

치-슬롯을 갖는 직선형 동기 전동기의 설계 특성

장 석명, 유 대준, 최 장영, 박지훈
충남대학교

Design of linear synchronous motor with slotted structure

Seok- Myeong Jang, Dae-Joon You, Jang-Young Choi, and Ji-Hoon Park
Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University

Abstract - This paper presents a analytical field solutions for the general class of Linear Brushless DC (LBLDC) motors with PM mover and 3-phase winding stator. In our magnetic field analysis, we have adopted an approach which can treat both magnetized material and winding from the each field analysis by magnetic vector potential considering 2-Dimensional slot modeling. Therefore, we give accurate analytical formulas and object function for design and parameters estimation by its magnetic field.

1. 서 론

직선형 동기 전동기(LBLDC)는 기존의 회전형 전동기와 달리 직선 운동에 의한 공장 및 사무 자동화, 운송 운용, 벨트, 체인 등에 널리 응용되고 있으며, 단위 무게 당 토크 비율 및 효율에 있어서 일반 유도전동기에 비해 신뢰성이 높고, d, q 에 의한 비간섭 형태의 모델링이 단순하여 제어성이 우수한 장점을 가지고 있다. 그러나 슬롯을 구성한 고정자를 갖는 직선형 동기 전동기에 있어서, 자속의 집중과 왜곡현상에 의한 detent force가 생겨나게 되며 자석과 코일 상호간의 자기적 전달에 있어서 정확한 추력 및 수직력을 추정하기 어렵다. 더욱이 용량 계산과 제어를 위한 전동기 파라미터의 계산에 있어서 많은 오차를 내포하게 된다.

그러므로 본 논문은 슬롯을 갖는 직선형 영구자석 전동기의 공간 고조파 해석적 기법과 슬롯 모델링을 통하여 전동기의 기하학적 구조에 따른 자기적 특성을 제시한다. 영구 자석에 의한 자계 분포에 있어서 슬롯이 없는 가정된 모델과 2차원 상대 퍼미언스를 도입하여 슬롯의 영향을 고려한 영구자석의 자계를 제시하며, 전류 코일의 경우 sheet current에 의한 자계 분포에 대해 제시한다. 영구자석 및 전류 코일에 대한 자계는 자기적 벡터 퍼텐셜을 이용한 단일한 기법으로 계산되어지며, 모든 해석적 결과는 FEM에 의해 검증되어진다.

2. 영구 자석 및 코일의 자계 분포 해석

2.1 해석 모델

특성 해석을 위한 모델의 기하학적인 구조는 그림 1과 같다. 가동자로 구성된 수직 배열 영구자석은 자계의 차폐 효과와 자속밀도의 효율을 크게 하기 위해 철심(Back iron)과 같이 사용되었으며, 고정자로 구성된 3상 코일은 슬롯과 치 부분에 일정하게 감기는 집중 권선법이 적용되었다. 제시된 모델의 일정한 y 방향의 길이에 대해 2차원 해석에 있어서, 일정한 극 간격 τ 에 대해 영구자석 및 코일의 길이는 각각 τ_m, τ_c 로 주어졌으며, 높이는 h_m, h_c 로 제시되어 있다. 또한 제시된 모델에 있어서 고정자의 고정 좌표계 (x, y, z) 에 대해 영구자석 가동자는 (x', y', z') 를 갖는 이동 좌표계를 갖는다.

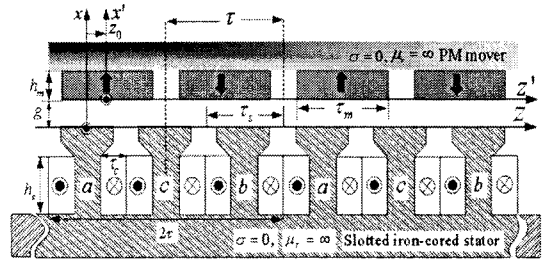


그림 1. 직선형 Brushless DC 전동기.

따라서 z_0 의 변화에 따른 영구 자석 및 코일에 의한 자계 특성은 중첩에 의해 계산되어진다.

그림.1에 있어서, g 는 공극의 높이이며, τ_s 는 슬롯폭 또는 치폭을 의미함으로써 제시된 전동기는 $3\tau_s$ 의 일정 주기를 갖는다. 또한 해석적 기법을 단순화시키기 위해 영구 자석 및 코일의 투자율은 공기와 같고 철심의 투자율은 ∞ 로 가정하였으며, 공극과 단부의 누설 자속은 무시하였다.

2.2 영구 자석의 자계 분포 해석

그림.1의 수직 자화 배열을 갖는 한 쌍 이상의 영구 자석은 그림.2의 해석 모델에 있어서, slotless 모델에 의한 해석으로부터 slotted 모델로 확장되어 진다. 이때, 영구 자석 모델링은 B_r/μ_0 을 갖는 자화량 M_0 와 주기 2τ 를 갖는 무한 지수함수 푸리에 급수에 의해 식(1)으로 표현 된다.

$$M = \sum_{n=1}^{\infty} M_{xn} e^{-jk_n z'} i_{x'}$$

$$M_{xn} = \frac{M_0}{jn\pi} (1 - e^{jk_n \tau}) (e^{jk_n \tau_m/2} - e^{-jk_n \tau_m/2}) \quad (1)$$

여기서, $k_n = \pi n/\tau$ 로 주어지는 n 차 공간고조파이며, 영구자석 내부는 공극과 같은 투자율을 갖는다.

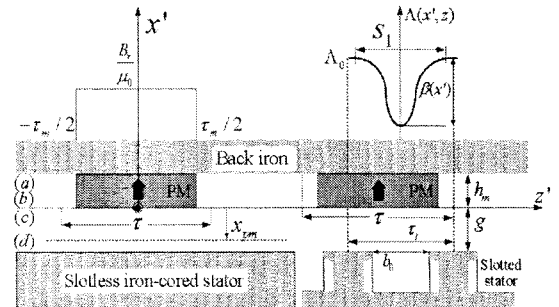


그림. 2 영구자석의 자계 해석 모델

식(1)의 자화 분포를 갖는 영구자석 내부의 자속 밀도 특성식은 등가자화 전류 J_e 에 의해 식 (2)를 갖는다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_e = [\nabla \times \vec{M}] \quad (2)$$

또한, 그림(2)의 2차원 해석모델에 있어서, 영구자석 내부의 자속밀도 특성식은 $\nabla \cdot B = 0$ 과 $B = \nabla \times A$ 로부터, 영구자석 높이 h_m 이 고려된 자속밀도 B 와 벡터 퍼텐셜 A 의 전달관계로 식 (3)과 같이 표현된다[1].

$$\begin{bmatrix} B_{zn}^{(b)} \\ B_{zn}^{(c)} \end{bmatrix} = k_n \begin{bmatrix} \coth k_n h_m & \frac{-1}{\sinh k_n h_m} \\ \frac{1}{\sinh k_n h_m} & -\coth k_n h_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{yn}^{(b)} \\ A_{yn}^{(c)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cosh k_n h_m - 1 \\ \sinh k_n h_m \\ -\cosh k_n h_m + 1 \\ \sinh k_n h_m \end{bmatrix} \mu_0 M_{xn} \quad (3)$$

여기서, 공극 내부의 자속밀도 특성식은 자화벡터를 갖지 않으므로, 공극의 높이 g 만 고려된 자속 밀도 특성식을 갖는다.

슬롯이 없는 영구 자석과 공극의 전달관계에 의한 방정식에 있어서, 철심의 투자율이 ∞ 로 가정되어 철심 경계면의 수평 성분의 자속밀도는 0이 되며, 각 경계면의 벡터 퍼텐셜과 자속밀도의 연속성에 의해, 경계면(b) 또는(c)의 벡터 퍼텐셜은 얻어지며 공극으로의 일반화된 벡터퍼텐셜은 식(4)와 같이 표현된다.

$$A_{yn}^{x'} = \frac{\mu_0 M_{xn}}{2jk_n} \frac{(a+\beta)(e^{-k_n g} e^{k_n x'} + e^{k_n g} e^{-k_n x'})}{a e^{k_n g} + \beta e^{-k_n g}}$$

$$a = (e^{2k_n h_m} - 1), \quad \beta = (e^{-2k_n h_m} - 1), \quad (0 < x' < g) \quad (4)$$

식 (4)의 일반화된 벡터 퍼텐셜은 $B = \nabla \times A$ 에 의해 자속밀도를 식 (5)와 같이 유도된다.

$$B_{xn} = jk_n A_{yn}, \quad B_{zn} = \frac{\partial A_{yn}}{\partial x'} \quad (5)$$

식 (5)로부터 얻어진 자속밀도 특성식은 직선형 동기 전동기에 있어서, 극 간격에 대한 영구자석의 높이 및 길이 그리고 공극에 따른 2차원 자속밀도 변화 특성을 제시하며 상대 퍼미언스 함수의 도입에 의한 slotted 모델의 자속밀도 특성식을 도출한다.

2.3 상대 퍼미언스에 의한 슬롯모델링.

퍼미언스는 기자력 NI 와 자속 Φ 와의 양을 결정짓는 자기적 파라미터로서 slotless 모델과 slotted 모델에 대한 비를 상대 퍼미언스로 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\bar{\lambda} = \frac{P_g^{slotted}}{P_g^{slotless}} \quad (6)$$

여기서, 상대 퍼미언스는 일반적인 경험 상수에 대한 카터 계수와와의 관계에 있어서 식 (7)과 같이 유효공극과 기계적 공극으로 표현된다.

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{k_c} = \frac{g}{g'} \quad (7)$$

따라서, slot에 의한 자기적 공극 g' 는 $k_c > 1$ 에 대해서 전체적인 자속 패스 거리가 길어지는 요소임을 알 수 있다. 그림. 2의 슬롯을 갖는 고정자에 있어서, 2차원 슬롯 모델링을 위한 2-D permeance function 은 식 (8)과 같이 고려된다.

$$\Lambda(x, a) = \Lambda_0 \left[1 - \beta(x) - \beta(x) \cos\left(\frac{\pi}{s_1/2} z\right) \right] \quad \text{for } -s_1/2 \leq z \leq s_1/2$$

$$\Lambda(x, z) = \Lambda_0 \quad \text{for } |z| \geq \frac{s_1}{2}, |z| \leq \tau_t \quad (8)$$

여기서, τ_t 는 슬롯폭 τ_s 과 같은 치의 폭을 의미하며, $\beta(x')$ 는 $x' = x_{pm}$ 에 대한 공극 높이에 따른 슬롯 현상 함수를 나타내고, s_1 는 slot 길이에 대한 슬롯 현상 범위를 제한한다. 따라서 무한 주기에 대한 푸리에 함수에 의해 2-D 퍼미언스 함수는 식 (9)와 같다 [2].

$$\Lambda(x, z) = \Lambda_0 \left[(1 - \beta(x')) \frac{s_1}{t_t} + \sum_{n=1}^{\infty} -\frac{2}{\pi n} \beta(x') \left[1 + \frac{n^2}{\left(\frac{\tau_t}{s_1}\right)^2 - n^2} \right] \sin(n\pi \frac{s_1}{\tau_t}) \cos\left(\frac{nz}{\tau_t}\right) \right] \quad (9)$$

상대 퍼미언스 함수는 슬롯이 없는 모델에 대한 슬롯의 상대적인 값을 의미함으로서 본 논문에서는 $\beta(x')$ 와 s_1 을 고려한 식 (10)의 카터 계수를 도입한다[2].

$$k_c = \left[1 - r \frac{g}{\tau_t} \right]^{-1}$$

$$r = \frac{4}{\pi} \left[\left(\frac{b_0}{2g} \right) \tan^{-1} \left(\frac{b_0}{2g} \right) - \ln \sqrt{1 + \left(\frac{b_0}{2g} \right)^2} \right] \quad (10)$$

또한, schwarz-Christoffel 변환에 의한 공극 높이와 슬롯 길이에 따른 슬롯의 영향을 고려한 상대 퍼미언스의 변화율 $\beta(x')$, s_1 는 식 (11)과 같이 주어진다.

$$\beta(x') = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{b_0}{2g} \right)^2 (1 + v^2)}} \right] \quad (11-1)$$

$$s_1 = \frac{rg}{\beta(x')} \quad (11-2)$$

여기서,

$$y \frac{\pi}{b_0} = \frac{1}{2} \ln \left[\frac{\sqrt{a^2 + v^2} + v}{\sqrt{a^2 + v^2} - v} \right] + \frac{2g}{b_0} \arctan \frac{2g}{b_0} \frac{v}{\sqrt{a^2 + v^2}}$$

$$a^2 = 1 + \left(\frac{2g}{b_0} \right)^2, \quad y = g - x_{pm}$$

따라서, 2-D 상대 퍼미언스 함수는 식 (9)와 식 (10)에 의해 식 (12)와 같이 얻어진다.

$$\bar{\lambda}(x, z) = \frac{1}{k_c} \left[(1 - \beta(0)) \frac{s_1}{t_t} + \sum_{n=1}^{\infty} -\frac{2}{\pi n} \beta(x') \left[1 + \frac{n^2}{\left(\frac{\tau_t}{s_1}\right)^2 - n^2} \right] \sin(n\pi \frac{s_1}{\tau_t}) \cos\left(\frac{nz}{\tau_t}\right) \right] \quad (12)$$

여기서, $\beta(0)$ 은 슬롯에 의한 직류 성분을 의미하므로 공극 높이에 영향을 받지 않는 절대치 값으로 얻어지며, 슬롯에 가까워 질수록 슬롯의 영향은 식 (12)의 교류 성분에 의해 자속의 왜곡을 계산할 수 있다. 그러므로, 슬롯리스의 자계 특성에 대해 슬롯의 영향을 고려는 자기적 저항에 대한 상대적인 퍼미언스로 얻어질 수 있으며, 2차원 해석을 위한 상대 퍼미언스는 슬롯에 가까워수록 자기적 왜곡은 심해진다. 즉 슬롯을 고려한 영구자석의 자계는 식 (13)과 같이 얻어진다.

$$B_{slot} = B_{slotless} \bar{\lambda} \quad (13)$$

2.4 Sheet current에 의한 자계 분포

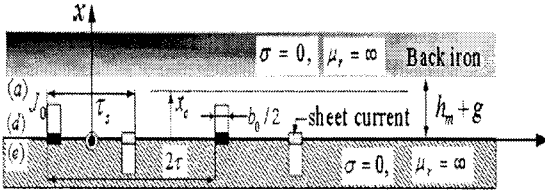


그림 3 sheet current에 의한 권선의 자계 해석

슬롯 내부의 해석은 고정자 코어의 투자율과 코일의 투자율이 상대적으로 큰 차이를 보임으로서 슬롯 내부의 모델링은 복잡해지고 정확한 자계 특성을 가지기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 슬롯 개구간의 sheet 전류 분포에 의한 슬롯리스 형태의 해석적 기법은 도입한다. 그림. 3은 한 상의 전류에 대한 전류밀도에 있어서 y 방향의 크기와 z 방향의 분포를 식 (14)와 같이 나타낸다.

$$J = \sum_{n=1}^{\infty} J_{yn} e^{-jk_n z} i_y \quad (14)$$

또한, 자기적 field의 벡터 퍼텐셜은 식 (15)와 같이 각 물질의 내부에 있어 존재하게 된다[2].

$$A_y(x) = \text{Real}((c_1 e^{-k_n x} + c_2 e^{k_n x}) e^{-jk_n z}) \quad (15)$$

그러므로, 그림.3의 각 물질을 고려한 경계조건으로부터 경계면 벡터 퍼텐셜의 계수는 계산되어 질 수 있으며, 공극 내부의 자속밀도는 식 (5)로 얻어질 수 있다. 여기서 물질의 경계 조건은 자속밀도의 연속조건과 자계의 불연속 조건에 의해 식 (16)과 (17)과 같이 얻어진다.

$$H_{zn}^{(a)} = 0 \quad (x = g + h_m) \quad (16)$$

$$H_{zn}^{(e)} - H_{zn}^{(d)} = J_{yn} \quad (x = 0) \quad (17)$$

3. 자계 분포해석에 대한 FEM 검증

표1. FEM 검증을 위한 설계 파라미터

항목	기호	크기(단위)
극 간격	τ	33(mm)
영구자석 높이	h_m	10(mm)
영구자석 길이	τ_m	25(mm)
슬롯폭	τ_s	22(mm)
슬롯 개구간 길이	b_0	3(mm)
코일 높이	h_c	11(mm)
코일 길이	τ_c	6(mm)
최대 전류	i_{max}	2(A)
코일 턴수	N	100(turns)
공극 높이	g	5(mm)

해석적 기법에 대한 FEM 검증에 있어서, 표1은 직선형 BLDC의 설계 변수를 제시하고 있다. 여기서, 영구자석에 의한 극 간격에 대해 슬롯 폭은 1/1.5 배를 갖으며, 코일 지름 0.65[mm]에 대해 최대 정격전류를 2[A]로 선정하였다. 그림. 1은 슬롯을 구성하지 않은 slotless type에 있어서 영구자석에 의한 수직 자속밀도를 보여주고 있다. 그러므로, 슬롯을 고려한 정확한 자속밀도 특성은 그림. 2의 상대 퍼미언스에 의해 완성되어진다. 또한, 그림. 3은 전류 코일에 의한 수직 자속밀도를 제시함으로써 공극에 있어서 Linear BLDC의 힘특성을 계산할 수 있다.

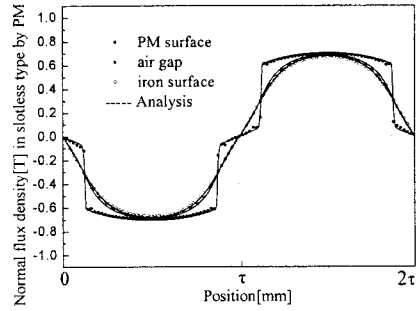


그림 1. 영구 자석에 의한 수직 자속 밀도(slotless type)

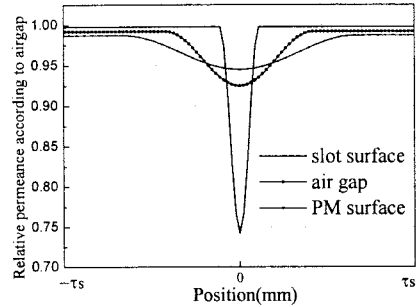


그림 2. 공극 높이에 따른 상대 퍼미언스

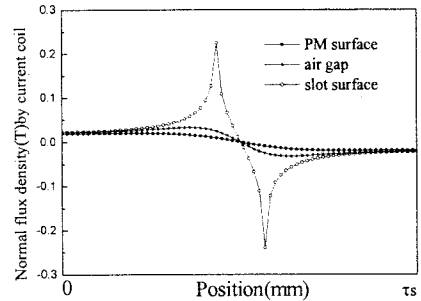


그림 3. 상당 전류 2[A]에 의한 공극의 수직 자속밀도

4. 결 론

본 논문은 슬롯을 갖는 직선형 동기 전동기의 자기적 특성을 계산하기 위하여, 영구자석 및 권선에 의한 자계 분포를 공간 고조파의 해석적 방법을 통하여 계산하였으며, 2-D 상대 퍼미언스 함수로부터 슬롯의 특성을 형상화하였다. 구해진 자계 특성식은 직선형 동기 전동기의 설계에 있어서 최적화 및 용량 산정을 위한 목적 함수로 이용되어 질 수 있으며, 제어에 있어서 정확한 전동기 파라미터를 제공하는 함수로 이용되어 진다.

[참 고 문 헌]

- [1] David L. Trumper, Won-jong kim, "Design and Analysis Framework for Linear Permanent-Magnet Machines." IEEE Trans. Magn, Vol.32, No.2, pp.371-379, March/April 1996.
- [2] Z. Q. Zhu, D. Howe "Instantaneous Magnetic Field in Brushless Permanent Magnet DC motors" IEEE Trans. Magn, Vol.29, No.1, pp.143-150, JAN 1993.