

Taguchi Method를 이용한 영구자석 모터의 자속 장벽 설계

양병렬¹, 박현각², 황규운¹, 권병일¹
¹한양대학교, ²모아텍

Modifide Taguchi Method for Novel Flux Barrier Design in IPM Type BLDC Motor

Byoung-yull Yang¹, Hyun-kag Park², Kyu Yun Hwang¹, Byung-il Kwon¹,
¹Hanyang University, ²Moatach Co. LTd.

Abstract - This paper proposes a novel flux barrier in q-axis of rotor in IPM type BLDC motor. The proposed flux barrier can reduce cogging torque and diminish torque ripple by sinusoidal waveform distribution of flux generated in the permanent magnet. To determine the optimal shape of the novel flux barrier, we also propose a modified Taguchi method which considering multiple quality characteristics, such as cogging torque, average torque, and efficiency. The proposed design and method were analyzed by using the 2D finite element method (FEM). Results of the proposed model were compared with initial model.

1. 서 론

영구자석 매입형 브러시리스 전동기(IPM type BLDC motor)는 구조적으로 회전자 내부에 영구자석이 삽입되어 있는 구조이므로, 톨러턴스 토크에 의해 높은 돌극비를 가지고 있어 부가적으로 톨러턴스 토크를 이용함으로써 고효율 특성을 가진다. 그러나 영구자석과 고정자의 돌극 구조에 의해 표면 부차형 브러시리스 전동기와 비교하여, 코깅 토크가 크게 발생되므로 모터의 진동/소음을 향상시키는 원인이 되고, 공극에서 발생하는 잔류 자속 밀도의 분포가 정현적인 분포를 가지지 못해, 회전자가 고속 회전시 홀센서에 의한 감지 오차가 발생하게 되어 회전자의 회전속도 및 위치 변화에 대한 위치정보 오차가 상승하게 된다. 이러한 단점을 보완하기 위하여, 영구자석형 모터의 코깅 토크 저감에 대한 연구가 상당히 진행 되고 있다[1,2]. 특히 GA법, Neural network법, Fuzzy 그리고 다구찌 실험계획법을 이용한 최적화 알고리즘을 적용하여 회전자 형상을 최적화함으로써 코깅 토크를 저감하는 연구가 활발하다[3,4]. 그러나 모터의 여러 가지 목적함수 중 특히 평균 토크, 코깅 토크 그리고 효율 등을 고려한 설계를 하기위해서 목적함수를 균등하게 주었다[5]. 그러나 이러한 방법은 다중목적함수 분석의 3인자 혹은 그이상의 경우에는 정확한 값을 구하기 힘들거나 불가능하다.

본 논문은 다중목적함수를 동시에 만족하는 개선된 다 특성 설계방법을 제안하고, 제안된 방법을 적용한 다구찌 실험계획법을 이용하여 자속장벽을 설계한다. 또한 최적 설계된 모델을 FEM을 이용하여 특성 해석하고, 실제 제작함으로써 제안방법의 타당성을 검증한다.

2. 자속장벽 설계

영구자석 매입형 전동기는 영구자석이 회전자에 매입되어 있는 형태로 철심에서 자기포화가 심하여 자기회로적으로 불 평형이다. 그 결과 d축, q축의 인덕턴스 차가

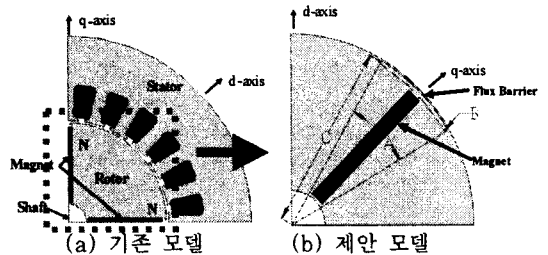


그림 1 초기 모델과 제안 모델의 형상 및 설계인자

매우 심하게 나타는 구조를 이루게 되어, 자기적인토크 외에 톨러턴스 토크까지 이용할 수 있어 단위체적당 높은 출력을 낼 수 있다. 그러나 톨러턴스 차에 의한 코깅 토크가 영구자석 표면 부차형 전동기에 비하여 매우 크게 발생하므로 토크리플 또한 크게 발생한다. 따라서 코깅 토크와 토크리플의 저감에 대한 방법을 강구하여야 한다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 회전자 q축에 직접 자속장벽을 설치하는 방법을 제안한다. 제안한 자속장벽은 그림 1 (a)에서 회전자의 d축을 기준으로 q축 방향으로 갈수록 자속밀도가 작아지도록 하여, 공극 자속밀도가 정현적 분포가 되도록 극 피치를 고려하여 자속장벽의 폭을 결정하고, 자속장벽의 형상은 영구자석의 끝단부분에 의해 발생하는 고정자 치의 포화 및 손실을 저감하기 위하여 q-axis 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. 자속장벽 설계

3.1 자속장벽 설계 변수 및 목적함수 선정

본 논문에서는 영구자석 매입형 BLCD 전동기의 코깅 토크, 평균토크, 효율 등의 3가지를 목적함수로 결정한다. 다구찌 실험계획법에서 사용하는 설계인자는 제어인자, 잠음인자, 신호인자이다. 제어인자로는 q축으로 흐르는 자속을 조절하여 공극자속밀도의 분포를 정현적인 분포로 만들 수 있도록 자속장벽의 위치 및 형상을 결정할 수 있는 인자로 자속장벽의 폭[deg]과 자속장벽의 모서리 곡률[mm] 그리고, 회전자 중심점으로부터 자속장벽 양끝단의 거리[mm]로 선정하였으며, 인자의 수준 수는 3수준으로 하였다. 잠음인자는 유한요소 해석 시 해석시간의 간격에 따른 전동기 특성 값의 오차로 인자의 수준을 해석 시간 간격을 50μs와 25μs로 2수준으로 선정하였다. 자속장벽과 회전자의 외경과의 거리는 기계적인 강도 및 가공의 용이성을 위하여 최소 0.3[mm]로 제한을 두었다. 그림 1에서는 기존모델과 본 논문에서 제안하는 자속장벽의 형상을 나타내었다. 표 1은 본 논문에서 사

표 1 제어인자 및 잡음인자의 수준

제어 인자		수준 1	수준 2	수준 3
A	자속장벽의 폭(deg.)	28.0	30.0	32.0
B	자속장벽 모서리 곡률 [mm]	0.25	0.30	0.35
C	자속장벽 끝단 거리 [mm]	32.8	32.9	33.0

잡음 인자		수준 1	수준 2	-
N	해석시간에 대한 오차(sec.)	50 μ s	25 μ s	-

표 2 L9 직교 배열 표

No.	A	B	C
1	28	0.25	32.8
2	28	0.3	32.9
3	28	0.35	33.0
4	30	0.25	32.8
5	30	0.3	32.9
6	30	0.35	33.0
7	32	0.25	32.8
8	32	0.3	32.9
9	32	0.35	33.0

용한 설계변수와 수준 수를 나타내고, 표 2는 L9 직교 배열 표이다. 총 9번의 실험으로 코깅 토크, 평균토크, 효율 등 목적함수의 최적 값을 2차원 유한요소해석을 통하여 도출하였다. 표 2의 직교배열 표를 이용하여 잡음인자를 고려한 후 총 18번의 2차원 유한요소 해석을 통하여 표 3과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 각 실험의 결과 값은 다구찌 실험계획법의 S/N비로 변환되고 이는 다구찌의 로버스트 파라미터설계에서 S/N비를 이용해 품질특성치를 분석할 경우 평균과 변동을 하나로 묶은 성능측도 정보로 사용되어 진다. S/N 비는 다음과 같이 정의되어 진다[1].

1) 품질 특성치가 작으면 작을수록 좋은 망소특성

$$\eta_s = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (1)$$

2) 품질 특성치가 크면 클수록 좋은 망대 특성

$$\eta_t = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (2)$$

표 3 직교배열 표에 의한 2차원 유한요소 해석결과 및 S/N비

No.	코깅 토크 [Nm]			평균 토크 [Nm]			효율 [%]		
	Y1 [Nm]	Y2 [Nm]	S/NR	Y1 [Nm]	Y2 [Nm]	S/NR	Y1	Y2	S/NR
1	0.05572	0.05573	25.07364	0.45655	0.45696	-0.78197	81.7332	81.7333	4.26857
2	0.07905	0.07905	22.04189	0.43544	-1.20275	83.0142	83.0142	83.0142	4.03348
3	0.10444	0.10444	19.62295	0.43443	0.41343	-1.65139	84.2077	84.2078	4.527639
4	0.51061	0.51062	39.99165	0.42800	0.43601	-1.14378	82.7716	82.7716	4.378227
5	0.02902	0.02903	31.69128	0.41622	0.41523	-1.5928	83.9597	83.9598	4.502017
6	0.01431	0.01432	36.88452	0.45729	0.45730	-0.77553	81.6589	81.6590	4.290670
7	0.11089	0.11089	19.11925	0.41904	0.41904	-1.53431	83.6599	83.6599	4.470241
8	0.12964	0.12965	17.74475	0.45998	0.45999	-0.74337	81.3240	81.3201	4.224975
9	0.09793	0.09793	20.18144	0.43768	0.43768	-1.15071	82.5659	82.5660	4.356014

3.2 개선된 다중목적함수를 위한 SN비 개선

전동기 설계에서 동시에 고려해야 할 특성치가 여러 가지 있다. 다구찌 실험계획법의 일반적인 방법은 각각의 목적함수에 대한 SN비를 구한 후 각 SN비의 합을 이용하여 특성값을 구하게 된다. 이때 여러 가지 특성값을 동시에 구하게 되면 모든 특성값을 만족시키지 못하고, 일부의 값만 만족하거나 최적값을 찾지 못하는 경우가 발생하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 논문은 특성치에 가중치를 부여한다. 즉, 다특성치를 고려하기 위하여 SN비의 선형모형을 이용한 성능측도 및 목적함수에 가중치를 적용함으로써 동시에 최적화시키는 방안을 사용하였으며 적용방법은 다음과 같다[6].

1) 고려할 특성치가 p개 종류로 y_1, y_2, \dots, y_p 가 있다면,

특성치에 대응하는 p개 종류의 SN비 SN_1, SN_2, \dots, SN_p 를 계산할 수 있다. 여기서 주어진 직교배열표에서 실험번호의 개수를 n이라 할 때 총계산된 SN비는 $p \times n$ 개가 존재 한다. p번째 특성치의 SN비인 SN_p 에서 실험번호의 수 n개의 SN비를 $SN_{p1}, SN_{p2}, \dots, SN_{pn}$ 이라 한다.

2) p번째 특성의 n개의 실험을 통하여 계산한 평균값과 표준편차를 가지고 각각의 SN비를 식(3)과 같이 z-표준화시킨다.

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

여기서, $\overline{SN_p}$ 는 p번째 특성의 n개의 실험을 통하여 계산한 평균값, $s.d(SN_p)$ 는 p번째 특성의 n개의 실험을 통하여 계산한 표준편차를 나타낸다. 표준화된 SN_p^* 의 값을 표 4에 기술하였다.

3) 각각의 표준화된 SN_p^* 에 가중치를 부과하여 TS 성능 척도를 구한다.

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

여기서, w_i 는 각 특성의 가중치로 $\sum_{i=1}^p w_i = 1$ (가중치의 합은 1)이다. 계산된 TS성능척도를 표 5에 기술하였다.

4) 위의 1)부터 3)단계의 과정을 식 (5)에 행렬식 표현으로 나타내었다.

$$\begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{p1} & y_{p2} & \dots & y_{pn} \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} SN_{11} & SN_{12} & \dots & SN_{1n} \\ SN_{21} & SN_{22} & \dots & SN_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ SN_{p1} & SN_{p2} & \dots & SN_{pn} \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} SN_{11}^* & SN_{12}^* & \dots & SN_{1n}^* \\ SN_{21}^* & SN_{22}^* & \dots & SN_{2n}^* \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ SN_{p1}^* & SN_{p2}^* & \dots & SN_{pn}^* \end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow \begin{pmatrix} w_1 \cdot SN_{11}^* & w_1 \cdot SN_{12}^* & \dots & w_1 \cdot SN_{1n}^* \\ w_2 \cdot SN_{21}^* & w_2 \cdot SN_{22}^* & \dots & w_2 \cdot SN_{2n}^* \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_p \cdot SN_{p1}^* & w_p \cdot SN_{p2}^* & \dots & w_p \cdot SN_{pn}^* \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} TS_1 \\ TS_2 \\ \vdots \\ TS_p \end{pmatrix}$$

5) 모든 특성에 대해 SN비는 크면 클수록 좋게 만들어진 성능 척도임을 고려하여 다특성치 고려시 사용할 TS 성능척도 역시 크면 클수록 좋게 만들어진 성능척도이다 [6]. 가중치 w_i 는 모터 특성에서 비중이 높은 특성일 경우 높은 값의 가중치를 부과하여 준다. 본 논문에서는 전동기의 특성 개선을 위하여 코깅 토크에 높은 가중치를 부과 하였으며 제안된 자속장벽을 설치하여 낮은 코깅 토크의 값을 얻을 수 있었다. 본 논문에 부과된 가중치는 코깅 토크는 0.5, 평균 토크는 0.1 그리고 효율은 0.4 이다. 이때 TS 분석으로 얻어진 최적조건으로 예측된 인자의 수준은 A2, B1, C3으로 그림 2에 인자의 주 효과를 나타내었다. TS분석을 통해 얻어진 최적조건을 이용하여 2차원 유한요소해석을 수행한 후, 해석결과를 이용하여 예측결과와 타당성을 검증하였다.

표 4 표준화된 SN_p^* 의 계산 값

	코깅 토크	평균 토크	효율
1	-0.09412611	1.16203581	-1.04652290
2	-0.48170521	-0.07418597	0.25678635
3	-0.79033217	-1.40440612	1.45309940
4	1.80846216	0.07628803	0.01151210
5	0.74943780	-1.23146373	1.20591653
6	1.41202997	1.18105042	-1.12274247
7	-0.85472428	-1.05882338	0.90612767
8	-1.02996650	1.27596835	-1.46715736
9	-0.71907566	0.07353658	-0.19701925

표 5 계산된 TS 성능척도

	TS Ratio
1	-0.444708358
2	-0.071707505
3	0.269976221
4	0.736769716
5	0.779587012
6	0.121545797
7	0.005291787
8	-1.017968441
9	-0.378786229

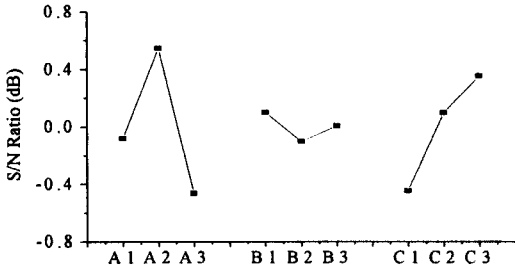


그림 2 TS성능척도에 대한 주효과 그래프

4. 특성해석 및 실험 결과

표 6은 초기 모델과 제안된 모델(A2B1C3)의 특성비교이며 코깅 토크는 0.2448[Nm]에서 0.0151[Nm]로 약 93.98[%]저감. 평균 토크는 약 0.81[%] 감소하였다. 또한 토크리플은 약 0.3425[Nm]에서 0.2032[Nm]로 약 40.66[%] 감소하였다. 모터 효율은 약 1.0 [%] 증가하였다. 그림 3은 초기 모델과 제안모델의 코깅 토크 해석 파형이고, 그림 4는 실제 초기 모델의 코깅 토크 측정파형으로 해석치와 유사함을 알 수 있다.

표 6 초기 모델과 제안된 모델의 특성비교

	코깅 토크 [Nm]	평균 토크 [Nm]	토크 리플 [Nm]	효율 [%]
초기모델	0.2448	0.4212	0.3425	82.93
제안 모델 (A2B1C3)	0.0151	0.4178	0.2032	83.93

* 코깅 토크 & 토크 리플 : peak to peak value

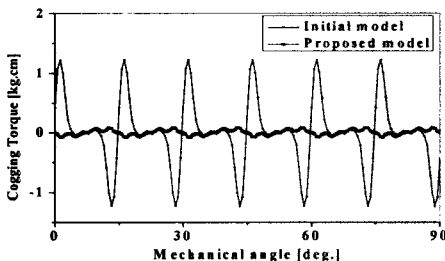


그림 3 초기모델과 제안모델의 코깅 토크 (해석 결과)

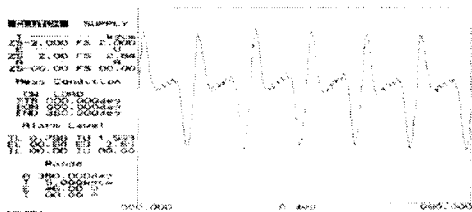


그림 4 초기모델의 코깅 토크 (실험 결과)

(Peak to peak value : 0.233Nm)

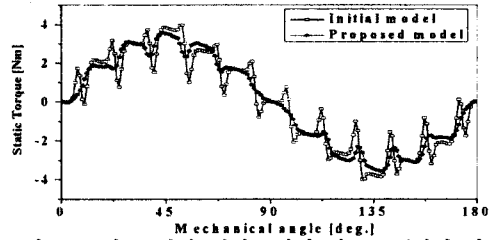


그림 5 초기 모델과 제안모델의 정토크 (해석 결과)

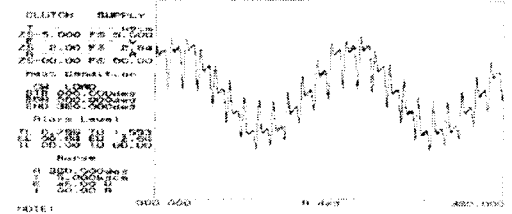


그림 6 초기 모델의 정토크 (실험 결과)

그림 5와 그림 6은 전동기 U-V상에 전류 0.5A를 공급 할 때 전동기에서 발생하는 정토크 특성을 보여 주고 있다. 그림 5는 초기 모델 및 개선 모델의 해석 파형이고, 그림 6은 실제 제작된 모델의 측정 파형이다.

3. 결 론

본 논문은 영구자석 매입형 BLDC 전동기의 단점인 코깅 토크를 저감시키고, 전동기의 성능을 향상시키기 위하여 회전자 q축의 영구자석 끝단부에 설치되는 자속장벽의 최적 설계 방법을 제안하였다. 모터 성능을 향상시키는 최적의 자속장벽을 설계하기 위하여 코깅 토크, 평균 토크 및 효율을 다중목적함수로 하고, 다중목적함수를 동시에 만족하는 개선된 다특성 다구찌 실험계획법을 제안하였다. 또한 제안된 방법을 이용하여 최적의 자속장벽의 형상을 설계하고, 실제 모터를 제작하고 측정함으로써 제안방법의 타당성을 검증하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 박현각, 양병렬, 이상봉, 권병일. "다특성 목적함수를 고려한 영구자석 매입형 전동기의 새로운 자속장벽 최적설계", *Transaction of KIEE*, Vol. 56, No. 3, March, 2007.
- [2] Thomas M. Johns, Wen L. Soong, "Pulsating Torque Minimization Techniques for Permanent Magnet AC Motor Drives," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 43, pp. 321-330, April 1996.
- [3] Ki-Jin Han, Han-Sam Cho, Dong-Hyeok Cho, Hyun-Kyo Jung, "Optimal core shape design for cogging torque reduction of brushless DC motor using genetic algorithm", *Magnetics, IEEE* vol 36, pp.1927 - 1931, July 2000.
- [4] Shao Bo, Cao Zhi-tong, Cheng Hong-ping, He Guo-guang, "Cogging Force and its Estimation using a Neural Network Based on 2D Field Model of PMLSM", *Electric Machines and Drives, 2005 IEEE*, pp.1243 1248, May 2005.
- [5] Chen, S.X., Low, T.S., B.Bruhl, "The Robust Design Approach For Reducing Cogging Torque In Permanent Magnet Motors", *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, Vol 34, no.4, pp.343 - 343, July 1998
- [6] Yong-Man Kwon, Young-Nam Son. "An Optimization Procedure using Signal-to-Noise Ratio in The Robust Parameter Design with Multiple Quality Characteristics", *Journal of the Korean Data Analysis Society*, Vol 5, No.3, pp. 541-548, 2003.