

IPMSM의 회전자 형상에 따른 인덕턴스 특성 분석

조규원*, 장기봉*, 김규탁*
창원대*

Study on the Inductance Characteristics According to Rotor Shape of IPMSM

Gyu-Won Cho*, Ki-Bong Jang*, Gyu-Tak Kim*
Changwon National University*

Abstract - 본 논문에서는 IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)의 회전자에 보조 슬롯인 노치(Notch)와 자속 장벽인 배리어(Barrier)를 설치하여 전반적인 구동 특성을 향상 시켰으며, 각 형상에 따른 d, q축 인덕턴스의 변화를 고찰하였다. 인덕턴스의 계산은 IPMSM의 등가회로 및 벡터도를 이용하였으며 계산되어진 인덕턴스로 전류위상각에 따른 토크를 계산하고 FEM(Finite Element Method)결과와 비교하였다.

각 모델은 실험계획법 및 유한요소해석을 통하여 설계 되어졌고 목적 함수는 코깅 토크 최소화이며, 제약사항으로 정격 토크로 설정하였다. 기본 모드 배리어 모델은 코깅 토크가 약 43.2%, 토크 리플이 약 69% 저감되었고, 노치 모델은 코깅 토크가 44.4% 토크 리플이 약 79.8% 저감되어 전반적인 구동 특성이 크게 향상 되었다.

1. 서 론

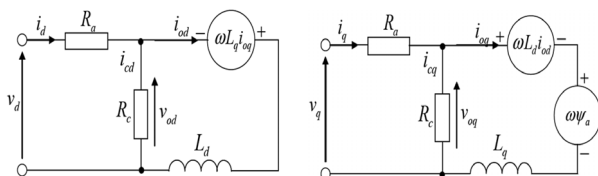
IPMSM은 구조적으로 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크가 합성된 토크를 발생하기 때문에 자석에 의한 높은 토크를 낼 수 있으며, 적절한 돌극성을 갖도록 회전자를 설계하면 자석 발생토크를 대신할 수 있어, 약 자속 제어법을 이용하면 SPMSM(Surface Permanent Magnet Synchronous Motor)에 비해 고속에서도 운전을 할 수 있다[1].

특히, 에너지 밀도가 높은 매입형전동기의 특성해석에서는 극부적인 자기포화현상이 심하기 때문에 d-q축 전류의 크기와 전류위상각에 따른 인덕턴스의 정확한 산정이 무엇보다도 중요하다. 또한 d-q축의 인덕턴스 특성이 전동기의 전반적인 특성에 지배적인 영향을 미치고 있으므로 이에 대한 정밀한 계산 방법이 요구된다.

본 논문에서는 코깅 토크의 저감과 토크 리플의 감소를 위한 보조 슬롯인 노치와 자속장벽인 배리어를 적용하여 전동기의 제반 특성 및 인덕턴스 변화를 유한요소해석을 통하여 고찰하였다.

2. 인덕턴스 계산

2.1 IPMSM의 벡터도



(a) d축 등가회로도 (b) q축 등가회로도
〈그림 1〉 IPMSM의 등가회로도

본 해석에 사용된 IPMSM의 d-q축 등가회로는 그림 1과 같다. 철손을 고려한 정밀 해석과 효율의 검토를 위해 등가 철손 저항 R_c 를 근사적으로 표현하였다[2].

i_d 와 i_q 는 d-q축 전기자 전류이고, i_{cd} 와 i_{cq} 는 d-q축 철손 전류이다. v_d 와 v_q 는 d-q축 전압을 나타내고, R_a 는 전기자 코일의 상저항, ψ_a 는 무부하시 영구자석에 의한 쇄교자속, L_d 와 L_q 는 d-q축 자기인덕턴스를 ψ_0 는 전류 통전시의 합성 쇄교자속을 각각 나타낸다. 이러한 특성은 전류 소스를 인가한 유한요소해석으로 검증하며 계산 시 철손은 고려하지 않았다.

2.2 구동특성 분석

〈표 1〉 구동특성

Item	기본 모델	배리어 모델	노치 모델
Cogging torque[Nm]	0.250	0.142	0.139
Operating torque[Nm]	2.03	2.03	1.98
Torque ripple[%]	18	5.59	3.66

2.3 인덕턴스 계산 결과

인덕턴스의 계산 방법은 IPMSM의 벡터도에 의한 파라미터를 산정하는 방법을 사용하였다[3].

$$i_d = -I_a \sin\beta \tag{1}$$

$$i_q = I_a \cos\beta \tag{2}$$

$$\psi_a = \sqrt{3} \psi_{ua} \tag{3}$$

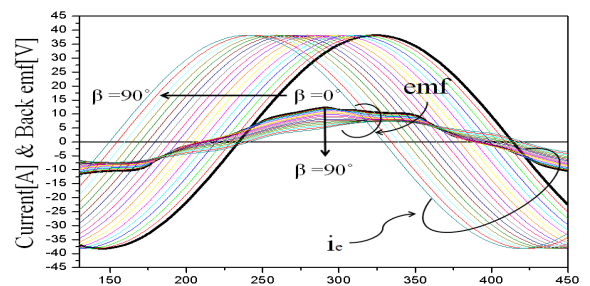
$$\psi_0 = \sqrt{3} \psi_{u0} \tag{4}$$

$$L_d = \frac{\psi_0 \cos\alpha - \psi_a}{i_d} \tag{5}$$

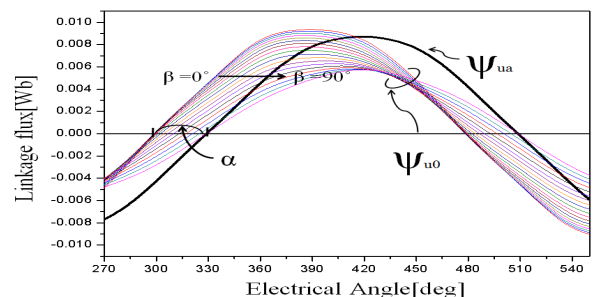
$$L_q = \frac{\psi_0 \sin\alpha}{i_q} \tag{6}$$

$$T = P_n (\psi_a i_a \cos\beta + \frac{1}{2} (L_q - L_d) i_a^2 \sin 2\beta) \tag{7}$$

그림 2는 각 파라미터들의 실제 변화 양상을 나타내고 있다. 역기전력과 상전류의 위상차는 전류위상각이 0°에서 90°로 증가함에 따라 실제로 증가하고 있음을 확인하였고, 쇄교자속은 무부하시 쇄교자속과 합성 쇄교자속의 위상차가 전류위상각의 증가에 따라 줄어들고 있음을 확인하였다.



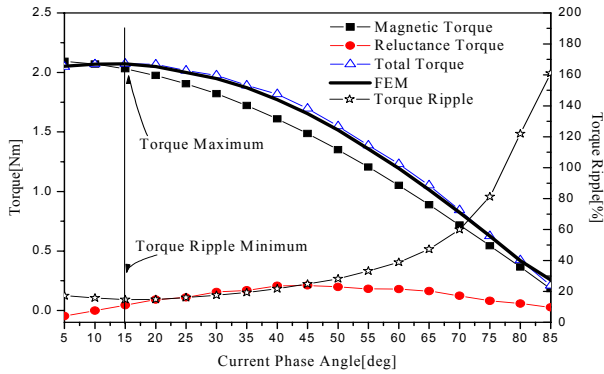
(a) 역기전력과 상전류의 위상차



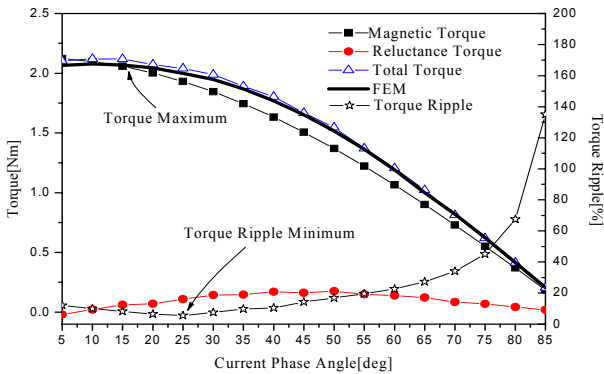
(b) 쇄교자속 위상차

〈그림 2〉 인덕턴스 계산을 위한 파라미터 계산

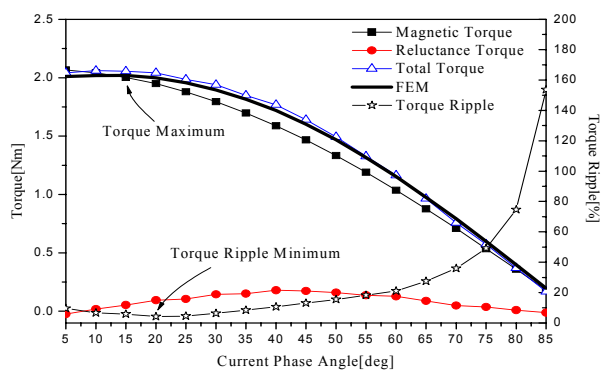
그림 3은 각 모델의 정격상태에서 영구자석의 전기자속의 변화에 의한 마그네틱 토크, 돌극구조에 의해 생성되는 릴럭턴스 토크와 합성된 토크 및 유한요소해석으로 계산되어진 토크를 나타낸다. 기본 모델의 경우 전류위상각 15°에서 구동 토크가 최대가 되고 토크 리플이 최소가 된다. 그러나 배리어 모델은 전류위상각 15°에서 구동 토크가 최대, 토크 리플은 25°에서 최소가 되고 있으며 노치 모델은 구동 토크는 15°에서 최대이지만 토크 리플은 20°에서 최소로 계산 되었다.



(a) 기본 모델

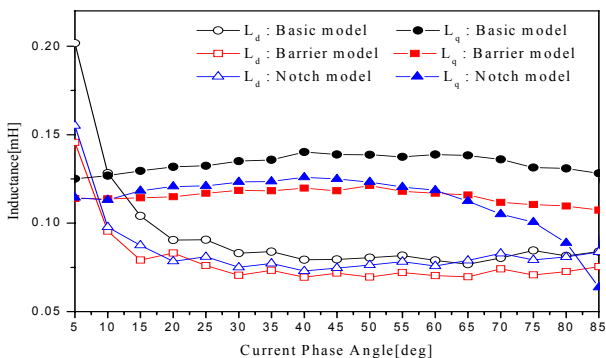


(b) 배리어 모델

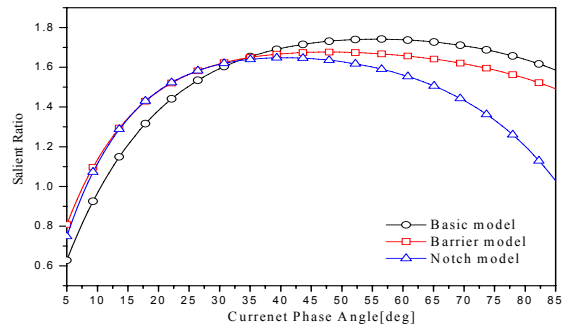


(c) 노치 모델

〈그림 3〉 전류 위상각에 따른 토크 및 토크 리플



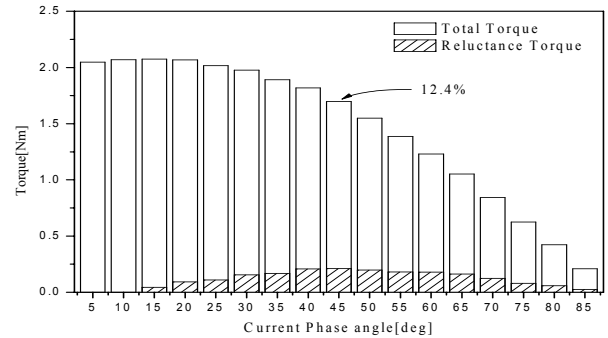
〈그림 4〉 인덕턴스 계산 결과



〈그림 5〉 전류위상각에 따른 돌극비

그림 4는 각 모델의 d, q축 인덕턴스 계산 결과를 나타내고 있다. 인덕턴스의 크기는 기본 모델이 가장 크게 나타나고 있다. 그러나 릴럭턴스 토크는 인덕턴스의 상대적인 크기가 아닌 돌극비의 크기에 따라 발생하게 되므로 각 모델의 돌극비를 그림 5에 나타내었다. 결과는 아주 작은 값을 연산할 시 리플이 크게 되므로 Curve Fitting Method를 통해 정리하였다. 기본 모델의 돌극비가 상대적으로 크므로 전체 발생 토크에서 기본 모델의 릴럭턴스 토크가 가장 크게 기여할 것으로 판단된다.

그림 6은 기본 모델의 전체 발생 토크에서 릴럭턴스 토크가 차지하는 비율을 나타낸다. 돌극비 계산 결과와 같이 전류위상각 45° 부근에서 릴럭턴스 토크는 가장 크게 계산 되었으나 비율은 12.4%로 마그네틱 토크에 비해 전체 발생토크에 기여하는 양이 작은 것으로 판단된다. 배리어 모델의 경우는 45° 일 때 9.6%, 노치 모델의 경우는 10.5%가 전체 발생 토크에 기여하고 있는 것으로 계산된다. 노치 모델에서는 보조 슬롯의 영향으로 공극자속이 감소하여 마그네틱 토크 또한 감소하였으므로 배리어 모델에 비해 돌극비는 작게 계산 되었으나 상대적으로 전체 발생 토크에 기여하는 정도는 오히려 커짐을 알 수 있다.



〈그림 6〉 발생 토크와 릴럭턴스 토크의 비

3. 결 론

본 논문에서는 IPMSM의 d, q축 인덕턴스의 계산을 수행하여 수식에 의한 토크를 산정하였으며 이를 FEM해석 결과와 비교하였다. 결과와 같이 전류위상각에 따른 인덕턴스를 이용한 토크 계산치와 FEM해석으로 구한 토크는 거의 오차가 없는 양호한 결과를 얻었다. 또한 인덕턴스 계산을 통하여 본 해석에 사용된 전동기는 마그네틱 토크가 전체 발생 토크에 아주 크게 기여하고 있음을 알 수 있었다.

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신 인력양성사업으로 수행된 연구결과임

[참 고 문 헌]

[1] A. Kioumars, M. Moallem, and B. Fahimi, "Mitigation of torque ripple in interior PM motors by optimal shape design," IEEE Trans. Magn., vol. 42, No. 11, pp. 3706-3711, Nov.
 [2] J.-Y. Lee, S.-H. Lee, G.-H. Lee, J.-P. Hong, and J. Hur, "Determination of parameters considering magnetic nonlinearity in an interior permanent magnet synchronous motor," IEEE Trans. Magn., vol. 40, no. 4, Apr. 2006.
 [3] W. H. Press, et al., Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing. Cambridge University Press, Oct. 1992.