

## BLDC 모터의 관측자를 이용한 강인 제어

유병삼\*, 신두진, 박익동, 허옥열  
인하대학교 전기공학과

### Robust Control using Observer for Brushless DC Motor

Byung-Sam Yu\*, Doo-Jin Shin, Eik-Dong Park, Uk-Youl Huh  
Dept. of Electrical Engineering Inha University

**Abstract** - In this paper, a robust control system with the disturbance observer is proposed for BLDC servo system. The overall control system consists of the speed controller which is implemented with PI controller and the disturbance observer with free parameters.

The proposed control system is designed the command input response and the closed loop characteristics independently by using two-degrees-of-freedom concept, so it can improve the closed loop characteristics with no influence on the command input response. The effective suppression of disturbance with the observer improves the characteristics of the closed loop of the system. And also, by fitting the bandwidth of free parameters, measurement noise is considered.

To verify the better performance of the proposed control system than that of the conventional PI controllers, the performance of the controller is analyzed theoretically and some simulation results are presented.

## 1. 서 론

현재 산업 현장에서 많이 사용되어지고 있는 BLDC 모터는 동적 특성이 우수하고 넓은 속도 범위에 대하여 높은 효율을 유지하며, 높은 파워 밀도와 낮은 기계적, 전기적 노이즈 등의 특성을 갖고 있다. 또한 회전자에 동기하여 고정자 권선에 전류를 흘려주면 전류에 비례하는 토크가 발생되기 때문에 유도기나 동기기에 비해 제어성이 뛰어나다. 그러므로, 높은 정밀성을 필요로 하는 제어나 제어이론에 기초한 알고리즘의 실현에 있어 아주 유연성 있는 대응이 가능한 개발환경을 갖추고 있으므로, 산업분야에서의 응용 범위가 확대되고 있다[1][2].

이러한 BLDC 모터 제어에는 PI 제어기와 피드포워드 제어가 가장 많이 사용되는데, PI 제어기는 과도 상태에서 발생하는 오버슈트와 전체 시스템이 3차 이상인 경우는 수학적 분석이 어려운 단점들, 피드포워드 제어기는 비선형성과 외부 외란 등에 민감한 단점들을 갖는다[3][4]. BLDC 모터 시스템에 사용되는 대부분의 제어기들이 모델이 정상적으로 동작하고 최적의 상태임을 가정하고 설계되는 것과는 달리 실제로는 외란이나 모델링 오차 등으로 인하여 원하는 출력을 제대로 얻어내기가 쉽지 않다. 특히 매우 정밀한 제어를 요구하는 분야에서는 이러한 오차로 인해 큰 손실을 얻을 수 있다. 따라서 이러한 시스템의 외란을 억제하거나 모델링 오차의 영향을 받지 않는 강인한 제어를 필요로 한다. 이를 위해 관측자를 이용하면 시스템에 외란 또는 모델의 불확실성에 대해 견실한 제어효과를 나타낸다.

일반적인 외란 관측자는 직류 외란의 보상에만 제한되어지고 외란의 제어를 위한 주파수 대역폭을 조절하는

데는 용이하지 않았다[5][6]. 따라서, 본 논문에서는 효과적인 외란 억제를 위하여 외란 관측자 내의 자유 매개변수를 조절하여 이러한 문제점을 개선하였다. 그리고 2자유도 개념을 이용하여 기존 입력응답과 폐루프 특성을 각각 독립적으로 설계하여 지령치에 대한 응답특성을 변화시키지 않으면서 외란 관측자의 자유 매개변수가 저역 통과필터의 특성을 갖도록 한다.

또한 모의 실험을 통하여 관측자를 사용하였을 경우와 관측자를 사용하지 않았을 경우에 대하여 고찰하였으며 이들 제어기는 PI 제어를 기본으로 적용하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 BLDC 모터의 모델링

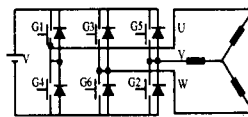


그림 1. BLDC 모터의 구동 시스템

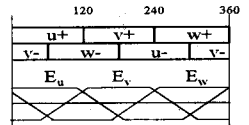


그림 2. 120° 구동형일때의 상전압과 역기전력 파형

일반적으로 BLDC 모터는 홀센서에 의해서 회전자의 위치를 검출하여 전기적 에너지를 기계적 에너지로 바꾸는 부분으로 이루어진다. 3상의 BLDC 모터는 사다리꼴의 역기전력을 가진다. 그림2와 같이 구동 방법은 120° 구동형으로 60° 간격으로 항상 두 개의 스위치가 on상태로 되어 전류가 흐른다. 이때에 u+와 v-만이 on상태일 때의 전압방정식을 세우면 식(1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 V &= R(i_u - i_v) + L\left(\frac{di_u}{dt} - \frac{di_v}{dt}\right) + E_u - E_v \\
 0 &= R(i_w - i_v) + L\left(\frac{di_w}{dt} - \frac{di_v}{dt}\right) + E_w - E_v \\
 i_v &= -(i_u + i_w)
 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $E_u, E_v, E_w$ : U, V, W 상의 역기전력

R: 권선의 저항

L: 코일의 자기 인덕턴스

식 (1)과 같은 방법으로 스위치가 바뀌는 6가지의 경우의 전압방정식을 세운다.

또한 토크 방정식을 세우면 식 (2)와 같다.

$$T = \frac{(E_u i_u + E_v i_v + E_w i_w)}{\omega} \quad (2)$$

여기서,  $\omega$ : 모터의 회전 각속도

## 2.2 시스템의 구성

그림 3은 BLDC 모터와 공조기 실내기에 사용되는 Cross flow fan을 포함하고 있는 전체 시스템 구성의 블록선도를 나타낸 것이다. 그림 3에서 점선으로 표시된 부분은 본 논문에서 제안하는 외란 관측자를 나타낸 것이다.

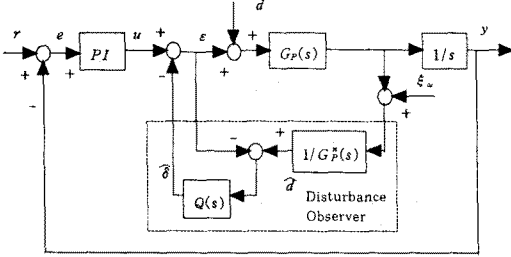


그림 3. 시스템의 블록선도

여기서,  $G_P(s)$ : BLDC 모터의 전달 함수

$u$ : 기준 속도 입력,  $e$ : 속도 오차 입력

$\xi_\omega$ : 속도 측정잡음 입력,  $d$ : 외란 입력

$\hat{d}$ : 추정 외란,  $G_P^*(s)$ : 공칭 전달 함수

## 2.3 관측자의 설계

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

그림 4는 외란 관측자의 블록선도이며 외란 관측자에 의해 추정된 외란을  $\hat{d}$ 로 정의하면 식 (3)과 같다.

$$\hat{d} = \frac{1}{G_P^*(s)} \omega - \epsilon \quad (3)$$

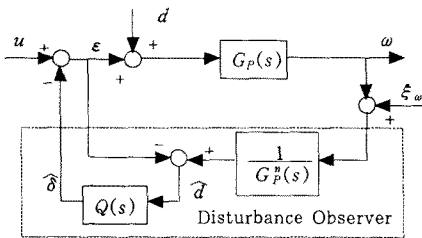


그림 4. 관측자의 블록선도

추정되는 외란  $\hat{d}$ 는 그림 2에서 보는 것과 같이 되먹임되어 외란을 상쇄시킨다. 그러나, 식 (3)의 외란 관측자의 공칭모델  $1/G_P^*(s)$ 은 분자의 차수가 분모의 차수보다 크기 때문에 그 자체로써는 실현될 수 없으므로 필터인  $Q(s)$ 의 차수를  $G_P^*(s)$ 의 차수와 같거나 크게 한다.

기준 속도 입력  $u$ 와 속도 측정 잡음  $\xi_\omega$ 를 고려한 속도 출력을 보면 식 (4)와 같다.

$$\omega = G_{u\omega}(s)u + G_{d\omega}(s)d + G_{\xi_\omega}(s)\xi_\omega \quad (4)$$

$$\text{여기서, } G_{u\omega} = \frac{G_P G_P^*}{G_P^* + (G_P - G_P^*)Q}$$

$$G_{d\omega} = \frac{G_P G_P^* (1 - Q)}{G_P^* + (G_P - G_P^*)Q} \quad (5)$$

$$G_{\xi_\omega} = - \frac{G_P Q}{G_P^* + (G_P - G_P^*)Q}$$

## 2.4 자유 매개변수 $Q(s)$

식 (5)에서  $Q(s) \approx 1$ 이면

$$G_{u\omega} \approx G_P^*, G_{d\omega} \approx 0, G_{\xi_\omega} \approx -1 \quad (6)$$

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

$$G_{u\omega} \approx G_P, G_{d\omega} \approx G_P, G_{\xi_\omega} \approx 0 \quad (7)$$

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

그림 4에서 기준 입력 응답을  $G_{u\omega}(s)$ 라고 할 때, 페루프 특성은 식 (8)과 같다.

$$S(s) = (1 - Q(s))(1 - G_P(s)) \quad (8)$$

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

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  $\xi_\omega$ 로부터 속도 출력  $\omega$ 까지의 전달 함수를 표시하는 보감도 함수는 식 (9)와 같다.

$$T(s) = 1 - S(s) \quad (9)$$

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 (10)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} |S(j\omega)| &= |1 - Q(j\omega)| \\ |T(j\omega)| &= |Q(j\omega)| \end{aligned} \quad (10)$$

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. 또한,  $Q(s)$ 의 주파수 특성에 있어서 공진 최대값은 측정 잡음에 대한 시스템의 감도에 많은 영향을 주기 때문에 분리도가 다소 작더라도 공진 최대값을 작게 해주는 방법을 선택해야 한다. 실험상의 경험으로 나타난 바로는  $|Q(j\omega)|$ 의 공진 최대치는 대략 2.0 (6dB)보다는 작아야 한다.

그러므로, 저역 통과 필터로서의  $Q(s)$ 는 식 (11)과 같다.

$$Q(s) = \frac{3(\tau s) + 1}{(\tau s)^3 + 3(\tau s)^2 + 3(\tau s) + 1} \quad (11)$$

여기서  $\tau$ 는 매개변수  $Q$ 의 차단주파수를 결정한다.

## 2.5 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 <sup>2</sup> ]
마찰 계수	0.0137[N · m · s / rad]
토크 상수	0.58[N · m/A]

그림 5는 Q필터에 대한 주파수 특성을 보여준다. 그림 5에서  $Q(j\omega)$ 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.

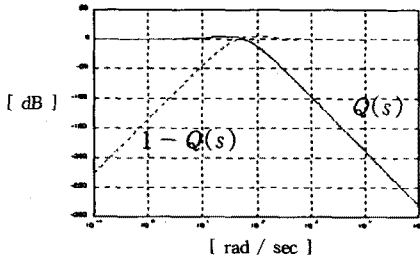
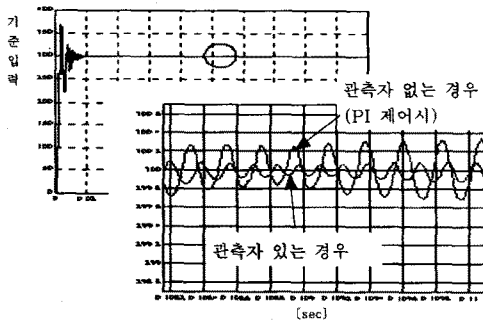
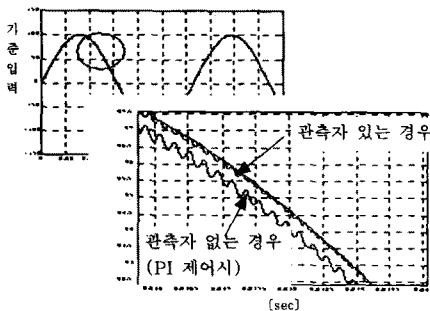


그림 5. Q필터의 주파수 특성 ( $r=0.02$ )

그림 6은 기준 입력이 각각 단위 계단 입력과 사인 입력 일 때, 관측자를 사용했을 경우와 사용하지 않았을 경우의 속도 응답 특성에 대한 모의 실험 결과이다.



(a) 단위 계단 기준 입력



(b) 사인 기준 입력  
그림 6. 속도 응답 특성 곡선

그림 6에서 관측자가 있는 경우가 관측자가 없는 경우보다 기준 입력을 잘 추종하는 우수한 성능을 볼 수 있다.

그림 7은 구형파 외란 인가시 외란 관측자의 성능에 관한 것으로 제안한 외란 관측자를 사용하였을 경우 효과적으로 외란을 억제하며 외란에 대하여 강인함을 알 수 있다.

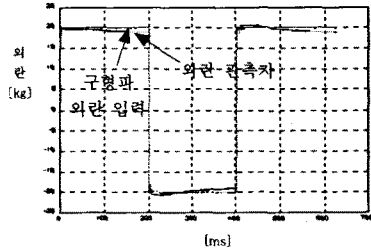


그림 7. 구형파 외란 인가시 외란 관측자의 성능

## 3. 결 론

본 논문에서는 관측자를 이용한 강인 제어에 관한 것으로 관측자를 사용하지 않은 경우에 비하여 효과적인 외란 억제 및 응답 속도의 성능이 개선됨을 모의 실험을 통하여 알 수 있으며, Q필터를 사용할 경우 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.