

실험계획법을 이용한 매입형 영구자석 전동기의 코깅 토크 저감에 대한 연구

한진우, 최거승, 하덕용, 조윤현
 동아대, (주)대우정밀, 한양대

The Approach for Reducing Cogging Torque of Interior Permanent Magnet Motor Using The Design of Experiment

Jin-Woo Han, Geo-Seung Choi, Duk-Yong Ha, Yun-Hyun Cho
 Dong-A Univ., DAEWOO Precision Co., Hanyang Univ.

Abstract - This paper proposes the optimal design method to reduce the cogging torque of the interior permanent magnet motor using the design of experiment. The slot opening, tooth tips and the pole arc/pole pitch are chosen as factors of the design of experiment in order to find optimal conditions of the interior permanent magnet motor. Finally, the cogging torque of the optimized motor compares with that of the original motor.

1. 서 론

BLDC 전동기는 회전자의 형상에 따라 매입형, 표면형, 매장형 BLDC 전동기로 구분할 수 있다. 이 중 매입형 영구자석 전동기는 회전자의 내부에 영구자석이 삽입되어 있는 구조이다. 때문에 고속 회전자 원심력에 의해 자석의 비산을 방지할 수 있을 뿐만 아니라, 회전자의 돌극성으로 인해 자석 토크와 릴럭턴스 토크를 발생하는 관계로 표면부착형 전동기에 비해 큰 토크를 발생하는 장점이 있다. 하지만 영구자석과 고정자의 슬롯의 위치에 따라 발생하는 코깅 토크가 존재한다. 이 코깅 토크는 설계 시 반드시 고려해야 한다.

본 논문에서는 IPM 전동기의 코깅 토크를 줄이기 위해서 3가지 인자를 선정하였고 실험계획법을 통한 최적 치수의 선정방법을 제시하였다.

2. IPM 전동기 구조 및 특성 방정식

2.1 IPM 전동기 구조

본 연구에서의 IPM 전동기의 구조는 그림 1과 같다.

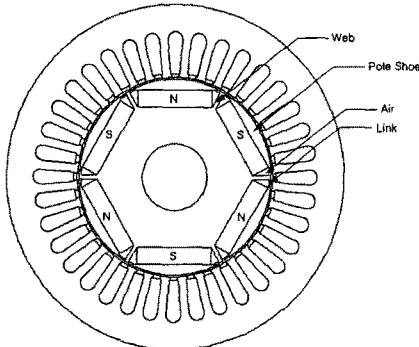


그림 1 IPM 전동기의 단면도

2.2 공극 자속 밀도

그림 2와 3은 그림 1의 d축과 q축의 자로를 나타낸 것이다. d축 자로를 이용하여 자기 등가 회로를 이용하여 간단하게 나타내면 그림 4와 같다.

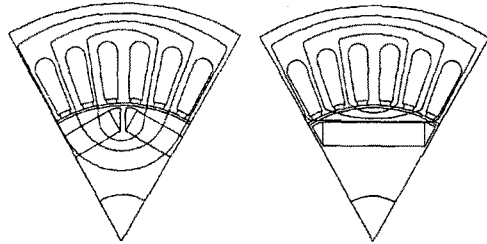


그림 2 d축 자로

그림 3 q축 자로

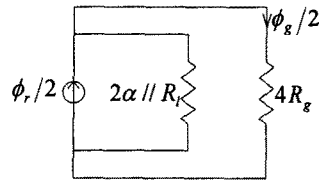


그림 4 간단화 시킨 등가회로도

그림 4에서 공극의 자속을 구하면 식 (1)과 같다.

$$\phi_g = \frac{1}{1 + \beta(1 + \eta + 4\lambda)} \phi_r \quad (1)$$

여기서,

$$\beta = R_g / R_m$$

$$\eta = R_m / R_w$$

$$\lambda = R_m / R_l$$

R_r 은 회전자부분, R_s 는 고정자부분, R_g 는 공극부분, R_l 은 link부분, R_w 는 web부분, R_m 은 magnet부분의 자기저항을 나타낸다.

표 1 original IPM 전동기의 재원

구분	재 원	
영구자석	자화방향 두께	7 (mm)
	자화방향 폭	31.06 (mm)
	잔류자속밀도	1.1 (T)
	보 자 력	827 (KA/m)
회전자	극 수	6
	외 경	39.75 (mm)
	내 경	13.5 (mm)
고정자	슬롯 수	36
	상 수	3
	축방향 길이	44 (mm)
	내 경	13.5 (mm)
공극	0.75 (mm)	

2.3 코깅 토오크 특성식

코깅 토오크는 영구자석 전동기에서 불필요한 요소로서 회전자의 자석과 고정자의 슬롯의 위치에 따라 발생하며, 고정자의 권선에 전류가 흐르지 않을 때 발생한다. 전동기 설계에 있어서 코깅 토오크를 줄이는 것이 중요하다. 코깅 토오크는 공극의 자속과 자기저항에 관한 식으로 다음과 같이 계산되어진다.

$$T_{cog} = -\frac{1}{2} \phi_g^2 \frac{dR}{d\theta} \quad (2)$$

코깅 토오크의 저감 방법은 표 2과 같다.

표 2 코깅 토오크 저감 방법

공극을 증가시키는 방법
분수의 slot/pole을 사용하는 방법
tooth tips의 두께를 두껍게 하는 방법
슬롯 개구폭을 작게 하는 방법
자성을 띤 슬롯 사용하는 방법
고정자 혹은 자석에 스크류를 주는 방법
모서리를 깎은 자석을 사용하는 방법
tooth tips에 구멍을 뚫는 방법
낮은 자속 밀도를 갖는 자석을 사용하는 방법
두 부분으로 나누어지는 teeth를 사용하는 방법
자석의 폭을 조정하는 방법

본 논문에서는 실험계획법에 적용하기 위해서 슬롯 개구폭, tooth tips 그리고 자극 각도비를 인자로 선정하였다.

3. 실험계획법

3.1 실험계획법의 정의

공학 문제에 있어 대부분의 경우 그 문제의 변수(인자)들이 결과에 미치는 영향을 정확하게 알 수가 없고 실험적으로 최적값을 결정하여야만 한다.

실험계획법(Design of experiment)은 이러한 실험수행에서 실험에 대한 계획 및 실험 데이터의 분석방법을 정하여 주는 것으로서, 해결하고자 하는 문제에 대하여 실험을 어떻게 실시하고, 데이터를 어떻게 취급하며, 어

떠한 통계적 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 실험횟수에서 최대의 정보를 얻을 수 있는가를 계획하는 것이라고 정의할 수 있다. 이를 통해 실험이 목표하는 결과(목표 특성치)에 대하여 각 변수(인자)들이 미치는 영향의 정도 파악과 최적조건을 결정하는 각각의 변수값(인자들의 수준)을 결정할 수 있다.

실험 계획법은 특성치의 선정방법, 실험의 배치방법, 데이터의 해석방법으로 구성되며 실험 계획법에 의한 실험 순서는 그림 5와 같다.

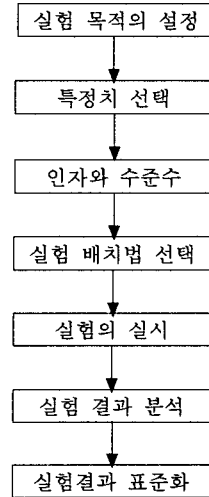


그림 5 실험 계획법의 실험 순서도

3.2 직교 배열표

실험계획법의 여러 원리들 중 직교화의 원리는 인자간에 직교성을 갖도록 실험을 계획하는 즉 임의의 두 인자가 그 수준의 모든 조합에서 같은 횟수씩 실험이 되도록 할당함으로써 같은 횟수라도 검출력이 더 좋아지고 정밀도 역시 높게 추정할 수 있다. 본 논문에서는 인자간의 교호작용 중에서 기술적으로 생각하여 무시될 수 있는 것을 주효과와 교락시켜 실험의 크기를 줄일 수 있게 실험계획을 짜도록 고안된 표인 직교 배열표(Tables of orthogonal arrays)를 이용하여 실험을 일부만 실시하는 직교 배열법을 사용하였다.

직교 배열표는 실험에서 각 열이 직교가 되게 만들어 놓은 표이다. 즉 어떤 수준에 대해서나 다른 열의 전체 수준이 같은 횟수씩 나타나도록 구성되어 인자가 많을 시에는 일반 요인배치법으로는 모든 실험을 할 수가 없기 때문에 적은 수의 실험으로 많은 효과를 찾으려는 목적으로 만든 표이다.

직교 배열법은 이 직교 배열표를 이용하여 실험을 실시하여 실험이 목표로 하는 특성치에 대하여 각 인자들이 미치는 영향의 정도 파악과 최적조건을 결정하는 각 인자들의 값을 결정할 수 있다.

표 3은 직교 배열표에 적용될 인자들과 특성값들을 나타내고 있다.

표 3 각 인자들의 특성치

인 자	각 인자들의 특성치		
슬롯 개구폭	2.5	3	3.5
tooth tips	0.8	1	1.2
자극 각도비	0.667	0.725	0.783

3.4 해석 결과

각 인자의 분산분석을 하기 위해 표 3의 데이터를 직교 배열법에 적용하여 유한 요소법 해석을 하고 그 결과 데이터를 이용하여 실험 계산 보조표를 작성하면 표 4를 얻을 수 있다. 여기서 T_1 는 각 인자에서 수준수가 1일 때 코깅 토오크의 합이고 T_2 , T_3 는 각 인자에서 수준수가 각각 2, 3일 때의 코깅 토오크의 합을 말한다.

인자의 변동이란 각 인자가 배치된 열의 변동이므로 직교 배열표를 이용하여 슬롯 개구폭의 변동을 구하면 다음과 같다. 여기서 CT는 수정항으로 총 데이터의 합의 자승에 실험의 횟수를 나눔으로서 구해진다.

$$S_A = \frac{3}{9} \sum_{i=0}^2 T_i^2 - CT$$

$$= \frac{1}{3} (2.6896^2 + 3.4204^2 + 4.1393^2) - 11.6713 \quad (3)$$

$$= 0.3510$$

마찬가지로 tooth tips와 자극 각도비 그리고 오차항의 변동을 식 (3)과 같이 구하면 각각 0.0460, 3.5380, 0.0378이다. 즉 오차항과 큰 차이가 없는 tooth tips는 실제적으로 코깅 토오크의 증감에 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

표 4 계산 보조표

인자	구분	T_c (코깅 토오크)
슬롯 개구폭 (A)	T_1	$0.2277 + 1.0154 + 1.4465 = 2.6896$
	T_2	$1.3065 + 1.8243 + 0.2896 = 3.4204$
	T_3	$2.1821 + 0.3990 + 1.5582 = 4.1393$
tooth tips (B)	T_1	$0.2277 + 1.3065 + 2.1821 = 3.7163$
	T_2	$1.0154 + 1.8243 + 0.3990 = 3.2387$
	T_3	$1.4464 + 0.2896 + 1.5582 = 3.2942$
자극 각도비 (C)	T_1	$0.2277 + 0.2896 + 0.3990 = 0.9163$
	T_2	$1.0154 + 1.3065 + 1.5582 = 3.8801$
	T_3	$1.4464 + 1.8243 + 2.1821 = 5.4528$
오차 (e)	T_1	$0.2277 + 1.8243 + 1.5582 = 3.6102$
	T_2	$1.0154 + 0.2896 + 2.1821 = 3.4871$
	T_3	$1.4464 + 1.3065 + 0.3990 = 3.1519$

표 4를 어떠한 인자가 코깅 토오크에 가장 영향을 많이 미치는가를 쉽게 알기 위해서 그래프로 나타내면 그림 6과 같다.

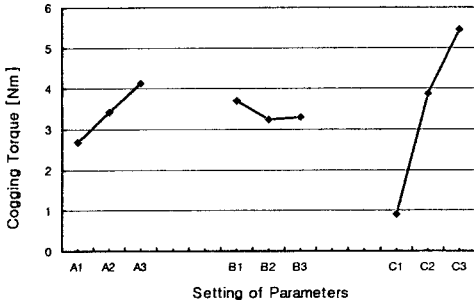


그림 6 코깅 토오크에 영향을 주는 인자들의 효과

그림 6로부터 코깅 토오크가 가장 작게 나올 수 있는 조건을 찾으면 A1, B2, C1이다. 즉, 슬롯 개구폭은 2.5(mm), tooth tips는 1(mm) 그리고 자극 각도비는 0.667 일 때 최소의 코깅 토오크를 얻을 수 있다. 기존의 전동기와 코깅 토오크를 줄이기 위해 최적화된 전동기의 코깅 토오크를 비교하면 그림 7과 같이 나타난다.

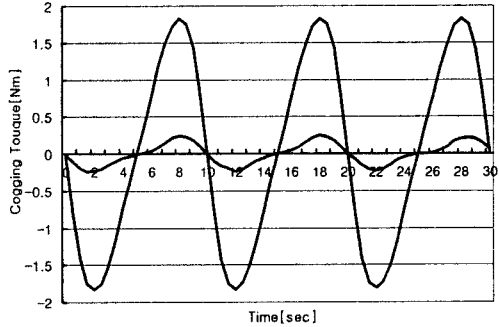


그림 7 기존의 전동기와 최적 전동기의 코깅 토오크 비교

3. 결 론

본 논문에서는 코깅 토오크를 줄이기 위해 실험 계획법을 이용하였다. 실험계획법을 이용해 코깅 토오크를 최소화시키기 위한 치수를 구하였고 그 결과 기존의 전동기의 코깅 토오크와 최적 전동기의 코깅 토오크를 비교한 결과 86%에 가까운 저감 효과를 얻을 수 있었다.

(참 고 문 헌)

- [1] Slemon, G.R., T.Sebastian, "Reduction of Cogging Torque in Permanent Magnet Motors", IEEE Trans. Magn., Vol. 24, No. 6, pp. 2901-2903, 1988
- [2] S.X.Chen, T.S.Low, and B.Bruhl, "The Robust Design Approach For Reducing Cogging Torque In Permanent Magnets Motors", IEEE Trans. Magn., Vol. 34, No. 4, pp. 2135-2137, July 1998
- [4] E.R.Braga Filho and A.M.N.Lima, T.S.Araujo, "Reducing Cogging Torque in Interior Permanent Magnet Machines without Skewing", IEEE Trans. Magn., Vol. 34, No. 5, September 1998
- [5] H.T.Wang, Z.J.Liu, S.X.Chen and J.P.Yang, "Application of Taguchi Method to Robust Design of BLDC Motor Performance", IEEE Trans. Magn., Vol. 35, No. 5, September 1999
- [5] 박성현, "현대실험계획법", 민영사, 2001