

오버행 구조를 갖는 LSPM의 3D FEM과 등가회로법을 이용한 특성해석

강한별\*, 김병택\*\*, 류세현\*, 권병일\*  
 \*한양대학교, \*\*군산대학교

Characteristic Analysis of Single-phase Line Start Permanent Magnet Motor Considering Overhang Structure Using 3D FEM and Equivalent Circuit

Han byul Kang\*, Byung taek Kim\*\*, Se hyun Rhyu\*, Byung il Kwon\*  
 \*Hanyang University, \*\*Kunsan University

**Abstract** - This paper shows the characteristic analysis of single-phase LSPM(Line Start Permanent Magnet) synchronous motor considering overhang structure. To obtain the dynamic and steady performance of the motor, the D-Q equivalent circuit is used and the circuit parameters are extracted by 3D FEM. The performance of the model with overhang is compared with conventional model without overhang on the condition that both models have the same volume of the permanent magnet.

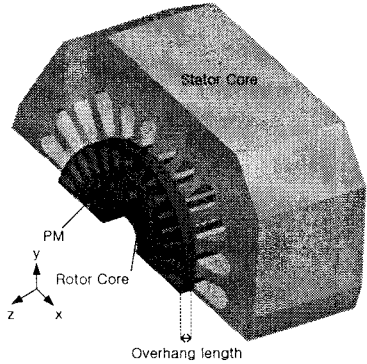
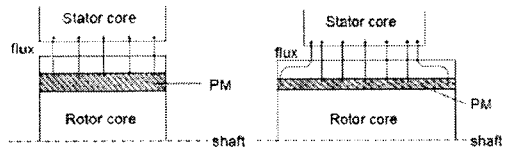


그림 1 오버행 구조를 갖는 단상 LSPM 동기전동기

1. 서 론

최근에 에너지 절약에 대한 관심이 고조되면서 영구자석을 사용한 전동기에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히, 효율은 낮지만 구조가 간단하고 제작이 용이하며 기동이 쉽기 때문에 가전분야에서 널리 사용되고 있는 단상 유도전동기의 대체 방안인 단상 LSPM 동기전동기는 단상 유도전동기에 비해 에너지 절약 차원에서 장점을 갖는다. 그러나 아직까지는 영구자석의 가격이 높아 제작 단가 상승의 단점이 있으며, 이에 따른 영구자석 채적 및 형상의 최적 설계는 단상 LSPM 성능 향상을 위한 중요한 인자이다[1,2].

따라서, 본 논문에서는 단상 LSPM 동기전동기의 구조적 특성 해석에 관한 연구의 일환으로서 회전자에 오버행을 갖는 모델을 제안하고, 영구자석 부피를 고정된 상태에서 오버행(overhang) 구조를 갖는 단상 LSPM 동기전동기의 특성을 고찰한다. 일반적으로 3차원적 자기회로를 갖는 모델의 해석 시 3D FEM을 이용하여 과도 특성을 해석하는 데는 많은 시간이 걸리고 결과를 검증하는데 비효율적이다. 본 연구에서는 해석 대상 모델의 회전자 오버행 구조를 고려하기 위하여 3D 정자계 FEM으로 산출한 역기전력 및 인덕턴스와 자기 등가회로법으로 계산한 파라미터를 D-Q 등가회로법에 적용하여 동특성을 해석한다.



(a) without overhang (b) with overhang  
 그림 2 오버행 유무에 따른 자속 흐름도

2. 3D FEM을 이용한 파라미터 산출

2.1 오버행 구조를 갖는 단상 LSPM

그림 1은 회전자에 영구자석이 삽입된 오버행을 갖는 단상 LSPM의 1/2 모델을 나타낸다. 고정자 전체의 슬롯 수는 24개이며, 극수는 2극이다. 또한, 그림 2는 오버행을 갖지 않는 기본 모델과 비교하여, 영구자석의 채적을 동일하게 유지하며 회전자에 오버행을 주었을 경우의 자속 경로에 대한 개념도를 보인다. 그림에서 보이듯이 오버행 영역의 자속은 회전자 축 방향의 자로를 통하여 공극에 집중됨을 나타낸다. 표 1은 오버행을 갖지 않는 기본모델의 전기적 및 기계적 제원을 나타낸다. 사용된 영구자석은 네오디뮴(Nd) 소결 타입으로서, 잔류자속 밀도는 1.1[T]이다.

표 1 기본 모델 사양

구 분	제 원
정격 출력 [W]	120
정격 속도 [rpm]	3600
극 수 [poles]	2
적층 길이 [mm]	45
영구자석 부피[mm <sup>3</sup> ]	1822.5(45*22.5*1.8)
영구자석 B <sub>r</sub> [T]	1.1
강판 재질	S18

2.2 3D FEM을 이용한 공극 자속밀도 계산

본 논문에서는 공극 자속밀도를 이용한 역기전력, 인덕턴스 산출 및 오버행 효과를 고찰하고자, 자기회로적으로 3차원적 구조를 갖는 연구대상 모델을 고려하여 3D FEM 해석을 행하였다. 오버행 길이에 따라 영구자석의 두께를 변화시켜 전동기에 사용되는 영구자석의 채적을 일정하게 고정시켰으며, 오버행의 길이는 전기 강판의 두께와 영구자석의 제작 가능성을 고려하여 최대 9[mm]로 가정하였다.

그림 3은 해석대상 모델인 단상 LSPM의 동심형 코일 권선을 갖는 고정자 부분을 나타낸다. 그림 4는 회전자 오버행 길이에 따른 공극의 축방향 중심선( $l_c$ ) 위치에서, 영구자석에 의한 공극 자속밀도 분포를 3D FEM을 이용하여 해석한 결과이다. 고정자 슬롯에 기인한 불균일 공극 자기저항의 분포로 각각의 위치에서 공극 자속밀도의 크기가 다름을 알 수 있다. 또한, 그림 5는 오버행의 길이에 따른 축방향( $l_c$ )으로의 공극 자속밀도 특성을 나타낸다. 그림에서 보이듯이 고정자 엔드 부에서 자속이 집중되는 양상을 나타내고 있으며, 오버행이 클수록 공극 자속밀도가 커짐을 알 수 있다.

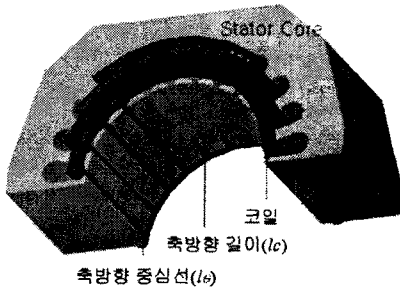


그림 3 해석대상 모델의 고정자

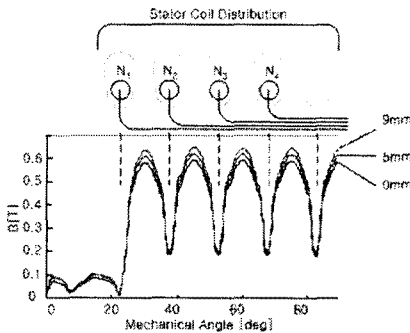


그림 4 축방향 중심선( $l_c$ )에서의 오버행에 따른 영구자석에 의한 공극 자속 밀도 분포도

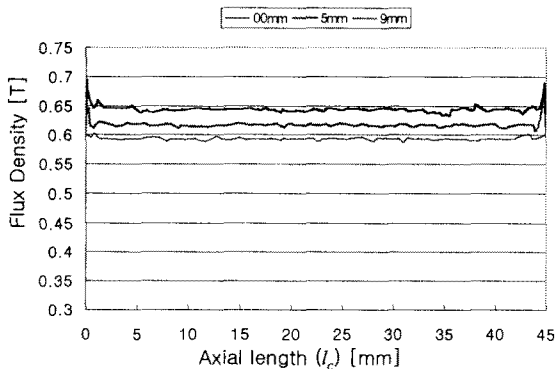


그림 5 축방향 길이( $l_c$ )로의 오버행에 따른 영구자석에 의한 공극 자속 밀도 크기 변화

### 2.3 역기전력 및 인덕턴스 계산

역기전력과 인덕턴스 산출을 위하여 쇄교 자속량을 먼저 계산한다. 쇄교 자속량은 영구자석과 권선 전류에 의한 공극 자속밀도 값을 식 (1)에 적용하여 계산한다.

$$\lambda_m = \sum_k \int_0^{l_c} N_k \int_{\alpha_k}^{\beta_k} B_g r d\theta dt \quad (1)$$

여기서,  $N_k$ 는 각각  $\alpha_k$ 부터  $\beta_k$ 의 스패น(span) 각을 갖는 권선 번호,  $l_c$ 는 철심의 적층 길이,  $r$ 은 공극 중심의 반지름을 나타낸다.  $l_c$ 는 공극의 자속을 추출하는 길이로 고려하며 오버행 구조에서도 고정자의 적층 길이인 45[mm]로 고정한다.

이로부터 구한 역기전력과 D축, Q축 인덕턴스를 식(2)와 (3)을 이용하여 계산한다. 그림 6은 각각 모델의 오버행 길이에 따라 계산된 역기전력과 D축, Q축 인덕턴스를 보여준다. 영구자석의 체적이 일정한 상태에서도 오버행 효과에 의해 역기전력과 인덕턴스가 상승한 결과를 볼 수 있다.

$$E_0 = \frac{d\lambda_m}{dt} = 2\pi f \lambda_m \quad (2)$$

$$L_{md} = \frac{\lambda_{md}}{i} \quad L_{mq} = \frac{\lambda_{mq}}{i} \quad (3)$$

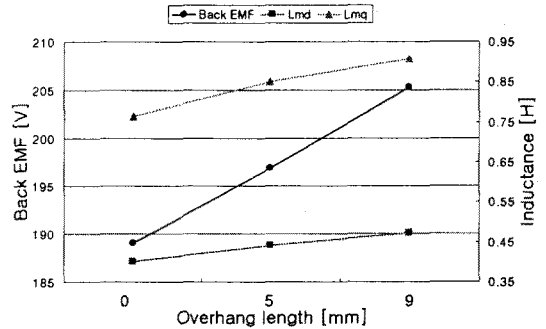


그림 6. 오버행 길이에 따른 역기전력과 인덕턴스

### 3. 등특성 해석

그림 7은 3D FEM과 자기 등가회로법으로부터 산출한 파라미터를 이용하여 D-Q 등가회로 해석을 하는 순서도를 나타낸다.

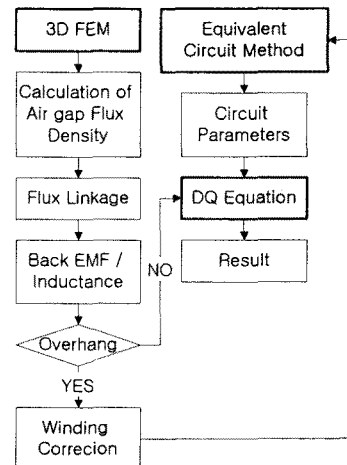


그림 7 오버행 구조를 갖는 전동기의 특성 해석 순서도

### 3.1 역기전력 상승을 고려한 권선 재설계

오버행 길이에 따른 기동, 효율특성을 비교하기 위하여 각 모델의 역기전력을 기본 모델과 같은 크기로 치환한다. 식 (4)와 (5)에 주어진 바와 같이 역기전력은 권선의 턴 수에 비례하므로 식 (5)를 이용하여 턴 수를 보정하고 선경은 식 (6)을 이용하여 재선정한다. 재선정된 권선을 갖는 모델로부터 D-Q 등가회로에 쓰이는 주요 파라미터들을 자기 등가회로법으로 계산한다[3].

$$E_0 = \frac{d\lambda}{dt} = \frac{d\lambda}{d\theta_e} \frac{d\theta_e}{dt} = \omega_e \frac{d\lambda}{d\theta_e} = \frac{N_m}{2} \omega_m \frac{2N\Phi_g}{\pi} \quad (4)$$

$$N_{cor} = \frac{E_0}{E_{oh}} \times N_{mi} \quad (5)$$

$$d_{cor} = \sqrt{\frac{N_{mi}}{N_{cor}} \times d_{mi}^2} \quad (6)$$

여기서,  $E_0$ ,  $E_{oh}$ 는 각각 초기 모델과 오버행 모델에서의 역기전력의 크기이다.  $N_{mi}$ 와  $d_{mi}$ 는 최초 턴 수 및 선경을 나타내고  $N_{cor}$ ,  $d_{cor}$ 는 역기전력 증가를 고려하여 보정한 턴 수와 선경을 나타낸다.

### 3.2 과도 특성 해석

식 (7)-(10)은 과도 특성 해석에 쓰이는 단상 LSPM 동기전동기의 D-Q 프레임 회로방정식이다.

$$v_d = (R_s + pL_d)i_d - \omega_r L_q \dot{i}_q + pL_{md}i_{2d} - \omega_r L_{mq}i_{2q} + pL_{md}i_{fm} \quad (7)$$

$$v_d = \omega_r L_d \dot{i}_d + (R_s + pL_q)i_d + \omega_r L_{md}i_{2q} + \omega_r L_{md}i_{fm} \quad (8)$$

$$0 = pL_{md}i_d + (R_d + pL_{2d})i_{2d} + pL_{md}i_{fm} \quad (9)$$

$$0 = pL_{mq}i_q + (R_q + pL_{2q})i_{2q} \quad (10)$$

여기서, 아래첨자 2는 회전자를,  $p$ 는 미분 연산자 ( $d/dt$ )를 나타낸다.  $L_{md}i_{fm}$ 은 영구자석으로부터 고정자 권선의 D축에 쇄교하는 자속이며, 그 값은 3D 정자계 FEM을 통하여 계산된 값이며 주요 파라미터들은 3.1에서 보정하여 계산한 값들을 적용한다.

식 (7)-(10)과 식 (11)의 기계방정식을 결합하여 미분방정식을 세우고 미분방정식의 해를 구함으로써 전동기의 특성 해석을 수행하였다[4].

$$T_e = T_L + J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \quad (11)$$

식 (11)에서  $T_L$ 은 부하토크,  $J$ 는 관성 모멘트 그리고  $B$ 는 댐핑 계수를 나타낸다. 기동 커패시터는  $30\mu F$ , 운전 커패시터는  $3\mu F$ 이며  $15\Omega$  PTC를 사용하였다. 그림 8은 정격 부하 조건에서의 기동 특성을 나타낸다. 원활한 기동이 이루어지고 있으며 오버행을 갖는 모델에서는 오버행 효과와 권선 재설계에 따른 1, 2차 저항 변화로 인한 기동 특성의 변화가 발생함을 볼 수 있다. 오버행 구조가 적용된 모델의 기동 시간과 속도 맥동 추이가 기존 모델에 비해 개선됨을 알 수 있다.

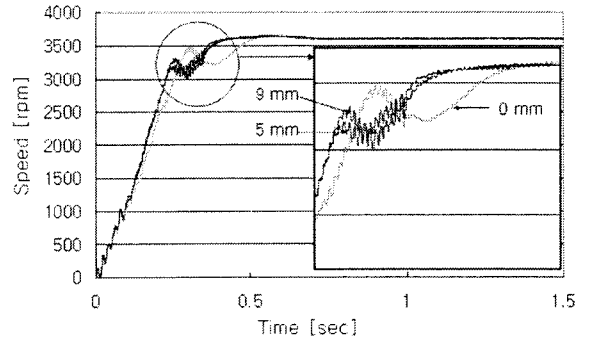


그림 8 오버행에 따른 속도 특성 곡선

그림 9는 정격부하시의 오버행 길이에 따른 효율 특성을 나타낸다. 그림에서 보이듯이 오버행을 갖지 않는 모델에 비하여 9[mm]의 오버행을 갖는 모델이 약 1.5[%]의 효율이 상승함을 알 수 있다. 이것은 역기전력의 상승에 따른 권선의 재설계에 의해 고정자 권선의 저항이 작아지면서 동손이 감소한 것에 기인한다.

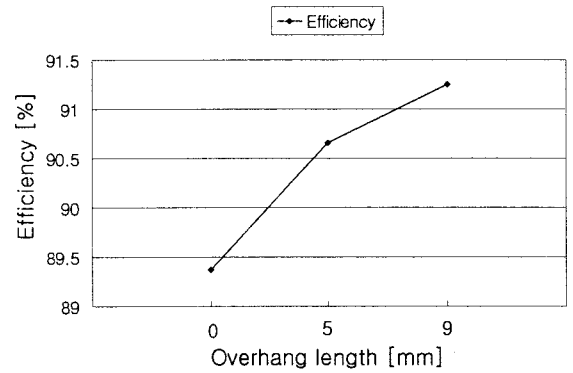


그림 9 오버행 길이에 따른 효율 곡선

## 4. 결 론

본 논문에서는 영구자석의 체적을 고정하고 회전자에 오버행 구조를 적용한 단상 LSPM 동기전동기의 특성을 해석하였다. 3D 정자계 FEM과 자기 등가회로법을 이용하여 계산된 파라미터를 D-Q 등가회로법에 적용하여 오버행의 길이에 따른 전동기의 효율 및 과도특성을 해석하였다.

해석 결과로부터, 단상 LSPM 동기전동기에 오버행 구조를 적용하면 영구자석의 사용량을 일정하게 유지하면서도 오버행을 갖지 않는 모델에 비하여 효율과 기동 특성 개선에 효과가 있음을 확인하였다.

## [참 고 문 헌]

- [1] T. J. E. Miller "Single-phase Permanent Magnet Motor Analysis", IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. IA-21, No 4, 1985
- [2] B. N. Chaudhari, "Performance of Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor with Single-phase Supply System", EPA, IEE, Vol. 151, 83-90, 2004
- [3] C. G. Veinott "Theory and Design of Small Induction Motors", McGRAW-HILL Book Company, 1959
- [4] 강규홍, "단상 직립기동 영구자석 동기전동기의 기동특성 해석", KIEE Transaction, Vol. 50B, No. 12, 2001