

외란 관측자를 이용한 BLDC 모터의 강인 제어

유병삼*, 신두진*, 김광영*, 허욱열*, 김진환**
 인하대학교 전기공학과*, 두원공과대학 컴퓨터 응용제어학과**

Robust Control of Brushless DC Motor Using Disturbance Observer

Yu Byung Sam*, Shin Doo Jin*, Kim Kwang Young*, Huh Uk Youl*, Kim Jin Hwan**
 Dept. of Electrical Engineering INHA University*, DOOWON Technical College**

Abstract - This paper proposes a robust control system with the disturbance observer for BLDC servo system. The overall control system is composed of the speed controller which is implemented with PI controller and the disturbance observer with free parameters.

The BLDC servo system can improve the closed loop characteristics without affecting the command input response. The characteristics of the closed loop system is improved by suppressing disturbance effectively with the disturbance observer. Measurement noise is also considered by adjusting bandwidth of free parameters. We can overcome the drawbacks of the conventional PI controller.

Finally, the performance of the controller is analyzed theoretically and some simulation results are presented to demonstrate the better performance than the conventional PI controllers.

1. 서 론

높은 파워 밀도와 낮은 전기적 노이즈의 특성을 갖는 BLDC 모터는 PMSM과 유사한 구조로서 동적 응답이 우수하고 넓은 속도 범위에 대하여 높은 효율을 유지하는 특성이 있다. 따라서, 정밀성을 요구하는 제어나 제어이론에 기초한 알고리즘의 실현에 있어 아주 유연성 있게 대응할 수 있는 개발환경을 갖추고 있음으로 인하여, 산업분야에서의 응용 범위가 확대되고 있다.[1][2]

BLDC 모터 제어에 가장 널리 사용되는 제어기는 PI 제어기와 피드포워드 제어기인데 PI 제어기는 과도 상태에서 오버슈트가 발생하고 전체 시스템이 3차 이상인 경우는 수학적 분석이 어렵다. 피드포워드 제어기는 입력 추적 속도와 정도가 내부 제어기 이득에 관계없이 빠르지만 비선형성과 외부 외란등에 민감한 단점을 갖는다.[3][4] BLDC 모터의 시스템에서 대부분의 제어기는 모델이 정상적으로 동작하고, 최적의 상태를 가정하고 설계되어 진다. 이렇게 하여 얻어진 제어기를 실제 시스템에 적용할 경우 외란이나 모델링 오차의 영향 때문에 원하는 출력을 제대로 얻어내지 못하는 경우가 많다. 특히 매우 정밀한 제어를 요구하는 분야에서는 이러한 오차가 큰 손실을 만들어 내는 결과를 초래할 수 있다. 이러한 시스템의 외란을 억제하거나 모델링 오차의 영향을 받지 않는 강인한 제어기를 필요로 한다. 이를 위해 외란 관측자를 이용하면 시스템에 외란 또는 모델의 불확실성에 대해 견실한 제어효과를 나타낸다.

일반적인 외란 관측자는 직류 외란(dc-disturbance)의 보상에만 제한되어지고 외란의 제어를 위한 주파수 대역폭을 조절하는 때는 용이하지 않았다.[5][6] 따라서, 본 논문에서는 산업 응용 분야에 많이 이용되어지고 있는 PI 제어와 외란 관측자를 사용하였을 경우에 대한

성능 비교를 하였으며 효과적인 외란 억제를 위하여 외란 관측자 내의 자유 매개변수를 조절하여 이러한 문제점을 개선하였다. 또한 모의 실험을 통하여 강인성에 대한 성능을 보인다.

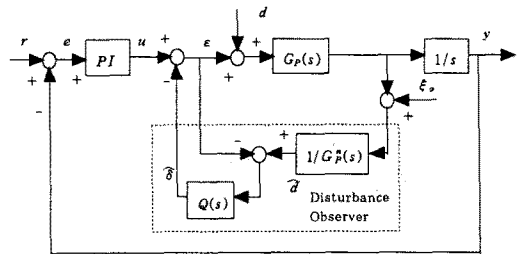
2. 본 론

2.1 시스템의 구성

그림 1의 (a)는 전체 시스템의 구성인 BLDC 모터와 공조기 실내기에 사용되는 Cross flow fan을 포함하고 있는 시스템의 단면도이다. 그림 1의 (b)는 (a)의 시스템의 전체 블록선도이다.



(a) 시스템의 구조 단면도



(b) 시스템의 블록선도
 그림 1. 시스템 구성도

여기서, $G_p(s)$: BLDC 모터의 전달 함수
 u : 기준 속도 입력, ϵ : 속도 오차 입력
 $\hat{\epsilon}_o$: 속도측정잡음 입력, d : 외란 입력
 \hat{d} : 추정 외란, $G_p^*(s)$: 공칭 전달 함수

2.2 BLDC 모터의 수학적 모델링

BLDC 모터의 토크방정식은 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

$$J_m \frac{d\omega_m(t)}{dt} + B_m \omega_m(t) = K_B i_a(t) \quad (1)$$

여기서, J_m : 모터의 관성 모멘트
 B_m : 모터의 점성 마찰계수
 ω_m : 모터의 기계 각속도

$$V(t) = L_a \frac{di_a(t)}{dt} + R_a i_a(t) + K_B \omega_m(t) \quad (2)$$

여기서, R_a : 전기자 저항
 L_a : 전기자 인덕턴스
 i_a : 전기자 전류
 V : 입력 전압
 K_B : 역기전력 상수

식 (1)과 (2)를 전달함수 형태로 표현하면 각각 식 (3)과 (4)와 같다.

$$sJ_m \omega_m(s) + B_m \omega_m(s) = K_B i_a(s) \quad (3)$$

$$V(s) = sL_a i_a(s) + R_a i_a(s) + K_B \omega_m(s) \quad (4)$$

따라서, 전달 함수는 식 (5)와 같다.

$$\frac{\omega_m(s)}{V(s)} = \frac{K_B}{L_a J_m s^2 + (L_a B_m + R_a J_m) s + R_a B_m + K_B^2} \quad (5)$$

2.3 외란 관측자

실제의 시스템과 모델링된 시스템 사이에는 오차가 생기기 마련이고 측정신호의 잡음에 의해서도 시스템의 성능이 저하된다. 본 논문에서는 모델링으로 생기는 오차와 측정 잡음도 외란으로 간주한다.

그림 2는 외란 관측자의 블록선도이며 외란 관측자에 의해 추정된 외란을 \hat{d} 로 정의하면 식 (6)과 같다.

$$\hat{d} = \frac{1}{G_P^*(s)} \omega - \varepsilon \quad (6)$$

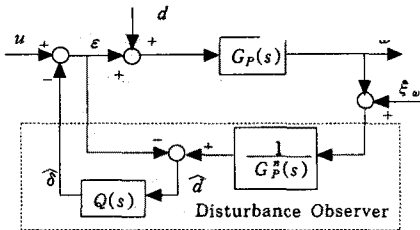


그림 2. 외란 관측자의 블록선도

추정되는 외란 \hat{d} 는 그림 2에서 보는 것과 같이 되며 임피어 외란을 상쇄시킨다. 그러나, 식 (6)의 외란 관측자의 공칭모델 $1/G_P^*(s)$ 은 분자의 차수가 분모의 차수보다 크기 때문에 그 자체로서는 실현될 수 없으므로 필터인 $Q(s)$ 의 차수를 $G_P^*(s)$ 의 차수와 같거나 크게 한다.

기준 속도 입력 u 와 속도 측정 잡음 ε_s 를 고려한 속도 출력을 보면 식 (7)과 같다.

$$\omega = G_{u\omega}(s)u + G_{d\omega}(s)d + G_{\varepsilon_s\omega}(s)\varepsilon_s \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } G_{u\omega} &= \frac{G_P G_P^*}{G_P^* + (G_P - G_P^*)Q} \\ G_{d\omega} &= \frac{G_P G_P^* (1-Q)}{G_P^* + (G_P - G_P^*)Q} \\ G_{\varepsilon_s\omega} &= - \frac{G_P Q}{G_P^* + (G_P - G_P^*)Q} \end{aligned} \quad (8)$$

2.4 매개변수 $Q(s)$ 의 설계

식 (8)에서 $Q(s) \approx 1$ 이면

$$G_{u\omega} \approx G_P^*, G_{d\omega} \approx 0, G_{\varepsilon_s\omega} \approx -1 \quad (9)$$

즉, 외란 입력에 대해 강인한 시스템이 된다. 만약 $Q(s) \approx 0$ 이면

$$G_{u\omega} \approx G_P, G_{d\omega} \approx G_P, G_{\varepsilon_s\omega} \approx 0 \quad (10)$$

즉, 외란 관측자가 없는 것과 같이 동작한다. 따라서, $Q(s)$ 는 저주파 영역에서는 1에 가깝고 고주파 영역에서는 매우 작은 값을 갖도록 설계되어야 한다.

그림 2에서 기준 입력 응답을 $G_{u\omega}(s)$ 라고 할 때, 페루프 특성은 다음과 같다.

$$S(s) = (1 - Q(s))(1 - G_P(s)) \quad (11)$$

$$G_{d\omega}(s) = S(s) G_P^*(s)$$

여기서, $S(s)$: 감도함수(sensitivity function)

$G_{d\omega}(s)$: 외란 입력 응답

이때, 감도함수의 노음 $|S(j\omega)|$ 를 충분히 작게 하여 시스템의 견실성을 얻도록 하는 것이 좋다. 센서의 잡음 ε_s 로부터 속도 출력 ω 까지의 전달 함수를 표시하는 보감도 함수는 식 (12)와 같다.

$$T(s) = 1 - S(s) \quad (12)$$

보감도 함수의 노음 $|T(j\omega)|$ 역시 작은 값을 유지하도록 해야 한다. 그러나 전 주파수 영역에 걸쳐 두 개의 노음 $|S(j\omega)|, |T(j\omega)|$ 를 동시에 작은 값으로 유지한다는 것은 사실상 불가능하다. 외란의 역제는 저주파 영역에서 더욱 중요하고, 잡음 성분은 보통 고주파 영역에서 높은 값을 갖는다.

$Q(s)$ 의 차단 주파수(cutoff frequency)가 $G_P(s)$ 보다 훨씬 높다면, 근사적으로 식 (13)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} |S(j\omega)| &= |1 - Q(j\omega)| \\ |T(j\omega)| &= |Q(j\omega)| \end{aligned} \quad (13)$$

따라서, $S(s)$ 와 $T(s)$ 의 노음의 조건을 만족하기 위하여, $Q(s)$ 는 저역 통과 필터, $1 - Q(s)$ 는 고역 통과 필터의 특성을 갖도록 설계해야 한다.

그러므로, 저역 통과 필터로서의 $Q(s)$ 는 식 (14)와 같다.

$$Q(s) = \frac{3(\tau s) + 1}{(\tau s)^3 + 3(\tau s)^2 + 3(\tau s) + 1} \quad (14)$$

여기서 τ 는 매개변수 Q 의 차단주파수를 결정한다.

2.4 모의 실험

모의 실험에 사용된 Parameter의 값은 표1과 같다.

표1. 모의 실험에 사용한 Parameter 값

Parameter	값
상저항	1.85[Ω]
상인덕턴스	0.00129[H]
관성 모멘트	0.00255[kg · m ²]
마찰 계수	0.0137[N · m · s / rad]
토크 상수	0.58[N · m/A]

그림 3은 단위계단 기준 입력시 외란 관측자를 사용했을 경우와 기존의 PI제어를 했을 경우의 속도 응답 특성에 대한 모의 실험 결과로써 0.5초 후의 시점에서 비교하였을 경우 PI 제어시에는 목표에 도달하지 못하지만 외란 관측자 사용시에는 목표에 수렴하고 진동이 다소 줄어드는 우수한 성능을 볼 수 있다.

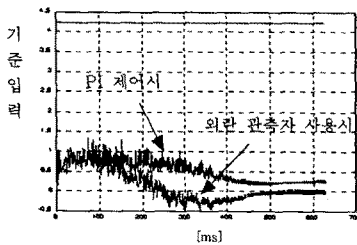


그림 3. 속도 응답 특성 곡선

그림 4는 Q필터에 대한 주파수 특성을 보여준다. 그림 4에서 보면 $Q(j\omega)$ 의 공진 최대치는 5.23[dB] 정도가 된다. 또한 $Q(s)$ 는 저역 통과 필터, $1-Q(s)$ 는 고역 통과 필터의 특성을 보이고 있다.

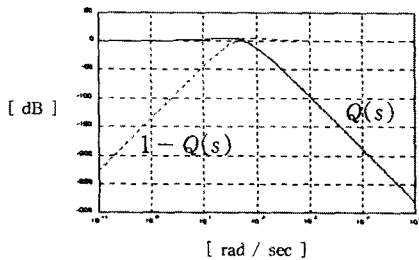


그림 4. Q필터의 주파수 특성 ($\tau=0.02$)

그림 5는 구형파 외란 인가시 외란 관측자의 성능에 관한 것으로 제안한 외란 관측자를 사용하였을 경우 효과적으로 외란을 억제하며 외란에 대하여 강인함을 알 수 있다.

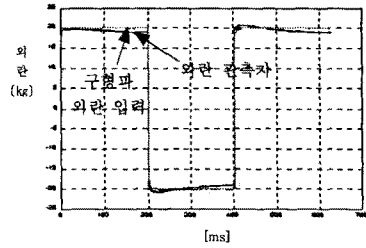


그림 5. 구형파 외란 인가시 외란 관측자의 성능

3. 결 론

본 논문에서는 외란 관측자를 이용한 강인 제어에 관한 것으로 기존 PI 제어를 사용했을 경우에 비하여 효과적인 외란 억제 및 응답 속도의 성능이 개선됨을 모의 실험을 통하여 알 수 있으며, Q필터 사용시 적절한 선택이 외란 관측자의 성능에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 또한 직류 외란에 대하여도 강인함을 모의 실험을 통하여 보였다. 실제 실험을 통해서 제안된 외란 관측자를 이용한 BLDC 모터 제어의 강인성과 전체적인 성능에 대한 고찰이 필요하다.

(참 고 문 헌)

- [1] P. Pillay and R. Krishnan, "Application Characteristics of Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motors for Servo Drives," IEEE IAS Annual Meeting, pp. 380~390, 1987.
- [2] D. Grenier, R. Mende, and J. P. Louis, "Comparison of Several Control Strategies for D. C. Brushless Drives," IECON '94, pp. 26~31, 1994.
- [3] Y. Hori, "Robust and Adaptive Control of a Servomotor Using Low Precision Shaft Encoder," IECON '93, pp. 73~78, 1993.
- [4] C. T. Johnson and R. D. Lorenz, "Experimental Identification of Friction and Its Compensation in Precise, Position Controlled Mechanisms," IEEE Trans. IAS., vol. 28, No. 6, pp. 1392~1398, November/December 1992.
- [5] K. Ohnishi, "Advanced Motion Control in Robotics," in Proc. IEEE IECON '89, Philadelphia, pp. 356~359, 1989.
- [6] L. Balmer, "Signals and Systems," Prentice Hall, pp.418~422, 1991.