

최적 Lead Angle 제어에 의한 폐루프 스테핑 전동기의 운전영역 확대

(Operating Range Expansion of a Closed-Loop Stepping Motor by Optimal Lead Angle Control)

禹廣俊* · 李鍾彦** · 李現彰***

(Kwang-Joon Woo · Jong-Eon Lee · Hyun-Chang Lee)

요 약

영구자석형 스테핑 전동기의 인덕턴스를 고려하여 최대 평균 토크식을 제시하였으며, 제시된 토크식에 근거하여 마이크로컨트롤러에 의해 lead angle을 전동기의 속도에 따라 최적으로 제어함으로써 최대 토크를 발생시키는 제어 시스템을 설계하여 전동기의 토크/속도 특성 실험을 하였다.

이론식에 의한 토크/속도 곡선에서 최적 lead angle의 도입에 따라 발생 토크가 증대되며, 운전영역이 2배 이상 대폭 확대되는 바와 같이, 특성실험 결과에서도 최적 lead angle의 실현에 따라 구동모드에 관계없이 발생 토크가 증대되며, 운전영역이 2배이상 확대됨을 확인 할 수 있다.

Abstract

In this paper, we design the microcontroller-based optimal lead angle control system on the basis of the presented maximum average torque formula of the permanent-type stepping motor with respect to the inductance. We confirm that optimal lead angle enlarges the operating range twice as much and increases the torque over all of the operating range in the case of presented formula as well as experimental results.

1. 서 론

스테핑 전동기는 속도 및 위치 제어의 용이함 때문에 광범위한 분야에서 사용되고 있다. 작은 규모로는 각종 디스크 드라이브, 프린터 등의 위치제어용으로 부터, 큰 규모로는 고정밀도의 대

형 밀링 머신이나 레이저 절단기 등에 광범위하게 사용된다.

스테핑 전동기의 운전방법(Driving Mode)으로는 제어기의 단순함과 조작의 간편함으로 인하여 과부하의 위험이 없는 시스템에 대하여는 개루프 운전방법을 주로 택하고 있으나, 개루프 운전은 지령 펄스의 주파수가 높거나 과부하시에는 지령 펄스에 응답을 못하는 수도 있으며, 토크 리플이 크게 나타나는 단점이 있다. 따라서 이러한 단점들을 보완하기 위하여 스테핑 전동기의 회전

*正會員：檀國大 電子工學科 教授

**正會員：天安工業專門大學 電氣科 教授

***正會員：檀國大 大學院 電子工學科 博士修了

接受日字：1995年 3月 16日

자 위치를 검출하여, 이에 상응하는 고정자의 상을 여자시키는 페루프 운전방법을 사용한다. 속도 계환과 위치 계환에 의한 페루프 운전방법은 개루프 운전 방법에 비해 고속 운전이 가능하며, 스텝 상실의 위험이 없고, 또한 토크 리플도 줄어드는 장점이 있다.^{1)~3)}

이와 같이 페루프 운전 방법에서 회전 토크를 발생시키기 위해서는 평형점보다 일정위치 앞서있는 고정자 상에 여자 펄스를 가하여야 하며, 이들 사이의 각을 lead angle이라 한다. 최대 평균 회전 토크를 발생하기 위한 기본 lead angle은 스테핑 전동기의 상의 수 및 여자 방법에 따라 결정할 수 있다. 또한 이러한 기본 lead angle에 의해서는 회전 토크의 발생은 전동기의 속도가 극히 낮은 경우에만 유효하다. 따라서 고속에서도 최대 토크를 얻기 위해서는 전동기의 저항, 회전자의 위치 및 고정자 전류의 함수로 주어지는 전동기의 인덕턴스 및 전동기의 역기전력에 기인하는 전류의 지연등을 고려하여 여자 시점을 더 앞세워야 한다.

그러나 이러한 모든 요소들을 고려하여 정확한 최적의 lead angle을 해석적으로 구하는 것은 어려우므로, Shimotani and Kataoka³⁾는 고정자 코일의 전기적 시정수만을 고려하여 다층구조 VR 전동기에 대하여 이론적인 해석을 시도하였다. Fredriksen²⁾은 1회전당 인코더 수와 스테핑 전동기의 1회전당 스텝수의 비를 고려하여 lead angle의 가능한 경우의 수를 운전 모드별로 테이블화하여 운전특성의 향상을 시도하였으며, Kenjo et. al.¹⁾은 Fredriksen²⁾이 제안한 방법을 바탕으로 하여 마이크로프로세서에 의한 실현 방법을 제시하였다. 또한 Simyon Palmin⁴⁾은 여자 펄스 폭 내의 전압 크기를 변화시켜 전류의 상승 시간을 줄임으로 스테핑 전동기의 운전 영역의 확장을 시도하였으며, Albert C. Leenhouts⁵⁾은 고정자 코일의 저항 및 인덕턴스를 변화 시킴으로서 스테핑 전동기의 운전 특성의 향상을 시도하였다.

본 논문에서는 해석을 단순화 하기 위하여 전동기의 속도에 따른 영구자석형 스테핑 전동기의 전기적 시정수만을 고려한 최적 lead angle의 이론적 해석을 시도하였으며, 이를 바탕으로 마이

크로컨트롤러에 의해 전운전 영역에 걸쳐 연속적인 최적 lead angle을 실현하였으며, 이 시스템으로 구동되는 스테핑 전동기의 토크/속도 특성을 측정하여 측정 결과를 유도한 이론식과 비교 검토하여 유도한 이론식의 타당성과 최적 lead angle의 실현으로 운전 영역이 확대됨을 확인하고자 한다.

2. 최적 lead angle 이론

전동기의 속도가 일정하고 모든 전압, 전류는 주기적으로 정상값에 도달하게 된다고 하면 각상의 작용은 위상차가 있을 뿐 동일하므로, 스테핑 전동기의 임의의 기준상인 A상에 대한 해석은 다음과 같다.

다른 상에 의한 상호 인덕턴스를 무시하고, 자기 인덕턴스가 회전자의 위치에 따라 일정하며, 영구자석형 스테핑 전동기 토크 파형과 상 전압을 그림 1과 같이 각각 정현파와 구형파라고 가정하면, A상의 전압 방정식은 다음과 같다.¹⁾⁶⁾⁷⁾

$$V_a = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + V_{back\ emf} \quad (1)$$

$$= Ri_a + L \frac{di_a}{dt} - Kp \sin p\theta$$

또한, 토크 방정식은

$$T_a = -Kp i_a \sin p\theta \quad (2)$$

이다. 여기서,

- V_a : A 상의 상전압[V]
- R : 권선 저항[Ω]
- L : 권선의 인덕턴스[H]
- i_a : A 상의 전류[A]
- T_a : A 상의 토크[N-m]

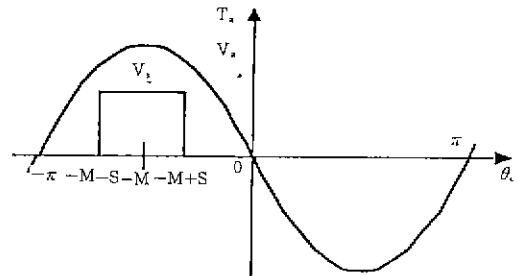


그림 1. 토크와 전압파형
Fig. 1 Waveforms of Torque and Voltage

- K : 비례상수[V sec/rad]
- p : 영구자석형 회전자의 자극쌍수
- ω : 기계 각속도[rad/sec]
- θ : 기계 각변위[rad]

이다.

따라서, 전기 각변위 $\theta_e = p\theta$ 이고, 전기각속도 $\omega_e = p\omega$ 이다.

전동기의 속도가 일정하다면 상 전류는 주기함수가 되므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$i_a(\theta_e) = A_0 + A_1 \cos \theta_e + B_1 \sin \theta_e + A_2 \cos 2\theta_e + B_2 \sin 2\theta_e + \dots \quad (3)$$

이를 식 (2)에 대입하면

$$T_e = -Kp \sin \theta_e (A_0 + A_1 \cos \theta_e + B_1 \sin \theta_e + A_2 \cos 2\theta_e + B_2 \sin 2\theta_e + \dots) \quad (4)$$

이다.

평균 토오크를 구해보면,

$$\begin{aligned} \bar{T}_e &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} T_e d\theta_e \\ &= -\frac{Kp}{2\pi} \int_0^{2\pi} B_1 \sin^2 \theta_e d\theta_e \\ &= -\frac{1}{2} Kp B_1 \end{aligned}$$

이다. 따라서, 평균 토오크 \bar{T}_e 는 B_1 에 의존한다.

전동기의 속도가 일정하므로 상 전압은 주기함수로 생각할 수 있고, 이를 푸우리에 급수로 전개하면,

$$V_a = C_0 + C_1 \cos \theta_e + D_1 \sin \theta_e + C_2 \cos 2\theta_e + D_2 \sin 2\theta_e + \dots \quad (6)$$

이다 여기서 C_n, D_n 은,

$$\begin{aligned} C_0 &= \frac{1}{2\pi} \int_{-M+\frac{\pi}{2}}^{M+\frac{\pi}{2}} V_a d\theta_e \\ &= \frac{V_s}{\pi} S \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} C_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-M+\frac{\pi}{2}}^{M+\frac{\pi}{2}} V_a \cos n\theta_e d\theta_e \\ &= \frac{V_s}{n\pi} [\sin n(-M+S) - \sin n(-M-S)] \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} D_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-M+\frac{\pi}{2}}^{M+\frac{\pi}{2}} V_a \sin n\theta_e d\theta_e \\ &= \frac{V_s}{n\pi} [\cos n(-M-S) - \cos n(-M+S)] \end{aligned} \quad (9)$$

이다. 여기서, n 은 1, 2, 3, ...이다. M 은 전압 펄스의 중심점으로 양수이며, S 는 전압펄스 폭의 절

반으로 양수이다.

평균 토오크 \bar{T}_e 는 B_1 에 의존하므로, B_1 을 구하기 위한 전압식 (1)에 식(6)과 전류식 (3)을 대입하면,

$$\begin{aligned} C_0 + C_1 \cos \theta_e + D_1 \sin \theta_e + \dots &= R(A_0 + A_1 \cos \theta_e + B_1 \sin \theta_e + \dots) \\ &\quad + \omega L(-A_1 \sin \theta_e + B_1 \cos \theta_e - \dots) - K\omega \sin \theta_e \end{aligned} \quad (10)$$

이다. 따라서,

$$C_1 = A_1 R + \omega L B_1 \quad (11)$$

$$D_1 = R B_1 - \omega L A_1 - K\omega \quad (12)$$

이다.

식 (11) 과 식 (12)로부터 B_1 을 구하면,

$$B_1 = \frac{R}{R^2 + \omega^2 L^2} (D_1 + \frac{\omega L}{R} C_1 + K\omega) \quad (13)$$

이다.

식 (8), (9)에 $n=1$ 을 대입하여 C_1 과 D_1 을 구하면,

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{2V_s}{\pi} \cos(-M) \sin S \\ D_1 &= \frac{2V_s}{\pi} \sin(-M) \sin S \end{aligned} \quad (14)$$

이다.

식 (14) 를 식 (13) 에 대입하여 정리하면,

$$\begin{aligned} B_1 &= \frac{R}{R^2 + \omega^2 L^2} \left[\frac{2V_s}{\pi} \sin S \{ \sin(-M) + \frac{\omega L}{R} \cos(-M) \} + K\omega \right] \end{aligned} \quad (15)$$

이다.

식 (15)에서 B_1 이 최소가 되기 위해서는 $\sin(-M) + \frac{\omega L}{R} \cos(-M)$ 항이 최소값을 가져야 하며, 이를 $f(M) \triangleq \sin(-M) + \frac{\omega L}{R} \cos(-M)$ (16)

이라 놓자.

식 (16) 을 M 에 관해 미분하고 그 값을 0으로 놓으면

$$-\cos(-M) + \frac{\omega L}{R} \sin(-M) = 0 \quad (17)$$

이다. 여기서,

$$M = \frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \frac{\omega L}{R} \quad (18)$$

이다. 따라서 평형점으로 부터 최대 평균 토크를 발생 시키기 위한 여자 시점까지의 각인 최적 lead angle A 는,

$$A = S + M$$

$$= S + \frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \frac{\omega L}{R} \quad (19)$$

이다.

식 (15)를 식 (5)에 대입하면 평균 토크 \bar{T}_a 는,

$$\bar{T}_a = -\frac{1}{2} K_p \frac{R}{R^2 + \omega^2 L^2} \left[\frac{2V_s}{\pi} \sin S (\sin(-M) + \frac{\omega L}{R} \cos(-M)) + K \omega_s \right] \quad (20)$$

이다.

여기서, 평균 토크가 최대가 되기 위한 구동 펄스의 폭 S 와 고정자 코일의 상의 수 m 과의 관계는 다음과 같다.

$$S = \frac{\pi}{m} : 1\text{-상 구동}$$

$$= \frac{2\pi}{m} : 2\text{-상 구동}$$

$$= \frac{3\pi}{2m} : 1-2\text{-상 구동} \quad (21)$$

3. 마이크로컨트롤러에 의한 최적 lead angle의 실현

식 (19)에서 본 바와 같이 스테핑 전동기는 여자펄스가 전동기의 속도 ω_s 에 따라 $\tan^{-1}(\omega L/R)$ 만큼 전진시켜야 최대 토크를 발생할 수 있다. 그림 2에 마이크로컨트롤러를 사용한 최적 lead angle 실현을 포함한 전체 페루프 제어 블록도를 나타내었다.

스테핑 전동기에는 페루프 제어를 위해 회전자 위치 검출기와 속도 검출기를 부착하였으며, 회전자 위치 검출기는 위치 신호에 glitch가 혼입되지 않도록 $\pi/2$ 위상차를 갖는 2채널의 펄스 P_1, P_2 에 의해 스테핑 전동기의 1-스텝당 기계각의 2배에 해당하는 펄스를 발생하여 gray-코드로 스테핑 전동기의 회전자 위치를 검출한다. 속도 검출기는 최적 lead angle의 분해능 및 동작속도 범위에 따라 속도 검출기인 광학 인코더의 펄스

수/Revolution가 결정되며, 또한 속도 샘플링 시간 T_s 가 결정된다.

실험에 사용된 영구자석형 스테핑 전동기는 24극이므로 12펄스/Rev. 이 생성되며, lead angle의 분해능을 2° 이하로 하기 위하여 2,400펄스/Rev.의 광학 인코더를 사용하고, 200pps(pulses per second)의 제어속도 범위 내에서 1pps당 1개의 펄스를 카운트 하려면, 카운터의 비트수 $N \geq 7$ 이므로 8비트 카운터를 사용한다. 또한 속도 샘플 펄스의 폭은 $(12\text{극} \times 1\text{pps}) / (2,400\text{펄스/Rev.}) = 5\text{ms}$ 로 하였다. 변환 테이블 ROM은 그림 3과 같이 $\tan^{-1}(\omega L/R)$ 의 함수가 이산적으로 변환된 값

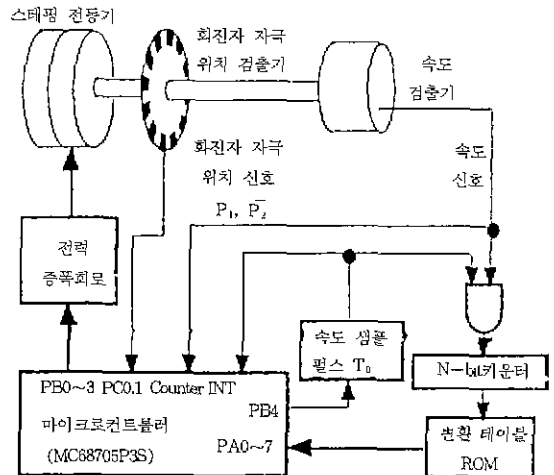


그림 2. 페루프 제어 블록도
Fig. 2. Block Diagram of Closed-Loop Controller

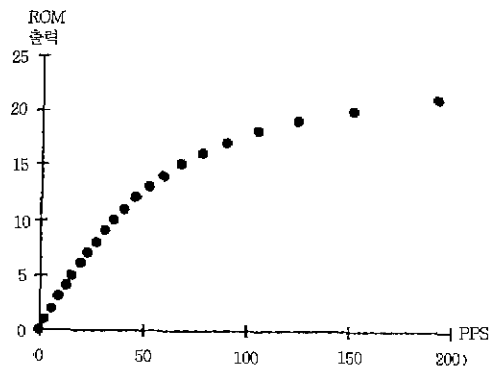


그림 3. 변환 테이블 ROM의 내용
Fig. 3. Contents of Transform Table ROM

을 갖는다.

마이크로컨트롤러는 일정 샘플기간 $T_0=5mS$ 동안 속도 검출기로부터의 속도 펄스를 변환 테이블 ROM으로 부터 최적 lead angle로 변환된 α 값을 읽어 들여, 이에 해당하는 각만큼 전진시킨 여자펄스를 스테핑전동기의 전력 증폭회로에 가한다. 이상의 동작을 위한 소프트웨어는 다음의 4부분으로 나뉘며, 이의 흐름도를 그림4에 나타내었다.

(1) 전동기 속도에대한 최적 lead angle설정 루틴(그림 4-(a)):

외부의 속도 검출 회로에서 5mS마다 검출되는 전진각을 읽어 들이는 루틴으로 외부 인터럽트 신호에 의해서 구동된다.

(2) 전동기 기동 루틴(그림 4-(b)):

전동기의 속도가 0pps로 설정된 범위에서 전동기를 기동시키기 위한 루틴이다.

(3) 최적 lead angle실행 루틴(그림 4-(c)):

전동기의 속도가 0pps로 설정된 범위 이상 올

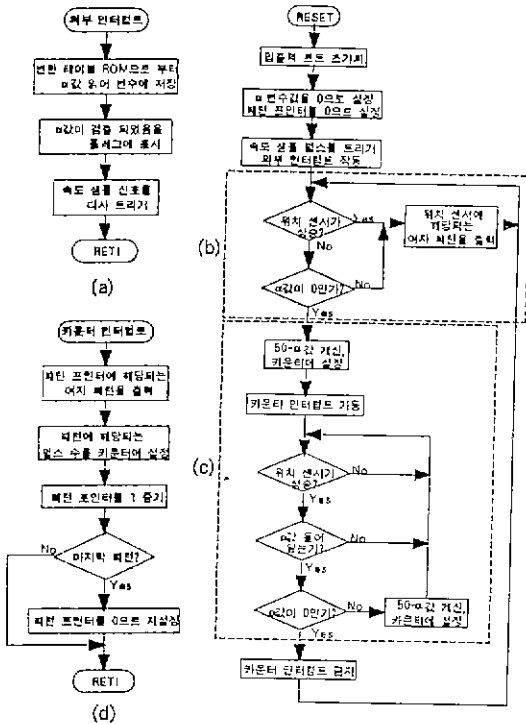


그림 4. 최적 lead angle 실험을 위한 흐름도
Fig 4 Flowchart of Optimal Lead Angle Realization

라가면 이 루틴이 실행되며, 변환 테이블 ROM으로 부터 읽어 들인 최적 lead angle을 실행하는 루틴으로, 최적 lead angle을 실현하는 원리를 그림5에 나타내었다.

자극 위치신호 P_1 의 상승 에지에서 현재의 전동기 속도 ω_e 에 해당하는 최적 lead angle의 변화값 α 를 변환 테이블 ROM으로 부터 읽어 들여 속도 인코더와 회전자 자극 위치 검출기 신호의 각각의 펄스수/Rev.으로 결정되는 값(50)으로 부터 최적 lead angle이 실현된 회전자 위치 신호 P_{10PT} , P_{20PT} 의 패턴을 생성 하므로써 매 회전자 자극 위치 신호마다 최적 lead angle을 실현한다.

(4) 전동기 패턴 출력 루틴(그림 4-(d)):

전동기의 회전자 자극 위치 검출기로부터의 신호 P_1 , P_2 와 전동기의 고정자 여자 펄스를 그림 6과 같이 패턴화 시켰으며, 이 루틴은 설정된 구동 모드에 따라 전동기가 다음 여자 패턴으로 넘어갈 때 실행되며, 내부의 타이머 인터럽트에 의해서 구동된다.

4. 실험결과 및 고찰

실험에 사용된 영구자석형 스테핑 전동기의 재원은 다음과 같다.

- 권선저항 $R = 38[\Omega]$
- 권선의 인덕턴스 $L = 116[mH]$
- 상전압 $V_n = 12[V]$
- 상의 수 $N = 4$
- 자극쌍수 $P = 12$

그림 7에는 고정자 코일의 역기전력 E_0 , E_1 ,

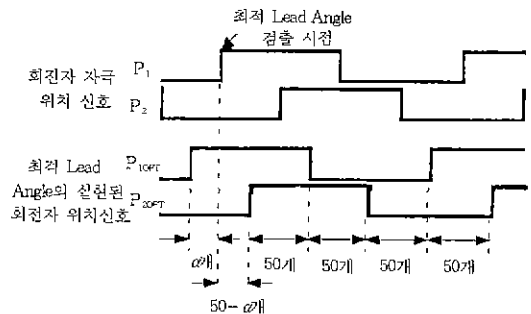


그림 5. 최적 lead angle 실현의 원리
Fig 5. Principle of Optimal Lead Angle Realization

E_2, E_3 파형을 도시 하였으며, 이 파형은 서로 90° 의 위상차를 갖는 정현파임을 확인할 수 있다.

그림 8은 회전자 자극 위치 신호 P_1, P_2 ,와 최적 lead angle이 실현된 회전자 위치신호 P_{1OPT}, P_{2OPT} 의 파형을 스테핑 전동기의 속도 ω_s 에 따라 도시한 파형으로, (a)는 25pps일 때 25.2도, (b)는 50pps일 때 43.2도, (c)는 100pps일 때 61.2도, (d)는 200pps일 때 75.6도 전진됨을 보여주고 있

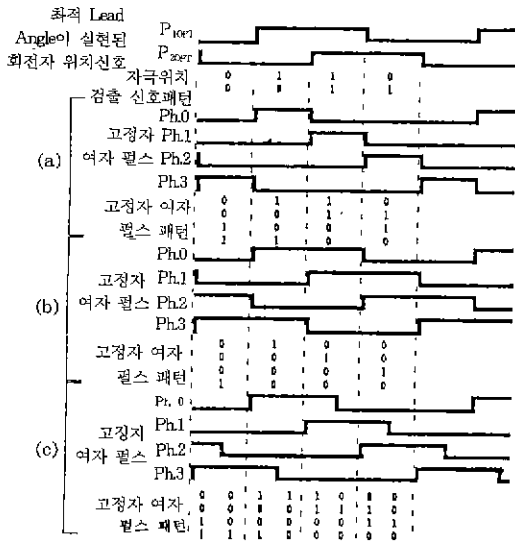
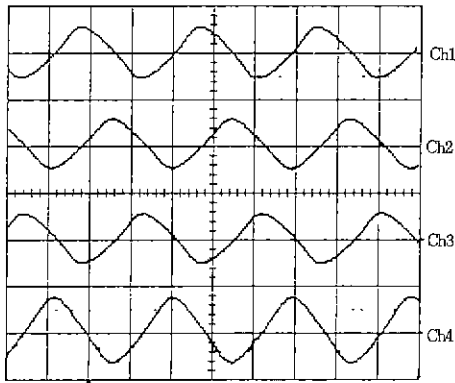


그림 6 고정자 여자 펄스의 패턴
Fig. 6 Patterns of Stator Excitation Pulse



(CH : E_0 , CH2 : E_1 , CH3 : E_2 , CH4 : E_3)
(CH : E_0 , CH2 : E_1 , CH3 : E_2 , CH4 : E_3)

그림 7. 고정자 코일의 역기전력 파형
Fig. 7. Back e.m.f of stator Coil

다.

식 (20), (31) 로 부터 실험에 사용된 스테핑 전동기에서 발생하는 총 평균 토오크 $\bar{T}_{i=1, 2, 1-2}$ 로 구동모드 표시)를 구하면 다음과 같다.

1상 구동 시 :

$$\bar{T}_1 = -2Kp \frac{R}{R^2 + \omega_s^2 L^2} \left[\frac{2V_s}{\pi} \sin \frac{\pi}{4} \{ \sin(-M) + \frac{\omega_s L}{R} \cos(-M) \} + K\omega_s \right]$$

2상 구동 시 :

$$\bar{T}_2 = -2Kp \frac{R}{R^2 + \omega_s^2 L^2} \left[\frac{2V_s}{\pi} \sin \frac{\pi}{2} \{ \sin(-M) + \frac{\omega_s L}{R} \cos(-M) \} + K\omega_s \right]$$

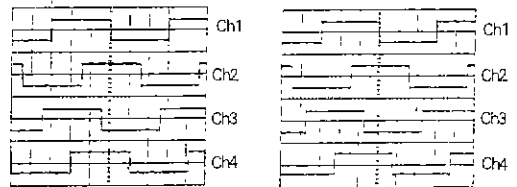
1-2상 구동 시 :

$$\bar{T}_{1-2} = -2Kp \frac{R}{R^2 + \omega_s^2 L^2} \left[\frac{2V_s}{\pi} \sin \frac{3\pi}{8} \{ \sin(-M) + \frac{\omega_s L}{R} \cos(-M) \} + K\omega_s \right] \quad (22)$$

또한 최적 lead angle을 행하지 않은 총 평균 토오크를 $\bar{T}_{i=0}$ ($i=1, 2, 1-2$ 로 구동 모드 표시)라 하면,

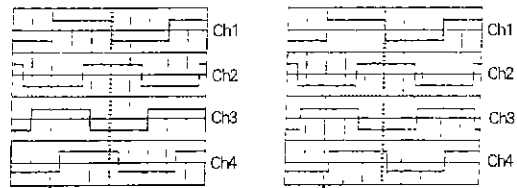
1상 구동 시 :

$$\bar{T}_{1,0} = -2Kp \frac{R}{R^2 + \omega_s^2 L^2} \left[-\frac{2V_s}{\pi} \sin \frac{\pi}{4} + K\omega_s \right]$$



(a)

(b)



(c)

(d)

(CH1 : P_1 , CH2 : P_2 , CH3 : P_{1OPT} , CH4 : P_{2OPT})
(CH1 : P_1 , CH2 : P_2 , CH3 : P_{1OPT} , CH4 : P_{2OPT})

그림 8. 회전자 위치 신호
Fig. 8. Waveforms of Stator Position Signal

2상 구동시 :

$$\bar{T}_{2,0} = -2Kp \frac{R}{R^2 + \omega_s^2 L^2} \left[-\frac{2V_s}{\pi} \sin \frac{\pi}{2} + K\omega_c \right]$$

1-2상 구동시 :

$$\bar{T}_{1-2,0} = -2Kp \frac{R}{R^2 + \omega_s^2 L^2} \left[-\frac{2V_s}{\pi} \sin \frac{3\pi}{8} + K\omega_c \right] \quad (23)$$

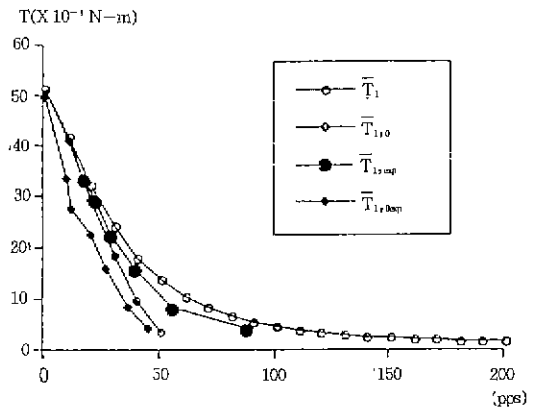
가 된다.

그림 9에 토오크/속도 곡선을 식 (22) 및 식 (23)의 이론식에 의한 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 실험에 의한 결과를 비교하여 도시 하였다. 그림에서 $\bar{T}_i (i=1,2, 1-2$ 로 구동모드 표시)는 최적 lead angle을 고려한 이론식에 의한 속도에 대한 총 평균 토오크 값이고, $\bar{T}_{i,0}$ 는 lead angle = $\pi/2$, 즉 최적 lead angle을 고려하지 않은 이론식에 의한 결과이며 $\bar{T}_{i,opt}$ 는 최적 lead angle 실현시의 실험에 의한 토오크 값이고, $T_{i,opt}$ 는 lead angle = $\pi/2$, 즉 최적 lead angle을 고려하지 않은 실험에 의한 측정 결과를 도시하였다.

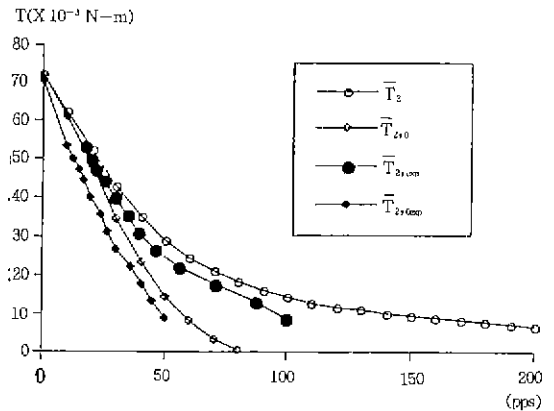
이 실험 결과에서 보면 실험에 의한 결과가 이론식에 근거한 값에 근사한 결과를 보여주고 있으며, 이론식에 의한 토오크/속도 곡선에서 최적 lead angle의 도입에 따라 발생 토오크가 증대되며, 운전영역이 2배이상 대폭 확대되는 바와 같이, 실험 결과에서도 최적 lead angle의 실현에 따라 구동모드에 관계없이 발생 토오크가 증대되며, 운전영역이 2배이상 확대됨을 보여주고 있다.

4. 결론

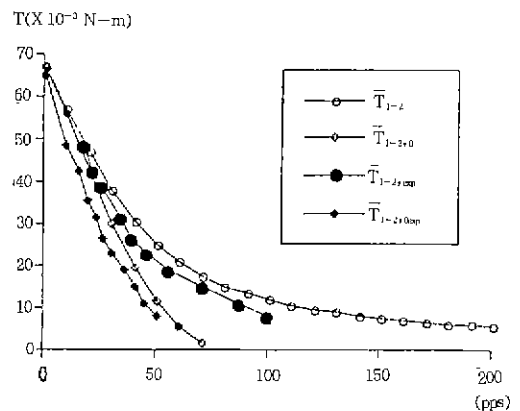
영구 자석형 스테핑 전동기의 인덕턴스를 고려하여 최대 평균 토오크를 발생하기 위한 조건 및 최대 평균 토오크 식을 유도 하였으며, 유도된 이론식에 근거하여 24극 4상 영구자석형 스테핑 전동기를 마이크로컨트롤러에 의해 고정자 여자 펄스의 위상 전진각을 전동기의 속도 ω_c 에 따라 최적으로 제어 하므로써 최대 토오크를 발생시키는 제어 시스템을 구성하여 전동기의 토오크/속도 특성 실험을 하였다.



(a) 1상 구동
(a) 1-Phase Excitation



(b) 2상 구동
(b) 2-Phase Excitation



(c) 1-2상 구동
(c) 1-2 Phase Excitation

그림 9. 이론식과 실험에 의한 토오크/속도 곡선
Fig 9 Theoretical and Experimental Torque VS Speed Curves

마이크로컨트롤러의 내부 인터럽트에 의해 여자 펄스의 패턴 발생, 속도 샘플 펄스 발생 및 속도 펄스의 카운트등을 처리 하므로서 초고속 영역까지 최적 lead angle의 실현이 가능하게 하였다.

상기 실현 방법에 의한 토크/속도 특성 실험 결과는 제시한 이론식에 유사한 특성을 보였으며, 이론식에 의한 토크/속도 곡선에서 최적 lead angle의 도입에 따라 발생 토크가 증대되며, 운전영역이 2배이상 대폭 확대되는 바와 같이, 특성 실험 결과에서도 최적 lead angle의 실현에 따라 구동모드에 관계없이 발생 토크가 증대되며, 운전영역이 2배이상 확대됨을 확인할 수 있다.

실험결과와 이론값과의 차이는 실험에 사용한 전동기와 측정장치 오차의 원인 이외에도, 최적 lead angle값이 단지 전동기의 속도 ω 뿐만 아니라 전동기의 부하량에 따라서도 영향을 받는 것으로 생각된다. 이러한 전동기 부하량이 고려된 이론식의 고찰과 더불어 전동기의 속도제어, 전류제어 회로도 보완한다면 한층 진보된 시스템이

될 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 1) Takashi Kenjo, "Stepping motors and their microprocessor controls," Clarendon Press, 1992
- 2) Fredriksen T.R., "Applications of the closed loop stepping motor," IEEE Trans. Automatic Control AC13, Vol.5, pp. 464~474, 1968
- 3) Shimotani K. & Kataoka T., "Improvement of a closed-loop stepping motor by excitation methods," Trans Institute of Electrical Engineers of Japan 96B, Vol. 6, pp.299~306, 1976.
- 4) Simyou Palmn, "Optimization of stepper motor performance," Proceedings. MOTOR-CON, pp.95~103, October 1986
- 5) Albert C Leenhouts, "The effect of inductance on step motor performance," Proceedings. MOTOR-CON, pp.89~94, October 1986.
- 6) Benjamin C.Kuo "Step motors and control systems," SRL Publishing Company, Vol II, 1979
- 7) Benjamin C. Kuo, "Theory and applications of Step motors," West Publishing Co, 1974

◆ 著者紹介 ◆



우 광 준(禹廣俊)
 1946年 11月 8日生. 1974年 漢陽大 電子工學科 卒. 1977年 漢陽大 大學院 電子工學科 卒(碩士). 1980年 Univ. de Strasbourg I 電子計測工學(D.E.A) 1983年 Institut National Polytechnique de Grenoble 計測制御(Docteur ingenieur) 現在, 檀國大學校 電子工學科 教授.



이 현 창(李現彰)
 1964年 11月 6日生. 1986年 檀國大 電子工學科 卒. 1989年 檀國大 大學院 電子工學科 卒(碩士). 1992年 檀國大 大學院 電子工學科 博士 修了



이 종 언(李鍾彦)
 1953年 5月 15日生. 1979年 明知大 電氣工學科 卒. 1981年 漢陽大 大學院 電氣工學科 卒(碩士). 現在, 檀國大學校 大學院 電子工學科 博士課程 天安 工業專門大學 電氣科 教授