

증기발생기 수위제어를 위한 다중 안정화 제어기 설계

Reliable Stabilizing Multi-controller for Steam Generator Level Control

권현진, 박상현*, 안성호**, 이상정*, 함창식**

*충남대학교 전자공학과 (Tel: 825-3991; Fax: 823-4494; E-mail: hyunjin@cslab.chungnam.ac.kr)

**한국원자력연구소 (Tel: 868-8662; Fax: 868-8364; E-mail: shahn2@nanum.kaeri.re.kr)

Abstract This paper proposes the passive redundancy algorithm of multi-controller structure applicable to the steam generator level control system in the low power operating range. In the passive redundancy scheme of multi-controller structure, two suitable controllers exist if the plant is strongly stabilizable. One of the two controllers can be selected arbitrarily only if it is stable. In particular, this paper shows that the passive redundancy scheme can be efficiently used with PID and GPC control algorithms through simulation studies on the control of the steam generator.

Keywords Steam Generator, Reliable Stabilizing Control, Multi-controller Stabilization, PID, GPC

1. 서론

제어시스템이 센서, 구동기, 제어채널, 부 피드백 루우프와 같은 제어시스템 요소들의 고장에도 불구하고 정해진 특성을 유지할 때 이 시스템을 Reliable하다고 말한다. 시스템이 Reliable하다고 할 때는 고장이 허용되는 시스템 요소들의 종류와 고장에도 계속 유지되어야 하는 시스템 특성들이 반드시 명시되어야 한다. 즉, 신뢰성 제어(Reliable Control)는 고장의 발생에도 불구하고 시스템 안정성의 지속적인 유지를 목적으로 하는 제어이다. 그 동안 신뢰성 제어에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다. 제어기 설계 방법에 따라 M. Vidyasagar에 의한 Two Factorization Approach[14], Y. J. Cho에 의한 An Adaptive Redundancy Approach[3], R. A. Date나 D. D. Siljak에 의한 Decentralized Control Approach[5,11], J. Ackermann, S. M. Joski 그리고 M. Mariton 등이 제안한 State-feedback Approach[1,6,8], J. V. Medanic, R. J. Veillette이 제안한 The ARI Approach(Reliable H_∞ Control)[9,13]와 같이 다섯 가지로 분류할 수 있다. 이러한 신뢰성 제어 알고리즘 중 원자력 발전소 증기발생기 수위제어 시스템에 적용 가능한 제어기법을 찾아 제어기를 설계하고 모의 실험을 통해 그 성능을 평가해 본다.

원전의 제어계통은 계통간의 유기관계가 복잡한 비선형 대규모 시스템으로 정상운전 뿐만 아니라 과도상태에서도 안정된 제어효과를 나타내어야 한다. 또한 원전 제어계통은 자가진단기법과 고장허용기법 등을 용이하게 실현할 수 있음으로 인해 신뢰도와 이용율을 향상시킬 수 있다. 본 논문에서는 원전 제어계통 중 원전 운전에 가장 영향이 큰 저출력시 증기발생기 수위제어 계통을 대상으로 하였으며, 현재 고리 3, 4호기와 영광 1, 2호기에 설치되어 있는 Westinghouse형태의 증기발생기를 대상으로 주급수와 증기유량, 1차측 냉매와 주급수 온도의 네 가지 입력을 가진 증기발생기 수위제어계통을 모델링하였다.

조사된 고장허용 제어기법 중 Two Factorization Approach는 R. Saeks와 J. Murray[10], M. Vidyasagar와 N. Viswanadham[14]이 제안하였다. 이는 플랜트가 주어졌을 때 C₁, C₂ 제어기의 합이 플랜트를 안정화시키도록 제어기를 설계하는 문제로서, 두 제어기 중 하나에 고장이 발생했을 경우에도 플랜

트는 안정화되어야 한다. 동시 안정화 문제와 다중 제어기 안정화 문제로 나누어 볼 수 있다.

동시 안정화 문제(Simultaneous Stabilization Problem)는 여러 개의 플랜트 P₀, P₁, ..., P_n이 주어졌을 때 이를 안정화시키는 단일 제어기 C의 존재를 결정하는 것으로, 여기서 P₀는 고장이 발생하지 않은 상태의 공칭 플랜트를 나타낸다. 반면 P₁, ..., P_n은 다양한 구조적인 불안요소에 의해 허용되는 범위내에서 감지되거나 구동기 등에 고장이 발생했을 경우, 또는 동작점이 변화하는 상태에서의 플랜트를 모델링한 것이다. 만약 동시 안정화 문제의 해가 존재한다면, 제어기는 공칭 플랜트 P₀를 안정화시킬 뿐만 아니라, 시스템이 불안해지는 각각의 상태에 대해서도 신뢰성있게 안정화시켜야 한다. 그러나 이러한 접근법에 의한 제어기 설계는 플랜트가 P₀, P₁과 같이 두 개인 경우까지만 수식적으로 증명, 실험이 가능하므로 증기발생기 모델에는 적용시키기 곤란하다.

다중 제어기 안정화 문제(Multi-controller Stabilization Problem)는 동시 안정화 문제를 쌍대적 관점에서 고려한 것으로 [16], 플랜트 P가 주어진 상태에서 제어기 C₁, C₂를 설계한다. 먼저 정상 상태에서 C₁, C₂ 두 제어기는 시스템을 안정화시켜야 한다. 또한 어느 한 쪽 제어기에 고장이 발생(i=1 또는 2 인 경우 C_i=0으로 모델링)했을 시에도 시스템은 여전히 안정해야 한다. 이를 다중 제어기 구조(Multi-controller configuration)라 하며 1978년 Siljak[12,18]에 의해 소개되었다. 다중 제어기 안정화 문제는 정상 동작시 플랜트에 연결되는 제어기의 구조에 따라 능동 중복 구조(Active Redundancy Scheme)와 수동 중복 구조(Passive Redundancy Scheme)의 두 가지로 나눌 수 있다.

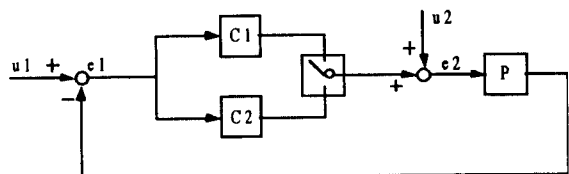


그림 1. 능동 중복 구조.

Fig. 1. Active Redundancy Scheme.

능동 중복 구조는 그림 1과 같이 주 제어기(main controller)의 고장이 검출되었을 때 백업 제어기(backup controller)로 스위칭되는 구조를 갖는다. 그러므로 어느 순간이든 플랜트에 연결된 제어기는 하나뿐이다. 이 구조는 각 제어요소들의 오동작으로 인한 제어기 고장 감지 등에 유리하다. 시스템은 제어기의 고장을 신속·정확하게 검출하여 이 정보를 신뢰성있게 백업 제어기로 전달할 수 있어야 한다.

이에 반해 수동 중복 구조는 그림 2와 같이 C_1, C_2 모두가 동작 중 일때 뿐만 아니라 그 중 하나는 작동하고 하나는 영이 될 때도 시스템을 안정화시킬 수 있도록 하는 C_1, C_2 를 찾는 문제이다. 능동 중복 구조와는 달리 정상 동작시 플랜트 P에는 언제나 두 제어기가 연결되어 있다. 그러나 두개의 제어기가 동시에 고장났을 때는 시스템이 불안정해지므로 단일 제어기 고장에 대한 신뢰성만을 고려하는 기법이다.

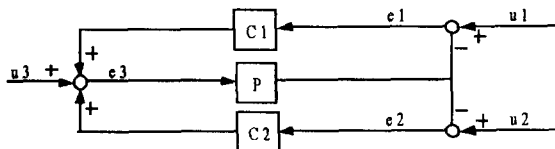


그림 2. 수동 중복 구조.
Fig. 2. Passive Redundancy Scheme.

Vidyasagar는 플랜트 P가 strongly stable할 경우에 수동 중복 구조상에서 시스템을 안정화시키는 적당한 제어기 C_1, C_2 가 존재함을 증명하였다[17]. 본 논문에서는 수동 중복 구조의 다중 안정화 제어기 설계 알고리즘에 따라 제어기를 설계하여 원전 제어계통 구성요소의 고장에 대해 성능 및 안정성을 유지하는지 모의실험을 통해 평가해 봄을 목적으로 한다.

2. 수동 중복 구조의 다중 안정화 제어기 설계

만약 플랜트 P가 strongly stable하다면 적합한 제어기 C_1, C_2 가 존재하며, 그 중 하나의 제어기는 그 제어기가 안정하기만 하다면 임의적으로 선택할 수 있다[14].

2.1 신뢰성 안정화 문제(Reliable Stabilization Problem)

Proper rational function들로 구성된 플랜트 P가 주어졌을 때 신뢰성 안정화 문제를 풀기 위해 다음 조건을 만족하는 두 제어기 C_1, C_2 를 구한다.

- i) 제어기 C_1 이 플랜트 P를 안정화시킨다.
- ii) 제어기 C_2 가 플랜트 P를 안정화시킨다.
- iii) 제어기 C_1+C_2 도 플랜트 P를 안정화시킨다.
- iv) 만약 C_1, C_2 를 $C_i = D_{e_i}^{-1} N_{e_i}$, 이때 $D_{e_i}^{-1}, N_{e_i}^{-1}$ 는 i

에 대한 left-coprime이라 할 때, $\bar{D}_{e_1}, \bar{D}_{e_2}$ 는 right-coprime이다. 이 조건은 C_1 과 C_2 의 parallel combination이 우반평면(RHP)에 근접한 내부적으로 중복되는 어떠한 극점도 갖지 않음, 즉 C_1 과 C_2 가 우반평면에 가까운 곳에서 내부적으로 중복되는 극점(internally duplicated poles)을 갖지 않음을 의미한다.

2.2 수정된 신뢰성 안정화 문제(Modified RSP)

앞서 살펴본 신뢰성 안정화 문제의 조건들과는 약간 다른 경우로서 다음과 같이 수정된 두 조건을 만족하는 제어기 C_1, C_2 를 구한다.

- i) 제어기 C_1 이 플랜트 P를 안정화시킨다.
- ii) 제어기 C_2 는 플랜트 P와 $P_1=P(1+C_1P)^{-1}$ 을 모두 안정화시킨다.

MRSP에는 완벽한 해가 주어지며, MRSP가 해를 갖는다면 RSP도 해를 갖고, 스칼라의 경우에는 그 역도 성립한다.

2.3 제어기 설계 알고리즘

Proper rational function들로 이루어진 플랜트 P에 대해 만약 P가 strongly stabilizable하다면 MRSP는 해를 갖는다. 이때 C_2 는 다음과 같은 방법으로 구한다[14,15].

P가 strongly stabilizable이고, C_1 은 P에 대한 strongly stabilizing controller라 할 때, $P_1=P(1+C_1P)^{-1}$ 라 정의하면,

$$P = P_1(1 - C_1P_1)^{-1} \quad (1)$$

MRSP가 해를 가짐을 보이기 위해 두 플랜트 P와 P_1 이 simultaneously stabilizable임을 보인다.

P_1 은 안정하므로 $P-P_1$ 은 strongly stabilizable하다.

$$\begin{aligned} P - P_1 &= P_1(1 - C_1P_1)^{-1} - P_1 \\ &= P_1C_1P_1(1 - C_1P_1)^{-1} \end{aligned} \quad (2)$$

위의 플랜트가 strongly stabilizable임을 다음과 같은 순서로 증명해 본다. 임의의 proper rational function F의 norm을 식(3)과 같이 정의한다.

$$\|F\| = \sup_w \overline{\sigma}(F(jw)) \quad (3)$$

또한, k를 $\|P_1C_1\|$ 보다 큰 어떤 정수라 하면, $\left\| \frac{C_1P_1}{k} \right\| < 1$ 이

므로 $(1 - \frac{C_1P_1}{k})$ 역시 proper rational function이다.

Binomial expansion에 의하면,

$$\left\{ 1 - \frac{C_1P_1}{k} \right\}^k = 1 - C_1P_1 + \sum_{i=2}^k r_i (C_1P_1)^i \quad (4)$$

여기서 r_i 는 binomial coefficients이다.

제어기 R을 다음과 같이 정의한다.

$$R = C_1 \sum_{i=2}^k r_i (C_1P_1)^{i-2} \quad (5)$$

$$1 - C_1P_1 + RP_1C_1P_1 = (1 - \frac{C_1P_1}{k})^k \quad (6)$$

제어기 R이 안정하다면 플랜트 $P_1C_1P_1(1-C_1P_1)^{-1}$ 을 안정화시킨다. 그러므로 이 플랜트는 strongly stabilizable하다.

$$C_2 = R(1 - P_1R)^{-1} \quad (7)$$

식(7)과 같이 제어기 C_2 를 정의하면 C_2 는 P와 P_1 을 안정화시키고, 이때 C_1 과 C_2 는 MRSP의 해가 된다.

3. 제어기 설계 및 모의실험

3.1 증기발생기의 적용 - PID 제어기

증기발생기 플랜트를 안정화시키는 PID 형태의 제어기 C_1 을 구한다. PID 제어기를 얻기 위해 개선된 Ziegler-Nichols Tuning을 통해 다음과 같은 계수값을 얻는다[2].

$$K_p = 3.1015, T_d = 31.1540, T_i = 124.6161 \quad (8)$$

이 계수 값으로 C_1 제어기를 설계하고, 수동 중복 구조의 다중 제어기 설계 알고리즘에 따라 안정한 제어기 R을 구하여 C_2 제어기를 설계한다. 여기서 $\|P_1C_1\|$ 보다 큰 정수값을 k로 정해야 하는데, 식(5)를 살펴보면 최소 2 이상이어야 함을 알 수 있다. 그런데 P_1C_1 의 norm 값이 커서 이에 따라 k값이 매우 커질 경우 전개식의 차수가 상당히 높아지게 되고, 모의실험에서 식의 연산이 불가능하게 된다는 문제점이 있다. 그런데 식(5)에서 r_i 는 binomial coefficients, 즉 상수이므로 k가 큰 값인 경우에 대해 식을 전개해도 제어기 R은 영점값만 변할 뿐, 중복되는 극점을 갖게된다. 그러므로 k는 제어기 R의 안정성을 보장받는 범위내에서 낮은 차수로 근사화시켜 사용할 수 있다.

일반적으로 PID 제어기의 전달함수는 다음과 같은 형태를 취한다[7].

$$C_1(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i S} + \frac{T_d S}{1 + \frac{T_d}{N} S} \right) \quad (9)$$

여기서 K_p 는 비례이득, T_i 는 적분 상수, T_d 는 미분 상수이다. 위 식은 고전적인 PID 제어기 형태인 $C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i S} + T_d S \right)$

에 $1 + \left(\frac{T_d}{N} \right) S$ 항을 추가하여 미분항에 필터링 효과를 주었으며, 제어기 C_1 을 rational function 형태로 만들었다. Tuning으로 얻은 식(8)의 계수값을 식(9)에 대입하여 제어기 C_1 을 구할 수 있다. 이 경우 $\|P_1 C_1\|$ 는 13.42276으로 k 는 최소 14로 매우 큰 값이므로 앞서 기술하였듯이 제어기 R의 안정성을 보장받는 범위에서 $k=3$ 으로 근사시켜 계산한다. 그러나 이렇게 설계된 제어기 C_1 은 플랜트를 안정화시키지만, 제어기 자체는 원점에 극점이 있는 불안정한 제어기이다. 그러므로 여기에 뒤짐 보상(lag compensation)이라 불리는 비례-적분과 유사한 보상방법을 사용하여 안정한 제어기 C_1 을 설계한다[7].

보통 PI 제어기의 전달함수는 $C(s) = \frac{K}{S} \left(S + \frac{1}{T_i} \right)$ 이다. 그런데 뒤짐보상을 사용한 경우

$$C(s) = K \left(\frac{TS + 1}{\alpha TS + 1} \right) \quad (10)$$

여기서 $\alpha > 1$ 이고, 이 때문에 극점이 영점보다도 더 낮은 절점주파수(breakpoint frequency)를 갖는다.

이러한 PID 제어기 C_1 의 전달함수는 다음과 같다.

$$C_1(s) = \frac{K_p \left[\left(\frac{T_i T_d}{N} + \alpha T_i T_d \right) S^2 + \left(T_i + T_d + \frac{T_d}{N} \right) S + 1 \right]}{\alpha \frac{T_i T_d}{N} S^2 + \left(\alpha T_i + \frac{T_d}{N} \right) S + 1} \quad (11)$$

$\|P_1 C_1\|$ 는 1이므로 $k=3$ 으로 설정하고 식(5)를 전개하면 안정한 제어기 R과 C_2 를 설계할 수 있다.

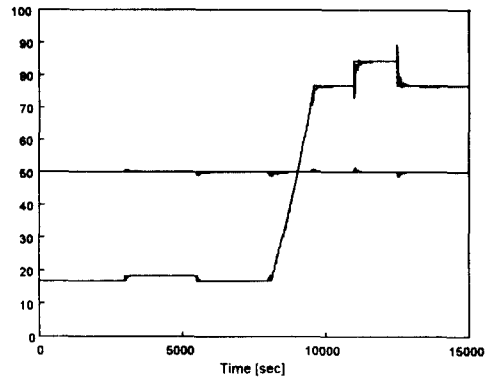
위의 방법으로 설계한 C_1 , C_2 , C_1+C_2 를 증기발생기 플랜트에 적용한다. 모의실험을 통해 설계한 C_1 , C_2 제어기 각각이 플랜트를 안정화시키며, C_1+C_2 제어기도 플랜트를 안정화시키는지를 확인하였다. 또한 설계한 제어기가 시스템을 신뢰성 있게 안정화시킬을 증명하기 위해, 출력의 5% 구간, 램프 변화구간, 20% 구간에서 $C_1=0$, 즉 C_1 제어기를 끊어 이 경우에도 C_2 제어기만으로 시스템을 안정화시킬 수 있음을 확인하였다. 모의실험에서 사용한 증기발생기 출력 시나리오는 5%에서 20%의 저출력 구간을 사용하였고, 5% 및 20% 구간에서 증기량이 정상상태 증기량의 10%만큼 계단변화하도록 하였다.

모의실험 결과 설계된 C_1 , C_2 , C_1+C_2 제어기 모두 플랜트를 안정화시켰다. 또한 모(母) 제어기인 C_1 제어기를 제어량의 변화가 가장 큰 시각에 제어기의 출력을 끊어 모의실험을 해 본 결과, 고장의 발생에도 불구하고 설계된 제어기 C_2 만으로도 시스템을 신뢰성 있게 안정화시킬을 확인하였다. 다음은 C_1+C_2 제어기에 대한 모의실험 결과이다. C_1+C_2 제어기는 시스템을 안정화시키며, 20% 출력 구간에서 C_1 제어기에 고장이 발생했을 경우(11200초에서 $C_1=0$)에도 시스템은 신뢰적으로 안정화됨을 알 수 있다. 그림 3은 모의실험 결과이다.

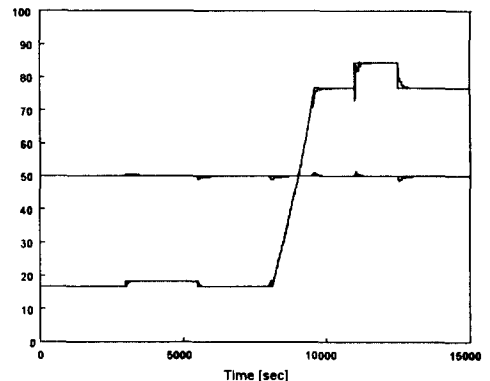
모의실험 결과 수동 중복 구조의 PID 제어기 C_1 , C_2 가 존재하며[17], 그 중 하나의 제어기는 그 제어기가 안정하기만 하다면 임의적으로 선택할 수 있음이 증명되었다.

3.2 증기발생기에의 적용 - GPC 제어기

수동 중복 구조의 GPC 다중 안정화 제어기를 설계하기 위해서는 일반형 제어기를 전달함수 형태로 변환해야 한다. 입력레환



a) C_1+C_2 제어기로 수위제어를 한 경우



b) 출력 20% 구간에서 C_1 제어기의 출력을 끊은 경우

그림 3. PID 제어기 모의실험 결과.

Fig. 3. PID Controller Simulation Results.

구조를 갖는 예측 제어기에 설계과정을 적용[18]하여 식(12)를 얻고 이를 이용해 일반형 예측 제어기를 전달함수의 형태로 변환하였다.

$$\begin{aligned} u_1(t) = & \left[1 - \sum_{j=1}^N \left(h_j \sum_{i=j}^N g_{i-j} \cdot g_{p,i,1} \right) \right] u_1(t-1) \\ & - \sum_{j=1}^N \left[h_j \sum_{i=j}^N g_{i-j} (g_{p,i,2} - g_{p,i,1}) \right] u_1(t-2) \\ & - \dots - \sum_{j=1}^N \left[h_j \sum_{i=j}^N g_{i-j} (g_{p,i,nb} - g_{p,i,nb-1}) \right] u_1(t-nb) \\ & + \sum_{j=1}^N \left[h_j \sum_{i=j}^N g_{i-j} g_{p,i,nb} \right] u_1(t-nb-1) \\ & + \sum_{j=1}^N \left[h_j \sum_{i=j}^N g_{i-j} \right] r(t) - \sum_{j=1}^N \left[h_j \sum_{i=j}^N (g_{i-j} F(z^{-1})) \right] y(t) \\ & - \left[\lambda_1 h_1 + \sum_{j=1}^N \left[h_j \sum_{i=j}^N g_{i-j} \cdot m_i \right] \right] u_2(t) \\ & - \left[\sum_{j=1}^N \left[h_j \sum_{i=j}^N g_{i-j} m_{p,i,1} \right] - \lambda_1 h_1 - \sum_{j=1}^N \left[h_j \sum_{i=j}^N g_{i-j} \cdot m_i \right] \right] u_2(t-1) \\ & - \sum_{j=1}^N h_j \left[\sum_{i=j}^N g_{i-j} \cdot (m_{p,i,2} - m_{p,i,1}) \right] u_2(t-2) - \dots \\ & - \sum_{j=1}^N h_j \left[\sum_{i=j}^N g_{i-j} \cdot (m_{p,i,nc} - m_{p,i,nc-1}) \right] u_2(t-nc) \\ & + \sum_{j=1}^N h_j \left[\sum_{i=j}^N g_{i-j} m_{p,i,nc} \right] u_2(t-nc-1) \end{aligned} \quad (12)$$

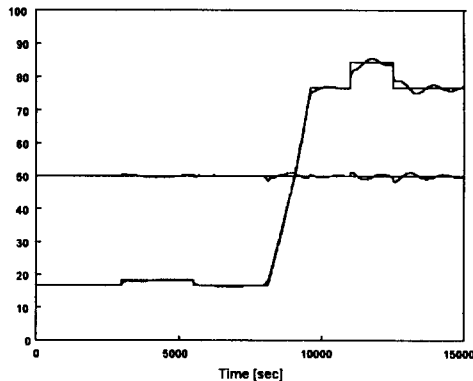
이 알고리즘에 의해 일반형 예측 제어기 C_1 을 설계하면 다음과 같다.

$$C_1 = \frac{0.1553S^5 - 0.0222S^4 - 0.0054S^3 + 3.32e^{-5}S^2 + 0.001S^1 + 7.64e^{-6}}{S^6 + 0.8S^4 + 0.24S^3 + 0.032e^{-3}S^2 + 0.0016S^1 - 1.62e^{-12}} \quad (13)$$

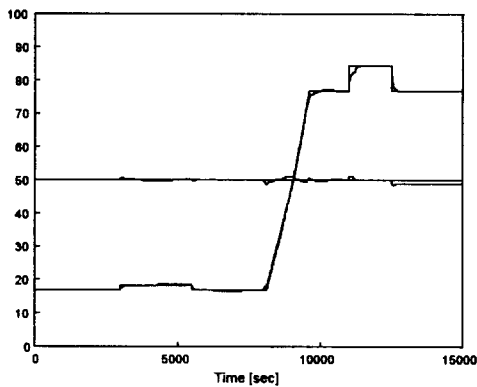
이미 제시된 신뢰성 안정화 제어기 설계 알고리즘에 따라 안정한 제어기 R을 구하여 C_2 제어기를 설계한다. 여기서 k 는 2였

다. 설계한 C_1 , C_2 , C_1+C_2 제어를 플랜트에 적용하여 모의실험하였다. 모의실험에서 사용한 시나리오는 PID 제어기와 같은 환경으로 증기발생기 출력 구간은 5%에서 20%의 저출력 구간이며, 5% 및 20% 구간에서 증기량이 정상상태 증기량의 10%만큼 계단변화하도록 하였다.

모의실험 결과 설계된 제어기가 플랜트를 안정화시키는지와 고장에 대해 안정한지 여부를 모의실험하였다. 다음은 모의실험 중 C_1+C_2 제어를 증기발생기 플랜트에 적용한 경우와 증기발생기 20% 출력 구간에서 C_1 제어 투우프에 관련된 고장이 검출되어 C_1 제어기의 출력을 끊은 경우에 대한 결과이다. 설계된 제어기는 플랜트를 신뢰적으로 안정화시킴을 알 수 있다.



a) C_1+C_2 제어기로 수위제어를 한 경우



b) 출력 20% 구간에서 C_1 제어기의 출력을 끊은 경우

그림 4. GPC 제어기 모의실험 결과.

Fig. 4. GPC Controller Simulation Results.

4. 결 론

저출력 운전 구간에서 증기발생기 수위제어 시스템에 적용 가능한 고장허용 제어 알고리즘을 설계하였다. 수동 중복 구조의 다중 안정화 제어기 구조를 사용하여 각 제어요소들의 고장 발생시에도 시스템을 신뢰성있게 안정화 시키도록 하였다. 특히 증기발생기 수위제어를 위해 기존에 제안 연구된 PID 제어기나 일 반형 예측 제어기(GPC)와 함께 연동하여 사용가능한 제어 알고리즘을 보였다. 설계된 제어기법은 857MWt급 Westinghouse 증기발생기 모델에 대한 모의실험을 통해 성능을 검증하였다.

참 고 문 헌

- [1] J. Ackermann, *Sampled-data control systems*. New York, Springer-Verlag, 1985.
- [2] K. J. Åström, T. Hagglund, *Automatic tuning of PID controller*. ISA, 1988.
- [3] Y. J. Cho, Z. Bien, and B. K. Kim, "Reliable control via additive redundant adaptive control," in *Proc. 1989 Amer. Contr. Conf.*, Pittsburgh, PA., pp. 1899-1904, 1989.
- [4] D. W. Clarke, C. Mohtadi and P. S. Tuffs, "Generalized predictive control-part II. Extensiona and interpretations," *Automatica*, vol. 23, pp. 149-160, 1987.
- [5] R. A. Date and J. H. Chow, "A reliable coordinated decentralized control system design," in *Proc. 28th Conf. Decision Contr.*, Tampa, FL, pp. 1295-1300, Dec. 1989.
- [6] S. M. Joski, "Failure-accommodating control of large flexible spacecraft," in *Proc. 1986 Amer. Contr. Conf.*, Seattle, WA, pp. 159-161, 1986.
- [7] I. D. Landau, *System identification and control design*. Prentice Hall International, Inc., 1990.
- [8] M. Mariton, and P. Bertrand, "Improved multiplex control systems: dynamic reliability and stochastic optimality," *Int. J. Contr.*, vol. 44, pp. 219-234, 1986.
- [9] J. V. Medanić, "Design of reliable controllers using redundant control elements," in *Proc. 1993 Amer. Contr. Conf.*, vol. 3, pp. 3130-3134, June 2-4, 1993.
- [10] R. Saeks and J. Murray, "Fractional representations, algebraic geometry and the simultaneous stabilization problem," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. AC-27, pp. 895-903, Aug. 1982.
- [11] D. D. Siljak, "Reliable control using multiple control systems," *Int. J. Contr.*, vol. 31, no. 2, pp. 303-329, 1980.
- [12] D. D. Siljak, "Dynamic reliability using multiple control systems," *Int. J. Control*, 31, 303, 1980.
- [13] R. J. Veillette, J. V. Medanić and W. R. Perkives, "Design of reliable control systems," *IEEE Trans. Automat. Control*, vol. 37, pp. 290-304, March 1992.
- [14] M. Vidyasagar and N. Viswanadham, "Algebraic design techniques for reiable stabilization," *IEEE-Trans. Automat. Contr.*, vol. 27, pp. 1085-1095, 1982.
- [15] M. Vidyasagar, *Control system synthesis: A factorization approach*. The MIT Press, 1985.
- [16] M. Vidyasagar and N. Viswanadham, "Reliable stabilization using a multi-controller configuration," *Automatica*, vol. 21, No. 5, pp. 599-602, 1985.
- [17] D. C. Youla, J. J. Bongiorno. Jr. and C. N. Lu, "Single loop feedback stabilization of linear multivariable plants," *Automatica*, 10, 159, 1974.
- [18] 윤강섭, 황하성, 이만형, 배종일, "GPC기법을 이용한 자기동조 PID제어," *95 한국자동제어학술회의*, pp. 898-901, 1995.