

단상 유도형 동기 전동기의 Cost 저감 설계

이병화*, 방량*, 홍정표*, 남혁**, 하승형**
한양대학교*, LG 전자**

Cost Reduction Design in Single-phase LSPM Motor

Byeong-Hwa Lee*, Liang Fang*, Jung-Pyo Hong*, Hyuk Nam**, Seung-Hyung Ha**
Hanyang University*, LG Electronics**

Abstract - This paper deals with cost reduction design of a single-phase line-start permanent magnet (LSPM) motor. The characteristic analysis according to the change of quantity of permanent magnet(PM) is examined by d-and q-axis equivalent circuit. The motor parameters which are satisfied with efficiency and maximum torque are determined by the characteristic map obtained by d-and q-axis equivalent circuit analysis. And then the geometric shape design using optimization methodology is performed by finite element method (FEM).

1. 서 론

가전 분야에 있어 상용 전원을 별도의 변환장치가 없이 기동 및 구동이 가능한 단상 유도 전동기는 BLDC 전동기나 인버터 구동 전동기에 비해 경제적이고 기동 특성이 우수하여 가전제품의 구동원으로 보편화되어 있다 [1]. 그러나 단상 유도 전동기는 주권선과 보조권선의 불평형과 2차측 회전자의 동손에 의해 낮은 효율을 가진다[2].

이에 반해 전원 주파수에 동기하여 동기속도로 회전하는 영구자석형 동기 전동기는 유도 전동기와 비교하여 구조면에서는 회전자의 차이밖에 없으나 회전자에서 발생하는 손실은 무시될 정도로 적기 때문에 더욱 높은 효율을 가진다. 그러나 영구자석형 동기 전동기는 영구자석으로 인한 비용 증가, 전자기 반작용에 의한 감자 문제 발생, 그리고 60Hz의 상용 전원을 인가하였을 때 스스로 기동되지 않으므로 특별한 기동장치가 부가적으로 필요한 문제점을 가진다 [2].

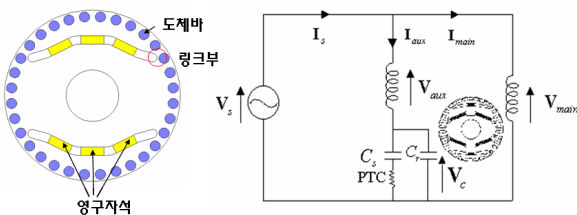
그러므로 단상 유도 전동기와 영구자석형 동기 전동기가 가지는 단점을 보완하면서 장점을 동시에 이용하는 단상 유도형 동기 전동기가 개발 되어졌다. 기동 시에는 단상 유도 전동기로, 동기 시에는 영구자석형 동기 전동기로 운전하면서 여러 가지 장점을 가지지만 영구자석의 사용으로 인한 전동기의 cost 증가는 해결해야 할 중요한 문제 중 하나다.

따라서 본 논문에서는 단상 유도형 동기 전동기의 cost를 줄이기 위해 영구자석 사용량을 효율적으로 저감하는 설계 방법을 제시하였다. 먼저 D-q 축 등가회로를 이용하여 영구자석 사용량에 따른 파라미터에 따라 효율과 최대 토크를 만족시키는 영역을 특성 맵으로 나타내었다. 이것을 통해 영구자석 사용량을 저감시키면서 prototype 단상 유도형 동기 전동기의 특성을 만족할 수 있는 목표 파라미터를 결정한 후 실험 계획법을 이용한 최적 설계를 진행하였다.

2. 단상 유도형 동기 전동기의 특성 해석 이론

2.1 LSPM의 구조 및 회로

그림 1 (a)는 단상 유도형 동기 전동기의 회전자 형상이며, 기동토크를 발생시키기 위해 도체바가 회전자 철심에 배치되어 있다. 고정자 권선은 주권선과 보조권선으로 이루어져 있고 이들의 위상차가 90도 나도록 공간적으로 분포시켰다. 또한 보조권선에 기동토크와 역률의 개선을 위하여 콘덴서를 부착시켰으며 그 결과 고정자의 회로도는 그림 1 (b)와 같다.



(a)회전자 형상

(b)고정자 회로도

<그림 1> 단상 유도형 동기 전동기의 회전자 형상과 고정자 회로도

2.2 정상상태 특성해석

2.2.1 대칭 좌표 변환

단상 유도형 동기 전동기의 고정자 권선에 의한 자계는 평형기와는 달리 불평형 자계를 발생시키기 때문에 여기서는 대칭좌표계법을 이용하여 2개의 독립적인 평형전동기로 고려하여 해석하였다[3].

2.2.2 특성 계산

전동기의 전기적 출력은 식 1과 같이 구할 수 있다[4].

$$P_1 = (Re(\dot{V}_1 \dot{I}_1^*) - RI_1^2)$$

$$P_2 = (Re(\dot{V}_2 \dot{I}_2^*) - RI_2^2) \tag{1}$$

여기서 V_1 과 V_2 : 정상분과 역상분 전압, I_1 과 I_2 : 정상분과 역상분의 대칭 성분 전류, R : 보조권선을 기준으로 한 상저항의 평균 값. P_1 과 P_2 : 정상분과 역상분 출력.

이때 발생하는 정상분과 역상분의 토크인 T_1 과 T_2 는 출력에 속도(ω_s)가 나누어진 식 2.4와 같이 표현되며, 총 발생토크인 T 는 식 3과 같다.

$$T_1 = \frac{P_1}{\omega_s}, T_2 = \frac{P_2}{\omega_s} \tag{2}$$

$$T = T_1 + T_2 \tag{3}$$

3. 특성해석을 이용한 Cost 저감 설계

3.1 설계 모델의 제한

전동기의 고정자 제원 및 사양은 기존에 설계되었던 prototype 단상 유도형 동기 전동기를 그대로 사용하였으며, 도체바 및 영구자석을 제외한 회전자 형상 또한 동일하게 사용했다. 단, 영구자석의 감자 문제로 인해 영구자석의 두께는 고정하였다.

3.2 영구자석 사용량 저감 설계

d-q축 등가회로를 이용하여 파라미터 변화에 따른 전동기의 중요한 특성인 최대토크와 효율을 특성 맵을 통하여 그림 2에 나타내었다. 그림 2는 전동기의 특성에 영향을 미치는 파라미터인 역기전력(Back EMF), d-축 인덕턴스, 그리고 돌극비의 변화에 따라 prototype 단상 유도형 동기 전동기의 특성을 만족하는 영역을 나타내었다. 영구자석의 사용량이 감소됨에 따라 역기전력과 magnetic torque가 줄어들기 때문에 돌극비가 증가되어지는 설계 방향으로 진행하였다. 단, d-q축 인덕턴스는 동일한 전류위상각에서 산정하였다.

최대 토크는 아래의 식 4와 같다. 최대 토크는 magnetic torque(T_m)와 reluctance torque(T_r)의 합으로 구성되어 있으며 입력 전류가 일정하다고 가정하면 영구자석 사용량이 감소됨에 따라 동일한 토크를 내기 위해 감소되어지는 magnetic torque와 증가되어야 하는 reluctance torque의 크기는 아래 그림 3에 나타내었다. 그림 3에 제시한 모델 M1, M2, M3, M4 그리고 M5의 영구자석 사용량은 prototype 단상 유도형 동기 전동기(M5 : 100%)를 기준으로 하여 점차적으로 감소시켰다.

$$T = P_n [\psi_a i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] = T_m + T_r \tag{4}$$

여기서 P_n : 극쌍수, ψ_a : 무부하 쇄교자속, L_d 와 L_q : d-q축 인덕턴스, i_d 와 i_q : d-q축 전류

그리고 최대 토크는 그림 2의 (a), (c) 그리고 (e)에서 보듯이 돌극비가 일정한 경우 역기전력이 증가되어질수록 d축 인덕턴스가 감소되어질수록 커짐을 확인할 수 있다.

다음으로 효율은 아래의 식 5와 같이 기계적인 출력(P_{out})과 손실(P_{loss})을 이용하여 산정하였으며, 여기서의 손실에는 철손과 기계손이 포함되어 있지 않다.

$$Eff. = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \times 100\% \quad (5)$$

따라서 효율은 그림 2의 (b), (d) 그리고 (f)에서 볼 수 있듯이 돌극비가 일정한 경우 역기전력과 d축 인덕턴스가 커질수록 증가되어진다. 그리고 최대 토크와 효율 모두 돌극비가 증가되어질수록 특성을 만족하는 영역은 넓어지는 것을 볼 수 있다.

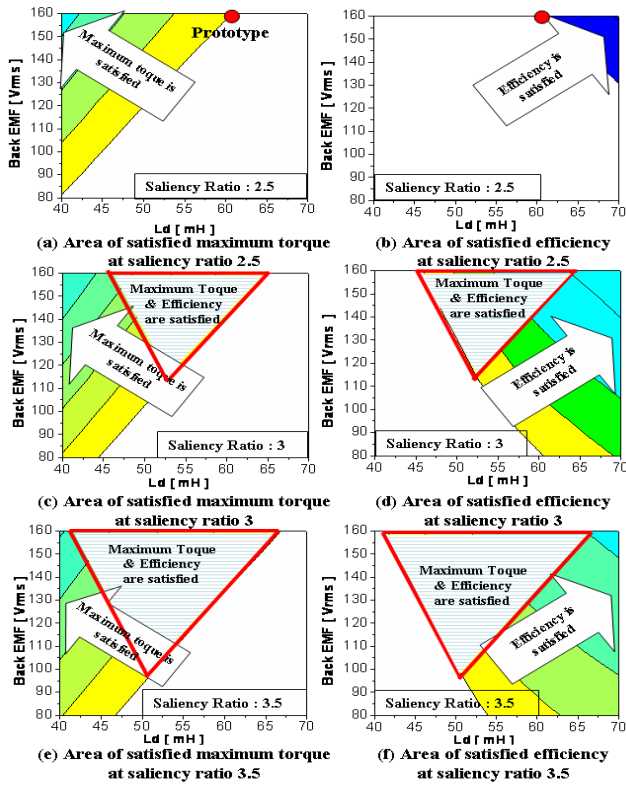
그러나 최대 토크와 효율은 증가되어지는 방향이 서로 반대로 나타남으로 두 가지 특성을 모두 만족시키는 파라미터를 가지는 것은 쉬운 일이 아니다. 따라서 초기에 등각회로 시뮬레이션으로부터 특성 맵을 그린다던 영구자석 사용량에 따른 목표 파라미터를 쉽게 결정할 수 있다.

그림 2에 prototype 단상 유도형 동기 전동기의 파라미터는 붉은 점으로 나타내었으며 영구자석 사용량이 점차 줄어들면서 만족해야 하는 목표 파라미터는 삼각형 형태의 영역으로 표시하였다. 영구자석 사용량을 저감시켜가면서 역기전력과 돌극비를 최대화 할 수 있는 최적설계를 진행하였다. Design of experiment (DOE)를 이용하여 역기전력과 돌극비에 영향을 주는 설계 변수의 영향도를 분석하였으며 주요 설계변수인 Lpm1과 Gpm을 그림 4에 나타내었다. 그리고 목표함수와 구속 조건을 아래와 같이 설정하여 response surface methodology (RSM)를 하였으며 그 결과는 그림 5와 같다.

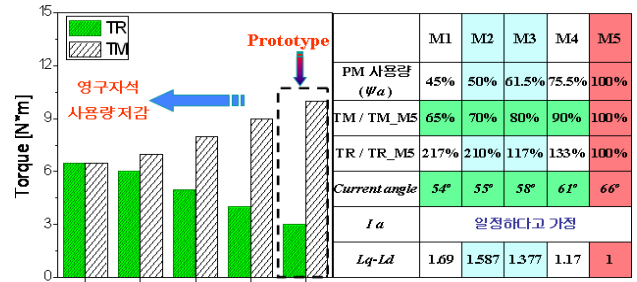
- 목적 함수 : 효율 ≥ 90 [%], 최대 토크 ≥ 130 [kgfcm]

- 구속 조건 : 출력 ≥ 2 [kW], 기동 토크 ≥ 26 [kgfcm]

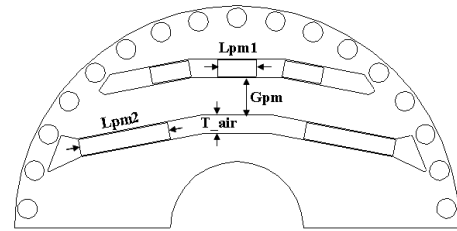
또 설계 변수를 두 번째 층의 영구자석 길이(Lpm2)와 중간 flux-barrier의 두께로 두고 RSM을 한 결과 각각의 길이가 11.17mm와 4.43mm일 때 각각의 파라미터가 목표 파라미터 영역에 들어갔다. 돌극비를 3.5까지 확보할 수 있다면 역기전력을 100V까지 줄일 수 있어 영구자석 사용량을 더욱더 저감할 수 있지만 최적설계 결과 더 이상의 돌극비 확보를 위한 자기 회로 설계가 어려웠다. 최종적으로 설계되어진 전동기의 파라미터는 아래의 표 1에 나타내었으며 optimized 단상 유도 동기 전동기는 prototype 단상 유도형 동기 전동기 대비 영구자석 사용량을 32% 저감되었다.



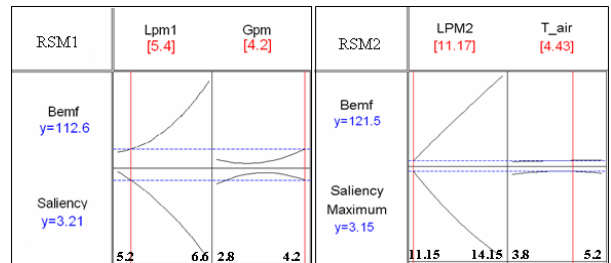
<그림 2> 파라미터 변화에 따른 특성 맵



<그림 3> 영구자석 사용량에 따른 토크 성분 비교



<그림 4> 설계 파라미터



<그림 5> 역기전력과 돌극비의 Response Surface

<표 1> 파라미터 비교

	역기전력[Vrms]	Ld[mH]	돌극비/[LqLd]
Prototype model	160.1	60.5	2.6
Optimized model	121.5	53	3.1

3. 결론

본 논문에서는 단상 유도형 동기 전동기의 영구자석 사용량의 최소화를 통하여 효율적인 cost 저감 설계 방법을 제시하였다. 영구자석 사용량이 줄어들면 역기전력과 magnetic torque의 감소로 인해 전동기의 특성이 저하되므로 prototype 단상 유도 전동기의 특성을 유지하기 위한 목표 파라미터를 결정하는 것은 쉬운 일이 아니다. 따라서 등각회로 시뮬레이션을 이용하여 주요 파라미터 변화에 따른 전동기의 특성 변화를 특성 맵으로 나타내어 초기 설계 시 효율적으로 목표 파라미터를 예측할 수 있다. 마지막으로 목표 파라미터를 만족하는 전동기를 설계하기 위하여 실험 계획법을 이용한 최적 설계를 진행하였다.

[참고문헌]

- [1] Timothy J. E. Miller, "Single-Phase Permanent-Magnet Motor Analysis", *IEEE Trans. On Indus. Appl.*, Vol. IA-21, No. 4, May/June 1985.
- [2] H. Nam, K. H. Ha, J. P. Hong, and G. H. Kang, "A study on iron loss analysis method considering the harmonics of the flux density waveform using iron loss curves tested on Epstein samples," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 39, pp. 1472 - 1475, May 2003
- [3] G. H. Kang, J. Hur, H. Nam, J. P. Hong, and G. T. Kim, "Analysis of irreversible magnet demagnetization in line-start motors based on the finite-element method," *IEEE Trans.* vol. 39, NO. 3, pp. 1488-1491, May 2003
- [4] G. H. Kang, J. Hur, H. Nam, J. P. Hong, and J. Hur, "Analysis and Design Methodology for Single-Phase Line-start Permanent Magnet Motor Considering Parameters Variation on d-q Axis Vector Diagram," *Industry Applications Conference*, 2003