

직립 기동 영구자석 동기전동기의 동특성 해석

김병국, 조원영, 이인재, 문지우, 김미정, 임성환*, 조윤현
 동아대학교, *브이제엠

Dynamic Characteristic Analysis of Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor

Byong Kuk Kim, Won Yung Jo, In Jae Lee, Ji Woo Moon, Mi Jung Kim, Seong Hwan Lim*, Yun Hyun Cho
 Dong-A University, *VGM

Abstract - The line-start permanent magnet synchronous motor has a high efficiency and an advantage in constant speed operation regardless of the effect of load variation. However it is difficult to predict the performance of characteristics accurately, because of the unbalanced starting torque with the initial starting position of the rotor and the generation of a break torque.

In this paper the dynamic characteristics of the line-start permanent magnet synchronous motor are described and compared with those of the squirrel-cage induction motor through the simulation to find the characteristics of the permanent magnets and the rotor bars in the line-start permanent magnet synchronous motor.

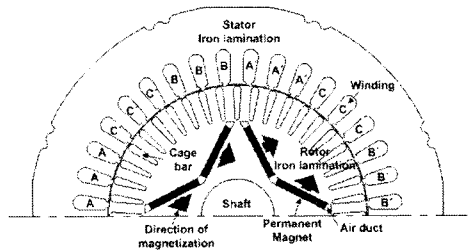


그림 1. 4극 LSPM 동기전동기 1/2 횡단면

표 1. LSPM 동기전동기 설계 모델 사양

구분	항목	치수	단위
사양	정격 출력	3.7	KW
	정격 전압	380	V
	주파수	60	Hz
	동기 속도	1800	rpm
고정자	정격 토크	19.6	Nm
	슬롯 수	36	
	외경	190	mm
	내경	118	mm
	극 수	4	Pole
	상당 저항	1.41	Ω
회전자	상당 권선수	34	Turn
	공극	0.5	mm
	슬롯 수	44	
	외경	117	mm
	영구자석	NdFeB	

1. 서론

직립 기동 영구자석 동기전동기(Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor : LSPM)는 일반 농형 유도전동기와 같은 농형 바를 가지는 회전자 내부에 영구자석을 매입한 구조이다. 가장 큰 특징은 회전자 내부에 농형 바를 가지기 때문에 별도의 제어기를 사용하지 않더라도 일반 유도전동기와 같이 상용 전원의 공급만으로 기동은 물론 정속 운전이 가능하도록 설계된 고효율, 고역율의 전동기라는 것이다. 하지만 LSPM 동기전동기는 회전자 내부의 농형 바와 영구자석에 의한 중첩된 토크 특성이 발생하므로 그 설계와 해석의 어려움으로 인해 다른 전동기에 비해 주목받지 못하고 있다.

본 논문에서는 3상 3.7KW 4극 LSPM 동기전동기의 최적화한 모델을 시뮬레이션을 통하여 제시하고 동급의 유도 전동기와 기동 특성 및 성능을 비교, 분석한다. 또한 시제품 제작을 통하여 설계의 정확성을 검증한다.

2. 해석 모델 특성

2.1 해석 모델

그림 1은 특성 해석에 쓰인 LSPM 동기전동기의 1/2 모델 횡단면이다. 본 논문에서 고정자는 3.7KW 4극 3상 유도전동기에 사용되는 코어를 사용하였으며 권선수를 해석 결과에 맞추어 수정하여 제작하였다. 농형 바는 알루미늄 다이캐스팅으로 제작되었으며 회전자의 스류(Skew)각은 5도로 하였다. 영구자석은 NdFeB계로 잔류자속 밀도 1.12[T], 보자력 796[kA/m], 최대 에너지적 231[kJ/m³]을 갖는 N30SH 재질을 사용하였으며 축방향은 그림 1에서 도시하였다. 표 1은 LSPM 동기전동기의 해석모델의 기본 설계 사양을 나타낸다.

2.2 토크 특성식

LSPM 동기전동기의 기자력에 의해 발생하는 총 토크는 식 (1)에서 보는 바와 같이 회전자 농형 바에 의해 발생하는 유도 토크와 영구자석에 의해 발생하는 브레이크 토크의 두 성분으로 구성된다.

여기서 m상 P극 전동기의 회전자 유도 토크는 식 (1)과 같이 주어진다.

$$T_c = \frac{P}{2} \frac{m}{2\omega_s} \{ (X_{2d} - X_{2q}) I_{2d} I_{2q} + X_{md} I_d I_{2q} - X_{mq} I_q I_{2d} + E_0 V I_{2q} \} \quad (1)$$

또한 영구자석에 의해 발생하는 브레이크 토크는 식 (2)로 주어진다.

$$T_m = \frac{P}{2} \frac{m}{\omega_s} \{X_{md} I_m I_{mq} + (X_d - X_q) I_{md} I_{mq}\} \quad (2)$$

따라서 총 전기자 토크는 식 (3)과 같이 주어진다.

$$T_e = \frac{P}{2} \frac{m}{\omega_s} \{ (X_d - X_q) I_d I_q + X_{md} I_{2d} I_q - X_{mq} I_{2q} I_d + E_0 I_q \} \quad (3)$$

그림 2는 LSPM 동기전동기의 과도 상태에서의 두 토크 성분의 특성을 나타낸다. 기동시 영구자석에 의해 발생된 브레이킹 토크의 영향으로 총 기동 토크가 감소됨을 알 수 있다.

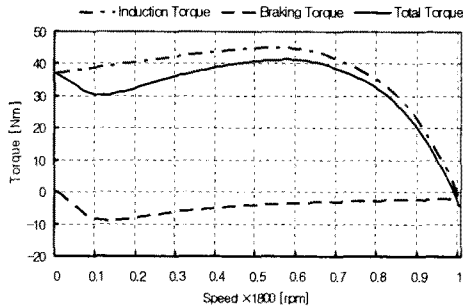


그림 2. LSPM 동기전동기의 기동 토크 특성

2.3 브레이킹 토크

영구자석에 의한 브레이킹 토크는 총 기동 토크의 감소를 가져오게 되므로 정확한 설계 및 해석이 이루어져야 한다. 그러므로 각 영구자석의 구조에 따른 특성 해석을 수행하고 전동기 성능에 미치는 영향을 확인 할 필요가 있다.

그림 3, 그림 4는 각각 영구자석의 두께, 영구자석의 넓이에 따른 LSPM 동기전동기의 브레이킹 토크 특성을 비교한 것이다.

그림 3에서 영구자석의 두께에 따른 토크 특성의 급격한 변화는 두께가 커지면서 공기 덕트의 위치가 변경되므로 전체 누설 자속의 급격한 변화를 일으키기 때문이다. 즉 공기 덕트와 농형 바 사이의 자속 밀도의 포화 정도에 따라 토크 특성이 많은 차이를 보임을 알 수 있다. 이와는 달리 그림 4에서와 같이 영구자석의 넓이만을 변경할 경우 브레이킹 토크는 선형적인 관계를 보이게 된다.

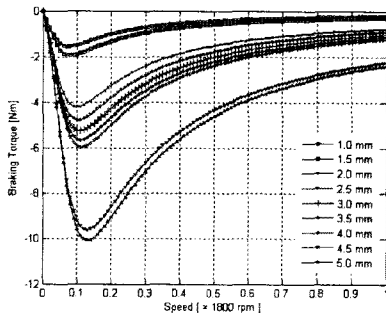


그림 3. 영구자석 두께에 따른 브레이킹 토크 특성

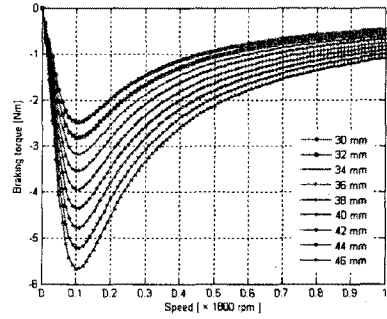


그림 4. 영구자석 넓이에 따른 브레이킹 토크 특성

3. 특성 해석

3.1 정상 상태 특성

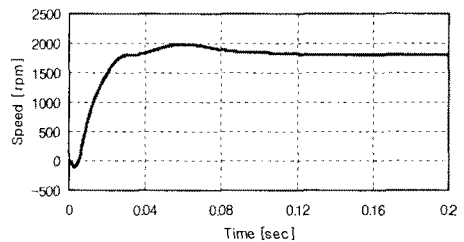
표 2는 제안된 해석 모델과 유도전동기의 정상 상태에서의 특성을 해석을 통하여 비교한 것이다. 정격 부하시 해석 모델의 효율이 유도전동기에 비해 약 10% 이상 높게 나타났다. 유도전동기는 슬립에 따라 정격 상태에서 1700 rpm으로 속도 저하가 발생하였고 해석 모델은 정격 부하 상태에서 동기 속도(1800 rpm)로 구동 되었다.

표 2. 해석 모델과 유도전동기 시뮬레이션 결과 비교

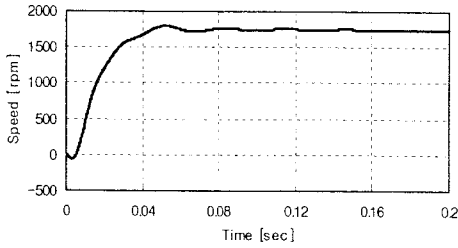
항 목	유도전동기	LSPM전동기
입력 전압 [V]	380	380
입력 전류 [A]	8.2	6.5
정격 속도 [rpm]	1,730	1,800
정격 토크 [Nm]	20.4	19.6
효 율 [%]	84.4	94.3
역 륫 륫	0.81	0.91
출 력 [W]	3,700	3,700
최대 출력 [W]	8,023	8,170
결 선	Y	Y

3.2 해석 모델의 기동 특성 해석

최적화된 해석 모델의 기동 특성 및 동기화 능력을 검증하기 위해 유한요소 해석을 수행하였다. 유도전동기의 해석은 최적화 모델에서 영구자석과 공기 덕트를 제거하여 동일 조건에서 실시하여 비교하였으며 결과는 그림 5에 나타내었다. 비교 결과 LSPM 동기전동기의 경우 정격부하에서 동기 속도 1800rpm을 유지하였으며 유도전동기의 경우 슬립에 의해 속도가 1750 rpm으로 저하하였다.



(a) 최적화 모델의 기동 특성 해석



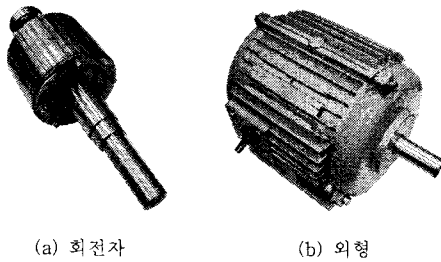
(b) 유도전동기의 기동 특성 해석

그림 5. 기동 특성 해석

4. 시제품 제작 및 시험

그림 6은 본 논문에서 최적 설계를 통해 제작된 LSPM 동기전동기의 회전자 및 전동기 외형을 나타낸다.

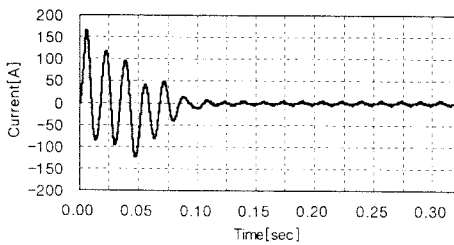
그림 7은 제안된 모델과 유도전동기의 특성 비교를 위하여 최적화 모델과 유도전동기의 기동 전류를 측정하는 것이며 그림 8은 정격 부하에서의 최적화 모델과 유도전동기의 U상 입력 전류를 측정하는 것이다. 표 3은 최적화 모델과 유도전동기의 특성 시험 결과를 나타낸다.



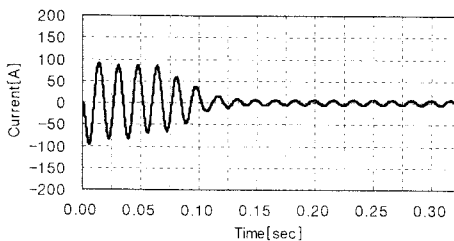
(a) 회전자

(b) 외형

그림 6. Prototype 직립기동 영구자석 동기전동기

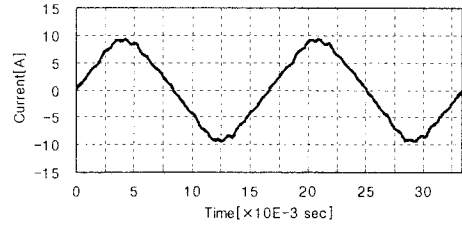


(a) 해석 모델 전동기 실측 기동 전류 파형(U상)

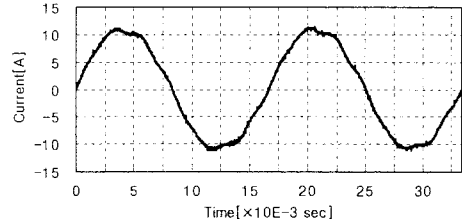


(b) 유도전동기 실측 기동 전류 파형(U상)

그림 7. 기동 전류 특성 비교



(a) 해석 모델 전류 측정 파형(U상)



(b) 유도전동기 전류 측정 파형(U상)

그림 8. 정격 전류 특성 비교(20Nm 인가시)

표 3. 해석 모델과 유도전동기 실험 결과 비교

항 목	유도전동기	LSPM전동기
입력 전압 [V]	400	400
입력 전류 [A]	7.6	6.4
정격 속도 [rpm]	1,760	1,800
정격 토크 [Nm]	20	20
효 율 [%]	86.3	94.1
역 륜	0.80	0.9
출 력 [W]	3,686	3,768
결 선	Y	Y

5. 결 론

본 논문에서는 3.7KW 4극 3상 직립 기동 영구자석 동기전동기(LSPM)의 동특성 해석 및 동급의 유도전동기와 성능 및 특성을 비교하였다. 이를 위하여 영구자석의 형상에 따른 기동 토크 및 동기화 특성을 고려한 최적 설계를 바탕으로한 시제품 제작 및 실험을 수행하였다.

시제품 특성 시험 결과 최적화 모델의 기동전류가 유도전동기에 비해 약 1.5배 높았으며 무부하 전류 및 전부하 전류는 약 2/3 정도로 측정 되었다. 효율 면에서는 유도전동기에 비해 LSPM 동기전동기가 약 8%이상 높게 나타났다. 정상상태 및 과도 상태에서의 특성 시험결과로 볼 때 유한요소해석 결과와 잘 일치함을 보임으로써 해석 결과의 타당성을 검증하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Li Gies, Guo Zhongbao, Wang Chunyuan, Giu Hong, Guo Daling, "High Starting Torque and High Efficiency REPM Synchronous Motor", Proceeding of the Seventh International Workshop on Rare Earth-Cobalt Permanent Magnets and Their Applications, Beijing, China, Sept. 1983, Chana Academic Publishers, pp.13-20
- [2] M.A Rahman and T.M. Osheiba, "Performance of a large line-start permanent magnet synchronous motor", IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 5, pp.211-217, Mar.1990.
- [3] T.J.E. Miller, "Synchronization of line-start permanent magnet AC motor", IEEE Trans., vol.PAS-103, Juillet 1984, pp 1822-1828.