

직립 기동 영구자석 동기 전동기의 브레이크 토크 특성 해석

김병국, 김태현, 조원영, 이인재, 조윤현
동아대학교

Character Analysis for Break-Torque of Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motors

Byung Kuk Kim, Tae Hyun Kim, Won Yung Jo, In Jae Lee, Yun Hyun Cho
Dong-A University

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.

1. 서 론

근래에 들어 고성능 영구자석 재료의 개발과 가격 저하, 반도체 소자의 성능 향상, 전동기의 구동 및 제어 기법이 발전함으로써 펌프나 팬 등의 단순한 구동원에서 로봇, 공작기계 등에 사용되는 고성능의 서보 시스템에 이르기까지 영구자석형 전동기에 대한 관심과 연구가 점차 증가해 왔다.

직립 기동 영구자석 동기전동기(Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor : 이하 "LSPM 동기전동기")는 일반 농형 유도전동기와 같은 농형 바를 가지는 회전자 내부에 영구자석을 매입한 구조이다. 영구자석은 유도 현상을 최대한 이용하기 위해 농형바 안쪽에 위치하는 형태를 취하고 있다. 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 1.5KW 4극 직립 기동 영구자석 동기전동기의 브레이크 토크의 특성을 유한요소해석을 통하여 해석하고 동급의 유도 전동기와 기동 특성 및 성능을 비교, 분석한다. 정확한 특성 비교를 위하여 기존의 3상 1.5KW 4극 유도전동기의 고정자와 농형 바 구조를 그대로 사용하고 회전자 내의 영구자석의 두께와 넓이, 공기 턱트의 위치 변경에 따른 브레이크 토크 특성 해석을 수행한다.

2. 해석 모델 특성

2.1 해석 모델

그림 1은 특성 해석에 쓰인 직립 기동 영구자석 동기 전동기의 횡단면이다. 고정자 및 회전자의 농형 바는 1.5 KW 4극 3상 유도전동기의 구조를 그대로 사용하였다. 농형 바는 알루미늄 다이캐스팅으로 제작되었으며 회전자 스류각은 5°이다. 영구자석은 NdFeB계로 잔류자속 밀도 1.12[T], 보자력 796[kA/m], 최대 에너지적 231[kJ/m³]을 갖는 N30SH 재질을 사용하였으며 착자 방향은 그림 1에서 도시하였다. 표 1은 본 논문의 해석 모델의 기본 사양을 나타낸다.

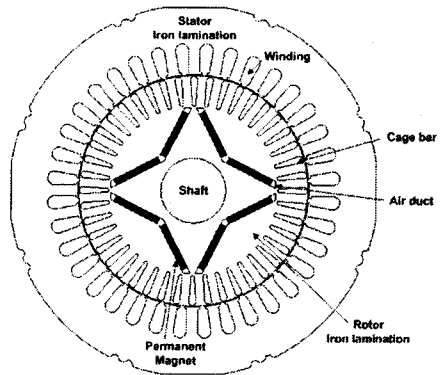


그림 1. 4극 직립 기동 영구자석 동기전동기 횡단면

표 1. 해석모델 사양

구분	항목	치수	단위
사양	정격 출력	1.5	KW
	정격 전압	220	V
	주파수	60	Hz
	동기 속도	1800	rpm
	정격 토크	7.96	Nm
고정자	슬롯 수	36	
	외경	160	mm
	내경	100	mm
	극수	4	Pole
	상당 저항	1.1	Ω
	상당 권선수	256	Turn
회전자	공극	0.5	mm
	슬롯 수	44	
	외경	99	mm
	영구자석	NdFeB	

2.2 토크 특성식

직립 기동 영구자석 동기전동기의 기자력에 의해 발생하는 총 토크는 식 (1)에서 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.

$$T_c = \frac{P}{2} \frac{m}{2\omega_s} \{ (X_{2d} - X_{2q}) I_{2d} I_{2q} + X_{m1} I_d I_{2q} - X_{m2} I_q I_{2d} + E_0 V I_{2q} \} \quad (1)$$

또한 영구자석에 의한 브레이크 토크는 식 (2)로 주어진다.

$$T_m = \frac{P}{2} \frac{m}{\omega_s} \{ X_{m1} I_{f1} I_{m1} + (X_d - X_q) I_{m1} I_{m2} \} \quad (2)$$

따라서 총 전기자 토크는 식 (3)과 같이 주어진다.

$$T_e = \frac{P}{2} \frac{m}{\omega_s} \{ (X_d - X_q) I_d I_q + X_{m1} I_{2d} I_q - X_{m2} I_{2d} I_d + E_0 I_d \} \quad (3)$$

그림 2는 과도 상태에서 정지 상태에서 정상 상태까지 상승하는 동안의 브레이크 토크 성분이 유도 토크 성분에 미치는 영향을 나타낸다. 기동시 영구자석에 의해 발생된 브레이크 토크의 영향으로 총 기동 토크가 감소됨을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 영구자석의 크기 및 형상에 따른 브레이크 토크의 영향과 특성을 고찰한다.

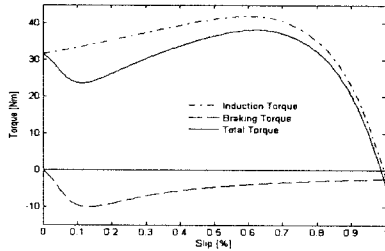


그림 2. LSPM 동기전동기의 브레이크 토크 특성

2.1 브레이크 토크

영구자석에 의한 브레이크 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 4, 그림 5는 각각 영구자석의 두께, 영구자석의 넓이 및 공기 덕트 위치에 따른 직립 기동 영구자석 동기전동기의 특성을 비교한 것이다.

그림 3에서 영구자석의 두께에 따른 토크 특성의 급격한 변화는 두께가 커지면서 공기 덕트의 형상이 변경되므로 전체 누설 자속의 급격한 변화를 일으키기 때문이다. 이러한 현상은 그림 5에서도 나타나고 있다. 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

브레이크 토크는 선형적인 관계를 보이게 된다.

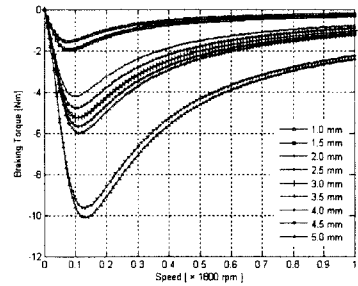


그림 3. 영구자석 두께에 따른 브레이크 토크 특성

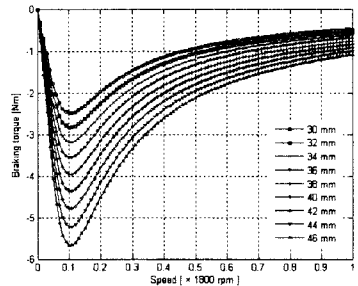


그림 4. 영구자석 넓이에 따른 브레이크 토크 특성

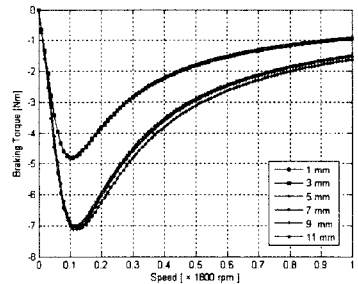


그림 5. 영구자석 덕트 형상에 따른 브레이크 토크 특성

3. 특성 해석

3.1 정상 상태 특성

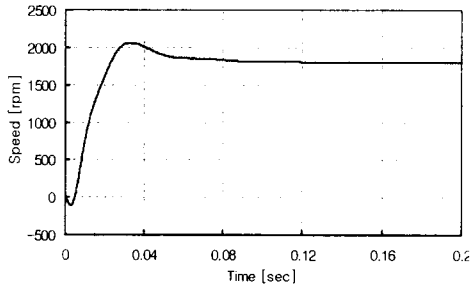
표 2는 제안된 해석 모델과 유도전동기의 정상 상태에서의 특성을 비교한 것이다. 정격 부하시 해석 모델의 효율이 유도전동기에 비해 약 10% 이상 높게 나타났다. 유도전동기는 슬립에 따라 정격 상태에서 1700 rpm으로 속도 저하가 발생하였고 해석 모델은 정격 부하 상태에서 동기 속도(1800 rpm)로 구동 되었다.

표 2. 해석 모델과 유도전동기 정상 상태 성능 비교

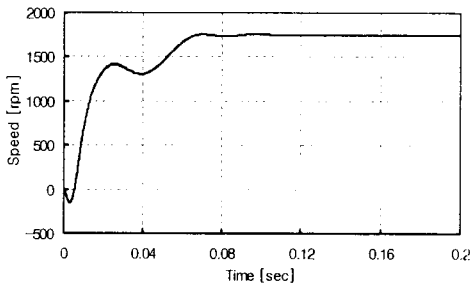
항 목	유도전동기	해석 모델
입력 전압 [V]	220	220
입력 전류 [A]	5.82	5.1
정격 속도 [rpm]	1,700	1,800
정격 토크 [Nm]	8.42	7.95
효 율 [%]	82.4	94.3
역 율	0.710	0.9
출 력 [W]	1,500	1,500
최대 출력 [W]	3,315	3,347
결 선	DELTA	DELTA

3.2 해석 모델의 기동 특성 해석

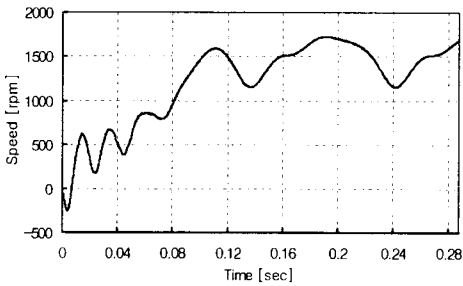
최적화된 해석 모델의 기동 특성 및 동기화 능력을 검증하기 위해 유한요소 해석을 수행하였다. 유도전동기의 해석은 최적화 모델에서 영구자석과 공기 덕트를 제거하여 동일 조건에서 실시하여 비교하였으며 결과는 그림 6과 그림 7에 나타내었다. 비교 결과 LSPM 동기전동기의 경우 정격부하에서 동기 속도를 유지하였으며 유도전동기의 경우 슬립에 따라 속도가 저하하였다. 그러나 과부하시 유도전동기에 비해 LSPM 전동기의 토크 리플이 크게 상승함을 알 수 있다.



(a) 기동 특성 : 부부하

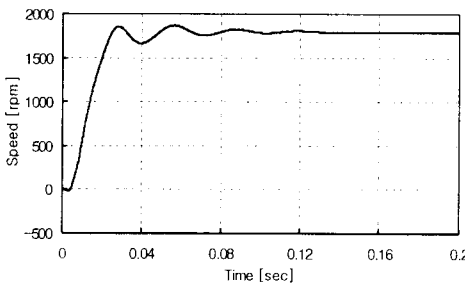


(b) 기동 특성 : 7.9Nm

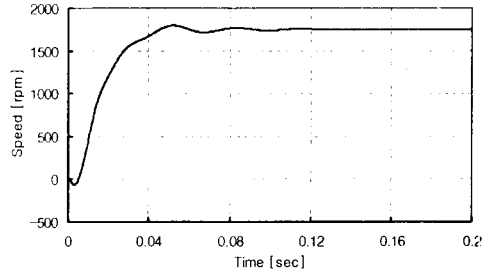


(c) 기동 특성 : 30Nm

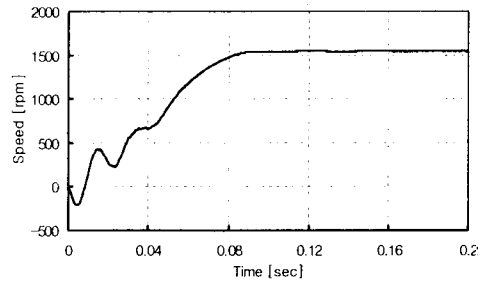
그림 6. 최적화 모델의 기동 특성 해석



(a) 기동 특성 : 부부하



(b) 기동 특성 : 8.4Nm



(c) 기동 특성 : 30Nm

그림 7. 유도전동기 기동 특성 해석

4. 결 론

본 연구에서는 1.5KW 4극 3상 직립 기동 영구자석 동기전동기(LSPM 동기전동기)의 기동 토크 최적화를 위하여 등가회로법과 유한요소법(FEM)을 병행하여 수행하였다. 설계 모델의 고정자는 특성 비교를 위하여 기존의 유도전동기 고정자 형태를 그대로 사용하였으며 본 연구에서는 회전자 설계만을 고려하였다.

해석 결과 직립 기동 영구자석 동기전동기의 경우 회전자 구조에 따라 영구자석에 의한 브레이크 토크의 영향이 크게 작용함을 알 수 있었다. 영구자석에 의한 브레이크 토크가 과다한 경우 기동 토크 부족으로 기동이 불가능하게 되며 부족할 경우 정상 상태에서의 동기화가 어렵게 된다. 또한 LSPM 동기전동기의 경우 과부하시 유도전동기에 비해 토크 리플이 크게 증가하였다. 정격 출력에서의 효율은 LSPM 동기전동기가 유도전동기에 비해 약 10%이상 높게 나타났다.

마지막으로 본 연구에서는 회전자 바의 형상 변경에 따른 특성 해석은 이루어지지 않았으므로 향후 연구에서는 회전자 바의 최적 설계를 통한 LSPM 동기전동기의 성능 개선 방향에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2003-B-272-0-00)주관으로 수행된 과제임

[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.