論文 9-2-5

2003 전력전자학술대회 우수추천논문

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

朴相炫†, 金泰成*, 李秉國**, 玄東石***

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

Sang-Hyun Park, Tae-Sung Kim, Byoung-Kuk Lee, and Dong-Seok Hyun

요 약

본 연구에서는 저 비용 응용분야에 적합한 4스위치 3상 BLDC 전동기의 새로운 전류 제어 알고리즘을 제안하였다. 4스위치 시스템에서 빠른 속도 및 토크 응답 그리고 적은 토크 리플과 같은 좋은 동작 특성을 얻기 위한 기준 전류 발생 기법을 제안하였다. 특히, 제안한 기법은 전류 전환시 발생되는 토크 리플을 현저히 저감시켜 4스위치 시스템을 산업 응용 분야에 보다 널리 적용할 수 있을 것으로 기대한다.

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. Especially, the proposed scheme can successfully reduce 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.

Key Words : Brushless DC motor, Four-switch three-phase inverter, Current reference generation scheme, Commutation torque ripple

1. 서 론

BLDC 전동기는 구조적으로 영구자석 동기전동기와 비슷하고 DC 전동기와 유사한 토크 대 전류, 속도 대 전압의 선형특성을 가지고 있으며 다른 AC 전동기 보다 제어가 용이하며, 고효율, 고출력 밀도 그리고 기계적인 전기자와 브러쉬의 제거로 저소음, 저유지 비용의 특성을 가지고 있다. 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 입력전류를 생성할 수 있다[1][2].

사다리꼴 형태의 역기전력을 갖는 BLDC 전동기는 이론적으로 120°도통의 구형파 전류를 공급하면 직류 전동기처럼 전류에 비례하는 일정한 토크를 발생시킬 수 있지만 전동기 내부의 권선

†교신저자 : 학생회원, 한양대 전기공학과 석사과정
E-mail : ppark1@ihanyang.ac.kr
* 정회원, 한양대 전기공학과 박사과정
** 정회원, 전기연구원 전력전자그룹 선임연구원
*** 정회원, 한양대 전자전기컴퓨터공학부 교수
접수일자 : 2003. 9. 1 1차 심사 : 2003. 10. 21
심사완료일 : 2003. 12. 9.

저항, 인덕턴스 성분으로 인해 이상적인 구형파 전류를 전동기에 공급할 수 없기 때문에 전류의 전환(commutation)시에 인가하는 상 전류와 감쇠되는 상 전류의 영향으로 토크 리플이 발생하여 평균토크의 ±50%까지 영향을 미치게된다[2].

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

2. 3상 BLDC 전동기 드라이브의 분석

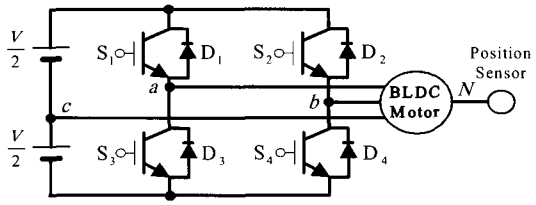


그림 1 4스위치 3상 인버터의 구조도
Fig. 1 Configuration of four-switch three-phase inverter

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

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.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

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

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　　w_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 구조적으로 C상의 독립적인 제어가 불가능하여 120°도통의 구형파를 만들기가 어렵다. 하지만 히스테리시스 전류제어를 이용한 직접 전류제어를 이용하여 쉽게 구동할 수 있다. 그림 2는 스위치 상태에 따른 각상의 leg전압을 나타내고 있다.

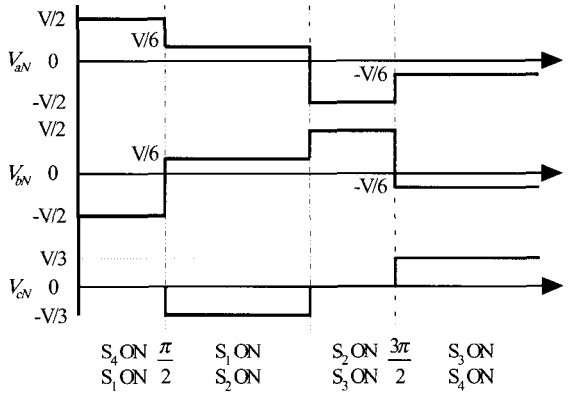


그림 2 4스위치 3상 인버터의 전압파형
Fig. 2 Voltage waveforms of four-switch three-phase inverter

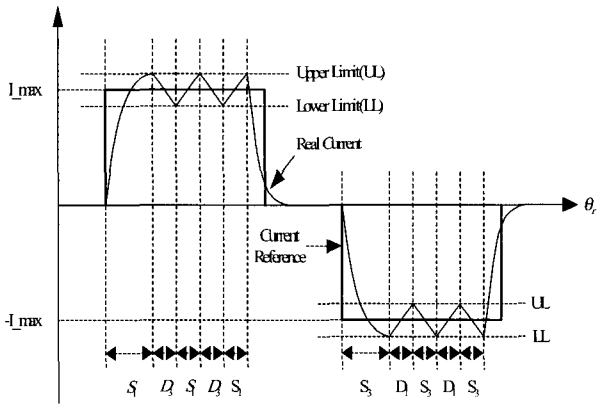


그림 3 한 상의 직접 전류 제어 PWM에 의한 실행
Fig. 3 Implementation of the direct current controlled PWM for phase one

그림 3은 직접 전류 제어에 의한 한 상의 전류 파형을 보여주고 있으며 아래와 같은 각각의 조건에 따른

스위칭 상태를 알 수 있다.

A. i_a가 0보다 큰 경우

i_a < 하부 제한(LL) → 스위치 S_1은 on

i_a > 상부 제한(UL) → 스위치 S_1은 off,
다이오드 D_3도통

LL < i_a <UL 이고 $di_a/dt > 0$ → 스위치 S_1은 on,

LL < i_a <UL 이고 $di_a/dt < 0$ → 스위치 S_1은 off,
다이오드 D_3 도통

B. i_a가 0보다 작은 경우

i_a > UL → 스위치 S_3은 on

i_a < LL → 스위치 S_3은 off, 다이오드 D_1 도통

LL < i_a < UL 이고 $di_a/dt < 0$ → 스위치 S_3은 on

LL < i_a < UL 이고 $di_a/dt > 0$ → 스위치 S_3은off,
다이오드 D_1 도통

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

4. 제안된 전류제어 알고리즘

4스위치 3상 BLDC 전동기 드라이브는 그림 4에서와 같이 6개의 운전모드로 나눌 수 있으며 운전모드에 따라 스위칭 순서가 결정된다. 특히 4스위치 3상 BLDC 전동기는 그림 5에서 알 수 있듯이 각 모드의 전류 전환구간에서 전류의 흐름이 다르기 때문에 3가지의 운전 모드에 대해 해석을 달리해야한다. 또 각 모드에서 다음과 같은 3가지 경우를 발견 할 수 있다.

경우 1) 그림 6(a)에서와 같이 인가하는 전류가 최종값 I에 도달하는 시간과 같은 시간에 감쇠되는 전류가 사라지는 경우

경우 2) 그림 6(b)에서와 같이 인가하는 전류가 최종값 I에 도달하기 전에 감쇠되는 전류가 사라지는 경우

경우 3) 그림 6(c)에서와 같이 감쇠되는 전류가 사라지기 전에 인가하는 전류가 최종값 I에 도달하는 경우

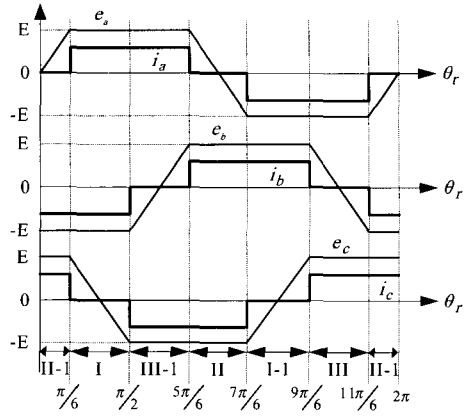
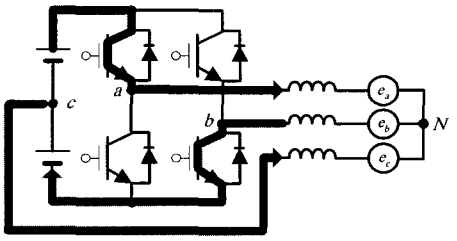
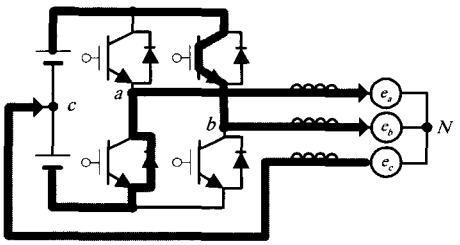


그림 4 4스위치 3상 인버터의 이상적인 역기전력과 전류 파형들

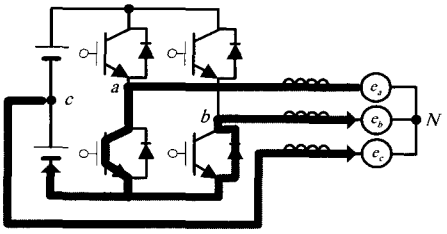
Fig. 4 Ideal back EMF and current profiles of four-switch three-phase inverter



(a) 모드 I의 전환 구간에서 전류 흐름



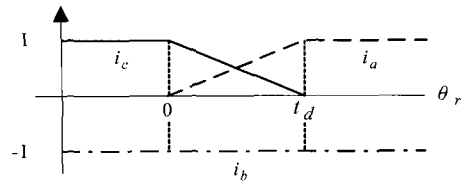
(b) 모드 II의 전환 구간에서 전류 흐름



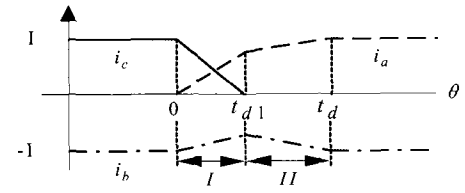
(c) 모드 III의 전환 구간에서 전류 흐름

그림 5 각 모드의 전환 구간에서 전류 흐름

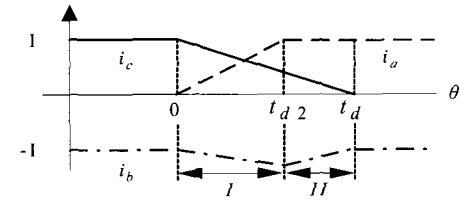
Fig. 5 Current path during commutation in each mode



(a) 경우 1의 전류전환 현상



(b) 경우 2의 전류전환 현상



(c) 경우 3의 전류전환 현상

그림 6 전환구간에서의 전류현상
Fig. 6 Current evolution during commutation

해석의 편리를 위해 다음 몇 가지를 가정하였다.

1) 히스테리시스 밴드가 매우 작아 권선에 흐르는 전류는 일정하다.
2) 선 저항은 무시하며 전환구간 내에 역기전력은 일정하다.
3) 전류 전환 이전에 권선에 흐르는 전류는 일정하다.

4.1 모드 I, I-1

모드 I에서 전류 전환구간에서의 전류 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{di_a}{dt}=\frac{3V-4E}{6L_s} \tag{3}$$

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

$$\frac{di_c}{dt}=-\frac{2E}{3L_s} \tag{5}$$

1) 경우 1 : 그림 6(a)에서 t_d 시점에서 $i_c(t_d)=0$, $i_a(t_d)=I$ 이므로 전환 조건과 전환 시간 t_d를 식 (3), (5)에 의해 구할 수 있다.

$$t_d=\frac{3L_sI}{2E} \quad (3V=8E) \tag{6}$$

2) 경우 2 : 그림 6(b)에서 전류 전환은 2가지 구간으로 나뉘어진다. I 구간에서 $i_c(t_{d1})=0$: I 구간의 전환 시간은 식 (5)에 의해 구해진다.

$$t_{d1}=\frac{3L_sI}{2E} \tag{7}$$

이때 흐르는 전류는 식 (3), (7)에 의해 구해진다.

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

II 구간에서 전류는 다음과 같이 구해진다.

$$\frac{di_a}{dt}=-\frac{di_b}{dt}=\frac{V-2E}{2L_s} \tag{9}$$

t_{d1} 시점에서 $i_a(t_{d1})<I$ 되므로 전환 조건을 식 (8)에 의해 구할 수 있으며, 식 (3), (8), 그리고 (9)로부터 전류 전환의 전체 시간을 구할 수 있다.

$$t_d=\frac{L_sI}{V-2E} \quad (3V<8E) \tag{10}$$

3) 경우 3 : 그림 6(c)에서 전류 전환은 2가지 구간으로 나뉘어진다. 식 (3)으로 I 구간의 시간을 구할 수 있다.

$$t_{d2}=\frac{6L_sI}{3V-4E} \tag{11}$$

II 구간에서 아래와 같은 전류 방정식이 얻어진다.

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

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

$$\frac{di_c}{dt} = -\frac{2E}{3L_s} \tag{14}$$

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

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

t_{d2} 시점에서 $i_c(t_{d2}) < I$ 되므로 전환 조건을 식 (15)에 의해 구할 수 있으며, 식 (5), (14), 그리고 (15)로부터 전환 구간와 시간을 구할 수 있다.

$$t_d = \frac{3L_sI}{2E} \quad (3V > 8E) \tag{16}$$

4.2 모드 II, II-1

위와 같은 방법으로 각각의 경우에서의 전환 시간과 전환 조건을 구할 수 있다.

1) 경우 1 : $t_d = \frac{6L_sI}{3V+4E} \quad (E=0)$ (17)

2) 경우 2 : $t_d = \frac{2L_sI}{V-4E} \quad (E>0)$ (18)

3) 경우 3 : $t_d = \frac{V-4E}{3V-4E} \cdot \frac{6L_sI}{V+4E} \quad (E<0)$ (19)

4.3 모드 III, III-1

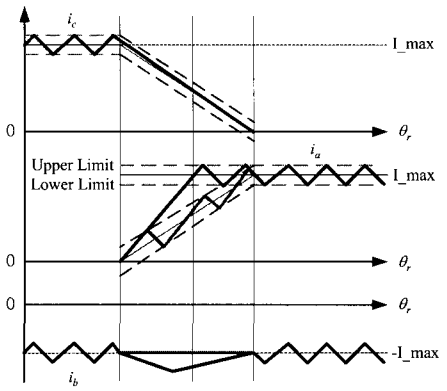
모드 I, II와 같은 방법으로 전환 시간과 전환 조건을 구할 수 있다.

1) 경우 1 : $t_d = \frac{6L_sI}{V+4E} \quad (V=8E)$ (20)

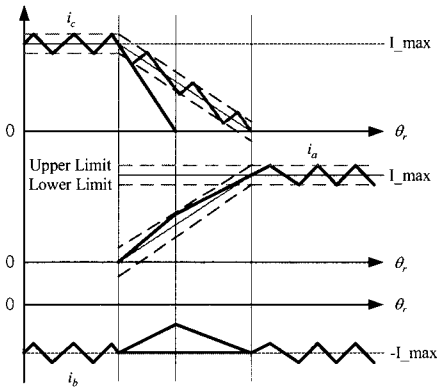
2) 경우 2 : $t_d = \frac{2L_sI}{V-4E} \quad (V<8E)$ (21)

3) 경우 3 : $t_d = \frac{2(V-E)}{V-2E} \cdot \frac{6L_sI}{3V+4E} \quad (V>8E)$ (22)

그림 7은 제안한 전류제어 알고리즘을 나타내고 있으며 그림 8은 제안한 전류제어 알고리즘의 블록도를 보여주고 있다. 위의 해석으로부터 얻은 전환 시간을 기준 전류 발생 기법에 의해 전류 전환 구간을 보상해 줌으로서 다양한 속도 변화에 따라 전류가 인가하는 상과 감쇠되는 상의 전환 구간을 일치시켜 전환 구간에서 발생하던 토크 리플을 효과적으로 줄일 수 있다.



(a) 3V>8E (I), E<0 (II), V>8E (III) 경우



(b) 3V<8E (I), E>0 (II), V<8E (III) 경우

그림 7 제안된 전류제어 알고리즘
Fig. 7 Proposed current control algorithm

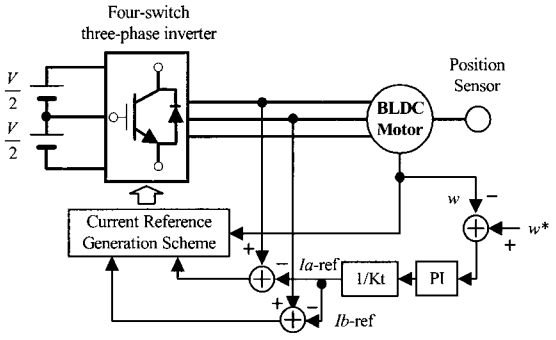


그림 8 제안한 전류제어 알고리즘의 블록도
Fig. 8 Block diagram of proposed current control algorithm

5. 시뮬레이션 결과

표 1 전동기 파라미터
Table 1 Motor parameters

직류 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

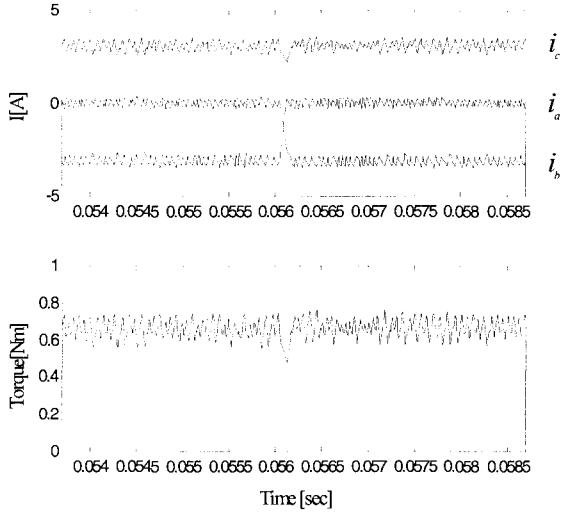
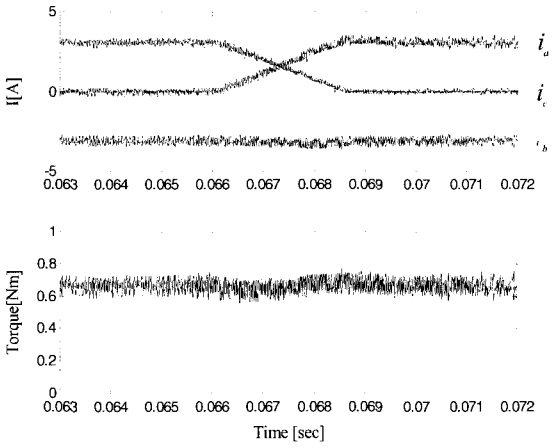


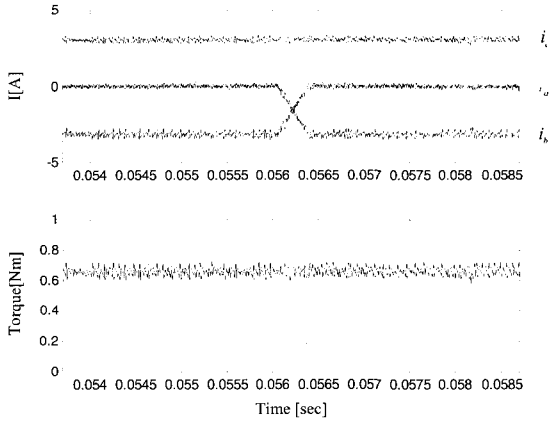
그림 9 1000[rpm]에서 전환구간 및 토크리플
Fig. 9 Commutation period and torque ripple at 1000[rpm]

표 1은 4스위치 3상 BLDC 전동기의 시뮬레이션 파라미터이다. 그림 9는 히스테리시스 전류 제어를 이용한 4스위치 BLDC 전동기를 1000[rpm]으로 운전했을 경우의 각상 전류와 토크 파형을 보여준다. 그림 10과 11은 제안한 기준 전류 발생 기법을 이용하여 3가지 모드에서 전환 구간을 보상하여 BLDC 전동기를 각각 1000[rpm]과 2000[rpm]으로 운전했을 때의 전류와 토크 파형을 나타내고 있다.

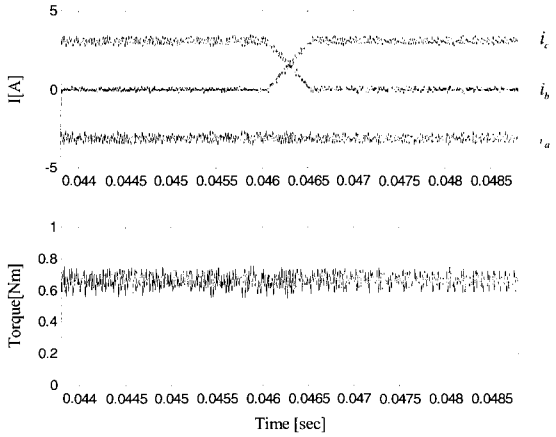
기존의 방법으로 운전했을 때에는 전환구간에서 큰 토크 리플이 발생하는 것을 알 수 있다. 하지만 제안한 기법을 사용하여 인가하는 상전류와 감쇠되는 상전류의 전환 시점을 일치시켜 줌으로서 전환 구간에서 토크 리플을 효과적으로 감소시킬 수 있었다.



(a) 모드 I에서 전환구간 및 토크리플

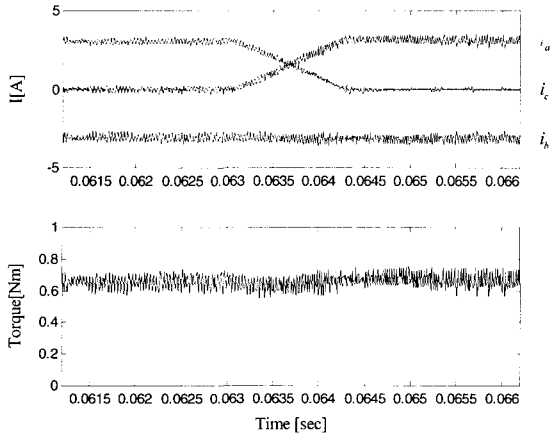


(b) 모드 II-1에서 전환구간 및 토크리플

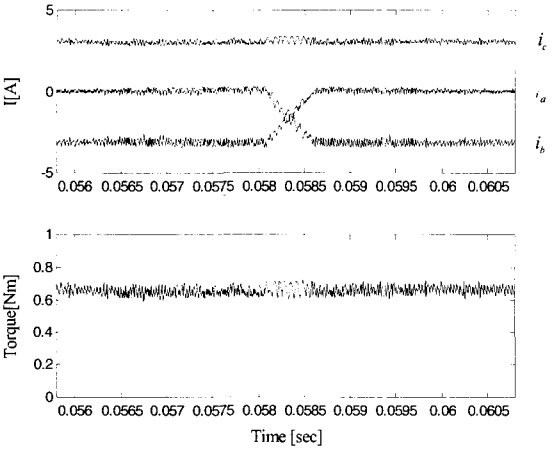


(c) 모드 III에서 전환구간 및 토크리플

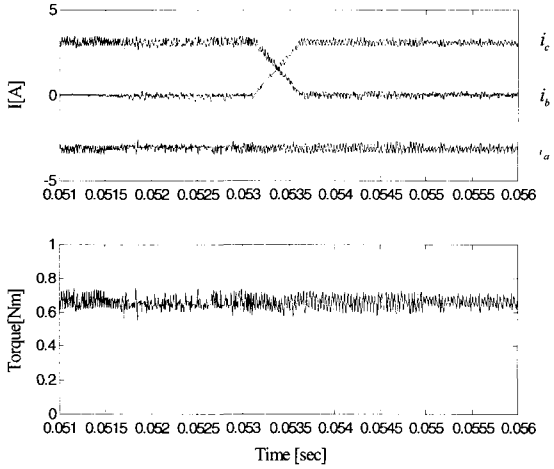
그림 10 1000[rpm]에서 출력파형(제안방식)
Fig. 10 Output waveforms at 1000[rpm]



(a) 모드 I에서 전환구간 및 토크리플



(b) 모드 II-1에서 전환구간 및 토크리플



(c) 모드 III에서 전환구간 및 토크리플

그림 11 2000[rpm]에서 출력파형(제안방식)
Fig. 11 Output waveforms at 2000[rpm]

6. 결 론

본 논문은 4스위치를 3상 BLDC 전동기에서 전류 전환구간에서 발생하는 토크 리플을 저감하기 위한 전류제어 알고리즘을 제안하였다. 일반적인 6스위치 3상 BLDC 전동기에서는 단지 하나의 모드에서 발생하는 전류 전환 구간에서의 전류 흐름을 해석하여 나머지 모드도 동일하게 적용할 수 있지만 4스위치를 이용한 BLDC 전동기에서는 3가지 모드에서 발생하는 전류 전환 구간에서의 전류 흐름이 다르기 때문에 각각에 대해 해석해야했다. 제안한 전류제어 알고리즘은 4스위치 BLDC 전동기에 전류 전환 시에 인가상과 감쇠상의 전환 시점을 일치시켜 효과적으로 토크 리플을 저감하였다. 제안한 전류제어 알고리즘은 저 비용과 토크 리플을 제거하여 가정용 기기, 오디오 그리고 컴퓨터 등의 산업응용분야에 널리 사용되어 질 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

[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, Mar./Apr. 1984.

[2] 이준환, 안성찬, 현동석, "오4 스위치 3상 인버터를 적용한 BLDCM 새로운 전류제어방법", *전력전자학회논문지*, 5권 6호, pp. 523~529, 2000년 12월.

[3] Renato Calrson, 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.

[4] 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, Jan. 2003.

저 자 소 개

박상현(朴相炫)

1975년 11월 5일생. 2002년 서울산업대 전기공학과 졸업. 2004년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사).

김태성(金泰成)

1973년 7월 4일생. 1996년 광주대 전자공학과 졸업. 2002년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

이병국(李秉國)

1968년 12월 25일생. 1994년 한양대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 미국 Texas A&M University 전기공학과 졸업(공박). 2001년 12월~2003년 1월 미국 Texas A&M University Postdoctoral Research Asso ciate. 2003년 4월~현재 한국전기연구원 전력전자그룹 선임연구원.

현동석(玄東石)

1950년 4월 8일생. 1973년 한양대 전기공학과 졸업. 1978년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1984년~1985년 미국 토레도대학 교환교수. 1988년~1989년 뮌헨 공과대학 교환교수. 현재 한양대 전자전기공학과 교수. 2000년 당 학회 회장 역임.