ISSN (Print) 1598-5385
ISSN (Online) 2233-6648
≪연구논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society 28(1), 10-16 (2018) https://doi.org/10.4283/JKMS.2018.28.1.010

The Analysis of Iron Losses in a 12-Slot 10-Pole Fractional-Slot Permanent Magnet Synchronous Motor with Various Stator Winding Methods

Tae Heoung Kim*
Department of Electrical Engineering, ERI, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea

(Received 4 January 2018, Received in final form 7 February 2018, Accepted 7 February 2018)

A fractional-slot permanent magnet synchronous motor under 180 degree sinusoidal current can be adopted for the electric power steering system of hybrid and electric vehicles. This motor has various stator winding methods such as double-layer and single-layer for its purpose. In this paper, we investigate the iron losses characteristic of the permanent magnet synchronous motor according to the various winding methods. To get the accurate hysteresis and eddy-current losses, we consider the time harmonics of the instantaneous flux density using finite element method. From the analysis results, we know that the most of the iron losses are generated in the stator and the stator teeth shoe part has the highest iron losses density because of its rotating magnetic flux. Under the light and the rated load, the single-layer has less iron losses compared to the double-layer. However, as the load increases, the iron losses in the single-layer rapidly become larger. This is because the magnetic circuits are saturated.

Keywords : permanent magnet synchronous motor, fractional-slot, iron losses analysis, finite element method

12-Slot 10-Pole 분수 슬롯을 갖는 영구자석 동기 전동기의 고정자 권선 방법에 따른 철손 특성 해석

김태형*
국립경상대학교 전기공학과, 공학연구원, 경남 진주시 진주대로 501, 52828

(2018년 1월 4일 받음, 2018년 2월 7일 최종수정본 받음, 2018년 2월 7일 게재확정)

정현파 전류 구동의 분수 슬롯을 갖는 영구자석 동기 전동기는 코깅 토크 저감 측면에서 장점을 갖기 때문에 하이브리드 및 전기자동차의 전기조향장치시스템에 적용이 가능하다. 이러한 전동기는 그 목적에 따라 이층권 및 단층권 등의 다양한 형태의 고정자 권선 방법을 적용하고 있는데, 본 논문에서는 여러 가지 고정자 권선 방법에 따른 영구자석 동기 전동기의 철손 특성을 정밀 분석하였다. 이를 위해 시간 고조파를 고려한 철손 해석 기법을 사용하였으며, 유한요소 해석에 의해 얻어진 순시 자속밀도로부터 히스테리시스손 및 와전류손을 계산하였다. 해석 결과, 각 권선 방법에서 대부분의 철손은 고정자에서 발생하였으며, 철손 밀도는 자계의 변화가 교번자계 특성을 갖는 치와 요크에서보다 회전자계의 특성을 갖는 고정자 치 끝단부에서 가장 높게 분포하였다. 또한 부하에 따른 철손은 정격부하 이하에서 단층권이 이층권에 비해 철손이 작았으며, 부하가 증가할수록 자기회로의 포화로 인해 단층권에서 급격히 철손이 증가함을 알 수 있었다.

주제어 : 영구자석 동기전동기, 분수 슬롯, 철손 해석, 유한요소법

I. 서 론

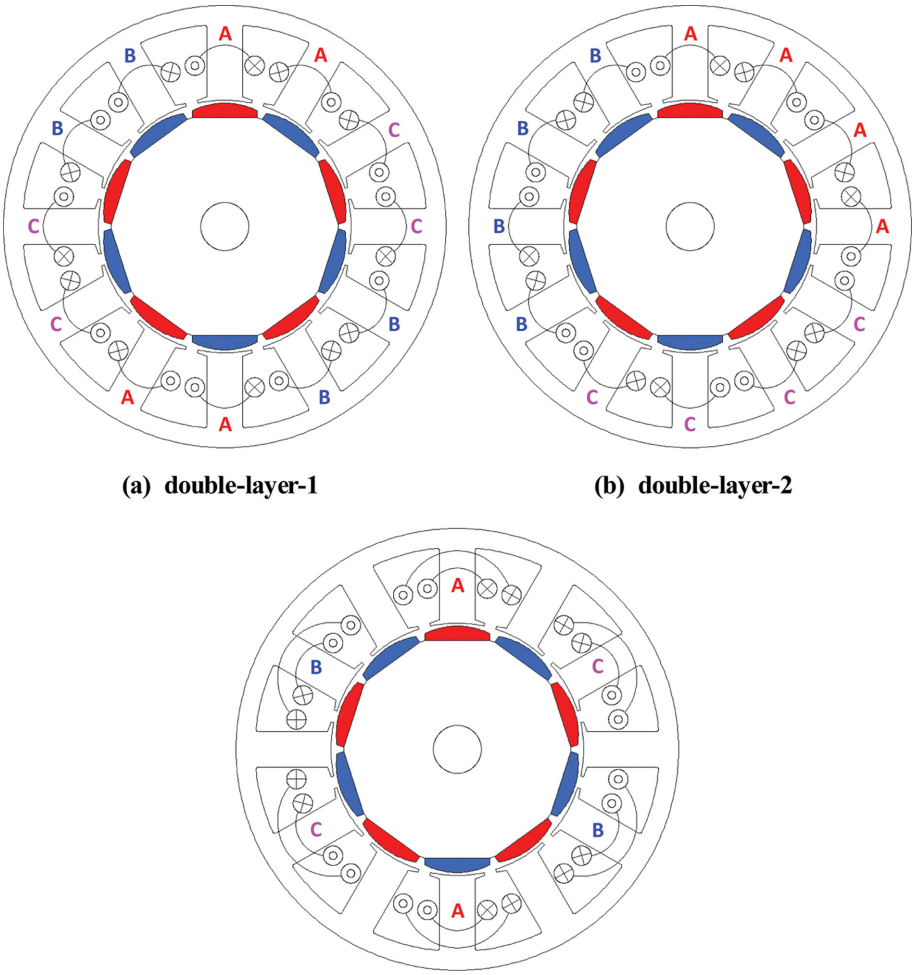
180도 정현파 전류에 의해 구동되는 영구자석 동기 전동기(Permanent Magnet Synchronous Motors: PMSM)는 고효율, 고출력밀도 및 저소음 특성을 갖기 때문에 가전 및 산업분야 전반에 걸쳐 널리 이용되고 있다. 최근 들어서는 하이브리드 및 순수 전기 자동차를 포함한 자동차 분야에 그 관심이 집중되고 있고, 특히 전기조향장치(Electric Power Steering: EPS) 시스템에서의 응용이 두드러지고 있다. 이러한 EPS 시스템용 PMSM은 특히 코깅 토크(Cogging torque)의 최소화가 필수적인데, 이를 위해 전동기의 구조 및 설계변수들을 이용한 다양한 방법들이 적용되고 있다. 그 중에서 고정자 슬롯과 회전자의 영구자석 사이에 주기성을 제거하여 코깅 토

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.
*Corresponding author: Tel: +82-55-772-1717,
Fax: +82-55-772-1719, e-mail: ktheoung@gnu.ac.kr

크를 감소시킬 수 있는 분수 슬롯(Fractional-slot) 형태의 PMSM도 많이 이용되고 있다[1-4]. 이러한 분수 슬롯 PMSM 설계 시, 토크 리플(Torque ripple) 저감 및 고출력밀도를 구현하기 위해서 이층권(Double layer winding) 및 단층권(Single layer winding) 등 다양한 형태의 고정자 권선(Winding) 방법을 이용할 수 있는데, 이에 따라 자기회로(Magnetic circuit)에서의 불평형 포화(Unbalanced saturation) 및 토크 리플, 기자력(Magneto-motive force: MMF) 파형에 높은 차수의 고조파(Harmonics)를 포함하기도 한다[5]. 따라서 고 신뢰성(High reliability)을 갖는 전동기를 설계하기 위해서는 고정자 권선 방법에 따른 여러 가지 전동기 특성 해석 및 분석이 반드시 필요하다. 본 논문에서는 분수 슬롯을 갖는 PMSM의 고정자 권선 방법에 따른 전동기의 여러 가지 기본 특성 및 철손 특성을 정밀하게 분석한다. 특히 고정자 치(Teeth) 및 요크(Yoke) 부분, 회전자 요크 부분에서 전동기의 회전에 따른 순시 자속밀도(Flux density) 분포를 유한요소(Finite Element Method: FEM) 기법을 통해 정밀하게 해석하고, 이를 이용해 히스테리시스(Hysteresis loss) 및 와전류(Eddy-current loss) 손을 포함하는 철손(Iron Losses)을 해석한다. 또한, 해석 결과로부터 각 고정자 권선 방법이 전동기의 철손에 미치는 영향을 분석하고, 향후 분수 슬롯 PMSM 설계 및 응용 시에 도움이 될 수 있는 설계 전략을 제시한다.

II. 해석 모델 및 고정자 권선 방법

본 연구에서 적용한 EPS용 분수 슬롯 PMSM은 3상 12-slot 10-pole의 구조이며, 정격 출력(Rated output)은 1200 rpm에서 650 W이다. 고정자 권선은 선경 1.7 mm의 코일이 이층권의 경우 치(Teeth)당 11턴으로 감겨져 있고, 단층권은 22턴이며, 해석 모델 모두 2개의 병렬회로 수를 갖는다. 회전자는 영구자석 표면 부착형(Surface-mounted Permanent Magnet: SPM)이며, 자석은 상온에서 평균 1.42T의 잔류자속밀도를 갖



(a) double-layer-1 (b) double-layer-2

(c) single-layer

Fig. 1. (Color online) Configurations of stator winding.

는 Nd-Fe-B를 적용하고 있다. 또한 고정자 및 회전자의 전기 강판은 0.5 mm 두께를 갖는 POSCO의 50PN600이다. Fig. 1은 12-slot 10-pole PMSM의 고정자 권선 방법을 나타낸다. 이층권으로 구성하는 경우는 일반적으로 Fig. 1(a)와 1(b)의 형태가 가능하고, 단층권의 경우는 Fig. 1(c)의 형태로 감을 수 있다. 분수 슬롯을 갖는 경우는 동일한 고정자 상(Phase)을 구성하는 코일(Coils)에서 발생하는 역기전력(Back electro-motive force: BEMF)에 위상차가 존재하게 되므로, 가능하면 역기전력의 합, 즉 토크 상수가 최대로 되는 조합의 코일들을 동일 상 권선으로 선택한다. 또한 180도 정현파 전류 구동의 경우는 토크 리플을 저감시키기 위해서 최대한 역기전력을 정현파 형태로 만들어야하기 때문에 Fig. 1(b)와 같이 다양한 역기전력 위상차를 갖는 코일들을 조합해 한 상의 권선을 구성하기도 한다. 한편 상간 발생할 수 있는 고장(Phase-to-Phase fault) 방지를 목적으로 동일 슬롯에는 동일 상만이 위치하도록 Fig. 1(c)와 같이 물리적으로 상들을 분리시키는 단층권을 사용하기도 한다. 하지만 이 경우 상간 절연은 가능한 반면, 권선의 끝단(End-turn) 길이가 다소 길어지게 되어 고정자 동손(Stator copper loss)이 증가할 수 있고, 고정자 치에 기자력이 집중되어 과부하(Overload) 운전 시에는 자기회로 포화로 인한 철손 증가 및 토크 감소가 있을 수 있다.

III. 전동기 기본 특성 분석

Fig. 2는 각 권선 방법에 따른 정격속도(Rated speed)에서의 상역기전력(Phase BEMF) 파형을 나타낸다. 단층권의 경우는 각 치에 감겨져 있는 코일들 중 같은 역기전력 위상을 갖는 코일들을 동일한 상으로 선택했기 때문에 역기전력이 이층권에 비해 크게 된다. 반면 이층권의 경우는 동일한 상의 코일에서 역기전력 위상차가 존재하게 되고, 특히 이층권-2는 한 상을 구성하는 4개 치의 코일에서 모두 다른 위상의 역기전력이 발생하게 되어 가장 역기전력 크기가 작게 된다. 하지만 그림에서 볼 수 있듯이 가장 정현적인 역기전력 파형을 얻을 수 있다. Fig. 3은 정격전류(실효치 75A) 인가 시 토크 특성을 보여준다. 역기전력 특성과 비례하여 단층권의 발생 토크가 가장 크며, 이층권-2에 비해서는 약 18% 크게 평균 토크가 발생한다. 하지만 토크 리플은 이층권의 경우가 정현적인 역기전력 파형을 갖기 때문에, 단층권에 비해 상당히 감소한다. 이층권-2의 경우는 단층권에 비해 거의 50% 수준으로 작게 된다. Fig. 4는 고정자 치 표면에서의 수직력 밀도를 나타낸다. 이는 전동기의 소음 및 진동 측면에서 중요한 의미를 가지는데, 이층권-2가 정현적인 역기전력 분포와 토크 리플이 작음에도 불구하고 수직력 밀도가 큰 이유는 고정자 치 끝단 부분에서의 자속밀도가 이층권-1과 단층권에 비해 크기 때문이다. 또한 단층권의 경우는 치 부분의 포화로 인해

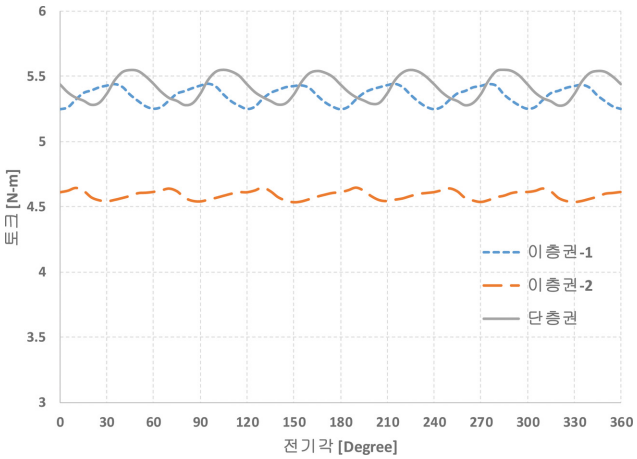


Fig. 3. (Color online) Torque waveform at rated load.

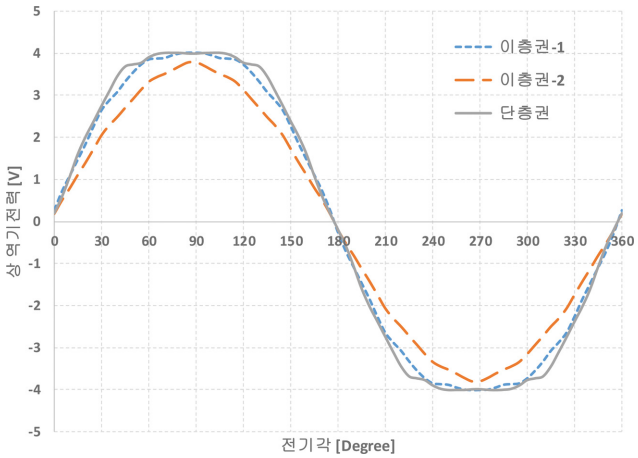


Fig. 2. (Color online) BEMF waveform at 1200 rpm.

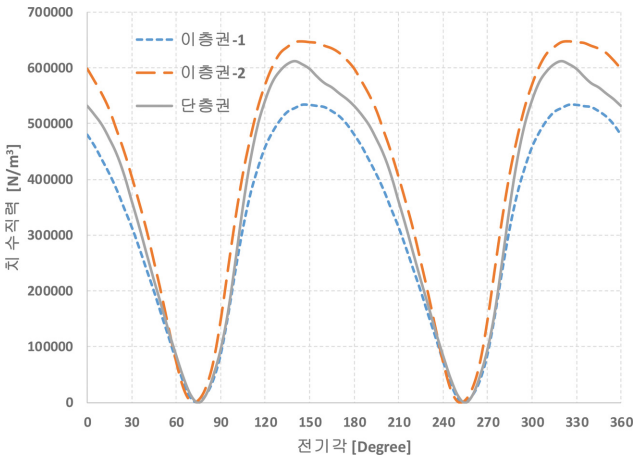


Fig. 4. (Color online) Normal force density waveform at rated load.

고조파를 많이 함유하고 있는 파형을 갖는다.

IV. 철손 해석 기법

PMSM 내의 자계(Magnetic field)는 정현파 전류 구동 시에도 회전자가 회전함에 따라 고정자 슬롯 리플, 자기회로의 포화 등에 의해 많은 고조파를 함유하고 있다. 따라서 이러한 고조파 영향을 해석하기 위해서는 기존의 교번자계(Alternating magnetic field) 인가 시 엡스타인(Epstein) 시험에 의해 구해진 철심 재료의 철손 대신 회전자계 인가 시의 자기 벡터 특성을 고찰할 필요가 있다. 이런 배경으로 최근 들어 유한요소법을 이용한 철손해석에 대한 연구가 상당히 많이 진행되고 있는데, 본 연구에서는 이중 Yamazaki가 제안한 방법을 적용하여 고조파를 고려한 철손을 해석 한다[6, 7]. 우선 전자계 수치해석 기법인 유한요소법을 이용하여 회전에 따른 전동기 각 부분의 순시 자속 밀도를 구한 후, 와전류손은 바로 이전 및 현재 회전자 위치에서 구해진 자속 밀도와 기존의 와전류손 계수를 이용하여 계산한다. 또한 마이너 루프(Minor loop) 포함한 히스테리시스손은 자속 밀도 한 주기분의 최대치 및 최소치를 찾아 저장한 후, 히스테리시스 계수를 이용하여 구한다. 본 연구에서 적용한 와전류손 및 히스테리시스손 계산식은 다음의 식(1), (2)와 같으며, Fig. 5는 철손 계산 과정을 보여준다.

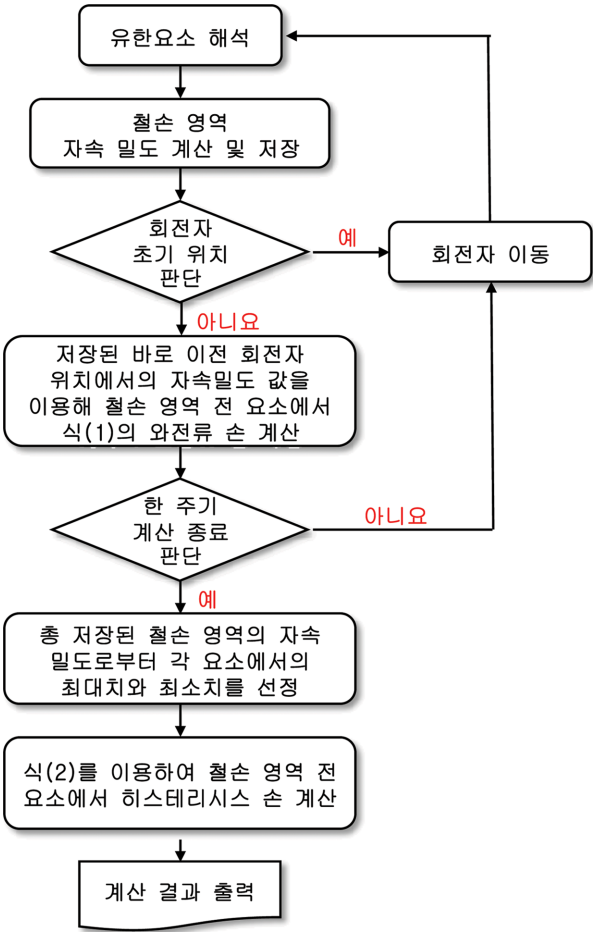


Fig. 5. (Color online) Flow chart for the iron loss calculation.

$$W_{eddy} = \frac{k_e D}{2\pi^2}\int_v \sum_{k=1}^{N}\left\{\left(\frac{B_r^{k+1}-B_r^k}{\Delta t}\right)^2 + \left(\frac{B_\theta^{k+1}-B_\theta^k}{\Delta t}\right)^2\right\}dv \quad (1)$$

$$W_{hyst} = \frac{k_h D}{T}\sum_{i=1}^{NT}\frac{\Delta V_i}{2}\left(\sum_{j=1}^{N_{pr}^i}(B_{mr}^{ij})^2 + \sum_{j=1}^{N_{p\theta}^i}(B_{m\theta}^{ij})^2\right) \quad (2)$$

여기서, k_e, k_h는 각각 와전류손과 히스테리시스손 계수이고, D는 철심의 밀도이다. N은 반복 횟수이며 NT는 철심에 포함되어진 총 요소 수를 나타낸다. ΔV_i는 i번째 요소에 대응하는 체적이며, B_r^{k+1}, B_r^k, B_θ^{k+1}, B_θ^k는 각각 자속밀도의 반경방향(r) 성분과 접선방향성분(θ)의 시간변화(회전)에 따른 이후, 이전 값을 나타낸다. 또한, B_{mr}^{ij}, $B_{m\theta}^{ij}$는 자속밀도 r과 θ 방향 성분에 해당하는 각 히스테리시스 루프의 진폭을 의미하며, N_{pr}^i, $N_{p\theta}^i$는 i번째 요소에서 자속밀도 r과 θ 방향 성분의 시간 변화에 대한 극대 · 극소치의 개수이다.

V. 철손 해석 결과 분석

Fig. 6은 정격 전류 인가 시 각 고정자 권선 방법에 의한 철손 해석 결과를 나타낸다. PMSM은 회전자가 동기속도로 회전하는 동기기이므로 회전자 철심에서의 자속변화가 작기 때문에 모든 권선 방법에서 철손은 거의 고정자에서 발생하고 있음을 알 수 있다. 또한, 고정자에서는 와전류손에 비해 히스테리시스손의 영향이 더 크고, 회전자의 경우는 비록 상당히 작은 양이지만 대부분의 철손은 와전류손에 의해 발생하고 있음을 볼 수 있다. Fig. 7은 중량당 철손 밀도를 보여준다. 이층권의 경우 고정자 치 및 치 끝단(Teeth shoe), 요크 부분에서의 철손 밀도 분포가 거의 동일하지만, 단층권의 경우는 코일이 감겨져 있는 치와 없는 치가 교대로 존재하고 있기 때문에 요크부분에서 철손 밀도의 분포가 변하게 된다. 또한, 치부분에서 이층권들에 비해 다소 철손 밀도가 낮음을 볼 수 있고, 그 결과 총 발생 철손은 단층권의 경우가 이층권-1과 2에 비해 약 4% 정도 작게 된다. Fig. 8은 고정자 치와 치 끝단에서의 자속밀도 변화를 나타낸다. 치의 중앙부에서는 각 권선 방법 모두 거의 교번자계 형태를 가지며, 치 끝단에서는 회전 자계 특성을 갖는다. 일반적으로 교번자계보다는 회전자계에 의한 철손이 크게 발생하게 되며, 그 결과 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 치 끝단의 철손 밀도가 크게 된다. 하지만, 치 끝단 부에서 큰 철손이 발생한다 하더라도 철심

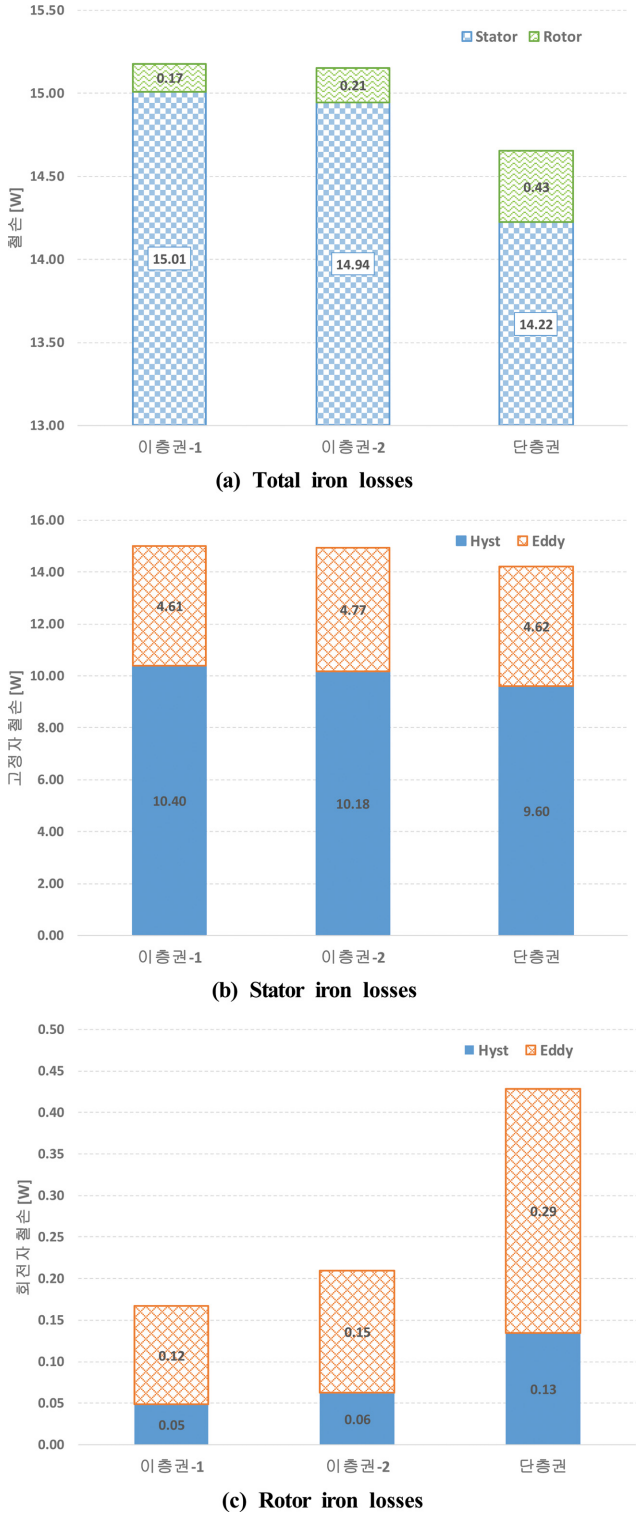


Fig. 6. (Color online) Iron losses at rated load.

의 중량은 대부분 치와 요크 부분에 있기 때문에 총 발생 철손 량에 대한 기여는 낮다고 볼 수 있다. Fig. 9는 고정자 요크와 회전자 요크 부분에서의 자속밀도 변화를 나타낸다. 고정자 요크에서는 치와 마찬가지로 각 권선 방법 모두 교번

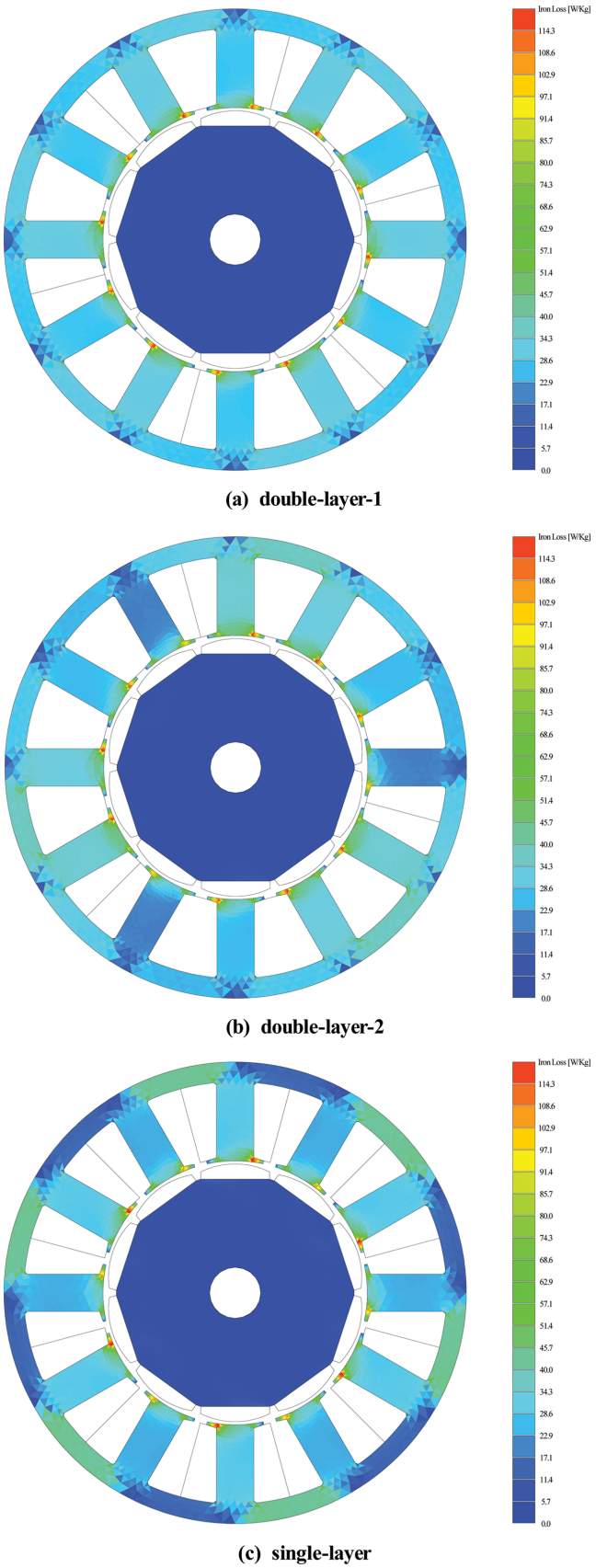
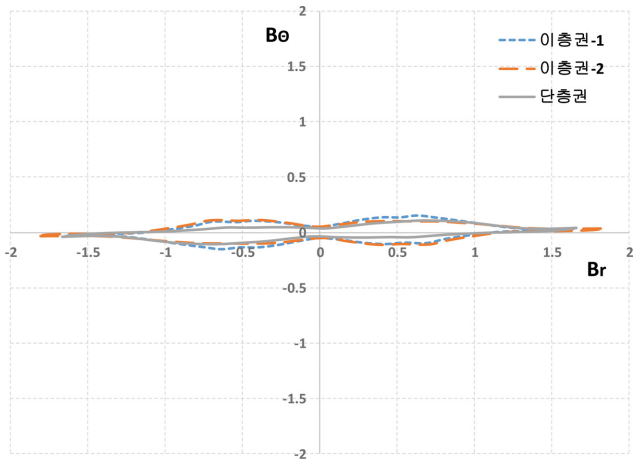
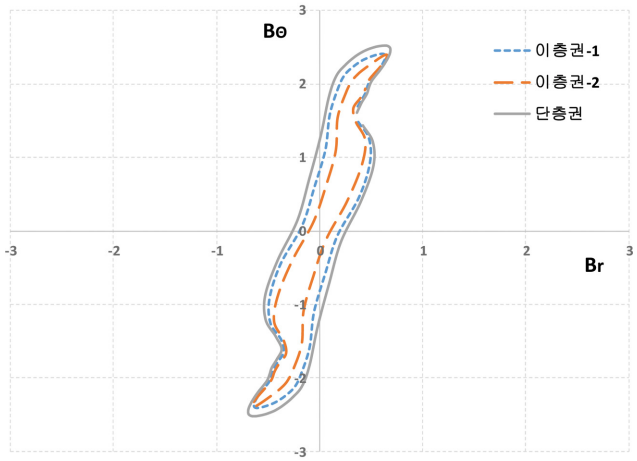


Fig. 7. (Color online) Iron losses density distribution at rated load.

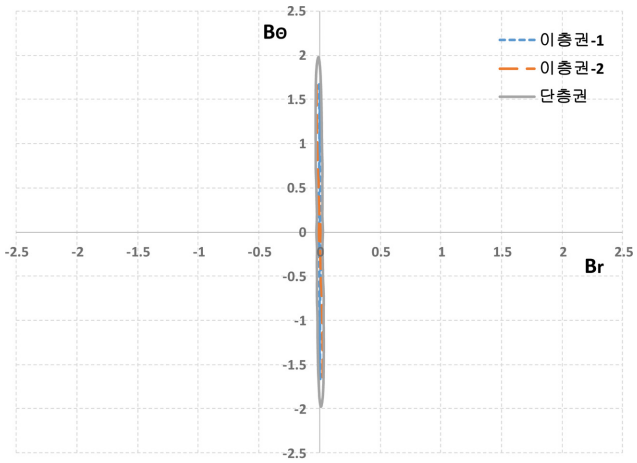


(a) stator teeth

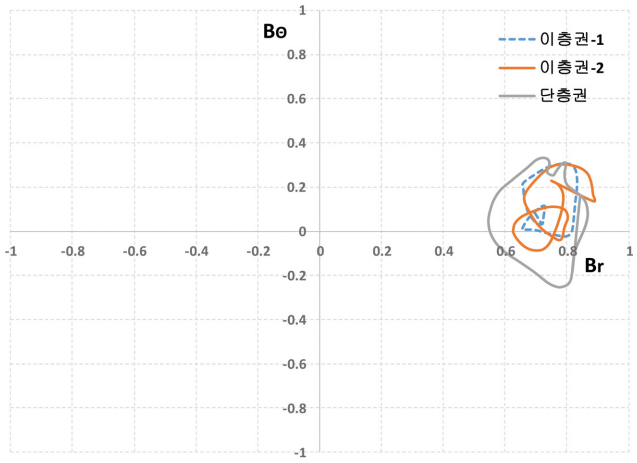


(b) stator teeth shoe

Fig. 8. (Color online) Flux density contour in the stator.



(a) stator yoke



(b) rotor yoke

Fig. 9. (Color online) Flux density contour in the yoke.

자계의 특징을 가지고 있고, 회전자 요크에서는 회전자가 동기속도로 회전하고 있으므로 자속의 극성 변화는 발생하지 않고, 그 크기만 조금씩 변하고 있음을 볼 수 있다. Fig. 10은 인가 전류 변화 시(부하 증가 시)의 발생 철손을 나타낸다. 그림의 X축은 정격 전류(75Arms) 대비 입력 전류의 크기[%]를 의미한다. 전류가 증가할수록, 즉 부하가 증가할수록 단층권이 이층권에 비해 철손이 크게 되는데, 이는 단층권의 경우 코일이 치에 집중되어 있기 때문에, 자기회로에서의 자속 포화 및 고조파 성분이 상대적으로 크게 되기 때문이다.

VI. 결 론

코깅 토크 저감 측면에서 장점을 갖는 분수 슬롯의 영구자석 동기 전동기는 다양한 방법으로 고정자 권선을 구성할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 여러 가지 고정자 권선 방법에 따른 영구자석 동기 전동기의 특성들을 분석 · 비교하였으며,

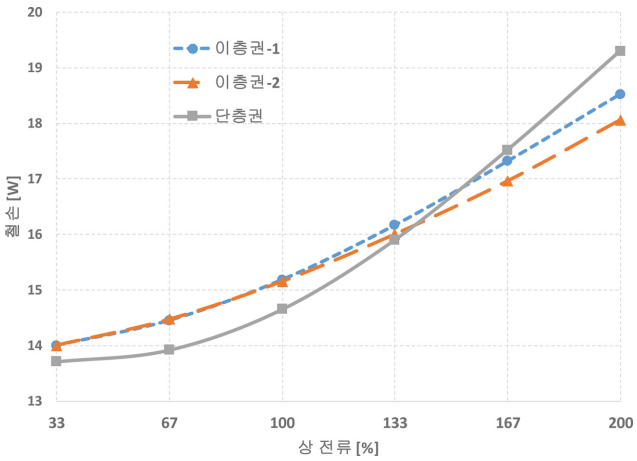


Fig. 10. (Color online) Total iron losses according to driving current.

시간 고조파를 고려한 철손 해석 기법을 사용해 히스테리시스손 및 와전류손의 철손 특성을 정밀 해석하였다. 그 결과

모든 권선 방법에서 철손은 거의 대부분 고정자에서 발생하고 있으며, 특히 고정자에서는 히스테리시스손이 회전자에서는 와전류손이 지배적임을 알 수 있었다. 또한 고정자 치와 요크에서는 자계변화가 교번자계를 갖는 반면, 고정자 치 끝단 부분에서는 회전자계의 특성을 갖고 있어서 철손 밀도가 가장 높았다. 부하에 따른 철손은 경부하 및 정격부하에서는 이층권에 비해 단층권의 경우가 철손이 작았으며, 인가 전류가 커지는 과부하에서는 자기회로의 포화 및 고조파 성분의 증가로 인해 단층권의 철손이 다소 급격히 증가함을 볼 수 있었다. 이러한 결과들은 향후 고효율 및 고 신뢰성을 갖는 영구자석 동기 전동기 설계 시 유용한 자료로 이용될 수 있으리라 판단된다.

References

[1] N. Bianchi and S. Bolognani, IEEE Trans. Ind. Appl. **38**, 1259 (2002).
[2] P. Salminen, M. Niemela, J. Pyrhonen, and J. Mantere, IEEE-IAS Annu. Meeting. **2**, 1032 (2004).
[3] D. Ishak, Z. Zhu, and D. Howe, IEEE PEMD **2**, 834 (2004).
[4] N. Bianchi and M. Dai Pre, IEE Proc. Electr. Power Appl. **153**, 459 (2006).
[5] N. Bianchi, S. Bolognani, M. Dai Pre, and G. Grezzani, IEEE Trans. Ind. Appl. **42**, 997 (2006).
[6] K. Yamazaki, IEEE Trans. Magn. **39**, 1460 (2003).
[7] K. Yamazaki and Y, Haruishi, IEEE Trans. Ind. Appl. **40**, 543 (2004).