

코깅토크 저감을 위한 IPM type BLDC전동기의 자속장벽 형상 설계

박현각*, 양병렬**, 이상봉*, 권병일*
*한양대학교, **삼성전자

Design of Flux Barrier in IPM type BLDC motor for Reducing Cogging Torque

Hyun Kag Park*, Byoung Yull Yang**, Sang Bong Rhee*, Byung Il Kwon*
*Hanyang University, **Samsung Electronics

Abstract - This paper proposes a novel design method for flux barrier which built in q-axis in rotor of IPM type BLDC motor. It aims to reduce the motor vibration with reduced cogging torque and lessened torque ripple by the sinusoidal waveform distribution of flux generated in the permanent magnet, which results from designed flux barriers. Design of flux barrier optimized using the Taguchi methods that considered multiple quality characteristics, such as cogging torque, average torque and efficiency are considered. The result of proposed method is compared and verified with 2D finite element method (FEM).

1. 서 론

영구자석매입형(IPM) 전동기는 영구자석이 회전자에 매입되어있는 구조로 인해 회전자의 d축 인덕턴스보다 q축 인덕턴스가 크게 나타나 영구자석에 의한 토크 외에도 추가적인 릴럭턴스 토크를 얻을 수 있는 장점이 있다. 그러나 릴럭턴스 차이에 의한 코깅토크가 크게 나타나 토크 리플이 증가하므로 전동기 운전 시 진동 및 소음이 발생하는 단점을 갖는다. 따라서 토크 리플 저감을 위한 방법으로 q축으로 흐르는 자속의 경로를 조절하여 d축 인덕턴스를 증가시켜 공극의 자속밀도를 정현 적으로 분포시키는 자속장벽(flux barrier)에 관한 연구와 설계기법이 다수 제안되었으나, 회전자 표면에 자속장벽 설치로 인한 자속의 누설로 자속 량의 감소와 그에 따른, 역기전력, 평균토크, 그리고 전체적인 효율을 감소시킨다[1-3].

본 논문에서는 기존의 자속장벽의 문제점을 보완하고자 새로운 형상의 자속장벽을 제안한다. 또한 실험계획법의 대표적인 방법인 다구찌 실험계획법을 사용하여 제안한 자속장벽의 최적형상 설계를 실시한다. 최적화를 위해 자속장벽 형상 결정 인자를 설계변수로 선택하며 코깅토크, 평균토크, 효율을 동시에 고려하는 다중목적함수를 정식화하고 분석하여 최적의 설계형상을 찾아내었다. 최적의 설계 결과는 2차원 유한요소해석법을 통해 검증한다.

2. 해석 모델

그림 1.(a)는 본 논문의 연구대상 초기모델로서 IPM type BLDC 전동기의 단면도를 나타낸다. 초기모델은 4극수를 가지며, 고정자 권선의 권선방법은 분포권으로 되어있다. 다음의 표 1은 초기모델의 설계사양을 나타낸다.

<표 1> 초기모델의 사양

구 분	사 양	구 분	사 양
DC 전압	310 [V]	극 수	4 [poles]
정격속도	3,000 [rpm]	병렬회로수	1 [parallel]
공극길이	0.7 [mm]	1 상당 직렬턴수	440 [turns]
상 수	3[phases]	영구자석	Nd소결[Br=1.1T]

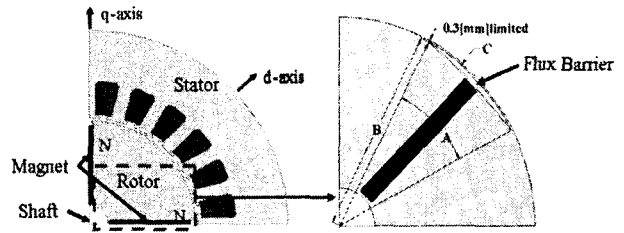
3. 자속장벽 최적 형상 설계를 위한 다구찌 실험계획법

3.1 제안된 자속장벽의 설계방법

기존의 자속장벽은 q축의 영구자석 끝단부분에 의해 고정자 치에서 발생하는 자속의 포화를 저감시키고 회전자의 q축과 d축 사이에 자속장벽을 삽입함으로써 q축의 자속밀도를 낮추어 코깅토크를 저감하는 방식을 취하고 있으나, 회전자 표면에 불필요하게 큰 공기영역을 만들어 자속의 누설 량이 큰 문제점을 안고 있어 효율적인 방법이라 볼 수 없다[1-3]. 따라서 기존 자속장벽의 문제점을 보완하고자 q축에 직접 자속장벽을 설치하는 방법을 제안한다. 제안한 자속장벽은 그림 1.(a)에서 회전자의 d축을 기준으로 q축 방향으로 갈수록 자속밀도가 작아지도록 하여, 공극 자속밀도의 분포가 정현 적으로 나타나도록 극 피치를 고려하여 자속장벽의 폭을 결정하고, 자속장벽의 형상은 영구자석의 끝단부분에 의해 발생하는 고정자 치의 포화 및 손실을 저감하기 위하여 q축 부분의 자속장벽의 두께를 조절하여 자속장벽의 형상을 결정한다. 제안된 자속장벽의 형상은 그림 1.(b)와 같이 회전자의 q축에 자속장벽을 삽입함으로써 자속을 d축으로 집중시키는 형상을 갖게 된다.

3.2 목적함수 및 설계변수 선정

본 논문에서는 IPM type BLDC 전동기의 코깅토크, 평균토크, 효율 등의 3가지를 목적함수로 정하고 설계변수를 선택하였다. 다구찌 실험계획법에서



<그림 1> 기존모델과 제안된 자속장벽의 형상(1/4 모델)

사용하는 설계인자는 제어인자, 잠음인자, 신호인자를 말할 수 있다[4]. 제어 인자로는 q축으로 흐르는 자속을 조절하여 공극자속밀도의 분포를 정현적인 분포로 만들 수 있도록 자속장벽의 위치 및 형상을 결정할 수 있는 인자로 자속장벽의 폭[deg]과 회전자 중심점으로 부터 자속장벽 양끝단의 거리[mm], 자속장벽의 곡률을 선정하였으며, 인자의 수준 수는 3수준으로 하였다. 잠음인자는 유한요소 해석 시 해석시간의 간격에 따른 전동기 특성 값의 오차로 인자의 수준을 기계각 0.5[°]와 0.2[°]로 2수준으로 선정하였다. 자속장벽과 회전자의 외경과의 거리는 기계적인 강도 및 가공의 용이성을 위하여 최소 0.3[mm]로 제한을 두었다. 또한 자속장벽의 설치를 위해 영구자석의 체적을 유지한 상태에서 영구자석의 길이를 26.3[mm]에서 25.3[mm]로 변화시켰으며 영구자석의 폭은 2.7[mm]에서 2.8[mm]로 증가시켰다. 그림 1에서는 기존모델과 본 논문에서 제안하는 자속장벽의 형상을 나타내었으며, 다음의 표 2는 본 논문에서 사용한 설계변수와 수준 수를 나타낸다.

<표 2> 제어 인자와 잠음 인자

제어 인자		수준 1	수준 2	수준 3
A	자속장벽의 폭(deg.)	28	30	32
B	자속장벽의 끝부분 위치의 길이(mm)	32.8	32.9	33
C	자속장벽의 곡률	0.0254	0.0275	0.0300
잠음 인자		수준 1	수준 2	-
N	해석 시간의 간격(기계각)	0.5°	0.2°	-

3.3 직교배열표에 의한 실험

본 논문은 3개의 인자 3수준을 고려하기 위하여 L9의 직교배열표를 사용하여 표 3에 인자와 인자별 수준을 할당한 직교배열표를 나타내었다. 총 9번의 실험으로 코깅토크, 평균토크, 효율등 목적함수의 최적 값을 2차원 유한요소해석을 통하여 도출하였다.

<표 3> L9 직교배열표

	제어인자			잠음인자		
	A	B	C	e	N1[sec.]	N2[sec.]
1	1	1	1	1	Y11	Y12
2	1	2	2	2	Y21	Y22
3	1	3	3	3	Y31	Y32
4	2	1	2	3	Y41	Y42
5	2	2	3	1	Y51	Y52
6	2	3	1	2	Y61	Y62
7	3	1	3	2	Y71	Y72
8	3	2	1	3	Y81	Y82
9	3	3	2	1	Y91	Y92

3.4 S/N비 분석 및 다목적치 고려 방법

다구찌 실험계획법에서 성능적으로 S/N비를 사용한다. 존재하는 모든 품질 특성치가 클수록 좋은 망대특성, 작을수록 좋은 망소특성, 그리고 특정한 목표치가 주어져 있는 망목적성 등이 있다[4]. 코깅토크는 망소특성을 나타내며, 평균토크와 효율은 망대특성을 갖는다. 아래 식(1), (2)에 망소,

망대 특성의 SN비 식을 나타내었다.

망소특성인 경우:

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

망대특성인 경우:

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

여기서, n은 실험결과 값의 개수, y_i 는 실험결과 값을 나타낸다.

<표 4> L9 직교배열표에 따른 2차원유한요소 해석 값과 S/N비 (평균토크, 효율 3000rpm에서 해석)

	코깅토크			평균토크			효율		
	N1[Nm]	N2[Nm]	S/N비	N1[Nm]	N2[Nm]	S/N비	N1	N2	S/N비
1	0.0485	0.0483	26.239	0.7036	0.7035	2.9912	0.8122	0.8123	4.2152
2	0.08424	0.0842	21.4910	0.68812	0.68812	2.5177	0.82821	0.82821	4.3834
3	0.11748	0.11694	18.6240	0.63321	0.63322	1.9551	0.84404	0.84405	4.5479
4	0.02765	0.02751	31.1854	0.70083	0.70089	2.9328	0.81682	0.81683	4.2632
5	0.03094	0.03086	25.8800	0.65846	0.65846	2.3911	0.83455	0.83455	4.4488
6	0.05384	0.05274	25.5430	0.67208	0.67208	2.5630	0.82919	0.82920	4.3687
7	0.07141	0.07141	22.9246	0.68882	0.68881	2.7353	0.82422	0.82423	4.3415
8	0.07346	0.07348	22.6800	0.70838	0.70839	3.0260	0.81591	0.81591	4.2534
9	0.04736	0.04738	26.3825	0.68882	0.68881	2.5008	0.83385	0.83385	4.4424

코깅토크, 평균토크, 효율 등의 세 가지 특성을 동시에 고려하기 위한 방법으로 SN비 선형모형을 이용한 최적화 방안을 적용하였다. 위의 표 4에 명시한 서로 다른 크기를 갖는 각각의 SN비를 평균과 표준편차를 사용하여 표준화를 실시한다. 표준화된 SN비는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$SN_p^* = \frac{SN_p - \overline{SN_p}}{s.d.(SN_p)} \quad (3)$$

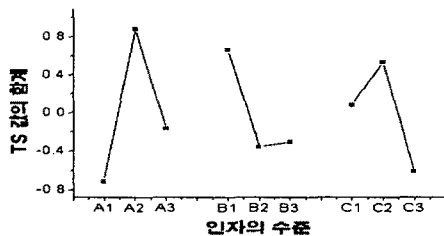
모든 특성에 대하여 SN비는 크면 클수록 좋게 만들어진 성능척도임을 고려하여, 다중목적함수를 고려할 경우 제어인자의 동시 최적조건을 찾기 위하여 표준화된 SN비의 선형모형에 가중치를 적용한 성능척도(TS)를 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$TS = \sum_{i=1}^p w_i SN_i^* \quad (4)$$

여기서, $\overline{SN_p}$ 는 p번째 특성의 평균값, $s.d.(SN_p)$ 는 p번째 특성의 표준편차, w_i 는 각 특성의 가중치로 $\sum_{i=1}^p w_i = 1$ (가중치의 합은 1이다.)를 나타낸다[5].

3.5 다목적치 고려한 최적화 값의 예측 및 해석 결과

본 논문에서는 전동기의 효율 향상에 관심을 두고 코깅토크를 저감하였다. 최적의 조건으로 코깅토크에 대한 가중치 0.15, 평균토크에 대한 가중치 0.25, 효율에 관한 가중치 0.6일 때 최적의 전동기 동작 특성을 나타내었다. 이때 최적조건으로 예측된 인자의 수준은 A2, B3, C3로 그림 2에 인자의 주 효과를 나타내었다. SN비의 예측 값과 검증 값을 표 5에 나타내었다. TS분석을 통해 얻어진 최적조건을 이용하여 2차원 유한요소해석을 수행한 후, 해석결과를 이용하여 예측결과의 타당성을 검증하였다.



<그림 2> 코깅토크, 평균토크, 효율을 동시에 고려한 TS의 주 효과 그래프

<표 5> 예측 값과 검증 값

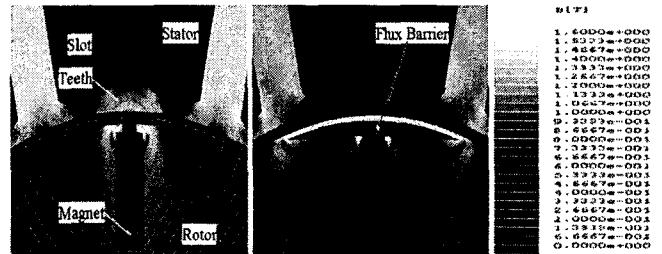
	Prediction	Confirmation
최적 조건(a2b3c3)	0.637	0.617

기존 모델과 제안된 모델(a2b3c3)의 특성비교를 다음의 표 6에 나타내었다. 코깅토크는 약0.4547[Nm]에서 0.0697[Nm]로 약 84.67[%] 저감하였으며, 평균토크는 약 2.44[%] 증가 하였다. 토크리플은 0.5374[Nm]에서 0.2179[Nm]로 약 59.45[%] 저감하였다. 또한, 앞서 언급한 영구자석의 끝단부에서 해고정자 치에서 발생하는 포화 및 손실을 자속장벽을 설치함으로써 그림 3과 같이 효과적으로 저감하였으며, 평균토크의 증가로 인하여 효율이

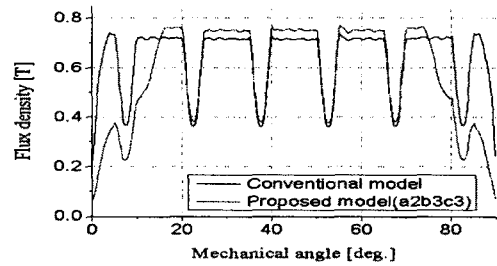
약 1.43[%] 증가하였다. 그림 4는 한 극에서 공극자속밀도 분포파형을 나타내며, 제안된 모델이 초기모델에 비해 보다 정현적인 공극자속밀도 분포파형을 갖는 결과를 얻었다. 고정자 권선방식이 분포권인 초기모델에 자속장벽을 설치하여 정현적인 공극자속밀도를 만들어 줌으로써 코깅토크가 그림 5와 같이 효과적으로 저감됨을 확인하였다.

<표 6> 기존모델과 제안모델의 특성비교

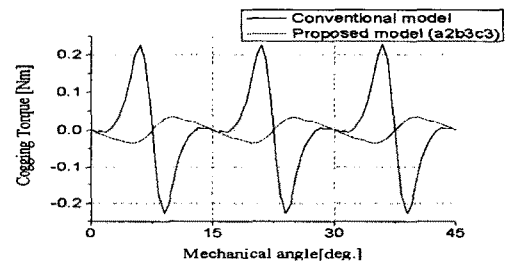
Item	Cogging Torque (peak-to-peak) [Nm]	Average Torque [Nm]	Torque Ripple (peak-to-peak) [Nm]	Efficiency [%]
기존모델	0.4547	0.6197	0.5374	83.17
A2B3C3	0.0697	0.6348	0.2179	84.36



<그림 3> 기존모델과 제안모델의 자속밀도분포 비교



<그림 4> 공극자속밀도 분포파형비교



<그림 5> 코깅토크 파형비교

4. 결 론

본 논문에서는 IPM type BLDC 전동기의 코깅토크를 저감하기 위한 방법으로 회전자 q축의 영구자석 끝단부에 자속장벽을 설치하는 형상을 제안하였다. 또한, 다구찌 실험계획법을 사용하여, 자속장벽의 형상 및 위치선정에 있어서 코깅토크, 평균토크, 효율 등의 다중목적치를 TS분석을 통하여 동시에 고려하여 최적의 설계 값을 도출하였으며, 2차원 유한요소해석을 통하여 제안된 방법의 유용성을 검증하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 양병렬, 윤근영, 권병일, "IPM type BLDC 전동기의 자속장벽 설치에 따른 코깅 토크 저감", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, B권, pp. 64-66, Oct. 2004.
- [2] 박현각, 양병렬, 권병일, "다구찌 기법을 이용한 IPM type BLDC 전동기의 토크리플 저감을 위한 자속장벽설계", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, B권, pp. 158-160, Apr. 2006.
- [3] N Bianchi, S Bolognani, "PERFORMANCE ANALYSIS OF AN IPM MOTOR WITH SEGMENTED ROTOR FOR FLUX-WEAKENING APPLICATION", IEE 1999, no 468, pp. 49 - 53, 1999.
- [4] Madhav S.Phadke, AT&T Bell Laboratories, Quality Engineering Using Robust Design. Prentice Hall PTR, 1989.
- [5] 권용만, 손영남, "다목적 로버스트 파라미터 설계에서 신호 대 잡음비를 사용한 최적화 방안", Journal of the Korean Data Analysis Society, Vol 5, No3, pp. 541-548, 2003.