

A Comparative Study on the Characteristics of IPMSM and Magnetic Geared Motor for Direct Drive of Railway Vehicles Satisfying the Identical Torque-Speed Performance Curve

동일한 토크-속도 성능곡선을 만족하는 철도차량 직접구동용 IPMSM과
마그네틱 기어드 모터의 특성 비교 연구

Seong-Hwi Kim · Ik-Hyun Jo · Jae-Hyeon Lim · Ju Lee · Chan-Bae Park

김성휘* · 조익현* · 임재현** · 이주* · 박찬배†

Abstract

This paper conducted a comparative study on the characteristics of an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor (IPMSM) and a Magnetic Gear Motor (MGM) with a 200 kW class direct drive motor (DDM). The IPMSM and MGM for DDM satisfying a given torque-speed performance curve were designed, and it was examined whether the same torque-speed performance curve could be satisfied based on the voltage limiting ellipse of MGM newly derived. In addition, the electromagnetic characteristics and performance of the two motors were analyzed, and a comparative study of the two motors was conducted in various aspects such as current density, power density, and efficiency.

Key Words

Direct drive motor, Magnetic geared motor, Interior permanent magnet synchronous motor

1. 서론

최근 세계적인 환경 문제에 대한 문제의식으로부터, 하이브리드 자동차, 전기자동차, 전기철도 등 교통산업의 전기화가 빠르게 진행되고 있다[1]. 이러한 교통산업의 견인용 전기기기는 그 자체 중량 대비 얼마나 더 큰 출력을 낼 수 있는지에 대한 지표로 고효율밀도화를 요구하게 된다[2]. 일반적인 견인전동기 구동시스템은 고속-저토크의 전동기 출력을 기계식 기어를 통해 저속-고토크의 출력을 부하에 전달한다. 기존의 이러한 시스템은 기계식 기어라는 부가적인 구동장치를 필요로 하며, 견인전동기 효율에 기계식 기어의 효율이 곱해져 전체 시스템의 효율이 감소하며, 기어의 마모, 오일 누수에 의한 문제, 잦은 유지보수 주기라는 단점들이 존재한다[3].

마그네틱 기어드 모터(Magnetic geared motor, MGM)는, Fig 1과 같이 마그네틱 기어와 영구자석형 동기전동기를 결합한 형태의 모터로, 기계식 기어를 필요로 하지 않는 저속 고토크 전동기로 고효율밀도화가 가능하다[4-5]. MGM은 고정자의 회

전자계로 고속회전자를 회전시키고, 마그네틱 기어의 원리에 의해 고속회전자의 낮은 토크가 고투크로 변환되어 저속회전자에 전달된다. Atallah는 이러한 구동방식을 갖는 마그네틱 기어드 모터를 Pseudo Direct Drive Machine (PDD)[6] 라고 명명하였으며, 수력 터빈, 풍력 터빈, HEV 등 다양한 어플리케이션에 대한 설계연구를 수행하였다[7-10].

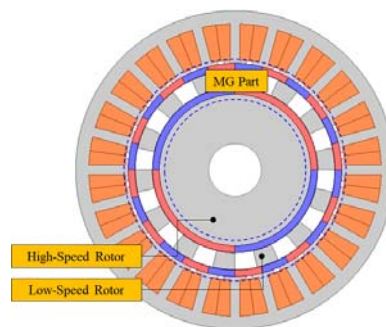


그림 1 마그네틱 기어드 모터의 구조
Fig. 1 Structure of magnetic geared motor

† Corresponding Author : Dept of Railroad Engineering, Korea National University of Transportation, Korea.
E-mail: cbpark@ut.ac.kr

https://orcid.org/0000-0002-2648-3456

* Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea.

https://orcid.org/0000-0003-1533-7450

https://orcid.org/0000-0003-0509-2023

https://orcid.org/0000-0003-0251-6492

** Dept of Railroad Engineering, Korea National University of Transportation, Korea.

https://orcid.org/0000-0003-1586-9238

Received: Sep. 01, 2022 Revised: Sep. 13, 2022 Accepted: Sep. 25, 2022

다른 연구자들에 의한 다양한 특성 연구 또한 다수 수행되었다. [11]에서는, MGM의 극 수 및 슬롯 조합에 따라 발생하는 Unbalanced magnetic force (UMF)에 대하여 연구하였으며, 기존 PMSM과 달리 MGM 구조에서 UMF가 발생하지 않는 극 수, 슬롯 수 조합 조건을 제시하였으며 [12]에서는 고정자 슬롯과 영구자석 극 수 조합에 따른 토크리플 발생 조건에 대한 연구를 수행하였다. [13-14]에서는 기존의 내전형 및 외전형 MGM과는 달리, 회전하지 않는 자속변조 철심을 전기자 슬롯으로 사용하여 기존의 내전형, 외전형 모델과 제안하는 모델의 특성을 비교하였다. 또한 [15]에서는 MGM의 변조자속을 포함한 전압방정식을 통해 부하조건에 따라 효율 및 역률에 미치는 영향을 분석하였다.

본 논문에서는 MGM이 견인용 모터로서 큰 출력밀도를 가질 수 있는 이유를 연구하였다. 일반적으로 견인용 모터는 높은 속도영역에서의 운전이 가능하여야 하므로, 약자속제어 또는 MTPV(Maximum torque per voltage) 제어가 가능하여야 한다. 이러한 약자속제어 또는 MTPV 제어가 가능하기 위해서는 전압제한타원의 중심이 d, q축 좌표의 원점에 가깝거나, 전류제한원의 크기가 클수록 유리하다. 하지만 전압제한타원의 중심이 원점에 가까울수록, PMSM의 회전자 사이즈는 줄고, 영구자석의 사용에 제한을 두게 된다. 따라서 이는 정토크 영역에서의 출력 토크를 감소시키며, 이를 보상하기 위해 전기장하를 증가시켜야 한다. 이러한 이유로 높은 에너지밀도를 보유한 영구자석 사용량의 감소와 전기장하의 증가는 필연적으로 출력밀도의 감소를 불러온다.

따라서 본 논문에서는 철도차량 직접구동 견인용 IPMSM[16-17] 설계사양을 바탕으로 동일한 토크-속도 성능곡선을 만족하는 MGM을 설계하여 두 모델 각각의 전압방정식으로부터 도출한 전압제한타원과 전류제한원을 도출하여 속도 특성을 분석하였으며, 이때 두 모델의 장하비와 토크, 토크리플, 손실, 역률, 효율 등 여러 특성들을 비교분석하였다.

2. MGM의 전압방정식

MGM과 IPMSM의 전압방정식은 3상 직각좌표계를 d-q축 회전좌표계로 변환하는 변환행렬을 이용하여 도출한다. 두 모델의 전압방정식에서는 쇄교자속에 대한 정의에서 차이점이 존재하는데, IPMSM의 경우 식 (1)과 같이 영구자석에 의한 쇄교자속 성분과 전기자 반작용 자속으로 이루어진 d축 쇄교자속과, 전기자 반작용 자속으로만 구성되는 q축 쇄교자속으로 구성된다. 하지만 MGM의 경우 Fig 2와 같이 공극 사이에 존재하는 자속변조철심에 의해, 변조자속이 존재하며, 이 변조자속은 부하각 δ에 의해 정의될 수 있다.

이 부하각은 정해진 마그네틱 기어의 풀아웃 토크(δ=90°) 이 내의 범위에서 동작하는 부하 상태에 따라 변화하는 값이며, 센서를 통해 위치정보를 받아 제어할 수 있다. 따라서 MGM의

쇄교자속은 식(2)와 같이 d, q축 성분과 변조자속 성분으로 분해할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_f + L_d i_d \\ L_q i_q \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_f + L_d i_d + \lambda_{ml} \cos \delta \\ L_q i_q + \lambda_{ml} \sin \delta \end{bmatrix} \tag{2}$$

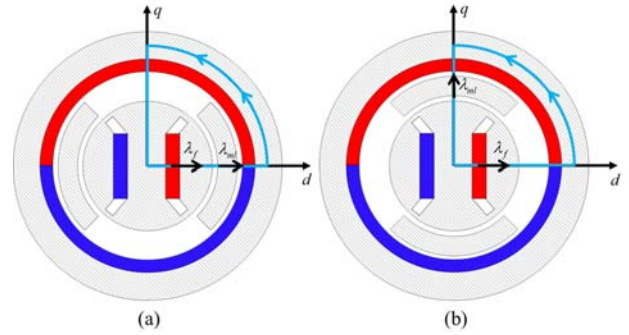


그림 2 MGM의 부하 조건에 따른 계자 자속과 변조자속 (a) 무부하(δ = 0°), (b) 최대 부하(δ = 90°)
Fig. 2 Field and modulated flux of MGM according to the load condition (a) no-load(δ = 0°), (b) Full-load(δ = 90°)

이렇게 도출한 MGM의 전압방정식은 식(3)과 같다. 이때, MGM의 부하 상태가 최대부하(δ=90°)를 가질 때, MGM의 전압방정식의 d축 전압은 IPMSM과 동일하게 나타나나, q축 전압에서는 변조자속 성분이 남게 되며, 무부하 상태에서는(δ=0°) q축 변조자속 성분이 사라져 IPMSM과 같이 q축 전압 성분이 없으나, d축 전압에서는 변조자속 성분이 남게 된다. Fig 3은 해당 전압방정식을 바탕으로 표현한 페이저도이다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} \lambda_{ml} \sin \delta + p(\lambda_f + \lambda_{ml} \cos \delta) \\ \lambda_f + \lambda_{ml} \cos \delta + p\lambda_{ml} \sin \delta \end{bmatrix} \tag{3}$$

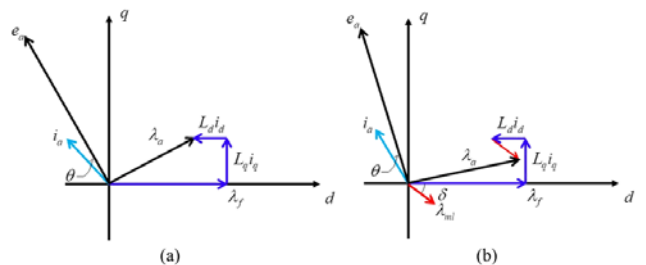


그림 3 페이저도를 이용한 전압방정식의 표현 (a) IPMSM, (b) MGM
Fig. 3 Express of voltage equation by phasor diagram (a) IPMSM, (b) MGM

기기의 한계속도는 이 전압방정식을 바탕으로 도출된다. d,q 회전 좌표계의 정상상태에서 역기전력은 속도기전력만을 고려하므로(p=0), 각각의 전압방정식으로부터 식 (4), (5)의 전압타

원방정식을 도출할 수 있다. 식(4)는 기존 IPMSM의 전압제한 타원을, 식 (5)는 MGM의 부하 상태가 고려된 전압제한타원을 의미한다. 상저항에 의한 전압강하 성분은 무시하였다.

$$(L_d i_d + \lambda_f)^2 + (L_q i_q)^2 = \left(\frac{V_{om}}{\omega}\right)^2 \quad (4)$$

$$(L_d i_d + \lambda_f + \lambda_{ml} \cos \delta)^2 + (\lambda_{ml} \sin \delta - L_q i_q)^2 = \left(\frac{V_{om}}{\omega}\right)^2 \quad (5)$$

이때 MGM의 경우 내측회전자가 IPM의 구조를 갖고 있음에도 불구하고, 폴 피스에 의해 d, q축 인덕턴스 차이가 매우 작아 Fig 4와 같이 전압제한타원이 원형의 형태를 갖는다. 따라서 두 모델의 전압제한원의 중심이 같더라도, IPMSM에 비해 약자속제어가 가능한 속도 범위가 짧다. 이를 보상하기 위해 MGM의 경우 IPMSM과 다른 장하비 설계를 통해 최대속도에서 전압제한원이 전류제한원 내에서 존재할 수 있도록 설계하여 이를 보상하여야 한다.

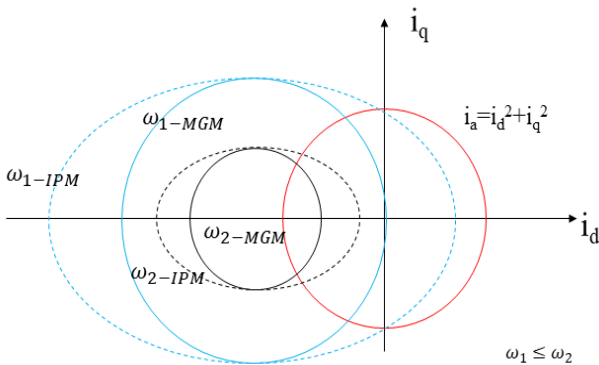


그림 4 IPMSM과 MGM의 전압제한타원
Fig. 4 Voltage limit ellipses of IPMSM and MGM

따라서 본 논문에서는 이렇듯 IPMSM에 비해 약자속제어 성능 확보가 어려운 MGM의 장하비 선정 과정을 통해, 철도차량 직접구동용 IPMSM과 동일한 토크-속도 성능곡선을 만족하는 모델을 설계하였으며, 기존의 IPMSM과 비교를 통해 전체적인 성능 비교 연구를 수행하였다.

3. 철도차량 직접구동용 IPMSM의 설계 파라미터

철도차량 직접구동용 MGM과의 비교를 위한 200kW급 IPMSM의 설계사양은 Table 1과 같다. 영구자석의 종류 및 상세한 설계사양은 공개되지 않아 비교에 있어 동등한 조건 하에서 목표 사양을 만족하도록 임의 설계하였다. Fig 5는 철도차량 직접구동용 IPMSM의 해석 모델과 자속밀도분포도이다.

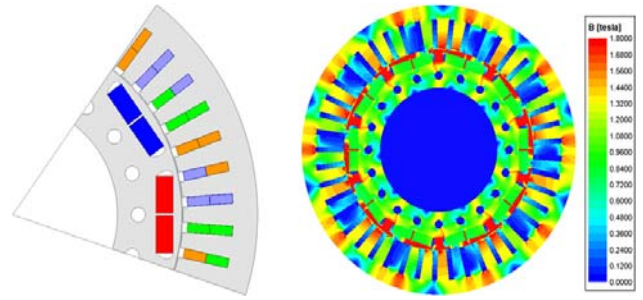


그림 5 철도차량 직접구동용 IPMSM의 해석 모델 및 자속밀도분포도
Fig. 5 Analysis model and magnetic flux density distribution of IPMSM for direct drive of railway vehicles

표 1 직접구동용 IPMSM의 주요 설계사양

Table 1 Specifications of IPMSM for direct drive motor[15-16]

구 분	값
정격출력	200kW
극/상/슬롯수	10극/3상/45슬롯
공극길이	1.7mm
전류밀도	4.5A _{rms} /mm ²
고정자 외경	624mm
회전자 내경	267mm
적층길이	410mm
적층강판	35PN230(S08)
영구자석	N38EH
정격속도	320RPM
최대속도	885RPM
정격토크	5968Nm

4. 철도차량 직접구동용 200kW급 MGM의 설계

동일한 토크-속도 성능을 만족하는 MGM의 설계를 위해 앞에서 언급한 직접구동용 IPMSM과 동일한 용량의 200kW급 MGM의 설계를 수행하였다. MGM의 경우 식 (6)에 의해 내측 회전자 영구자석의 극 수, 외측 영구자석의 극 수, 폴 피스로 이루어진 외측회전자 개수를 조합할 수 있다. 철도차량 직접구동용 MGM의 경우 [11-12]을 바탕으로 회전자의 편심을 예방할 수 있고, 토크리플을 최소화 할 수 있는 조합을 선정하였으며, Fig 6의 직접구동용 IPMSM와 동일한 토크-속도 성능을 만족하는 장하비를 선정하여 Fig 7의 프로세스를 통해 설계를 수행하였다. 철도차량 직접구동용 MGM의 도면은 Fig 8과 같으며 주요, 상세 설계 파라미터는 Table 2, 3과 같다.

$$p_o = p_m \pm N_{pp} \quad (6)$$

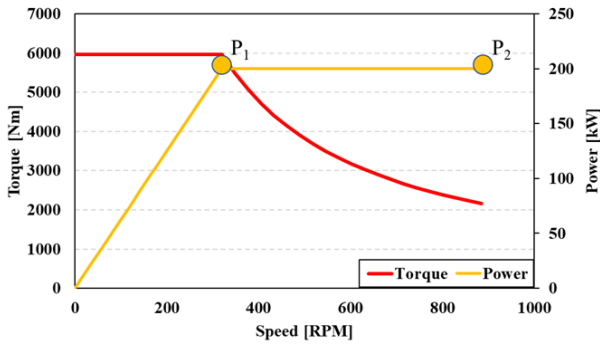


그림 6 200kW급 MGM의 토크-속도 성능곡선
Fig. 6 Torque-Speed Curve of the 200kW MGM

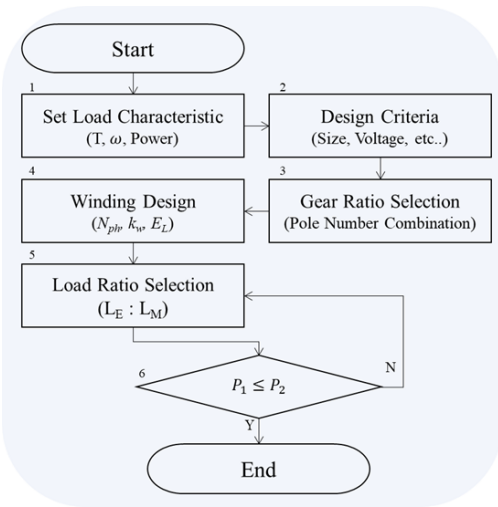


그림 7 200kW급 MGM의 설계 프로세스
Fig. 7 Design process of 200kW-MGM

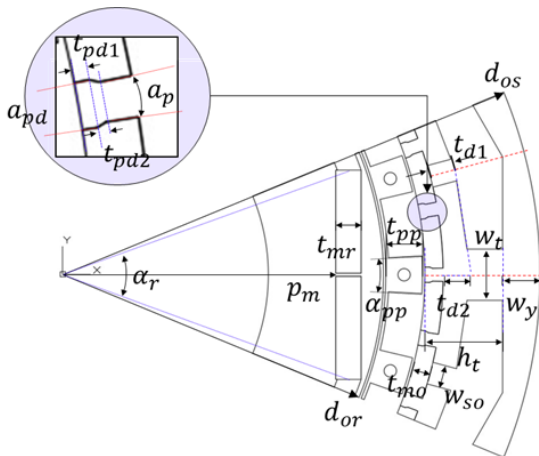


그림 8 200kW급 직접구동용 MGM의 형상설계
Fig. 8 Shape design of the 200kW MGM for direct drive

표 2 직접구동용 MGM의 주요 설계사항

Table 2 Specifications of 200kW MGM

구 분	값
정격출력	200kW
극/상/슬롯수	8극/3상/12슬롯

구 분	값
폴피스 개수	22개
외측 PM 극수	36극
기어비	5.5
공극길이	1.7mm
고정자 외경	620mm
회전자 내경	267mm
적층길이	380mm
전류밀도	3.4A _{rms} /mm ²
적층강판	35PN230(S08)
영구자석	N38EH
정격속도	320RPM / 1760RPM
최대속도	885RPM / 4867.5RPM
정격토크	5968Nm

표 3 200kW급 MGM의 형상 파라미터

Table 3 Shpae parameter of 200kW MGM

구 분	값	구 분	값
d _{os}	620	t _{pd1}	3.1
d _{or}	416.5	t _{pd2}	2
h _t	50.5	α _p	2
w _t	33.3	α _{pd}	2.4
w _y	24.3	t _{pp}	23.8
t _{d1}	15.5	α _{pp}	6
t _{d2}	16.6	t _{mr}	16.5
w _{so}	14.5	α _r	40
t _{mo}	12	p _m	177.3

*단위 : 길이 [mm], 각도 [degree]

Fig 7의 설계 프로세스를 통해 Table 2, 3와 같은 MGM의 설계 모델을 도출하였다. 해당 모델은 설계 프로세스의 토크-속도 성능곡선의 만족과 더불어 출력, 효율의 최대화를 목적으로 하여 상세설계된 모델이다. 동등한 비교를 위해 공극 길이와 영구자석의 재질, 적층 강판의 재질은 두 모델 모두 동일하다. Fig 9는 철도차량 직접구동용 MGM의 해석 모델과 자속밀도 분포도이다.

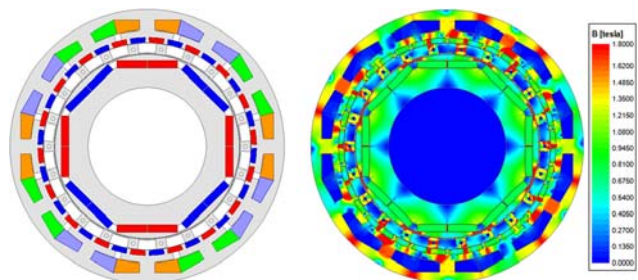


그림 9 철도차량 직접구동용 MGM의 해석모델 및 자속밀도분포도

Fig. 9 Analysis model and magnetic flux density distribution of MGM for direct drive of railway vehicles

5. 철도차량 직접구동용 IPMSM과 MGM의 비교 분석

5.1 토크 특성

Fig 10은 DDM용 IPMSM과 MGM의 순시토크 특성이다. 동일한 토크-속도 성능곡선을 만족하기 때문에, 정격속도에서 평균토크는 각각 7.09kNm로 동일한 값을 갖도록 설계하였으며, 토크리플은 IPMSM의 경우 9.26%, MGM의 경우 4.38%로 MGM의 토크리플이 더욱 우수하게 나타났다, 이는 MGM이 [11-12]에 따라 극 수 조합에 따라 토크리플을 최소화하는 극 수 조합을 선정하여 토크 리플 성분을 최적화 하였기 때문이다. 최대 속도에서의 경우 돌극비가 커 약자속제어 성능이 우수한 IPMSM의 평균토크가 2.71kNm로 MGM의 2.65kNm보다 크게 나타났다. 토크리플의 경우 정격에서와 마찬가지로 MGM의 경우 12.25%로 IPMSM의 12.84%보다 더 낮게 나타났다. MGM의 경우 적층길이가 380mm로 IPMSM의 410mm보다 7.3% 작게 설계되었지만, 비슷한 수준의 토크를 만족하는 것을 확인할 수 있다.

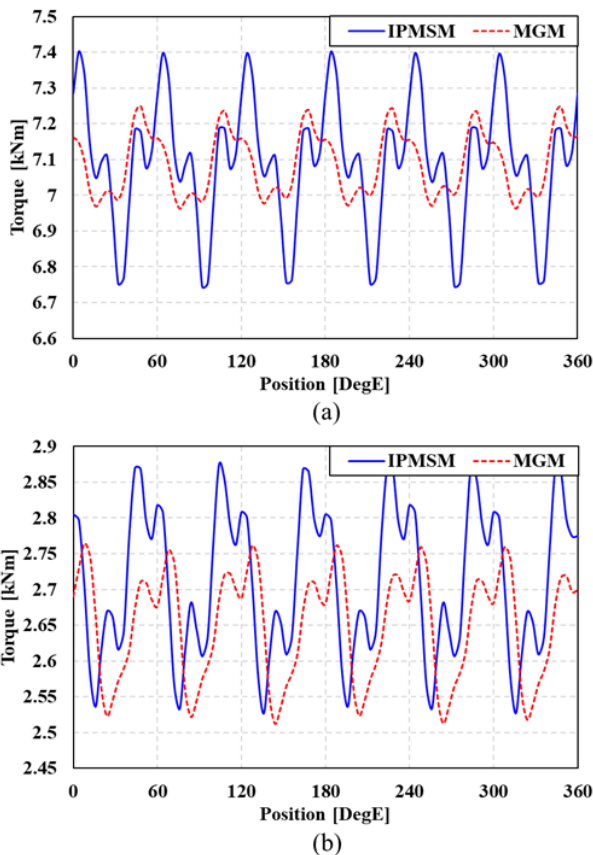


그림 10 DDM용 IPMSM과 MGM의 순시 토크 특성 (a) 320RPM, (b) 885RPM
Fig. 10 Instantaneous torque characteristics of IPMSM and MGM for DDM (a) 320RPM, (b) 885RPM

MGM의 경우 Fig 11과 같이 코깅토크가 (-)값을 갖는 것을 특징으로 한다. 이는 외측 고정자에 부착된 영구자석에 의한 제동토크에 의해 발생한다. 이렇듯 외측 영구자석의 경우 폴

피스에 의해 왜곡된 공간고조파 자속에 의해 제동 토크와 더불어 많은 와전류손이 발생한다. 이에 더불어 MGM의 경우 내측 회전자는 고속 회전, 외측회전자는 기어비에 감속하여 저속 회전하는 구조로, 내측회전자와 동기되는 주파수는 IPMSM에 비해 높은 주파수를 필요로하며 이는 와전류손의 추가적인 발생을 야기한다. 따라서 MGM의 경우 Fig 12와 같이 영구자석의 와전류손을 저감시키는 영구자석 분할 설계가 동반되어야 한다[18].

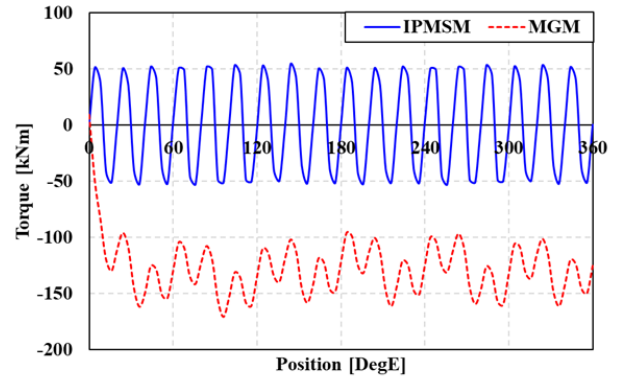


그림 11 IPMSM과 MGM의 코깅 토크 특성
Fig. 11 Cogging torque characteristics of IPMSM and MGM

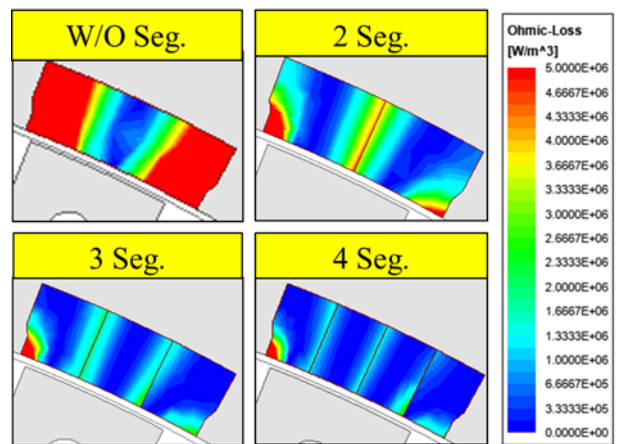


그림 12 외측 영구자석 분할에 의한 영구자석 와전류손 저감
Fig. 12 Reduction of eddy current loss of permanent magnet due to outer permanent magnet split design

5.2 전압제한타원

Table 4와 같이, MGM의 자기 인덕턴스는 내측 회전자가 IPM의 구조임에도 불구하고 d, q축 인덕턴스 차이가 매우 작게 나타났다. MGM의 d, q축 인덕턴스는 약 1.2의 돌극비를 가졌으며, 이중 공극 구조로 인해 자기인덕턴스 평균값은 2.9220mH로 비교적 낮게 나타났다. 반면 IPMSM의 경우 d, q축 인덕턴스는 약 2.29의 돌극비를 가졌으며, 자기인덕턴스 평균값은 12.1933mH로 나타났다. 해당 d, q축 인덕턴스와 쇄교자속량 정보를 바탕으로 아래의 전압제한타원 곡선을 도출할 수 있다.

표 4 IPMSM과 MGM의 자기인덕턴스

Table 4 Self-inductance of IPMSM and MGM

구 분	IPMSM	MGM
L_d	7.5330mH	2.6830mH
L_q	16.9327mH	3.1678mH

$$i_d = \frac{-\lambda_f \pm \sqrt{\left(\frac{V_{om}}{\omega}\right)^2 - (L_q i_q)^2}}{L_d} \quad (7)$$

$$i_d = \frac{-(\lambda_f + \lambda_{mi} \cos \delta) \pm \sqrt{\left(\frac{V_{om}}{\omega}\right)^2 - (\lambda_{mi} \sin \delta - L_q i_q)^2}}{L_d} \quad (8)$$

앞에서 이론적으로 다뤘던 IPMSM과 MGM의 전압제한방정식 (4), (5)을 식 (7), (8)과 같이 표현하면, I_d , I_q 평면에서 회전 속도에 따라 전압제한타원을 만족하는 영역을 도출할 수 있다. Fig 13은 식 (7), (8)을 바탕으로 도출한 IPMSM과 MGM의 전압제한타원이다.

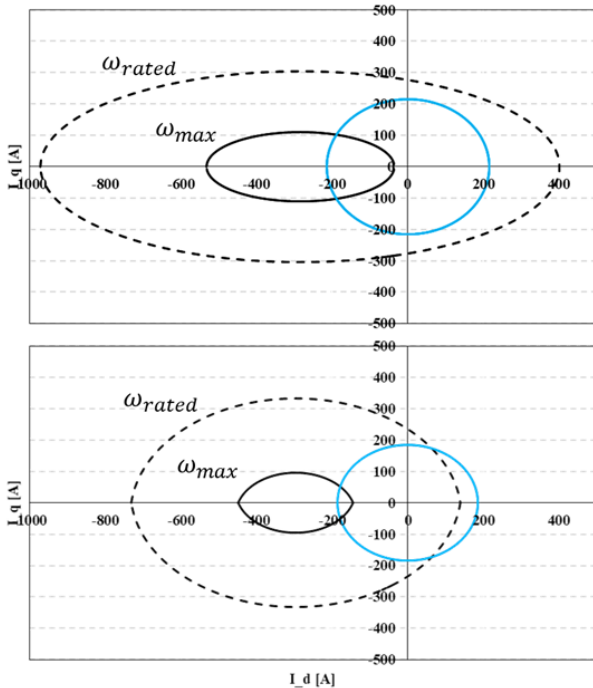


그림 13 직접구동용 IPMSM과 MGM의 전류·전압 제한타원 (a) IPMSM, (b) MGM

Fig. 13 Current and voltage limit ellipses of IPMSM and MGM for DDM (a) IPMSM, (b) MGM

Fig 13을 통해 인덕턴스 차이가 작은 MGM의 경우 전압제한 타원이 더욱 원형의 형태를 갖고 있음을 확인할 수 있다. 설계 결과 MGM과 IPMSM의 전압제한타원의 중심은 유사한 위치에 설계되었음에도, MGM의 전압제한원이 최대속도에서도 전류제한원 내에 존재하여 동일한 토크-속도 성능곡선을 만족하도록 설계되었다. 더욱이 MGM의 경우 IPMSM과 동일한 정격

토크를 가질 때 더 작은 전류밀도를 가지므로, IPMSM과 동일한 전류밀도로 운전할 때 전류제한원이 커져 더욱 높은 속도영역에서도 운전이 가능할 여지가 있다.

5.3 주요 특성 비교

Fig 14는 철도차량 직접구동용 IPMSM과 MGM의 전류밀도, 중량, 영구자석 사용량을 비교한 그래프이다. 두 전동기의 중량은 샤프트, 외함 등 기타 구조물을 제외한 전자계 재료들의 무게만을 고려하였다. MGM의 경우 폴피스 회전자에 의한 영구자석 기자력의 공간고조파 왜곡으로 인해 고정자 권선부를 권선계수가 높은 치 집중권을 사용하여도 역기전력 파형에 고조파가 크게 나타나지 않는다. 따라서 환선을 사용한 MGM의 경우(점적률 0.45)가 전류밀도 3.4Arms/mm²을 사용하며 평균 권선을 사용한 IPMSM(점적률 0.6)의 4.5Arms/mm²보다도 낮은 전류밀도를 가질 수 있다. 이는 곧 전동기의 열 특성에 있어서도 MGM의 경우가 비교적 안정적인 열 특성을 갖고 있음을 추측할 수 있다. 또 이러한 이점에 더해 치 집중권의 경우 엔드턴 길이가 짧아 권선의 총 사용량이 크지 않다.

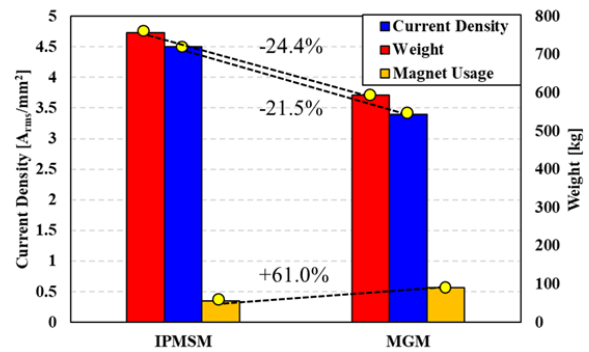


그림 14 직접구동용 IPMSM과 MGM의 전류밀도, 중량, 영구자석 사용량 비교
Fig. 14 Comparison of current density, weight, and permanent magnet usage of 200kW IPMSM and MGM for DDM

따라서 MGM의 전동기 중량 또한 594kg으로 IPMSM의 757kg에 비해 24.4% 가볍게 나타난다. 이는 곧 출력밀도의 증가를 의미하며, 이는 전기장하 대비 에너지밀도가 높은 영구자석의 높은 사용량에 기인한 것임을 알 수 있다. 이는 Fig 15의 무부하 역기전력 비교 결과를 통해서도 알 수 있다. IPMSM의 경우 무부하 역기전력 해석 결과 MGM에 비해 매우 작은 값을 보인다.

표 5 직접구동용 IPMSM과 MGM의 역률 및 효율비교

Table 5 Power factor and efficiency of IPMSM and MGM for DDM

구 분	IPMSM		MGM	
	정격속도	최대속도	정격속도	최대속도
역률	90.8%	99.6%	80.7%	99.5%
효율	96.4%	96.2%	96.9%	92.1%
출력밀도	0.313	0.338	0.400	0.413
	kW/kg	kW/kg	kW/kg	kW/kg

Table 5는 동일한 토크-속도 성능곡선을 만족하는 직접구동용 IPMSM과 MGM의 역률 및 효율 특성 결과이다. MGM의 경우 영구자석에서 발생하는 와전류손의 저감을 위해 Fig 11에서 제시한 영구자석 분할 설계 방법을 적용하였다. 그럼에도 불구하고 MGM의 경우 최대속도에서 92.1%로 IPMSM의 96.2%에 비해 비교적 낮은 효율을 갖는다. MGM의 대부분의 손실은 영구자석의 와전류손이 차지하고 있으며, 이러한 영구자석 와전류손의 저감이 가장 큰 기술장벽으로 보인다. 반면 출력밀도의 경우 MGM의 경우 IPMSM에 비해 약 30% 높게 나타났다.

6. 결론

본 논문은 동일 토크-속도 성능 곡선을 만족하는 철도차량 직접구동용 매입형 영구자석 동기전동기와 마그네틱 기어드 모터의 전자계 특성을 비교하였다. MGM의 전압방정식으로부터 MGM의 전압제한타원을 이론적으로 살펴보고 실제 해석을 통해 구한 인덕턴스를 바탕으로 주어진 설계 프로세스를 통해 설계된 MGM과 IPMSM의 전류, 전압제한타원 비교를 수행하였다. 이를 통해 두 모델이 모두 동일한 토크-속도 성능 곡선을 만족할 수 있음을 확인하였으며, 실제 정격 및 최대속도의 토크 특성 해석을 통해 두 모델을 비교하였다. 두 모델의 비교 결과, IPMSM과 동일한 토크-속도 성능곡선을 만족하는 MGM의 경우 IPMSM에 비해 큰 자기장하를 사용할 수 있으며, 이로 인해 고출력밀도화가 가능함을 확인하였다. 그러나 희토류 자석의 가격 상승으로 인해 많은 양의 영구자석을 사용하는 것은 비용적 문제를 가져올 수 있다. 또한 기존의 IPMSM에 비해 복잡한 구조와 어려운 제작공정이 MGM의 기술 장벽으로 보인다. 그럼에도 불구하고 IPMSM의 경우 높은 비자기장하를 사용하게 될 경우 전압제한타원에 의해 견인전동기로서 동작하기가 매우 어렵기 때문에, 견인전동기의 고출력밀도화를 위한 MGM의 채용은 상당히 매력적으로 보인다.

Acknowledgements

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2021R1F1A1064291).

References

- [1] Z. Yang, F. Shang, I. P. Brown and M. Krishnamurthy, "Comparative Study of Interior Permanent Magnet, Induction, and Switched Reluctance Motor Drives for EV and HEV Applications," in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 1, no. 3, pp. 245-254, Oct. 2015.
- [2] J. -H. Choi et al., "Design of High Power Permanent Magnet Motor With Segment Rectangular Copper Wire and Closed Slot Opening on Electric Vehicles," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 46, no. 6, pp. 2070-2073, June 2010.
- [3] N. Niguchi and K. Hirata, "Transmission Torque Analysis of a Novel Magnetic Planetary Gear Employing 3-D FEM," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 48, no. 2, pp. 1043-1046, Feb. 2012.
- [4] S. Gerber and R. -J. Wang, "Design and Evaluation of a Magnetically Geared PM Machine," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 51, no. 8, pp. 1-10, Aug. 2015.
- [5] Geochul Jeong, Dong-Hoon Jung, "Performance Analysis of Magnetic Gear Integrated Permanent Magnet Motor for Electrical Railway considering Gear Characteristics," The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, 70(3), 535-541, 2021.
- [6] K. Atallah, J. Rens, S. Mezani and D. Howe, "A Novel "Pseudo" Direct-Drive Brushless Permanent Magnet Machine," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 44, no. 11, pp. 4349-4352, Nov. 2008.
- [7] A. Penzkofer and K. Atallah, "Analytical Modeling and Optimization of Pseudo-Direct Drive Permanent Magnet Machines for Large Wind Turbines," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 51, no. 12, pp. 1-14, Dec. 2015.
- [8] P. Chmelicek, S. D. Calverley, R. S. Dragan and K. Atallah, "Dual Rotor Magnetically Geared Power Split Device for Hybrid Electric Vehicles," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 55, no. 2, pp. 1484-1494, March-April 2019.
- [9] R. S. Dragan, R. E. Clark, E. K. Hussain, K. Atallah and M. Odavic, "Magnetically Geared Pseudo Direct Drive for Safety Critical Applications," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 55, no. 2, pp. 1239-1249, March-April 2019.
- [10] R. -S. Dragan, R. Barrett, S. Calverley, J. Moreu and K. Atallah, "Pseudo-Direct-Drive Electrical Machine for a Floating Marine Turbine," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 58, no. 2, pp. 1-5, Feb. 2022.
- [11] X. Zhang, X. Liu and Z. Chen, "Investigation of Unbalanced Magnetic Force in Magnetic Geared Machine Using Analytical Methods," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 52, no. 7, pp. 1-4, July 2016.
- [12] L. Zhu, S. Z. Jiang, Z. Q. Zhu and C. C. Chan, "Analytical Methods for Minimizing Cogging Torque in Permanent-Magnet Machines," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 45, no. 4, pp. 2023-2031, April 2009.
- [13] L. Jian, W. Gong, G. Xu, J. Liang and W. Zhao, "Integrated Magnetic-Geared Machine With Sandwiched Armature Stator for Low-Speed Large-Torque Applications," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 48, no. 11, pp. 4184-4187, Nov. 2012.
- [14] Y. Shi, J. Wei and L. Jian, "Parallel-path power flows in magnetic-geared permanent magnet machines with sandwiched armature stator," in Chinese Journal of Electrical

Engineering, vol. 3, no. 1, pp. 16-26, 2017.

- [15] K. Ito, K. Nakamura, "A Consideration of Efficiency and Power Factor of IPM-type Magnetic-Geared Motor," in Journal of the Magnetics Society of Japan, vol. 46, no. 1, pp. 16-21, 2022.
- [16] J. Kim, D. Kim, Y. Park, and C. Kim, "Development of Direct Drive Permanent Magnet Synchronous Motor for Next Generation Railway Vehicles," 2009 Autumn Conference & Annual Meeting of the Korean Society for Railway, 2013-2017, 2009.
- [17] G. Kim et al., "Final research report for next-generation advanced urban rail system technology development project," Korea Railroad Research Institute, Uiwang-si, Republic of Korea, Oct. 2011.
- [18] W. -Y. Huang, A. Bettayeb, R. Kaczmarek and J. -C. Vannier, "Optimization of Magnet Segmentation for Reduction of Eddy-Current Losses in Permanent Magnet Synchronous Machine," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 25, no. 2, pp. 381-387, June 2010.

저자소개



김성희 (Seong-Hwi Kim)

He received B.S. and M.S. degree from Korea National University of Transportation, Gyeonggi-do, Korea, in 2020 and 2022. He is currently a Ph.D. Candidate of department of electrical engineering at Hanyang University, Seoul, Korea. His scope of study is the design and field analysis of various power energy conversion systems such as rotary/linear motor and magnetic gear.



조익현 (Ik-Hyun Jo)

He received B.S. and M.S. degrees from Korea National University of Transportations, Gyeonggi-do, Korea. He is Currently a Ph.D. candidate of electrical engineering at Hanyang University, Seoul, Korea in 2020. His research interests are design, analysis and control of the motor/generators: power conversion system,



임재현 (Jae-Hyeon Lim)

He received B.S. and M.S. degrees from Korea National University of Transportation, Gyeonggi-do, Korea, in 2020 and 2022. He is currently a Ph.D. Candidate of department of electrical engineering at Korea National University of Transportation, Uiwang, Korea. His research interests include design and analysis of propulsion motor for railways.



이 주 (Ju Lee)

He received the M.S. degree from Hanyang University, Seoul, South Korea, in 1988, and the Ph.D. degree in electrical engineering from Kyusyu University, Japan, in 1997. In 1997, he joined Hanyang University, where he is currently a Professor with the Department of Electrical and Bio-Engineering. His main research interests include electric machinery and its drives, electro-magnetic field analysis, transportation systems, such as hybrid electric vehicles and railway propulsion systems. He is a member of the IEEE Industry Applications Society, the Magnetics Society, and the Power Electronics Society.



박찬배 (Chan-Bae Park)

He received the M.S. degree in electrical engineering from Seoul National University, Seoul, Korea, in 2003 and the Ph.D. degree in electrical engineering from Hanyang University, Seoul, Korea, in 2013. From 2003 to 2006, he had worked as Senior Engineer in the Digital Appliance R&D Center at Samsung Electronics. From 2007 to 2015, he had worked as Senior Researcher at the Korea Railroad Research Institute. Since 2015, he has been an associate professor at the Korea National University of Transportation, Uiwang-si, Korea. His research interests include design and analysis of various electric machines for electric vehicles and railways.