

복권형 하이브리드 스텝핑 전동기의 회전자 위치 검출에 대한 연구

유기남, 유정봉, 우광준
단국대학교 전자공학과

A Study on The Rotor Position Detection of
Bifilar-Wound Hybrid Stepping Motors

K.N Yu, J.Bong You, K.J Woo
Dan Kook University, Dept. of Electronics

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 the modeling of the stepping motor including motor driving circuits. We also analyze the relationship between phase current and rotor position from the computer simulation results. It is shown 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.

1. 서 론

스텝핑 전동기의 폐루프 운전을 위한 회전자 위치를 검출하기 위해서 일반적으로 고가의 회전자 위치 인코더를 사용한다. 이런한 위치 인코더를 사용하지 않고 회전자 자극 위치를 검출하기 위한 연구가 수행되었다. 영구자석형 스텝핑 전동기에서는 여기되지 않은 상에서 역기전력을 검출하여 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 검출 할 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 도시하고 분석하였다. 상전압 인가 후 $\pi/2$ 시점에서 상전류값과 상전류 미분값을 측정하여 회전자 자극 위치 정보를 얻을 수 있음을 보였다.

2. 본 론

2.1 하이브리드 스텝핑 전동기의 순시 전류

본 논문에서 도입한 전동기는 2상 복권형 하이브리드 스텝핑 전동기로써 2상 구동으로 해석한다. 2상 복권형 하이브리드 스텝핑 전동기는 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 이루어 지며, 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 식(1)에 나타내었다.

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

여기서,

λ_k : k 상의 쇄교 자속

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

λ_{jk} : 회전자의 영구자석에 의해 발생한 k 상의 쇄교 자속

이다.

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 식(2a)와 같다.

$$\lambda_{kk} = L i_k \quad (2a)$$

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

$$\lambda_{jk} = -\lambda_{kj} \quad (2b)$$

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

다.

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

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

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

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

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

여기서,

k_0 : 회전자 영구자석의 자속상수 (flux constant)

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

이때,

θ_m : 회전자의 기계각

N_{teeth} : 회전자의 치극수
이다.

전동기 k 상에서의 전압-전류 관계는 식(5)로 나타낼 수 있다.

$$v_k = R_k i_k + \lambda_k \quad (5)$$

여기서,

v_k : k 상에 인가된 전압

i_k : k 상에 흐르는 전류

R_k : k 상의 권선 저항

λ_k : k 상의 쇄교 자속의 시간에 대한 미분량

이다.

식(1), (3), 및 식(5)로부터 식(6)을 얻을 수 있다.

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

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

한편 정전압 구동에서 상 저항은 다음과 같이 해석할 수 있다. k 상이 여기되면, 상 저항은 권선 저항 r_0 와 트랜지스터 on 저항 r_o 의 합으로 나타난다. k 상이 여기되지 않으면, 상 저항은 권선 저항 r_0 와 트랜지스터와 거의 무관대인 다이오드 off 저항 r_∞ 의 합으로 나타낸다. 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.

식(6a)에서 권선을 정전압 구동 상태로 이해한다면

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

-1 : 상 a 가 여기되면, $R_a = r_0 + r_o \approx r_0$, $R_c = r_0 + r_\infty \approx r_0$.

+1 : 상 c 가 여기되면, $R_a = r_0 + r_\infty \approx r_\infty$, $R_c = r_0 + r_o \approx r_0$ 로 되어 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_a = -\frac{r_0}{L} (\lambda_a - \lambda_{a\theta}) + \frac{v_a}{2} (1 \pm 1) - \frac{v_c}{2} (1 \mp 1) \quad (7)$$

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

$$\lambda_a = -\frac{r_0}{L} (\lambda_a - \lambda_{a\theta}) \pm V_s \quad (8a)$$

$$\lambda_b = -\frac{r_0}{L} (\lambda_b - \lambda_{b\theta}) \pm V_s \quad (8b)$$

한편 전진각(Lead Angle) γ 는 a 상이 여기되는 회전자 각도 즉 평형점에서 a 상이 여기되는 위치까지 측정된 전기각이나 스텝으로써 정의한다.

순환 정상상태(cyclic steady state)로부터 $V_{sk}(\theta)$, $\lambda_k(\theta)$, $i_k(\theta)$, 및 $R_k(\theta)$ 의 각 상들의 위상관계는 $\frac{\pi}{2}$ 의 위상차만을 갖고 그 크기는 각각 서로 같다. 각속도가 일정하다고 가정하면 시간함수를 위치함수로 변환할 수 있다. 즉, 식(8a)를 일정한 각속도라는 가정하에 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

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

여기서 $\lambda_a(\theta) = d\lambda_a / d\theta$ 이다.

식(9)로부터 λ_a 및 λ_b 를 풀기 위해 푸리에 급수로 나타내면 다음과 같다.

$$\lambda_a(\theta) = \lambda_{A0} + \lambda_{A1} \cos(\theta) + \lambda_{B1} \sin(\theta) + \dots$$

$$= \lambda_{A0} + \sum_{m=1}^{\infty} (\lambda_{Am} \cos(m\theta) + \lambda_{Bm} \sin(m\theta)) \quad (10a)$$

$$\lambda_b(\theta) = \lambda_{C0} + \lambda_{C1} \cos(\theta) + \lambda_{D1} \sin(\theta) + \dots$$

$$= \lambda_{C0} + \sum_{m=1}^{\infty} (\lambda_{Cm} \cos(m\theta) + \lambda_{Dm} \sin(m\theta)) \quad (10b)$$

식(10a)와 식(10b)를 위치의 미분 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$\lambda_a(\theta) = \sum_{m=1}^{\infty} (-m \lambda_{Am} \sin(m\theta) + m \lambda_{Bm} \cos(m\theta)) \quad (11a)$$

$$\lambda_b(\theta) = \sum_{m=1}^{\infty} (-m \lambda_{Cm} \sin(m\theta) + m \lambda_{Dm} \cos(m\theta)) \quad (11b)$$

a 상 구동함수를 푸리에 급수로 표현하면 다음과

같다.

$$\begin{aligned}
 V_{sa}(\theta) &= \sum_{m=1}^{\infty} (V_{sA_m} \cos(m\theta) + V_{sB_m} \sin(m\theta)) \\
 &= \sum_{m=2n-1}^{\infty} \frac{4V_s}{m\pi} (-\sin(m\gamma) \cos(m\theta) \\
 &\quad + \cos(m\gamma) \sin(m\theta)) \\
 &= \sum_{m=2n-1}^{\infty} \frac{4V_s}{m\pi} \sin m(\theta - \gamma), \quad n = 1, 2, 3, \dots; (12)
 \end{aligned}$$

식(9)에 식(4a), (10a), (11a), 및 식(12)를 대입하면 다음 식(13)과 같다.

$$\begin{aligned}
 \omega \lambda_a(\theta) &= -\frac{r_0}{L} (\lambda_a(\theta) - \lambda_a(\theta)) \pm V_{sa}(\theta) \\
 \omega \sum_{m=1}^{\infty} (-m\lambda_{A_m} \sin(m\theta) + m\lambda_{B_m} \cos(m\theta)) \\
 &= -\frac{r_0}{L} \left\{ \lambda_{A0} + \sum_{m=1}^{\infty} (\lambda_{A_m} \cos(m\theta) + \lambda_{B_m} \sin(m\theta)) \right\} \\
 &\quad - \frac{r_0}{L} (-k_0 \cos(\theta)) \\
 &\pm \sum_{m=1}^{\infty} (V_{sA_m} \cos(m\theta) + V_{sB_m} \sin(m\theta)) (13)
 \end{aligned}$$

식(13)에서 각 계수들은 푸리에 급수의 직교성을 이용해 구할 수 있었으므로 푸리에 계수들을 식(10a)에 대입하면 식(14)와 같이 된다.

$$\begin{aligned}
 \lambda_a(\theta) &= \frac{4V_s}{\pi} \sin(\theta - \gamma - \phi_1) + \frac{r_0}{L} k_0 \cos(\theta - \phi_1) \\
 &+ \sum_{m=2n-1}^{\infty} \frac{4V_s}{m\pi} \sin(m(\theta - \gamma) - \phi_m), \quad n = 2, 3, \dots, (14)
 \end{aligned}$$

a 상의 시간에 관한 전류-전압식을 위치 함수로 변화시키면 식(15)와 같다.

$$i_a(\theta) = \frac{1}{r_0} (V_{sa}(\theta) - \omega \lambda_a(\theta)) \quad (15)$$

식(15)에 식(12) 및 푸리에 계수들을 대입하면 식(16)으로 나타낼수 있다.

$$\begin{aligned}
 i_a(\theta) &= \frac{1}{r_0} [V_{sA0} - \omega \lambda_{B0}] + \sum_{m=2n-1}^{\infty} [(V_{sA_m} - \omega m \lambda_{B_m}) \cos(m\theta) \\
 &\quad + (V_{sB_m} + \omega m \lambda_{A_m}) \sin(m\theta))] \\
 &= \frac{1}{r_0} \left\{ -\frac{4V_s}{\pi} \sin(\gamma) + \omega \frac{4V_s}{\pi} \sin(\gamma + \phi_1) \right. \\
 &\quad \left. - k_0 \frac{\omega r_0^2}{L^2 Z_1^2} \right\} \cos(\theta) + \frac{1}{r_0} \left\{ \frac{4V_s}{\pi} \cos(\gamma) \right. \\
 &\quad \left. - \omega \frac{4V_s}{\pi} \cos(\gamma + \phi_1) + k_0 \frac{r_0 \omega^2}{L Z_1^2} \right\} \sin(\theta) \\
 &+ \frac{1}{r_0} \left\{ \sum_{m=2n-1}^{\infty} \frac{-4V_s}{m\pi} (\sin(m\gamma) - \omega m \sin(m\gamma + \phi_m)) \right\} \cos(m\theta)
 \end{aligned}$$

$$+ \frac{1}{r_0} \left\{ \sum_{m=2n-1}^{\infty} \frac{4V_s}{m\pi} (\cos(m\gamma) + \omega m \cos(m\gamma + \phi_m)) \right\} \sin(m\theta) \quad (16)$$

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.

식(16)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.

$$\begin{aligned}
 i_a(\gamma + \pi/2) &= \frac{4V_s}{\pi r_0} - \omega \frac{4V_s}{\pi L Z_1} + \omega \frac{k_0}{L Z_1} \cos(\gamma - \phi_1) \\
 &+ \frac{4V_s}{\pi r_0} \sum_{m=2n-1}^{\infty} \frac{(-1)^{m-1}}{m} (1 + \cos(2m\gamma + \phi_m))
 \end{aligned} \quad (17)$$

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 식(17)의 순시 전류식에서 파라미터가 측정된 복권형 하이브리드 스테핑 전동기와 그 구동 조건이 주어지고 일정 각속도로 운전 할 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 $\gamma + \pi/2$ 지점에서의 전류 미분식을 구하면 다음 식(18)과 같다.

$$\begin{aligned}
 \frac{di_a(\gamma + \pi/2)}{d\theta} &= -\omega^2 \frac{4V_s}{\pi r_0 Z_1} + \omega \frac{k_0}{L Z_1} \cos(\phi_1 + \gamma) \\
 &+ \omega \frac{4V_s}{r_0} \sum_{m=2n-1}^{\infty} \frac{(-1)^m}{Z_m} \sin(2m\gamma + \phi_m)
 \end{aligned} \quad (18)$$

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.

2.2 시뮬레이션 결과 및 고찰

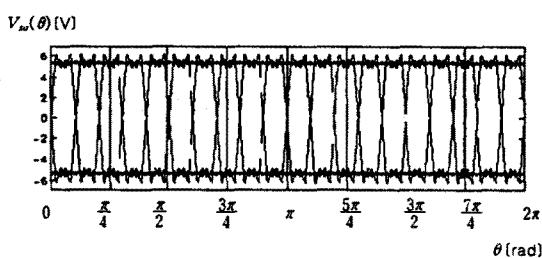
식(16) 및 식(17)과 같이 수식적으로 표현된 전류식으로부터 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 회전자 위치 정보를 얻을 수 있음을 보인다. 시뮬레이션은 IBM PC에서 MATLAB을 이용해 해석하였다. 시뮬레이션에 이용된 복권형 하이브리드 스텝핑 전동기는 Warner Electric SM200-0080 BB 복권형 1.8°이며 전동기 파라메터는 표. 1과 같다.

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

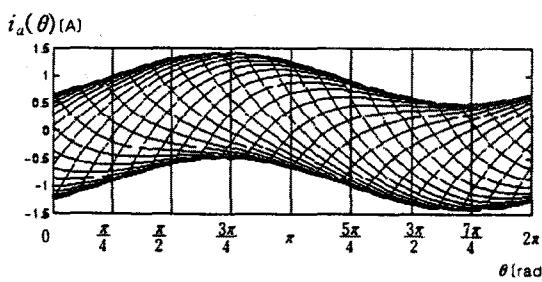
표 1. 하이브리드형 스텝핑 전동기의 측정된 파라메터.

Table 1. Measured Parameters of Hybrid Stepping Motor.

다음은 100 pps에서 복권형 하이브리드 스텝핑 전동기의 전압 인가각에 따른 구형파의 인가 상전압 파형, 식(16)에 의한 순시 상전류 파형, 식(17)에 의한 전압 인가각에서 $\pi/2$ 벗어난 지점에서의 상전류 크기, 식(18)에 의한 $\pi/2$ 시점에서의 전류의 변화량을 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 나타났다. 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 측정함으로서 전압 인가후 $\pi/2$ 시점에서의 상전류값과 상전류 변화량을 가지고 전진각의 크기, 즉 회전자 자극 위치를 구할 수 있음을 보여 주고 있다.



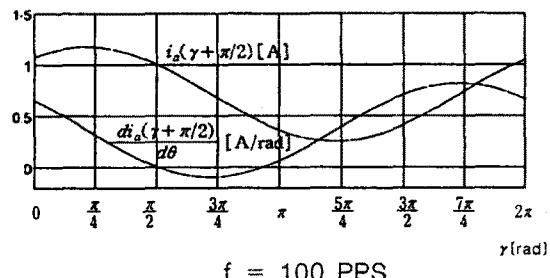
인가 상전압 파형, $\gamma = \pm n\pi/10$ $n = 0, 1, \dots, 10$



순시 상전류 파형, $\gamma = \pm n\pi/10$ $n = 0, 1, \dots, 10$

그림 1. 인가 상전압 파형과 순시 상전류 파형 ($f = 100\text{PPS}$)

Fig. 1. Excitation Phase Voltage Waveforms and Instantaneous Phase Current Waveforms ($f = 100\text{PPS}$)



$f = 100 \text{ PPS}$

그림 2. $\gamma + \pi/2$ 시점에서의 순시 상전류와 상전류 미분값

Fig. 2. Instantaneous Phase Current Value and its Differentiated Current Value at $\gamma + \pi/2$

그림 1은 전동기의 속도 ($f = 100\text{PPS}$)에서 인가 전압과 순시 상전류 파형을 $\gamma = \pm n\pi/10$, $n = 0, 1, \dots, 10$ 에 대해 나타내었다.

그림 2에는 전동기의 속도 ($f = 100\text{PPS}$)에서 $\gamma + \pi/2$ 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 과정을 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.

3. 결 론

스텝핑 전동기의 폐루프 운전을 위한 회전자 위치를 검출하기 위해서는 일반적으로 고가의 회전자 위치 인코더를 사용한다. 이런한 위치 인코더를 사용하지 않고 회전자 위치를 검출하는 방법으로서 영구자석형 스텝핑 전동기에서는 여기 되지 않은 상에서 역기전압을 검출하여 회전자극 위치 정보를 얻으며, 가변 릴리턴스형 스텝핑 전동기에서는 회전에 따른 릴리턴스의 변화를 상전류와 상전압의 변화를 측정하여 회전자 위치정보를 얻는 방법이 사용된다. 그러나 복권형 하이브리드 스텝핑 전동기에서는 역기전압을 검출하거나 릴리턴스의 변화를 검출할 수가 없다.

따라서 본 연구에서는 복권형 하이브리드 스텝핑 전동기의 폐루프 제어를 위한 회전자 위치 검출 방법으로서 전동기의 상전류를 이용할 수 있음을 보였다. 구동회로를 포함한 복권형 하이브리드 스텝

평 전동기의 모델링을 통해 전기각 위치의 함수로 주어지는 순시 상전류식을 제시하였으며, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 순시 상전류와 회전자극의 위치와의 관계를 도시하고 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 복권형 하이브리드 스텝평 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.

(참 고 문 헌)

- [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," IMCSD 13th Proc., pp.163-166, MAY 1984.
- [5] Albert C. Leenhaouts, "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.