

영구자석 전동기의 코어 형상에 따른 코깅 토크 저감에 관한 연구

박일환 · 김동석 · 박관수*

부산대학교 전자전기공학부, 부산시 금정구 장전동 산30번지, 609-735

(2010년 3월 16일 받음, 2010년 4월 16일 최종수정본 받음, 2010년 4월 16일 게재확정)

근래 첨단 전동기 개발에 고성능 영구자석이 적용됨에 따라 소형 전동기의 고출력화가 가능해진 반면 전동기의 진동과 소음이 커져 그 원인이 되는 코깅 토크에 대한 연구가 필요하게 되었다. 영구자석 전동기의 코깅토크는 영구자석에 의한 자계의 분포에 기인하게 되는데, 전동기의 자계 분포는 코어의 형상에 기인하므로 코어의 형상을 적절하게 설계함으로써 코깅토크를 저감시킬 수 있다. 본 논문에서는 영구자석 전동기의 코깅토크를 저감하기 위한 기존의 sub-slot 법을 개선하여 보다 단순화 한 형상으로 코어의 설계변수를 대폭 줄임으로 효과적으로 코깅토크를 저감할 수 있는 기법을 제안하고 이를 영구자석 전동기에 적용하여 기존의 대표적인 sub-slot 법과 비교하고 그 성능을 검증하였다.

주제어 : PMSM, Cogging Torque, Core Design

I. 서 론

영구자석 전동기는 효율과 역률이 좋고 고속운전이 가능하며, 다양한 구조 설계가 가능하여 여러 분야에 걸쳐 오래전부터 연구되고 사용되어왔다. 특히 최근에는 고에너지 밀도의 영구자석 재질이 개발되고 발달함에 따라 고출력의 영구자석 전동기의 설계도 가능해져 수만 rpm 이상의 고속 전동기뿐만 아니라 MW급 이상의 고 토크 전동기의 설계도 가능해졌다[1]. 그러나 고성능 영구자석 모터는 필연적으로 큰 코깅 토크를 수반하므로 진동 소음의 원인이 되는 Cogging Torque 의 저감이 반드시 필요하다[2]. Cogging Torque의 저감방법은 고정자나 회전자에 skew를 주는 방법, fractional pole/slot을 사용, slot open 감소, 공극 길이 증가, sub-slot 사용, 고정자 형상 변화 등이 있다[2-4]. 본 논문에 적용된 모델은 이상의 코깅 저감 방법 중 Skew, fractional pole/slot, slot open의 방법이 이미 적용된 모델이며, 정격 토크 대비 20.06%의 Cogging Torque 를 가지는 모델로서, 여전히 Cogging 저감의 필요성을 가지는 모델이다.

따라서 본 논문에서는 영구자석 모터의 Cogging Torque 를 저감하기 위한 방법 중 core에 sub-slot을 사용하는 방법에 있어서, 일반적으로 알려진 square type sub-slot 방식을 변형하여 arc type sub-slot을 설계하고, 유한요소해석을 통해 영구자석형 동기 전동기에 적용하여 그 성능을 검증하였다.

II. 본 론

1. 코깅 토크의 발생

코깅 토크는 회전자 영구자석과 고정자 철심 코어, 공극으로 구성되는 자기회로에서 릴럭턴스가 최소인 방향으로 유지하려는 경향에 의해 발생하는 맥동 토크이다[3]. Fig. 1에서와 같이, 영구자석 회전자가 slot A 위치로부터 반시계 방향으로 회전한다고 할 때, 회전자가 Fig. 1(a)의 위치에 있을 경우, slot A와의 릴럭턴스를 최소화 할 수 있는 방향인, 회전방향의 역방향으로 국지적인 회전력이 발생하게 된다. 마찬가지로 회전자가 Fig. 1(b)의 위치에 있을 경우, slot B와의 릴럭턴스를 최소화 할 수 있는 방향인, 회전방향과 같은 방향으로 국지적인 회전력이 발생하게 된다. 이렇게 Fig. 2에서와 같이, 영구자석 전동기의 회전자가 각 slot을 지날 때 마다 회전자의 영구자석과 고정자 코어 slot의 형상과 위치관계

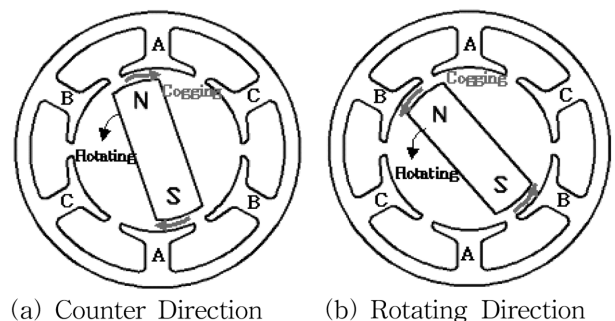


Fig. 1. Cogging torque.

*Tel: (051) 510-2788, E-mail: gspark@pusan.ac.kr

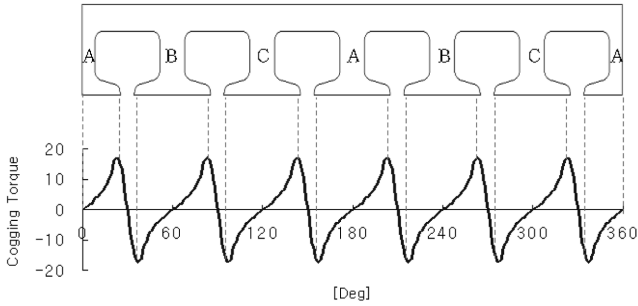


Fig. 2. Cogging Torque in each rotor position.

에 따라 회전 방향에 대하여 역방향과 정방향의 맥동하는 힘의 형태로 코깅 토크가 발생한다.

2. 초기 형상의 코깅 토크

기본 모델은 Fig. 3과 같이 고정자 직경이 47 mm, 회전자 직경 27 mm, slot open 2.2 mm인 영구자석형 동기 전동기(PMSM)로서 4극 6슬롯 모델이다. 또한 고정자와 회전자 사이의 공극은 0.4 mm로서, 토크와 코깅 토크의 주 해석 영역

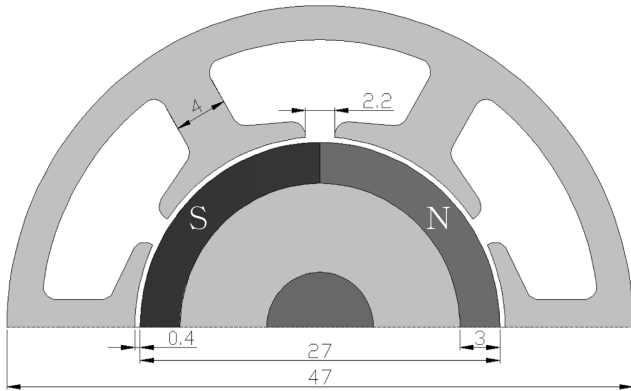


Fig. 3. Initial model [unit: mm].

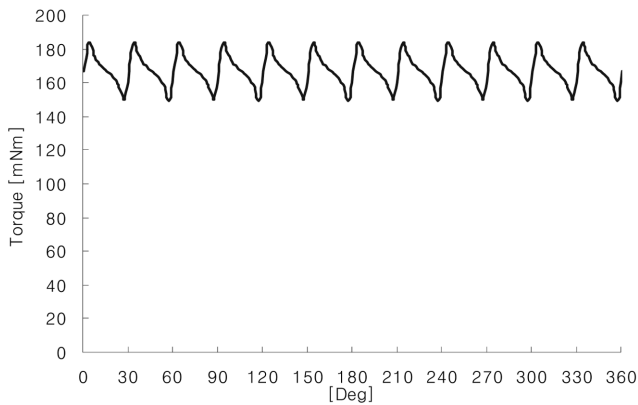


Fig. 4. Cogging Torque of initial model (4pole 6slot).

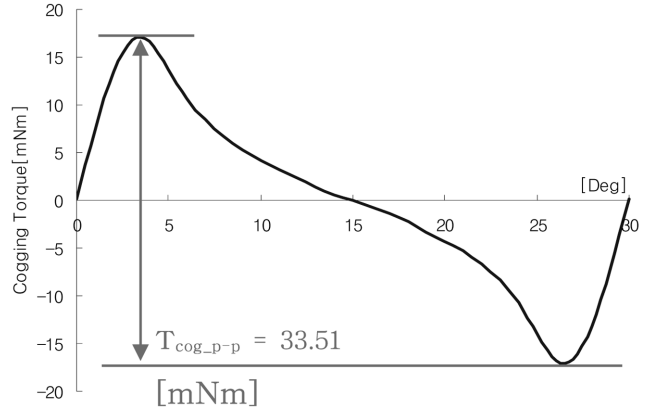


Fig. 5. Cogging torque of initial model (Peak-Peak).

이 된다.

본 모델에 사용된 영구자석은 잔류자속 밀도 0.65 T인 Nd-Ferrite Bonded 가 사용되었으며, 연자성 코어의 재질은 35PN350로서, 0.35 mm 무방향성 전기강판을 사용하였다.

본 모델에서는 코깅 저감 기술 중, 1/4 슬롯의 magnet-skew와 권취(winding)을 위한 공정 한계 최소치인 2.2 mm의 slot open이 적용된 모델이다.

각 모델은 Cedrat 사의 FEM 해석틀인 Flux 2D를 사용하여 해석하였고, Fig. 4와 같이 167.03 mNm의 평균토크를 가지며, 코깅 토크는 Fig. 5와 같이 33.51 mNm로서 평균토크에 대비 20.06 %의 코깅을 가진다.

3. 형상 파라미터 정의

각 sub-slot 형상은 sub-slot의 폭 L 과 높이 h 에 의존하는 함수로 나타낼 수 있다. 여기서 sub-slot의 폭 L 은 코깅 주파수 조절법에 의해 결정되는 sub-slot의 개수에 따라 정해진다.

Fig. 6에서와 같이 sub-slot의 높이 h 는 고정자 teeth와 회전자 자석 사이의 공극 거리에 따라 달라져야 하므로, sub-slot의 높이를 공극 거리 $L_{air\ gap}$ 와 구조적 높이 h 를 사용하여

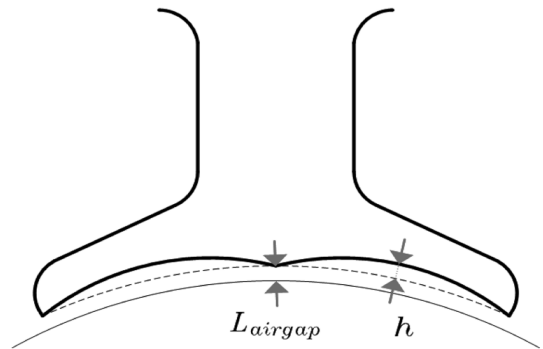


Fig. 6. Defining a scale factor.

다음과 같이 공극거리 대비 sub-slot의 scale factor k 로 표시할 수 있다.

$$k = \frac{h}{L_{air\ gap}} \quad (1)$$

4. 코깅 저감 형상 설계

코깅 저감 방법으로서의 기존의 sub-slot 법은 간단한 구조로 인해 설계 및 공정이 용이한 square 형상 기법과 민감도 해석 기법을 통한 변수 최적화 기법을 사용한 형상 최적화 모델로 대표 될 수 있다.

그러나 square 법은 코깅 저감 성능이 충분치 못하고, 변수 최적화 기법은 많은 설계 변수를 필요로 하고, 형상이 복잡하여, 일반적으로 적용하기 어려움이 있다.

따라서 sinusoidal 곡선과 arc 곡선을 이용하면 단순화된 설계변수를 가지는 형상함수를 구현할 수 있고, 이를 통해 기존의 최적설계와 비교할 때 변수의 수를 획기적으로 줄일 수 있다. 그 결과, 설계 공정이 용이 하면서도 코깅 저감 성능이 민감도 해석 기법에 근사하는 core 형상을 만들 수 있다.

4.1. Sinusoidal 형상의 sub-slot 모델

Sinusoidal 형상의 sub-slot 모델은 teeth 면의 sub-slot을 정현파 형상으로 디자인 한 것으로, radial 방향으로 sub-slot

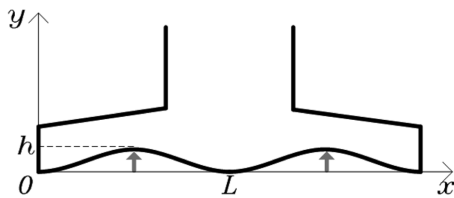


Fig. 7. Sinusoidal type sub-slot.

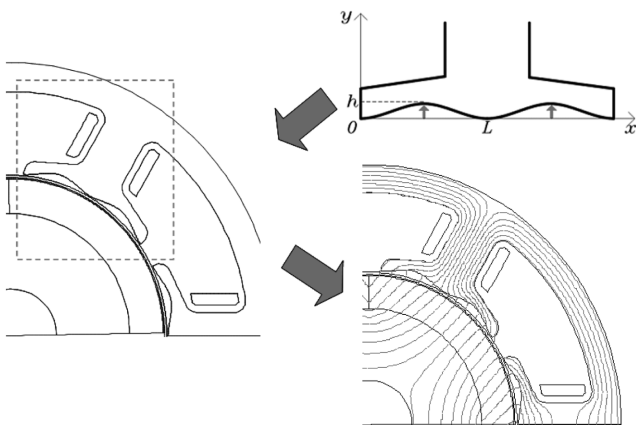


Fig. 8. Applying of sinusoidal type sub-slot.

의 높이 h 만큼 만입된 cosine 함수 형태의 sub-slot을 가지는 teeth 형상이 다. 이 모델은 Fig. 7과 같이 직교좌표축에서 teeth의 한 끝점이 원점에 위치한다고 할 때, sub-slot의 폭 L , sub-slot의 높이 h 에 대하여 다음 식과 같이 형상함수로 표현할 수 있으며, Fig. 8과 같이 sub-slot에 적용될 수 있다.

$$y = h \cdot \frac{1}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{L}x\right) \quad (2)$$

Sinusoidal 형상 적용시의 sub-slot의 깊이에 따른 코깅 토크의 변화를 확인하기 위해서 Fig. 9와 같이 scale factor 0.25인, 높이 0.1 mm부터 scale factor 2.5인, 1 mm까지 0.1 mm 간격으로 조절하면서 코깅 토크의 변화를 확인하였다. 그 결과 Table I에서와 같이, sub-slot의 깊이의 증가에 따라 깊이가 0.4 mm(scale factor = 1) 근방까지는 코깅 토크의 peak to peak가 감소하였으며 깊이가 0.4 mm 이상에서는 코깅 토크

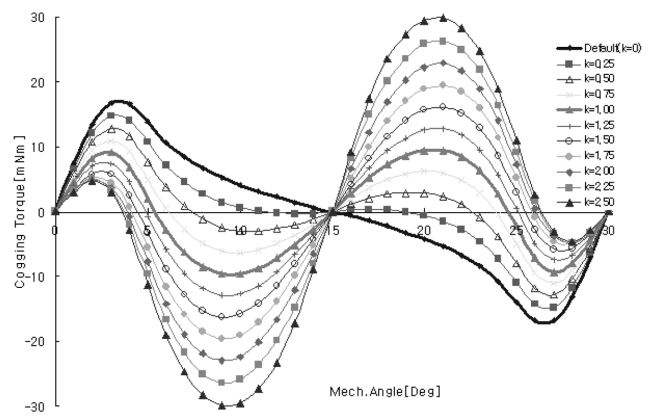


Fig. 9. Cogging torque by scale factor (Sinusoidal type).

Table I. Peak to Peak Cogging Torque by scale factor (Sinusoidal type).

Scale factor	Depth [mm]	Cogging [mNm]		Average Torque		Torque Ripple [%]
		P-P	Rate [%]	[mNm]	Rate [%]	
0.000	0.00	33.51	0.00	167.03	0.00	20.06
0.250	0.10	29.52	-11.89	165.94	-0.65	17.79
0.500	0.20	25.64	-23.46	165.09	-1.16	15.53
0.750	0.30	21.91	-34.60	164.26	-1.66	13.34
0.875	0.35	20.12	-39.96	163.81	-1.93	12.28
0.950	0.38	19.05	-43.15	163.52	-2.10	11.65
1.000	0.40	19.01	-43.25	163.33	-2.22	11.64
1.250	0.50	25.70	-23.29	161.92	-3.06	15.87
1.500	0.60	32.37	-3.40	160.01	-4.20	20.23
1.750	0.70	39.08	+16.65	157.50	-5.71	24.82
2.000	0.80	45.81	+36.72	154.63	-7.42	29.63
2.250	0.90	52.68	+57.22	151.05	-9.57	34.88
2.500	1.00	59.69	+78.16	148.19	-11.28	40.28

의 peak to peak가 증가하였다. 10^{-2} mm 범위에서의 코깅 토크의 peak to peak 값은 scale factor가 $k=1$ 일 때 ($h=0.35$ mm) 최소값 19.01 mNm로 나타났다(Fig. 10). 따라서 고정자 teeth에 scale factor 1인, sinusoidal 형상의 sub-slot을 적용한 경우 sub-slot이 없는 모델에 비해 코깅 토크가 43.25% 감소되었으며, 그 때의 평균 토크 손실은 2.22%, 평균 토크 대비 코깅 토크는 11.64%로 나타났다.

4.2. Arc 형상의 sub-slot 모델

Arc 형상의 sub-slot 모델은 teeth 면에서 radial 방향으로 h 만큼 만입된 원호 형태의 sub-slot을 가지는 teeth 형상이다.

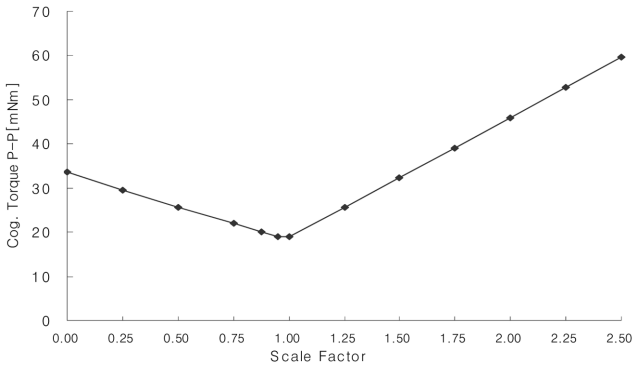


Fig. 10. Peak to Peak Cogging Torque is least at scale factor = 1 (Sinusoidal type).

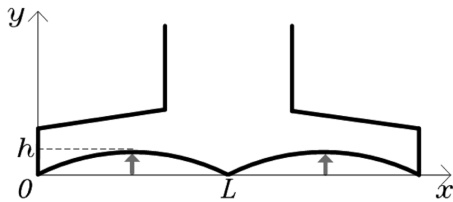


Fig. 11. Arc type sub-slot.

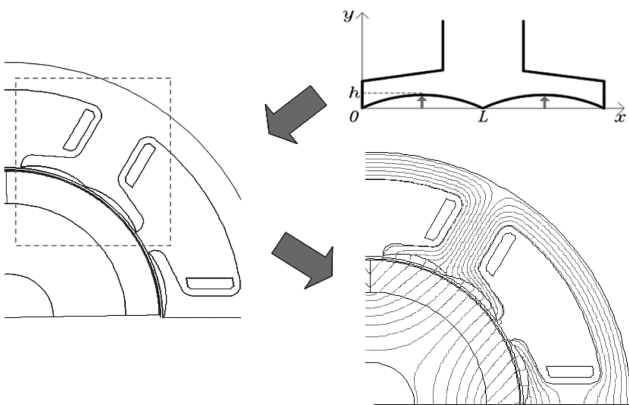


Fig. 12. Applying of arc type sub-slot.

이 모델은 Fig. 11과 같이 직교좌표축에서 teeth의 한 끝점이 원점에 위치한다고 할 때, sub-slot의 폭 L 과 sub-slot의 높이 h 에 대하여 다음 식과 같이 형상함수를 표현할 수 있으며, Fig. 12와 같이 sub-slot에 적용될 수 있다.

$$x^2 + y^2 - Lx + \left(\frac{L^2}{4h} - h\right)y = 0 \quad (3)$$

Arc 형상의 sub-slot 적용시의 sub-slot의 깊이에 따른 코깅 토크의 변화를 확인하기 위해서 Fig. 13과 같이 scale factor 0.25인, 높이 0.1 mm부터 scale factor 2.5인, 1 mm까지 0.1 mm 간격으로 조절하면서 코깅 토크의 변화를 확인하였다. 그 결과 Table II에서와 같이, sub-slot의 깊이의 증가에 따라 깊이 0.4 mm(scale factor = 1) 근방까지는 코깅 토크의 peak to peak가 감소하였으며 깊이 0.4 mm 이상에서는 코깅 토크의 peak to peak가 증가하였다. 10^{-2} mm 단위계에서의 코깅

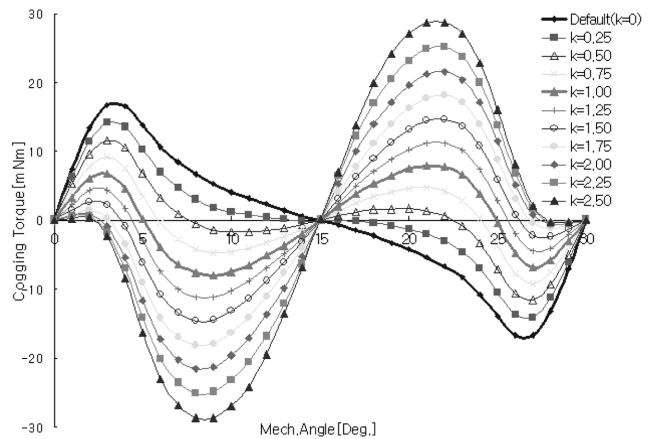


Fig. 13. Cogging Torque by scale factor (Arc type).

Table II. Peak to Peak Cogging Torque by scale factor (Arc type)

Scale factor	Depth [mm]	Cogging [mNm]		Average Torque		Torque Ripple [%]
		P-P	Rate [%]	[mNm]	Rate [%]	
0.000	0.00	33.51	0.00	167.03	-0.00	20.06
0.250	0.10	28.27	-15.61	164.70	-1.39	17.16
0.500	0.20	23.24	-30.65	162.52	-2.70	14.30
0.750	0.30	18.33	-45.28	160.54	-3.89	11.42
0.875	0.35	15.95	-52.39	159.80	-4.33	9.98
0.950	0.38	14.68	-56.20	159.23	-4.67	9.22
1.000	0.40	15.97	-52.34	158.97	-4.83	10.05
1.250	0.50	22.39	-33.18	157.04	-5.98	14.26
1.500	0.60	29.24	-12.73	154.73	-7.36	18.90
1.750	0.70	36.23	+8.14	151.48	-9.31	23.92
2.000	0.80	43.17	+28.85	148.06	-11.36	29.16
2.250	0.90	50.17	+49.73	144.44	-13.52	34.73
2.500	1.00	57.40	+71.31	141.10	-15.52	40.68

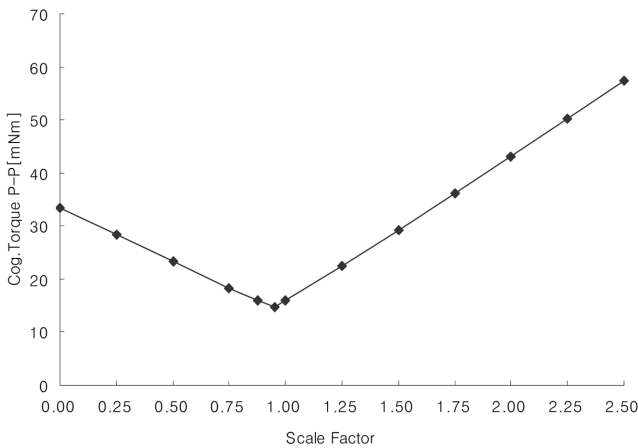


Fig. 14. Peak to Peak Cogging Torque is least at scale factor = 0.95 (Arc type).

토크의 peak to peak 값은 scale factor 가 k=0.95 일 때 (h = 0.38 mm) 최소값 14.68 mNm로 나타났다(Fig. 14). 따라서 고정자 teeth에 arc 형상의 sub-slot을 적용한 경우 sub-slot이 없는 모델에 비해 코깅 토크가 56.20 % 감소되었으며, 그 때의 평균 토크 손실은 4.67 %, 평균 토크 대비 코깅 토크는 9.22 %로 나타났다.

5. 기존의 sub-slot 법과의 비교

Arc 형상과 sinusoidal 형상의 sub-slot이 적용된 모델 (Table III)을 기존의 square 형상과 형상 변수 최적화 기법이 적용된 모델 (Table IV)과 비교해 보았다. 비교에는 매 sub-slot 당 설계 변수의 수와 공극 대비 sub-slot 높이 파라미터 인 scale factor, peak-peak cogging torque 감쇠율, 평균 토크 감쇠율, 그리고 리플을 알 수 있는 평균 토크 대비 코깅율에 대한 비교를 실시하였다.

먼저 33.51 mNm의 peak-peak 코깅 값을 가지는 default model의 평균토크 대비 코깅 20.06 %에 대하여, 설계변수 3 개를 가지는 square 형상의 경우, scale factor 1.25에서 최

Table III. Existing sub-slot method.

	<Square type Sub slot>	(Parameter Opt.)
Shape		
Design parameter	• w, h, l _{eg} (3 parameter)	• Sensitivity coefficient (10 parameter)
Shape function	• l _b = $\frac{l - l_{op} \times N}{N + 1}$	• Parameter optimizing method

Table IV. Suggested sub-slot method

	<Arc type Sub slot>	<Sinusoidal type Sub slot>
Shape		
Design parameter	• Height of sub slot, h (1 Para.)	• Height of sub slot, h (1 Para.)
Shape function	• $x^2 + y^2 - Lx + \left(\frac{L^2}{4h} - h\right)y = 0$	• $y = h \cdot \frac{1}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{L}\right)$

적 값을 가지며, 3.8 % 출력 감쇠 범위에서 25.17 %의 코깅 감쇠를 보였다. 이때의 평균 토크 대비 코깅은 15.61 %로 코깅 저감 효과는 다른 모델에 비하여 적었다(Table V).

Sub-slot 당 설계변수 10개 인 형상 최적화 기법의 경우 4.05 % 출력 감쇠 범위에서 57.31 %의 코깅 감쇠, 평균토크 대비 코깅은 8.93 %로 가장 코깅 저감 성능이 좋았다(Table V).

Sinusoidal 형상의 경우 scale factor 1.00에서 최적값을 가졌으며 2.22 % 출력 감쇠 범위로 출력 저감이 가장 적었으며, 평균 대비 코깅은 11.64 %로 43.25 %의 코깅 감쇠율을 보였다(Table V).

Arc 형상의 경우 scale factor 0.95에서 최적값을 보였으며, 4.67 %의 출력 감쇠 범위에서 평균 토크 대비 코깅 9.22 %로 56.20 %의 코깅 저감 성능을 보였다(Table V).

이상의 비교 결과를 토대로 기존의 변수 최적화 기법과 Square 형상에 대하여 sinusoidal 형상과 arc 형상을 비교해 보면, sinusoidal 형상의 경우, 설계변수가 1개로서 square 형상 모델보다 적어 설계 공정에 더 유리하고, 평균 토크 저감은 가장 적으면서도 코깅 감쇠율은 40 % 대로 square 형상 모델에 비해 좋은 효율을 나타낸다 할 수 있다.

Arc 형상의 경우 sinusoidal 형상과 마찬가지로 설계변수가 square 형상 모델보다 적은 1개 이면서도, 평균 토크 4.67 % 저감 범위에서 코깅 저감율은 56.2 %로 Fig. 15에서와 같이 변수 최적화 기법 모델에 근접한 저감 성능을 보였다.

또한, sub-slot의 높이를 결정함에 있어서 변수 최적화 기법

Table V. Design parameter and cogging reducing by sub-slot type

	Square type	Para. Opt.	Sin. type	Arc type
Scale factor	1.25	1.02	1.00	0.95
Design parameter	4	10	1	1
Cogging reducing	25.17 %	57.31 %	43.25 %	56.20 %
Shaft yorque loss	3.80 %	4.05 %	2.22 %	4.67 %
Torque ripple	15.61 %	8.93 %	11.64 %	9.22 %

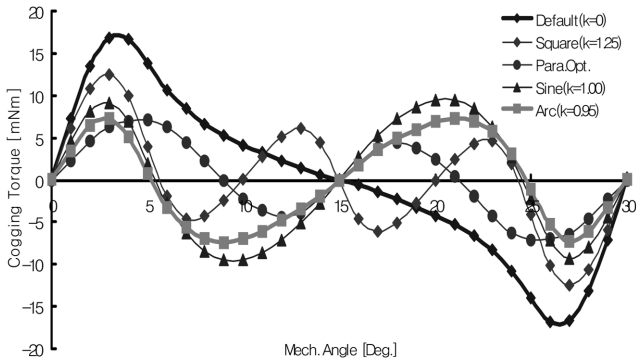


Fig. 15. Cogging Torque by sub-slot type.

모델($k = 1.02$), sinusoidal형($k = 1.00$), arc형($k = 0.95$)에서 볼 수 있는 것처럼 scale factor가 모두 1.00에 근사하는 값으로 나타났다.

이것은 sub-slot의 깊이는 공극과 같다는 것을 의미하며, 기존의 sub-slot에서와 마찬가지로 sub-slot의 깊이는 공극과 같을 때 Cogging이 최대로 줄기 때문에 sub-slot의 깊이를 공극과 같게 하며, 이는 sinusoidal 형상과 arc 형상의 sub-slot에서도 마찬가지로 적용됨을 확인 할 수 있다.

III. 결 론

본 논문에서는 영구자석 모터의 코깅 토크 저감을 목적으로, 새로운 sub-slot 형상을 제안 하였고, 기존의 방식과의 비교를 통해 설계 및 공정의 경제성과 코깅 저감 효과의 측면에서 분석하였다.

코깅 저감 방법으로서의 기존의 sub-slot 법은 간단한 구조로 인해 설계 및 공정이 용이한 square 형상 기법과 민감도 해석 기법을 통한 변수 최적화 기법을 사용한 형상 최적화 모델로 대표 될 수 있다.

그러나 square 법은 코깅 저감 성능이 충분치 못하고, 변수 최적화 기법은 많은 설계 변수를 필요로 하고, 형상이 복잡하여, 일반적으로 적용하기 어려움이 있다.

본 논문에서는 sub-slot 당 1개의 설계변수를 가짐으로서 설계 및 공정이 용이한 sub-slot인 sinusoidal 형상과 arc 형상의 sub-slot을 4극 6슬롯 영구자석형 동기 모터에 적용하고 해석하여 기존의 sub-slot 법과 비교하였다.

Sinusoidal 형상 sub-slot은 square 형상 sub-slot 에 비해 설계변수가 1개로 설계/제작이 용이하며, 이 형상에서의 최적 값은 scale factor 1 일 때 나타났고, 코깅 토크 감쇠 43.25%의 감쇠율에서 평균 토크 감쇠율이 2.22%로 출력 손실이 가

장 적었다.

Arc 형상 sub-slot은 sinusoidal 형상과 마찬가지로 1개의 설계변수를 가지며, 형상 최적화 변수 기법을 적용한 결과에 필적하는 56.2%의 코깅 저감 효과를 볼 수 있었으며, 이 형상에서의 최적값은 scale factor 1 일 때 나타났고, 이때의 출력 감쇠 범위는 4.67%, 평균 토크 대비 코깅율은 20.06%에서 9.22%로 저감 되었다.

또한, sub-slot의 높이를 결정함에 있어서 arc 형($k = 0.95$), sinusoidal 형($k = 1.00$), 변수 최적화 기법 모델($k = 1.02$) 등 scale factor가 모두 1.00에 가까운 값으로 나타났다. 따라서 sub-slot 법의 적용 시 형상 변형 기준은 scale factor 1인 상태, 즉 공극거리와 sub-slot 깊이가 같을 때 Cogging이 가장 많이 감소하는 것을 확인 할 수 있었으며, 기존의 형상에서와 마찬가지로 sinusoidal 형상과 arc 형상의 sub-slot에서도 마찬가지로 적용됨을 확인 할 수 있다.

이상에서와 같이 본 논문에서는 코깅 저감을 위한 코어 형상 설계 기법으로서, 간단한 구조로 경제성과 효율성을 가지는 sub-slot 형상인 arc 형상과 sinusoidal 형상을 제시하고 분석하였다. 본 결과에 따라 단일 설계변수를 가지면서도 코깅토크 저감 성능에 강점을 보이는 arc 형상, 적은 출력 감쇠가 강점인 sinusoidal 형상을 각각 목적에 맞게 적용할 수 있음을 보였다.

감사의 글

본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원 인력양성사업의 연구결과입니다.

참고문헌

- [1] N. Bianchi and S. Bolognani, Ruzojcic, Branimir, Power Electronics and Applications, 2009. EPE '09. 13th European Conference on I (2009).
- [2] E. Favre, L. Cardoletti, and M. Jufer, Record of IEEE on Industry Applications 1, 204 (1991)
- [3] J. R. Hendershot Jr. and T. J. E. Miller, Design of Brushless Permanent Magnet Motors, Magna Physics Publishing and Clarendon Press, pp. 4-26 (1994).
- [4] C. S. Koh, H. S. Yoon, K. W. Nam, and H. S. Choi, IEEE Trans. Magn. 33(2), 1822 (1997).
- [5] T. K. Chung, S. K. Kim, and S.-Y. Hahn, IEEE Trans. Magn. 33(2), 1908 (1997).
- [6] S.-M. Hwang, J.-B. Eom, G.-B. Hwang, W.-B. Jeong, and Y.-H. Jung, IEEE Trans. Magn. 36(5), 3144 (2000).

A Study on Reducing Cogging Torque by Core Shapes in Permanent Magnet Motors

Il Hwan Park, Dong Sok Kim, and Gwan Soo Park*

Dept. of Electrical Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

(Received 16 March 2010, Received in final form 16 April 2010, Accepted 16 April 2010)

As a high energy permanent magnet is commonly applied to motors so that small motors have high power capacities, it is also necessary to reduce a cogging torque which causes a noise and vibration in permanent magnet motors. The patterns of cogging torque in permanent magnet motors depend on the magnetic field distributions, so it is possible to reduce a cogging torque by designing a core shapes optimally. But it is known that an optimum design algorithm for reduction of cogging torques is too complicated and the process to get an optimized core shape is time consuming task. In this paper, new simplified core shapes are suggested to reduce a design parameters so that the core shapes to reduce a cogging torques could be obtained with simple computations. The result shows that the cogging torques of permanent magnet motors with this simplified core shapes could be reduced effectively without any loss of average torques.

Keywords : PMSM, cogging torque, core design