

단상 유도형 동기전동기의 회전자 설계에 관한 연구

(A study on the Rotor Design in Single-phase Line-start Permanent Magnet Motor)

김원호*

(Won-Ho Kim)

Abstract

The purpose of this paper is the rotor design of a single-phase LSPM(Line-start permanent magnet) motor. A single-phase LSPM motor has a permanent magnet in the rotor that is same as induction motor. For that reason, magnet is operated by breaking torque in starting region and alignment torque in driving region. Therefore, we need the design process considering the trade-off relationship.

In this paper, we propose the design process of a single-phase LSPM motor for a high starting torque and efficiency with FEM. And we use Taguchi Method for considering tolerance in manufacture. Finally, we compared the LSPM motor that is designed in this paper and conventional induction motor.

Key Words : Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor, Taguchi Method

1. 서 론

가전 분야에 있어 동력을 필요로 하는 장치의 대부분이 전동기를 구동원으로 이용하고 있다. 그 중에서도 단상유도전동기는 그 구조가 간단하고 제작이 용이할 뿐만 아니라 저가격 등의 장점을 가지고 있어 가전 분야의 동력으로 주로 이용되고 있다[1]. 그러나 효율은 60~70% 정도로 좋지 않아 이에 대한 개선은 끊임없이 요구되어 왔다[2]. 이에 따라 효율 특성이 떨어

지는 단상유도전동기를 대체하여 가변속 제어가 가능한 BLDC(Brushless direct current) 전동기가 사용되기도 하지만 제어를 필요로 하기 때문에 추가적인 가격 상승이 발생하게 된다[3]. 이에 대한 대안으로 고려되는 것이 단상 유도형 동기(LSPM) 전동기이다. 단상 LSPM 전동기는 회전자에 유도 전동기와 같은 농형바에 영구자석형 동기전동기와 같이 영구자석을 삽입한 형태로 기동시에는 유도전동기와 같은 기동 특성을 보이며 동기 속도에서는 영구자석형 동기전동기와 같은 특성을 보이는 전동기이다[4].

LSPM 전동기는 직입기동이 가능하다는 점에서 별도의 제어가 필요 없고 기존 단상 유도기와 비교해 고정자는 그대로 사용하면서도, 최대 토크와 효율은 더욱 향상시킬 수 있는 장점이 있으며 최근 논문에서는 새로운 회전자 형상이나 영구자석 배치를 통해 장

* 주저자 : 삼성전자 종합기술원 전문연구원
* Main author : Samsung Advanced Institute of Technology
Tel : 010-9856-1535, Fax : 031-280-9158
E-mail : wonho79@nate.com
접수일자 : 2013년 10월 1일
1차심사 : 2013년 10월 8일, 2차심사 : 2013년 10월 22일
심사완료 : 2013년 10월 30일

점을 극대화시키고 있다[5-6]. 그러나 LSPM 전동기는 회전자의 형상에 따라 영구자석의 브레이킹 토크에 의해 기동이 되지 않거나, 동기 속도까지 도달하지 못하는 경우가 빈번하다[7-8]. 또한 소형으로 갈수록 설계 파라미터의 작은 치수 변화에도 큰 성능 차이를 보여, 제작상 공차에 강건한 설계가 이루어지지 않을 시 원하는 성능을 낼 수 없다[9-10].

본 논문에서는 LSPM 전동기의 기동과 효율을 동시에 고려한 회전자 자속장벽 설계를 위해 실험계획법(DOE)과 유한요소법을 사용하였다. 특히 공차에 강건한 설계를 위해 다푸찌 실험 계획법을 사용하여 제작 공차를 고려하였다. 또한 같은 고정자를 사용하는 기존 유도기와 LSPM 전동기와의 성능 비교를 통해 본 연구의 타당성을 검증하였다.

2. LSPM 전동기의 구조 및 사양

단상 유도전동기는 기동토크를 얻기 위해서 주 코일과 보조코일을 연결하여 기동하는 방법을 사용하고 있으며 그림 1과 같이 구성된다. 본 논문에서는 기존 전동기와의 호환성을 위해 60W급 단상 유도기의 고정자 권선 및 구성을 그대로 사용하고, 회전자 부분만 LSPM 전동기로 변형 설계하였다. 적용된 회전자 형상은 그림 2와 같이 외곽에 기동을 위한 알루미늄 농형바가 있으며, 안쪽으로 구동을 위한 영구자석과 누설을 막아주는 자속장벽 구조를 가지고 있다.

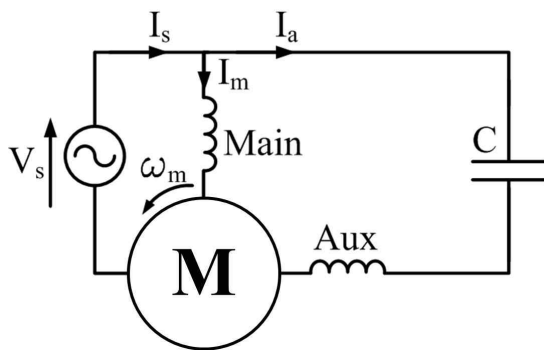


그림 1. 커패시터 기동 & 구동형 단상 전동기 구성
Fig. 1. Circuit of the capacitor start and drive single phase motor

영구자석의 삽입 위치는 역기전력을 보다 정현적으로 하기 위해 한 극에 자석 두 개를 방사방향으로 배치하였으며, 영구자석과 자속장벽 모두 다이캐스팅시 간섭이 일어나지 않게 안쪽으로 들어간 구조를 택함으로 간단한 제조공정으로 생산될 수 있도록 하였다. 표 1에 설계할 LSPM 전동기의 제원과 목표 사양을 나타내었다.

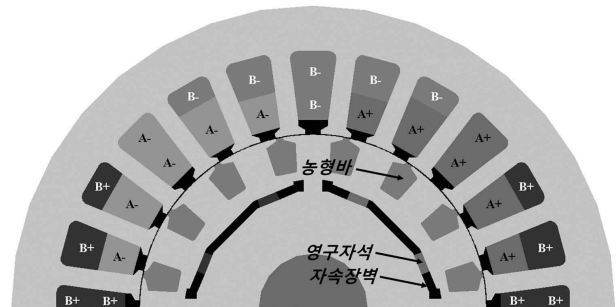


그림 2. LSPM 전동기의 구조
Fig. 2. Cross-section of the LSPM motor

표 1. LSPM 전동기의 제원과 목표 사양
Table 1. Target specifications of the LSPM motors

구분	사양 [단위]
입력 전압	220V
주파수	60Hz
극수	4
슬롯수 / 농형바수	24 / 16
적층길이	45mm
영구자석 / 전기강판	NdFeB / S60
영구자석 잔류자속밀도	1.12T
정격 속도	1,800rpm
정격 토크	0.35Nm

3. LSPM 전동기의 회전자 설계

3.1 설계 프로세스

LSPM 전동기의 회전자 설계 순서는 다음과 같다. 먼저 단상 유도기의 자기 등가회로를 이용하여 회전자 농형바를 설계한다. 농형바는 기동 토크에 큰 영향

을 미치며, 구동시에는 동기속도 이탈을 막기 위한 댐핑 역할만을 하기 때문에 기동 토크를 최대화 하는 형상으로 설계한다. 이 때 일반적인 단상 유도기의 슬롯과 농형바의 개수 조합은 회전자의 치가 얇아 영구자석에 의한 자기 포화의 가능성이 크기 때문에 농형바 개수를 기존 유도기보다 작게 가져간다.

다음으로 영구자석 사이즈를 결정한다. 영구자석이 크면 최대토크는 커지나, 기동시 브레이킹 토크로 인해 기동토크를 줄이는 Trade off의 관계에 있다. 본 논문에서는 LSPM 전동기의 최대 문제 중 하나인 기동토크의 개선을 위해 영구자석 사이즈를 정격을 만족하는 범위에서 최소가 되도록 하였다. 이를 통해 기동토크를 확보하면서, 영구자석 사용량을 줄여 제작 단가도 낮추는 효과를 얻을 수 있다. 사이즈 설계 방법으로 자속장벽을 고려한 자기 등가회로를 이용한다.

마지막으로 자속장벽 설계는 목적함수를 효율과 기동특성으로 두고 실험계획법을 이용하여 결정한다. 이 부분은 3.2절에 자세히 설명하겠다.

이를 통해 나온 모델의 기동 특성, 효율과 최대 토크 등을 계산하여 목표 사양에 맞지 않을지 영구자석 사이즈와 자속장벽의 재설계를 통해 최종 모델을 도출한다. 그림 3은 LSPM 전동기의 회전자 설계 과정을 간략하게 나타내고 있다.

3.2 다꾸찌 실험 계획법을 이용한 자속장벽 설계

영구자석이 들어간 회전자에서 자속장벽의 역할은 영구자석에서 나온 자속이 누설되지 않고, 권선과 쇠교하도록 하는 역할을 한다. 효율적으로 설계된 자속장벽은 영구자석의 사이즈를 줄이고, 효율을 극대화시키는 역할을 한다. 그러나 제어기가 없고 소형기기기 때문에 0.1mm의 자속장벽 제작공차에도 전동기의 효율이나 기동 특성이 떨어질 수 있다. 따라서 LSPM 전동기의 자속장벽은 제작 시 변할 수 있는 공차에 많은 영향을 받지 않으면서 높은 효율과 기동 능력을 동시에 만족시킬 수 있는 설계가 필요하다. 이에 본 논문

에서는 기동 성능과 효율, 제작시 공차까지 고려한 자속장벽의 설계를 제안한다. 그 중 제작시 공차는 설계자가 제어할 수 없는 인자임으로 이를 고려하기 위해 다꾸찌 실험 계획법을 이용하였다.

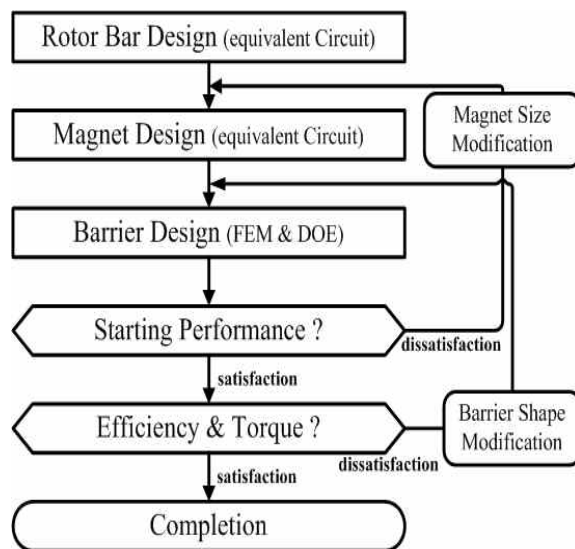


그림 3. 회전자 설계 순서도
Fig. 3. Flowchart of the rotor design

다꾸찌 실험 계획법은 제품의 품질 향상을 위해 개발된 방법으로써 제품의 품질 특성에 영향을 미치는 여러 인자를 선정한 후, 이들의 관계를 알아보기 위해 실험계획법을 수립하고, 이에 의거해 얻어진 데이터를 분석하여 제품의 품질개선 또는 품질향상을 위한 최적 생산 조건을 찾아내는 방법으로 제어할 수 없는 인자의 경우는 오차인자(노이즈)로 두고, 제어 가능한 요소를 조절하여 신호 대 잡음비를 통해 노이즈에 강한 인자를 설계할 수 있게 한다. 다꾸찌 실험 계획법은 전기 분야에도 적용되어 유효성이 입증되었다 [11-12].

본 논문에서는 목적함수를 기동 토크 및 정격 운전시 효율의 최대화로 두고 노이즈 인자는 제작시 공차로 3수준으로 고려하였다.(-0.1mm, 0mm, 0.1mm)

설계 변수는 그림 4, 표 2와 같이 자속장벽과 관련된 4가지 파라미터로 모두 3수준으로 결정하였다. 설계 변수의 선정 기준은 자속의 누설과 자기 포화와 관련된 회전자 파라미터로 한정하였다. 일반적인 영구자

석형 전동기는 정렬 토크가 클수록 효율이 좋기 때문에 자속장벽의 누설을 최소화하는 방향으로 설계 변수의 값을 결정하면 되지만, LSPM 전동기는 이 정렬 토크가 기동시 브레이킹 토크로 작동하여 Trade off 관계가 있어 본 논문의 설계 변수 선정 기준이 의미를 가진다.

각 공차별로 9번씩 총 27번의 실험을 FEM으로 수행하였다. 기동 토크와 효율 모두 노이즈에 대하여 좋은 성능을 나타내는 것이 중요하므로, 신호대 잡음비는 식 (1)과 같은 망대특성을 사용하였다.

$$S/N = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \quad (1)$$

표 3은 직교배열법에 의한 실험계획법의 순서를 나타낸 것이며, 그림 5는 S/N의 Main Effect Plot을 나타낸 것이다.

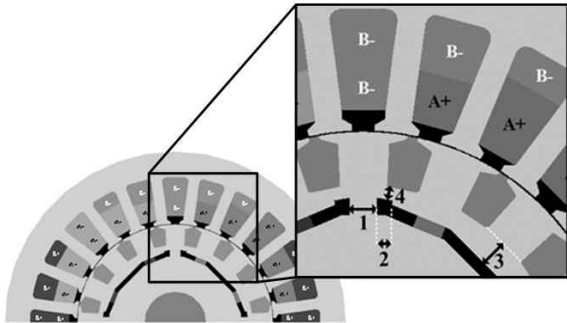


그림 4. 자속장벽 설계 변수
Fig. 4. Design variables of the flux-barriers

표 2. 설계변수와 노이즈 선정 치수
Table 2. Values of the design variables and the noises

구분	파라미터 [단위]			
설계 변수	1 자속장벽 거리 mm	1.8	2.2	2.6
	2 자속장벽 끝단 두께 %	25	50	75
	3 자속장벽-농형바 거리 mm	1.5	2.0	2.5
	4 리브 두께 mm	1.0	1.2	1.4
노이즈	제작 공차 mm	-0.1	0	0.1

표 3. 직교배열법에 의한 실험 순서
Table 3. Experiments of the orthogonal arrays

	변수 1	변수 2	변수 3	변수 4
실험1	1.8	25	1.5	1.0
실험2	1.8	50	2.0	1.2
실험3	1.8	75	2.5	1.4
실험4	2.2	25	2.0	1.4
실험5	2.2	50	2.5	1.0
실험6	2.2	75	1.5	1.2
실험7	2.6	25	2.5	1.2
실험8	2.6	50	1.5	1.4
실험9	2.6	75	2.0	1.0

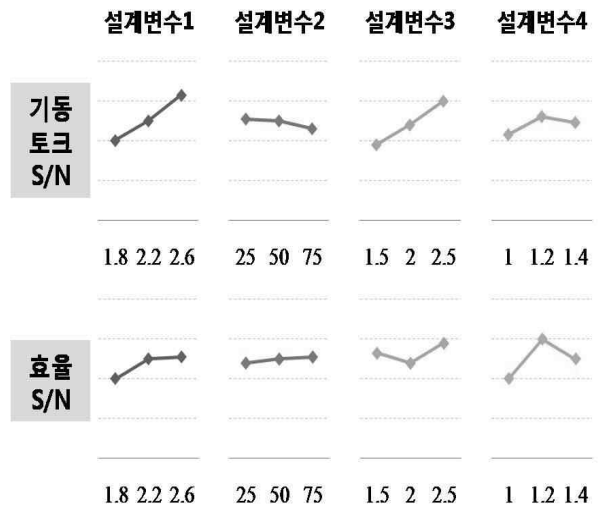


그림 5. 기동토크와 효율의 S/N Main Effect Plot
Fig. 5. S/N main effect plot of the starting torque and efficiency

표 4. 최종 선정된 자속장벽 파라미터값
Table 4. Final parameter values of the flux-barriers

파라미터	최종값	파라미터	최종값
자속장벽 거리	2.6mm	자속장벽-농형바 거리	2.5mm
자속장벽 끝단 두께	25mm	리브 두께	1.2mm

결과를 확인해 보면 기동 토크에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 설계변수 1과 3 정도로 압축할 수 있다. 또 효율과 가장 관련 있는 인자로는 설계변수 4를 들 수 있다. 위 결과에서 특이한 것은 설계변수 1번과 4번의 경우 작으면 작을수록 누설되는 자속이 작아져 효율이 향상할 것으로 예상했는데 결과는 그렇지 않았다. 이유는 리브가 작아져 누설이 작아지면 쇠교자속이 많아져서 출력에 도움이 되지만, 큰 토크 리플로 인한 동기 속도의 리플이 발생하여 댐핑을 위한 2차측 동손이 커지는 것을 알 수 있었다. 그러므로 LSPM 전동기의 경우 효율을 높이기 위해서는 누설뿐 아니라 토크 리플과의 관계도 중요하다는 것을 알 수 있다.

설계 변수 2는 기동토크와 효율이 Trade off 관계에 있지만 큰 영향력이 아니므로 기동토크 향상에 비중을 두고 최적 설계값을 정하였다. 위 결과를 바탕으로 선정된 최적 자속장벽 파라미터값은 표 4에 나타내었다.

4. 설계 검증

4.1 시뮬레이션을 통한 성능 비교

최종 설계된 모델의 타당성을 검증하기 위해 기존 상용화되고 있는 단상 유도기 모델과의 성능을 FEM 시뮬레이션을 통하여 비교하였다. 기존 모델의 단면도는 그림 6에 나타내었다. 유도기는 부하에 따라 슬립에 의해 속도가 변하므로, 토크를 일정하게 맞춰가며 다른 파라미터의 성능을 비교하였다.

그림 7은 부하 토크를 점점 증가시켜가며 속도를 시뮬레이션한 파형이다. 기동시간은 브레이킹 토크가 존재함에도 거의 비슷하게 정상상태까지 도달하는 것을 알 수 있다. 이는 기존의 유도기 농형바는 기동과 구동시 모두를 고려하여 설계되지만, LSPM 전동기의 농형바는 기동에만 초점이 맞춰졌기 때문인 것으로 판단된다. 기동 시간뿐 아니라 기동 토크 역시 유도기를 능가하지는 못하지만 90%정도까지 따라가 기동 토크를 고려한 설계가 타당함을 확인할 수 있었다.

그림 8은 회전자에서 발생하는 2차측 동손이다. 이상적인 경우 동기기는 2차측 동손이 0이어야 하나 속

도 곡선에서 보듯 리플의 발생으로 댐핑 전류에 의한 동손이 발생한다. 그러나 부하 토크가 커짐에 따라 점점 작아져서 정격 부하인 0.35Nm에서는 거의 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. 이에 반해 유도기는 부하에 따라 2차측 동손이 커짐으로 효율이 낮아질 것으로 예상할 수 있다. 실제 효율을 계산하여 보면 기존 유도기가 정격 부하시 59%인데 반해, LSPM 전동기의 경우 71%까지 증가했다.

그림 9는 정격 부하(0.35Nm)에서 정상 상태시 토크를 나타내고 있다. 일반적으로 LSPM 전동기의 경우 유도기보다 토크 리플이 크지만, 최종 모델은 유도기와 토크 리플면에서 큰 차이가 없다.

위 결과를 토대로 분석한 결과 본 논문에서 제시한 효율과 기동을 동시에 고려한 설계법이 타당한 것을 확인할 수 있다.

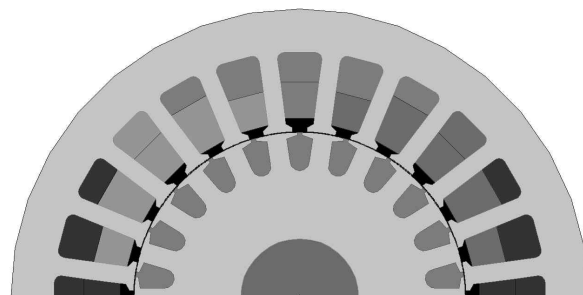


그림 6. 성능 비교에 사용된 단상 유도기 모델
Fig. 6. The single-phase induction motor used to compare the performance

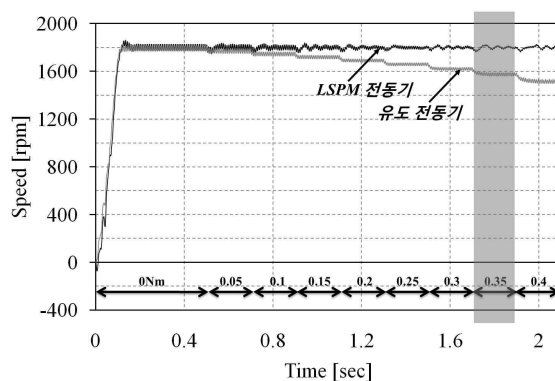


그림 7. LSPM 전동기와 유도 전동기의 부하토크별 속도
Fig. 7. Rotating Speed per load-torque of the LSPM motor and induction motor

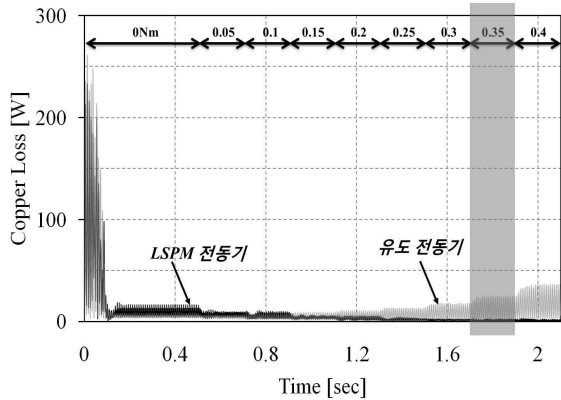


그림 8. LSPM 전동기와 유도 전동기의 2차측 동손
Fig. 8. Secondary copper loss of the LSPM motor and induction motor

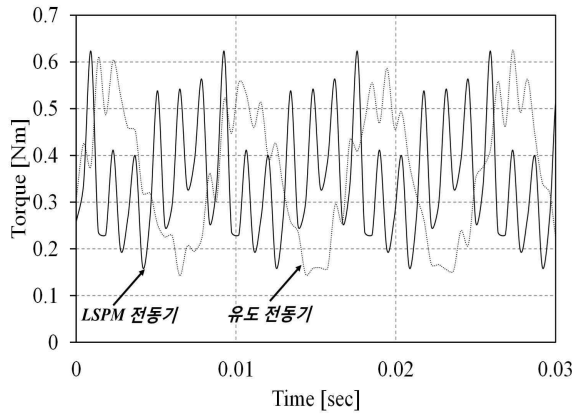


그림 9. LSPM 전동기와 유도 전동기의 토크 파형
Fig. 9. Torque waveform of the LSPM motor and induction motor

4.2 제작 및 시험을 통한 시뮬레이션 검증

시뮬레이션의 타당성을 검증하기 위하여 그림 10과 같이 LSPM 전동기를 제작하여 효율을 측정하였다. 실제 1800rpm, 0.35Nm에서 파워미터로 측정된 효율은 70.1%로 시뮬레이션의 71%에 비해 0.9%p 작게 측정되었다. 이는 시뮬레이션 효율 계산 시 베어링 마찰손 및 풍손, 표류부하손 등이 반영되지 않아 발생하는 차이로 사료되며 시뮬레이션의 토크 및 2차측 동손 등의 시뮬레이션 결과와 제작 공차에 강건한 설계법이 타당함을 알 수 있다. 기동 토크는 시험

다이내믹의 특성상 측정이 어려웠으나 기동 불량 등의 사례가 발생하지 않는 것으로 비추어 기동 토크를 고려한 설계 및 시뮬레이션이 적절하게 이루어졌음을 알 수 있다.

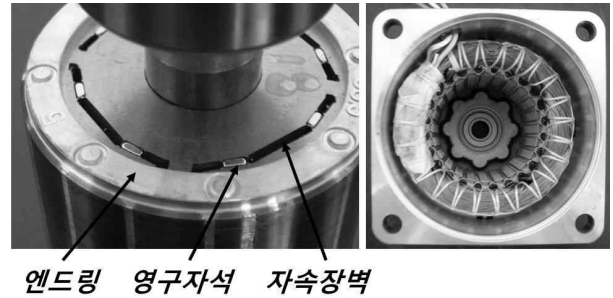


그림 10. LSPM 전동기의 회전자 및 고정자
Fig. 10. The rotor and the stator of the LSPM motor

5. 결론

본 논문에서는 에너지 절감과 관련된 전동기 고효율화와 발맞추어 단상 유도전동기를 대체할 수 있는 LSPM 전동기의 자속 장벽의 설계 방법을 제안하였다. 범용성을 위해 유도기의 고정자와 권선, 베어링, 하우징, 샤프트 등은 그대로 사용하고 회전자만 교체함으로써 정격에서 효율을 증가시켰다.

자속장벽의 설계방법으로 FEM과 다꾸찌 실험 계획법을 통해 효율과 기동토크를 최대화시키는 설계를 하였다. 이 때 제작공차를 고려해 강건한 설계가 될 수 있도록 하였으며 자속장벽의 파라미터 분석을 수행하였다. 최종적으로 설계된 LSPM 전동기와 기존의 유도 전동기의 성능을 시뮬레이션으로 비교하여 동등 토크 및 토크 리플을 가지며 효율이 약 12% 향상되어 제안한 설계법이 타당함을 확인하였다. 또한 설계된 LSPM 전동기를 제작하여 효율 측정 시험을 수행하였으며 1% 오차범위 안에서 시뮬레이션 결과가 타당함을 확인하였다.

마지막으로 본 논문의 제작 공차를 고려한 강건 설계는 다른 종류의 소형 전동기 설계에도 충분히 활용 가능할 것으로 사료된다.

References

[1] Dae-Sung Jung, Seung-Ju Kim, Jin-Hun Lee, Jae-Hak Choi, Ju Lee, "A Study on the Characteristics in Single-Phase Line-Start Permanent Magnet Motor," Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, vol.21, no.3, pp. 125-131, 2007.

[2] Jong-Myong Lee, Nam-Ho Kim, "A experimental Study on the Reinforced Coil Development for the Efficiency Improvement of a Single Phase Induction Motor," Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, vol.24, no.1, pp. 78-84, 2010.

[3] Sun-Ki Hong, "A Study on the Starting Characteristics for Capacitor-run Single Phase Permanent Magnet Synchronous Motor," Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, vol.18, no.2, pp. 150-156, 2004.

[4] T. J. E. Miller, "Single-Phase Permanent-Magnet Motor Analysis," IEEE Trans. Ind. Applicant., vol. 21, no. 4, pp. 651-658, 1985.

[5] Ugale, R.T., Chaudhari, B.N., "A new rotor structure for line start permanent magnet synchronous motor," Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), pp. 1436-1442, 2013.

[6] Yaxin Bao, Mehmood, W., Xueqing Feng, "Super premium efficiency Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor: Design, test and comparison," Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC), pp. 1-7, 2012.

[7] Andrew M. Knight and Catherine I. McClay, "The Design of High-Efficiency Line-Start Motors," Trans. Ind. Applicant., vol. 36, no. 6, pp. 1555-1562, 2000.

[8] Byung-Taek Kim, Young-Kwan Kim and Duk-Jin Kim, "Analysis of Squirrel Cage Effect in Single Phase LSPM", KIEE International Transactions on EMECS, vol. 4-B, no. 4, pp. 190-195, 2004.

[9] Kazumi Kurihara and M.Azizur Rahman. "High Efficiency Line-Start Interior Permanent Magnet Synchronous Motors," IEEE Trans. Ind. Applicant., vol. 40, no. 3, pp. 789-796, 2004.

[10] M.A.Rahman and A.M. Osheiba, "Performance fo a large line-start permanent magnet synchronous motor," IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 5, no. 1, pp. 211-217, 1990.

[11] Sung-Soo Kim, Soo-Jin Jung, Young-Hoon Lee, Dong-Hee Kim, Chae-Kyun Ro, "Robust Design of a Linear DC Motor Using Taguchi Method," Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, vol.15, no.4, pp. 51-56, 2001.

[12] Suk-Muk Hong, Myung-Kyu Park, "A Study on the Noise Characteristics of the Wire Duct Using Taguchi Method," Proceedings of KIEE Annual Conference, pp. 173-177, 2002. 11.

◇ 저자소개 ◇



김원호 (金元顥)
 1979년 12월 28일생. 2005년 한양대학교 전자전기공학부 졸업. 2009년 한양대학교 전기공학과 졸업(석사). 2011년 한양대학교 전기공학과 졸업(박사). 현재 삼성 전자 종합기술원 전문연구원 재직중.