

DSP를 이용한 BLDC 모터의 H-infinity 속도 제어기 설계

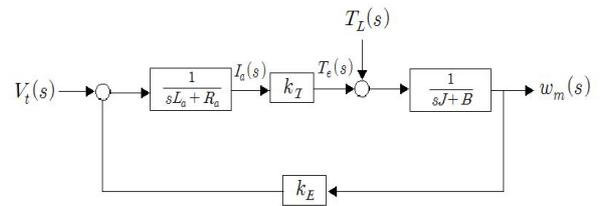
장소현*, 고다솜*, 조남훈*
 송실대학교 전기공학과*

H-infinity Speed Controller Design for BLDC Motor using DSP

So-Hyun Jang*, Da-Som Ko*, Nam-Hoon Jo*
 Department of Electrical Engineering, Soongsil University*

Abstract - BLDC 모터는 고효율, 비 관성에 의한 큰 토크, 제어의 단순성과 같은 뚜렷한 장점을 때문에 일반적으로 로봇공학 및 항공 우주, 자동차 같은 응용 분야에 널리 사용된다. 따라서 사용자가 원하는 속도를 일정하게 유지하는 것은 중요하다. BLDC 모터는 무게 변화와 같은 파라미터 변화나 센서 잡음, 외부환경 변화에 따른 외란의 영향이 항상 존재하게 된다. 하지만 일반적인 제어기 설계방법으로는 파라미터 변화, 센서 잡음이나 외란의 영향에 효과적으로 대응하는 것이 쉽지 않다. 본 논문에서는 강인 제어 기법 중 하나인 H-infinity 제어기법을 BLDC 모터에 적용하여 속도제어기를 설계하였다. 또한 DSP 구현을 통하여 일반적으로 널리 사용되는 PI 제어기와의 비교를 통해 H-infinity 속도 제어기의 우수성을 보였다.

이용하여 그림 1과 같은 BLDC 모터의 블록선도를 얻을 수 있다. [6]



〈그림 1〉 BLDC 모터의 블록 선도

1. 서 론

BLDC 모터는 직류 전동기와 전기적인 특성은 유사하지만 전자적인 정류를 사용하여 유지보수가 필요한 기계적인 접촉 구조의 정류 기구를 제거하여 신뢰성을 향상시킨 모터이다. 유도 전동기에 비해 높은 효율을 가지고 있고 고성능 토크 컨트롤을 수행하기 쉽다 [1]. BLDC 모터는 이러한 고효율, 비 관성에 의한 큰 토크, 제어의 단순성, 가벼운 중량, 컴팩트한 디자인, 유지보수가 쉬운 점과 같은 뚜렷한 장점들 때문에 일반적으로 로봇공학 및 자동차, 항공 우주, 자동차, 수치 제어, 기계, 제조 및 군사와 같은 응용 분야에 널리 사용된다 [2-4].

BLDC 모터는 무게, 온도, 외부 환경에 의한 파라미터 변화와 제조환경에서의 모델링 오차, 부하토크 외란이 항상 존재한다. 하지만 일반적인 제어기 설계방법만으로는 제어 시스템에서 항상 문제가 되는 외란, 모델링 오차 등의 영향에 효과적으로 대응하는 것이 쉽지 않다. 따라서 적응 제어, 최적 제어와 같은 고급제어기법들의 적절한 응용이 필요하지만, 이러한 기법들은 그 구조가 복잡하여 구현하는데 어려움이 있어서, 저가로 고급 제어사양을 만족하는 제어 시스템을 구현하기는 쉽지 않다 [5].

본 논문에서는 강인 제어 기법 중 하나인 H-infinity 제어기법을 BLDC 모터에 적용하여 속도제어기를 설계하였다. 제어기 설계 시 실제 파라미터를 모른다고 가정하여 DSP 실험을 통하여 공칭모델을 추정하여 파라미터에 의존적이라는 기존 제어기의 단점을 보완하였다. 또한 DSP 구현을 통하여 일반적으로 널리 사용되는 PI 제어기와의 비교를 통해 H-infinity 속도 제어기의 우수성을 보였다.

2. 본 론

2.1 BLDC 모터 모델링

BLDC 모터의 출력 P_e 는 식 (1)과 같이 표현되며, 출력 전력 P_e 와 회전자의 각속도 w_m 으로부터 모터의 토크는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$P_e = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c \quad (1)$$

$$T_e = \frac{P_e}{w_m} = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{w_m} = k_T I_a \quad (2)$$

식 (2)에서 기계 각속도 $w_m = \frac{w_r}{P}$ 이며, w_r 은 전기 각속도, P 는 극수이다. 또한, 기계 시스템의 운동 방정식으로 토크를 표현하면 식 (3)과 같다.

$$T_e = T_L + J \frac{dw_m}{dt} + B w_m \quad (3)$$

식 (3)에서 T_L 는 부하토크, J 는 관성모멘트, B 는 마찰계수이다. BLDC 모터의 전달함수를 계산하기 위한 라플라스 변환을

2.2 H-infinity 제어기

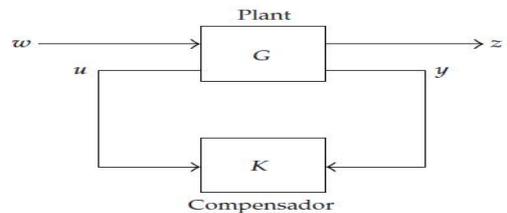
그림 2는 H-infinity 제어시스템의 표준 구조를 나타낸다. 기본적으로 플랜트 G 와 제어기 K 로 구성되어 있으며, G 는 각각 2개의 입력과 출력을 가지는 시스템으로 간주한다. w 는 시스템에 들어오는 모든 외부의 입력 신호, z 는 외란에 의한 출력으로 성능과 안정도를 위해 최소화되어야 하는 값이고 y 는 실제로 측정이 가능하여 제어기 K 에서 쓸 수 있는 신호, 그리고 u 는 제어기에서 플랜트로 보내는 제어 신호이다. 그림 2를 플랜트와 제어기의 전달함수로 표현하면 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} Z &= G_{zw} w + G_{zu} u \\ y &= G_{yw} w + G_{yu} u \\ u &= Ky \end{aligned} \quad (4)$$

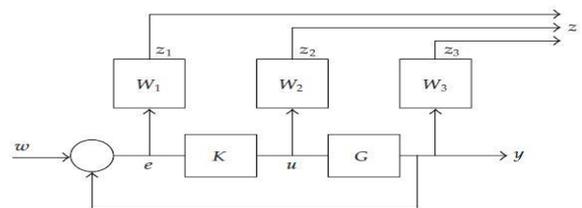
식 (4)를 z 에 대하여 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$z = [G_{zw} + G_{zu} K (I - G_{yu} K)^{-1} G_{yw}] w = T_{zw} w \quad (5)$$

H-infinity 제어기 설계 문제는 모든 입력 w 의 에너지를 1보다 작거나 같도록 제약하는 가운데 출력 z 를 최소화 할 수 있는 안정 제어기 K 를 찾는 것이고 이는 w 에서 z 로의 전달함수 T_{zw} 의 H-infinity 노름(norm)을 최소화 하는 것과 같다 [7].



〈그림 2〉 H-infinity 제어시스템의 구조.



〈그림 3〉 H-infinity 디자인을 위한 가중함수가 포함된 플랜트

가중함수가 포함된 플랜트(The augmented plant)는 그림 3에서 보여 지는 것과 같이 가중함수 W_1 , W_2 그리고 W_3 을 포함하여 나타내어진다. 제어 목적을 이루기 위해서, 출력은 전달 가중함수 $z_1 = W_1$; $z_2 = W_2$; $z_3 = W_3$ 로 선택되어진다.

mixed sensibility의 함수 값은 식 (6)과 같이 주어진다.

$$T_{y1u1} = \begin{bmatrix} W_1 S \\ W_2 R \\ W_3 T \end{bmatrix}, \begin{matrix} S = (I + GK)^{-1}, \\ R = K(I + GK)^{-1}, \\ T = GK(I + GK)^{-1}, \end{matrix} \quad (6)$$

W_1 은 기준 입력에 대한 가중함수, W_2 는 제어 입력에 대한 가중함수, W_3 는 강인성에 대한 가중함수이다 [8].

2.3 실험

본 장에서는 외란 입력 시 기존 PI 속도 제어기와 제안된 H-infinity 기반 제어기로 구성된 BLDC 모터 시스템의 외란 제거 성능을 실험을 통해 비교하였다. DSP는 TI사의 TMS320F28335 (150MIPS, 32bit)를 사용하였다.

제어기 설계 시 사용된 공칭모델 P_n 은 실험을 통하여 식 (7)과 같이 정하였다.

$$P_n = \frac{3500}{0.03s + 1} \quad (7)$$

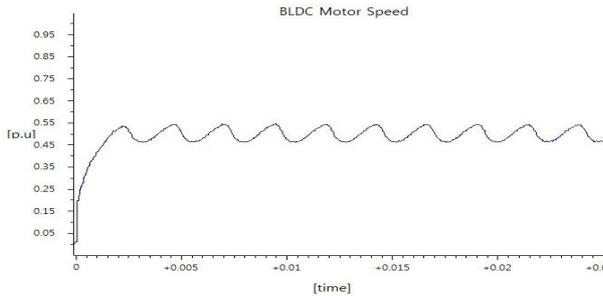
공칭모델로 주어지는 시스템을 제어하기 위한 PI 제어기를 다음과 같이 선정하였다.

$$C(s) = 0.001 \frac{0.1s + 1}{s} \quad (8)$$

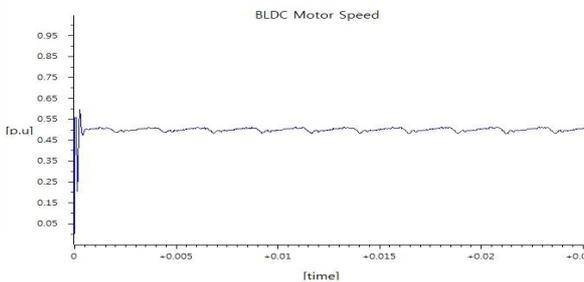
또한, H-infinity 제어기를 설계하기 위한 가중함수 W_1 , W_2 , W_3 는 다음과 같이 선정하였다.

$$W_1(s) = \gamma \frac{1}{\left(\frac{1}{100}s + 1\right)^2} \frac{1}{s}, \quad W_2(s) = 0, \quad W_3 = \frac{s^2}{1000} \quad (9)$$

실험에서 기준입력은 모터의 정격 속도의 50%인 0.5 [p.u], 1500 [rpm]으로 하였다.



<그림 4> 외란이 존재할 때 PI 속도 제어기의 성능



<그림 5> 외란이 존재할 때 H-infinity 속도 제어기의 성능

그림 4와 5에서 보여 지는 것과 같이 PI 제어기에 비해 H-infinity 제어기의 외란제거 성능이 뛰어난 것을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 강인 제어 기법 중 하나인 H-infinity 제어기법을 BLDC 모터에 적용하여 속도제어기를 설계하였다. BLDC 모터를 구동할 때 외부에서 외란이 존재하는 경우 발생하는 속도변동을 억제하는 것을 제어목표로 하였다. DSP 구현을 통하여 일반적으로 널리 사용되는 PI 제어기와 비교를 통해 이론뿐만 아니라 실제적으로도 H-infinity 속도 제어기가 외란이 존재 할 경우 PI 속도 제어기 보다 뛰어난 외란 제거 성능을 보임을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 산업통상자원부 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (NO. 20134010200570)

[참 고 문 헌]

- [1] G. Bauerlein, "A brushless DC motor with solid-state commutation", IRE National Convention Record, pp. 184~190, 1962.
- [2] J. Fang, X. Zhou, and G. Liu, "Instantaneous torque control of small inductance brushless DC motor", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no.12, pp. 4952-4964, Dec. 2012.
- [3] S. R. Gurumurthy, A. Sharma, S. Sarkar and S. S. Kumar, "Effect of leakage inductance on the performance of BLDC machine used in flywheel energy storage applications", International Conference on Power, Signals, Controls and Computation (EPSCICON), 2014 International Conference on. IEEE, pp. 1-5, Jan. 2014.
- [4] F. Aghili, "Fault-tolerant torque control of BLDC motors", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26, no. 2, pp. 355-363, Feb. 2011.
- [5] A. V. Sant and K. R. Rajagopal, "PM synchronous motor speed control using hybrid fuzzy-PI with novel switching functions", IEE Transactions on Magnetics, vol. 45, no. 10, pp. 4672-4675, Oct. 2009.
- [6] 이주원, "외란 관측기 기반 제어기 설계를 이용한 BLDC 전동기의 강인 속도 제어," 석사학위논문, 숭실대학교 대학원, 2013.
- [7] 강태삼, 윤광준, 하태현, 이기건, "쿼드러터의 H-infinity 제어시스템 설계", 제어로봇시스템학회 논문지, 2015.
- [8] Ximena Celia Mendez Cubillos and Luiz Carlos Fadelha de Souza, "Using of H-infinity control method in attitude control system of rigid-flexible satellite", Mathematical Problems in Engineering, 2010.