

다구찌 기법을 이용한 IPM type BLDC 전동기의 토크리플 저감을 위한 자속장벽설계

박현각*, 양병렬**, 권병일*
 *한양대학교, **삼성전자

Flux Barrier Design for Reducing Torque Ripple in IPM type BLDC motor
 Using the Taguchi Methods

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

Abstract - The structure of interior permanent magnet type brushless DC motor (IPM type BLDC motor) has high saliency ratios that produce additional reluctance torque. But this structure has a significant cogging torque that may cause acoustic noise and vibration. In this paper describes an optimization of flux barrier in order to reduce cogging torque and torque ripple in IPM type BLDC motor using the Taguchi methods. The optimal design considered noises such as manufacturing tolerances of permanent magnet size. So, optimal design ensures that torque performance is insensitive to noise.

매우 크게 발생하므로 토크리플 또한 크게 발생한다. 따라서, 코깅토크와 토크리플의 저감에 대한 방법을 강구하여야 한다. 표 1은 초기모델의 사양을 나타낸 것이다.

표 1 초기모델의 사양

구분	사양	구분	사양
DC 전압	310 [V]	극 수	4 [poles]
정격속도	3,000 [rpm]	병렬회로수	1 [parallel]
공극길이	0.7 [mm]	상당직렬턴수	440 [turns]
상 수	3[phases]	영구자석	Nd소결(Br=1.1T)

1. 서론

영구자석매입형(IPM) 전동기는 영구자석이 회전자에 매입되어있는 관계로 회전자의 d축 인덕턴스보다 q축 인덕턴스가 크게 나타나 영구자석에 의한 토크 외에 또 추가적인 릴럭턴스 토크를 얻을 수 있는 장점이 있다. 그러나 릴럭턴스 차이에 의한 코깅토크가 크게 나타나 토크 리플이 증가하므로 전동기 운전 시 진동 및 소음이 크게 나타난다. 따라서 토크리플 저감을 위한 방법으로 q축으로 흐르는 자속의 경로를 조절하여 d축 인덕턴스를 증가시켜 공극의 자속밀도를 정현적으로 만드는 자속장벽에 대한 설계기법이 다수 제안되었다[1-3]. 자속장벽의 설치는 역기전력을 감소시켜, 전동기의 평균 토크를 감소시키는 단점이 있다. 따라서, 역기전력의 감소를 최소화 하며 토크리플을 저감시키는 방법에 대하여 고려해야 한다.

2.2 다구찌 기법(Taguchi method)

다구찌 방법은 실험계획법중의 하나로 근래에 들어 많이 이용되기 시작하였는데 고전적인 실험 계획법이 고도의 통계지식을 필요 하는 반면에 이 방법은 특별한 통계 지식이 없이도 생산 현장에 쉽게 적용할 수 있는 장점이 있다. 다구찌 방법은 부분 실시법(fractional factorial experiment)에 근거한 직교 배열(orthogonal array)을 이용하여 최소한의 실험으로 전조합 실시법(full factorial experiment)의 효과를 내기 위해 고안 되었다. 설계자는 우선 목적함수 및 설계변수를 정하고 적절한 직교배열을 선정하여 여기에 따라 실험을 한 후 실험 결과를 해석하여 평균분석(Analysis of Means), 분산분석(Analysis of Variation) 통하여 제어 인자의 효과 및 최적의 값을 찾을 수 있는 방법이다[4].

본 논문에서는 실험계획법(Experimental design) 중 산업 전반에 쓰이는 다구찌 기법을 사용하여, 진동, 소음의 주원인인 토크리플 저감 위해 자속장벽의 위치 및 형상 최적화를 위해 5가지 제어인자의 2³가지 수준을 적용하기 위하여 복합 인자법을 사용하여 2²×3³번의 실험을 9번의 실험으로 대체하였다[4]. 영구자석 설계 시 가공오차를 잡음 인자로 적용하여 가공오차로 인한 역기전력, 코깅토크의 변동을 고려하여 강건 설계를 실시하고 2차원 유한요소해석을 통하여 제안한 방법의 타당성을 검증한다.

2.2.1 제어인자와 잡음인자의 설계

제어인자란 설계자가 통제할 수 있는 인자로 특성에 영향을 미치는 인자를 말하며, 잡음인자란 설계자가 통제할 수 없는 인자로 가공오차와 같은 인자를 말한다. 본 논문에서는 자속장벽의 위치 및 형상을 결정하기 위하여, 5개의 제어인자와 1개의 잡음인자를 선택하였다. 각 인자는 그림 1과 같이 1/8모델로 양방향으로 동일하게 고려된다. A인자는 회전자 외경과 자속장벽사이의 거리, B인자는 자속장벽의 두께, C인자는 자속장벽의 끝부분 위치의 각도, D인자는 자속장벽의 곡률로 호의 반지름분의 1로 나타낼 수 있다.

2. 자속장벽의 위치 및 형상설계

2.1 해석 모델

영구자석 매입형 전동기는 영구자석이 회전자에 매입되어 있는 형태로 철심에서 자기포화가 심하여 자기 회로적으로 불평형을 이루며, 그 결과 d축, q축의 인덕턴스 차가 매우 심하게 나타나는 구조를 이루게 되어, 자기적인 토크 외에 릴럭턴스 토크까지 이용할 수 있어 단위체적당 높은 출력을 낼 수 있다. 그러나, 릴럭턴스 차에 의한 코깅토크가 영구자석 표면 부착형 전동기에 비하여

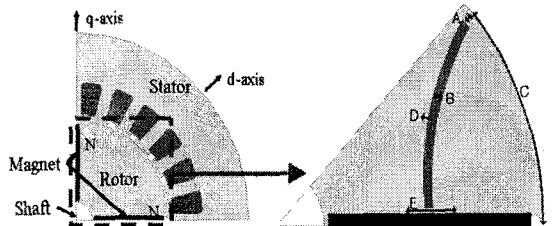


그림 1 초기 모델의 형상 및 자속장벽설계인자 E인자는 영구자석의 길이 비율에 따른 분할 위치로 자속장벽의 시작점을 나타낸다. 영구자석으로부터 자속장벽의 거리는 누설을 고려하여 0.5[mm]로 고정 하였다.

각 인자의 수준과 범위는 표 2와 같으며, 잡음인자로 영구자석의 가공오차를 영구자석의 길이방향으로 ± 0.1 [mm]로 3개의 수준으로 고려하였다.

표 2 제어인자 및 잡음인자의 수준

제어 인자		Level 1	Level 2	Level 3
A	회전자의경과 자속장벽의 거리(mm)	0.5	1.0	-
B	자속장벽의 두께(mm)	0.5	0.8	-
C	자속장벽의 끝부분 위치의 각도(deg.)	42	43	44
D	자속장벽의 곡률	0	0.0088	0.0175
E	영구자석길이 비율 대 자속장벽의 시작위치(%)	33.3	50	66.6
잡음 인자		Level 1	Level 2	Level 3
N	영구자석의 길이방향 가공오차(mm)	-0.1	0	+0.1

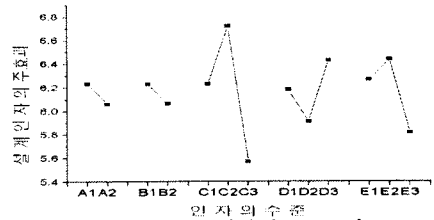


그림 2 설계인자의 주 효과

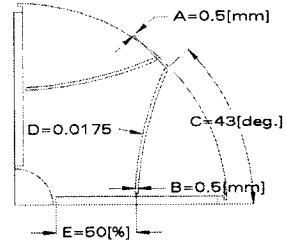


그림 3 A1B1C2D3E2의 자속장벽 형상(1/4 모델)

2.2.2 직교 배열에 의한 실험

표 2와 같이 5가지의 제어인자를 선택하고 L_9 의 직교 배열을 사용하여 복합 인자법을 이용하여 2수준인자 2개와 3수준 인자3개를 고려 할 수 있도록 직교배열을 변형하였다. 직교배열에 따라 2차원 유한요소 해석을 통하여 표 3과 같은 토크리플 값을 얻어 토크리플을 최소화 한다는 목표로 망소특성(식 (1))을 사용하여 토크리플의 S/N비를 얻어 내었다. 각 인자의 교호작용은 고려하지 않는다.

$$S/NRatio = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right] \quad (1)$$

표 3 직교배열 및 토크리플에 관한 망소특성

	A	B	C	D	E	S/N비[dB]	N1[Nm]	N2[Nm]	N3[Nm]
1	1	1	1	1	1	6.5579	0.4680	0.4697	0.4722
2	1	1	2	2	2	6.9485	0.4469	0.4517	0.4494
3	1	1	3	3	3	5.6939	0.5175	0.5258	0.5141
4	1	2	1	2	3	5.5012	0.5342	0.5308	0.5275
5	1	2	2	3	1	6.9595	0.4459	0.4505	0.4500
6	1	2	3	1	2	5.7356	0.5138	0.5157	0.5205
7	2	1	1	3	2	6.6386	0.4583	0.4635	0.4750
8	2	1	2	1	3	6.2562	0.4846	0.4866	0.4887
9	2	1	3	2	1	5.2840	0.5424	0.5429	0.5474

2.2.3 평균 분석(Analysis of Means)

자속장벽의 위치 및 설계의 인자 수준 효과는 전체 평균으로 그 인자수준에 의한 결과의 편차로 정의된다. 식 (2)와 같이 각 수준에서 S/N비의 평균 합을 구하여 각 인자의 수준별 효과 나타낸다.

$$m_{C_i} = \frac{1}{3} [SN_2 + SN_5 + SN_8] \quad (2)$$

토크리플이 최소인 값은 각 인자별 S/N비의 평균 합이 최대인 값을 선택함으로써 최적의 해를 얻을 수가 있다. 여기서 토크리플이 최소인 최적 값 A1B1C2D3E2를 얻을 수 있다. A1B1C2D3E2의 형상은 그림 3과 같이 나타낸다.

2.2.4 분산 분석(Analysis of Variance)

서로 다른 인자들이 토크리플에 영향을 주는 정도는 서로 다르다. 인자효과들의 상대적 크기는 그림 2에 나타낸 각 인자수준에 대해 평균 S/N비 값으로 판단할 수 있으며, 이 상대적 효과는 분산을 분해함으로써 보다 잘 파악할 수 있는데, 이 기법을 분산분석이라 한다. 각 인자의 제곱합을 식 (3) 사용하여 계산하여 각 인자의 상대적인 효과에 대해 분석한다.

$$SSA = 3 \sum_{i=1}^3 (m_{A_i}(SN_i) - m(SN))^2 \quad (3)$$

표 4에 보여지는 것과 같이 자속장벽의 위치 및 형상에 관하여 C인자(자속장벽의 끝부분 위치의 각도)가 63.67[%]로 가장 크게 작용하는 것을 나타낸다. 이것은 자속장벽의 끝단사이의 각과 치폭과의 위치관계에서 기인하는 것으로 슬롯의 치폭보다 심하게 좁아지면 자속의 포화로 인한 추가적인 코깅토크가 발생하여 초기모델의 값보다 큰 경우가 나타난다.

표 4 인자의 영향력 평가

인자	자유도	제곱합	영향력[%]
A	1	0.0600	1.91
B	1	0.0540	1.72
C	2	1.9998	63.67
D	2	0.2025	12.90
E	2	0.3110	19.80

3. 자속장벽 설치시 특성 해석

3.1 특성해석

초기 모델에서 고정자의 권선 사양이 분포권으로 고정자전류에 의한 자속의 형태가 정현적으로 되므로 영구자석에 의한 자속의 분포가 정현적일 때 진동과 소음에 관하여 유리한 토크를 발생시킬 수 있다. 그림 4는 초기모델과 다구찌 기법을 이용하여 얻은 토크리플이 최소인 자속장벽의 조합(A1B1C2D3E2)을 영구자석의 길이 방향으로 25.2[mm], 25.3[mm], 25.4[mm]일때, 공극자속밀도 그래프를 나타낸 것이다. 그림 4에서 나타난 초기모델의 공극자속밀도 분포를 보면 분포파형 양 끝단에서 자속밀도 값이 치솟는 부분이 존재하며, 이것은 전 동기 운전 시 진동과 소음의 원인이 될 수 있다.

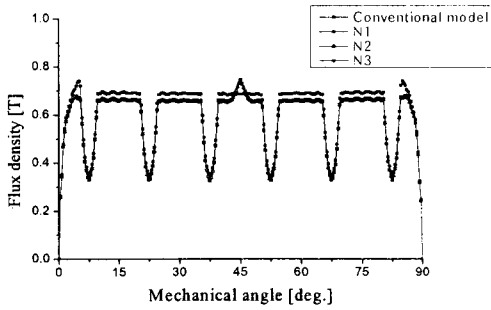


그림 4 초기모델과 A1B1C2D3E2의 공극자속밀도의 분포 파형비교

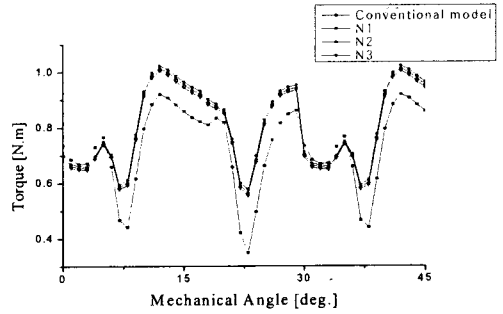


그림 7 초기모델과 A1B1C2D3E2의 토크 파형비교 (speed:3000rpm)

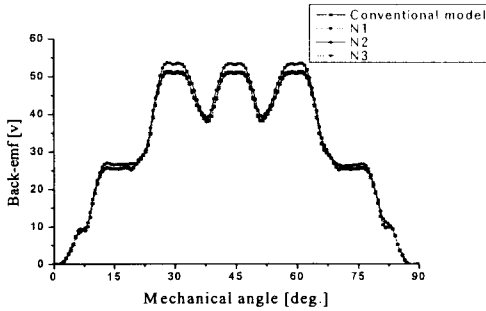


그림 5 초기모델과 A1B1C2D3E2의 역기전력 파형비교

따라서, 회전자의 표면에 자속장벽을 설치함으로써 q축으로 흐르는 자속을 조절하여 공극자속밀도 분포파형 양 끝단에서의 치솟는 부분을 줄여 보다 평형적으로 공극자속밀도를 만들어 진동 및 소음을 저감시킬 수 있다. 그림 5는 자속장벽설치로 인한 자속의 누설로 역기전력의 감소를 보여주고 있다. 약 3.9[%]의 역기전력의 감소되었다. 자속장벽의 설치에 의해 초기모델에 비하여 공극자속밀도의 크기가 약 3.4[%] 감소했으나, 그림 6으로부터 개선전의 초기모델의 코깅토크 peak-peak 값이 0.4331[Nm]이고, 자속장벽설치 최적모델의 코깅토크 peak-peak 값은 0.2964[Nm]로 31.6[%] 감소했다.

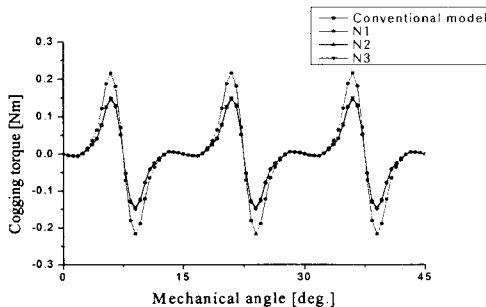


그림 6 초기모델과 A1B1C2D3E2의 코깅토크 파형비교

그림 7로부터, 개선전의 초기모델의 토크리플 peak-peak 값이 0.5688[Nm]에서 자속장벽설치 최적모델의 토크리플 peak-peak 값 0.4483[Nm]으로 약 21.2[%] 감소되었다. 영구자석의 길이를 ± 0.1 [mm]씩 변화를 주어 3수준의 잡음 인자로 선택하여 2차원 유한요소해석 결과는 표 5와 같다.

다구찌 기법을 통하여 얻어낸 조합 A1B1C2D3E2의 자속장벽 형상은 영구자석의 가공오차 범위 내에서 최소의 토크리플을 갖는 강건한 형상임을 표 5로부터 알 수 있다. 또한, 제어인자를 선정할 때 면적에 대한 비율을 고려하여 영구자석의 면적 변화에 따른 최적의 토크리플을 갖는 자속장벽의 형상을 얻었다.

표 5 잡음인자에 따른 특성 해석값

Item	Cogging Torque (peak-to-peak) [Nm]	Average Torque [Nm]	Torque Ripple (peak-to-peak) [Nm]	Efficiency [%]
초기 모델	0.4331	0.7222	0.5688	80.7
A1B1C2D3E2 N1	0.2912	0.8142	0.4457	78.1
A1B1C2D3E2 N2	0.2964	0.8058	0.4483	78.5
A1B1C2D3E2 N3	0.3004	0.7972	0.4495	78.9

3.2 자속장벽 설계에 대한 고찰

자속장벽은 회전자내에서 공기의 장벽을 만들어주어 매질의 투자율 차에 의한 자속의 흐름을 굴절시키는 역할을 하여 자속의 흐름을 조절할 수 있으나, Spoke type BLDC 전동기에서 자속장벽 설치는 그림 4, 5와 표 5의 결과와 같이 자속량을 감소시켜, 역기전력 감소, 그 결과 평균토크의 감소를 가져오며, 전체적으로 효율을 감소시키는 역할을 한다. 따라서 역기전력의 감소를 최소로 하면서 최소의 토크리플을 발생하는 자속장벽의 형상을 고안하는 것이 최선의 문제이다.

4. 결 론

본 논문에서는 IPM type BLDC 전동기의 코깅토크 및 토크리플을 저감하기 위하여 자속장벽을 설치하고 다구찌 기법을 사용하여 토크리플에 관하여 최적화된 자속장벽의 형상을 얻었다. 또한 영구자석의 길이방향 가공 오차를 잡음신호로 사용하여 영구자석의 가공오차에 따른 영구자석의 면적변화에 강건하게 코깅토크와 토크리플을 저감할 수 있는 자속장벽을 2차원 유한요소해석을 통하여 확인하였다.

[참고 문헌]

- [1] Y.Kawaguchi, "A Reduction Method of Cogging Torque for IPMSM.", ICEMS 2005. Volume 1, pp. 248 - 250, Sept. 2005.
- [2] Byoung-Kuk Lee, "Design of Spoke Type BLDC Motors with High Power Density for Traction Applications", IEE E trans, vol.2, pp.1068 - 1074, Oct. 2004.
- [3] 양병렬, 윤근영, 권병일, "IPM type BLDC 전동기의 자속장벽 설치에 따른 코깅 토크오크 저감", 대한 전기학회 추계학술대회 논문집, B권, pp. 64-66, Oct. 2004.
- [4] Madhav S.Phadke, AT&T Bell Laboratories, Quality Engineering Using Robust Design. Prentice Hall PTR, 1989.