

단상 유도형 동기 전동기의 Cost 저감 설계

Cost Reduction Design in Single-phase Line-start Permanent Magnet Motor

李炳華* · 南赫** · 李貞宗*** · 方亮*** · 洪正杓† · 河承亨**

(Byeong-Hwa Lee · Hyuk Nam · Jeong-Jong Lee · Liang Fang · Jung-Pyo Hong · Seung-Hyung Ha)

Abstract - This paper deals with the cost reduction design of a single-phase line-start permanent magnet (LSPM) motor. Due to high cost of the permanent magnet (PM), cost reduction can be effectively achieved by reducing PM volume. Therefore, motor characteristics according to the PM volume are calculated by using d-q axis equivalent circuit analysis, and the characteristic map is made. In the characteristic map, maximum torque and efficiency are shown according to motor parameters such as back electromotive force (back emf) and inductances; back emf represents the PM volume. Minimum back emf and inductances satisfying output performance are determined in the characteristic map. Then, motor geometry based on the prototype motor is optimized to get the determined parameters using response surface methodology (RSM) and finite element method (FEM). Through the presented cost reduction design, total PM volume is reduced to 32% of prototype model.

Key Words : Cost reduction, Efficiency, Equivalent circuit, Maximum torque, LSPM motor.

1. 서 론

가전 분야에 있어 구조가 간단하고 제작이 용이하며 상용 전원으로 부터 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 기차력 차에 의한 불평형 자계 및 2차 축 회전자의 동손으로 인해 낮은 효율을 가진다 [2]. 이에 반해 전원 주파수에 동기하여 동기속도로 회전하는 영구자석형 동기 전동기는 유도 전동기와는 달리 영구자석을 계자로 사용하기 때문에 공극 자속 밀도가 높고 2차 축 동손이 발생하지 않는다. 따라서 유도 전동기에 비해 더욱 높은 효율을 가지는 장점을 있다. 그러나 영구자석형 동기 전동기는 영구자석으로 인한 비용 증가, 전자기 반작용에 의한 감자 문제 발생, 그리고 상용 전원을 인가하였을 때 스스로 기동되지 않으므로 특별한 기동장치가 부가적으로 필요한 문제점이 있기 때문에 현재 가전 분야에 적용이 미미한 실정이다 [2],[3].

따라서 에너지 절약 및 전동기의 고효율화가 요구되고 있는 현재 시점에서 단상 유도 전동기와 영구자석형 동기 전동기가 가지는 각각의 장점을 동시에 이용하는 단상 유도형 동기 전동기가 적합하다 하겠다. 기동 시에는 단상 유도 전

동기로, 동기 시에는 영구자석형 동기 전동기로 운전하는 장점을 가지지만 단상 유도 전동기 대비 영구자석의 사용으로 인한 전동기의 cost 증가는 해결해야 할 중요한 문제 중 하나이다.

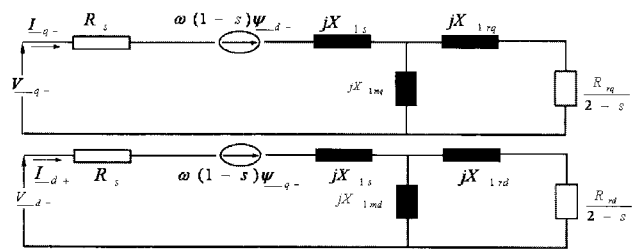
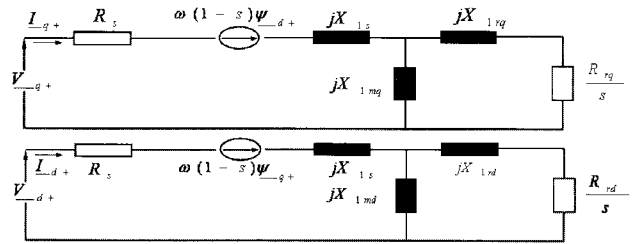
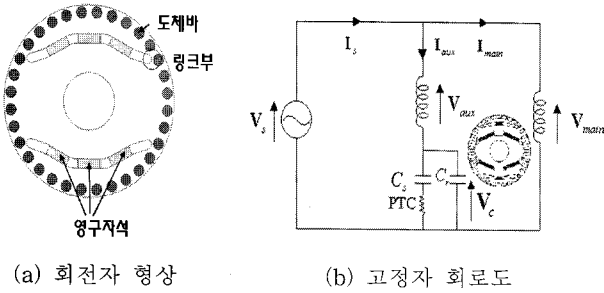
본 논문에서는 단상 유도형 동기 전동기의 cost를 줄이기 위해 영구자석 사용량을 효율적으로 최적화하는 설계 방법을 제시하였다. 먼저 영구자석의 감자 문제로 인하여 영구자석의 두께는 고정시켰으며 d-q 축 등가회로를 이용하여 파라미터 변화에 따라 효율과 최대 토크를 만족시키는 영역을 특성 맵으로 나타내었다. 이것은 영구자석의 사용량이 저감됨에 따라 감소되어지는 역기전력과 변화되어지는 d-q축 인덕턴스에 따른 특성을 보다 쉽게 확인하기 위한 것이다. 이를 통해 영구자석 사용량을 저감시키면서 prototype 단상 유도형 동기 전동기의 특성을 만족할 수 있는 목표 파라미터를 결정 후 실험 계획법을 이용한 최적 설계를 진행하였다.

2. 단상 유도형 동기 전동기의 특성 해석 이론

2.1 단상 유도형 동기 전동기의 구조 및 동작 원리

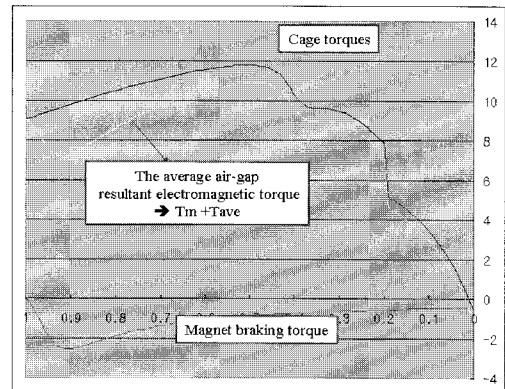
그림 1 (a)는 단상 유도형 동기 전동기의 회전자 형상이다. 기동시 단상 유도 전동기와 같이 기동 토크를 발생시키기 위하여 도체바가 철심에 배치되어 있으며 정상상태에서는 동기 전동기와 같이 운전하기 위해 회전자에 영구자석을 삽입하였다. 그리고 영구자석의 측면 부분은 철심으로의 누설을 방지하기 위한 자속 장벽이 존재한다. 고정자 권선은 주권선과 보조권선으로 이루어져 있고 이들의 위상차가 90도나도록 공간적으로 분포시켰다. 또한 보조권선에 기동토크와 역률의 개선을 위하여 콘덴서를 부착시켰으며 공극에서의 기차력이 정현적인 분포가 되도록 권선한다. 그 결과 고정자의 회로도도 그림 1 (b)와 같다.

* 學生會員 : 漢陽大學 自動車工學部 碩士課程
 ** 正會員 : LG 電子 研究院
 *** 正會員 : 漢陽大學 自動車工學部 博士課程
 † 교신저자, 正會員 : 漢陽大學 機械工學部 教授 · 工博
 E-mail : hongjp@hanyang.ac.kr
 接受日字 : 2008年 9月 1日
 最終完了 : 2008年 9月 8日



(a) 단상 유도형 동기 전동기의 정상분 등가회로

(b) 단상 유도형 동기 전동기의 역상분 등가회로



(c) The average air-gap resultant electromagnetic torque

그림 2 단상 유도형 동기 전동기의 등가회로

Fig. 2 Equivalent circuit and the average air-gap resultant electromagnetic torque of Single-phase LSPM motor

그림 1 단상 유도형 동기 전동기의 회전자 형상과 고정자 회로도

Fig. 1 Configuration of stator winding connection and rotor of prototype Single-phase LSPM motor

단상 유도형 동기 전동기의 동작 원리는 전원 인가 시 도체바에 의해 유도 기동이 되며 정상상태에서는 영구자석형 동기 전동기로 동작하여 동기속도로 운전하게 된다. 또한 정상상태가 되면 영구자석에 의한 마그네틱 토크와 인덕턴스 차에 의한 릴럭턴스 토크가 더해져서 운전하게 된다.

2.2 정상상태 특성 해석

2.2.1 대칭 좌표 변환

단상 유도형 동기 전동기는 단상 유도 전동기와 마찬가지로 고정자 권선에 의한 자계는 평형기와는 달리 불평형 자계를 발생시킨다. 따라서 여기서는 대칭좌표계법을 이용하여 2개의 독립적인 평형전동기로 고려하여 해석하였다 [4].

2.2.2 대칭 좌표 변환

전동기의 전기적 출력은 식 (1)과 같이 구할 수 있다 [5], [6].

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

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

$$P_{out} = P_1 - P_2$$

여기서 V_1 과 V_2 : 정상분과 역상분 전압, I_1 과 I_2 : 정상분과 역상분의 대칭 성분 전류, R : 보조권선을 기준으로 한상저항의 평균 값, P_1 과 P_2 : 정상분과 역상분 출력, P_{out} : 전동기의 출력.

이때 발생하는 정상분과 역상분의 토크인 T_1 과 T_2 는 출력에 속도(ω_s)가 나누워진 식 (2)와 같이 표현되며, 총 발생 토크인 T 는 식 (3)과 같다.

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

$$T = T_1 + T_2$$

2.3 대칭 좌표 변환

운전 조건에 따라 단상 유도형 동기 전동기는 유도 전동기와 동기 전동기의 특성을 가진다 [7]. 단상 유도형 동기 전동기의 등가회로는 그림 2(a), (b)과 같으며 비동기시 토크는 그림 2(c)와 같이 cage torque와 magnetic breaking

torque로 각 각 표현되어진다. 여기서 magnetic breaking torque는 영구자석의 사용량이 줄어들때 따라 점점 작은 값을 갖기 때문에 영구자석 사용량을 저감시킬 경우 기동 특성은 더 좋아지게 된다. 수식은 아래의 식 (4), (5)와 같이 표현된다. 그리고 Air-gap resultant electromagnetic torque는 아래의 그림 2(c)에 나타내었다. 이것은 위의 cage torque와 magnetic breaking torque의 합으로 이루어진다.

$$T_{(cage)+} = \frac{P}{2} \cdot Re[(\psi_{q+})^* \underline{I}_{d+} - (\psi_{d+})^* \underline{I}_{q+}]$$

$$T_{(cage)-} = \frac{P}{2} \cdot Re[(\psi_{q-})^* \underline{I}_{d-} - (\psi_{d-})^* \underline{I}_{q-}]$$

$$T_{avg} = T_{(cage)+} + T_{(cage)-}$$

$$T_m = \frac{P}{2} [\frac{1}{\beta} \psi_{dm} I_{qm} - \beta \psi_{qm} I_{dm}]$$

여기서 β : 유효 권선비(주권선/보조권선), ψ_{d+} , ψ_{q+} , I_{d+} , I_{q+} : 정상분 d-q축 쇄교 자속과 전류

3. 특성 해석을 이용한 cost 저감 설계

3.1 설계 모델의 제원

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 이용한 파라미터 변화에 따른 전동기의 주요 특성인 최대토크와 효율을 특성 맵을 통하여 그림 3에 나타내었다. 그림 3은 전동기의 특성에 영향을 미치는 파라미터인 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 효율과 최대 토크를 만족하는 영역이 점점 줄어들어간다 [8]. 따라서 돌극비가 증가되어지는 방향으로 설계가 진행되어야 한다. 단, 여기서 d-q축 인덕턴스는 전동기의 주 운전 구간인 전류 위상각 40°에서의 값을 사용하였다.

최대 토크는 아래의 식 (7)과 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 4에 나타내었다. 그림 4에 제시한 모델 M1, M2, M3, M4 그리고 M5의 영구자석 사용량은 prototype 단상 유도형 동기 전동기(M5 : 100%)를 기준으로 하여 점차적으로 감소시켰다.

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

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

그리고 최대 토크는 그림 3의 (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 기계손은 무시하였다.

$$Eff. = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \times 100[\%]$$

따라서 효율은 그림 3의 (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 파라미터

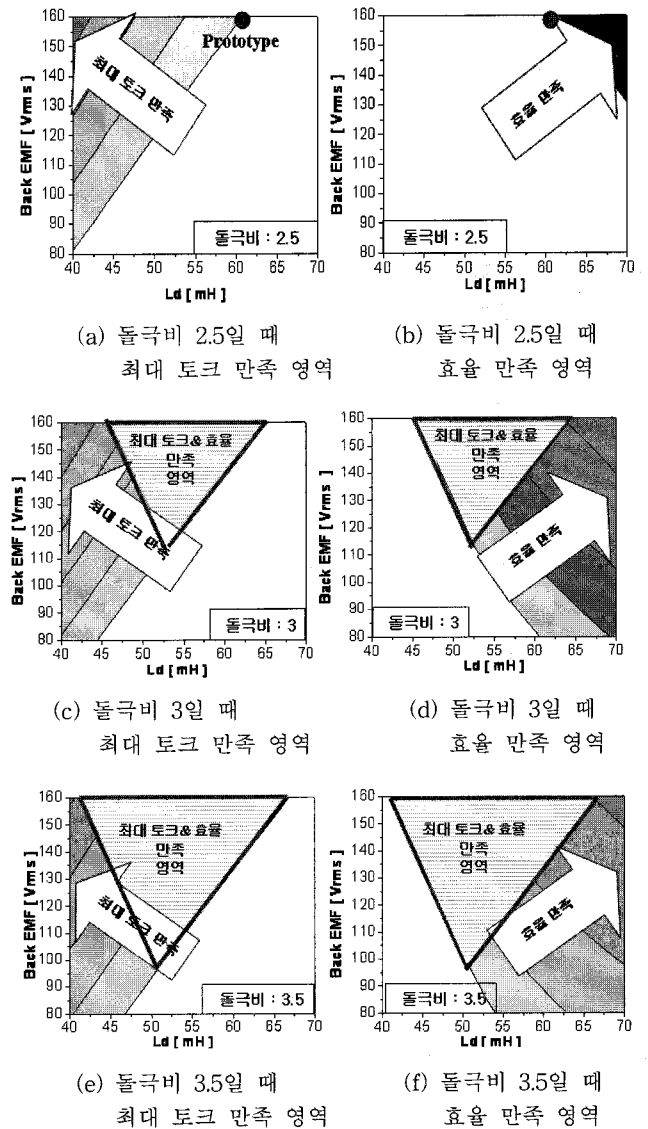


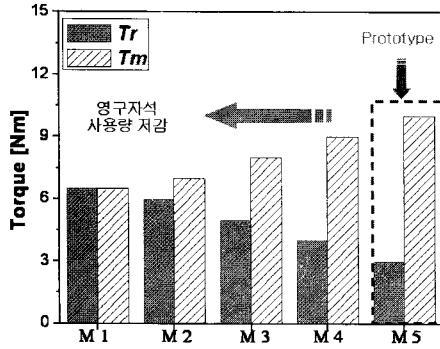
그림 3 파라미터 변화에 따른 특성 맵

Fig. 3 Characteristics map predicted with main parameters

를 가지는 것은 쉬운 일이 아니다. 따라서 초기에 등가회로 시뮬레이션으로부터 특성 맵을 이용한다면 영구자석 사용량에 따른 목표 파라미터를 쉽게 결정할 수 있다.

그림 3에 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 L_{pm1} 과 G_{pm} 을 그림 5에 나타내었다. 그리고 목표함수와 구속 조건을 아래와 같이 설정하여 response surface methodology (RSM)를 하였으며 그 결과는 그림 6과 같다.

- 목적 함수 : 효율 ≥ 90 [%], 최대 토크 ≥ 130 [kgfcm]
- 구속 조건 : 출력 ≥ 2 [kW], 기동 토크 ≥ 26 [kgfcm]



	M1	M2	M3	M4	M5
PM 사용량 (ψ_a)	45%	50%	61%	75%	100%
T_m / T_m_{M5}	65%	70%	80%	90%	100%
T_r / T_r_{M5}	217%	210%	117%	133%	100%
전류 위상각	54°	55°	58°	61°	66°
I_a	일정하다고 가정				
$Lq-Ld$	1.69	1.587	1.377	1.17	1

그림 4 영구자석 사용량에 따른 토크 성분 비교
 Fig. 4 Hybrid torque components comparison according to PM usage

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.

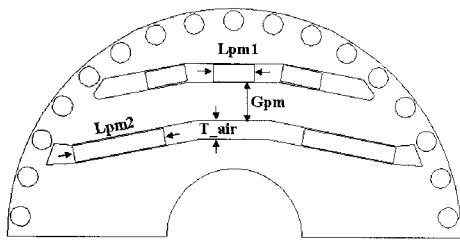


그림 5 설계 파라미터
 Fig. 5 Design parameter

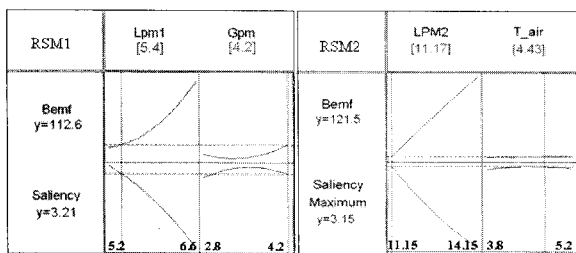


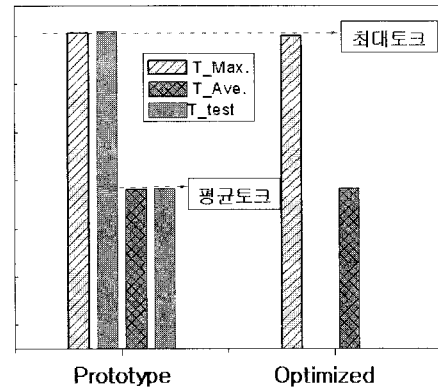
그림 6 역기전력과 돌극비의 Response Surface
 Fig. 6 Optimization analysis with back-EMF and saliency ratio using response surface method

3.3 설계 결과 및 검토

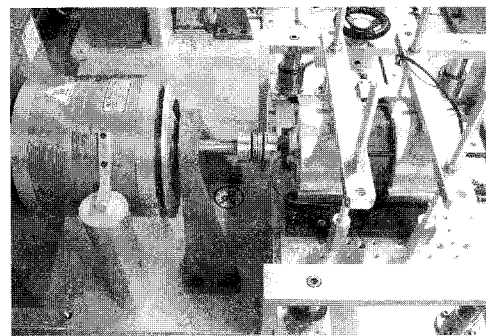
최종적으로 설계되어진 전동기의 파라미터는 아래의 표 1에 나타내었으며 optimized 단상 유도 동기 전동기는 prototype 단상 유도형 동기 전동기 대비 영구자석 사용량이 32% 저감되었다. 기존에 설계되어졌던 prototype 단상 유도형 동기 전동기의 해석치와 실험치를 비교함에 따라 optimized 단상 유도 동기 전동기의 실험치를 예측해 볼 수 있다. Prototype 단상 유도형 동기 전동기의 실험 세트와 실험결과는 아래의 그림 6과 같다. 전동기의 주요 특성인 최대토크와 평균 토크를 비교하였다. 기동 특성은 영구자석 사용량이 감소함에 따라 magnet breaking torque가 줄어들므로 기동 토크는 더 증가한다고 판단된다 [1]. 따라서 optimized 단상 유도 동기 전동기의 특성은 prototype 단상 유도 동기 전동기와 비교하여 영구자석 사용량이 32% 저감되었음에도 불구하고 동등한 수준으로 설계되었다.

표 1 파라미터 비교
 Table 1 Comparison of Motor Parameter

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



(a) 단상 유도형 동기 전동기의 실험치와 해석치 비교



(b) 단상 유도형 동기 전동기의 실험 세트

그림 7 단상 유도형 동기 전동기의 실험치와 해석치 비교 및 실험 세트

Fig. 7 Comparison of FEA results with test results and experiment setup of the LSPM motor

4. 결 론

본 논문에서는 단상 유도형 동기 전동기의 cost 저감을 위하여 초기 설계 시 영구자석 사용량을 효율적으로 최소화 하는 설계 방법을 제시하였다. 영구자석 사용량이 줄어들면 역기전력과 magnetic torque의 감소로 인해 전동기의 특성이 저하되므로 prototype 단상 유도형 동기 전동기의 특성을 유지하기 위한 목표 파라미터를 결정하는 것은 쉬운 일이 아니다. 따라서 등가회로 시뮬레이션을 이용하여 주요 파라미터 변화에 따른 전동기의 특성 변화를 특성 맵으로 나타내어 초기 설계 시 효율적으로 목표 파라미터를 예측할 수 있었다. 마지막으로 목표 파라미터를 만족하는 전동기를 설계하기 위하여 실험 계획법을 이용한 최적 설계를 진행하였으며, 그 결과 prototype 단상 유도형 동기 전동기의 특성을 만족시키고 동시에 영구자석 사용량이 32% 저감된 모델이 설계되었다.

참 고 문 헌

- [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] Shigeo Morimoto, Yoji Takeda, "Machine parameters and performance of interior permanent magnet synchronous motors with different permanent magnet volume," *Electrical Engineering in Japan*, vol. 131, No. 4, 2000.
- [4] 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.
- [5] G. H. Kang, J. Hur, H. Nam and J. P. Hong, "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.
- [6] Popescu, M., Miller, T.J.E, McGilp, M.I., Kalluf, F.J.H., da Silva, C.A., Dokonal, L, "Effect of winding harmonics on the asynchronous torque of a single-phase line-start permanent-magnet motor," *IEEE Trans. On Energy covers*, vol. 20. No. 1, March 2005.
- [7] Mircea Popescu, Senior Member, IEEE, T. J. E. Miller, Fellow, IEEE, "Asynchronous Performance Analysis of a Single-Phase Capacitor-Start, Capacitor-Run Permanent Magnet Motor", *IEEE Trans. On Energy covers*, vol. 20, NO. 1, March 2005.

저 자 소 개



이 병 화 (李炳華)

1980년 7월 05일생, 2006년 창원대학교 전기공학과 졸업, 2007년~현재 한양대학교 자동차공학과 재학(석사과정)



남 혁 (南赫)

1972년 5월 24일생, 1999년 창원대학교 전기공학과 졸업, 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2001년~2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 2004~현재 LG전자 가전 사업 본부 연구소 책임연구원



이 정 종 (李貞宗)

1976년 3월 10일생, 2000년 창원대학교 전기공학과 졸업, 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2003~2007년 (주)KOMOTEK 부설 연구소 책임연구원, 2007년~한양대학교 자동차 공학과 재학(박사과정)



방 량 (方亮)

1980년 11월 18일생, 2003년 동북대학교 졸업 자동차공학과, 2006년 창원대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2007년~현재 한양대학교 자동차 공학과 재학(박사과정)



홍 정 표 (洪正杓)

1959년 4월 17일생, 1983년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1985년~1990년 LG정밀(주) 중앙연구소 주임 연구원, 1990년~1992년 삼성전기(주) 종합연구소 선임 연구원, 1995년 동 대학원 기공학과 졸업(공학박사), 1996년~2006년 창원대학교 전기공학과 부교수, 2006년~2008년 한양대학교 기계공학부 부교수, 2008년~현재 한양대학교 기계공학부 교수, 2002년~현재 IEEE Senior member



하 승 형 (河承亨)

1979년 10월 11일생, 2005년 창원대학교 전기공학과 졸업, 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사) 2007~현재 LG전자 가전 사업 본부 연구소 주임 연구원