

영구자석형 선형 동기전동기의 skew에 따른 디텐트력 특성분석

장석명, 윤기갑*, 서정철, 김상준*, 정원욱*
 충남대학교 전기공학과, 한전 전력연구원*

The Detent Force Analysis of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor according to the skew

Seok-Myeong Jang, Gi-Gab Yoon*, Jung-Chul Seo, Snag-Joon Kim*, Won-Wook Jung*
 Chungnam National University, KEPRI*

Abstract - The severe problem in improving the positioning precision of a permanent linear synchronous motor(PMLSM) is the large detent force caused by the PM. It is generally an undesired effect that contributes to the torque ripple, vibration and noise of machine. In this paper, the method to reduce detent force according to the mover skew is studied and analyzed using the analytical method. The analytical results are validated by finite element analyses.

1. 서 론

영구자석 선형 동기전동기(PMLSM)는 선형 유도전동기에 비해 개루프 제어성능이 떨어지고 제조원가가 높다는 단점에도 불구하고 영구자석을 사용하기 때문에 상대적으로 효율이 높고 추력/중량비가 높아 고 추력화 및 고속화가 가능하며 역률이 높다. 또한, 추력/전류비가 높고 제어가 용이하여 고속 지상운송수단으로서 뿐만 아니라 고층빌딩의 엘리베이터, 반송 시스템 및 서보 시스템의 구동원으로 많이 연구되고 있다. 더욱이 최근 들어 높은 에너지 밀도를 가지는 영구자석의 개발과 영구자석의 가격하락으로 제조원가의 저감, 전력전자 및 디지털 제어기술의 발전에 의해 PMLSM의 단점이 많이 보완되었다[1].

PMLSM은 기본적으로 회전형 영구자석형 동기전동기와 구조 및 구동원리가 동일하나 상대적으로 큰 공극을 가지며 회전을 필치 놓는 유한한 길이를 가진다. 따라서, 가동자의 이동 변위가 제한될 뿐만 아니라 회전기에서는 존재치 않는 수직력 및 단부효과가 존재하므로 설계시 이러한 성분들을 고려해야 한다. 특히, 영구자석형 회전기에서의 코깅토크와 같이 디텐트력이 존재하며 이는 전동기 구동시 발생추력의 맥동으로 작용하여 기기의 소음 및 진동을 유발할 뿐만 아니라 기기의 제어성능을 저하시키며 특히 정지상태에서의 정밀 위치제어를 어렵게 하는 요인으로 작용되므로 디텐트력 저감 설계가 필요하다. 디텐트력을 저감하는 방법으로는 영구자석 자극 폭 조절법, 영구자석 형상 변화법, 전기자나 영구자석에 skew를 주는 방법 등이 있다[2]. 본 논문에서는 이러한 디텐트력 저감방법중의 하나인 전기자 skew에 따른 디텐트력 저감에 대해 해석하였다. 직각좌표계에서 공간조파법과 2-D 비퍼미언스를 이용하여 skew 유무에 따른 자속밀도 특성을 해석적인 방법으로 구하였고 구해진 자속밀도를 이용하여 skew에 따른 디텐트력을 계산하였다. 해석결과를 유한요소 해석결과와 비교하여 타당성을 검증하였다.

2. 해석모델

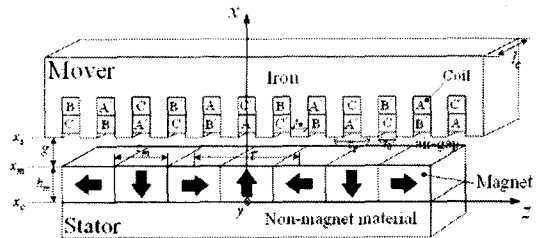


그림 1. skew가 고려되지 않은 PMLSM 해석모델

그림 1은 skew가 고려되지 않은 PMLSM 해석모델을 보여준다. 고정자는 Halbach 배열을 갖는 영구자석으로 이루어져 있으며 가동자는 3상 이층권 2/3 단결권으로 이루어져 있다. 해석을 용이하기 위해 다음과 같은 가정을 적용하였다.

- ▷ 영구자석의 비투자율은 1, 가동자 철심의 비투자율은 무한대로 한다.
- ▷ 슬롯 형상은 사각형 모양으로만 고려한다.
- ▷ 가동자 철심은 적층되어 있어 와전류가 유기되지 않는다.
- ▷ 고정자와 가동자의 길이는 무한히 길다.

3. 무부하 자속밀도를 이용한 디텐트력 해석

맥스웰 방정식과 가정으로부터 지배방정식을 유도하여 경계조건에 대입시키면 slotting과 skew가 고려되지 않은 무부하 자속밀도 특성식이 유도된다. Slotting과 skew는 2-D 비퍼미언스를 이용하여 계산할 수 있다[3]. 따라서 slotting과 skew가 고려된 무부하 자속밀도 특성식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} B_{slotted} &= \bar{n} \cdot B_x' \\ B_{skewed} &= \bar{n}_s \cdot B_x' \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 \bar{n} 와 \bar{n}_s 는 각각 skew가 고려되지 않은 2-D 비퍼미언스 함수와 skew가 고려된 2-D 비퍼미언스 함수를 나타내며 식 (2)와 같다. B_x' 는 slotting과 skew가 고려되지 않은 공극의 무부하 수직 자속밀도 특성식이며 식 (3)과 같다.

디텐트력은 영구자석과 슬롯구조에 기인한 공극 고조파

$$\tilde{\eta}(z, x) = \eta_{dc} + \sum_{k=1,2,3..} \eta_{ac} \cdot \cos\left(\frac{k\pi}{z_i} z\right)$$

$$\tilde{\eta}_s(z, x) = \eta_{dc} + \sum_{k=1,2,3..} \eta_{ac} \cdot \frac{\sin\left(\frac{\xi k \pi}{2\tau_i}\right)}{\frac{\xi k \pi}{2\tau_i}} \cdot \cos\left(\frac{k\pi}{\tau_i} z\right) \quad (2)$$

$$B_x^l = \sum_{n=1,3,5..} \frac{\mu_0}{2} \left[\frac{(M_{2n} + M_{2n})e^{-k_n y_m} - 2M_{2n}e^{k_n y_0} + (M_{2n} - M_{2n})e^{k_n y_m} e^{2k_n y_0}}{e^{-2k_n y_0} - e^{-2k_n y_m}} \right]$$

$$\times \left[e^{-2k_n x_s} e^{k_n x} + e^{-k_n x} \right] \cos(k_n z) \quad (3)$$

성분의 증가에 의한 것으로 회전기에서의 코킹토크와 동일한 특성을 가진다. 따라서 회전기에서 적용되었던 많은 연구들이 직선기에 그대로 적용될 수 있다. 먼저 디텐트력 저감을 위해 영구자석의 잔류밀도를 조절하여 공극 자속의 양을 줄이는 방법을 들 수 있으나 이는 발생 추력의 저하를 가져오며 디텐트력의 크기에만 영향을 줄 뿐 근본적인 저감책은 될 수 없다. 일반적으로 디텐트력 저감을 위해서 공극 자속의 고조파 성분을 줄여 주는 방법이 보편화되어 있으며 이러한 방법으로 영구자석의 형상을 변화시키는 방법, 분할 영구자석을 이용하는 방법, 전기자나 영구자석에 skew를 주는 방법 등이 있다. 본 논문에서는 PMLSM 전기자에 skew를 주는 방법의 의한 디텐트력 저감법을 다루고 있다.

디텐트력은 가동자가 이동할 때 추력발생 전류와는 상관없이 발생하는 에너지 변화량이므로 에너지법을 이용하여 표현이 가능하며 영구자석과 철심의 자화 에너지는 공극 에너지에 비해 무시할 만큼 작으므로 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$F_j(z) = -\frac{\partial W(z)}{\partial z} = -\frac{\partial W(z)_{airgap}}{\partial z}$$

$$F_d^{skew}(z) = -\frac{\partial W(z)^{skew}}{\partial z} = -\frac{\partial W(z)^{skew}_{airgap}}{\partial z} \quad (4)$$

여기서

$$W(z) \approx W(z)_{airgap} = \frac{1}{2\mu_0} \int_V [B_{stotted_l}]^2 dV$$

$$W(z)^{skew} \approx W(z)^{skew}_{airgap} = \frac{1}{2\mu_0} \int_V [B_{stotted_l}^{skew}]^2 dV$$

디텐트력 계산은 가동자를 이동시켜가면서 각 지점에서의 무부하 수직 자속밀도를 계산한 후 계산된 자속밀도를 이용하여 각 지점의 에너지를 구한 후 각 지점간의 에너지변화로 계산된다.

그림 2와 3은 skew가 없는 경우, 그림 4와 5는 skew가 half slot skew인 경우, 그림 6와 7은 skew가 ons slot skew인 경우에 각각 가동자를 이동시켜가면서 무부하 수직 자속밀도 변화를 계산한 것이다. 그림 2, 4, 6에서 가동자를 이동시켜가면서 skew에 따른 수직 자속밀도 변화 차이를 보여주나 skew에 따른 차이를 더욱더 명확하게 보여주기 위해서 가동자를 이동시켜가면서 얻어진 무부하 수직 자속밀도를 동시에 나타낸 그림 3, 5, 7을

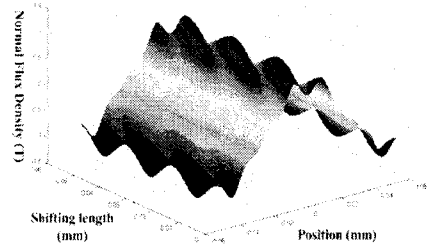


그림 2. skew가 없는 경우 가동자 이동에 따른 수직 자속밀도 변화 I

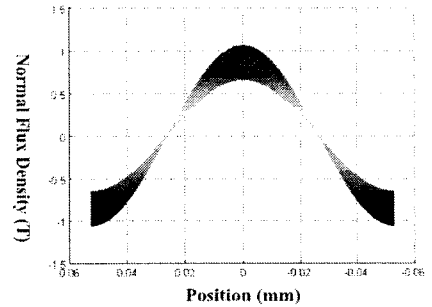


그림 3. skew가 없는 경우 가동자 이동에 따른 수직 자속밀도 변화 II

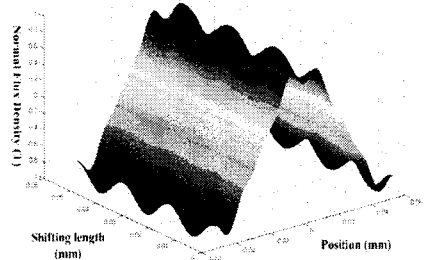


그림 4. half slot skew의 경우 가동자 이동에 따른 수직 자속밀도 변화 I

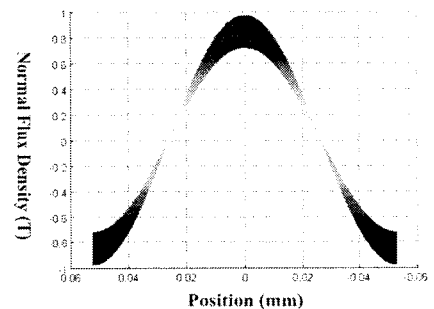


그림 5. half slot skew의 경우 가동자 이동에 따른 수직 자속밀도 변화 II

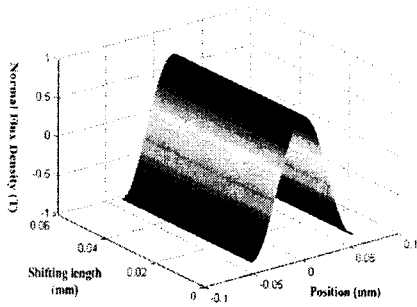


그림 6. one slot skew를 갖는 경우 가동자 이동에 따른 수직 자속밀도 변화 I

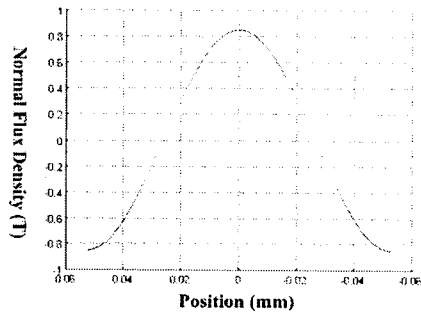


그림 7. one slot skew를 갖는 경우 가동자 이동에 따른 수직 자속밀도 변화 II

같이 보여준다. 각 그림에서 보여진 것과 같이 가동자 이동에 따른 수직 자속밀도 변화는 skew의 정도에 따라 변화하며 one slot skew를 갖는 경우에 가장 적은 변화를 보인다. 이와 같은 결과를 통하여 skew의 정도에 따라 디텐트력이 변화하며 one slot skew인 경우 가장 적은 디텐트력이 발생함을 예상할 수 있다.

그림 8, 9, 10은 skew에 따른 디텐트력 해석결과를 유한요소 해석결과와 비교한 것이며 해석결과가 잘 일치함을 보여준다. 예산한 바와 같이 디텐트력은 one slot skew인 경우 가장 적다.

3. 결 론

본 논문에서는 PMLSM 전기자에 skew를 주는 방법에 의한 디텐트력 저감법에 대하여 다루었다. skew에 의하여 디텐트력이 크게 감소하였고 공극 수직 자속밀도 성분의 왜곡과 디텐트력이 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다. 해석결과는 유한요소 해석결과와 비교하여 타당성을 검증하였다.

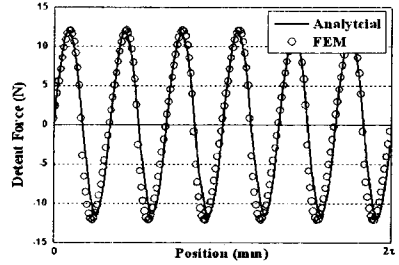


그림 8. skew가 없는 경우의 디텐트력

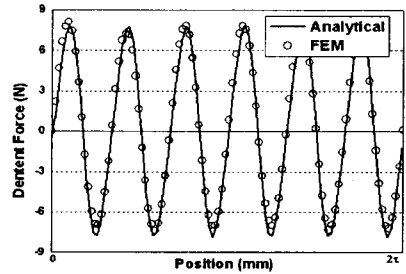


그림 9. half slot skew를 갖는 경우의 디텐트력

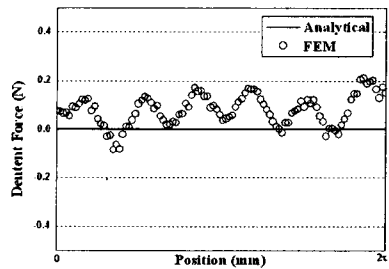


그림 10. one slot skew를 갖는 경우의 디텐트력

[참 고 문 헌]

- [1] 윤인기, "PMLSM의 정특성 해석 및 디텐트력 저감방안에 관한 연구", 충남대학교 석사논문, 2000.
- [2] 임기채, 우준근, 홍정표, 김규탁, "영구자석 선형동기전동기의 디텐트력 저감법", 전기학회논문지, 49B권, pp. 749-756, 2000.
- [3] Z.Q. Zhu, D. Howe, "Instantaneous magnetic field distribution in permanent magnet brushless dc motors, Part III : Effect of stator slotting." IEEE Trans Magn., vol. 29, pp 143-151, 1993.