

## 4스위치 3상 BLDC 전동기의 속도응답특성 향상에 대한 연구

이준호\*, 김태성\*, 김경화\*\*, 현동석\*

\*한양대학교, \*\*서울산업대학교

### A Study for Improvement of Speed Response Characteristic in Four-Switch Three-Phase BLDC Motor

J.H. Lee\*, T.S. Kim\*, K.W. Kim\*\* and D.S. Hyun\*

\*Hanyang University, \*\*Seoul National University of Technology

#### ABSTRACT

This paper presents a new speed control method using the acceleration feedforward compensation and using the disturbance torque estimate method. The proposed method improve transition response characteristic of system and has been a robust characteristic in the four-switch three-phase motor drive system in which the gain of speed controller cannot be made large enough. The simulation results prove the validity of the proposed method.

#### 1. 서 론

BLDC 전동기는 영구자석 동기 전동기(PMSM)와 유사한 구조로 정류자와 브러시가 없기 때문에 유지보수가 거의 필요 없는 고신뢰성 전동기이다.<sup>[1][2]</sup> 그리고 유도전동기에 비해 선형적 속도제어가 용이하며 간단한 구조와 높은 자속밀도, 작은 관성, 적은 잡음과 고출력 등의 장점을 가진다. 또한 높은 전력밀도와 우수한 제어성으로 작은 크기에서 큰 힘을 요구하는 산업 응용 분야에서 DC 전동기를 대신하여 널리 사용되고 있다.<sup>[3]-[5]</sup> 더욱이 영구자석 생산원가의 저하로 인해 산업응용에 대한 적용이 더욱 광범위 해지고 있는 추세이다.

일반적으로 사다리꼴 형태의 역기전력을 갖고 있는 BLDC 전동기의 구동을 위해 6스위치 3상 인버터(SSTPI)가 사용되었으나, 생산원가를 절감시키기 위한 여러 가지 방법 중 4개의 스위치만으로 전동기를 구동하는 방식이 제안되었다.<sup>[6]</sup> 최근 이러한 4스위치 3상 인버터를 이용하여 BLDC 전동기의 구동에 필요한 120°도통의 구형파전류를 만들기 위한 다양한 방법들이 제안되어 왔으나, 기존 방식들을 사용했을 경우 현저히 낮은 속도응답특성을 갖

게 된다는 단점을 갖는다.<sup>[7][8]</sup>

전동기 구동 시스템은 보통 PI제어기가 사용된다. 그러나 낮은 강성을 갖는 로봇의 위치제어나 추적 응용의 경우에는 시스템 안정성의 관점에서 속도 제어기의 이득을 높게 설정할 수 없다. 이런 경우, 시스템의 속도응답특성을 향상시키기 위해 속도제어기에 가속도 피드백 루프를 추가하는 방법이 제안되었다.<sup>[9]</sup> 그러나 이러한 방법은 가속도 정보를 필요로 하는데, 가속도 센서를 이용하거나 추정을 통해 얻게 된다. 가속도 센서는 추가적인 비용이 들고, 가속도 추정은 시스템의 정확한 파라미터 정보를 요구하며 설계가 복잡하다. 따라서 본 논문에서는 제어기의 속도 변수를 이용하여 속도응답특성을 향상시키는 가속도 전향보상 방법을 제안한다.

또한 전동기가 일정한 속도로 회전하는 동안에는 가속도 지령이 없게 된다. 이러한 경우, 외란 토크가 존재하면 제어기 이득이 낮기 때문에 속도응답특성이 좋지 않다. 따라서 본 논문은 가속도 전향보상과 함께 정상상태에서 외란 토크로 인한 속도변동에 강인한 특성을 갖도록 외란 토크 관측기를 이용한 외란 토크 추정법을 제안한다.

#### 2. 4스위치 3상 BLDC 전동기의 모델링

그림 1은 4스위치 3상 BLDC 전동기의 구조이고, 해석의 용이성을 위해 다음과 같은 조건을 가정하였다.

- 1) 전동기는 포화되지 않는다.
- 2) 고정자 권선의 저항은 같으며, 자기 그리고 상호 인덕턴스는 일정하다.
- 3) 인버터의 전력용 반도체 소자는 이상적이다.
- 4) 철손은 무시한다.

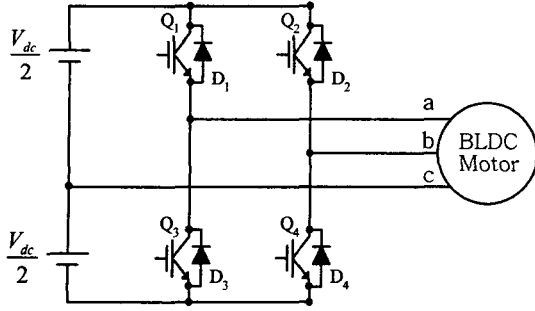


그림 1 4스위치 3상 BLDC 전동기의 구조  
Fig. 1 Configuration of four-switch three-phase BLDC motor

위의 가정으로부터 BLDC 전동기의 상전압 방정식 식(1)과 토크식 식(2)를 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T_e = \frac{1}{\omega_m} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) \quad (2)$$

여기서,  $v_a, v_b, v_c$  = 모터 상전압;  $R_s$  = 상당 저항;  $i_a, i_b, i_c$  = 상전류;  $L_s$  = 상당 인덕턴스;  $e_a, e_b, e_c$  = 상당 역기전력;  $\omega_m$  = 기계적인 각속도

역기전력은 다음과 같은 관계를 가지고 있다.

$$e = f(\theta_e) \cdot k_e \cdot \omega_m \quad (3)$$

역기전력 함수의 크기를  $k_e$  라고 할 때 역기전력 함수는 각 구간에서 다음과 같이 표현된다.

$$f(\theta_e) = \begin{cases} \frac{6}{\pi} \theta_e & (0 < \theta_e \leq \frac{\pi}{6}) \\ 1 & (\frac{\pi}{6} < \theta_e \leq \frac{5}{6} \pi) \\ \frac{6}{\pi} (\pi - \theta_e) & (\frac{5}{6} \pi < \theta_e \leq \pi) \end{cases} \quad (4)$$

각 상은  $120^\circ$  위상차를 가지고 있으며,  $f(\theta_e)$  는 역기전력의 형태를 결정하는 형태 함수이며,  $k_e$  는 역기전력의 크기,  $\omega_m$  은 전동기의 기계적인 각속도이다. 그리고 물리적인 토크( $T_e$ )는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

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

여기서,  $T_L$ 은 부하토크,  $J$ 는 관성계수,  $B$ 는 마찰계수이다.

### 3. 제안한 방법의 속도제어

#### 3.1 가속도 전향보상

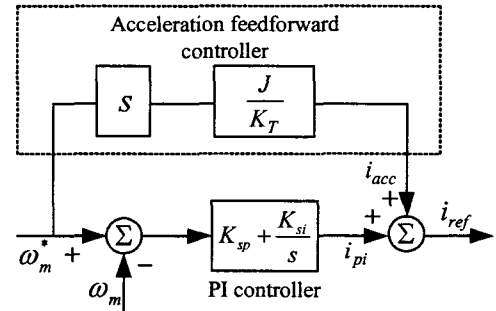


그림 2 가속도 전향보상 제어기의 블록도  
Fig. 2 Block diagram of acceleration feedforward compensation

그림 2는 제안된 가속도 전향보상기의 블록도이다. 가속도 전향보상은 주어진 속도지령  $\omega_m^*$ 로부터 보상전류  $i_{acc}$ 를 구해 이를 PI 속도제어기 출력에 전향 보상한다. 따라서 토크 지령 전류  $i_{ref}$ 는 전향 보상전류  $i_{acc}$ 와 PI 속도제어기의 출력전류  $i_{pi}$ 의 합으로 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{ref} = i_{acc} + i_{pi} \quad (6)$$

기계적인 토크식과 시스템 방정식은 식 (7)과 같다.

$$T_e = K_T \times i_{ref} = J \times \frac{d\omega_m}{dt} \quad (7)$$

여기서,  $K_T = \frac{3P}{2} \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr}^e$ 는 토크상수,  $i_{ref}$ 는 동기좌 표계 q축 고정자 전류,  $J$ 는 시스템의 관성이다.

가속도 전향보상 전류  $i_{acc}$ 를 구하기 위해서는 시스템의 관성이 요구되며, 시스템의 관성  $J$ 는 식 (7)로부터 전동기의 토크와 속도를 사용하여 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$J = \frac{T_e}{d\omega_m / dt} = \frac{T_e}{a} \quad (8)$$

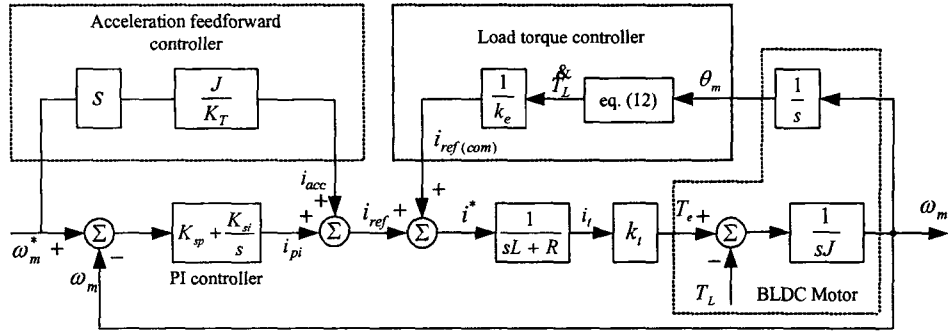


그림 3 제안한 속도제어 알고리즘의 블록도  
Fig. 3 Block diagram of proposed speed control algorithm

결과적으로, 가속도 전향보상 전류  $i_{acc}$ 는 식 (7)과 식(8)을 사용하여 식 (9)와 같이 얻을 수 있다.

$$i_{acc} = a^* \times \frac{J}{K_T} \quad (9)$$

여기서,  $a^*$ 는 가속도 지령으로  $a^* = \frac{d\omega_m^*}{dt}$ 이다.

### 3.2 부하토크에 대한 보상

정상상태에서 전동기는 가속도 지령이 없으므로 전향보상전류 없이 PI 속도제어기만으로 속도제어를 한다. 이러한 경우 외란 토크가 존재하면 제어기 이득이 낮기 때문에 속도응답특성이 좋지 않다. 따라서 본 논문에서는 외란 토크에 대한 보상을 위해서 외란 토크 관측기를 이용한 외란토크 추정법을 제안하였다. 외란 토크에 대한 보상은 부하 토크의 정보가 필요하게 되는데, 부하의 직접적인 측정은 부가적인 고가의 장비를 필요로 하게 된다. 그러므로 본 논문에서는 회전자 위치정보를 입력으로 갖는 관측기를 사용하여 외란 토크의 정보를 추정하여 사용하였다.

검출된 회전자의 속도로부터 위치정보는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_m = \int \omega_m dt \quad (10)$$

여기서  $\theta_m$ 는 회전자 위치 정보이다.

그리고 시스템의 상태방정식은 다음과 같다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (11)$$

$$\text{여기서, } x = \begin{bmatrix} \theta_m \\ \omega_m \\ T_L \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B_m}{J_m} & -\frac{1}{J_m} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ J_m \\ 0 \end{bmatrix}, u = T_e$$

따라서, 부하토크에 대한 상태 관측기는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_m \\ \dot{\omega}_m \\ \dot{T}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B_m}{J_m} & -\frac{1}{J_m} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta}_m \\ \hat{\omega}_m \\ \hat{T}_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ T_e \\ 0 \end{bmatrix} + L \left[ \theta_m - (1 \ 0 \ 0) \begin{bmatrix} \hat{\theta}_m \\ \hat{\omega}_m \\ \hat{T}_L \end{bmatrix} \right] \quad (12)$$

여기서,  $\hat{\theta}_m$ ,  $\hat{\omega}_m$ ,  $\hat{T}_L$ 은 추정된 상태 벡터이고  $L$ 은 관측기의 이득 행렬이다.

위 식에서 실제 측정된 속도 정보를 이용하여 부하 토크의 정보를 알 수 있으며, 추정된 부하 토크는 보상을 위하여 사용된다. 일반적으로 유도전동기나 영구자석 동기전동기의 경우, 외란 정보를 통한 보상방법은 d-q 변환을 통하여 토크분 전류를 보상한다. 그러나 BLDC 전동기의 경우 사다리꼴 역기전력을 가지기 때문에 120도 도통의 구형파 전류가 인가되므로 d-q 변환을 통한 보상은 어렵다. 따라서 BLDC 전동기의 보상 전류는 다음과 같이 얻을 수 있다.

전기적인 속도 ( $\omega_e$ )는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\omega_e = \omega_m \times \frac{P}{2} \quad (13)$$

위의 식을 식 (2)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$T_e = k_e \times [f_a(\theta_e) \cdot i_a + f_b(\theta_e) \cdot i_b + f_c(\theta_e) \cdot i_c] \quad (14)$$

토크에 기여하는 3상 전류의 합을 계산하면 다음과 같다.

$$i_t = f_a(\theta_e) \cdot i_a + f_b(\theta_e) \cdot i_b + f_c(\theta_e) \cdot i_c \quad (15)$$

식 (14)에 식 (15)를 대입하여 정리하면 다음과 같이 간략화 할 수 있다.

$$T_e = k_e \cdot i_t \quad (16)$$

보상해야하는 전류의 지령치는 식 (12)에서 추정된 외란 토크로부터 다음과 같이 계산된다.

$$i_{ref(com)} = \frac{T_L}{k_e} \quad (17)$$

위의 식 (17)로부터 외란 토크에 대한 보상 전류를 구할 수 있다.

그림 3은 제안된 방법의 제어 블록도를 보여주고 있다. 전체적인 시스템은 PI제어기, 가속도 전향 보상기, 외란 관측기를 이용한 외란 토크 보상기, 그리고 BLDC 전동기로 구성되어 있다.

#### 4. 시뮬레이션 결과

표 1 전동기의 파라미터  
Table 1 Parameters of BLDC Motor

정격 전압	$V$	300 [V]
정격 토크	$T_e$	2 [Nm]
저항	$R_s$	0.5 [ $\Omega$ ]
인덕턴스	$L_s$	20 [mH]
역기전력 상수	$K_e$	0.19 [V/(rad/sec)]
극 수	$P$	4
관성	$J$	0.007316 [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ]

시뮬레이션에 사용된 4스위치 3상 BLDC 전동기의 파라미터는 표 1과 같다. 그림 4는 6스위치 BLDC 전동기의 속도응답특성 파형이고, 그림 5는 일반적인 방법을 사용한 4스위치 BLDC 전동기의 속도응답특성 파형이며, 그림 6은 제안한 방법을 이용한 4스위치 BLDC 전동기의 속도응답특성 파형이다. 그림 4와 5에서 알 수 있듯이 4스위치 BLDC 전동기의 속도응답특성은 6스위치 BLDC 전동기에 비해 매우 좋지 못함을 알 수 있다. 그러나 제안된 방법은 4스위치 BLDC 전동기 구동에 적용하였을 경우 속도응답특성이 월등하게 향상되었음을 알 수 있다.

그림 7과 8은 각각 일반적인 방법과 제안한 방법을 사용한 4스위치 BLDC 전동기의 외란 토크에 대한 속도응답특성이다. 그림 7과 8에서 알 수 있듯이 제안한 방법을 이용한 4스위치 BLDC 전동기가 외란 토크에 대해서도 속도응답특성이 현저하게 향상되었음을 알 수 있다.

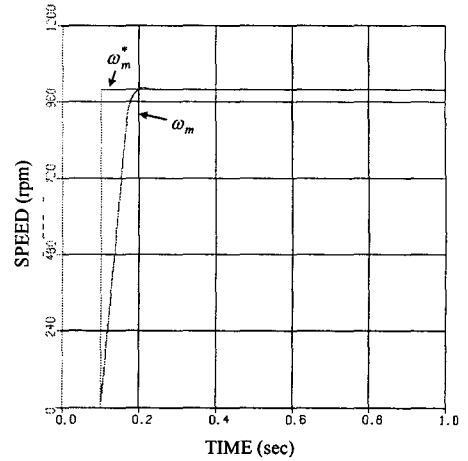


그림 4 6스위치 BLDC 전동기의 속도응답특성

Fig. 4 Speed response characteristic waveform of six-switch BLDC motor

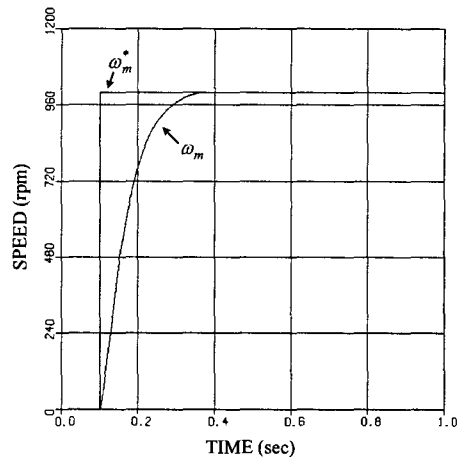


그림 5 기존 방법을 사용한 4스위치 BLDC 전동기의 속도응답특성

Fig. 5 Speed response characteristic waveform of four-switch BLDC motor using conventional method

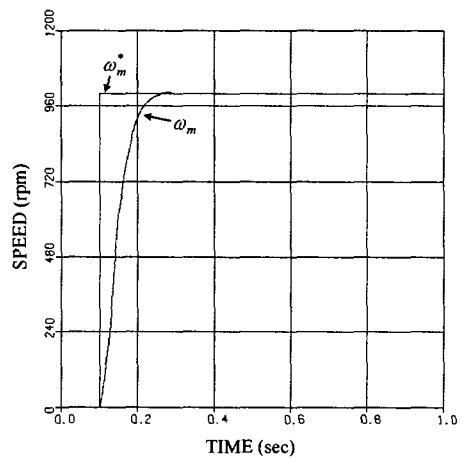


그림 6 제안한 방법을 사용한 4스위치 BLDC 전동기의 속도응답특성

Fig. 6 Speed response characteristic waveform of four-switch BLDC motor using proposed method

## 5. 결 론

본 논문에서는 4스위치 3상 BLDC 전동기의 속도응답특성을 향상 시키는 방법을 제안하였다. 6스위치 3상 BLDC 전동기에 비해 생산 단가를 낮출 수 있는 4스위치 3상 BLDC 전동기는 이러한 장점에도 불구하고 제어용량의 감소 및 속도응답특성의 저하 등의 이유로 인해 산업현장의 상용화가 이루어지지 못하고 있었다. 하지만 제안된 방법을 속도제어기의 이득을 충분히 높일 수 없는 구동 시스템이나 낮은 강성을 갖는 로봇팔과 같은 경부하 제어 시스템에 적용한다면 매우 경제적이며 효율적인 제어 시스템이 될 것으로 예상된다.

## 참 고 문 헌

- [1] Gui-Jia Su, Donald J. Adams, "Multilevel DC Link Inverter for Brushless Permanent Magnet Motors with Very Low Induction", *Conf. Rec. 2001 IEEE Ind. Appl.*, Vol. 2, pp. 829-834
- [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, Sept./Oct., 1991
- [3] D. W. Novotny and R. D. Lorentz, "Introduction to field oriented and high performance AC drives", *IEEE-IAS Tutorial Course*, 1986
- [4] P. C. Krause, "Analysis of electric machinery", Mc Graw-Hill, 1984
- [5] C. C. Chen et al, "A novel polyphase multipole square-wave permanent magnet motor drive for electric vehicles", *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, Vol. 30, pp. 1258-1266, Sept./Oct., 1994
- [6] Darwin T. W. Liang, "Flux Vector Modulation Strategy for a Four-Switch Three-Phase Inverter for Motor Drive Applications", *Conf. Rec. 1997 IEEE Power Elec.*, Vol. 1, pp. 612-617
- [7] S. K. Safi and P.P. Acarnley and A. G. Jack, "Analysis and simulation of the high-speed torque performance of brushless DC motor drives", *IEEE Proc. Elec. Power Appl.*, Vol. 142, No. 3, pp. 191-200, May, 1995
- [8] J. D. Van Wik H. W. Van Der Broeck, "A comparative investigation of three-phase induction machine drive with a component minimized voltage-fed inverter under different control options", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 20, No. 2, pp. 309-320, Mar./Apr., 1984
- [9] Yoichi Hori, "Comparison of Vibration Suppression Control Strategies in 2-Mass Systems including a Novel Two-Degree-of-Freedom H Controller", *Proc. Of 2nd Int. Conf. Of AMC*, pp. 409-416, 1992

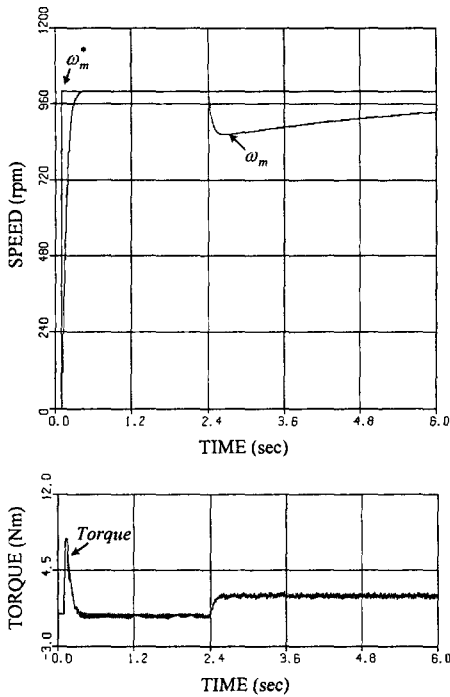


그림 7 기존 방법을 사용한 4스위치 BLDC 전동기의 외란토크에 대한 속도응답특성과 토크  
 Fig. 7 Speed response characteristic waveform and Torque for disturbance torque of four-switch BLDC motor using conventional method

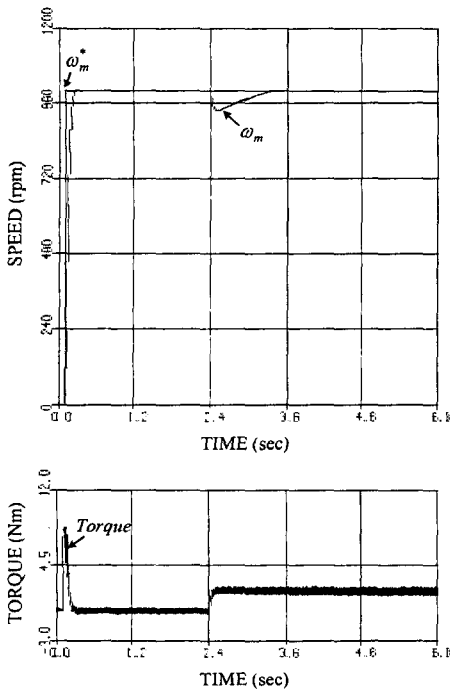


그림 8 제안한 방법을 사용한 4스위치 BLDC 전동기의 외란토크에 대한 속도응답특성과 토크  
 Fig. 8 Speed response characteristic waveform and Torque for disturbance torque of four-switch BLDC motor using proposed method