

상 권선 인덕턴스의 위상지연 보상에 의한 브러시리스 직류 전동기의 토크 리플 개선

柳時榮, 李斗秀

Improvement of Torque Ripple Using Compensation for the Phase Delay of Winding Inductance on Brushless DC Motor

Si-Yeong Ryoo, Doo-Soo Lee

요 약

본 논문에서는 브러시리스 직류 전동기(BLDCM)의 정류과정에서 발생하는 유도성 상 전류의 위상각 제어에 의한 토크 리플의 감소 방법에 대하여 연구한다. 고정자 코일에서 발생하는 유도성 전이 전류에 대한 위상지연의 크기는 전동기의 회전속도에 따라 달라지므로, 속도에 대한 보상각을 결정하고 테이블 처리에 의하여 실시간 제어한다. 실험으로, AVR 8515 마이크로 프로세서를 이용하여 위상지연을 보상하는 회로를 설계하였으며 4극 3상의 브러시리스 직류 전동기에 대하여 전동기의 모든 운전 영역에서 토크 리플이 현저하게 감소함을 확인하였다.

ABSTRACT

In this paper, a method of reducing torque ripples caused by phase winding inductances in BLDCM(Brushless DC Motor) drives is presented. In order to compensate the inductive current delays, commutation angle is controlled by the value compensating angle varied in accordance with rotational speed. Using the microprocessor AVR 8515, the proposed compensator is implemented and experiments are done with a 4-pole 3-phase BLDCM. The results show the remarkable reduction of torque ripple at whole speed ranges.

Key Words : Brushless DC motor, Torque ripple, Current delay

1. 서 론

브러시리스 직류 전동기는 기계적인 정류자(commutator)와 브러시가 없고 외부의 전자회로에 의하여 정류를 행하는 전동기로서 제어의 간단성과 고효율, 고풍력, 브러시가 없음으로 인한 유지의 간편성, 설계의 유연성등의 특성으로 인하여 폭넓게 사용되고 있다. 브러시리스 직류 전동기에서 필연적으로 발생하

는 토크 리플은 속도제어 분야에서 진동과 소음의 원인이 되고, 서보 제어에서는 정밀도를 떨어뜨리는 원인이 되므로 고성능 속도 및 위치제어에서 토크 리플의 감소는 필수적이며, 토크 리플의 발생 원인은 다음 3가지로 분류된다. 첫째, 회전자 자석과 고정자 치극의 상호 작용에 의한 코깅 토크이며 둘째, 회전자의 위치에 따른 상 인덕턴스의 변동에 의한 릴럭턴스 토크 셋째, 상권선 전류와 회전자 자석 사이에서 발생하는 상

호 토크 등이다. 이와 같은 토크 리플을 줄이기 위한 다각적인 방법들이 연구되었으며, 전동기의 설계에 관한 측면과 제어회로의 설계에 관한 측면으로 나눌 수 있다. 고정자 혹은 자석에 스큐(skew)를 주거나 돌극(saliency)의 조정에 의하여 처음 2개의 원인에 의한 토크 리플은 현저하게 줄일 수 있다. 또한 Hwang 등은 자극의 변형(magnet pole shaping)과 자석의 호의 길이를 줄임으로써 원하는 역기전압 파형을 얻을 수 있음을 나타냈다¹¹.

상호 토크 리플은 불완전한 역기전압과 이상적인 전류를 생성할 수 없으므로 인하여 발생한다. 브리시리스 직류전동기는 사다리꼴(trapezoidal) 형태의 역기전력(back emf)을 갖는다. 만약 이 역기전력이 완전한 모양을 갖고, 전동기를 구동하는 전류가 완전한 형태의 구형 펄스(rectangular pulse)의 파형을 갖는다면, 토크 리플은 0으로 감소한다. 그러나, 실제의 전동기는 기계적인 오차와 설계상의 트레이드-오프로 인하여 그러한 요구를 만족할 수 없다.

따라서 최적의 전류파형을 얻음으로써 토크 리플을 감소시키는 방법이 계속하여 연구되고 있다^{12,3,4,51}.

d-q-0변환에 기초한 벡터제어에 의하여 최적 전류를 얻는 방법¹²과 푸리에 해석에 의한 방법¹³이 있고, Hung등은 상 전류(phase current)의 고조파 항에 최적가중치를 부가하는 방법을 제안하였으며¹⁴, Chen등은 전류 벡터가 역기전력 벡터를 추종하도록 변형된 d-q 변환을 행하여 최적 전류 파형을 발생하였다¹⁵.

또한 전동기의 권선 코일은 유도성 인덕턴스를 가지므로 요구되는 완전한 구형 펄스의 전류 파형을 생성할 수 없다. 특히 사다리꼴형 역기전력인 경우에, 구형 펄스의 전류에 대하여 전류의 전이과정에서 무한대의 di/dt 를 생성해 낼 수 없다. 따라서 상 권선에 전압이 인가되는 즉시 최대 토크를 낼 수 없을 뿐만 아니라, 상권선의 전압이 제거된 후에도 권선에 저장된 에너지는 즉시 0으로 되지 않기 때문에 회전자에 회전하는 반대방향으로의 토크가 여전히 남아있게 된다.

따라서 구형과 전류로 구동하는 사다리꼴형 브리시리스 DC 전동기는 상권선 인덕턴스에 의하여 반드시 토크의 변동을 수반하게 되며, 이 변동은 토크 리플로 나타난다.

Kim등은 전압원 인버터의 스위칭 각을 제어하는 방법을 이용하여 토크리플을 감소하는 방법을 제안하였다¹⁶. Tal은 정현파 브리시리스 직류 전동기를 구형파의 전류로 구동할 때 최적 정류의 위치를 찾는 문제를 제기하였고¹⁷, Woo등은 그 방법을 실현하여 운전특성

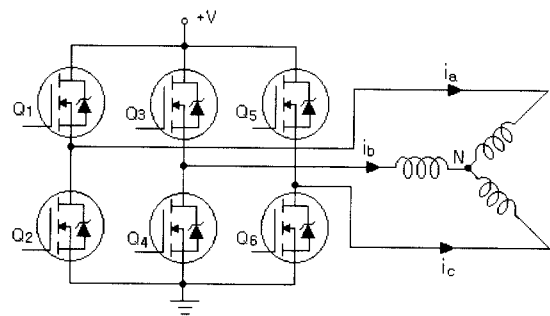
이 현저하게 개선함을 보였다¹⁸. Kim등은 전동기의 회전 주파수가 일정할 때, 전동기의 절환각을 변환하면서 토크의 특성을 관찰하였다¹⁹.

본 논문에서는 사다리꼴형 브리시리스 직류 전동기에 대하여 전동기의 상권선 인덕턴스에 의한 위상지연을 인버터의 제어 알고리즘으로 보상하여 최적 정류를 실현함으로써 리플을 감소시킨다. 실험으로, 4극 3상의 BLDCM 및 AVR 8515 마이크로 프로세서를 이용하여 제안된 방법을 구현하고 300rpm과 1200rpm의 두 가지 운전속도에서 토크 리플을 관측하였다.

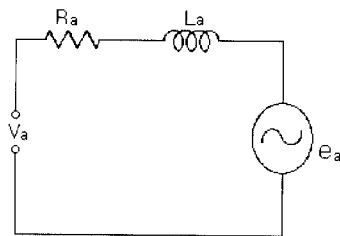
2. 한 상에 대한 전류와 위상지연

브리시리스 직류 전동기의 구동회로는 그림 1(a)와 같고 이 전동기의 한 상에 대한 등가회로는 그림 1(b)와 같으며, 이 전동기의 한 상에 대한 전압 방정식은 식 (1)과 같다.

$$v_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_a \tag{1}$$



(a)



(b)

그림 1 (a) 3상 브리시리스 직류 전동기의 구동회로
(b) 한 상에 대한 등가회로

Fig. 1 (a) Driving circuit of three-phase brushless dc motor

(b) Equivalent circuit of a phase

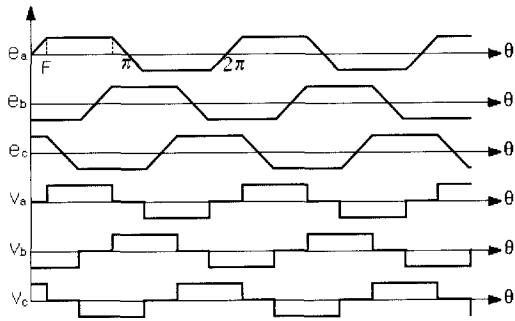


그림 2 3상 BLDC 전동기의 각 상에 대한 이상적인 역기 전압과 단자 전압의 파형
 Fig. 2 Ideal back emf waves and terminal voltage waves for respective phases of a 3-phase BLDC motor

여기에서, v_a 와 e_a 는 각각 한 상에 대한 전압과 역기전압이고 R_a , L_a 및 i_a 는 각각 한 상에 대한 저항, 인덕턴스 및 한 상에 흐르는 전류이다.

이때, 브러시리스 직류전동기의 이상적인 v_a 와 e_a 의 형태는 그림 2와 같다.

그림 2로부터 $v_a(\theta)$ 와 $e_a(\theta)$ 는 각각 다음 식으로 표현된다.

$$v_a(\theta) = \begin{cases} 0 & : 0 < \theta < F \\ +V & : F < \theta < \pi - F \\ 0 & : \pi - F < \theta < \pi \end{cases} \quad (2)$$

$$e_a(\theta) = \begin{cases} \frac{E}{F} \theta & : 0 < \theta < F \\ +E & : F < \theta < \pi - F \\ -\frac{E}{F} (\theta - \pi) & : \pi - F < \theta < \pi \end{cases} \quad (3)$$

여기에서, V 와 E 는 각 상의 전압과 역기전압의 크기이고, F 는 그림 2에 표시된 것처럼 사다리꼴형의 역기전력 파형에서 대각선 부분의 각도이다.

두 함수는 각각 식 (4)와 식 (5)와 같이 푸리에 급수로 표현된다면,

$$v_a(\theta) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\theta + b_n \sin n\theta) \quad (4)$$

$$e_a(\theta) = f_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (f_n \cos n\theta + g_n \sin n\theta) \quad (5)$$

$v_a(\theta)$, $e_a(\theta)$ 두 함수는 모두 반파대칭이고, 기함수이므로 푸리에 계수 a_0 , a_n , f_0 , f_n 은 모두 0이 되고, b_n 과 g_n 은 각각 다음과 같이 된다.

$$b_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} v_a(\theta) \sin n\theta d\theta \\ = \frac{4V}{n\pi} \cos nF \quad (6)$$

$$g_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} e_a(\theta) \sin n\theta \\ = \frac{4E}{\pi F} \frac{\sin nF}{n^2} \quad (7)$$

따라서 식 (4)와 식 (5)는 각각 다음과 같이 된다.

$$v_a(\theta) = \sum_{n=2m-1}^{\infty} \frac{4V}{n\pi} \cos nF \sin n\theta \quad (8)$$

$$e_a(\theta) = \sum_{n=2m-1}^{\infty} \frac{4E}{\pi F} \frac{\sin nF}{n^2} \sin n\theta \quad (9)$$

여기에서 $m=1, 2, 3, \dots$ 이다.

식 (1)에 대하여 정상상태에서 한 상에 대한 전류의 식은 다음과 같이 된다.

$$i_{a,s}(\theta) = \frac{v_a(\theta) - e_a(\theta)}{Z} \quad (10)$$

여기에서 Z 는 복소 임피던스이고 $Z(j\omega) = R + j\omega L$ 이다. 이때

$$|Z(j\omega)| = \sqrt{R^2 + (n\omega L)^2} \quad (11)$$

$$\phi_n = \tan^{-1} \frac{n\omega L}{R} \quad (12)$$

이고, $Z_n \triangleq |Z(j\omega)|$ 으로 정의한다.

식 (8)과 식 (9)로부터 $v_a(\theta) - e_a(\theta)$ 는 다음과 같이 되고,

$$\begin{aligned}
 v_a(\theta) - e_a(\theta) &= \sum_{n=2m-1}^{\infty} \frac{4V}{n\pi} \cos nF \sin n\theta \\
 &\quad - \sum_{n=2m-1}^{\infty} \frac{4E}{\pi F} \frac{\sin nF}{n^2} \sin n\theta \\
 &= \sum_{n=2m-1}^{\infty} \left(\frac{4V}{n\pi} \cos nF \right. \\
 &\quad \left. - \frac{4E}{\pi F} \frac{\sin nF}{n^2} \right) \sin n\theta \\
 &= \sum_{n=2m-1}^{\infty} (b_n - g_n) \sin n\theta \quad (13)
 \end{aligned}$$

따라서, 한 상의 전류 식은 다음과 같이 정리된다.

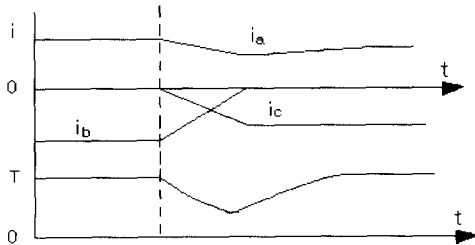
$$i_{a,s}(\theta) = \sum_{n=2m-1}^{\infty} i_n \sin(n\theta - \phi_n) \quad (14)$$

단, $i_n = (b_n - g_n)/Z_n$

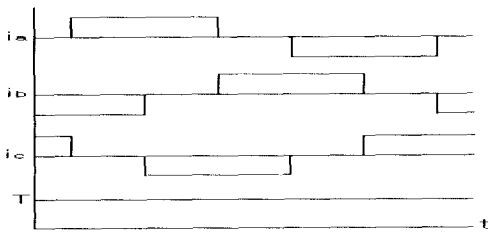
그리고, 회전속도가 일정한 정상상태에서의 한 상에 대한 발생 토크는

$$T_a = \frac{e_a \cdot i_{a,s}}{\omega_m} \quad (15)$$

이다. 여기에서 ω_m 은 기계각속도이다.



(a)



(b)

그림 3 (a) 발생 토크 (b) 이상적인 발생 토크
Fig. 3 (a) Shape of generated torque and (b) shape of ideal instantaneous torque

이때 발생 토크는 다음 그림 3(a)와 같이 되고, 정상 상태에서의 이상적인 발생 토크는 그림 3(b)와 같은 모양을 갖게 된다. 그러나, DC 전동기에 구형파의 전압을 가했을 경우에도 전동기에 구형파의 상승부분과 하강부분에서 순간적으로 스텝모양의 전류가 흐르는 것은 아니다. 이것은 전동기의 상권선의 인덕턴스에 의한 것이며 그림 4와 같이 전류에는 시상수 $\tau = L_a/R_a$ 에 의하여 반드시 지연이 생긴다.

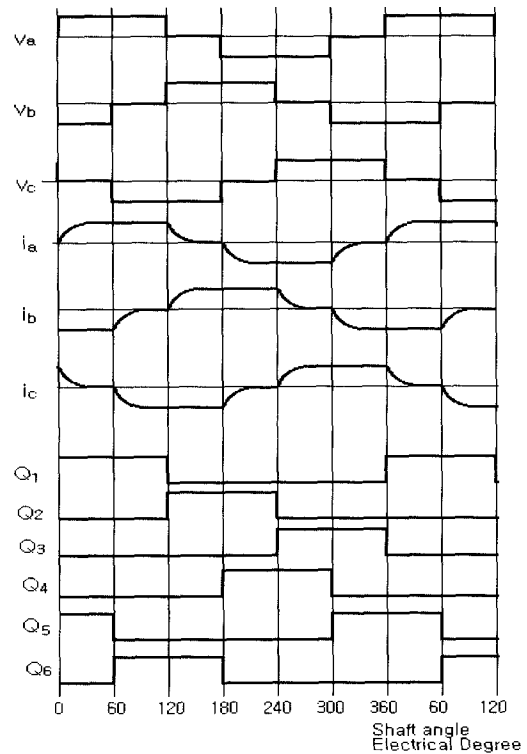


그림 4 상 권선 인덕턴스에 의한 전류의 지연
Fig. 4 The current delay caused by phase winding inductances

그림 2의 이상적인 전류의 파형과 그림 4의 전류의 파형을 비교하면 초기 전류값이 작아진다. 이것은 충분한 토크를 낼 수 없다는 것을 의미하며, 따라서 전동기의 토크 특성이 나빠지게 됨을 의미한다.

또한 단자 전압이 0이 되어도 상권선의 전류는 지수 함수적으로 감소하므로 잔류 토크가 남게되고, 전동기의 회전을 방해함으로써 회전의 불균일을 발생시키고, 결과적으로 상권선의 인덕턴스에 의한 전류의 상승부분과 하강부분의 전이전류는 토크 리플 발생의 원인이 된다.

이러한 전류지연은 식 (13)에서 ϕ_n 만큼의 유도성 위상지연 성분으로 표현되고 있으며, 따라서 이 위상지연을 보상해 준다면 토크 리플은 감소하게 된다. 이 보상은 전동기의 각 상의 전압을 ϕ_n 만큼 앞서 인가해 줌으로써 가능하다.

위상지연을 보상하는 원리는 그림 5와 같다.

$S_{1,comp}$, $S_{2,comp}$, $S_{3,comp}$ 는 각각 S_1 , S_2 , S_3 에 위상을 보상한 신호임을 나타내며, 식 (12)에 의하여 α [rad]만큼 위상을 보상한 회전자의 위치신호이다.

그리고 그림 5와 같이 보상된 위상 신호에 대하여 그림 1(a)의 인버터 구동을 위한 스위칭 패턴은 그림 6과 같으며, 위와 같은 위상보상을 실현하기 위한 소프트웨어의 순서도는 그림 7에 나타나 있다.

순서도에서 R은 회전수를 세는 카운터 변수이고, M은 전동기가 1회전 하였음을 표시하는 플래그 비트이며 TI는 타이머 인터럽트를 카운트하여 그 값을 저장하는 레지스터이다. 따라서 TI의 값은 전동기의 회전 속도를 나타내며, 전동기의 회전 속도의 측정은 타이머 인터럽트에 의하여 250[μ sec]마다 펄스를 발생하여 16비트 카운터를 카운트 업(count up) 함으로써 실행하였다.

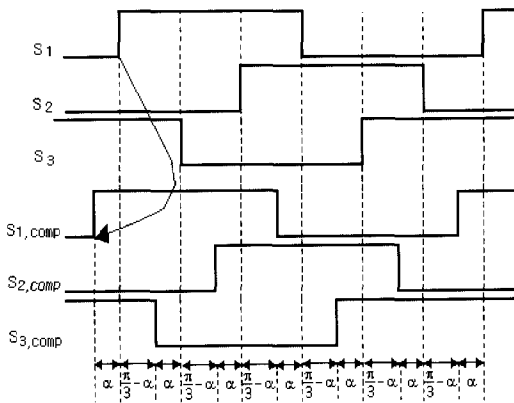


그림 5 위상 보상의 원리
Fig. 5 The principle of the phase compensation

속도 카운트 값(TI)은 전동기가 1회전 하였을 때 1번만 가져와야 전동기의 속도를 알 수 있다. 엔코더 값이 0일때(엔코더의 Z상에 의하여 리셋된다) 펄스 카운터 값(TI)을 읽고 카운터를 클리어한다.

그리고 플래그 비트 M을 클리어 함으로서 1회전이 끝났음을 나타낸다.

따라서, 전동기의 1회전 당 카운트 값이 크면 저속 회전 하였음을 나타내고, 카운트 값이 작으면 고속 회전 하였음을 나타낸다.

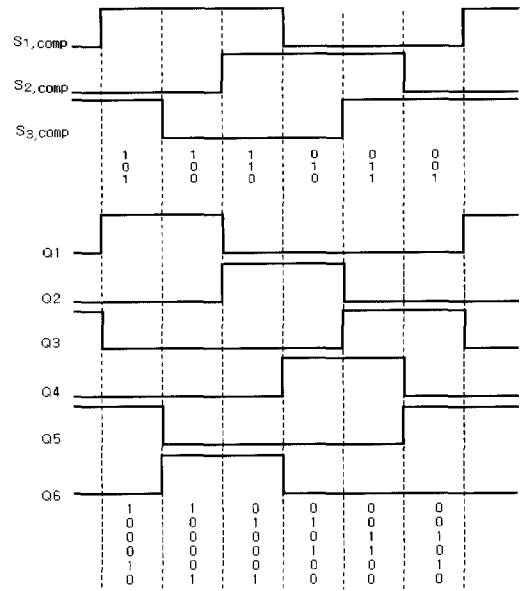


그림 6 인버터의 스위칭 패턴
Fig. 6 Switching patterns for inverter

속도- α 룩업 테이블로부터 운전하고 있는 속도에 해당하는 α 값을 읽은 후 현재의 위치와 α 를 더해서 보상된 위치정보를 얻은 후 그 위치에서부터 그림 6의 패턴을 출력한다.

전동기에서 발생하는 토크 리플을 측정하기 위해서는 전동기에서 발생하는 순시·토크(instantaneous torque)를 측정하여야 하는데, 이러한 순시 토크를 직접 측정하기 위해서는 토크 측정장치의 내부 관성이 전동기의 관성보다 훨씬 작아야 한다.

그러나 토크 측정에 사용한 다이내모메터는 와전류를 발생시키기 위한 회전 디스크가 전동기에 연결되어 관성이 크므로 순시 토크 리플이 측정되지 않는다.

따라서 본 논문에서는 전동기에 발생하는 순시 토크를 간접적인 방법으로 측정하였다. 그리고 순시 토크를 간접적인 방법으로 측정하기 위하여 전동기의 회전에 따른 전류와 역기전압의 데이터를 AD 컨버터를 통하여 수집하여 이를 컴퓨터에서 분석하였다.

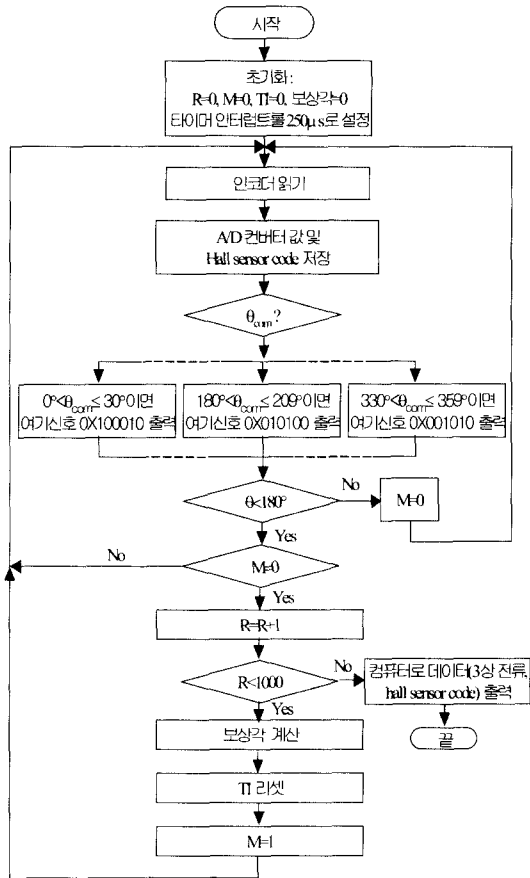


그림 7 위상보상에 대한 소프트웨어의 순서도
Fig. 7 Flowchart of the phase compensation

데이터는 안정속도로 운전할 수 있는 조건에서 수집하여야 하므로 전동기가 1000회전 한 후, 컴퓨터에서 데이터를 수집하도록 하였으며 이는 그림 7의 순서도에 표시되어 있다. 일반적으로 토크 리플은 전동기의 회전속도가 일정한 조건에서 측정되며, 각 상의 전류와 역기전압에 대하여 발생 토크는 식 (16)과 같으며, 수집된 데이터는 식 (16)을 이용하여 분석된다.

$$T_e = \frac{e_{ai}a + e_{bi}b + e_{ci}c}{\omega_m} \quad (16)$$

위 식을 살펴보면, 전동기의 속도 ω_m 이 일정할 때에는 전동기의 토크는 전동기 역기전압과 전동기 상 전류에 비례함을 알 수 있다. 그러므로, 동일한 회전속도에서 전동기 각 변위에 대한 역기전압과 전동기 각 변위에 대한 전류를 측정하면 전동기 각 변위에 대한 순시 토크를 측정할 수 있다. 또한 토크의 불균일

정도를 평가할 수 있는 토크 리플율은 다음 식에 의하여 구할 수 있다.

$$ripple\ rate = \frac{T_{p-p}}{T_{avr}} \times 100 [\%] \quad (17)$$

3. 실험 결과

실험은 (주)성신의 Y-결선 4극 3상 브러시리스 전동기(모델명 : DL-88430LGIC)를 이용하였으며, 이 전동기의 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 실험에 사용한 전동기 상수
Table 1 Parameters of the test motor

정격 전압 [V]	무부하 회전수 [RPM]	무부하 전류 [A]	정격 전류 [A]	정격 회전수 [RPM]	단자 저항 [Ω]	단자L [mH]
36	2150	0.3	1.7	1470	1.5	2

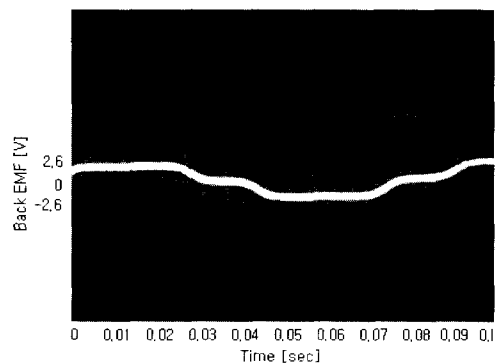


그림 8 공급전압이 20V 일 때, 300rpm의 운전속도에서 측정된 한 상의 역기전압

Fig. 8 Back emf of one phase at 300 rpm with the supply voltage 20[V]

상전류 지연을 보상하는 회로를 구성하는 CPU는 ATMEL사의 AVR8515이며, 8 비트 RISC 프로세서로써, 8 Kbyte의 플래시 메모리와 512 바이트의 SRAM, 256 바이트의 상수 보관용 EEPROM이 내장되어 있다.

또한 데이터를 취득하기 위한 AD 컨버터는 LINEAR사의 LTC1605를 사용하였으며, 100KHz의 샘플링 속도를 가진 고속 16비트 AD 컨버터이다. 전동기를 구동하는 브릿지에 필요한 스위칭 소자로는 IR사의 FET (형명 : IRFP150)를 사용하였으며, 게이트에 인가되는 펄스전압은 10V이다. 전동기의 코일로 흐르는

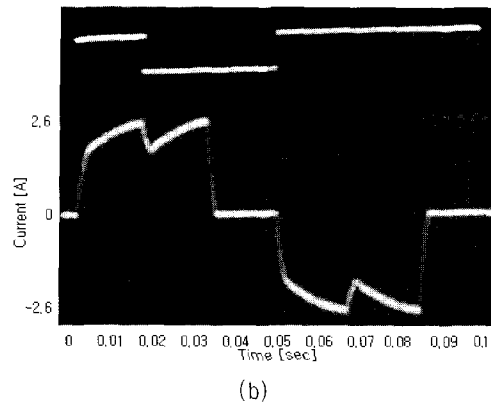
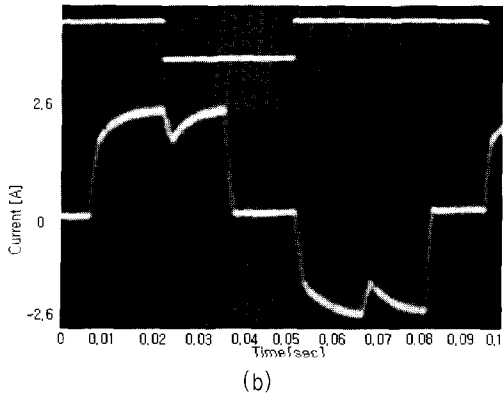
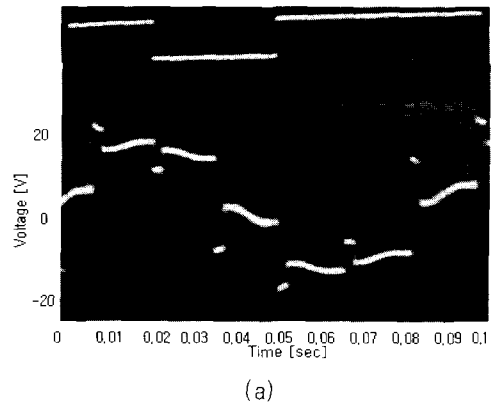
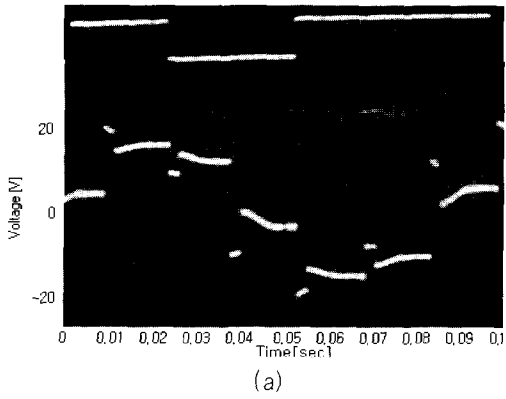


그림 9 300rpm의 운전속도에서 위상지연을 보상하지 않았을 때 한 상에 대한 파형
(a) 중성점부터 전동기 단자까지의 전압 파형
(b) 상 전류 파형

그림 10 300rpm의 운전속도에서 위상지연을 보상을 했을 때 한 상에 대한 파형
(a) 중성점부터 전동기 단자까지 전압파형
(b) 상 전류 파형

Fig. 9 Wave forms without the phase compensation at 300rpm
(a) terminal voltage with respect to the neutral point
(b) phase current

Fig. 10 Wave forms with the phase compensation at 300rpm
(a) terminal voltage with respect to the neutral point
(b) phase current

전류와 역기전압을 검출하기 위하여 입력과 출력이 절연된 HP사의 아이솔레이션 앰프(HP7800)를 이용하였다. 전동기의 전류제어는 전동기와 커플링으로 직결된 부하 전동기의 양단에 가변 저항을 장착하여 부하를 조절하는 저항 제어법을 이용하였다.

실험에서는 공급전압을 20 V로 결정하였으며, 그림 8은 1200rpm에서 위 전동기의 역기전압을 측정했을 때의 파형이며, 불안정한 사다리꼴의 형태를 가지고 있다. 역기전압의 크기는 전동기의 운전 속도가 증가함에 따라 증가하고, 실험에서는 속도에 따라 거의 선형적으로 증가함을 확인하였다.

본 논문에서는 2가지의 운전속도에 대하여 측정된 결과를 보여주고 있으며, 부하에 따라서 300rpm과 1200rpm의 2가지 조건으로 운전하였으며, 한 방향으로만 회전하는 조건에서 운전하였다.

그림 9와 그림 10은 각각 300rpm에서 보상하지 않았을 때와 보상을 했을 때의 한 상에 대한 단자 전압과 상 전류 파형이다. 보상은 9.5° 가 되며, 그림 10은 전동기의 고정자의 자극 위치가 전기각 9.5° 만큼 앞서 인가된 후의 결과이며, 신호의 한 주기는 88[msec]이다. 이때의 한 상에 대한 토크는 각각 그림 11, 그림 12와 같다.

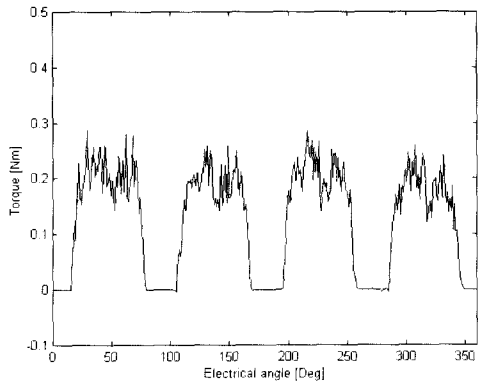


그림 11 300rpm의 운전속도에서 보상하지 않았을 때 한 상에 대한 토크 파형

Fig. 11 Torque of one phase at the 300rpm without the phase compensation

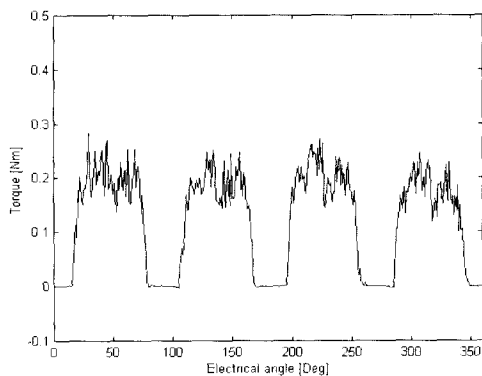


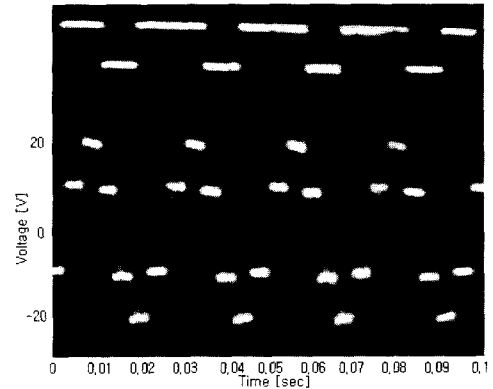
그림 12 300rpm의 운전속도에서 보상을 했을 때 한 상에 대한 토크 파형

Fig. 12 Torque of one phase at the 300rpm with the phase compensation

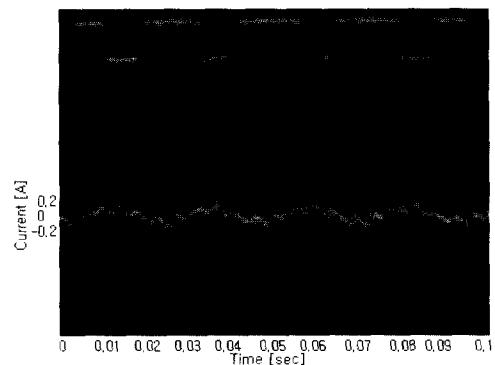
1200rpm에서 전류지연을 보상하지 않았을 때의 결과는 그림 13과 같고, 같은 속도에서 전류지연을 보상을 했을 때의 결과는 그림 14에 나타내었으며, 전류는 구형파와 같게 됨을 확인 할 수 있다. 1200rpm으로 회전할 때의 보상각은 약 36° 가 되며 전류 파형의 한 주기는 22.5[msec]이다.

주어진 속도에서 한 상에 대한 전류지연이 보상된 경우와 보상되지 않은 경우에 대한 각각의 토크 파형은 그림 15와 그림 16이다.

300rpm은 전부하 상태에서의 전동기 회전속도이며,



(a)



(b)

그림 13 1200rpm의 운전속도에서 위상지연을 보상하지 않았을 때 한 상에 대한 파형

(a) 중성점에서부터 전동기 단자까지의 전압 파형
(b) 상 전류 파형

Fig. 13 Wave forms with the phase compensation at the 1200rpm

(a) terminal voltage with respect to the neutral point
(b) phase current

이때 보상각은 9.5° 이며, 보상하더라도 전류와 토크는 거의 같음을 알 수 있다.

1200rpm에서는 보상을 했을 때의 토크 파형의 평평면이 약 90° 로서 보상하지 않았을 때보다 약 30° 정도 더 토크를 발생하고 있음을 알 수 있다. 따라서 토크의 변동이 훨씬 줄어들었음을 알 수 있으며, 이것은 각 회전 속도에서 전류지연을 보상하지 않았을 때와 보상을 했을 때의 순시 토크의 파형을 관측함으로써 알 수 있다.

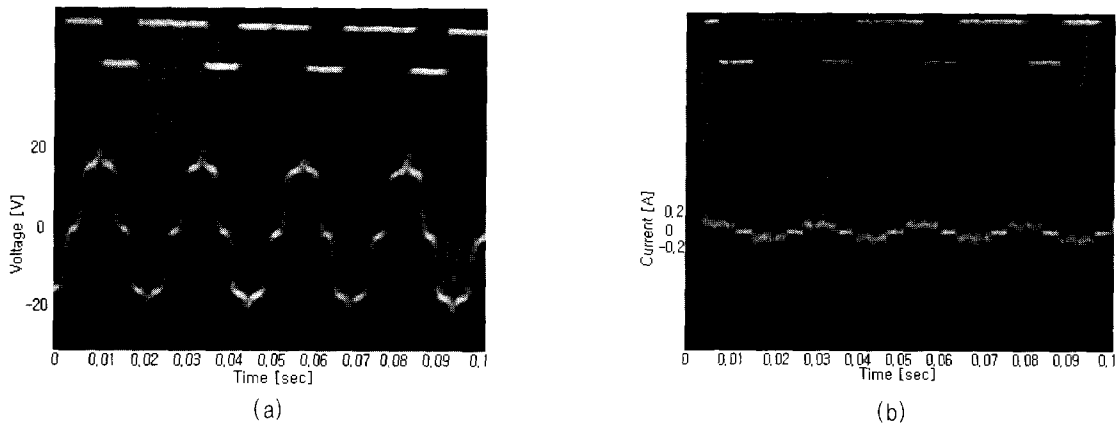


그림 14 1200rpm의 운전속도에서 위상지연을 보상했을 때의 한 상에 대한 파형
 (a) 중성점에서부터 전동기의 단자까지의 전압 파형 (b) 상 전류 파형

Fig. 14 Wave forms with the phase compensation at the 1200rpm

(a) terminal voltage with respect to the neutral point (b) phase current

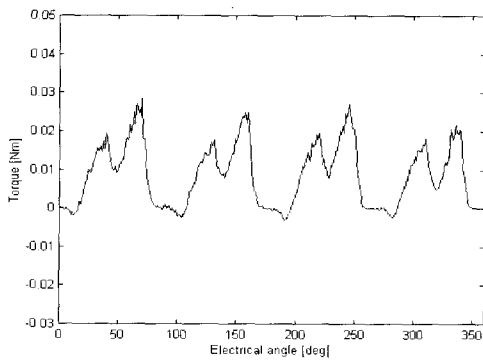


그림 15 1200rpm의 운전속도에서 보상하지 않았을 때 한 상에 대한 토크 파형

Fig. 15 Torque of one phase at the 1200rpm without the phase compensation

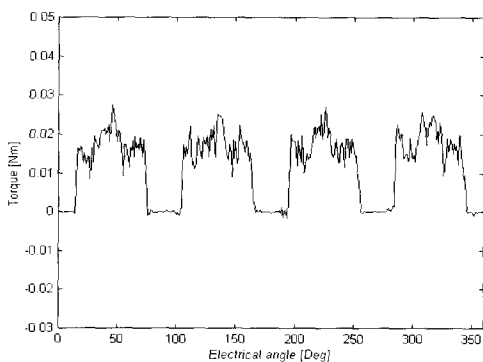


그림 16 1200rpm의 운전속도에서 보상했을 때 한 상에 대한 토크 파형

Fig. 16 Torque of one phase at the 1200rpm with the phase compensation

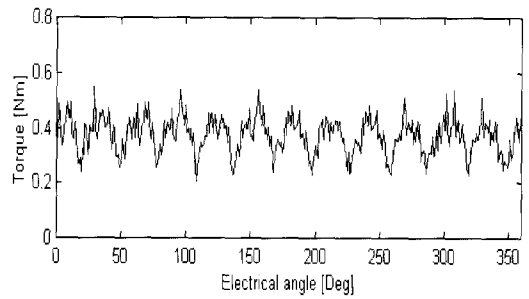


그림 17 300rpm의 운전속도에서 보상하지 않았을 때 순시 토크

Fig. 17 Instantaneous torque at the 300rpm without the phase compensation

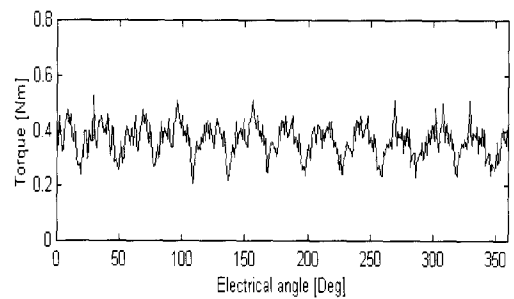


그림 18 300rpm의 운전속도에서 보상했을 때 순시 토크

Fig. 18 Instantaneous torque at the 300rpm with the phase compensation

그림 17과 그림 18은 300rpm의 회전속도에서의 순시 토크의 결과들이며 보상 전의 리플율은 28.5%이고 보상 후의 리플율은 28%이다.

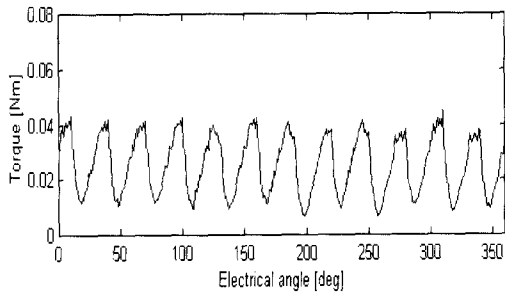


그림 19 1200rpm의 운전속도에서 보상하지 않았을 때 순시 토크
Fig. 19 Instantaneous torque at the 1200rpm without the phase compensation

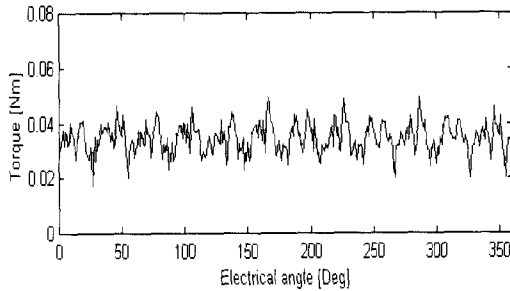


그림 20 1200rpm의 운전속도에서 보상을 했을 때의 순시 토크
Fig. 20 Instantaneous torque at the 1200rpm with the phase compensation

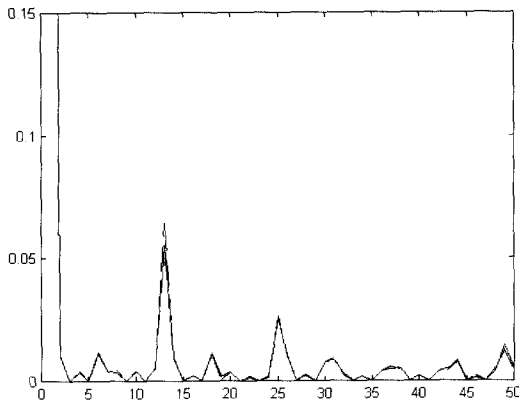


그림 21 300rpm에서 토크리플에 대한 6, 12, 18 고조파 부근에서 확대한 토크 스펙트럼 (실선 : 보상을 한 경우, 점선 : 보상하지 않은 경우)
Fig. 21 Torque spectrum for the instantaneous torque at 300rpm. It is expanded region around 6th, 12th, 18th harmonic (solid line : with compensation, dashed line : without compensation)

그림 19와 그림 20은 각각 1200rpm의 회전속도에서의 순시 토크의 결과들로서 보상 전의 리플율은 54%이고 보상 후의 리플율은 42%이다.

그림 21과 그림 22는 2가지 운전 속도에 대한 토크 스펙트럼이며, 6, 12, 18고조파 근처 영역을 확대한 그림이다. 그림에서 점선은 전류지연을 보상하지 않았을 때의 스펙트럼이며, 실선은 전류지연을 보상하였을 때의 스펙트럼 결과이다.

300rpm에서 6고조파는 15%, 1200rpm에서의 6고조파는 71%감소한 것을 알 수 있다.

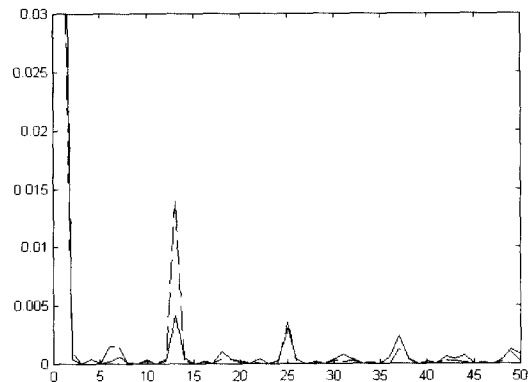


그림 22 1200rpm에서 토크리플에 대한 6, 12, 18 고조파 부근에서 확대한 토크 스펙트럼 (실선 : 보상을 한 경우, 점선 : 보상하지 않은 경우)
Fig. 22 Torque spectrum for the instantaneous torque at 1200rpm. It is expanded region around 6th, 12th, 18th harmonics (solid line : with compensation, dashed line : without compensation)

표 2 각각의 회전속도에서 보상을 했을 때와 보상하지 않았을 때의 리플율에 대한 비교

Table 2 Comparison of measured values of ripple rates without and with compensation at various rotational speeds

전동기 회전 속도[rpm]	토크 리플율 [%]	보상 전	보상 후
300		28.5	28
600		41	35
900		48	38
1200		54	42

표 2는 각각의 속도에서 위상지연을 보상한 경우와 보상하지 않은 경우에 대한 토크 리플율에 대한 분석 결과이다. 그림 8에 보인 바와 같이 실험에 이용한 전동기의 불완전한 모양의 역기전력 및 토크 리플을 유발하는 다른 요소들로 인하여 토크 리플이 상당히 크지만 특히, 고속 운전 속도에서 유도성 전류지연에 대한 보상을 통하여 토크 리플이 현저히 감소됨을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 브러시리스 직류 전동기의 상 권선 코일에서 발생하는 유도성 전류지연을 보상함으로써 토크리플을 감소하는 방법에 대한 실험적 고찰 결과들을 제시하였다. 보상하는 방법은 속도에 따른 보상각을 룩-업 테이블에 저장하고, 검출된 신호에 해당하는 보상각을 읽은 후, 홀 센서로부터 검출된 위치값과 더해준다. 그 후 보상된 위치에서부터 정류패턴을 출력한다.

실험결과에 대하여 300rpm과 1200rpm 두가지 속도에서 보상되었을 때와 보상하지 않았을 때의 경우에 대한 파형을 제시하였으며, 측정 결과들로부터 유도성 전류지연에 대한 위상각 보상을 통하여 토크리플이 상당히 감소될 수 있음을 확인하였다.

실험에 이용한 전동기는 서보제어용이 아니고, 전동기의 역기전력 파형은 약간 불완전한 역기전력의 모양을 가지고 있으므로, 정밀 서보 제어용 전동기를 이용하고 역기전력 파형을 동정(identification)하는 방법이 함께 연구된다면 훨씬 더 토크리플을 감소시킬 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

[1] S.M. Hwang and D.K. Lieu "Reduction of Torque Ripple in Brushless DC Motors" *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 31, No. 6, pp. 3737~3739, 1995.

[2] H.W. Park, S.J. Park, J.W. Ahn, Y.B. Choo, M.H. Lee, C.U. Kim "A Novel Optimal Excitation Scheme of Brushless DC Motor" *Proceedings of ISIE'99-Bled, Slovenia*, Vol. 2, pp. 656~660, 1999, July.

[3] D.C. Hanselman "Minimum Torque Ripple, Maximum Efficiency Excitation of Brushless Permanent Magnet Motors" *IEEE Trans. Ind. Elec.*, Vol. 41, No. 3, pp. 292~300, 1994.

[4] J.Y. Hung, Z. Ding "Design of Currents to Reduce Torque Ripple in Brushless Permanent Magnet Motors" *IEE Proc. B*, Vol. 140, No. 4, pp. 260~266, 1993.

[5] Shanzhong Chen, Takashi Sekiguchi "High Efficiency and Low Torque Ripple Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on the Current Tracking Vector of Electromotive Force" *Trans. IEE Japan*, Vol. 120-D, No. 4, pp. 559~565, 2000.

[6] 김윤호, 조병국, 국윤상, "Torque Ripple Reduction of BDCM Using PWM Switching AngleControl", *전기학회 논문지*, 44권 6호, pp. 783~789, 1995.

[7] Jacob Tal "Optimal Commutation of Brushless Motors" *Proceeding of IMCSD 11th*, pp. 49~53, 1982.

[8] 우광준, 장석구, 이현창, "정류각 제어에 의한 무정류자 직류 전동기의 운전특성 개선", *조명. 전기설비학회지*, 제 4권 제 3호, pp. 216~224, 1990.

[9] 김일환, 윤병도, "브러시리스 직류 전동기의 모델링 및 정상상태 해석", *전기학회 논문집*, 40권 10호, pp. 1049~1055, 1991.

저 자 소 개



유시영(柳時榮)

1988년 단국대 전자공학과 졸업. 1990년 한양대 전자공학과 졸업(석사). 1991년~2001년 동 대학원 전자공학과 박사과정 수료. 현재 천안공업대학 정보통신공학과 조교수.



이두수(李斗秀)

1968년 전북대 전자공학과 졸업. 1970년 동 대학원 졸업(석사). 1973년 동 대학원 졸업(공학박사). 1973년~1979년 3월 전북대 전자공학과 조교수. 1979년 3월~2001년 현재 한양대학교 전자공학과 교수.