

매입형 영구자석 전동기의 코깅 토크 저감을 위한 노치 최적 설계

홍승기, 여한결, 박현정, 정현교
서울대학교 전기정보공학부

Optimal Design of Interior Permanent Magnet Motor for the Cogging torque reduction

Seung-Ki Hong, Han-Kyeol Yeo, Hyeon-Jeong Park, Hyun-Kyo Jung
Department of Electrical & Computer Engineering, Seoul National University

Abstract - 본 논문에서는 매입형 영구자석 전동기의 코깅토크 저감을 위해 회전자 표면에 노치를 적용하여 최적 설계를 수행하였다. 최적 설계를 위해 전역 최적점의 빠른 탐색이 가능한 크리깅 근사모델을 이용한 진화전략 알고리즘이 사용되었다. 설계 변수인 노치 크기에 대해 코깅 토크를 목적 함수로 두고 최적 설계를 진행하였으며, 이를 통해 찾은 전역 최적점과 지역 최적점 가운데 역기전력 특성을 고려하여 최종 설계안을 도출하였다.

1. 서 론

매입형 영구자석 전동기(Interior Permanent Magnet Motor)는 회전자 철심 내에 영구자석을 삽입한 구조를 갖는다. 이는 자기적으로 유효 공간이 작고 고속 회전 시 원심력에 의한 영구자석 비산의 문제가 없는 이점을 갖는다. 또한, 회전자에 돌극성이 생기게 되어 자석에 의한 토크 외에 d축, q축 인덕턴스 차이에 의한 릴럭턴스 토크가 부가되어 보다 큰 토크를 발생시킬 수 있다. 하지만 이러한 영구자석형 전동기는 고정자 치(teeth)와 영구자석 간에 발생하는 높은 코깅 토크(Cogging Torque)를 갖게 되며 이는 전동기의 소음, 진동 및 효율 특성의 저하를 유발시킨다. 특히 차량 구동용 전동기의 경우 소음, 진동 특성이 매우 중요하며, 고속 회전 시 상대적으로 코깅 토크의 영향이 커지므로 이러한 코깅 토크의 저감이 필수적이다.[1]

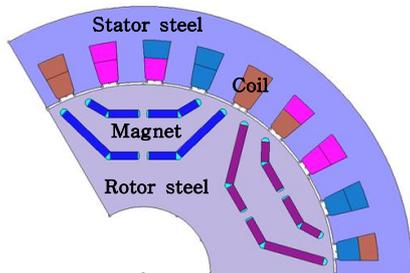
일반적으로 코깅 토크를 감소시키기 위한 방법으로는 영구자석 폭이나 배치의 조정, 슬롯 및 치의 폭 조정, 영구자석의 스큐 적용, 치에 보조구 생성, 무슬롯 전기자의 사용, 노치의 적용 등이 있다. 이 중 본 논문에서는 노치(Notch)를 적용하는 방법을 택하였다.[2][3] 회전자의 표면에 홈을 파는 방식인 노치를 적용하면 코깅 토크를 발생시키는 주요 요소를 제거하여 코깅 토크 저감에 효과가 있다.

노치 형상의 최적 설계를 위해서는 크리깅 메타모델(Kriging Metamodel)을 이용한 진화전략(Evolution strategy) 알고리즘이 사용되었다. 이는 전체 공간을 탐색하며 전역 최적점을 찾을 수 있는 진화 전략 알고리즘의 함수 호출 횟수를 현저히 줄일 수 있는 장점이 있다. 목적 함수는 코깅 토크의 첨두간치(peak to peak)로 설정하되, 코깅 토크가 저감됨에 따라 발생토크의 감소를 야기할 수 있으므로 이를 고려한 최적 설계안의 도출이 필요하다. 따라서 탐색한 전역 및 지역 최적점 가운데 코깅 토크의 저감 효과가 큰 몇 개의 sample을 구하고, 이들 중 역기전력(Back Electro-motive Force) 저하가 적은 sample을 선택함으로써 최종 설계안을 도출하였다.

2. 본 론

2.1 기본 모델

그림 1은 본 논문에서 선정한 매입형 영구자석 전동기의 기본 모델이다. 기본 모델에 대한 세부 설계 사양은 표 1에 나타내었다.



〈그림 1〉 기본 모델 형상

〈표 1〉 기본 모델의 설계 사양

항목	값	단위
정격 토크	300	Nm
정격 출력	95	kW
극수/슬롯수/상수	6 / 27 / 3	-
고정자 외경/내경	240 / 172	mm
회전자 외경/내경	170 / 60	mm
축방향 길이	230	mm
영구 자석	NdFeB (Br=1.0T)	-

일반적으로 고정자의 슬롯수가 증가하게 되면 제작성이 저하되지만 정현파 역기전력 구현이 용이하고 코깅 토크와 토크 리플이 저감되는 등 전동기의 전자기적 특성이 좋아진다. 또한 매극 상당 슬롯수가 분수인 경우 각 자석 극과 고정자 슬롯과의 상대 위치의 위상이 다르게 되어 코깅 토크가 저감되는 효과를 보인다. 따라서 6극 전동기의 경우 27슬롯이 36슬롯 보다 더 나은 코깅 토크 특성을 가지며, 27슬롯 구조와 54슬롯 구조가 동일한 최소 공배수를 가지기 때문에 비슷한 코깅 토크 특성을 나타낼 것으로 예측할 수 있다. 이에 본 논문에서는 극, 슬롯 수 조합으로부터 분수 슬롯수를 선택함으로써 1차적으로 코깅 토크가 줄어든 기본 모델을 설계하였고, 이를 바탕으로 추가적인 코깅 토크 최소화를 수행한다.

2.2 크리깅 근사모델을 이용한 진화 전략 알고리즘

일반적으로 진화 전략 알고리즘은 방대한 문제 공간의 탐색 능력을 갖고 있으며 이미 만들어진 해들의 특징을 효율적으로 이용할 수 있는 장점을 갖는다. 하지만 이러한 방법은 교차 및 변이 연산이 임의적으로 이루어지기 때문에 지역 최적점에서의 접근 속도가 느리다. 따라서 진화 전략 알고리즘에 크리깅 근사 모델을 도입하면 전체 공간을 탐색하며 전역 최적점을 찾을 수 있는 진화 전략 알고리즘의 함수 호출 횟수를 현저히 줄일 수 있는 장점이 있다. 여기서 크리깅 모델의 역할은 이전 세대까지의 모든 정보를 이용하여 실제 목적함수와 유사한 근사 모델을 생성함으로써, 이로부터 구해진 예측 최적점을 다음 세대의 후보해로 가져갈 수 있도록 하는 것이다. 초기해에 민감한 진화 전략 알고리즘의 후보해를 우수한 해로 선택할 수 있는 것은 빠른 전역 최적점의 탐색을 가능하게 하며, 이는 계산 시간을 크게 감소시켜 줄 것이다.

크리깅 모델을 이용한 진화 전략 알고리즘의 진행 절차는 다음과 같다.

Step 0. 초기해 생성 : 문제 영역 내에서 n개의 해를 임의로 생성한다.

Step 1. 부모해 생성 : 초기해 가운데 우수한 목적 함수 값을 갖는 μ 개의 부모해를 뽑는다. 남은 초기 개체들은 근사모델의 업데이트를 위해 저장된다.

Step 2. 자식해 생성 : 각 해의 적합도(fitness)를 계산한 후, Roulette wheel selection을 이용하여 확률적인 우선권을 가진 해에 현해서 새로운 λ 개의 자식해를 만든다.

Step 3. Annealing : 현재의 엘리트 해가 이전 세대의 엘리트 해와 비교하여 향상되었을 경우, 진화 범위는 증가된다. 반면, 엘리트 해가 나아지지 않을 경우 진화 범위는 감소하게 된다. 향상되었을 경우 진화 범위가 증가되는 것은 다양성을 유지할수록 근사모델의 정확도가 높아지기 때문이다.

Step 4. Shaking : 부모해에 없는 속성을 도입하여 해의 다양성을 높이기 위해 전체 탐색 공간 내에서 일정 확률을 가지고 임의의 해를 생성시킨다.

Step 5. Reshaping : 세대가 거듭됨에 따라 얻어진 새로운 데이터로부

더 크리깅 모델은 계속적으로 업데이트된다. 생성된 크리깅 모델의 전역 최적점을 탐색하여 현재의 엘리트 해보다 우수한 해가 나타나면 우수한 해로 엘리트 해를 대체한다. 엘리트 해보다 나아지지 않을 경우, 다음 세대의 부모해를 위한 후보해가 되며, 그 데이터는 다음 Reshaping을 위해 저장된다.

Step 6. 수렴 여부 판단 : 1~6 스텝을 반복한다. 더 이상 해가 향상되지 않아 진화 범위가 제한 조건 이하로 줄어들었을 경우 알고리즘은 종료된다.

2.3 알고리즘의 검증

알고리즘에 대한 신뢰성을 확인하기 위해서 식 (1)의 시험 함수가 사용되었다. 총 10회 반복 실행 하였을 때, 평균 208번의 함수 호출을 통해 그림 2와 같이 시험 함수의 최적점을 찾을 수 있었다. 이는 실제 함수의 피크 값과 평균적으로 1% 이내의 오차를 갖는다.

$$f = \sum_{k=1}^{N_p} \frac{b_k}{1 + \frac{(x-x_{pk})^2 + (y-y_{pk})^2}{a_k}}, (-50 \leq x, y \leq 50) \quad (1)$$

2.4 설계 변수 및 목적 함수

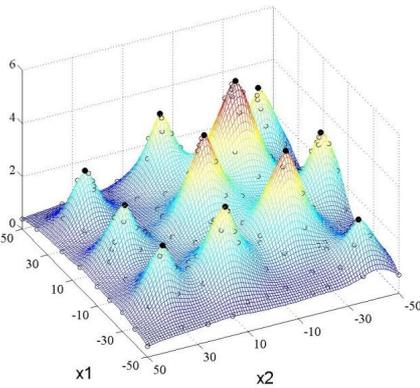
최적 설계를 위한 설계변수는 그림 3과 같이 노치의 너비(Width)와 깊이(Depth)로 선정하였다. 회전자 표면과 자석 사이의 공간을 고려할 때 설계 변수의 범위는 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} 0 &\leq \text{Depth}[\text{mm}] \leq 2 \\ 0 &\leq \text{Width}[\text{mm}] \leq 25 \end{aligned} \quad (2)$$

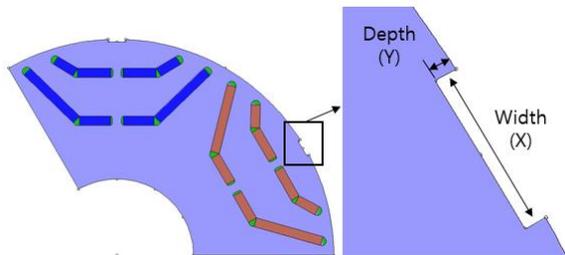
목적 함수는 코깅 토크의 pick to pick 값이며, 최종 설계안 도출에 고려될 역기전력은 3000rpm에서의 최대값을 기준으로 계산되었다.

2.5 최적 설계 결과

최적화 결과를 표 2에 나타내었다. 각 Case는 목적 함수에 대해 전역 및 지역 최적점으로 이해할 수 있다. 우선 코깅 토크 저감 측면에서는 Case 1이 가장 효과적이다. 하지만 Case 2의 경우 비슷한 코깅 토크 저감 효과를 가지면서 역기전력의 감소가 적음을 확인할 수 있다. 따라서 Case 2를 최종 설계안으로 선정하였다. 그림 4, 5는 기본 모델과 최종 설계안의 코깅 토크 및 역기전력 파형을 비교하여 나타내고 있다. 코깅 토크의 경우 기본 모델 대비 약 80%이상의 저감 효과를 보였고, 역기전력의 감소는 5% 이내로 제한되었음을 확인할 수 있다.



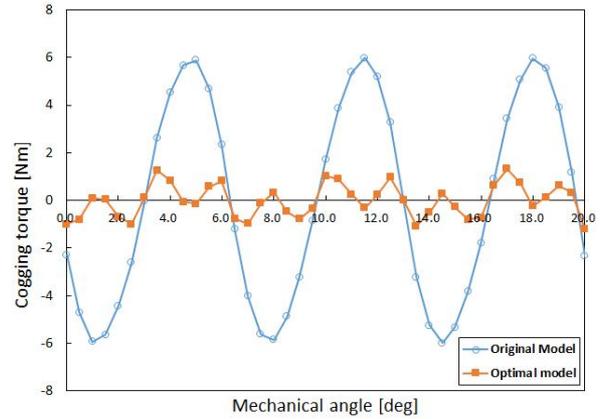
〈그림 2〉 시험 함수에 대한 알고리즘 적용 결과



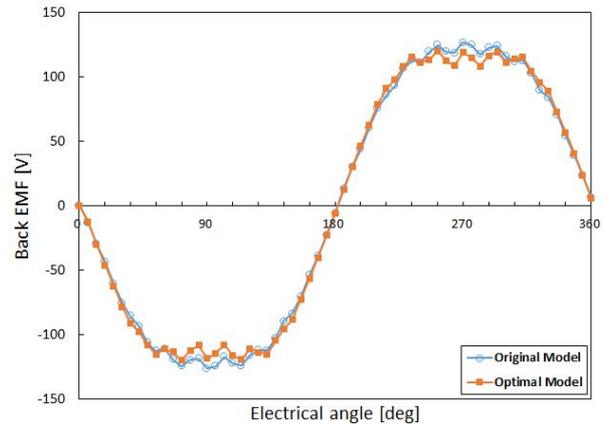
〈그림 3〉 설계 변수

〈표 2〉 최적화 결과

변수	Case 1	Case 2	Case 3
노치 너비 [mm]	21.1	14.4	18.8
노치 깊이 [mm]	0.62	0.51	0.52
코깅 토크 [Nm]	2.36	2.65	2.68
역기전력 [V]	116.1	121.1	118.8



〈그림 4〉 기본 모델과 최적 모델의 코깅 토크 비교



〈그림 5〉 기본 모델과 최적 모델의 역기전력 비교

3. 결 론

본 논문에서는 매입형 영구자석 전동기의 코깅토크 저감을 위한 최적 설계가 수행되었다. 크리깅 근사모델을 이용한 진화전략 알고리즘이 사용되었으며, 시험함수의 적용을 통해 그 신뢰성을 검증하였다. 이를 노치의 최적 설계에 적용하여 역기전력 크기를 고려한 코깅 토크의 최적 개선안을 도출할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] Yubo Yang, "Study of Magnet Asymmetry for Reduction of Cogging Torque in Permanent Magnet motors", Industrial Electronics and Applications, 2009. ICIEA 2009, ICIEA 2009, 4th IEEE Conference, pp. 2325-2328, May 2009.
- [2] C.S.Koh, and J.S.Seol, "New Cogging-Torque Reduction Method for Brushless Permanent-Magnet Motors", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 39, No. 6, pp. 3503-3506, Nov. 2003.
- [3] G.H.Kang, Y.D.Son, G.T.Kim, and J.Hur, "A Novel Cogging Torque Reduction Method for Interior-Type permanent-Magnet Motor", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 45, No. 1, pp. 161-167, Jan/Feb. 2009.