

상전류 측정에 의한 복권형 하이브리드 스텝핑 전동기의 회전자 위치 검출

Rotor Position Detection of Bifilar-Wound Hybrid Stepping Motors by Phase Current Measurement

김규희, 유정봉, 우광준
(Kyu Hui Kim, Jeong Bong You, Kwang Joon Woo)

Abstract : In this paper, we show that the rotor position of the bifilar-wound hybrid stepping motors for the closed-loop drives is detected by the phase current measurement. We propose an instantaneous phase current equation, which is the function of electrical angle, by modeling the stepping motor including motor driving circuits. We also analyze the relationship between phase current and rotor position from the computer simulation results. We show that the information about the rotor position is obtained from the phase current amplitude and its derivatives at the instance of $\pi/2$ electrical angle of excitation voltage.

Keywords : rotor position detection, bifilar-wound hybrid stepping motor, instantaneous phase current equation, phase current derivatives

I. 서론

스텝핑 전동기는 속도 및 위치 제어가 용이하기 때문에 광범위한 산업분야에서 사용되고 있다. 스텝핑 전동기는 회전자의 구조에 따라 영구 자석형, 가변 릴럭턴스형, 하이브리드형으로 나누어진다. 영구 자석형은 회전자가 영구 자석으로 구성되어 높은 토오크를 발생하지만 영구 자석 표면을 정밀하게 가공하기 어려워 그 스텝 정밀도가 떨어진다. 가변 릴럭턴스형은 회전자를 가공하기 쉬운 연철을 사용해 그 스텝각이 정밀하지만 발생하는 토오크가 작다는 단점이 있다. 이에 비해 하이브리드형은 영구 자석형과 가변 릴럭턴스형의 장점을 취한 것으로 높은 토오크를 얻기 위해 회전자의 중심은 영구 자석으로 구성하였고 회전자의 외부는 연철을 정밀하게 가공하여 영구 자석을 둘러싸서 스텝 각의 정밀도를 높였다.

스텝핑 전동기의 운전방법(Operating Mode)으로는 제어기의 단순함과 조작의 간편함으로 인하여 과부하의 위험이 없는 시스템에 대하여 개루프 운전방법을 주로 택하고 있다. 그러나 개루프 운전은 지령 펄스의 주파수가 높거나 과부하시에는 지령 펄스에 응답을 못 할 수 있으며, 또한 토오크 리플이 크게 나타나는 단점이 있다. 따라서 이러한 단점들을 보완하기 위해 스텝핑 전동기의 회전자 위치를 검출하여 이에 상응하는 고정자의 상을 여자시키는, 즉 속도 제환과 위치 제환에 의한 폐루프 운전방법을 사용한다. 폐루프 운전방법은 개루프 운전방법에 비해 고속 운전이 가능하며 스텝 상실의 위험이 없고 토오크 리플도 줄어드는 장점이 있다. 그러나, 속도 제환과 위치 제환을 하기 위해선 전동기의 속도와 위치를 검출하는 센서가 필요하게 된다.

스텝핑 전동기의 폐루프 운전을 위한 회전자 위치를 검출하기 위해서 일반적으로 고가의 회전자 위치 인코더를 사용한다. 이러한 위치 인코더를 사용하지 않고 회전자 자극 위치를 검출하기 위한 연구가 수행되었다. 영구자석형 스텝핑 전동기에서는 여기되지 않은 상에서 역기전력을 검출하

여 회전자의 위치를 검출하는 방법으로, 가변 릴럭턴스형 스텝핑 전동기에서는 릴럭턴스의 변화를 전압과 전류의 변화를 측정하는 방법으로 회전자의 위치를 검출하는 방법이 연구되었다.

그러나 복권형 하이브리드 스텝핑 전동기에서는 역기전력이나 릴럭턴스 변화를 검출할 수가 없다. 따라서 본 논문에서는 복권형 하이브리드 스텝핑 전동기의 폐루프 운전을 위한 회전자 위치 검출 방법으로써 전동기의 상전류를 이용할 수 있음을 보였다. 복권형 하이브리드 스텝핑 전동기의 모델링을 통해 전기각의 함수로 주어지는 순시 상전류식을 제시하였으며, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 상전류와 회전자 자극 위치와의 관계를 도출하고 분석하였다. 상전압 인가 후 $\pi/2$ 시점에서 상전류값과 상전류 미분값을 측정하여 회전자 자극 위치 정보를 얻을 수 있음을 보였다.

II. 하이브리드 스텝핑 전동기의 순시 전류

본 논문에서 도입한 전동기는 2상 복권형 하이브리드 스텝핑 전동기로서 2상 구동으로 해석한다. 2상 복권형 하이브리드 스텝핑 전동기는 그림 1과 같이 a 상과 c 상은 하나의 치극에 복권식으로 구성되고, b 상과 d 상도 이웃하는 하나의 치극에 복권식으로 구성되어 a 상과 c 상, b 상과 d 상 사이에는 완전 자속 결합이 이루어지며, 치극으로 구별되는 $a-c$ 권선 쌍과 $b-d$ 권선 쌍 사이에는 자속결합이 이루어지지 않는다. 따라서 임의의 k 상의 쇄교 자속은 임의의 k 상 권선에 흐르는 전류와, 권선 쌍의 다른 쪽에 흐르는 전류와, 그리고 회전자의 영구 자석에 의해 발생한다. 그 관계식을 (1)에 나타내었다.

$$\begin{aligned}\lambda_a &= \lambda_{aa} + \lambda_{ac} + \lambda_{af} \\ \lambda_b &= \lambda_{bb} + \lambda_{bd} + \lambda_{bf} \\ \lambda_c &= -\lambda_a \\ \lambda_d &= -\lambda_b\end{aligned}\quad (1)$$

여기서,

λ_k : k 상의 쇄교 자속

λ_{kj} : j 상에 흐르는 전류에 의해 발생한 k 상의 쇄교 자속

λ_{kf} : 회전자의 영구자석에 의해 발생한 k 상의 쇄교 자속이다.

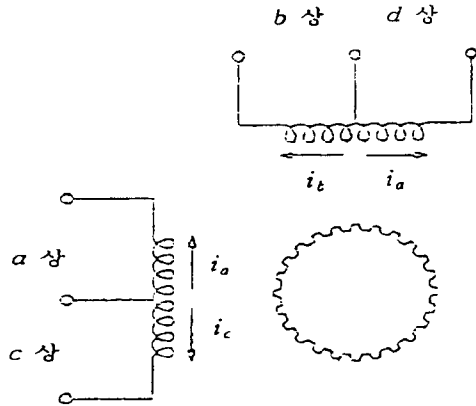


그림 1. 복권형 하이브리드 스텝핑 전동기의 중심점 연결 권선.

Fig. 1. Center-tapped windings for the bifilar-wound hybrid stepping motor.

또한 자기 포화가 일어나지 않고 와전류를 무시하는 가정과 각 상들의 인덕턴스 L_k 를 같다고 가정하면, 즉 모든 k 상에서 $L_k = L$ 이라면, 자기 인덕턴스에 의한 쇄교 자속은 다음 (2a)와 같다.

$$\lambda_{kk} = L i_k \tag{2a}$$

또한 상호 인덕턴스에 의한 반대상 (j 상)에서의 쇄교 자속은 다음과 같다.

$$\lambda_{jk} = -\lambda_{kk} \tag{2b}$$

여기서 k 상과 j 상은 같은 치극에 구성되어 있다. 이들 (2a)와 (2b)에 나타난 쇄교 자속과 전류사이의 관계에 의해 (1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\lambda_a = L(i_a - i_c) + \lambda_{af} \tag{3a}$$

$$\lambda_b = L(i_b - i_d) + \lambda_{bf} \tag{3b}$$

또한 회전자의 영구자석에 의해 발생한 a 상과 b 상의 쇄교자속은 (4)와 같이 표시 할 수 있다.

$$\lambda_{af} = k_0 \cos(\theta) \tag{4a}$$

$$\lambda_{bf} = k_0 \sin(\theta) \tag{4b}$$

여기서,

k_0 : 회전자 영구자석의 자속상수 (flux constant)

θ : 전기각으로서 회전자 각 위치이며 $\theta = N_{teeth} \cdot \theta_m$ 이다.

이때,

θ_m : 회전자의 기계각

N_{teeth} : 회전자의 치극수이다.

전동기 k 상에서의 전압-전류 관계는 (5)로 나타낼 수 있다.

$$v_k = R_k i_k + \dot{\lambda}_k \tag{5}$$

여기서,

v_k : k 상에 인가된 전압

i_k : k 상에 흐르는 전류

R_k : k 상의 권선 저항

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

(1), (3) 및 (5)로부터 (6)을 얻을 수 있다.

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

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

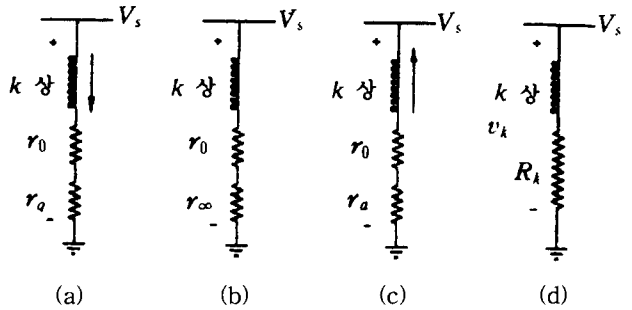


그림 2. 정전압 구동회로에서 상 k 저항 모델링.

Fig. 2. k th phase resistance modeling in constant voltage drive.

그림 2는 정전압 구동에서 상 저항을 모델링하는 과정이다. 그림 2(a)에서 k 상이 여기되면, 상 저항은 권선 저항 r_0 와 트랜지스터 on저항 r_q 의 합으로 나타난다. 그림 2(b)에서, k 상이 여기되지 않으면, 상 저항은 권선 저항 r_0 와 트랜지스터와 거의 무한대인 다이오드 off저항 r_∞ 의 합으로 나타난다. 그림 2(c)에서 k 상 도통 역전류가 흐르게 되면 상 저항은 권선 저항 r_0 와 다이오드 on 저항 r_d 의 합으로 나타난다. 권선의 상태는 위 세가지 경우에 한정된다. 세 경우를 고려해 k 상 권선 저항을 그림 2(d)에 R_k 로 나타내었다.

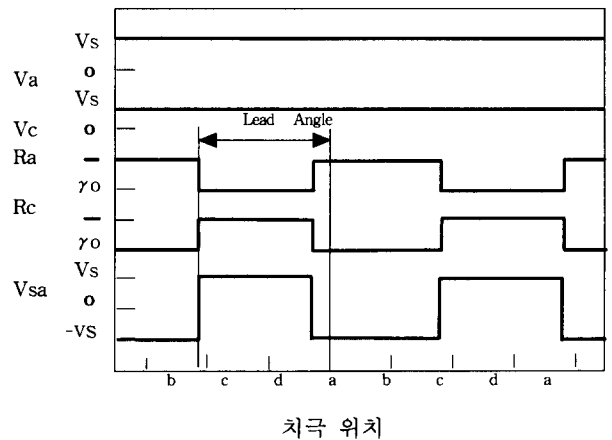


그림 3. 새로운 단자 전압, 전체 상 저항, ac 권선쌍의 구동 함수 V_{sa} .

Fig. 3. New terminal voltages, total phase resistances and forcing function V_{sa} for the ac winding pair.

그림 3은 그림 2에서 나타낸 새로운 상 저항을 이용해 권선 쌍 $a-c$ 의 새로운 단자 전압을 나타낸 것이다. 상이 여기하는 동안 권선 단자 전압은 전압원 V_s 와 거의 같고, 상이 여기하지 않는 동안 권선 단자 전압은 전압원이 아닌 역기전압(Back emf)과 같다. (6a)에서 권선을 그림 2와 같은 상태로 이해한다면

$$\frac{R_a - R_c}{R_a + R_c} =$$

$$-1 : \text{ 상 } a \text{가 여기되면, } \begin{aligned} R_a &= r_0 + r_q \doteq r_0, \\ R_c &= r_0 + r_\infty \doteq r_\infty \end{aligned}$$

$$+1 : \text{ 상 } c \text{가 여기되면, } \begin{aligned} R_a &= r_0 + r_\infty \doteq r_\infty, \\ R_c &= r_0 + r_q \doteq r_0. \end{aligned}$$

로 되어 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}_a &= -\frac{r_0}{L} (\lambda_a - \lambda_{af}) + \frac{v_a}{2} (1 \pm 1) \\ &\quad - \frac{v_c}{2} (1 \mp 1) \end{aligned} \quad (7)$$

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

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

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

그림 3에서 보인바와 같이 $V_{sa}(\theta)$ 와 $V_{sa}(t)$ 는 (8a)에서의 $\pm V_s$ 라 하면, V_{sa} 는 그림 3과 같이 위치나 시간의 구형파 함수이다. 이 구형파 함수는 a 상 여기될 때는 $+V_s$, c 상 여기될 때는 $-V_s$ 이다. 따라서 V_{sa} 는 구형파 함수로서 a 상의 스위칭 위치나 시간에 따라 $-V_s$ 에서 $+V_s$ 로 스위칭 된다. 전진각(Lead Angle) γ 는 a 상이 여기되는 회전자 각도이다. 특히 그림 3에 보인바와 같이 전진각 γ 는 평형점에서 a 상이 여기되는 위치까지 측정된 전기각이나 스텝으로써 정의한다.

순환 정상상태(cyclic steady state)로부터 각 상들의 위상관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{sa}(\theta) = V_{sb}(\theta + \pi/2)$$

$$\lambda_a(\theta) = \lambda_b(\theta + \pi/2) \quad (9)$$

$$i_a(\theta) = i_b(\theta + \pi/2) = i_c(\theta + \pi)$$

$$= i_a(\theta + 3\pi/2)$$

$$\begin{aligned} R_a(\theta) &= R_b(\theta + \pi/2) = R_c(\theta + \pi) \\ &= R_a(\theta + 3\pi/2) \end{aligned} \quad (10)$$

(8a)와 (8b)는 시간의 미분함수이다. 각 속도가 일정하다고 가정하면 시간함수를 위치함수로 변환할 수 있다. 즉 (8a)를 일정한 각속도라는 가정하에 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

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

$$\frac{d\lambda_a}{dt} = \frac{d\theta}{dt} \frac{d\lambda_a}{d\theta} = \omega \frac{d\lambda_a}{d\theta}$$

$$\omega \dot{\lambda}_a(\theta) = -\frac{r_0}{L} (\lambda_a(\theta) - \lambda_{af}(\theta)) \pm V_{sa}(\theta) \quad (11)$$

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

(11)로부터 λ_a 를 풀기 위해 푸리에 급수로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \lambda_a(\theta) &= \lambda_{A0} + \lambda_{A1} \cos(\theta) + \lambda_{B1} \sin(\theta) \\ &\quad + \dots \\ &= \lambda_{A0} + \sum_{m=1}^{\infty} (\lambda_{Am} \cos(m\theta) \\ &\quad + \lambda_{Bm} \sin(m\theta)) \end{aligned} \quad (12a)$$

λ_b 도 푸리에 급수로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \lambda_b(\theta) &= \lambda_{C0} + \lambda_{C1} \cos(\theta) + \lambda_{D1} \sin(\theta) \\ &\quad + \dots \\ &= \lambda_{C0} + \sum_{m=1}^{\infty} (\lambda_{Cm} \cos(m\theta) \\ &\quad + \lambda_{Dm} \sin(m\theta)) \end{aligned} \quad (12b)$$

(12a)와 (12b)를 위치의 미분 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}_a(\theta) &= \sum_{m=1}^{\infty} (-m \lambda_{Am} \sin(m\theta) \\ &\quad + m \lambda_{Bm} \cos(m\theta)) \end{aligned} \quad (13a)$$

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}_b(\theta) &= \sum_{m=1}^{\infty} (-m \lambda_{Cm} \sin(m\theta) \\ &\quad + m \lambda_{Dm} \cos(m\theta)) \end{aligned} \quad (13b)$$

a 상 구동함수를 푸리에 급수로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_{sa}(\theta) &= V_{sA0} + V_{sA1} \cos(\theta) \\ &\quad + V_{sB1} \sin(\theta) + \dots \\ &= V_{sA0} + \sum_{m=1}^{\infty} (V_{sAm} \cos(m\theta) \\ &\quad + V_{sBm} \sin(m\theta)) \end{aligned} \quad (14)$$

여기서,

$$V_{sAm} = \frac{1}{\pi} \int_{\gamma}^{\gamma+2\pi} V_{sa}(\theta) \cos(m\theta) d\theta \quad (15a)$$

$$V_{sBm} = \frac{1}{\pi} \int_{\gamma}^{\gamma+2\pi} V_{sa}(\theta) \sin(m\theta) d\theta \quad (15b)$$

이다.

(15a)와 (15b)로부터 푸리에 계수들을 구하면 다음과 같다.

$$V_{sA0} = 0 \quad (16a)$$

$$V_{sAm} = \frac{2V_s}{m\pi} ((-1)^m - 1) \sin(m\gamma) \quad (16b)$$

$$V_{sBm} = \frac{2V_s}{m\pi} (1 - (-1)^m) \cos(m\gamma) \quad (16c)$$

따라서 (16)을 (14)에 대입한 푸리에 급수 형태의 a 상 구동함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_{sa}(\theta) &= \sum_{m=1}^{\infty} (V_{sAm} \cos(m\theta) \\ &\quad + V_{sBm} \sin(m\theta)) \\ &= \sum_{m=2n-1}^{\infty} \frac{4V_s}{m\pi} (-\sin(m\gamma) \cos(m\theta) \\ &\quad + \cos(m\gamma) \sin(m\theta)) \\ &= \sum_{m=2n-1}^{\infty} \frac{4V_s}{m\pi} \sin m(\theta - \gamma), \end{aligned} \quad (17)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots,$$

(11)에 (4a),(12a),(13a) 및 (17)을 대입하면 다음 (18)과 같다.

$$\begin{aligned} \omega \dot{\lambda}_a(\theta) &= -\frac{r_0}{L}(\lambda_a(\theta) - \lambda_{a'}(\theta)) \pm V_{sa}(\theta) \\ \omega \sum_{m=1}^{\infty} (-m\lambda_{Am} \sin(m\theta) + m\lambda_{Bm} \cos(m\theta)) \\ &= -\frac{r_0}{L} \left\{ \lambda_{A0} + \sum_{m=1}^{\infty} (\lambda_{Am} \cos(m\theta) \right. \\ &\quad \left. + \lambda_{Bm} \sin(m\theta)) \right\} - \frac{r_0}{L} \{-k_0 \cos(\theta)\} \quad (18) \\ &\quad \pm \sum_{m=1}^{\infty} (V_{sAm} \cos(m\theta) + V_{sBm} \sin(m\theta)) \end{aligned}$$

(18)에서 각 계수를 푸리에 급수의 직교성을 이용해 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\lambda_{A0} = \frac{L}{r_0} V_{sA0} = 0. \quad (19a)$$

$m = 1$ 일 때,

$$\lambda_{A1} = \frac{1}{\omega^2 + \frac{r_0^2}{L^2}} \left\{ \frac{r_0}{L} V_{sA1} - \omega V_{sB1} + k_0 \frac{r_0^2}{L^2} \right\} \quad (19b)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{B1} &= \frac{1}{\omega^2 + \frac{r_0^2}{L^2}} \left\{ \omega V_{sA1} + \frac{r_0}{L} V_{sB1} \right. \\ &\quad \left. + k_0 \frac{r_0 \omega}{L} \right\} \quad (19c) \end{aligned}$$

$m \geq 2$ 일 때,

$$\begin{aligned} \lambda_{Am} &= \frac{1}{\omega^2 m^2 + \frac{r_0^2}{L^2}} \left\{ \frac{r_0}{L} V_{sAm} - \omega m V_{sBm} \right\} \\ &= \frac{-4V_s}{m\pi} \sin(m\gamma + \phi_m) \quad (19d) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda_{Bm} &= \frac{1}{\omega^2 m^2 + \frac{r_0^2}{L^2}} \left\{ \omega m V_{sAm} + \frac{r_0}{L} V_{sBm} \right\} \\ &= \frac{-4V_s}{m\pi} \cos(m\gamma + \phi_m) \quad (19e) \end{aligned}$$

여기서,

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

이다.

(19)를 (12a)에 대입하면 (20)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \lambda_a(\theta) &= \frac{4V_s}{\pi} \sin(\theta - \gamma - \phi_1) \\ &\quad + \frac{r_0}{L} k_0 \cos(\theta - \phi_1) \\ &\quad + \sum_{m=2n-1}^{\infty} \frac{4V_s}{m\pi} \sin(m(\theta - \gamma) - \phi_m), \\ n &= 2, 3, \dots \quad (20) \end{aligned}$$

a 상의 시간에 관한 전류-전압식은 (21)로 주어지므로 위치 함수로 변화시키면 (22)와 같다.

$$v_a(t) = r_0 i_a(t) + \dot{\lambda}_a(t) \quad (21)$$

$$i_a(\theta) = \frac{1}{r_0} (V_{sa}(\theta) - \omega \dot{\lambda}_a(\theta)) \quad (22)$$

(22)에 (17), (19a), (19b), (19c), (19d) 및 (19e)를 대입하면 (23)으로 나타낼수 있다.

$$\begin{aligned} i_a(\theta) &= \frac{1}{r_0} \left[\sum_{m=2n-1}^{\infty} ((V_{sAm} - \omega m \lambda_{Bm}) \cos(m\theta) \right. \\ &\quad \left. + (V_{sBm} + \omega m \lambda_{Am}) \sin(m\theta)) \right] \\ &= \frac{1}{r_0} \left\{ -\frac{4V_s}{\pi} \sin(\gamma) + \omega \frac{4V_s}{\pi} \sin(\gamma + \phi_1) \right. \\ &\quad \left. - k_0 \frac{\omega r_0^2}{L^2 Z_1^2} \right\} \cos(\theta) \\ &\quad + \frac{1}{r_0} \left\{ \frac{4V_s}{\pi} \cos(\gamma) - \omega \frac{4V_s}{\pi} \cos(\gamma + \phi_1) \right. \\ &\quad \left. + k_0 \frac{r_0 \omega^2}{L Z_1^2} \right\} \sin(\theta) \\ &\quad + \frac{1}{r_0} \left\{ \sum_{m=2n-1}^{\infty} \frac{-4V_s}{m\pi} (\sin(m\gamma) \right. \\ &\quad \left. - \omega m \cos(m\gamma + \phi_m)) \right\} \cos(m\theta) \quad (23) \\ &\quad + \frac{1}{r_0} \left\{ \sum_{m=2n-1}^{\infty} \frac{4V_s}{m\pi} (\cos(m\gamma) \right. \\ &\quad \left. - \omega m \sin(m\gamma + \phi_m)) \right\} \sin(m\theta) \end{aligned}$$

여기서,

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

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

$$n = 2, 3, 4, 5, \dots$$

이다.

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

$$\begin{aligned} i_a(\gamma + \pi/2) &= \\ &\quad \frac{1}{r_0} \left\{ -\frac{4V_s}{\pi} \sin(\gamma) + \omega \frac{4V_s}{\pi} \sin(\gamma + \phi_1) \right. \\ &\quad \left. - k_0 \frac{\omega r_0^2}{L^2 Z^2} \right\} \cos(\gamma + \pi/2) \\ &\quad + \frac{1}{r_0} \left\{ \frac{4V_s}{\pi} \cos(\gamma) - \omega \frac{4V_s}{\pi} \cos(\gamma + \phi_1) \right. \\ &\quad \left. + k_0 \frac{r_0}{L Z^2} \omega^2 \right\} \sin(\gamma + \pi/2) \\ &\quad + \frac{1}{r_0} \left\{ \sum_{m=2n-1}^{\infty} \frac{-4V_s}{m\pi} (\sin(m\gamma) + \omega m \cos \right. \\ &\quad \left. (m\gamma + \phi_m)) \right\} \cos(m\gamma + n\pi - \pi/2) \quad (24) \\ &\quad + \frac{1}{r_0} \left\{ \sum_{m=2n-1}^{\infty} \frac{4V_s}{m\pi} (\cos(m\gamma) - \omega m \sin \right. \\ &\quad \left. (m\gamma + \phi_m)) \right\} \sin(m\gamma + n\pi - \pi/2) \end{aligned}$$

위 식을 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} i_a(\gamma + \pi/2) &= \frac{4V_s}{\pi r_0} - \omega \frac{4V_s}{\pi L Z_1} \\ &\quad + \omega \frac{k_0}{L Z_1} \cos(\gamma - \phi_1) \end{aligned}$$

$$+ \frac{4V_s}{\pi r_0} \sum_{m=2n-1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{m} \cdot (1 + \cos(2m\gamma + \phi_m)) \quad (25)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{r_0}\right) \\ \phi_m &= \tan^{-1}\left(\frac{m\omega L}{r_0}\right) \\ n &= 2, 3, 4, 5, \dots \end{aligned}$$

이다.

전압 인가각인 전진각 γ 는 회전자 자극 위치를 기준으로 정의된 각이므로 회전자 위치 정보는 전진각 γ 로부터 구할 수 있다. 따라서 (25)의 순시 전류식에서 파라미터가 측정된 복권형 하이브리드 스텝핑 전동기와 그 구동 조건이 주어지고 일정 각속도로 운전할 경우 전진각 γ 는 $\gamma + \pi/2$ 시점의 순시 상전류값 $i_a(\gamma + \pi/2)$ 의 역여현 함수와 유사하다. 또한, 역여현 함수는 한 주기 내에서 한 전류값에 대해 두 지점의 전진각 γ 가 존재한다. 따라서, 하나의 전진각 γ 를 구하기 위해서 전류 미분식을 구하면 다음 (26)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{di_a(\theta)}{d\theta} &= \\ &\frac{1}{r_0} \left\{ \frac{4V_s}{\pi} \sin(\gamma) - \omega \frac{4V_s}{\pi} \sin(\gamma + \phi_1) \right. \\ &\quad \left. + k_0 \omega \frac{r_0^2}{L^2 Z^2} \right\} \sin(\theta) \\ &+ \frac{1}{r_0} \left\{ \frac{4V_s}{\pi} \cos(\gamma) - \omega \frac{4V_s}{\pi} \cos(\gamma + \phi_1) \right. \\ &\quad \left. + k_0 \omega^2 \frac{r_0}{L Z^2} \right\} \cos(\theta) \\ &+ \frac{1}{r_0} \left\{ \sum_{m=2n-1}^{\infty} \frac{4V_s}{\pi} (\sin(m\gamma) \right. \\ &\quad \left. - \omega m \sin(m\gamma + \phi_m)) \right\} \sin(m\theta) \\ &+ \frac{1}{r_0} \left\{ \sum_{m=2n-1}^{\infty} \frac{4V_s}{\pi} (\cos(m\gamma) \right. \\ &\quad \left. + \omega m \cos(m\gamma + \phi_m)) \right\} \cos(m\theta) \end{aligned} \quad (26)$$

여기서,

$$\begin{aligned} Z_m &= \sqrt{\omega^2 m^2 + \frac{r_0^2}{L^2}} \\ \phi_m &= \tan^{-1}\left(\frac{m\omega L}{r_0}\right) \\ n &= 2, 3, 4, 5, \dots \end{aligned}$$

이다.

또한 $\gamma + \pi/2$ 지점에서의 전류 미분식은 (27)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{di_a(\gamma + \pi/2)}{d\theta} &= \\ &\frac{1}{r_0} \left\{ \frac{4V_s}{\pi} \sin(\gamma) - \omega \frac{4V_s}{\pi} \sin(\gamma + \phi_1) \right. \\ &\quad \left. + k_0 \omega \frac{r_0^2}{L^2 Z^2} \right\} \sin(\gamma + \pi/2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+ \frac{1}{r_0} \left\{ \frac{4V_s}{\pi} \cos(\gamma) - \omega \frac{4V_s}{\pi} \cos(\gamma + \phi_1) \right. \\ &\quad \left. + k_0 \omega^2 \frac{r_0}{L Z^2} \right\} \cos(\gamma + \pi/2) \\ &+ \frac{1}{r_0} \left\{ \sum_{m=2n-1}^{\infty} \frac{4V_s}{\pi} (\sin(m\gamma) - \omega \sin(m\gamma \right. \\ &\quad \left. + \phi_m)) \right\} \sin(m\gamma + n\pi - \pi/2) \\ &+ \frac{1}{r_0} \left\{ \sum_{m=2n-1}^{\infty} \frac{4V_s}{\pi} (\cos(m\gamma) + \omega \cos(m\gamma \right. \\ &\quad \left. + \phi_m)) \right\} \cos(m\gamma + n\pi - \pi/2) \end{aligned} \quad (27)$$

위 식을 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{di_a(\gamma + \pi/2)}{d\theta} &= \\ &-\omega^2 \frac{4V_s}{\pi r_0 Z_1} + \omega \frac{k_0}{L Z_1} \cos(\phi_1 + \gamma) \\ &+ \omega \frac{4V_s}{r_0} \sum_{m=2n-1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{Z_m} \sin(2m\gamma + \phi_m) \end{aligned} \quad (28)$$

여기서,

$$\begin{aligned} Z_m &= \sqrt{\omega^2 m^2 + \frac{r_0^2}{L^2}}, \\ \phi_m &= \tan^{-1}\left(\frac{m\omega L}{r_0}\right) \\ n &= 2, 3, 4, 5, \dots \text{이다.} \end{aligned}$$

III. 시뮬레이션 결과 및 고찰

(23) 및 (25)와 같이 수식적으로 표현된 전류식으로부터 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 회전자 위치 정보를 얻을 수 있음을 보인다. 시뮬레이션은 IBM PC에서 MATLAB을 이용해 해석하였다. 시뮬레이션에 이용된 복권형 하이브리드 스텝핑 전동기는 Warner Electric SM200-0080 BB 복권형 1.8°이며 전동기 파라메타는 표 1과 같다.

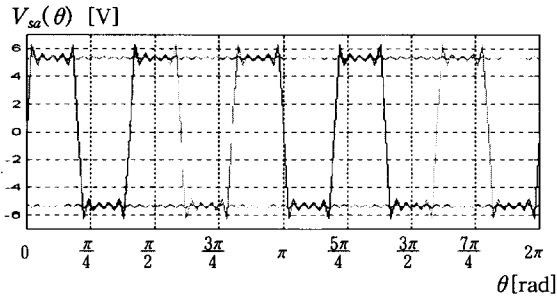
표 1. 하이브리드형 스텝핑 전동기의 측정된 파라메타.

Table 1. Measured parameters of hybrid stepping motor.

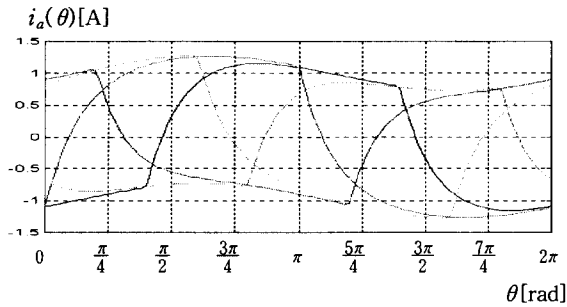
$r_0 = 5.32 \ \Omega$	$K_t = 0.29 \text{ Nm/A}$
$L = 6.9 \text{ mH}$	$K_0 = 0.005 \text{ V/(rad/s)}$
$V_s = 5.35 \text{ V}$	

다음은 여러 속도에 따른 복권형 하이브리드 스텝핑 전동기의 전압 인가각에 따른 구형파의 인가 상전압 파형, (23)에 의한 순시 상전류 파형, (25)에 의한 전압 인가각에서 $\pi/2$ 벗어난 지점에서의 상전류 크기, (28)에 의한 $\pi/2$ 시점에서의 전류의 변화량을 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 나타냈다. 일정한 각속도에서 순시 상전류로부터 회전자 위치 정보를 얻기 위해 전압 인가각의 함수로 변환된 순시 상전류식으로부터 전압 인가후 $\pi/2$ 시점에서 상전류 크기를 구하였다. 이 상전류의 크기는 전압 인가 시점의 회전자 위치에 따라 정해짐을 보였다. 따라서 구해진 상전류의 특징이 여현함수에 유사하므로 상전류의 변화량을 동시에 측정

함으로서 전압 인가후 $\pi/2$ 시점에서의 상전류값과 상전류 변화량을 가지고 전진각의 크기, 즉 회전자 자극 위치를 구할 수 있음을 보여 주고 있다.



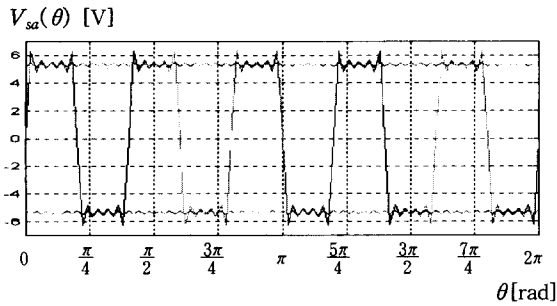
인가 상전압 파형, $\gamma = 2n\pi/5$ $n=0,1,2,3,4$



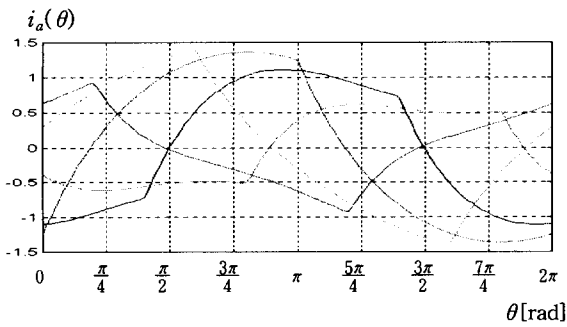
순시 상전류 파형, $\gamma = 2n\pi/5$ $n=0,1,2,3,4$

그림 4(a). 인가 상전압 파형과 순시 상전류 파형 ($f = 50\text{PPS}$).

Fig. 4(a). Excitation phase voltage waveforms and instantaneous phase current.



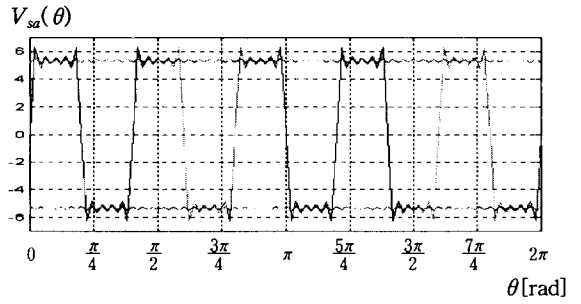
인가 상전압 파형, $\gamma = 2n\pi/5$ $n=0,1,2,3,4$



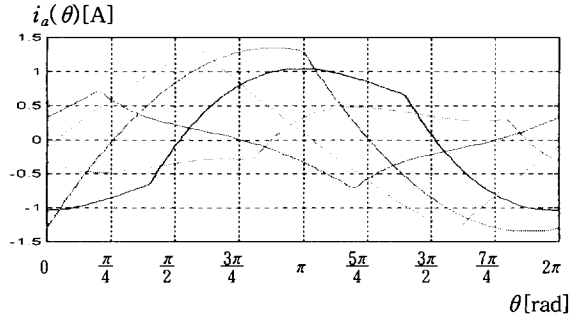
순시 상전류 파형, $\gamma = 2n\pi/5$ $n=0,1,2,3,4$

그림 4(b). 인가 상전압 파형과 순시 상전류 파형 ($f = 100\text{PPS}$).

Fig. 4(b). Excitation phase voltage waveforms and instantaneous phase current waveforms ($f = 100\text{PPS}$).



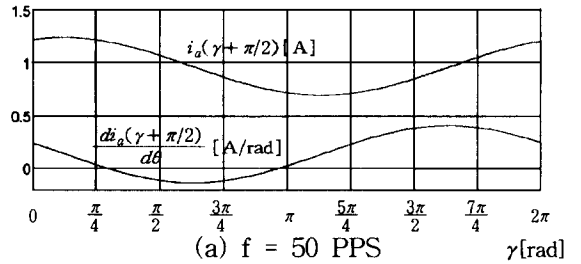
인가 상전압 파형, $\gamma = 2n\pi/5$ $n=0,1,2,3,4$



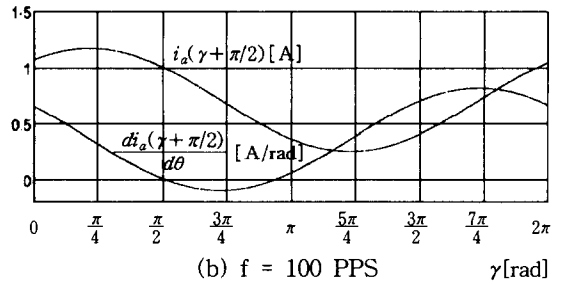
순시 상전류 파형, $\gamma = 2n\pi/5$ $n=0,1,2,3,4$

그림 4(c). 인가 상전압 파형과 순시 상전류 파형 ($f = 150\text{PPS}$).

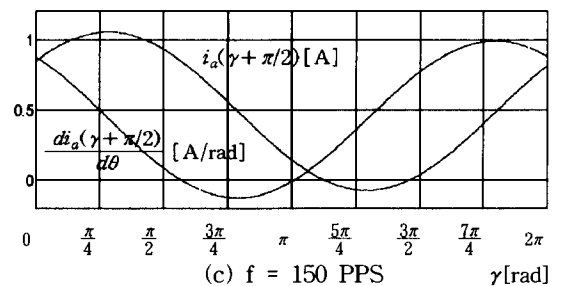
Fig. 4(c). Excitation phase voltage waveforms and instantaneous phase current waveforms ($f = 150\text{PPS}$).



(a) $f = 50 \text{ PPS}$



(b) $f = 100 \text{ PPS}$



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

그림 5. $\gamma + \pi/2$ 시점에서의 순시 상전류 미분값. Fig. 5. Instantaneous phase current value and its differentiated current value at $\gamma + \pi/2$.

그림 4는 3개의 서로 다른 전동기의 속도 ($f = 50\text{PPS}$, $f = 100\text{PPS}$, $f = 150\text{PPS}$)에서 각각의 경우의 인가 전압과 순시 상전류 파형을 $\gamma = \pm 2n\pi/5$ $n=0,1,2,3,4$ 에 대해 나타내었다.

그림 5에는 3개의 서로 다른 전동기의 속도 ($f = 50\text{PPS}$, $f = 100\text{PPS}$, $f = 150\text{PPS}$)에서 각각의 경우 $\gamma + \pi/2$ 시점에서의 순시 상전류값과 상전류 미분값을 전진각 γ 에 대해 연속적으로 나타내었다.

$\pi/2$ 시점에서의 순시 상전류값 $i_a(\gamma + \pi/2)$ 는 위상천이된 여현함수와 유사한 파형을 보여 주고 있으며, 따라서 하나의 순시 상전류값은 두 시점의 전진각 γ 에 대해서 나타나 있다. 그러므로 $\pi/2$ 시점에서의 상전류 미분값을 동시에 고려하면 하나의 전진각 γ 를 구할 수 있음을 보여 주고 있다.

IV. 결론

스테핑 전동기의 개루프 운전시에는 토오크 리플이 크게 나타나고 지령 펄스의 주파수가 높거나 과부하시에는 지령 펄스에 응답을 못하는 단점이 있다. 이를 보완하기 위하여 전동기의 회전자 위치를 검출하여 이에 상응하는 고정자의 상을 여기시키는, 즉 속도 제환과 위치 제환에 의한 폐루프 운전방법이 사용된다.

폐루프 운전을 위한 회전자 위치를 검출하기 위해서는 일반적으로 고가의 회전자 위치 인코더를 사용한다. 이러한 위치 인코더를 사용하지 않고 회전자 위치를 검출하는 방법으로서 영구자석형 스테핑 전동기에서는 여기되지 않은 상에서 역기전압을 검출하여 회전자극 위치 정보를 얻으며, 가변 릴럭턴스형 스테핑 전동기에서는 회전에 따른 릴럭턴스의 변화를 상전류와 상전압의 변화를 측정하여 회전자 위치정보를 얻는 방법이 사용된다. 그러나 복권형 하이브리드 스테핑 전동기에서는 역기전압을 검출하거나 릴럭턴스의 변화를 검출할 수가 없다.

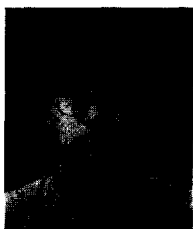
따라서 본 연구에서는 복권형 하이브리드 스테핑 전동기의 폐루프 제어를 위한 회전자 위치 검출 방법으로서 전동기의 상전류를 이용할 수 있음을 보였다. 구동회로를 포함한 복권형 하이브리드 스테핑 전동기의 모델링을 통해 전기 각 위치의 함수로 주어지는 순시 상전류식을 제시하였으며, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 순시 상전류와 회전자극의 위치와의 관계를 도식하고 분석하였다. 이들 사이의 관계에서 구동전압 인가후 $\pi/2$ 시점에서의 순시 상전류의 크기와 순시 상전류의 미분값을 회전자 자극 위치를 기준으로 정의된 전압 인가각인 전진각의 함수로 나타냄으로서 회전자 자극 위치 정보를 얻을 수 있음을 보였다.

향후 연구로서 본 연구에서 제시한 이론에 근거하여 복

권형 하이브리드 스테핑 전동기의 회전자 위치 검출기가 없는 제어기의 설계와 부하의 영향을 고려한 전진각의 함수로 주어지는 순시 상전류식의 이론적인 유도 및 이에 근거한 제어기의 설계에 관한 연구가 수행되고 있다.

참고문헌

- [1] Ronald 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.
- [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," *Proc. IMCSD 13th*, pp. 163-166, May, 1984.
- [5] Albert C. Leenhaouts, "Step accuracy enhancement of hybrid stepping motors," *Proc. IMCSD 12th*, pp. 147-152, June, 1983.
- [6] W. Wetter & M. Jufer, "Damping of step motors at stand-still," *Proc. IMCSD 11th*, pp. 113-121, May, 1982.
- [7] Charles K. Taft & Raymond G. Gauthier, "The operation of a stepping motor against an elastic stop," *Proc. IMCSD 13th*, pp. 149-155, May, 1984.
- [8] Geroge Bennett, "Introducing active damping to stepper motor drives," *Proc. IMSD 13th*, pp. 271-282, May, 1984.
- [9] A. Fratta, G. P. Troglia, A. Vagati & F. Villata, "Torque ripple evaluation of high-performance synchronous reluctance machine," *IEEE Ind. Appl. Magm.*, pp. 14-22, July/August, 1995.
- [10] J. T. Bass, M. Fhsani & Timothy J. E. Miller, "Simplified electronics for torque control of sensorless switched-reluctance motor," *IEEE Trans. Ind. Elect.*, vol. IE-34, no. 2, pp. 234-239, May, 1987.
- [11] Tachasi Kenjo, "Stepping motors and their micro-processor controls," *Clarendon Press*, 1992.



김규희

1994년 단국대학교 전자공학과 졸업.
1996년 동 대학원 석사. 현재 (주) 선일
옵트론 부설 연구소 연구원.



유정봉

1988년 단국대학교 전자공학과 졸업.
1990년 동 대학원 석사. 1990년~1993년
(주) 신도리코 근무. 1994년~ 현재 동
대학원 박사과정 수료.

우 광 준

제어·자동화·시스템공학회 논문지 제 3권 제 4호 참조.