

BLDC 모터의 코깅토크 저감을 위한 코어형상 최적화

한 기진, 조 한삼*, 조 동혁, 조 현래*, 이 해석*, 정 현교
 서울대학교 전기공학부, LG전자 디지털 미디어 연구소*

Core Shape Optimization for Cogging Torque Reduction of BLDC Motor

Ki-Jin Han, Han-Sam Cho*, Dong-Hyeok Cho, Hyun-Rae Cho*, Hae-Seok Lee*, Hyun-Kyo Jung
 School of Electrical Engineering, Seoul National University
 Digital Media Lab, LG Electronics Inc.*

Abstract - The cogging torque in the small BLDC motors used in the DVD driving system or HDD driving system can cause some serious vibration problem. In this paper, some core shapes that reduce cogging torque are found by using reluctance network method(RNM) for magnetic field analysis and genetic algorithm(GA) for optimization. The outer rotor type BLDC motor for the DVD ROM driving system has been optimized as an sample model.

1. 서 론

DVD ROM 구동 시스템에 응용되는 BLDC모터는 데이터의 정확하고 빠른 판독을 위해 고속으로 회전하면서 정밀하게 위치를 유지해야 한다. 기계적인 또는 전자기적 가진력에 의한 진동은 이러한 면에서 모터의 성능을 저하시킬 수 있다. 특히, 모터의 속도가 점차 증가하고, 고에너지 자석이 응용됨에 따라 전자기적 원인에 의한 고주파 성분의 가진력이 새로운 문제로 대두되고 있다. 본 논문에서는 BLDC모터의 기계적 구조를 가진시키는 전자기력의 한 형태인 코깅토크를 줄이기 위한 한가지 방법을 제시한다.

코깅토크는 권선을 위한 슬롯 구조의 돌극성으로부터 발생하며, 영구자석의 자화형태 및 코어의 형상에 따라 그 크기와 파형이 달라질 수 있다. [1] 따라서, 코깅토크를 줄이기 위해 영구자석의 자화형태를 조절하거나 [2] 코어의 형상을 최적화 하는 방법을 생각할 수 있다. 본 논문에서는 후자의 방법을 채택하였다.

현재까지 전기기계 소자의 최적설계를 위한 여러 가지 방법들이 제시되어 있으나 [3] [4], 이들은 FEM을 응용한 간단한 구조의 형상최적화 또는 설계식을 이용한 치수최적화 방법에 국한되어 있다. 본 논문에서는 최적화 알고리즘으로써 유전 알고리즘을 사용하고, 코깅토크 해석을 위한 전자기 해석에는 릴럭턴스 망법을 적용하여, 모터의 복잡하고 동적인 특성인 코깅토크를 형상최적화로 저감할 수 있었다.

2. 본 론

2.1 릴럭턴스 망법

릴럭턴스 망법은 자기시스템과 관련된 문제를 해석하는 방법 중 하나이다. 이 방법은 자기저항을 계산하여 회로를 구성하여 회로방정식과 같이 문제를 푸는 자기회로법과 같은 이론적 배경을 갖고 있다. 그러나, 릴럭턴스 망법은 자기회로법과 달리 자속의 경로를 미리 가정하지 않고 자기저항을 보다 세분화된 영역에 대해 정교하게 계산한다. 전기기계의 특성해석에 응용될 경우 릴럭턴스 망법은 회전자의 회전효과를 회로망의 재구성 없이 쉽게 구현할 수 있기 때문에 유한요소법보다 유용하고 빠른 결과를 얻을 수 있다. [5] [6]

릴럭턴스 망법은 다음과 같이 이루어진다. 먼저, 주어

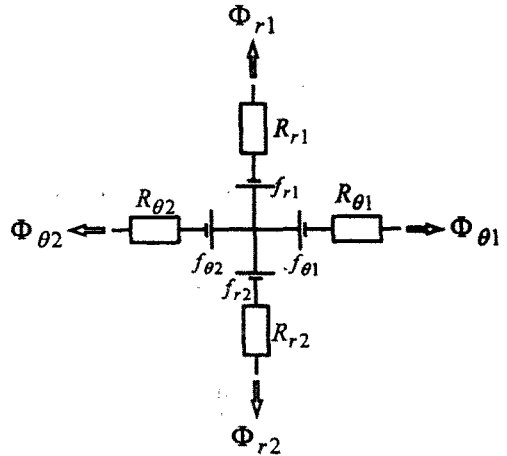


그림 1. 릴럭턴스 요소의 구성

진 자기 시스템을 여러 개의 릴럭턴스 요소로 분할한다. 2차원 해석의 경우 일반적으로 한 요소는 그림 1과 같이 한 개의 절점과 네 개의 자기저항 및 기자력원을 포함한다. [6] 다음으로 각 릴럭턴스의 값과 기자력원의 값을 계산한다. 다양한 형태의 자기 시스템에 대해 여러 가지 형상의 릴럭턴스 요소가 고려될 수 있으나, 해석적으로 릴럭턴스 값을 얻을 수 있는 직육면체 요소 또는 부채꼴형 요소가 주로 쓰이며 [5], 일반적인 형상의 자기저항의 계산을 위해서는 릴럭턴스 요소의 주어진 영역에 대한 수치 적분이 필요하다. [7] 각 요소의 자기저항 및 기자력 값을 계산하면, 각 절점에 대한 회로방정식을 얻을 수 있고, 각 회로 방정식으로 시스템 행렬을 조립할 수 있다. 각 요소의 절점에 대해 자속에 관한 KCL식은 다음과 같이 표현된다.

$$\sum_{x,y,q=1,2} \Phi_{x,q} = 0 \quad (1)$$

전체 요소에 대한 회로 방정식은 다음과 같다.

$$[P]\{F\} = \{F^{m.m.f.}\} \quad (2)$$

N : 절점 또는 요소의 총 개수 - 1

$[P]$: $N \times N$ 퍼미언스 행렬

$\{F\}$: $N \times 1$ 자기 포텐셜 벡터

$\{F^{m.m.f.}\}$: $N \times 1$ 기자력 벡터

마지막으로 회로방정식을 풀면 각 요소에서의 자기 포텐

설 값을 얻을 수 있고, (1)번식에 자기 포텐셜값과 톨릭턴스 값을 대입하여 한 요소 당 네 방향의 자속밀도 값을 얻을 수 있다.

2.2 유전 알고리즘

유전 알고리즘은 유전자의 자연 선택을 모사한 최적화 알고리즘으로 재생산, 교배 및 변이의 세 가지 연산을 기본으로 한다. 재생산은 개개의 코드화된 변수들이 각각의 적합도에 따라 복제되는 과정인데, 이때의 재생산의 확률은 각 코드의 적합도에 비례하게 된다. 이는 적자 생존의 자연 선택과 유사한 과정이다. 다음으로 교배 및 변이 연산을 수행한다. 먼저 재생산을 통해 형성된 풀로부터 두 원소(코드화된 변수)가 선택되어 교배의 확률에 따라 교배 연산을 수행한다. 각 코드의 k 번째 위치가 임의로 선택되어, k 번째 부터 끝자리까지의 모든 코드정보를 서로 교체하여 새로운 두 개의 코드화된 변수를 얻는다.

유전 알고리즘의 재생산 및 교배 연산으로부터 보다 최적에 근접하는 코드화된 설계변수를 찾을 수 있으나, 두 연산만을 수행할 경우 국소적인 최적해로 빠져버릴 가능성이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 변이 연산이 추가되어야 한다. 이는 임의로 선택된 코드의 한 위치에 대해 임의의 변화를 가하는 것이다. 이진 코드를 사용하는 경우, 변이연산은 0을 1로 또는 1을 0으로 교환하는 작업이다. 이러한 비트의 변화에 의해 국소최적해로부터 빠져나와 전역최적해로 수렴할 수 있다.

유전 알고리즘의 과정은 다음과 같다. 먼저 초기 개체 집단을 임의로 발생시키고 이들이 제약조건을 만족하는지 확인한다. 제약조건을 만족하면 각 개체 변수에 대한 목적함수 값, 즉 적합도가 계산된다. 알고리즘이 적절히 수행되기 위해서 목적함수값의 스케일링이 필요할 수도 있다. 다음으로, 현재의 개체집단에 대해 유전연산을 수행하여 다음 세대의 개체집단을 생성한다. 위의 과정은 새로운 개체집단이 알고리즘의 종결조건을 만족할 때까지 반복된다. [3]

2.3 코깁토크의 계산과 형상 최적화

톨릭턴스 방법을 이용하여 외전형 BLDC모터의 2차원 모델을 해석하였다. 그림 2에 해석 및 최적화를 위한 모델을 보이고, 표 1에는 이 모델에 대한 몇가지 사양을 명시하였다. 12극 9슬롯의 구조이므로 120도마다 동일한 자계분포를 갖는다고 가정할 수 있다. 영구자석으로는 회토티 자석을 채택하였으며, 이상적인 균일한 반경 방향의 착자를 가정하였다. 해석의 주목적이 코깁토크의 계산이기 때문에 전기자 권선은 고려하지 않았다.

위의 모델을 톨릭턴스 요소로 분할하였다. 각 요소는 반경 방향 및 각도 방향의 자기저항 성분을 가지며, 영구자석의 경우 기자력 값을 갖는다. 모터의 회전효과는 각 시간 단위마다 영구자석의 기자력 값을 변화시켜 얻을 수 있다. 공극 근방에서의 자속밀도가 포화값으로부터 충분히 떨어져 있음을 확인하여 철재료의 투자율은 일정하다고 가정하였다. 2.1절에서 언급한 대로, 시스템 행렬 방정식을 풀어 해석 영역의 자속밀도 분포를 구할 수 있다. 최적화의 목적함수인 코깁토크 값은 공극 자속밀도값에 대해 맥스웰 응력텐서법을 적용하여 얻을 수 있다. 즉,

$$T_c = \sum_i R_i \frac{B_{ri} B_{\theta i}}{\mu_0} A_i \quad (3)$$

T_c : 한 시간 단위에서의 코깁토크

R_i : 모터 회전 중심으로부터 i 번째 요소까지의 거리

B_{ri} : 공극에서의 i 번째 요소의 반경방향 자속밀도

$B_{\theta i}$: 공극에서의 i 번째 요소의 각도방향 자속밀도

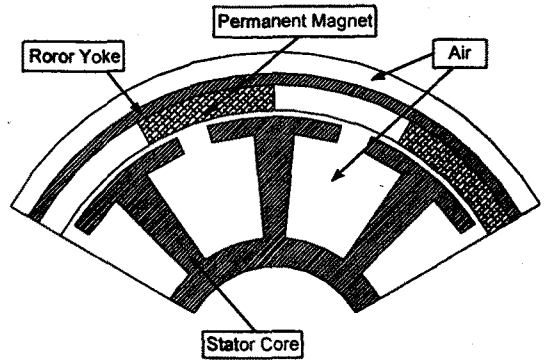


그림 2. 외전형 BLDC 모터의 해석 모델

표 1. 외전형 BLDC 모터의 사양

극 수	12	고정자 외경	10.3(mm)
슬롯 수	9	고정자 높이	3.5(mm)
회전자 내경	10.6(mm)	잔류자속밀도	6400(G)
회전자 외경	12.2(mm)	보자력	5000(Oe)
고정자 내경	4.0(mm)	공극 길이	0.3(mm)

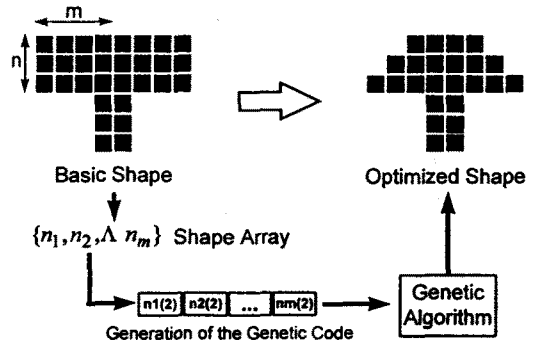


그림 3. 형상 최적화의 개념도

A_i : i 번째 요소의 공극 부분의 면적

본 논문에서 적용한 형상 최적화의 기본 개념을 그림 3에 보인다. 각 설계변수들은 각도방향을 따라 코어부분의 높이정보를 갖고 있다. 이들 변수는 정수값이기 때문에, 코어의 형상을 나타내는 형상 배열로부터 직접 유전 알고리즘을 위한 코드를 얻을 수 있다.

2.4 결과 및 토의

다음의 세 가지 형상 제약 조건에 따라 최적화를 수행하였다. 1) 형상에 대한 제약조건이 없는 경우 (설계변수 5개), 2) 곡면형 코어 (설계변수 5개), 3) 요철형 코어 (설계변수 3개). 정격 토크를 일정 정도 유지해야 하므로, 모든 경우에 대해 치를 통과하는 유효 자속값은 그림 4.(a)에 보이는 기본 형상의 경우의 95%를 넘어야 한다. 코깁토크의 최대값이 전체 토크 리플의 크기를 결정하기 때문에, 목적함수는 각 시간 단위에서의 코깁토크 값 중 최대값으로 하였다.

그림 4에 기본 코어 형상 및 각 제약 조건에 대해 최적화된 코어 형상을 보인다. 또한 그림 5와 그림 6에 각 경우에 대한 공극 자속밀도 분포 및 코깁토크 파형을 보인다. 표 2에는 각 코어 형상에 대한 최대 코깁토크

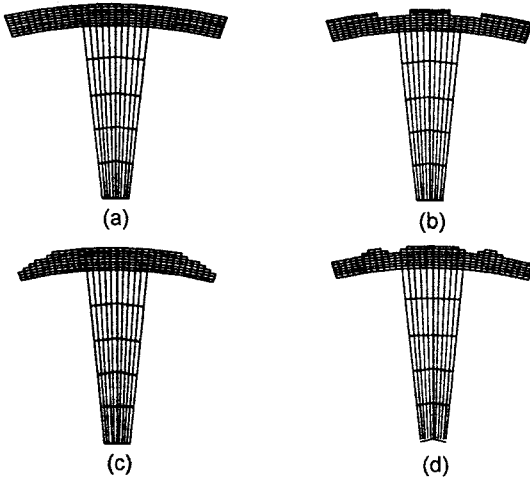


그림 4. 기본 코어 형상 및 각 제약조건에 따라 최적화된 코어 형상
 (a) 기본형 코어 (b) 요철형 코어 (c) 곡면형 코어
 (d) 최적 코어(형상 제약조건 없음)

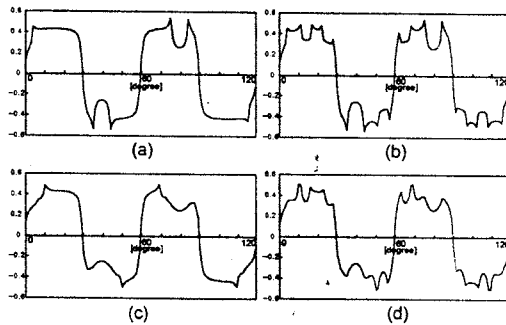


그림 5. 각 코어 형상에 따른 공극 자속밀도 분포(Tesla)
 (a) 기본형 코어 (b) 요철형 코어 (c) 곡면형 코어
 (d) 최적 코어(형상 제약조건 없음)

값을 보였다. 요철형 코어의 경우 기본 형상의 경우 보다 약 75%의 코깅토크를 저감하였고, 곡면형 코어와 형상제약 조건이 없는 경우의 최적 코어 형상의 경우 각각 약 94% 및 95%의 코깅저감 효과를 가져왔다. 요철형 코어는 코깅토크를 유발하는 고조파 성분을 억제하기 위해 고안된 형상이다. [1] 한편, 곡면형 코어는 그림 4(c)의 자속밀도 분포에서 알 수 있듯이 공극에서의 자속밀도 분포를 부드럽게 만들어 주는 효과가 있다. 제약조건이 없는 경우의 최적 코어 형상은 요철형 코어와 곡면형 코어의 조합으로 볼 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 외전형 BLDC모터의 코깅토크를 저감하기 위해 유전 알고리즘과 릴럭턴스 방법을 이용하여 코어 형상 최적화를 수행하였다. 형상에 대한 제약 조건이 없는 경우의 최적 코어 형상과 곡면형 코어의 경우 최적화를 통해 코깅토크를 현저하게 저감하는 구조를 찾아 낼 수 있었다. 형상의 제약 조건이 없는 경우의 최적 형상은 제작이 어렵기 때문에, DVD ROM 구동 시스템에 응용되는 외전형 BLDC모터의 코깅토크 저감을 위

표 2. 각 코어 형상에 따른 최대 코깅토크

	최대 코깅토크 (gf cm p-p)	코깅토크 저감비
기본형 코어	48.32	0%
요철형 코어	13.57	75%
곡면형 코어	2.766	94%
최적 코어	2.414	95%

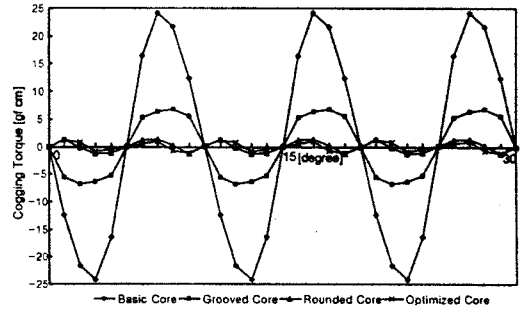


그림 6. 각 코어 형상에 따른 코깅토크 파형

해 곡면형 코어를 채택할 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Humio Tajima, Kunio Miyashita, Motoya Itou, Akira Tamura, and Takeo Konno, "Analysis of Cogging Torque by Finite Element Methods", T. IEE Japan, Vol. 107-D, No. 5, pp. 635-641, 1987
- [2] 황 동윤, 허 진, 윤 상백, 홍 정표, 현 동석, "3차원 등가 자기회로방법을 이용한 영구자석의 자화분포에 따른 BLDC 모터의 코깅 토크 해석", '97 대한 전기학회 창립 50주년 학계학술대회 논문집 (EMP 11), pp. 159~ 173, 1997
- [3] Dong-Joon Sim, Dong-Hyeok Cho, Jang-Sung Chun and Hyun-Kyo Jung, "Efficiency Optimization of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor using Genetic Algorithms", IEEE Trans. on Mag., Vol. 33, pp. 1880-1883, 1997
- [4] Osama A. Mohammed, "GA Optimization in Electric Machines", 1997 IEEE IEMDC Record, pp. TA1-2.1-TA1-2.6
- [5] 임 달호, 김 학련, "등가자기회로방법에 의한 자체해석에 관한 연구", 전기학회 논문지, 42권, pp. 14~21, 1993
- [6] J. Perho, E. Ritchie, "Analysis of a Permanent Magnet Machine Using Reluctance Network Method", International Conference on Electrical Machine, IECM'96 Vigo, Vol. 1, pp. 44-47, September 1996
- [7] Vlado Ostovic, *Dynamics of Saturated Electric Machines*, Spinnnger Verlag, 1989, Chap2, pp. 6-29