

# DC Link단 단일 전류센서에 의한 브리시리스 직류 전동기의 토크 리플 저감

백대진<sup>\*</sup>, 원창희<sup>\*</sup>, 이교범<sup>\*</sup>, 최익<sup>\*</sup>, 송중호<sup>\*</sup>, 유지윤<sup>\*\*</sup>  
 한국과학기술연구원, 고려대학교

## Torque Ripple Reduction of BLDC Motors Using Single DC-Link Current Sensor

Dae-Jin Baek<sup>\*</sup>, Chang-Hee Won<sup>\*</sup>, Kyo-Beum Lee<sup>\*</sup>, Ick Choy<sup>\*</sup>, Joong-Ho Song<sup>\*</sup>, and Ji-Yoon Yoo<sup>\*\*</sup>  
 KIST, Korea Univ<sup>\*\*</sup>

**Abstract-** This paper presents a method to reduce commutation torque ripples occurred during commutation in brushless dc motor drives using a single DC-link current sensor. In brushless dc motor drives with a single dc current sensor instead of 3-phase line current sensors, it is noted that dc-link current sensor cannot give any information corresponding to the motor currents during line current commutation intervals. A new technique to resolve such a problem is dealt with based on a deadbeat current control in which motor armature voltage command is computed from a dc-link current reference, an actual current and counter emf voltage. The simulation results show that the proposed method reduces the torque ripple significantly

### 1. 서 론

BLDC 전동기는 직류 전동기의 정류자 및 브러쉬에 의한 기계적 전환 방식을 반도체 스위치를 이용한 전자적 전환 방식으로 대체한 전동기로 전류 대 토크, 전압 대 속도 특성이 직류 전동기와 같은 성능을 가지며 회전시 브러시와 정류자 사이에서 발생하는 마찰에 의한 브러시 마모에 대해 정기적인 유지, 보수가 필요없고 소음과 스파크로 인한 현상 응용에의 제약성이 없으며, 회전자에 코일이 없어 냉각이 용이하며, 동손이 없어 넓은 속도 영역에서 높은 효율을 유지하므로 동일 용량의 유도 전동기에 비하여 소형 경량화가 가능하다. 그러므로 직류 직전동기와 같은 여러 가지 제약성을 갖지 않아 자동차 공업의 생산라인, 반도체 제조장비나 우주산업 분야 등의 특수환경에 널리 쓰이고 있다. 그러나 사다리꼴 형태의 역기전력 파형을 갖는 구형과 전류 여자 BLDC 전동기는 고정자 권선의 인덕턴스 성분으로 인하여 3상 2여자 방식의 인버터로 이상적인 구형과 전류를 전동기에 인가하는 것이 불가능하기 때문에 상 전류가 전환될 때마다 전류 리플이 발생되고 이로 인하여 토크 리플이 발생하는 단점이 있다<sup>[1]</sup>. 기존 연구들은 전동기의 3상 전류를 모두 센싱하여 이러한 상전류 전환 구간에서의 토크 리플 성분을 저감하는 기법들을 제안하였으나 다수의 전류 센서가 필요하고 그로 인해 비용 증가와 구동 드라이브의 크기 또한 증가하였다.<sup>[2-4]</sup>

따라서, 본 연구에서는 Deadbeat 제어를 사용하여 전류 제어를 수행하고 DC-link단의 단일 전류 센서만을 사용하여 기존의 제안된 방법보다 저비용 및 구동 드라이브의 소형화

를 구현하여 상전류 전환 구간에서의 토크 리플을 저감하는 방법을 제안하였다<sup>[5]</sup>. 디지털 시뮬레이션을 행하여 결과를 보임으로써 제안된 방법의 성능을 검증하였다.

### 2.1 BLDC 전동기의 구동

구동 드라이브 및 BLDC 전동기 등가회로와 스위칭 패턴은 그림1과 같다.

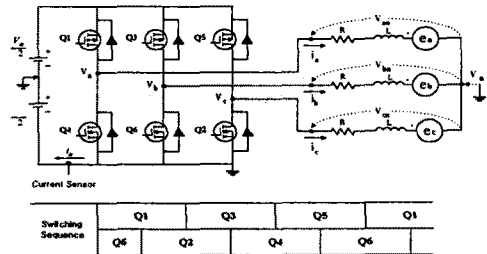


그림 1. 전동기 구동 드라이브 및 스위칭 패턴  
 Fig. 1 Inverter & Switching sequence

일반적인 BLDC전동기의 전압 방정식과 출력 토크 방정식은 식(1), 식(2)와 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = -\frac{R}{L} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

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

여기서,  $v_{an}, v_{bn}, v_{cn}$ : 전동기 단자전압,  $i_a, i_b, i_c$ : 상전류,  $e_a, e_b, e_c$ : 역기전력,  $R$ : 상당 저항,  $L$ : 상당 인덕턴스

#### 2.2-1. Normal operation Mode

상전류 전환이 완료된 후 동작은 그림 2와 같다. 스위칭에 의해  $i_{dc}$ 는 (+),(-) 값으로 교번한다.

이상적인 Deadbeat 제어기는 한 Sampling 구간인  $T_s$  동안에 전류 오차를 0으로 한다. k시점에서 샘플링된 직류 전류 오차  $\Delta i_{dc}(k) = i_{dc}^*(k) - i_{dc}(k)$ 를  $\Delta i_{dc}(k+1) = 0$  이 되도록 스위치에 인가될 전압 지령치를 계산한다.

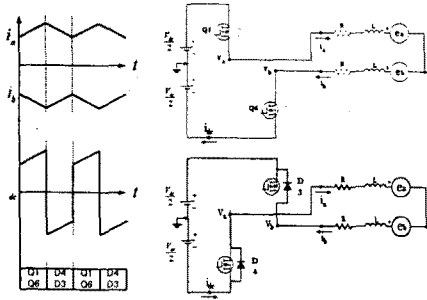


그림 2 정상 동작 모드  
Fig. 2 Normal operation mode

(k+1) sampling 시점에 인가될 전압지령치는 식3과 같다.

$$v_{ref}(k+1) = 2L \cdot \frac{i_{dc}^*(k) - |i_{dc}(k)|}{T_s} + 2E(k) \quad (3)$$

여기서, E: 역기전력의크기이다.

### 2.2-2. Commutation period

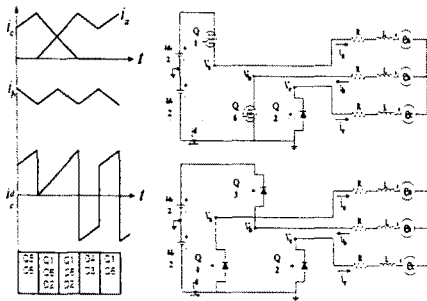


그림 3 전류 모드  
Fig. 3 Commutation period

2상 여자 구간에서는 전류 제어기의 출력인 전압 지령치에 의해 전류 제어가 수행되나 상전환이 이루어진 직후인 Commutation 구간에서는 턴-오프되는 상의 환류 다이오드가 도통이 되어 DC-link단 전류가 0으로 감소했다가 일정 기울기를 가지며 증가하게 된다. 그 순간 전류 제어기의 입력이 되는 DC-link단 전류 오차가 커지게 되어 제어기 출력이 포화 상태가 된다.

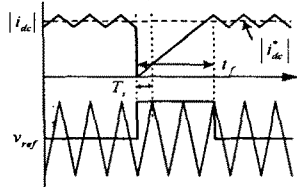


그림 4 Commutation 시 전류제어기 출력의 포화  
Fig. 4 Controller saturation during commutation interval

### 3. 토크 리플 저감

전압 지령치가 포화되어 전류 제어가 수행되면 전류 리플이 존재하고 그로 인해 토크 리플이 발생하게 된다. 따라서, 전류 제어기의 출력에 적절한 값을 보상하여 전압 지령치가 포화되지 않도록 새로운 전압 지령치를 계산하여 구동 드라이브에 인가한다. 이를 도식화하면 그림 5와 같다.

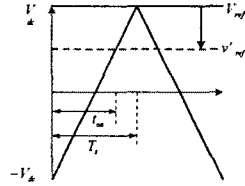
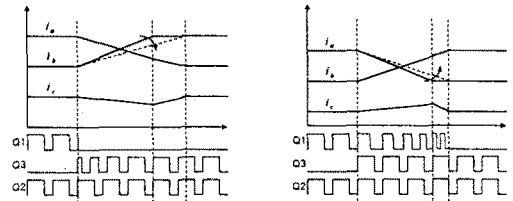


그림 5 전류제어기 출력에 대한 보상 방법  
Fig. 5 Compensation method to current controller

보상된 새로운 전압 지령치에 의해 commutation 구간에서 스위칭이 이루어지고 이에 의해 전동기 단자 전압이 달라지게 된다. 따라서 상전환에 의해 턴-온, 턴-오프되는 상의 전류의 증가, 감소하는 기울기의 변화가 생긴다. 저속 및 고속에서 보상값은 그림 6와 같은 원리로 결정한다.



(a) 저속 영역 (b) 고속 영역

그림 6 보상값 결정의 개념  
Fig. 6 Conception of determination of compensation value

BLDC 전동기의 토크 리플이 발생하는 가장 큰 요인은 상 전환시 속도에 따라 달라지는 역기전력의 크기의 영향으로 턴-온, 턴-오프되는 상의 전류의 증가, 감소하는 기울기가 다르므로써 생기는 전류 리플 때문이며 전류 기울기를 같게 하므로써 전류 리플을 저감할 수 있다. 저속에서의 보상값은 다음 식에 의해 유도된다.

$$\begin{cases} \frac{di_{off}}{dt} = -\frac{V_{dc} + 2E}{3L} \\ \frac{di_{on}}{dt} = \frac{V_{dc}(3D_{low} - 1) - 2E}{3L} \end{cases} \quad (4)$$

전류 변화의 기울기의 크기를 같게 하면 유효 전압이 인가될 시비율은 (식5)와 같이 얻어진다.

$$D_{low} = \frac{2}{3} + \frac{4}{3} \frac{E}{V_{dc}} \quad (5)$$

고속영역에 대한 보상값은 저속영역에서의와 같은 원리이다

$$D_{high} = -1 + \frac{4E}{V_{dc}} \quad (6)$$

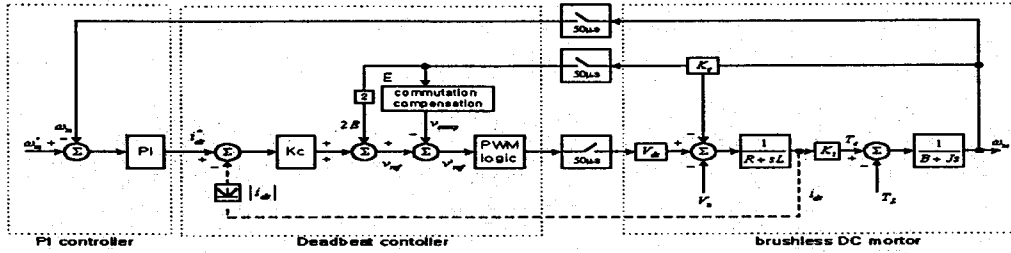


그림 8 제어 블록도  
Fig. 8 Control Block Diagram

(식5),(식6)에서 보는바와 같이 스위치에 인가될 시비율은 역기전력의 함수로써 나타난다. 역기전력은 또한 기계적 각 속도에 비례하는 함수이므로 속도에 따른 시비율을 도식화 하면 그림7과 같다.

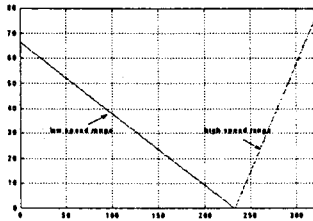
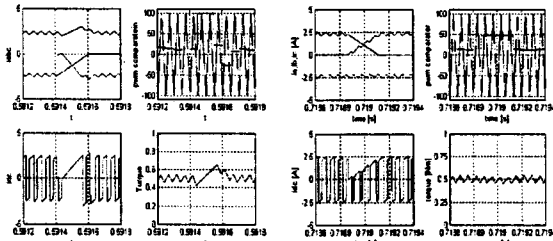


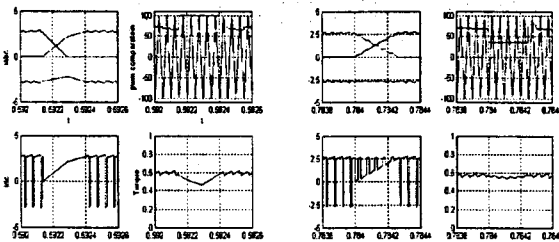
그림 7. 속도에 따른 시비율의 변화  
Fig. 7. Variation of duty ratio

#### 4. 시뮬레이션 결과

전체 제어 블록도는 그림 8와 같다.



(a) 보상 전 (b) 보상 후  
그림 9 저속 영역에서의 파형  
Fig. 9 Low speed range



(a) 보상 전 (b) 보상 후  
그림10 고속 영역에서의 파형

#### 5. 결론

본 논문에서는 Deadbeat 제어를 사용하여 전류제어를 수행하고 DC-link단의 단일 전류센서만을 사용하여 기존의 제안된 방법보다 전류센서의 수를 줄였다. 상전환이 이루어진 직후 dc-link 전류가 0으로 감소하므로 전류 제어기의 출력인 전압 지령치가 포화 된다. 이를 저속과 고속에 따라 각각 보상하여 스위칭이 이루어지도록 함으로써 스위치의 턴-온, 턴-오프에 따라 상승, 하강하는 전류의 기울기를 같게 하여 전류 리플 및 토크 리플을 저감할 수 있었다.

#### [참고문헌]

- [1] R. Carlson et al, "Analysis of torque ripple due to phase commutation in brushless dc machines", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 28 no.3, pp. 632-638, 1992
- [2] Y. Murai et al, "Torque ripple improvement for brushless dc miniature motors", IEEE Trans. on Industry Applications, vol.25 no.3, pp. 441-450, 1989
- [3] C. Berendesen et al, "Commutation strategies for brushless dc motor: Influence on instant torque", IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 8, no. 2, pp. 231-236, 1993
- [4] Seog-Joo. Kang et al, "Direct torque control of the brushless dc motor with non-ideal trapezoidal back EMF", IEEE Trans. on Power Electronics, vol.10, no. 6, pp. 796-802, 1995
- [5] F. Blaabjerg et al, "Single current sensor technique in the DC link of three-phase PWM-VS inverters: a review and a novel solution", IEEE Trans. on Industry Applications, vol.33, no.5, pp. 1241-1253, 1997