

비선형 보상항을 갖는 2-관성 모터 속도 제어 시스템

이덕*, 안영주**, 이형기**

S&T대우(주) 전자/ICT연구소*, 부경대학교 전기제어공학부**

2-Inertia Motor Speed Control System with Non-linear Compensator

Duk Lee*, Young-Joo An**, Hyung-ki Lee**

S&TDaewoo Co., Ltd Electronics department*, Pukyong National University**

Abstract - 본 논문은 회전기의 비틀림 현상을 억제하기 위하여 복소 쌍입력 기술함수 기법을 이용한 제어시스템을 구성한다. 시스템의 주기적 출력은 복소 기술함수로 표현되며 제어기는 이러한 함수를 바탕으로 비선형으로 설계된다. 제한한 알고리즘의 타당성 및 성능의 우수성을 검증하기 위하여 2관성 특성을 갖는 DC 전동기 시스템에 적용하여 실시간 실험을 통해 성능을 분석하였다. 시스템을 구동하기 위한 하드웨어 보드는 PSoC(Programmable System on Chip) 프로세서를 이용하여 임베디드 형태로 구성하였으며 실시간 데이터는 제한하는 제어알고리즘이 프로그램되어 있는 PC의 Matlab/Simulink 소프트웨어와 연동이 가능하게 구성하였다.

1. 서 론

회전축을 포함한 기계적 시스템에서, 회전축의 급격한 속도변화는 비틀림 진동을 발생시킨다. 또한 축에 연결된 부하의 관성이 클수록 이러한 비틀림 진동은 더욱 커지며, 전체 시스템의 안정성에 큰 영향을 미친다. 특히 발전용 터빈 및 선박의 엔진과 스크류 사이의 대형 회전축에서 발생하는 비틀림 진동은 공진 현상을 발생시켜 축 계의 손상이나 축 계에 연결되어 있는 커플링의 풀림 등으로 전체 시스템의 불안정을 초래한다. 따라서 회전축의 비틀림 진동은 제어에 의해 억제되어야 하며, 이러한 제어를 위해 많은 방법들이 제안되었다[1]-[4].

본 논문에서는 비틀림 진동을 제어하기 위해 복소 쌍입력 기술함수의 합성기법을 제시하였으며, 이 기법을 토대로 하여 복소 쌍입력 기술함수를 갖는 비선형 제어기의 구성법을 제안하였다. 또한 미리 예측할 수 있는 복소 쌍입력 기술함수로 구성되어 있는 비선형 특성의 평가방법을 제안하였다. 복소 쌍입력 기술함수를 갖는 비선형 제어기는 두 개의 입력과 한 개의 출력을 갖는다. 첫 번째 입력과 출력은 보상하기 위한 시스템의 전향경로에 연결되고, 두 번째 입력은 외부 신호 발생기의 출력에 연결되어진다. 실시간 실험을 위하여 DC 전동기 구동회로 및 제어기에 대하여 PSoC 디바이스를 이용하여 제작하였다. 이러한 PSoC의 통합 임베디드 시스템 환경을 이용하여 DC Motor 드라이버 및 제어기를 설계함으로써 드라이버 보드의 공간 및 부품 효율성을 높이고 드라이브 스위칭 주파수의 가변 설계를 통하여 신호처리의 유연성과 복소 쌍입력 기술함수로 구성되어 있는 제어기의 타당성을 입증하였다.

2. 쌍입력 기술함수

쌍입력 기술함수를 다루기 위하여, 시스템 입력 $x(t)$ 는 두 정현파 입력 $x_1(t)$ 와 $x_2(t)$ 의 선형합으로 다음과 같이 표현된다고 가정한다.

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t) \quad (1)$$

여기서 각각의 신호는 다음의 주기함수로 주어진다.

$$x_1(t) = \alpha \cdot \sin\theta_1, \quad -\pi \leq \theta_1 \leq \pi \quad (2)$$

$$x_2(t) = \beta \cdot \sin\theta_2, \quad -\pi \leq \theta_2 \leq \pi \quad (3)$$

이며, 여기서 α 와 β 는 각각 정현파 입력신호의 진폭이며, $\theta_1 = \omega_1 t$ 과 $\theta_2 = \omega_2 t$ 이다. 또한, 비선형 요소에 인가되는 두 정현파 입력신호 $x_1(t)$ 와 $x_2(t)$ 의 주파수비는 $\gamma = \omega_2/\omega_1$ ($\omega_1 \ll \omega_2$)이며, 식(1)의 입력신호 $x(t)$ 에 대하여 비선형 요소를 인가할 경우 비선형 요소의 출력 $y(t)$ 는 비정현파특성을 가지며, 비선형 요소의 등가이득인 DIDF로 나타내면 다음과 같다.

$$N_p(\alpha, \beta) = \frac{4}{\pi^2 \beta^2} \int_0^\alpha \int_0^\beta \frac{x_1 \cdot y(x_1, x_2)}{\sqrt{\alpha^2 - x_1^2} \sqrt{\beta^2 - x_2^2}} dx_1 dx_2 \quad (4)$$

여기서 이것은 모든 $x_1 \in (0, \alpha), x_2 \in (0, \beta), \alpha > 0, \beta > 0$ 에서 변수 $x_1(t)$ 에 대하여 기함수(odd function)임을 의미하며, 변수 $x_2(t)$ 에 대해서는 우함수(odd function)임을 의미한다. 주어진 비선형 요소의 출력에 대한 DIDF의 합성 문제는 식 (4)에 역(inverse) 기술함수를 적용하여 산

출할 수 있으며 따라서, Volterra의 제1 적분식[2]을 이용하여 출력 $y(x_1, x_2)$ 를 구하면 다음과 같다.

$$y(x_1, x_2) = \frac{1}{x_1} \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_2} \int_0^{x_1} \int_0^{x_2} \frac{z^3 s N_p(z, s)}{\sqrt{x_1^2 - z^2} \sqrt{x_2^2 - s^2}} dz ds \quad (5)$$

여기서 $y(x_1, x_2)$ 에서 $N_p(\alpha, \beta)$ 는 정현파 입력 신호의 진폭 α 와 β 에 대하여 우함수이므로 다음과 같이 표현된다.

$$N_p(\alpha, \beta) = N_p(-\alpha, -\beta) \quad (6)$$

3. 비선형 제어기의 설계

본 절은 앞서 설명한 CDIDF 기법을 이용하여 시스템의 응답성능을 개선하기 위한 비선형 보상기의 설계를 서술한다. 여기서, 비선형 보상기 N_h 는 다음과 같이 우선 정의된다.

$$N_h = N_p + jN_q \quad (7)$$

보상기가 적용되지 않은 상태의 시스템에 대한 Nyquist 임계점(critical point)를 다음과 같이 간주할 경우

$$P_c = -1 + j0 \quad (8)$$

가 되며 전체 시스템의 Nyquist 임계점은 다음과 같이 전개된다.

$$P_c = \frac{-(1 + N_{hp})}{(1 + N_{hp})^2 + N_{hq}^2} + j \frac{N_{hq}}{(1 + N_{hp})^2 + N_{hq}^2} \quad (9)$$

또한 시스템의 페루프 전달함수 F 는

$$F = \frac{NG}{1 + NG} \quad (10)$$

이며, 여기서 각 전달함수는 다음과 같으며

$$G = KG(s) = x + jy, \quad N = N_h + 1 = \lambda + j\mu$$

식 (10)의 크기를 M 으로 정의하면 보상기를 적용하였을 경우의 M 의 궤적은 다음은 원의 방정식으로 표현된다.

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = R^2 \quad (11)$$

여기서 각각의 파라미터는 다음과 같다.

$$x_c = \frac{\lambda M^2}{(\lambda^2 + \mu^2)(1 - M^2)}, \quad y_c = -\frac{\mu M^2}{(\lambda^2 + \mu^2)(1 - M^2)}, \quad R = \frac{M}{(\lambda^2 + \mu^2)^{1/2}(1 - M^2)}$$

따라서 비선형 보상기의 Nyquist 임계점은 다음 식의 직선상에 위치하게 된다.

$$y = -\frac{y_c}{x_c} x = -\frac{\mu}{\lambda} x \quad (12)$$

4. 2관성 구조를 갖는 전동기 시스템

산업용 서보시스템은 대부분 다수의 관성모멘트와 탄성을 갖는 축으로 연결된 다관성 시스템으로 구성되어진다. 이들 대부분의 시스템은 2관성 진동모델로 근사화되어지며 또한 이러한 모델을 통해 시스템의 동특성을 분석한다. 이 시스템의 구동모터는 회전축을 통해 연결된 하나의 부하로 구성되어지며, 비틀림 강성을 갖는 회전축의 강도에 따라 회비틀림 탄성계수를 결정되어진다. 또한 이러한 관성 시스템은 전동기의 급격한 속도 변화가 있을 경우 탄성요소인 스프링의 비틀림 토크에 의해 불규칙한 진동이 발생되며 이러한 현상은 시스템의 불안정한 요소가 작용된다. 이 전동기 시스템 입력은 전동기 구동전압 V 이며, 출력은 전동기 속도 Ω_M 과 부하속도 Ω_L 로 할 때, 운동방정식을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} G_1 & G_2 & 0 \\ -1 & G_3 & 1 \\ 0 & 1 & G_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_M \\ T_S \\ \Omega_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \\ 0 \\ T_L \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서 V, Ω_M, Ω_L 는 전동기의 구동 입력전압, 전동기 속도, 그리고 부

하속도를 각각 나타내면, 각각의 전달함수는 다음과 같다.

$$G_1 = \frac{1 + G_M G_e K_V K_T}{G_M G_e K_T}, \quad G_2 = \frac{1}{G_e K_T}, \quad G_3 = \frac{1}{K_S}$$

$$G_4 = -\frac{1}{G_L}, \quad G_M = \frac{1}{J_M s + B_M}, \quad G_L = \frac{1}{J_L s + B_L}$$

$$G_e = \frac{1}{L_a s + R_a}$$

또한 외란 토크 항을 0으로 두고 전동기 속도출력 Ω_M 에 대한 전달함수는 다음과 같다.

$$G_p(s) = \frac{\frac{s}{K_S G_L} + 1}{\left(\frac{1}{G_M G_e K_T} + K_V \right) \left(\frac{s}{K_S G_L} + 1 \right) + \frac{1}{G_e G_L K_T}} \quad (14)$$

여기서 각각의 전달함수는 다음과 같다.

$$B_p = \frac{s}{K_S G_L} + 1$$

$$A_p = \left(\frac{1}{G_M G_e K_T} + K_V \right) \left(\frac{s}{K_S G_L} + 1 \right) + \frac{1}{G_e G_L K_T}$$

$$C_p = \frac{1}{G_e K_T} + \left(\frac{1}{G_M G_e G_T} + K_V \right) \frac{s}{K_S}$$

여기서 전동기의 인덕턴스와 부하의 점성마찰계수는 상대적으로 매우 작으므로 간편화를 위하여 무시하였다.

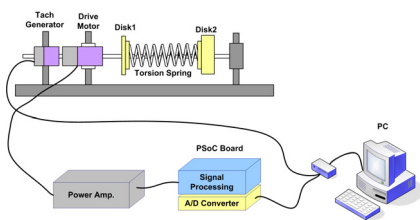
5. 실시간 실험 및 결과 고찰

본 연구 방법의 타당성을 검토하기 위하여 시뮬레이션과 실험을 행하였다. 그림 1은 실험장치 연결도이고 사진 6.1은 2-관성 시스템의 실험장치이다. 실험장치는 PC, DC전동기, 속도 검출을 위한 TG(Tach Generator), 비틀림 스프링, 전동기 구동용 Power Amp 및 Realtime 보드 등으로 구성되어 있다.

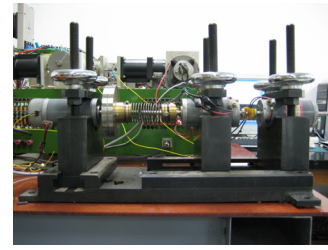
두 개의 DC 모터는 서로 다른 원판과 결합되어 있으며 서로 동일한 중심축 상에 고정된다. 오른쪽의 DC 모터는 회전축을 구동하기 위해 사용되고, 왼쪽의 DC 모터는 속도 피드백용 모터로 사용된다.

그림 1에 2관성시스템의 실험장치의 블록선도를 나타내었다. 제어기 구현 장치로 사용된 Realtime 내장 보드는 고속데이터 연산을 위한 DSP processor와 A/D, D/A 컨버터를 내장하고 있다. PC에서 Matlab의 Simulink로 작성한 프로그램을 DSP 보드로 이식하거나, DSP 보드에서 PC로 출력신호를 보내기 위해 PCI 버스를 통해 데이터 교환이 이루어진다. Matlab의 Simulink에서 제작한 모터 제어 신호를 아날로그 전압으로 D/A 컨버터를 통하여 출력하고 부하속도에 대한 전압신호를 A/D 컨버터를 통하여 피드백 입력 받는다. PSoc로 제작한 DC 모터 드라이버는 PC의 모터 제어 아날로그 신호를 PSoc 내부에 설계된 신호 변환기에 의하여 PWM파형으로 변환되며 최종적으로 전력 증폭된 신호를 출력하여 DC 모터를 구동 시킨다.

본 논문에서 설계한 비선형 보상기를 속도 제어 시스템에 적용하여 모터와 부하의 속도응답을 비교하는 실험을 하였다. 그림 2(a)는 PI제어기를 사용한 속도 제어시스템의 출력응답이고, 그림 2(b)는 비선형 보상기를 사용하여 실험한 출력응답을 나타내었다. 그림 2(a)에서 출력응답의 Percent Overshoot가 46.67%이고 Peak Time는 3.55초이다. 따라서 PI제어기만을 사용하였을 경우 Overshoot 및 Peak Time이 증가함을 알 수 있다. 그러나 비선형 보상기를 사용 하였을 경우의 시스템의 출력응답은 그림 2(b)와 같으며 응답은 Percent Overshoot가 11.67%이고 Peak Time은 2.16초이며, Settling Time은 5.58초이다. 따라서 CDIDF 비선형 보상기를 사용하였을 때, Percent Overshoot 및 Peak Time, Settling Time을 줄일 수 있다. CDIDF 비선형 보상기를 사용한 속도제어시스템은 step 설정 속도를 인가 했을 경우 출력응답특성이 입력에 잘 수렴함을 알 수 있다. 또한 입력과 출력 응답특성의 위치 편차가 없음을 보여 주고 있다. 따라서 CDIDF 비선형 보상기를 적용시키면 과도응답과 편차를 줄여 시스템의 응답을 개선시킬 수 있다.

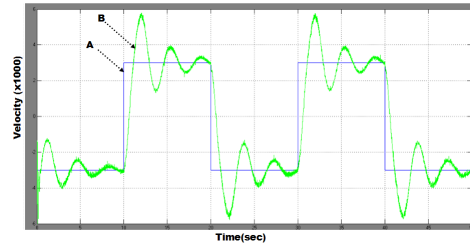


(a) 2 관성 DC 전동기 구성도

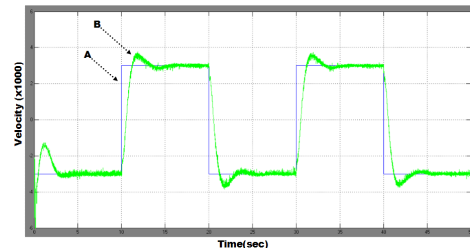


(b) 실시간 실험장치의 실제배치도

그림 1 DC 전동기 실시간 실험 세트



(a) PI 제어시스템의 응답파형
(A: 기준속도, B: 실제응답)



(b) 비선형 DIDF 보상시스템의 응답파형
(A: 기준속도, B: 실제응답)

그림 2 DC 전동기 실험결과 파형

6. 결론

본 논문은 비틀림 진동을 가지는 관성 시스템의 속도제어를 위해 쌍 입력 기술함수를 이용한 비선형 보상항을 갖는 CDIDF 제어기를 설계하였고 시뮬레이션과 실험을 통하여 성능의 우수성을 입증하였다. 또한 제안한 PSoc를 이용한 비선형 보상기를 통한 2-관성 시스템은 진동 성분의 제거 및 빠른 응답 특성의 장점을 제시하였다. 또한 모터와 부하간의 속도차로 인한 회전축의 비틀림 진동을 억제하여 전체 시스템의 안정성을 동시에 확보 할 수 있었다.

[참고문헌]

- [1] K. Yuki, T. Murakami and K. Ohnishi, "Vibration control of 2 mass resonant system by resonance ratio control," *IEEE Int. Conf. Industrial Electronics*, vol.3, pp. 2009-2014, 1993.
- [2] K. Sugiura and Y. Hori, "Vibration suppression in 2- and 3-mass system based on the feedback of imperfect derivative of the estimated torsional torque," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 43, no. 1, pp. 56-64, 1996.
- [3] Y. Wu, K. Fujikawa and H. Kobayashi, "A torque control method of two-mass resonant system with PID-P Controller," *Proc. of 5th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, Coimbra, Portugal, pp.240-245, 1998.
- [4] K. Date, H. Ohmori, A. Sano, Y. Todaka and H. Nishida, "Speed control of two mass resonant system by new simple adaptive control scheme," *Proc. of the 1998 IEEE Int. Conf. on Control Applications*, Trieste, Italy, pp. 1120-1124. 1998.