

비동기 3중화 제어기의 성능분석을 위한 모델링 기법

김석주, 권순만, 김종문, 김국헌
한국전기연구소 제어자동화 그룹

A Modeling Technique for Performance Evaluation of Asynchronous TMR Controller

Seogjoo Kim, Soonman Kwon, Jongmoon Kim, and Kook-Hun Kim
Control & Automation Group, Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - This paper describes a preliminary study on a modeling technique for control performance evaluation of asynchronous TMR (Triple Modular Redundancy) controller. Hybrid system modeling is applied to TMR controller performance evaluation and mixed logical dynamical system description is used to model the behavior of majority voter in the controller. Windup and bumpless transfer problems in redundancy controls are also mentioned.

1. 서 론

항공기나 원자력발전소와 같은 안전 최우선 시스템(Safety critical system)에 고장포용 시스템(Fault-tolerant system)으로서 다중화 제어기가 사용되는 예가 점점 늘고 있다[1][2]. 다중화 제어기의 고장포용은 같은 하드웨어를 사용하는 모듈을 여러개 사용하여 입력 샘플링 및 제어연산을 하고 제어출력을 평균값 또는 중간값을 취하도록 Voting 함으로써 한 개 또는 그 이상의 모듈에 고장이 발생하여도 Voting 과정에서 고장이 배제될 수 있도록 하는 것이 일반적이다. 다중화 제어기는 입력과 출력의 동기방식에 따라서 동기식과 비동기식으로 나눌 수 있다. 비동기식은 모듈간 영향을 주는 부분이 최소화되어 있어서 고장포용면에서는 유리하지만 제어성능면에서는 제어모듈간 연산시차가 발생하여 제어성능에 원하지 않는 영향을 줄 수 있다.

즉, 각 모듈이 센서를 동시에 샘플링할 수 없고 또한 잡음이나 센서의 잔류편차(offset)에 의한 오차 등이 발생하여 제어기간 출력값에 미세한 차이가 발생하게 된다. 따라서 중간값을 선택하는 Voter의 경우 제어기가 계속 바뀌면서 선택되는 현상이 발생하여 원하지 않는 스위칭 제어가 될 수 있다. 이때 나타나는 대표적인 현상이 windup과 bump 문제이다.

이러한 현상은 중간값 Voter가 비선형적이기 때문에 모델링이 어려워 해석하기 곤란하였지만 본 논문에서는 하이브리드 시스템 해석기술을 적용해 보고자 한다.

하이브리드 시스템은 시스템의 동특성(dynamical characteristics)이 아날로그값과 이산 논리값 모두에 의해서 결정되는 시스템을 말한다. 이러한 시스템은 제어기가 복잡해지고 PLC(Programmable logic controller)와 같은 논리 프로그래밍을 사용하는 예가 많아지면서 점점 늘고 있는 추세이다. 특히 임베디드 시스템(embedded system)의 간단한 제어루프에도 논리의사 결정(logical decision making) 알고리즘이 내장되는 경우도 많이 있고 대규모 플랜트에 계층적 제어를 구성하는 경우는 상위제어기에 제어기나 플랜트 상태에 따라 하위제어방식을 선택할 수 있는 관리감독제어기(supervisory controller)가 채택되는 경우가 대부분이기 때문에 최근의 거의 모든 제어기는 하이브리드 제어 시스템으로 볼 수 있다.

이러한 하이브리드 시스템은 컴퓨터 시스템에서 실시

간 또는 다중 프로세서 프로그래밍의 특성을 연구하기 위하여 FSM (Finite state machine) 또는 Petri net 모델을 이용하여 연구되었으며 계측제어 분야에서는 논리기반 스위칭제어(Logic based switching control)를 중심으로 연구되어 왔다.

최근 이들의 연구가 체계화되고[3] 수학적 모델링 기법이 제시되면서[4][6] 이들의 연구가 하이브리드 제어 시스템의 안정도 최적제어, 모델예측제어 등으로 넓어지고 있다.

본 논문은 3중화 제어기의 성능분석 및 제어기 설계를 위한 선행연구로서 비동기 3중화 제어기의 모델링 방법을 하이브리드 시스템 모델링 기법을 도입하여 제시하고자 하며 이를 바탕으로 앞으로 다중화 제어기의 안정도 해석, 최적 제어기 설계 및 성능 분석에 이용하고자 한다.

2. 3중화 제어기 모델링

2.1 3중화 제어기의 개요

그림 1에 3중화 제어기의 구조를 표시하였다. 이 시스템은 각 제어기가 개별적인 센서와 연산과정을 거쳐 제어출력을 Voter로 보내고 Voter는 중간값 또는 평균값을 출력하도록 되어있는 가장 일반적인 구조이다.

경우에 따라서는 Common mode failure를 방지하기 위하여 연산 알고리즘을 제어기마다 다른 것을 사용하기도 하지만 여기서는 모든 제어기에 같은 알고리즘을 사용하는 것으로 한다.

평균값을 출력하는 Voter의 경우 제어기 고장이나 제어기 투입시 과도현상이 발생할 수 있기 때문에 빠른 시정수를 가지는 시스템에는 사용하기 어렵지만 느린 시스템에 사용하면 Flux-summing과 같은 강건한 특성을 얻을 수 있다.

이에 반하여 중간값 Voter는 각각의 제어기가 서로 출력값을 추종함으로써 평균값 Voter와 같은 과도현상은 없지만 정상상태에서 제어기가 랜덤하게 선택되는 스위칭 제어가 발생하여 정상상태의 제어 특성이 나빠질 가능성이 있다. 본 논문은 중간값 Voter만 고려하기로 한다.

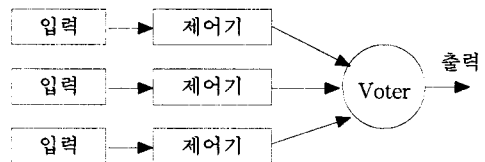


그림 1. 전형적인 3중화 제어기 구조

먼저 가장 간단한 비례-적분(PI) 제어기와 중간값 Voter를 가지는 3중화 제어기의 제어문제는 다음과 같이 표현할 수 있다. 플랜트는 선형이고 출력에 대한 PI

제어를 가정하였다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \\ y_1 &= y + v_1 \\ y_2 &= y + v_2 \\ y_3 &= y + v_3 \\ u_1 &= \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)y_1 \\ u_2 &= \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)y_2 \\ u_3 &= \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)y_3 \\ u_{\min} &\leq u_i \leq u_{\max}, \quad i=1,2,3 \\ u &= \begin{cases} u_1, & \text{if } u_2 \leq u_1 \leq u_3 \text{ or } u_3 \leq u_1 \leq u_2 \\ u_2, & \text{if } u_1 \leq u_2 \leq u_3 \text{ or } u_3 \leq u_2 \leq u_1 \\ u_3, & \text{if } u_1 \leq u_3 \leq u_2 \text{ or } u_2 \leq u_3 \leq u_1 \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 x 는 $n \times 1$ 상태벡터, u 는 $m \times 1$ 입력, y 는 $p \times 1$ 출력 벡터이고 y_1, y_2, y_3 는 각 제어기에서 측정된 출력, v_1, v_2, v_3 는 측정잡음, u_1, u_2, u_3 는 각 제어기의 제어출력이고 u 는 중간값 Voter의 출력값을 나타낸다.(그림 2)

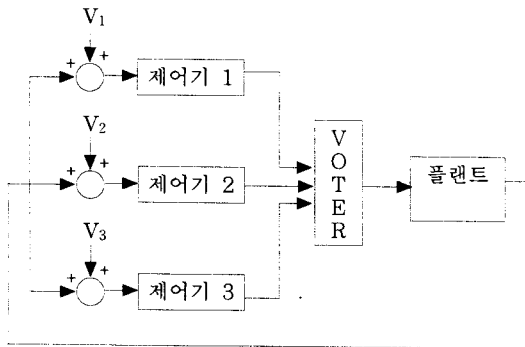


그림 2. 다중화 제어기 모델

이러한 형태의 다중화 제어기는 중간값 Voter의 비선형성과 스위칭 제어가 이루어진다는 점을 고려하면 가장 기본적인 문제는 windup과 bump 문제일 것이다. windup은 식(1)에서 각 PI 제어기의 적분값이 포화되는 문제로 예를 들어 u_1 으로 제어가 이루어진다고 할 때 u_2 와 u_3 의 적분값이 시간이 지남에 따라서 포화되어 각 제어기 출력값이 큰 차이를 보이는 현상을 말한다. 따라서 만약 제어기 1에 고장이 발생하여 제어가 제어기 2 또는 제어기 3으로 전환된다면 큰 bump가 발생할 가능성이 있게 된다. 이러한 문제가 '다중화 제어기의 설계를 어렵게 하는 문제이다. 다음 그림 3은 동기 발전기가 무부하 상태에서 식 (1)과 같은 3중화 제어기로 제어된다고 할 때 시스템 응답의 windup 현상을 나타내고 있다. 그림 3은 제어기 1, 3에 각각 +2, -2%의 입력센서 간류편차가 존재한다고 가정하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 제어기 1과 3의 출력은 각각 출력의 최대, 최소로 포화되는 과정에 있는 것을 알 수 있다. 이때 제어기 2에 고장이 발생하여 제어기 2의 출력이 나오지 않는다면 그림 4와 같이 큰 bump가 발생하게 된다. 이러한 windup과 bump를 없애기 위한 제어방법이 Anti-windup과 bumpless transfer이다. 다음 그림 5는 일반적인 Anti-windup 제어기의 블록도를 나타내고 있다. 즉, 각 제어기는 자신의 출력과 Voter

의 출력차를 Anti-windup 제어기의 입력신호로 하고 Anti-windup 제어기의 출력을 제어기에서 사용하여 windup을 방지하는 것이 일반적이다. 그림 6은 1차 필터로 Anti-windup 제어기를 사용했을 때의 출력파형이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 출력의 bump는 거의 없으며 센서의 편차분만 존재하는 것을 알 수 있다.

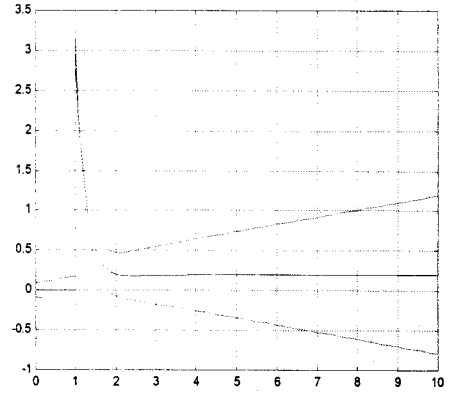


그림 3. 3중화 제어기의 windup

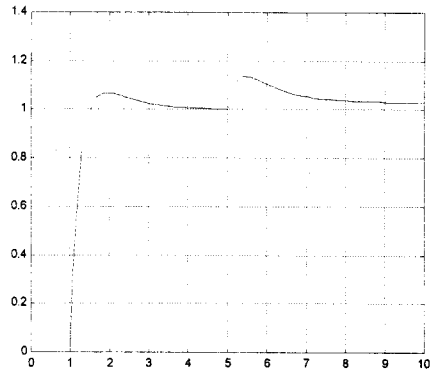


그림 4. 3중화 제어기의 bump(5초후 고장발생)

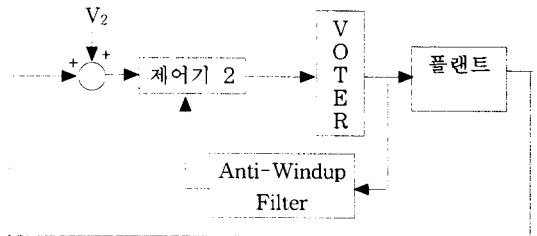


그림 5. 다중화 시스템의 Anti-windup

2.2 하이브리드 시스템 모델링

하이브리드 시스템을 모델링하는 방법은 몇가지가 제시되었지만 여기서는 Bemprad[6]가 제시한 방법을 사용하고자 한다. 이 방법은 명제논리(Propositional logic)를 정수와 실수로 표현되는 선형부등식으로 나타내서 해석하는 방법으로 시스템의 방정식이 MLD (Mixed Logical Dynamical) 시스템으로 표현된다.

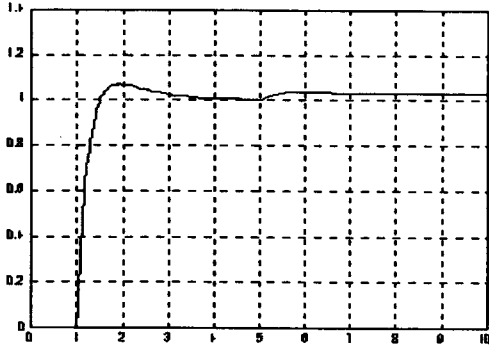


그림 6. bumpless transfer

이 방법은 어떤 명제에 논리 변수 $\delta \in \{0,1\}$ 를 대응시키고 이들의 관계를 등식 또는 부등식으로 표현하는 방법이다. 예를 들어 명제 X_1 과 X_2 에 논리변수 δ_1, δ_2 를 각각 대응시키면 X_1 또는 X_2 명제는 다음과 같은 선형 부등식 제약조건으로 표시할 수 있다.

$$X_1 \vee X_2 \Leftrightarrow \delta_1 + \delta_2 \geq 1$$

다음 표는 기본적인 논리식과 명제간의 관계를 나타내고 있다(7).

표 1. 기본 논리 부등호

관계	논리	혼합 정수 (부)등식
AND (\wedge)	$[\delta_1=1] \wedge [\delta_2=1]$	$\delta_1=1, \delta_2=1$
	$[\delta_3=1] \Leftrightarrow [\delta_1=1] \wedge [\delta_2=1]$	$-\delta_1 + \delta_3 \leq 0$ $-\delta_2 + \delta_3 \leq 0$ $\delta_1 + \delta_2 - \delta_3 \leq 1$
OR (\vee)	$[\delta_1=1] \vee [\delta_2=1]$	$\delta_1 + \delta_2 \geq 1$
	$[\delta_3=1] \Leftrightarrow [\delta_1=1] \vee [\delta_2=1]$	$\delta_1 - \delta_3 \leq 0$ $\delta_2 - \delta_3 \leq 0$ $-\delta_1 - \delta_2 + \delta_3 \leq 0$
NOT	$\sim[\delta_1=1]$	$\delta_1=0$
XOR	$[\delta_1=1] \oplus [\delta_2=1]$	$\delta_1 + \delta_2 = 1$
	$[\delta_3=1] \Leftrightarrow [\delta_1=1] \oplus [\delta_2=1]$	$-\delta_1 - \delta_2 + \delta_3 \leq 0$ $-\delta_1 + \delta_2 - \delta_3 \leq 0$ $\delta_1 - \delta_2 - \delta_3 \leq 0$ $\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 \leq 2$
\rightarrow	$[\delta_1=1] \rightarrow [\delta_2=1]$	$\delta_1 - \delta_2 \leq 0$
	$[f(x) \leq 0] \rightarrow [\delta=1]$	$f(x) \geq \epsilon + (m - \epsilon)\delta$
	$[\delta=1] \rightarrow [f(x) \leq 0]$	$f(x) \leq M(1 - \delta)$
\leftrightarrow	$[\delta_1=1] \leftrightarrow [\delta_2=1]$	$\delta_1 - \delta_2 = 0$
	$[f(x) \leq 0] \leftrightarrow [\delta=1]$	$f(x) \leq M(1 - \delta)$ $f(x) \geq \epsilon + (m - \epsilon)\delta$
	$z = \delta \cdot f(x)$	$z \leq M\delta$ $-z \leq -m\delta$ $z \leq f(x) - m(1 - \delta)$ $-z \leq -f(x) + M(1 - \delta)$

2.3 3중화 제어기의 하이브리드 시스템 모델링

식 (1)에서 다음과 같은 논리변수를 가정하면

$$\begin{aligned} [\delta_1=1] &\leftrightarrow [u_2 < u_1 < u_3 \text{ or } u_3 < u_1 < u_2] \\ [\delta_2=1] &\leftrightarrow [u_1 < u_2 < u_3 \text{ or } u_3 < u_2 < u_1] \\ [\delta_3=1] &\leftrightarrow [u_1 < u_3 < u_2 \text{ or } u_2 < u_3 < u_1] \end{aligned} \quad (2)$$

상태방정식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B(\delta_1 u_1 + \delta_2 u_2 + \delta_3 u_3) \\ \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 &= 1 \end{aligned} \quad (3)$$

위식을 MLD를 이용하여 표시하면

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B(z_1 + z_2 + z_3) \\ z_i &\leq u_{\max} \delta_i \\ -z_i &\leq -u_{\min} \delta_i \\ z_i &\leq u_i - u_{\min}(1 - \delta_i) \\ -z_i &\leq -u_i + u_{\max}(1 - \delta_i) \\ \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 &= 1 \\ z_1 &= \delta_1 u_1, \quad z_2 = \delta_2 u_2, \quad z_3 = \delta_3 u_3 \end{aligned} \quad (4)$$

즉, 다중화 제어기의 상태방정식과 Voting 함수를 통합하여 식 (4)와 같은 혼합정수 상태방정식으로 나타낼 수 있다.

3. 결 론

본 논문은 다중화 제어기의 제어성능 분석을 위한 선행연구로서 다중화 제어기의 제어문제 및 모델링 기법을 제시하였다. 다중화 제어기의 제어문제에 windup과 bumpless transfer를 언급하였고 스위칭 제어 모델링은 하이브리드 시스템의 모델링 기법을 사용하여 Voting 함수를 상태방정식과 함께 선형 혼합 정수 (부) 등식 제약조건으로 표현하였다. 다중화 시스템의 하이브리드 모델링은 새로운 Voter 설계, 고장포용을 고려한 다중화 제어 알고리즘 개발, 제어기 재구성 및 예측제어 등에 적용할 수 있을 것으로 생각된다.

(참고 문헌)

- [1] B. W. Johnson, "Design and Analysis of Fault-Tolerant Digital System", Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- [2] H. D. Kirrmann, "Fault Tolerance in Process Control: An Overview and Examples of European Products", IEEE Micro, pp. 27-50, Oct. 1987.
- [3] M. S. Branicky, V. S. Borkar and S. K. Mitter, "A Unified Framework for Hybrid Control: Model and Optimal Control Theory", IEEE Trans. on AC, Vol. 43, No. 1, pp. 31-45, 1998.
- [4] M. L. Tyler and M. Morari, "Propositional Logic in Control and Monitoring Problems", Automatica, No. 35, pp. 565-582, 1999.
- [5] J. Eker and J. Malmberg, "Design and Implementation of a Hybrid Control Strategy", IEEE Control Systems Magazine, pp.12-21, Aug. 1999.
- [6] A. Bemporad and M. Morari, "Control of Systems Integrating Logic, Dynamics, and Constraints", Automatica, No. 35, pp. 407-427, 1999.
- [7] D. Mignone, A. Bemporad, M. Morari, "A Framework for Control, Fault Detection, State Estimation, and Verification of Hybrid System. Proc. of American Control Conference, pp.134-138, 1999.