

# 능동 외란 제거 제어를 이용한 이관성 시스템의 진동 저감 기법

김범진<sup>1)</sup> 윤영두<sup>1)</sup> 조병극<sup>2)</sup> 홍찬욱<sup>2)</sup>  
 한양대학교 미래자동차공학과<sup>1)</sup> LSIS<sup>2)</sup>

## Vibration Suppression Method in Two-Mass System Based on Active Disturbance Rejection Control

Bum-Jin Kim g Young-Doo Yoon g Byung-Guek Cho g Chanook Hong  
 Hanyang University<sup>1)</sup> g LSIS<sup>2)</sup>

### ABSTRACT

이 논문은 이관성 시스템에서 능동 외란 제거 제어(Active Disturbance Rejection Control, ADRC) 기반의 진동 저감 알고리즘을 제안한다. 제안한 방법은 축소 차원 ADRC를 기반으로 구성하였다. ADRC 이론에 기반한 제어 이론은 전체 토크 중 전동기 축의 관성 모멘트에 대한 토크를 제외한 모든 토크를 외란 성분이라 설정한다. 외란에 대한 가속도 성분을 전체 외란(Total Disturbance)이라고 설정하고, 이를 추정하여 보상한다. 축소 차원 ADRC의 차수가 낮아서, 축소 차원 ADRC의 대역폭을 기존 ADRC의 대역폭보다 크게 설정할 수 있다. 그리고, 증가한 이득과 실질적인 구현을 고려하여, 이산 시간 영역에서 설계하였다. 제안된 알고리즘의 안정도를 확보하고, 성능을 높이기 위하여, 추정하는 제정수의 값을 실제 값보다 작게 설정하였다. 제안한 방법은 기계시스템의 공진에 의한 영향을 감쇄시킬 수 있다. 제안한 방법을 검증하기 위해, 시뮬레이션과 실험을 수행하였다.

### 1. 서론

서보 드라이버는 토크(전류) 제어기, 공진 억제기, 모션(위치/속도) 제어기로 구성된다. 그리고, 성능을 향상시키기 위해, 외란 관측기 및 외란 보상 알고리즘 등이 필요하다. 서보 드라이버는 로봇 제작에 있어서, 가장 하위의 제어를 담당하는 제품이다. 로봇의 움직임은 동작 조건의 변동을 의미한다. 즉 관성, 부하 등의 변동을 의미하며, 이는 바로 플랜트의 변동을 의미한다. 플렉서블 샤프트(Flexible Shaft)를 갖는 이관성 시스템은 로봇을 포함하는 대표적인 기계시스템의 구조 중 하나이며, 공진을 포함하고 있다. 이러한 공진은 기계시스템에 진동을 발생시키는 주요 원인이다. 이에 대한 영향을 줄이기 위하여, 진동을 저감하는 제어 기술에 대한 많은 연구들이 있다<sup>[1-4]</sup>.

본 논문에서는 플렉서블 샤프트를 갖는 이관성 시스템에 대해 축소차원 능동 외란 제거 제어(Active Disturbance Rejection Control, ADRC)를 이산 시간 영역에서 설계하고 추정하는 제정수의 값을 실제 값보다 작게 설정하는 형태의 제어를 제안한다. 제안된 알고리즘은 관측 대역폭을 크게 설정하여도 극점이 안정한 영역에 존재한다. 추정 대역폭을 플랜트의 공진 주파수보다 넓게 설계하여, 플랜트의 공진 주파수가 변하는 경우에도 대응이 가능하다.

### 2. ADRC 기반의 공진 억제 알고리즘

### 2.1 절 플렉서블 샤프트를 갖는 이관성 시스템의 모델링

그림 1과 같은 이관성 시스템에 대하여 ADRC를 기반으로 공진에 의한 영향을 저감하는 알고리즘을 제안한다. 이관성 시스템에서, 토크 입력,  $T_e$ 에 대한 전동기의 기계 각속도,  $\omega_M$ 의 전달함수는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\omega_M}{T_e} = \frac{J_L + B_L s + K_{sh}}{J_M J_L s^3 + (B_M J_L + B_L J_M) s^2 + (B_M B_L + J_L K_{sh} + J_L K_{sh}) s + (B_M + B_L) K_{sh}} \quad (1)$$

여기서,  $J_M$ 은 전동기의 관성모멘트,  $J_L$ 은 관성부하의 관성모멘트,  $B_M$ 은 전동기의 마찰계수,  $B_L$ 은 관성부하의 마찰계수,  $K_{sh}$ 은 축의 강성계수를 의미한다.

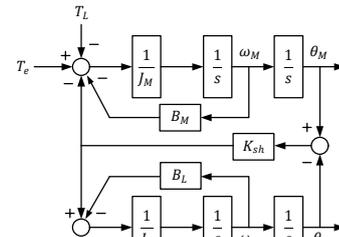


그림 1. 이관성 시스템의 블록도

그림 1에서  $T_L$ 은 외란 토크,  $\omega_L$ 은 관성부하의 기계 각속도,  $\theta_M$ 은 전동기의 기계 각,  $\theta_L$ 은 관성부하의 기계 각을 의미한다.

기계시스템에서 전동기와 관성부하의 마찰 계수가 매우 작다고 가정하였을 경우, (1)은 (2)와 같이 간략하게 나타낸다. 기계시스템의 공진 각주파수,  $\omega_r$  및 반공진 각주파수,  $\omega_{AR}$ 는 (3)과 같다.

$$\frac{\omega_M}{T_e} = \frac{J_L s^2 + K_{sh}}{J_M J_L s^3 + (J_M K_{sh} + J_L K_{sh}) s} \quad (2)$$

$$\omega_r = \sqrt{\frac{K_{sh}}{\left(\frac{J_M J_L}{J_M + J_L}\right)}}, \quad \omega_{AR} = \sqrt{\frac{K_{sh}}{J_L}} \quad (3)$$

### 2.2 절 축소차원 ADRC

플렉서블 샤프트를 갖는 기계시스템의 경우, 공진 및 반공진이 존재한다. 또한, 기계시스템의 제정수를 정확히 파악할 수 없으며, 운전 조건에 따라 부하의 제정수는 바뀐다. 반면에, 기계

시스템에서 전동기의 관성 모멘트는 일정하다. 이러한 특성을 이용하여, ADRC 기법이 제안되었다. 기계시스템에 가해지는 토크 중 전동기의 관성모멘트와 관련된 토크를 제외한 모든 토크를 전체 외란(total disturbance)와 관련된 토크로 설정하면 기계방정식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\omega}_M = \frac{1}{J_M} \cdot T_e + f \quad (4)$$

$$f = \frac{K_{sh}}{J_M J_L} \iint T_e - \frac{J_M + J_L}{J_M J_L} \cdot K_{sh} \int \omega_M$$

여기서,  $f$  는 전체 외란을 의미하며,  $f$  의 물리량은 가속도이다.

식 (4)를 이용하여  $f$  를 추정하는 축소차원 확장 상태 관측기(Reduced Extended State Observer, RESO)를 구성할 수 있다. 디지털 제어로 인해, 전동기의 토크 값은 직전 제어 시점의 토크 명령이라는 것을 고려하면 관측기는 아래와 같이 구성된다.

$$\frac{d}{dt} \hat{f}(t) = \omega_{ob} \left[ \frac{d}{dt} \omega_M(t) - \frac{1}{J_M} T_e(t - T_s) - \hat{f}(t) \right] \quad (5)$$

여기서,  $T_s$  는 샘플링 주기,  $\hat{f}$  는 추정된 전체 외란을 의미한다.  $\omega_{ob}$  는 관측기의 이득이다.

전동기의 기계 각속도에 대한  $\hat{f}$  의 전달함수,  $G_{zy}(s)$  와 전동기 토크에 대한  $\hat{f}$  의 전달함수,  $G_{zu}(s)$  는 아래와 같다.

$$G_{zy}(s) = \frac{\hat{f}(s)}{\omega_M(s)} = \frac{\omega_{ob} s}{s + \omega_{ob}} \quad (6)$$

$$G_{zu}(s) = \frac{\hat{f}(s)}{T_e(s)} = \frac{\omega_{ob}}{\hat{J}_M (s + \omega_{ob})} e^{-sT_s} \quad (7)$$

영차 홀드(Zero-Order Hold, ZOH)를 이용하여 주파수 도메인의 전달함수를  $z$ -도메인의 전달함수로 변환하기 위한 관계식<sup>[5]</sup>은 아래와 같다.

$$G(z) = (1 - z^{-1}) \mathcal{L} \left[ \mathcal{L}^{-1} \left[ \frac{G(s)}{s} \right] \right] \quad (8)$$

식 (8)을 이용하여  $G_{zy}(s)$  와  $G_{zu}(s)$  를  $z$ -변환하면 아래와 같다.

$$G_{zy}(z) = \frac{\hat{f}(z)}{\omega_M(z)} = \frac{\omega_{ob}(z-1)}{z - e^{-\omega_{ob}T_s}} \quad (9)$$

$$G_{zu}(z) = \frac{\hat{f}(z)}{T_e(z)} = \frac{1 - e^{-\omega_{ob}T_s}}{\hat{J}_M z (z - e^{-\omega_{ob}T_s})} \quad (11)$$

식 (3)의 기계시스템에 대한 방정식에 따라 ADRC의 Control Law는 아래와 같이 나타난다.

$$T_e = (T_{ref} - \hat{f}) \cdot \hat{J}_M \quad (12)$$

$$\dot{\omega}_M = T_{ref}$$

여기서,  $T_{ref}$  는 속도 제어기의 출력이고, 물리량은 가속

도이다.

속도 제어기는 비례 제어기를 이용하고, 이득 값은 아래와 같이 설계한다. ADRC를 적용한 속도 제어 시스템 블록도는 아래 그림 2와 같다.

$$K_p = \omega_{sc} \quad (13)$$

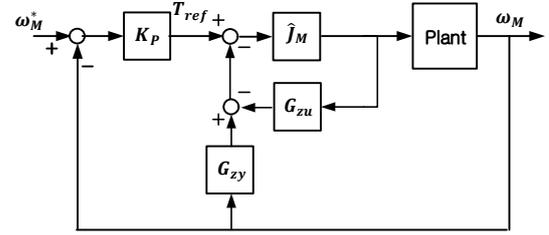


그림 2. 속도 제어 시스템의 블록도

### 2.3 절 ADRC 기반의 진동 저감 기법

제안된 ADRC 기반의 진동 저감 기법은 추정 전동기 관성 모멘트의 값을 실제 값의 반으로 사용한다. 그림 3은 표 1의 기계 제정수를 이용하여 모델링한 플랜트, 기존의 ADRC에서 모델링한 플랜트 그리고 제안된 알고리즘에서 모델링한 플랜트의 보드 선도를 나타낸다.

표 1. 기계 제정수

내용	값 [단위]
$J_M$	$1.02 \times 10^{-3} \text{ [kg} \cdot \text{m}^2]$
$J_L$	$1.156 \times 10^{-3} \text{ [kg} \cdot \text{m}^2]$
$K_{sh}$	$241 \text{ [N} \cdot \text{m/rad]}$

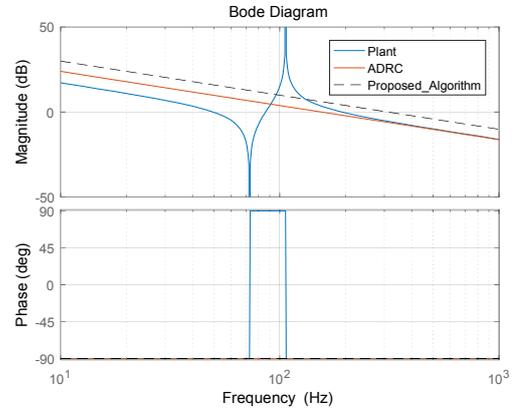


그림 3. 기계 제정수를 이용하여 모델링한 플랜트와 ADRC 및 제안된 알고리즘에서 모델링한 플랜트

### 2.4 절 제안된 알고리즘의 분석

제안된 알고리즘의 관측 대역폭을 증가시키는 경우, 페루프 속도 제어 전달함수의 극점-영점 지도는 그림 4와 같이 나타난다. 관측 대역폭이 증가할수록, 우세한 극점이 안정한 영역으로 이동하고 공진에 의한 영향이 감소한다. 반면에, 추정 관성 모멘트를 실제값으로 사용하는 경우, 안정도가 저하되었다. 그림 5는 속도 오차에 대한 속도의 보드 선도를 나타낸다. 관측 대역폭을 공진 주파수보다 큰 200 Hz로 설정한 경우부터 공진에 의한 영향이 크게 저감되고 관측 대역폭을 증가시킬수록 공진

에 의한 영향이 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

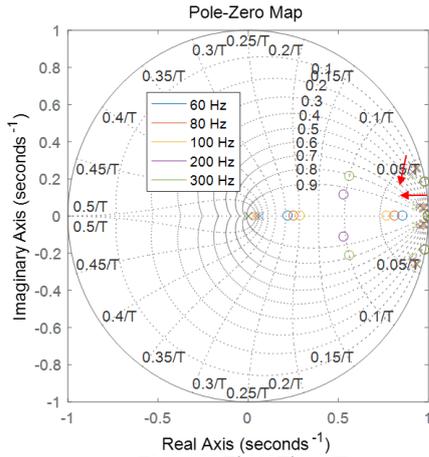


그림 4. 극점-영점 지도

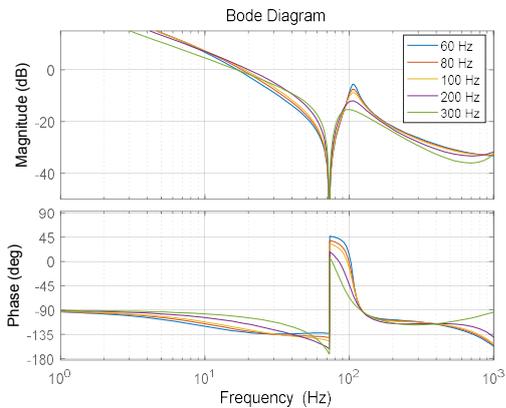


그림 5. 개루프 전달함수의 보드 선도

### 3. 실험 결과

플렉서블 샤프트를 갖는 기계시스템에 제안된 알고리즘을 적용하여 실험을 진행하였다. 표 2는 제어기를 설계하는데 있어 사용한 공칭 제정수를 나타낸다. 인버터의 스위칭 주파수는 5 kHz이고, 더블 샘플링 기법을 적용하였다. 전류 제어기의 동작 주파수는 10 kHz이고, 전류 제어 주기는 100  $\mu$ s이다. 속도 제어 주기는 400  $\mu$ s로 설정하였다. 속도 및 전류 제어 대역폭은 각각 30 Hz와 500 Hz로 설정하였고, 관측기 대역폭은 900 Hz로 설정하였다. 전동기의 엔코더로 측정된 전동기의 기계각에 M/T Method를 적용하여 기계 각속도를 계산하였다.

표 2. 전동기 및 기계시스템의 제정수

내용	값 [단위]
전동기의 정격 속도	2000 [rpm]
전동기의 정격 토크	5.25 [N·m]
축 전단부의 관성 모멘트	$1.02 \times 10^{-3}$ [kg·m <sup>2</sup> ]
축 후단부의 관성 모멘트	$1.156 \times 10^{-3}$ [kg·m <sup>2</sup> ]
축의 강성계수	241 [N·m/rad]

그림 6은 제안된 알고리즘을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우를 나타낸다. 적용하지 않은 경우는 간단히 비례적분 제어기만으로 속도를 제어하였다. 주파수 분석기(Frequency Analyzer)로 측정된 전동기 측의 개루프 전달함수의 보드 선도를 나타낸다. 비례적분 속도 제어기만으로 속도 제어하는 경우, 공진주파수에서 공진의 영향이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 반면에, 제안된 알고리즘을 사용하는 경우, 기계시스템에 포함된 공진의 영향이 저감되는 것을 확인할 수 있다.

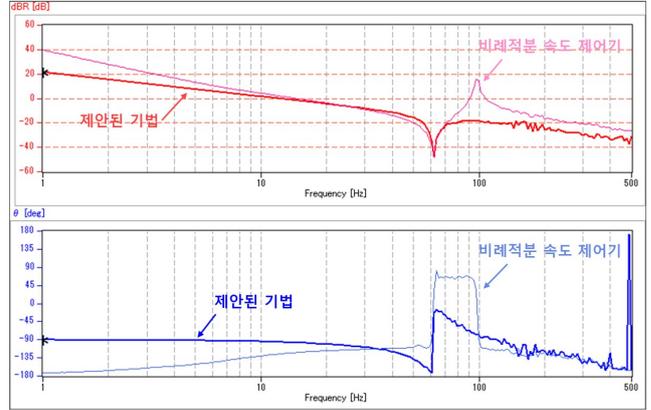


그림 6. 제안된 알고리즘의 성능 확인; 전동기 측

### 4. 결론

본 논문에서는 플렉서블 샤프트를 갖는 이관성 시스템에 대하여 ADRC 기반의 진동 저감 알고리즘을 제안하였다. ADRC를 축소차원으로 구성하여 관측기의 대역폭을 증가시켰다. 그리고, 전동기 측 관성 모멘트의 추정값을 실제값의 반으로 설정하여, 관측기의 안정도를 향상시켰다. 제안된 알고리즘은 플렉서블 샤프트를 갖는 이관성 시스템에서 나타나는 공진에 대하여 효과적이며, 공진에 의한 진동을 저감시킬 수 있다.

이 논문은 LS산전의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

### 참고 문헌

- [1] G Ellis, RD Lorenz, "Resonant Load Control Methods for Industrial Servo Drives", IEEE Industry Applications Society Annual Meeting Rome, Italy, October 8 - 12, 2000.
- [2] Q Zheng, Z Gao, "On Practical Applications of Active Disturbance Rejection Control", Proceedings of the 29<sup>th</sup> Chinese Control Conference, July 29-31, 2010, Beijing, China.
- [3] S Zhao, Z Gao, "An Active Disturbance Rejection Based Approach to Vibration Suppression in Two-Inertia Systems", Asian Journal of Control, Vol. 15, No.2, pp.350-362, March 2013.
- [4] DH Lee, JH Lee, JW Ahn, "Mechanical Vibration Reduction Control of Two-Mass Permanent Magnet Synchronous Motor Using Adaptive Notch Filter with Fast Fourier Transform Analysis", IET Electric Power Applications, 2012.
- [5] Gene F. Franklin, J. David Powell, and Michael Workman, Digital Control of Dynamic Systems. Addison Wesley Longman, 1998, Chapter 4.