

CDTP 기법을 이용한 BLDC 전동기의 토크맥동 저감에 관한 연구

申玆錫[†], 姜秉熹^{*}

A Study on Reduction of Torque Pulsating for BLDCM Using CDTP Control Method

Woo-Seok Shin and Byoung-Hee Kang

요 약

본 논문은 CDTP 기법을 이용한 다양한 역기전력을 갖는 BLDCM(Brushless DC Motor)의 토크특성에 대하여 연구하였다. 상전환 및 상전환 시점에 의한 토크맥동을 개선하기 위한 CDTP 기법을 제안하였다. 이를 위하여 Hague의 해석방법에 따른 실제 역기전력을 갖는 BLDCM의 제어에 적용하였으며 이때 실제 역기전력은 착자의 가장자리 지수와 평탄구간에 의해 발생된다. 이의 검증을 위하여 시뮬레이션 및 실험을 통하여 제안한 방식을 이용한 토크맥동 저감방법의 타당성을 살펴보았다

ABSTRACT

This paper studies the torque characteristics of CDTP controlled BLDCM with various back-EMF waveforms. We propose a CDTP method to suppress torque pulsation due to commutation time and point. It is adopted to control the BLDCM with real back-EMF waveforms through the Hague's method for minimizing torque ripple. Real back-EMF waveforms are produced with a magnetic fringing factor and crest width of back-EMF. The performance and characteristics of the proposed control method are analyzed by simulation and verified through experimental results.

Key Words : BLDCM, Torque Pulsating, Commutation, Commutation Delay Time Control, Commutation Point

1. 서 론

최근 각종 산업기기 및 자동화기에 널리 사용되고 있는 서보전동기는 회전자가 영구자석으로 구성된 브러시리스 DC 전동기(BLDCM : Brushless DC Motor)의 사용이 급증하고 있는 추세이다. BLDCM은 견고성, 저소음, 무보수성, 긴 수명 및 회전자 손실이 없는

장점과 제어가 간단하고 운전영역이 매우 넓은 특징을 갖고 있다^[1]. 2상 여자방식의 BLDCM의 구동시스템은 일반적으로 각 스위칭 소자를 순차적으로 120°씩 전기적으로 통전되도록 제어하는데 전기적으로 1 회전당 전기자 상수의 2배의 주파수를 갖는 상전환(Commutation)이 필요하다. 이로 인하여 상전환시에 관여하지 않는 상의 전류에 맥동이 나타나며 이는 토크맥동 발생의 주 요인으로 작용하여 속도 및 위치제어의 정밀도를 떨어뜨린다. 이러한 토크맥동은 특히 회전 시 발생하는 역기전력에 비하여 상대적으로 인버터의 직류단 전압이 작은 고속영역에서는 평균토크를 감소시키는 경향이 있다. 이러한 토크맥동을 저감하기

[†]교신저자 : 정회원, 두원공과대 전기과 부교수

E-mail : wsshin@doowon.ac.kr

^{*}정회원, (주)케이펙신기술 대표이사

접수일자 : 2005. 11. 8 1차 심사 : 2005. 12. 16

2차 심사 : 2006. 1. 20 심사완료 : 2006. 2. 1

위하여 토크맥동저감에 관한 연구가 많이 진행되고 있는 추세이다^[2-7]. 그러나, 기존 BLDCM의 토크모델에 의한 제어로는 토크맥동을 완전히 저감시킬 수 없으며 역기전력이 정현파에 가까운 BLDCM의 제어방법에서는 토크맥동이 현저하게 크게 나타남을 알 수 있다. 따라서 토크맥동의 원인을 분석하고 사다리꼴 역기전력을 가지는 BLDCM의 상전환시 맥동토크와 평균토크를 개선할 수 있는 새로운 토크맥동 저감방식이 제안되었다^[8].

본 논문에서는 역기전력을 고려한 새로운 토크모델을 이용하여 2상 도통구간과 상전환구간의 토크맥동성분에 대한 새로운 해석을 적용한 CDTP 기법을 이용하여 다양한 역기전력 형태를 갖는 BLDCM의 상전환시 맥동토크의 저감률을 살펴보았다.

2. BLDCM의 상전환 및 토크모델

2.1 BLDCM의 상전환 및 토크

사다리꼴 형태의 역기전력을 갖는 BLDCM은 맥동이 없는 일정토크를 얻기 위해서 상전환 신호에 따라 사다리꼴 역기전력의 평탄한 구간동안 전류제어를 통하여 일정하게 전류의 크기가 유지되도록 해야 한다. 이 때 발생하는 토크와 역기전력, 속도 및 각 상전류와의 관계는 식 (1)과 같다.

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

여기서

T_e : 토크, ω_m : 속도
 e_a, e_b, e_c : 상당 역기전력, i_a, i_b, i_c : 상전류

식 (1)에서 보는바와 같이 토크맥동 및 속도의 변동을 줄이기 위해서는 전류×전압의 전체 합이 일정해야 하는데 BLDCM의 경우 상전환에 의한 전류맥동성분이 발생한다. 상전환에 의한 전류맥동은 전기자권선의 저항과 인덕턴스 및 제한된 직류단 전압의 영향으로 인하여 전류의 상승과 감쇄가 순간적으로 이루어지지 않고 일정한 지연시간이 발생하기 때문에 전류제어기에 의해 쉽게 저감될 수 없다. 따라서 역기전력 및 전동기정수에 의한 전류와의 관계를 해석하여 상전환시 발생하는 전류맥동을 저감할 수 있는 제어기법이 필요하다. 사다리꼴 형태의 역기전력을 갖는 BLDCM의 역기전력의 크기를 E_m 이라고 하면 일반적인 BLDCM의 상전환시 발생하는 전류맥동은 역기전력과 직류단 전

압과의 관계에 따라 세 가지 형태로 나타나며 식 (2)와 같다^[2-5].

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

여기서 V_{dc} : 직류단 전압, E_m : 역기전력

그림 1은 역기전력과 직류단 전압과의 관계에 의한 속도영역에 따른 전류벡터도를 보여준다.

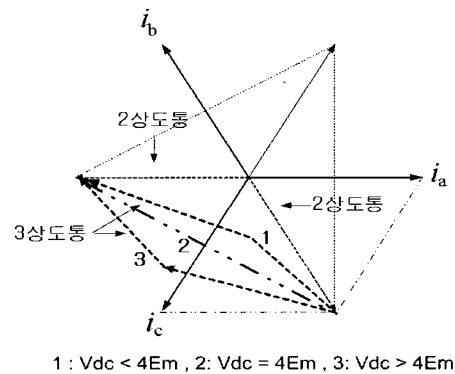


그림 1 속도영역에 따른 전류벡터도
 Fig. 1 Current Vector Diagram with Speed Range

그림에서 알 수 있듯이 BLDCM의 경우 총 6개의 전류벡터가 존재하며 상전환시 2번 궤적과 같이 선형적으로 제어하는 것이 전류(轉流)에 의한 토크맥동성분을 저감하는 방법이지만 고속영역의 경우에는 1번 궤적과 같이 전류의 크기가 작아져 출력토크성분이 고속으로 갈수록 감소하는 경향으로 나타나며, 저속영역의 경우 3번 궤적과 같이 전환 시 전류의 크기가 증가하여 출력토크가 증가한다. 이는 영구자석형 전동기의 경우 감자방지 및 전류제한에 나쁜 영향을 주게 되며 결과적으로는 전동기의 출력효율을 떨어뜨리는 결과를 가져오게 된다. 따라서 임의의 속도영역에서도 전류벡터의 궤적이 2번 궤적을 통하여 일정하게 유지되도록 해 주어야 하며 이를 위한 토크맥동저감 제어가 필요하다.

2.2 BLDCM의 새로운 토크모델

BLDCM의 토크맥동 저감을 위한 전류제어방법에 대한 연구결과들은 발표가 되었으나, 그림 1에서 2번 궤적을 통한 전류제어에 의해 감쇄상의 상전류와 상승상의 상전류가 같을 경우에도 BLDCM의 토크맥동은

역기전력과 상관관계에 의하여 여전히 존재하고 있다. 상전환 시 오프(off)되는 상을 감쇄상, 온(on)되는 상을 상승상이라고 하면, 감쇄상의 역기전력은 상전환하는 시점에 따라 감소하고 있는 반면 상승상의 역기전력은 역기전력의 도통구간이 120°라고 가정할 경우 일정한 크기의 역기전력(E_m)을 갖는 일정전압이기 때문에 상전환이 이루어지지 않는 비전환상의 전류(non-commutating current)의 변화율이 일정하게 제어되어도 맥동성분이 토크에 나타나게 된다. 따라서 역기전력을 고려한 토크맥동해석이 필요하며 각 저속 및 고속영역에서의 상전환시 발생하는 토크성분은 식 (3)과 같이 나타난다^[8].

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

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

여기서,

E_m : 일정 역기전력 전압

I_{mf} : 한 상의 전류가 끝났을 때 나머지 상의 전류

I_m : 전환 후 일정전류

t_f : I_{mf} 때의 시간

k_e : 역기전력 상수

식 (3)은 저속영역 및 고속영역에서의 역기전력 성분을 고려한 출력토크를 나타낸 것이다.

우변의 첫 번째 항은 일정출력을 발생시킬 수 있도록 하는 기존의 토크성분이고, 두 번째 항은 일정기울기로 감쇄하는 전류(off상)와 상승상(on상)의 역기전력에 따라 나타나는 상전환시간에 의한 토크맥동성분이다. 세 번째 항은 상승상과 감쇄상의 기울기 차이에 의한 비전환상의 전류의 맥동성분으로써 비전환상의 전류와 역기전력과의 관계에 의해 나타나는 성분이다.

전술한 바와 같이 저속영역에서는 평균토크성분이 증가함을 알 수 있으며 고속영역에서는 감소함을 알 수 있다. 따라서 BLDCM을 제어할 경우 상전류와 역기전력과의 관계에 의해 발생하는 토크맥동성분에 대하여 고려해야만 임의 속도영역에서도 토크맥동을 최소화할 수 있다.

3. CDTP제어에 의한 토크맥동의 저감

식 (3)에서 전술한 상전환시 발생하는 토크성분은 역기전력 및 상전환을 고려하였을 경우 모두 3개의 토

크성분으로 나타나며 이를 전류(電流)맥동에 의한 맥동성분과 상전환(轉流)시간에 따른 맥동성분으로 나타내면 토크성분은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다^[8].

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

여기서,

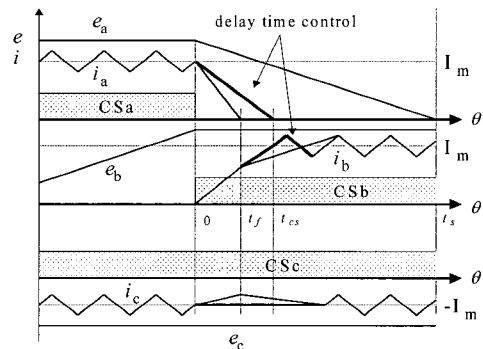
E_m : 일정 역기전력 전압

I_m : 전환후 일정전류

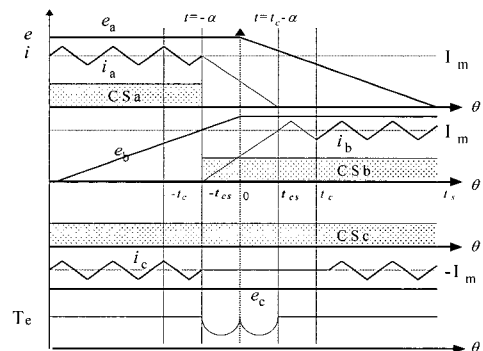
t_c : 상전환 시간

k_e : 역기전력 상수

직류단 전압이 4배의 역기전력보다 작은 고속영역의 경우 상승상전류의 기울기가 감쇄상에 비해 작기 때문에 감쇄상이 늦게 감쇄하도록 제어해야 하는데 일반적인 방법으로는 상승상의 전류가 제어되고 감쇄상은 전동기의 정수에 의해 자연 감쇄되는 반대의 현상이 나타나게 되고 따라서 비전환상의 전류변화율을 일정하게 제어하지 못하게 된다. 그러므로 이러한 맥동을 줄이기 위한 새로운 저감방법이 필요하며 이를 위하여



(a) 상전환 지연시간 제어



(b) 상전환시점 제어

그림 2 CDTP 제어기법
Fig. 2 CDTP Control Method

그림 2와 같은 CDTP 기법이 필요하다.

그림 2에서 I_m 은 일정 전류값을, CS_{abc} 는 전동기의 상전환 센서에서 출력되는 상전환 신호를 나타내며 t_{cs} 는 새로운 상전환 시간을, t_f 는 한 상의 전환이 끝나는 시간을, t_c 는 기존의 상전환 시간을 나타낸다. 그림 2(a)와 같이 감쇄상전류의 기울기는 상승상전류의 기울기보다 크기 때문에 상승상 전류의 기울기와 같은 전류제어를 따라갈 수 있게 제어하는 것이 가능하기 때문에 상승상 및 감쇄상 전류를 모두 같은 기울기를 갖도록 제어한다. 이를 위해서는 새로운 상전환 시간(t_{cs})을 결정해야 하며 이를 위하여 감쇄상전류를 제어하기 위한 전류(轉流)신호를 제어해야 한다. 상전환 시간에 의한 토크맥동은 전압원 인버터의 제한된 직류단 전압과 전동기 정수에 의해 전환이 신속히 순간적으로 이루어지지 못하는데 t_c 라는 전환시간에 따라 상전류의 기울기가 발생하기 때문이다. 상전환에 의한 토크맥동 T_c 는 상전환 시간 t_c 의 함수로 나타나는 토크맥동성분에 대해 다시 쓰면 식 (5)와 같다. 이 때 나타나는 최대 상전환 토크맥동 $T_{c,max}$ 는 회전자의 위치 θ 에 따른 2차함수로 나타나며 $\theta = \frac{t_c}{2}$ 일 때 T_c 는 최대의 맥동을 가지고 이는 식 (6)과 같이 나타난다. 따라서, 맥동토크를 저감시키기 위해서는 상전류의 크기 및 전환시간을 고려해야 함을 알 수 있다.

$$T_c = \frac{6k_e I_m}{\pi} \left(-\frac{\theta^2}{t_c} - \theta \right), 0 \leq \theta \leq t_c \quad (5)$$

$$T_{c,max} = T_c \Big|_{\theta = \frac{t_c}{2}} = -\frac{3k_e I_m t_c}{2\pi} \quad (6)$$

식 (5)와 식 (6)에 의하여 새롭게 설정된 전환시점을 기준으로 하여 상전환 지연시간 제어를 통하여 상승상과 감쇄상의 전류의 기울기를 일정하게 제어하고 이때 상승상과 감쇄상의 전환시간을 새롭게 설정된 전환시간에 의해 그림 2(b)와 같이 전류제어를 수행한다. 상전환시간은 상승상과 감쇄상의 전환시간의 최적점에서의 전환시간을 구하고 이를 통하여 새롭게 설정된 시간에 따라 제한된 토크맥동저감 알고리즘을 적용하여 상전환시 발생하는 맥동토크를 저감할 수 있게 된다.

실제 BLDCM의 역기전력은 이상적인 사다리꼴의 형태를 갖추지 못하고 권선방식이나 착자의 형태에 따라 여러 가지 형태로 나타날 수 있다. 따라서, 다양한 역기전력의 형태에 따른 토크맥동 및 속도맥동에 대하

여 고찰이 필요하며 본 논문에서는 Hague의 해석방법을 통하여 착자의 가장자리의 기울기에 따른 형태와 역기전력의 평탄한 구간이 120°보다 작을 때의 경우 두 가지에 대하여 검토하였다^[1]. Hague의 해석방법에 따른 역기전력을 수학적 수식에 의하여 전개하였다. 이때 복원된 역기전력의 각도에 따른 함수는 다음과 같다.

$$y = \frac{1}{2} \exp\left(\frac{-x}{FF}\right) \quad (7a)$$

$$y = \frac{1}{2} \left(1 - \exp\left(\frac{-x}{FF}\right) \right) \quad (7b)$$

여기서, x : 역기전력의 평탄한 구간

FF : 가장자리효과지수(Fringing Factor)

실제 역기전력 파형은 착자의 형태와 권선방식에 따라 역기전력의 평탄한 구간의 가장자리가 비선형적으로 나타난다. 또한 역기전력의 평탄한 구간이 120°보다 상대적으로 작게 나타날 수 있으며 따라서 이를 고려해야 한다.

4. 시뮬레이션 및 실험

표 1은 본 논문에서 사용된 BLDCM의 전동기상수를 보여준다.

표 1 BLDCM 파라미터
Table 1 BLDCM Parameters

| | |
|---------|--------------------|
| 정격속도 | 3000 [rpm] |
| 정격전류 | 9.2 [A] |
| 상당저항 | 0.379 [Ω] |
| 상당 인덕턴스 | 5.26 [mH] |
| 역기전력상수 | 0.0372 [V/rpm] |
| 직류단 전압 | 310 [V] |
| 극수 | 4 |

본 연구에 사용한 BLDCM은 권선방식이 전절권의 형태를 띄고 있어 역기전력의 평탄한 구간이 상대적으로 작게 나타나며 그림 3과 같다. 실험에 사용된 BLDCM은 역기전력의 평탄한 구간이 약 40°의 구간을 갖는 정현파형태의 역기전력에 가까운 전압형태를 나타내고 있는데 가감속 운전이 빈번한 응용분야에 이러한 전동기가 적용되고 있다. 특히 BLDCM은 고속영역의 경우에 토크맥동이 크게 나타나며 직류단 전압의 한계로 인하여 제어가 어려움이 있으며 본 논문에서도

고속영역에서의 특성을 살펴보았다.

그림 4는 비교적 제어특성이 좋은 비전환상의 전류를 일정하게 제어하는 비전환 상전류제어방식을 적용하여 제어한 정현파 형태의 역기전력을 갖는 BLDCM의 각 부 출력파형을 보여주고 있으며 그림 5는 제안한 제어방법에 의해 제어되는 토크맥동성분을 보여주고 있다. 가속구간에서의 토크맥동성분은 비슷한 경향을 나타내고 있으나 고속영역에서의 정속구간에서는 기존의 제어방법보다 맥동토크가 다소 줄어들을 알 수 있다.

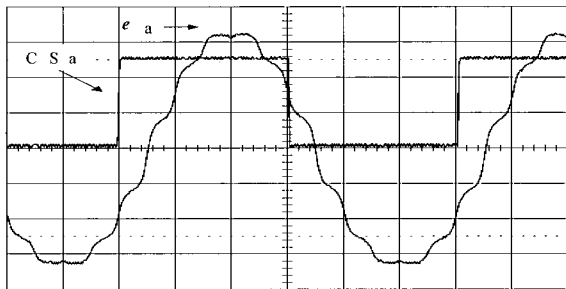
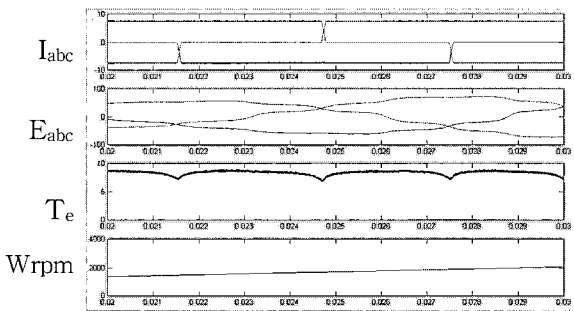
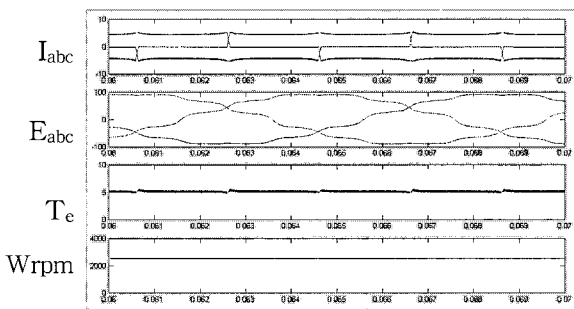


그림 3 BLDCM의 실제 역기전력파형
Fig. 3 Real back-Emf Waveform of BLDCM

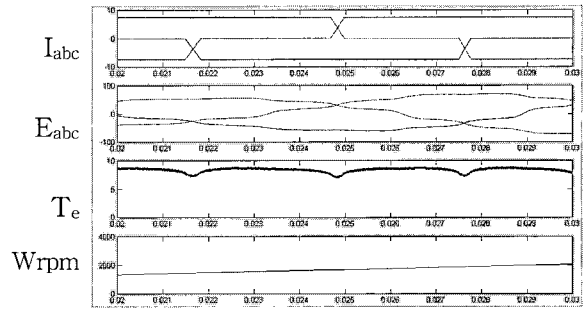


(a) 가속구간에서의 출력특성

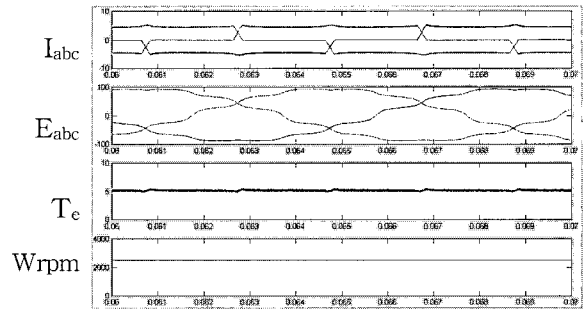


(b) 정속구간에서의 출력특성

그림 4 속도 $\omega_m \approx 1.2$ [p.u.]의 출력파형 (기존)
Fig. 4 BLDCM Waveforms at $\omega_m \approx 1.2$ [p.u.]
(Conventional Method)



(a) 가속구간에서의 출력특성



(b) 정속구간에서의 출력특성

그림 5 속도 $\omega_m \approx 1.2$ [p.u.]의 출력파형 (제안방식)
Fig. 5 BLDCM Waveforms at $\omega_m \approx 1.2$ [p.u.]
(Proposed Method)

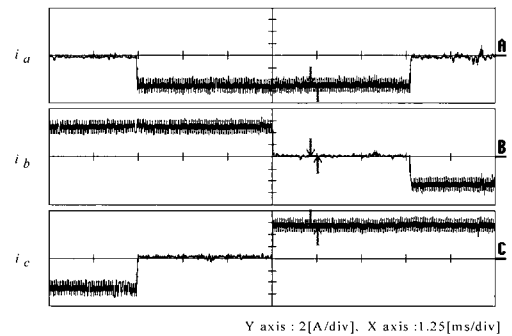


그림 6 CDTF제어에 의한 속도 $\omega_m \approx 1.2$ [p.u.]일 때의 실제 역기전력을 갖는 BLDCM의 전류파형
Fig. 6 BLDCM Current Waveforms at $\omega_m \approx 1.2$ [p.u.] with CDTF Control

그림 6은 고속영역에서 전류제어에 의한 CDTF제어 방식을 적용한 실험파형을 보여준다. 고속영역에서의 전류맥동이 작게 나타나며 상 전환시 전류의 기울기 일정하게 나타남을 알 수 있다. 그림 7과 8은 식 (7)에서 제안된 방식에 따라 역기전력을 구성하여 본 것이다. 가장자리 효과지수 및 평탄구간에 따라 여러 가지 형태의 역기전력을 재구성할 수 있다.

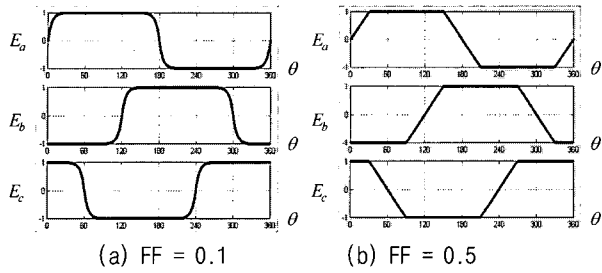


그림 7 가장자리 효과지수에 따른 역기전력파형
Fig. 7 Back-EMF waveforms with fringing factor

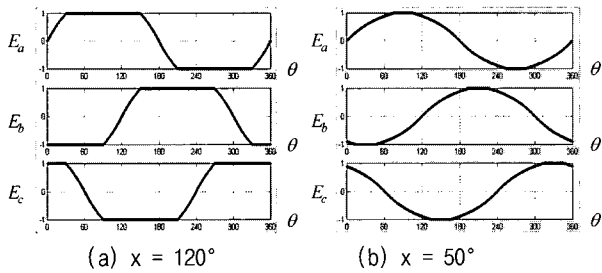
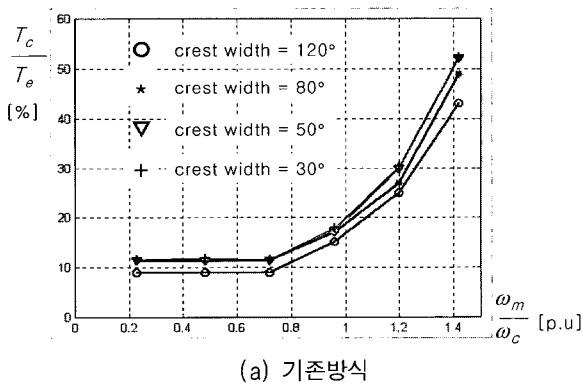
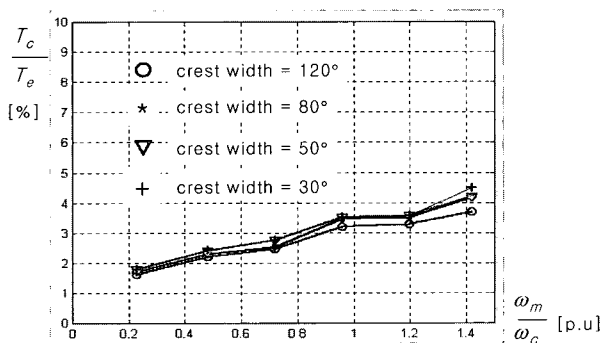


그림 8 평탄한 구간에 따른 역기전력파형
Fig. 8 Back-EMF waveforms with crest factor



(a) 기존방식



(b) CDTF 제어방식

그림 9 역기전력의 평탄구간에 따른 토크맥동률
Fig. 9 Torque ripple ratio at crest width of back-EMF

그림 9는 그림 8에서 얻어진 역기전력의 평탄구간을 고려하여 기존의 방식과 제안한 방식을 비교하여 각 속도에 따른 토크의 맥동률을 나타낸 것이다. 토크의 맥동률은 평균토크와는 달리 상전환시에 발생하는 토크맥동의 크기를 측정된 것으로서 일정토크성분에 대한 비로서 나타내었다. 기존방식은 임계속도이상에서는 토크맥동률이 높게 나타나며 따라서 그 사용영역의 한계를 극복할 수 없었다. 제안한 방식의 경우 임계속도이상에서도 토크맥동률을 최소화할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

BLDCM의 토크는 전류와 역기전력의 함수이므로 맥동 없는 토크를 얻기 위해서는 전류제어의 관점 및 전류와 역기전력과의 상호관계도 고려해야 한다.

본 논문에서는 사다리꼴 형태의 BLDCM의 단점인 전류구간에서 토크맥동이 발생하는 문제에 대하여 살펴보았으며 토크맥동의 원인을 분석하여 이를 저감하기 위한 지연시간 제어방식과 전환시점 제어방식으로 구성된 CDTF 기법을 제안하였다. 그러나, 산업기에 사용되는 BLDCM은 역기전력파형이 정현파에 근사한 형태를 가지므로 역기전력의 평탄구간이 40%정도 되는 실제 BLDCM을 이용하여 제안한 CDTF 기법을 적용하여 구동하였다. 이의 검증을 위하여 시뮬레이션 및 실험을 통하여 살펴보았으며 제안된 CDTF 기법을 직류단 전압이 4배의 역기전력보다 상대적으로 큰 고속영역에서 적용하여 전류맥동 및 상전환시간이 일정 제어됨을 보였다.

또한 Hauge의 방법에 따라 다양한 BLDCM의 역기전력파형을 구성하여 이에 대한 구동특성을 분석하였으며 제안한 방식의 경우 임계속도이상에서도 토크맥동률을 최소화할 수 있음을 알 수 있다.

본 연구는 2004년도 산업자원부 전력산업연구개발 사업 전력선행기술에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

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] 강병희, 목형수, 최규하, "최소토크맥동을 갖는 BLDC 전동기의 최적제어," 전력전자논문집, 제8권 제1호, pp. 56-63.

저 자 소 개



신우석(申玆錫)

1961년 2월 9일생. 1986년 건국대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1988년~1996년 LG전자 생활시스템연구소 선임연구원. 1996년~현재

두원공과대 전기과 부교수.



강병희(姜秉熹)

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

펙신기술 대표이사.