

매입형 영구자석 동기전동기의 유한요소해석

최길선*, 한성진*
 동아대학교*

Finite Element Analysis of Interior Buried Permanent Magnet Synchronous Motor

Gil-Sun Choi*, Sung-Chin Hahn*
 Dong-A University*

Abstract - 본 논문에서는 하이브리드 전기자동차 구동에 적용되는 비선형 자기포화특성이 두드러진 매입형 영구자석 동기전동기의 돌극비에 따른 특성해석에 대해 나타낸다. 영구자석의 층수에 따라 달라지는 돌극비 특성을 구하기 위해 고정자, 회전자 형상 및 재질 등을 동일하게 두고 유한요소해석을 통해 자체해석을 하였다.

1. 서 론

최근 지구온난화, 기상이변, 오존층 파괴 등 환경문제와 석유 에너지 자원의 고갈위기에 따라 신재생에너지, 친환경 차량, 고효율 전기기기 등의 개발을 위한 노력이 계속되고 있다. 특히 전동기의 고효율화, 대용량화, 소형화, 경량화, 신뢰성 향상 등으로 친환경 차량에 적용되는 전동기의 개발이 활발히 진행되고 있다.[1]

1990년도 초까지는 유도 전동기와 영구자석 전동기가 비슷한 비율로 이용되었으나 하이브리드 차량 개발이 본격화되면서 영구자석 전동기가 주류를 이루고, 2000년대 이후로는 전기자동차용 구동 모터로 영구자석 전동기만이 개발되고 있다. 매입형 영구자석 동기 전동기(Interior Buried Permanent Magnet Synchronous Motor:IPMSM)는 자석토크(Magnet Torque) 뿐만 아니라 돌극성으로 인한 자기저항 토크(Reluctance Torque)를 발생할 수 있기 때문에 더 큰 토크뿐만 아니라 일정 출력 영역까지 넓은 운전속도 영역에서 구동이 가능하기 때문에 전기자동차 구동에 사용된다. IPMSM은 약자속제어성을 증대하기 위하여 영구자석이 회전자의 내부에 다층으로 매입된 구조를 많이 사용하는데, 영구자석의 층수에 따라 달라지는 돌극비에 따른 특성을 유한요소해석법을 통해 연구하고자 한다.

2. 본 론

2.1 매입형 영구자석 동기전동기 특성 분석

전동기의 출력은 인버터 전류 정격과 최대전류 I_{max} , 최대 직류단 전압에 의해 결정되는데 최대 출력 전압 V_{max} 에 의해 제한된다. 이러한 전압 제한과 전류 제한은 다음 식(1)과 같이 표현된다.

$$V_{ds}^2 + V_{qs}^2 \leq V_{max}^2 \quad (1)$$

$$i_{ds}^2 + i_{qs}^2 \leq I_{max}^2$$

여기서, V_{ds}, V_{qs} 는 d-q축 단자 전압, i_{ds}, i_{qs} 는 d-q축 전류를 의미한다. d-q축 고정자 쇄교자속($\lambda_{ds} = L_{ds}i_{ds} + \lambda_f$, $\lambda_{qs} = L_{qs}i_{qs}$)을 매입한 전압 방정식은 다음 식(2)과 같이 표현된다.

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + L_{ds} \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_r L_{qs} i_{qs} \quad (2)$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + L_{qs} \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_r (L_{ds} i_{ds} + \lambda_f)$$

여기서, ω_r 는 동기 전기 각속도, R_s 는 고정자 상저항, $\lambda_{ds}, \lambda_{qs}$ 는 d-q축 고정자 쇄교자속, L_{ds}, L_{qs} 는 d-q축 인덕턴스, λ_f 는 영구자석에 의한 쇄교자속을 의미한다.

전기적 입력 P_m 은 다음 식(3)과 같이 표현된다.

$$P_m = \frac{3}{2} [R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + \frac{d}{dt} (\lambda_{ds} i_{ds} + \lambda_{qs} i_{qs}) + \omega_r (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds})] \quad (3)$$

여기서, 첫 번째 항은 동손, 두 번째 항은 자기 에너지의 시간에 대한

변화율, 그리고 마지막 항은 기계적 출력으로 표현 할 수 있다. 따라서 발생 토크 T_e 는 다음 식(4)과 같이 표현된다.

$$T_e = \frac{P_m}{\left(\frac{\omega_r}{P/2}\right)} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (4)$$

$$= \frac{3}{2} \frac{P}{2} [\lambda_f i_{qs} + (L_{ds} - L_{qs}) i_{ds} i_{qs}]$$

여기서, 첫 번째 항은 영구자석에 의한 자속과 고정자 q축 전류의 상호작용에 의해 발생하는 자석토크, 두 번째 항은 d-q축 인덕턴스 차이 즉, 돌극성으로 인해 발생하는 자기저항 토크로 표현 할 수 있다. 또 d-q축 전류 조합별로 d-q축 쇄교자속 $\lambda_{ds}, \lambda_{qs}$ 는 다른 값을 가지기 때문에 전류에 따른 함수 형태로 나타낼 수도 있다.

한편, d-q축 쇄교자속 계산은 다음 식 (5)과 같이 각 권선 단면적의 벡터포텐셜 A 평균값으로 가능하다.

$$\lambda = \left[\frac{\iint_{S_1} A_1 dS}{S_1} - \frac{\iint_{S_2} A_2 dS}{S_2} \right] l \quad (5)$$

여기서, l 은 축 방향 길이, S_1 과 S_2 는 전류방향별 N번 감긴 권선의 총 단면적을 의미한다.

2.2 매입형 영구자석 동기전동기 유한요소해석

본 논문에서는 매입형 영구자석 동기전동기의 자체해석을 위해 Maxwell 방정식으로부터 회전자 영구자석의 지배방정식을 식 (6)과 같이 도출한다.[2]

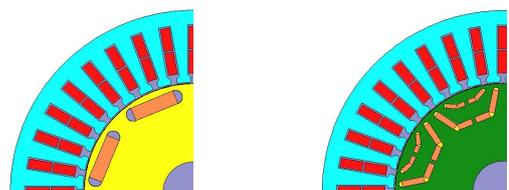
$$\left[\frac{\partial^2}{\partial r^2} A_{zn} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} A_{zn} - \left(\frac{1}{r}\right)^2 A_{zn} \right] = -\frac{j}{r} \mu_0 M_n \quad (6)$$

동일한 방법으로 Maxwell 방정식으로부터 고정자 권선의 지배방정식은 식 (7)과 같이 표현한다.

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial r^2} A_{zn} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} A_{zn} - \left(\frac{1}{r}\right)^2 A_{zn} \right] = 0 \quad (7)$$

2.3 매입형 영구자석 동기전동기의 모델

매입형 영구자석 동기전동기는 약자속제어성을 증대하기 위하여 영구자석이 회전자의 내부에 다층으로 매입된 구조를 많이 사용하는데, 영구자석의 층수에 따라 달라지는 돌극비에 따른 특성을 구하기 위해 고정자, 회전자 형상 및 재질 등을 동일하게 설계한다. 그림 1에서는 설계된 전동기 모델, 표 1에서는 적용된 동기전동기의 사양을 보여준다.



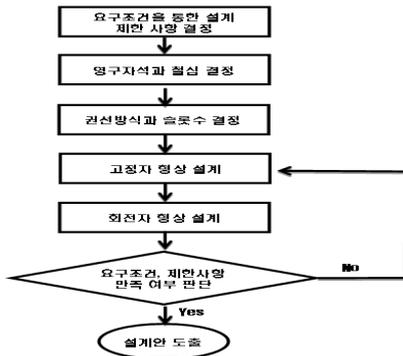
(a) single-layer (b) multi-layer

<그림 1> 매입형 영구자석 동기전동기 모델

〈표 1〉 매입형 영구자석 전동기 사양

전동기 항목	전동기 사양
극 수	8
공극 길이	1.5 [mm]
회전자 외경	142[mm]
고정자 외경	240[mm]
고정자 내경	145[mm]
적층길이	193[mm]
슬롯 수	36

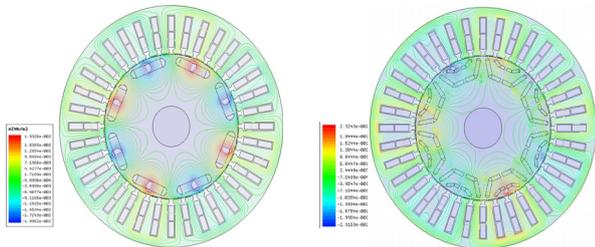
그림 2은 매입형 영구자석 동기 전동기의 설계 흐름도를 보여주고 있다. 이때 요구조건 및 제한사항을 만족하지 못하면 고정자 형상 설계부터 다시 이루어진다.



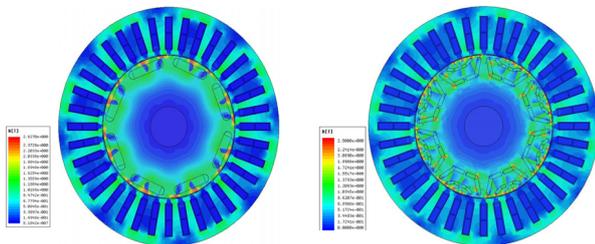
〈그림 2〉 매입형 영구자석 동기전동기 설계 흐름도

2.4 자계 해석 결과

그림 3와 그림 4은 매입형 영구자석 동기전동기의 돌극비에 따른 자속선도 및 자속밀도를 보여준다. 여기서 센터포스트와 브리지부분에 국부적으로 자기포화가 두드러짐을 확인할 수 있다.



(a) single-layer (b) multi-layer
〈그림 3〉 영구자석 돌극비에 따른 자속선도



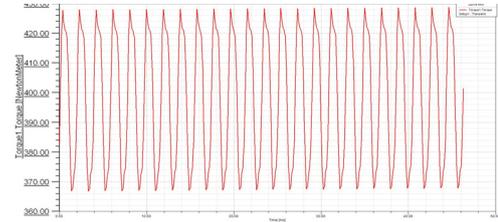
(a) single-layer (b) multi-layer
〈그림 4〉 영구자석 돌극비에 따른 자속밀도

그림 5는 매입형 영구자석 동기전동기의 돌극비에 따른 토크를 보여준다. 여기서 multi-layer에서 q축 자로의 확보가 용이하기 때문에 자기 저항 토크가 증대되어 출력토크가 더 크다는 것을 확인할 수 있다.

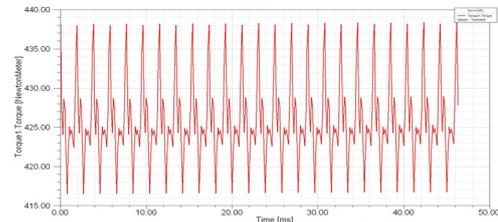
그림 6는 매입형 영구자석 동기전동기의 돌극비에 따른 역기전력을 보여준다. 여기서 multi-layer의 역기전력이 정현파에 가깝고 더 크다는 것을 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 하이브리드 전기자동차 구동에 적용되는 비선형 자기 포화특성이 두드러진 매입형 영구자석 동기전동기의 돌극비에 따른 특성해석에 대해 나타내었다. 매입된 영구자석 층수에 따른 특성 비교를 통해 single-layer보다 multi-layer 경우 더 큰 토크와 코깅 토크 및 토크 리플도 저감됨을 확인할 수 있었다. 또한 Multi-layer의 경우 2층 이상에서 돌극비 증가는 크기 않음을 확인할 수 있었다. 향후 최적의 센터포스트와 브리지간격 결정과 손실 고려를 통해 좀 더 정확한 특성해석을 수행할 수 있을 것으로 사료된다.

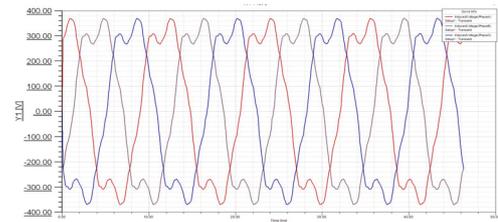


(a) single-layer 토크

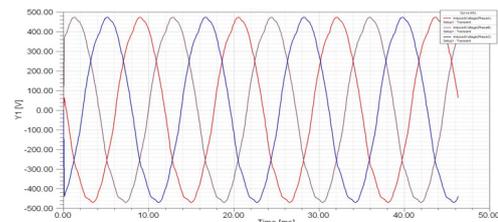


(b) multi-layer 토크

〈그림 5〉 영구자석 돌극비에 따른 토크



(a) single-layer 역기전력



(b) multi-layer 역기전력

〈그림 6〉 영구자석 돌극비에 따른 역기전력

[참 고 문 헌]

- [1] Mehrdad Ehsani, Khwaja M. Rahman, Hamid A. Toliyat, "Propulsion System Design of Electric and Hybrid Vehicles.", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.44, NO. 1, February 1997.
- [2] S.M. jang, H.W. Choi, "Design and Analysis of a High-speed Brushless DC Motor for Centrifugal Compressor.", IEEE Trans magn., vol.43, pp.2573-2575, June2007.
- [3] Nagorny, A.S., Dravid, N.V., Jansen, R.H., Kenny, B.H., "Design aspects of a high speed permanent magnet synchronous motor / generator for flywheel applications", IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, May 2005.

본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원 인력양성사업의 연구결과입니다.