

TLIM의 권선방법 개선에 관한 연구

임달호, 홍정표, 김 영우*
한양대학교 전기공학과

A Study on the improved winding method in Tubular Linear Induction Motor

D.H.Im, J.P.Hong, Y.W.Kim*
Dept. of Electrical Engineering

Abstract

In this paper, we propose the One-Ampere Conductor Method which is able to calculate the flux distribution conceptionally and easily, and the improved winding method which suppress space harmonics of magnetomotive force and enhance the utilization of primary iron core in tubular linear induction motor.

We examine no-load test to verify propriety of proposed method and analyze characteristics by finite element method. As a result, performances are improved and propriety of primary iron core is enhanced comparing with conventional model.

1. 서 론

직선추진력을 얻기 위해 기존의 회전형전동기를 이용할 경우에는 기계적 변환장치에서 발생하는 손실, 마모, 소음등의 문제가 수반된다. 따라서, 교통 차량용, 산업용 기기, 사무자동화 기기등에서 요구되는 직선추진력을 직접 발생시킬 수 있는 직선형 유도전동기에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 이것을 응용하는 분야도 점차 다양화되고 있다. [1]

선형유도전동기는 권선을 시행할 수 있는 일차측 철심의 길이가 제한되어 일차측 여자권선의 이상적인 분포권을 시행하는데 한계가 있으며, 이상적인 분포권을 시행하였다 하더라도 일차철심의 양단부에서의 자속밀도가 중앙부에서의 자속밀도 보다 낮아지게 되는 현상은 피할 수가 없다. [2], [3] 본 연구에서는 이러한 문제점을 보완하기 위해서 공극에서의 기자력분포파형의 개선, 양단부에서의 자속밀도 저하현상의 억제, 및 일차측 철심의 이용율을 높일 수 있는 새로운 권선방법을 제안하였다.

대상모델로서는 평판형 유도전동기에 비해 일차여자권선의 독립여자가 가능하며, 여자방법의 자유도가 큰 Tubular형 유도전동기로 하였다.

2. 단도체법에 의한 공극자속밀도계산

공극자속밀도분포는 기기의 특성을 결정하는 가장 중요한 파라미터 중에 하나로서, 이를 계산하기 위해서는 한 코일에 의해서 형성되는 자극을 기본으로 하는 것이 일반적인 방법이었다. [5] 본 연구에서는 공극자속밀도를 계산하기 위해 회전기의 일페어-콘덕터 개념에 해당하는 여자전류도체 한개에 의한 공극자속밀도를 계산한 후, 공간과 시간위상차를 고려하여 일차전류도체 전체가 동시에 여자되었을 경우의 공극자속밀도를 구하는 단일도체법(One Ampere Conductor Method)을 이용하였다. [4]

공극자속밀도를 계산하기 위해 다음과 같은 가정을 두었다.

- ① 일차 및 이차측 철심의 비투자율은 무한대이다.
- ② 자속의 후링징(ringing)현상은 없다.
- ③ 일차측 여자전류는 8축 성분만을 갖는다.

2.1 공극자속밀도 계산의 기본식

공극의 길이가 g , 길이가 L 인 1차측 철심내의 임의의 위치 Z_p 에 기자력 (Ni) 가 되는 단일도체가 놓여 있다고 하였을때, 이 단일도체에 의해 발생하는 공극에서의 자속밀도분포는 그림1과 같으며, B_L 과 B_R 의 값은 각각 다음과 같이 구할 수 있다.

즉, Z_p 의 좌측과 우측의 자기저항을 각각 R_L, R_R 이라 하면 자기회로의 전체자기저항 R 은 가정으로 부터 식 (1)과 같이 쓸 수 있다.

$$R = R_L + R_R = \frac{g}{\mu_0 \cdot Z_p \cdot s} + \frac{g}{\mu_0 \cdot (L - Z_p) \cdot s} \quad (1)$$

여기서, μ_0 는 공기 투자율, S 는 8방향의 원주길이. 한편, 자속 ϕ 는 다음과 같다.

$$\phi = \frac{Ni}{R} = \frac{\mu_0 \cdot Ni \cdot Z_p \cdot (L - Z_p) \cdot s}{g \cdot L} \quad (2)$$

이제, 식 (2)로 부터 Z_p 의 좌,우측에서의 자속밀도 B_L, B_R 는 각각 식 (3), (3-1)과 같이 쓸 수 있다.

$$B_L = \frac{\mu_0 \cdot Ni}{g} \cdot \frac{(L - Z_p)}{L} \quad (3)$$

$$B_R = \frac{\mu_0 \cdot Ni}{g} \cdot \frac{Z_p}{L} \quad (3-1)$$

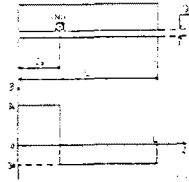


그림1. 단일도체에 의한 공극자속밀도 분포

2.2 다도체에 의한 공극자속밀도

1, 2 두 전류도체의 기자력이 각각 $(Ni)_1, (Ni)_2$ 라 할 때 두 전류도체에 의한 공극자속밀도의 계산은 두 전류도체에 대하여 각각 식(3)을 이용하여 별도로 계산한 다음, 계산결과치를 중첩시켜 계산한다. 그림2는 두 전류도체에 의한 공극자속밀도분포인데, 그림 2-b)가 합성된 공극자속밀도분포이다.

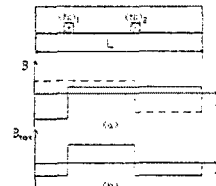


그림2. 두 도체에 의한 공극자속밀도 분포

3. 권선방법 개선

일반적인 LIM의 권선방법은 양단부에서의 자속밀도가 중앙부에 비해 낮아진다. 따라서, 공극자속의 모듈레이션이 존재하게 된다. 본 연구에서는 공극자속밀도 분포와 일차축 철심의 이용을 고려하여 일차축 철심의 모든 slot에 2중전류를 시행하여 일차축 철심길이를 줄일 수 있는 권선방법을 제안하였다.

3.1 공극자속밀도분포

매극 매상당의 slot수가 1이며, slot pitch는 t_p 인 15 slot 구조의 3상 4극기를 대상으로 각 상 전류도체에 의해 만들어지는 공극 자속밀도분포를 검토해보자. 여기서, 대문자와 소문자는 각각 전류의 들어가는 방향과 나오는 방향을 나타낸다.

양단부에 1층진으로 분포된 전류도체 중에서 중앙(그림3의 c상 전류도체)에 위치한 c상에 c, a, b상이 더하여졌다고 가정하면, 3상평형 전류의 a, b, c상에 의한 합성기자력은 항상 '0'이기 때문에 전체 기자력은 더하기 이전의 원래상태와 변화가 없다. [6] 더해진 c, a, b상 전류도체와 원래의 c상 전류도체를 벡터도를 이용해 새로운 두개의 전류도체성분(A, B상)으로 치환시킬 수가 있다. 즉, a상과 c상의 합을 B상으로, b상과 c상의 합을 A상으로 치환한다.

그림4를 보면 치환된 두상(A, B상)에 대하여 전체철심 중에는 자속밀도가 항상 '0'이 되는 무효부분이 나타남을 알 수 있다. 따라서 1, 14번 slot에 있는 A상 전류도체를 2, 13번 slot으로 이동시키고, 2, 15번 slot에 위치한 B상 전류도체는 2, 14번 slot으로 이동시켜 무효부분을 없앨 수가 있다. 결과적으로 1, 15번 slot에는 전류도체가 없어지게 되고, 자속을 확보하는지 못하는 빈 slot을 없애므로서 그만큼의 일차철심 길이를 줄일 수 있다.

개선 전, 후의 합성 자속밀도분포를 그림3과 5를 통해 비교해보면, 2중진 전류분포를 갖고 있던 철심 중앙부(종래형의 4번-12번 slot)의 자속밀도는 개선 전, 후에 변화가 없으나, 양단부의 자속밀도가 종래형에 비해 일차철심 길이를 줄인 개선형이 높아졌다는 것을 알 수 있다.

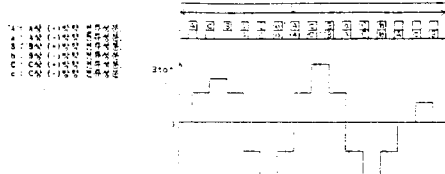


그림3. 전류도체분포와 합성자속밀도(종래형, wt=90°)

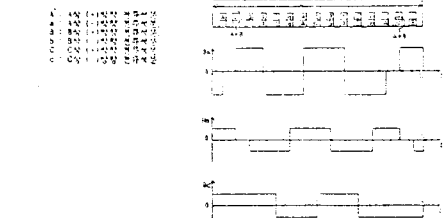


그림4. 각 상의 자속밀도분포

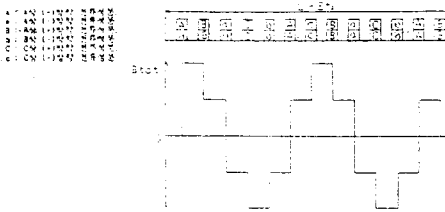


그림5. 합성자속밀도(개선형, wt=90°)

3.2 권선방법의 개선

권선방법 개선안을 일반화하여 정리하면 다음과 같다.

단계 1) 양단부 1층 전류도체의 중앙(3상의 경우 c상도체)의 전류도체에 별도로 전류도체를 추가한다.

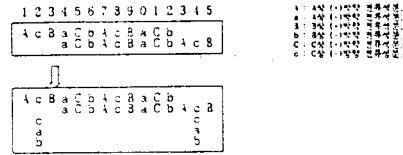
단계 2) 두 전류도체의 합성성분 전류도체로 치환시킨다.

단계 3) 단계 2)에서 합성한 전류도체 성분 중에 일부를 인접한 같은 상의 전류도체위치로 이동시킨다.

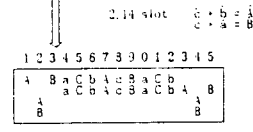
단계 4) 단부의 전류도체성분을 내측분포위치로 이동시킨다.

구체적인 사례로서, 15 slot 구조의 3상 4극기에 대한 적용과정은 다음과 같다. 단계 1)의 첫번째가 종래형이며, 단계 4)의 결과가 개선형이다.

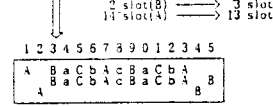
단계 1)



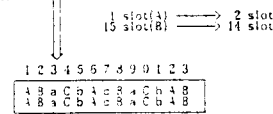
단계 2)



단계 3)



단계 4)



종래형과 개선형에 대한 공극자속, 단부에서의 자속밀도 및 평균공극자속의 변화는 각각 그림6, 그림7 및 그림8과 같다. 여기서 평균자속은 식 (4)를 이용하여 계산하였다.

$$\text{Average Flux} = \text{Total flux} / L \quad (4)$$

L : 1차축 철심길이.

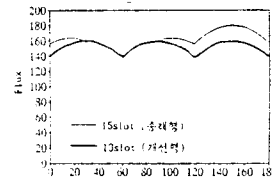


그림6. 공극자속

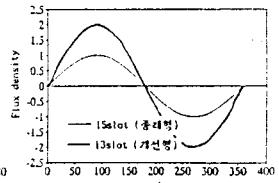


그림7. 단부 자속밀도

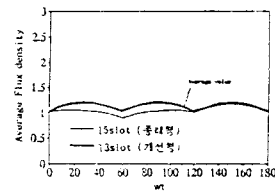


그림8. 평균 공극자속

이와 같이 개선형이 종래형과 비교하여 평균 공극자속이 증가하였고, 시간변화에 따른 공극자속의 모듈레이션현상이 줄어들었으며, 단부에서의 자속밀도가 높아졌음을 알 수 가 있다.

4. 무부하시험

단도체법에 의한 계산치를 검증하기 위해 종래형 3기종(3상 2극기 18slot, 3상 4극기 15slot, 6상 4극기 30slot)과, 이에 대응되는 개선형 3기종(3상 2극기 14slot, 3상 4극기 13slot, 6상 4극기 26slot)의 시작기를 제작하여 실측치와 비교 검토하였다. 시간변화에 따른 모의 3상 및 6상 직류순시전류로 전체 전류도체를 동시에 독립여자하고 각 치의 중앙에 설치한 홀소자로 출력전압을 측정하는 방법으로 공극 자속밀도를 측정하였다.

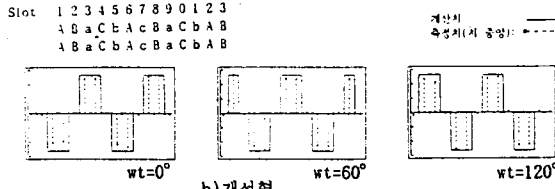
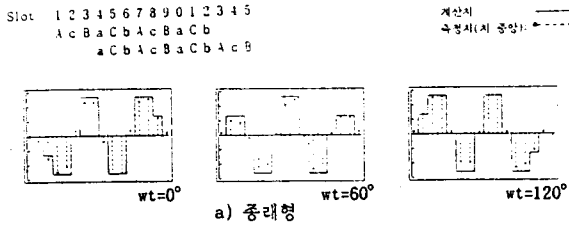


그림9. 공극자속밀도 분포

5. 유한요소법에 의한 부하특성 해석

권선방법개선 전.후의 부하특성변화를 검토하기 위해 유한요소법을 이용하여 축대칭 3차원 해석을 하였다. 해석모델은 3상 4극기(종래형 15slot, 개선형 13slot)이며 해석모델의 제원은 표 1과 같다.

표1. 해석모델의 제원

1차 축 제원	축방향길이	176.5, 153.5 [mm]	2도체 두께	2.0 [mm]					
	slot 수	15.13 [개]		2도체 도전율	3.12×10^7 [S/m]				
	외경	163.0 [mm]			back iron 외경	44.0 [mm]			
	내경	53.0 [mm]				back iron 내경	32.0 [mm]		
	slot 길이	35.0 [mm]					back iron 비투자율	300	
	slot 폭	7.5 [mm]						back iron 도전율	5.0×10^6 [S/m]
	치 폭	4.0 [mm]							
	공극 길이	2.5 [mm]							
철심 비투자율	1000								

5.1 유한요소법의 적용

자기벡터포텐셜을 계변수로 하여 맥스웰 전자기방정식으로부터 축대칭 3차원장치의 특성방정식을 유도하면 식 (5)과 같다.

$$[\nabla \times \nabla \times \mathbf{A}]_z = \frac{\partial}{\partial z} (\nabla \times \mathbf{A})_r - \frac{\partial}{\partial r} (\nabla \times \mathbf{A})_z \quad (5)$$

$$= J_{0z} + \sigma \left(-\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \mathbf{v} \times \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} \right)$$

여기서, J_{0z} : 강제 입력전류, σ : 도전율,
 \mathbf{v} : 도체가 이동속도, \mathbf{v} : 자기저항율.

전류 J 와 자기벡터포텐셜 \mathbf{A} 는 θ 방향성분(시간에 따라서는 정현적으로 변화), 속도 V 는 z 방향성분 만을 갖는다고 하면 식 (5)는 식 (5-1)과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{v}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (rA_\theta) \right] + \frac{\partial}{\partial z} (v \frac{\partial A_\theta}{\partial z}) \quad (5-1)$$

$$= -[J_{0z} + \sigma(j\omega \cdot A_\theta + V_z \cdot \frac{\partial A_\theta}{\partial z})]$$

여기서, ω : 강제 입력전류의 각속도, V_z : 도체의 이동속도,
 A_θ : 자기벡터포텐셜의 θ 방향성분.

본 연구에서는 프로그램이 간단해지고 자속밀도를 쉽게 구할 수 있는 A_R ($A_R = rA_\theta$)법을 이용한 유한요소해석으로 자속밀도를 계산하였고, 맥스웰 응력법을 이용해 추력을 계산하였다.

5.2 해석결과

부하특성 해석결과를 검토해보면 개선형의 공극자속밀도가 종래형과 비교하여 중앙부에서는 거의 같으나 양단부에서의 자속밀도값은 현저히 높아져 있음을 알 수 있다.

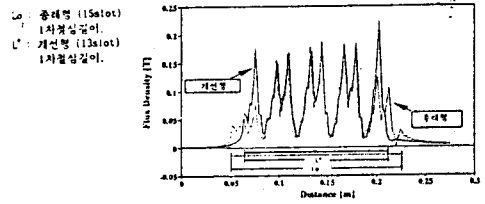


그림10. 공극자속밀도분포 (wt=0°, slip=0.0)

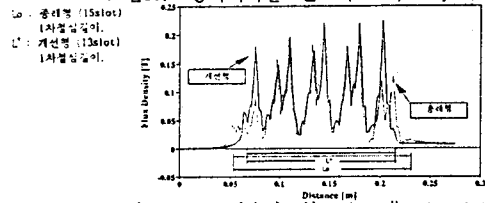


그림11. 공극자속밀도분포 (wt=0°, slip=0.5)

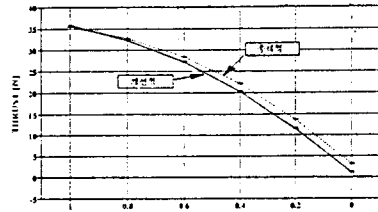


그림12. 속도-추력 특성곡선

속도-추력 특성은 개선형이 기동시를 포함한 높은 slip 운전영역에서는 종래형에 비하여 1차축 철심의 길이가 2 slot pitch 만큼 짧아 줌에도 불구하고 우월한 특성을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

6. 결론

본 연구에서는 전기기기의 특성해석에서 가장 중요한 공극자속밀도분포를 개념적으로 손쉽게 계산할 수 있는 단도체법(One-Ampere conductor method)과 1차철심의 이용율을 높일 수 있는 효율적인 권선방법 개선안을 제시하였다.

무부하 시험결과 단도체법의 타당성을 확인할 수가 있었으며, 권선방법을 개선한 모델이 종래형의 모델에 비교하여 공극자속분포의 공간조화 성분은 감소하고 시간변화에 따른 공극자속의 모듈레이션 현상은 개선되었음을 알 수 있었다. 또한, 유한요소법을 이용하여, 개선형의 전반적인 특성향상을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] 日本電氣學會, "リアモタとその應用", 1984
- [2] S.A.Nasar and I.Boldea, "Linear Motion Electric Machines", John Wiley & Sons, 1976
- [3] Sakae Yamamura, "Theory of Linear Induction Motors", University of Tokyo press, 1978
- [4] Dai-Ho Im, "Research on the Method of Calculation the Air-gap Magnetic Flux Distribution and Travelling Magnetic Field", Proceedings of Seoul International Conference on Electrical and Electronics Engineering, 1970
- [5] 野中・吉田, "リアモタの空間高調波解析", T.IEE Japan, vol.93-B, No. 89, 1973
- [6] 小質天, 若尾眞治, 笠原祥一, "角筒型形リア誘導機における推力特性向上を圖った一次電流分布の検討", T.IEE Japan, Vol.112-D, No.12, 1992

* 본 연구는 日本 総合研究センター 무비리티研究所 수탁과제임을 밝힙니다.