

BLDC 전동기의 코깅토크 저감을 위한 고정자 설계

유대일, 임승빈, 김기찬, 원성홍, 이주
한양대학교 전기공학과

The Stator Design of BLDC for reducing the Cogging Torque

D.I.Ryu, S.B.Lim, K.C.Kim, S.H.WON, J.Lee
Dept. of Electrical Engineering at HANYANG University

Abstract - Cogging torque is produced in a permanent magnet machine by the magnetic attraction between the rotor-mounted permanent magnets and the stator. It is an undesired effect that contributes to the machines' output ripple, vibration, and noise. This paper presents the stator design for reducing cogging torque in the BLDC motor by using the DOE(Design of Experiments). The cogging torque is computed by using a two-dimensional finite element analysis.

1. 서 론

브러시리스 직류 전동기(이하 'BLDC')는 소형 전동기 영역에서 비교적 큰 토크를 얻을 수 있고 속도 제어 등의 가변속 제어가 용이하고 브러시가 없어 반영구적으로 사용 가능하므로 가전기기, 컴퓨터 주변기기, 사무자동화 및 공장자동화 등의 구동원 및 제어원의 핵심 부품으로서 그 수요가 증가하고 있다. 특히 최근에 영구자석의 개발과 스위칭 제어기술의 발달로 인해 많은 성능 개선이 이루어져 소형화, 정밀화, 고속화 하는 추세에 있다. 이러한 소형화, 정밀화, 고속화의 요구 조건을 만족시키기 위해서는 전동기에서 발생하는 진동, 소음 등의 문제를 해결하여야 한다. 이러한 문제의 원인 중 하나로 코깅토크를 찾을 수 있다.[1]

코깅토크는 슬롯수와 극수의 최소 공배수를 기본 주파수로 하여 맥동을 하게 되고 전동기의 속도제어 및 위치제어에 악영향을 주며 진동의 원인이 되는 토크 리플의 주요 원인이 된다. 이러한 코깅토크를 저감하는 방안들은 아래와 같이 알려져 있다.[2]

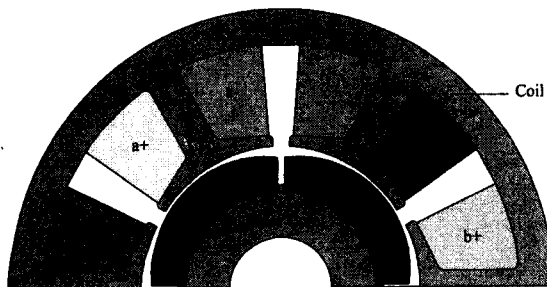
- 공극의 길이 증가
- 슬롯이나 극의 수 증가
- 보조 슬롯의 사용
- 고정자 치의 형상 변화
- 고정자나 전기자에 스류(Skew)
- 구동전류 파형 변조로 보상
- 분수 슬롯 또는 극 사용
- 슬롯 개구폭 감소
- 자석의 형상 변화
- 자극의 착자 변화
- 낮은 자속밀도의 자석 사용

본 논문에서는 이러한 방안들 중 보조 슬롯의 사용을 통한 코깅토크 저감을 다루고자 한다. 이는 대량의 BLDC 제작시 고정자의 재료인 규소강판의 부스러기(scrap)처리를 통한 원가 절감에도 효과적이라 예상되기 때문이다. 이러한 이유로 BLDC의 보조 슬롯과 관련 형상 변경을 인자로 둔 실험계획법(DOE)과 2차원 유한요소법(Finite Element Method)을 통해 코깅토크에 크기에 관여하는 인자를 결정하고 이를 결정하여 코깅토크를 저감하고자 한다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

본 논문에서 해석에 사용한 모델은 내전형 BLDC로써 3상 4극 6슬롯을 가지며, 영구자석은 소결 페라이트를 사용하였다. 자극의 끝단으로 갈수록 자석의 두께가 줄어드는 형상으로 공극 자속밀도의 급격한 변화를 저감시킴으로써 코깅토크를 줄이고 있다. 해석 모델의 1/2 단면도를 그림 1에 나타내었다. 그리고 구체적인 사양은 표 1과 같다.



<그림 1> 해석 모델

<표 1> 해석 모델의 사양

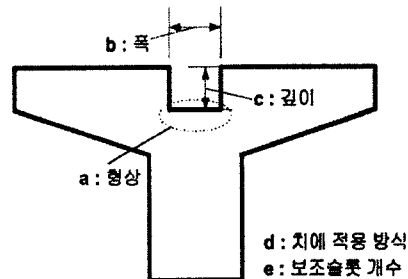
항 목	제 원	
	고정자	슬롯수
외경		40 mm
상당 권선수		77 turn
선간 저항		0.462 Ω
공극	공극 길이	0.5 mm
회전자	극 수	4 pole
	외경	20 mm
영구자석	잔류자속밀도	0.2957 T
	정 격	정격 출력
입력 전압		48 V
정격 속도		2900 rpm
정격 토크		0.9879 Nm

2.2 실험계획법(Design of Experiments)

실험계획법은 실험에 대한 계획방법을 의미하는 것으로, 제품 품질 특성에 영향을 미치는 요인들이 어떤 것들인지를 알아보기 위하여 실험의 배치와 실시를 어떻게 하고, 또 얻어진 데이터를 어떠한 통계적 방법으로 분석을 하는지에 관한 이론이다. 이와 같은 실험계획법을 이용하면 이상변동을 가져오는 많은 원인 중에서 중요한 원인을 적은 비용으로 선정, 그 효과를 수량적으로 측정할 수 있게 된다.[7]

그림 2는 코깅토크 저감을 위해 고려한 여러 설계 변수들 중 중요하다고 예상되는 5개의 설계 인자를 나타내고 있다. 표 2는 이러한 5개의 인자와 그 수준들을 설명한다. 보조 슬롯의 크기와 형상에 관한 3개의 설계 인자와 보조 슬롯의 적용방식에 따른 2개의 설계 인자를 선택하였다. 보조 슬롯의 폭과 깊이에 해당하는 설계 인자 b와 c에 대해서는 다른 모델에도 적용을 용이하게 하기 위해 고정자 치의 슈 부분의 폭과 깊이 치수에 대한 비로써 주어진다.

이렇게 선정된 5개의 설계 인자들에 대해 각 수준에 따라 도출할 수 있는 총 모델 수는 $2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 3 = 48$ 가지이다. 이 중에서 실험계획법을 시행하여 36가지 모델을 추출하였고, 이 모델들에 2차원 유한요소법을 적용한 해석을 통하여 각각의 코깅토크를 찾을 수 있었다. 이러한 코깅토크를 분석하여 앞서 예상했던 5개의 인자와의 연관성 및 추이를 분석하여 코깅토크에 크게 관여하는 인자를 찾고 이를 토대로 코깅토크 저감을 위한 개선 모델을 제시한다.



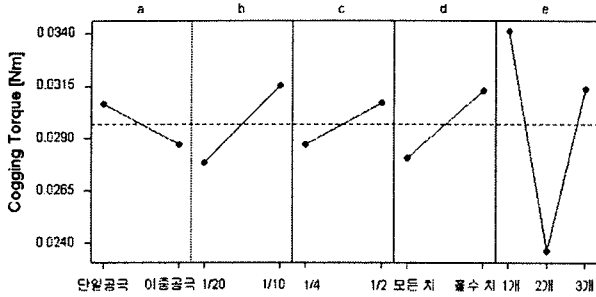
<그림 2> 고정자 치의 설계 인자

<표 2> 설계인자와 수준

설계 인자	수 준	내 용
a	2	단일공극, 이중공극
b	2	슈 폭의 1/20, 1/10
c	2	슈 높이의 1/4, 1/2
d	2	모든 치, 홀수 치
e	3	1개, 2개, 3개

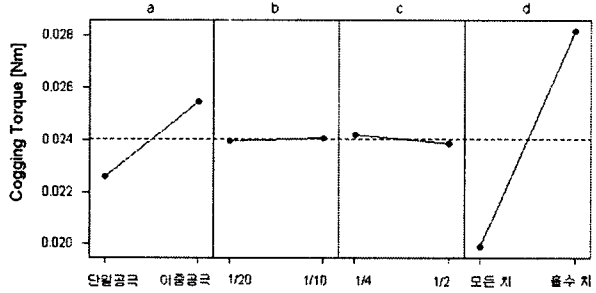
2.3 주요 인자 분석

그림 3은 설계 인자로 선정한 5개의 변수들이 코깅토크에 미치는 영향도와 그 성향을 나타내고 있다. 코깅토크에 영향을 미치는 효과가 큰 인자들을 순서대로 나열해 보면 보조 슬롯의 개수, 보조 슬롯의 폭, 치에 적용 방식, 보조 슬롯의 형상, 보조 슬롯의 깊이 순으로 나타났다. 보조 슬롯의 경우에는 비례 혹은 반비례 경향이 아닌 V 타입의 형태로 인자의 수준을 2개로 선정시 가장 크게 코깅토크가 줄어들음을 알 수 있다. 이는 보조 슬롯이 2개일 경우에 총 슬롯 수가 18이 되고 극수는 4로 이들의 최소공배수인 36으로 보조 슬롯이 1개인 경우 총 슬롯수는 12이 되며 최소공배수는 12, 보조 슬롯이 2개이면 총 슬롯수는 24가 되며 최소공배수는 24로 이들에 비해 코깅토크의 주파수가 커지므로 코깅토크는 줄어들게 된다.

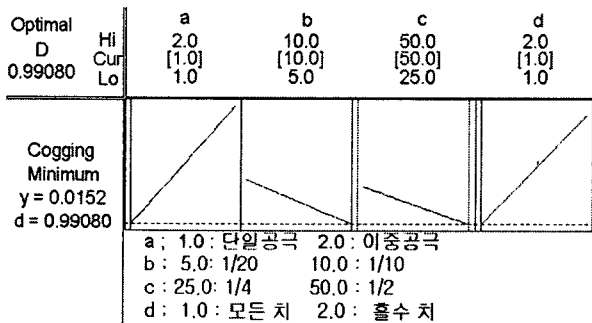


〈그림 3〉 각 설계 인자들이 코깅토크에 미치는 영향

그림 3에서와 찾을 수 있듯이 가장 큰 영향을 주는 설계 인자로 보조 슬롯의 개수를 기준으로 하여 나머지 설계 인자의 영향을 살폈다. 그림 4는 코깅토크의 가장 많은 저감을 보여준 보조 슬롯의 개수를 2개로 정하고, 나머지 설계 인자 4개의 코깅토크에 대한 영향도와 성향을 보여준다. 여기서 치에 적용 방식이 가장 영향을 많이 끼치는 설계 인자로 나타나고 있다. 그런데 나머지 인자들인 보조 슬롯의 형상, 폭, 깊이는 그림 3의 경향과는 다르게 나타나며, 보조 슬롯의 형상의 경우 단일공극에서 오히려 코깅토크가 저감으로 작용하고 있음을 볼 수 있다. 이는 설계 인자들 사이의 상호작용으로 볼 수 있으며 따라서 이러한 설계 인자의 조합상 상호작용 결과를 예견하고 최적 조합을 찾기 위해 MINITAB에서 지원하는 반응표면 최적화 루틴을 이용하여 그림 5와 같이 코깅토크의 저감을 위한 모델의 결과 값을 찾을 수 있다.



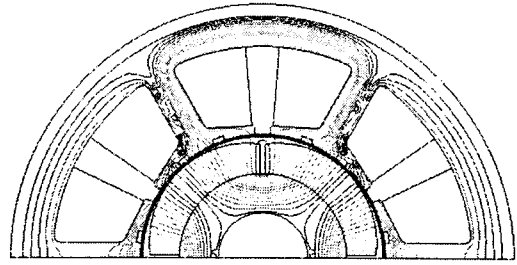
〈그림 4〉 보조 슬롯이 2개일 경우 다른 설계 인자들이 코깅토크에 미치는 영향



〈그림 5〉 MINITAB의 반응표면 최적화 루틴 결과

2.4 개선 모델

그림 5와 같이 MINITAB의 최적화 루틴 결과에 의해 선정된 모델의 각 설계 인자들의 값들을 아래 표 3에 나타내었다. 이로부터 나온 개선 모델의 유한요소해석을 통해서 코깅토크 피크-피크값인 0.01523 [Nm]을 얻고, 그림 5의 실험계획법을 통해 표시되고 있는 값 0.0152 [Nm]과 비교하면 매우 근사한 값으로 만족하고 있음을 확인할 수 있었다.

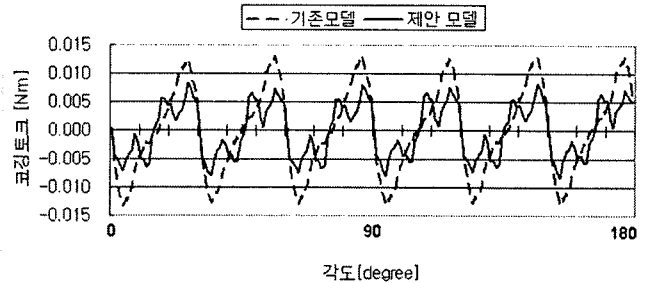


〈그림 6〉 개선 모델 자속분포도

설계 인자	수준
a	단일공
b	슈 폭의 1/10
c	슈 높이의 1/2
d	모든 치
e	2개

〈표 3〉 개선 모델의 설계인자와 값

그림 6은 개선 모델의 자속분포를 나타내고 있으며, 그림 7은 기존 모델과 개선 모델의 코깅토크 파형을 기계각 180도 구간에서 보여주고 있다. 기존 모델의 코깅토크의 피크-피크값이 0.0259 [Nm]이며 개선 모델은 0.0152 [Nm]이다. 여기서 코깅토크의 피크-피크값이 41% 감소함을 알 수 있다. 그리고 보조 슬롯의 영향으로 기존 모델의 슬롯수 6보다 개선 모델의 슬롯이 18로 3배가 커지므로 코깅토크의 주파수 역시 3배 증가함을 확인할 수 있다.



〈그림 7〉 코깅 토크 비교

3. 결 론

본 논문에서는 3상 4극 6슬롯을 가진 BLDC의 코깅토크를 저감하기 위해 보조 슬롯을 채용하였으며, 이러한 보조 슬롯과 관련된 5개의 설계 인자를 가지고 실험계획법을 시행하였다. 이를 통해 보조 슬롯에 관한 설계 인자들의 코깅토크에 대한 영향도와 성향을 파악할 수 있었으며, 최적화 루틴을 통해 개선 모델을 찾을 수 있었다.

향후에는 본 논문에서 제시한 방법을 포함하여 보다 많은 인자들과 수준을 적용함으로써 코깅토크의 저감을 효과적으로 유도할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 중점추진 과제인 신·재생에너지 발전의 계통연계 기초기술개발 연구 (과제번호 : R-2004-B-125)의 지원으로 수행되었음.

[참고 문헌]

- [1] 전연도, "브러시리스 직류전동기의 와전류 손실과 오버행 효과해석", 박사학위 논문, 한양대학교, 2001.
- [2] TJE Miller외, "Design of Brushless Permanent-Magnet Motors", MAGNA PHYSICS PUBLISHING AND CLARENDON PRESS, 1994.
- [2] Duane Hanselman, "Brushless Permanent Magnet Motor Design", Second edition, The Writers' Collective, 2003.
- [3] 임달호외, "브러시리스 DC모터의 코깅토크 저감에 관한 연구", KIEE, VOL.37, P772-779, 1988
- [4] Jacek F. Gieras외, "Permanent Magnet Motor Technology", Second edition, Marcen Dekker, Inc, 2002.
- [6] 임달호, "전기계의 유한요소법", 동명사, 1986
- [7] 이상민외, "고정자 및 페어링을 이용한 고효율 토크 영구자석 직류 전동기의 코깅토크 및 소음 저감", 대한전기학회 논문집, 제48B권, 제3호, pp.97-103, 1999.
- [8] 이상복, "MINITAB을 활용한 예제 중심의 시험계획법", 이레테크, 2000.