

철손 예측을 위한 IPMSM의 자계거동 및 고조파 분석

우석현*, 계승현*, 장기봉*, 김규탁*
 창원대*

The Magnetic Field Distribution and Harmonic Analysis of IPMSM
 in order to Calculate Coreloss

Seok-Hyeon Woo*, Seung-Hyun Kye*, Ki-Bong Jang*, Gyu-Tak Kim*
 Changwon National University*

Abstract - 본 논문에서는 매입형 영구자석 전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)의 회전자 형상에 따른 철손의 변화를 고찰하였다. 철손 계산은 철손 수식의 계수들을 Curve Fitting Method (CFM)를 통하여 산정하였고, 자속밀도는 고정자의 자계 거동 및 고조파 분석을 통하여 계산하였다.

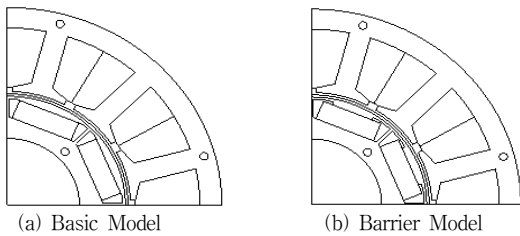
1. 서 론

IPMSM은 단위 체적당 발생하는 토크가 다른 전동기에 비해 큰 반면 코깅토크가 크게 발생하여 전동기 운전 시 진동과 소음이 크게 발생한다. 또한 운전 특성상 고속에서 높은 주파수 특성으로 인하여 철손이 많이 발생하기 때문에 자석의 감자 위험이 높으며 효율 저감의 위험성도 가진다. 전기기에 있어 손실은 기기의 운전조건이나 효율을 결정하는 중요한 요소이므로 이러한 손실을 정밀하게 예측하여 설계하는 것이 매우 중요하다[1]. 따라서 본 논문에서는 코깅토크 저감, 구동 토크의 맥동의 저감, 자속의 집중을 시키기 위하여 자속장벽(Barrier)을 설치한 모델과 기본 모델의 기본 구동 특성을 비교하고, 두 모델의 철손을 자계거동 및 고조파 분석을 통하여 계산하였다.

2. 철손 계산

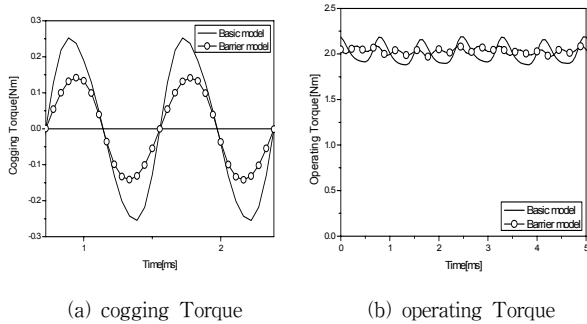
2.1 해석 모델의 구동특성

본 논문에서는 코깅 토크의 저감을 통한 정토크 특성의 향상을 위해 회전자 최적화를 실시하여 배리어를 설치하였다.



<그림 1> 해석 모델

그림 1은 기본 모델과 배리어 모델의 형상을 나타낸 것이다. 배리어 모델은 d축을 기준으로 q축의 영구자석 방향으로 갈수록 자속밀도가 작아지도록 만들어 준다. 즉, 영구자석에 의해 발생하는 자속을 회전자 표면에서 정현적으로 분포시켜 코깅 토크를 저감하는 방법이다.



<그림 2> 기본 구동 특성

그림 2는 기본 모델과 배리어 모델의 코깅 토크 및 발생 토크 특성을 나타낸 것이다. 배리어를 적용한 결과 기본모델에 비해 코깅토크 43.2%, 토크 리플 69%, 구동 토크 0.2% 저감 되었다. 구동토크가 미소량 감소하였지만 코깅 토크와 토크 리플이 크게 저감되어 전동기의 전반인 성능이 크게 향상되었다.

2.2 Steinmetz의 철손 특성식

일반적인 철손에서는 재질 자체의 자기이력 특성으로 인한 히스테리시스 손실분과 유도 전류에 의한 와전류 손실분으로 분류되고, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_c = P_h + P_e = k_h f B_m^n + k_e f^2 B_m^2 \quad (1)$$

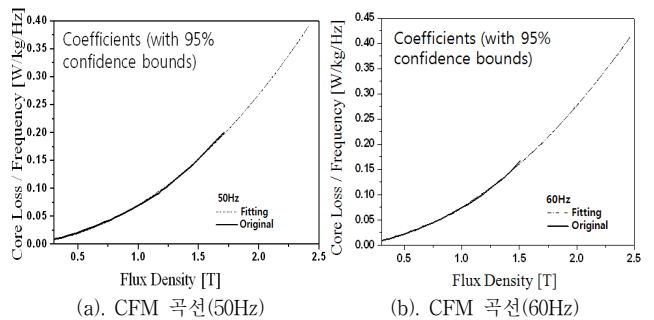
여기서 f 는 외부에서 인가되는 자계의 주파수, B_m 은 자속밀도, k_h 는 히스테리시스 손실계수, k_e 는 와전류 손실계수, n 은 Steinmetz 상수이다. 그러나 식 (1)에서 나타난 히스테리시스 손실과 와전류 손실 외에 이상와전류 손실 (Anomalous eddy current loss)이 발생하게 되는데 이는 주파수와 자속밀도의 함수로 수식 2와 같이 정의된다. 여기서 k_a 는 이상와전류 손실 계수이다[2][3].

$$P_c = P_h + P_e + P_a = k_h f B_m^n + k_e f^2 B_m^2 + k_a f^{1.5} B_m^{1.5} \quad (2)$$

철손을 계산하는 것은 위의 수식들의 계수를 올바르게 산정하는 것으로 귀결되지만 각각의 계수들은 전기 강판의 재질과 주파수에 따라 그 크기가 비선형적으로 달라지므로 설계과정에서 정확한 구동 특성 예측을 위해 계수들의 계산 방법을 정의하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 CFM을 사용하여 철손 계산에 사용될 계수들을 산정하였다[3].

2.3 Curve Fitting Method를 통한 철손 계수 산정

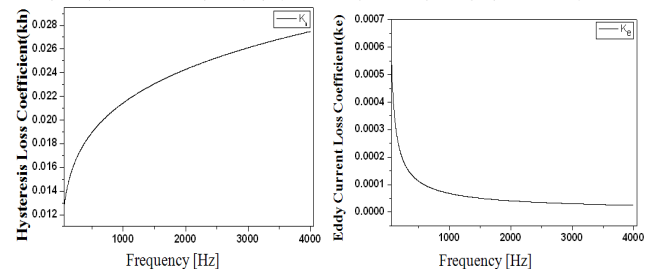
제공된 철손 데이터는 설계자가 원하는 자속밀도와 주파수에 대한 정보가 제공되지 않으므로, 제공받은 데이터를 이용하여 설계자가 원하는 철손 계수를 구하여 원하는 자속밀도와 주파수에 따른 철손을 구하여야 한다.

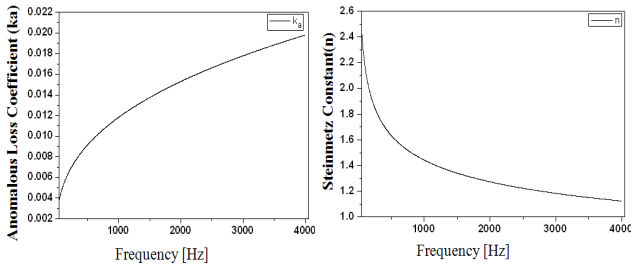


(a). CFM 곡선(50Hz) (b). CFM 곡선(60Hz)

<그림 3> 계수 산정을 위한 CFM

그림 3은 CFM을 이용한 자속-철손 그래프와 실제 자속-철손 데이터를 이용한 그래프를 비교해 나타낸 것으로 신뢰 범위 95%의 그래프가 fitting이 된 것을 알 수 있다. 산정되어진 철손 계수는 50, 60Hz 두 영역에서만 만족하는 값이므로 보다 정확한 철손 계산을 위해서는 CFM을 이용하여 구동 주파수에서의 철손 계수를 재 산정해야만 한다.



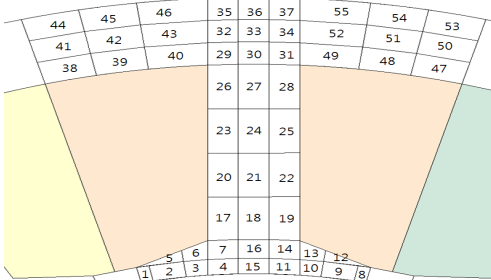


〈그림 4〉 계수 산정을 위한 CFM

그림 4는 주파수에 따른 철손 계수 함수 $Y=AX^B$ 를 이용하여 주파수에 따른 철손 계수의 변화양상을 나타낸 것이다. 주파수가 4000Hz 영역까지 산정되어진 것은 해석에 사용된 전동기는 구동 주파수가 200Hz 이나 고조파의 주파수는 기본과 주파수의 고조파 차수만큼 증가하므로 구동 주파수 영역 보다 넓은 주파수 영역에서의 철손 계수의 산정이 필요하게 된다.

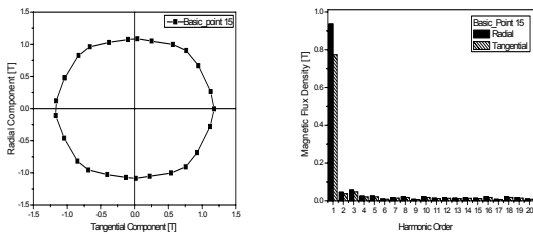
2.4 자계거동 분석 및 고조파 분석

본 논문에서는 그림 5과 같이 고정자 치를 55개의 영역으로 분할하여 각각의 영역에서 자계 거동 분석을 실시하였다.

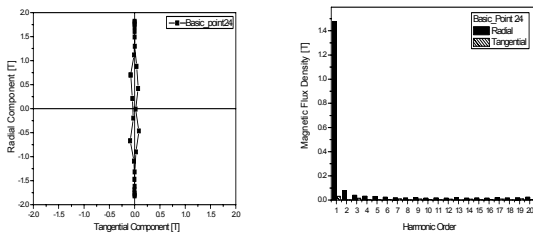


〈그림 5〉 고정자에서의 자계 거동 분석 위치

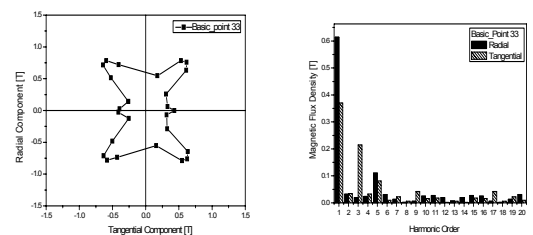
교번자계 및 회전자계 영역의 분할 기준은 하경호의 3명의 영구자석형 모터의 고정자 철심에서 자계의 거동 및 철손 분석에서 한 주기 동안 최대치 자속밀도와 최소치 자속밀도의 비율이 0.1 보다 작으면 교번자계, 0.1보다 크면 회전자계의 영역으로 정의 한 것을 본 논문에 적용하였다[4].



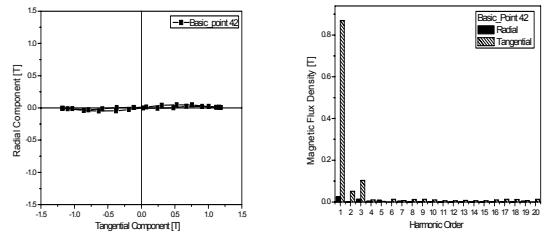
(a). Point 15



(b). Point 24



(c). Point 33



(d). Point 42

〈그림 6〉 영역에서의 자속밀도 궤적 및 FFT 분석결과

치의 끝단부인 point 1 - 4, 6 - 7, 13 - 16 영역과치의 요크 연결부인 point 29 - 35 영역에서는 축비가 0.1 보다 큰 타원형의 회전자계 주요하게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 치의 중간부인 point 17 - 28 영역에서는 반경방향 성분의 자속밀도가 크게 나타나고 요크 부분인 point 38 - 55영역에서는 접선방향 성분의 자속밀도가 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 이는 자속이 크게 회전하지 않고 주로 크기만 바뀌는 한쪽 방향으로 교번자계가 크게 발생하는 구간이다.

〈표 1〉 철손계산

Freq. [Hz]	Model	기본과 철손[W]	고조파 철손[W]	전체철손 [W]
50	Basic	2.695	4.158	6.853
	Barrier	2.758	4.218	6.976
60	Basic	3.551	5.163	8.714
	Barrier	3.676	5.371	9.047
200	Basic	23.072	55.439	78.511
	Barrier	23.558	56.290	79.848

철손계산 결과 기본 모델에 비해 베리어 모델이 기본과에 의한 철손과 고조파에 의한 철손이 증가로 인해 다소 증가하였지만, 기본모델과 베리어 모델의 발생 철손이 대동소이함을 확인할 수 있었다. 베리어를 설치한 경우 공극자속의 고조파 저감과 기본과 자속의 향상을 통하여 구동특성의 향상을 가지는 결과를 가지게 된다. 하지만 유효 쇄교자속이 증가하였으므로 증가된 자속이 치에 유입되므로 각 영역의 Radial 성분과 Tangential 성분의 자속이 커지게 되고 철손이 전반적으로 증가하는 결과를 가지게 되었다. 이는 공극자속의 고조파 양상과 치의 각 부분마다의 고조파 양상과 다를 수 있다는 의미를 가진다.

3. 결 론

본 논문에서는 IPMSM의 단점인 치, 슬롯 구조에 의한 코깅 토크를 최소화시키고 정토크 특성을 향상시키기 위해 베리어 설계를 수행하고 그에 따른 제반 특성과 고정자 자계 거동 및 고조파 분석을 통하여 철손을 계산 하였다. 철손계산 결과 베리어 모델이 기본 모델보다 기본모델과 베리어 모델의 발생 철손이 대동소이함을 확인할 수 있었다. 향후 제작을 통해 철손 실험을 수행하여, 실험과 이론치를 비교함은 물론 철손 저감 방법에 대해 계속해서 고찰할 것이다.

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임

[참 고 문 헌]

[1]Gyu-Hong Kang, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim, and Jung-Woo Park, "Improved Parameter Modeling of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Finite Element Analysis" IEEE Trans. on Magnetism, vol. 36, no. 4, pp.1867 ~ 1870, 2000.
 [2] Y.Chen, P.Pillay, "An Improved formula for lamination core loss calculations in machines operating with high frequency and high flux density excitation" Industry Application Conference. Vol. 2 pp. 13~18, 2002
 [3] 장석명, 고경진, 최장영, 이성호 "회전속도를 고려한 영구자석형 풍력발전기의 철손 해석" 대한전기학회 2007년 추계학술대회 논문집, pp.115~117. 2007. 10
 [4] 하경호, 차상운, 김재관, 홍정표 "영구자석형 모터의 고정자 철심에서 자계의 거동 및 철손 분석" 대한전기학회 논문지 B, 제55B권 제2호 pp. 76~82. 2006. 2