

최소토크맥동을 갖는 BLDC 전동기의 최적제어

강병희, 목형수, 최규하
전국대학교 전기공학과

High Performance Control for BLDC Motor with Minimum Torque Pulsation

Byoung-Hee Kang, Hyoung-Soo Mok, and Gyu-Ha Choe
Dept. of Electrical Engineering, Konkuk University

ABSTRACT

본 논문에서는 기존의 BLDC전동기 구동방식에 의한 등가회로를 스위치가 off되는 상의 전류 및 역기전력을 고려한 새로운 토크모델을 이용하여 사다리꼴 역기전력을 가지는 BLDC전동기의 전환시 발생하는 토크맥동과 평균토크를 개선할 수 있는 새로운 토크맥동 저감방식을 제안하였다. BLDC전동기의 전기적인 등가모델 및 전류(轉流)현상과 전환시 발생하는 토크맥동에 대하여 기술하였으며 발생토크의 변동의 원인이 되는 역기전력과 전류와의 관계를 고찰하였다. 이를 바탕으로 전환시 발생하는 토크맥동을 개선하기 위하여 스위칭 소자가 off 되는 상의 전류 및 역기전력을 고려한 상승상과 감쇄상의 전류기울기 제어 및 전환시제어를 통한 토크맥동 저감방식을 제안하였으며, 전환시 발생하는 맥동토크의 저감효과에 대하여 해석하였다. 이의 검증을 위하여 MATLAB/Simulink를 이용하여 제안한 토크맥동 저감방식의 저감효과의 타당성을 검증하였다.

1. 서 론

최근 각종 산업기기 및 자동화기기에 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 계자와 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^[1]. 2상 여자방식의 BLDC전동기 구동 시스템은 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 권선저항, 인덕턴스 성분 및 제한된 직류전압의 크기로 인하여 이상적인 구형파전류를 전동기에 공급할 수 없게 되며 상전환시에 전환하지 않는 상의 전류에 맥동이 나타나며 토크맥동 발생의 주요인으로 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.^[2~7]

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 전류(轉流)시 맥동토크와 평균토크를 개선할 수 있는 새로운 토크맥동 저감방식을 제안하였다.

2. BLDC전동기의 전류(轉流)현상

2.1 BLDC전동기의 구동조건과 전류(轉流)현상

BLDC전동기는 그림 1에서 보는바와 같이 맥동이 없는 일정한 토크를 얻기 위해서는 일정토크에 비례하는 일정한 크기의 구형파 상전류를 전환신호(commutation signal)에 따라 전기적으로 120°씩 순차적으로 사다리꼴 역기전력의 평탄한 구간동안 유지시켜 주어야 한다. 이때 발생하는 토크 T_e 와 역기전력 및 각 상전류와의 관계는 다음과 같다.

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

식 (1)에서와 같이 토크맥동 및 속도의 변동을 줄이기

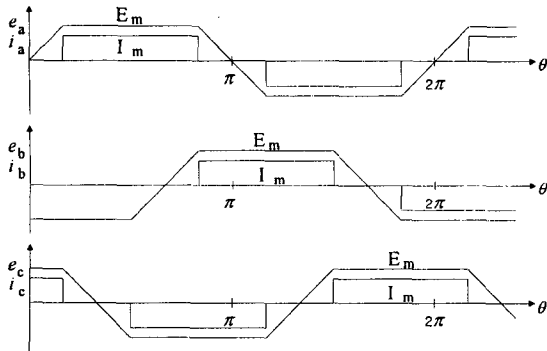


그림 1 BLDC전동기의 역기전력과 전류
Fig. 1 Back EMF and phase current of BLDC motor

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 비전환 상에의 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 on/off되는 상의 전류의 상승과 감쇄가 순간적으로 이루어지지 않고 일정한 지연시간을 전류(轉流)됨에 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 전환시 발생하는 전류맥동성분을 보여준다. 그림 2와 같이 전기적으로 1회전당 6번의 전류맥동이 발생하며 이러한 전류맥동은 역기전력과 직류단 전압과의 관계에 따라 3가지 형태로 나타나며 식 (2)에 나타내었다.^[2-5]

$$\begin{aligned}
 V_{dc} > 4E_m & : \text{저속영역} \\
 V_{dc} = 4E_m & : \text{임계영역} \\
 V_{dc} < 4E_m & : \text{고속영역}
 \end{aligned} \quad (2)$$

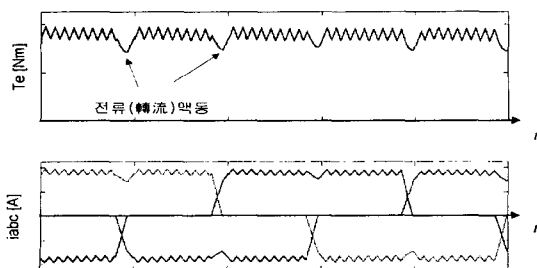


그림 2 BLDC전동기의 전류(轉流)현상
Fig. 2 Commutation of BLDC motor

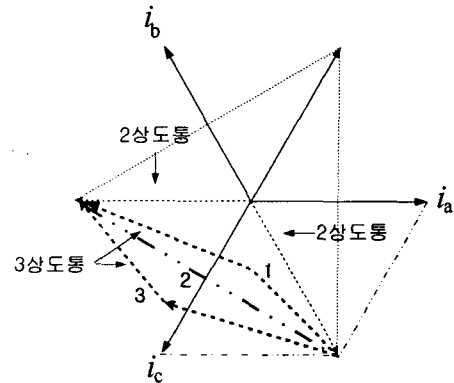


그림 3 속도영역에 따른 전류벡터도
Fig. 3 current vector diagram in speed range

식 (2)에서와 같이 역기전력과 직류단 전압과의 관계는 4배의 역기전력을 임계점으로 하여 모두 3가지의 영역으로 나뉘어 지며 본 논문에서는 각각 저속영역, 임계영역, 고속영역으로 구분하였다. 저속영역의 경우 전환시간이 고속영역에 비해 상대적으로 길기 때문에 제어면에서 용이하며 저속영역의 감쇄상의 상전류를 제어하는 연구가 많이 발표되어 왔다^[2-5]. 그러나 고속영역의 경우 저속영역에 비해 상대적으로 전환시간이 짧기 때문에 감쇄상의 기울기가 빨리 영점으로 도달하기 때문에 제어가 쉽지 않으며 본 논문에서는 고속영역에서 스위치가 off되는 상의 전류를 제어하여 토크맥동을 저감할 수 있는 새로운 토크맥동 저감알고리즘에 초점을 맞추었다. 그림 3은 속도영역에 따라 역기전력과 직류단 전압과의 관계에 따른 전류벡터도를 보여준다.

그림 3에서 알 수 있듯이 BLDC전동기의 경우 총 6개의 전류벡터가 존재하며 전환시 2번 궤적을 통하여 일정하게 움직이는 것이 전류에 의한 토크맥동성분을 저감하는 방법이지만 3번 궤적과 같이 속도영역에 따라 출력토크성분이 고속으로 갈수록 감소하는 경향이 있으며 1번 궤적과 같이 저속의 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 2번궤적을 통하여 일정하게 유지되도록 해 주어야 하며 이를 위해서는 새로운 토크맥동 저감 알고리즘이 필요하다.

2.2 BLDC전동기의 새로운 토크모델^[8]

기존의 BLDC전동기의 역기전력을 고려한 연구결과들은 발표가 되었으나 감쇄상의 상전류와 상승상의 상전류가 같을 경우 전환시 토크맥동성분은 나타나질 않고 있다. 또한 감쇄상의 역기전력은 θ 에 따라 감소하고 있는 반면 상승상의 역기전력은 역기전력의 도통구간이 120°라고 가정할 경우 일정한 크기 E_m 을 갖는 일정전압이 때문에 비전환전류(non-commutating current)의 전류변화율은 일정하더라도 맥동성분이 토크에 나타나게 된다.

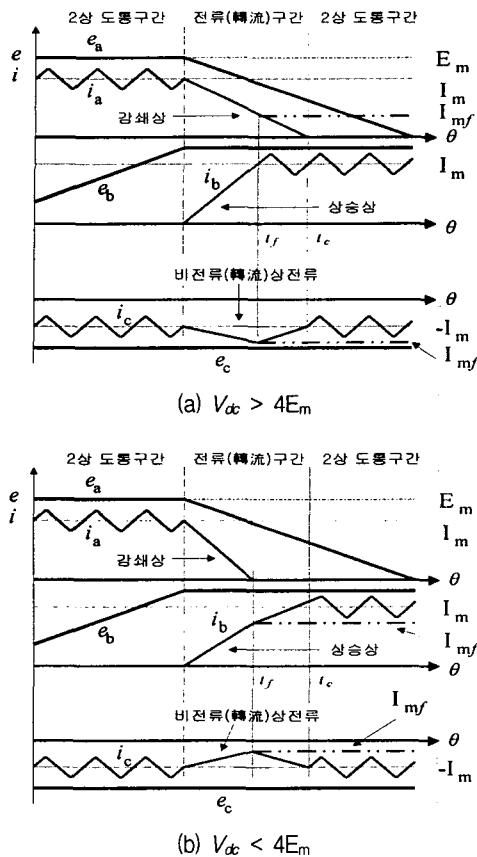


그림 4 전류(轉流)구간에서의 상전류 및 역기전력
 Fig. 4 Phase current and back EMF in commutating period

따라서 역기전력을 고려한 해석이 필요하게 되며 각 속도영역에 따른 전환시 발생하는 최대 토크성분은 식 (3)과 같이 나타나며 이 때 각 상에 나타나는 전류파형은 그림 4와 같다.

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

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

식 (3)은 저속영역 및 고속영역에서의 역기전력 성분을 고려한 출력토크 성분으로서 첫 번째 항은 일정출력을 발생할 수 있도록 하는 성분이며 두 번째 항은 일정한 역기전력 성분은 고려한 기존의 해석과는 달리 일정 기율기로 감쇄하는 상승상의 역기전력에 의해 나타나는 전환시간에 의한 토크맥동성분이다. 세 번째 항은 상승상과 감쇄상의 기율기 차이에 의한 비전환전류의 맥동성분으로써 비전환전류와 역기전력과의 관계에 의해 나타나는 성분이다. 전술한 바와 같이 저속영역에서는 평균 토크성분이 증가함을 알 수 있으며 고속영역에서는 감소함을 알 수 있다. 따라서 BLDC전동기의 경우 역기전력과의 관계에 의해 발생하는 토크맥동성분에 대하여 제어

시 고려를 해야 하며 토크맥동을 최소화 할 수 있다.

3. 새로운 전류(轉流)맥동토크의 저감방법

3.1 전류(轉流)에 의한 토크맥동의 저감

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 살펴본바와 같이 직류단 전압이 4배의 역기전력보다 작은 고속영역의 경우 속도가 증가할수록 상승상과 감쇄상의 기율기의 차이는 커지게 되며 그로 인한 토크맥동은 더욱 더 증가하게 된다. 이는 그림 1에서의 전환신호와 PWM신호의 동기화도 관계가 있는데 일반적으로 BLDC전동기는 회전자 위치를 검출하기 위한 전환신호를 가지고 있는데 이 전환신호와 전류제어를 위한 PWM신호를 조합하여 인버터를 구동하게 된다. 그림 4의 (b)에서 알 수 있듯이 t_f 시점에서 감쇄상전류는 완전히 감쇄하며 상승상 전류는 이 시점에서 기율기가 변화하게 된다. 그리고 이 두 상전류의 기율기 차이에 의해 비전환상에 전류맥동이 나타나게 되는데 상승상전류의 경우 전환이 시작되는 시점을 알기 위한 신호가 있기 때문에 PWM제어가 가능하지만 감쇄상의 경우에는 전환신호의 역할이 이미 끝난 상태이기 때문에 전류제어를 수행하지 못하게 된다. 고속영역에서는 상승상전류의 기율기가 감쇄상에 비해 작기 때문에 감쇄상이 늦게 감쇄하도록 스위칭을 해야 하는데 일반적인 방법으로는 상승상의 전류가 제어되고 감쇄상은 전동기의 정수에 의해 자연 감쇄되는 반대의 현상이 나타나게 되고 따라서 비전환상의 전류변화를 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 감쇄상의 전류는 영점으로 도달, 감쇄가 완료되어 이때의 토크맥동은 최대가 된다. 이 경우에는 상승상과 감쇄상 중에서 상승상의 기율기가 작으므로 이 기율기를 기준으로 감쇄상기율기를 제어해야 한다. 상승상 전류를 기준으로 연장선을 그어 전류 기준치와 만나는 지점을 t_{cs} 라고 하면 상승상 및 감쇄상 전류를 모두 이 기율기를 갖도록 제어한다. 감쇄상전류의 기율기는 상승상전류의 기율기보다 크기 때문에 상승상전류의 기율기와 같은 전류계측을 따라갈 수 있게 제어하는 것이 가능하다. 이를 위해서는 새로운 전류(轉流)시간 t_{cs} 를 알아야 하며 감쇄상전류를 제어하기 위한 전류(轉流)신호도 새롭게 인가해 주어야 한다. 새로운 전류(轉流)시간 t_{cs} 는 다음과 같이 구한다.

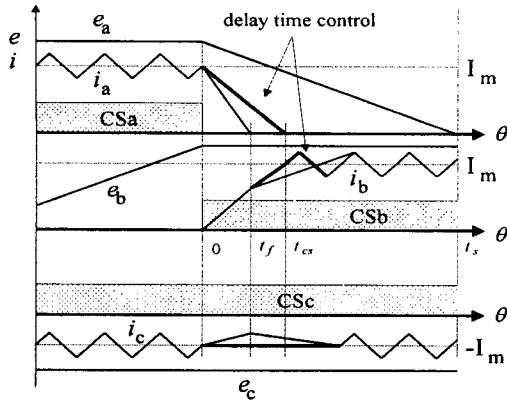


그림 5 전류(轉流)지연시간 제어법
Fig. 5 Commutation delay time control

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

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

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

• 고속 영역 : $i_{ris}(t_{cs}) = I_m$ (8)

• 저속 영역 : $i_{dec}(t_{cs}) = 0$ (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.^[8]

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

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

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

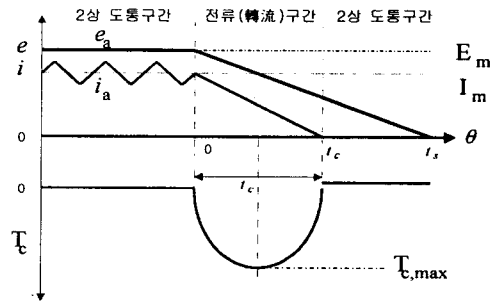


그림 6 토크맥동 T_c 의 파형
Fig. 6 Waveform of torque ripple, T_c

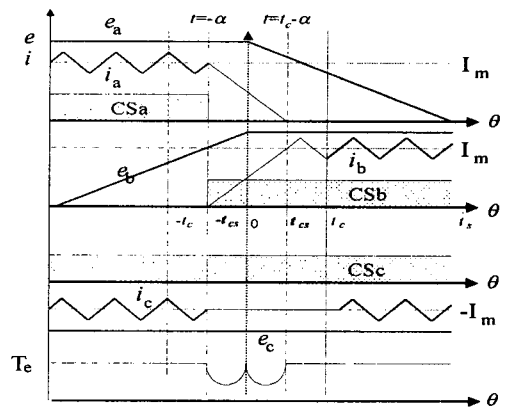


그림 7 전환시점과 토크맥동
Fig. 7 Commutation starting point and torque ripple

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 구형과 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 감쇄상의 전류의 기울기를 일정하게 하며 이때 상승상과 감쇄상의 전환시간을 새롭게 설정된 전환시간에 의해 전류제어를 수행한다. 이 때 전환시간은 상승상과 감쇄상의 전환시간의 최적점에서의 전환시간을 구하고 이를 통하여 새롭게 설정된 시간에 따라 제안한 토크맥동저감 알고리즘을 적용하여 전환시 발생하는 맥동토크를 최소로 저감할 수 있게 된다.

그림 8은 속도에 따른 상승상 및 감쇄상의 전환시간을 나타낸 것으로서 속도영역에 따라 각 전류의 전환시간이

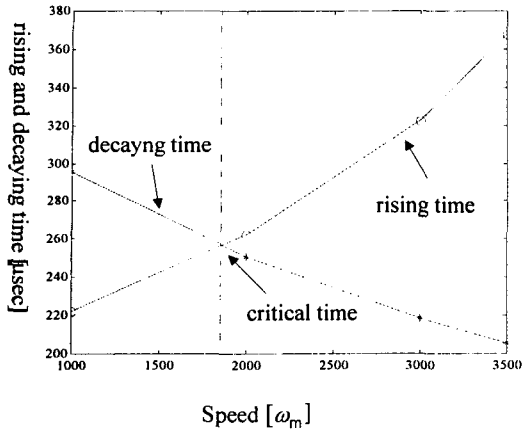


그림 8 속도에 따른 상승상 및 감쇄상의 전환시간
Fig. 8 Rising and decaying commutation time with speed

차이를 보임에 따라 각 영역에 따른 우위의 전환시간을 설정하면 된다.

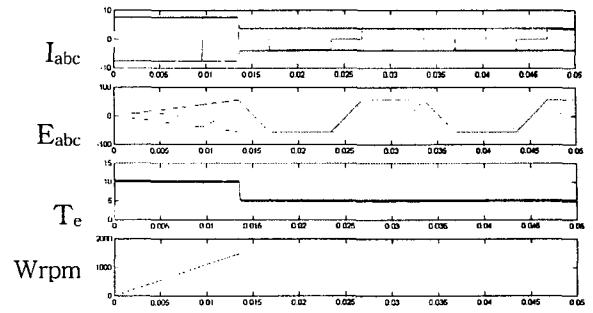
4. 시뮬레이션 및 검토

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

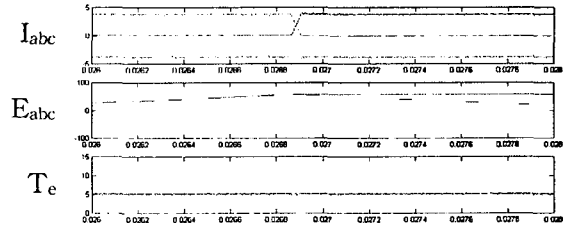
그림 9에서 그림 12는 기존의 BLDC전동기의 구동방식과 본 논문에서 제안한 방식을 이용한 구동특성을 보여주고 있다. 먼저 그림 9는 표 1에 의해 $V_{dc} > 4E_m$ 영역인 약 1500[rpm]에서 기존방식에 의한 토크 및 전류특성을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 상대적으로 저속인 경우에 기존방식은 토크맥동을 많이 저감할 수 있으나 토크맥동을 완전히 영으로 만들 수는 없다. 그림 10은 상대적으로 고속영역인 $V_{dc} < 4E_m$ 구간인 2500[rpm]에서의 전환시 특성을 보여주고 있다. 고속영역의 경우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

표 1 전동기 파라미터
Table 1 Motor parameter

정격속도	3000 [rpm]
정격전류	9.2 [A]
상당저항	0.379 [Ω]
상당 인덕턴스	5.26m [H]
역기전력상수	0.0372 [V/rpm]
DC Link 전압	310 [V]
회전자관성모멘트	0.04313 [Kgm ²]
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]

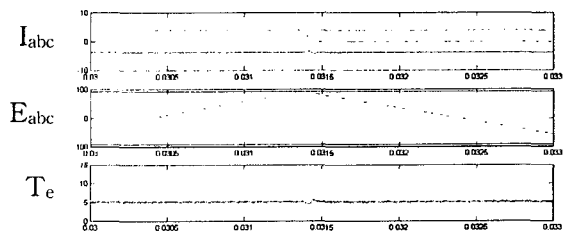
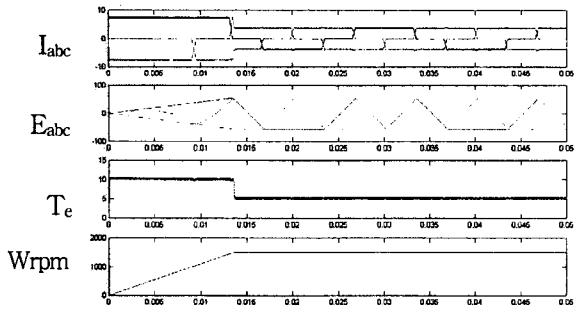
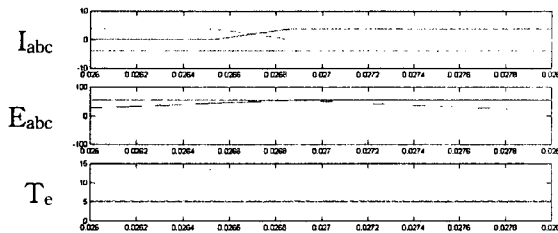


그림 10. $\omega_m = 2500$ [rpm]에서 출력파형(기존방식)
Fig. 10 Output Waveforms in $\omega_m = 2500$ [rpm]

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



(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 $\omega_m = 1500[\text{rpm}]$

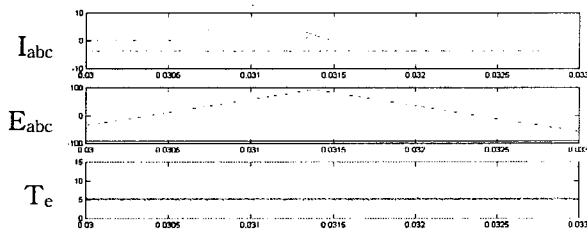


그림 12 $\omega_m = 2500[\text{rpm}]$ 에서 출력파형(제안 방식)
Fig. 12 Output Waveforms in $\omega_m = 2500[\text{rpm}]$

5. 결 론

BLDC 전동기의 토크는 전류와 역기전력의 함수이므로 맥동없는 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 감쇄상 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 제어함으로써 전류에 의한 토크맥동을 상당히 저감할 수 있음을 보였으며 최적의 전환시점을 제안하였다.

또한 토크맥동의 원인에 근거한 맥동저감 방식으로 지연시간제어방식과 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 Transactions 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 Transactions 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 Transactions 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 Transactions 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 Transactions on Industry Applications, vol. 32, No. 1, pp. 195-200, 1996.
- [8] 김철주, 강병희, 목형수, 최규하, "BLDC 모터에서 전류시간이 토크맥동에 미치는 영향에 관한 연구", 대한전기학회논문집, 제50권 제1호, pp. 23-29.