2001년도 대한전기학회/대한전자공학회 시스템및제어분야 합동 추계학술대회 논문집 (2001.11.24)

오픈 슬릿을 가진 선형 유도 전동기의 특성연구

유 수엽, 강명법
호서 대학교, 벤처 대학원

A Study of Cylindrical Linear Induction Motor with Open Slit

Soo-Yeub Yoo, MyungBub Kang
Graduate School of Venture of Hoseo University

Abstract - 원통 모양의 선형 유도 전동기를 구성하고 코일의 밖에 위치한 코일에 전류가 유도되며 이때 코일의 축방향과 이에 수직인 방향으로 힘이 유도되며, 이때 힘의 특성이 유도 전동기의 특성을 지님을 밝혀 내었다. 이 힘은 두 코일의 축이 어긋나서 생기는 힘과, 드라이브 코일의 open slit의 정도에 따라 다른 것을 밝혔다.

1. 서 론

원통형의 유도 전동기는 우주개발 및 군사목적의 EML(Electromagnetic launcher)로 개발되어 왔다. 이 전동기의 특징은 이차 코일을 코일의 내부에 위치하고 외부의 원통형 코일이 전류를 유도하여 내부의 코일에 전류 및 힘을 유도한다는 특징이 있다. 이 형태의 전동기는 내부 코일의 크기에 제한이 있고 그 이용에 한계가 있다. 이 제한을 벗어나는 방법중의 하나는 코일의 위치를 바꾸는 것이다. 즉 이차 코일을 원통형의 드라이브 코일의 외부에 위치하는 형태가 된다. 이때 외부의 원통형 코일에 일정한 각도의 열림각을 갖게하면 드라이브 코일에 전력을 공급하는 문제가 해결 될 것이다. 이 형태의 전동기를 구성하면 몇가지 새로운 사실이 나타난다. 즉 기존의 선형 전동기에서 없던 편축에 의한 힘과, 오픈 각도에 의한 힘이 존재한다는 것이다. 이 논문에서는 간단한 모델을 통하여 유도전동기의 특성을 조사하고, 진행방향으로 힘과, 열림각에 의한 힘을 조사하였다.

2. 본 론

2.1 시스템 개요

전동기의 형태는 그림 2.1 과 같은 형태의 형상을 지닌다.

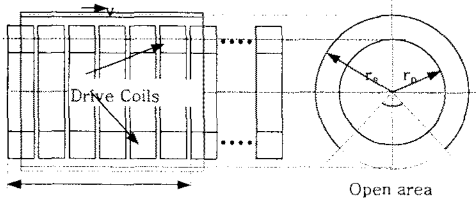


그림 2.1 제시된 선형 유도 전동기의 형태

이 전동기의 이차코일에는 drive coil에서 제공하는 진행파형태의 자장에 의하여 전류가 유도된다. 즉 이 전동기는 드라이브코일에 의하여 자장및 이차 전류가 제공되는 유도 전동기의 형태를 가졌다. 이때 드라이브 코일이 만드는 기본진행파의 전류는 드라이브 코일 주변에 진행파형태의 자계를 형성하고 이 자계는 이차측의 코일에 전류를 유도하며 이 전류는 다시 일차측코일의 전류와 결합한 힘을 만들어 내는데 이 힘이 코일의 진행방향의 힘과 반경 방향으로 형성되므로, 이 힘이 결려된 부분은 그 반경 방향이 없으므로 코일은 진행과 함께 편축을 만드는 하는 힘이 구성된다.

2.1.1 모델링

드라이브 코일의 형태는 절연된 전선을 적층하여 구성한다. 이 드라이브 코일은 일정한 두께를 가진 형태로 이를 수학적으로 다루기 쉬운 형태로 다루기 위하여 드라이브 코일의 적당한 반경의[1] 판 형태의 전류로 간략화 하였다. 이 전류는 식 2.1의 phaser 의 형태로 표시될 수 있다.

$$\underline{K}_{pn}(t,z) = \mathrm{Re}(\underline{k}_{pn.\max} e^{j(\omega t - n\beta z - \varphi_n)}) = \mathrm{Re}\{\sqrt{2}\underline{K}_{pn} e^{j(\omega t - \beta z)}\} \qquad 2.1$$

여기서 $\underline{K}_{pn}$은 phase 형태로 나타낸 드라이브 코일의 전류이다. ω는 드라이브 코일에 여기되는 전류의 각주파수이며, β 는 wave number이며, 이 β는 폴 피치 τ와 는 진행파의 속도v_s 와는 $v_s = 2\cdot\tau\cdot f = \frac{\tau\cdot\omega}{\pi} = \frac{\omega}{\beta}$ 관계가 있다. 이 전류에 의하여 드라이브 코일 주변의 자계의 형태를 관측하기 위하여 마그네틱 벡터 포텐셜을 구하려면 식 2.2 와 같이 나타내진다.

$$\overline{A}_{\phi.p1} = \begin{cases} \mu_0 K_p r_p I_1(\beta r_p) K_1(\beta r) \hat{a}_\phi & r_p \le r \le \infty \\ \mu_0 K_p r_p K_1(\beta r_p) I_1(\beta r) \hat{a}_\phi & 0 \le r \le r_p \end{cases} \qquad 2\text{-}2$$

이식의 μ는 투자율이며 K_p는 드라이브 코일의 전류를 판형태의 전류로 등가전류로 나타낸 것이다. 이식의 K_1, I_1은 1차 베셀 함수이다. 이 마그네틱 벡터포텐셜은 전류의 방향과 같은 형태의 방향이므로 이 벡터 포텐셜로 드라이브 코일과 같은 방향의 벡터방향을 가진다. 마찬가지로 2차 코일은 2-2와 유사한 형태를 가지나 도체에 흐르는 전류와 열려있는 코일의 slit의 영향을 고려하면 이차 코일의 전류에 의한 벡터포텐샬의 기본 차수는 푸리에 급수에 의하여 구하면

$$\overline{A}_{s\varphi} = \begin{cases} \mu_0 \dfrac{2\pi - \alpha}{2\pi} \underline{k}_s r_s I_1(\beta r_s) K_1(\beta r) \hat{a}_\phi & r_s \le r \le \infty \\ \mu_0 \dfrac{2\pi - \alpha}{2\pi} \underline{k}_s r_s K_1(\beta r_s) I_1(\beta r) \hat{a}_\phi & 0 \le r \le r_s \end{cases} \qquad 2\text{-}3$$

이다. 이 식의 α는 이차측 코일 즉 sleeve 의 열려있는 각이다.

이차 코일의 유도 전류는 일차코일의 진행파와 이차 코일의 속도가 0이 아닌 상대적인 속도가 있을때 이차

코일에 유도 된다. 이 전류의 크기는 옴의 법칙에 의하여 식 2-4에 의하여 구해진다.

$$\vec{K}_s = \alpha_s \gamma_s (\vec{E}_\phi + \vec{v}_z \times \vec{B}_r) \qquad 2\text{-}4$$

여기에 는 이차코일의 일체형의 도체일 경우 두께이며, γ_s는 2차 코일의 도체의 전도상수(conductivity)이다. $\vec{E}_\phi$와 $\vec{B}_r$는 전계와 자계의 세기이며 아래 첨자는 그 전계의 벡터방향을 나타낸다, 이때 속도의 표시인 $\vec{v}_z$는 이차 코일과 일차코일과의 상대속도이다.
이 전동기의 경우에는 기본 파에 대하여 식 2-2와 2-3의 관계식에서 자계의 벡터포텐셜을 구하였으므로 이식을 이용하여 2-4식에서 2차측의 전류를 구할 수 있다. 즉 $\vec{E}_\phi = -\frac{\partial}{\partial t}\vec{A}_\phi = -j\omega\vec{A}_\phi$, $\vec{B}_r = -\frac{\partial}{\partial z}\vec{A}_\phi = j\beta\vec{A}_\phi$의 관계와 유도 전동기에서 사용하는 slip상수인 $s = \frac{\vec{v}_{z,s} - \vec{v}_z}{\vec{v}_{z,s}}$ 를 도입하면 2-4식은

$$K_s \cdot \vec{a}_\phi = -j\beta a_s \gamma_s s v_s \left[\begin{matrix} K_{p1} r_p I_1(\beta r_p) K_1(\beta r_p) \\ + \frac{2\pi - \alpha}{2\pi} K_s r_s I_1(\beta r_s) K_1(\beta r_s) \end{matrix} \right] \vec{a}_\phi \qquad 2\text{-}5$$

이다. 이 식을 1차측의 전류에 의하여 2차측에 유도되는 전류의 식으로 구하면

$$K_s \cdot \vec{a}_s = \frac{-s}{\sqrt{s^2 + s_c^2}} \frac{2\pi}{2\pi - \alpha} \frac{r_p I_1(\beta r_p)}{r_s I_1(\beta r_s)} K_p \cdot \vec{a}_\phi \angle\varphi \qquad 2\text{-}6$$

가 된다. 이 식의 $\varphi = Tan^{-1}\frac{s_c}{s}$는 1차측의 전류와 2차측의 전류의 위상각을 말하며 s_c는 임계상수로

$$s_c = \frac{2\pi}{(2\pi - \alpha)\mu_0 a_s \gamma_s v_s \beta r_s K_1(\beta r_s) I_1(\beta r_s)} \qquad 2\text{-}7$$

의 관계를 가지고 있다.

2.2 전동기의 특성

이상의 모델링에서 원통의 내외부에 삽입된 도체와 코일간에는 유도 전동기의 형태로 구성됨을 보여주었다. 이 전동기의 과도기적 형태는 매우 복잡하고 이 전동기 모델로는 해결하기에 무리가 있어 여기서는 정상상태의 특성만 구하여 보기로 한다.
원통형 전동기의 축방향으로 힘은 축의 방사상의 형태의 자계에 의하여 힘이 구성된다. 따라서 이 자속의 방향을 구하면

$$\overline{B}_r = j\beta\left(\overline{A}_{p\phi} + \overline{A}_{s\phi}\right) \qquad 2\text{-}8$$

로 된다. 이 관계식과 선형모델에서 구한 2차측전류를 이용하여 축방향의 힘을 구하면

$$F_{z,1} = \frac{2\pi}{2\pi - \alpha} \frac{\mu_0 \beta r_p^2 I_1^2(\beta r_p) K_1(\beta r_s)}{r_s I_1(\beta r_s)[\frac{s_c}{s} + \frac{s}{s_c}]} K_{p1}^2 \qquad 2\text{-}9$$

의 관계식이 된다. 여기에 힘의 아래첨자 1은 이 힘은 기본진행파에 의한 크기를 말한다. 이 힘의 크기는 βr_s

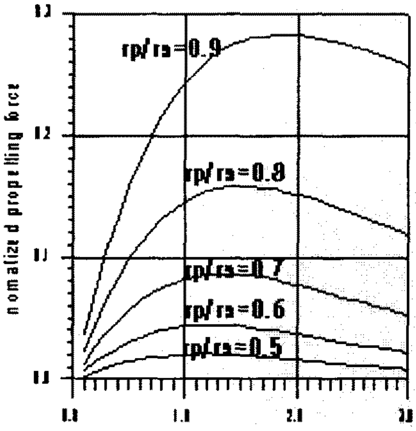
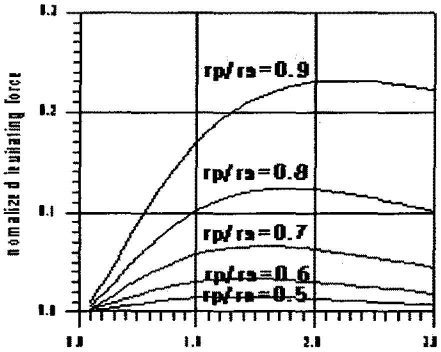


그림 2.2 진행방향으로 힘의 크기
($F_{z\max} / (K_{p1}^2/2)$:nomalized force)

형태가 된다. 이 관계식은 선형 유도 전동기의 설계에 필요한 상수를 구하기 위한 그래프로 전동기의 드라이브 코일의 반경과 2차측 코일의 반경, 폴 간격거리등을 결정하는 지표를 구하는데 필요한 그림이다. 즉 진행방향으로 최대 힘을 구하려면 적당한 폴피치는 2차측 코일과 1차측 코일의 유효 반경비와 관계한다는 관계를 가지고 설계해야 한다.
이 선형 유도전동기는 이 축 방향의 힘 이외의 축의 방사형의 힘이 발생된다. 이 힘의 역시
모델링된 형태의 전동기관계식에서 구할 수 있다. 이 힘의 크기는

$$f_{r1} = \frac{2\pi}{2\pi - \alpha} \frac{s^2}{s^2 + s_c^2} \mu_0 \frac{\beta r_p^2}{r_s} \frac{I_1^2(\beta r_p)}{I_1(\beta r_s)} K_0(\beta r_s) K_{p1}^2 \qquad 2\text{-}10$$

로 구하여 진다. 이 관계식에서 힘의 크기를 단위힘의 크기로 단순화한 형태로 구해보면 그림 2-3 과 같은 관계식이 된다.



βr_s

그림 2.3 축방향으로 힘의 크기 오픈각은 $90°$
$\frac{2\pi - \alpha}{(2\sin(\alpha/2)} \frac{f_{l\max}}{4\mu_o K_{p1\max}^2}$:nomalized force)

이 그림 2.2와 2.3을 참조하여 전동기의 설계를 하면 축방향이나 그 직각방향으로 특성이 다른 형태의전동기

를 구성 할 수 있다.

이상의 특성은 전동기의 디자인에 필요한 상수를 구하는데 필요한 고찰이다. 이때 두 힘(축방향과 그 직각방향)의 관계를 고찰하면 그림 2-4 와 같은 형태의 특성을 구할 수 있다.

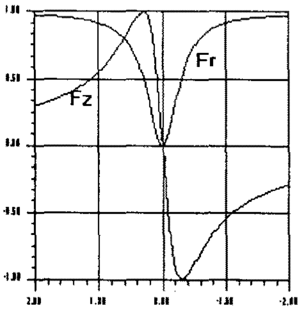


그림 2.4 슬립과 슬리브에 유도되는 힘의 관계 (SC = 0.3)

2.2.1 실험

이 기기의 실험은 2가지에 걸쳐 이루 어 졌다. 그 첫번째는 Open Slit이 가지는 유도식이 실제 값과 같은지 검정하는 단계이고 이를 바탕으로 전동기를 구성하여 실제로 구동될때 힘을 측정하는 구성을 가졌다.

Open 각도가 가지는 영향은 두 코일간의 상호인덕턴스를 측정하여 위 식을 검증할 수 있다. 즉 위식에서 유도된 전류의 양은 일차측 코일과 이차측 코일과의 인덕턴스에 의하여 유도되는 관계를 가진다. 따라서 이 관계를 이용하여 수식들을 검증할 수 있다. 이 오픈 슬릿의 경우 1차측과 2차측의 코일을 그림 2-5와 같이 가는 전선을 이용하여 구성 할 수 있다. 이 구성에서 두 코일의 축이 일치시키고 원형의 코일에 전류를 가하고 부채형태의 코일에 유기된 전압을 구하면 부채살에 유기된 전류는 검은 실선에만 전압이 유기됨을 알 수 있다. 즉 이 회로에서 유효한 길이는 부채살 형태의 외곽 의 전선이다. 따라서 이 부채살의 각도를 조절하면서 유기되는 전압을 측정하여보면 외각의 각도에만 비례한다. 따라서 식 2-2와 2-3에 대한 검증을 수행할 수 있다.

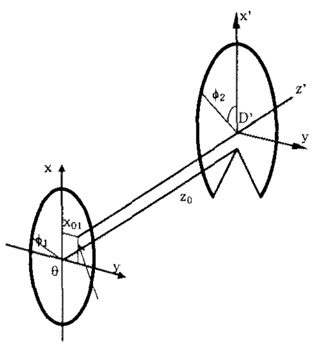


그림 2.5. 코일의 오픈 각도에 비례한 상호인덕턴스 측정방법

일반적으로 유도전동기의 실험은 블록 테스트로 많은 전동기의 특성을 추출할 수 있다. 이 전동기의 슬리브를 고정시켰을때 두가지 힘이 혼재한 힘이 슬리브에 유도 된다. 이 힘의 비율이 측정이나 설계조건에 따라 그 비율이 크고 또 드라이브 코일에 상용 주파수를 가하는 경우 이 전류의 진동이나 축의 이축이나 슬리브와 드라이브간의 축의 각도등 여러 요인에 의하여 실험에 오차를 불러온다. 특히 축 방향의 힘은 충분히 큰 방면 그에 직각인 방향은 그리 크지 않은 경우가 대분분의 경우이다. 이를 고려하여 축방향의 직각 방향의 힘은 진행파의 변형의 형태의 진행파를 구성하여 실험한다. 즉 두개의 긴행파가 서로 반대방향으로 진행하며, 그 크기와 파속이 같다면 그 진행파는 정지된파 (Standing wave)의 형태를 지니게 된다. 이 경우 슬리브에 유도되는 전류와 드라이브코일의 전류관계는 2개의 전동기가 서로 반대로 돌려는 형상이 된다. 이 때에 축에 직각 방향의 힘은 서로 힘이 합한 2배의 힘이 측정되며, 축방향의 힘은 서로 상쇄되어 나타난다. 따서 이를 이용하면 축에 직각인 방향의 힘의 측정이 용이하다.

3. 결 론

선형 유도 전동기를 설계하여 보았다. 이 전동기는 에어 코어 형태의 전동기로 순간 파워를 내기에 적합한 장치로 이차 코일을 오픈 시켜 코일 외곽에 설치한 형태이다. 이 구조는 축방향의 힘 이외에 축에 직각의 방향으로 힘이 발생된다. 이 힘을 이용하여 자기부상열차나 자기 부상 슬랫을 개발할 수 있다. 이 선형 전동기의 이용을 적절히 하면 기존의 압축공기로 구현하던 구내 서류 이동을 구현하는 등 여러 응용이 기대된다.

[참 고 문 헌]

[1] F. W. Grover, " Inductance Calculations", D. Van Nostrand company, Inc. , 1946

[2] Zivan Zabar, "Behavior of Azimuthal Currents Induced in the Projectile of the Linear Induction Launcher (LIL)" IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 29, No. 1, pp 696-700, January 1993 (with X.N. Lu, E. Levi and L. Birenbaum).

[3] Zivan Zabar, "Experimental Results and Performance Analysis of a 500 m/sec Linear Induction Launcher (LIL)," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 31, No. 1, pp 522-527, January 1995 (with X.N. Lu, E. Levi, L. Birenbaum, and J. Creedon.)

(부록) 마그네틱 벡터 포텐셜 구하기.

이 형태의 전동기의 마그네틱 벡터 포텐셜은 원통형의 마그네틱의 형태가 축방향으로 구성된 경우 식 A-1 과 같이 미분 방정식으로 구해 질 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \overline{A}_{p.\varphi}}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial \overline{A}_{p.\varphi}}{\partial r} - (\beta^2 + \frac{1}{r^2})\overline{A}_{p.\varphi} = -\mu\overline{J} + \mu\varepsilon\frac{\partial^2 \overline{A}_{p.\varphi}}{\partial t^2} \quad \text{A-1}$$

이 경우 경계 조건이 식 A-2 처럼 주어 지므로

$$\overline{H}_z(r_p^+) - \overline{H}_z(r_p^-) = \underline{k}_p$$
$$\overline{B}_z(r_p^+) = \overline{B}_z(r_p^-)$$
$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad \text{A-2}$$

이를 만족하는 마그네틱 벡터 포텐셜은 식 2-2의 형태이다.