

2상 선형 하이브리드 스텝핑 전동기의 코깅 리플 저감

황 태 식, 석 줄 기
영남대학교 전기공학과

Cogging Force Reduction of Two Phase Linear Hybrid Stepping Motor

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

Abstract - This paper presents a new two-phase linear hybrid stepping motors (LHSM), which has two windings per phase and one of them shares the other phase winding. The proposed motor shows a unique ability to deliver low cogging force without any particular complex control scheme and additional power electronics hardware in micro stepping control. An analytical and experimental comparison between conventional and proposed LHSM is evaluated to confirm the effectiveness of the proposed design.

1. 서 론

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 가능하다. 그리고 선형전동기는 기계적인 마찰, 진동 및 소음이 작은 장점 때문에 회전형 전동기를 이용한 직선 이송장치들을 대체하고 있다.

선형 전동기는 선형 동기 전동기(Linear Synchronous Motor)와 선형 유도 전동기(Linear Induction Motor), 선형 DC 전동기((Linear Direct Current Motor), 그리고 선형 스텝핑 전동기(Linear Stepping Motor)등의 종류가 있다. 이 중에서 선형 하이브리드 스텝핑 전동기(Linear Hybrid Stepping Motor : 이하 LHSM)는 선형 동기 전동기에 비해 간단한 구조를 가지며 저가의 위치제어를 할 수 있는 장점이 있다.

지금까지 대부분의 LHSM은 그림 1과 같은 구조의 LHSM으로 설계하고 있다. 그 이유는 대부분의 LHSM의 제어방식은 정현파 상전류를 인가하는 마이크로 스텝핑(Micro Stepping)구동 방식인데 이것은 제어 회로가 비교적 간단하기 때문이다. LHSM은 단위 전류 입력 당 높은 추력을 가지며 다른 일반적인 위치 제어형 선형 서보 전동기들보다 매우 단순한 구동 드라이브와 제어를 갖는다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 기존의 LHSM은 퍼미언스(Permeance)의 고조파 성분으로 인해 4배 주파수의 톨력턴스 및 코깅 추력리플이 발생된다[2]. 최근에 LHSM의 코깅 리플을 보상하는 연구가 수행되었으나[3]-[4] 제어기 구현이 매우 복잡하며 단순한 마이크로 스텝핑 방식을 사용하기 어렵다.

본 논문에서는 새로운 구조의 2상 LHSM을 제안한다. 제안한 구조의 LHSM은 특별한 제어 방법 없이도 매우 낮은 추력리플을 발생시키는 구조임을 알 수 있다. 그리고 제안한 LHSM은 추가적인 전력전자 회로의 필요 없이 마이크로 스텝핑 제어 방식만으로 쉽게 구현할 수 있다. 그리고 제안한 LHSM의 추력 리플 저감에 대한 타당성을 실험을 통해 입증한다.

2. LHSM의 코깅 리플 해석

그림 1은 기존의 2상 2극형 LHSM의 전체 구조를 나타낸다. 가동자에 두 개의 모노필러(Monofilar) 권선으로 각각 N 번 감겨있다. 각 극에서 상전류가 입력되며 이동자와 고정자간의 치피치당 1/4편차이므로 90° 위상차를 가진다.

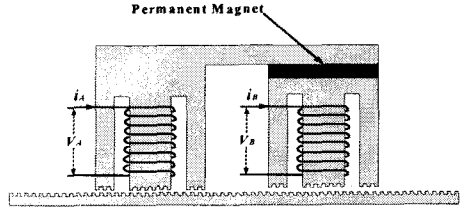


그림 1. 기존의 LHSM의 전체 구조

그림 2는 제안한 2상 4극형 LHSM의 전체 구조를 나타낸다. 두 개의 극에는 바이필러(Bifilar) 권선으로 $\sqrt{2}N$ 번 감겨있다. 그리고 다른 두 개의 극에는 모노필러 권선으로 N 번 감겨있으며 이동자와 고정자간의 치피치당 1/8 편차이므로 위상차는 45° 이다. 이것은 각 극에서 전기적인 권선의 위상차와 기계적인 치의 위상차를 45° 로 정합시켜 최대 추력을 얻기 위해서이다. 추력특성을 해석하기 위해 철코어의 상대 투자율이 공극보다 매우 높다고 가정한다.

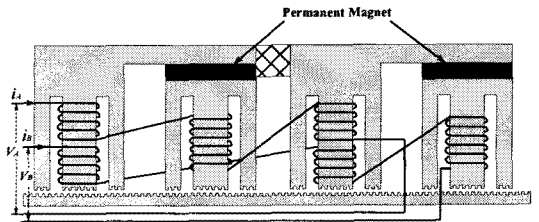


그림 2. 제안한 LHSM의 전체 구조

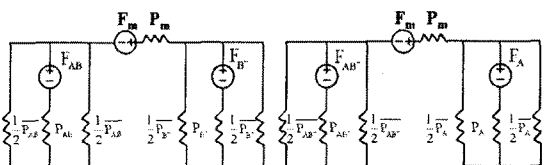


그림 3. 제안한 LHSM의 자기 등가 회로

그림 2의 LHSM의 구조는 그림 3과 같이 나타낼 수 있으며 5차까지의 고조파 성분을 고려하면 각 극에서 발생하는 퍼미언스는 다음과 같다.

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

$$\overline{P_{AB}} = P_0 + \sum_{n=1}^5 P_n \cos n \left(\theta - \frac{\pi}{4} - \pi \right) \quad (2)$$

$$P_{B^-} = P_0 + \sum_{n=1}^5 P_n \cos n \left(\theta - \frac{\pi}{2} \right) \quad (3)$$

$$\overline{P_{B^-}} = P_0 + \sum_{n=1}^5 P_n \cos n \left(\theta - \frac{\pi}{2} - \pi \right) \quad (4)$$

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

$$\overline{P_{AB^-}} = P_0 + \sum_{n=1}^5 P_n \cos n \left(\theta + \frac{\pi}{4} - \pi \right) \quad (6)$$

$$\overline{P_A} = P_0 + \sum_{n=1}^5 P_n \cos n (\theta - \pi) \quad (7)$$

$$\overline{P_A} = P_0 + \sum_{n=1}^5 P_n \cos n (\theta) \quad (8)$$

$$\theta = \frac{2\pi}{p_t} x \quad (9)$$

여기서 p_t 는 치의 한 피치거리이며 x 는 이동자의 위치를 나타낸다. 각 극에서 발생하는 기자력은 다음과 같다.

$$F_{AB} = \frac{\sqrt{2}N}{2} (i_A + i_B) \quad (10)$$

$$F_{B^-} = -N i_B \quad (11)$$

$$F_{AB^-} = \frac{\sqrt{2}N}{2} (i_A - i_B) \quad (12)$$

$$F_A = N i_A \quad (13)$$

F_m 과 P_m 각각 영구자석의 기자력과 퍼미언스를 의미한다. 코깅 리플을 계산하기 위해서 그림 4와 같이 자기등가회로를 간략화 할 수 있다. 식 (1)-(8)로부터 각 퍼미언스는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\frac{1}{P_{AB} + \overline{P_{AB}}} \approx \frac{1}{4P_0^2} (2P_0 - 2P_2 \cos 2\theta + 2P_4 \cos 4\theta) \quad (14)$$

$$\frac{1}{P_{B^-} + \overline{P_{B^-}}} \approx \frac{1}{4P_0^2} (2P_0 + 2P_2 \cos 2\theta - 2P_4 \cos 4\theta) \quad (15)$$

$$\frac{1}{P_{A^-B} + \overline{P_{A^-B}}} \approx \frac{1}{4P_0^2} (2P_0 + 2P_2 \sin 2\theta + 2P_4 \cos 4\theta) \quad (16)$$

$$\frac{1}{P_A + \overline{P_A}} \approx \frac{1}{4P_0^2} (2P_0 - 2P_2 \cos 2\theta - 2P_4 \cos 4\theta) \quad (17)$$

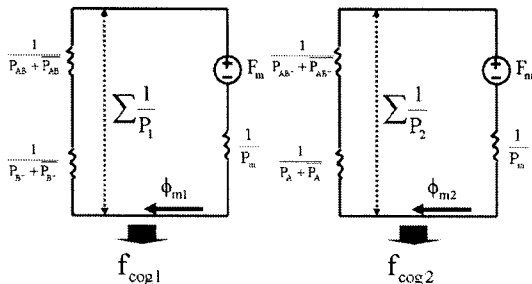


그림 4. 제안한 LHSM의 간략화한 자기등가 회로

그림 4의 각 영역에서 저장된 자기에너지는 다음과 같다.

$$W_{m1} = \frac{1}{2} \phi_{m1}^2 \sum \frac{1}{P_1} = -\frac{\phi_{m1}^2}{8P_0^2} (4P_0 + 2P_2 \cos 2\theta - 2P_2 \sin 2\theta) \quad (18)$$

$$W_{m2} = \frac{1}{2} \phi_{m2}^2 \sum \frac{1}{P_2} = -\frac{\phi_{m2}^2}{8P_0^2} (4P_0 - 2P_2 \cos 2\theta + 2P_2 \sin 2\theta) \quad (19)$$

여기서 코어자로의 퍼미언스를 무시하면 영구자석에서 발생하는 자속은 다음과 같다.

$$\phi_m = \phi_{m1} = \phi_{m2} = F_m P_m \quad (20)$$

식 (18)-(19)에서 위치에 대한 편미분을 계산하면 각 부분에서 발생하는 코깅 리플을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$f_{\text{cog1}} = -\frac{\partial W_{m1}}{\partial x} = -\left(\frac{2\pi}{p_t} \right) \frac{\phi_{m1}^2}{2P_0^2} (-P_2 \sin 2\theta - P_2 \cos 2\theta) \quad (21)$$

$$f_{\text{cog2}} = -\frac{\partial W_{m2}}{\partial x} = -\left(\frac{2\pi}{p_t} \right) \frac{\phi_{m2}^2}{2P_0^2} (P_2 \sin 2\theta + P_2 \cos 2\theta) \quad (22)$$

따라서, 식 (18)-(19)로부터 제안한 LHSM의 전체 코깅 리플은 서로 상쇄됨을 알 수 있다.

3. 실제적인 영향을 고려한 코깅 리플 해석

실제 이동자의 영구자석은 양극 가운데 착자시키는 것이 어렵다. 그래서 기존의 LHSM과 제안한 LHSM은 영구자석을 한쪽 극위에 배치시켜 그림 5와 같이 양극에서 불균형 자속분포를 이루게 된다. 따라서 그림 6과 같은 비대칭 자기 등가회로를 얻을 수 있다.

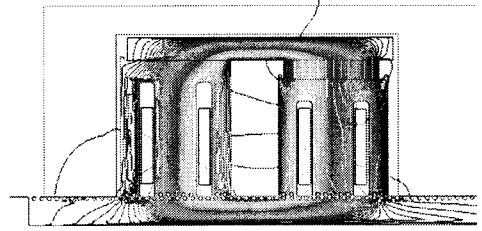


그림 5. LHSM의 자속 분포

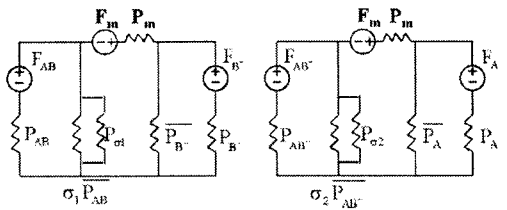


그림 6. 제안한 LHSM의 비대칭 자기 등가회로

그림 6의 비대칭 자기 등가회로에서 전체 퍼미언스를 계산하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{\sum P} = \frac{1}{P_{\sigma_1} + \sigma_1 P_{AB} + P_{AB^-}} + \frac{1}{P_{AB} + P_{AB^-}} + \frac{1}{P_{\sigma_2} + \sigma_2 P_{AB^-} + P_{AB^-}} + \frac{1}{P_A + P_A} = h_0 + h_1 \cos(\theta + \delta_1) + h_2 \cos(2\theta + \delta_2) + h_3 \cos(3\theta + \delta_3) + h_4 \cos(4\theta + \delta_4) \quad (24)$$

식 (24)는 영구자석의 비대칭 배치로 발생하는 코깅 리플에 비례한다. 이것은 기존의 LHSM과 제안한 LHSM에서 모두 발생하지만 제안한 구조는 영구자석을 두 개로 분할 배치하여 코깅 리플 성분은 기존의 LHSM보다 저감된다.

그림 7은 제안한 LHSM의 실제 역기전력을 측정 한 것으로 자속의 불평형 때문에 A상과 B상의 크기가 다른 것을 알 수 있다.

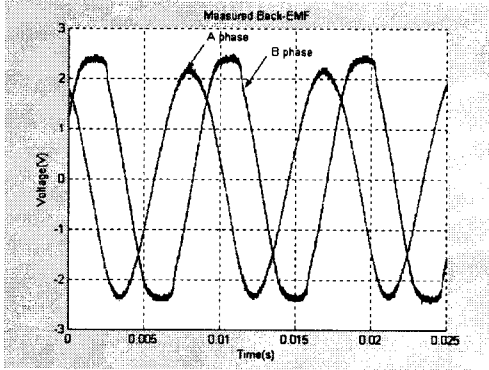
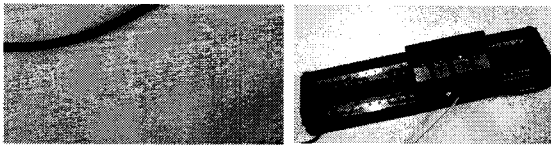


그림 7. 실제 역기전력의 측정 파형



(a) (b)

그림 8. 기존의 LHSM(a)과 제안한 LHSM(b)의 사진

4. 실험 결과

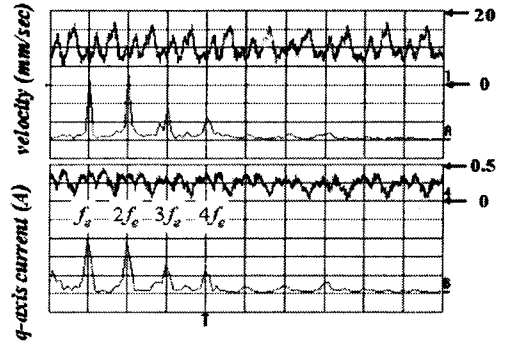
제안한 LHSM의 코깅 리플의 저감의 타당성을 검증하기 위해 실험을 수행하였다. 추력리플 성분을 확인하기 위해 LHSM의 구동속도는 저속 영역(10mm/sec)에서 수행하였으며 속도 및 전류 피드백 성분을 측정하였다.

그림 9(a)는 전동기 속도가 10mm/sec에서 제어했을 때 속도 및 전류 피드백 성분을 나타낸다. 속도 리플 성분은 대부분 코깅 리플의 원인으로 발생하는데, 영구자석을 가진 이동자와 고정자간의 상대적 위치에 따라 주기적인 속도 및 전류 리플이 발생하는 것을 알 수 있다.

그림 9(b)는 제안한 LHSM의 실험결과를 나타내며 그 결과를 FFT로 분석하여 추력리플을 비교하였다. 그림 9(a),(b)에서 발생하는 리플 주파수 성분은 대부분 1차, 2차, 3차, 4차가 발생하는데 이것은 앞에서 설명한 고차 퍼미언스의 영향 및 자석의 비대칭 배치로 인한 코깅 리플 성분 때문이다.

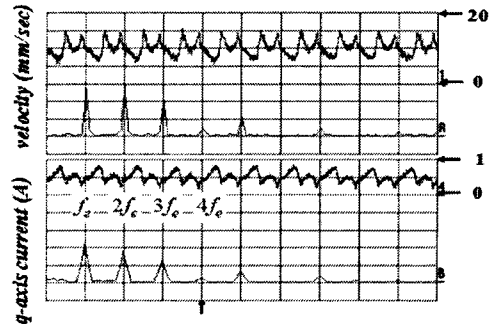
그러나 4차 리플 주파수 성분을 보면 제안한 LHSM이 기존의 LHSM보다 약 70% 감소하였음을 알 수 있다. 이것은 제안한 LHSM이 4차 리플 주파수 성분의 저감됨이 타당함을 보여준다. 그리고 나머지 주파수 성분 또한 제시한 LHSM이 다소 감소하였음을 알 수 있다.

따라서 본 논문에서 제안한 LHSM이 기존의 LHSM보다 코깅 추력을 저감한 구조임을 확인 할 수 있다.



THD:35.35%

(a) 기존의 LHSM의 속도 및 전류



THD:24.75%

(b) 제안한 LHSM의 속도 및 전류

그림 9. 속도 응답 및 피드백 전류(T/div=100[ms])

5. 결론

본 논문에서는 LHSM의 코깅 추력리플을 저감하기 위한 개선된 구조를 제안하였다. 그리고 추력리플 분석을 위해 자기 등가회로를 이용하여 해석하였으며 기존의 LHSM과 제안한 LHSM의 실험 결과를 비교함으로써 해석의 타당함을 보였다. 실험 결과로부터 제안한 선형 하이브리드 스텝핑 전동기는 별도의 복잡한 제어 방법이 없이도 마이크로 스텝핑 제어만으로 코깅 리플을 저감할 수 있음을 알 수 있다.

[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.