

Lead Angle 제어에 의한 복권형 하이브리드 스테핑 전동기의 상전류 변화에 관한 연구

(Phase Current Variation of Bifilar-Wound Hybrid Stepping Motor by Lead Angle Control)

우광준* · 이종언**

(Kwang-Joon Woo · Jong-Eon Lee)

요 약

본 연구에서는 복권형 하이브리드 스테핑 전동기의 Lead Angle에 따른 순시 상전류값의 변화를 보이고 이를 실험적으로 확인하였다. Lead Angle에 따른 순시 상전류값의 변화는 상권선이 여기된 시점에서의 회전자 위치에 대한 정보를 제공한다. 따라서 복권형 하이브리드 스테핑 전동기의 폐루프 운전을 위한 회전자 위치검출 방법으로서 전동기의 순시 상전류를 이용할 수 있음을 보였다. 복권형 하이브리드 스테핑 전동기의 모델링을 통해 Lead Angle 함수로 주어지는 순시 상전류 식을 제시하였으며, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 순시 상전류와 회전자 자극위치와의 관계를 도식하고 분석하였고, 상전압 인가후 $\pi/2$ 시점에서의 순시 상전류값을 측정하여 회전자 자극위치 정보를 얻을 수 있음을 실험적으로 확인하였다.

Abstract

In this paper, we confirm that the instantaneous phase current of the bifilar-wound hybrid stepping motor is dependent of lead angle by the experimental results. The variation of phase current with lead angle gives informations about the rotor position at the moment when phase winding coil is excited. We show that the rotor position of the bifilar-wound hybrid stepping motor for the closed-loop drives can be detected by using the instantaneous phase current measurement. We propose an instantaneous phase current equation as the function of electrical lead angle by the modeling of the bifilar-wound hybrid stepping motor.

We also analyze the relationship between instantaneous phase current and rotor position by the computer simulation results. By the experimental results, we also confirm that the information about the rotor position can be obtained from the instantaneous phase current values at the instance of $\pi/2$ electrical angle of excitation pulse.

*정회원 : 단국대학교 전자공학과 교수

접수일자 : 1997. 11. 21

**정회원 : 천안공업전문대학 전기과 교수

I. 서론

스테핑 전동기는 속도 및 위치 제어가 용이하기 때문에 광범위한 분야에 사용되고 있다. 스테핑 전동기는 회전자 구조에 따라 영구자석형, 가변 릴럭턴스형, 하이브리드형으로 나누어진다.

스테핑 전동기의 운전방법(Operation Mode)으로는 제어기의 단순함과 조작의 간편함으로 인하여 과부하의 위험이 없는 시스템에 대해서는 개루프 운전 방법을 주로 택하고 있다. 그러나 개루프 운전은 지령 펄스의 주파수가 높거나 과부하시에는 지령 펄스에 응답하지 못할 수도 있으며, 또한 토크 리플이 크게 나타나는 단점이 있다. 따라서 이러한 단점들을 보완하기 위해 스테핑 전동기의 회전자 위치를 검출하여 이에 상응하는 고정자의 상을 여자시키는 폐루프 운전방법을 사용한다[1].

폐루프 운전을 행하기 위해서는 회전자 위치 검출기를 필요로 하는데, 이러한 회전자 위치 검출기를 사용하지 않고 회전자 자극 위치를 검출하기 위한 연구가 수행되었다[2~3]. 영구자석형 스테핑 전동기에서는 여기되지 않은 상에서 역기전력을 검출하여 회전자의 위치를 검출하며, 가변 릴럭턴스형 스테핑 전동기에서는 릴럭턴스의 변화에 따른 전압과 전류의 변화를 측정하여 회전자의 위치를 검출하는 방법이 연구되었다[4].

그러나 복권형 하이브리드 스테핑 전동기에서는 역기전력이나 릴럭턴스 변화를 검출할 수가 없다. 따라서 본 논문에서는 복권형 하이브리드 스테핑 전동기의 폐루프 운전을 위한 회전자 위치 검출 방법으로 전동기의 상전류를 이용할 수 있음을 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 보였으며, 이를 실험적으로 확인하였다. Lead Angle에 따른 순시 상전류값의 변화는 상권선이 여기된 시점에서의 회전자 위치에 대한 정보를 제공한다. 따라서 복권형 하이브리드 스테핑 전동기의 폐루프 운전을 위한 회전자 위치검출 방법으로서 전동기의 순시 상전류를 이용할 수 있다. 이러한 원리에 의하여 복권형 하이브리드 스테핑 전동기의 모델링을 통해 Lead Angle 함수로 주어지는 순시 상전류식을 제시하였으며, 컴퓨터 시뮬레이션

을 통해 상전류와 회전자 자극 위치와의 관계도를 도시하고 분석하였고 실험적으로 확인하였다. 상전압 인가 후 $\pi/2$ 시점에서의 상전류값을 측정하여 회전자 자극 위치 정보를 얻을 수 있음을 실험적으로 확인하였다.

II. 하이브리드 스테핑 전동기의 순시 전류 해석

본 연구에서 도입한 전동기는 2상 복권형 하이브리드 스테핑 전동기이며, 2상 구동으로 해석한다.

임의의 전동기 권선 k상에서의 전압-전류 관계는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$v_k = R_k \cdot i_k + \dot{\lambda}_k \tag{1}$$

여기서,

v_k : k상에 인가된 전압

i_k : k상에 흐르는 전류

R_k : k상의 권선 저항

$\dot{\lambda}_k$: k상의 쇄교 자속의 시간에 대한 미분량이다.

그림 1에 2상 복권형 하이브리드 스테핑 전동기의 구조를 나타내었다.

그림 1에서, 2상 복권형 하이브리드 스테핑 전동기는 a상과 c상이 하나의 치극에 복권형으로 구성되고, b상과 d상도 이웃하는 하나의 치극에 복권형으로 구성되어 있다. 이를 그림 1에 나타내었다.

따라서 a상과 c상, b상과 d상 사이에는 완전 자

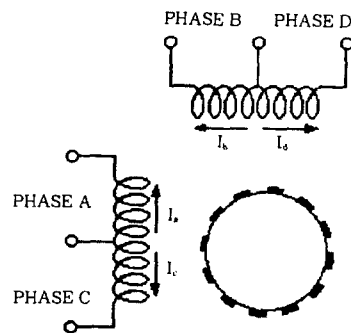


그림 1. 2상 복권형 하이브리드 스테핑전동기의 구조
Fig. 1. Structure of the Bifilar-wound Hybrid Stepping Motor

속결합이 이루어지고, 치극으로 구분된 a-c 권선쌍과 b-d 권선 쌍 사이에는 자속결합이 이루어지지 않는다. 그러므로 임의의 k상 쇄교자속은 권선에 흐르는 전류와, 권선쌍을 이루는 다른 쪽에 흐르는 전류와, 그리고 회전자의 영구자석에 의해 발생되며, 그 관계식을 다음에 나타내었다.

$$\begin{aligned} \lambda_a &= \lambda_{aa} + \lambda_{ac} + \lambda_{aj} \\ \lambda_b &= \lambda_{bb} + \lambda_{bd} + \lambda_{bj} \\ \lambda_c &= -\lambda_a \\ \lambda_d &= -\lambda_b \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,

λ_k : k상의 쇄교 자속

λ_{kj} : j상에 흐르는 전류에 의해 발생한 k상의 쇄교 자속

λ_{kk} : 회전자의 영구자석에 의해 발생한 k상의 쇄교 자속이다.

또한 자기 포화가 발생하지 않고 와전류가 없으며 각 상들의 인덕턴스가 모든 k상에서 $L_k=L$ 와 같이 모두 같다고 가정하면, 자기 인덕턴스에 의한 쇄교자속과 반대 상의 쇄교자속은 다음과 같다.

$$\lambda_{kk} = Li_k \quad (3a)$$

$$\lambda_{jk} = -\lambda_{kk} \quad (3b)$$

여기서, k상과 j상은 치극에 구성되어 있고, 식 (3a)와 (3b)에 나타난 쇄교 자속과 전류와의 관계에 의해 식 (2)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\lambda_a = L(i_a - i_c) + \lambda_{aj} \quad (4a)$$

$$\lambda_b = L(i_b - i_d) + \lambda_{bj} \quad (4b)$$

또한 회전자의 영구자석에 의해 발생한 a상과 b상의 쇄교자속은 식 (5)와 같이 표시 할 수 있다.

$$\lambda_{af} = k_f \cos(\theta) \quad (5a)$$

$$\lambda_{bf} = k_f \sin(\theta) \quad (5b)$$

여기서,

k_f : 회전자 영구자석의 자속상수 (flux constant)

θ : 전기각으로서 회전자 각 위치이며,

$$\theta = N_{teeth} \cdot \theta_m$$

θ_m : 회전자의 기계각

N_{teeth} : 회전자의 치극수 이다.

식 (1), (2) 및 (4)로부터 다음 식 (6)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}_a &= \frac{1}{2} v_a \left[1 - \frac{R_a - R_c}{R_a + R_c} \right] \\ &\quad - \frac{1}{2} v_c \left[1 + \frac{R_a - R_c}{R_a + R_c} \right] - \frac{R_a R_c (\lambda_a - \lambda_{af})}{L(R_a + R_c)} \end{aligned} \quad (6a)$$

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}_b &= \frac{1}{2} v_b \left[1 - \frac{R_b - R_d}{R_b + R_d} \right] \\ &\quad - \frac{1}{2} v_d \left[1 + \frac{R_b - R_d}{R_b + R_d} \right] - \frac{R_b R_d (\lambda_b - \lambda_{bf})}{L(R_b + R_d)} \end{aligned} \quad (6b)$$

한편 정전압 구동에서 상 저항은 k상이 여기되었을 때 상 저항이 권선 저항 r_0 와 트랜지스터 on저항 r_q 의 합으로 나타나고, k상이 여기되지 않았을 때는 상 저항이 권선 저항 r_0 와 트랜지스터와 거의 무한대인 다이오드 off저항 r_∞ 의 합으로 된다. 또한, k상 도통 역전류가 흐를 때는 상 저항이 r_0 와 다이오드 on저항 r_d 의 합으로 된다. 권선의 상태는 위 세가지 경우로 한정된다. 식 (6a)에서 권선을 정전압 구동 상태로 가정한다면,

$$\frac{R_a - R_c}{R_a + R_c} = \begin{cases} -1: \text{상 } a \text{가 여기되면,} \\ \quad R_0 = r_0 + r_q \approx r_0 \\ \quad R_c = r_0 + r_\infty \approx r_\infty \\ +1: \text{상 } c \text{가 여기되면,} \\ \quad R_a = r_0 + r_\infty \approx r_\infty \\ \quad R_c = r_0 + r_q \approx r_0 \end{cases} \quad (7)$$

로 되며, 각 상 전원은 단일 정전압원을 사용하므로, $v_a = v_c = V_s$ 가 되어 식 (8)과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{\lambda}_a = -\frac{r_0}{L} (\lambda_a - \lambda_{af}) \pm V_s \quad (8a)$$

$$\dot{\lambda}_b = -\frac{r_0}{L} (\lambda_b - \lambda_{bf}) \pm V_s \quad (8b)$$

Lead Angle γ 는 a상이 여기되는 회전자 각도, 즉 평형점에서 a상이 여기되는 위치까지 측정된 전기각 또는 스텝으로써 정의한다.

순환 정상상태(Cyclic Steady State)로부터 각 상들간 함수들의 위상관계는 $\pi/2$ 의 위상차가 있을 뿐 크기는 같다. 전동기의 각속도가 일정하다면, 시간함수를 위치함수로 변환할 수 있고, 이는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \text{constant}, \quad \frac{d\lambda_a}{dt} = \frac{d\theta}{dt} \frac{d\lambda_a}{d\theta} = \omega \frac{d\lambda_a}{d\theta}$$

$$\omega \dot{\lambda}_a(\theta) = -\frac{r_0}{L}(\lambda_a(\theta)) - \lambda_{ar}(\theta) \pm V_{sa}(\theta) \quad (9)$$

여기서, $\dot{\lambda}_a(\theta) = \frac{d\lambda_a}{d\theta}$ 이다.

식 (9)로부터 λ_a 와 λ_b 를 푸리에 급수로 나타내고 이를 위치의 미분 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{\lambda}_a(\theta) = \sum_{m=1}^{\infty} (-m\lambda_{Am}\sin(m\theta) + m\lambda_{Bm}\cos(m\theta)) \quad (10a)$$

$$\dot{\lambda}_b(\theta) = \sum_{m=1}^{\infty} (-m\lambda_{Cm}\sin(m\theta) + m\lambda_{Dm}\cos(m\theta)) \quad (10b)$$

a상 구동함수를 푸리에 급수로 표현하면 다음과 같다.

$$V_{sa}(\theta) = V_{sA0} + V_{sA1}\cos(\theta) + V_{sB1}\sin(\theta) + \dots$$

$$= V_{sA0} + \sum_{m=1}^{\infty} (V_{sAm}\cos(m\theta) + V_{sBm}\sin(m\theta)) \quad (11)$$

여기서,

$$V_{sAm} = \frac{1}{\pi} \int_r^{r+2\pi} V_{sa}(\theta)\cos(m\theta)d\theta \quad (12a)$$

$$V_{sBm} = \frac{1}{\pi} \int_r^{r+2\pi} V_{sa}(\theta)\sin(m\theta)d\theta \quad (12b)$$

이다.

식 (12a)와 (12b)로 부터 푸리에 계수들을 구하여 식 (11)에 대입한 푸리에 급수 형태의 a상 구동함수는 다음과 같다.

$$V_{sa}(\theta) = \sum_{m=1}^{\infty} (V_{sAm}\cos(m\theta) + V_{sBm}\sin(m\theta))$$

$$= \sum_{m=2n-1}^{\infty} \frac{4V_s}{m\pi} (-\sin(m\gamma)\cos(m\theta) + \cos(m\gamma)\sin(m\theta)) \quad (13)$$

$$= \sum_{m=2n-1}^{\infty} \frac{4V_s}{m\pi} \sin(m(\theta-\gamma))$$

여기서, $n=1, 2, 3, \dots$ 이다.

식 (9)에 (4a), (10a) 및 식 (13)을 대입하면 다음과 같다.

$$\omega \dot{\lambda}_a(\theta) = -\frac{r_0}{L} \{ \lambda_{A0} + \sum_{m=1}^{\infty} (\lambda_{Am}\cos(m\theta) + \lambda_{Bm}\sin(m\theta)) \} - \frac{r_0}{L} \{ -k_a\cos(\theta) \}$$

$$\pm \sum_{m=1}^{\infty} (V_{sAm}\cos(m\theta) + V_{sBm}\sin(m\theta)) \quad (14)$$

식 (14)에서 각 계수를 푸리에 급수의 직교성을 이용해 구하고 이를 식 λ_a 와 λ_b 에 대입하면 다음과 같다.

$$\lambda_a(\theta) = \frac{4V_s}{\pi} \sin(\theta - \gamma - \phi) + \frac{r_0}{L} k_a \cos(\theta - \phi)$$

$$+ \sum_{m=2n-1}^{\infty} \frac{4V_s}{m\pi} \sin(m(\theta - \gamma) - \phi_m) \quad (15)$$

여기서,

$$\phi_m = \tan^{-1} \left(\frac{m\omega L}{r_0} \right)$$

이다.

a상의 시간에 관한 전류-전압식은 식 (5)와 같이 주어지므로 위치 함수로 변환하면 다음과 같다.

$$i_a(\theta) = \frac{1}{r_0} (V_{sa}(\theta) - \omega \lambda_a(\theta)) \quad (16)$$

식 (16)에 식 (13), (15)를 대입하면 다음과 같다.

$$i_a(\theta) = \frac{1}{r_0} \sum_{m=2n-1}^{\infty} \{ (V_{sAm} - \omega m \lambda_{Bm}) \cdot \cos(m\theta) + (V_{sBm} + \omega m \lambda_{Am}) \cdot \sin(m\theta) \}$$

$$= \sum_{m=2n-1}^{\infty} \frac{-4V_s}{r_0 m \pi} \{ \sin(m\gamma) - \omega m \cos(m\gamma + \phi_m) \} \cdot \cos(m\theta)$$

$$+ \sum_{m=2n-1}^{\infty} \frac{4V_s}{r_0 m \pi} \{ \cos(m\gamma) - \omega m \sin(m\gamma + \phi_m) \} \cdot \sin(m\theta) \quad (17)$$

여기서,

$$Z_m = \sqrt{\omega^2 m^2 + \frac{r_0^2}{L^2}}$$

이다.

식 (17)의 순시 전류식은 전압 인가각인 Lead Angle γ , 회전자 각속도 ω , 회전자의 위치 θ 로 주어진 함수로서 회전자 위치 정보를 포함하고 있다. 따라서 뚜렷한 회전자 위치 정보를 얻기 위하여 전압 인가후 $\pi/2$ 시점의 전류, 즉 $i_a(\gamma + \pi/2)$ 를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} i_a(\gamma + \pi/2) = & \sum_{m=2n-1}^{\infty} \frac{-4V_s}{r_0 m \pi} \{ \sin(m\gamma) \\ & + \omega m \cos(m\gamma + \phi_m) \} \cdot \cos(m\gamma + n\pi - \pi/2) \\ & + \sum_{m=2n-1}^{\infty} \frac{4V_s}{r_0 m \pi} \{ \cos(m\gamma) \\ & - \omega m \sin(m\gamma + \phi_m) \} \cdot \sin(m\gamma + n\pi - \pi/2) \end{aligned} \quad (18)$$

전압 인가각인 Lead Angle γ 는 회전자 자극 위치를 기준으로 정의된 각이므로, 회전자 위치 정보는 Lead Angle γ 로 부터 구할 수 있다. 따라서 식 (17)의 순시 전류식에 전동기 파라미터를 대입하고 일정 각속도로 운전하는 경우의 Lead Angle γ 에 대한 $\gamma + \pi/2$ 시점의 순시 상전류값은 고유의 값을 가지게 된다.

III. 컴퓨터 시뮬레이션

식 (17) 및 식 (18)과 같이 수식적으로 표현된 전류식을 MATLAB을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 일정한 전동기의 속도에서 Lead Angle 변화에 따른 전류파형을 나타내었다. 시뮬레이션에 이용된 전동기는 본 연구의 실험에 사용된 복권형 하이브리드 스텝핑 전동기로서 그의 특성 파라미터는 표 1과 같다.

그림 2에는 전동기의 속도 $f=150\text{PPS}$ 에서, 그림 3에는 전동기의 속도 $f=200\text{PPS}$ 에서 각각 Lead Angle 변화에 대한 순시 상전류 파형을 나타내었다.

시뮬레이션 결과를 살펴보면, Lead Angle이 변화

함에 따라 전류파형의 변화가 뚜렷이 나타나며, 특히 $\pi/2$ 지점에서의 전류변화가 확실하게 나타남을 알 수 있다. 따라서, Lead Angle 변화에 따른 정확한 상전류 변화를 알아내기 위해서는 $\pi/2$ 지점의 전류를 추출하는 것이 유리함을 알 수 있다.

표 1. 사용된 스텝핑 전동기의 제원

Table 1. Parameters of Hybrid Stepping Motor

제작사	Oriental Motor Co., Japan
Model	VEXTA PH264-02
분해능	1.8[deg/step]
V_s	12[V]
r_0	30[Ω]
L	50[mH]
k_0	7.2[mV/(rad/s)]

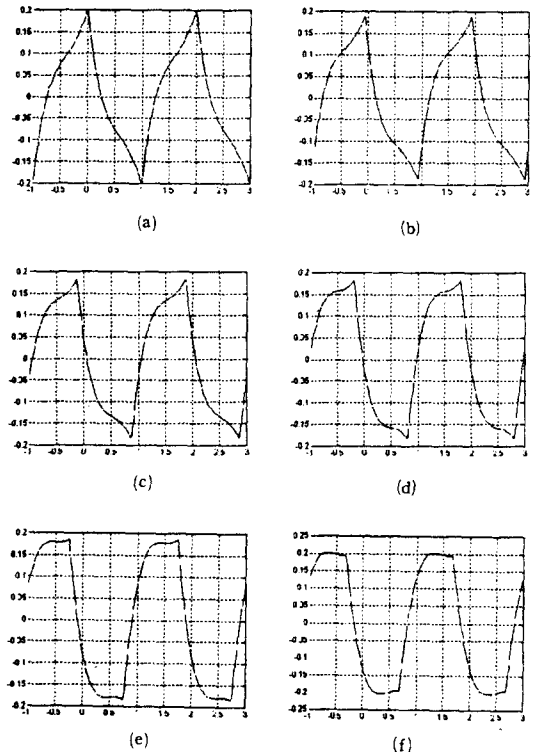


그림 2. 시뮬레이션에 의한 순시 상전류 파형

($f=150\text{PPS}$)

Fig. 2. Instantaneous Phase Current Waveforms by Simulation Results($f=150\text{PPS}$)

Lead Angle (a) $\gamma=0.95\pi$ rad (b) $\gamma=1\pi$ rad
(c) $\gamma=1.05\pi$ rad (d) $\gamma=1.1\pi$ rad
(e) $\gamma=1.15\pi$ rad (f) $\gamma=1.2\pi$ rad

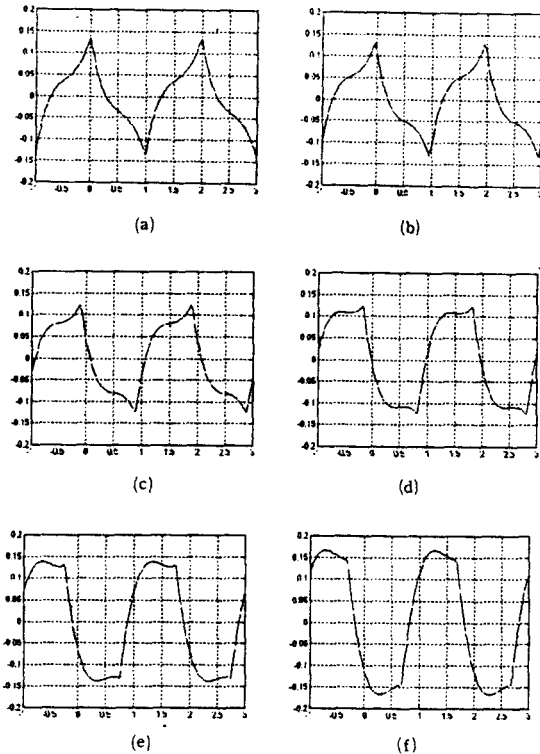


그림 3. 시뮬레이션에 의한 순시 상전류 파형 ($f=200\text{PPS}$)

Fig. 3. Instantaneous Phase Current Waveforms by Simulation Results ($f=200\text{PPS}$)
 Lead Angle (a) $\gamma=0.95\pi$ rad (b) $\gamma=1\pi$ rad
 (c) $\gamma=1.05\pi$ rad (d) $\gamma=1.1\pi$ rad
 (e) $\gamma=1.15\pi$ rad (f) $\gamma=1.2\pi$ rad

IV. 실험 및 고찰

앞에서 살펴본 바와 같이, 스텝핑 전동기에 인가되는 상전압의 위치에 따라 변화되는 상전류의 변화를 실험적으로 확인하기 위하여 그림 4와 같이 회로를 구성하였다.

그림 4에서, 실험에 사용된 스텝핑 전동기의 회전자 위치 정보를 얻기 위하여 인크리멘탈형 옵티컬 인코더를 부착하여 전동기의 회전자 위치 정보를 얻었다. 그림 5의 파형들은 스텝핑 전동기와 옵티컬 인코더의 파형을 나타낸 것이다. 그림에서 살펴보면, 스텝핑 전동기의 인가 파형과 옵티컬 인코더의 파형은 동일하다. 즉, 옵티컬 인코더의 출력신호는 스텝

핑 전동기의 상권선 여기위치(또는 회전자의 위치)와 동일하다. 이러한 파형들은 스텝핑 전동기의 규격상으로는 90도에 해당하는 파형이 1스텝을 나타내고, 옵티컬 인코더의 규격으로는 360도에 해당하는 파형이 하나의 분해능이 되므로, 전동기의 회전자 위치 정보를 얻기 위해서 옵티컬 인코더의 분해능은 스텝핑 전동기 분해능의 1/4 분해능을 가진 것을 사용해야 한다.

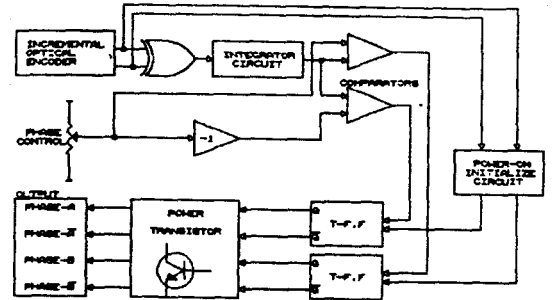


그림 4. 실험 회로의 블럭도
 Fig. 4. Block Diagram of Experiment Circuit

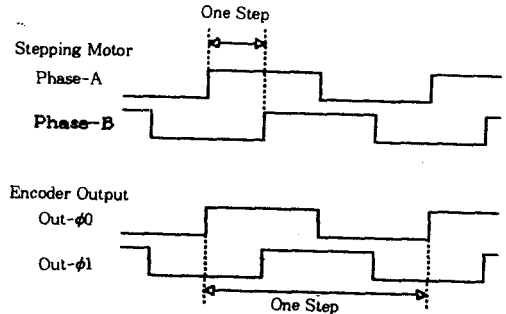


그림 5. 옵티컬 인코더의 분해능
 Fig. 5. Resolution of the Optical Encoder

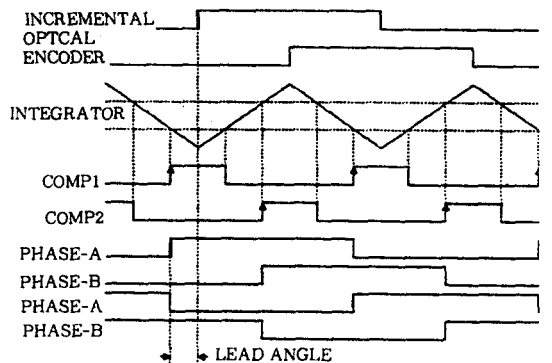


그림 6. 실험 회로의 각부 파형
 Fig. 6. Waveforms of Experiment Circuit

이와같은 회로에 의해 발생되는 각부의 파형을 그림 6에 나타내었다.

그림 6에서, 옵티컬 인코더에서 발생되는 신호는 실제의 상권선 여자 시점이고, 이 파형을 처리하여 PHASE-A에서는 목적하는 Lead Angle만큼의 위상이 전진되어 나타난다.

상기의 실험 회로를 이용하여 전동기를 일정 각속도로 운전하는 상태에서 Lead Angle을 변화시켜 그림 7, 8과 같은 전류 파형을 얻었다.

이들 전류파형들에서 $\gamma + \pi/2$ 지점에서의 전류값을 표 2에 나타내었으며, 그래프로 나타내면 그림 9, 10과 같다.

그림 9, 10에 나타난 바와 같이, Lead Angle 변화에 대한 $\gamma + \pi/2$ 지점에서의 순시 상전류 이론값은 역여현 함수와 유사한 특성을 가지고 있음을 알 수

있다.

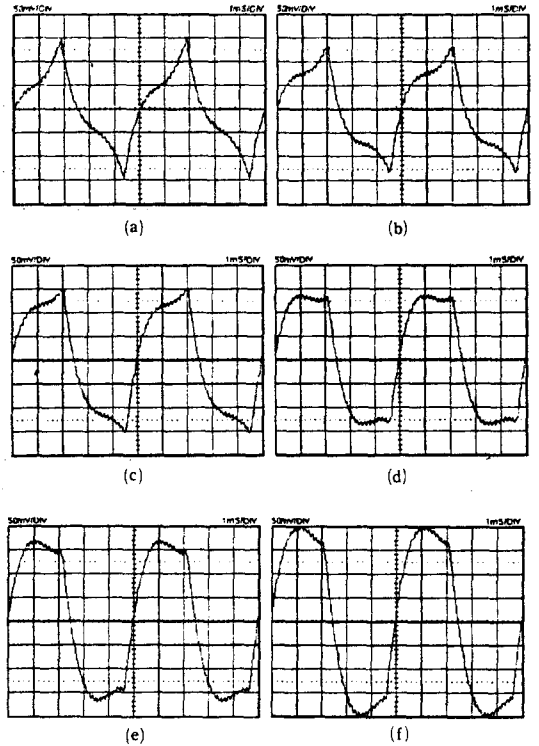


그림 8. 실험에 의한 순시 상전류 파형($f=200\text{PPS}$)
 Fig. 8. Instantaneous Phase Current Waveforms by Experimental Results($f=200\text{PPS}$)
 Lead Angle (a) $\gamma=0.95\pi$ rad (b) $\gamma=1\pi$ rad
 (c) $\gamma=1.05\pi$ rad (d) $\gamma=1.1\pi$ rad
 (e) $\gamma=1.15\pi$ rad (f) $\gamma=1.2\pi$ rad

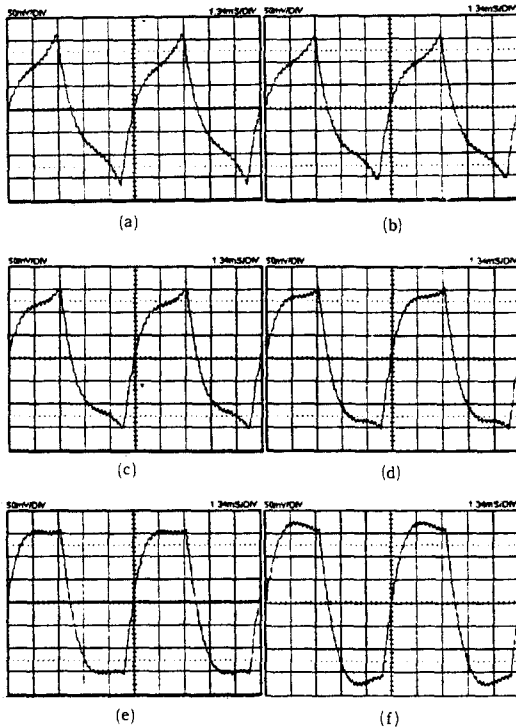


그림 7. 실험에 의한 순시 상전류 파형($f=150\text{PPS}$)
 Fig. 7. Instantaneous Phase Current Waveforms by Experimental Results($f=150\text{PPS}$)
 Lead Angle (a) $\gamma=0.95\pi$ rad (b) $\gamma=1\pi$ rad
 (c) $\gamma=1.05\pi$ rad (d) $\gamma=1.1\pi$ rad
 (e) $\gamma=1.15\pi$ rad (f) $\gamma=1.2\pi$ rad

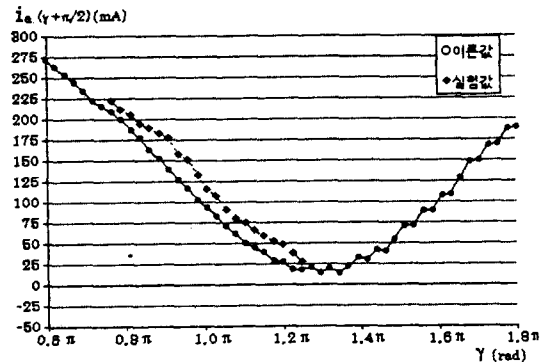


그림 9. $\gamma + \pi/2$ 지점에서의 순시 상전류값($f=150\text{ PPS}$)
 Fig. 9. Instantaneous Phase Current Values at $\gamma + \pi/2$ ($f=150\text{ PPS}$)

표 2. $\gamma + \pi/2$ 지점에서의 전류값
Table 2. Current at the point of $\gamma + \pi/2$

γ (π rad)	$i_a(\gamma + \pi/2)$ (mA)			
	150 PPS		200 PPS	
	이론값	실험값	이론값	실험값
0.7888	200.2	212.3	224.1	238.2
0.8128	187.1	205.4	215.4	228.3
0.8372	177.1	194.5	203.0	215.1
0.8611	163.5	188.9	189.9	199.2
0.8850	152.7	183.0	178.5	192.4
0.9094	138.8	177.5	164.5	184.8
0.9333	127.8	157.6	151.5	175.3
0.9572	117.0	150.6	136.8	167.8
0.9817	103.2	132.3	121.6	149.1
1.0056	92.9	116.0	106.2	130.5
1.0294	83.5	107.9	91.9	122.8
1.0539	70.6	90.7	77.6	97.5
1.0778	62.5	80.4	63.4	90.1
1.1017	50.4	75.2	49.6	70.9
1.1261	44.3	65.8	36.5	50.6
1.1500	39.6	59.6	21.7	32.5
1.1739	29.4	52.4	9.9	24.2
1.1983	27.2	48.5	-0.5	17.2
1.2222	18.3	38.2	-9.7	7.3

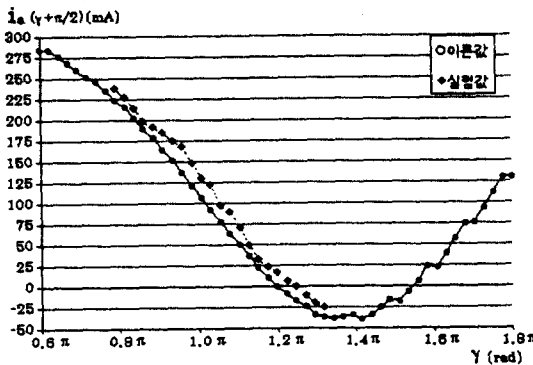


그림 10. $\gamma + \pi/2$ 지점에서의 순시 상전류값 ($f=200$ PPS)
Fig. 10. Instantaneous Phase Current Values at $\gamma + \pi/2$ ($f=200$ PPS)

실험은 전동기가 원하는 방향 즉, 정방향으로 회전할 수 있는 Lead Angle 영역에서 이루어졌으며, 이 보다 작은 Lead Angle 영역에서는 전동기의 평형점에 근접하기 때문에 정방향으로의 발생 토오크

와 역방향으로의 발생 토오크가 유사한 크기로 발생되어 상전류의 크기는 대폭 증가하지만, 원하는 방향 즉, 정방향으로는 회전을 하지 못하고 진동상태에 머문다. 또한 Lead Angle이 지나치게 큰 영역에서는 전동기의 역방향으로의 발생 토오크가 증가하여 역방향으로 회전을 하며, 따라서 이는 앞서의 조건인 일정 각속도 조건에서 벗어나므로 실험에서 제외하였다.

그림에서, 이론값과 실험값은 약간 차이가 발생하는데, 이는 전동기의 여러가지 요인, 특히 특정 위치에서 전동기의 진동등의 영향과 전동기 파라미터의 차이, 전류 측정오차등에 의한 것으로 생각되며, 전류값이 약간의 차이를 보이고 있지만, 전체적인 전류값의 변화 성향은 유사한 것으로 나타났다.

따라서 전동기의 동작 상태에 따라 세부분의 Lead Angle 영역으로 구분할 수 있으므로 전동기가 진동상태로 동작할 경우는 Lead Angle이 평형점 부근 영역에 존재함을 의미하고, 전동기가 역방향으로의 회전 토오크가 발생할 시는 Lead Angle이 지나치게 큰 영역에 존재함을 의미한다. 또한 전동기가 정방향 즉, 원하는 방향으로 회전 토오크가 발생하는 범위내에서는 각 Lead Angle에 따라 이에 대응하는 순시 상전류값을 지니고 있음을 알 수 있으며, 따라서 임의의 전동기에서 이러한 전류정보를 얻어내면, 이 전류량을 이용하여 역으로 전동기의 회전자 위치정보를 얻어낼 수 있는 가능성을 보여준다.

V. 결 론

스테핑 전동기를 페루프로 운전함에 있어서 회전자의 위치에 따른 해당 상권선의 여기를 위해 회전자 위치 검출기가 필수적이다. 그러나 각 회전자 위치에 따른 상권선 전류를 살펴보면 각 회전자 위치에 따라 상권선 전류의 변화가 나타남을 본 연구에서 확인하였다. 따라서 이러한 상권선 전류의 변화로부터 역으로 회전자 위치 정보를 얻어낼 수 있다. 이러한 회전자 위치 정보를 얻어낼 수 있다면 스테핑 전동기를 페루프로 운전함에 있어서 회전자 위치 검출기를 생략할 수 있으므로, 기존의 개루프 운전

으로 사용하던 스테핑 전동기에 물리적인 회전자 위치 검출기 없이도 페루프 운전을 행할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 하이브리드 스테핑 전동기의 Lead Angle 변화에 대한 상전류의 변화 정도를 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 보이고 이를 실험적으로 확인하였다. Lead Angle 변화에 따른 상전류의 변화는 상권선이 여기된 시점에서의 회전자 위치에 대한 상전류 변화를 의미하고, 따라서 이러한 전류 변화 정보를 이용하면 회전자 위치 정보를 얻을 수 있음을 의미한다. 순시 상전류값 변화에 대한 이론적 해석을 통하여 순시 상전류식을 유도하고 Lead Angle에 따른 순시 상전류값을 MATLAB을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 구하였으며, 이를 실험적으로 확인하였다.

실험 결과에 의하면, 전동기가 정방향으로 회전 토오크가 발생시에는 각 Lead Angle에 따라 이에 대응하는 순시 상전류값이 존재하며, 따라서 이러한 전류 정보를 이용하여 전동기의 회전자 위치 정보를 얻을 수 있는 가능성을 제시하였다. 그리고 회전자 위치 정보는 상전류 검출의 정밀도에 따라서 그만큼 더욱 정밀한 회전자 위치를 얻어낼 수 있으므로, 정밀한 상전류 검출이 이루어진다면 스테핑 전동기를 페루프 운전시에 회전자 위치 검출기를 생략할 수 있는 가능성도 아울러 제공된다.

차후의 연구과제로 복권형 Hybrid-Stepping Motor에 대해 부하를 고려한 Lead Angle에 따른 순시 상전류식의 유도 및 실험과 이를 이용한 Rotor position sensorless controller의 구성을 연구중에 있다.

참 고 문 헌

- [1] Takahashi Kenjo, "Stepping motors and their micro-processor controls," Clarendon Press, 1992.
- [2] M. Schroel, "An improved position estimator for sensorless controlled permanent magnet synchronous motors," EPE Firenze, Vol. 3, pp.418~423, 1991.
- [3] N.M. Mvungi & J.M. Stephensen, "Accurate sensorless rotor position detection in an SR motor," EPE Firenze, Vol. 1, pp.390~393, 1991.
- [4] Hi-Dong Chai, "Cogging Torque of PM Step Motors," IMCSD 13th Proc., pp.163~166, MAY, 1984.

- [5] Albert C. Leenhououts, "Step Accuracy Enhancement of Hybrid Stepping Motors," IMCSD 12th Proc., pp. 147~152, JUNE, 1983.
- [6] W. Wetter & M. Jufer, "Damping of Step Motors at Stand-still," IMCSD 11th Proc., pp.113~121, MAY, 1982.
- [7] Reonald H. Brown & Maher Jaroudi, "Torque Prediction and Maximization Strategies for Bifilar-Wound Hybrid Step Motor," IEEE Trans. on power electronics, Vol. 7, No. 3, pp.535~541, JULY, 1992.

본 논문은 단국대학교 교내 연구비지원에 의한 연구 결과임.

◇ 著 者 紹 介 ◇



우 광 준(禹廣俊)

1946년 11월8일생. 1974년 한양대 전자공학과 졸. 1977년 한양대 대학원 전자공학과 졸(석사). 1980년 Univ. de Strasbourg I 전자 계측 공학(D.E.A). 1983년 Institut National Polytechnique de Grenoble 계측 제어(Docteur ingenieur). 현재 단국대학교 전자공학과 교수.



이 종 언(李鍾彦)

1953년 5월15일생. 1979년 명지대 전자공학과 졸. 1981년 한양대 대학원 전기공학과 졸(석사). 1996년 단국대 대학원 전자공학과 박사 수료. 현재 국립 천안공업전문대학 전기과 교수.