

# 상 저항을 고려한 BLDC Motor의 상 전환 토크리플 저감에 대한 연구

오대영\*, 최 익\*, 송중호\*\*  
 \*광운대학교, \*\*서울산업대학교

## Commutation torque ripple reduction in brushless dc motor considering phase resistance

Dae-Young Oh\*, Ick Choy\*, Joong-Ho Song\*\*  
 \*Kwangwoon University, \*\*Seoul National University of Technology

### ABSTRACT

본 논문에서는 하나의 DC-Link 전류센서를 사용하여 BLDC 모터의 상 저항을 고려한 상 전환 토크리플 저감 방법을 제안하고자 한다. 지금까지 하나의 DC-Link 전류센서를 사용하여 BLDC 모터의 상 전환 토크리플 저감에 대한 연구는 많이 진행 되어 왔다. 기존의 방법들은 상 저항 값을 무시하여 상 인덕턴스 성분만을 가지고 제어한 방법이 주류를 이루어 왔다. 하지만 상 저항 값이 크면, 저속 영역과 고속 영역 구간에 변화를 가져와 기존의 방법을 사용할 시 토크리플이 발생한다. 또한 상 전환 시 전류 기울기와 상 전환 시간에 대해 영향을 미치게 되어 기존의 방법을 사용할 경우 토크리플이 발생하게 된다. 본 논문에서는 시뮬레이션을 통하여 상 저항을 고려한 BLDC 모터의 상 전환 토크리플 저감 방법에 대해 효율성을 입증하고자 한다.

향을 끼치게 되어 발생한다. 또한 상 전환 구간에서 기존의 방법을 사용하였을 경우 보다 나은 토크리플 저감을 할 수 있다. 본 논문에서는 하나의 DC-Link 전류센서를 사용하여 상 저항을 고려한 상 전환 토크리플 저감 방법에 대해 시뮬레이션을 통하여 효율성을 입증하고자 한다.

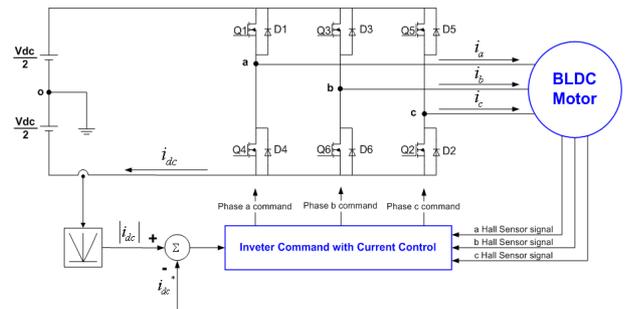


그림 1 하나의 DC-Link 전류센서를 사용한 BLDC 모터 드라이브 구성도

### 1. 서 론

BLDC 모터는 회전자 속도에 따라 상 전환 토크 리플이 발생하게 된다. 이러한 토크리플은 상 전환 구간에서 상전류의 상승, 하강 시간이 불일치하여 발생하게 된다. 상 전환 토크리플은 회전자의 속도에 따라 제어된 기준 토크 값에서 높은 값으로 튀는 경우와 낮은 값으로 튀는 경우, 토크리플이 없는 경우 세 가지 경우로 분리 할 수 있다. 토크 리플이 위로 튀는 경우는 상 전환 구간동안 감소하는 상전류 시간이 증가하는 상전류 시간보다 짧은 경우일 때 발생하며, 이러한 현상이 발생하는 구간을 저속 영역이라 한다. 토크 리플이 아래로 튀는 경우는 상 전환 구간동안 감소하는 상전류 시간이 상승하는 상전류 시간보다 긴 경우일 때 발생하며, 이러한 현상이 발생하는 구간을 고속 영역이라 한다.<sup>[1]</sup> 상 전환 토크 리플을 저감할 때 토크리플이 발생되는 회전자 속도에 따른 토크 리플 영역 구간을 정하는 것은 매우 중요하며, 발생된 토크리플은 상전류 상승, 감소 시간을 일치시킴으로써 저감시킬 수 있다.<sup>[2]</sup> 그림 1은 하나의 DC-Link 전류센서를 사용한 BLDC 모터 드라이브 구성도이며, 저속 영역일 때와 고속 영역일 때의 상전류와 토크를 나타낸 시뮬레이션 파형은 그림 2와 같다. 기존의 방법에서는 저속 영역과 고속 영역을 모터의 부하에 상관없이 분리하여 토크리플을 저감 하였으나 모터에 부하를 인가하였을 시 전류량에 따라서 저속 영역과 고속 영역이 기존의 방법과 비교 하였을 때 오차가 발생한다. 이는 전류가 증가함에 따라 상 저항 값이 영

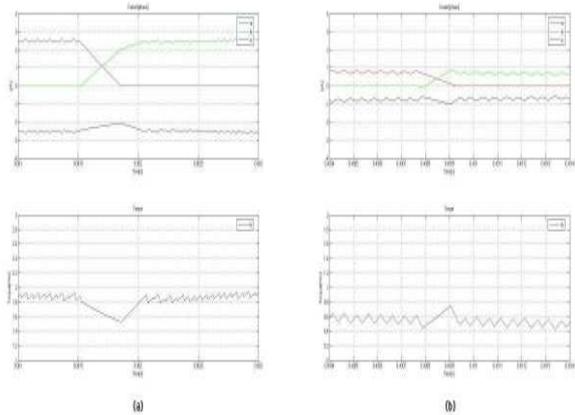


그림 2 상 전환 구간에서 전류와 토크 시뮬레이션 (a)고속 영역 (b)저속 영역

### 2. BLDC 모터의 전류 제어

본 논문에서 사용한 BLDC 모터 드라이브 구성은 그림 1과 같다. 구동 PWM은 바이폴라 PWM 방식을 사용하였으며, 전류 제어기는 Dead-beat 전류 제어기를 사용하였다. BLDC 모터는

회전자의 위치에 따라 각 상에 전압을 인가함에 따라 비로소 구동을 할 수 있다. 그림 3은 회전자 위치에 따른 역기전력 파형과 전류 파형을 나타낸 그림이다.

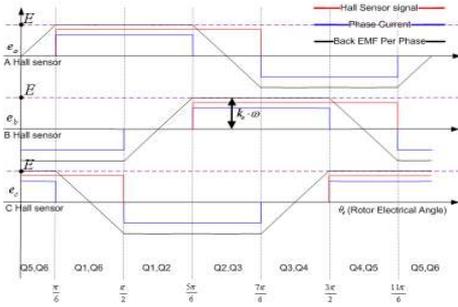


그림 3 회전자 위치에 따른 역기전력 파형 및 Hall Sensor 신호 파형

### 2.1 상 전압 방정식

인버터 스위치 조건에 따라서 BLDC 모터의 상 전압 방정식이 바뀌게 된다. 회전자 전기 각이  $\pi/2 \sim 5\pi/6$  구간에서는 그림 4와 같이 인버터가 동작하고, 스위치 상태를 고려하여 상 전압 방정식을 표현하면 수식(1)~(2)와 같다. S는 스위치 상태를 나타내며, 위의 Q1스위치가 On되는 상을 기준으로 상의 윗 스위치가 On 일 때 1, 아래 스위치가 On일 때 -1이다.

$$S \cdot \frac{V_{dc}}{2} = R \cdot i_a + L \cdot \frac{di_a}{dt} + e_a + V_{no} \quad (1)$$

$$-S \cdot \frac{V_{dc}}{2} = R \cdot i_b + L \cdot \frac{di_b}{dt} + e_b + V_{no} \quad (2)$$

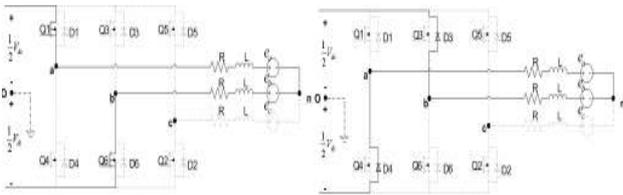


그림 4 회전자 전기 각이  $\pi/2 \sim 5\pi/6$  구간에서의 인버터 동작

### 2.2 전류 제어

인버터 동작을 고려하여 각 상 전압 방정식을 하나의 수식을 표현하면 수식(3)과 같이 표현할 수 있다. 이 때 각 상 역기전력은 그림 3에서 표현한 것과 같이 비전환 구간에서는 E값을 갖는다고 한다.<sup>[2]</sup>

$$S \cdot V_{dc} = V_{ab} = S \cdot 2R \cdot i_{dc} + S \cdot 2L \cdot \frac{di_{dc}}{dt} + 2E \quad (3)$$

전류를 제어하기 위해서 PWM의 Duty를 결정해야 한다. 수식(6)은 Dead-beat 전류 제어기를 통하여 나온 PWM 변조 신호이다.<sup>[2]</sup> 그림 5는 본 논문에서 사용한 PWM 변조 신호와 반송 신호를 표현한 것이다.

$$V_m^*(k) = 2R \cdot |i_{dc}(k-1)| + \frac{2L}{T_s} \cdot (i_{dc}^*(k-1) - |i_{dc}(k-1)|) + 2E(k-1) \quad (4)$$

## 3. 토크 리플 저감

### 3.1 토크 관계식

BLDC 모터 토크와 역기전력 관계식은 수식(5)~(6)과 같다.  $\omega_e$ 는 회전자 전기적 속도이며,  $k_e$ 는 역기전력 상수이다.

$$T_e \cdot \omega_e = e_a \cdot i_a + e_b \cdot i_b + e_c \cdot i_c \quad (5)$$

$$e_x = k_e \cdot \omega_e \quad (6)$$

회전자 전기 각이  $\pi/2 \sim 5\pi/6$  구간에 토크관계식은 최종적으로 수식(7)과 같다. 이 때 상역기전력 값은 그림 3에서 나타낸 E값이라 한다.

$$T_e = \frac{2E}{\omega_e} \cdot i_a \quad (7)$$

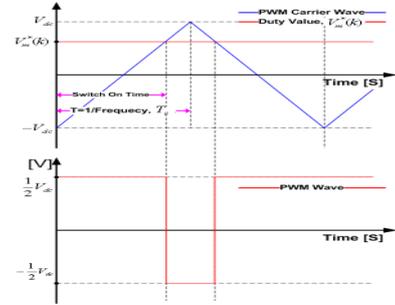


그림 5 PWM 변조 신호와 반송 신호

### 3.2 저속 영역과 고속 영역

앞에서 기술한 바와 같이 상 전환시 전류 기울기에 따라 토크 리플이 발생하게 된다. 이러한 토크 리플을 저감하기 위하여 먼저 고속 영역과 저속 영역이 발생하는 구역을 설정하는 것은 선행 되어야한다. 이는 각 영역이 토크 리플이 발생하는 전류 기울기 차이에 의해 속도 영역에 따라 인버터 스위치 상태가 다르게 주어야 하므로 매우 중요하다. 수식(8)은 상 저항을 고려했을 때 토크 리플 발생 조건이다. 그림 6은 기존 방식과 상 저항을 고려하였을 때 토크 리플이 발생하는 속도 영역을 비교한 그림이다. 수식(8)과 그림 6에서 나타나듯이 부하가 증가함에 따라 상 저항이 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 사용한 BLDC 모터 상수는 표1과 같다.

$$V_{dc} > 3 \cdot R \cdot |i_{dc}| + 4E \quad (\text{저속영역 조건}) \quad (8)$$

$$V_{dc} = 3 \cdot R \cdot |i_{dc}| + 4E \quad (\text{토크리플 없는 조건})$$

$$V_{dc} < 3 \cdot R \cdot |i_{dc}| + 4E \quad (\text{고속영역 조건})$$

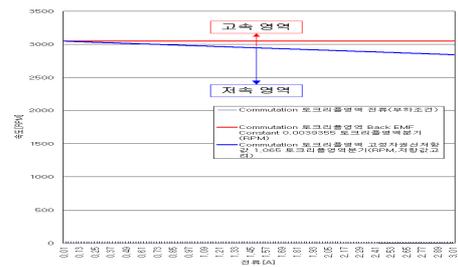


그림 6 토크리플 발생 영역

### 3.2.1 저속 영역

회전자 전기 각이  $5\pi/6$  구간에서 저속 영역에서의 토크리플 저감은 그림 8과 같이 전류 상승, 감소 시간을 같게 인버터를 동작하여 토크 리플을 저감 한다. 상 전환 시 PWM 변조 신호는  $V_{dc}$  값을 갖는다. 상 전환 시 보상 값을 넣어 인버터를 동작 시킨다. PWM 변조 신호의 보상 값은 수식(9)와 같다.

$$V_{dc}'(k)_{low} = \frac{10}{3} \cdot V_{dc} - \quad (9)$$

$$\frac{8}{3} \cdot E(k-1) - 2 \cdot R \cdot |i_{dc}(k-1)|$$

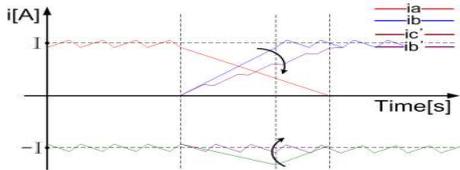


그림 7 저속 영역에서의 토크리플 저감 방법

### 3.2.2 고속 영역

회전자 전기 각이  $5\pi/6$  구간에서 고속 영역에서의 토크리플 저감은 그림 9와 같이 전류 상승, 감소 시간을 같게 인버터를 동작하여 토크 리플을 저감 한다. 상 전환 시 PWM 변조 신호는  $V_{dc}$  값을 갖는다. 상 전환 시 보상 값을 넣어 인버터를 동작시킨다. PWM 변조 신호의 보상 값은 수식(10)과 같다.

$$V_{dc}^*(k)_{high} = 6 \cdot R \cdot |i_{dc}(k-1)| + 8 \cdot E(k-1) - 2 \cdot V_{dc} \quad (10)$$

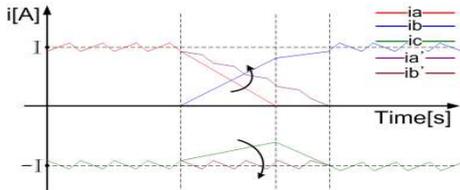


그림 8 고속 영역에서의 토크리플 저감 방법

## 4. 시뮬레이션

시뮬레이션에 사용한 BLDC 모터 상수는 표1과 같다. 그림 9~그림 12는 각 영역에서의 토크리플 저감 전/후 시뮬레이션 결과 파형이다. 전류 제어 주기는 20Khz이다.

정격 출력	212[W]
정격 전압	48[V]
무부하 속도	6060[RPM]
무부하 전류	0.129[A]
상 저항	1.065[Ω]
상 인덕턴스	360[mH]
회전자 이너샤	130[gcm]
역기전력 상수	7.871[mV/RPM]

표 1 BLDC 모터 상수

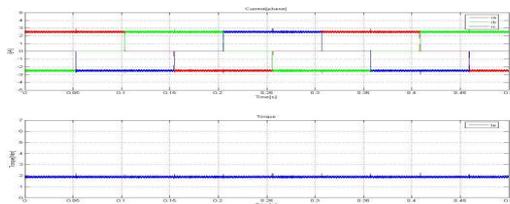


그림 9 저속 영역에서의 토크리플 저감 전 상 전류와 토크 시뮬레이션 파형

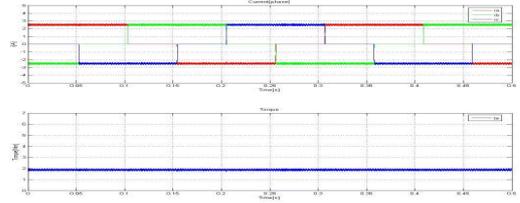


그림 10 저속 영역에서의 토크리플 저감 후 상 전류와 토크 시뮬레이션 파형

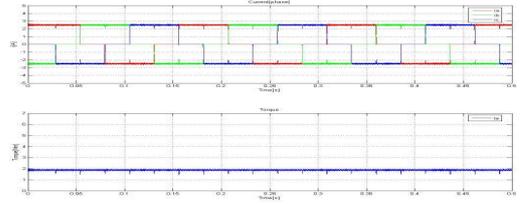


그림 11 고속 영역에서의 토크리플 저감 후 상 전류와 토크 시뮬레이션 파형

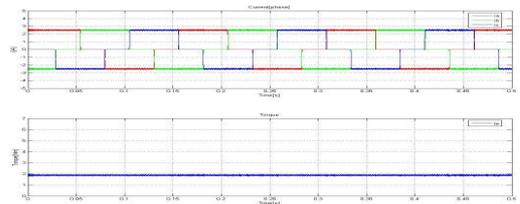


그림 12 고속 영역에서의 토크리플 저감 후 상 전류와 토크 시뮬레이션 파형

## 5. 결론 및 향후 연구방향

본 논문에서는 BLDC 모터의 상 저항을 고려하여 상 전환 토크리플 저감 방법을 제안하였다. 현재 시뮬레이션을 통하여 그 효율성을 검증 하였으나, 앞으로 실험을 통하여 상 저항을 고려한 상 전환 구간에서 토크리플 저감에 대해 효율성을 검증해야 할 것이다.

### 참고 문헌

- [1] R. Carlson, M. Lajoie-Mazenc, and J. C. S Fagundes, "Analysis of torque ripple due to phase commutation in brushless DC machines", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 28, pp. 632-638, May/June. 1992.
- [2] Joong-Ho Song, Ick Choy, "Commutation torque ripple reduction in brushless DC motor drives using a single DC current sensor", IEEE Transactions on power electronics, vol. 19, NO. 2, March 2004.
- [3] J. Holtz and L. Springob, "Identification and compensatoin of torque ripple in high-precision permanent magnet motor drives", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 43, pp. 309-320, Apr. 1996