

## Spoke type 전동기의 최대토크와 최소토크리플을 위한 형상 최적 설계

이진경\*, 김영현\*, 김홍석\*\*, 이중호\*  
한밭대\*, 경남테크노파크\*\*

### Optimum Shape Design of Spoke Type Motor for Maximum Torque and Minimum Torque Ripple

Jin-Kyoung Lee\*, Young-Hyun Kim\*, Hong-Seok Kim\*\*, Jung-Ho Lee\*  
Hanbat National University\*, GYEONGNAM TECHNOPARK\*\*

**Abstract** - In this paper, we investigate the optimization design for a spoke type motor with the characteristics of high torque density and high-efficiency. This motor has a high output per unit volume. In order to reduce noise and vibration caused by a high cogging torque, optimization design of the rotor and stator have been conducted using both Response surface method (RSM) and Finite elements method (FEM). In this paper, we show the potential for this motor to efficiently replace existing interior permanent magnet synchronous motors (IPMSM) in a wide range of industries.

#### 1. 서 론

최근 희토류계(NdFeB) 영구자석의 개발로 인하여 매입형 영구자석 전동기의 성능이 발전되고 있다.

매입형 영구자석 전동기는 높은 보자력을 가지는 희토류계 영구자석을 사용하기 때문에 높은 성능을 가진다. 그러나, 희토류계 영구자석의 가격은 상당히 증가하였고, 이러한 문제점들은 앞으로도 계속될 것이다 [1]-[2].

높은 가격을 가지는 희토류계의 전동기의 문제점을 해결하기 위해서, 1/10 정도의 저렴한 가격의 페라이트 영구자석을 사용하여 기존의 매입형 영구자석 전동기와 동등 이상의 출력을 낼 수 있는 전동기 개발이 필요하다. 이를 위한 대체 전동기로써, 페라이트 영구자석이 만지름 방향으로 배치된 Spoke type 전동기는 톨러턴스 토크와 영구자석으로 인한 자속이 집중되는 형태를 가지므로 높은 토크밀도를 가지는 특징이 있다[3]-[5]. 그러나 Spoke type 전동기는 매입형 영구자석 전동기와 비교해서 공극에 큰 자기저항 차가 발생되어, 큰 코깅토크를 가진다.

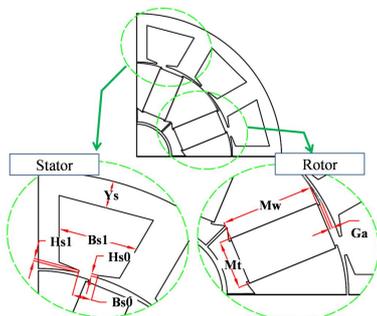
소음과 진동을 야기하는 코깅토크는 운전 중 고조파 성분으로 작동함으로써 전동기에 나쁜 영향을 미친다[6]-[7]. Spoke type 전동기에 페라이트를 사용하고, 코깅토크를 저감할 수 있으면, 가격적인 문제뿐만 아니라 전동기의 성능도 향상시킬 수 있다.

본 논문은 유한요소해석과 반응표면법을 이용하여 고정자와 회전자형상을 변화시킬 뿐만 아니라, 고정자의 노치(Notch) 및 회전자의 이중공극(Arc)을 추가로 적용하여 공극자속밀도를 정현하게 함으로써, spoke type 전동기의 코깅토크를 줄이는 형상 최적 설계를 다룬다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 Basic model of the Spoke type

본 논문에서는 Spoke type 전동기의 코깅토크를 저감하기 위한 설계 방법을 제안하였다. 초기 모델의 형상 및 사양은 그림 1과 표 1에 나타내었다. 우선 초기모델을 기준으로 코깅토크를 줄이기 위한 고정자와 회전자를 각각 설계하고, Arc와 Notch를 추가 적용하여 공극자속밀도를 정현적으로 만들어 코깅토크를 저감하였다.



〈그림 1〉 Spoke type 전동기의 고정자와 회전자 설계변수

〈표 1〉 Spoke type 전동기 사양

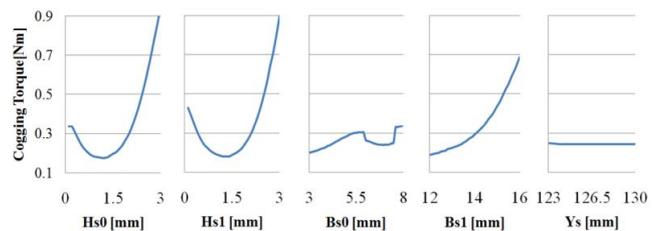
	값	단위
고정자 외경	130	[mm]
회전자 외경	81	[mm]
공극	0.5	[mm]
극수	8	
슬롯수	12	
영구자석재질	ferrite 12E	
정격용량	1.88	[kW]
정격속도	3600	[rpm]

##### 2.2 Design of the Stator

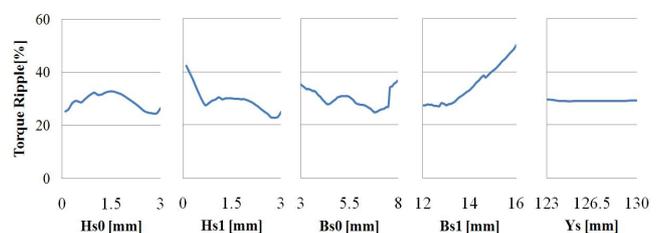
그림 1은 고정자와 회전자의 설계변수를 나타내고 있다. 이러한 설계 변수들은 서로 독립적이어야 한다. 고정자의 설계변수들은 Bs0, Bs1, Hs0, Hs1, Ys이다. 위 변수들은 제작성과, 철심의 포화를 고려하여 설계된다. 그림 3은 설계변수 범위에 따른 코깅토크 값이다. 특히, Hs0, Hs1과 Bs1은 코깅토크 변화에 큰 영향을 미치는 요소들이다.

Bs1은 슬롯의 크기를 결정하는 요소로서, 그 값이 작을수록 코깅토크는 작아진다. 그러나, 코일의 턴수가 많아진다면 충분히 고려해야 할 변수이다. Ys은 코깅토크와 관계가 없으므로, 백요크의 포화가 되지 않을 정도의 Ys값을 결정해야 한다.

각 설계변수는 코깅토크 값에 대해 각각 독립적이기 때문에, 이들의 설계변수의 적절한 조합을 통하여 우수한 코깅토크를 가지는 전동기의 설계가 가능하다.



〈그림 2〉 각 설계변수들에 대한 코깅토크 값



〈그림 3〉 각 설계변수들에 대한 토크리플 값

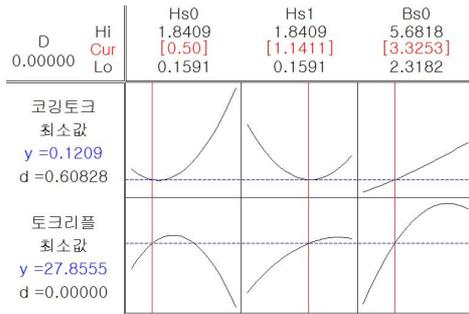
하지만, 그림 2의 코깅토크(Hs0, Hs1, Bs0)와 그림 3의 토크리플(Hs0, Hs1, Bs0)패턴이 불일치한다. 그러나 많은 경우에서 코깅토크는 거의 0에 가깝게 줄었어도, 토크 백동은 정격에서 여전히 큰 경우가 있다.

그 이유는, 토크리플이 역기전력(back-EMF)과 여자전류(exciting current)와의 파형불일치에 의해 발생하기 때문이다.

그림 2와 3을 비교하면 설계변수 Bs1과 Ys는 코깅토크와 토크리플의

변화가 비슷한 것을 확인할 수 있지만, 설계변수 Bs0, Bs1, Bs0은 코깅토크와 토크리플의 변화가 다른 것을 확인할 수 있다. 그러므로 세 변수를 RSM을 통해 코깅토크와 토크리플을 동시에 고려한 설계가 필요하다.

그림 4는 반응표면법을 이용하여 얻어진 고정자의 설계값이다. Bs0의 제약조건이 코일의 직경을 고려한 3.3[mm]인 경우, Hs0와 Hs1은 각각 0.5[mm], 1.14[mm]의 값으로 도출되었다.

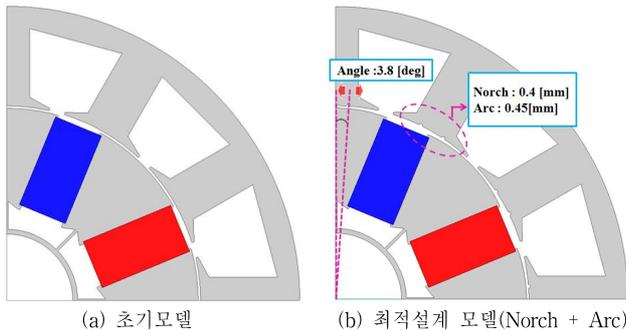


〈그림 4〉 코깅토크와 토크리플을 고려한 RMS 설계치

### 2.3 Optimization design by mean of the Arc and Norch

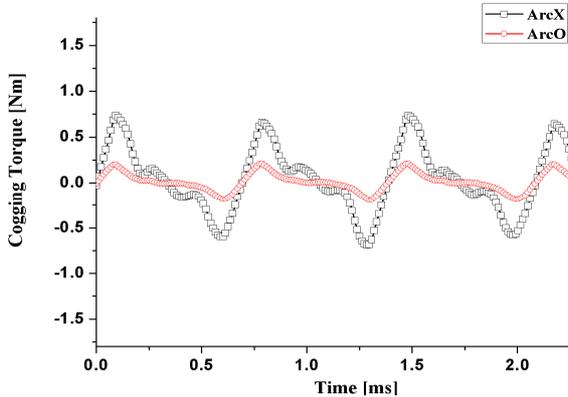
최소의 코깅토크와 토크리플을 위해 회전자와 고정자에 각각 Arc와 Norch를 적용하였다. 그림 5(Rotor)에서, Arc의 설계는 회전자 자극의 중심을 제안된 모델의 공극과 동일하게 하고, 영구자석 양측 가장자리의 공극 길이를 조절하는 것이다. 이것은 구형적인 공극자속분포를 정형적인 공극자속분포로 변경함으로써 코깅토크를 저감하는 방법이다.

다음은 고정자 치(teeth)에 Norch를 추가로 적용하여 코깅토크를 더욱 저감하였다. Norch를 적용시키는 목적은 코깅토크와 반대방향의 토크를 발생시켜 코깅토크를 상쇄시키기 위함이다. 그림 5는 초기모델과 Norch와 Arc가 적용된 최적설계된 Spoke type 전동기를 보여준다.

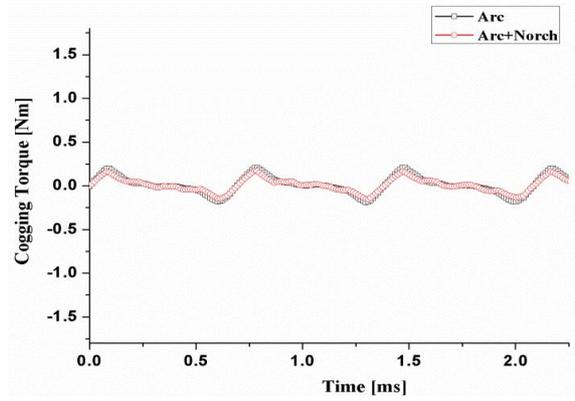


〈그림 5〉 초기모델과 최적설계 모델

그림 5에서, 초기모델에서는 회전자 자극의 양측 단부가 교차하는 지점에서 자기저항의 변화가 매우 크므로 코깅토크가 0.365[Nm]로 제안된 모델에 비해 크게 측정되었다. Arc로 인해 회전자 자극에서 자기저항의 변화가 작아진 제안모델에서는 코깅토크가 0.098[Nm]로 상당히 저감되었다. 또한 각 모델의 토크리플 값은 34.08[%]와 17.63[%]로 Arc의 설계로 인해 코깅토크 뿐만 아니라 토크리플도 상당히 저감되었다.



〈그림 6〉 Arc에 따른 코깅토크 파형



〈그림 7〉 Arc 및 Arc+Norch가 적용된 코깅토크 파형

그림 7은 Arc만 적용된 모델과 Arc와 Norch가 적용된 모델의 코깅토크를 비교하였다. 코깅토크는 0.098[Nm]에서 0.077[Nm]로 저감되었다. Norch에 의해 저감된 코깅토크는 Arc에 의해 저감된 코깅토크에 비해 변화량이 작고 출력이 감소되기 때문에 Spoke type의 전동기의 설계에 있어 Arc형상과 Norch의 적용에 대한 고찰이 필요하다.

### 3. 결론

본 연구에서는 Spoke type의 전동기의 최적설계를 하기 위해서 반응표면법과 유한요소해석을 이용하여 설계하였으며, 제안된 전동기는 기존의 회로류 영구자석을 사용한 IPMSM 컴프레서의 대체용으로, 페라이트 영구자석을 사용하고 자속이 집중되는 spoke type 전동기로 선택하였다. 이러한 spoke type 전동기는 높은 출력을 가지는 장점이 있지만, 소음과 진동을 야기하는 높은 코깅토크가 단점이다. 이를 줄이기 위해 Arc와 Norch를 추가하여 회전자와 고정자의 최적설계를 통해 코깅토크 저감을 수행하였다.

또한 RSM을 통하여 코깅토크와 토크리플의 최소값을 가지는 설계값을 구하였다. 이상 본 논문에서는 제안된 전동기는 기존의 IPMSM을 대체 가능하다. 향후에는, 기존의 고정자 권선을 사용한 착자 시스템(Magnetization System) 연구를 통해 제작성과 비용의 문제를 해결하는 방안을 분석할 예정이다.

### [참고 문헌]

- [1] A. Chiba, Y. Takano, M. Takeno, T. Imakawa, N. Hoshi, M. Takemoto, and S. Ogasawara, "Torque density and efficiency improvements of a switched reluctance motor without rare-earth material for hybrid vehicles," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 47, May/June, 2011.
- [2] D. G. Dorrell, A. M. Knight, and M. Popescu, "Performance improvement in high-performance brushless rare-earth magnet motors for hybrid vehicles by use of high flux-density steel," IEEE Trans. Magn., vol. 47, no. 10, Oct. 2011.
- [3] B. K. Lee, G. H. Kang, J. Hur, and D. W. You: "Design of Spoke type BLDC Motors with High Power Density for Traction Applications", Proceedings of IEEE-IAS Annual Meeting, vol. 2, pp.1068-1074 (2004).
- [4] K. Y. Hwang, S. B. Rhee, J. S. Lee, and B. I. Kwon: "Shape Optimization of Rotor Pole in Spoke type Permanent Magnet Motor for Reducing Partial Demagnetization Effect and Cogging Torque", Proceedings of Int. Conf. on Electrical Machines and Systems, pp. 955-960 (2007).
- [5] K. K. Han, D. Y. Lee, G. H. Kang, K. B. Jang, H. K. Shin, and G. T. Kim: "The Design of Rotor and Notch to Improve the Operation Characteristics in Spoke type BLDC Motor", Proceedings of Int. Conf. on Electrical Machines and Systems, pp. 3121-3125 (2008).
- [6] B. Y. Yang, K. Y. Yun, and B. I. Kwon, "Designing method of flux barriers in rotor for reducing cogging torque," in COMPUMAG2005, Shenyang, China, June 2005, IV-26, PG1-7.
- [7] E. S. Hamdi, DESIGN OF SMALL ELECTRICAL MACHINES, John Wiley & Sons Ltd, 1994.