

표면부착형 영구자석 동기전동기의 노치 및 영구자석 offset에 의한 코깅토크 저감 연구

김태우*, 장정환
 동아대학교 전기공학과

A Study on Cogging Torque Reduction by Teeth Notching and Permanent Magnet offset in Surface-mounted Permanent Magnet Synchronous Motor

Tae-Woo Kim*, Jung-Hwan Chang
 Department of Electrical Engineering, Donga University

Abstract - 본 논문은 표면부착형 영구자석 동기전동기(Surface-mounted Permanent Magnet Synchronous Motor)의 영구자석 offset의 변화와 노치(notch)의 적용에 따른 코깅토크 저감 특성을 분석하고, 중심합성계획법(Central Composite Design)을 이용한 최적 모델 설계에 대한 연구이다. 영구자석 offset만 적용한 모델의 경우 코깅토크의 피크-피크값은 95%로 크게 저감되었지만 정격전류 인가시 평균토크의 감소율이 12.3%로 출력 손실이 크기 때문에 최적 설계를 통해 추가적으로 노치를 적용하고 영구자석 Offset을 조절함으로써 코깅토크 저감율을 96.5%로 개선시킬 수 있었고, 평균토크의 감소율은 7.7%로 영구자석 offset만 적용한 모델보다 평균토크의 감소량이 작아진 것을 확인할 수 있었다.

1. 서 론

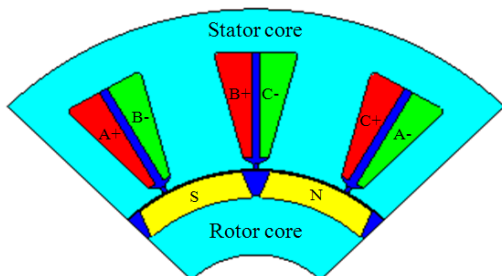
영구자석 전동기는 회전자의 영구자석과 고정자 슬롯 간의 자기저항 차에 의한 코깅토크를 가진다. 코깅토크는 극수와 슬롯수의 최소공배수를 기본 주파수로 맥동하고, 전동기의 속도제어 및 위치제어에 악영향을 주며 이로 인하여 발생하는 토크리플은 전동기의 진동 및 소음 발생에 큰 영향을 미치는 주요 원인이 된다. 이러한 이유로 전동기 설계시 출력에 영향을 적게 주면서 코깅토크를 저감시키는 방법이 반드시 필요하다. 코깅토크를 저감시키는 방법은 공극의 길이 증가, fractional slot/pole의 사용, 고정자나 회전자에 스큐(skew)를 주는 방법, 슬롯의 개구폭 조정, 보조슬롯(notch)의 사용, 고정자 치의 형상 변화, 영구자석의 형상 변화 등이 있다[1].

본 논문에서는 이상의 코깅토크를 저감시키는 방법 중에서 영구자석 offset의 변화 및 고정자의 노치 적용을 통하여 코깅토크 저감 및 평균토크에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 평균토크의 감소량을 최소화하기 위해 영구자석 offset과 노치의 깊이를 설계변수로 선정하고 중심합성 계획법을 이용하여 최적 모델을 설계하였다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

기본 모델은 표면부착형 영구자석 동기전동기로서 3상 8극 12슬롯으로 경계조건을 고려한 해석 모델의 1/4 단면도는 그림 1과 같고, 전동기의 구체적인 사양은 표 1과 같다.



<그림 1> 해석 모델

2.2 노치 적용에 따른 코깅토크 특성

코깅토크는 회전자가 회전할 때 발생하는 에너지의 변화량에 의한 것으로 자기에너지의 변화가 최소가 되는 안정위치(aligned or detent

<표 1> 해석 모델의 사양

항 목	제 원	
General Data	Rated Output	55 kW
	Rated Voltage	3∅ 380 Vrms
	Rated Current	100 Arms
	Rated Torque	350 Nm
	Rated Speed	1500 rpm
	Air Gap	1 mm
Stator	Number of Slots	12
	Outer Diameter	310 mm
	Number of Conductor per Slot	68
Rotor	Number of Poles	8
	Outer Diameter	158 mm
	Br (Remenace) of Permanent Magnet	1.25 T

position)로 되돌아가려는 힘에 의해 발생하는 맥동 토크이다[2]. 전동기의 철심과 영구자석의 자기에너지 변화량은 공극에서의 자기에너지 변화량에 비해 무시할 만큼 작으므로 코깅토크를 회전자에 따른 공극에서의 자기에너지로 표현하면 식 (1)과 같다.

$$T_{cog} = - \frac{\partial W_{air\ gap}}{\partial \alpha} \tag{1}$$

여기서 α 는 고정자 치와 회전자 영구자석 사이의 위치각을 나타낸다. 에너지법을 이용하여 코깅토크 식 (1)을 푸리에 급수 전개를 통해 유도하면 식 (2)와 같이 표현할 수 있다[3].

$$T_{cog}(\alpha) = \frac{\pi z L_{Fe}}{4\mu_0} (R_2^2 - R_1^2) \sum_{n=1}^{\infty} n G_n B_r \frac{nz}{2p} \sin n z \alpha \tag{2}$$

여기서 L_{Fe} 은 적층 길이, R_1 은 영구자석의 외경, R_2 는 고정자의 내경, z 는 고정자의 슬롯 수, p 는 영구자석의 극쌍수, n_{nt} 는 고정자 치 한 개에 대한 노치의 수, n 은 $(n_{nt} + 1)$ 배수의 고조파 성분을 나타낸다. 또한 푸리에 계수 G_n 은 고정자의 슬롯 폭 및 노치에 대한 함수로 표현되는데 $G_n \neq 0$ 이면 $(n_{nt} + 1)$ 배수의 고조파 성분이 커져서 코깅토크를 저감할 수 없지만, $G_n = 0$ 이면 $(n_{nt} + 1)$ 배수의 고조파 성분을 제거함으로써 전체적인 코깅토크를 저감할 수 있다.

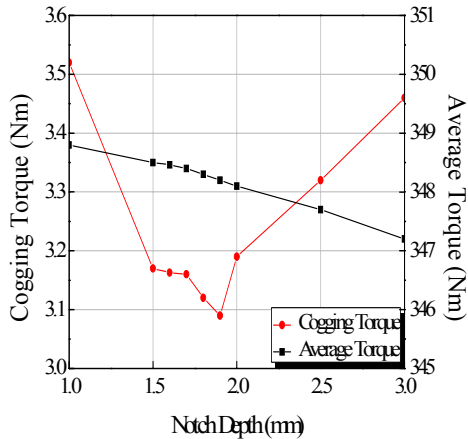
한 슬롯 피치에 대한 코깅토크 주기 N_p 는 식(3)과 같이 표현되고, 이때의 극당 슬롯수가 분수인 경우 $G_n = 0$ 을 만족시키는 n_{nt} 는 식 (4)를 만족해야 한다[4].

$$N_p = \frac{2p}{GCD(z, 2p)} \tag{3}$$

$$n_{nt} + 1 \neq m N_p \tag{4}$$

여기서 m 은 임의의 정수, $GCD(z, 2p)$ 는 영구자석의 극쌍수와 슬롯수의 최대공약수를 나타낸다. 8극 12슬롯 모델의 극당 슬롯수는 1.5이고, $N_p = 2$ 이므로 식 (4)에 의해 고정자의 치 하나에 대한 노치의 수 n_{nt} 는 $2(4, 6, \dots)$ 개로 선택할 수 있다. 전동기의 구조 및 제작의 편의를 위해 노치의 수를 2개로 선정하고 기본 모델에 적용하여 코깅토크의 특성을 해석하였다.

그림 2는 노치의 깊이의 변화에 따른 코깅토크와 정격전류 인가시 평균토크를 그래프로 나타낸 것이다. 코깅토크의 경우 노치의 깊이가 1.9mm에서 최소값을 가지고 그 외의 깊이에서는 코깅토크가 증가하는 경향을 보이지만 평균토크는 노치의 깊이가 클수록 작아지는 경향을 가진다. 기본 모델과 노치가 적용되어 코깅토크의 크기가 최소인 모델을 비교하면, 코깅토크의 피크-피크값은 21.49Nm에서 3.09Nm로 85.6% 저감된다.

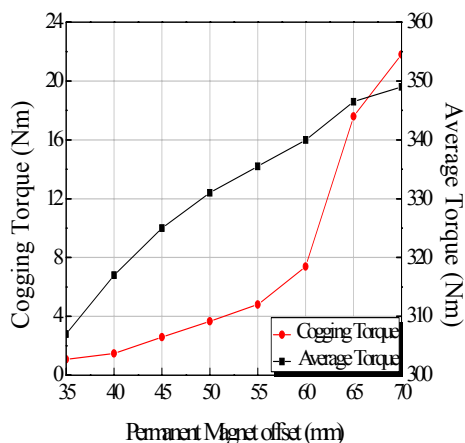


〈그림 2〉 노치의 깊이 변화에 따른 코깅토크와 평균토크

2.3 영구자석 offset 따른 코깅토크 특성

영구자석의 offset에 의해 자석의 끝단으로 갈수록 자석 두께가 줄어드는 형상으로 공극 자속밀도의 급격한 변화를 감소시킴으로써 코깅토크를 저감할 수 있다.

그림 3은 영구자석 offset의 변화에 따른 코깅토크와 평균토크를 나타낸 것이다. 영구자석 offset이 작을수록 코깅토크 뿐만 아니라 평균토크도 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 기본 모델과 영구자석 offset이 35mm인 모델을 비교하면, 코깅토크의 피크-피크값은 21.49Nm에서 1.08Nm로 95% 저감되어 코깅토크 저감율은 높으나 평균토크가 12.3%로 크게 감소하여 출력 손실이 커지게 된다.



〈그림 3〉 영구자석 offset의 변화에 따른 코깅토크와 평균토크

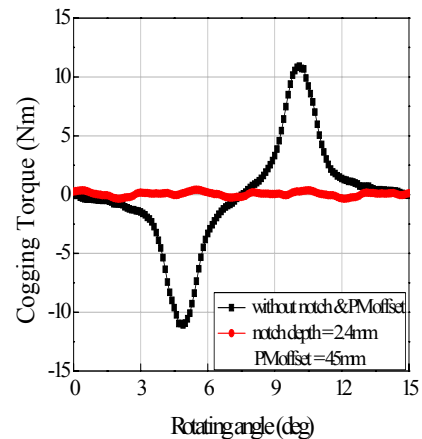
2.4 중심합성계획법에 의한 최적화

코깅토크 저감과 평균토크의 감소량을 최소화하기 위해 코깅토크 저감이 큰 변수인 영구자석 offset에 추가적으로 노치를 적용하여 최적설계를 수행하였다. 최적화 방법으로는 중심합성계획법을 이용하였으며 최적설계에 사용되는 설계변수의 수준과 치수는 표 2와 같다.

〈표 2〉 설계 변수의 수준

설계 변수	설계 변수의 수준				
	$-\alpha$	-1	0	1	α
영구자석 offset [mm]	33	35	40	45	47
notch depth [mm]	1.2	1.4	1.9	2.4	2.6

그림 4는 기본 모델과 최적 모델의 코깅토크 파형을 그래프로 나타낸 것이다. 최적화된 모델의 각 설계 변수의 치수는 영구자석 offset은 45mm, 노치의 깊이는 2.4mm이다. 두 변수의 상호작용으로 인해 앞서 분석한 각 변수들에 대한 최소 코깅토크값을 가질 때의 치수와는 다른 값의 치수가 결정됨을 확인할 수 있다. 최적모델의 코깅토크의 피크-피크값은 0.76Nm이고 코깅토크 저감율은 96.5%로 향상되었으며, 노치만 적용된 모델보다는 10.9% 저감되었고, 영구자석 offset만 적용된 모델보다는 1.5% 저감되었다. 최적 모델의 평균토크 감소율은 영구자석 offset만 적용된 모델에서의 12.3%보다 줄어든 7.7%로 평균토크의 감소량이 작아진 것을 확인할 수 있다.



〈그림 4〉 기본 모델과 최적 모델의 코깅토크 비교

3. 결 론

본 논문에서는 3상 8극 12슬롯 표면부착형 영구자석 동기전동기의 코깅토크 저감을 목적으로 노치 및 영구자석 offset을 적용하여 그 결과를 분석하고 중심합성계획법을 이용하여 최적 설계를 수행하였다. 영구자석 offset만 적용한 경우 코깅토크의 최소값을 가지는 35mm에서 코깅토크 저감율이 95%이지만 평균토크가 정격토크보다 12.3% 감소하여 출력 손실이 크다. 평균토크의 감소를 줄이기 위해 노치를 추가 적용하여 최적 설계를 하였으며 그 결과 코깅토크 저감율은 96.5%로 개선되었고 평균토크 감소율은 7.7%로서 영구자석 offset만 적용한 모델보다 평균토크의 감소량이 작아져 출력 손실을 줄일 수 있다. 코깅토크 저감율이 높은 영구자석 offset만으로 코깅토크를 저감시킬 수 있지만 평균토크의 감소율이 작기 때문에 추가적으로 노치를 적용하여 영구자석 offset을 조절함으로써 코깅토크 저감율을 향상시키고 동시에 평균토크 출력을 증가시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] J. R. Hendershot Jr and T. J. E Miller, "Design of Permanent Magnet Motors," Magna Physics Publishing and Clarendon Press, 1994
- [2] 고흥석, 김광준, "영구자석을 사용한 모터의 코깅토크에 관한 이론적 해석," 대한기계학회논문집, 제24A권 제7호, pp. 1795-1800, 2000
- [3] Yubo Yang and Xiuh Wang, "Reducing Cogging Torque in Surface-mounted Permanent Magnet Motors by Teeth Notching," 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2007
- [4] Bin Zhang, Xiuh Wang, Ran Zhang and Xiaolei Mou, "Cogging Torque Reduction by Combining Teeth Notching and Rotor Magnets Skewing in PM BLDC with Concentrated Windings," ICEMS, pp. 3189-3192, 2008