

직립 기동 영구자석 동기전동기의 최적설계 및 동특성 해석

김도선, 김병국, 이병준, 조운현\*  
 동아대학교,

Optimal Design and Dynamic Characteristic Analysis of Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor

Do-Sun Kim, Byong-Kuk Kim, Byung-Jun Lee, Youn-Hyun Cho

**Abstract** - The interest in permanent magnet synchronous motor is present in a wide area of applications, ranging from high-performance servo drive to line-start application[1]. The are mainly two reasons for this trend: first low rotor losses and second the falling prices of high-energy magnets.

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

1. 서 론

직립 기동 영구자석 동기전동기(Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor : LSPM)는 회전자에 여자를 위한 영구자석과 기동을 위한 농형 바의 형태로 이루어진다[2]. LSPM 동기전동기의 가장 큰 특징은 유도전동기보다 높은 효율과 역률, 및 출력 밀도를 갖고 제어 용이하다. 또한 브러시와 정류자가 없기 때문에 직류전동기에 비해 구조가 간단하며 정기적인 보수, 점검이 필요 없고 설치와 운영에 소요되는 비용이 저렴하다는 장점을 가지고 있다. 최근의 추세에 맞추어 전동기 제어 시스템을 지능화하고 고효율 LSPM 전동기를 개발하여 선박 전기 제어 장치 구동용으로 적용할 경우 고효율에 따른 에너지 절감효과로 약 20~30% 절약할 수 있으며 고 신뢰성, 소형 경량화 구현, 소음 및 진동 저감의 효과를 거둘 수 있다.

본 논문에서는 3상 20KW 6극 LSPM 동기전동기의 최적화한 모델을 시뮬레이션을 통하여 제시하고 동급의 유도전동기와 기동 특성 및 성능을 비교, 분석한다. 해석의 주안점은 정격 부하에서의 토크 특성 및 정상 상태에서의 동기화 능력, 그리고 고효율화에 두었다.

2. 본 론

2.1 해석모델

그림 1은 특성 해석에 쓰인 LSPM 동기전동기의 해석 모델의 단면도이다. 본 논문에서 고정자와 회전자에 사용된 코어의 재질은 5[mm], S30의 규소강판이 사용되었다. 농형 바는 알루미늄으로 설계하였으며 해석의 편의를 위하여 회전자의 스킴각은 생략하였다. 영구자석은 NdFeB계로 잔류자속 밀도 1.26[T]인 N30SH 재질을 사용하였으며 착자 방향은 그림 1에 나타내었다. 표 1은 LSPM 동기전동기의 해석 모델의 기본 사양을 나타낸다.

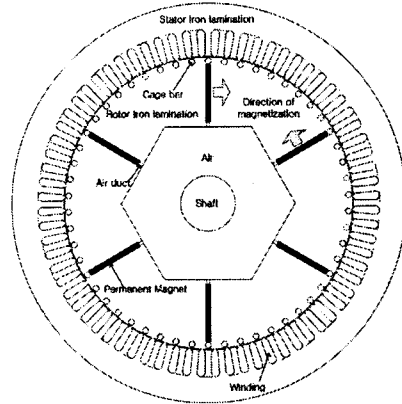


그림 1. 6극 LSPM 동기전동기 모델 횡단면도

표 1. LSPM 동기전동기 설계 모델 사양

구분	Item	Parameter	Unit
사양	정격출력	20	KW
	정격전압	380	V
	주파수	90	Hz
	동기속도	1800	rpm
	정격토크	106	Nm
고정자	슬롯 수	72	E.A
	외경	432	mm
	내경	317	mm
	극수	6	Pole
회전자	상당 직렬 권선수	192	Turn
	공극	0.9	mm
	슬롯 수	54	E.A
	외경	315.2	mm
	영구자석	NdFeB	

2.2 기본 특성식

고정자 전압 방정식은 식 (1)과 같다[2].

$$\begin{aligned} V_s \sin \delta &= p\lambda_d - \lambda_q \omega_r + R_s i_d \\ V_s \cos \delta &= p\lambda_q + \lambda_d \omega_r + R_s i_q \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $\lambda_d$ 와  $\lambda_q$ 는 d축, q축 쇠교자속수,  $R_s$ 는 고정자 상간 저항,  $p = \frac{d}{dt}$ 이다.

회전자 전압 방정식은 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} 0 &= p\lambda_{2d} + R_d \dot{i}_{2d} & (2) \\ 0 &= p\lambda_{2q} + R_q \dot{i}_{2q} \end{aligned}$$

여기서  $R_d$ 와  $R_q$ 는 회전자 d와 q축 저항의 미분계수이다.

해교 자속 방정식은 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} \lambda_d &= L_d \dot{i}_d + L_{md} + L_{md} I_{fm} & (3) \\ \lambda_{2d} &= L_{2d} \dot{i}_{2d} + L_{md} \dot{i}_d + L_{md} I_{fm} \\ \lambda_q &= L_q \dot{i}_q + L_{mq} \dot{i}_{2q} \\ \lambda_{2q} &= L_{2q} \dot{i}_{2q} + L_{mq} \dot{i}_q \end{aligned}$$

여기서  $I_{fm}$ 은 영구자석을 DC 여자 전류로 변환한 값이다.

식 (1)과 식 (2)를 식 (3)에 대입하여 정리하면 식 (4)를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} V_d &= (R_s + pL_d) \dot{i}_d - w_r L_q \dot{i}_q + pL_{md} \dot{i}_{2d} - w_r L_{mq} \dot{i}_{2q} + pL_{md} \dot{i}_{fm} & (4) \\ V_q &= w_r L_d \dot{i}_d + (R_s + pL_q) \dot{i}_q + w_r L_{md} \dot{i}_{2q} + pL_{md} \dot{i}_{2q} + w_r L_{md} \dot{i}_{fm} \\ 0 &= pL_{md} \dot{i}_d + (R_d + pL_{2d}) \dot{i}_{2d} + pL_{md} \dot{i}_{fm} \\ 0 &= pL_{mq} \dot{i}_q + (R_q + pL_{2q}) \dot{i}_{2q} \end{aligned}$$

순간의 회전자 가속도는 마찰을 무시하면 식 (5)와 같다.

$$p w_r = \frac{P}{2J} (T_e - T_L) \quad (5)$$

$w_r$ 는 회전자 각속도,  $P$ 는 극수,  $J$ 는 관성계수,  $T_L$ 는 부하토크,  $T_e$ 는 전기자 토크이다. 동기속도에서  $p=0$ 이면 유효 전류  $I_{md}$ 와  $I_{mq}$ 는 식 (6)로 나타난다.

$$\begin{aligned} I_{md} &= \frac{-E_0 X_q}{R_s^2 + X_d X_q} & (6) \\ I_{mq} &= \frac{-E_0 R_s}{R_s^2 + X_d X_q} \end{aligned}$$

### 2.3 브레이킹 토크

영구자석에 의한 브레이킹 토크는 총 기동 토크의 감소를 가져오기 때문에 기동시의 과도 상태에 대한 정확한 설계 및 해석이 이루어 져야 한다. 그러므로 각 영구자석의 구조에 따른 특성 해석을 수행하고 전동기 성능에 미치는 영향을 확인 할 필요가 있다. 논문에서는 그림 2에서 영구자석의 두께( $t$ )를 일정 비율로 변화시켰을 경우 브레이킹 토크에 따른 총 기동토크 및 속도 특성을 검토한다.

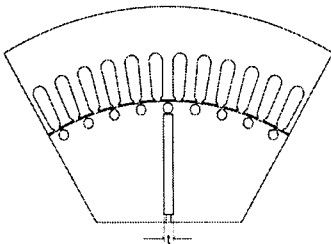


그림 2. LSPM 동기전동기 영구자석 형상

### 3. 특성 해석

#### 3.1 자석의 두께에 따른 특성 해석

최적화된 LSPM 동기전동기 모델을 선정하기 위해 자석의 두께에 따른 기동 특성 및 동기화 능력을 검증하고 자 유한요소 해석을 수행하였다. 자석 두께  $t$ 를 3[mm],

6[mm], 9[mm]로 변화시키되 나머지 조건은 일정하게 유지시킨다. 초기 무부하 기동 후 0.9[sec]초에 정격 부하 106[N]를 인가하였다. 그림 3과 그림 4는 이에 따른 LSPM의 속도와 토크 특성을 나타내고 있다. 무부하시, 자석이 3[mm]와 6[mm]일 때 상대적으로 속도와 토크 리플이 적음을 확인 할 수 있다. 하지만 정격 부하 인가 후 동기화 능력은 거의 동일할 하다.

최종적으로  $t$ 가 6[mm]인 자석을 도입한 LSPM과 유도전동기의 성능을 비교한다.

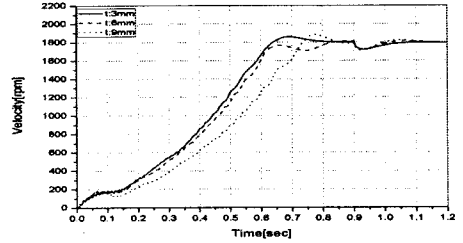


그림 3. 속도 특성 해석

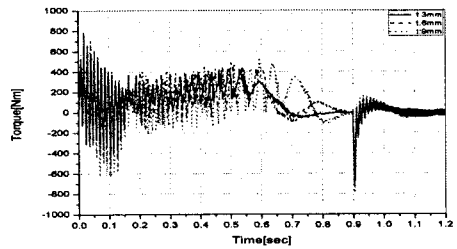


그림 4. 토크 특성 해석

#### 3.2 유도전동기와 LSPM 특성 비교

그림 5는 유도 전동기와 직립기동 영구자석 전동기의 무부하 기동시 자속 밀도를 나타내고 있다. 상대적으로 자석이 매입된 LSPM 동기전동기에서의 자속 포화가 유도전동기에 보다 높게 발생함을 확인 할 수 있다.

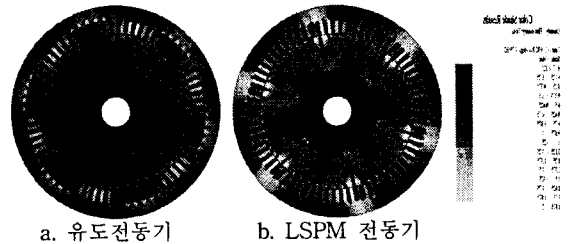
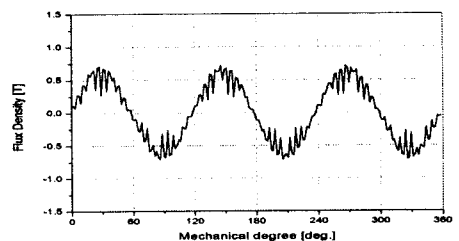
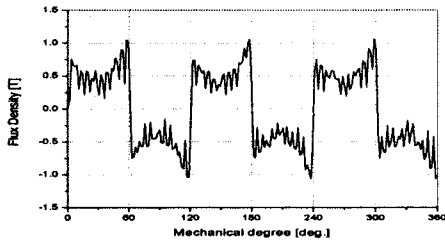


그림 5. 무부하 시 자속밀도

그림 6은 유도 전동기와 LSPM의 공극자속밀도로써 유도전동기에 비해 LSPM의 공극에서 자속 밀도가 높고 비정현적으로 나타내고 있다.



a. 유도전동기



b. LSPM 전동기

그림 6. 무부하 시 공극자속밀도

그림7과 그림8은 LSPM 동기전동기와 유도전동기의 정격부하 인가에 따른 동기화 특성을 나타내는 속도와 토크 그래프이다. 비교 결과 LSPM 동기전동기의 경우 정격부하에서 동기 속도 1800[rpm]으로 유지하였으며 유도전동기의 경우 슬립에 의해 속도가 1730[rpm]으로 저하하였다. 하지만 LSPM 동기전동기는 영구자석에 인한 브레이킹 토크 발생으로 유도전동기보다 심한 토크 리플이 일어난다.

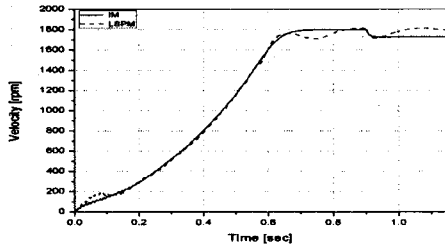


그림 7. 정격 부하 시 속도 비교

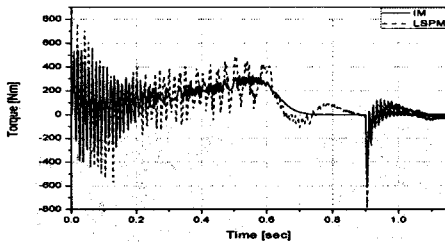
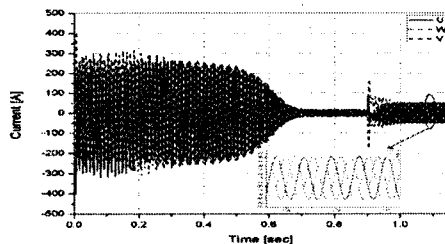
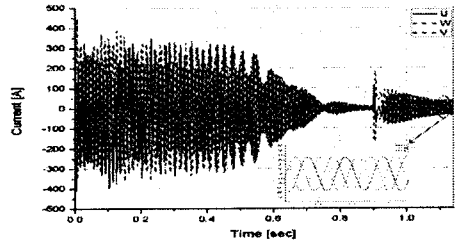


그림 8. 정격 부하 시 토크 비교

그림9는 위와 동일한 조건에서 유도전동기와 LSPM 동기전동기의 전류 그래프를 나타낸다. 정격 부하 인가 시 LSPM 동기전동기의 경우 유도전동기에 비해 상전류의 감소를 확인할 수 있다.



a. 유도전동기



b. LSPM 전동기

그림 9. 정격 부하 시 전류 비교

표 2. 유도전동기와 LSPM 동기전동기 해석 비교

항목	유도전동기	LSPM 해석모델
입력전압[V]	380	380
입력전류[A]	38	35
정격속도[rpm]	1730	1800
정격토크[Nm]	106	106
효율[%]	91.4	96.3
출력[W]	19203	19980

#### 4. 결 론

본 논문에서는 20KW 6극 3상 LSPM 동기전동기와 유도전동기의 특성 비교를 위하여 2차원 유한요소해석을 수행하였다. 이를 위하여 영구자석 두께에 따른 기동 특성과 동기화 특성을 고려한 최적 설계를 시행하였다.

해석 결과에 따라 유도전동기가 LSPM 동기전동기의 정격전류에 비해 약 1.08배 정도 높았다. 효율 면에서는 유도전동기에 비해 LSPM 동기전동기가 약 1.05배 높게 나타났다.

이상으로 LSPM 동기전동기와 유도전동기의 정상상태 및 과도 상태에서의 특성을 비교 검토하였다. 차후 이를 토대로 LSPM 동기전동기의 시제품 제작을 통한 유한요소 해석 결과와의 타당성을 입증한다.

본 논문은 한국전력공사의 한국 에너지 자원기술 기획평가원 (KETEP)에서 지원한 전력변환 시스템 신기술 연구센터(과제 번호 2007-0192)의 사업으로 수행 되었습니다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] Dan STOIA, Maria ANTONOAI, Danut ILEA, Mihai CERNAT "Design of Line Start PM Motors with High Power Factor", POWERENG2007, VOL.12-14, pp342-346, April2007
- [2] Byong-kuk Kim, Ji-Woo Moon, Mi-Jung Kim, Byung-Jun Lee, Yun-Hyun Cho, "Optimal Design for Starting-Torque of Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor", T HR KOREA INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS, VOL.56 NO.8, pp1390-1396, AUGUST 2007
- [3] Andrew M. Knight, Catherine I. McClay, "The Design of High-Efficiency Line-Start Motor", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL.36 NO.6, pp1555-1562, Nov/Dec2000
- [4] Kazumi Kurihara, M. Azizur Rahman "High-Efficiency Line-Start Interior Permanent-Magnet Synchronous Motors", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL.40 NO.3, pp789-796, May/June2004
- [5] Chang-Chou Hwang, Y.H. Cho "Effects of Leakage Flux on Magnetic Fields of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL.37 NO.4, pp3021-3024, July2001