

SPM의 편심을 고려한 코깅토크 산정에 관한 연구

김규섭, 이재민, 김도진, 홍정표
한양대학교 자동차공학과

A study on the calculation of cogging torque considering magnet eccentricity in SPM motor

Kyu-Seob Kim, Jae-Min Lee, Do-Jin Kim, Jung-Pyo Hong
Department of Automotive Engineering, Hanyang University

Abstract - 영구자석을 활용한 전동기는 현재까지 많은 연구가 진행되어왔다. 전동기의 특성을 분석하기 위해 해석적인 방법과 유한요소법을 쓰고 있는데 두 가지 모두 장점과 단점을 가지고 있으므로 설계하는데 있어 서로 알맞은 방법을 선택하여 사용하는 것이 바람직하다. 특히 초기설계에서 계산시간이 빠르고 전동기 구성요소들의 경향을 살펴볼 수 있는 공간고조파법을 사용하고 상세설계에서는 시간이 많이 걸리지만 정확한 해를 찾을 수 있는 유한요소법을 사용하는 것이 일반적이다. 본 논문에서는 영구자석이 편심이 적용된 경우에 대해 해석적인 방법으로 공극 자속밀도와 코깅토크를 산정해 본 후, 유한요소법을 사용하여 이를 검증하였다.

1. 서 론

공극 자속밀도의 파형에 영향을 주는 요인으로는 영구자석의 형상, 공극의 길이, 극수, 영구자석의 자화 방향 등이 있다. 전동기 특성을 분석하기 위해서 공극 자속밀도 파형을 살펴보는 것이 필요하다. 유한요소법이나 유한계절법과 같은 수치 해법은 해석하는데 시간이 오래 걸릴 뿐만 아니라 해석적인 해와 비교하여 특성에 영향을 미치는 인자가 전동기 특성에 어떤 영향을 미치는지 알 수 없다.

본 논문에서는 radial의 자화방향을 갖는, 편심 유무에 따른 영구자석의 공극 자속밀도와 코깅토크를 해석적인 방법으로 산정해보고 이를 유한요소법을 이용하여 검증하였다.

2. 본 론

2.1 전동기의 종류 및 이론

본 논문에서 해석에 사용될 전동기는 SPM 전동기이고 공간고조파법 및 자화에 대한 내용을 살펴보면 다음과 같다.

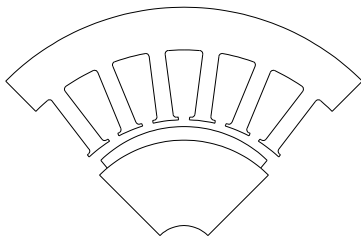
2.1.1 SPM 전동기

본 논문에서 해석에 사용되는 전동기는 SPM 전동기이며, 4극 24슬롯 모델 그리고 영구자석에 편심이 적용되어 있다.

2.1.2 공간고조파법

전동기의 특성해석 기법에는 유한요소법과 같은 수치해석 법과 미분방정식의 해법을 통한 해석적인 방법 등이 있다. 그 중 유한요소법은 수치해석법의 하나로서 복잡한 구조에 대한 모델링이 용이하고 외부회로 방정식이 결합된 경우 슬롯 고조파 및 비정현파 전압에 의한 시간 고조파를 고려할 수 있지만 계산 시간이 길고 보다 정밀한 해석결과를 산출하기 위해서는 계산기의 용량증대 및 성능향상이 필요하다. 따라서, 수치해석법의 단점인 해석 시간을 단축시키고 전동기의 초기설계 변수의 변화에 따른 특성해석을 행하기 위하여 주기적인 등가자화전류의 공간분포를 이용한 공간고조파법을 사용하고 있다.

공간고조파법이란 공극부분의 자속밀도를 수학적인 방법으로 모델링하여 공극 자속밀도를 계산하고 이를 통해 전동기 특성을 산정하는 방법이다.



〈그림 1〉 SPM 전동기

공간고조파법을 적용하기 위해 몇 가지 가정을 둔다.

- 1) 단부 효과는 무시한다.
- 2) 고정자와 회전자에의 비투자율은 무한대이다.
- 3) 영구자석은 등방성이며 선형적인 감자특성을 가진다.

본 논문의 SPM 전동기 해석에서는 이차원의 원통좌표계를 사용한다. 그리고 Laplace Equation의 해를 경계조건을 사용하여 구한다. Ω 는 자기 스칼라 포텐셜로서 그로부터 자속밀도를 산정할 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \Omega}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Omega}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Omega}{\partial \theta^2} = 0 \quad (1)$$

$$B_r = \mu_o H_r = -\mu_o \frac{\partial \Omega}{\partial r} \quad (2)$$

$$B_t = \mu_o H_t = -\mu_o \frac{1}{r} \frac{\partial \Omega}{\partial \theta} \quad (3)$$

여기서 H_r, H_t 은 각각 radial과 tangential 방향의 공극 자계세기이며, B_r, B_t 은 radial과 tangential 방향의 공극 자속밀도이다.

2.1.3 영구자석의 자화

영구자석의 자화 방향은 parallel 방향과 radial 방향이 있다. Parallel 방향은 각 자석이 평행하게 뻗어나가고 radial 방향은 한 점을 중심으로 반경방향으로 뻗어나가는 형태이다.

Parallel 자화 방향과 radial 자화 방향의 효과는 [2]에서 설명되었듯이 parallel 방향은 radial 방향보다 같은 영구자석의 사용량을 동일하게 할 경우 자속밀도의 크기가 크지만 radial 방향의 자화는 공극 자속밀도 파형 형태를 정현적으로 가져갈 수 있으며, 이는 토크리플 및 코깅토크를 줄이는데 효과적이다.

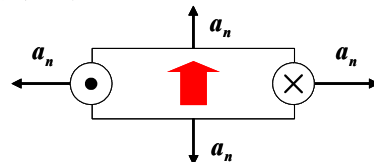
영구자석의 자화벡터 \vec{M} 은 잔류자속밀도로 산정된다.

본 논문에서는 편심을 고려한 radial 방향으로 자화된 영구자석의 공극 자속밀도를 해석해 보았다.

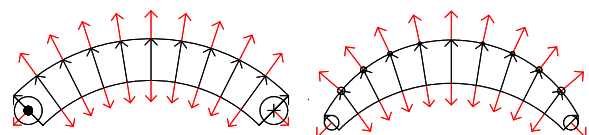
2.2 영구자석의 편심 유무에 따른 표면전류밀도의 변화

2.2.1 등가자화 표면전류밀도

영구자석의 자화는 등가자화 전류밀도로 나타낼 수 있다. 등가자화 표면전류밀도는 표면과 체적 전류밀도로 나눌 수 있다. 만일 영구자석 내부의 자화가 일정하다면 즉, 체적 내에서 \vec{M} 의 회전이 0이 되므로 체적전류밀도가 존재하지 않게 된다. 따라서 영구자석의 표면에만 전류밀도가 분포하게 된다. 영구자석의 표면을 표면전류밀도로 등가화 하면 아래와 같은 방향이 된다.



〈그림 2〉 표면전류 밀도 분포 및 방향



〈그림 3〉 편심의 유무에 따른 등가 자화전류 밀도의 변화

등가자화 표면전류밀도는 아래와 같이 자화벡터와 면벡터의 벡터 곱으로 산정하며 영구자석의 표면은 세부분으로 나누어 모델링 할 수 있다.

$$\vec{J}_{mL} = \vec{M} \times \vec{a}_n \quad (5)$$

먼저 가장자리 모서리 부분의 등가자화 표면전류밀도는 자화벡터와 면벡터가 pole arc의 변화에 관계없이 일정하다. 그리고 영구자석의 반경이 작은 호 부분의 등가자화 표면전류밀도는 호를 따라서 자화벡터와 면벡터의 방향이 이루는 각도가 180°를 이루므로 전류밀도가 없다. 또한 영구자석의 바깥쪽 호 부분은 편심을 고려하면 호를 따라서 전류밀도가 변하게 된다.

- 가장자리 모서리 부분 : $J_{mL} = M$ (6)

- 영구자석의 아래의 호 부분 : $J_{c1} = 0$ (7)

- 영구자석의 위의 호 부분 : $J_{c2} = M \cdot \sin\theta$ (8)

따라서 편심이 들어간 경우는 편심이 없는 경우와 비교하여 호 부분에 표면전류밀도가 존재하게 되므로 좀 더 정현적인 공극 자속밀도를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

2.2.2 편심이 고려된 표면전류 밀도의 해석 방법

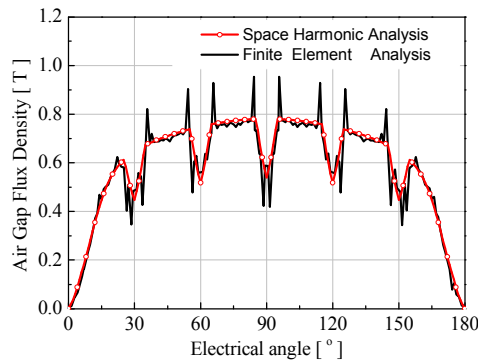
산정한 등가자화 표면전류밀도를 사용하여 공극 자속밀도를 산정한다. 등가자화 표면전류밀도와 미소 길이에 대한 곱이 미소 전류가 되므로 이를 적분하여 얻을 수 있다. 편심이 없는 영구자석과 다른 점은 미소 전류가 호를 따라서 변하게 되므로 이를 고려하여 구한다.

가장자리의 모서리 부분은 모서리 길이에 따라 표면전류밀도가 분포하므로 길이에 대하여 적분을 하여 공극자속밀도를 산정하고 윗부분의 호 부분은 각도의 변화에 따라 표면전류밀도가 분포하므로 영구자석의 각도에 따른 적분을 수행하여 산정한다.

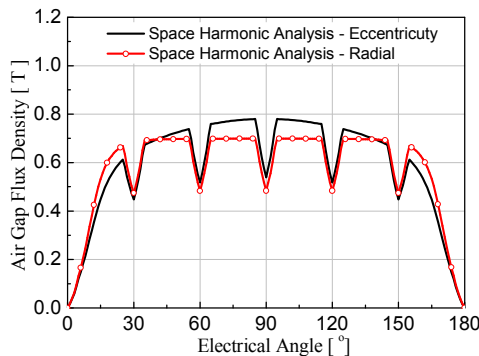
2.3 공간고조파 해석 및 유한요소해석 결과

공간고조파법과 유한요소법을 이용하여 해석한 결과는 그림 4와 같으며, 해석한 결과는 유사하다. 또한 영구자석의 사용량 동일하게 하고 편심이 없는 경우와 비교해보면 최대값은 편심이 있는 것이 크게 산정되고 끝부분으로 갈수록 작아짐을 볼 수 있다.

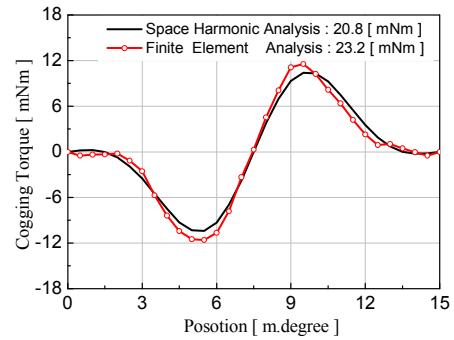
공간고조파법 및 유한요소법을 사용하여 코깅토크를 산정한 결과는 그림 6과 같으며, 크기는 대략 10% 차이가 남을 알 수가 있다.



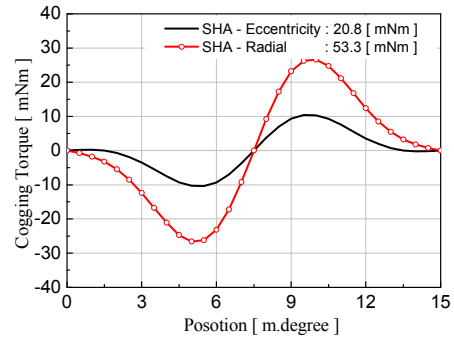
〈그림 4〉 공간고조파법 및 유한요소법으로 산정한 공극자속밀도



〈그림 5〉 편심유무에 따른 공극 자속밀도



〈그림 6〉 편심을 고려한 공간고조파법 및 유한요소법으로 산정한 코깅토크



〈그림 7〉 편심유무에 따른 코깅토크

3. 결 론

공간고조파법을 사용하여 공극의 자속밀도와 코깅토크를 산정해보고 이를 유한요소법을 사용하여 비교해 보았다. 공간고조파법에서의 공극 자속밀도의 최대값이 유한요소법의 결과가 서로 유사하다. 또한 영구자석의 사용량을 동일하게 하였을 때 편심이 있을 경우에는 자속밀도의 최대치는 증가하며 가장자리로 갈수록 자속밀도는 작아짐을 알 수 있다. 즉, 공극의 파형이 radial 방향의 자화방향을 가지고 있었던 것에 비해 상당히 정현적인 파형을 나타낸다. 이는 영구자석의 사용량이 동일할 경우 표면전류밀도가 radial 방향은 양쪽 끝에만 존재하는 반면에 편심이 있을 경우에는 호 부분에도 등가자화 표면전류밀도가 존재하게 되기 때문이다. 그리고 코깅토크 값은 파형과 값이 비슷하였지만 오차가 10%정도로 공극 자속밀도보다 작게 산정되었다. 코깅토크의 경우 radial의 자화 방향을 가진 경우와 비교하였을 때에는 편심이 없는 경우가 2.5배 증가한다.

본 논문의 연구 결과 편심이 적용되어 있는 모델에 대해서 해석적인 방법을 사용함으로써 빠른 시간내에 해석 결과를 얻을 수 있으며, 유한요소해석 결과와 비교하여 유사한 결과값을 얻을 수 있었다. 따라서 초기 설계 시 본 논문에서 제시한 해석적인 방법을 통해서 영구자석에 편심이 고려된 모델에 대한 검토가 가능하다.

[참 고 문 헌]

- [1] Nady Boules, "Prediction of No-Load Flux Density Distribution in Permanent Magnet Machines", IEEE Industry Applications Society, Vol.IA-21 .NO. 4, MAY/JUNE 1985
- [2] Z. Q. Zhu, "Instantaneous Magnetic Field Distribution in Brushless Permanent Magnet dc Motor, Part I : Open-Circuit Field", IEEE TRANSACTION ON MAGNETICS , VOL. 29, NO.1.JANUARY 1993
- [3] Jacek F. Gieras and Chong Wang and Joseph Cho Lai, Noise of Polyphase Electric Motor.Taylor & Francis, 2006