

BLDC 전동기의 정현적 공극 자속밀도 구현에 의한 진동·소음 저감

김사무엘*, 정승호*, 권병일*, 김홍석**
*한양대학교, ** (주)모터넷 인터내셔널

Reduction of Vibration and Noise of BLDC Motors by Realizing Sinusoidal Air-Gap Flux Density Distribution

Samuel Kim*, Seung Ho Jeong*, Byung Il Kwon*, Hong Seok Kim**

*Hanyang University, **Motor-Net International Co.,LTD

Abstract - Cogging torque is often a principal source of vibration, noise and difficulty of control in BLDC motors. Therefore, this paper will present a design method of magnetization system with sinusoidal air-gap flux density distribution of Nd-Fe-B magnets in ring type for reduction of Vibration and Noise and low manufacturing cost.

1. 서 론

BLDC 전동기는 영구자석을 갖지 않는 전동기와는 달리 회전자의 영구자석과 고정자 슬롯 구조간의 상호적 자기저항차로 인하여 진동·소음의 주요 원인이 되는 코깅 토크가 발생한다. 특히, 고 에너지 적을 갖는 회로유계열 Nd-Fe-B 자석은 기존의 페라이트 자석보다 높은 잔류 자속 밀도를 가진다. 자속밀도의 제곱에 비례하여 커지는 코깅 토크는 전동기 운전 시 비 균일 토크맥동 (torque pulsation)을 유발하여, 진동·소음 발생 및 제어의 어려움을 야기 시킨다.

코깅 토크 저감을 위한 여러 가지 방법 중 공극 자속 밀도 분포를 정현파에 가깝게 되도록 영구자석의 기하학적인 형상을 arc형으로 가공하는 방법이 있으나 제조 비용이 증가하는 단점이 있다[1]. 또한, 종래의 환형 (ring type) 등방성 영구자석이 정현적 공극 자속밀도 분포를 갖게 하기 위해 착자 요크의 권선을 배치하는 방법이 연구된 바 있다[2]. 그러나 이 방법은 극수가 증가할수록, 그리고 보다 정밀한 정현적 공극 자속밀도 분포가 요구될수록 권선 배치를 위한 공간 확보가 어렵다. 따라서 본 논문에서는 BLDC 전동기의 정현적 공극 자속밀도 분포를 위한 영구자석의 착자 시스템을 설계하여 진동·소음의 주요 원인이 되는 코깅 토크를 저감한다. 착자 해석 방법으로는 2차원 유한요소법(2D FEM)과 프라이자흐 모델(Preisach model)을 사용한다. 또한, 착자 요크의 철심 형상은 실험계획법 (design of experiments) 중의 하나인 요인배치법(factorial design)을 통해 설계 시간의 단축은 물론, 정현적 공극 자속밀도를 갖는 착자 요크 철심 형상을 최적설계 한다. 실험을 통하여 코깅 토크 및 진동·소음 저감을 확인한다.

2. BLDC 전동기의 정현적 공극 자속밀도 구현

본 논문에서 연구대상 모델은 6슬롯 8극 영구자석 표면 부착형(Surface mounted Permanent Magnet Type, SPM) BLDC 전동기이다. 영구자석은 환형 본드 등방성 네오디뮴 자석을 사용한다.

2.1 착자 시스템 설계

영구자석의 착자 해석 방법은 착자 전류가 임펄스 파형이고, 철심이 비선형성을 갖고 있기 때문에 등가회로법등의 해석방법은 부적합하므로 유한요소법이 필요하다.

다. 또한, 착자 후 영구자석의 자화분포 해석에 대한 여러 가지 방법이 연구되었으나 그 중에 자성재료의 가장 큰 특징 중에 하나인 히스테리시스 현상을 고려한 프라이자흐 모델이 정확한 방법으로 알려져 있다. 따라서 유한요소법과 프라이자흐 방법을 결합하면 영구자석의 착자 후 자화분포를 정확히 해석할 수 있다.

2.1.1 착자기 회로 설계

자계의 세기에 따라 영구자석의 자화 값이 변하므로 적절한 착자 전류의 선정이 요구된다. 착자 전류는 저항, 인덕턴스, 커패시턴스의 값에 따라 전류의 양상이 달라진다. 따라서 기자력을 증가시키기 위해서 권선의 턴 수를 작게 하고, 단면적을 크게 하면, 저항과 인덕턴스가 작아지게 되고, 그에 따라 큰 전류가 발생한다. 따라서 착자 자속을 위한 기자력을 크게 발생하도록 결정한다. 또한, 충전전압과 정전용량은 착자기가 공급하는 총 에너지량을 구하여 결정한다.

2.1.2 실험계획법을 이용한 착자 요크 최적 설계

기존의 착자 시스템과는 달리 정현적 자화분포를 갖는 착자 시스템 설계의 경우에는 착자기 용량뿐만 아니라 착자 요크 철심 형상이 매우 중요하다. 지금까지는 시행착오법(trial and error method)을 통한 설계로 인하여 많은 설계시간을 요구함은 물론, 보다 정현적인 공극 자속밀도를 구현하는 착자 시스템의 설계가 쉽지 않았다 [3]. 따라서 실험계획법 중의 하나인 요인배치법과 2차원 유한요소 시뮬레이션을 통해 정현적 공극 자속밀도를 갖는 착자 요크 철심 형상을 최적 설계한다. 그림 1은 착자 요크 설계 순서도를 나타내고 있다.

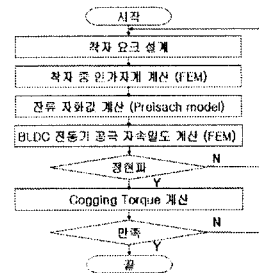


그림 1 착자 요크 설계 순서도

요인배치법에 의한 실험을 요인 실험(factorial experiment)이라고 하고, 요인실험에서는 모든 요인효과 (인자의 효과와 교호작용)를 추정할 수 있다는 장점이 있다. 실험계획 초기에 관련된 인자가 많을 때 핵심 인자를 찾아내는데 좋은 기법(screening)이다. 중요한 인자 중에서 최적치를 찾아주고, 최적치 주위에서 변화를 알

아볼 수도 있다. 그림 2는 FEM 정자계 해석에 의한 착자 요크(1/16 모델)에서의 자속선도를 나타내고 있으며, 이를 통해 극 형상에 따라 자속밀도 분포가 정현파가 될 것을 예상할 수 있다. 따라서 극 형상 중 경험치를 바탕으로 극 반경과 극 길이 및 극 폭을 설계변수로 선정하고, 이때 목적함수는 FFT(Fast Fourier transform) 분석을 통한 기본과 성분으로 한다. 표 1은 설계변수를 나타내고 있다.

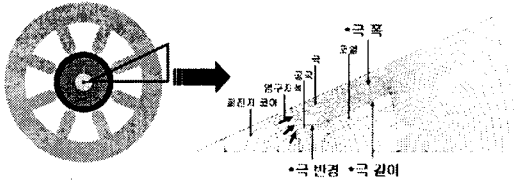
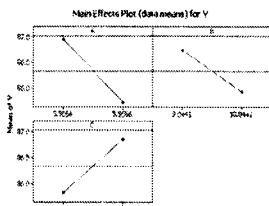


그림 2 정자계 해석에 의한 자속선도(1/16 모델)

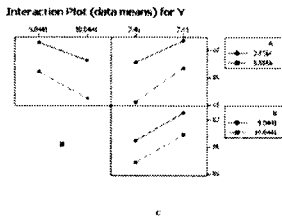
표 1 설계 변수

수준	1	2
A(극 반경)	3.5566mm	5.5566mm
B(극 길이)	9.0441mm	10.0441mm
C(극 폭)	7.4119mm	7.8150mm

통계용 소프트웨어인 미니탭(MINITAB)을 이용한 요인 플롯 최적을 통해 2의 3승 요인배치법으로 총 8번의 실험을 한다. 그림 3에서 보는 바와 같이 주 효과 분석결과 경험치를 바탕으로 한 설계 변수의 선정이 타당함을 알 수 가 있으며, 교호작용 효과 분석결과 교호작용이 없음을 확인할 수 있다. 또한 입방체 플롯 분석을 통해 극 반경은 3.5566mm일 때, 극 길이는 10.0441mm일 때, 극 폭은 7.81mm일 때 최적 조건임을 그림 4에서 나타내고 있다. 따라서 입방체 플롯 분석으로 얻은 최적 조건을 통해 각 설계변수의 범위를 좁혀서 재설계변수를 선정한다. 재설계결과 극 반경이 3.4294mm일 때, 극 길이가 9.3804mm일 때, 극 폭이 7.9832mm일 때 그림 5에서 보는 바와 같이 슬롯이 없다고 가정된 상태에서 공극자속밀도의 FFT 분석 결과 93.02%의 기본과 성분을 가짐을 알 수가 있다.



(a) 주 효과 분석



(b) 교호작용 효과 분석

그림 3 주 효과 그림과 교호작용 효과 분석

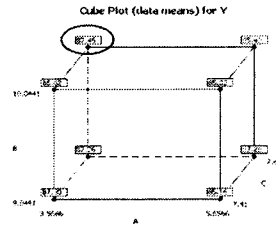


그림 4 입방체 플롯 분석

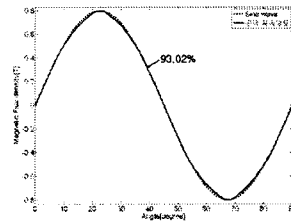


그림 5 정현적 공극 자속밀도

3. 제작 및 실험

3.1 착자 요크 제작 및 표면 자속밀도 평가

표 2는 설계된 착자 시스템의 제원을 나타낸다.

표 2 설계된 착자 시스템 제원

항목	세부항목	내용	단위
착자기	충전전압	1500	V
	정전용량	2000	μF
착자 요크	공극길이	0.1	mm
	극 폭	7.9832	mm
	극 길이	9.3804	mm
	극 표면의 반경	3.4294	mm
	요크 폭	10	mm
	축 방향 길이	32	mm
	턴 수	5	Turn
권선 직경	2	mm	

착자 해석 방법의 타당성을 입증하기 위해 그림 6에서 보는 바와 같이 시뮬레이션을 통한 표면 자속밀도 값과 실험을 통한 표면 자속밀도 값을 비교 한다. 비교 결과 해석치와 실험치의 오차가 적음을 확인할 수 있다. 따라서 착자 해석 방법의 타당성을 입증할 수 있다. 그림 7은 초기모델과 개선모델의 표면 자속밀도 실험치 비교를 나타내고 있다. 초기모델은 사다리꼴 파형과 유사함을 알 수 있고, 개선모델은 정현적 임을 알 수 있으며, 표면 자속밀도의 크기도 개선모델이 약 23% 더 증가함을 알 수 있다.

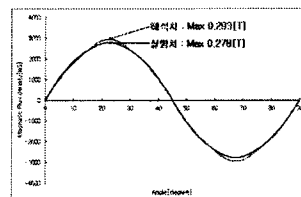


그림 6 해석치와 실험치의 표면 자속밀도 비교

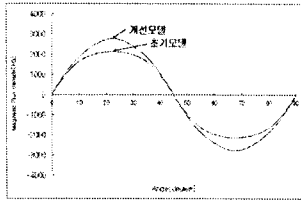


그림 7 표면 자속밀도 실험치 비교

3.2 코깅 토크 및 진동·소음 분석

설계한 착자 시스템에 의해 착자 시킨 영구자석을 연구대상 BLDC 전동기의 회전자에 사용하여, 코깅 토크 및 진동·소음 실험을 행하였다. 그림 8은 초기모델과 개선모델의 코깅 토크 실험치를 나타낸다. 연구대상 모델은 6슬롯 8극 구조이기 때문에 기계각 90도를 기준으로 했을 때 코깅 토크 주기는 6주기를 가지며, 개선모델의 코깅 토크 최대치는 초기모델에 비하여 49.21% 감소됨을 알 수 있다.

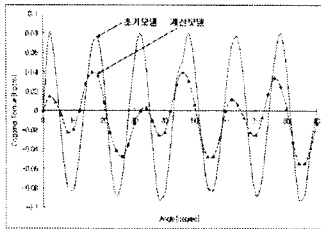
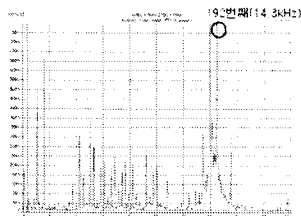


그림 8 코깅 토크 실험치 비교

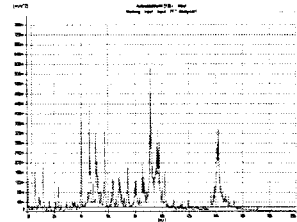
실험대상 모델의 무부하 구동상태에서 계측된 진동·소음 측정결과는 각각 그림 9 및 10과 같다.

진동·소음의 측정결과를 바탕으로 진동과 소음의 가진원을 분석하기 위해 식(1)을 이용해 계산한다. 본 모델에서 360도를 극수와 슬롯수의 최소공배수인 24로 나눈 15도가 코깅 토크 기본 각도 주파수가 된다. 즉, 코깅 토크의 기본 주파수는 전동기 회전 주파수의 24배수차에 해당함을 확인할 수 있다. 계산 결과 그림9는 특히 기본 속도 주파수의 192번째(14.3kHz)에서 큰 고조파성분이 발생함을 알 수 있고, 그림 10에서는 216번째(16.1kHz), 240번째(17.9kHz), 264번째(19.7kHz)에서 큰 고조파성분이 발생함을 알 수 있다. 따라서 진동·소음의 전자기적 요인인 코깅 토크 고조파 성분이 발생하여 전동기의 진동·소음의 가진원으로 작용함을 확인할 수 있다. 따라서 그림 9에서 보는 바와 같이 진동의 경우 초기 모델 대비 개선 모델은 44.68%가 감소되어 1.77m/s²임을 확인할 수 있다. 또한, 그림 10에서 보는 바와 같이 소음의 경우 초기 모델 대비 개선 모델은 20.8%가 감소되어 44.6dB(A)임을 확인할 수 있다[4].

$$f = \frac{kN}{60}, \text{ where } \begin{cases} k: \text{정수}(1,2,3 \dots) \\ N: \text{rpm} \end{cases} \quad (1)$$

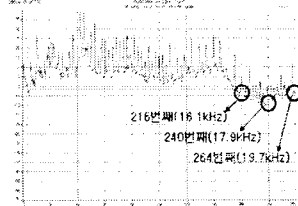


(a) 초기모델

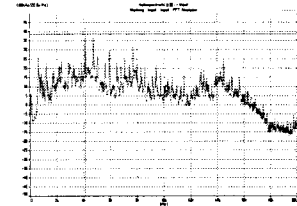


(b) 개선모델

그림 9 진동 실험치 비교



(a) 초기모델



(b) 개선모델

그림 10 소음 실험치 비교

4. 결 론

본 논문에서는 SPM type BLDC 전동기의 정현적 공급 자속밀도 분포를 위한 영구자석의 착자 시스템을 설계하여 진동·소음의 주요 원인이 되는 코깅 토크를 저감하였다. 종래의 시행착오법을 통한 착자 요크 철심 형상 설계의 단점들을 실험계획법 중의 하나인 요인배치법을 이용하여 설계시간 단축과 정현적 자화분포를 만드는 착자 요크 철심 형상을 최적화 하였다. 표면자속밀도 해석치와 실험치를 비교하여 착자 해석 방법의 타당성을 입증하였으며, 코깅 토크 실험결과 초기모델 대비 49.21%가 감소됨을 확인할 수 있었다. 또한, 진동·소음의 실험 결과로부터 코깅 토크 고조파 성분의 저감에 의해 진동이 44.68%, 소음이 20.8%가 감소됨을 확인 하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Thomas M. Jahns and Wen L. Soong, "Pulsating Torque Minimization Techniques for Permanent Magnet AC Motor Drives-A Review", IEEE Trans. on Industrial Electronics. Vol. 43, NO. 2, pp. 321-330, April 1996
- [2] K. Atallah and D. Howe, "The Application of Halbach Cylinders Brushless AC Servo Motors", IEEE Trans. on Magnetics. Vol. 34, NO. 4, pp. 2060-2062, July 1998
- [3] 김사무엘, 정승호, 권병일, 이철규, "BLDC 전동기의 정현적 공급 자속밀도 구현에 의한 코깅 토크 저감", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, p140~142, 2006
- [4] 김경태, 황상문 "세그먼트 극을 가진 BLDC 전동기의 가진력에 관한 연구", 대한전기학회 논문지 제48권, 제10호, B권, p 530~536, 1999