

전향보상을 이용한 BLDC 전동기의 속도제어에 관한 연구

朴基洪[†], 金泰成^{*}, 玄東石^{**}A Study on the Speed Control of BLDC Motor
Using the Feedforward Compensation

Ki-Hong Park, Tae-Sung Kim, and Dong-Seok Hyun

요 약

본 논문은 BLDC 전동기의 고성능 속도제어를 위하여 외란 토크 관측기를 기반으로 한 속도 제어 방법에 대하여 기술하였다. 강성이 낮은 로봇 팔이나 추적 응용의 경우 시스템의 안정성 측면에서 속도 제어기의 이득 값을 크게 할 수 없다. 따라서 외란 토크 관측기를 이용한 전향 보상 방법을 이용하였다. 본 방법으로 속도 제어기의 이득을 충분히 크게 할 수 없을 때 외란 토크에 대한 속도 응답 특성을 향상시킬 수 있다. 결과적으로, 고성능 분야의 응용을 위한 BLDC 전동기의 속도 제어가 가능하게 된다.

ABSTRACT

This paper presents a speed controller method based on the disturbance torque observer for high-performance speed control of the brushless DC (BLDC) motor. In case of the speed control of robot arms and tracking applications with lower stiffness, we cannot design the speed controller gain to be very large from the viewpoint of the system stability. Thus, the feedforward compensation method using disturbance torque observer was proposed. This method can improve the speed characteristic without increasing the speed controller gain. The speed characteristic against disturbance torque can be improved when the bandwidth of the speed controller cannot be made large enough.

Consequently, the speed control of the BLDC motor for the high-performance application become achieved.

Key Words : Brushless DC Motor, Disturbance Torque Observer, Feedforward Compensation

1. 서 론

BLDC 전동기의 브러시와 정류자의 제거는 신뢰성과 수명을 향상시켰으며, 유지 및 보수비용의 감소를 가져왔다. 또한 같은 출력의 DC 전동기에 비해 전기적 기계적 노이즈가 적으며 크기에 비한 큰 출력 및

저관성의 장점을 가지고 있어, 작은 사이즈에 비해 상대적으로 큰 힘을 요구하는 산업 응용 분야에서 DC 전동기를 대신하여 널리 사용되고 있다^{[1][2]}.

일반적으로 전동기의 속도 제어에 사용되는 PI 제어기는 제어 알고리즘이 간단하고 이득 값이 적절히 조절될 경우 우수한 운전 특성을 갖는다. 그러나 낮은 강성을 가지는 로봇 팔이나 추적 응용의 경우, 시스템 안정성 측면에서 속도 제어기의 이득 값을 높게 설계할 수 없다. 이로 인하여 외란 토크의 인가 시 속도 응답 특성이 현저히 저하하는 문제가 발생한다. 이러한 이유로 고성능 응용에서 PI 제어기만으로는 만족할

[†]교신저자 : 학생회원, 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사)
E-mail : khpark@ihanyang.ac.kr

^{*}학생회원, 한양대 대학원 전기공학과 박사과정

^{**}평의원, 한양대 전자전기공학과 교수

접수일자 : 2003. 10. 8 1차 심사 : 2003. 11. 12

2차 심사 : 2004. 2. 5 심사완료 : 2004. 3. 4

만한 성능을 얻기 어렵다. 이러한 단점을 해결하기 위하여 여러 가지의 전향 보상 방법들이 제안되어 왔다. 초창기에는 직류 전동기를 서보제어용으로 사용하기 위하여 가속도를 이용한 전향 보상 방법을 사용하였다^[3]. 이후에는 관성을 추정하여 속도 응답특성을 개선시키는 방법이 제안되었다.^[4] 그러나 근래에 들어서는 시스템의 상태 변수를 관측하여 속도 응답특성을 향상시키는 방법에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이러한 관측기를 이용한 전향 보상 시스템은 직류기 뿐만 아니라 타 전동기에서 고성능 응용분야에 널리 사용되고 있다. 벡터 제어를 하는 유도 전동기에서는 외란 토크 관측기를 사용하여 외란의 입력 시 토크축 성분을 보상하여 강인한 속도제어를 하였다^[5]. 그리고 센서리스 구동 시에는 속도응답특성을 보완하는 방법으로 사용되었다^[6]. 또한 영구 자석형 동기 전동기의 속도 제어에서는 부하 가변 및 저항과 인덕턴스의 변화에 따른 속도 응답 특성 향상 방법에 대하여 연구되었다^[7]. 직접 구동용 BLDC(BLDD) 전동기의 응용에서는 유도 전동기에서와 유사하게 d-q 변환을 이용하여 토크 분 전류를 보상해주는 방법으로 정밀한 위치 제어를 가능하게 하였다^[8].

위와 같이 전향 보상 방법은 여러 전동기에 응용되어 고성능 제어에 널리 행하여지고 있다. 그러나 BLDC 전동기 응용분야에서는 토크 리플 등의 영향으로 초정밀 제어를 요하는 서보전동기와 같은 산업응용 분야에 대한 적용에 제한 조건으로 작용하고 있다. 따라서 본 논문에서는 BLDC 전동기에서 외란 토크 관측기를 사용한 강인한 속도 제어 시스템의 적용 가능성을 알아보고자 한다. 또한 토크 리플을 줄이기 위하여 임계속도 이상에서 토크리플 저감 방법으로 가장 널리 사용되고 있는 진상각 제어 방법을 사용하였다. 외란 토크의 정보는 상태 관측기에 의해 추정되며 추정된 외란 토크의 전류 성분을 보상해주는 방법으로 적용하게 된다. 제안된 전향 보상 방법은 다른 전동기의 전향 제어에서와 마찬가지로 외부에서 인가되는 외란에 대해서 속도 제어기의 이득 값이 작아도 속도 회복 특성을 현저하게 향상시킬 수 있음을 확인 하고자 한다.

시뮬레이션과 실험을 통하여, BLDC 전동기를 위하여 제안된 속도제어기가 외란 토크의 영향에 강인한 속도 응답 특성을 가짐을 입증하였다.

2. BLDC 전동기의 모델링

사다리꼴 형태의 역기전력을 갖는 BLDC 전동기는

구형 공극 자속 분포를 갖는 영구자석 회전자와 집중 권 고정자 권선에 의해 만들어진다. 따라서 최적의 토크를 발생시키기 위해 요구되는 상전류는 120도 도통의 구형파 형태가 된다.

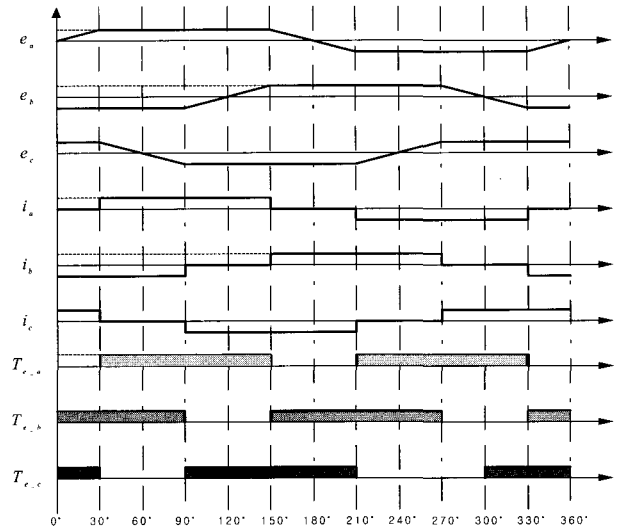


그림 1 BLDC 전동기의 역기전력 및 전류 파형
Fig. 1 BEMF and Current Waveform of BLDC Motor

그림 1과 같이 BLDC 전동기는 3상 평형의 사다리꼴 역기전력을 가지고 있으며, 토크 리플의 저감을 위해 정현파가 아닌 120도 도통의 구형파 전류의 인가가 필요하게 된다. 그러나 구형파 전류를 인가함으로써 가장 큰 영향을 미치는 것이 바로 상전류 전환 시 발생하는 리플이다. 임계속도 이상의 속도 영역에서 상전류 리플은 속도 증가에 따라 전류가 늦게 기립하여 발생하는 현상으로 전류 주입 시기를 앞당김으로써 감소시킬 수 있다.

따라서 본 논문에서는 상전류 전환 시 발생하는 토크 리플을 줄이기 위한 가장 보편화된 방법으로 진상각 제어 방법을 사용하여 제어하였다. 본 방법은 전류의 주입 시기를 앞당김으로써 전류의 기립을 빠르게 하여 전류의 모양을 좀 더 구형파에 가깝게 제어할 수 있게 되며 토크리플 또한 현저히 감소시킬 수 있다.

BLDC 전동기에서 외란 토크를 추정하여 전향 보상하고자 할 경우 역기전력을 구간 별로 구분하여 제어해야 한다. 그림 1에서와 같이 역기전력을 120도 구간으로 구분하여 구간별로 주입되는 각 상의 전류를 파악하여 발생하는 토크를 계산하여야 한다.

그림 2의 BLDC 전동기의 블록도로부터 상 변수 방정식을 나타낼 수 있으며 이를 토대로 전향 보상하기 위한 전류를 계산하게 된다.

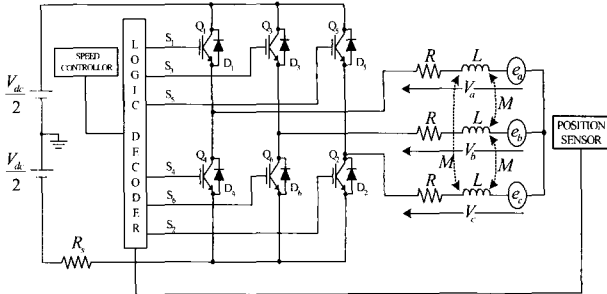


그림 2 BLDC 전동기의 블록도
Fig. 2 Block diagram of BLDC motor drive

그림 2로부터 고정자 3상 권선의 상 변수 회로 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 i_a, i_b, i_c 는 구형과 형태의 120도 간격으로 도통되는 전류이며, e_a, e_b, e_c 는 사다리꼴 형태의 역기전력이다.

식 (1)에서 표현된 역기전력은 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$e = f(\theta_e) \cdot k_e \cdot \frac{2 \cdot \omega_e}{P} \quad (2)$$

각 상은 120도의 위상차를 가지고 있으며, $f(\theta_e)$ 는 역기전력의 형태를 결정하는 형태 함수, k_e 는 역기전력의 크기, ω_e 는 전동기의 전기적인 속도, 그리고 P 는 전동기의 극수이다. 그리고 역기전력 함수의 크기를 k_e 라고 할 때 역기전력 함수는 각 구간에서 다음 식과 같이 표현된다.

$$f(\theta_e) = \begin{cases} \frac{6}{\pi} \theta_e & (0 \leq \theta_e \leq \frac{\pi}{6}) \\ 1 & (\frac{\pi}{6} \leq \theta_e \leq \frac{5\pi}{6}) \\ \frac{6}{\pi}(\pi - \theta_e) & (\frac{5\pi}{6} \leq \theta_e \leq \pi) \end{cases} \quad (3)$$

그리고 전기적 토크는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_e = \frac{1}{\omega_m} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) \quad (4)$$

여기서, ω_m 은 기계적인 속도이다.

위의 식 (4)를 운동 방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$T_e = \tau_d + J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \quad (5)$$

여기서, τ_d 는 외란 토크, J 는 관성 계수, 그리고 B 는 마찰계수이다.

3. 외란 토크 관측기의 모델링

전향 보상을 하기 위하여 본 논문에서 제안된 속도 제어 방법은 외란 토크의 정보가 필요하다. 그러나 외란 토크의 직접적인 측정은 부가적으로 고가의 장비를 필요로 하게 된다. 따라서 본 논문에서는 회전자 위치 정보를 입력으로 가지는 관측기를 사용하여 외란 토크의 정보를 추정하여 사용하였다.

검출된 실제 위치로부터 회전자의 속도는 다음과 같이 계산된다.

$$\omega_m = d \frac{\theta_m}{dt} \quad (6)$$

여기서, θ_m 은 회전자의 위치 정보이다.

외란 토크의 변화는 제어기의 샘플링 주기에 비해 매우 늦다고 가정하면, 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$d \frac{\tau_d}{dt} = 0 \quad (7)$$

그리고 전체적인 시스템을 상태 방정식으로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (8)$$

여기서, $x = \begin{bmatrix} \theta_m \\ \omega_m \\ \tau_d \end{bmatrix}$, $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B}{J_m} & -\frac{1}{J_m} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J_m} \\ 0 \end{bmatrix}$,

$u = T_e$ 이다.

따라서 시스템의 상태 관측기는 다음과 같이 구성되 어진다.

$$\begin{bmatrix} \hat{\theta}_m \\ \hat{\omega}_m \\ \hat{\tau}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B_m}{J_m} & -\frac{1}{J_m} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta}_m \\ \hat{\omega}_m \\ \hat{\tau}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ T_e \\ 0 \end{bmatrix} + L \left(\theta_m - [1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} \hat{\theta}_m \\ \hat{\omega}_m \\ \hat{\tau}_d \end{bmatrix} \right) \quad (9)$$

여기서, L 은 관측기의 이득 행렬이다.

위 식에서 실제 측정된 위치 정보를 이용하여 외란 토크의 정보를 알 수 있으며 추정된 외란 토크는 전향 보상을 위하여 사용되게 된다.

4. 외란 토크 추정 모델의 적용

일반적으로 유도 전동기나 영구자석형 동기 전동기의 경우, 외란 정보를 통한 전향보상 방법은 $d-q$ 변환을 통하여 토크분 전류를 보상하는 방법으로 사용된다. 그러나 BLDC 전동기의 경우 사다리꼴 역기전력을 가지기 때문에 120도 도통의 구형과 전류가 인가되므로 $d-q$ 변환을 통한 전향 보상은 어렵다.

따라서 BLDC 전동기의 전향 보상을 위한 전류의 지령치는 다음과 같이 구하게 된다.

전기적인 속도 ω_e 는 $\omega_m \times \frac{P}{2}$ 라는 관계를 식 (4)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$T_e = k_e \times [f_a(\theta_e) \cdot i_a + f_b(\theta_e) \cdot i_b + f_c(\theta_e) \cdot i_c] \quad (10)$$

위의 식에서 토크에 기여하는 3상 전류의 합을 계산하면 다음과 같다.

$$i_t = f_a(\theta_e) \cdot i_a + f_b(\theta_e) \cdot i_b + f_c(\theta_e) \cdot i_c \quad (11)$$

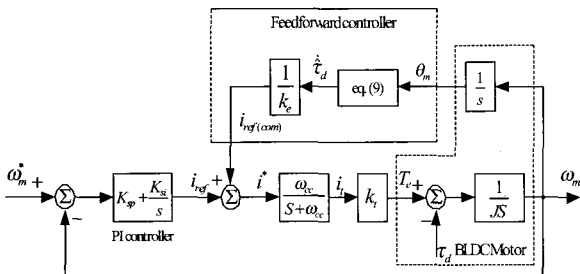


그림 3 제안된 방법의 제어 블록선도
Fig. 3 Block diagram of proposed method

식 (10)에 식 (11)을 대입하여 정리하면 다음과 같이 간략화 시킬 수 있다.

$$T_e = k_e \cdot i_t \quad (12)$$

보상해야하는 전류의 지령치는 식 (9)에서 추정된 외란 토크로부터 다음과 같이 계산되어진다.

$$i_{ref(com)} = \hat{\tau}_d / k_e \quad (13)$$

위의 식 (13)으로부터 외부에서 인가되는 토크에 대하여 보상되는 전류를 구할 수 있게 된다.

그림 3에서는 제안된 방법의 제어 블록선도를 나타내었다. 전체적인 시스템은 PI 제어기, 외란 관측기를 이용한 전향 보상 제어기, 그리고 BLDC 전동기로 구성되어있다.

표 1 BLDC 전동기의 파라미터
Table 1 Parameters of BLDC Motor

정격 전압	V	300 [V]
정격 토크	Te	2 [Nm]
저항	Rs	0.5 [Ω]
인덕턴스	Ls	10 [mH]
역기전력 상수	Ke	0.145 [V/(rad/sec)]
극 수	P	4
마찰 계수	B	0.0001 [Nmsec/rad]
관성	J	0.0036 [kg·m2]

5. 시뮬레이션 결과

본 연구에서 제안된 방법의 타당성을 입증하기 위하여 Advanced Continuous Simulation Language (ACSL)를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 표 1은 3상 BLDC 전동기의 파라미터를 나타내고 있으며 3상 6스위치 인버터의 동작에서 스위치는 이상적인 것으로 가정하였다. 기준 속도는 1500 [rpm]이다.

각각의 그림은 부하인가 시 나타나는 속도 파형이다. 그림 4 와 5는 4 [sec]에서 2 [Nm]의 외란 토크 인가 시 속도 파형과 실제 토크 및 추정된 토크를 나

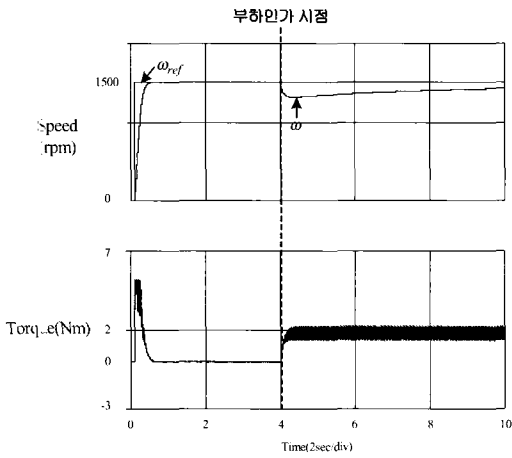


그림 4 전향보상을 하지 않은 시스템의 속도응답
Fig. 4 Speed response of the system without feedforward compensation

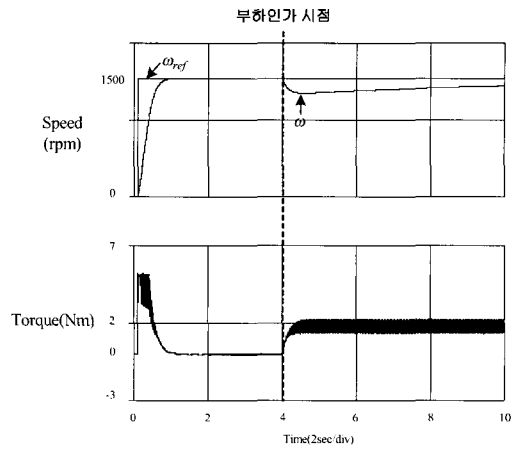


그림 6 전향보상을 하지 않은 시스템의 속도응답 (파라미터 변동)
Fig. 6 Speed response of the system without feedforward compensation(parameter variations)

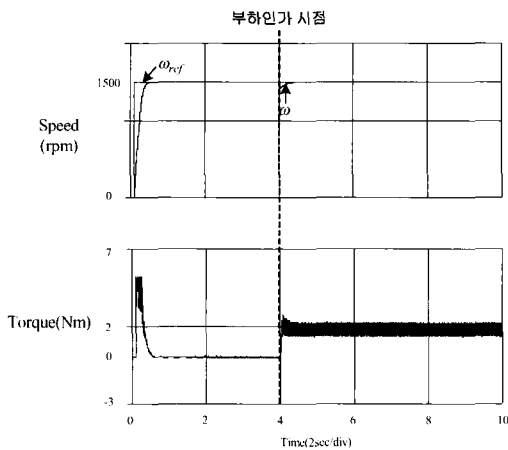


그림 5 전향보상을 한 시스템의 속도응답
Fig. 5 Speed response of the system with feedforward compensation

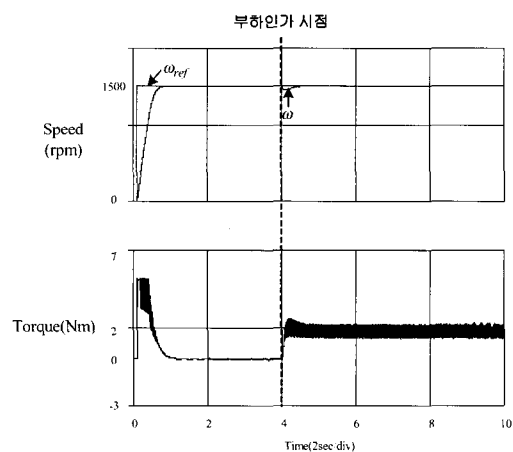


그림 7 전향보상을 한 시스템의 속도응답 (파라미터 변동)
Fig. 7 Speed response of the system with feedforward compensation(parameter variation)

타내었다. 그림 4에서는 낮은 PI 제어기 이득에서의 응답 특성을 나타내었다. 낮은 PI 제어기 이득으로 인한 속도 응답의 지연 현상이 나타나고 있음을 알 수 있다.

그림 5는 전향 보상을 하였을 경우 외란 토크인가에 대한 속도 응답 특성을 나타내었다. 그림 5에서 알 수 있듯이 전향 보상을 하였을 경우 속도 응답 특성이 현저하게 향상되었음을 알 수 있다. 또한, 그림 6과 7은 관성과 마찰계수가 두 배가되었을 때의 속도 파형을 나타내었다. 그림 6에서는 파라미터 변동의 영향으로 속도 지연 현상이 그림 4보다 더욱 심화됨을 알 수 있

다. 그러나 그림 7에서는 외란 토크를 추정하기 위해서 적용되는 파라미터 즉 관성과 마찰 계수의 변동 하에서도 외란 토크 관측기를 추가한 전향제어 시스템은 큰 영향을 받지 않고 뛰어난 속도 응답 특성을 보여주고 있음을 알 수 있다.

6. 실험 결과

제안한 방법의 타당성을 입증하기 위하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 인버터는 전력용 스위칭 소자로 IPM (Intelligent Power Module)을 사용하였고,

알고리즘은 TMS320C31 (DSP)을 사용하여 구현하였다. 전체 시스템의 구성도는 그림 8과 같다.

기준 속도는 1500 [rpm]이다. 각각의 그림에서는 약 4 [sec]에서 5 [sec] 사이에서 부하 인가시의 파형을 나타내었다. 그림 9는 외란 토크 2 [Nm]를 인가하였을 때 나타나는 속도 응답 파형을 보여준다. 그림에서 알

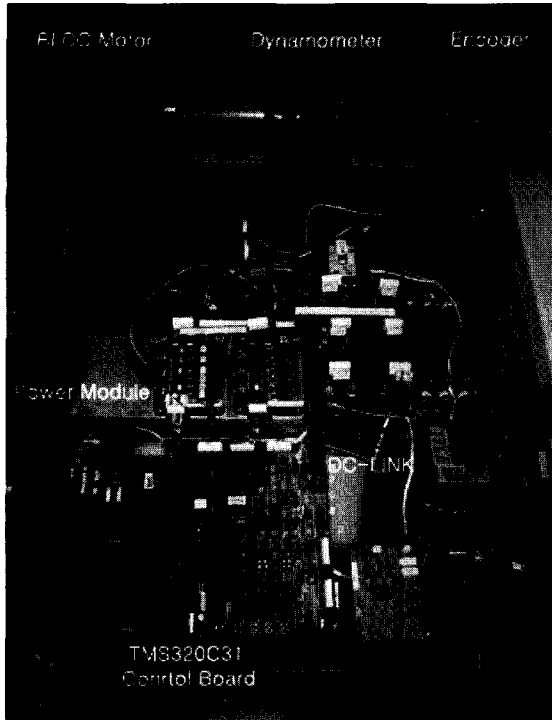


그림 8 시스템의 전체 구성도
Fig. 8 Structure of total system

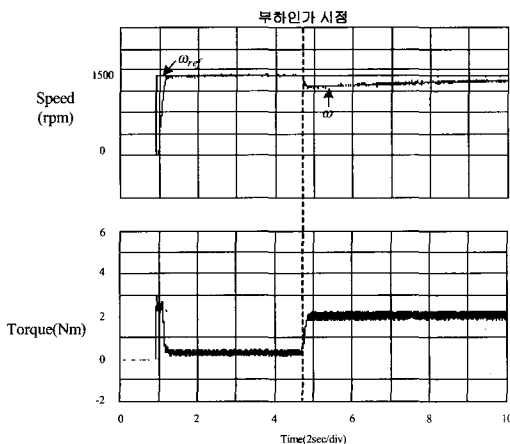


그림 9 전향보상을 하지 않은 시스템의 속도응답
Fig. 9 Speed response of the system without feedforward compensation

수 있듯이 낮은 PI 제어기의 이득으로 인하여 속도 지령을 추종하는데 많은 시간이 걸림을 알 수 있다. 그림 10은 제안한 방법을 사용한 경우의 속도 응답 파형이다. 외란 토크의 인가로 인한 언더슈트를 감소시키고 속도 지령추종이 빨라짐을 알 수 있다.

그림 11과 그림 12는 같은 조건에서 관성과 마찰계수를 각각 2배씩 변화 준 것이다. 그림 11에서는 관성과 속도 응답특성이 파라미터 변동의 영향으로 그림 9보다 약간 느려짐을 알 수 있다. 그러나 그림 12에서는 그림 10에서와 같이 빠른 응답 특성이 보여 짐을 알 수 있다. 그림 12의 결과에서는 제안된 관측기 시스템이 파라미터의 변동에도 강인하게 동작하고 있음을 알 수 있다.

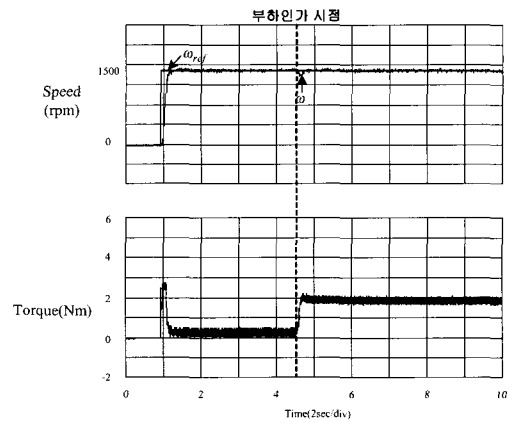


그림 10 전향보상을 한 시스템의 속도응답
Fig. 10 Speed response of the system with feedforward compensation

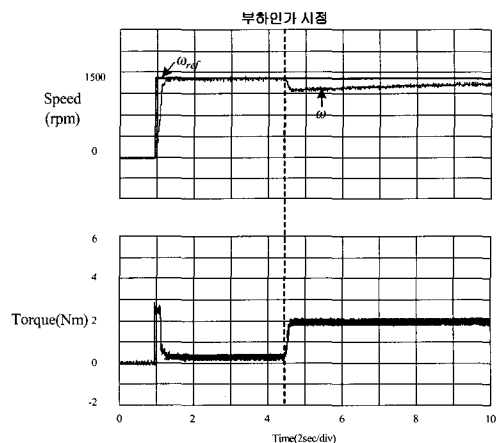


그림 11 전향보상을 하지 않은 시스템의 속도응답 (파라미터 변동)
Fig. 11 Speed response of the system without feedforward compensation (parameter variation)

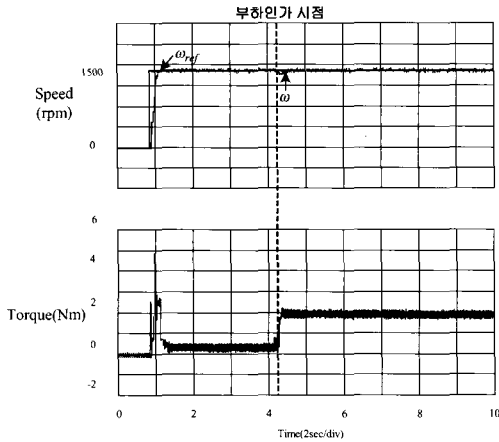


그림 12 전향보상을 한 시스템의 속도응답 (파라미터 변동)
 Fig. 12 Speed response of the system with feedforward compensation (parameter variation)

7. 결 론

본 논문에서는 영구자석형 동기 전동기에 비하여 가격적으로 경쟁력이 있는 BLDC 전동기를 고성능 응용 분야에 응용하기 위한 연구를 진행하였다.

따라서 BLDC 전동기의 응용 분야 중 안정성의 관점에서 속도제어기의 이득을 충분히 높일 수 없는 구동 시스템이나 낮은 강성을 갖는 로봇 팔과 같은 제어 시스템의 속도제어 성능을 향상시키기 위한 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 낮은 제어기 이득에서 향상된 속도 응답 특성을 얻기 위하여 외란 토크 추정을 통한 전향 보상 방법을 이용하였다. 시뮬레이션과 실험결과로부터 외란 토크 관측기를 이용한 속도 제어 시스템은 외란 토크인가 시 우수한 속도 응답 특성을 가짐을 알 수 있었으며, 외란 토크 관측기는 고정 값으로 입력되는 관성 및 마찰계수의 변동에 대해서도 큰 영향을 받지 않고 강인하게 제어됨을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] T. J. E Miller, "Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives", Clarendon Press, Oxford 1989.
 [2] P. Pillay and R. Krishnan, "Application Characteristics of Permanent Magnet Synchronous and Brushless dc Motors for Servo Drives", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 27, No. 5, pp. 986~996 Sep./Oct. 1991.
 [3] Yoichi Hori, "Disturbance Suppression on an Acceleration Control Type DC Servo System", *IEEE*

PESC Rec., pp. 222~229, 1988.

[4] 이재왕, 김상동, "관성능률 추정과 가속도 전향보상을 이용한 유도전동기의 속도제어 성능향상", *전력전자학회 논문지*, 제6권, 제1호, pp. 90~97, 2001.
 [5] M. Iwasaki and N. Matsui, "Robust speed control of IM with torque feedforward control", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 40, pp. 553~560, Dec. 1993.
 [6] 김대일, 신명호, 현동석 "속도센서가 없는 유도전동기의 고정자자속 기준제어를 위한 강인한 속도제어기 설계", *전력전자학회 논문지*, 제7권, 제6호, pp. 531~536, 2002.
 [7] Guchuan Zhu, Dessaint, L.-A., Akhrif, O., and Kaddouri, A., "Speed tracking control of a permanent-magnet synchronous motor with state and load torque observer", *IEEE Trans.*, Vol. 47, No. 2, pp. 346~355, Apr. 2000.
 [8] 고종선, 윤성구, "직접 구동용 BLDC 전동기의 정밀 Robust 위치제어 및 적응형 외란 관측기 연구", *전력전자학회 논문지*, 제4권, 제2호, pp. 138~143, 1999.

저 자 소 개



박기홍(朴基洪)

1976년 10월 18일생. 2002년 숭실대 전기공학과 졸업. 2004년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사).



김태성(金泰成)

1973년 7월 4일생. 1996년 광주대 전자공학과 졸업. 2002년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



현동석(玄東石)

1950년 4월 8일생. 1973년 한양대 전기공학과 졸업. 1978년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1984년~1985년 미국 토레도대학 교환교수. 1988년~1989년 원현공과대학 교환교수. 현재 한양대 전자전기공학과 교수. 2000년 당 학회 회장 역임.