

# CDTP 기법을 이용한 BLDC 전동기 제어에 관한 연구

신우석, 강병희  
두원공과대학

## A Study of BLDC Motor Control Using CDTP Method

Woo-Seok Shin, Byoung-Hee Kang  
Doowon Technical College

### ABSTRACT

본 논문에서는 역기전력을 고려한 새로운 토크모델인 CDTP(Commutation Delay Time and Point) 제어기법을 이용하여 실제 역기전력을 고려한 BLDC(Brushless DC) 전동기의 토크맥동에 대하여 연구하였다. BLDC 전동기의 상전환(Commutation)시 발생하는 토크맥동에 대하여 기술하였으며 토크맥동의 원인이 되는 역기전력과 전류와의 관계를 고찰하였다. 이를 바탕으로 토크맥동의 개선을 위하여 상전환시점과 상전환기간을 고려한 CDTP 제어기법을 제안하였으며 맥동토크의 저감효과에 대하여 해석하였다. 또한 BLDC 전동기의 실제 역기전력을 고려하기 위하여 Hague의 해석방법에 따른 역기전력의 다양한 형태를 살펴보고, 제안한 CDTP기법을 적용하여 기존 방법을 통한 토크맥동 제어방법과 비교·검토하였다. 이의 검증을 위하여 MATLAB/Simulink를 이용하여 제안한 방식의 토크맥동 저감방법의 타당성을 살펴보았다.

### 1. 서론

최근 각종 산업기기 및 자동화기기에 널리 사용되고 있는 서보전동기는 회전자가 영구자석으로 구성된 브러시리스 서보전동기의 사용이 급증하고 있는 추세이다. 이 중에서 브러시리스 직류전동기 (BLDCM)는 견고성, 저소음, 무보수성, 긴 수명 및 회전자 손실이 없다는 장점과 제어가 간단하고 운전영역이 매우 넓다는 특징을 갖고 있다<sup>[1]</sup>. 2상 여자방식의 BLDCM 구동시스템은 일반적으로 각 스위칭 소자를 순차적으로 120°씩 전기적으로 통전되도록 제어하는데 전기적으로 1회전당 전기자 상수의 2배의 주파수를 갖는 상전환(commutation)이 필요하다. 이로 인하여 상전환시에 관여하지 않는 상의 전류에 맥동이 나타나며 이는 토크맥동 발생의 주요인으로 작용하여 속도 및 위치제어의 정밀도를 떨어뜨리고,

특히 고속영역에서의 경우 평균토크를 감소시키는 경향이 있다. 이러한 토크맥동을 저감하기 위하여 토크맥동 저감에 관한 연구가 많이 진행되고 있는 추세이다.<sup>[2~7]</sup> 그러나, 기존 BLDCM의 토크모델에 의한 제어로는 토크맥동을 완전히 저감시킬 수 없으며 특히 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.<sup>[8]</sup>

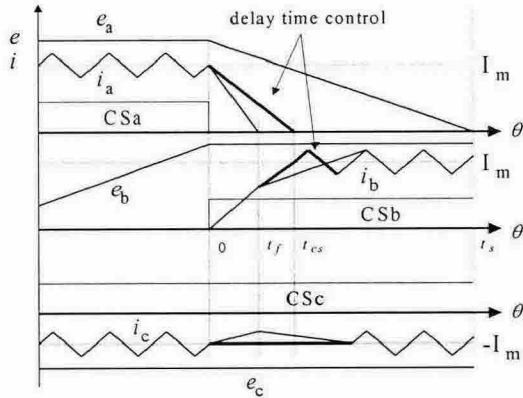
본 논문에서는 역기전력을 고려한 새로운 토크모델을 이용하여 2상도통구간과 상전환구간의 토크맥동성분에 대한 새로운 해석을 적용한 CDTP제어기법을 이용하여 다양한 역기전력 형태를 갖는 BLDCM의 상전환시 맥동토크의 저감률을 살펴보았다.

### 2. CDTP제어에 의한 토크맥동의 저감

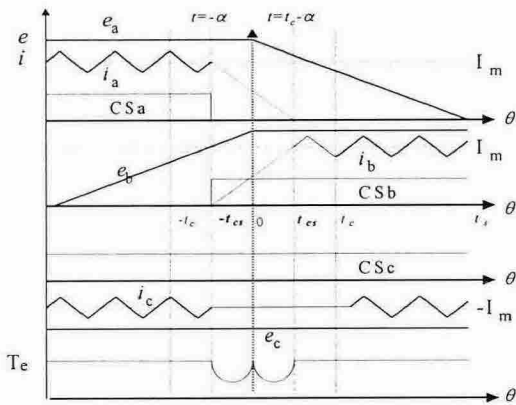
브러시리스 직류전동기 전환시 발생하는 토크는 식 (1)와 같이 나타나며 전류리플에 의한 맥동성분과 전환 시간에 따른 맥동성분으로 나타남을 알 수 있다.<sup>[8]</sup>

$$T_e = \frac{2E_m I_m}{\omega_m} + \frac{6k_e I_m}{\pi} \left( \frac{\theta^2}{t_c} - \theta \right) \quad (1)$$

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 그림 1과 같은 CDTP제어기법이 필요하다.



(a) 상전환 지연시간 제어



(b) 상전환시점 제어  
그림 1 CDTF 제어기법

그림 1(a)와 같이 감쇄상전류의 기울기는 상승상전류의 기울기보다 크기 때문에 상승상전류의 기울기와 같은 전류궤적을 따라갈 수 있게 제어하는 것이 가능하기 때문에 상승상 및 감쇄상 전류를 모두 이 기울기를 갖도록 제어한다. 이를 위해서는 새로운 전환시간을 알아야 하며 감쇄상전류를 제어하기 위한 전류(轉流)신호도 새롭게 구성해야 한다. 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 (2)와 같으며 이 때 나타나는 최대토크는 식 (3)과 같다. 식에서 알 수 있듯이 맥동토크를 저감시키기 위해서는 상전류의 크기 및 전환시간을 고려해야 함을 알 수 있다.

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

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

식 (2)와 식 (3)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 1(b)와 같이 전류제어를 수행한다. 상전환시간은 상승상과 감쇄상의 전환시간의 최적점에서의 전환시간을 구하고 이를 통하여 새롭게 설정된 시간에 따라 제한한 토크맥동저감 알고리즘을 적용하여 상전환시 발생하는 맥동토크를 최소로 저감할 수 있게 된다.

### 3. 실제 역기전력을 고려한 BLDCM의 CDTF제어에 의한 토크맥동의 저감

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

$$\frac{1}{2} \exp\left(\frac{-x}{FF}\right) \quad (4-1)$$

$$\frac{1}{2} (1 - \exp\left(\frac{-x}{FF}\right)) \quad (4-2)$$

여기서,  $x$ 는 역기전력의 평탄한 구간

$FF$ 는 가장자리효과지수(Fringing Factor)

식 (4)에 따라 복원된 역기전력 파형을 고찰하면 그림 2, 그림 3과 같다. 그림 2와 그림 3에서 처럼 역기전력 파형은 착자의 형태와 권선방식에 따라 역기전력의 평탄한 구간의 가장자리가 비선형적으로 나타난다. 또한 역기전력의 평탄한 구간이  $120^\circ$ 보다 상대적으로 작게 나타날 수 있으며 따라서 이를 고려해야 한다.

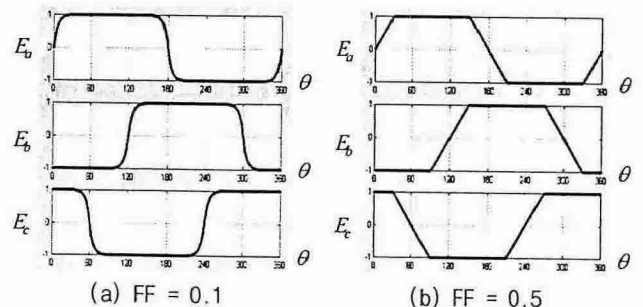


그림 2 가장자리 효과지수에 따른 역기전력파형

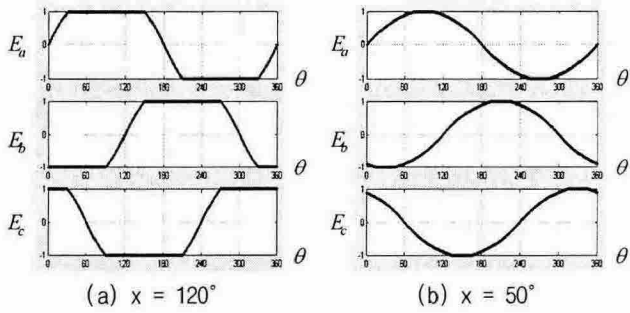


그림 3 역기전력의 평탄한 구간에 따른 역기전력파형

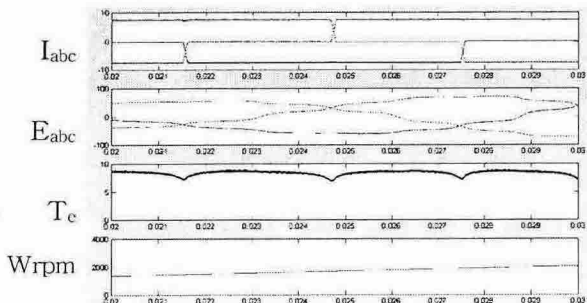
#### 4. 시뮬레이션 및 검토

시뮬레이션은 MATLAB/Simulink를 사용하였으며 표 1은 본 논문에 사용된 BLDCM의 사양을 보여준다.

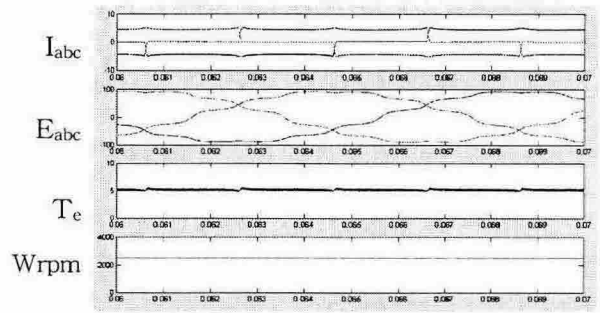
표 1 BLDCM 사양

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

본 연구에 사용한 BLDCM은 권선방식이 전절권의 형태를 띄고 있어 역기전력의 평탄한 구간이 상대적으로 작게 나타난다. 역기전력의 평탄한 구간이 약 40°의 구간을 갖는 다소 정현파형태의 역기전력전압을 나타내고 있는데 가감속 운전이 빈번한 응용분야에 이러한 전동기가 적용되고 있으며 본 연구에서도 전절권의 권선방식을 가진 BLDC전동기를 사용하였다. 그림 4는 기존의 제어방식을 적용한 실제 BLDC전동기의 각 부 출력파형을 보여주고 있으며 그림 5는 제안한 제어방법에 의해 제어되는 토크맥동성분을 보여주고 있다.

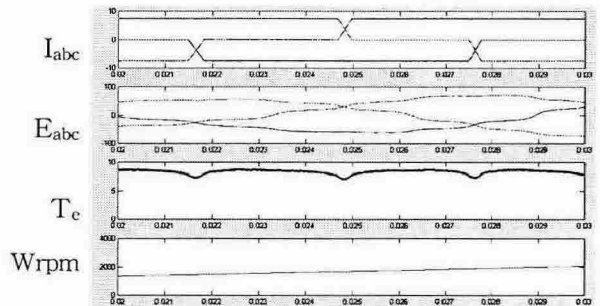


(a) 가속구간에서의 출력특성

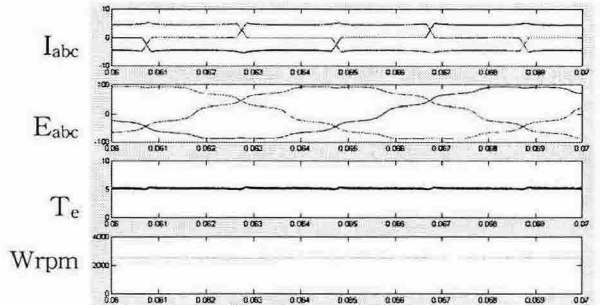


(b) 정속구간에서의 출력특성

그림 4 속도  $\omega_m = 1.2$  [p.u.]일 때의 실제역기전력을 갖는 BLDCM의 출력파형 (기존의 방식)



(a) 가속구간에서의 출력특성

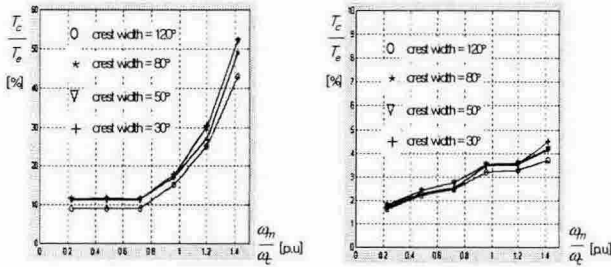


(b) 정속구간에서의 출력특성

그림 5 속도  $\omega_m = 1.2$  [p.u.]일 때의 실제역기전력을 갖는 BLDCM의 출력파형 (CDTF 제어방식)

가속구간에서의 토크맥동성분은 비슷한 경향을 띄고 있으나 정속구간에서는 기존의 제어방법보다 나은 결과를 보여주고 있다. 또한 현재 상전환시간제어의 시점을 일정하게 하고 전류제어를 한 결과를 보여주고 있으며 속도에 따른 전류시간을 적용하여 전류제어를 수행한다면 가속구간에서도 상전환에 의한 맥동성분이 크게 줄어들 것으로 예상된다. 제안한 방법의 경우 상대적으로 고속영역에서의 토크맥동이 작게 나타남을 알 수 있다. 그림 6은 위에서 얻어진 역기전력 파형을 고려하여 기존의 방식과 제안한 방식을 저감하였을 경우 각 속도에 따른 토크의 맥동률을 나타낸 것이다. 토크의 맥동률은 평균 토크와는 달리 상전환시에 발생하는 토크맥동의 크기를 측정된 것으로서 일정토크성분에 대한 비로서 나타내었다. 기존의 방식으로는 임계속도이상에서는 토크맥동율이 수십%정도가 되며 정격속도부근에서는 50%이상이

되는 것을 알 수 있으며 따라서 그 사용영역의 한계를 극복할 수 없었다. 제안한 방식의 경우 토크맥동률은 현저히 줄어들 수 있으며 BLDCM의 경우 임계속도 이상에서도 토크맥동을 최소화할 수 있는 알고리즘이 필요하고 제안한 방식에 의해 저감할 수 있음을 확인하였다.



(a) 기존방식 (b) CDTF 제어방식  
 그림 6 역기전력의 평탄한 구간에 따른 토크맥동률

### 5. 결 론

브러시리스 직류전동기의 토크는 전류와 역기전력의 함수이므로 맥동없는 토크를 얻기 위해서는 전류제어의 측면 뿐만 아니라 전류와 역기전력과의 상호관계를 고려하여야 한다. 본 논문에서는 BLDCM의 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. 토크맥동의 원인에 근거한 맥동저감 방식으로 지연시간제어방식과 전환시점제어방식으로 구성된 CDTF제어기법을 제안하였다. 또한 실제 BLDCM의 역기전력파형은 착자형태와 권선방식에 따라 이상적인 120°의 평탄한 구간을 갖는 역기전력파형으로 나타나지 않으며 "가장자리효과지수"와 "평탄한구간"에 따라 여러가지 형태로 나타날 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 여러가지 역기전력파형에 대한 구동특성을 분석하였으며 토크맥동률은 속도가 증가함에 따라 증가하는 형태로 속도변동율은 임계속도를 기준으로 임계속도이하에서는 변동율이 감소하는 경향으로 임계속도이상에서는 변동율이 증가함을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 2004년도 산업자원부 전력산업연구개발사업 전력선행기술과제에 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 BLDC전동기의 최적제어", 전력전자논문집, 제8권 제1호, pp. 56~63