

추력 리플을 보상하는 선형 하이브리드 스텝핑 전동기의 고성능 제어

황태식, 석줄기
영남대학교 전기공학과

High Performance Control of Linear Hybrid Stepping Motor with Force Ripple Compensator

Tai-Sik Hwang, Jul-Ki Seok
School of Electrical Engineering, Yeungnam University

ABSTRACT

The linear hybrid stepping motors (LHSM) has been widely used due to its simple structure and low cost control. Despite of its attractive features, the conventional LHSM has the multiples of 4th times harmonic reluctance force from excitation current and cogging force from space harmonic of permeance. This paper propose a new LHSM, which the mechanical and electrical phase difference are 45°. The proposed motor shows a unique ability to deliver low detent force and we propose a closed-loop control scheme to attack the ripple force for high performance applications. An analytical and experimental comparison between conventional and proposed LHSM is evaluated to confirm the effectiveness of the proposed modeling and control scheme.

1. 서론

최근 반도체, LCD 장비를 중심으로 선형 전동기의 수요가 크게 증가하고 있다. 선형 전동기는 일반 회전형 전동기에 비해 직선운동을 변환하기 위한 별도의 장치 없이도 직접적으로 직선 이송운동이 가능한 장점이 있다.

선형 전동기의 종류는 선형 동기 전동기, 선형 유도 전동기, 선형 DC 전동기, 그리고 선형 스텝핑 전동기 등이 있다. 이 중에서 선형 하이브리드 스텝핑 전동기(Linear Hybrid Stepping Motor : 이하 LHSM)는 선형 동기 전동기에 비해 구조가 단순하며 저가의 속도 및 위치제어를 할 수 있는 장점이 있다.

대부분의 LHSM의 구동은 개루프 형태의 마이크로 스텝핑(Micro Stepping)구동 방식을 사용한다. 그러나 기존의 LHSM은 마이크로 스텝핑 제어시 4차 고조파의 릴럭턴스 및 코깅 리플이 발생한다^[2].

본 논문에서는 릴럭턴스 및 코깅리플을 저감하는 LHSM을 제안한다. 제안한 구조의 LHSM은 마이크로 스텝핑 구동만으로 4차 추력리플을 상쇄하는

구조를 갖는다. 그러나 실제 LHSM은 불균형한 자속분포 및 기계적인 오차, 비선형요소 등으로 인해 추력 리플이 발생한다. 따라서 제안한 LHSM의 고성능 제어를 위해 추력 리플 보상방법을 제시하며 실험으로 타당성을 검증한다.

2. 제안한 LHSM의 구조 및 추력 리플특성

2.1 제안한 LHSM의 구조

그림 1은 제안한 2상 4극형 LHSM의 전체 구조를 나타낸다. 각 극은 바이필러(Bifilar)권선과 모노필러(Monofilar)권선으로 구성되며 각 극에서 이동자와 고정자 치의 배치는 1/8편차를 가진다.

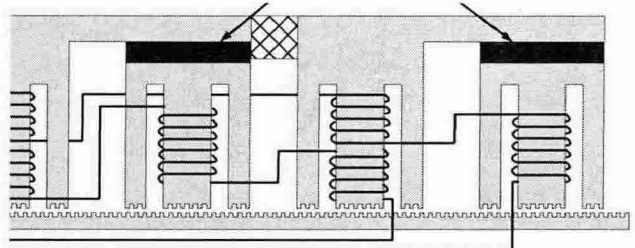


그림 1. 제안한 LHSM의 전체 구조

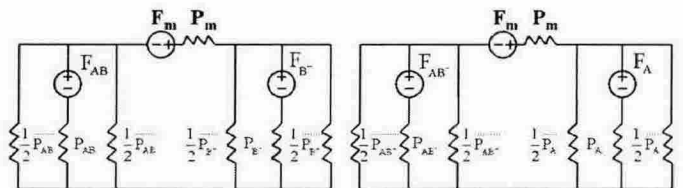


그림 2. 제안한 LHSM의 전체 자기 등가 회로

$$P_{AB} = P_0 + \sum_{n=1}^5 P_n \cos n \left(\theta - \frac{\pi}{4} \right) \quad (1)$$

$$P_{B'} = P_0 + \sum_{n=1}^5 P_n \cos n \left(\theta - \frac{\pi}{2} \right) \quad (2)$$

$$P_{AB} = P_0 + \sum_{n=1}^5 P_n \cos n \left(\theta + \frac{\pi}{4} \right) \quad (3)$$

$$P_A = P_0 + \sum_{n=1}^5 P_n \cos n(\theta - \pi) \quad (4)$$

여기서 P_0, P_1 : 상수, $\theta = \frac{2\pi}{p_t} x$, p_t : 치의 피치

2.2 릴럭턴스 추력 리플 특성

릴럭턴스 추력을 계산하기 위해 그림 3과 같은 자기등가 회로를 나타낼 수 있다.

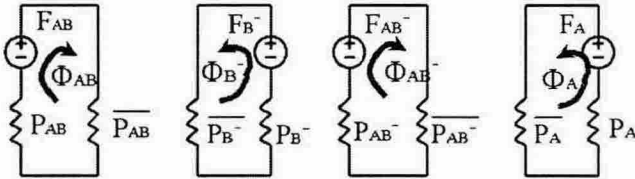


그림 3. 간략화한 자기등가 회로

그림 3에서 쇄교자속은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_{AB} \approx \left[L_0 - L_1 \cos 2\left(\theta - \frac{\pi}{4}\right) \right] \cdot \frac{1}{2} (i_A + i_B) \quad (5)$$

여기서 L_0, L_1 : 상수, i_A, i_B : 상전류

나머지 쇄교자속도 같은 식으로 계산하여 자기저장 에너지를 계산하면 다음과 같다.

$$W_m = \frac{1}{2} [i_A \ i_B] \begin{bmatrix} L_0 - L_1 \cos 2\theta & -L_1 \sin 2\theta \\ -L_1 \sin 2\theta & L_0 + L_1 \cos 2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \end{bmatrix} \quad (6)$$

위의 식에 편미분을 취하여 릴럭턴스 추력을 계산하면 다음과 같다.

$$f_{re} = \frac{2\pi}{p_t} L_1 (\sin 2\theta i_A^2 - \sin 2\theta i_B^2 - 2 \cos 2\theta i_A i_B) \quad (7)$$

정상상태에서 각 상전류는 $i_A = I \cos \theta$, $i_B = I \sin \theta$ 이므로 $f_{re} = \tau_{ud}$ 이 된다. 따라서 제안한 LHSM의 릴럭턴스 추력리플은 소거된다.

2.3 코깅 추력 리플 특성

코깅 리플을 계산하기 위해서 그림 4와 같이 자기등가 회로를 간략화 할 수 있다.

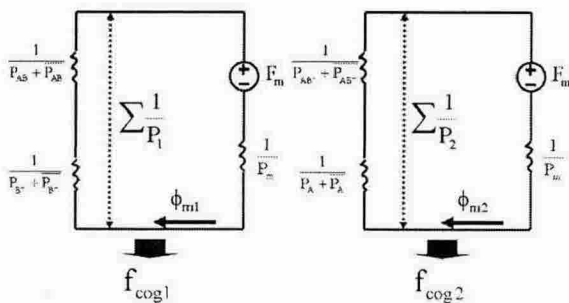


그림 4. 간략화한 자기등가 회로

그림 4의 각 영역에서 저장된 자기에너지는 다음과 같다.

$$W_{m1} = \frac{\phi_{m1}^2}{8P_0^2} (4P_0 + 2P_2 \cos 2\theta - 2P_2 \sin 2\theta) \quad (8)$$

$$W_{m2} = \frac{\phi_{m2}^2}{8P_0^2} (4P_0 - 2P_2 \cos 2\theta + 2P_2 \sin 2\theta) \quad (9)$$

식 (8)-(9)에서 위치에 대한 편미분을 계산하면 각 부분에서 발생하는 코깅 리플을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$f_{cog1} = -\left(\frac{2\pi}{p_t}\right) \frac{\phi_{m1}^2}{2P_0^2} (-P_2 \sin 2\theta - P_2 \cos 2\theta) \quad (10)$$

$$f_{cog2} = -\left(\frac{2\pi}{p_t}\right) \frac{\phi_{m2}^2}{2P_0^2} (P_2 \sin 2\theta + P_2 \cos 2\theta) \quad (11)$$

따라서, 식 (10)-(11)로부터 제안한 LHSM의 전체 코깅 리플은 서로 상쇄됨을 알 수 있다.

3. 추력 리플 보상

본 논문에서 제안한 LHSM은 릴럭턴스 및 코깅 리플을 저감한 구조를 가지지만 실제 LHSM은 영구자석의 배치와 공극 및 고정자와 이동자 치의 오차, 다른 비선형 특성으로 인해 각 상에 발생하는 자속분포가 불균형을 이루게 된다.

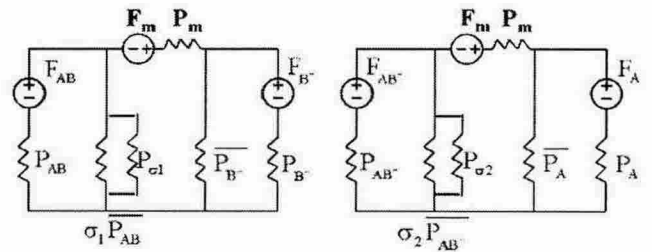


그림 5. 제안한 LHSM의 비대칭 자기 등가회로

따라서 그림 5와 같은 비대칭 자기 등가회로로 나타낼 수 있으며 전체 퍼미언스를 계산하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{\sum P} = h_0 + h_1 \cos(\theta + \delta_1) + h_2 \cos(2\theta + \delta_2) + h_3 \cos(3\theta + \delta_3) + h_4 \cos(4\theta + \delta_4) \quad (12)$$

식(12)의 의해서 1차, 2차 3차, 4차 고조파의 추력 리플을 발생시킨다. 이것은 여자 전류에 무관하며 위치에 의존하는 힘이다.

$$f_{ripple} = f_1 \cos(\theta + \delta_1) + f_2 \cos(2\theta + \delta_2) + f_3 \cos(3\theta + \delta_3) + f_4 \cos(4\theta + \delta_4) \quad (13)$$

위의 추력 리플은 위치에 의존하는 외란임을 알

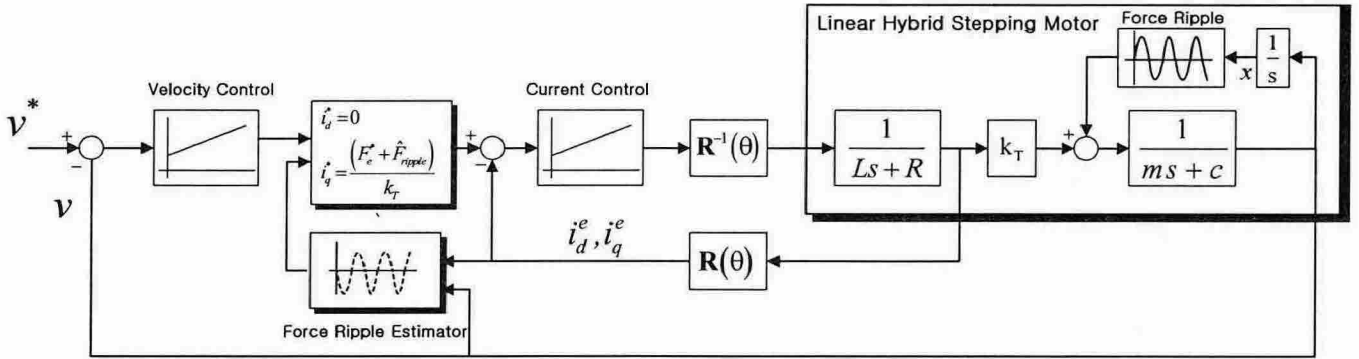


그림 6. 추력 리플을 보상하기 위한 전체 제어 구성도

수 있다. 본 논문에서는 아래와 같은 비선형 관측기를 이용하여 추력 리플을 추정한다.

$$\begin{aligned} \hat{v} &= \frac{1}{m}(\hat{z}_1 + \hat{z}_2 + \hat{z}_3 + \hat{z}_4) + \frac{k_T}{m} i_q^e - \frac{k_0}{m}(\hat{v} - v) \\ \dot{\hat{z}}_1 &= \alpha^2 \hat{y}_1 - k_1(\hat{v} - v), \quad \hat{y}_1 = -\hat{v}z_1 \\ &\vdots \\ \dot{\hat{z}}_4 &= (\alpha\gamma)^2 \hat{y}_4 - k_4(\hat{v} - v), \quad \hat{y}_5 = -\hat{v}z_5 \end{aligned} \quad (14)$$

여기서 k_0, k_1, k_2, k_3, k_4 는 관측기 이득이며, $\hat{z}_1, \hat{z}_2, \hat{z}_3, \hat{z}_4$ 는 추정 추력 리플이다.

4. 실험결과

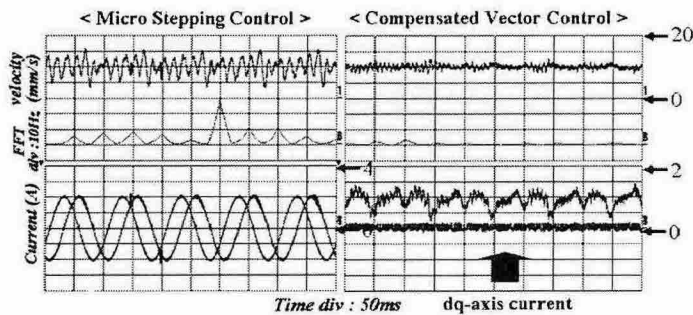


그림 7. 속도 응답 및 피드백 전류(속도:10[mm/s])

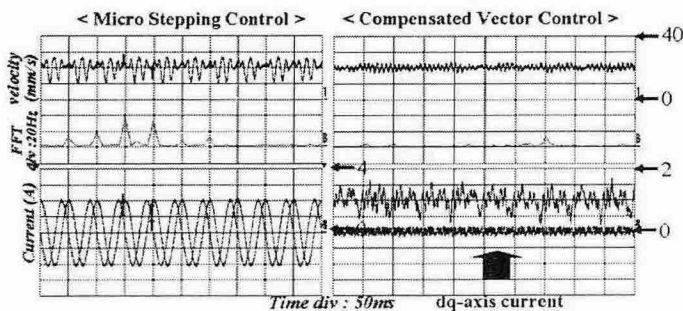


그림 8. 속도 응답 및 피드백 전류(속도:20[mm/s])

그림 7, 8은 기존의 마이크로 스텝핑 제어와 그림 6과 같은 방식의 추력리플을 보상하는 벡터제어

의 실험결과를 비교한 것이다. 추력 리플은 속도가 증가하면 기계적인 관성의 영향으로 속도 리플이 감소하게 된다. 따라서 본 논문에서는 추력 리플 보상의 타당성을 검증하기 위해 저속 영역(10, 20mm/s)에서 실험을 수행했다.

실험결과는 기존의 마이크로 스텝핑 제어와 비교했을 때 속도 리플이 매우 감소하였음을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 LHSM의 릴럭턴스 및 코깅 추력 리플을 저감하기 위한 개선된 구조를 제안하였다. 추력리플 분석을 위해 자기 등가회로를 이용하여 해석하였다. 그리고 실제 전동기에서 기계적인 오차 및 비선형성으로 나타나는 추력리플을 추정하여 보상하는 고성능 제어방법을 제시하였다.

실험결과로부터 기존의 마이크로 스텝핑 제어방식보다 우수한 제어 특성을 가짐을 알 수 있다.

본 연구는 산업자원부 지원에 의하여 기초전력연구원(과제번호:R-2005-B-143)주관으로 수행된 과제임

참 고 문 헌

- [1] B. C. Kuo, Theory and Applications of Step Motors. West Publishing Co., 1974.
- [2] Nobuyuki Matsui, Makoto Nakamura, and Takashi Kosaka, "Instantaneous Torque Analysis of Hybrid Stepping Motor," IEEE Trans. on Ind. Applicat., vol. 32, Sep/Oct. 1996, pp. 1176-1182.
- [3] S. Yang, F. Lin, and M. Chen, "Micro-stepping Control of a Two-Phase Linear Stepping Motor with Three-Phase VSI Inverter for High-Speed Applications," IEEE Trans. on Ind. Applicat., vol. 40, pp. 1257- 1264, Sep/Oct. 2004.
- [4] J. Hirai, T. Kim, and A. Kawamura, "Position-Sensorless Drive of Linear Pulse Motor for Suppressing Transient Vibration," IEEE Trans. on Ind. Electron., vol. 47, pp. 337- 345, April 2000.