

## Brushless DC Motor에서 토크리플 저감을 위한 새로운 전류제어 기법

권경준, 김상훈  
강원대학교

### A New Current Control Method for Torque Ripple Reduction on Brushless DC Motor

K.J. Kwon and S.H. Kim  
Kangwon National University

#### ABSTRACT

This paper presents a new current control method to reduce torque ripple of Brushless DC Motor during commutation. In the proposed control strategy, the current slopes of rising and decaying phase during commutation is equalized by the compensation voltage. By adding the compensation voltage for it to the current controller output, the reduced torque ripple can be obtained. The simulation and experimental results show that the proposed method reduces the torque and the current ripples significantly.

#### 1. 서 론

역기전력 모양이 사다리꼴인 브러시리스 직류 전동기(Brushless DC Motor)는 구조상으로 3상 전기가 권선이 고정자 슬롯에 위치하고, 영구자석 회전자 는 여자 시스템을 대신하는 기존의 브러시 직류 전동기의 고정자와 회전자가 바뀐 구조로 되어 있다. 또한, 회전자 움직임에 동기화 하도록 모터의 상을 바꾸기 위하여 인버터와 회전자 위치 센서를 필요로 하게 된다. BLDC 전동기의 동작 특성은 기존의 브러시 직류 전동기와 유사하고, 위치 센서와 인버터의 반도체 소자 스위치가 기존 직류 전동기의 브러시와 기계적 정류자 역할을 하게 된다. 따라서 BLDC 전동기는 브러시 직류 전동기에서와 같이 브러시의 마멸로 인한 보수가 필요 없으면서도 정류자형 직류 전동기와 같은 우수한 제어 특성이 있다. 또한 전력용 반도체 스위칭 소자의 개발과 회로류 자석의 개발에 힘입어 고속화 및 소형화가 가능하게 되어 서보 시스템의 여러 분야에서 널리 사용되고 있다.<sup>[1]-[2]</sup>

BLDC 전동기에서의 토크 리플은 비이상적인 역기전력과 전압원 인버터 사용시 각 상 전류의 전환에(commutation) 따른 전류 리플에 주 원인이 있다.

상 전류 전환(commutation)에 기인한 토크리플은 제어 회로상에서 어쩔수 없이 발생하는 문제이며 모터의 역기전력, 상 인덕턴스에 관계한다.

최근까지 이 상전류 전환에 따른 전류리플을 감소시키기 위한 많은 연구가 있어 왔다. Carlson등은 BLDC 전동기에서 상 전환(phase commutation)에 기인한 토크리플을 해석하였고,<sup>[3]</sup> Berendsen등은 BLDC 전동기에서 모터의 중성점과 인버터의 중성점간의 전압( $V_{NM}$ )을 보상하는 기법을 제안하였다.<sup>[4]</sup> 본 논문에서는 상 전류 전환(commutation)시 이 구간 동안에 BLDC 전동기에서 토크 리플을 최소화 하기위해 보상된 전압을 통하여 전류모드(commutation) 전류의 감소율과 증가율을 같게 해주는 방법을 제안한다. 또한 시뮬레이션과 실험은 제안한 방법이 타당함을 증명한다.

#### 2. BLDC 전동기의 전류제어<sup>[5]-[6]</sup>

본 연구에서의 BLDCM 구동 시스템의 블록도는 그림 1과 같다. 모터의 상전류를 검출하여 위치센서의 신호에 따라 전류 제어루프에 캐환되는 전류를 선택하고, 전류 제어기에서 출력되는 PWM신호, 그리고 위치센서에 의해 해당하는 인버터의 스위칭 소자를 스위칭한다.

그림 2는 BLDCM의 이상적인 구동 조건을 나타낸 것이다. 역기전력의 평탄한 부분에 이상적인 구형파전류를 인가함으로써 맥동이 없는 일정한 토크를 얻을 수 있다. 역기전력과 올바른 위상으로 전류를 인가하기 위하여 BLDCM에 위치센서가 있고, 이 위치센서의 신호에 따라 회전자의 위치를 검출하여 해당하는 상의 전류를 흘릴 수 있다.

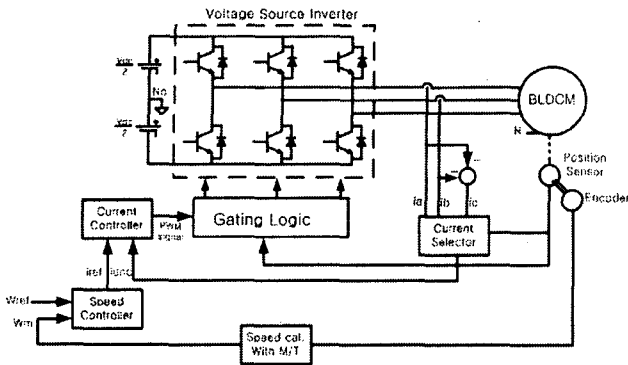


그림 1 BLDC 전동기의 시스템 전체 블록도  
Fig.1 Block diagram of a Brushless DC Motor drive

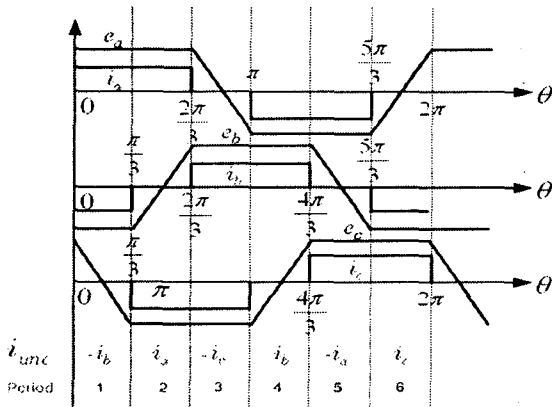


그림 2 이상적인 구동 조건

Fig. 2 Ideal shape of current and back emf in a BLDCM

일반적으로 사용되는 BLDC 전동기의 전압방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서,  $v_{as}, v_{bs}, v_{cs}$ : 상당 전압,

$i_a, i_b, i_c$ : 상전류,  $e_a, e_b, e_c$ : 상당 역기전력,

$R$ : 상당 저항,  $L$ : 상당 누설인덕턴스

발생되는 전기적 토크식은 다음과 같다.

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

여기서,  $\omega_m$ : 회전 각속도로 주어진다.

그림 3은 그림 2에서 구간 6과 1에 대하여 2상 도통구간과 전류(commutation)구간에서의 전류 파형을 나타낸다.

전류(commutation)시에 c상은 감소하므로 감소 모드 상, a상은 상승 하므로 상승 모드상, b상은 전류(commutation)에 직접 관계하지 않으므로 비전류(non-commutation) 모드상이라 하고, 발생 토크는 그 구간에서 역기전력이 일정하다면 항상 비전류(non-commutation)모드 전류에 직접 비례한다.

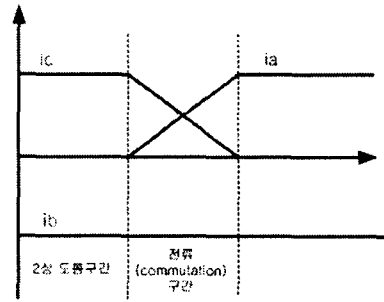


그림 3 2상 도통구간과 전류(commutation) 구간

Fig. 3 Two phase conducting period and the commutating period

### 3. 제안된 전류제어 방법

그림 3의 경우에 전류(commutation)구간에서 a상, c상의 증가율과 감소율은 같음을 알 수 있다. 따라서 비전류(non-commutation)모드 전류에 리플이 없는 일정한 전류가 흐르고, 이 전류에 관계하는 토크는 리플이 없는 일정한 토크를 만든다. 하지만, 그림 4의 경우처럼 전류(commutation)구간에서 역기전력과 상 인덕턴스에 관계하여 c상, a상 전류의 감소율과 증가율에 차이가 생기는 경우가 발생한다. 따라서, 비전류(commutation)모드 전류인 b상 전류에 리플을 만들고, 이것은 전류(commutation) 구간에서 토크 리플의 원인이 된다.

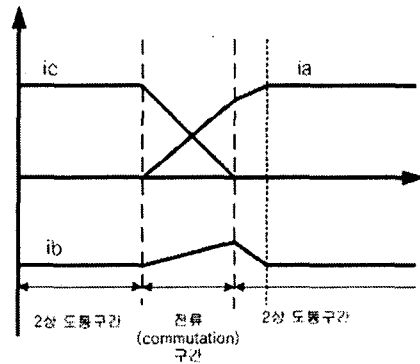


그림 4 감소모드와 상승모드의 전류

Fig. 4 Rising and decaying currents

그림 4의 전류(commutation) 구간에서 c상, a상 전류의 감소율과 증가율은 상 저항을 무시할 경우 식 (1)로부터 다음과 같다.

$$L \frac{di_a}{dt} = \frac{V_{dc}}{2} - e_a \quad (3)$$

$$L \frac{di_c}{dt} = -\frac{V_{dc}}{2} - e_c$$

식 (3)에서 두 상의 역기전력은 모두 양(positive)의 값을 가지므로, a상과 c상의 증가율과 감소율의 크기는 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$\left| L \frac{di_a}{dt} \right| < \left| L \frac{di_c}{dt} \right| \quad (4)$$

또한, a상과 c상의 증가율과 감소율의 크기의 차이는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \left| L \frac{di_c}{dt} \right| - \left| L \frac{di_a}{dt} \right| \\ = \frac{V_{dc}}{2} + e_c - \frac{V_{dc}}{2} + e_c \\ = e_c + e_a \end{aligned} \quad (5)$$

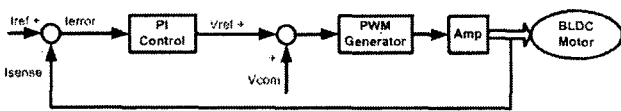


그림 5 제안한 전류 제어기법의 블록선도

Fig. 5 Block diagram of the proposed control method

식 (4)는 전류(commutation)구간에서 전류(commutation)모드 전류의 감소율과 증가율은 그림 4에서와 같이 차이가 발생한다는 것을 보여준다. 이러한 현상은 전기 각으로 매 60°마다 전류(commutation)구간에서 발생한다.

그림 4에서 증가모드 전류의 증가율을 감소모드 전류의 감소율과 같게 해주기 위하여 전류(commutation) 구간에서 식 (5)에서와 같은 전압을 보상해주면 비전류(non-commutation)모드 전류는 일정하게 되고, 역기전력이 이상적이라면, 토크 리플은 최소화 될 수 있다. 그림 5는 제안한 전류제어 방법의 블록선도를 나타낸다.

#### 4. 시뮬레이션

제안된 BLDC 전동기의 전류제어 기법의 성능을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 시뮬레이션 툴은 Matlab Simulink를 사용하였고, 역기전력은 이상적이라고 가정하였다. 사용된 BLDC 전동기의 파라미터는 표 1과 같다.

그림 6은 보상이 없는 경우 속도 1000rpm에서의 전류와 토크 파형이다. 전류(commutation)구간에서 역기전력과 상 인덕턴스에 관계하여 상승모드 전류와 감소모드 전류의 증가율과 감소율에 차이가 생기므로 전류와 토크에 리플이 발생한다.

그림 7은 본 논문에서 제안한 전류 제어기법을 사용하여 전압을 보상했을 경우의 전류와 토크 파형이다. 전류와 토크 리플이 전류(commutation) 구간에서 현저하게 감소하였음을 확인할 수 있다.

#### 5. 실험 결과

표 1 BLDC 전동기의 파라미터  
Table 1. Parameters of BLDC Motor

정격출력	W	550 [W]
정격전압	V	170 [V]
정격전류	A	3.2 [A]
관성	J	0.001323 [kg.m <sup>2</sup> ]
극수	P	4
저항	R	2.47 [Ω]
인덕턴스	L	21.8 [mH]
토크상수	Kt	0.573 [Nm]
역기전력상수	Ke	0.0338 [V/rpm]

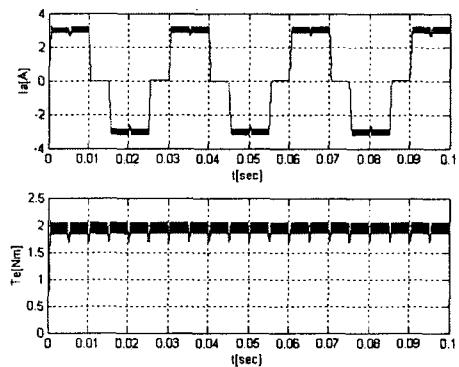


그림 6 보상이 없는 경우의 전류와 토크 파형  
Fig. 6 Current and torque waveforms without compensation

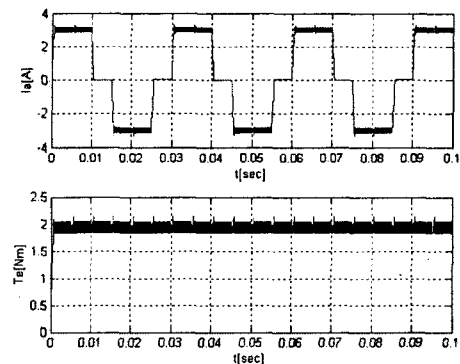


그림 7 보상이 있는 경우의 토크와 전류 파형  
Fig. 7 Current and torque waveforms with compensation.

그림 8은 실험을 통하여 그 타당성을 검증하기 위한 BLDC 전동기의 제어시스템 구성을 보여준다. 제안한 제어기법을 적용하기 위하여 Texas Instruments사의 TMS320F240 DSP를 주처리로 하는

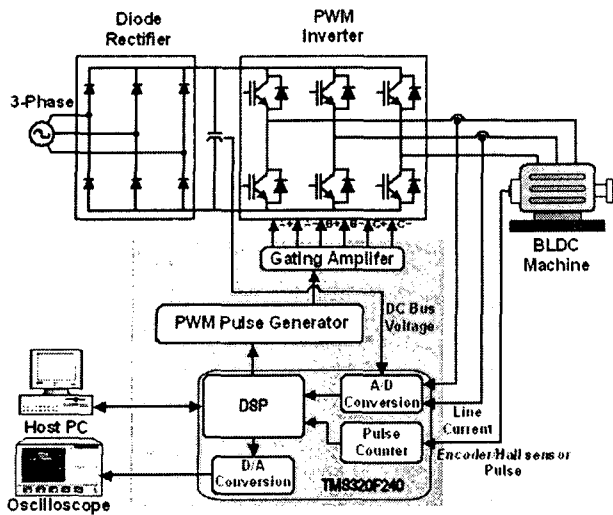


그림 8 BLDC 전동기의 제어 시스템  
Fig. 8 Control system of Brushless DC Motor

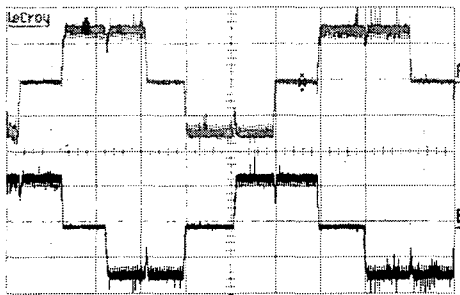


그림 9 보상이 없는 경우의 전류 파형  
Fig. 9 Current waveforms without compensation

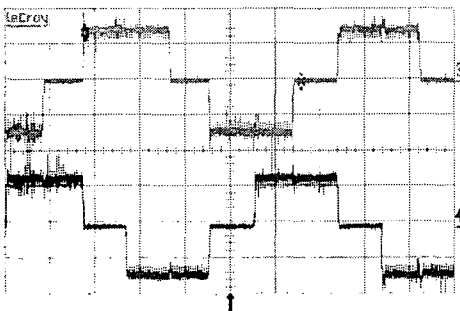


그림 10 보상이 있는 경우의 전류 파형  
Fig. 10 Currents waveforms with compensation

디지털 제어 시스템과 PWM Inverter, Diode 정류기 등을 사용하였다. 실험에서 사용한 BLDC 전동기 파라미터는 표 1에 주어졌다. 스위칭 주파수는 10[kHz]이고 인버터의 직류단 전압은 310[V]이다.

그림 9는 보상이 없는 경우에 1000rpm 속도에서의 전류 파형이다. 전류(commutation) 구간에서 역기전력과 상 인덕턴스에 관계하여 상승 모드 전류와 감소모드 전류의 증가율과 감소율에 차이가 생기므로 인한 전류 리플이 생기는 것을 알 수 있다. 이 전류 리플은 토크 리

플에 영향을 준다.

그림 10은 보상이 있는 경우에 1000rpm 속도에서의 전류 파형이다. 그림 9의 전류(commutation)구간에서 발생하는 전류 리플이 현저히 감소하였고, 따라서 토크 리플도 현저히 감소한다는 것을 알 수 있다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 BLDC 전동기의 토크리플 저감을 위한 새로운 전류 제어기법을 제안하였다. 제안한 방법은 전류(commutation) 구간에서 전류(commutation)모드 전류들의 증가율과 감소율을 같게 해주도록 전압을 보상함으로써 토크리플을 감소시킬 수 있었다. 시뮬레이션과 실험 결과로부터 제안한 방법이 토크리플을 현저히 감소함을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] J.F. Gieras, M. Wing, "Permanent Magnet Motor Technology", Marcel Dekker, Inc., Second Edition, Revised and Expanded, pp. 227-297, 2002.
- [2] 김상훈, 김진용, "BLDC 전동기를 위한 고성능 전류제어 기법", 강원대학교 산업기술 연구소 산업기술연구 논문집, 제22권 B호, pp. 125-132, 2002, 12.
- [3] R. Carlson, M.L. Mazenc, and J.C.S. Fagundes, "Analysis of Torque Ripple Due to Phase Commutation in Brushless dc Machines", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 28, No. 3, pp. 441-450, 1992.
- [4] C. Berendsen, G. Champenois, and A. Bolopion, "Commutation Strategies for Brushless DC Motors: Influence on Instant Torque", IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 8, No. 2, pp. 231-236, 1993.
- [5] 강석주, 김준석, 홍석준, 설승기, "저가형 BLDC 구동장치를 이용한 정밀위치제어", 대한전기학회지, 제44권 제4호, pp. 447-452, 1995.
- [6] Seog-Joo Kang and Seung-Ki Sul, "Direct Torque Control of Brushless DC Motor with Nonideal Trapezoidal Back EMF", IEEE Trans. on Power Electronics, vol 10, No. 6, pp. 796-802, 1995, November.