

인버터로 운전되는 리니어 모터에서의 공극자속밀도 및 회로정수 산정

장석명, 이성래, 이성호, 윤기갑*
충남대학교 전기공학과, 한국전력공사 전력연구원*

Calculation of Airgap Flux Density and Circuit Parameter
in Linear Induction Motor driven by Inverter

Seok-Myeong Jang, Sung-Lae Lee, Sung-Ho Lee, Ki-Gap Yoon*
Department of Electrical Engineering of Chungnam National University, KEPRI*

Abstract - In this paper, approximate means of estimating the flux and torque levels in an induction motor is discussed. There exists several method that is used directly by flux meter and flux sensing coils in the airgap. Most of these methods are sensitive to motor parameter value changes. Also, the harmonics in the motor voltage and current due to the nonsinusoidal inverter waveform cause errors in the estimated torque. Finally, this result is applied in arch type linear induction motor for study of noise and vibration.

1. 서 론

리니어 모터(이하 LIM)를 회전형 모터와 비교할 때 다음과 같은 LIM만의 특성들을 갖는다. 첫째, 수직력에 대응하는 기계적인 공극(mechanical clearance)을 유지하기 위하여 필연적으로 공극이 크다. 둘째, 기계적인 구조로 인하여 stator core의 양 끝단에는 전기자 코일이 완전히 세워지지 않는 슬롯이 존재하게 된다. 이것은 이동자계의 불연속으로 인한 단부효과(end effect)를 초래하는 원인이 된다. 또한 이 단부효과는 LIM의 속도가 증가할수록 그 영향이 더욱 커지게 된다. 셋째, 2차 측 reaction plate에 의한 transverse edge effect가 존재 한다는 것이다. 이러한 모든 현상은 LIM에서의 공극자속밀도를 왜형시키거나 감소시키는 원인으로 작용하게 된다. 따라서 공극자속밀도를 정확히 분석하는 것이 LIM의 성능을 과악하는데 있어 대단히 중요한 일이다.

공극자속을 측정하는 방법에는 search coil, hall sensor를 이용하는 방법이 있으며, 자속검출용 코일로 써 모터 자체의 코일을 이용하는 방법을 들 수 있다. search coil은 고정자 코어의 치에 코일을 설치하고 쇄교하는 자속의 크기를 측정하는 방법으로 비교적 간단히 공극에서의 자속을 측정할 수 있는 장점이 있다. 그러나 이는 제작시에 주권선이외에 별도로 수행되어야 하는 과정이므로 제작 단기가 높아지는 점과 코일의 고장시 모터 자체를 전부 분해해야 한다는 점등은 단점으로 치부된다. 또 다른 방법으로 hall sensor를 이용한 방법이 있는데 이 방법 역시 온도에 민감하여 소자가 파괴될 위험이 있다는 면에서 그리 많은 주목은 받지 못한다.

본 논문에서는 제작시 설치된 search coil을 이용하여 측정한 자속과 flux meter로 직접 측정한 자속, 유한요소분석법에 의하여 계산한 자속을 상호 비교 분석하였으며 제작된 Arch type LIM의 소음과 진동에 관한 필요한 토대를 얻고자 하였다.

2. 시험 모델

2.1 시험에 사용된 LIM의 사양

LIM의 특성실험을 수행하기 위해서는 충분한 2차측 선로를 필요로 한다. 그러나 이러한 점은 경제성이나 설치의 문제등에 있어서 매우 비현실적이다. 이러한 점을

해결하기 위해 Arch type LIM이 제작 되었다. 표 1은 시험에 사용된 LIM의 사양을 나타낸다.

표 1 LIM의 사양

항 목	제 원
상 수	3
극 수	6
공 극	5(mm)
단 절 율	2/3
극 간격	66(mm)
코일 간격	44(mm)
슬 롯 폭	12(mm)
치 폭	11(mm)
병렬 회로수	2
1차측 arch 반지름	545(mm)

2.2 해석모델

그림 1은 시험에 사용된 LIM의 형상을 나타낸다.

2.2.1 LIM의 해석모델

공극에서의 자속을 측정하기 위한 일반적인 방법 중 본 논문에서 채택한 방법은 search coil을 이용한 방법이다. 그림 1은 Arch type LIM의 형상이며 자속측정을 위해 설치한 코일을 A,B,C상으로 분리하여 설치하였으며 코일의 턴수는 10턴이다.

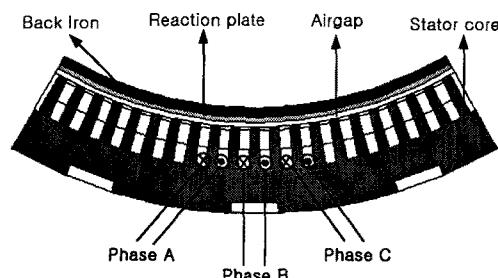


그림 1. LIM의 측면도

2.2.2 자속검출

모터 파라미터에 관계없이 정확한 토크와 자속을 검출하기 위한 방법으로 모터에 자속검출코일을 직접 삽입하는 방법이 주로 이용된다. 유도전동기도 축변환에 의하여 2상 등가회로로 표현이 가능하다. 그림 2는 검출코일이 동작하는 방법을 개념적으로 보여준다.

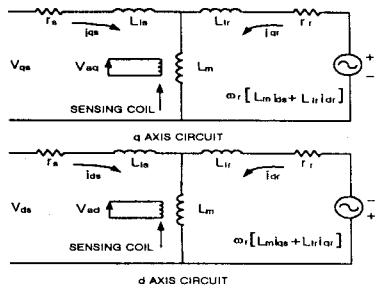


그림 2. 유도전동기 등가회로

고정자 전류를 가지고 자속신호의 바른 상관계를 얻기 위해 모터에서 이들 코일들의 위치를 적당히 위치시키는 것이 필요하다. A,B,C 3상의 코일은 전기적으로 120도의 위상차를 갖게되므로 검출코일 역시 120도의 위상차를 갖도록 배치해야 한다. 그림 3은 이러한 코일의 이상적인 위치를 보여준다.



그림 3 모터의 권선 배치

search coil에서 발생되는 유기전기전력을 나타내는 전압방정식은 일반적으로 다음과 같이 나타낸다.

$$V = -N \frac{di}{dt} \quad (1)$$

N : search coil의 턴수
 λ : search coil의 쇄교자속

따라서, 코일의 쇄교자속은 식(2)와 같음을 알 수 있다.

$$\lambda = -\frac{1}{N} \int V dt \quad (2)$$

2.2.3 Torque 계산을 위한 관계식

일반적인 토크식을 얻기 위해 A,B,C상의 자극축에 설치한 search coil에서 유기되는 기전력을 V_A , V_B , V_C 라하면 이 코일에 쇄교하는 자속은 λ_A , λ_B , λ_C 로 나타낼 수 있다.

$$\lambda_i = -\frac{1}{N} \int V_i dt \quad (i = A, B, C) \quad (3)$$

그림 4는 검출된 자속으로부터 토크를 계산하기 위한 Block diagram을 보여준다.

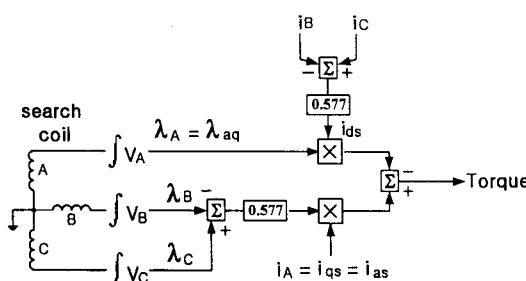


그림 4. 자속검출을 위한 구성도

유도전동기에서의 토크식은

$$T = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{ad} I_{as} - \lambda_{aq} I_{ds}) \quad (4)$$

와 같이 쓸수 있다. 이 양은 공극쇄교자속을 의미한다. 따라서, 그림 2의 등가회로를 기준으로 공극에서의 자속은 고정자의 자속과 전류로 쓸 수 있다.

$$\lambda_{qs} = L_{is} I_{qs} + \lambda_{aq} \quad (5)$$

$$\lambda_{ds} = L_{is} I_{ds} + \lambda_{ad} \quad (6)$$

식(5),(6)을 식(4)에 대입하면 식(7)을 얻는다.

$$T = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{ds} I_{qs} - \lambda_{qs} I_{ds}) \quad (7)$$

2.3 공극자속밀도(Airgap flux density)

2.3.1 t=const. 일 때의 공극자속밀도

그림 5는 LIM을 무부하 상태로 운전하며 공극에서의 자속밀도를 측정한 결과이다. LIM은 회전형 모터에 비하여 공극이 상대적으로 크므로 Flux meter를 사용하여 직접 공극에서의 자속밀도를 측정할 수 있다. LIM에 3상 전원을 인가하고 운전할 경우 공극에는 이동자계가 발생하게 되므로 자속의 실효치는 모두 같게된다. 그래서 시간을 정지시킨 상태에서 각 치와 슬롯에 분포하는 자속밀도의 값을 측정하였다. 이때 전원으로는 DC를 인가하고 운전조건을 3상교류전원 인가시와 같게 하였다. 또한 이 측정값을 비교하기 위하여 유한요소분석을 이용하였다. 실제 측정에 있어서 누설이나 측정시의 오차등을 감안한다면 측정치는 이론치와 대체로 일치함을 볼 수 있다.

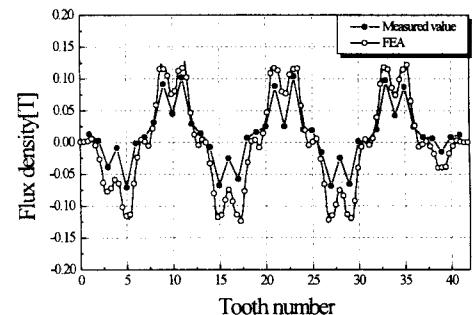


그림 5. t=const. 일 때의 공극자속밀도

2.3.2 3상전원 인가시 공극자속밀도

그림 6은 공극에 이동자계가 발생할 경우 공극에 분포하는 자속밀도의 값을 나타낸다. 이경우도 시간을 정지시키고 측정하였을 때와 마찬가지로 Flux meter를 이용하여 공극에서 직접 자속밀도의 값을 측정하였다. 또한 이를 이론적인 값과 비교하기 위하여 공극에서의 Field equation에 대한 시뮬레이션치를 구하였다. LIM에서는 단부가 존재하므로 Field equation을 entry zone, exit zone, active zone의 세가지 경우로 각각 나누어 정리하면

$$\bar{H}_{entry} = \bar{A}_0 e^{k \bar{\gamma}_1 x} \quad (8)$$

$$\bar{H}_{exit} = \bar{A}_3 e^{[k \bar{\gamma}_2(x-l)]} \quad (9)$$

$$\bar{H}_{active} = \bar{A}_1 e^{[k \bar{\gamma}_1(x-l)]} + \bar{A}_2 e^{k \bar{\gamma}_2 x} + \bar{B}_n e^{-ikx} \quad (10)$$

과 같이 나타낼 수 있다.

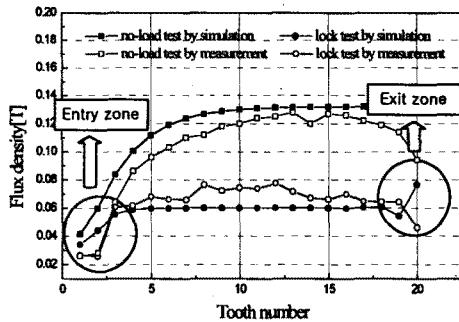


그림 6. 부하상태에 따른 공극자속밀도 특성

2.3.3 search coil에 의한 검출자속

그림 7은 모터의 치에 설치한 search coil에서 발생된 자속을 측정한 값을 나타낸다. 그림의 하단은 모터를 정현파로 구동하였을 때 발생되는 자속을 측정한 결과이고 상단은 인버터로 구동하였을 때의 결과이다. 정현파 구동을 하였을 경우 발생자속 역시 정현파 이지만 인버터 구동시는 파형의 왜곡이 있음을 볼 수 있다.

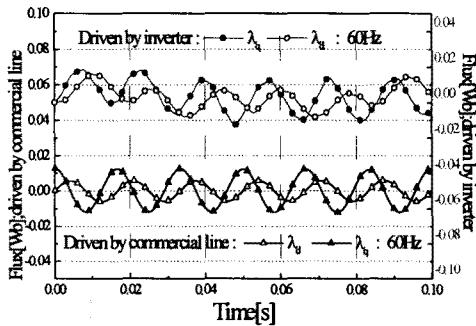


그림 7. search coil에서 측정한 공극자속밀도 분포

2.3.4 3상 전류의 축변환

그림 8은 A,B,C상 전류를 d-q축 전류로 변환한 것을 나타낸다. A상의 전류를 기준으로 A상과 q축을 동일 축으로 놓고 q축은 B상과 C상의 벡터합으로 표현한다.

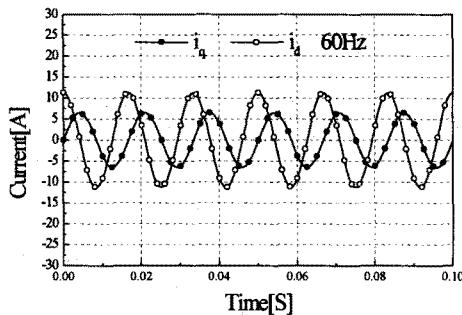


그림 8. 축변환에 따른 전류

2.4 축변환에 의한 Torque

search coil로부터 구한 공극에서의 d-q축 자속밀도와 입력전류로부터 변환에 의하여 구한 d-q축 전류를 계산하여 토크를 얻을 수 있다. 토크를 구하기 위한 계산식은 식(7)과 같으며 그림 9는 그 결과를 보여준다. 그림 7에서 보았듯이 인버터 구동을 하였을 경우 자속파형에는 왜곡이 있었다. 토크는 이 자속과 전류에 관한 식이므로 왜곡도 존재함을 할 수 있다.

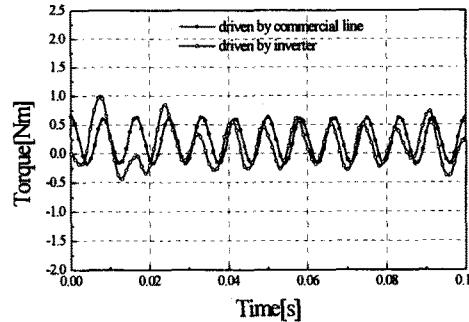


그림 9. 계산된 Torque

2.5 추력특성

그림 10은 슬립에 따라서 변화하는 추력을 상용전원과 인버터로 운전되는 경우로 분리하여 나타낸다. 이때 LIM은 $s=0.03$ 인 점에서 운전된다. 또한 simulation으로 구한 추력과 그림 9의 토크에 의한 추력을 슬립이 0.03인 지점에서 비교하였다. LIM의 회전자 반지름은 $R=0.43m$ 이다.

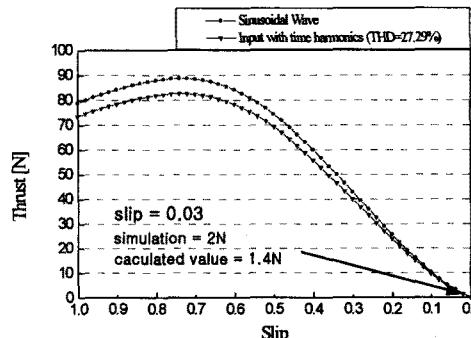


그림 10. 추력 특성곡선

3. 결론

본 논문에서는 LIM의 벡터제어를 위해서 필요한 공극자속밀도를 측정 및 이론적 해석을 통하여 구하였다. 공극자속밀도를 측정하는 방법에는 여러 가지가 있으나, 가장 일반적인 방법으로 고정자의 치에 search coil을 설치하고 그로부터 유기되는 기전력으로부터 자속을 구하는 방법을 이용하였으며 이 값을 자속계로 공극에서 직접 구한 값과 비교하였다. search coil에서 측정한 자속밀도의 값을 실제 공극자속과 비교할 때 상당적으로 큰 공극, 단부효과 등으로 인하여 상당한 차이가 있음을 확인하였다. 또한 3상의 고정자 전류와 search coil에서 측정한 자속을 토대로 이를 축변환하여 LIM의 토크를 구하는데 응용하였다.

이는 토크의 맥동이 기기의 소음과 진동에 미치는 영향을 분석하기 위한 기초로 활용될 수 있으리라 기대된다.

[참고문헌]

- (1) Fitzgerald and Kingley, "Electric Machinery," New York: McGraw Hill, 1961.
- (2) ALLAN B.PLUNKETT, "Direct Flux and Torque Regulation in a PWM Inverter-Induction Motor Drive" IEEE Transactions on industry applications, Vol. IA-13, NO.2, MARCH/APRIL 1977.
- (3) T.A. Lipo, "Flux sensing and control of static AC drives by the use of flux coils" IEEE Transactions on Magnetic Vol. MAG-13, No. 5, September 1977.