Notch Type IPMSM의 d-q축 인덕턴스 및 특성해석

김희운*, 강규홍**, 허진*
울산대학교*, 조선기자재연구원**

Analysis of d-q axis Inductance and Characteristic to Notch Type IPMSM

Hee-Woon Kim*, Gyu-Hong Kang** Jin Hur*
University of Ulsan*, Korea Marine Equipment Research Institute**

Abstract - This paper study on the notch effect for *d-q* axis inductance of interior type permanent magnet (IPM) motor. The variations of *d-q* axis inductance are analyzed by finite element method (FEM). Applying the notch for cogging torque minimization and maximization of reluctance torque is confirmed to be improve the torque characteristics. Also, speed characteristics is analyzed according to the load current

1. 서 론

최근 적용이 증대되고 있는 전동시스템에 있어 소형·고출력을 포함한 진동·소음의 성능개선을 통한 고성능화에 대한 관심이 증대되고 있다. 전동기의 고출력화를 위해 에너지 밀도가 높은 영구자석을 채용한 연구가 주를 이루며 특히 단위 전류당 토크 및 출력 밀도가 높은 매입형 영구자석 전동기(Interior type Permanent Magnet Motor : IPM Motor)의 연구는 매우 광범위하게 이루어지고 있는 실정이다. [1][2]

매입형 영구자석 전동기의 경우 회전자 구조의 특징으로부터 원심력에 의한 자석의 비산을 방지 할 수 있고, 릴럭턴스 토크가 전자기적 토크에 부가되므로 고출력화를 이룰 수 있을 뿐만 아니라 기계적 공극과 자기적 공극의 길이가 동일하므로 높은 공극자속밀도를 확보할 수 있어 고출력화 가능하지만 이에 따른 코깅토크가 증가하고, 이는 기계적 진동 및 소음의 원인이 된다.

따라서 IPM Motor의 코깅토크 저감을 위한 형상설계로 슬롯 opening의 조절, 회전자의 flux barrier 위치 조절에 따른 자기적 자극비의 조절 및 고정자 치나 회전자 표면에 notch를 형성하는 연구가 주를 이루고 있다.

그러나 이러한 설계는 단순히 코깅토크의 저감만을 위한 설계로 고출력화를 위한 설계와 직접적으로 병행하지 않고 있어 형상설계 시 코깅토크의 저감뿐만 *d-q*축 인덕턴스의 변화 및 릴럭턴스 토크변화, 출력변화 등 IPM 전동기의 전반적인 특성을 고려할 필요성이 있다.

본 논문에서는 코깅토크의 저감을 위한 회전자 표면에 notch를 형성한 경우의 *d*축 및 *q*축 인덕턴스의 변화를 고려하여, 형상설계로 인해 달라지는 *d, q*축 회로정수 변화로부터 IPM Motor의 특성을 분석하였다.

2. IPM Motor 회전자 형상설계

IPM Motor의 코깅토크 저감과 단위전류당 토크밀도 증가를 위한 회전자 형상설계 과정은 다음과 같다. 먼저 공간고조파이론을 이용하여 자극 형상 변화에 따른 코깅토크 최소화 형상을 설계를 한 후 *d-q*축 인덕턴스 특성 및 이에 따른 IPM 전동기의 토크 및 속도-출력 특성을 분석하였다.[1]

그림 1은 4극 6슬롯의 IPM Motor 고정자와 회전자의 초기모델과 코깅토크 저감 및 릴럭턴스 토크 증가를 위한 회전자 형상설계 모델을 나타내었으며, *d*축과 *q*축의 자속경로를 그림 2에 나타내었다.

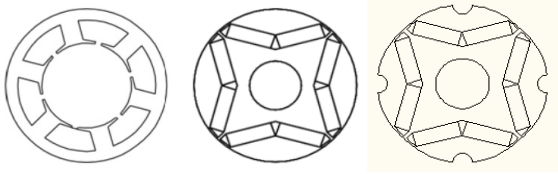
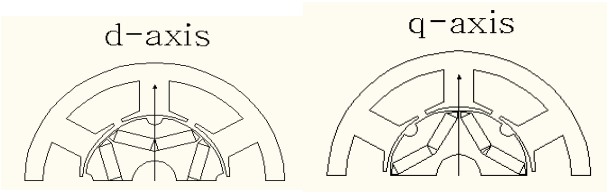


그림 1. IPM Motor의 기본모델 및 notch 모델



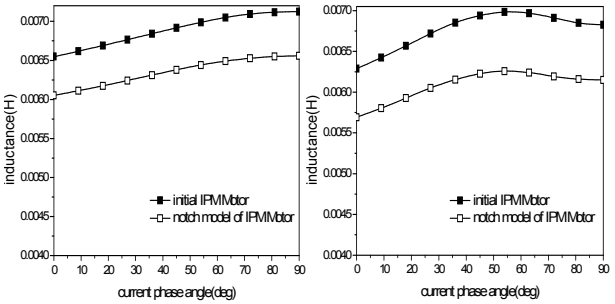
(a)*d*-축 (b) *q*-축

그림 2. 4극 6슬롯 IPM Motor의 d-q축

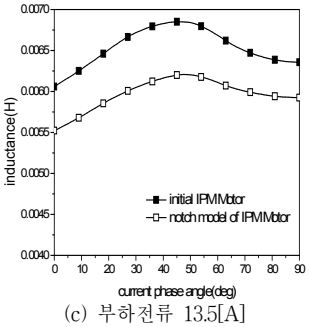
그림 2 (a)의 *d*-축 모델에서 회전자의 표면은 고정자의 치와 마주하고 있으며 고정자 전류에 의한 자속은 공극을 지나 영구자석을 지나가게 된다. 회전자 표면에 notch를 시행하면 회전자 표면의 등가자화 분포 형상이 변형되어 코깅토크의 변동을 유발할 수 있다. 이때 회전자 notch에 의해 *d*축의 자속경로에서 공극이 증가하므로 *d*축 인덕턴스는 감소하게 되고, 결국 *d-q*축 인덕턴스의 차이는 증가하며 릴럭턴스 토크는 증가하게 된다.

3. d-q축 인덕턴스 특성

에너지중첩법을 이용하여 IPM Motor의 *d-q*축 인덕턴스 해석결과를 그림 3, 4에 나타내었다. 그림 3은 초기모델과 notch 모델의 전류 크기에 따른 *d*축 인덕턴스 특성을 나타내었다. 해석결과 notch 모델의 경우 *d*-축 자속경로의 공극길이가 증가하므로 초기모델에 비해 *d*-축 인덕턴스가 감소함을 알 수 있다. 또한, 부하 전류가 정격전류(4.5[A])보다도 증가하여도 *d*-축 인덕턴스 차이의 변화는 미미함을 알 수 있다.



(a) 부하전류 4.5[A] (b) 부하전류 9[A]



(c) 부하전류 13.5[A]

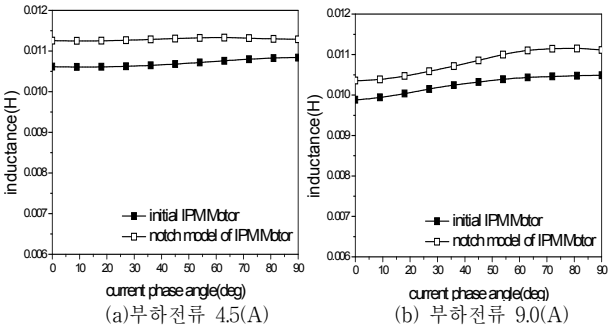
그림 3. *d*- 축 인덕턴스

q-축 인덕턴스의 경우 notch 모델의 notch가 q-축의 자속경로에 직접적으로 영향을 미치지는 않지만 영구자석에 의한 철심의 자기포화를 고려하는 경우 notch에 의한 자기적 공극이 증가하므로 영구자석에 의한 철심의 자기포화가 감소하게 된다. 따라서 notch 모델의 철심 자기포화 감소에 의해 notch 모델의 q-축 인덕턴스가 증가하게 된다.

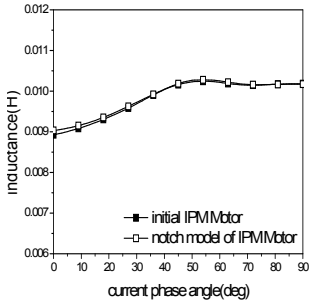
그러나 부하 전류가 증가하는 경우 q-축 인덕턴스는 전류위상각 0도 부근에서 급격하게 저감하며, 정격전류의 3배가 되는 13.5[A]에서는 초기모델과 notch모델의 q-축 인덕턴스 차이는 발생하지 않음을 알 수 있다. 이는 전류에 의한 자속의 증가로부터 자기포화가 발생하여 notch의 효과가 나타나지 않기 때문이다.

4. Notch type IPM Motor 특성

Notch 모델에서 d-축 인덕턴스는 기본형상에 비해서 감소하였고 q-축 인덕턴스는 증가하였다. 즉 notch 형상설계를 통해 d-q축 인덕턴스의 특성이 변하였고 IPM Mortor의 여러 특성 또한 영향을 받았다.

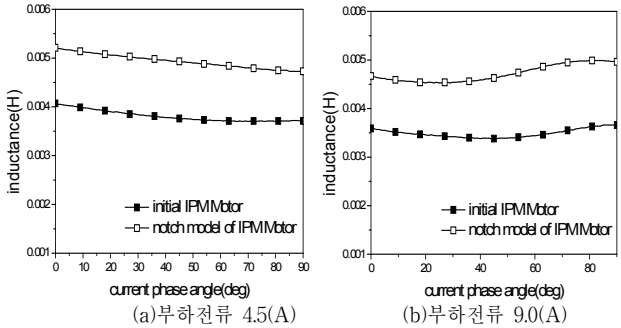


(a)부하전류 4.5(A) (b) 부하전류 9.0(A)

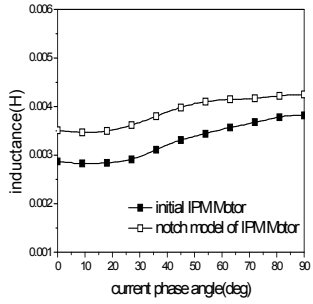


(c)부하전류 13.5(A)

그림4. q- 축 인덕턴스



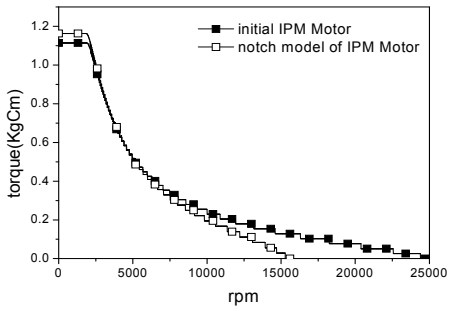
(a)부하전류 4.5(A) (b)부하전류 9.0(A)



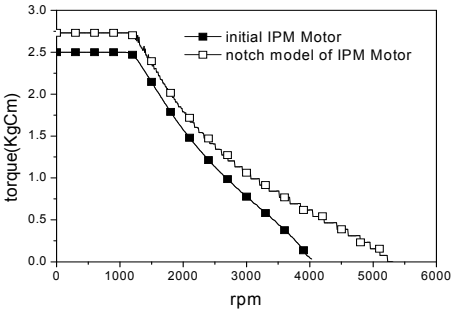
(c) 부하전류 13.5(A)

그림 5. $L_q - L_d$특성

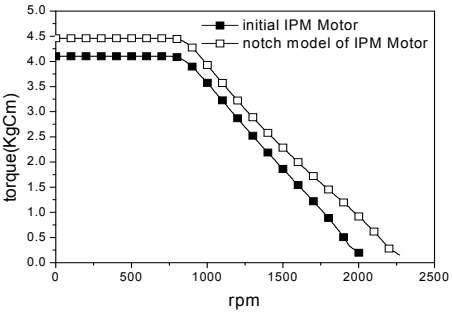
그림 6은 기본 모델과 notch 모델의 토크특성을 나타낸 것이다. 그림 6의 (a)에서 보듯이 notch 형상 설계를 한 모델이 기본 모델보다 정토크 값이 크게 나타난다. 전류가 기준 전류의 2배가 되면 약계자 영역 또한 notch 모델이 넓어짐을 그림 6의 (b)에서 확인 할 수 있다. 하지만 전류가 기준전류의 3배가 되면 포화현상으로 인해 notch효과가 감소됨을 그림 6의 (c)에서 확인 할 수 있다. 효율 역시 notch 모델이 더 넓은 속도 영역에서 더 좋은 효율을 보임을 확인하였다.



(a) 부하전류 4.5(A)



(b)부하전류 9.0(A)



(c)부하전류 13.5(A)

그림 6. 합성토크 특성

3. 결 론

본 논문에서는 IPM Motor의 코깅토크를 저감 하는 목적으로 회전자에 notch 형상설계를 수행하고, d-q 인덕턴스특성을 분석하였다. 또한, d-q 회로정수의 변화를 바탕으로 Motor의 특성을 해석하였다. 해석결과 회전자의 notch 설계를 통해서 d-축 인덕턴스는 감소하였고 q-축 인덕턴스는 값이 증가 하였으며, 토크 특성에서는 정토크 값도 커지게 되고 약계자 영역의 범위도 늘어나는 결과를 얻었다. 이를 통하여, 회전자에 notch를 설계함으로서 인덕턴스의 변화에 의한 토크증대 및 효율향상을 이룰 수 있음을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

[1.] 김희운, 허 진, "A Study on the Inductance Variation According to the Rotor Shape in IPMSM", KIEE 춘계학술대회논문집, pp 274~276, April 2009

[2.] Jin Hur, "Characteristic Analysis of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor in Electro-Hydraulic Power Steering System", IEEE Trans. on. IE, vol. 55, No 6, pp 2316~2322, 2008

[3.] G.-H. Kang, Y-.D. Son, G.-T. Kim, and J. Hur "The Novel Cogging Torque Reduction Method for Interior Type Permanent Magnet Motor", IEEE Trans. on IA, Vol.45, No.1, pp161~167, 2009