

## 최소토크맥동을 갖는 BLDC 전동기의 최적제어

姜秉燾,睦亨洙,崔圭夏\*

## Optimum Torque Control Method for BLDC Motor with Minimum Torque Pulsation

Byoung-Hee Kang, Hyoung-Soo Mok, and Gyu-Ha Choe

## 요 약

본 연구에서는 감쇠상 역기전력을 고려한 토크모델이 도통 및 전환구간에서 다름을 보였으며 이를 통해 전환구간에서 나타나는 토크맥동을 수학적으로 해석하였다. 본 논문에서는 전환시간에 의해 나타나는 토크맥동을 저감할 수 있는 새로운 방식을 제안하였다. 첫째, 전환시간을 조절하여 상승상 및 감쇠상의 전류의 기울기를 일정하게 조정하는 전환지연시간제어를 제안하였다. 이를 통하여 비전환상에서의 전류맥동을 저감하였으며 직류단전압과 4배의 역기전력전압의 크기가 같아지는 임계속도이하에서 토크맥동을 저감할 수 있다. 그러나, 역기전력 및 전환하는 전류의 관계에 의해 토크맥동이 여전히 존재한다. 특히 임계속도 이상에서는 토크맥동이 크게 증가한다. 둘째, 역기전력과 전류의 관계에 따라 나타나는 토크맥동을 고려한 전환시점제어를 제안하였다. 제안한 방식에 의하여 BLDC 전동기의 토크맥동을 임계속도 이상에서 뿐 만 아니라 전 속도영역에서도 최소화 할 수 있다.

## ABSTRACT

This paper studies that torque model considered with decaying phase back-EMF is different in conduction and commutation period and analyzes the torque pulsation components mathematically. In this paper, it is proposed a novel method to suppress torque pulsation due to commutation time. First, it proposes commutation delay time control method, which is to compensate current slope of rising phase and decaying phase to control commutation time. Current ripple is minimized at non-commutating current and torque ripple is reduced below critical speed range that dc link voltage is the same as four times of back-EMF voltage. However, torque ripple still exists due to the relation with back-EMF and commutating current and it is increased on a large scale above critical speed range, especially. Secondly, proposed method is commutation time control, which is considered with torque pulsation due to the relation of back-EMF and commutating current. Through the proposed method, the torque pulsation can be minimized in the whole speed range as well as range over critical speed.

**Key Words** : BLDC motor, Commutation, Trapezoidal back-EMF, Non-commutating current, Delay time control  
Commutation time control, Torque pulsation

\*건국대학교 전기공학과 교수

E-mail : ghchoe@konkuk.ac.kr

접수일자 : 2002. 7.25

1차심사 요청일 : 2002. 7.30

2차심사 요청일 : 2002. 9.17

심사완료일 : 2002.11.25

### 1. 서 론

최근 각종 산업기기 및 자동화기에 널리 사용되고 있는 서보전동기는 회전자가 영구자석으로 구성된 브러시리스 서보전동기의 사용이 급증하고 있는 추세이다. 이 중에서 역기전력 파형이 사다리꼴로 나타나며, 구형파의 상전류를 순차적으로 인가해주면 일정토크를 발생시킬 수 있는 브러시리스 직류전동기(Brushless DC Motor ; 이하 BLDC전동기)는 직류전동기의 개자와 전기자의 위치가 서로 뒤바뀐 구조로서 무브러시로 인한 견고성, 저소음, 무보수성, 긴 수명 및 회전자 손실이 없다는 장점과 제어가 간단하고 운전영역이 매우 넓은 특징을 갖고 있다<sup>[1]</sup>. 2상 여자방식의 BLDC전동기 구동시스템은 각 스위칭 소자를 순차적으로 120°씩 전기적으로 통전되도록 제어하면 되는데 전기적으로 1회전당 전기자 상수의 2배의 주파수를 갖는 상전환(commutation)이 필요하다. 따라서 전압원 인버터를 이용하여 구동하는 경우 전동기 내부의 권선 저항, 인덕턴스 성분 및 제한된 직류전압의 크기로 인하여 이상적인 구형파전류를 전동기에 공급할 수 없게 되며 상전환시에 전환하지 않는 상의 전류에 맥동이 나타나며 토크맥동 발생의 주 요인으로 작용하여 속도 및 위치제어의 정밀도를 떨어뜨리고, 특히 고속영역에서의 경우 평균토크를 감소시키는 경향이 있다. 역기전력이 정현파형태를 가지는 BLDC전동기의 토크맥동 및 전류리플을 억제하기 위한 방법에 대해서는 많은 연구가 진행되어 왔으나 사다리꼴 역기전력을 갖는 BLDC전동기의 토크맥동저감에 관한 연구는 근래에 들어 많은 관심을 갖고 연구가 진행되고 있는 추세이다<sup>[2] [7]</sup>.

본 논문에서는 기존의 BLDC전동기 구동방식에 의한 등가회로를 스위치가 off되는 상의 전류 및 역기전력을 고려한 새로운 토크모델을 이용하여 2상도통구간과 전환구간의 토크맥동성분에 대한 새로운 해석을 통하여 토크맥동의 원인을 분석하고, 사다리꼴 역기전력을 가지는 BLDC전동기의 상전환시 맥동토크와 평균토크를 개선할 수 있는 새로운 토크맥동 저감방식을 제안하였다.

### 2. BLDC전동기의 상전환현상

#### 2.1 BLDC전동기의 구동조건과 상전환현상

BLDC전동기는 그림 1에서 보는바와 같이 맥동이 없는 일정한 토크를 얻기 위해서는 일정토크에 비례하

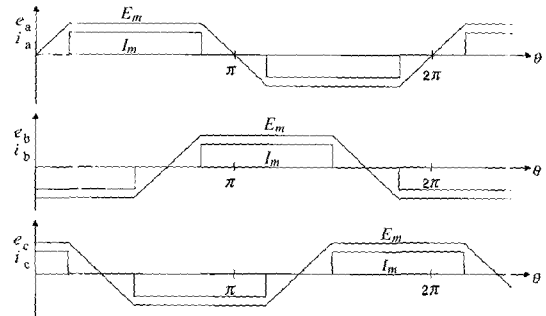


그림 1 BLDC전동기의 역기전력과 상전류  
Fig. 1 Back-EMF waveforms and phase currents of BLDC motor

는 일정한 크기의 구형파 상전류를 전환신호(commutation signal)에 따라 전기적으로 120°씩 순차적으로 사다리꼴 역기전력의 평탄한 구간동안 유지시켜 주어야 한다. 이 때 발생하는 토크와 역기전력 및 각 상전류와의 관계는 다음과 같다.

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

식 (1)에서와 같이 토크맥동 및 속도의 변동을 줄이기 위해서는 전류 및 전압의 곱의 전체합이 일정해야 하며 BLDC전동기의 역기전력이 120°씩 일정하고 역기전력의 평탄한 구간에 구형파의 일정전류가 흐를 수 있다면 토크맥동이 없는 일정 토크를 발생시킬 수 있음을 알 수 있다. 그러나, BLDC전동기의 경우 전환에 따른 비전환상의 전류맥동이 나타나며, PWM 전압원 인버터로 구동되는 BLDC전동기의 토크맥동성분은 전류리플 및 전환에 의한 영향으로 나눌 수 있다. 전환에 의한 맥동성분은 전환시 전기자권선의 저항과 인덕턴스 및 제한된 직류단 전압의 영향으로 인하여 스위치가 동작되는(on/off) 상의 전류의 상승과 감쇠가 순간적으로 이루어지지 않고 일정한 지연시간을 상전환됨에 따라 발생하는 성분으로써 전류제어기에 의해 쉽게 저감될 수 없으며 역기전력 및 전동기정수에 의한 전류와의 관계를 해석하여 전환시 발생하는 전류맥동을 저감할 수 있는 제어기법을 사용해야 한다.

그림 2는 상전환시 발생하는 전류(轉流)맥동성분을 보여준다. 그림 2와 같이 전기적으로 1회전당 6번의 전류맥동이 발생하며 이러한 전류맥동은 역기전력과 직류단 전압과의 관계에 따라 3가지 형태로 나타나며 식 (2)에 나타내었다<sup>[2] [13]</sup>.

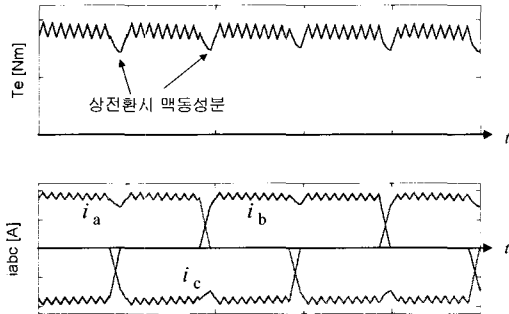


그림 2 BLDC전동기의 상전환현상  
Fig. 2 Commutation of BLDC motor

- $V_{dc} > 4E_m$  : 임계속도이하
  - $V_{dc} = 4E_m$  : 임계속도
  - $V_{dc} < 4E_m$  : 임계속도이상
- (2)

식 (2)에서와 같이 역기전력과 직류단 전압과의 관계는 4배의 역기전력을 임계점으로 하여 모두 3가지의 영역으로 나뉘어지며 본 논문에서는 각각 임계속도이하, 임계영역, 임계속도이상의 영역으로 구분하였다. 임계속도이하의 경우 전환시간이 임계속도이상의 영역에 비해 상대적으로 길기 때문에 제어면에서 용이하며 감쇠상의 상전류를 제어하는 연구가 많이 발표되어 왔다<sup>[2]-[5]</sup>. 그러나 임계속도 이상의 영역의 경우 이하의 영역에 비해 상대적으로 전환시간이 짧아서 감쇠상의 기울기가 빨리 영점으로 도달하기 때문에 제어가 쉽지 않다. 따라서 본 논문에서는 임계속도이상의 영역에서 스위치가 오프(off)되는 상의 전류를 제어하여 토크맥동을 저감할 수 있는 새로운 토크맥동 저감알고리즘을 제안하였다. 그림 3은 속도영역에 따라 역기전력과 직류단 전압과의 관계에 따른 전류벡터도를 보여준다.

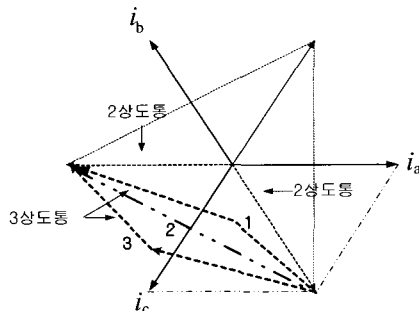


그림 3 속도영역에 따른 전류벡터도  
Fig. 3 Current vector diagrams in speed range

그림 3에서 알 수 있듯이 BLDC전동기의 경우 총 6개의 전류벡터가 존재하며 상전환시 2번 궤적을 통하여 일정하게 움직이도록 하는 것이 전류에 의한 토크 맥동성분을 저감하는 방법이지만 3번 궤적과 같이 속도영역에 따라 출력토크성분이 임계점 이상으로 갈수록 감소하는 경향이 있으며, 또한 1번 궤적과 같이 임계속도이하의 경우 출력토크가 증가하나 이는 영구자석형 전동기의 경우 감자방지 및 전류제한에 나쁜 영향을 주게 되며 따라서 결과적으로는 전동기의 출력효율을 떨어뜨리는 결과를 가져오게 된다. 따라서 임의의 속도영역에서도 전류벡터의 궤적이 2번 궤적을 통하여 일정하게 유지되도록 해 주어야 하며 이를 위해서는 새로운 토크맥동 저감 알고리즘이 필요하다.

### 2.2 BLDC전동기의 새로운 토크모델<sup>[8]</sup>

기존의 BLDC전동기의 역기전력을 고려한 토크맥동 저감에 대한 연구결과들은 발표가 되었으나 감쇠상의 상전류와 상승상의 상전류가 같을 경우 상전환에 의한 토크맥동성분은 나타나질 않고 있다. 또한 감쇠상의 역기전력은  $\theta$ 에 따라 감소하고 있는 반면 상승상의 역기전력은 역기전력의 도통구간이  $120^\circ$ 라고 가정할 경우 일정한 크기  $E_m$ 을 갖는 일정전압이기 때문에 비전환상전류(non-commutating current)의 전류변화율은 일정하더라도 맥동성분이 토크에 나타나게 된다. 따라서 역기전력과 전류와의 새로운 해석이 필요하다. 각 속도영역에 따른 상전환시 발생하는 최대 토크성분은 식 (3)과 같이 나타나며 이 때 각 상에 나타나는 전류 파형은 그림 4와 같다.

$$T_e = \frac{2E_m I_m}{\omega_m} + \frac{6k_e I_m}{\pi} \left( \frac{\theta^2}{t_f} - \theta \right) + \frac{2k_e (I_m - I_{mf})}{t_f} \theta \quad (3-a)$$

$$T_e = \frac{2E_m I_m}{\omega_m} + \frac{6k_e I_m}{\pi} \left( \frac{\theta^2}{t_f} - \theta \right) - \frac{2k_e (I_m - I_{mf})}{t_f} \theta \quad (3-b)$$

여기서,  $k_e$ 는 역기전력상수,  $t_f$ 는 상전환시간,  $I_m$ 은 일정전류값,  $I_{mf}$ 는 상전환시 비전환상전류의 최대전류값이다.

식 (3)은 임계속도 이하 및 이상에서의 역기전력 성분을 고려한 출력토크 성분으로서 첫 번째 항은 일정 출력을 발생할 수 있도록 하는 성분이며 두 번째 항은 일정한 역기전력 성분은 고려한 기존의 해석과는 달리 일정기울기로 감쇠하는 상승상의 역기전력에 의해 나타나는 전환시간에 의한 토크맥동성분이다. 세 번째 항은 상승상과 감쇠상의 기울기 차이에 의한 비전환상전류의 맥동성분으로써 비전환상전류와 역기전력과의

관계에 의해 나타나는 성분이다. 전술한 바와 같이 임계속도 이하의 영역에서는 평균토크성분이 증가함을 알 수 있으며 임계속도 이상의 영역에서는 감소함을 알 수 있다. 따라서 BLDC전동기의 경우 역기전력과 관계에 의해 발생하는 토크맥동성분에 대하여 이를 고려한 제어기법을 사용해야 하며 토크맥동을 최소화 할 수 있다.

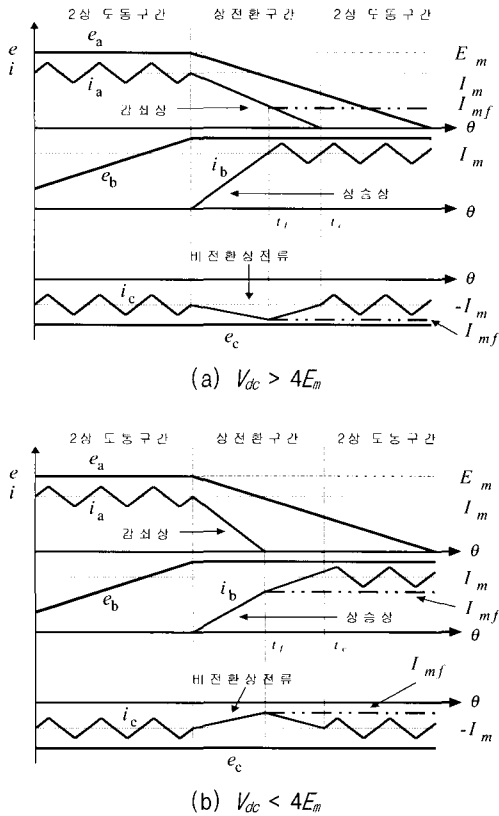


그림 4 전류(轉流)구간에서의 상전류 및 역기전력  
Fig. 4 Phase currents and back-EMFs in commutating period

### 3. 새로운 토크맥동 저감방법

#### 3.1 상전환에 의한 토크맥동의 저감

상 전환시 발생하는 토크는 식 (4)와 같이 나타나며 [2]-[5] 전술한 바와 같이 전류리플에 의한 맥동성분과 전환시간에 따른 맥동성분으로 나타남을 알 수 있다.

$$T_e = \frac{2E_m I_m}{\omega_m} + \frac{6k_e I_m}{\pi} \left( \frac{\theta^2}{t_c} - \theta \right) \quad (4)$$

2절에서 살펴 본 바와 같이 직류단 전압이 4배의 역기전력보다 작은 영역의 경우 속도가 증가할수록 상승상과 감쇠상의 기울기의 차이는 커지게 되며 그로 인한 토크맥동은 더욱 더 증가하게 된다. 이는 그림 1에서의 상전환신호와 PWM신호의 동기와의 관계가 있는데 일반적으로 BLDC전동기는 회전자의 위치를 검출하기 위한 상전환신호를 가지고 있는데 이 전환신호와 전류제어를 위한 PWM신호를 조합하여 인버터를 구동하게 된다. 그림 4의 (b)에서 알 수 있듯이  $t_f$ 시점에서 감쇠상전류는 완전히 감쇠하며 상승상 전류는 이 시점에서 기울기가 변화하게 된다. 그리고 이 두 상전류의 기울기 차이에 의해 비전환상에 전류맥동이 나타나게 되는데 상승상전류의 경우 전환이 시작되는 시점을 알기 위한 신호가 있기 때문에 PWM제어가 가능하지만 감쇠상의 경우에는 전환신호의 역할이 이미 끝난 상태이기 때문에 전류제어를 수행하지 못하게 된다. 고속영역에서는 상승상전류의 기울기가 감쇠상에 비해 작기 때문에 감쇠상이 늦게 감쇠하도록 스위칭을 해야 하는데 일반적인 방법으로는 상승상의 전류가 제어되고 감쇠상은 전동기의 정수에 의해 자연 감쇠되는 반대의 현상이 나타나게 되고, 따라서 비전환상의 전류 변화율을 일정하게 제어하지 못하게 된다. 그러므로 이러한 맥동을 줄이기 위한 새로운 저감방법이 필요하며 이를 위한 방법을 그림 5에 나타내었다. a-c상에서 b-c상으로 전류가 일어나는 경우로  $t=0$ 에서 전환이 시작된다고 가정하면  $t_f$ 시점에서 감쇠상의 전류는 영점으로 도달, 감쇠가 완료되어 이때의 토크맥동은 최대가 된다. 이 경우에는 상승상과 감쇠상 중에서 상승상의 기울기가 작으므로 이 기울기를 기준으로 감쇠상 기울기를 제어해야 한다. 상승상 전류를 기준으로 연장선을 그어 전류 기준치와 만나는 지점을  $t_{cs}$ 라고 하면 상승상 및 감쇠상 전류를 모두 이 기울기를 갖도록 제어한다. 감쇠상전류의 기울기는 상승상전류의 기울기보다 크기 때문에 상승상전류의 기울기와 같은 전류제어를 따라갈 수 있게 제어하는 것이 가능하다. 이를 위해서는 새로운 상전환시간  $t_{cs}$ 를 알아야 하며 감쇠상 전류를 제어하기 위한 상전환신호도 새롭게 인가해 주어야 한다. 새로운 상전환시간  $t_{cs}$ 는 다음과 같이 구한다.

$$i_{dec}(t) = -\frac{V_m + 2E_m}{3R} \left( 1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) + \frac{4E_m \omega}{\pi R} \left\{ t - \frac{L}{R} \left( 1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) \right\} + i_{dec}(0) e^{-\frac{R}{L}t} \quad (5)$$

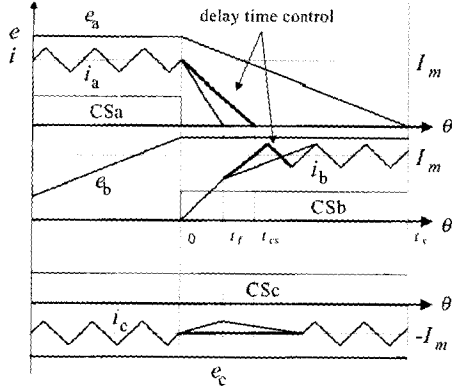


그림 5 상전환지연시간 제어법  
Fig. 5 Commutation delay time control

$$i_{ris}(t) = \frac{2(V_m - E_m)}{3R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) - \frac{2E_m\omega}{\pi R} \left\{ t - \frac{L}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) \right\} + i_{ris}(0) e^{-\frac{R}{L}t} \quad (6)$$

$$i_{non}(t) = -\frac{V_m - 4E_m}{3R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) - \frac{2E_m\omega}{\pi R} \left\{ t - \frac{L}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) \right\} - (i_{dec}(0) + i_m(0)) e^{-\frac{R}{L}t} \quad (7)$$

◦ 임계속도이하 영역 :  $i_{dec}(t_{cs}) = 0$  (8)

◦ 임계속도이상 영역 :  $i_{ris}(t_{cs}) = I_m$  (9)

3.2 역기전력을 고려한 토크맥동의 저감

전환시간에 의한 토크맥동은 전압원 인버터의 제한된 직류단 전압과 전동기 정수에 의해 전환이 신속히 순간적으로 이루어지지 못하고  $t_c$ 라는 전환시간에 따라 상전류의 기울기가 발생하기 때문이며 이에 의한 토크맥동  $T_c$ 는 식 (10)과 같으며 그림 6은 이의 파형을 보여주고 있다<sup>[8]</sup>.

$$T_c = \frac{6k_e I_m}{\pi} \left( \frac{\theta^2}{t_c} - \theta \right), 0 \leq \theta \leq t_c \quad (10)$$

이때 나타나는 토크의 최대값을 구하면 식 (11)과 같으며 맥동토크를 저감시키기 위해서는 상전류의 크기 및 전환시간을 함께 고려해야 함을 알 수 있다.

$$T_{c,max} = T_c \Big|_{\theta = \frac{t_c}{2}} = -\frac{3k_e I_m t_c}{2\pi} \quad (11)$$

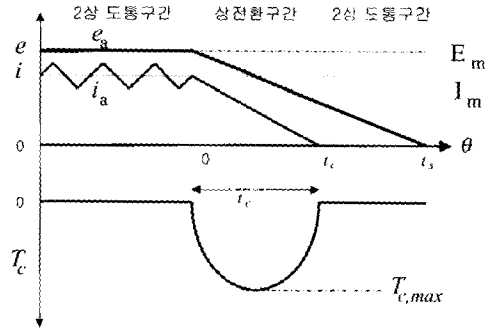


그림 6 토크맥동  $T_c$ 의 파형  
Fig. 6 Waveform of torque ripple

상전류의 크기를 줄이면 전체토크의 감소를 가져오게 되고 전환시간을 줄이면 토크맥동을 줄일 수 있으나 전환시간  $t_c$ 는 전동기의 시정수 및 시스템의 정수에 영향을 받기 때문에 완전히 감소시켜 이상적인 구형파 전류를 인가하기는 실제로 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 전환시간을 제어하여 전환시간 및 역기전력에 의한 토크맥동을 저감할 수 있는 전환시점 제어법을 제안하고자 한다. 새로운 전환시간의 설정에 따라 전환시 발생하는 전류맥동을 저감할 수 있으며 이때 새롭게 설정된 전환시간  $t_{cs}$ 는  $\alpha = -\frac{t_{cs}}{2}$  일 때 가장 작게 나타남을 알 수 있다. 이를 통한 전환시점 제어법을 그림 7에 나타내었다.

새롭게 설정된 전환시점을 기준으로 하여 3.1절에서 제안한 전류의 기울기 제어법을 통하여 상승상과 감쇠상의 전류의 기울기를 일정하게 하며 이때 상승상과 감쇠상의 전환시간을 새롭게 설정된 전환시간에 의해

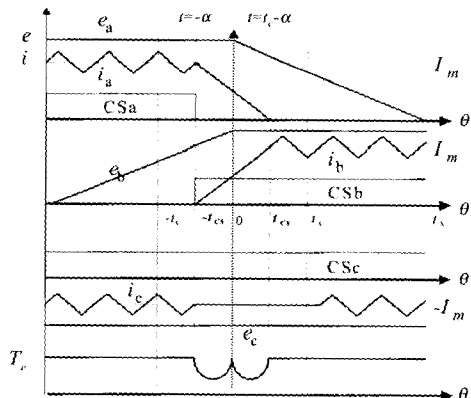


그림 7 전환시점과 토크맥동  
Fig. 7 Commutation starting point and torque ripple

전류제어를 수행한다. 이 때 전환시간은 상승상과 감쇠상의 전환시간의 최적점에서의 전환시간을 구하고 이를 통하여 새롭게 설정된 시간에 따라 제안한 토크 맥동저감 알고리즘을 적용하여 전환시 발생하는 맥동 토크를 최소로 저감할 수 있게 된다.

그림 8은 속도에 따른 상승상 및 감쇠상의 전환시간을 나타낸 것으로서 속도영역에 따라 각 전류의 전환시간이 차이를 보임에 따라 각 영역에 따른 우위의 전환시간을 설정하면 된다.

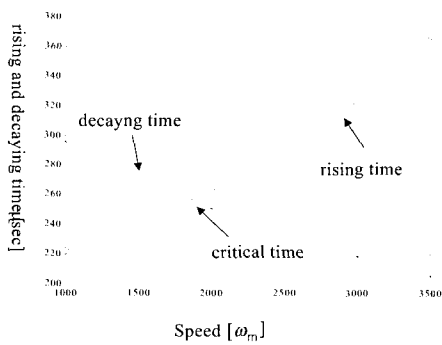


그림 8 속도에 따른 상승상 및 감쇠상의 전환시간  
Fig. 8 Rising and decaying commutation time with speed

#### 4. 시뮬레이션 및 검토

시뮬레이션은 MATLAB/Simulink를 사용하였으며 표 1은 본 논문에 사용된 BLDC전동기의 파라미터를 보여준다.

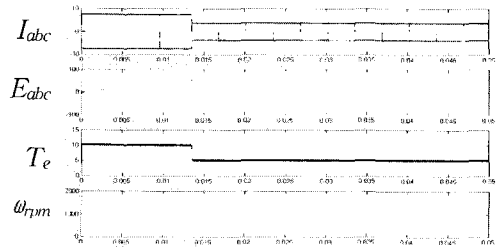
그림 9에서 그림 12는 기존의 BLDC전동기의 구동 방식과 본 논문에서 제안한 방식을 이용한 구동특성을 보여주고 있다. 먼저 그림 9는 표 1에 의해  $V_{dc} > 4E_m$  영역인 약 1500[rpm]에서 기존방식에 의한 토크 및 전류특성을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 상대적으로 저속인 경우에 기존방식은 토크맥동을 많이 저감할 수 있으나 토크맥동을 완전히 영으로 만들 수는 없다. 그림 10은 상대적으로 고속영역인  $V_{dc} < 4E_m$  구간인 2500[rpm]에서의 전환시 특성을 보여주고 있다. 고속영역의 경우 기존의 방식에 의해서는 전환시에 발생하는 토크맥동을 줄일 수 없으며 속도영역이 높아질수록 역기전력 및 전환시간을 함께 고려하여 제어할 수 행해야 한다.

그림 11, 그림 12는 본 논문에서 제안한 전환시 상승상과 감쇠상의 전류의 기울기를 일정하게 제어하고 전환시간을 고려한 전환시점제어를 통하여 상대적으로 저속영역인 1500[rpm]과 2500[rpm]에서의 전동기 출력을 살펴보았다.

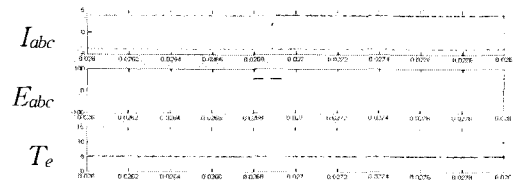
표 1 전동기 파라미터

Table 1 Motor parameter

정격속도	3000 [rpm]
정격전류	9.2 [A]
상당저항	0.379 [ $\Omega$ ]
상당 인덕턴스	5.26m [H]
역기전력상수	0.0372 [V/rpm]
DC Link 전압	310 [V]
회전자관성모멘트	0.04313 [Kgm <sup>2</sup> ]
극수	4



(a) 출력특성  
(a) Output characteristics



(b) 전환구간 및 토크맥동  
(b) Commutating period and torque ripple

그림 9  $\omega_m = 1500$ [rpm]에서 출력파형(기존 방식)

Fig. 9 Output waveforms in  $\omega_m = 1500$ [rpm]

( $I_{abc}=10$ [A]/div,  $E_{abc}=100$ [V]/div,  
 $T_e=5$ [N.m]/div,  $\omega_{rpm}=1000$ [rpm]/div)

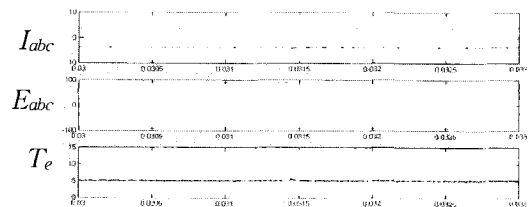


그림 10  $\omega_m = 2500$ [rpm]에서 출력파형(기존방식)

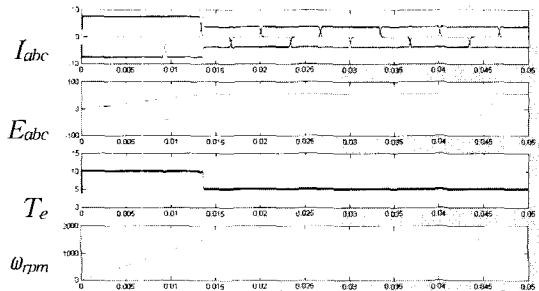
Fig. 10 Output waveforms in  $\omega_m = 2500$ [rpm]

( $I_{abc}=10$ [A]/div,  $E_{abc}=100$ [V]/div,  $T_e=5$ [N.m]/div)

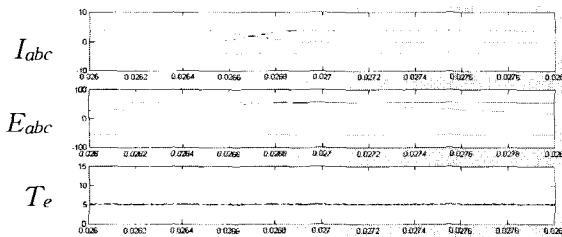
그림 11에서 보는 바와 같이 제안한 방식의 경우 역시 기동특성 및 가속특성이 좋게 나타나고 있음을 알 수 있다. 상대적으로 저속영역에서도 전환에 의한 토크맥동이 거의 나타나지 않음을 알 수 있으며 일정한 출력값을 유지하고 있다.

그림 12는 고속영역에서의 경우를 살펴본 것으로서 제안한 방법은 고속영역에서도 일정한 토크특성을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서 제안한 새로운 토크맥동 저감방식은 전 영역에서 우수한 특성을 보이고 있으며 특히 고속영역에서 다른 방식보다 성능이 뛰어난 것을 알 수 있다.

표 2는 본 논문에서 제안한 방식의 속도에 따른 저감률을 살펴본 것으로서 순시토크맥동률을 살펴본 것이다. 임계속도 이상에서 기존의 방식과 제안한 방식 모두 토크맥동이 증가하고 있으나 기존의 방식에 비해 현저하게 토크맥동이 저감되어 나타남을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서 제안한 알고리즘에 의해 BLDC전동기의 사용영역을 확장시킬 수 있을 것으로 사료된다.



(a) 출력특성  
(a) Output characteristics



(b) 전환구간 및 토크맥동  
(b) Commutating period and torque ripple

그림 11  $\omega_m = 1500[\text{rpm}]$ 에서 출력파형(제안 방식)  
Fig. 11 Output waveforms in  $\omega_m = 1500[\text{rpm}]$   
( $I_{abc}=10[\text{A}]/\text{div}$ ,  $E_{abc}=100[\text{V}]/\text{div}$ ,  
 $T_e=5[\text{N.m}]/\text{div}$ ,  $\omega_{rpm}=1000[\text{rpm}]/\text{div}$ )

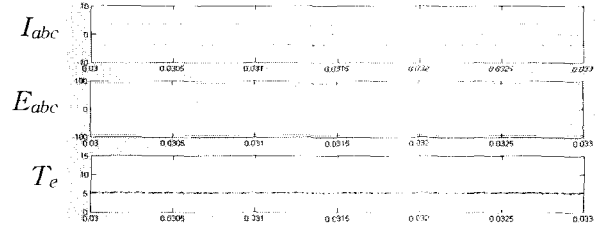


그림 12  $\omega_m = 2500[\text{rpm}]$ 에서 출력파형(제안 방식)  
Fig. 12 Output waveforms in  $\omega_m = 2500[\text{rpm}]$   
( $I_{abc}=10[\text{A}]/\text{div}$ ,  $E_{abc}=100[\text{V}]/\text{div}$ ,  
 $T_e=5[\text{N.m}]/\text{div}$ )

표 2 토크맥동 비교

Table 2 Comparisons of torque pulsation.

속 도[rpm]	1000	2000	3000	3200
기존의 방식	0.08	0.12	1.09	1.47
제안한 방식	0.045	0.06	0.12	0.35
저감률[%]	43.75	50	80.99	76.10

## 5. 결 론

BLDC 전동기의 토크는 전류와 역기전력의 함수이므로 맥동 없는 토크를 얻기 위해서는 전류제어의 측면 뿐만 아니라 전류와 역기전력과의 상호관계를 고려하여야 한다. 본 논문에서는 BLDC 전동기의 단점인 전류구간에서 토크맥동이 발생하는 문제에 대하여 연구하였으며 먼저 전환구간에서의 감쇠상 역기전력을 고려한 토크모델을 이용하여 전환구간의 토크가 전류에 비례하는 부분과 전환시간에 비례하는 토크맥동으로 나눌 수 있음을 보였다. 전자는 모터를 회전시키는 실제적인 출력토크로 작용하는 성분으로 전류에 맥동이 있을 경우 토크맥동으로 나타날 수도 있고 후자는 맥동으로만 존재하는 성분으로 전류제어가 원활하게 수행된 경우에도 여전히 존재하게 된다. 따라서 전환시의 토크맥동의 원인은 전류의 맥동과 유한한 전환시간으로 나눌 수 있다. 지금까지 BLDC 전동기의 토크맥동저감을 위한 연구는 주로 전류제어의 측면에서 이루어져 왔는데 본 논문에서는 전류시간에 의한 토크맥동을 저감시킬 수 있는 방식을 제안하였다. 전환에 의한 토크맥동은 2차함수 형태이고 전환시점을 제어할 때 역기전력의 평탄한 구간을 중심으로 토크맥동이 양분되는 현상에 착안하여 전환시점을 적절히 제어함

로써 전류에 의한 토크맥동을 상당히 저감할 수 있음을 보였으며 최적의 전환시점을 제안하였다. 또한 토크맥동의 원인에 근거한 맥동저감 방식으로 지연시간 제어방식과 전환시점제어방식을 제안하였다. 각각의 방식을 이용하여 전류구간의 토크맥동이 상당히 저감됨을 확인할 수 있었다.

### 참 고 문 헌

[1] T.J.E. Miller, and Hendershot, Design of Brushless Permanent-Magnet Motors, Magna Physics publishing and Clarendon Press, Oxford, 1994.

[2] H. Le-Huy, R. Perret, and R. Feuillet, "Minimization of Torque Ripple in Brushless DC Motor Drives", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. IA-22, No. 4, pp. 748~755, 1986.

[3] Y. Murai, Y. Kawase, K. Ohashi, K. Nagatake, and K. Okuyama, "Torque Ripple Improvement for Brushless DC Miniature Motors", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 25, No. 3, pp. 441~450, 1989.

[4] 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.

[5] 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.

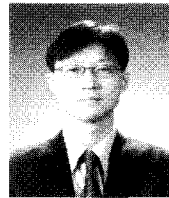
[6] T.M. Jahns, and W.L. Soong, "Pulsating Torque Minimization Techniques for Permanent Magnet AC Motor Drives-A Review", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 43, No. 2, pp. 321~330, 1996.

[7] T. Sebastian, and V. Gangla, "Analysis of Induced EMF Waveforms and Torque Ripple in Brushless

Permanent Magnet Machine", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 32, No. 1, pp. 195~200, 1996

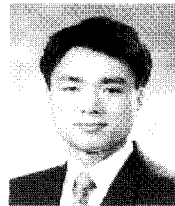
[8] 김철주, 강병희, 복형수, 최규하, "BLDC 모터에서 전류시간이 토크맥동에 미치는 영향에 관한 연구", 대한전기학회논문집, 제50권 제1호, pp. 23~29.

### 저 자 소 개



#### 강병희(姜秉熹)

1966년 9월 19일생. 1993년 건국대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 졸업(석사). 2002년 동 대학원 졸업(공학박사). 1995년~1998년 삼성종합기술원 전문연구원. 현재 (주)케이팩신기술 연구실장.



#### 목형수(睦亨洙)

1963년 10월 31일생. 1986년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원(석사). 1992년 동 대학원 졸업(공학박사). 1992년~1996년 서울산업대 제어계측공학과 조교수. 1997년~현재 건국대 전기공학과 교수. 당 학회 협력이사.



#### 최규하(崔圭夏)

1978년 서울대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 졸업(석사). 1986년 동 대학원 졸업(공학박사). 1987년~1988년 미국 오레곤주립대 Post-Doc. 1997년~1998년 건국대 연구처장. 현재 건국대 전기공학과 교수, 교무처장 및 전력전자기술연구센터 소장. 당 학회 부회장 역임.