

네트워크기반 복수전동기의 동기제어알고리즘 구현

이흥희, 정의현, 김정희
울산대학교 전기전자정보시스템공학부

Implementation of Synchronization Algorithm for Networked Multi-Motors

Hong-Hee Lee, Eui-Heon Jung, Jung-Hee Kim
School of Electrical Engineering and Information System, University of Ulsan, Korea

ABSTRACT

복수구동장치를 사용하여 작업을 수행하는 시스템은 동기화를 위해 기계적인 제한조건을 두고 운영하는 경우 지속적인 유지보수가 요구되고 작업 정밀도가 떨어진다. 이러한 단점을 보완하기 위해 개별적인 구동장치의 제어루프 외부에 동기화를 위한 제어루프를 추가하는 방법^[1]이 제안되었다. 본 논문에서는 CAN(Controller Area Network)으로 연결된 두 대의 서보앰프를 구동하여 주어진 작업을 수행하는 경우 외란과 내부 파라미터 변동에 강인한 H_{∞} 제어를 설계하고 이를 이용하여 동기 제어 알고리즘을 구현하고자 한다.

Key words : H_{∞} 제어기, 동기제어 알고리즘, 복수 전동기, CAN

1. 서 론

분산제어시스템에서 제어신호 및 각종 센서 데이터를 교환하기 위해서 사용되었던 종래의 점대점(peer-to-peer) 연결방법은 Ethernet, FieldBus 등과 같은 프로토콜을 가지는 공유버스로 대체되는 추세이다. 이는 기존의 방식에서 발생하는 배선구조의 복잡성을 줄이고 공정변화에 따른 배선상의 유연성 확보와 함께 유지보수 능력을 향상시킬 수 있다. FieldBus는 다양한 종류의 프로토콜이 있으며 성능 면에서도 차이를 보이고 있어 시스템의 요구사항을 만족시킬 수 있도록 선정되어야 한다. 예를 들어 생산 셀 간의 통신에는 FIP, Profibus 등이 적용가능하고 생산 셀 내부의 디바이스 레벨이나 비교적 원거리에 분산된 복수전동기로 구성된 시스템의 경우 CAN (Controller Area Network)이 적용될 수 있다. CAN은 차량용 네트워크로 개발되었으나 열악

한 환경에서 신뢰성이 검증되었고 가격대 성능비가 우수하여 공장자동화 분야에도 적용되고 있는 추세이다. 본 논문에서는 Gantry 크레인, 압연공정 등과 같이 복수전동기를 구동하여 주어진 작업 수행하는데 필요한 동기제어 알고리즘을 구현하고자 한다. 구현상의 편의를 도모하기 위해 두 대의 서보앰프가 CAN으로 연결된 시스템에 대해 고려하기로 한다. 서보앰프와 전동기는 입.출력의 주파수 특성을 고려하여 PID제어기와 직류전동기로 근사화 모델을 구하고 두 대의 서보앰프 외부에 H_{∞} 제어기를 적용하여 동기제어 알고리즘을 구현하였다.

2. 시스템 모델링

2.1 CAN 프로토콜

CAN은 CSMA/CD+AMP (Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection + Arbitration on Message Priority) 프로토콜을 가진다. 이는 IEEE 802.3 CSMA/CD 프로토콜과 유사하며 ISO/OSI 7 계층 중 물리계층과 데이터 링크 계층만을 지원한다. 이러한 CAN 프로토콜을 간단히 설명하면, 연결된 모든 노드는 전송해야 할 메시지가 있는 경우 버스의 상태를 감지해 버스 비활성화 상태에서 이를 전송한다. 만약 하나 이상의 노드에서 버스사용권을 요구했을 경우 메시지가 노드에 부여된 식별자(ID)를 이용해 우선순위가 높은 노드에서 버스 사용권을 얻는다. (이러한 버스사용권 획득방법은 NBA(Non-deductive Bitwise Arbitration)라 불린다.) 우선순위가 낮아 버스사용권을 획득하지 못한 노드는 버스의 상태를 감지하다 비활성화되면 메시지를 재전송한다. 구현시 최대전송 속도는 2Mbps로 한다. (2.0A(B) 규격상 최대전송 속도는 1Mbps^[2] 이나 클럭을 20MHz로 높여 실험해본 결과 2Mbps로 데이터 전송가능)

2.2 서보앰프 모델링

본 논문에서는 미쓰비시 속도제어용 서보앰프와 전동기에 대해 입력(속도지령)과 출력(속도) 데이터로부터 얻어지는 주파수 특성을 이용하여 PID 제어기와 직류전동기로 이루어진 근사화 모델을 구했다. 이는 그림1과 같고 서보앰프의 근사화 모델에 대한 상태방정식은 다음과 같다.^[3]

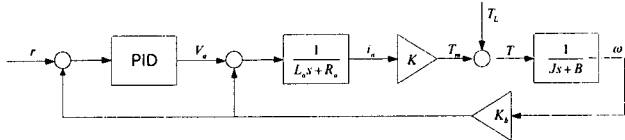


그림 1 서보앰프 근사화 모델

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\alpha & -\beta & -\gamma \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (1)$$

$$y = [\delta \quad \varepsilon \quad \gamma] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, $\alpha = \frac{JR + BL + K K_d}{JL}$,

$$\beta = \frac{BR + K K_p + K^2}{JL}, \quad \gamma = \frac{K K_i}{JL}$$

$$\delta = \frac{K K_d}{JL}, \quad \varepsilon = \frac{K K_p}{JL}$$

J=관성모멘트, R=회전자 저항, L=회전자 인덕턴스
K=역기전력 상수(=토크상수), Ki, Kd, Kp=PID제어기 이득, B=마찰계수

3. 제어기 설계

3.1 H ∞ 제어기

본 논문에서는 두 대의 서보앰프 동기제어를 위해 외부에 H ∞ 제어기를 사용하여 시스템의 강인성을 확보할 수 있다. 전체 시스템 블록도는 그림2와 같고 전달함수는 식(3)으로 나타낼 수 있다.

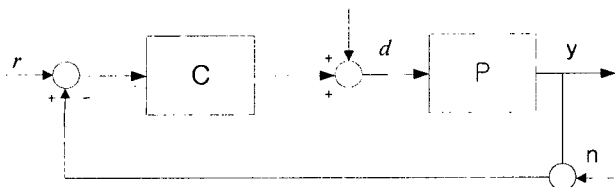


그림 2 전체 시스템 블록도

$$y = \frac{PC}{1+PC} r + \frac{P}{1+PC} d - \frac{PC}{1+PC} n$$

$$= T \cdot r + P \cdot S \cdot d - T \cdot n \quad (3)$$

Loopshaping^[4]을 이용해 robust performance를 만족하는 H ∞ 제어기를 설계하기 위해서 플랜트 P는 stable하고 minimum phase 이어야 한다는 전제조건이 요구되는데 실제 시스템은 이를 만족한다.

Robust performance 문제는 플랜트 P에 대한 제한 시스템이 내부적으로 안정하고 식(4)의 부등식을 만족시키는 제어기 C를 구하는 것이다.

$$\| W_1 S + W_2 T \|_{\infty} < 1 \quad (4)$$

여기서, W₁, W₂는 가중치 함수

가중치 함수 W₁, W₂는 주어진 P와 제어목적에 맞게 선정해 주어야 하는데, W₁은 저주파 영역에서 S의 크기를 조절하는데 사용되고 W₂는 고주파 영역에서 T의 크기를 조절하는데 사용된다.

Loopshaping 설계방법은 식(5), (6)에서 얻어지는 곡선을 이용하여 L(=PC)의 보드선도를 얻는다. L은 저주파 영역에서 식(5)로부터 얻은 곡선보다 크고 고주파 영역에서는 식(6)으로부터 얻어지는 곡선보다 작은 보드선도를 얻는다.

저주파 영역에서 $|W_1| > 1 > |W_2|$ 인 경우

$$\frac{|W_1|}{1 - |W_2|} \quad (5)$$

고주파 영역에서 $|W_1| < 1 < |W_2|$ 인 경우

$$\frac{1 - |W_1|}{|W_2|} \quad (6)$$

위와 같은 과정을 통해 얻은 L을 이용하여 식(4)의 조건을 만족시키는 제어기 C=L/P로 구할 수 있다.

3.2 동기제어

본 논문에서는 두 대의 서보앰프 동기제어를 위해 3.1절에서 설계한 H ∞ 제어기를 서보앰프 외부에 두고 그림3과 같이 두 출력의 오차를 제한하는 방법을 이용하였다.

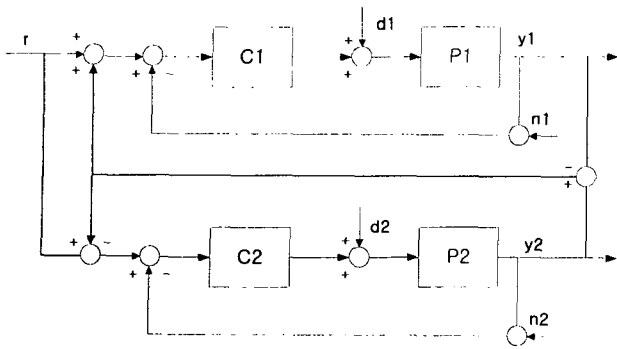


그림 3 동기제어 블록도

4. 시뮬레이션

3절의 설계방법을 바탕으로 H^∞ 제어를 이용한 동기제어방법의 성능평가를 위해 표1과 같은 모델 파라미터를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

표 1 모델 파라미터

$R[\Omega]$	1
$L[H]$	0.1
$J[\text{Kg.cm}^2/\text{sec}]$	0.0098
$B[\text{Kg.cm}^2/\text{sec}]$	0.2
$K[\text{Kg.cm}^2/\text{A}](\text{V}/\text{rad})$	0.1
K_p, K_i, K_d	100, 100, 10

이를 이용해 얻은 서보앰프의 페루프 전달함수는 식 (7)과 같다.

$$\frac{\omega_o}{\omega_i} = \frac{\delta S^2 + \epsilon S + \gamma}{S^3 + \alpha S^2 + \beta S + \gamma} \quad (7)$$

H^∞ 제어기 입장에서 서보앰프를 P로 보고 설계사양을 결정하여 L의 Loopshaping을 통해 식(4)의 조건을 만족시킬 수 있는 제어기 C를 얻으면 된다. 이를 위해 설계사양을 만족시킬 수 있는 W_1, W_2 를 각각 식(8),(9)로 선정하면 식(10)과 같이 L을 얻을 수 있다. L과 W_2, W_1S+W_2T 의 보드선도는 그림4와 같이 얻을 수 있다.

$$W_1 = \frac{10}{2S^2 + 2S + 1} \quad (8)$$

$$W_2 = \frac{S+1}{0.2S+20} \quad (9)$$

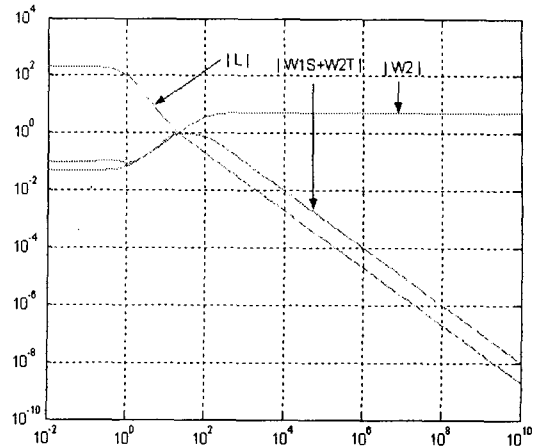


그림 4 $|L|, |W_2|, |W_1S+W_2T|$ 의 보드선도

이러한 과정을 통해 얻은 H^∞ 제어기의 전달함수는 식(10)과 같다.

$$H^\infty = \frac{0.49 S^4 + 15.8 S^3 + 169.5 S^2 + 655S + 200}{0.1 S^4 + 1.2 S^3 + 3.1 S^2 + 3S + 1} \quad (10)$$

이상에서 구한 제어기를 이용한 동기제어방법의 성능평가를 위해 Matlab을 이용하였다. 동기제어를 위한 Simulink모델은 그림5와 같다.

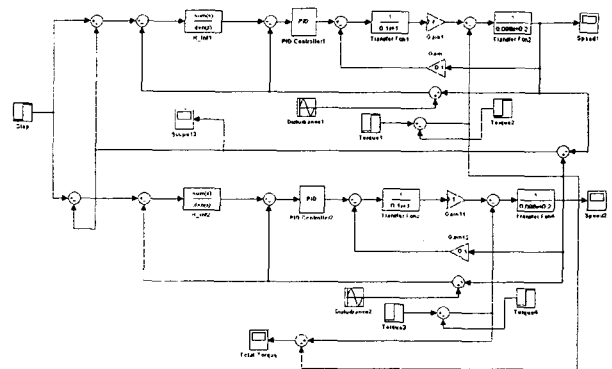


그림 5 동기제어 시스템 블록도

시뮬레이션 결과 파형은 그림6-11과 같다.

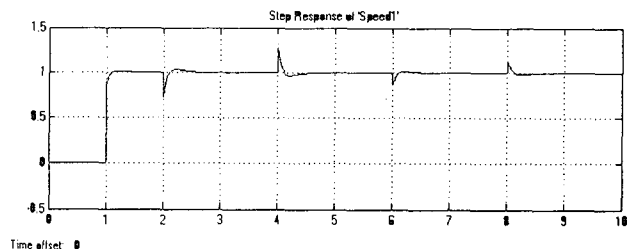


그림 6 속도1(스텝입력)

5. 결 론

압연공정, gantry 크레인 등과 같이 비교적 원거리 분산되어있는 복수전동기를 구동하여 주어진 작업을 수행하는 시스템의 경우 기존에는 기계적인 제한조건을 두어 동기화를 수행하였으나, 경제적인 손실을 막고 작업 정밀도를 높이기 위해 제어기를 통한 동기화가 이루어지고 있는 추세이다. 본 논문에서는 FieldBus의 한 형태인 CAN 네트워크로 연결된 두 대의 서보앰프로 구동되는 시스템에 적용할 수 있는 동기제어 알고리즘을 구현하였다. 각 서보앰프로 대한 근사화 모델은 입력(속도 지령치)과 출력(속도)에 대한 주파수 응답을 통해 얻었고 동기제어를 위해 사용될 H_∞ 제어기는 Loopshaping 설계방법으로 구현하였다. Matlab을 이용한 시뮬레이션을 통해 성능평가를 수행한 결과 구현된 H_∞ 제어기로 서보앰프의 강인성을 높일 수 있고 동기제어 알고리즘으로 서로 다른 부하조건에서 발생하는 속도오차를 보정할 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] Hong Sun, George T.-C Chiu, "Motion Synchronization for Multi-Cylinder Electro-Hydraulic System", Proceedings. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, v1. pp. 636-641, 2001.
- [2] Wolthard. Lawrenz, "CAN System Engineering From Theory to Practical Application", Springer, 1997.
- [3] Zuo Z. Lui, Fang L. Luo, Muhammad H. Rashid "Nonlinear Adaptive Controller for High Performance DC Motor Field Weakening", IEEE Power Electronics Specialists Conference, 31st Annual, v.3 pp.1100 -1105, 2000
- [4] J. C. Doyle, B. A. Francis, A. R. Tannebaum "Feedback Control Theory", Macmillan Publishing Company, pp. 105-109, 1992.

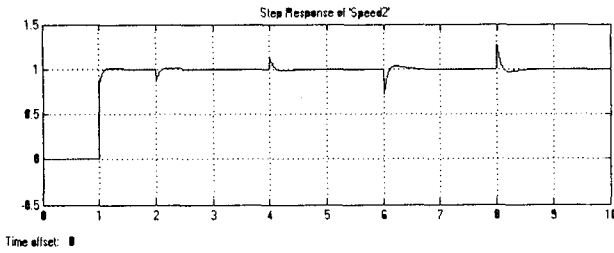


그림 7 속도2(스텝입력)

그림6-7은 스텝입력에 대해 각 전동기의 동기제어 후 속도응답을 나타낸다.

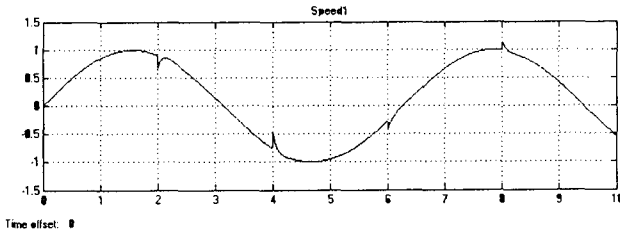


그림 8 속도1(정현파 입력)

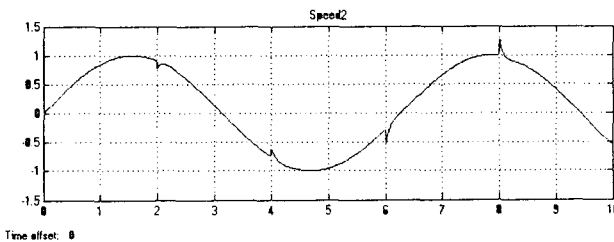


그림 9 속도2(정현파 입력)

그림8-9는 정현파 입력에 대해 각 전동기의 동기제어 후 속도응답을 나타낸다.

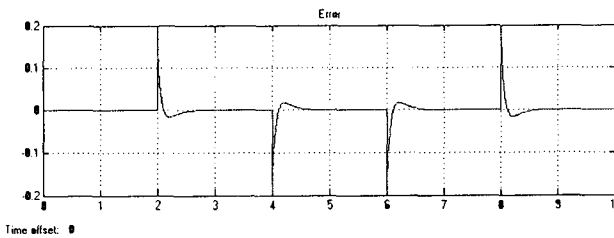


그림 10 속도 오차

그림10은 두 전동기 사이의 속도오차를 나타낸다.

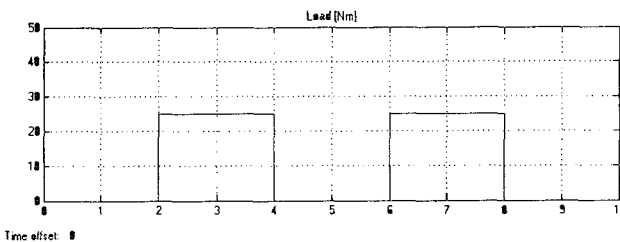


그림 11 부하

그림11은 2-4초 사이에서는 정격토크의 25%에 해당하는 부하가 전동기1에 인가되고 6-8초 사이에서는 동일 부하가 전동기2에 인가됨을 나타낸다.