

논문 2005-42TE-2-2

브러시리스 직류 전동기의 토크리플 저감에 관한 연구

(A Study on the Torque Ripple Reduction on Brushless DC Motor)

유 시 영*

(Siyeong Ryoo)

요 약

본 논문에서는 브러시리스 직류 전동기의 상권선 인덕턴스에 의해 발생하는 위상지연을 보상함으로써 토크리플을 저감하는 방법을 제안한다. 브러시리스 직류 전동기의 토크리플 특성을 상권선 인덕턴스에 의한 전류지연의 관점에서 개선하기 위하여, 전동기의 한 상에서 발생하는 토크를 위상지연함의 함수로 표현되는 푸리에 급수로 유도하고, 또한, 유도된 푸리에 급수로부터 위상지연을 보상했을 때의 토크 식을 유도한다. 보상된 한 상의 토크가 이상적인 토크 파형인 구형파에 대한 푸리에 급수와 같아짐을 보이고 결과적으로 토크리플이 감소함을 보인다. 위상보상에 대한 실험적인 방법은 인버터의 스위칭 패턴을 보상된 위치의 패턴으로 발생함으로써 실현된다. 시뮬레이션 결과와 3상 4극 브러시리스 직류 전동기에 대한 실험결과를 통하여 제안한 방법의 토크 리플 저감 효과를 확인하였다.

Abstract

This paper presents a method to reduce torque ripple of brushless DC motor by compensating phase delay due to winding inductance. For considering torque ripple comes from the phase winding inductance, torque equation of one phase is derived as Fourier series that is function of the delay. From the equation, also the resultant equation that the current delay is compensated is derived. It is validated that the compensated torque has a form of Fourier series for rectangular wave that is ideal torque, and torque ripple is reduced, consequently. Experimental method for the compensation is realized by replacing switching pattern of inverter by pattern of compensated rotor position. The effectiveness of the proposed method to reduce torque ripple has been demonstrated by the simulation and experimental results using 3 phase 4 pole brushless DC motor.

Keywords : Brushless DC Motor, Torque ripple, Phase compensation

I. 서 론

브러시리스 직류전동기(BLDCM : Brushless DC Motor)가 일정한 토크를 발생하기 위하여 구형파 전류가 필요하다. 그러나 BLDCM을 전압원 인버터로 구동하는 경우에는 상 권선의 인덕턴스에 의하여 상전류의 형태가 지수함수적으로 증가 혹은 감소하므로 구형파의 전류를 인가할 수 없으며, 결과적으로 토크의 불균일이 발생하게 된다. 이러한 토크 리플은 속도 리플의 원인

이 됨으로써 속도제어 및 위치제어 특성을 저하시키는 지대한 영향을 미치고, 고속회전 시에는 기계적인 관성에 의하여 제거되지만, 소음 발생의 원인이 된다.

이러한 토크 리플을 저감하기 위한 여러 가지 방법들이 연구되었으며, Yosida^[1] 등은 스위치가 오프되는 상에 일정시간 전류를 더 흘려주는 오버래핑 방법으로 정류 순차에 기인하는 토크 리플을 줄였다. 이 방법은 순시토크의 6차 고조파 항이 최소로 되는 오버래핑 각을 시뮬레이션에 의하여 구하여야 한다.

전류의 상승상 및 감쇠상의 전류의 기울기를 일정하도록 조절하여 비 전환상의 전류 리플을 저감하고, 역기전력과 전류의 관계에 따라 나타나는 토크 맥동을 고

* 정회원, 공주대학교 정보통신공학부
(Div. of Information and Telecommunication Eng.,
Kongju University)

접수일자: 2005년2월25일, 수정완료일: 2005년6월8일

려한 전환시점을 제어하는 상 전환 시간 제어방법^[2]과 상전류 전환 시 전환하는 전류들의 변화율을 같도록 하는 역기전력이 고려된 보상전압을 구하고 전환 구간동안 보상전압을 인가하는 방법^[3]과 역기전력과 전류의 관계에서 전환 시간 및 조건을 구하여 전류 전환구간에서 인가하는 상전류와 감쇠되는 상의 전환구간을 일치시키는 방법^[4]이 있다.

Kim 등^[5]은 속도 제어기에서 발생한 전류 지령치 값을 푸리에 전개를 통한 각 고조파 성분으로 분리한 후 각 성분별 정지 좌표계로 변환하고 성분별로 합성하여 정지 좌표계 상에서의 전류 지령치를 얻음으로써 토크리플을 저감하는 방법을 제안하였고, Kim 등^[6]은 한 상의 토크에 대한 푸리에 전개를 통하여 토크 방정식을 PWM의 펄스 위치 즉, 전압원 인버터의 스위칭 각의 함수로 표현하고, 이 스위칭 각을 제어함으로써 토크리플이 감소함을 보였다.

본 논문에서는 상전류가 상 권선의 인덕턴스에 의해 지수함수적으로 증가 혹은 감소하는 점을 고려하여, 푸리에 급수를 이용하여 한 상에서 발생하는 토크를 상 권선의 인덕턴스에 의한 위상 성분의 함수로 전개한다. 그리고 이 위상 성분을 보상함으로써 상전류의 형태가 구형파로 표현됨을 보이고, 이 때 토크 리플이 감소됨을 시뮬레이션과 실험 결과를 통하여 보인다.

II. 토크 식에 대한 푸리에 전개

BLDC 전동기의 한 상에 대한 등가회로는 그림 1과 같고, 따라서 식(1)과 같은 한 상에 대한 전압방정식을 얻을 수 있다.

$$v_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_a \quad (1)$$

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

한 상에 대한 수학적 토크 모델은 그림 2의 사다리꼴 형태의 이상적인 역기전력 e_a 와 입력전압 v_a 의 푸리에 급수를 이용하여 구할 수 있다.

그림 2로부터 $v_a(\theta)$ 와 $e_a(\theta)$ 는 각각 다음과 같이 푸리에 함수로 전개된다.

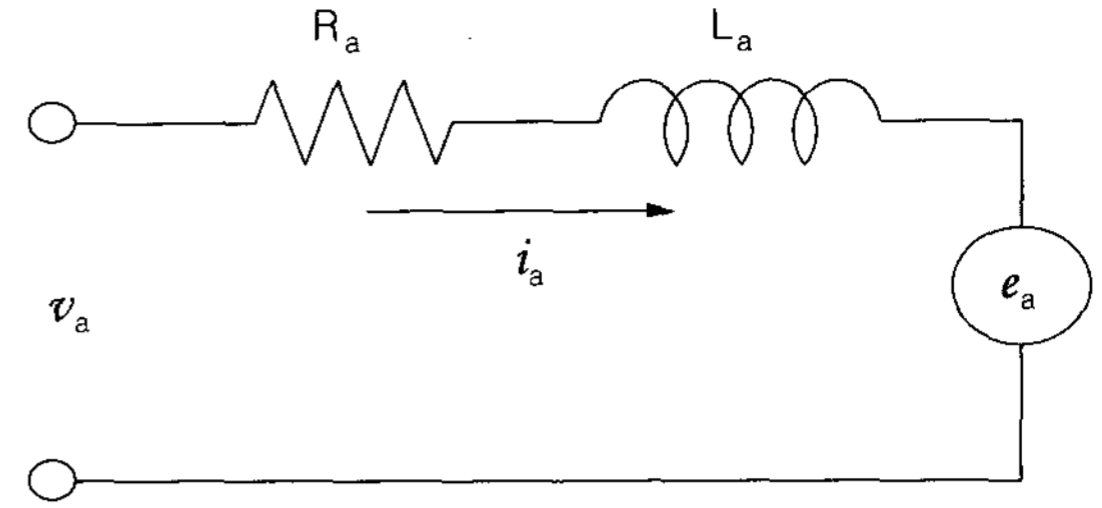


그림 1. 전동기의 한 상에 대한 등가회로
Fig. 1. Circuit model for each motor phase.

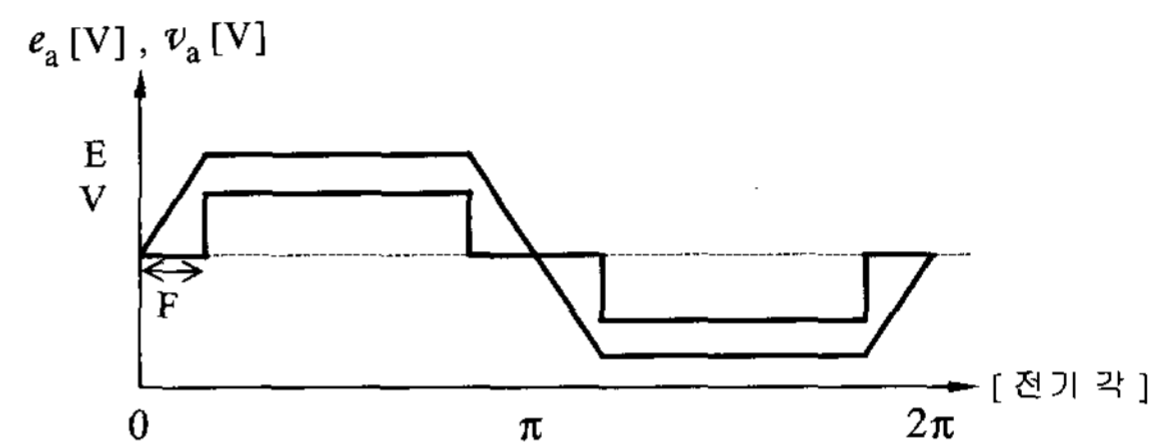


그림 2. 3상 BLDC 전동기의 한 상에 대한 이상적인 역기전력과 단자 전압의 파형
Fig. 2. Ideal back emf and terminal voltage waveforms for a phases of a 3-phase BLDC motor.

$$v_a(\theta) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\theta + b_n \sin n\theta) \quad (2)$$

$$e_a(\theta) = f_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (f_n \cos n\theta + g_n \sin n\theta) \quad (3)$$

$v_a(\theta)$, $e_a(\theta)$ 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.

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

$$= \frac{4V}{n\pi} \cos nF$$

$$g_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} e_a(\theta) \sin n\theta d\theta \quad (5)$$

$$= \frac{4E}{\pi F} \frac{\sin nF}{n^2}$$

여기에서, E와 V는 각각 역기전력과 입력전압의 크

기이고, F는 이상적인 사다리꼴 역기전력 파형에서 대각선 부분의 각으로 $\pi/6$ 이다.

따라서 식(2)와 식(3)은 각각 다음과 같이 된다.

$$v_a(\theta) = \sum_{n=2m-1}^{\infty} \frac{4V}{n\pi} \cos nF \sin n\theta \quad (6)$$

$$e_a(\theta) = \sum_{n=2m-1}^{\infty} \frac{4E}{\pi F} \frac{\sin nF}{n^2} \sin n\theta \quad (7)$$

여기에서 $m = 1, 2, 3, \dots$ 이다.

또한, 그림 1의 등가회로에서 상전류는 다음과 같다.

$$i_a(\theta) = \sum_{n=2m-1}^{\infty} i_n \sin(n\theta - \phi_n) \quad (8)$$

여기에서 $i_n = (b_n - g_n)/Z_n$,

$$Z_n = \sqrt{R^2 + (n\omega L)^2},$$

$$\phi_n = \tan^{-1} \frac{n\omega L}{R}$$

이다.

그리고 한 상에 대한 토크는 식 (9)와 같다.

$$T_a = \frac{e_a i_a}{\omega_m} = \frac{p}{2} \frac{e_a i_a}{\omega_r} \quad (9)$$

여기에서, ω_m 은 기계각주파수, p 는 회전자의 자극수, ω_r 은 전기각주파수이다. 한 상의 역기전력과 전류가 이상적인 형태를 갖는다면 그림2로부터 $e_a i_a$ 는 구형파가 되고 따라서, 한 상에서 발생하는 토크는 구형파가 된다.

그러나 상전류는 식 (8)에서 상권선의 인덕턴스 성분에 의한 위상지연 항을 포함하고 있으므로 BLDC 전동기에 구형파의 전압을 인가했을 경우에도 상전류의 상승부분과 하강부분에서 지수함수적으로 증가하거나 감소한다. 따라서 상 권선에서 발생하는 역기전력이 이상적인 사다리꼴 형태일지라도 상승부분에서는 잔류 토크가 남고, 하강부분에서는 역 토크가 발생하여 토크 리플 발생의 원인이 된다.

이상적인 역기전력과 상 권선의 인덕턴스 성분에 의하여 위상지연을 갖는 상전류에 관한 식(6)과 식(8)을 이용하여 $e_a i_a$ 항을 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} e_a i_a &= \left(\sum_{n=2m-1}^{\infty} g_n \sin n\theta \right) \left(\sum_{l=2m-1}^{\infty} i_l \sin(l\theta - \phi_l) \right) \\ &= \frac{1}{2} \sum_{n=2m-1}^{\infty} \sum_{l=2m-1}^{\infty} [g_n i_l \{ \cos(n-l)\theta \cos \phi_l \\ &\quad - \sin(n-l)\theta \sin \phi_l - \cos(n+l)\theta \cos \phi_l \\ &\quad - \sin(n+l)\theta \sin \phi_l \}] \end{aligned} \quad (10)$$

식(10)을 식(9)에 대입하고 정리하면, 한 상에 대한 토크 식은 다음과 같은 급수의 형태로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} T_a &= T_{a0} + T_{a2c} \cos 2\theta + T_{a2s} \sin 2\theta + T_{a4c} \cos 4\theta \\ &\quad + T_{a4s} \sin 4\theta + T_{a6c} \cos 6\theta + T_{a6s} \sin 6\theta \\ &\quad + T_{a8c} \cos 8\theta + T_{a8s} \sin 8\theta + \dots \end{aligned} \quad (11)$$

여기에서, 푸리에 계수는 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T_{a0} &= \frac{p}{2} \frac{1}{2\omega_r} \{ g_1 i_1 \cos \phi_1 + g_3 i_3 \cos \phi_3 + g_5 i_5 \cos \phi_5 \\ &\quad + g_7 i_7 \cos \phi_7 + \dots \} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{a2c} &= \frac{p}{2} \frac{1}{2\omega_r} \{ (g_3 - g_1) i_1 \cos \phi_1 + (g_5 + g_1) i_3 \cos \phi_3 \\ &\quad + (g_7 + g_3) i_5 \cos \phi_5 + (g_9 + g_5) i_7 \cos \phi_7 + \dots \} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{a2s} &= \frac{p}{2} \frac{1}{2\omega_r} \{ -(g_3 + g_1) i_1 \sin \phi_1 - (g_5 - g_1) i_3 \sin \phi_3 \\ &\quad - (g_7 - g_3) i_5 \sin \phi_5 - (g_9 - g_5) i_7 \sin \phi_7 + \dots \} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{a4c} &= \frac{p}{2} \frac{1}{2\omega_r} \{ (g_5 - g_3) i_3 \cos \phi_1 + (g_7 - g_1) i_5 \cos \phi_5 \\ &\quad + (g_{11} + g_3) i_7 \cos \phi_7 + (g_{13} + g_5) i_9 \cos \phi_9 + \dots \} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{a4s} &= \frac{p}{2} \frac{1}{2\omega_r} \{ -(g_5 + g_3) i_3 \sin \phi_1 - (g_7 + g_1) i_5 \sin \phi_5 \\ &\quad - (g_{11} - g_3) i_7 \sin \phi_7 - (g_{13} - g_5) i_9 \sin \phi_9 + \dots \} \end{aligned}$$

⋮

(12)

이다.

전체 순시토크는 위의 a상에 대하여 각각 $2\pi/3$, $4\pi/3$ 의 간격을 갖는 b상과 c상의 토크를 더해준다.

$$T_e = \frac{p}{2} \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_r} \quad (13)$$

이때의 결과는 다음과 같이 $6n$ ($n = 1, 2, \dots$)차 항의 계수만 갖고, 각 계수는 식(12)의 계수 중 $6n$ ($n = 1, 2, \dots$)차 항의 계수의 3배가 된다.

$$T_e = T_0 + T_{6c} \cos 6\theta + T_{6s} \sin 6\theta + T_{12c} \cos 12\theta + T_{12s} \sin 12\theta + \dots \quad (14)$$

결과적으로 순시토크 T_e 는 상 권선 인덕턴스에 의한 토크리플의 원인이 되는 전류지연 ϕ_n 의 함수가 된다. 따라서 이 위상지연을 보상해 줌으로써 토크 리플은 감소하게 된다. 이 보상은 전동기의 각 상의 전압을 ϕ_n 만큼 앞서 인가해 줌으로써 실현된다. 식 (12)에 대하여 ϕ_n 을 보상 했을 때 한 상에 대한 토크 계수는 다음 식과 같이 된다.”

$$\widetilde{T}_{a0} = \frac{p}{2} \frac{1}{2\omega_r} \{g_1 i_1 + g_3 i_3 + g_5 i_5 + g_7 i_7 + \dots\}$$

$$\widetilde{T}_{a2c} = \frac{p}{2} \frac{1}{2\omega_r} \{(g_3 - g_1) i_1 + (g_5 + g_1) i_3 + (g_7 + g_3) i_5 + (g_9 + g_5) i_7 + \dots\}$$

$$\widetilde{T}_{a2s} = 0$$

$$\widetilde{T}_{a4c} = \frac{p}{2} \frac{1}{2\omega_r} \{(g_5 - g_3) i_3 + (g_7 - g_1) i_5 + (g_{11} + g_3) i_7 + (g_{13} + g_5) i_9 + \dots\}$$

$$\widetilde{T}_{a4s} = 0$$

⋮

(15)

이때, 한 상에 대한 토크 식은 다음과 같이 구형파의 급수전개 형태로 나타난다.

$$\widetilde{T}_a = \widetilde{T}_{a0} + \widetilde{T}_{a2c} \cos 2\theta + \widetilde{T}_{a4c} \cos 4\theta + \widetilde{T}_{a6c} \cos 6\theta + \widetilde{T}_{a8c} \cos 8\theta + \dots \quad (16)$$

이와 같이 각 상에 대한 토크가 구형파가 되면, 순시토크는 리플이 없는 이상적인 형태를 가지게 된다.

위상 보상을 행했을 때의 결과적인 순시토크 식은 다음과 같다.

$$\widetilde{T}_e = \widetilde{T}_0 + \widetilde{T}_{6c} \cos 6\theta + \widetilde{T}_{12c} \cos 12\theta + \dots \quad (17)$$

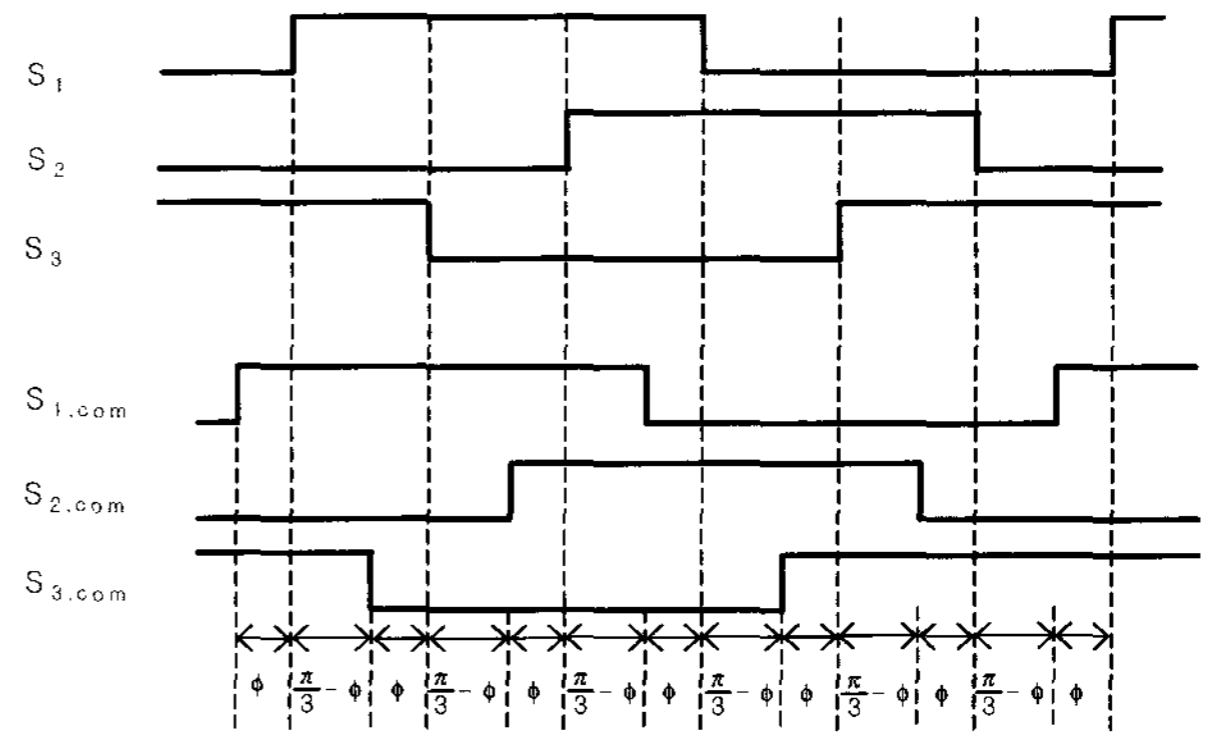


그림 3. 위상 보상의 원리

Fig. 3. Method of the phase compensation.

위상지연을 보상하는 원리는 그림 3과 같다. BLDC 전동기의 홀센서 신호 S_1, S_2, S_3 에 대하여 $S_{1.com}, S_{2.com}, S_{3.com}$ 는 각각 ϕ [rad]만큼 위상을 보상한 회전자 위치신호이다. 보상된 위치신호는 자극위치 신호 S_1 의 상승 에지에서 현재의 전동기 속도에 해당하는 보상각의 변환 값 ϕ 를 룩-업 테이블 ROM으로부터 읽어 들임으로써 결정되며, 보상된 위치를 결정한 후 보상이 실현된 회전자 위치 신호 $S_{1.com}, S_{2.com}, S_{3.com}$ 해당하는 인버터의 스위칭 패턴을 생성함으로써 매 회전자 자극위치 신호마다 전류지연의 보상을 실현한다.

III. 시뮬레이션 및 실험결과

본 논문에서는 4극 3상 브러시리스 직류전동기를 대상으로 하여 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였으며, 시뮬레이션에 사용된 파라미터는 표 1과 같고 실험에서 사용할 전동기와 동일한 값이다.

시뮬레이션은 다음의 몇 가지 가정 하에 실행된다.

i) 각 상권선의 저항과 인덕턴스는 같고 회전자의 위치에 따른 인덕턴스의 변화와 상호 인덕턴스는 무시한다.

ii) 코깅 토크는 없다.

iii) 3상의 역기전력 파형은 이상적인 사다리꼴 형이며, 각각 역기전력의 평평면 구간이 $2\pi/3$ [rad]이다.

iv) 각 상의 역기전력은 서로 $2\pi/3$ [rad]의 위상차를 가지고 있다.

v) 전동기는 정상상태에서 회전한다.

전동기의 회전의 질은 다음 식과 같이 평균 토크에 대한 토크의 맥동에 대한 비율인 리플을 ϵ_r 로 나타낸다.

$$\epsilon_r = \frac{T_{r,p-p}}{T_{avr}} \times 100[\%] \quad (18)$$

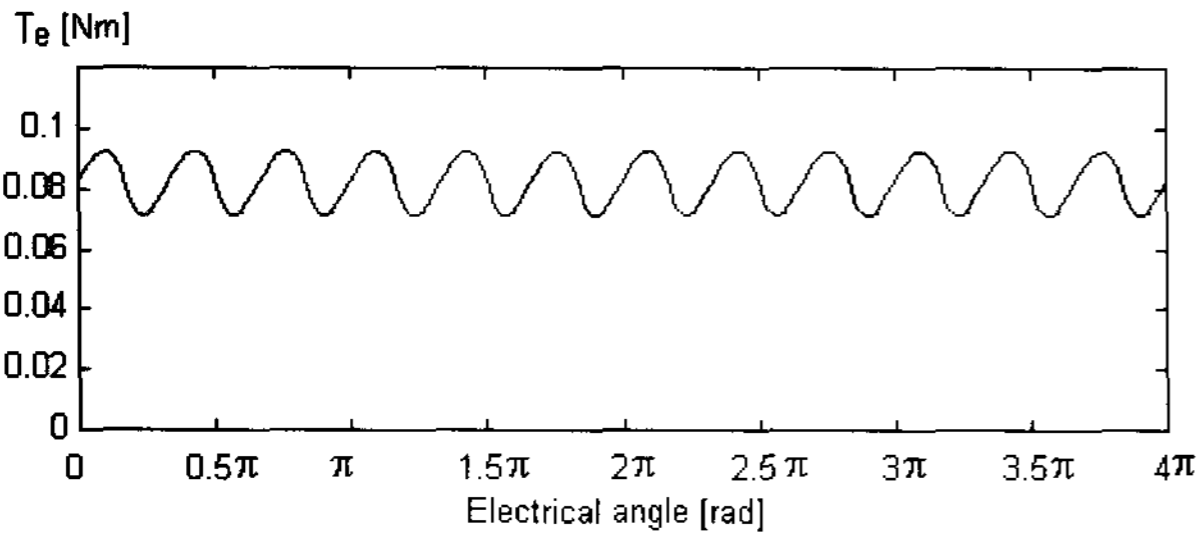


그림 4. 1200rpm에서 전류지연을 보상하지 않은 경우의 순시토크에 대한 시뮬레이션 결과
Fig. 4. Simulation result of instantaneous torque without compensation at 1200rpm.

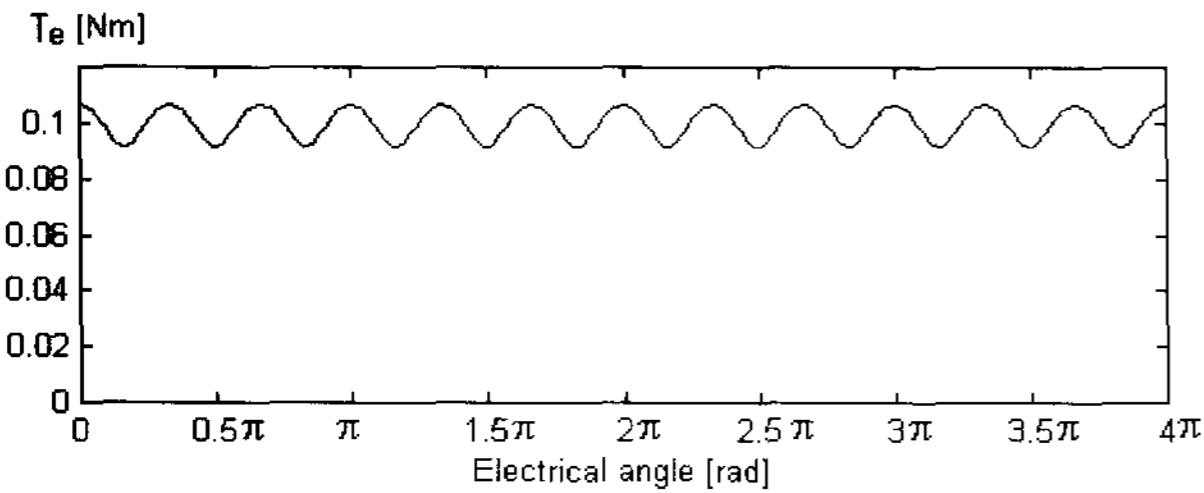


그림 5. 1200rpm에서 전류지연이 보상된 경우의 순시토크에 대한 시뮬레이션 결과
Fig. 5. Simulation result of instantaneous torque with phase compensation at 1200rpm.

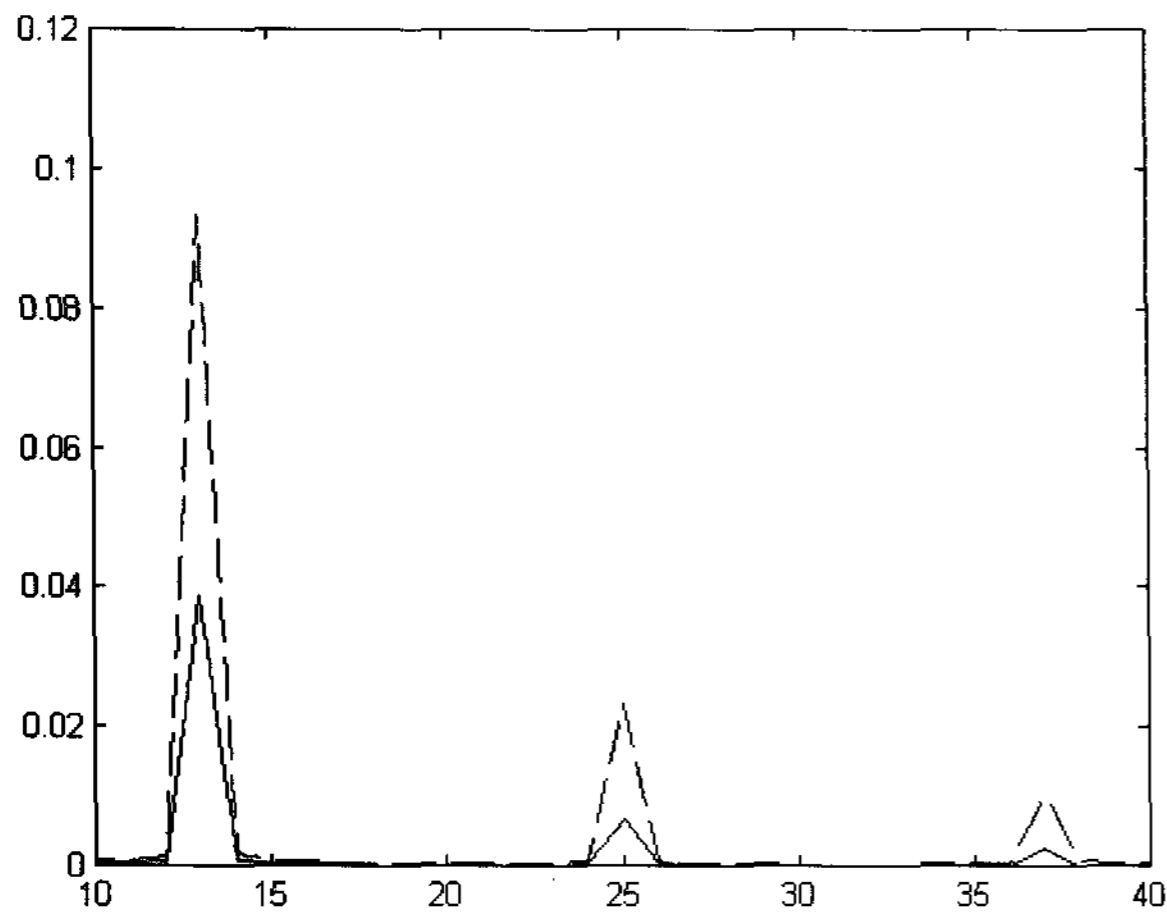


그림 6. 1200rpm으로 운전할 때 전류지연을 보상하지 않은 경우(점선)와 보상한 경우(실선)에 대한 6, 12, 18 고조파 영역에서 확대된 토크 스펙트럼의 시뮬레이션 결과
Fig. 6. Simulation result of torque spectrum without phase compensation (dotted line), and with phase compensation (solid line) at 1200rpm. It is represented in the expanded region around the 6th, 12th and 18th harmonics.

그림 4와 그림 5는 각각 전동기가 1200rpm으로 회전할 때, 전류지연을 보상하지 않은 경우와 보상을 했을 때의 순시 토크에 대하여 시뮬레이션 한 결과이다.

전류지연을 보상하지 않은 경우와 보상한 경우의 평균 토크는 각각 0.082[Nm], 0.1[Nm]이고 리플율은 각각 25.89[%], 14.79[%]이다. 전류지연을 보상을 했을 경우 전류의 상승부분과 하강부분에서 발생하는 잔류 토크와 역 토크가 감소함에 따라, 전체적인 평균 토크는 증가하게 되고 따라서, 리플율이 감소하게 됨을 알 수 있다.

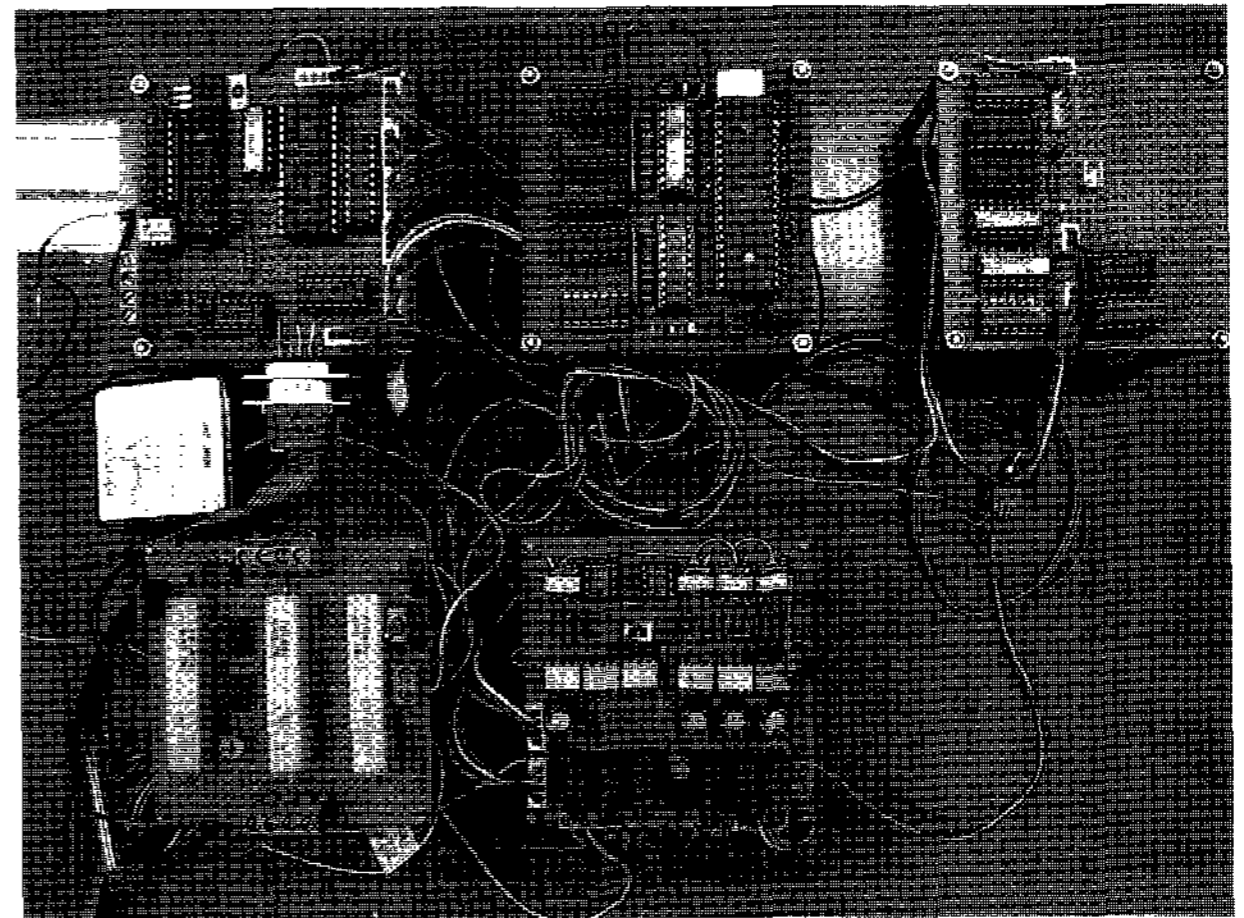


그림 7. 위상보상을 위한 구현 시스템
Fig. 7. Designed system for phase compensation.

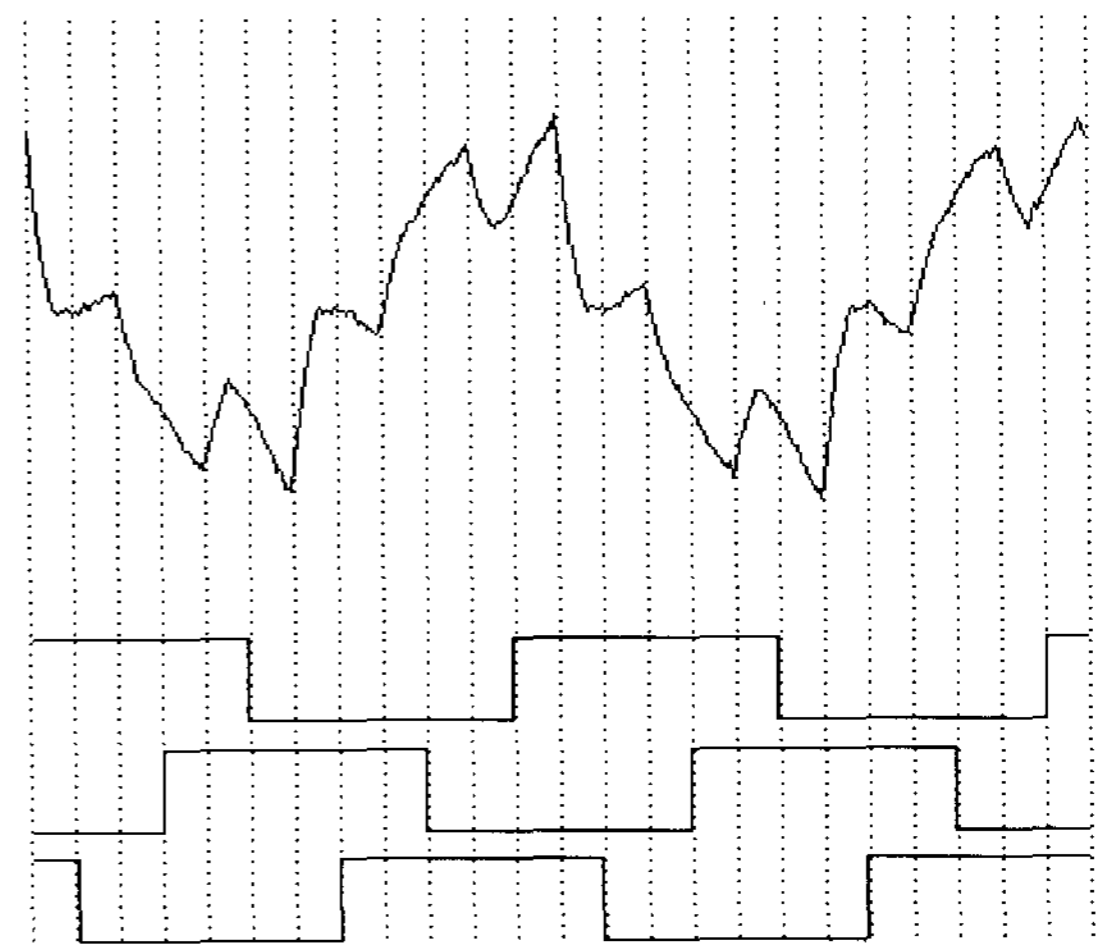


그림 8. 1200rpm의 운전속도에서의 위상 보상 전 한 상에 대한 상전류
Fig. 8. Phase current of one phase without the phase compensation at 1200rpm.

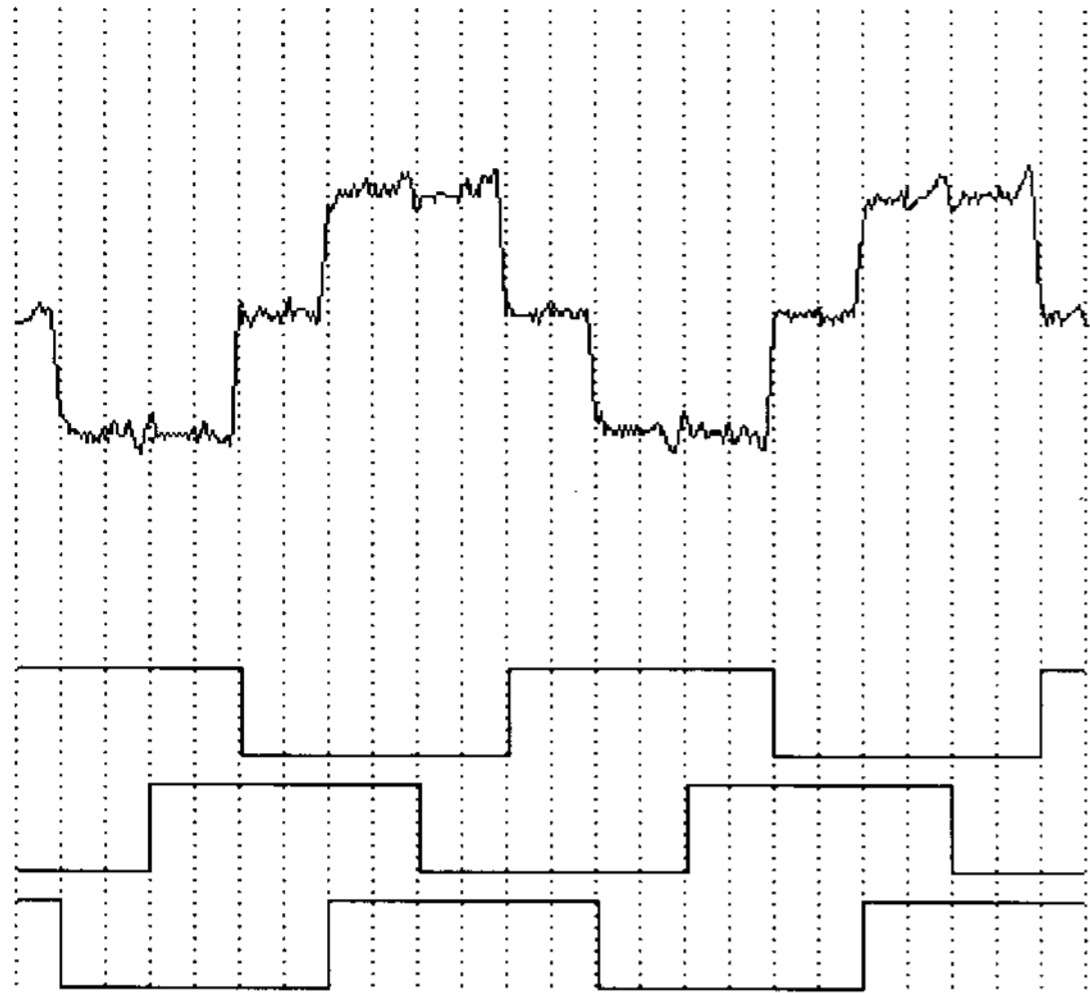


그림 9. 1200rpm의 운전속도에서 위상 보상에 대한 상전류 파형
 Fig. 9. Phase current of one phase with the phase compensation at 1200rpm.

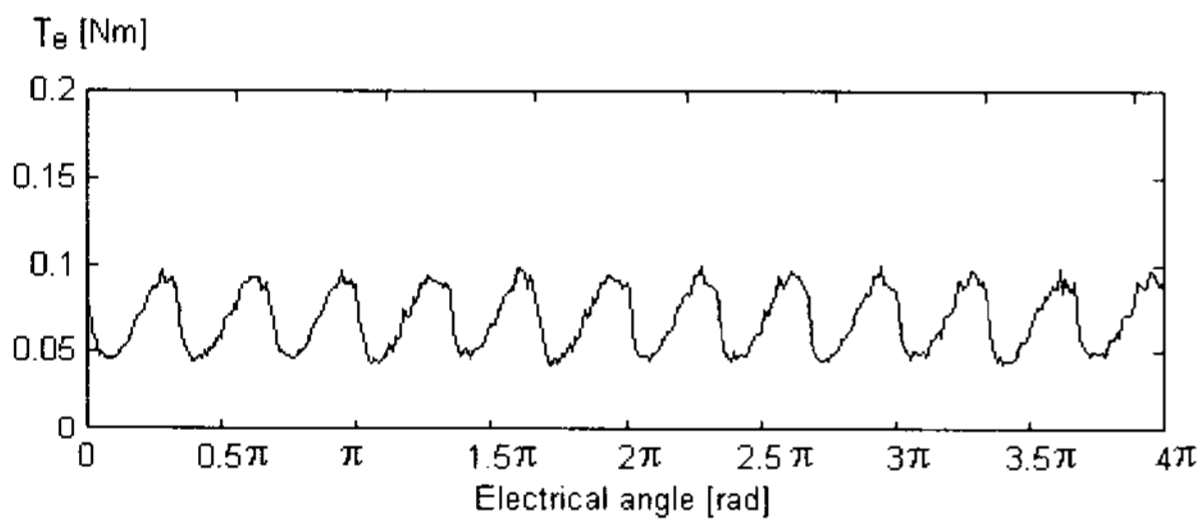


그림 10. 1200rpm의 운전속도에서 위상 보상 전 순시 토크에 대한 실험결과
 Fig. 10. Experimental result of instantaneous torque without the phase compensation at 1200rpm.

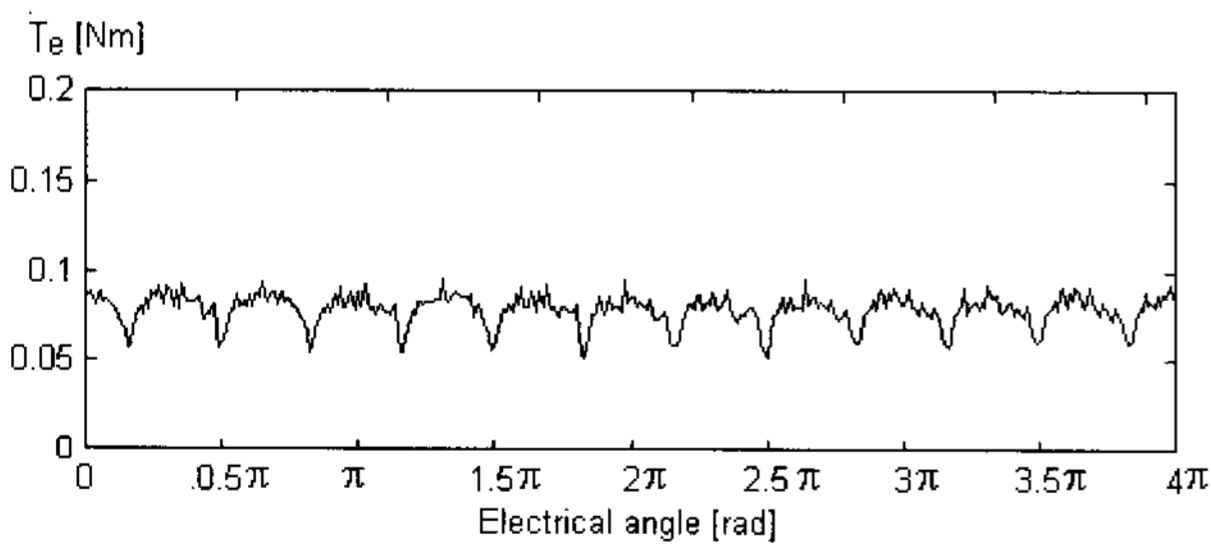


그림 11. 1200rpm의 운전속도에서 위상보상 후 순시토크에 대한 실험결과
 Fig. 11. Experimental result of Instantaneous torque with the phase compensation at 1200rpm.

식(14)에서 $6n$ ($n = 1, 2, \dots$) 고조파 항이 토크리플에 기여하므로 토크리플의 감소는 이들 고조파 항이 감소함을 의미하고, 주파수 분석을 통한 결과를 그림 6에 나타낸다. 그림에서 리플에 가장 큰 영향을 미치는 6고조파는 58[%]가 감소한다.

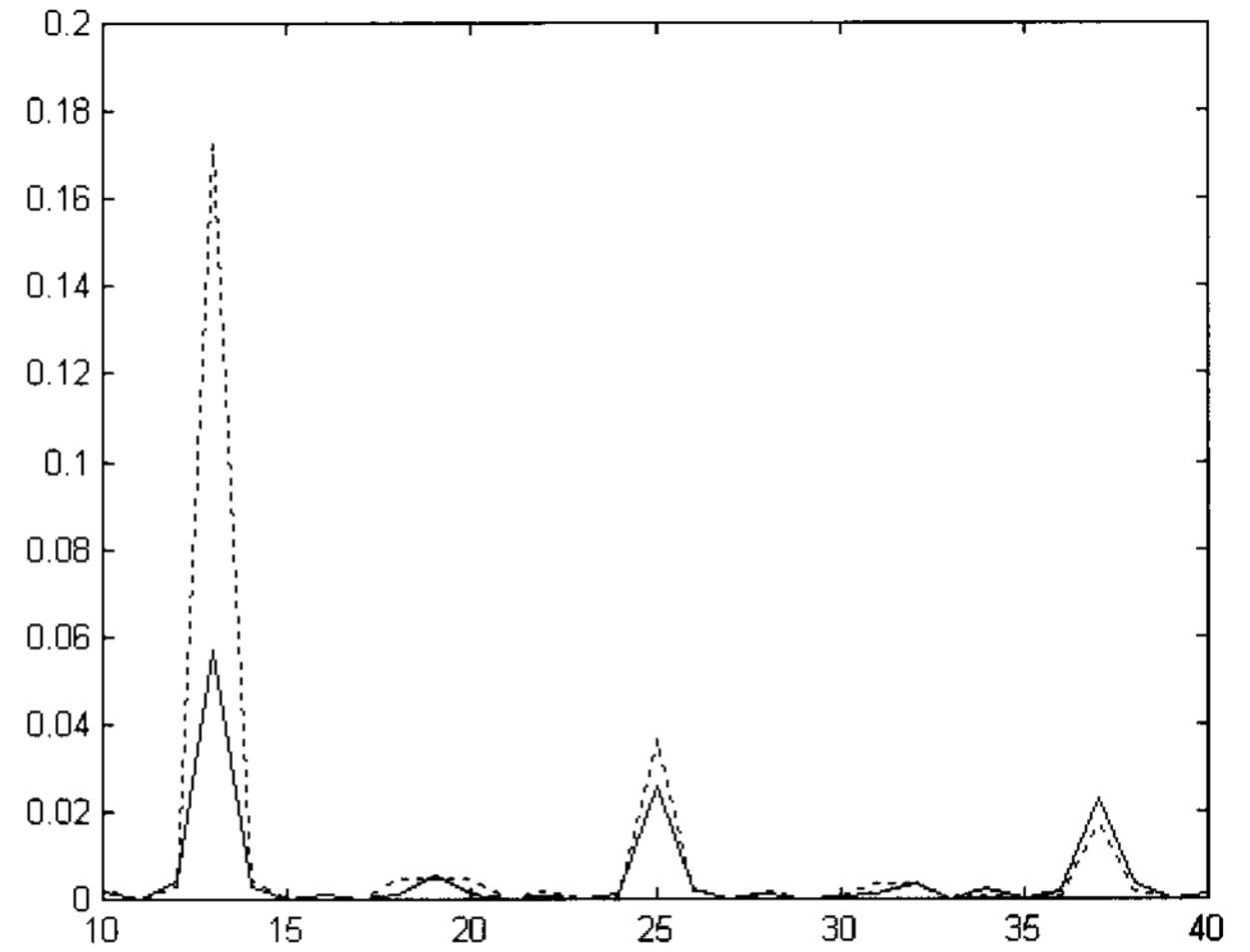


그림 12. 1200rpm으로 운전할 때 전류지연을 보상하지 않은 경우(점선)와 보상한 경우(실선)에 대한 6, 12, 18 고조파 영역에서 확대된 토크 스펙트럼의 실험 결과

Fig. 12. Experimental result of torque spectrum for the instantaneous torque without (dotted line) phase compensation, and with (solid line) phase compensation at 1200rpm. It is represented in the expanded region around 6^{th} , 12^{th} , 18^{th} harmonics.

위상보상을 실현하기위한 회로의 실물 장치는 그림 7과 같으며, 마이크로프로세서는 AVR8515를 이용하여 설계하였다.

그림 8과 그림 9의 실험결과는 전동기가 1200rpm으로 회전할 때 a상, b상, c상의 홀센서 신호에 대하여 한상의 상전류의 변화를 보인 것이며, 위상보상을 행하지 않은 그림 8과 위상보상을 행한 그림 9의 결과를 비교하면 그림 9의 자극(excitation) 위치가 약 30° 앞서 있음을 알 수 있다.

전동기를 1200rpm에서 운전하고 위상보상을 행하지 않았을 때와 그림 9와 같이 위상보상을 행했을 때의 토크 측정 파형은 각각 그림 10과 그림 11이다. 그림 10과 그림 11에서 평균 토크는 각각 0.068[Nm], 0.078[Nm]이며 시뮬레이션 결과와 같이 위상보상에 의해 평균토크가 증가한다.

리플율은 위상보상 전에 54[%]이고 위상보상 후에 42[%]로 감소한다. 그림 12는 그림 10과 그림 11의 실험결과에 대한 주파수 분석의 결과이며 보상 후 $6n$ ($n = 1, 2, \dots$)고조파 항의 크기가 감소하는 것을 보이며 특히, 리플에 가장 큰 영향을 미치는 6고조파는 67[%] 감소함을 나타내고 있다.

실험에 사용한 전동기는 역기전력이 이상적인 사다리꼴이라는 조건을 만족하지 않고, 상 전환 시 발생하는 상전류의 변화로 인해 시뮬레이션의 결과와 실험의 결과에 차이가 있지만, 전체 운전 구간에 걸쳐서 리플이 감소한다.

IV. 결 론

상권선의 인덕턴스에 기인하는 상전류의 위상지연은 BLDC 전동기의 상권선의 역기전력이 이상적인 사다리꼴 형태일지라도 토크리플 발생의 요인이 된다. 본 논문에서는 BLDC 전동기의 토크를 이러한 상전류의 위상지연에 관한 함수로 푸리에 전개하고, 이 위상지연을 보상함으로써 토크리플을 저감하는 방법을 제안하였다. 위상지연이 보상된 각 상의 토크는 구형과 형태의 함수가 되며 결과적으로 토크리플이 감소된다. 3상 4극 BLDC 전동기를 실험에 이용하였으며 제안한 방법을 적용하여 전동기의 전체 운전구간에서 토크리플이 감소하였다. 순시토크의 주파수 특성은 시뮬레이션과 실험에서 측정한 값을 분석한 결과 모두 리플에 가장 크게 영향을 미치는 6고조파 항이 현저하게 감소하고, 나머지 고조파 항들도 감소함을 알 수 있었다. 역기전력을 추정하는 등의 알고리즘을 함께 적용할 수 있을 것으로 생각되며 이때 BLDC 전동기의 토크 성능이 크게 향상될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- 126-133쪽, 2004년 4월
- [5] 김태성, 안성찬, 현동석, "BLDC 전동기의 토크리플 저감을 위한 새로운 전류제어 알고리즘에 대한 연구," 전력전자학회 논문지, 제 6권, 제5호, 416-422쪽, 2001년 10월
- [6] 김윤호, 조병국, 국윤상, "PWM 스위칭각 제어에 의한 BDCM의 토크 리플 저감," 전기학회논문지, 제44권, 제6호, 783-789쪽, 1995년 6월
- [1] M. Yoshida, Y.Murai and M.Takada, "Noise Reduction by Torque Ripple Suppression in Brushless DC Motor," in Proc. of the Record of the 29th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conf., vol.2, pp. 1397-1401, Fukuoka, Japan, May 1998.
- [2] 강병희, 목형수, 최규하, "최소토크맥동을 갖는 BLDC 전동기의 최적 제어," 전력전자학회 논문지, 제 8권, 제 1호, 56-63쪽, 2003년 2월
- [3] 권경준, 김상훈, "Brushless DC Motor에서 토크리플 저감을 위한 전환 구간에서의 전류제어 기법," 전력전자학회 논문지, 제9권, 제3호, 195-202쪽, 2004년 6월
- [4] 박상현, 김태성, 이병국, 현동석, "4스위치 3상 BLDC 전동기의 토크 리플 저감을 위한 전류제어 알고리즘," 전력전자학회 논문지, 제9권, 제2호,

— 저 자 소 개 —



유 시 영(정회원)

1988년 단국대학교 전자공학과 학사 졸업.

1990년 한양대학교 전자공학과 석사 졸업.

2001년 한양대학교 전자공학과 박사 졸업.

1997년~2005년 2월 천안공업대학 부교수

2005년 3월~현재 공주대학교 정보통신공학부 부교수

<주관심분야 : 신호처리, 적응제어, 건설제어, 전동기제어 >