

전환시간 제어를 통한 BLDC전동기의 토크리플 저감 방법

A Method of Torque Ripple Reduction using Commutation Time Control in BLDC Motor

허남억*, 오태석**, 김일환***
Nam-Euk Her, Tae-Seok Oh, Il-Hwan Kim

Abstract - This paper present a method of current control for torque ripple reduction in brushless dc motor which have a trapezoid back EMF. In such drives the current ripples are generated by motor inductance in stator windings and the back EMF. The ripples suppression techniques that are practically effective in high speed as well as in low speed regions are rarely found. The proposed method here is based on a strategy that the commutation intervals of the incoming and the outgoing phases can be equalized by a proper PWM control.

Key Words :BLDC Motor, Commutation Time, Torque Ripple

1. 서론

역기전력의 형태가 사다리꼴인 BLDC전동기는DC모터와 달리 브러쉬가 필요없다. 단위 전류당 높은 토크, 간단한 구동방식을 가지는 장점이 있다. 그러나 고정자 권선의 인덕턴스 성분으로 인하여 상전류가 전류되는(commutation) 구간에서 상전류에 맥동이 발생되고, 이로 인해 토크 맥동이 발생되어 고성능을 필요로 하는데 사용하기에는 제약이 있다.

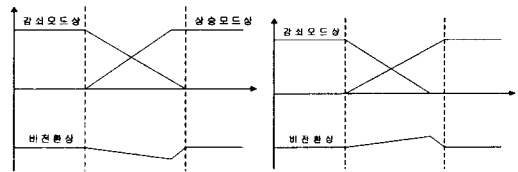
최근까지도 전류시에 나타나는 토크맥동의 감소를 위해 많은 연구가 진행되어지고 있다[1-5]. 이러한 연구에는 이상적인 전류를 흘려주기위해 프리에 시리즈 계수를 이용하는 방법, 중성점 전압과 역기전력등을 고려하여 보상전압을 인가하는 방법, 상전류를 바이폴라(Bipolar) PWM 방식으로 제어할 때 전류구간에서 전동기의 중성점과 인버터 중성점간의 전위차를 전류제어기에 전향 보상하여 전류에 의한 토크맥동을 저감시키는 방법 등을 제시하였다.

그러나 이러한 방법은 모터의 인덕턴스 성분과 직류단 전압의 제한성, 스위칭 손실 등의 단점이 있다. 따라서 본 연구는 유니폴라 PWM 방식에서 저속영역과 고속영역을 구분하여 전류 전환 구간의 시간을 계산하여 감쇠모드 전환 시간과 상승 모드 전환시간을 제어함으로써 토크 맥동을 최소화하는 방법을 제안하였다. 또한, 제안한 방법을 고속의 DSP를 이용하여 구현하여 그 효율성을 확인함으로써, 고정밀성을 요구하는 분야에도 적용할 수 있음을 보이고자 한다.

2. 본론

2.1 전환 구간에서의 전류 맥동

BLDC전동기의 가장 큰 단점인 전류 전환 구간에서의 전류 맥동 현상을 그림1에 나타낸다. 이러한 현상은 120° 구형파 전류 제어를 할 때 제한된 DC 전압과 전동기의 인덕턴스 성분, 사다리꼴 형태의 역기전력에 때문에 생기는 문제이다.



(a)저속영역의 전류 맥동 (b) 고속영역의 전류 맥동
그림 1. 전환구간에서의 전류 맥동

그림 1에서 알 수 있듯이 전환시간에서 감쇠모드상의 전류 하강 시간과 상승모드상의 전류 상승 시간이 일치하지 않으면 비전환상의 전류 맥동이 존재하게 된다.

2.2 저속영역에서 전환 구간의 전류 보상 방법

2.2.1 PWM ON, OFF시의 전류 흐름

PWM ON시와 OFF시의 전류 흐름의 그림 2, 그림 3에 각각 나타내었고, 이때의 수식을 식(1)과 식(2)에 각각 나타내었다.

* 허남억: 江原大學 電氣電子工學科 碩士課程
** 오태석: 江原大學 電氣電子工學科 工博
*** 김일환: 江原大學 電氣電子工學科 教授·工博

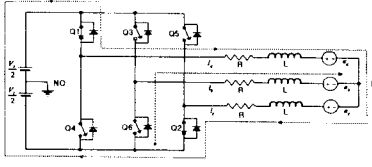


그림 2 저속 전환구간에서의 전류 (스위치 ON)

$$V_{NNO} = \frac{-V_s}{6} - \frac{e_a + e_b + e_c}{3}$$

(1)

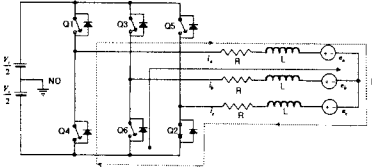


그림 3. 저속 전환구간에서의 전류 (스위치 OFF)

$$V_{NNO} = \frac{-V_s}{2} - \frac{e_a + e_b + e_c}{3}$$

(2)

여기서, V_s 는 직류 공급전압, R 은 상전압, L 은 인덕턴스, e 는 역기전력, i 는 상전류, V_{NNO} 는 모터의 중성점 전압이다.

2.2.2 전환시간의 전류 맥동보상

식(2)와 식(4)로부터 전환구간에서 비전환상의 평균 전압 (V_{m2})을 PWM 시비율(d_b)로 표현하면 식(3)과 같다.

$$V_{m2} = \frac{V_s d_b}{3} - \frac{4e}{3}$$

(3)

여기서, d_b 는 저속 전환구간에서 PWM의 시비율을 나타낸다. 이때, 전환구간에서 역기전력의 크기는 일정하다고 가정하였다. 비전환 구간에서 비전환상의 평균 전압(V_{m1})을 PWM 시비율(d_a)에 관한 식으로 표현하면 식(4)과 같다.

$$V_{m1} = \frac{V_s d_a}{2} - e$$

(4)

여기서, d_a 는 저속 비전환구간에서 PWM의 시비율을 나타낸다. 전류 맥동을 줄이기 위해서 비전환상의 전류를 일정하게 유지해야 하고 전류를 일정하게 하기 위해서는 비전환상의 전압은 전환시와 비전환시에 같아야 하기 때문에 전환시의 PWM 시비율은 식(3)과 식(4)로부터 식(5)과 같이 구해진다.

$$d_b = \frac{3}{2} d_a + \frac{e}{V_s}$$

(5)

감쇠 모드상에 걸리는 평균 전압(V_{m3})은 식(6)과 같다.

$$V_{m3} = -\frac{V_s d_b}{3} + \frac{e}{3}$$

(6)

따라서 감쇠모드 상에서의 전압식은 식(7)과 같다.

$$Ri_b + L \frac{di_b}{dt} = \frac{-V_s d_b + e}{3} - e$$

(7)

식(7)으로부터 전환구간 시간(t_r)을 구하면 식(8)과 같다.

$$t_r = -\frac{L}{R} \ln \left[\frac{V_s d_b + 2e}{3Ri_p + V_s d_b + 2e} \right]$$

(8)

여기서, i_p 는 감쇠모드상 전류의 초기치이다.

위 방법구한 상승모드 상에서의 전압방정식은 식(9)와 같다.

$$Ri_a + L \frac{di_a}{dt} = \frac{2V_s d_b - 2e}{3}$$

(9)

식(9)로부터 상승모드시의 전환구간 시간(t_r)을 구하면 식(10)과 같다.

$$t_r = -\frac{L}{R} \ln \left[\frac{2V_s d_b - 2e - 3Ri_p}{2V_s d_b - 2e} \right]$$

(10)

식(8)과 식(10)으로부터 듀티가 1인 경우, 즉 스위치를 완전히 ON시켰을 때 상승모드의 전환구간 시간과 감쇠모드의 전환구간 시간이 같아지는 조건은 식(11)과 같다.

$$e = \frac{V_s - 3Ri_p}{4}$$

(11)

2.3 고속영역에서 전류전환 구간의 전류 보상 방법

식(11)에서 속도가 증가하여 $4e + 3Ri_p$ 가 V_s 보다 커지게 되면 식(11)의 조건을 만족할 수가 없게 된다. 따라서 고속에서는 다른 방법의 보상이 필요하다.

2.3.1 고속영역에서 스위치 ON, OFF시의 전류

PWM ON시와 OFF시의 전류 흐름의 그림 4, 그림 5에 각각 나타내었고, 이때의 수식을 식(12)과 식(13)에 각각 나타내었다.

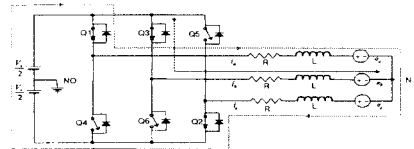


그림 4 고속 전환구간에서의 전류 (PWM ON)

$$V_{NNO} = \frac{V_s}{6} - \frac{e_a + e_b + e_c}{3}$$

(12)

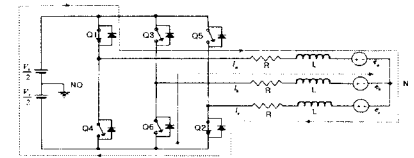


그림 5 고속 전환구간에서의 전류 (PWM OFF)

$$V_{NNO} = \frac{-V_s}{6} - \frac{e_a + e_b + e_c}{3}$$

(13)

2.3.2 고속영역에서 전류맥동 보상

전환구간에서 감쇠 모드상의 전압식을 PWM의 시비율(d_f)로 표현하면 식(14)와 같다.

$$Ri_b + L \frac{di_b}{dt} = \frac{2V_s d_f - V_s - 2e}{3}$$

(14)

여기서, d_f 는 고속에서 감쇠모드상의 PWM 시비율이다.

전환 구간에서 상승 모드 상 전압 식을 PWM의 시비율에 관한 식으로 표현하면 식(15)과 같다.

$$Ri_a + L \frac{di_a}{dt} = \frac{-V_s d_f + 2V_s - 2e}{3} \quad (15)$$

고속영역에서의 전환구간에서 감쇠상 모드 시간과 상승상 모드 시간을 계산하면 각각 식(16)과 식(17)가 된다.

$$t_f = -\frac{L}{R} \ln \left[\frac{2V_s d_f - V_s - 2e}{2V_s d_f - V_s - 2e - 3Ri_p} \right] \quad (16)$$

$$t_r = -\frac{L}{R} \ln \left[\frac{2V_s - 2e - 3Ri_p - V_s d_f}{2V_s - 2e - V_s d_f} \right] \quad (17)$$

따라서 상승상 모드 시간과 감쇠상 모드 시간을 같게 만드는 조건의 PWM 시비율은 식(18)과 같다.

$$d_f = \frac{4e + 3Ri_p}{V_s} - 1 \quad (18)$$

2.4 실험 결과

위에 제시한 방법으로 저속영역과 고속영역을 구분하여 DSP를 이용하여 실험하였다.

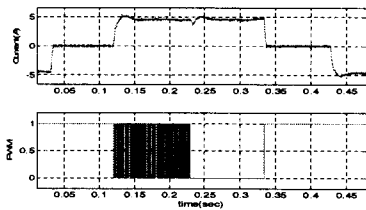


그림 10 저속에서의 토크 맥동저감 (보상전)

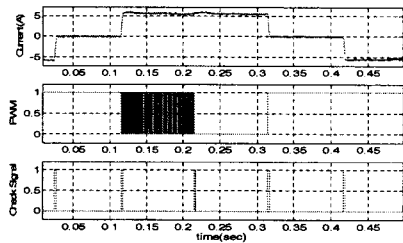


그림 11 저속에서의 토크 맥동저감 (보상후)

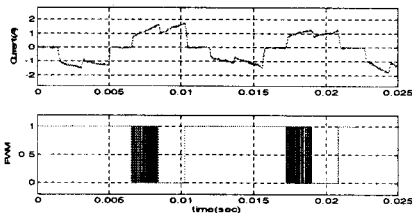


그림 12 고속에서의 토크 맥동저감 (보상전)

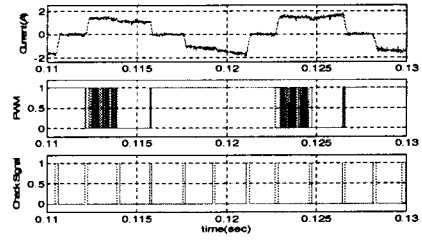


그림 13 고속에서의 토크 맥동저감 (보상후)

저속(30rpm) 과 고속(2800rpm)의 보상후 그림 11, 그림 13에서 볼 수 있듯이 제안된 방법에 의해 전환구간 보상을 한 경우에 전류 맥동이 줄어든 것을 확인할 수 있다. check signal은 보상 시간을 나타낸다.

3. 결론

본 논문에서는 사다리꼴 형태의 역기전력을 가지는 브러시리스 직류전동기의 전류맥동을 최소화 하기위하여 저속영역과 고속 영역을 구분하여 전류 전환 구간의 시간을 계산하여 감쇠모드상과 상승모드상의 전환 시간을 동일하게 되도록 제어함으로써 전환구간에서의 토크 맥동을 최소화 하는 방법을 제시하였다. 고속영역에서 빠른 전환시간제어를 위하여 고속의 DSP를 이용하여 고속연산을 수행하는데 문제가 없게 하여 논문에서 제안한 방법이 전환구간에서 발생하는 토크리플을 줄이는데 효과적임을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] Tae-Sung Kim, Sung-Chan Ahn, Dong-Seok Hyun, "A new current control algorithm for torque ripple reduction of BLDC motors", Industrial Electronics Society, 2001. IECON '01. The 27th Annual Conference of the IEEE, Volume 2, pp. IECON, 2001.
- [2] 권경준, 김상훈 "Brushless DC Motor에서 토크리플 저감을 위한 전환 구간에서의 전류제어 기법", 전력전자학회지, 제9권3호, pp.195-202, 2004
- [3] C. Berendsen, G. Champenois, A. Bolopion, "Commutation Strategies for Brushless DC Motor ; Influence on Instant Torque" IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 8, No.2, pp.231-236, 1993
- [4] Joong-Ho Song, Ick Choy, "Commutation torque ripple reduction in brushless DC motor drives using a single DC current sensor", Power Electronics, IEEE Transactions on Volume 19, Issue 2, pp.312-319, March 2004
- [5] 강석주, 김준석, 홍석준, 설승기, "저가형 BLDC 구동장치를 이용한 정밀 위치제어", 대한전기학회지, 제44권 제4호, pp.447-452, 1995