

4스위치 3상 BLDC 전동기의 토크 리플 저감을 위한 전류제어 알고리즘

박상현, 김태성, 이병국*, 현동석
한양대학교, 한국전기연구원*

A Current Control Algorithm for Torque Ripple Reduction of Four-Switch Three-Phase Brushless DC Motors

S.H. Park, T.S. Kim, B.K. Lee*, and D.S. Hyun

Dept. of Electrical Engineering, Hanyang Univ., Korea Electrotechnology Research Institute*

ABSTRACT

In this paper, a new current control algorithm is proposed for four-switch three-phase brushless DC (BLDC) motor drives, which are suitable for low cost applications. A current reference generation scheme is developed and implemented to obtain high performance characteristics in the four-switch system, such as small torque ripple and fast dynamic speed/torque response. Moreover, the proposed scheme can successfully eliminate the torque ripple during commutations, so that it can be expected that the four-switch system can be much more practically applied for the industrial application areas.

1. 서 론

BLDC 전동기는 구조적으로 영구자석 동기전동기와 비슷하고 DC 전동기와 유사한 토크대 전류, 속도대 전압의 선형특성을 가지고있으며 다른 AC 전동기 보다 제어가 용이하며, 고효율, 고풍력 밀도, 그리고 기계적인 전기자와 브러시의 제거로 인한 저소음, 저유지 비용의 특성을 가지고있다. 일반적인 3상 전압원 인버터는 일반적으로 6개의 전력용 반도체 소자로 구성되어 있지만 1984년 Prof. Van Der Broeck에 처음으로 제안된 4스위치 3상 인버터는 그림 1과 같이 단지 4개의 스위치로 입력 전류를 생성하게 된다.^[1]

사다리꼴 형태의 역기전력을 갖는 BLDC 전동기는 이론적으로 120°도통의 구형과 전류를 공급하면 직류 전동기처럼 전류에 비례하는 일정한 토크를 발생시킬 수 있지만 전동기 내부의 권선 저항, 인덕턴스 성분으로 인해 이상적인 구형과 전류를 전동기에 공급할 수 없기 때문에 전류의 전환

(commutation)시에 인가되는 상 전류와 감쇠되는 상 전류의 영향으로 토크 리플이 발생하여 평균토크의 $\pm 50\%$ 까지 영향을 미치게 된다.^[2]

본 논문에서는 4스위치를 이용한 히스테리시스 제어를 사용하여 간단하게 BLDC 전동기를 제어하였다.^[3] 특히, 전류 전환구간에서 인가되는 상 전류와 감쇠하는 상의 전환구간을 일치시켜 전류 전환구간에서 발생하는 토크 리플을 효과적으로 감소시키는 기준 전류 발생 기법을 제안하였다.

2. 3상 BLDC 전동기 드라이브의 분석

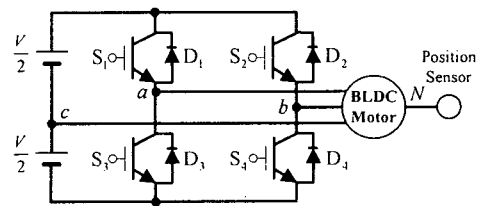


그림 1 4스위치 3상 인버터의 구조도
Fig. 1 Configuration of four-switch three-phase inverter

그림 1은 4스위치 BLDC 전동기의 구조도 이고 해석의 용이를 위해 다음과 같은 조건을 가정 하였다.

- 1) 전동기는 포화되지 않는다.
- 2) 고정자 권선의 저항은 같으며, 자기 그리고 상호 인덕턴스는 일정하다.
- 3) 인버터의 전력 반도체 소자는 이상적이다.
- 4) 철손은 무시한다.

위의 가정으로부터 BLDC 전동기의 상전압 방정식 식 (1)과 토크식 식 (2)를 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$$

$$T_e = \frac{1}{\omega_r} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) \quad (2)$$

여기서,
 v_a, v_b, v_c : 모터 상전압 R_s : 상당 저항
 i_a, i_b, i_c : 상전류 L_s : 상당 인덕턴스
 e_a, e_b, e_c : 상당 역기전력 ω_r : 각속도

3. 히스테리시스 운전원리

4스위치 3상 BLDC 전동기 드라이브는 그림 1에서와 같이 2개의 상은 각 leg에 연결되어있고 C상은 직류 링크의 분할 캐패시터 중간 탭에 연결되어 C상은 독립적인 제어가 불가능하여 120°도통의 구형파를 만들기가 어렵다. 하지만 히스테리시스 전류 제어를 이용한 직접 전류제어를 이용하여 쉽게 구동할 수 있다. 그림 2는 스위치 상태에 따른 각상의 leg전압을 나타내고 있다.

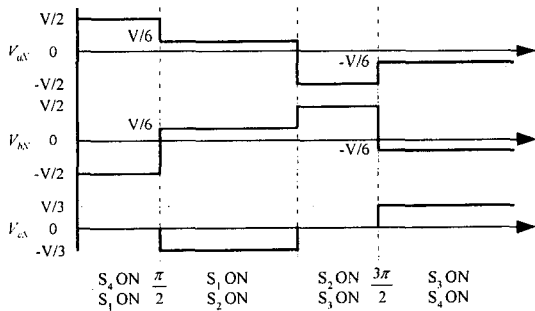


그림 2 4스위치 3상 인버터의 전압파형
 Fig. 2 Voltage waveforms of four-switch three-phase inverter

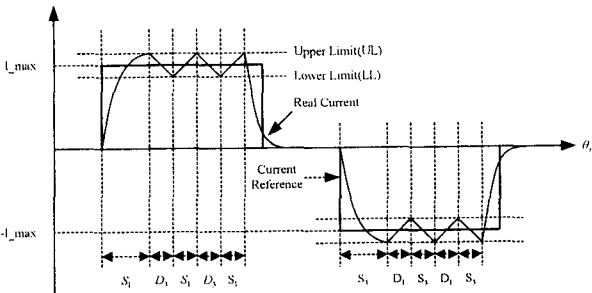


그림 3 한 상의 직접 전류 제어 PWM에 의한 실행
 Fig. 3 Implementation of the direct current controlled PWM for phase one

그림 3은 직접 전류 제어에 의한 한 상의 전류 파형을 보여주고 있으며 아래와 같은 각각의 조건에 따른 스위칭 상태를 알 수 있다.

- A. i_a 가 0보다 큰 경우
- $i_a <$ 하부 제한(LL) \rightarrow 스위치 S_1 은 on
 - $i_a >$ 상부 제한(UL) \rightarrow 스위치 S_1 은 off, 다이오드 D_3 도통
 - LL $< i_a <$ UL 이고 $di_a/dt > 0 \rightarrow$ 스위치 S_1 은 on,
 - LL $< i_a <$ UL 이고 $di_a/dt < 0 \rightarrow$ 스위치 S_1 은 off, 다이오드 D_3 도통
- B. i_a 가 0보다 작은 경우
- $i_a >$ UL \rightarrow 스위치 S_3 은 on
 - $i_a <$ LL \rightarrow 스위치 S_3 은 off, 다이오드 D_1 도통
 - LL $< i_a <$ UL 이고 $di_a/dt < 0 \rightarrow$ 스위치 S_3 은 on
 - LL $< i_a <$ UL 이고 $di_a/dt > 0 \rightarrow$ 스위치 S_3 은 off, 다이오드 D_1 도통

위와 같은 스위치 동작으로 밴드 내에서 각상의 전류가 제어되게 된다. 그러나 이와 같은 전류제어를 하더라도 전류 전환구간에서 토크리플이 발생하게 되므로 새로운 토크리플 저감 알고리즘이 필요하다.

4. 제한된 전류제어 알고리즘

4스위치 3상 BLDC 전동기 드라이브는 그림 4에서와 같이 6개의 운전모드로 나눌수 있으며 운전모드에 따라 스위칭 순서가 결정된다. 특히 4스위치 3상 BLDC 전동기는 각 모드의 전류 전환구간에서 전동기에 인가되는 전압이 다르기 때문에 3가지의 운전 모드에 대해 해석을 달리해야한다. 또 각 모드에서 다음과 같은 3가지 경우를 발견 할 수 있다.

- 경우 1) 그림 5(a)에서와 같이 인가되는 전류가 최종 값 I에 도달하는 시간과 같은 시간에 감쇠상의 전류가 사라지는 경우
- 경우 2) 그림 5(b)에서와 같이 인가되는 전류가 최종 값 I에 도달하기 전에 감쇠상의 전류가 사라지는 경우
- 경우 3) 그림 5(c)에서와 같이 감쇠상의 전류가 사라지기 전에 인가되는 전류가 최종값 I에 도달하는 경우

해석의 편리를 위해 다음 몇 가지를 가정할 것이다.

- 히스테리시스 밴드가 매우 작아 권선에 흐르는 전류는 일정하다.

2) 선 저항은 무시하며 전환구간 내에 역기전력은 일정하다.

3) 전류 전환 이전에 권선에 흐르는 전류는 일정하다.

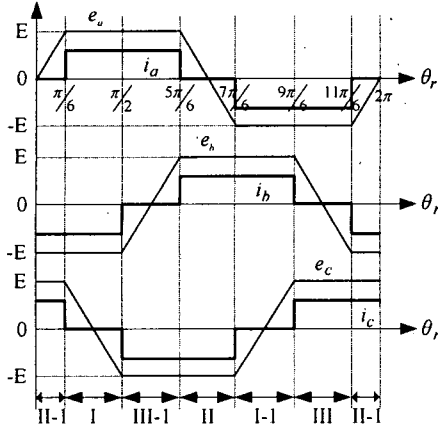
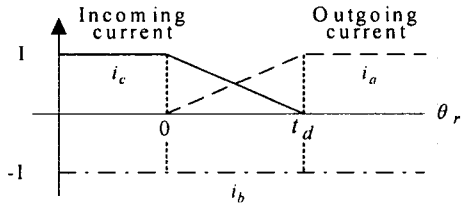
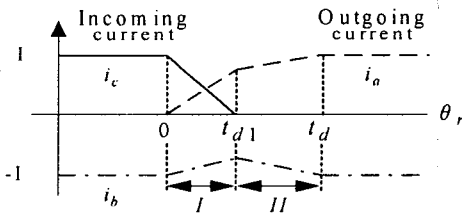


그림 4 4스위치 3상 인버터의 이상적인 역기전력과 전류 파형들

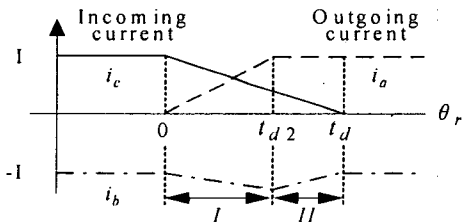
Fig. 4 Ideal back EMF and current profiles of four-switch three-phase inverter



(a) 경우 1의 전류전환 현상



(b) 경우 2의 전류전환 현상



(c) 경우 3의 전류전환 현상

그림 5 전환구간에서의 전류현상

Fig. 5 Current evolution during commutation

A. 모드 I, I-1

모드 I에서 전류 전환구간에서의 전류 방정식을 구할

수 있다.

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{3V-4E}{6L_s} \quad (3)$$

$$\frac{di_b}{dt} = -\frac{3V-8E}{6L_s} \quad (4)$$

$$\frac{di_c}{dt} = -\frac{2E}{3L_s} \quad (5)$$

1) 경우 1 : 그림 5(a)의 경우, $i_c(t_d) = 0$: 전환시간 t_d 는 식 (5)에 의해 얻어진다.

$$t_d = \frac{3L_s I}{2E} \quad (6)$$

2) 경우 2 : 그림 5(b)에서 전류 전환은 2가지 구간으로 나뉘어진다. I 구간에서 $i_c(t_{d1}) = 0$: I 구간의 전환시간은 식 (5)에 의해 구해진다.

$$t_{d1} = \frac{3L_s I}{2E} \quad (7)$$

이때 흐르는 전류는 식 (3), (7)에 의해 구해진다.

$$i_a(t_{d1}) = \frac{(3V-4E)I}{3V+4E} \quad (8)$$

II 구간에서 전류는 다음과 같이 구해진다.

$$\frac{di_a}{dt} = -\frac{di_b}{dt} = \frac{V-2E}{2L_s} \quad (9)$$

식 (3), (8), 그리고 (9)로부터 전류 전환의 전체 시간을 구할 수 있다.

$$t_d = \frac{L_s I}{V-2E} \quad (10)$$

3) 경우 3 : 그림 5(c)에서 전류 전환은 2가지 구간으로 나뉘어진다. 식 (3)으로 I 구간의 시간을 구할 수 있다.

$$t_{d2} = \frac{6L_s I}{3V-4E} \quad (11)$$

II 구간에서 아래와 같은 전류 방정식이 얻어진다.

$$\frac{di_a}{dt} = -\frac{3V+4E}{6L_s} \quad (12)$$

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{3V+8E}{6L_s} \quad (13)$$

$$\frac{di_c}{dt} = -\frac{2E}{3L_s} \quad (14)$$

t_{d2} 에서 전류 i_c 는 식 (5), (11)에 의해 구해진다.

$$i_c(t_{d2}) = \frac{4EI}{3V-4E} \quad (15)$$

식 (5), (12), 그리고 (15)로부터 전환구간의 시간을 구할 수 있다.

$$t_d = \frac{3L_s I}{2E} \quad (16)$$

B. 모드 II, II-1

위와 같은 방법으로 각각의 경우에서의 전환 시간을 구할 수 있다.

$$1) \text{ 경우 1: } t_d = \frac{6L_s I}{3V+4E} \quad (17)$$

$$2) \text{ 경우 2: } t_d = \frac{2L_s I}{V-4E} \quad (18)$$

$$3) \text{ 경우 3: } t_d = \frac{V-4E}{3V-4E} \cdot \frac{6L_s I}{V+4E} \quad (19)$$

C. 모드 III, III-1

모드 I, II와 같은 방법으로 전환시간을 구할 수 있다.

$$1) \text{ 경우 1: } t_d = \frac{6L_s I}{V-4E} \quad (20)$$

$$2) \text{ 경우 2: } t_d = \frac{2L_s I}{V+4E} \quad (21)$$

$$3) \text{ 경우 3: } t_d = \frac{2(V-E)}{V-2E} \cdot \frac{6L_s I}{V+4E} \quad (22)$$

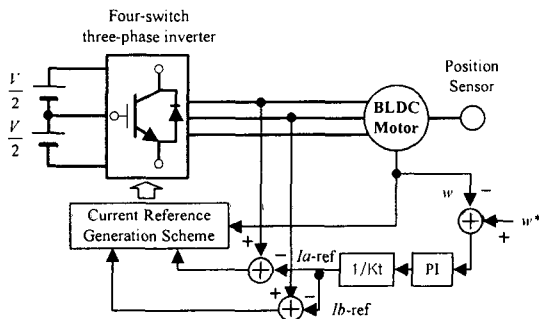


그림 6 제안한 전류제어 알고리즘의 블록도
Fig. 6 Block diagram of proposed current control algorithm

그림 6은 제안한 전류제어 알고리즘의 블록도를 보여주고 있다. 위의 해석으로부터 얻은 전환시간을 기준 전류 발생 기법에 의해 보상해줌으로서 다양한 속도 변화에 따라 전류가 인가되는 상과 감쇠하는 상의 전환구간을 일치시켜준다. 그러므로, 전환구간에서 발생하던 토크 리플을 효과적으로 줄일 수 있다.

5. 시뮬레이션 결과

표 1 전동기 파라미터

Table 1 Motor parameters

DC 링크전압	160 [V]
정격 토크	2 [Nm]
상당 저항	0.75 [Ω]
상당 인덕턴스	3.05 [mH]
역기전력상수	0.214859 [V/(rad/sec)]
극수	4

표 1은 4스위치 3상 BLDC 전동기의 시뮬레이션 파라미터이다. 그림 7은 히스테리시스 전류 제어를 이용한 4스위치 BLDC 전동기를 1000[rpm]으로 운전했을 경우의 각상 전류와 토크 파형을 보여준다. 그림 8와 9는 제안한 기준 전류 발생 기법을 이용하여 3가지 모드에서 전환구간을 보상하여 BLDC 전동기를 각각 1000[rpm]과 2000[rpm]으로 운전했을 때의 전류와 토크 파형을 나타내고 있다.

결국, 기존의 방법으로 운전했을 때에는 전환구간에서 토크 리플이 발생하는 것을 알 수 있었다. 하지만 제안한 기법을 사용하여 인가하는 상전류와 감쇠하는 상전류의 전환구간을 일치시켜 전환구간에서 토크 리플을 효과적으로 감소시킬 수 있다.

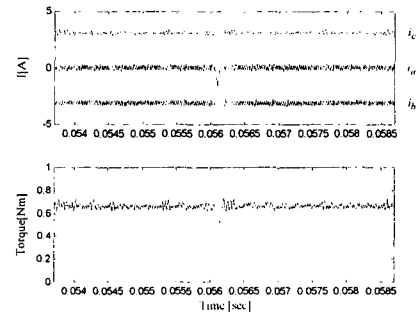
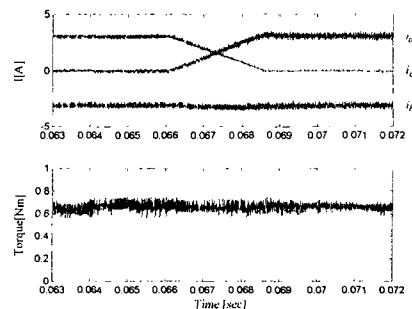
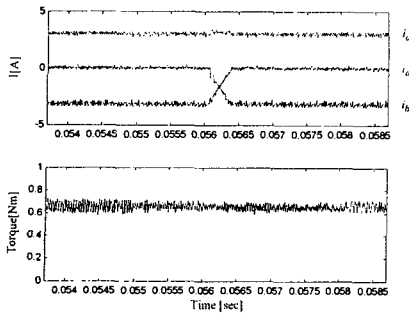


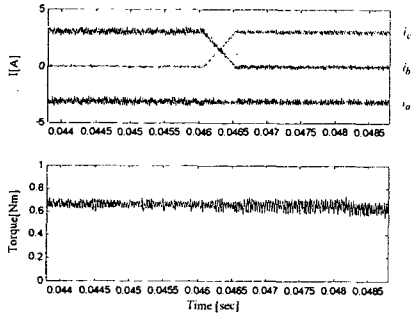
그림 7 1000[rpm]에서 전환구간 및 토크리플
Fig. 7 Commutation period and torque ripple at 1000[rpm]



(a) mode I에서 전환구간 및 토크리플

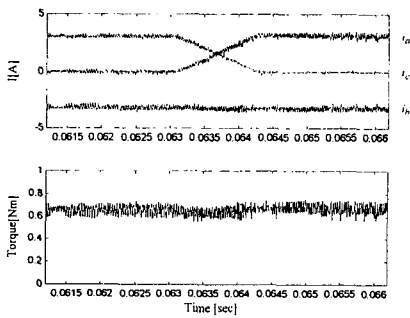


(b) 모드 II-1에서 전환구간 및 토크리플

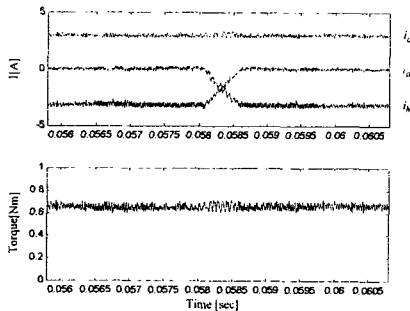


(c) 모드 III에서 전환구간 및 토크리플

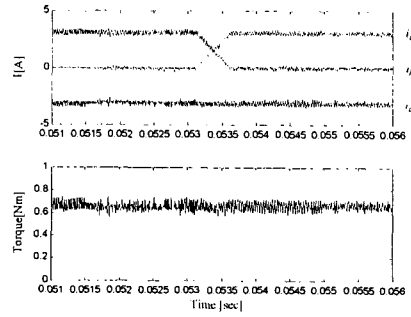
그림 8 1000[rpm]에서 출력파형(제안방식)
Fig. 8 Output waveforms at 1000[rpm]



(a) mode I에서 전환구간 및 토크리플



(b) 모드 II-1에서 전환구간 및 토크리플



(c) 모드III에서 전환구간 및 토크리플

그림 9 2000[rpm]에서 출력파형(제안방식)

Fig. 9 Output waveforms at 2000[rpm]

6. 결론

본 논문은 4스위치를 3상 BLOC 전동기에서 전류 전환구간에서 발생하는 전환 토크를 저감하기 위한 간단한 전류제어 알고리즘을 제안하였다. 일반적인 6스위치 3상 BLDC 전동기에서는 하나의 모드에 대해서만 해석을 하면 되지만 4스위치를 이용한 BLDC 전동기에서는 3가지 모드에 인가되는 전압이 다르기 때문에 해석을 달리 해주어야 했다. 제안한 전류제어 알고리즘은 4스위치 BLDC 전동기에 전류 전환시에 인가상과 감쇠상의 전환 시점을 일치시켜 효과적으로 전환토크를 저감하였다. 제안한 전류제어 알고리즘은 저 비용과 토크 리플을 제거하여 가정용기기, 오디오 그리고 컴퓨터 등의 산업응용분야에 널리 사용되어 질 것으로 생각된다.

참고 문헌

- [1] J.D. Van Wik H.W. Van Der Broeck. "A Comparative Investigation of Three-Phase Induction Machine Drive with a Component Minimized Voltage-Fed Inverter under Different Control Options," *IEEE trans.Ind.Appl.*, Vol. 20, No. 2, pp. 309-320, 1984, March/April.
- [2] Renato Carlson, Michel Lajoie-Mazenc and Joao C.dos S.Fagundes, "Analysis of Torque Ripple due to Phase Commutation In Brushless DC machines", In Conf. Rec. IAS Annual Meeting, pp. 287-292, 1990.
- [3] B.K, Lee, "On the Feasibility of Four-Switch Three-Phase BLDC Motor Drives for Low Cost Commercial Applications : Topology and Control," *IEEE trans. on Power Electron.*, Vol. 18 No. 1, pp. 164-172, 2003, Jan.