

LSM 성능 측정을 위한 회전형 시험기 설계에 대한 연구

설현수*, 심원보*, 이 주*
한양대*

Study on Design of the Rotary Type Testing Machine to Measure the Performance

Hyun-Soo Seol*, Won-bo Shim*, Ju Lee*
Hanyang University*

Abstract - 본 연구에서는 선형동기전동기(Linear Synchronous Motor)의 회전형 시험기 설계를 위해서 그 기본 모델이 되는 선형동기전동기의 기초 설계 과정을 통해 주요 파라미터를 선정하고 FEM 모델을 도출하였다. 또한 유한요소법을 이용하여 전자계 해석을 수행하여 선형동기전동기의 특성을 분석하였고, 설계된 선형동기전동기를 바탕으로 회전형으로 모델링하여 시험기의 형태로 설계하였으며, 유한요소해석을 통해 요구 사양을 만족함을 확인하였다.

1. 서 론

초고속 열차에 사용가능한 선형동기전동기는 이동자와 고정자 모두 직선형의 구조로 되어 있기 때문에 이동자에 작용하는 추진력 측정의 어려움이 존재하며, 이는 일반 회전형 전동기와 같이 전동기와 측정 장비의 상대 위치가 고정되어 있는 경우와 다르다. 또한 선형동기전동기의 고속운전시험을 위해서는 매우 긴 노선이 필요하고 막대한 비용이 발생하므로 회전시험기의 형태로 제작하면 고속영역시험이 가능하고 선형동기전동기의 기기적 특성을 파악하고 제어시스템 선행연구에 이용가능하다[1].

본 연구에서는 선형동기전동기의 회전형 시험기 설계를 위해서 그 기본 모델이 되는 선형동기전동기의 기초 설계 과정을 통해 주요 파라미터를 선정하고 FEM 모델을 도출하였다. 또한 유한요소법을 이용하여 전자계 해석을 수행하여 선형동기전동기의 특성을 분석하였고, 설계된 선형동기전동기를 바탕으로 회전형으로 모델링하여 시험기의 형태로 설계하였으며, 유한요소해석을 통해 요구 사양을 만족함을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 선형동기전동기 기본 설계

가. 극 피치

본 연구에서는 선형동기전동기의 회전형 시험기를 설계하는데 목적이 있다. 따라서 회전형 시험기의 직경과 극 수를 정한다면, 극 피치를 정할 수 있다. 회전형 시험기의 외경을 3m로 하고, 회전형 시험기의 극 수를 60으로 설계하면

$$\tau = \frac{3\pi}{60} = 0.157[m] \approx 0.15[m] = 150[mm] \quad (1)$$

이므로 극 피치를 150[mm]로 정한다. 따라서 회전형 시험기의 직경은

$$D = 150[mm] \times 60/\pi = 2864.8[mm] \quad (2)$$

2864.8[mm]으로 정해진다.

나. 계자 전류

계자의 기자력은 다음과 같이 정의된다.

$$N_f I_f = \frac{g B_{fg} K_c K_r}{\mu_o} \quad (3)$$

계자 턴 수를 100, 계자에 의한 공극자속밀도 0.2[T], Kc(카터 계수)를 1.3, Kr(릴럭턴스 계수)를 1이라고 하면, 계자 전류는 아래와 같다.

$$I_f = 10.3[A] \approx 10[A] \quad (4)$$

다. 계자 치수 설계

계자의 슬롯 면적은 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$A_{slot,f} = \frac{N_f I_f \times 2}{K_{fiu,f} \times J_f} \quad (5)$$

여기서, 계자의 점적률을 0.45, 전류밀도를 2A/mm²으로 산정하면 계자 슬롯 면적은 다음과 같다.

$$A_{slot,f} = \frac{N_f I_f \times 2}{K_{fiu,f} \times J_f} = 2298.9[mm^2] \quad (6)$$

그리고 계자 teeth 폭을 70mm로 산정하면 극 피치가 150mm이므로 슬롯 폭은 80mm가 되므로 이를 슬롯면적에 나누면 계자 치 높이는 28.7mm가 된다. 또한 계자 요크는 계자 teeth의 1/2인 35mm로 한다.



<그림 1> 계자 설계 파라미터

라. 전압 제한값

DC 링크 전압 값은 3상 380VLLrms기준으로 다음과 같다.

$$V_{DC} = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} V_{LLrms} = 1.35 V_{LLrms} = 513[V] \quad (7)$$

본 연구에서는 출력 가능한 전압이 큰 SVPWM을 고려하여 설계하였다. SVPWM을 고려하여 상전압 최대값을 구하면 다음과 같다.

$$V_{peak} = 513 \times \frac{1}{\sqrt{3}} = 296.2[V_{peak}] \quad (8)$$

마. 전기자 턴 수

본 연구에 의한 전기자의 극 수를 10이라 하고 매극 매상 슬롯 수를 1이라고 하면 고정자의 슬롯 수는 30으로 정해진다. 또한 적층길이를 100mm, 전압 제한값의 Margin을 고려하여 Eo를 200Vrms으로 고려하면

$$N_{ph} = \frac{E_o}{\sqrt{6} \times v \times L_{stk} \times B_{fg} \times \frac{2}{\pi}} \approx 67.3 \quad (9)$$

상당적렬턴수가 약 67.3턴이 된다. 따라서 슬롯 당 도체 수는 극 쌍수를 나눈 13.5턴이므로 최종적으로 13턴이 된다[2].

바. 전기자 상전류

본 시험기의 목표 출력은 20kW이므로 출력식으로부터 상전류 값을 구할 수 있다.

$$I_{ph} = \frac{P[kW]}{3 \times V_{ph} \times \eta \times \cos\phi} = \frac{20 \times 10^3}{3 \times \frac{513}{\sqrt{6}} \times 0.8} = 39.79[A] = 40[A] \quad (10)$$

사. 전기자 치수 설계

공극자속밀도를 0.4[T], 치 포화자속밀도를 1.3이라 하면 치 폭은

$$t_w = \frac{\tau}{3} \times \left(1 - \frac{B_g}{B_t}\right) = \frac{150}{3} \times \left(1 - \frac{0.4}{1.3}\right) = 34.61 \approx 35[mm] \quad (11)$$

이 된다. 슬롯 점적률을 0.25라 하고 전기자 전류밀도를 3A/mm²이라 하면 슬롯의 면적은 아래와 같다.

$$A_{slot} = \frac{N \times I_{ph}}{K_{slot} \times J} = 693.3[mm^2] \quad (12)$$

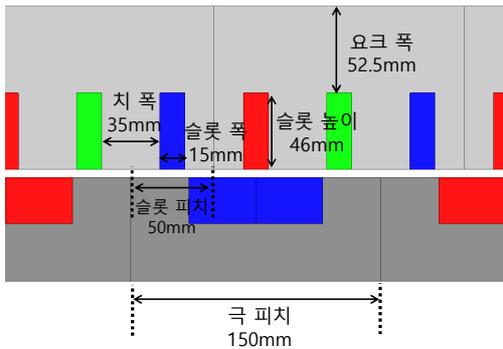
극 피치가 150mm이므로 고정자 슬롯 피치는 50mm가 되고, 슬롯의 폭은 치 폭이 35mm이므로 15mm가 된다. 또한 슬롯의 폭과 슬롯 면적을 구했으므로 슬롯의 높이를 구할 수 있고 고정자 요크는 치 폭의 1.5배한 값으로 결정한다.

$$\tau = \frac{150}{3} = 50[mm] \quad (13)$$

$$w_{slot} = 50 - t_w = 15[mm] \quad (14)$$

$$h_{slot} = \frac{A_{slot}}{W_{slot}} = 46[mm] \quad (15)$$

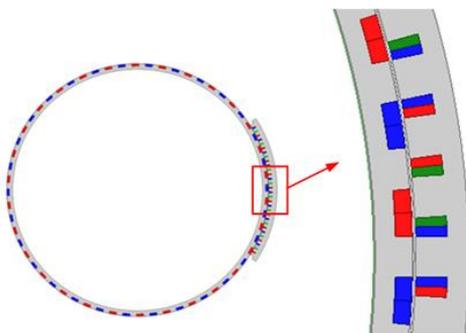
$$w_{yoke} = 1.5 \times t_w = 52.5[mm] \quad (16)$$



〈그림 2〉 계자 설계 파라미터

2.2 선형동기전동기의 회전형 시험기 설계

앞 절에서 설계한 선형동기전동기의 기초 모델을 회전형 시험기 형태로 모델링하면 그림 3과 같다.



〈그림 3〉 회전형 시험기 모델

그림 3의 모델을 전자기 해석을 수행한 결과는 표 1, 표 2와 같다. 선형동기전동기의 정격 속도는 343km/h이며, 이를 3m의 회전형 시험기로 설계할 경우, 등가속도는 635RPM이 되고 20kW를 만족시키기 위해서는 목표토크는 300.7Nm가 된다. 또한 최고속도 600km/h는 등가적으로 1,111RPM이 되고, 목표토크는 171.9Nm가 된다.

표 1과 표 2는 정격속도와 최고속도에서의 회전형 시험기의 전류위상각에 따른 토크를 나타낸다. 표 1을 살펴보면, 전압 제한치를 만족하면서 목표토크를 만족하는 전류 위상각은 -10deg에서 10deg 사이가 된다. 그리고 최고속도에서 목표 토크와 전압 제한치를 만족시키는 계자 전류, 고정자 상전류, 전류 위상각을 살펴보면 표 2의 노란색으로 표기한 부분과 같다.

〈표 1〉 회전형 시험기의 전류위상각에 따른 토크@635RPM

전류 위상각 [deg]	토크 [Nm]	유기전력 기본파 [V]	전류 위상각 [deg]	토크 [Nm]	유기전력 기본파 [V]
-50	264.9	361.1	10	308.1	214.1
-40	302.2	342.6	20	277.2	185.8
-30	332.6	320.7	30	241.0	157.8
-20	345.3	296.2	40	201.6	130.7
-10	344.3	270.0	50	160.8	105.0
0	331.2	242.4			

〈표 2〉 회전형 시험기의 전류위상각에 따른 토크@1,111RPM

고정자 상전류	전류 위상각	계자전류			
		8[A]		10[A]	
		토크 [Nm]	전압 [V]	토크 [Nm]	전압 [V]
35[Arms]	20	173.7	261.2	221.4	325.0
	40	126.6	185.9	165.7	247.1
	60	76.0	117.2	100.9	180.1
	80	25.1	65.0	33.7	137.4
40[Arms]	20	195.3	264.2	249.7	324.1
	40	140.3	181.6	184.3	236.4
	60	82.8	105.3	110.9	158.8
	80	27.0	38.9	36.7	104.8
45[Arms]	20	216.2	269.3	277.2	325.3
	40	152.4	181.8	201.6	228.6
	60	88.3	102.8	119.7	141.5
	80	28.5	34.2	39.3	74.2

3. 결 론

본 논문에서는 600km/h를 달성하는 선형동기전동기의 성능을 증대하기 위한 20kW급 시험기 설계에 대해 서술하였다. 먼저 시험기의 대상이 될 20kW급 선형동기전동기의 기초 설계를 수행하였고, 이를 바탕으로 유한요소해석 모델을 구축하였다. 그리고 기초 설계된 선형동기전동기를 바탕으로 회전형 타입의 시험기를 모델링하였다. 마지막으로 전자기 해석을 수행하여 시험기의 정격 속도(343km/h)와 최고 속도(600km/h)에서 목표 토크를 만족하는지 확인하였다.

[감사의 글]

본 논문은 국토교통과학기술진흥원에서 시행하는 리니어펄스모터 기반 철도차량 추진시스템 원천기술 개발(과제번호 : 14ENGF-C067865-02)의 일환으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] Chan-Bae Park, Byung-Song Lee, Chang-Young Lee, "Characteristic Analysis of Superconducting LSM for the Wheel-rail-guided Very High Speed Train according to Winding Method of the Ground 3-phase Coils," The Traction of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 63, No. 8, pp. 1164~1169, 2014.
- [2] ION BOLDEA, "Linear Electric Machine, Drives, and MAGLEVS Handbook"