

가변시간비중을 갖는 내고장성 제어

(Fault Tolerant Control with Variable Time Weight)

李 喜 圭*, 卞 增 男*

(Hee Gyoo Lee and Zeungnam Bien)

要 約

내고장성을 갖는 고 신뢰도의 제어 시스템을 필요로 하는 산업 공정에서 제어기의 고장시에도 추적 성능을 유지할 수 있는 중복제어 시스템을 제안한다. 제안된 제어시스템은 두개의 제어기와 제어기의 고장을 진단하는 고장 감지 및 제어시스템을 재구성하는 알고리즘을 갖는 스위칭 부분으로 구성되어 있다. 퍼지논리를 사용한 제어기의 고장감지 방법은 제어기의 고장시에 나타나는 불안정성을 통하여 고장을 감지함으로써 고장에 대한 수학적 가정을 필요로 하지 않는다. 고장난 제어기는 제어기의 시간 비중을 감소함으로써 제어루프에서 점진적으로 제거된다.

Abstract

A redundant control scheme which can maintain its tracking capability in the case of a controller failure is proposed for the industrial applications which need high reliability with fault-tolerance. It consists of two identical controllers and a switching mechanism which includes failure detection and reconfiguration algorithm. The new detection method against controller failure using fuzzy logic enables the detection of controller failures without failure assumptions through the instability of the failed controller. The failed controller is smoothly removed from the control loop by reducing time weight of the failed controller.

I. 서 론

자동화된 제어 시스템은 인간의 노동을 줄일 수 있고, 제품의 생산성의 향상 및 품질의 고급화를 가능하게할 수 있는 장점을 갖고 있으나 구조가 매우 복잡하고 대규모화 되었다. 이에 따라, 제어 시스템을 설계하는데 있어서 제어 시스템의 신뢰성은 중요한 문제가 되고 있다!¹⁻⁴

고 신뢰도를 위하여 제어 시스템에 첨가되는 여유

분은 감지기 (sensor), 구동기 (actuator), 그리고 제어 기능의 각 구성요소에 첨가할 수 있다. 그 중 제어기는 시스템의 동작 특성에 가장 큰 영향을 주며 다른 구성요소에 비해 그 구조가 복잡하여 상대적으로 단위 모듈의 신뢰도가 낮으므로 제어기 부분을 중복 구조로 구성하는 것은 전체 시스템의 신뢰도 향상의 측면에서 매우 효과적이다. 다중 제어기 시스템은 중복구조의 구성방식 및 고장을 감지하는 방법에 따라 능동 중복 (active redundancy) 구조와 수동중복 (passive redundancy) 구조로 나뉘어 진다!⁴

능동 중복구조는 보통 백업 (back-up) 제어기를 이용하여 주 제어기의 고장이 탐지되었을 때 백업 제어기로 교체되어 정상적인 동작을 계속 하도록 하는

*正會員, 韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., KAIST)

接受日字: 1992年 1月 11日

시스템으로 고장 감지방법이 이 구조의 핵심이 된다.⁵⁻⁶ 대부분의 고장 진단방법은 고장에 대한 모델을 통하여 고장을 감지하기 때문에 고장에 대한 패턴이 미리 정의되며 모델이 정확하다는 가정을 필요로 한다. 또한, 탐지 대상 모듈을 정상 상태와 고장 상태의 두가지로만 구분함으로써 오감지 가능성과 미감지 가능성을 최소화하는 최적의 임계치(threshold)의 설정이 매우 어렵다. Merill등은⁷⁾ 고장을 soft failure와 hard failure로 나누어 고장 대응 방법을 달리하는 방법을 제안하기도 하였으나 정확한 고장 탐지 능력을 갖기 위해서는 고장 감지부의 구조가 복잡하게 되어 전체 시스템의 신뢰도를 저하시키는 원인이 될 수 있으므로, 제어시스템의 신뢰도와 고장감지부의 성능사이의 절충(trade-off)이 필요하다.

수동 중복 구조는 플랜트의 입력단에서 다중 제어기의 출력을 가산기(adder)를 사용하여 더해주는 구조로서 Siljak,⁸⁾ Vidyasagar와 Viswanadham,⁹⁾ 그리고 Cho와 Bien¹⁰⁾등에 의하여 연구되었다. 이 방법은 두개의 제어기가 주어진 플랜트를 협동하여 제어하며, 그 중 한 제어기에서 고장이 일어나더라도 다른 제어기에 의해 원하는 제어 성능을 계속 유지하도록 하는 구조이다. 이 방식에서는 제어기를 설계할 때 미리 고장을 정의하므로 고장의 특성을 변경하거나 새로 추가하기가 곤란하고 잘못하면 전체 제어 시스템의 안정도가 나빠질 염려가 있다. 또한, 고장난 제어기를 제어 루프에서 제거하는 기능이 없기 때문에 고장난 제어기의 출력이 제어시스템의 안정도에 영향을 주게되어 고장난 제어기의 출력은 영(zero)이거나 일정(constant)하다는 가정을 필요로 한다. 그러나, 실제의 경우에서 모든 고장이 항상 이 가정을 만족하기는 어려우며 고장난 제어기의 출력이 최대 출력치로 포화(saturation)되어 나타나는 경우에는 중복 제어기에서 이를 상쇄하는 것이 불가능해진다.

고장에 대한 수학적인 모델을 구하는 대신 제어기의 제어 성능을 측정하여 고장을 표현할 수 있다. 이 방법은 전문가가 자동차의 엔진소리의 변화로부터 엔진의 고장을 알아내는 것과 비슷한 방법으로 제어 성능에서 추출한 고장의 특성(feature)은 고장을 정확하게 표현할 수는 없으나 고장의 가능성을 예측할 수는 있다. 일반적으로 제어기는 주어진 설정치를 추적하도록 설계되므로 제어기의 고장을 제어기가 그 구성 소자의 고장 또는 오동작등의 원인으로 인하여 정상상태의 출력값을 내지 못하는 것으로 정의하면 고장난 제어기의 설정치 추적능력은 정상일 때 보다 현저히 나빠지므로 제어 시스템의 설정치 추정

성능을 평가함으로써 제어기의 고장을 간접적으로 감지할 수 있다. 이때, 플랜트에서는 동시에 고장이 일어나지 않는다고 가정한다. 이 방법에서는 고장에 대한 패턴을 보다 광범위하게 포함할 수 있으며 제어기의 정확한 모델을 필요치 않는 장점이 있다. 이러한 제어 성능의 평가는 적응제어 등에서 다양한 형태로 이용되고 있으며, Gertler¹¹⁾는 신호의 경향(trend)을 통하여 신호의 불안정성을 파악하고자 하였고 Procyk과 Mamdani¹²⁾는 제어기의 성능을 평가하여 퍼지제어기의 제어규칙을 개선하는 방법을 제안하였다.

이러한 접근 방법은 수학적인 방식보다는 퍼지 논리를 통하여 표현하기에 편리하다. 본 논문에서는 전문한 두가지 중복 구조에 대한 제약조건을 효과적으로 개선할 수 있는 한 방법으로, 두 개의 제어기와 고장 감지부를 포함하는 스위칭 시스템으로 구성되는 중복 제어구조에서 퍼지 논리를 사용하여 고장을 표현하고 이를 이용하여 제어기의 고장을 감지하고 고장난 제어기를 제거하는 방법을 제안한다. 제안된 중복제어시스템은 기존의 방법과는 달리 두 제어기가 교대로 플랜트를 제어하며 제어기의 상태를 정상 상태와 고장상태 사이의 연속적인 값으로 파악하여 오감지나 미감지의 경우를 줄이면서 효과적으로 고장을 진단할 수 있다. 이 결과에 따라 두 제어기의 시간 비중을 가변함으로써 고장난 제어기를 제어 루프에서 제거한다. 이 방법은 제어기의 고장을 판별하는 임계치(threshold)의 설정 및 고장에 대한 수학적 모델이 필요하지 않으며, 간단한 진단방법을 사용하면서도 전체 시스템의 내고장 성능을 높일 수 있다.

II. 내고장성 제어 시스템

1. 내고장성 제어 구조

어떤 플랜트에 대해 그 출력이 설정치 입력을 추적하도록 설계된 폐환 제어기가 주어져 있다고 하자. 주어진 단일 제어기 시스템의 신뢰도를 향상시키고 제어기에서 고장이 발생하더라도 전체 제어 시스템의 동작성능을 유지하기 위한 한 방법으로 그림 1과 같이 두개의 같은 제어기가 스위칭 회로를 통하여 플랜트에 연결된 중복제어 구조를 갖는 다중 제어 시스템을 제안한다.

중복 제어구조를 위하여 부가되는 스위칭 회로는 고장 감지 및 제어기의 재구성(reconfiguration)의 기능을 갖고 있으며 두 제어기는 같은 제어기라고 가정한다. 제어기의 성능평가를 통하여 제어기의 고

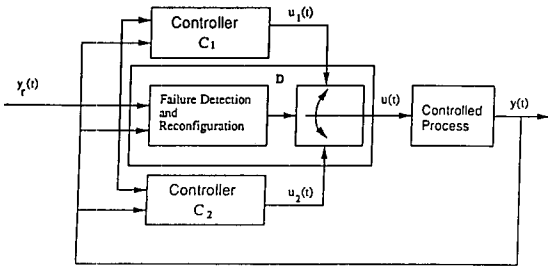


그림 1. 내고장성 중복 제어기의 구조
Fig. 1. Structure of the fault tolerant control system.

장을 감지하기 위하여 기존의 일반적인 방법과는 달리 두 제어기는 일정한 주기를 갖는 스위칭 회로에 의해 교대로 플랜트에 연결되어 플랜트를 제어한다. 즉, 각 스위칭 주기 kT 마다, 제어기 C_1 은 $[kT, kT+T_s(k)]$ 의 시간동안 플랜트를 제어하고, 나머지 시간 $(kT+T_s(k), (k+1)T]$ 동안에는 제어기 C_2 가 플랜트를 제어한 후에 다시 제어기 C_1 로 제어가 옮겨지며 이 과정을 계속 반복한다.

k 번째 스위칭 시간에서 두 제어기의 전체 제어 입력은 다음과 같이 표시된다.

$$u(t) = \begin{cases} u_1(t), & kT \leq t \leq kT + T_s(k) \\ u_2(t), & kT + T_s(k) \leq t \leq (k+1)T \end{cases} \quad (1)$$

단, $0 \leq T_s(k) \leq T$, $T_s(1) = \frac{T}{2}$ 이다.

여기에서 시간 T 는 두 제어기가 플랜트를 각각 한번씩 제어하는 시간 주기이고, 두 제어기 C_1 과 C_2 사이의 시간 비중을 나타내는 $T_s(k)$ 는 매 주기마다 결정된다. 시간 비중 $T_s(k)$ 은 처음에는 같은 값이나 그 중 한 제어기가 고장나면, 고장난 제어기의 시간 비중은 점차 감소하여 결과적으로는 제어 루프에서 제거된다. 고장난 제어기가 제거된 나머지 제어루프는 정상적으로 제어를 수행하는 제어기에 의해 계속 제어 목적을 수행할 수 있다.

두개의 제어기 C_1 과 C_2 는 같으므로, 두 제어기가 모두 정상동작할 때의 전체 제어 입력 $u(t)$ 는 스위치가 완전하다는 가정하에 단일 제어기 시스템의 경우와 같다. 따라서, 전체 제어 루프 제어 시스템도 시간 비중 값 T_s 의 크기에 관계없이 안정하고 설정치 추적성능을 갖는다는 것을 알 수 있다.

제안된 중복 제어 구조는 능동 중복 제어구조와 수동 중복 제어구조의 특성을 동시에 포함하고 있다. 즉, 스위칭의 동작에 의해 고장난 제어기를 제어 루프에서 제거하는 동작은 능동 중복 제어구조의 특성

과 비슷하고, 두개의 제어기가 함께 플랜트를 제어하는 것은 수동 중복제어 구조와 비슷하다. 그러나, 제어기의 고장이 감지되었을 때, 능동 중복의 경우처럼 주 제어기를 한번에 제거하지 않고 시간 비중을 줄임으로써 제거하므로 일시적인 고장 또는 외란에 의해 제어기의 여유분을 잃어 버리지 않고 계속 유지함으로써 전체 시스템의 운전시간을 높일 수 있다. 또한, 고장난 제어기의 출력이 포화되더라도 수동 중복 제어구조와는 달리 계속 제어 목적을 수행할 수 있다.

2. 제어 시스템의 신뢰도

제어기의 내고장성 능력은 신뢰도(reliability)와 평균 수명시간(mean time to failure)등의 척도로 나타낼 수 있다. 이 중 기본이 되는 신뢰도(reliability)는 주어진 시간 $[t_0, t]$ 에서 시스템이 요구되는 기능을 만족하면서 동작하는 조건확률(conditional probability)로 정의된다²⁾

그림1의 중복 제어기를 갖는 제어 시스템은 두 개의 제어기 C_1, C_2 와 두 제어기를 중복구조로 하기 위하여 부가되는 고장 감지 및 재구성을 담당하는 부 시스템 D 의 연결로 생각할 수 있다. 신뢰도 함수를 유도하기 위하여 다음과 같은 가정을 한다.

- (1) 각 부 시스템의 고장율은 일정한 값을 갖는다.
- (2) 각 부 시스템의 고장은 독립적으로 발생한다.
- (3) 각 부 시스템은 고장여부에 따라 작용모드(functioning mode) 또는 고장모드(failed mode)의 두가지 상태만 갖는다.

각 부 시스템에 대하여 작용모드는 C_1, C_2 , 그리고 D 로, 그리고 고장모드는 \bar{C}_1, \bar{C}_2 , 그리고 \bar{D} 로 표시할 수 있다. 가정 (3)에서 각 부 시스템은 두가지의 상태로만 존재할 수 있다고 하였으므로 전체 제어 시스템이 취할 수 있는 상태의 수는 8가지이나, 두 제어기는 같으므로 전체 제어 시스템이 가질 수 있는 상태는 다음의 4가지로 표현할 수 있다.

- S1: 모든 부 시스템이 정상적으로 동작하는 상태
- S2: 두 제어기중의 한 제어기가 고장난 상태
- S3: 고장 감지 및 재구성을 담당하는 부 시스템이 고장난 상태
- S4: 모든 부 시스템이 고장난 상태

각 부 시스템의 고장율을 제어기는 λ_c , 고장감지 부 시스템은 λ_D 로 놓으면 그림1의 중복제어 시스템의 상태도는 그림2와 같이 표현된다. 각 부 시스템의 합성모드 중 동작모드는 $C_1C_2D, \bar{C}_1C_2D, C_1\bar{C}_2D$, 및 $C_1C_2\bar{D}$ 이므로 S1, S2 및 S3의 상태에서 제어 시스템은 제어동작을 할 수 있다.

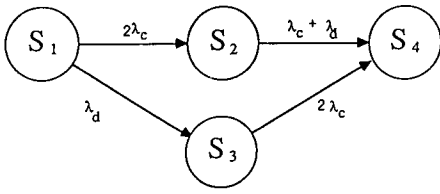


그림 2. 중복 제어시스템의 상태도
Fig. 2. State diagram of the redundant control system.

제어 시스템이 동작하는 모드는 S1, S2, 와 S3의 상태에 있을 때이므로 이 모델에서 제어 시스템의 신뢰도함수를 구하면 다음과 같다.

$$R(t) = e^{-2\lambda_c t} + 2e^{-\lambda_c + \lambda_d} t - 2e^{-(2\lambda_c + \lambda_d)t} \quad (2)$$

신뢰도 함수를 시간에 대해 적분하면 평균수명시간(mean time to failure:MTTF)을 구할 수 있다. 평균 수명 시간은 시스템에서 고장의 처음 발생하기까지의 평균 시간으로 다음과 같이 구해진다.

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \frac{1}{2\lambda_c} + \frac{2}{\lambda_c + \lambda_d} - \frac{2}{2\lambda_c + \lambda_d} \quad (3)$$

만일 고장 감지부의 고장율이 $\lambda_d=0$ 이라면 제어 시스템의 신뢰도는

$$R(t) = 2e^{-\lambda_c t} - e^{-2\lambda_c t} \quad (4)$$

과 같이 간단히 표현된다. 이 경우는 중복 제어구조를 만들기 위하여 부가되는 부시스템에 의한 신뢰도의 저하 영향을 무시한 경우로서 이상적인 경우이다. 이 경우의 평균수명은 $MTTF = \frac{3}{2\lambda_c}$ 이 되며, 단일 제어기 시스템에 비하여 50%의 신뢰도 개선이 효과가 있음을 알 수 있다.

또한, 각 부 시스템의 고장율이 모두 같은 경우에는, 즉, $\lambda_c = \lambda_d = \lambda$ 인 경우, 전체 시스템의 신뢰도는 다음과 같이 표시되며 삼중구조를 갖는 TMR(triple module redundancy)의 신뢰도 함수와 같은 형태가 된다.

$$R(t) = 3e^{-2\lambda t} - 2e^{-3\lambda t} \quad (5)$$

위의 신뢰도 함수에서 시스템의 평균수명시간(mean time to failure)을 계산하면, $MTTF = \frac{5}{6\lambda}$ 으로 단일 제어기의 경우보다 평균수명시간이 작으나 중복 제어 시스템은 높은 신뢰도를 보장하면서 동작하는 경우가 대부분이므로 고 신뢰도를 보장하는 운전시

간(mission time)의 관점에서 보면 단일 제어기 시스템 보다 신뢰도의 개선이 이루어 진다. 신뢰도의 측면에서 보면, 중복제어 구조를 위해 부가되는 고장감지 부 시스템은 마치 또하나의 제어기처럼 작용하여 두 제어기의 시간 비중을 조절하는 것이 TMR 시스템에서의 Voting과 유사한 작용을 한다.

제안된 중복 제어 구조에서는 중복제어구조를 위한 별도의 제어기를 설계할 필요가 없고 부가되는 고장감지부는 간단한 구조로 구성될 수 있으므로 제어 시스템의 신뢰도 개선효과는 다른 중복 제어 시스템에 비하여 쉽게 구현될 수 있다.

III. 고장진단 및 재구성 방법

1. 제어성능평가에 의한 제어기의 고장감지

일반적인 제어 알고리즘에서는, 설정치와의 오차가 발생하면 제어 입력은 이 오차를 줄이도록 플랜트에 가해진다. 오차가 크면, 그만큼 오차를 줄이기 위한 제어 입력의 값도 커지게 된다. 고장난 제어기는 주어진 설정치를 추적하는 능력을 상실하게 되므로 고장난 제어기가 제어를 하는 구간에서는 설정치 추적 오차가 줄어들지 않고 더 커지게 된다. 따라서, 플랜트의 응답을 관찰하여 오차가 증가하게 되면 제어기가 고장이라고 추측할 수 있다. 이에 비하여 오차가 감소하는 방향으로 진행하면 제어가 잘되고 있다고 생각할 수 있다. 그러나, 이 정보만으로는 제어기가 고장인지를 정확히 판단하기에는 부족하므로 다른 제어기의 응답과 비교하여 제어기의 고장을 판단하고자 한다.

퍼지 논리를 이용하여 제어기의 고장을 감지하기 위하여, 주어진 설정치와 플랜트의 출력값의 오차와 오차의 변화율을 입력 변수로 정한다. 오차와 오차의 변화율은 퍼지 연산을 위하여 퍼지화 된다. 고장의 정도를 표시하는 퍼지 변수 FM은 퍼지 추론을 통하여 구하여 진다. 입력력 공간의 소속 함수는 그림3과 같이 PB(positive big), PS(positive small), ZE(zero), NS(negative small), NB(negative big)의 5개로 나타내었다.

퍼지 알고리즘은 IF와 THEN으로 구성되는 조건문이 일반적으로 사용된다. 고장에 대한 언어적 표현을 다음과 같이 퍼지 추론 규칙으로 나타낼 수 있다.

IF E=PB and CE=PB THEN FM=PB
ELSE

IF E=PB and CE=NB THEN FM=NB

퍼지 제어기에서는 제어규칙은 대부분 전문가의

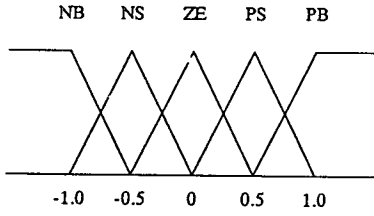


그림 3. 퍼지 변수
Fig. 3. Fuzzy variables.

지식으로 부터 유추되어 만들어 진다. 한편, 전문가의 지식을 이용하여 규칙을 구성할 경우 모든 경우에 대하여 규칙을 유추해 내기는 힘들므로 정성적인 표현은 전문가의 지식을 이용하고 규칙에서의 정성적인 부분은 제어기의 동작모델을 통하여 정하기로 한다.

제어 시스템의 k번째 스위칭 구간에서 시간 T 동안의 제어기의 제어 성능을 평가하는 성능지수 함수를 생각해 보자.

$$J(k) = \frac{1}{T} \int_{k-T}^{kT} e^2(\tau) d\tau \quad (6)$$

윗 식에서 $e(t) = y_r(t) - y(t)$ 는 출력오차이다.

위 식의 성능지수 함수는 시간 T 동안의 오차의 제곱의 평균치로 해석되며, 이는 어느 한 측정치에서의 신호의 변화로 고장을 진단하는 경우에는 고장을 잘못 판단할 수 있으므로 시간 T 동안의 응답을 통하여 고장의 영향을 진단하는 것이 더 효과적이라 할 수 있다. 제어기는 주어진 설정치를 추적하도록 설계되므로 제어기는 위의 성능지수를 가급적 작게 하도록 플랜트를 제어하게 된다. 따라서, 제어 시스템이 정상적으로 동작하는 동안에는 시간이 지남에 따라 $J(k) \rightarrow 0$ 이 됨을 알 수 있다. 즉, 시스템에 고장이 없는 경우에는 성능지수의 미분치 $J(k) < 0$ 이 되어야 한다. 위의 성능지수함수를 시간에 대하여 미분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} J(k) &= \frac{1}{T} (e^2(kT) - e^2((k-1)T)) \\ &= 2 \frac{e(kT) + e((k-1)T)}{2} \cdot \frac{e(kT) - e((k-1)T)}{T} \end{aligned} \quad (7)$$

$t_k = kT$ 에서, 시간 T 동안의 제어시스템의 오차와 오차의 변화율이 평균값을 각각 다음과 같이 표시하면,

$$\begin{aligned} \overline{e(t_k)} &\approx \frac{e(kT) + e((k-1)T)}{2} \\ \overline{ce(t_k)} &\approx \frac{e(kT) - e((k-1)T)}{T} \end{aligned} \quad (8)$$

위의 성능지수의 변화율 $\dot{J}(kT)$ 는

$$\dot{J}(k) \approx 2\overline{e(t_k)} \cdot \overline{ce(t_k)} \quad (9)$$

으로 되어 시간 T에서의 오차와 오차의 평균치의 곱으로 표현 가능하다. 위의 성능지수의 크기를 작게하기 위하여 오차는 될 수 있는대로 빨리 영으로 수렴하여야 하며 이 수렴속도는 $\overline{e(t_k)} \overline{ce(t_k)}$ 를 측정함으로써 알 수 있다.

이 관계에서 식(10)과 같이 고장의 정도를 표시할 수 있다.

$$fm(t_k) = \overline{e(t_k) ce(t_k)} \quad (10)$$

즉, $fm < 0$ 이면 제어기는 오차를 줄이기 위하여 동작하고 있다고 볼 수 있다. $fm > 0$ 이면 제어가 잘 되지 않는 것이므로, 이때 다른 제어기가 $fm < 0$ 이면 이 제어기에 고장 가능성이 있다고 볼 수 있다. 또한, fm 의 값의 크기는 오차의 수렴 또는 이탈 속도의 크기를 의미하므로 이 값의 크기에 따라 고장의 정도를 추측할 수 있다. 그림4는 오차와 오차의 변화율에 대한 fm 과의 관계를 표시한 것이다.

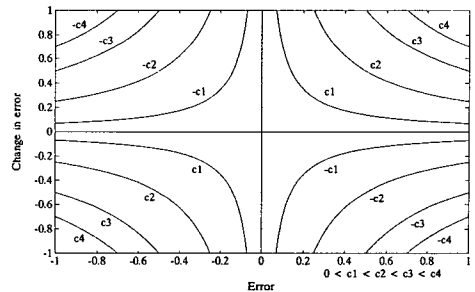


그림 4. 오차와 오차의 변화에 대한 fm과의 관계
Fig. 4. fm from relation between error and change of error.

이를 이용하여 운전자의 경험에 의한 지식과 오차의 수렴성의 관계에서 제어 성능 평가를 통한 제어기의 고장 감지 규칙을 유도할 수 있으며, 구성된 제어기의 고장을 감지하기 위한 퍼지룰을 표1에 나타내었다.

표1의 퍼지규칙은 제어 시스템의 오차와 오차의 변화율을 통하여 고장을 표시하는 퍼지변수 FM을 결정한다. 각 제어기에 대한 퍼지 추론의 결과는 각 제어기의 고장 가능성을 나타내며 두 제어기의 고장 가능성을 비교함으로써 고장난 제어기를 판별할 수 있다. 고장을 감지하는 퍼지 추론기의 룰은 퍼지 제

표 1. 고장감지를 위한 퍼지 추론규칙
Table 1. Fuzzy rule for failure detection.

		CE				
		NB	NS	ZE	PS	PB
E	NB	PB	PB	PS	NB	NB
	NS	PB	PS	ZE	NS	NB
	ZE	PS	ZE	ZE	ZE	PS
	PS	NB	NS	ZE	PS	PB
	PB	NB	NB	PS	PB	PB

어기의 경우와 그 동작원리가 같으며, 퍼지제어기의 제어 규칙을 자동으로 동조하는 퍼지자동 동조제어기 (self organizing fuzzy logic controller)에서 제어 법칙을 개정하기 위하여 제어기의 제어 성능을 평가하는 평가규칙과 비슷하다.^[12]

2. 시간비중의 결정

고장감지부에서 고장을 감지한 후, 두 제어기의 시간 비중을 결정한다. 전술한 바와 같이 제어기의 추적오차만으로 제어기의 고장을 정확히 판단하기는 어려우므로 고장난 제어기를 제어루프에서 한번에 제거하는 것보다 시간 비중을 점차 줄이는 방법이 오감지를 줄일 수 있고 더욱 효과적이다.

퍼지 추론을 사용하여 두 제어기의 시간 비중을 결정하는 방법은 다음과 같다. 두 제어기가 모두 제어 목적을 잘 수행하는 경우에는 두 제어기 모두 작은 고장정도 값을 나타낸다. 그러나, 한 제어기가 고장나면, 고장난 제어기의 고장 정도값은 크게 나타나고 정상인 제어기의 고장정도 값은 작게 나타난다. 따라서, 두 제어기의 고장정도 값을 비교하여 차이가 발생하면 고장정도 값이 크게 나타난 제어기가 고장이라고 판단할 수 있다. 또한, 두 제어기에 대한 고장정도 값의 차이가 크면 고장난 제어기의 고장정도가 크다고 할 수 있다. 따라서, 고장난 제어기의 다음 제어 순서에서의 시간 비중은 고장의 정도에 따라 줄임으로써 고장난 제어기의 영향을 줄이고, 고장이 지속적으로 감지되면 고장난 제어기를 제어 루프에서 점진적으로 제거한다. 각 제어기의 고장정도값은 과도응답 특성에서도 나타날 수 있다. 그러나, 이 경우에는 두 제어기 모두 과도현상을 겪게 되므로 두 제어기의 고장정도 값이 비슷하게 나타나게 되며 시간 비중의 변화는 나타나지 않는다. 또한, 시간 비중 T_s 의 변화 감도를 조정함으로써 외란등에 의한 오감지로 인한 제어기의 손실을 줄일 수 있다.

시간 비중을 결정하는 퍼지 규칙의 예는 다음과 같이 표현된다.

IF $FM_1 = PB$ and $FM_2 = NB$ THEN C_1 fails
and $\Delta T = NB$
ELSE
IF $FM_1 = NB$ and $FM_2 = PB$ THEN C_2 fails
and $\Delta T = PB$

두 제어기의 고장 가능성 FM_1 과 FM_2 에서 시간 비중을 결정하는 퍼지룰은 표2와 같으며 퍼지변수 ΔT 의 멤버십 함수는 그림3과 같다.

표 2. 시간 비중을 결정하는 퍼지 추론규칙
Table 2. Fuzzy rule for adjusting time weight.

		FM ₂				
		NB	NS	ZE	PS	PB
FM ₁	NB	ZE	NS	NS	NB	NB
	NS	PS	ZE	ZE	NS	NB
	ZE	PS	ZE	ZE	ZE	NS
	PS	PB	PS	ZE	ZE	NS
	PB	PB	PB	PS	PS	ZE

퍼지 추론을 한 뒤 비퍼지화를 하면 시간 비중의 변화 ΔT_s 가 결정되며 다음 제어 구간에서의 시간 비중은 식(11)과 같이 결정된다.

$$T_s(k+1) = T_s(k) + \frac{T}{2} \Delta T_s(k) \tag{11}$$

제어기의 고장이 감지되면, 고장난 제어기의 시간 비중은 고장의 정도에 따라 감소되고 마침내 제어 루프에서 완전히 제거된다. 남아있는 제어시스템은 다른 제어기에 의해 계속 제어능력을 유지할 수 있으며 고장난 제어기는 수리된 후에 다시 실장되어 처음의 상태와 같이 중복제어구조로 회복 가능하다.

IV. 시뮬레이션

본 장에서는 제어기의 고장에 대응하여 제안된 알고리즘을 수치 예제를 통하여 검토하고자 한다.

다음과 같은 전달함수를 갖는 플랜트를 생각해 보자.

$$H(s) = \frac{1}{s^2 + s + 1} \tag{12}$$

주어진 플랜트를 제어하는 설정치 추적 제어기 C_1 , 과 C_2 는 다음과 같이 일반적인 형태의 PID 제어기로 설정하였다.

$$C_{1,2}(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s) \tag{13}$$

시뮬레이션에 사용된 제어기의 이득값 K_p, T_i 및 T_D 는 모드 1로 하였으며 $N(0, 0.02)$ 인 노이즈(noise)를 인가하였다.

두 제어기가 제어를 하는 시간 구간 T 는 플랜트의 시정수에 관련되어 결정된다. 제어 성능을 통하여 제어기의 상태를 판단해야 하므로 시간 T 가 작으면 제어 성능을 정확히 파악하기 힘들고, 시간 T 가 크면 고장의 영향을 많이 받게된다. 시간 T 의 기준으로는 상승시간(rise time)을 선택하였으며 상승시간 t_r 은 다음의 관계에 의하여 결정될 수 있다.^[14]

$$t_r = \frac{0.8 + 2.5\zeta}{\omega_n} \quad (14)$$

시뮬레이션에 사용된 플랜트의 ζ 와 ω_n 는 각각 0.5와 1이며, 상승시간을 구해보면 약 2.5이다. 따라서, 제어기의 성능을 평가하기 위한 시간 T 는 $T=2$ 로 정하였다.

두개의 제어기는 처음에는 같은 시간 비중을 갖고 교대로 제어를 행한다. 기준 설정치는 1로 주어졌으며 제안된 중복제어 시스템의 내고장성을 실험하기 위하여 20초 뒤에 제어기 C_1 에서 고장이 발생하도록 하였다. 고장은 제어기의 출력이 영으로 된 경우와 제어기의 고장이 정상상태의 값에서 서서히 이탈하는 경우 그리고 외부의 외란등에 의하여 잠시동안 제어 입력이 변하는 경우에 대하여 각각 실험하였다. 또한, 고장이 일어난 뒤에도 설정치 추적 성능을 갖을 수 있음을 보이기 위하여 기준 설정치를 -1 로 변경하였다.

먼저, 제어 입력이 갑자기 영으로 되면 단일 제어기 시스템에서는 제어능력을 상실하고 플랜트의 출력은 그림5(a)에서와 같이 설정치에서 이탈한다. 제안된 중복 제어시스템의 경우에는 고장발생 후에 C_1 의 제어 구간에서는 설정치 추적 오차가 커지게 되나 C_2 의 제어 구간이 되어 정상동작을 하는 C_2 의 제어 입력이 가해지면 플랜트는 다시 설정치로 복귀한다. 이 두 구간의 응답에 의해 표1에서 주어진 퍼지룰에 의해 각 제어기의 고장수치를 구하면 그림 5 (c)와 같이 고장난 제어기의 값은 크고 고장나지 않은 제어기의 값은 작게 나타나 제어기 C_1 의 시간 비중이 감소하게 된다. 이 과정을 반복하여 고장난 제어기 C_1 은 제어 루프에서 완전히 제거되고 고장나지 않은 제어기 C_2 에 의해 전체 제어 시스템은 계속 제어 목적을 수행할 수 있다.

두번째의 고장은 제어기의 출력이 적분기의 고장과 같은 원인으로 정상치에서 서서히 벗어나는 경우이다. 그림6(a)는 단일 제어기 시스템에서의 결과로

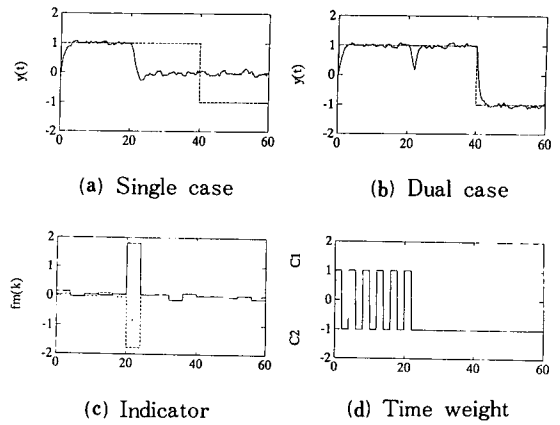


그림 5. 급격한 고장에 대한 결과
Fig. 5. Response of the abrupt failure.

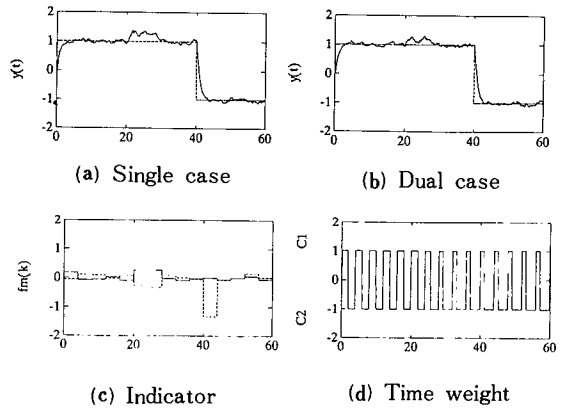


그림 6. 램프 고장에 대한 결과
Fig. 6. Response for the ramp failure.

서 앞의 경우와 마찬가지로 설정치 추적성능을 잃어버린다. 이에 비해 제안된 제어 시스템은 그림6(b)와 같이 고장난 제어기의 시간 비중을 서서히 줄임으로써 고장난 제어기의 영향을 제거하여 전체 제어 시스템이 계속 설정치를 추적할 수 있도록 동작한다. 이 경우에는 고장난 제어기의 출력값의 편차가 커짐에 따라 고장난 제어기의 제어구간에서 발생하는 오차는 점차 커지게 된다. 이 때 고장 감지부에서의 고장난 제어기에 대한 고장지수는 앞의 경우보다 작은 값이나 두 제어기의 응답의 차이에 따라 제어기 C_1 은 서서히 제어루프에서 제거된다.

세번째의 고장은 한 제어기에 외란과 같은 제어기의 동작과 무관한 입력이 작용하여 제어기의 동작이

일정시간동안 악화되는 경우이다. 그림7(a)와 같이 단일 제어기 시스템의 경우에는 외란이 작용하는 시간동안 제어의 결과가 나빠지게 되고, 능동 중복구조를 갖는 제어 시스템에서 이러한 외란의 크기가 고장 감지부의 임계치보다 크면 오감지되어 부 제어기로 제어가 전환될 수 있다. 그러나, 제안된 제어 시스템에서는 외란에 의해 제어결과가 나빠지면 제어기의 시간비중을 감소시켜 잘못된 제어 입력에 대한 영향을 억제하지만 제어 루프에서 완전히 제거되는 않으므로 외란의 영향이 없어져서 제어기가 다시 정상적으로 동작하면 중복구조를 상실하는 능동 중복 제어 시스템의 경우에 비해 그림7(b)와 같이 계속 중복 구조를 유지할 수 있다.

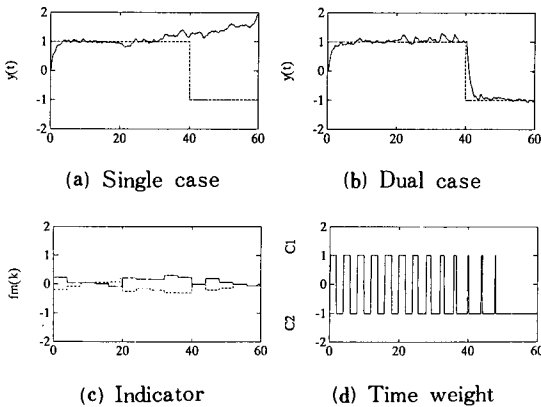


그림 7. 외란에 의한 단기성 고장에 대한 결과
Fig. 7. Response for the short period failure due to external disturbance.

V. 결 론

중복 제어구조에서 제어기의 고장을 쉽게 감지하고 하나의 제어기가 고장나더라도 전체 제어 시스템의 성능을 유지할 수 있는 방법을 제안하였다. 두개의 제어기는 스위칭 회로를 통하여 플랜트에 제어입력을 가함으로서 제어를 행하게 되며, 두 제어기에 대한 시간 비중을 변화함으로써 제어기가 고장나더라도 계속 제어를 할 수 있다. 제안된 제어구조는 제어기의 제어 성능 평가를 통하여 제어기의 고장을 파악하고 일반적인 중복제어 시스템과는 달리 두 제어기의 시간 비중의 변화로서 고장난 제어기를 제거하므로 오감지의 영향을 줄일 수 있다.

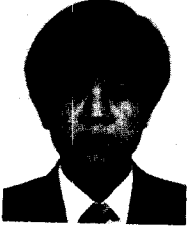
또한, 두 제어기가 같은 제어기이므로 기존의 방법에서 두 제어기를 주, 부제어기로 구분되어 나누어

설계되는 것에 비하여 쉽게 구현 가능하며, 제어기의 구조가 변경되더라도 수정없이 적용할 수 있다. 제안된 방법은 기존의 제어기를 이용하여 고장 대응 능력이 없는 단일 제어기 제어 시스템에 간단히 적용하여 제어 시스템의 신뢰도를 높일 수 있다.

參 考 文 獻

- [1] R.F. Stengel, "Intelligent failure-tolerant control," *IEEE Contr. Sys. Mag.*, vol. 11, no. 4, pp. 14-23, 1991.
- [2] B.W. Johnson, *Design and Analysis of Fault-Tolerant Digital systems*, Addison-Wesley, 1989.
- [3] D.B. Brown, *Systems analysis and design for safety*, Prentice-Hall, Inc., 1976.
- [4] 한전 기술연구원, 마이크로 컴퓨터를 이용한 전자제어 시스템의 고 신뢰화에 관한 연구(최종 보고서), 1988.
- [5] A.S. Willsky, "A survey of design methods for failure detection in dynamic systems," *Automatica*, vol. 12, no.6, pp. 601-611, Nov. 1976.
- [6] R. Isermann, "Process fault detection based on modeling and estimation methods- A survey," *Automatica*, vol. 20, pp. 387-404, July 1984.
- [7] W.C. Merrill, J.C. DeLaat, and W.M. Bruton, "Advanced detection, isolation and accommodation of sensor failures- real-time evaluation," *J. Guidance*, vol. 11, no. 6, pp. 517-526, Nov. 1988.
- [8] D.D. siljak, "Reliable control using multiple control systems," *Int. J. control*, vol. 31, no. 2, 1980.
- [9] M Vidyasagar and N. Viswanadham, "Reliable stabilization using a multi-controller configuration," *Automatica*, vol. 21, no. 5, 1985.
- [10] Y.J. Cho and Z. Bien, "Reliable control via an additive redundant controller," *Int. J. Control*, vol. 50, no. 1, pp. 385-398, 1989
- [11] J. Genrtlr and H. Chang, "An instability indicator for expert control," *IEEE Contr. Syst. Mag.*, vol. 6, pp. 14-17, Aug. 1986.
- [12] T.J. Procyk and E.H. Mamdani, "A linguistic self-organizing process controller," *Automatica*, vol. 15, pp.15-30, 1979.
- [13] Y.F. Li and C.C. Lau, "Development of fuzzy algorithms for servo systems," *IEEE Contr. Syst. Mag.*, vol. 9, no. 3, pp. 65-72, April 1989.
- [14] B.C. Kuo, *Automatic Control Systems*, Prentie-Hall, Inc., 1987.

 著 者 紹 介



李 喜 圭 (正會員)

1961年 9月 14日生. 1984年 서울대 전자공학과(학사). 1986년 서울대 전자공학과(석사). 1986年~1987年 한국전기통신공사 전임연구원. 1987年~현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사과정. 주관심분야는 Fault-tolerant control, Fuzzy System, Intelligent Control, FA 등임.

卞 增 男 (正會員) 第28卷 B編 第3號 參照
현재 한국과학기술원 전기 및 전자과 교수