 한층 고조되고 있는 추세이다. 본 논문에서는 보일러-터빈시스템의 분산제어기 설계방식을 제안하고자 하며, 보령 T/P #1, 2호기의 B-T모델[4]을 대상으로 하였다. 간략화된 4차의 비선형 분포정수 모델로부터 출력에 대한 수 개의 동작점에 대해 선형화 모델을 구하고 연소 제어제, 출력 제어제, 드럼 수위 제어제의 3개 부시스템으로 분산화 시키는 입력 비집중화 기법을 제시하였다. 대규모 시스템을 비집중모델(decentralized model)로 분할하였을 때 각 부시스템의 국부제어기(local controller)가 추구하는 목적에 따라 협동상황(team situation)과 경쟁상황(competitive situation)을 고려하여야 하며, 상층단계에서 이들 부시스템의 제어를 조정해주는 조정자(coordinator)가 필요하게 된다. 이러한 관점의 협조제어방식으로 본 논문에서는 각 부시스템의 상호연관(interconnection)의 영향을 줄여주도록 하는 분산다단계제어(decentralized multilevel control : DMC) [2,3]방식을 적용하였으며 시뮬레이션을 통해 제시한 방식이 출력변동에 효과적으로 제어될 수 있음을 보였다.

2. 보일러-터빈 모델

보일러-터빈(B-T) 시스템은 대규모, 각종 파라미터의 분포성, 지연시간요소, 비선형성등으로 인해 정확한 모델을 수학적으로 표현하기란 대단히 어렵다. 특히 출력변동에 따른 모델의 변화는 불가피하다.

본 논문에서는 분산제어 방식개발을 위한 대상 모델로 참고문헌[4,5]에 제시된 모델을 이용하고자 한다. 이 모델은 보령화력 1,2호기의 실제 사양과 운전 데이터로부터 얻어진 비선형모델로서, 넓은 동작범위에 걸쳐 실제 플랜트와 잘 일치한다.

<그림 2.1>은 드럼형 B-T모델의 계통도이며, 과열기 부분이 간략화된 드럼형 B-T 모델의 상태방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{44} & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & 0 & 0 & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{P}_s \\ \dot{q}_s \\ \dot{V}_w \\ \dot{X}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_4 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

위식을 상태변수로 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A(x)^{-1} b(x, u) = f(x, u) \\ y &= g(x, u) \\ x^T &= [P \quad q_s \quad V_w \quad X_r] \\ u^T &= [Q \quad P_{cv} \quad q_{fw}] \\ y^T &= [P_{sw} \quad V_w \quad MW] \end{aligned} \quad (2.2)$$

여기서 P는 드럼의 증기압력[MPa], Vw는 드럼내의 물의부피 [m³], Xr은 상승관내의 증기질, q_s는 증기류량[Kg/sec], Q는 공급열량[KJ/sec], q_{fw}는 급수유량[Kg/sec], P_{cv}는 주증기 제어 밸브의 개폐율[%], P_{sw}는 주증기 압력, MW는 출력을 나타낸다. 각 제수와 출력관계식은 참고문헌[4]를 참조한다.

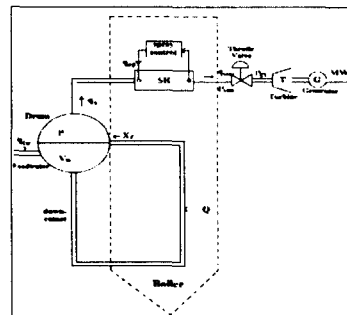


그림2-1 드럼형 보일러-터빈 계통도

3. B-T 시스템의 입력분산화모델

B-T 시스템의 분산제어방식의 연구에 있어서 중요한 출발점은 대규모 복합시스템을 어떻게 비집중화하는가이다. 이러한 목적을 위해서 B-T시스템을 주요 제어 기능별로 분류하면 다음과 같다[5].

(i) 온도제어제 : 터빈이 열응력에 의해 균열되는 것을 막기 위하여 과열기 출구의 주증기 온도를 일정하게 유지하는 것이 제어 목표이다. 과열저장기로부터 분사되는 냉각수의 유입량으로 제어된다.

(ii) 수위제어제 : 드럼형 보일러에서, 드럼의 수위는 동작점의 변화에 이에 수반되는 외란하에서도 정해진 상하한을 넘지 않도록 제어되어야 한다. 드럼 수위제어는 드럼에 공급되는 급수량의 제어에 이루어진다.

(iii) 연소제어제 : 보일러에 공급되는 열량과 보일러가 터빈에 공급하는 과열증기의 총엔탈피 사이에 에너지 평형이 이루어지도록 한다. 이는 주증기의 압력을 일정하게 유지하는 것으로 달성되며, 이를 위해 보일러에 공급되는 열량을 제어한다.

(iv) 출력제어제 : 보일러의 출력은 주증기가 갖고 있는 총엔탈피로 표시되며, 터빈을 거쳐 전력(MW)으로 변환된다. 주증기의 온도 압력이 유지되며, 총엔탈피는 주증기량에 의해 결정되며, 유량 제어밸브로 주증기량을 제어한다.

온도 제어와 관련된 공정은 그 동특성이 다른 공정에 비해 매우 빠르므로, 특이성동법을 적용하여 다른 공정과 분리할 수 있다. 따라서, B-T모델의 분산화 부시스템은 나머지 세개로 구성하기로 한다. 모델분할기법에는 시스템의 물리적 성질과 내부 구조를 고려하여 이루어지는 physical decomposition과 수학적인 방식 2가지로 나누어진다. 본 논문에서는 선형변환(linear transform)방식을 이용한 B-T시스템의 input decentralized model을 제시하고자 한다.

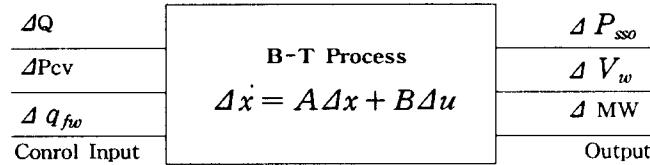


그림 3-1 B-T 모델

식 (2.1)을 한동작점[$x^0 \ u^0$]에서 선형화 근사모델로 표현하면 다음과 같다.

$$S: \dot{z} = Az + Bu \quad (3.1)$$

$$\text{여기서, } z^T = [\Delta P \ \Delta q_i \ \Delta V_w \ \Delta X_r] \quad (3.2)$$

$$u^T = [\Delta Q \ \Delta P_{cv} \ \Delta q_{fw}] \quad (3.3)$$

$$A \in R^{4 \times 4}, \ B \in R^{4 \times 3}$$

식(3.1)의 파라미터 행렬 A, B는 시불변이고 (A, B)는 가제어 (controllable)라고 가정한다. 모든 시스템이 하나의 독립된 입력을 갖는 시스템을 input decentralized system이라 한다.

여기서 고려하는 B-T 모델은 <그림 3.1>과 같이 3개의 제어 입력을 가지는 선형화모델을 나타내며, 앞에서 검토한 바에 따라 연소제어제, 출력제어제, 드럼수위제어제의 3개 부시스템으로 분할하기로 한다. 즉,

$$\bar{S}_i: \dot{\bar{z}}_i = \bar{A}_i \bar{z}_i + \sum_{j=1, j \neq i}^3 \bar{A}_{ij} \bar{z}_j + \bar{B}_i u_i, \ i=1,2,3 \quad (3.4)$$

이제 식(3.1)로부터 (3.4)을 구하기위해 equivalence transformation $\bar{z} = Pz$ 을 이용한다. $P \in R^{4 \times 4}$ 는 constant nonsingular matrix이다.

선형변환 P는 \bar{B} 가 다음 형태가 되도록 선택한다.

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} \bar{B}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{B}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{B}_3 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$\bar{B}_1 = 1, \ \bar{B}_2 = 1, \ \bar{B}_3 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

\bar{B} 를 다시쓰면,

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$\bar{z} = Pz$ 에 의해 S와 \bar{S} 에는 다음 관계가 있다.

$$\bar{A} = PAP^{-1}, \ \bar{B} = PB, \ \bar{C} = CP^{-1} \quad (3.8)$$

식 (3.7), (3.8)로 부터 선형변환 P를 다음과 같이 선택하였다.

$$P = Q^{-1} \quad (3.9)$$

$$Q = [B : \eta] \quad (3.10)$$

여기서 $\eta \in R^4$ 는 Q가 정칙이도록 임의로 선택된다.

위 결과들 각 부시스템별로 정리하면 다음과 같다.

(i) 연소제어 부시스템

$$\dot{\bar{z}}_1 = \bar{a}_{11} \bar{z}_1 + \bar{a}_{12} \bar{z}_2 + \bar{A}_{13} \bar{z}_3 + u_1 \quad (3.11)$$

$$\bar{y}_1 = c_1 Q_1 \bar{z}$$

(ii) 출력제어 부시스템

$$\dot{\bar{z}}_2 = \bar{a}_{21} \bar{z}_1 + \bar{a}_{22} \bar{z}_2 + \bar{A}_{23} \bar{z}_3 + u_2 \quad (3.12)$$

$$\bar{y}_2 = c_2 Q_2 \bar{z}$$

(iii) 드럼수위제어 부시스템

$$\dot{\bar{z}}_3 = \bar{A}_{33} \bar{z}_3 + \bar{A}_{31} \bar{z}_1 + \bar{A}_{32} \bar{z}_2 + u_3 \quad (3.13)$$

$$\bar{y}_3 = c_3 Q_3 \bar{z}$$

여기서 $\bar{z}_1, \bar{z}_2 \in R, \ \bar{z}_3 \in R^2, \ \bar{a}_i, \bar{a}_{ij} \in R^1, \ \bar{A}_{ij} \in R^{2 \times 2}$

$$c^T = [c_1 \ c_2 \ c_3], \ Q = [Q_1 \ Q_2 \ Q_3 \ Q_4], \ d_{32} \in R$$

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} \bar{a}_{11} & \bar{a}_{12} & \bar{A}_{13} \\ \bar{a}_{21} & \bar{a}_{22} & \bar{A}_{23} \\ \bar{A}_{31} & \bar{A}_{32} & \bar{A}_{33} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

4. B-T모델의 Decentralized multilevel control 알고리즘

분산제어는 대규모 시스템을 각 구성체간의 정보전달 관계에 따라 여러개의 부시스템(subsystem)으로 나누고, 각 부시스템의 제어부가 자신의 부시스템내의 정보만을 이용하여 출력회환(output feedback) 또는 상태회환(state feedback) 제어를 구성하 8면서 동시에 다른 부시스템과의 interconnection을 고려하여 전체 안정도를 도모하는 제어방식이다. 이러한 방식에는 분산 극 배치 방법, 분산 준최적제어 방법, 분산 확률제어 방법으로 분류할 수 있다. 본 논문에서는 B-T 모델의 분산 극배치 제어를 설계하고자 한다. <그림 4.1>은 식 (3.6)의 i-번째 부시스템에 대한 block diagram이다.

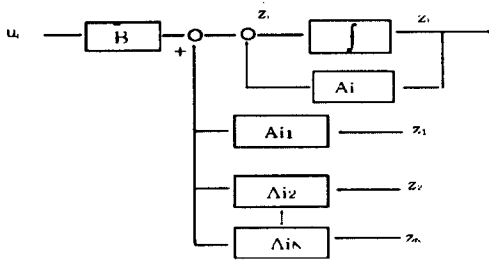


그림 4.1 Decentralized subsystem

식(3.4) 시스템에 대한 decentralized multilevel control은 각 부시스템의 제어칙을 국부적 안정을 위한 local control과 interaction을 상쇄시키기 위한 global control의 조합으로 구성한다. 즉

$$u_i = u_i^l + u_i^g, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4.1)$$

이제 u_i^l 과 u_i^g 를 설계하는 방법을 정리하고자 한다.

(\bar{A}_i, \bar{B}_i)가 가제어하다는 가정하에 interconnection을 무시한 decoupling system에 대해 local control law는 다음식(4.3)의 극배치가 이루어지도록 상태피드백 제어를 설계한다.

$$u_i^l = -h_i x_i \quad (4.2)$$

$$h_i = [h_{1i} \ h_{2i} \ h_{3i}]$$

$$|\lambda I - \bar{A}_i + \bar{b}_i h_i| = (\lambda - s_1^*)(\lambda - s_2^*)(\lambda - s_3^*) \quad (4.3)$$

여기서 s_i^* 는 미리 정해주는 subsystem의 페루프 특성이 다. 물론 (4.2)는 suboptimal control law에 의해서도 설계될 수 있다.

Global control law를

$$u_i^g = -\sum_{j=1}^N h_{ij} \bar{z}_j \quad (4.4)$$

라 놓으면, 페루프 시스템은 다음과 같다.

$$\dot{\bar{z}}_i = (\bar{A}_i - \bar{b}_i h_i) \bar{z}_i + \sum_{j=1}^N (\bar{A}_{ij} - \bar{b}_j h_{ij}) \bar{z}_j, \quad i = 1, 2, 3 \quad (4.5)$$

식(4.1) 제어가 식(3.4)의 전체 시스템을 안정화 시키는 global control gain h_{ij} 는 Sevastyanov-Kotelyanski 조건[2]을 만족하도록 다음과 같이 구할 수 있다.

$$h_{ij} = [(\bar{b}_i^T \bar{b}_i)^{-1} \bar{b}_i^T \bar{A}_{ij}]^T \quad (4.6)$$

여기서, $(\bar{b}_i^T \bar{b}_i)^{-1} \bar{b}_i^T$ 는 \bar{b}_i 의 Moore-Penrose inverse이다. 따라서 전체상태피드백 분산제어의 이득행렬은 다음과 같다.

$$H = \begin{bmatrix} h_1 + h_{11} & h_{12} & \dots & h_{14} \\ h_{21} & h_2 + h_{22} & \dots & h_{24} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{41} & h_{42} & \dots & h_4 + h_{44} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

5. 시뮬레이션

식(2.2) B-T모델의 95%출력에 대응하는 동작점 변수는

$$X_{95}^T = [P, qs, Vw, Xr] \\ = [17.75, 393.0, 18.5, 0.2435]$$

$$U_{95}^T = [Q, Pcv, qfw] \\ = [486.492, 58.38, 393]$$

이며, 선형화모델 식(3.1)의 A, B는 다음과 같이 구해진다.

$$A = \begin{bmatrix} 3.8943e-3 & -2.7403e-4 & -4.2356e-10 & 4.4591e-8 \\ 3.6901e-1 & -3.3333e-2 & 0 & 0 \\ 7.4461e-3 & 7.1972e-3 & -1.3253e-08 & -3.3199e+1 \\ 2.5990e-4 & 7.7672e-5 & -1.8311e-10 & -3.1539e-1 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 2.6185e-007 & 0 & -5.0118e-005 \\ 0 & 1.1363e-001 & 0 \\ 4.9018e-007 & 0 & -9.3820e-005 \\ 1.7402e-008 & 0 & -2.5977e-005 \end{bmatrix}$$

입력분산화를 위한 변환행렬 P는 다음과 같이 선정하였다.

$$P = \begin{bmatrix} 1.3120e+7 & 0 & -4.6687e+6 & -8.4516e+06 \\ -1.8893e+1 & 8.8006 & 1.0093e+1 & 2.1250e-14 \\ 9.1433e+4 & 0 & -4.7275e+4 & -4.4158e+04 \\ 2.1468e-3 & 0 & -1.1468e-3 & -2.4146e-18 \end{bmatrix}$$

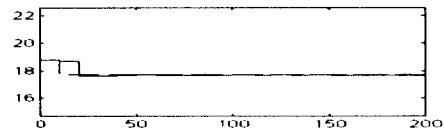
A의 고유치는 $-3.0383e-2, 9.4425e-4, -3.1539e-1, -9.1114e-9$ 로 불안정한 시스템으로 나타난다. 이들 고유치를 고려하여 local control law 설계를 위한 식(4.3)의 페루프 극값을 $-1, -2, -7, -10$ 에 설정하였다. Ackerman의 극배치 공식과 식(4.6)에 의한 global control gain을 구하면 최종 DMC이득의 H행렬 다음과 같다.

$$H = \begin{bmatrix} 1.3134e7 & -3.7853e4 & -4.6687e6 & 1.4921e8 \\ -3.4537e1 & 1.7386e1 & 2.0185e1 & -3.3507e2 \\ 3.3307e5 & -3.6873e2 & -9.1607e4 & -8.4808e5 \end{bmatrix}$$

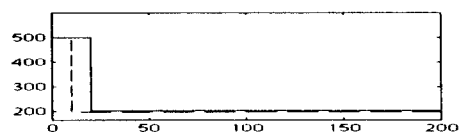
이때, 선형화 시스템의 페루프 고유치는

$$\lambda[\bar{A} - \bar{B}H] = \lambda[A - BHP] \text{는 } -1, -2, -7, -10 \text{ 로 나타난다.}$$

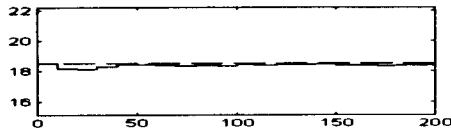
<그림 5>는 B-T출력이 110%에서 운전중 50%로 스텝변화가 일어난 경우에 대한 시뮬레이션결과로서 상태레직 [P, qs, Vw, Xr]과 출력[Mw]을 나타내는데 출력의 추종 성능이 매우 우수함을 보여주고 있다. 실선은 시뮬레이션결과이고 파선은 기준값을 나타낸다. 과도응답 데이터의 그래프가 다소 단순하게 보여지는 것은 Matlab-Simulink를 이용한 real-time simulation결과를 나타냈기 때문이다.



(a) P: 드럼의 증기압력 [MPa]



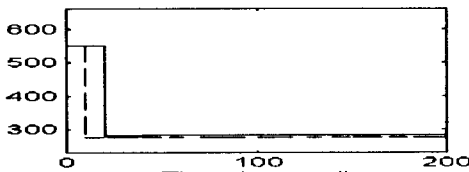
(b) qs: steam flow rate [Kg/sec]



(c) V_w : 드럼내의 물의 부피 [m^3]



(d) X_r : 상승관내의 증기질



(e) M_w : 출력

그림5. 터빈 출력이 110%에서 50%로 스텝변화 한 경우 DMC의 제어결과

6. 결 론

최근에 개발된 보령T/P의 보일러-터빈 모델을 기준으로하여, 과열증기계의 온도제어루프를 별도의 제어루프로 분리하고 간략화시킨 보일러-터빈계의 선형화 모델로부터 (1)연소제어 (2)출력 제어 (3)드럼수위제어의 3개 부시스템으로 분할하는 방식을 제안하였다. 여기서, 각 부시스템은 한 개씩의 독립적인 입력을 갖도록 분산화된다. 이러한 모델에 대해 분산 다단계 제어기의 설계기법을 제시하였으며, 시뮬레이션을 통해 제안한 방식의 유용성을 보였다. 이 방식에서 부시스템의 안정도는 부시스템이 피드백 제어에 의해 달성되고 통합시스템의 안정은 상호연관의 영향을 최소화하도록 협조제어 기능을 갖는 구조로써 보일러-터빈 제어계에 매우 효과적인 제어방식이 될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. N.R. Sandell et al 3, " Survey of Decentralized Control Methods for Large Scale System," *IEEE Trans. Auto. Contr.*, Vol.AC-23, pp.108-129, 1978.
2. D.D. Siljak, *Large Scale Dynamic Systems: Stability and Structure*, North Holland, 1978.
3. D.D. Siljak, *Decentralized Control of Complex System*, Academic Press, 1991.
4. 한전기술연구원, "보일러 계수추정에 의한 최적 보일러 제어기 개발(1)," KRC-901 -J03, 연구보고서, 1993.
5. 서진현, 발전플랜트의 분산적용 제어기 구성에 관한 연구, 한2 국전력공사 연구보고서, 1994.
6. 기초전력공학 공동연구소, 발전플랜트를 위한 컴퓨터 분산제어 알고리즘의 개발, 1차년도 중간보고서, 1995. 7.