

## BLDC 전동기의 토크리플 저감을 위한 새로운 전류제어 알고리즘에 대한 연구

김태성, 안성찬, 현동석  
한양대학교 전기공학과

### A New Current Control Algorithm for Torque Ripple Reduction of BLDC Motors

Tae-Sung Kim, Sung-Chan Ahn, Dong-Seok Hyun  
Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University

#### ABSTRACT

The BLDCM (Brushless DC Motor) characterized by linear torque to current, and speed to voltage has low acoustic noise, and fast dynamic response. Moreover, it has high power density with high proportion of torque to inertia in spite of small size drive. But, it produce torque ripple due to the motor inductance components in stator windings and back-EMF, when armature current is commutated. Therefore, it is difficult to apply the BLDCM to a precision servo drive system.

In this paper is proposed to a new current control algorithm with using fourier series coefficients can minimize torque ripple due to the phase current commutation of BLDCM. Simulation and Experimental results prove the effectiveness the proposed algorithm through comparison with the conventional used unipolar PWM method.

#### 1. 서 론

BLDC 전동기는 넓은 속도범위에 걸쳐 높은 효율을 유지하고 제어가 용이하여 가감속 운전이 요구되는 응용분야에 최적의 전동기라 할 수 있다. 사다리꼴 형태의 역기전력을 갖는 BLDC 전동기는 이론적으로 120° 도통의 구형과 상전류 인가시 토크 리플이 없는 일정토크를 갖게된다. 일정전류 인가를 위한 두 가지 방법 중 전류원 인버터를 이용하는 방법은 큰 인덕터와 스위칭소자 선택에 따른 제약조건으로 인해 일반적으로 전압원 인버터를 사용하여 상전류를 제어하는 방식이 사용되고 있다.

그러나, 전압원 인버터의 사용시 각 상전류의 전환(Commutation)에 따른 토크리플이 발생하게 된다.

최근까지 이 상전류 전환에 따른 토크리플을 감소시키기 위한 여러 가지 전류제어 기법들이 제안되었으며, 그 대표적인 방법이 히스테리시스 전류제어기법과 PWM 전류제어기법이다. 먼저 히스테리시스 전류제어기법은 전류제어 응답성이 우수하나, 히스테리시스 밴드의 폭과 역기전력의 크기에 따라서 스위칭 주파수가 변화하므로 스위칭 성능이 떨어지는 소자에 적용하는데 문제가 있다. 반면에, PWM 전류제어기법은 히스테리시스 제어기법에 비해 제어 응답성은 조금 나쁘지만, 스위칭 소자의 스위칭 주파수를 일정하게 유지할 수 있는 장점이 있다.

PWM 전류제어기법은 크게 두가지로 단극성(Unipolar) PWM 방식과 양극성(Bipolar) PWM 방식으로 나눌 수 있다. 보편적인 구동방식인 120° 도통의 단극성 PWM 방식은 상전류 전환(Commutation)에 의한 전류제어가 어렵다는 단점이 있어 서보모터와 같은 정밀 위치제어를 요구하는 응용분야에 대한 적용이 곤란하다. 양극성 PWM방식은 전류제어시 응답특성이 우수하나 전류리플과 스위칭 손실이 단극성 PWM 방식에 비해 큰 단점이 있다. 하지만 전력용 반도체 소자의 발달로 스위칭 손실이 점차 줄어들고 있다.

본 논문에서는, 120° 전 구간에 걸쳐 모든 스위치에 지속적인 PWM을 적용하는 바이폴라 PWM 방식에 푸리에 시리즈계수를 사용한 전류제어 알고리즘을 적용하여 토크리플을 최소화시켰으며, 제안한 전류제어 알고리즘의 효율성을 시뮬레이션과 실험을 통해 입증 하고자 한다.

#### 2. BLDC 전동기의 동작

##### 2.1 BLDC 전동기의 모델링

그림 1은 일반적인 BLDC 전동기의 구조도를 보여주고 있다.

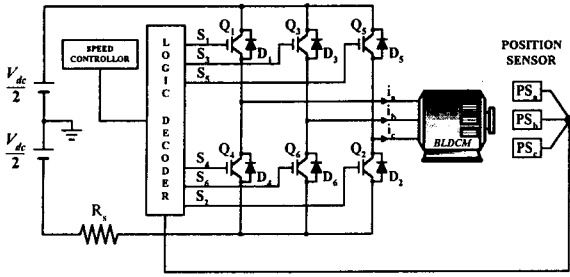


그림 1 BLDC 전동기의 구조도  
Fig. 1 Block diagram of BLDCM drive.

BLDC 전동기의 상전압 방정식은 식(1)과 같으며, 발생 토크는 식(2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} V_{ap} \\ V_{bp} \\ V_{cp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix} \frac{di}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

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

여기서,

- $V_{ap}, V_{bp}, V_{cp}$  : 모터 상전압
- $i_a, i_b, i_c$  : 상전류
- $e_a, e_b, e_c$  : 상단 역기전력
- $R_s$  : 상단 저항
- $L_s$  : 상단 인덕턴스
- $\omega_m$  : 각속도

그림 2와 같이 BLDC 전동기는 역기전력의 형태가 사다리꼴 모양을 갖기 때문에 입력 상전류가 구형파 형태일 때 토크 리플이 가장 적게 나타나게 된다. 그러나, 고정자 권선의 인덕턴스 성분과 역기전력으로 인해 그림 2와 같은 이상적인 전류의 입력이 사실상 불가능하다.

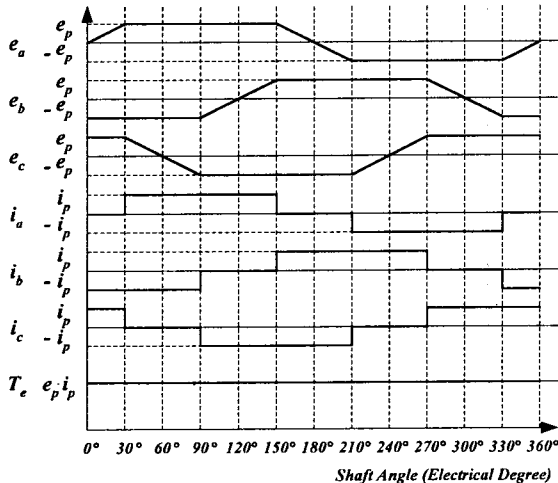


그림 2 BLDC 전동기의 역기전력과 입력전류파형  
Fig. 2 Back EMF and input phase current waveform of BLDCM.

앞서 설명한바와 같이, 최소 토크리플을 갖는 BLDC 전동기의 구동을 위한, 120° 도통 구형파 전류를 만들기 위해 일반적으로 많이 사용하는 것은 그림 3과 같은 단극성 PWM 방식이다.

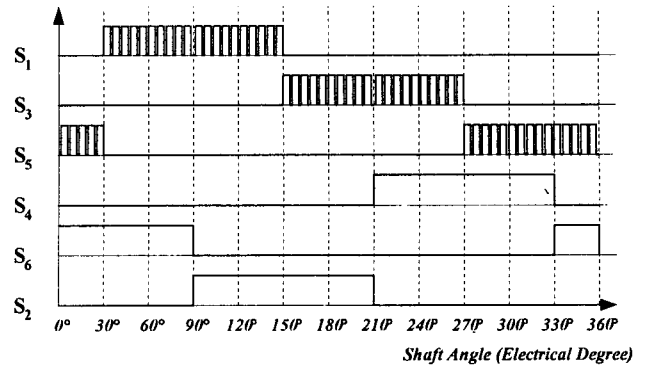


그림 3 단극성 PWM 방식  
Fig. 3 Waveform of unipolar PWM method.

그러나, 단극성 PWM 방식은 전류제어 응답성이 떨어지고, 전환(Commutation)에 의한 토크리플을 제어하는데 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서 제안한 전류제어 알고리즘의 출력을 공간전압벡터 PWM(Space Vector PWM) 방식으로 하였으며, 이로 인한 PWM 파형은 그림 4와 같은 양극성 PWM 형태가 된다.

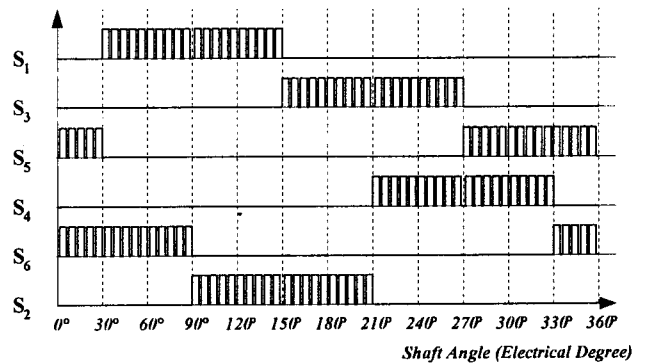


그림 4 양극성 PWM 방식  
Fig. 4 Waveform of bipolar PWM method.

## 2.2 제안하는 전류제어 알고리즘

그림 2와 같은 120° 도통의 구형파 전류에 대한 푸리에 시리즈 전개를 하면 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} k(a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (3)$$

여기서,  $a_0 = 0, a_n = 0$

그리고, 기준 전류파형은 기함수 형태이므로,  $i(t)$ 는 식(4)와 같이 표현되어질 수 있다.

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} (b_n \sin n\omega t) \quad (4)$$

$$b_n = \frac{4k}{n\pi} \cos\left(\frac{n\beta}{2}\right) \quad (5)$$

여기서,  $n = 1, 3, 5, \dots$

$\beta = \pi/3$  [전환(Commutation)구간]

식(5)에서, 3의 배수 고조파들은 Y결선이므로 상쇄됨을 알 수 있다. 120° 도통의 구형파 전류는 푸리에 시리즈 전개에 의한 각 고조파별 정현파를 합성하면 만들 수 있다. 속도지령에서 발생한 직류값을 각 고조파별 계수로 분리 후, 이 계수들을 합하여 만든 파형이 지령치와 유사함을 그림 5를 통해 알 수 있다.

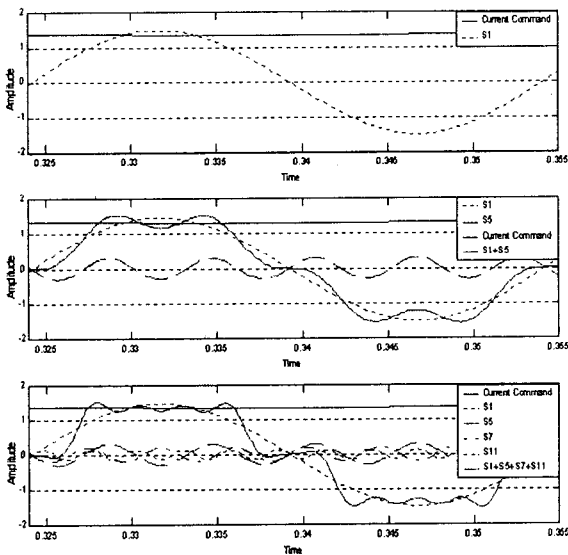


그림 5 지령 값과 각 조파의 합  
Fig. 5 Command value and summation of each harmonic

이와 같은 논리를 적용한 전류제어 블록도를 그림 6에 나타내었다. 속도 제어기에서 발생한 전류 지령치  $i_a^*$ 는 직류 값이다. 이때  $i_a$  성분은 자속 성분이므로 BLDC 전동기와 같이 영구 자석을 사용한 경우에는 0으로 제어 할 수 있다. 이 전류 지령치 값을 식(5)를 사용하여 허용한도내의 각 고조파 성분으로 분리한 후 각 성분별 정지 좌표계로 변환하여 합성하면 정지 좌표계 상에서의 전류 지령치  $i_a^*$ 와  $i_b^*$ 를 얻을 수 있다.

$i_a^*$ 와  $i_b^*$ 는 실제전류와 비교되어진 후 PI 제어를 수행하며, 실질적인 구동에 필요한 전압 지령치 값은 전환(Commutation)시의 인버터의 중성점과 모터의 중성점 사이의 전위가 같지 않으므로 이 전압만큼을 전향 보상하여 얻는다. 이로써 원하던 구형파 형태의 입력 상전류가 효과적으로 발생하여 토크리플을 감소시킬 수 있다.

### 3. 시뮬레이션 및 실험

시뮬레이션과 실험을 위해 사용된 전동기의 각종 사양은 표 1과 같다.

표 1 BLDC 전동기의 사양  
Table 1 Parameters of BLDCM

정격 전압	V	310 [V]
정격 토크	Te	2 [Nm]
저항	Rs	7.3 [ $\Omega$ ]
인덕턴스	Ls	20.3 [mH]
역기전력 상수	Ke	0.3 [V/(rad/sec)]
극수	P	4

실험에 사용된 BLDC 전동기는 IPM(Intelligent Power Module)을 전력용 스위칭 소자로 사용하였으며 알고리즘은 TMS 320C31 DSP(Digital Signal Processor)를 사용하여 구현하였다. 전류 제어 주기는 150 [ $\mu$ s]으로 하였으며, 고조파 계산을 위해 look-up table을 사용하여 실험하였다.

그림 7은 기존 BLDC 전동기 구동방식인 단극성 PWM 방식의 한 상에 대한 세부적인 입력 상전류와 발생 토크를 나타낸 시뮬레이션 파형이다. 그림 7(a)에서 보여지는 것처럼 입력 상전류의 전환(Commutation)에 의한 리플이 발생되고, 이로 인해 토크 리플이 발생함을 알 수 있다. 그러나 제안한 알고리즘으로 전류제어를 수행하면 그림 8(a)와 같이 거의 이상적인 120° 도통의 구형파 전류를 얻을 수 있어, 토크 리플을 현저히 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 그림 9는 일반적으로 쓰이고 있는 전류제어방법을 이용하여, 0 rpm에서 1200 rpm의 순간 속도 지령시 나타나는 파형들로서, 그림 10의 제안한 방식과 비교하면 속도 응답성이 상당히 떨어지는 것을 알 수 있다. 그림 10에서 보듯 제안한 방식은 과도상태 속도 응답성이 overshoot 없이 매우 양호함을 알 수 있다.

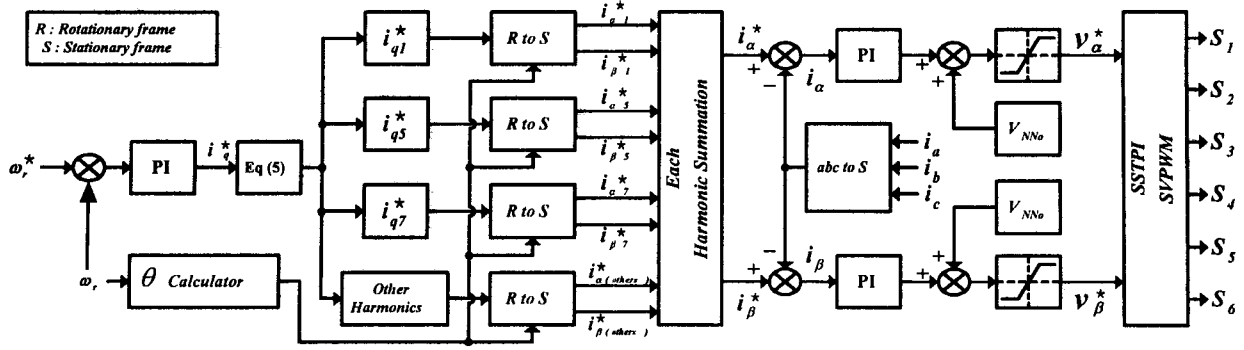


그림 6 전류제어 블록도  
Fig. 6 Block diagram of current control

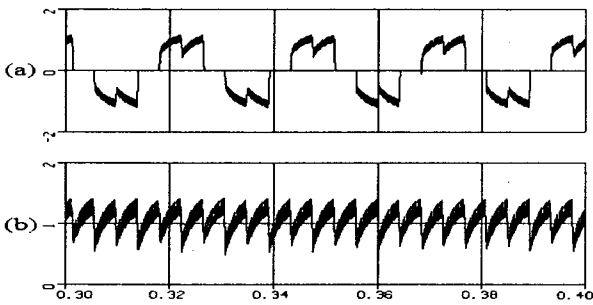


그림 7 일반적인 방법에 의한 부하 1[Nm]시 한 상의 세부적인 입력 상전류와 토크의 시뮬레이션 파형  
(a) 입력 상전류[A] (b) 토크[Nm]

Fig. 7 Detailed input phase current and torque waveform at load 1[Nm] using conventional method in simulation  
(a) Phase Current[A] (b) Torque[Nm]

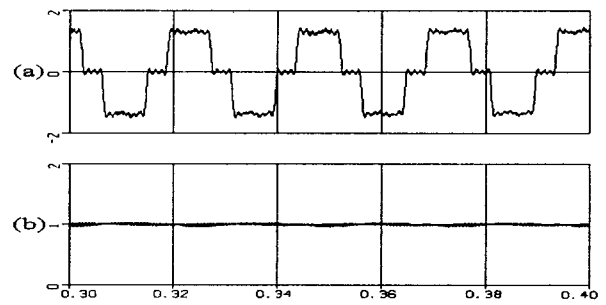


그림 8 제안한 전류제어 알고리즘에 의한 부하 1[Nm]시 한 상의 세부적인 입력 상전류와 토크의 시뮬레이션 파형  
(a) 입력 상전류[A] (b) 토크[Nm]

Fig. 8 Detailed input phase current and torque waveform at load 1[Nm] using proposed method in simulation  
(a) Phase Current[A] (b) Torque[Nm]

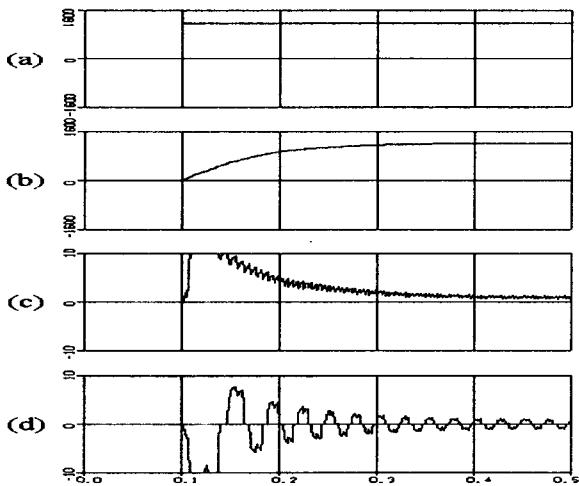


그림 9 일반적인 방법에 의한 초기기동 시뮬레이션 파형  
(a) 지령 속도[rpm] (b) 검출 속도[rpm]  
(c) 토크[Nm] (d) 입력 상전류[A]

Fig. 9 Start up waveform of BLDCM using conventional method in simulation

(a) Reference Speed[rpm] (b) Actual Speed[rpm]  
(c) Torque[Nm] (d) Phase Current[A]

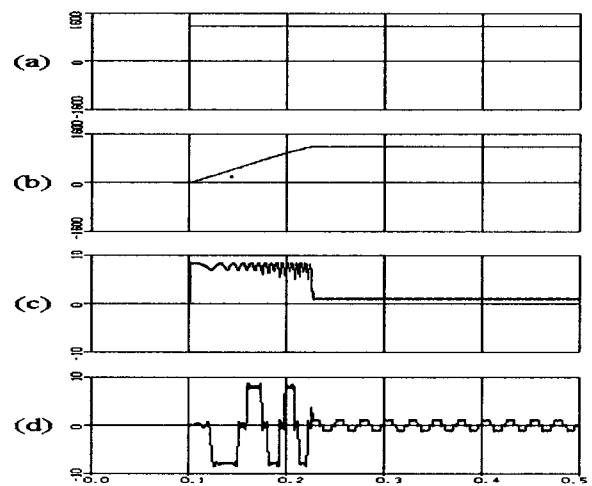


그림 10 제안한 알고리즘에 의한 초기기동 시뮬레이션 파형  
(a) 지령 속도[rpm] (b) 검출 속도[rpm]  
(c) 토크[Nm] (d) 입력 상전류[A]

Fig. 10 Start up waveform of BLDCM using proposed method in simulation

(a) Reference Speed[rpm] (b) Actual Speed[rpm]  
(c) Torque[Nm] (d) Phase Current[A]

## 4. 결 론

본 논문에서는 기존의 BLDC 전동기 구동을 위해 흔히 사용하는 단극성 PWM 방식에 의해 발생되는 토크리플 저감을 위한 새로운 전류제어 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 푸리에 시리즈 계수를 이용하여 허용차수까지 전류 고조파를 계산하고, 이 고조파 성분을 정지 좌표계상의 값으로 환산한 후 전류제어를 통하여 최종적으로 만들어낸 전압 지령치를 SVPWM 방식으로 구현하여 구형파에 근접한 상전류를 발생시켜 토크리플을 저감할 수 있어, 구동시 발생하는 소음과 진동을 현저히 감소시킬 수 있었다.

제안한 알고리즘을 에어컨의 실내 송풍기나 환풍기, 냉장고의 컴프레셔 등과 같은 저소음이 요구되는 가전제품은 물론 사무용 기기, 오디오 및 컴퓨터용 소형정밀 기기 등에 적용하였을 때, 월등한 품질향상을 기대할 수 있을 것으로 예상된다.

## 참 고 문 헌

- [1] T. J. E. Miller, "Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives," Clarendon Press, Oxford 1989.
- [2] R. Carlson, M. Lajoie-Mazenc, and J. Fagundes, "Analysis of Torque Ripple Due to Phase Commutation in Brushless dc Machines," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, Vol. 28, No. 3, pp. 632-638, 1992, May/June.
- [3] P. Pillay and R. Krishnan, "Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent - Magnet Motor Drives, Part I : The Permanent - Magnet Synchronous Motor Drive," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, Vol. 25, No. 2, pp. 265-273, 1989, March/April.
- [4] C. S. Berendsen, G. Champenois, and A. Bolopion, "Commutation Strategies for Brushless DC Motors : Influence on Instant Torque," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 8, No. 2, pp. 231-236, 1993, April.
- [5] T. M. Jahns and W. L. Soong, "Pulsating Torque Minimization Techniques for Permanent Magnet AC Motor Drives - A Review," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 43, No. 2, pp. 321-330, 1996, April.
- [6] S. K. Safi and P. P. Acarnley and A. G. Jack, "Analysis and simulation of the high-speed torque performance of brushless DC motor drives," *IEE Proc. Electron. Power Applicat.*, Vol. 142, No. 3, pp. 191-200, 1995, May.
- [7] D. C. Hanselman, "Minimum Torque Ripple, Maximum Efficiency Excitation of Brushless Permanent Magnet Motors," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 41, No. 3, pp. 292-300, 1994, June.

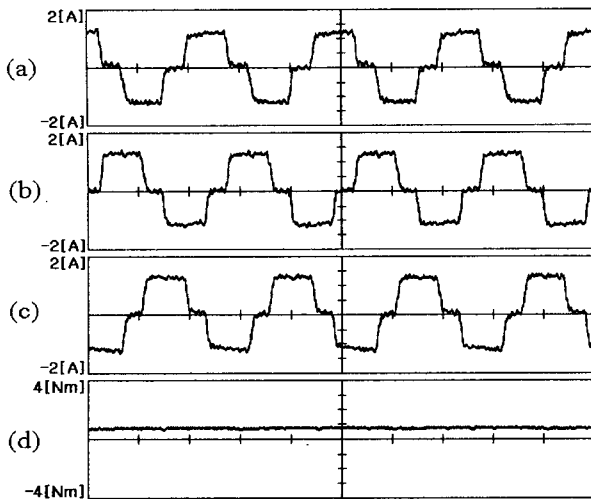


그림 11 제안한 전류제어 알고리즘에 의한 부하 1[Nm]시의 각 상전류와 토크파형의 실험 결과  
(a) a상 전류[A] (b) b상 전류[A]  
(c) c상 전류[A] (d) 토크[Nm]

Fig. 11 Input phase currents and torque waveform at load 1[Nm] using proposed method in experimental result  
(a) a Phase Current[A] (b) b Phase Current[A]  
(c) c Phase Current[A] (d) Torque[Nm]

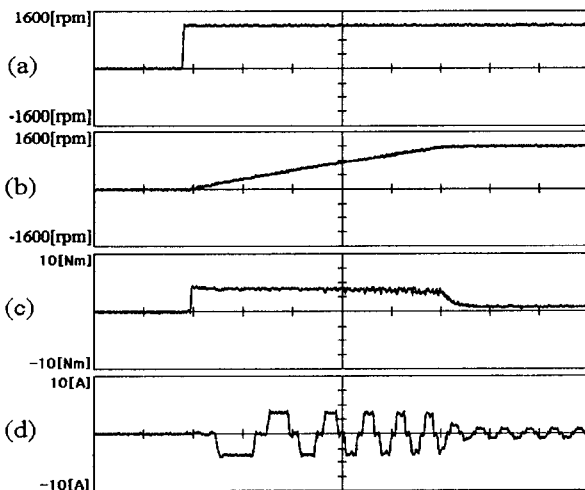


그림 12 제안한 전류제어 알고리즘에 의한 초기구동의 실험 결과  
(a) 지령 속도[rpm] (b) 검출 속도[rpm]  
(c) 토크[Nm] (d) 입력 상전류[A]

Fig. 12 Start up of using proposed method in experimental result  
(a) Reference Speed[rpm] (b) Actual Speed[rpm]  
(c) Torque[Nm] (d) Phase Current[A]

그림 12의 실험 파형은 시뮬레이션에서와 같이 0 rpm에서 1200 rpm의 순간 속도 지령시, 제안한 알고리즘에 의해 만들어진 구형파에 가까운 상전류가 입력됨에 따라, 토크 리플이 효과적으로 감소된다는 것을 입증하여 보여주고 있다.