

## BLDC모터에서 전류시간에 의한 토크맥동에 관한 연구

김철주, 강병희, 목형수, \*김덕근, \*\*김병규  
건국대학교 전기공학과, \*(주)코모텍, \*\*(주)아모텍

### A study on the torque pulsation caused by commutation time in BLDC Motor

C.J.Kim, B.H.Kang, H.S.Mok, \*D.K.Kim, \*\*B.K.Kim  
Dept. of Electrical Eng. Konkuk Univ., \*Komotek, \*\*Amotek

#### ABSTRACT

Torque pulsation generated in every commutation period is the main drawback of BLDC motor, which deteriorates the precision of BLDC motor. Many methods to solve this problem have been proposed. In this paper, a new torque model considered with decaying phase back EMF is introduced and from it the cause of torque pulsation in commutation period is analyzed. From this analysis, new algorithms to reduce the torque pulsation by commutation time are proposed and with simulation, the validity is verified.

#### 1. 서 론

역기전력의 형태가 사다리꼴인 BLDCM(Brushless DC Motor)은 단위전류당 높은 토크, 간단한 구동방식, 무보수성, 견고성등의 장점을 가지고 있는 반면 전류(轉流, commutation)로 인한 토크 맥동이 발생한다는 단점이 있다. 이는 고정밀도를 요구하는 분야에 대한 BLDC모터의 응용을 제한하는 걸림돌로 작용하고 있다.

전류시에 나타나는 토크맥동의 원인을 전류의 맥동으로 보고 전류제어에 의한 토크맥동감소에 관한 연구가 수행되어져 왔으며, 직류단 전류를 일정하게 제어하는 방법[1], off상 전류를 지연시켜 토크리플을 억제하는 방법[2], 비전류상전류를 일정하게 제어하는 방법[3], 모터와 인버터간의 중성점 전압을 비전류제어에 전향보상한 방법[4], off상전류 스위칭을 통해 상승/감쇠기울기를 동일하게 유지하여 비전류상전류를 일정하게 하는 방법[5] 등이 있다.

그러나, 모터권선의 인덕턴스 성분과 인버터 직류단전압의 제한성 때문에 전류는 순간적으로 일어날 수 없고 유한한 시간을 필요로 하며 이러한 유한한 전류시간은

전류시간(轉流時間)에 비례하는 토크맥동을 발생시킨다. 따라서, 본 연구에서는 전류시 토크맥동의 또 다른 원인으로 전류시간이 토크맥동에 미치는 영향에 대하여 해석하였으며 전류시간에 의한 토크맥동을 저감시키기 위한 방식을 제안하였다. 전류시간을 근본적으로 제거할 수는 없으나 전류시점을 제어함으로써 전류시간에 의한 토크맥동을 저감시키는 것은 가능하며, 세 가지 경우의 전류시점을 비교하여 최적의 전류시점을 구하였다.

마지막으로 시뮬레이션을 통하여 제안된 방식의 타당성을 검토하였다.

#### 2. BLDC모터의 토크

그림1은 120° BLDC모터의 이상적인 역기전력 및 전류파형을 나타내고 있다. 일반적으로 BLDC모터는 3상 2 여자방식으로 구동되며 2상에 전류가 흐르는 2상도통구간(이하 도통구간)과 3상에 전류가 흐르는 전류구간으로 나눌 수 있다. 그림에서 역기전력이 평탄한 120° 구간에서 이상적인 구형파 전류를 인가할 때 맥동없는 일정한 토크를 얻을 수 있다.

본 절에서는 먼저 일반적인 토크표현에 관해 살펴보고 다음으로 본 연구에서 제안한 감쇠상의 역기전력을 고려한 토크모델을 이용하여 기존 모델과의 비교와 함께 토크맥동의 원인을 분석하였다.

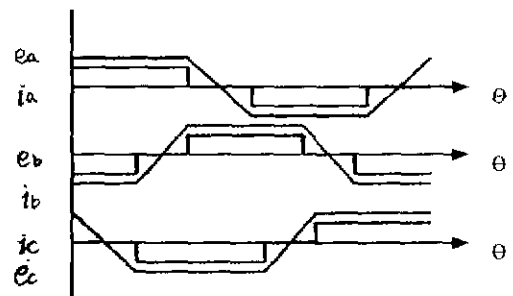


그림1. BLDC전동기의 역기전력과 전류

본 논문에서 사용된 가정은 다음과 같다.

- 1) BLDC모터의 역기전력은 평탄한 구간이 120° 인 이상적인 사다리꼴이다.
- 2) 각상의 역기전력은 120° 의 위상차를 가지고 있다.
- 3) 각상의 저항과 인덕턴스는 동일하며 회전자의 위치에 따른 인덕턴스의 변화는 무시한다.

## 2.1 일반적인 토크모델

### 2.1.1 도통구간의 토크

그림2는 전류(轉流)시점을 기준으로 확대한 것으로 전류는 전기적으로 60° 마다 반복되기 때문에 임의의 한 구간을 해석하면 전구간에 적용할 수 있다.

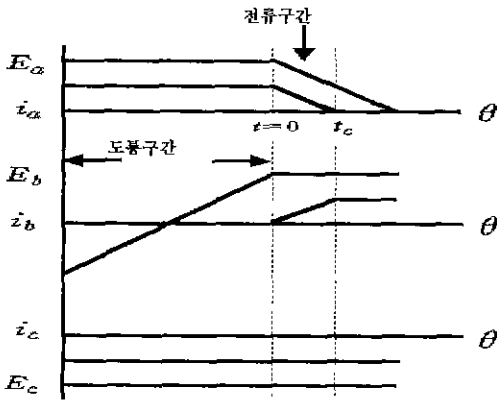


그림2. 도통 및 전류구간

전동기의 토크식은 식(1)과 같으며, 그림2와 같이 a상과 c상이 도통된 경우 각상의 전류와 역기전력은 식(2)과 같다.

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

$$i_a = -i_c = I, \quad i_b = 0 \quad (2)$$

$$e_a = -e_c = E, \quad e_b = \frac{6E}{\pi} \theta + E \quad (3)$$

여기서,  $i_a, i_b, i_c$ 는 a,b,c상 전류,  $e_a, e_b, e_c$ 는 a,b,c상 역기전력,  $E$ 는 역기전력의 최대치,  $I$ 는 전류,  $\theta$ 는 회전자의 위치를 각각 나타낸다.

식(2),(3)을 식(1)에 대입하여 정리하면 식(4)과 같이 도통구간의 토크를 얻으며 토크는 전류와 역기전력에 비례하여 나타남을 알 수 있다.

$$T_e = \frac{2EI}{\omega_m} = \frac{2E}{\omega_m} i_a \quad (4)$$

### 2.1.2 전류구간의 토크

그림 2에서 ac상에서 bc상으로 전류가 일어나는 경우, 각상의 전류와 역기전력은 식(5),(6)이 표현될 수 있으며 이때, 전류구간에서 역기전력의 크기는 일정하다고 가정하였다.

$$i_a = -\frac{I}{t_c} \theta + I, \quad i_b = \frac{I}{t_c} \theta, \quad i_c = -I \quad (5)$$

$$e_a = e_b = -e_c = E \quad (6)$$

여기서,  $t_c$ 는 전류시간을 나타내며 a상은 감쇠상, b상은 상승상, c상은 비전류상이다. 식(5),(6)을 식(1)에 대입하면 식(4)과 같은 크기를 갖는 토크가 얻어짐을 알 수 있다.

$$T_e = \frac{2EI}{\omega_m} = -\frac{2E}{\omega_m} i_c \quad (7)$$

일반적으로 속도 제어기의 제어주기가 전류제어주기의 제어주기에 비해 상당히 크기 때문에 속도를 일정하다고 가정하면 토크는 전류에 비례하며 이를 일정하게 제어함으로써 식(4),(7)에서와 같은 일정토크를 얻을 수 있으며 기존의 토크맥동저감방식을 통해 가능하다.

### 2.1.2 전류구간의 토크

식(7)에서 전류시의 토크를 구할 때 감쇠상역기전력이 일정하다는 가정은 역기전력의 평탄한 구간이 120° 보다 큰 경우, 또는 저속에서와 같이 전류구간이 도통구간보다 상대적으로 아주 짧은 경우에는 유효하다. 그러나 속도의 증가에 따라 전류시간은 증가하게 되고, 일반적인 BLDC모터의 경우 역기전력의 평탄한 구간이 120° 이하이기 때문에 전류구간에서 감쇠상의 역기전력이 일정하다고 볼 수 없다.

전류구간에서의 감소분을 고려한 감쇠상역기전력은 식(8)과 같이 나타낼 수 있으며 토크는 식(9)과 같다.

$$e_a = -\frac{6E}{\pi} \theta + E \quad (8)$$

$$T_e = \frac{2EI}{\omega_m} + \frac{6k_e I}{\pi} \left( \frac{\theta^2}{t_c} - \theta \right) = T_i + T_k \quad (9)$$

여기서,  $T_i$ 는 전류(電流)에 의한 출력토크성분,  $T_k$ 는 전류(轉流)시간에 의한 토크맥동성분이다. 식(7)과 식(9)를 비교해 볼 때, 기존의 토크와 제안한 토크 사이에는  $T_k$ 만큼의 차이가 있음을 알 수 있는데, 이것은 전류구간의 토크를 구할 때 감쇠상의 역기전력을 고려함으로써 기존에는 나타나지 않는 전류시간  $t_c$ 에 의한 영향이 나타남을 알 수 있으며, 일정전류제어가 성공적으로 수행되어 비전류상 전류가 일정하게 유지되어도 전류(轉流)자체에 의한 토크맥동은 피할 수 없음을 의미한다. 전류구간의 토크는 두 가지 성분으로 구성되어 있다.  $T_i$ 는 도통구간의 토크성분과 동일하며 전류(電流)와 역기전력의 상호작용에 의한 출력토크이고,  $T_k$ 는 유한한 전류시간  $t_c$ 에 의해 전류구간에서만 나타나는 성분으로 출력토크  $T_i$ 를 감소시키는 역할을 한다. 따라서, 전류구간에서 나타나는 토크맥동의 원인은 전류의 맥동과 유한한 전류(轉流)시간으로 나눌 수 있음을 알 수 있다.

## 3. 전류시간에 의한 토크맥동 $T_k$

전류시간에 의한 토크맥동  $T_{tc}$ 는 전압원 인버터의 유한한 직류단 전압과 모터권선에 존재하는 인덕턴스로 인해 전류(轉流)가 순간적으로 일어나지 못하고  $t_c$ 라는 유한시간을 필요로 하기 때문에 나타나는 성분으로 전류시간  $t_c$ 에 의한 토크맥동은 식(10)과 같다.

$$T_{tc} = \frac{6k_e I}{\pi} \left( \frac{\theta^2}{t_c} - \theta \right) \quad (10)$$

( $k_e$  = 역기전력 상수 [V/rad/sec])

식(10)에서 알 수 있듯이 토크맥동  $T_{tc}$ 는 회전자의 위치에 대한 2차함수로 나타나며  $T_{tc}$ 의 최대값을 구하기 위해 식(10)을  $\theta$ 에 대해 미분하면 다음과 같다.

$$\frac{dT_{tc}}{d\theta} = \frac{6k_e I}{\pi} \left( \frac{1}{t_c} 2\theta - 1 \right) = 0 \quad (11)$$

식(11)에서  $\theta = \frac{t_c}{2}$  일 때  $T_{tc}$ 는 최대의 맥동을 가지며 그때의  $T_{tc}$ 는 식(12)과 같고 변화량은 식(13)과 같다.

$$T_{tc, \max} = T_{tc} \Big|_{\theta = \frac{t_c}{2}} = -\frac{3k_e I t_c}{2\pi} \quad (12)$$

$$T_{tc, \mu} = \frac{T_{tc, \min}}{T_{base}} = \frac{3t_c}{4\pi} [\rho.u] \quad (13)$$

$$(T_{base} = \frac{2EI}{\omega_m})$$

식(12)에서  $T_{tc}$ 는 전류  $I$ 와 전류시간  $t_c$ 에 비례함을 알 수 있으며 이것을 저감시키기 위해서는 두 가지 요소를 고려해야 한다. 전류  $I$ 를 줄이면  $T_{tc}$ 는 감소하지만 출력토크도 같이 감소하기 때문에 원하는 효과를 기대할 수 없다. 전류시간  $t_c$ 는 출력토크에 영향을 미치지 않고  $T_{tc}$ 를 저감할 수 있으나 전기적 시정수 및 속도(역기전력)에 종속적이기 때문에 전류시간  $t_c$  자체를 줄이는 것은 불가능하다. 그러나 다음절에서 제안한 전류(轉流)시점을 제어하면  $t_c$ 에 의한 영향을 상당히 저감시킬 수 있다.

#### 4. 전류시점 제어법

전류시점 제어법은 전류(轉流)에 의해 발생하는 토크맥동  $T_{tc}$ 를 저감하기 위해 제안한 방식이다.

$T_{tc}$ 는 식(10)에서 알 수 있듯이 회전자의 위치  $\theta$ 에 대한 2차함수이며 전류의 시점과 종점에서는 영이며 중간지점인  $\theta = t_c/2$ 에서 최소값을 갖기 때문에 전류의 시점을 제어하면  $T_{tc}$ 가 그림8과 같이 전류신호  $t=0$ 을 중심으로 나누어지는 효과를 얻을 수 있다. 전류시점을  $\alpha$ 라고 할 때 전류시점의 제어범위는  $-t_c \leq \alpha \leq 0$ 가 된다. 만약,  $\alpha < -t_c$ 인 경우에는 감

쇠상 전류가 미리 감소하기 때문에 출력토크가 그만큼 감소하게 되고  $\alpha > 0$ 인 경우에는 상승상 전류가 늦게 상승함으로 인한 출력토크의 감소를 초래하게 되어 두 경우 모두 토크맥동을 발생시키게 된다.

전류시점을  $-\alpha$ 라고 할 때, 토크맥동  $T_{tc}$ 는 다음과 같이  $t=0$ 를 기준으로 두 영역으로 나누어 표현할 수 있다.

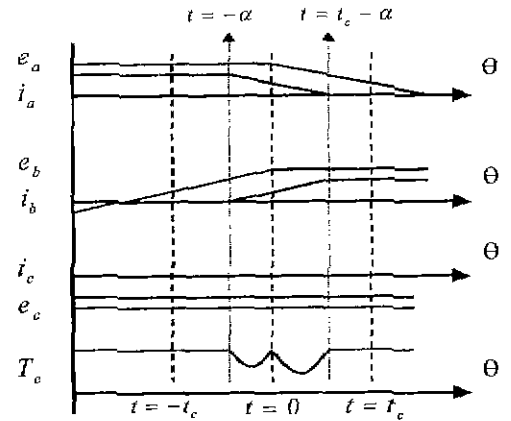


그림3. 전류시점과 토크맥동

1)  $-\alpha \leq \theta \leq 0$

$$i_a = -\frac{I}{t_c}(\theta + \alpha) + I, i_b = \frac{I}{t_c}(\theta + \alpha), i_c = -I \quad (14)$$

$$e_a = E, e_b = \frac{6E}{\pi}\theta + E, e_c = -E \quad (15)$$

토크를 구하기 위해 각 상의 전류와 역기전력을 구하면 식(14),(15)와 같으며 이것을 이용해서 토크를 구하면 식(16)과 같고, 이때의  $T_{tc}$ 는 식(17)과 같다.

$$T_e = \frac{2EI}{\omega_m} + \frac{6EI}{\omega_m \pi t_c} (\theta^2 + \alpha\theta) \quad (16)$$

$$T_{tc} = \frac{6k_e I}{\pi t_c} (\theta^2 + \alpha\theta) \quad (17)$$

최대값  $T_{tc1, \max}$ 와 정규화한 값  $T_{tc1}$ 은 각각 식(18),(19)와 같다.

$$T_{tc1, \max} = -\frac{6k_e I \alpha^2}{4\pi t_c} \quad (18)$$

$$T_{tc1} = \frac{3}{4\pi} \cdot \frac{\alpha^2}{t_c} [\rho.u] \quad (19)$$

2)  $0 \leq \theta \leq t_c - \alpha$

1)의 경우와 마찬가지로 토크를 구하기 위해 각 상의 전류와 역기전력을 구하면 식(20),(21)과 같고

$$i_a = -\frac{I}{t_c}(\theta + \alpha) + I, i_b = \frac{I}{t_c}(\theta + \alpha), i_c = -I \quad (20)$$

$$e_a = -\frac{6E}{\pi}\theta + E, e_b = E, e_c = -E \quad (21)$$

토크  $T_e$ 와  $T_{ic}$ , 최대값  $T_{ic2,max}$ , 정규화한 값  $T_{ic2}$ 은 각각 식(22)~(25)와 같다.

$$T_e = \frac{2EI}{\omega_m} + \frac{6EI}{\omega_m \pi t_c} (\theta^2 + (\alpha - t_c)\theta) \quad (22)$$

$$T_{ic} = \frac{6EI}{\omega_m \pi t_c} (\theta^2 + (\alpha - t_c)\theta) \quad (23)$$

$$T_{ic2,max} = -\frac{6k_d I}{4\pi t_c} (\alpha - t_c)^2 \quad (24)$$

$$T_{ic2} = \frac{3}{4\pi} \cdot \frac{(\alpha - t_c)^2}{t_c} [p.u] \quad (25)$$

식(19),(25)에서 알 수 있듯이 토크맥동은  $t=0$ 을 기준으로 두 부분으로 나누어지며 각각은 입력의 제곱에 비례함을 알 수 있다.

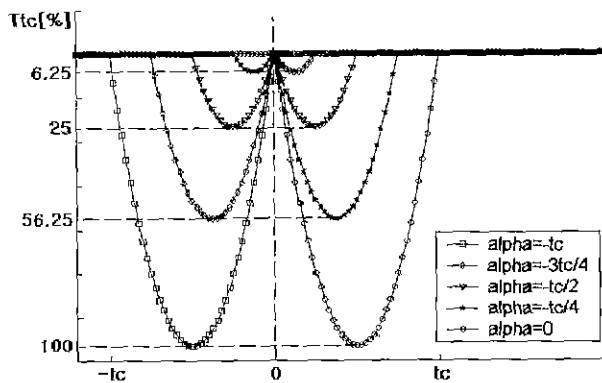


그림4. 전류시점과 토크맥동

그림4는 몇 가지 전류시점  $\alpha$ 에 대한 토크맥동의 크기를 상대적으로 나타낸 것으로  $\alpha = -t_c$ 와  $\alpha = 0$ 일 때 토크맥동은 최대가 됨을 알 수 있고 이 때의 값을 기준으로 비교하면  $\alpha = -t_c/2$ 일 때의 토크맥동이 25%로 양분되어 최소로 됨을 알 수 있다.

## 5. 시뮬레이션

시뮬레이션에 이용된 모터의 파라미터는 표1에 나타나 있으며 전체 시뮬레이션 블록은 그림5와 같다.

그림6은 몇 가지 전류시점  $\alpha$ 에 대한 토크맥동  $T_{ic}$ 를 나

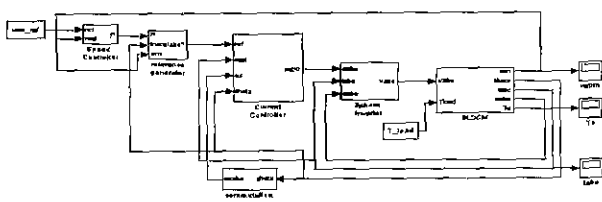
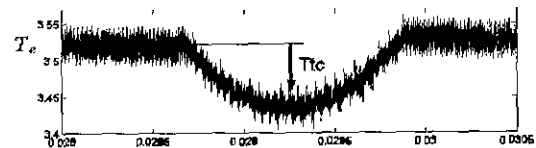


그림5 시뮬레이션 블록

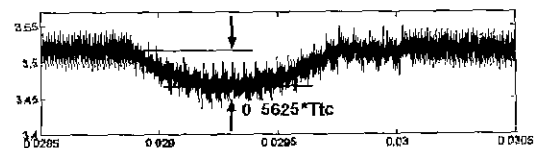
표1. 모터 파라미터

정격속도	3000 [rpm]
정격전류	3.2 [A]
상당저항	2.5 [ $\Omega$ ]
상당인덕턴스	11.2m [H]
역기전력상수	0.02735 [V/rpm]
토크상수	0.4998 [Nm/A]
회전자관성모멘트	0.0016 [Kgm <sup>2</sup> ]
극수	4

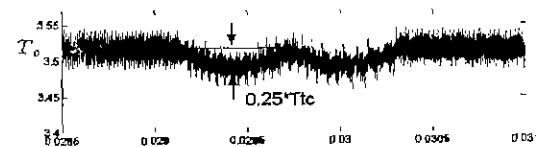
타내고 있다.  $\alpha = -t_c, -3t_c/4, -t_c/2$ 인 경우에 대하여 토크와 전류 및 역기전력을 보이고 있으며 전류신호  $t=0$ 를 기준으로  $T_{ic}$ 가 어떤 비율로 좌우로 나누어지며 전술한 바와 같이  $\alpha = -t_c/2$ 가  $T_{ic}$ 가 최소가 되는 최적의 전류시점임을 확인할 수 있다.



(a)  $\alpha = -t_c$



(b)  $\alpha = -3t_c/4$



(c)  $\alpha = -t_c/2$

그림6. 전류시점과 토크맥동

## 6. 결 론

본 논문에서는 감쇄상의 역기전력을 고려한 새로운 토크모델을 이용하여 전류시간이 토크맥동에 미치는 영향에 관하여 해석하였다. 전류구간에서 토크맥동의 원인은 전류(電流)의 맥동과 유한한 전류(轉流)시간으로 나눌 수 있으며 전류시간에 의한 토크맥동은 기존의 방식에 의해 전류제어가 성공적으로 수행된 경우에도 존재하는 불가피한 성분이다. 따라서 전류시점제어법을 제안하였으며 이를 통해 최적의 전류시점을 확인하였다.

본 연구는 산업자원부에서 시행하는 에너지  
기술개발사업의 지원에 의해 수행되었음

## 참 고 문 헌

- [1] H.Le-Huy et al., "Minimization of Torque Ripple in Brushless DC Motor Drives," *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. IA-22, No. 4, pp. 748-755, 1986.
- [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] 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.
- [4] C.Berendsen 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.
- [5] 이광운 외, "브러시리스 직류전동기의 전환에 의한 전류맥동저감에 관한 연구", *전기학회논문집*, Vol. 48B, No.9, pp. 490-496, 1999