

직립 기동 영구자석 동기 전동기의 기동 토크 최적화 설계

김병국, 황동원, 김태현, 조원영, 이인재, 한성진, 조윤현
 동아대학교

Optimal Design for Starting -Torque of Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor

Byong Kuk Kim, Dong Won Hwang, Tae Hyun Kim, Won Yung Jo, In Jae Lee, Sung Jin Han, 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.

공기 덕트의 위치 변경에 따른 특성 해석을 수행한다. 해석의 주안점은 정격 부하에서의 기동 토크 특성 및 정상 상태에서의 동기화 능력, 그리고 고 효율화에 두었다.

2. 해석 모델 특성

2.1 해석 모델

그림 1은 특성 해석에 쓰인 직립 기동 영구자석 동기 전동기의 1/2 모델 횡단면이다. 고정자 및 회전자의 농형 바는 1.5 KW 4극 3상 유도전동기의 구조를 그대로 사용하였다. 농형 바는 알루미늄 다이캐스팅으로 제작되었으며 회전자 스쿠각은 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.

1. 서 론

일반적으로 영구자석 동기전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor : PMSM)는 회전자의 구조에 따라 서 두 가지로 분류된다. 하나는 영구자석이 회전자 표면에 부착되는 표면 부착형(SPM)으로 일반적으로 AC 서보 모터에서 주로 사용되고 있다. 다른 하나는 영구자석이 회전자 내부에 위치하는 매입형(IPM)으로 구동 인버터에 의해 직립 기동 전동기의 형태로 사용되고 있다. 이러한 영구자석 동기전동기에서 주목해야 할 점은 최근 들어 적용 분야가 고성능의 서보용에서부터 팬과 펌프와 같은 직립 기동 전동기에 이르기까지 매우 폭넓은 분야로 확대되고 있다는 것이다. 그 이유로는 전 세계적으로 직면한 에너지 고갈 문제와 환경오염에 대한 규제 강화로 고효율 기기의 요구가 점차 증가하고 있다는 것과 고에너지 영구자석의 가격이 하락하고 있기 때문이다.

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 1.5KW 4극 직립 기동 영구자석 동기전동기의 기동 토크를 최적화한 모델을 시뮬레이션을 통하여 제시하고 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,

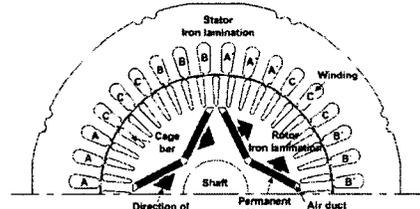


그림 1. 4극 직립 기동 영구자석 동기전동기 1/2 횡단면

표 1은 본 논문의 LSPM 동기전동기 해석모델의 기본 사양을 나타낸다.

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
고정자	정격 토크	7.96	Nm
	슬롯 수	36	
	외경	160	mm
	내경	100	mm
	극 수	4	Pole
	상당 저항	1.1	Ω
회전자	상당 권선수	256	Turn
	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 브레이킹 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 의한 브레이킹 토크는 식 (2)로 주어진다.

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

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 과도 상태에서의 두 토크 성분의 특성을 나타낸다. 기동시 영구자석에 의해 발생된 브레이킹 토크의 영향으로 총 기동 토크가 감소됨을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 브레이킹 토크를 최소화되는 영구자석의 두께에 대한 최적 설계 치수 선정과 특성을 고찰한다.

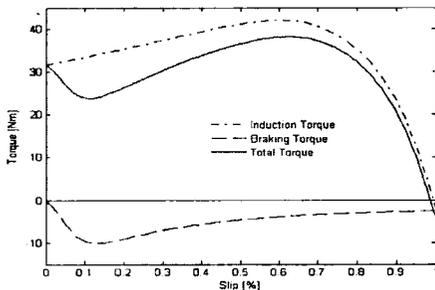


그림 2. 직립 기동 영구자석 동기전동기의 토크 특성

2.1 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 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 위치가 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 브레이킹 토크는 선형적인 관계를 보이게 된다.

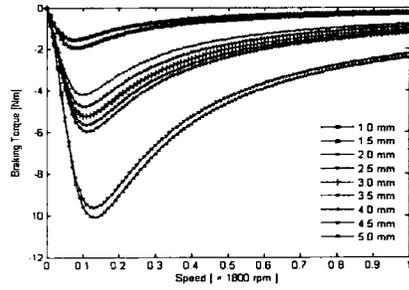


그림 3. 영구자석 두께에 따른 브레이킹 토크 특성

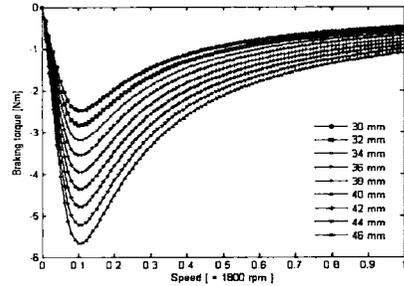


그림 4. 영구자석 넓이에 따른 브레이킹 토크 특성

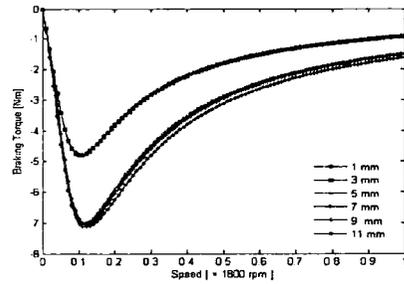


그림 5. 영구자석 덕트 위치에 따른 브레이킹 토크 특성

3. 특성 해석

3.1 정상 상태 특성

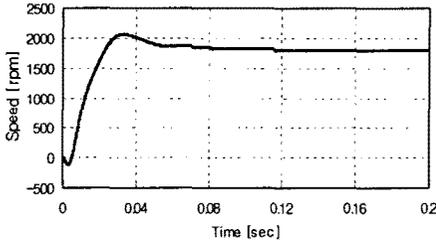
표 2는 제안된 해석 모델과 유도전동기의 정상 상태에서의 특성을 비교한 것이다. 정격 부하시 해석 모델의 효율이 유도전동기에 비해 약 10%이상 높게 나타났다. 유도전동기는 슬립에 따라 정격 상태에서 1700 rpm으로 속도 저하가 발생하였고 해석 모델은 정격 부하 상태에서 동기 속도(1800 rpm)로 구동 되었다.

표 2. 해석 모델과 유도전동기 정상 상태 성능 비교

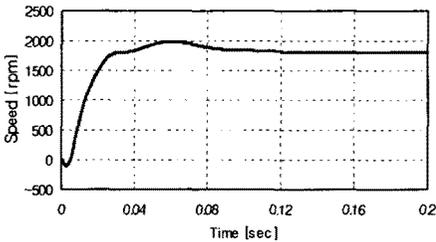
항 목	유도전동기	해석 모델
입력 전압 [V]	220	220
입력 전류 [A]	5.82	5.1
정격 속도 [rpm]	1,700	1,800
정격 토크 [Nm]	8.42	7.95
효 율 [%]	82.4	94.3
역 륫	0.710	0.9
출 력 [W]	1,500	1,500
최대 출력 [W]	3,315	3,347
결 선	DELTA	DELTA

3.2 해석 모델의 기동 특성 해석

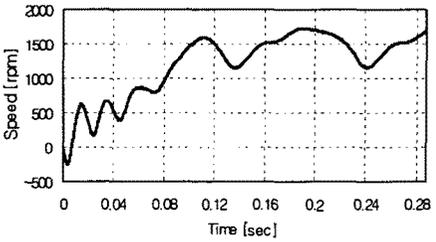
최적화된 해석 모델의 기동 특성 및 동기화 능력을 검증하기 위해 유한요소 해석을 수행하였다. 유도전동기의 해석은 최적화 모델에서 영구자석과 공기 덕트를 제거하여 동일 조건에서 실시하여 비교하였으며 결과는 그림 6 과 그림 7에 나타내었다. 비교 결과 LSPM 동기전동기의 경우 정격부하에서 동기 속도를 유지하였으며 유도전동기의 경우 슬립에 따라 속도가 저하하였다. 그러나 과부하시 유도전동기에 비해 LSPM 전동기의 토크 리플이 크게 상승함을 알 수 있다.



(a) 기동 특성 : 무부하

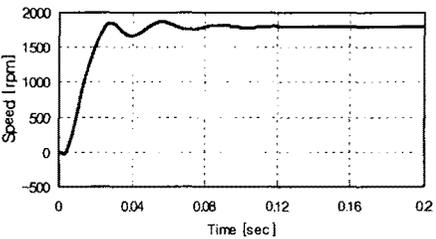


(b) 기동 특성 : 7.9Nm

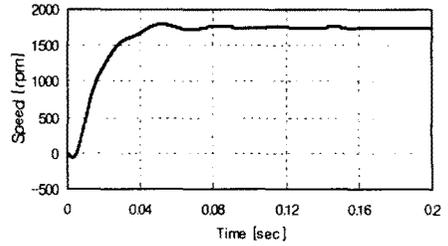


(c) 기동 특성 : 30Nm

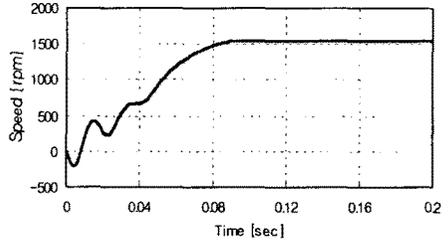
그림 6. 최적화 모델의 기동 특성 해석



(a) 기동 특성 : 무부하



(b) 기동 특성 : 8.4Nm



(c) 기동 특성 : 30Nm

그림 7. 유도전동기 기동 특성 해석

4. 결 론

본 논문은 1.5KW 4극 3상 직립 기동 영구자석 동기전동기(LSPM)의 기동 토크 최적화를 위하여 회전자 내부에 매입된 영구자석의 두께, 넓이 및 공기 덕트의 위치에 따른 기동 특성 해석을 수행하였다. 직립 기동 영구자석 동기전동기의 경우 회전자 구조에 따라 영구자석에 의한 브레이킹 토크의 영향이 크게 작용함을 알 수 있었다. 효율 면에서는 유도전동기에 비해 LSPM 동기전동기가 약 10%이상 높게 나타났다. 또한 유한요소해석을 통하여 최적화된 모델과 유도전동기와의 정상 상태 및 과도 상태의 성능 비교를 통하여 해석 타당성을 검증하였다. 향후 연구에서는 직립 기동 영구자석 동기전동기의 시제품 제작을 통하여 설계 결과의 정확성을 입증할 것이다.

감사의 글

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.