

## 동특성 향상을 위한 매입형 영구자석 전동기의 회전자 형상 설계

윤병채, 이동엽, 장기봉, 김규탁  
 창원대학교 전기공학과

### A Study on the Improvement of Dynamic Characteristics in Interior Permanent Magnet motor by Rotor Shape Design

Byung-Chae Yun, Dong-yeup Lee, ki-bong Jang, Gyu-Tak Kim  
 Changwon National University Electrical Engineering

**Abstract** - This paper presents the improvement of dynamic characteristics in Interior Permanent Magnet (IPM) type BLDC motor with notch. The notch is applied on the surface of the rotor to reduce the cogging torque and to improve dynamic characteristics. The current, inductance and torque of initial model and optimal model are analyzed by FEA. The validity of improved dynamic characteristics is confirmed.

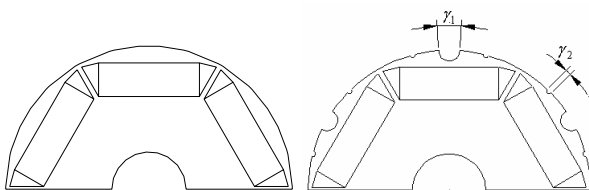
#### 1. 서 론

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 영구자석을 삽입시켜 고속 회전 운전에서도 영구자석의 비산과 같은 표면 부착형 영구자석 전동기(Surface-mounted Permanent magnet Motor : SPM 전동기)의 문제점을 해결 할 수 있다. 특히 IPM 전동기는 d축, q축 인덕턴스 차이에 의해 톨릭턴스 토크가 전자기적 토크에 더하여져 토크가 증대되는 이점으로 인하여 최근 IPM 전동기의 연구가 많이 진행 되고 있다[1][2]. 그러나 IPM 전동기는 SPM 전동기와 비교 할 때 높은 코깅 토크가 발생하며 이 코깅 토크가 진동과 소음의 원인이 되며 높은 토크 리플을 발생시킨다.

따라서, 본 논문에서는 IPM 전동기의 동특성 향상을 위하여 토크리플의 원인이 되는 코깅 토크를 저감시키기 위해 영구자석이 삽입된 회전자의 철심 표면에 보조슬롯(노치)을 설치하는 방법을 제안하였다. IPM 전동기의 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.

#### 2. 본 론

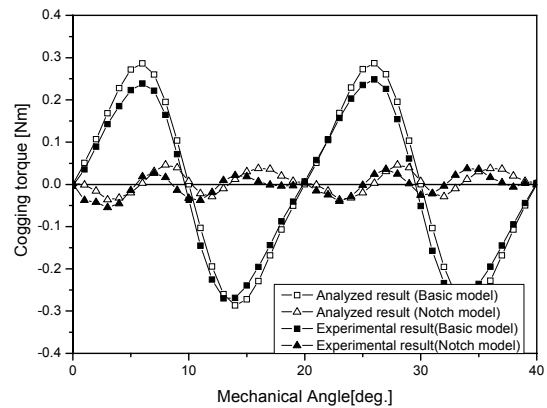
##### 2.1 노치 설치에 따른 코깅토크 저감



〈그림 1〉 해석 모델

코깅 토크는 전동기 시스템의 자기 에너지가 최소인 위치로 이동하려는 힘이며, 부하 전류와는 상관없이 회전자 영구자석과 고정자 슬롯의 상호 인력에 의해 발생한다. IPM 전동기는 구조상 공극이 작아 회전자 표면의 자화 분포의 변화가 매우 크다. 이 때문에 다른 형태의 전동기에 비해 코깅 토크가 매우 크게 발생 하게 된다. IPM 전동기에서 발생하는 코깅 토크는 회전자 표면의 자화 분포가 가장 큰 영향을 미치기 때문에 자화 분포를 푸리에 급수 전개 방법을 이용해 코깅 토크를 분석하여 노치의 폭과 높이를 결정하였다. 그림 1 (a)는 기본 모델 회전자 구조이

며 그림1 (b)는노치 모델의 회전자 구조를 나타낸다.

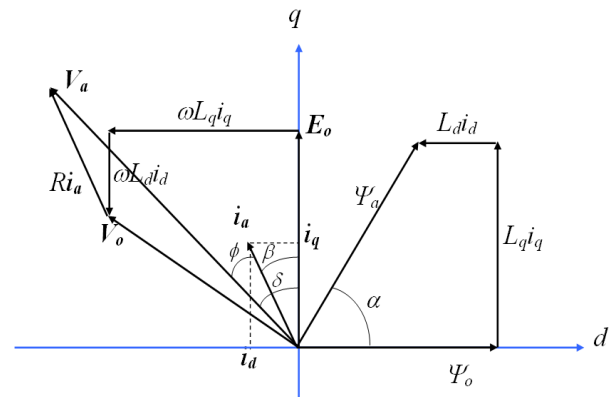


〈그림 2〉 코깅 토크

그림 2는 기본 모델과 노치 설계 모델의 코깅 토크 유한 요소 해석, 실험 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 노치 모델의 코깅 토크가 기본 모델의 코깅 토크에 비하여 87%저감되었다.

##### 2.2 노치 설치에 따른 운전특성

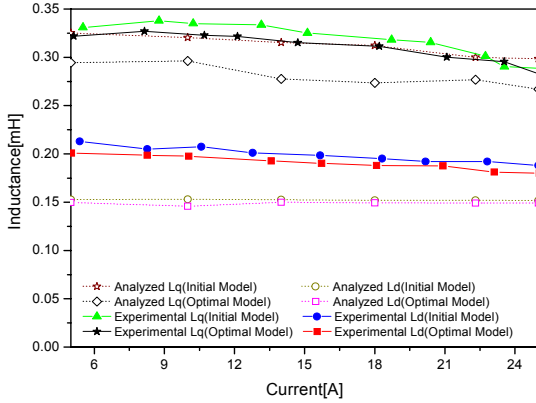
그림 3은 IPM 전동기의 기본 벡터도이며 이를 바탕으로 d-q축 인덕턴스를 산정하였다. 여기서  $\Psi_0$ 는 영구자석에 의한 무부하 쇄교자속이며,  $\Psi_a$ 는 전기자 반작용을 고려한 부하 상태의 총 쇄교 자속이다. 즉, 전류를 인가하지 않은 영구자석에 의한 자속과 전류를 인가한 합성 쇄교자속의 위상차와 크기로  $L_d-L_q$ 를 구할 수 있다. 이를 바탕으로 유한요소해석으로부터 결과를 얻을 수 있으며 식 (1), (2)에 의하여  $L_d-L_q$ 를 얻을 수 있다.



〈그림 3〉 D-Q 좌표계의 벡터도

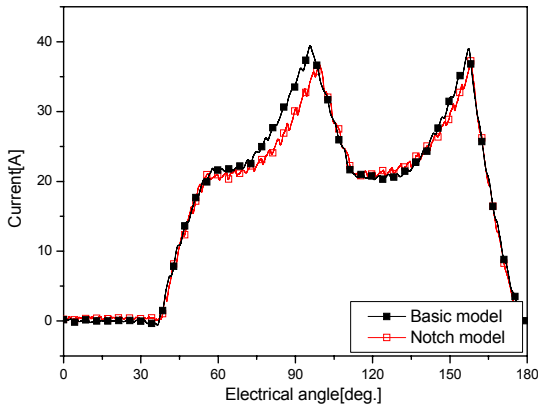
$$L_d = \frac{\Psi_a \cos \alpha - \Psi_0}{i_d} \quad (1)$$

$$L_q = \frac{\Psi_0 \sin \alpha}{i_q} \quad (2)$$



〈그림 4〉 인덕턴스

그림 4는 전류 위상각 30에서의 전류의 크기에 따른 인덕턴스의 이론치와 실험치를 비교하여 나타낸 것이다. 노치를 적용한 모델이 기본 모델보다 q축 인덕턴스는 7.84%, d축 인덕턴스 4.03% 적다. 이는 노치로 인한 자기저항의 증가로 인덕턴스가 감소되었기 때문이다. IPM 전동기의 인덕턴스는 전류의 크기, 전류의 위상각, 회전자 위치에 따라서 d-q축의 인덕턴스는 달라진다. 실험치와 해석치가 차이가 발생한 이유는 실험상에서 온도 조건과 해석상의 온도 조건이 맞지 않아 영구자석의 Br이 틀려짐에 따라 코일에 채교하는 자속량이 틀려지기 때문이며, 해석치는 철손 저항에 의한 손실 전류를 고려하지 않았으나 실험치에는 철손은 물론 기계손에 의한 손실 전류도 모두 포함되어 있기 때문이다.

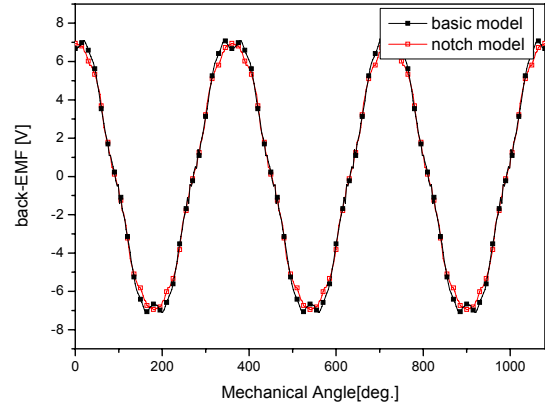


〈그림 5〉 실험치 전류 비교

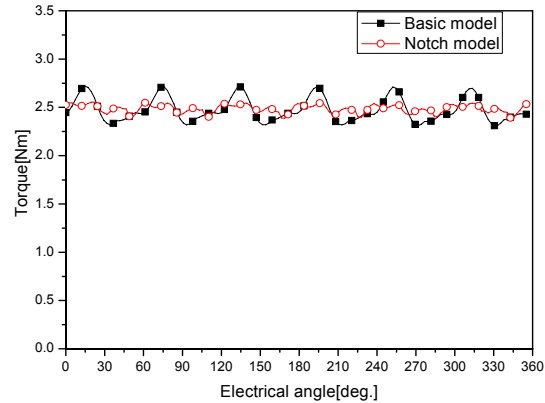
노치를 설치한 IPM 전동기는 역기전력 파형, 인덕턴스가 달라지기 때문에 토크 및 전류 파형도 달라진다.

그림 5는 기본 모델과 노치 모델의 인가전압에 따른 전류 특성을 나타낸 것으로 시뮬레이션 치와 이론치를 비교하여 나타내었다. 노치를 적용한 최적화 모델은 기본 모델에 비하여 상대적으로 인덕턴스가 작으므로 프리휠링 구간에서 상승 속도가 빠르고 빌드업 구간에서 상승 값과 프리휠링이 끝나는 구간에서의 최소값이 기본 모델 보다 적고 하강하는 전류 역시 같은 시정수를 가지고 하강하기 때문에 정류에 의한 토크 리플이 기본 모델보다 다소 적다.

그림 6은 1000rpm 기본 모델과 노치 모델의 1000rpm일 때 역기전력 파형이다.



〈그림 6〉 역기전력



〈그림 7〉 운전 토크

그림 7은 기본 모델과 노치 모델의 운전토크를 나타낸다. 노치 모델의 리플률은 6%, 기본 모델은 16%로 최적화 모델의 리플이 현저하게 감소하였다. 코깅 토크는 87% 감소 한 것에 비해 출력 토크의 감소는 거의 없다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 IPM 전동기의 동특성을 향상시키기 위해 영구자석이 삽입된 회전자 철심 표면에 보조슬롯을 설치하였다. 노치를 설치한 최적화 모델의 경우를 코깅 토크는 84.5% 감소하였으나 출력토크의 감소는 크게 나타나지 않아 본 연구의 타당성을 입증할 수 있었다. 인덕턴스의 영향으로 노치 적용에 따른 인덕턴스를 전류의 크기와 전류위상각, 회전자 위치에 따른 해석과 실험을 통하여 산정하여 인덕턴스가 전류 및 토크의 리플에 미치는 영향을 분석하였다. 노치를 적용한 모델의 동특성이 기본 모델보다 향상되었음을 확인할 수 있다.

### [참 고 문 헌]

- [1] T.J.E. Miller, Design of Brushless Permanent Magnet Motor, Clarendo Press, Oxford,1994.
- [2] Gyu-Hong Kang, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim, and Jung-Woo Park, "Improved Paramater Modeling of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Finitu Element Analysis", IEEE Trans. on Magnetics, vol. 36, no. 4, pp. 1867 ~ 1870, 2000.
- [3] 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, 2003.