

릴렉턴스 토크 확보를 위한 단상 유도형 동기기의 자기회로 설계

오영진, 남 혁, 정승규, 홍정표, 정태욱*, 백승민*
 창원대학교 전기공학과, *LG전자 디지털 어플라이언스 사업본부 연구소

Design of Magnetic Circuit Obtained with Reluctance Torque
 in Line-start Permanent Synchronous Motor(LSPM)

Young-Jin Oh, Hyuk Nam, Jung-Pyo Hong, Seung-Kyu Jung*, Tae-Uk Jung**, Seung-Myun Baek**
 Dept. of Electrical Engineering, Changwon Nat'l Univ., *EM-Tech, **DA Lab(C)

Abstract - This study investigates magnetic circuit design of the Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor (LSPM) for advanced reluctance torque in steady state. Back-emf and d-q-axial inductance is analyzed by using 2 dimensional Finite Element Method (FEM). These results are reflected characteristic analysis of LSPM.

자계는 특정한 공간적 위상차를 갖도록 분포시키고 공극에서의 기자력이 정적인 분포가 되도록 권선한다. 고정자 권선 회로도에서 V_s, I_s 는 입력되는 전압과 전류를, V_{main}, I_{main} 은 주권선축의 전압과 전류를, V_{aux}, I_{aux} 는 보조권선축의 전압과 전류를, 그리고 C_r 은 운전 커패시터를, V_c 는 커패시터 전압을 나타낸다.

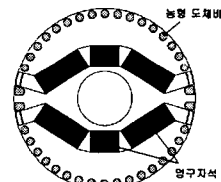
1. 서 론

가전 분야에 있어서 상용 전원을 이용하여 기동 및 구동이 가능한 단상 유도전동기는 경제적이고 기동특성이 우수하여 가전제품의 구동원으로 보편화되어 있다. 하지만, 단상 유도전동기의 경우 회전자의 도체바에 흐르는 전류로 인한 2차측 손실이 발생하여 효율 향상에 한계가 있다. 이에 비해 단상 유도전동기의 회전자에 영구자석을 매입한 구조를 가지는 단상 유도형 동기전동기(Single-Phase Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor, LSPM)는 기동 시에 2차측 도체바에 의한 유도기동을 하고 정상운전 시에는 영구자석에 의한 마그네틱 토크(Magnetic torque)와 d-q축 인덕턴스 차이에 의한 릴렉턴스 토크(Reluctance torque)를 이용하여 동기속도로 운전한다. 따라서 정상운전 시에는 슬립에 의한 유도현상이 없어 2차측 동손을 줄일 수 있고, 영구자석을 사용하므로 출력 에너지 밀도가 높고 고효율이 가능하다는 장점이 있다 [1].

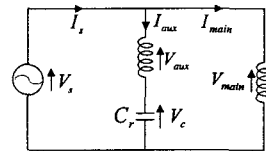
본 논문에서는 정상상태에서 마그네틱 토크와 함께 유효토크에 기여하는 릴렉턴스 토크를 확보하여 전동기의 정격에서의 효율 향상 및 최대토크 증대를 위한 LSPM의 자기회로 설계를 수행하였다. d-축 인덕턴스와 q-축 인덕턴스의 비가 커질수록 릴렉턴스 토크는 증가하므로 회전자에 삽입되어 있는 영구자석의 위치에 따른 d-q축 인덕턴스를 산정하였다. 또한 q-축 인덕턴스 확보를 위하여 회전자의 직경을 증가시켰다. d-q축 인덕턴스 및 역기전력은 자기회로의 포화 상태와 영구자석이 삽입된 부분의 형상 및 위치에 따라 큰 영향을 받기 때문에 집중정수로 산정하기 어려우므로 유한요소해석을 통하여 산정하였으며 이를 등가회로를 이용한 특성 해석에 반영하였다.

2.2 대칭좌표계법

LSPM의 고정자 권선에 의한 자계는 평형기와는 달리 불평형 자계를 발생시킨다. 따라서 본 논문에서는 대칭좌표계법을 이용하여 2개의 독립적인 평형전동기로 고려하여 해석하였다. 그림 2는 2상 전동기 변환 과정을 나타낸다. 먼저 주권선과 보조권선을 가진 단상전동기를 2상 전동기로 변환하여, 이 2상 전동기의 상전압 및 전류로부터 대칭성분으로 분해한다.



(a) LSPM의 회전자 구조



(b) LSPM의 고정자 권선 회로도

그림 1 LSPM의 회전자 구조 및 고정자 회로도

2. 정상상태 특성 해석

2.1 LSPM의 구조

그림 1은 본 논문에서 특성해석을 하고자 하는 LSPM의 회전자 구조 및 고정자 권선 회로도를 나타낸다. 일반적으로 영구자석을 매입한 구조를 많이 사용하고, 유도 기동토크를 얻기 위해 논형 도체바가 회전자에 삽입되어 있다. 또한 영구자석의 측면 부분은 철심으로의 누설을 방지하기 위한 자속 장벽이 존재한다.

고정자 권선은 주권선과 커패시터가 직렬로 연결된 보조권선으로 구성되어 있다. 주권선과 보조권선에 의한

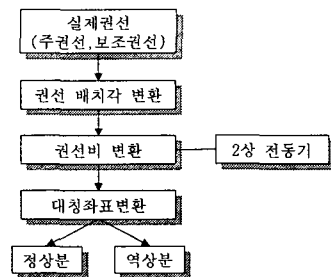


그림 2 2상 전동기 대칭좌표 변환과정

2.3 전압방정식 유도

LSPM은 주권선과 보조권선이 공간적으로 90°의 위상차를 가지고, 보조권선의 커패시터에 의해 시간적인 위상차가 발생하므로 2상 전동기로 생각할 수 있다. 그림 3은 2상 전동기의 상 성분과 d-q축 성분과의 관계를 나타낸 것이다 [2]. 이러한 벡터 관계로부터 고정자 상의 d-q축 성분은 식(1)과 같다. 여기서 θ 는 2상으로 변환된 고정자 a' 상의 기자력과 회전자의 d-축이 전기적으로 이루는 각이다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{a'} \\ v_{b'} \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)의 행렬로부터 2상 전동기 전압방정식을 식 (2)와 같이 d-q축 형태로 변환하여 정상분 전압방정식을 구성하였다. 식 (3)은 d-q축 변환에 의한 저항을 나타내며, 그림 4는 정상성분의 d-q축 등가회로를 나타낸다. 여기서 $\theta = \omega t - \delta$ 로 시간 항이 있지만, 정상상태에서는 시간을 고려하지 않아도 되기 때문에 부하각만을 고려하였다.

$$\begin{aligned} V_d &= R_d' I_d - X_q I_q \\ V_q &= R_q' I_q + X_d I_d + E \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} R_d' &= R_a' \cos^2 \theta + R_b' \sin^2 \theta \\ R_q' &= R_a' \sin^2 \theta + R_b' \cos^2 \theta \end{aligned} \quad (3)$$

역상분의 경우 정상 운전 시 정상분과 반대방향의 회전자계가 발생하므로 슬립이 2인 유도전동기로 생각할 수 있다. 따라서 역상분 등가회로는 그림 5와 같이 표현할 수 있다. 등가회로의 임피던스를 d-q축으로 분리해서 정리하면 식 (5)와 같고, 역상분 임피던스는 식 (6)과 같이 등가회로의 d-q축 임피던스의 평균값으로 한다. 식 (5)에서 첨자 r 은 회전자측을, s 는 고정자 측을, l 은 누설성분을 의미하고, X_{md} , X_{mq} 는 각각 d-q축의 자화리액턴스이다.

$$Z_d = \frac{(R_d/2 + jX_{rd})jX_{md}}{R_d/2 + j(X_{md} + X_{rd})} + (R + jX_{sl}) \quad (5)$$

$$Z_q = \frac{(R_q/2 + jX_{rq})jX_{mq}}{R_q/2 + j(X_{mq} + X_{rq})} + (R + jX_{sl})$$

$$Z_2 = (Z_d + Z_q)/2 \quad (6)$$

2.4 초기 모델의 특성해석

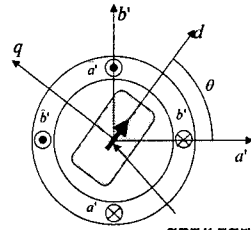
정상분과 역상분의 임피던스가 결정되면 대칭성분 전압과 전류를 계산할 수 있고, 이 전압과 전류에 의해 정상분과 역상분의 출력을 계산할 수 있다. 식 (7)은 권선 저항을 무시한 경우의 정상분 출력으로 릴럭턴스 성분과 마그네틱 성분으로 이루어져 있다. 그림 6은 초기모델에 대하여 정상분 출력을 부하각에 따라 나타낸 것으로 최대 출력시 대부분이 릴럭턴스 성분임을 알 수 있다.

$$P = \frac{EV}{X_d} \sin \delta + \frac{V^2(X_d - X_q)}{2X_d X_q} \sin 2\delta \quad (7)$$

3. 릴럭턴스 토크 확보를 위한 자기회로 설계

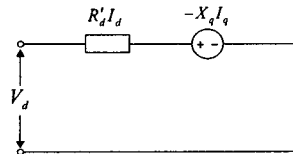
3.1 초기모델의 인덕턴스 특성해석 결과

그림 7은 초기 모델을 대상으로 전류 위상각 0° 일때 전류 크기에 따라 회전자 요크에서의 q-축 인덕턴스를 산정한 결과이다. A는 영구자석의 윗부분을, B는 영구자석의 밑부분을 나타낸다. 전류의 크기가 증가함에 따라 부분적인 포화현상이 발생하여 q-축 인덕턴스가 감소하는 결과를 나타내었다. 그림 8은 초기모델에서 영구자석과 회전자 내경의 간격인 ω 를 감소시키면서 인덕턴스의 변화 추이를 산정한 것이다. 그 결과 ω 가 감소할수록 d-축 인덕턴스는 감소하고 q-축 인덕턴스는 증가하여 돌극비가 증가함을 알 수 있다. 그림 9는 A부분과 B부분, ω 및 영구자석의 이동방향을 나타낸다.

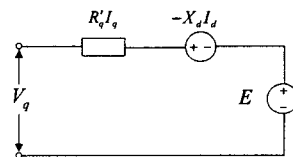


영구자석 자화방향

그림 3 고정자의 상과 d-q축 성분과의 관계



(a) d-축 성분의 등가회로



(b) q-축 성분의 등가회로

그림 4 정상분의 등가회로

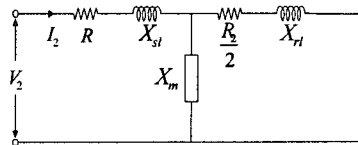


그림 5 역상분의 등가회로

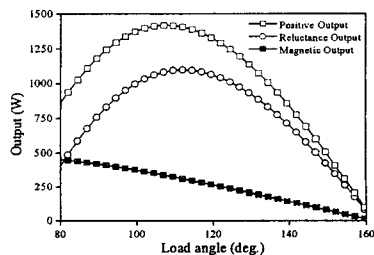


그림 6 초기 모델의 정상분 출력 특성

3.2 설계 모델의 정상상태 특성해석 결과

표 2는 설계 시 변경된 사양을 나타낸다. 회전자의 외경을 증가시키고 영구자석의 위치를 변경하여 초기 모델보다 높은 돌극비를 얻기 위한 자기회로를 설계하였다. 그림 10은 d-q축 전류에 의한 자속 분포를 나타낸 것이고 그림 11은 초기모델과 설계된 모델의 역기전력을 비교한 것이다. 역기전력은 초기모델에 비해 회전자의 외경이 증가하여 2(%) 정도 낮은 값은 나타내었지만, 표 3의 초기 모델과 설계 모델의 정격 시 정상상태 특성해석 결과에서 돌극비가 초기 모델에 비해 30(%) 정도 증가하였음을 알 수 있다. 그림 12는 초기모델과 설계 모델의 토크를 부하각에 따라 비교한 것이다.

4. 결 론

본 논문에서는 LSPM의 최대토크 확보 및 효율 향상을 위한 자기회로를 설계하였고 그 결과 초기 모델과 비교하여 효율과 최대 토크가 증가하였다. 회전자의 링크부와 2차측 도체바의 형상 및 영구자석 두께 등 여러 설계 사양의 최적 설계를 통해 돌극비의 향상을 가져올 수 있는 자기회로를 설계한다면 보다 나은 성능의 전동기를 설계할 수 있을 것으로 판단된다.

[참고 문헌]

- [1] 이선권, 강규홍, 홍정표, 김규탁 "2상 전동기 변환을 이용한 단상 영구자석형 Line-start 모터의 정상특성해석", 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템학회 추계학술대회 논문집, pp. 119-121, 2001
- [2] Timothy J. E. Miller, "Single-Phase Permanent Magnet Motor Analysis", IEEE Trans. Industry Application, no. 4, pp. 651-658, 1995

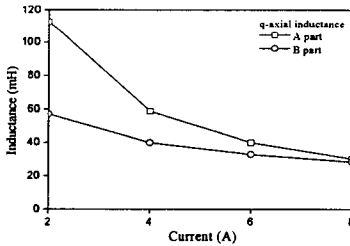


그림 7 초기 모델의 전류 크기에 따른 인덕턴스

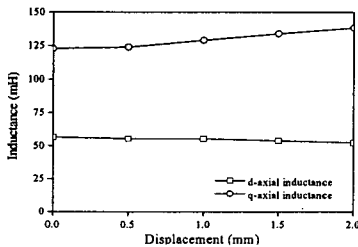


그림 8 초기 모델의 영구자석 위치에 따른 특성

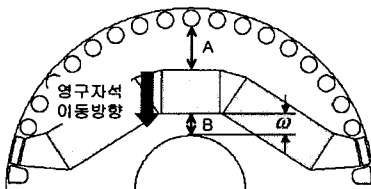
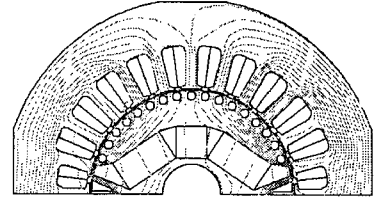
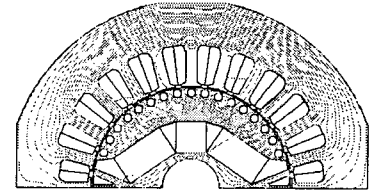


그림 9 영구자석의 이동방향



(a) d-축 전류에 의한 자계 분포



(b) q-축 전류에 따른 자계 분포

그림 10 d-,q-축 전류에 따른 자계 분포

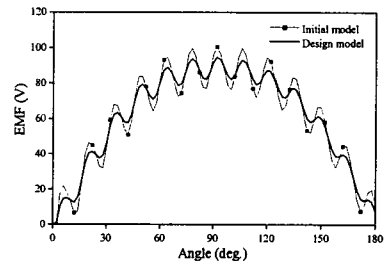


그림 11 보조권선의 역기전력 특성

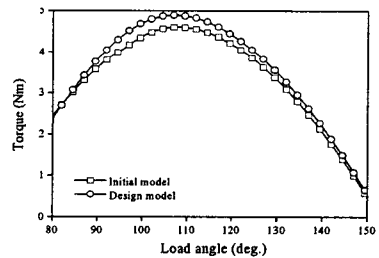


그림 12 부하각에 따른 토크

표 2 초기 모델과 설계 모델의 사양 비교

변경 사양	초기 모델	설계 모델
회전자 외경 (mm)	60.0	65.0
ω (mm)	4.35	1.85

표 3 정격 시 특성해석 결과 비교

특성	초기 모델	설계 모델
선전류 (A)	6.25	5.26
주권선전류 (A)	6.19	4.41
보조권선전류 (A)	2.97	2.95
돌극비	2.94	3.77
입력 (W)	1241.4	1136.7
출력 (W)	1000.3	1009.9
최대토크 (Nm)	4.63	4.89
효율 (%)	80.63	88.84
역률 (%)	90.26	99.04