

매입형 동기전동기의 극수 슬롯수에 따른 노치 효과 고찰

윤병채, 권오창, 장기봉, 김규탁
 창원대학교 전기공학과

A Study on the Notch Effect of Interior Permanent Magnet Motor
 with compound variable number of Pole and Slot

Byung-Chae Yun, O-Chang Gwon, Ki-bong Jang, Gyu-Tak Kim
 Department of Electrical Engineering, Changwon National University

Abstract - This paper presented the notch effect of interior permanent magnet motor(IPM) with compound variable number of pole and slot. The selection of proper pole and slot which makes characteristic and efficiency of motor is very important on motor design. The motor which has 6pole and 9slot is at base. This paper is choose the 4pole 6slot motor which has 2:3 ratio then analyzed the characteristic.

전 토크를 필요로 하게 되고 이는 기동 전류의 증가는 물론 정속도 운전 시 토크 리플이 크게 되어 기기의 제반 성능을 저하시킨다. 코깁 토크를 저감시키기 위해 본 논문에서는 공극 에너지 분포로부터 코깁 토크를 계산하였다. 즉, 코깁 토크는 공극의 자기에너지의 변화 분으로 수식 (1)과 같이 계산 할 수 있다.

1. 서 론

$$T_e(\theta) = \pi \sum_{n=1}^{\infty} (nGX_{nG}Y_{nG}) \sin(nG\theta + x_{nG} - y_{nG}) \quad (1)$$

최근 석탄, 석유 등과 같은 에너지 자원의 고갈은 물론 지구 온난화 등과 같은 문제로 인하여 고에너지 밀도, 고효율 전동기에 대한 관심이 집중되고 있다. 이에 따라 고에너지 밀도를 갖는 영구자석을 사용하는 전동기의 응용분야가 넓어지고 있으며, 그 수요 또한 증대되고 있다. 그러나 영구자석 전동기는 고속회전 시 회전자에 고정되어 있는 영구자석이 원심력을 이기지 못해 비산하는 문제점이 발생하게 된다. IPM 전동기는 이러한 문제점을 해결하기 위해 회전자 철심 내에 영구 자석을 삽입 시켜 고속 회전 운전에서도 영구자석의 비산과 같은 표면 부착형 영구자석 전동기의 문제점을 해결 할 수 있다. 특히 IPM 전동기는 d축, q축 인덕턴스 차이에 의해 토크리플 토크가 전자기적 토크에 더하여져 토크가 증대되는 이점으로 인하여 최근 IPM 전동기의 연구가 많이 진행 되고 있다[1]. 그러나 IPM 전동기는 표면 부착형 영구자석 전동기와 비교 할 때 높은 코깁 토크가 발생하며 이 코깁 토크가 진동과 소음의 원인이 되며 높은 토크리플을 발생시킨다.

치와 영구자석의 상호 작용에 의해 발생하는 코깁 토크는 전동기의 운전 시에 고조파 성분 토크로, 영구 자석 수와 슬롯 수의 최소 공배수를 극수로 나눈 값의 배수가 되는 고조파 성분으로 나타나게 된다.

IPM전동기의 제반 특성을 향상시키기 위해서는 식 (1)로 표현된 코깁 토크를 제거 시켜야 하므로 본 연구에서는 노치를 설치하여 이를 저감시키고자 하였다. 회전자 표면이나 고정자 치에 보조 슬롯을 설치하여 코깁 토크와 반대되는 토크를 발생시킴으로써 코깁 토크를 제거 하고자 한다. 즉, 노치에 의해 공극 자속 밀도 분포 형상을 변화시킴으로써 코깁 토크와 반대로 작용하는 토크를 발생 시켜 코깁 토크를 상쇄시키고자 한다. 노치에 의한 코깁 토크 저감기법은 철심의 형상이 복잡하지 않아 제작 공정의 비용이 높아지지 않는 이점이 있다. 회전자 표면(또는 고정자 표면)에 폭 2γ의 노치를 설치한 경우, 노치와 영구자석의 자화에 의한 공극에너지 분포를 수식으로 표현하면 식 (2)과 같다. 이때 보조슬롯의 깊이는 무한대라고 가정하였다.

따라서, 본 논문에서는 토크리플의 원인이 되는 코깁 토크를 제거하기 위한 노치의 효과가 극수 슬롯 수에 따른 코깁 토크 감소 효과를 알아보기 위해 영구 자석이 삽입된 회전자의 철심 표면에 보조슬롯(노치)을 설치하였다[2]. IPM 전동기의 공극 자기에너지 분포를 fourier 급수로 전개하여 슬롯 - 치 구조에 의한 코깁 토크 특성을 분석하였으며, 슬롯 구조에 의한 에너지 차를 상쇄시키기 위한 노치 함수를 설정하여 그 위치 및 폭을 계산하였다. 유한요소 해석을 통하여 각 모델의 역기전력, 역기전력의 외형률, 코깁 토크를 비교 분석 하였다.

$$F_m(\theta) = X'_0 + \sum_{k=1}^{\infty} X_k \sin(kP\theta + \frac{\pi}{2}) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(k\gamma)}{\sin(k\delta)} X_k \sin(kP(\theta - \alpha) + \frac{\pi}{2}) \quad (2)$$

$$\sin(3n\phi - x_{3np}) + \frac{\sin(3n\gamma)}{\sin(3n\delta)} \sin(3n(\phi - \alpha) - x_{3np}) = 0 \quad (3)$$

즉, 노치에 의한 에너지 분포 식 (2)의 미분치가 코깁 토크를 상쇄시키기 위한 토크로 작용한다. 즉, 식 (2)의 미분치로 주어진 보조슬롯에 의해 발생하는 토크와 식 (1)로 주어진 슬롯에 의한 코깁 토크의 함이 0이 되면 슬롯에 의한 코깁 토크는 발생하지 않는다. 본 연구에서 적용한 6극 9슬롯, 4극 6슬롯 모델의 경우 3n의 배수 고조파 성분 코깁 토크가 발생하게 되므로 코깁 토크를 제거 하기 위한 보조슬롯의 위치와 폭은 수식 (3)을 만족 하면 된다.

2. 본 론

2.1 노치 설치

코깁 토크는 영구자석 전동기에서 공극의 자기 저항 차에 의해서 발생하는 토크로서, 무전원 상태에서도 전동기의 자기 에너지가 최소로 되는 위치로 회전자가 이동하려는 힘이다. IPM전동기의 경우 회전자의 위치에 따라 공극 자기에너지 변화가 매우 크므로 표면 부착형 영구자석 전동기에 비해 코깁 토크가 크게 발생 하게 된다. 따라서, 코깁 토크로 인하여 IPMSM 기동 시 큰 회

여기서 n 은 고조파차수이다.

수식 (3)을 만족하는 노치의 위치 α 와 보조슬롯의 폭 γ 는 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{2m\pi}{6n}, \quad m=1,2,\dots$$

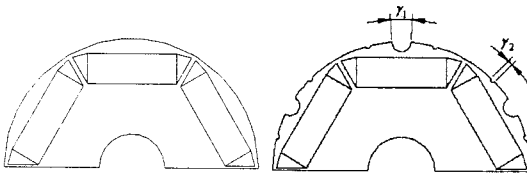
$$\gamma = \frac{\left\{ (2m+1)\pi + \frac{\pi}{2} \pm \left(\frac{\pi}{2} - 6nq \right) \right\}}{6n}, \quad m=0,1,2,\dots$$

위의 수식에서 알 수 있는바와 같이 특정 고조파 성분의 코깅 토크를 저감시키기 위한 노치의 위치와 폭은 m 값에 따라 다른 값을 갖게 됨을 알 수 있다. m 값 중 실제 회전자 표면에 설치 가능한 값을 계산하였다.

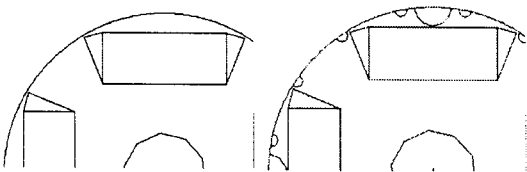
2.2 해석 모델

6극 9슬롯 모델을 기본모델로 선정하여 영구자석의 면적과 전체 턴수가 동일한 4극 6슬롯 모델을 비교 모델로 선정하였다.

그림 1, 2는 6극 9슬롯 모델과 4극 6슬롯 모델의 해석 모델을 나타낸다.



(a) 기본 모델 (b) 노치 설계 모델
그림 1. 6극 9슬롯 해석 모델



(a) 기본 모델 (b) 노치 설계 모델
그림 2. 4극 6슬롯 해석 모델

6극 9슬롯 모델의 영구자석 면적이 114mm 슬롯당 턴수는 36턴이다. 4극 6슬롯 모델에 동일한 면적의 영구자석을 설계하고 슬롯당 턴수는 56턴으로 설계하였다. 식 (4)의 수식에서 알 수 있는바와 같이 특정 고조파 성분의 코깅 토크를 저감시키기 위한 노치의 위치와 폭은 m 값에 따라 다른 값을 갖게 됨을 알 수 있다. m 값 중 실제 회전자 표면에 설치 가능한 값을 계산하였다.

6극 9슬롯 모델의 경우 3, 6, 9고조파 성분 코깅 토크를 제거시키기 위해 노치를 설치할 경우, 5개의 노치 설치되게 되므로 회전자 표면, 또는 고정자 표면의 굴곡이 너무 심하게 되어 공극의 평균 길이를 증가하여 에너지가 낮아져 이에 따라 IPM전동기의 토크가 저하되게 된다. 따라서 코깅 토크의 9고조파 성분의 경우 토크 리플의 영향이 크지 않기 때문에 3고조파와 6고조파 성분의 코깅 토크를 제거시키기 위한 노치를 설계 하였다.

4극 6슬롯 모델의 경우 3, 6, 9고조파 성분 코깅 토크를 제거시키기 위해 노치를 설치할 경우, 6고조파 성분 코깅 토크 제거를 위한 노치의 위치가 영구자석에 의해 설치가 불가능한 위치가 되어 설치되지 않았다. 9고조파 성분이 미약하지만 6고조파 제거를 위한 노치를 설치하지 않아 9고조파 제거를 위한 노치는 설치하였다.

2.3 특성 비교

그림 3, 4는 4극 6슬롯 노치 모델과 기본 모델의 코깅 토크 해석치를 나타낸다. 기본모델의 코깅 토크는 0.13Nm인데 비해 노치 적용 모델의 코깅 토크는 0.12Nm이다. 4극 6슬롯 모델의 경우 노치 설치시 코깅 토크 8%감소하였다.

그림 5는 6극 9슬롯 모델의 기본 모델과 노치 모델의 코깅 토크 해석치 나타낸다. 유한요소법을 이용한 해석 결과에서 노치 모델이 기본 모델에 비하여 코깅 토크가 87% 저감되었다. 4극 6슬롯 모델과 6극 9슬롯의 노치 설계는 각각 공극 자기에너지 분포를 fourier 급수로 전개하여 슬롯 - 치 구조에 의한 코깅 토크 특성을 분석하였으며, 슬롯 구조에 의한 에너지 차를 상쇄시키기 위한 노치 함수를 설정하여 그 위치 및 폭을 계산하였다.

6극 9슬롯 모델은 코깅 토크가 87% 저감된 것에 비해 4극 6슬롯 모델은 8% 저감 되었다.

그림 6은 기본 모델과 노치 모델의 1000rpm일때 역기전력 파형이다. 노치 모델이 기본 모델에 비하여 정현파에 가까운 역기전력 파형이다. 역기전력 파형의 정현성은 운전, 제어특성과 밀접하게 관련되어 있는데 노치 모델의 기본 모델에 대한 우수성이 나타났다.

그림 7은 4극 6슬롯 모델의 기본 모델과 노치 모델의 3000rpm일때 역기전력 파형이다. 노치 모델의 로터 표면에 노치에 의한 굴곡이 심해져 역기전력이 왜곡이 기본 모델보다 심하게 나타난다.

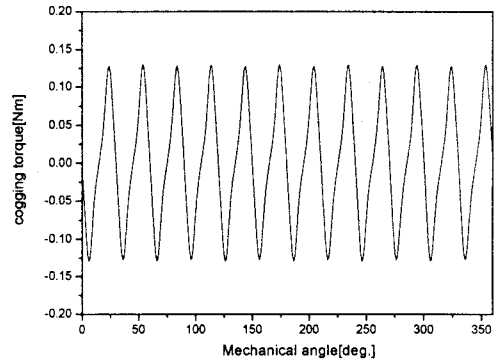


그림 3. 4극 6슬롯 노치설계 모델

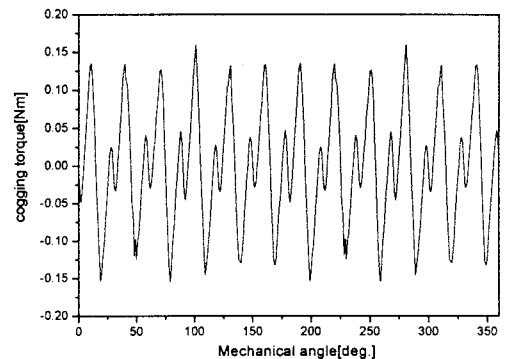


그림 4. 4극 6슬롯 기본 모델

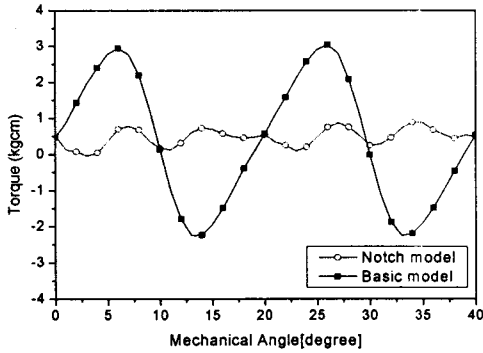


그림 5. 6극 9슬롯 기본 모델, 노치 모델 코깅 토크

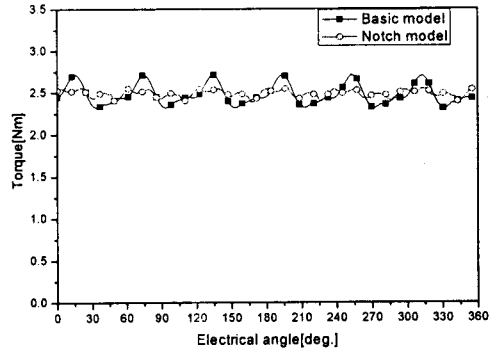


그림 8. 6극 9슬롯 기본 모델, 노치 모델 토크

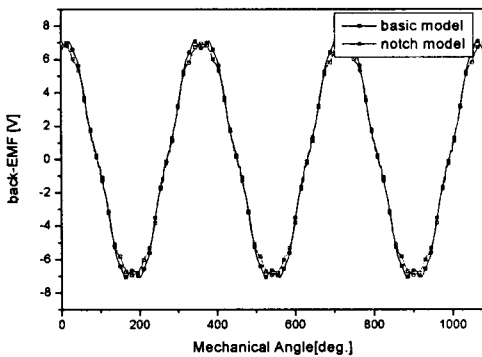


그림 6. 6극 9슬롯 기본 모델, 노치 모델 역기전력

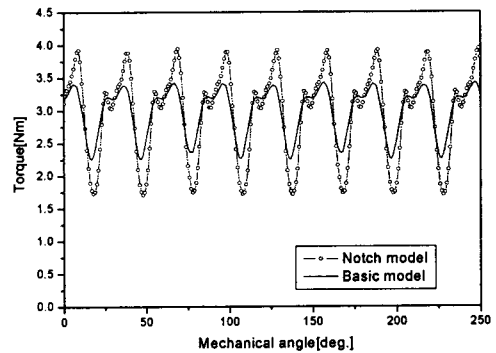


그림 9. 4극 6슬롯 기본 모델, 노치 모델 토크

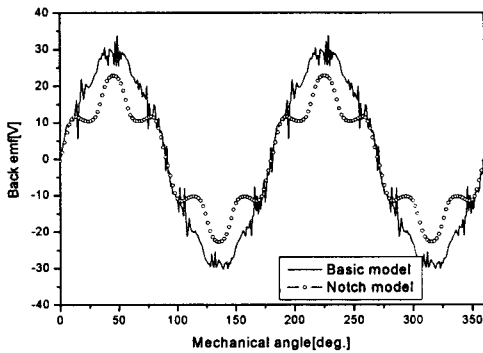


그림 7. 6극 9슬롯 기본 모델, 노치 모델 코깅 토크

그림 8은 6극 9슬롯 모델의 토크 해석치이다. 노치 모델이 기본 모델에 비해 토크의 크기가 감소하지 않았고 토크 리플이 크게 감소하였다.

그림 9는 4극 6슬롯 모델의 토크 해석치이다. 6극 9슬롯 모델의 토크 해석 결과와는 다르게 노치 모델이 기본 모델에 비해 토크 리플이 크게 증가하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 극수 슬롯수 조합이 2:3 배열을 가지는 4극 6슬롯 모델과 6극 9슬롯 모델의 IPM전동기 회전자 표면에 노치를 설계하여 자화 분포 영역을 조정함으로써 코깅 토크의 감소를 비교 하였다. 수치해석 방법으로 자화 분포를 분석하여 코깅 토크의 함수를 표현 하고 그 함수를 상쇄 할 수 있는 노치의 함수에서 노치 설계 변수들을 결정 하였다. 노치가 적용된 모델을 유한요소해석 방법으로 비선형 해석하여 코깅 토크 저감 효과를 시뮬레이션 하였으며 추론 할 수 있는 파라메타 내의 해석 결과에서 노치 모델의 위치와 폭을 결정 하였다. 4극 6슬롯 모델이 6극 9슬롯 모델에 비하여 노치 설치 모델의 코깅 토크 감소율이 미비하였으며 노치 모델의 역기전력 그래프가 왜형률이 크게 나타났다. 토크 해석 결과 또한 노치 모델이 기본모델 보다 토크 리플이 크게 나타났다. 4극 6슬롯 모델의 회전자에 노치 설치로 인한 표면의 굴곡이 너무 심하게 나타난 결과 때문이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Gyu-Hong Kang, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim, and Jung-Woo Park, "Improved Paramater Modeling of Interi or Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Fin iti Element Analysis", IEEE Trans.on Magnetics, vol. 36, No. 4, pp.1867~1870, July.2000.
- [2] Chang Seop Koh, and Jin-Soo Seol, "New Cogging-Torque Reduction Method for Brushless Permanent-Magnet Motors", IEEE Trans.on Magnetics, vol. 39, No.6, pp.3503~3506, Nov.2003.