

**반응표면법과 유한요소법을 이용한 라인-스타트 영구 자석 전동기의 최대토크밀도와 최소전류밀도를 위한 최적설계**

장순명\*, 전명진\*, 이중호\*  
국립한밭대학교\*

**Optimum Design Criteria for Maximum Torque Density & Minimum Current Density of a Line-Start Permanent-Magnet Motor using Response Surface Methodology & Finite Element Method**

Soon Myung Jang\*, Myung Jin Jun\*, Jung Ho Lee\*  
Hanbat National University\*

**Abstract** - This paper deals with optimum design criteria for maximum torque density & minimum current density of a single phase line-start permanent-magnet motor (LSPMM) using RSM (Response Surface Methodology) & FEM (Finite Element Method).

The focus of this paper is to find a design solution through the comparison of torque density and minimum current density resulting from rotor shape variations. And then, a central composite design (CCD) mixed resolution is introduced, and analysis of variance (ANOVA) is conducted to determine the significance of the fitted regression model.

**1. 서 론**

유도전동기의 효율 및 역률을 최대한 개선 시켜도 내재적 한계로 인해 성능향상을 더 이상 기대할 수 없다. 따라서 새로운 전동기 기술은 높은 효율과 역률을 위해 개발해야 한다.

또한 새로운 전동기는 기존의 유도전동기에 즉시 대체할 수 있어야 산업적으로 유리하다. 따라서 라인-스타트 영구 자석 전동기(LSPMM)는 매력적인 대상이다. LSPMM의 고정자는 농형 유도전동기와 같고, 영구자석은 농형 유도전동기의 회전자에 삽입된다.

기동토크는 회전자 도체의 전자기 유도에 의해 발생하고, 운전시 발생하는 토크는 영구 자석에 의해 만들어진다. 간단히 말해, 라인-스타트 PM모터는 고정전압 및 주파수에서 유도전동기와 같은 전원공급 장치에서 작동하도록 설계된 매우 높은 효율을 가진 동기 전동기이다.

LSPMM은 삽입된 영구자석으로부터 각각의 모양, 재료, 크기 및 위치의 구성에 따라 많은 종류가 있다[1]-[4].

전류밀도와 토크밀도 같은 문제는 전기기기의 성능을 평가할 때 중요하다.

이러한 특성은 고정자와 회전자 기기의 형태에 의존하고 있으므로, 수치 해석과 형상최적 설계를 필요로 한다.

유한요소 해석은 비선형성, 이방성 특성 및 동특성 해석에서 등가회로의 방법보다 점진적으로 더 큰 중요성을 확보해왔다.

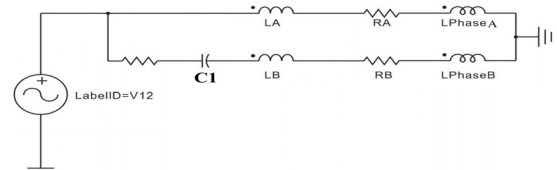
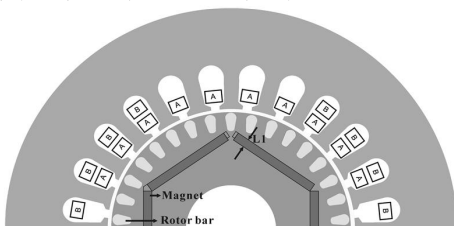
그리고 반응표면법(RSM)은 유한요소법을 결합한 실험 설계방법을 사용하여 이루어질 수 있고, 설계변수의 수많은 상호작용을 평가하는 복잡한 문제에 대한 해석모델을 만드는데 아주 적합하다[5]-[7].

**2. 본 론**

**2.1 디자인 알고리즘과 모델**

영구자석 크기의 변화를 위해 회전자의 형상좌표가 만들어졌다. 회전자의 설계 변수는 토크밀도와 LSPMM의 전류밀도를 극대화하기 위해 결정된다. 다음, 분석데이터는 주로 반응표면법(RSM)에 사용되는 중심합성설계(CCD)을 기반으로 유한 요소법을 통해 얻어진다.

최적설계치는 데이터의 분석을 통해 결정된다. <그림 1>은 회전자bar, 영구자석 크기와 관련된 형상의 핵심 변수와 변형 방향 및 콘덴서가 포함된 회로도도를 보여준다.



<그림 1> LSPMM의 설계변수와 초기 모델의 변형방향 및 회로

**2.2 설계결과 및 분석**

유한요소해석은 <표 2>의 중심 합성설계 실험의 응답을 얻는데 사용한다.

목적함수는 최대토크밀도(13.5 Nm:고정값), 설계변수는 자석의 너비와 콘덴서의 용량이다.

<그림 3>은 자석의 너비와 콘덴서의 용량 변화에 따른 응답을 등고선 맵으로 보여준다. 이것은 토크가 자석의 너비 2.2-2.6 mm, 콘덴서용량 40 μF일 때 토크가 13.30이하임을 보여준다.

토크는 자석 너비 1.6 mm, 콘덴서 용량 58-74 μF일 때 13.30 Nm이상인 것을 <그림 3>에서 보여준다. <그림 4>는 L1과 C1의 비율의 반응표면응답을 보여준다.

결과적으로 자석너비 약 1.6 mm의 값에서 고출력 및 저비용 생산에 최적임을 알 수 있다.

콘덴서 용량이 크면, 낮은 전류밀도를 나타내지만, 생산 비용을 초래한다.

따라서 자석너비와 콘덴서 용량의 적절한 결합이 필요하다.

<그림 5>는 최종 RSM 최적설계 과정을 보여준다.

<그림 5> (a),(b),(c)그리고(d)는 토크와 자석너비, 토크와 콘덴서 용량, 전류와 자석너비, 전류와 콘덴서 용량에 관련된 응답특성을 보여준다.

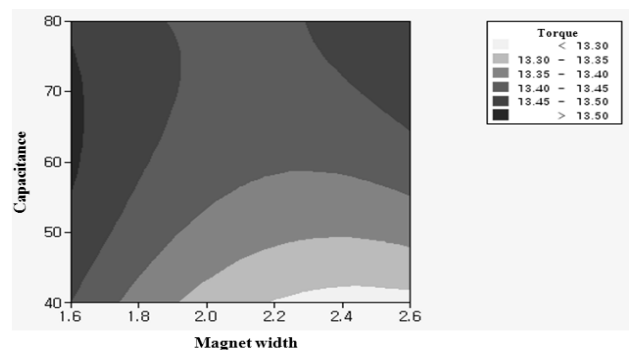
1.616 mm의 자석너비, 58,0224 μF의 콘덴서 용량이 목적함수(최대토크 13.5 Nm)의 최적값인 것으로 <그림 5>의 ①-④포인트를 보고 확인할 수 있다. 그리고 전류밀도는 42.6055 mA이다. <표 2>에 보여지는 것처럼 비교적 낮은값임을 알 수 있다.

<그림 6>은 최적화된 설계 모델(자석너비:1.616 mm, 콘덴서 용량:58,0224 μF) 그리고 초기모델(자석너비:2.2 mm, 콘덴서용량 80 μF)을 나타낸다.

따라서 이 최적설계모델은 생산시 회전자 자석과 콘덴서의 비용을 절감할 수 있다

<그림 7>과 8은 최적설계 모델의 순시 토크와 전류응답 특성을 보여준다.

응답특성은 LSPMM의 최적설계 치와 거의 일치함을 알 수 있다.

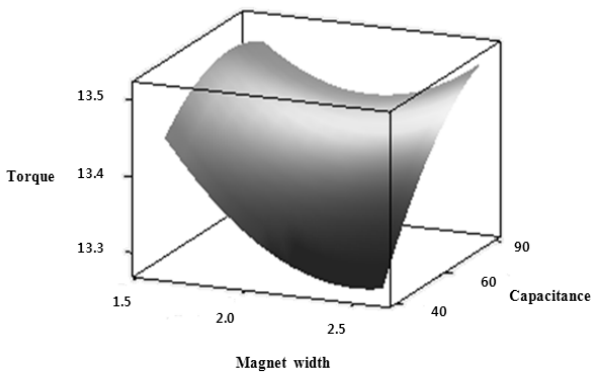


<그림 3> 자석의 너비와 콘덴서 용량에 따른 토크 등고선 맵

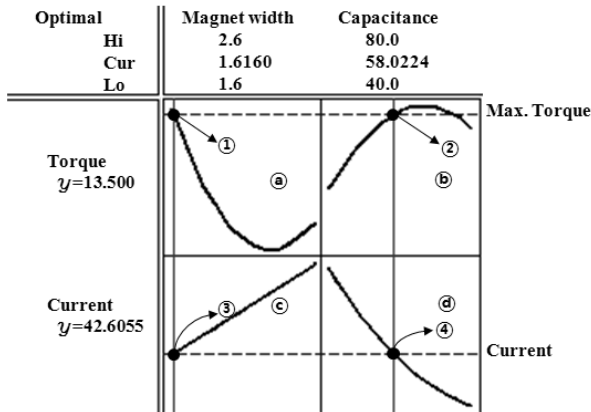
〈표 2〉 중심합성설계를 이용한 실험결과

	L1	C1	Torque	Current
1	2.20	60	13.436	46.252
2	2.60	60	13.430	48.607
3	1.60	40	13.497	49.036
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
25	1.60	60	13.462	40.745
26	2.20	40	13.213	48.796
27	2.20	60	13.436	46.252
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
50	1.60	80	13.491	39.076
51	1.60	60	13.462	40.745
52	2.20	40	13.213	48.796

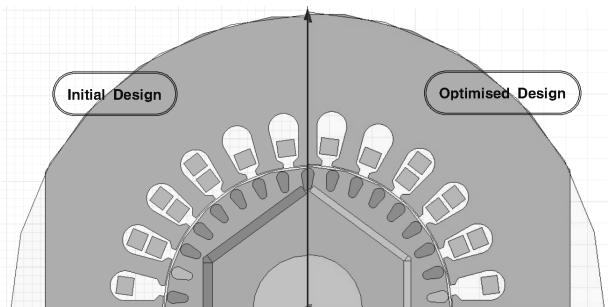
● L1: 자석의 너비, C1: 콘덴서 용량



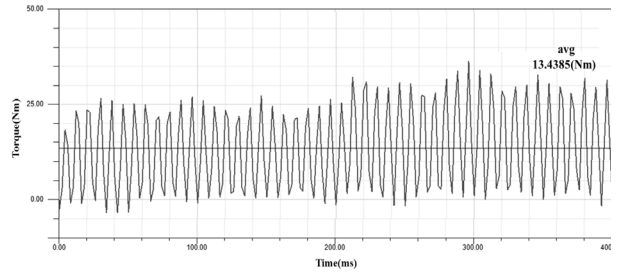
〈그림 4〉 반응표면의 예



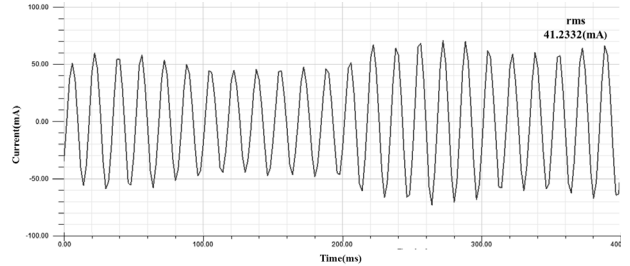
〈그림 5〉 RSM 최적화 과정



〈그림 6〉 초기설계 모델 및 최적화 설계 모델의 구성



〈그림 7〉 최적화된 모델의 토크특성



〈그림 8〉 최적화된 모델의 전류특성

### 3. 결 론

본 논문은 단상 라인-스타트 영구자석전동기의 자석너비와 콘덴서의 용량에 따른 토크밀도와 관련된 최적설계방법을 제안하였다.

신속한 설계를 위해, 회전자의 자석 형상 변형에 따른 자동 ACAD파일 및 메쉬 생성을 자동적으로 수행하는 예약 프로그램을 개발했다.

초기 설계에서 시작하여 최적해를 구했으며 저비용, 고성능 LSPMM의 개발을 통해 최적설계 알고리즘으로서의 RSM의 적합성이 다시 확인되었다.

### [참 고 문 헌]

- [1] T. J. E. Miller, M. Popescu, C. Cossar, M. I. McGilp, G. Strappazzon, and R. Santarossa, "Line-Start Permanent-Magnet Motor single-Phase Steady-State Performance Analysis", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 40, No. 2, March/April 2004, pp.516-525.
- [2] M. Popescu, T. J. E. Miller, M. I. McGilp, G. Strappazzon, N. Trivillin, R. Santarossa, "Line-Start Permanent-Magnet Motor: Single-Phase Starting Performance Analysis", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 39, No. 4, July/August 2003, pp.1021-1030.
- [3] W. H. Kim, K. C Kim, S.J. Kim, D. W. Kang, S. C. Go, H. W. Lee, Y. D Chun, J. Lee, "A study on the Optimal Rotor Design of LSPM Considering the Starting Torque and Efficiency", IEEE Transactions on Magnetics, Vol 45, No 3, March 2009, pp.1808-1811.
- [4] I.S. Jacobs and C.P. Bean, "Fine particles, thin films and exchange anisotropy," in Magnetism, vol. III, G. T. Rado and H. Suhl, Eds. NewYork:Academic,1963,pp.271-350.
- [5] J.T. Li, Z.J. Liu, M.A. Jabbar, X.K. Gao: Design optimization for cogging torque minimization using response surface methodology, IEEE Transactions on Magnetics, Vol 40, No 2, 2004, pp.1176-1179.
- [6] J. M. Park, S. I. Kim, J. P. Hong, J. H. Lee, "Rotor design on Torque Ripple Reduction for a synchronous reluctance motor with concentrated winding using response surface methodology", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 42, No. 10, pp.3479-3481. Oct. 2006.
- [7] Y. C. Choi, H. S. Kim, J. H. Lee, "Design Criteria for Maximum Torque Density & Minimum Torque Ripple of SynRM according to the Rated Wattage using Response Surface Methodology", IEEE Transactions on Magnetics, Vol, 44, No. 11, pp.4135-4138. Nov 2008.