

BLDC 모터의 토크리플을 줄이기 위한 외란 관측기 기반 제어기 설계에 관한 연구

A Study on the Torque Ripple Reduction in Brushless DC Motors using Disturbance-Observer Controller

장 소 현* · 조 남 훈*
(So-Hyun Jang · Nam-Hoon Jo)

Abstract - In this paper, we study the problem of torque ripple minimization in Brushless DC Motors (BLDC) and proposes a disturbance observer (DOB) based controller in order to efficiently reduce the torque ripple. In the DOB based control system, an equivalent disturbance (plant disturbance and effect of modelling error) is cancelled by its estimate. When the DOB controller is applied to BLDC motors, the effect of inverter switching is considered as an equivalent disturbance and to be cancelled by the DOB controller. Through computer simulations, it is shown that the performance of the proposed DOB controller is superior to that of the conventional PI controller. In the case where the numerical values of resistance and inductance are not known exactly, it is shown that the proposed DOB controller achieves better performance than the PI controller.

Key Words : BLDC motor, Torque ripple, Parameter uncertainty, Disturbance observer

1. 서 론

영구자석 모터는 회전자 표면에 장착되거나 회전자 안에 매설된 자석에 의해 주자속이 생성된다. 자속들이 전류를 운반하지 못하기 때문에, 구리 손실은 회전자로부터 제거된다. 더 나아가, 영구자석 모터는 거의 역률 1로 전력손실이 없이 구동될 수 있다. 따라서 영구자석 모터는 유도 전동기에 비해 높은 효율을 가지고 있다. 또한 영구자석 모터는 특히 브러시리스 DC (brushless direct current; BLDC) 모터나 브러시리스 영구자석 (brushless permanent magnet) 모터에서 고성능 토크 제어를 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, 수차 제어, 기계, 제조 및 군사와 같은 응용 분야에 널리 사용된다. 또한 여러 고성능 어플리케이션에 사용되므로 토크리플을 최소화 하는 것은 BLDC 모터를 구동하는데 매우 중요하다 [2, 3].

긴 유효 공극으로 인해, 영구자석 모터는 작은 값의 인덕턴스를 갖는 경향이 있다. 공극은 코깁 토크를 저감시키거나 고정자 슬롯으로 인한 자속의 고조파를 감소시키기 위해 의도적으로 크게 이루어진다. 최근 아이언리스 고정자 구조 (ironless stator structure)를 사용하는 EV/HEV를 위한 높은 전력의 영구자석 모터 (수십 kW)에서의 설계 기술은 심지어 인덕턴스를 100 μ H 이하까지 감소시키고 있다. 하지만, 전류리플은 인버터의 스위칭 주파수와 인덕턴스 값에 반비례하기 때문에 낮은 인덕턴스는 높은 스위칭 주파수에서의 동작을 필요로 한다 [4, 5].

위에서 언급한 것처럼 BLDC 모터는 토크리플을 줄이기 위해 고속 스위칭 주파수를 이용한다. 하지만 스위칭에 의한 전력손실, 전자파 방해 (EMI), 전동기 과열현상 등의 문제점이 있다. 또한 높은 전압 상승율을 가진 PWM 파형이 인가되면 절연파괴 (Electrical Machining Discharge; EMD)로 인해 베어링이 손상되며, 심한 경우 완전히 파괴되는 등의 문제점이 있다 [6]. 따라서 낮은 스위칭 주파수로 작은 인덕턴스를 가지는 모터의 토크리플을 줄이기 위한 제어 방법이 필요하다.

BLDC 모터는 입력전류와 출력 토크가 비례하는 특성을 이용하여 토크를 직접 제어하는 대신에 전류를 제어하는 방법이 많이 사용되고 있다. 따라서 토크리플을 줄이기 위해서 전류 제어를 잘 설계하는 것은 중요하다. 일반적인 제어기 설계방법만으로는 제어 시스템에서 항상 문제가 되는 외란, 모델링 오차 등의 영향에 효과적으로 대응하는 것이 쉽지 않다. 따라서 적응 제어, 최적

* Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering,
Soongsil University, Korea

E-mail : nhjo@ssu.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University, Korea

Received : July 7, 2015; Accepted : July 30, 2015

제어와 같은 고급제어기법들의 적절한 응용이 필요하지만, 이러한 기법들은 그 구조가 복잡하여 저가로 고급 제어사양을 만족하는 제어 시스템을 구현하기는 쉽지 않다[7].

본 논문에서는 BLDC 모터의 토크 리플을 효과적으로 감소시키기 위한 방법으로 외란관측기 기반 제어기 설계에 대한 연구를 수행한다. 인버터 스위칭에 영향을 받아 출력 전류에 리플이 포함되는데, 이를 고려하여 본 논문에서는 인버터 스위칭을 외란으로 간주하였다. 따라서 전류의 리플을 감소시키기 위해서 외란의 영향을 최소화하는 전류 제어기를 설계하는 것을 목표로 한다. 또한, 고속 스위칭 주파수를 이용하지 않고 상대적으로 낮은 스위칭 주파수에서의 모의실험을 통하여 제안된 외란관측기 기반 제어기가 토크리플을 줄이기 위해 고속 스위칭 주파수를 쓰지 않아도 우수한 제어 성능을 나타낸다는 것을 보인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 본 논문에서 고려하는 BLDC 모터의 모델링을 소개하고, 3장에서는 BLDC 모터의 전류 리플을 분석한다. 4장에서는 외란 관측기의 장점과 설계방법을 소개한다. 5장에서는 컴퓨터 모의실험을 통해, 제안된 외란관측기 기반 제어기가 일반적으로 많이 사용되는 PI 제어기보다 우수한 토크리플 저감 성능을 나타낸다는 것을 보인다. 마지막으로 6장에서는 본 논문의 결론을 제시한다.

2. BLDC 모터의 모델링

BLDC 모터의 출력 P_e 는 식 (1)과 같이 표현되며, 출력 전력 P_e 와 회전자 각속도 w_m 으로부터 모터의 토크는 식 (2)와 같이 표현된다[8].

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

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

식 (2)에서 기계 각속도 $w_m = \frac{w_r}{P}$ 이며, w_r 은 전기 각속도, P 는 극수이다. 또한, 기계 시스템의 운동 방정식은 다음과 같다[8].

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

여기서 T_L 은 부하토크, J 는 관성모멘트, B 는 마찰계수이다. BLDC 모터의 등가회로는 그림 1과 같고 전압방정식은 식 (3)의 운동방정식을 통해 구할 수 있다.

BLDC 모터의 전달함수를 계산하기 위한 라플라스 변환을 이용한 시스템의 방정식은 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} V_t(s) &= (sL_a + R_a)I_a(s) + E_a(s) \\ E_a(s) &= k_E w_m(s) \\ T_e(s) &= k_T I_a(s) \\ T_e(s) &= T_L(s) + (sJ + B)w_m(s) \end{aligned} \quad (4)$$

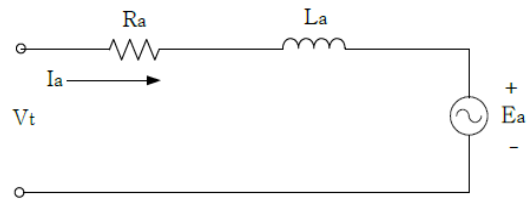


그림 1 BLDC 모터의 등가회로.

Fig. 1 The equivalent circuit of BLDC motor.

식 (4)로부터 BLDC 모터의 블록선도는 그림 2와 같다.

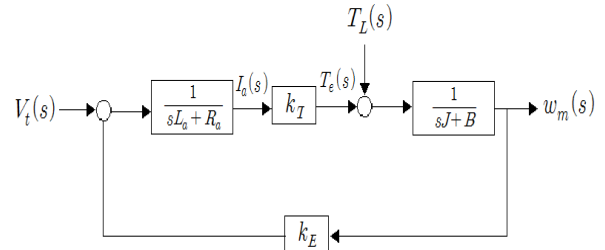


그림 2 BLDC 모터의 블록선도.

Fig. 2 The block diagram of BLDC motor.

3. BLDC 모터의 전류리플 분석

BLDC 모터를 위한 인버터는 통상 일정한 시점에 두 개의 스위칭 소자만이 동작하는 2상 여자방식으로 구동된다. 그림 3은 인버터 스위칭 패턴에 따른 BLDC 모터의 DC-link 전류 파형을 나타내는데, 실제 모터 전류 i_m 은 스위칭 리플 Δi_m 을 포함한다. 이상적인 경우, 평균 상 전압은 역기전력 e_m 과 전류 I_m 에 의해 다음과 같이 표현된다.

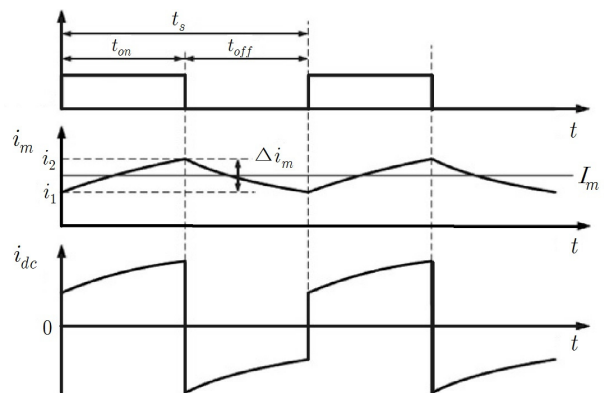


그림 3 스위칭 패턴에 따른 BLDC 모터의 전류리플 분석.

Fig. 3 Current ripple analysis for the BLDC motor according to switching pattern.

$$V_m = R_s I_m + e_m \quad (5)$$

또한, 실제 상 전압은 스위칭 방법에 의해 공급되고 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$t_{on} V_t - (t_s - t_{on}) V_t = V_m \quad (6)$$

스위칭 도통 시간인 PWM 듀티비 d_m 은 (7)과 같으므로

$$d_m = \frac{t_{on}}{t_s} = 0.5 + \frac{1}{2} \frac{V_m}{V_t}, t_s = t_{on} + t_{off} \quad (7)$$

BLDC 모터의 전류리플과 토크리플은 아래와 같다.

$$\Delta i_m = \left(\frac{V_t - e_m - 2R_a I_m}{2L_a} \right) d_m t_s \quad (8)$$

$$\Delta T_m = \Delta i_m k_T \quad (9)$$

식 (8)과 (9)로부터 전류리플과 토크리플은 모터의 인덕턴스와 인버터 스위칭 주파수에 반비례하는 것을 알 수 있다[9].

4. 토크리플 저감을 위한 DOB 제어기

일반적인 PID 제어기 설계방법만으로는 제어 시스템에서 항상 문제가 되는 외란, 모델링 오차 등을 다루기 어렵다. 따라서 적응 제어, 최적 제어와 같은 고급제어기법들의 적절한 응용이 필요하지만, 이러한 기법들은 그 구조가 복잡하여 구현하는데 어려움이 있다. 이에 비해서 외란 관측기(Disturbance Observer; DOB)는 그 구조가 간단하면서도 외란 제거에 뛰어난 성능을 보여주는 것으로 알려져 있다[10, 11].

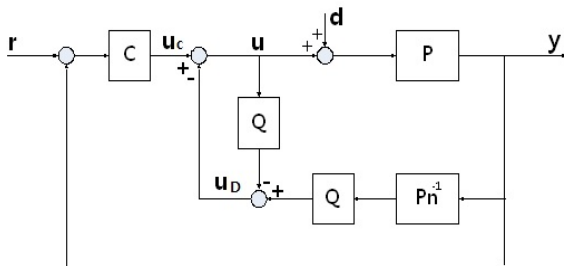


그림 4 외란관측기 기반 제어시스템.

Fig. 4 The disturbance observer based control system.

외란 관측기는 관측된 외란을 피드백에 의해서 효과적으로 보상해주는 특징을 갖고 있다. 그림 4는 외란 관측기에 기초한 제어 시스템 구조를 보여주고 있다. 여기서 P 는 실제 플랜트, P_n

은 플랜트의 공칭 모델, Q 는 저역 통과 필터로 일반적으로 Q 필터라고 칭한다. 신호 u 는 시스템에 인가되는 제어입력, 신호 d 는 입력외란, 신호 y 는 시스템의 출력이다. 그림 4로부터 플랜트의 출력을 계산하면 다음과 같다.

$$y(s) = \frac{PP_n}{P_n + (P - P_n)Q} u(s) + \frac{PP_n(1 - Q)}{P_n + (P - P_n)Q} d(s) \quad (10)$$

식 (10)을 이용하면 외란관측기 피드백에 의해서 입력외란이 효과적으로 보상된다는 것을 알 수 있다. 입력외란은 저주파 신호이고, 저주파 영역에서는 $Q(s) \approx 1$ 로 근사할 수 있기 때문에 (11)과 같은 근사식을 얻을 수 있다.

$$\frac{PP_n}{P_n + (P - P_n)Q} \approx P_n, \frac{PP_n(1 - Q)}{P_n + (P - P_n)Q} \approx 0 \quad (11)$$

따라서 $Q(s) \approx 1$ 를 만족하는 저주파 영역에서는 $y(s) \approx P_n u(s)$ 를 얻을 수 있고 다음을 추론할 수 있다: 외란관측기를 사용하는 경우 1) 입력외란 d 가 시스템 출력에 영향을 미치지 않으며, 2) 시스템 출력은 공칭모델 P_n 에 의해 결정되고 불확실한 실제 플랜트 P 의 영향을 받지 않는다.

위에서 기술한 외란관측기의 우수한 제어특성을 이용하기 위해서는 전체 시스템이 반드시 안정해지도록 Q 필터와 공칭모델 P_n 을 선정하여야 한다. 외란관측기 제어시스템의 안정도를 보장하기 위한 조건은 참고문헌[12]에서 연구되었는데, 그 내용을 간단히 소개하도록 한다. 먼저 Q 필터는 일반적으로 식 (12)와 같은 형태로 선정한다.

$$Q(s) = \frac{a_0}{(\tau s)^r + a_{r-1}(\tau s)^{r-1} + \dots + a_1(\tau s) + a_0} \quad (12)$$

여기서, r 은 공칭모델의 상대차수(relative degree)이고 τ 는 Q 필터의 시정수인데 보통 1보다 작은 값으로 선정한다. 또한, $Q(s)$ 의 분모 다항식의 계수 a_{r-1}, \dots, a_1, a_0 는 다항식 $s^r + a_{r-1}s^{r-1} + \dots + a_1s + a_0$ 이 안정해지도록 임의로 선정한다. 이제, 그림 4와 같은 외란관측기 제어시스템의 안정성을 분석하기 위해서 다항식 (13)을 고려하자.

$$\delta(s; \tau) := (DD_c + NN_c)N_n D_Q + N_Q D_c (ND_n - N_n D) \quad (13)$$

여기서, N, N_c, N_n, D, D_c, D_n 는 $P(s), P_n(s), C(s)$ 로부터 $P(s) = \frac{N(s)}{D(s)}, P_n(s) = \frac{N_n(s)}{D_n(s)}, C(s) = \frac{N_c(s)}{D_c(s)}$ 로 정의되는 서로 소 다항식(coprime polynomial)이다. 마찬가지로, N_Q, D_Q 도 $Q(s) = \frac{N_Q(s; \tau)}{D_Q(s; \tau)}$ 로 정의되는데, 여기서 τ 를 함수의 인자로 명시적

으로 표시한 이유는 Q 필터가 s 뿐만 아니라, 시정수 τ 의 함수임을 나타내기 위해서다. 이때, 전체 시스템의 안정성을 보장하기 위해서는 주어진 $\tau > 0$ 에 대해서 다항식 (13)의 모든 근이 LHP에 존재해야 한다[12]. 하지만, (13)을 이용하여 시스템의 안정성을 보장하는 Q 필터와 공칭모델을 구하는 것은 어렵기 때문에, DOB 설계를 위해서는 다음과 같은 정리를 이용한다.

정리 1[12]: 그림 4와 같은 외란관측기 제어 시스템에 대해서 다음을 만족한다고 하자.

- (i) $P_n C / (1 + P_n C)$ 가 안정하다.
- (ii) $P(s)$ 가 최소위상(minimum phase) 시스템이다.
- (iii) 다항식 $p_f(s) := D_Q(s; 1) + \left(\lim_{s \rightarrow \infty} \frac{P(s)}{P_n(s)} - 1 \right) N_Q(s; 1)$ 의 모든 근이 LHP 평면에 존재한다.

그러면, 충분히 작은 $\tau > 0$ 에 대해서 외란관측기 기반 제어 시스템은 안정하다.

지금까지 기술된 DOB 제어기의 특징들은 본 논문에서 고려하는 BLDC 모터의 토크리플 저감 제어에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 보인다. BLDC 모터는 입력전류와 출력 토크가 비례하는 특성을 이용하여 토크를 직접 제어하는 대신에 전류를 제어하는 방법이 많이 사용되고 있다. 따라서 토크리플을 감소시키기 위해 그림 3의 Δi_m 을 줄이는 것을 제어목적으로 정할 수 있다. 전류 리플은 인버터 스위칭에 의해서 주로 발생된다는 점에 착안하여, 본 논문에서는 인버터 스위칭을 외란으로 간주하였다. 따라서, 외란의 영향을 효과적으로 감소시킬 수 있는 DOB 제어기를 사용하면, 인버터의 영향을 최소화하여 전류의 리플을 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다. 본 논문에서 고려하는 BLDC 모터의 공칭 파라미터는 표 1과 같다. 이를 이용하여 BLDC 모터의 공칭 모델 전달함수를 구하면 (14)와 같다.

$$P_n(s) = \frac{1}{L_a s + R_a} = \frac{1}{0.000049s + 0.36} \quad (14)$$

한편, 모터의 저항과 인덕턴스의 경우 온도나 여러 가지 환경

표 1 BLDC 모터의 공칭 파라미터.

Table 1 The nominal parameters of BLDC motor.

Symbol	Description	Nominal value
P	극수	4 [pole]
R_a	전기자 저항	0.36 [Ω]
L_a	전기자 인덕턴스	0.049 [mH]
k_E	역기전력 상수	1290 [rpm/V]
k_T	토크 상수	7.39 [mNm/A]
J	관성 모멘트	4.6 [$g \cdot cm^2$]
T_L	부하토크	0.2 [Nm]
V_{dc}	입력전압	32 [V]

변화에 의해서 변하기 쉽다. 또한 제조과정에서 모델링 오차가 존재하기 때문에 정확한 파라미터 값을 알 수는 없다. 따라서 실제의 인덕턴스와 저항값을 \tilde{L}_a, \tilde{R}_a 로 나타내면 실제 BLDC 모터의 전달함수는 아래와 같이 주어진다.

$$P(s) = \frac{1}{\tilde{L}_a s + \tilde{R}_a} \quad (15)$$

(15)로부터 $P(s)$ 가 최소위상 시스템이기 때문에 정리 1의 조건 (ii)를 만족함을 알 수 있다. 또한, 그림 4에서 제어기 $C(s)$ 는 조건 (i)을 만족하도록 선정하면 되는데, 본 논문에서는 간단히 PI 제어기로 선정하였다. $C(s)$ 를 (16)과 같이 선정하고

$$C(s) = \frac{s+20}{s} \quad (16)$$

$P_n C / (1 + P_n C)$ 의 극점(pole)을 계산하면 $-2.77 \times 10^4, -14.7$ 이어서 안정하고 조건 (i)을 만족함을 확인할 수 있다.

마지막으로, Q 필터는 (12)와 같은 형태인데, 정리 1의 조건 (iii)이 만족되도록 선정하면 된다. 공칭모델 (14)의 상대차수(relative degree)가 1이기 때문에 (12)로부터 $Q(s) = \frac{a_0}{\tau s + a_0}$ 임을 알 수 있는데, 간단히 $a_0 = 1$ 인 경우, 즉 (17)의 Q 필터를 고려해 보자.

$$Q(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (17)$$

(14), (15), (17)로부터 다항식 $p_f(s)$ 를 계산해 보면

$$p_f(s) = s + 1 + (L_a/\tilde{L}_a - 1) \times 1 = s + L_a/\tilde{L}_a$$

이고 모든 $\tilde{L}_a > 0, \tilde{R}_a > 0$ 에 대해서 조건 (iii)을 만족함을 확인할 수 있다. 따라서, 정리 1에 의해서 BLDC 모터에 (14), (16), (17)을 이용한 DOB 제어기를 적용할 경우, 충분히 작은 τ 에 대해서 전체 시스템이 안정하게 된다.

5. 모의 실험

본 장에서는 Matlab/Simulink을 이용한 모의실험을 통하여 외란관측기 기반 제어기가 BLDC 모터의 토크리플 저감 제어에 우수한 성능을 가짐을 검증해 보도록 한다. 그림 5는 모의실험에 사용된 Matlab/Simulink 전체 구성도인데, 실제 실험상황과 유사한 모의실험을 위하여 전기 모델, 기계 모델, 토크 모델 뿐만 아니라 인버터 모델 등이 포함되어 있다. 4장에서 설계한 DOB 제어기의 Q 필터 시정수 τ 는 값이 작을수록 우수한 외란제거 성능

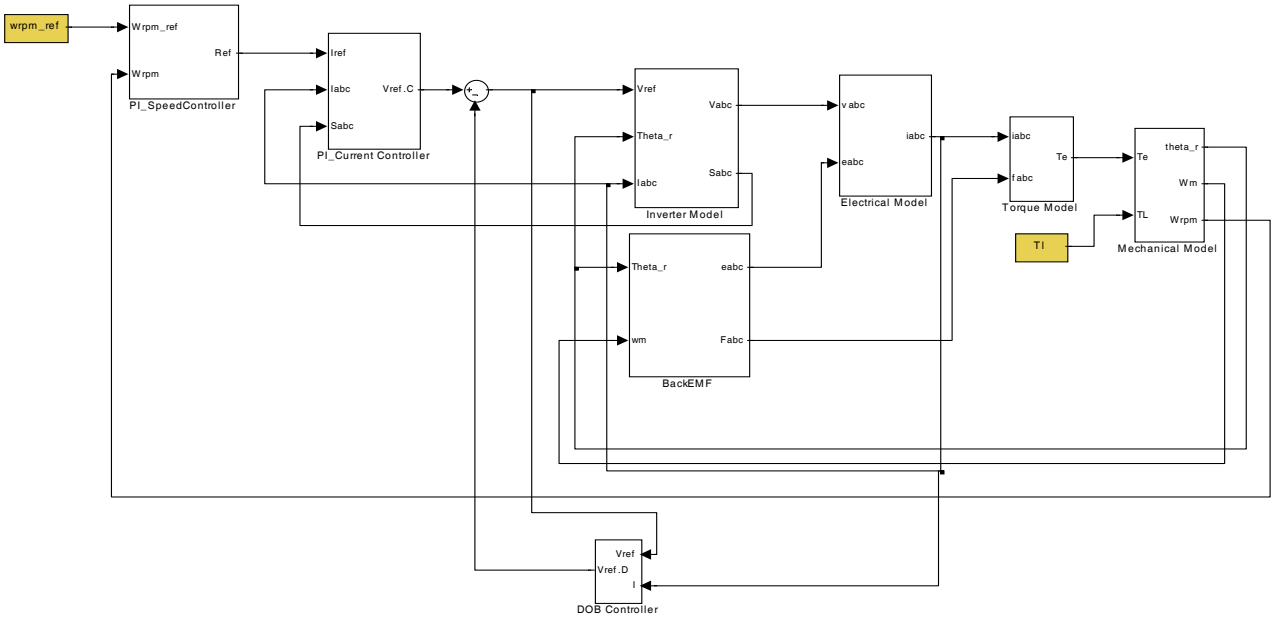


그림 5 시뮬레이션 전체 구성도.
 Fig. 5 Entire simulation block diagram

을 얻을 수 있다는 것을 고려하여 $\tau = 2.5 \times 10^{-5}$ 로 정하였다. 제안된 DOB 제어기의 제어성능은 산업계에서 주로 사용하는 PI 제어기와 비교하였다. 객관적인 성능비교를 위하여 PI 제어기는 제안된 제어기와 유사한 대역폭(Bandwidth)을 갖도록 선정하였다. 그림 6은 제안된 DOB 제어기와 PI 제어기 (18)을 적용하였을 때의 개루프 진폭응답을 보여주고 있는데, 두 시스템의 개루프 교차 주파수(Open loop crossover frequency)가 거의 유사함을 알 수 있다.

$$C(s) = \frac{3(s + 1000)}{s} \tag{18}$$

따라서, PI 제어기 (18)과 제안된 DOB 제어기는 거의 유사한 페루프 대역폭을 갖게 된다는 것을 알 수 있다.

표 2 컴퓨터 모의실험에서 사용된 모델 파라미터
 Table 2 Model parameters used in computer simulation

모델 파라미터들	
사례 연구 1	$f_{sw} = 1kHz, \tilde{R}_a = 1.5R_a, \tilde{L}_a = 1.5L_a$
사례 연구 2	$f_{sw} = 1kHz, \tilde{R}_a = 5R_a, \tilde{L}_a = 5L_a$

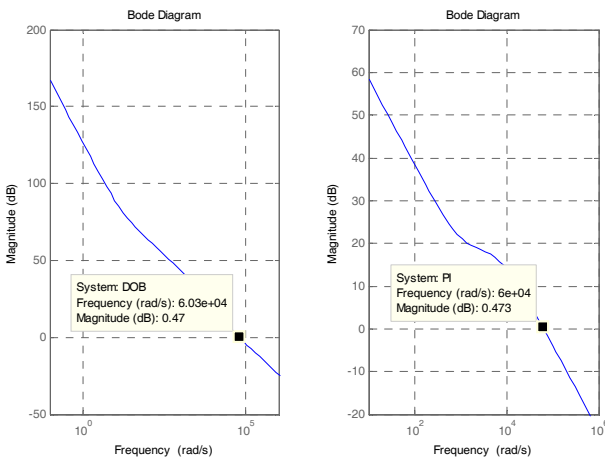


그림 6 DOB 제어기와 PI 제어기의 개루프 교차 주파수 비교
 Fig. 6 Comparison of open loop crossover frequency between the proposed DOB controller and PI controller

실제상황에서는 BLDC 모터의 전자 저항과, 전자 인덕턴스 값이 공칭 값과 다른 경우가 대부분이기 때문에, 이를 고려하여 표 2와 같은 조건에서 모의실험을 수행하고 그 결과를 비교해 보았다. 표 2에서 f_{sw} 는 인버터 스위칭 주파수를 나타내며, \tilde{R}_a, \tilde{L}_a 는 모터의 실제 파라미터를 의미한다. 그림 7은 사례연구 1에 대한 모의실험 결과이다. 첫 번째 그림과 두 번째 그림은 PI제어기와 DOB 제어기를 적용했을 때의 상전류 파형인데, DOB 제어기를 사용했을 때 전류리플이 작아짐을 확인할 수 있다. 세 번째 그림은 두 제어기를 적용했을 때의 토크를 비교하고 있는데, DOB제어기(빨간색)가 PI제어기(파란색)보다 리플을 작게 만들 수 있음을 알 수 있다. 그림 7의 경우보다 모델 파라미터 값이 더욱 부정확해지는 경우의 성능 비교를 위해서 추가로 모의실험을 수행

하였다. 그림 8은 사례연구 2에 대한 모의실험 결과이다. 그림 7과 마찬가지로 DOB 제어를 적용했을 때 전류 리플과 토크 리플이 모두 감소하였음을 확인할 수 있다.

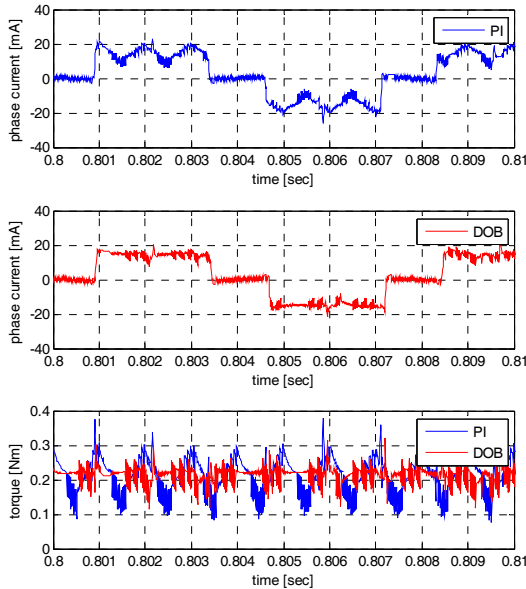


그림 7 사례연구 1에 대한 제안된 DOB 제어기와 PI 제어기의 성능 비교

Fig. 7 Performance comparison between the proposed DOB controller and PI controller for the case study 1

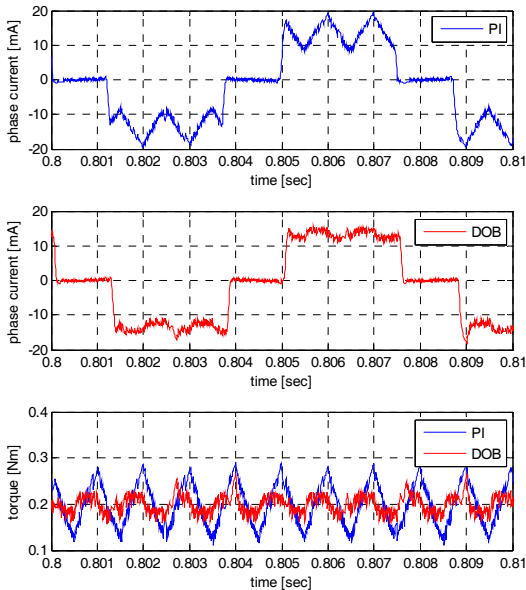


그림 8 사례연구 2에 대한 제안된 DOB 제어기와 PI 제어기의 성능 비교

Fig. 8 Performance comparison between the proposed DOB controller and PI controller for the case study 2

6. 결 론

본 논문에서는 BLDC 모터의 토크리플을 저감하기 위한 제어 방법으로 DOB 제어가 효과적으로 사용될 수 있음을 보였다. BLDC 모터는 입력전류와 출력 토크가 비례하는 특성을 이용하여 토크를 직접 제어하는 대신에 전류를 제어하는 방법을 사용한다. 제어기 설계시 인버터 스위칭을 외란으로 간주하였으며, 이러한 외란의 영향을 줄이기 위해서 외란관측기 기반 제어를 설계하였다. 컴퓨터 모의실험을 통하여 DOB 제어가 기존 PI 제어기보다 우수한 토크리플 저감 성능을 가지고 있음을 보였다.

감사의 글

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

References

- [1] G.J. Su, J. Mckeever and K. Samons, "Design of a PM Brushless Motor Drive for Hybrid Electric Vehicle Application," PCIM 2000, Boston, MA, pp. 35-43, 2000.
- [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] F. Aghili, "Fault-tolerant torque control of BLDC motors", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26, no. 2, pp. 355-363, Feb. 2011.
- [4] J. O. Krah and J. Holtz, "High-performance current regulation and efficient PWM implementation for low-inductance servo motors", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 35, no. 5, pp. 1039-1049, Sep/Oct. 1999.
- [5] S. J. Su and D. J. Adams. "Multilevel DC link inverter for brushless permanent magnet motors with very low inductance", Industry Applications Conference, 2001. Thirty-Sixth IAS Annual Meeting, Conference Record of the 2001 IEEE. vol. 2, pp. 829-834, Sep/Oct. 2001.
- [6] K. Kim, "Problems in recent application of inverters and its solution", technical reports of Korean energy agency, 2003
- [7] Y. Park, M. R. Nam, I. H. Seo, S. H. Lee, J. T. Lim, and M.-J. Tahk, "Least squares based PID control of an electromagnetic suspension system," KSAS Int. Journal, vol. 4, no. 2, pp. 69-78, 2003.
- [8] S. Kim, Control of DC and AC motors, Bokdoo, 2007
- [9] D. H. Lee, and J. W. Ahn, "A current ripple reduction

- of a high-speed miniature brushless direct current motor using instantaneous voltage control," IET Electric Power Applications, vol. 3, no. 2, pp. 85-92, Mar. 2009.
- [10] Y. Choi, K. Yang, W.K. Chung, H.R. Kim, and I.H. Suh, "On the robustness and performance of disturbance observers for second-order systems", IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 48, pp. 315-320, 2003.
- [11] M.T. White, M. Tomizuka, and C. Smith, "Improved track following in magnetic disk drives using a disturbance observer", IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol. 2, pp. 63-76, 1997.
- [12] H. Shim, and Nam H. Jo, "An Almost Necessary and Sufficient Conditions for Robust Stability of Closed-loop Systems with Disturbance Observer", Automatica, Vol. 45, No. 1, pp. 296-299, Jan. 2009.

저 자 소 개



장 소 현 (So-Hyun Jang)

2014년 송실대 공대 전기공학부 졸업. 2014년~현재, 송실대 공대 전기공학부 석사과정. 연구분야는 강인제어, 모터 제어시스템 설계.
Tel : 02-824-0640
E-mail : jshjsh117@nate.com



조 남 훈 (Nam-Hoon Jo)

1992년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 2000년 서울대 대학원 전기공학부 졸업(공학박). 2002년~현재 송실대학교 전기공학부 부교수. 연구분야는 강인제어, 비선형 시스템 제어, 풍력터빈 제어시스템, 제어 시스템 및 시스템 생물학에의 응용.
Tel : 02-820-0643
E-mail : nhjo@ssu.ac.kr