철도차량용 매입형 영구자석 동기전동기의 영구자석 와전류 손실 분석 연구

Analysis of Eddy Current Loss on Permanent Magnets of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Railway Transit

박찬배* · 이형우 · 이병송

Chan-Bae Park · Hyung-Woo Lee · Byung-Song Lee

Abstract In order to apply Interior Permanent Magnet Synchronous Motor(IPMSM) to the propulsion system of the railway transit, 110kW class IPMSMs with high-power density are designed as a concentrated winding model and a distributed winding model in this study. The concentrated winding model designed in this study is 6 poles/9 slots and the distributed winding model is 6 poles/36 slots. In general, the eddy current losses in the permanent magnets of IPMSM are caused by the slot harmonics. The thermal demagnetization of the magnet by the eddy current losses at high rotational speed often becomes one of the major problems in the IPMSM with a concentrated windings especially. A design to reduce eddy current losses in permanent magnet design is important in IPMSM for the railway vehicle propulsion system which requires high-speed operation. Therefore, a method to devide the permanent magnet is proposed to reduce the eddy current losses in permanent magnet in this study. Authors analyze the variation characteristics of the eddy current losses generated in permanent magnet of the concentrated winding model by changing the number of the division of the permanent magnets.

Keywords : Permanent magnet synchronous motor, Permanent magnet, Concentrated winding, Eddy current loss, Magnet segmentation

초 록 본 연구에서는 철도차량용 추진시스템에 매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM)를 적용하기 위하여 110kW급 고풍력밀도 IPMSM을 집중권/분포권 모델로 각각 설계하였다. 집중권 모델은 6극 9슬롯 구조이고, 분포권 모델은 6극 36슬롯 구조이다. 일반적으로 IPMSM의 영구자석에서의 와전류 손실은 슬롯 고조파에 의해 발생된다. IPMSM의 고속 회전 시 와전류 손실에 의한 영구자석의 열적 감자현상은 특히 집중권 IPMSM에서 주요 문제가 된다. 영구자석에서의 와전류 손실을 줄이는 설계는 고속 운전을 필요로 하는 철도차량 추진시스템용 IPMSM 설계에 있어서 중요하다. 그러므로 본 논문에서는 영구자석에서의 와전류 손실을 줄이기 위하여 영구자석을 분할하는 방법을 제안한다. 저자는 영구자석의 분할 개수를 변화시면서 IPMSM 집중권 모델의 영구자석에서 발생하는 와전류 손실의 변화 특성을 분석한다.

주요어 : 동기전동기, 영구자석, 집중권, 와전류손실, 영구자석분할

1. 서 론

최근 매입형 영구자석 동기전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)는 많은 장점 때문에 산업 전반에서 널리 사용되고 있다. 특히 집중권선을 가진 IPMSM은 고정자의 각 치마다 전기자 코일을 각각 권선한 형태로써, 엔드 코일이 분포권선을 가지는 IPMSM보다 짧아지게 되어, 전동기 전체의 사이즈, 코일 사용량, 코일 손실을 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다[1-4]. 반면에 몇몇 논문에서는 집중권 IPMSM의 경우 넓은 고정자-슬롯 피치로 인하여 영구자석에서의 와전류 손실이 분포권 IPMSM에서보다 상

당히 크다는 점을 단점으로 지적하고 있다[1,2]. 즉, 분포권 IPMSM의 경우, 고정자 슬롯 피치가 짧기 때문에 고정자 슬롯 고조파 성분이 회전자 깊숙히 침투하지 못하고 표면에만 대부분 존재하게 되므로 영구자석의 와전류 손실이 작게 발생되지만, 집중권 IPMSM의 경우, 넓은 고정자 슬롯 피치 때문에 슬롯 고조파 성분이 회전자로 깊숙히 침투하게 되어 영구자석의 와전류 손실이 크게 발생하는 것이며, Fig. 1의 예제 모델을 통하여 집중권과 분포권 모델 사이의 고정자의 슬롯 고조파에 의한 자속 성분이 회전자에 침투되는 깊이를 차이를 보여준다[3,4]. 결론적으로, IPMSM의 영구자석에서의 와전류 손실은 고정자의 슬롯 고조파에 의해 발생되며, IPMSM의 고속 회전 영역에서의 영구자석 와전류 손실에 의한 영구자석의 열적 감자가 집중권 IPMSM에서 주요 문제로 종종 제기되며, 이러한 영구자석에서의 와전류 손실을 줄이는 설계는 고속 운전을 필요로 하는 철도차량 추진시스템

*Corresponding author

Tel.: +82-31-460-5427, E-mail : cbpark@krii.re.kr

©The Korean Society for Railway 2012

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2012.15.4.370>

Fig. 1 Differences in the penetration depth of harmonics to the rotor by slot harmonics of the stator based on the winding method

용 IPMSM 설계에 있어서 중요하다[5].

본 연구에서는 경량전철용 추진시스템에 IPMSM을 적용하기 위하여 110kW급 고효율밀도 IPMSM을 집중권/분포권 모델로 각각 설계하였으며, 각각의 모델에 대하여 기본적인 손실 특성을 살펴보았다. 또한 집중권 IPMSM의 영구자석에서의 와전류 손실을 줄이기 위하여 영구자석을 분할하는 방법을 검토하였다. IPMSM의 영구자석의 분할 개수를 변화시면서 집중권 IPMSM 모델의 영구자석에서 발생하는 와전류 손실의 변화 특성을 분석하였다.

2. IPMSM의 설계 및 기본 손실 특성 분석

2.1 IPMSM의 설계

본 연구에서 검토한 마그넷 포집장치의 경우, 지하철 영업운전 이외의 시간에 운영이 되는 시스템이기 때문에 영구자석에 의한 자속이 신호장치의 궤도회로에 미치는 영향에 대한 검토는 제외하였다. 본 연구에서는 다양한 철도차량 중 경량전철용 추진시스템에 적용하기 위한 IPMSM을 설계하기 위하여 경량전철 조건에 부합되는 요구 견인력 곡선을 먼저 도출하였다. Fig. 2는 한국철도기술연구원이 개발한 한국형 경량전철(K-AGT)로써, 본 연구에서 경량전철 요구 조건에 부합되는 견인력 곡선 도출을 위한 모델로 사용되었다[6,7]. Fig. 3은 철도차량용 110kW급 IPMSM의 요구 견인력 곡선

Fig. 2 K-AGT (Light Railway Transit)

을 보여준다. Fig. 3에서 보는 바와 같이, 기동토크는 433Nm, 정토크 출력은 110kW, 최고속도 토크는 75Nm, 최고속도 출력은 47kW 이상을 만족하면 된다. Table 1은 110kW급 IPMSM의 설계 제한 사항을 보여준다. 무엇보다도 추진제어 장치의 DC Link 전압이 750V이므로, 공간벡터 펄스변조법(Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM) 방식을 선택할 경우 최대 공급 상전압은 $433V_{peak}$ 가 되므로 전부하 역기전력 제한치도 $433V_{peak}$ 이하가 되어야 한다. Table 2는 110kW급 IPMSM의 설계 결과를 보여준다. 분포권 IPMSM 모델은 6극 36슬롯 구조로 설계되었으며, 집중권 IPMSM 모델은 6극 9슬롯 구조로 설계되었다. Fig. 4는 설계가 완료

Fig. 3 Required traction curve of 110kW-class IPMSM for Light railway transit

Table 1 Design criteria of 110kW-class IPMSM

항목	값
정격속도/최고속도	2400/6000rpm
정격출력/최고속도 출력	110/47kW
정격토크/최고속도 토크	433/75Nm
DC Link 전압	750V
최대 공급 상전압	$433V_{peak}$
전부하 역기전력 제한	$433V_{peak}$

Table 2 Design results of 110kW-class IPMSM

항목	분포권 모델	집중권 모델
상수/극수/슬롯수	3/6/36	3/6/9
고정자/회전자 외경	316mm / 180mm	
적층길이	280mm	
영구자석	Nd-Fe-B, 59.1×10mm, 1.2T	
영구자석 도전율	$7.1 \times 10^5 \text{ S/m}$	
코어용 강판	S08	

된 IPMSM 모델을 보여준다. Fig. 4의 좌측은 분포권 IPMSM 모델이며, 우측은 집중권 IPMSM 모델이다.

2.2 설계된 IPMSM의 기본 손실 특성 분석

본 연구에서는 유한요소법(FEM)을 이용하여 설계된 분포권/집중권 IPMSM 모델의 기본적인 특성 분석을 수행하였

다. 2D FEM을 적용하였으며, 1/3 모델에 대하여 전류원 해석을 수행하였다. Fig. 5는 FEM을 이용하여 분석된 집중권/분포권 IPMSM 모델의 기본 특성을 보여준다. Fig. 5의 (a), (b)는 6000rpm에서의 무부하/전부하 역기전력 분포를 보여주며, 설계 제한치를 만족함을 알 수 있다. Fig. 5의 (c), (d)는 정격속도와 최고속도에서의 토크 특성을 보여주며, 해석 조건은 분포권/집중권 모델의 상전류 실효치 264A에 위상각이 80°, 75°이며, 고정자 권선의 병렬회로수는 3이다. 두 모델 모두 설계 제한치를 만족함을 알 수 있다. Fig. 6은 분포권/집중권 IPMSM 모델의 기본 손실 특성을 보여준다. Fig. 6의 (a), (b)는 6000rpm에서의 분포권/집중권 IPMSM 모델의 코어 손실 분포와 영구자석에서의 와전류 손실 분포를 보여준다. Fig. 6에서 알 수 있듯이, 코어 손실의 경우 집중권 모델이 분포권 모델에 비하여 작다. 하지만 영구자석에서의 와전류 손실은 집중권 모델이 분포권 모델에 비하여 상당히 큼을 알 수 있다. 따라서 집중권 IPMSM의 영구자석에서의 와전류 손실을 줄이는 연구를 다음 장에서 진행하고자 한다.

Fig. 4 Designed models of IPMSM **Fig. 5** Basic characteristics of IPMSMs with concentrated winding and distributed winding by FEM analysis

Fig. 6 Loss characteristics of IPMSMs at the high speed rotation region by FEM analysis

Table 3 Characteristic analysis results of the designed IPMSMs

항목	분포권 모델(6P36S)		집중권 모델(6P9S)	
	2400rpm	6000rpm	2400rpm	6000rpm
부하시 역기전력 (V_{peak})	232	407	257	357
부하시 역기전력 ($V_{fund.}$)	201	248	220	287
평균 토크 (Nm)	462	175	461	172
코어 손실 (kW)	0.824	3.555	0.718	0.937
영구자석 와전류 손실 (kW)	0.043	0.026	6.89	16.05

마지막으로 설계된 분포권/집중권 IPMSM 모델의 기본 특성 분석 결과를 Table 3에 정리하였다.

3. 집중권 IPMSM의 영구자석 와전류 손실 저감 방안 연구

3.1 집중권 IPMSM의 영구자석 분할 개념

집중권 IPMSM의 경우 넓은 고정자-슬롯 피치로 인하여 영구자석에서의 와전류 손실이 분포권 IPMSM에서보다 상당히 큼을 앞장에서 확인하였다. IPMSM의 회전자 내부에 매입된 영구자석에서 발생하는 큰 와전류 손실은 IPMSM의 고속 회전 시 영구자석의 열적 감자의 원인이 되기 때문에 본 연구에서는 집중권 IPMSM의 영구자석에서의 와전류 손실을 줄이기 위하여 영구자석 분할법을 적용하였다[8]. Fig. 7은 FEM을 이용한 손실 해석을 위한 집중권 IPMSM의 영

Fig. 7 Segmented permanent magnet models of IPMSM with the concentrated winding

구자석 분할 모델을 보여준다. Fig. 7에서 보는 바와 같이, 각 영구자석 분할 모델은 영구자석의 극 피치를 동일하게 유지하면서 4분할까지 수행하였다

3.2 집중권 IPMSM의 영구자석 분할에 따른 와전류 손실 저감 특성 분석

Fig. 8은 집중권 IPMSM의 영구자석 분할에 따른 각 모델에서의 손실 특성을 보여준다. Fig. 8(a), (b)는 각각 2400rpm과 6000rpm에서의 코어 손실 특성을 보여주며, Fig. 8(c), (d)는 영구자석에서의 와전류 손실 특성을 보여준다. Fig. 8에서 알 수 있듯이, 영구자석의 분할에 따른 각 모델 간의 코어 손실 변화는 거의 없으나, 영구자석에서의 와전류 손실 변화가 큼을 알 수 있다. 2400rpm에서는 기본 모델과 대비하여 4분할 모델의 경우 영구자석에서의 와전류 손실이 약 91% 정도 감소하였으며, 6000rpm에서는 약 82%정도 감소하였다. Fig. 9는 영구자석 분할에 따른 각 모델에서의 영구자석 와전류 손실의 주파수 분석을 수행한 결과이다. 해석 조건은 IPMSM설계 결과에 의거하여 고정자 인가전류를 정격전류인 400A를 인가하였다. 또한 최대토크/전류 제어(MPTA)를 만족하는 최적 전류 위상각(β 각)은 2400rpm에서 18° , 4000rpm에서 75° 를 반영하였다. Fig. 8에서 보는 바와 같이, 여러 차수의 Harmonics 중에 $3 \cdot i$ 차($i=1, 2, 3, \dots$) 고조파 성분은 고정자 슬롯에 의해 발생된 것이다. 즉 영구자석의 분할 수에 따라 고정자 슬롯에 의한 고조파 성분의 영향이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. Fig. 10은 집중권 IPMSM의 영구자석 분할 및 회전속도 변화에 따른 각 모델의 기본 특성 변화 추이를 보여준다. Fig. 10에서 보는 바와 같이, 영구자석을 분할할수록 손실이 감소하면서 발생 토크도 변하게 되기 때문에, 집중권 IPMSM의 설계 시 손실

Fig. 8 Loss characteristics of each model by permanent magnet segmentation of IPMSM with the concentrated winding

Fig. 9 FFT analysis results of eddy current losses on the permanent magnets by magnet segmentation

Fig. 10 Variations of main characteristics of each model by magnet segmentation of IPMSM with the concentrated winding

저감과 발생 토크 증가 효과를 동시에 고려하여 적절한 영구자석 분할의 선택이 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 철도차량용 추진시스템에 IPMSM을 적용하기 위하여 110kW급 고회전밀도 IPMSM을 집중권/분포권 모델로 각각 설계하였으며, 각각의 모델에 대하여 기본적인 손실 특성을 살펴본 결과, 집중권 IPMSM의 영구자석에서의 와전류 손실이 분포권 IPMSM에서 보다 상당히 컸다. 따라서 본 연구에서는 집중권 IPMSM의 영구자석에서의 와전류 손실을 줄이기 위하여 영구자석을 분할하는 방법을 검토하였다. IPMSM의 영구자석의 분할 개수를 변화시면서 집중권 IPMSM 모델의 영구자석에서 발생하는 와전류 손실의 변화 특성을 분석한 결과, 집중권 IPMSM이 2400rpm에서는 기본 모델과 대비하여 4분할 모델의 경우 영구자석에서의 와전류 손실이 약 91% 정도 감소하였으며, 6000rpm에서는 약 82% 정도 감소하였다. 결론적으로 IPMSM의 영구자석을 분할할수록 손실이 감소하면서 발생 토크도 변하게 되기 때문에, 집중권 IPMSM의 설계 시 손실 저감과 발생 토크 증가 효과를 동시에 고려하여 적절한 영구자석 분할의 선택이 필요하다.

참고문헌

- [1] K. Yamazaki, Y. Kanou, Y. Fukushima, S. Ohki, A. Nezu, T. Ikemi, R. Mizokami (2010) Reduction of Magnet Eddy-Current Loss in Interior Permanent-Magnet Motors with Concentrated Windings, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 46(6), pp. 2434-2441.
- [2] K. Yamazaki, H. Ishigami (2010) Rotor-Shape Optimization of Interior Permanent-Magnet Motors to Reduce Harmonic Iron Losses, *IEEE Trans. Ind. Elec.*, 57(1), pp.61-69.
- [3] K. Yamazaki, A. Abe (2009) Loss Investigation of Interior Permanent-Magnet Motors Considering Carrier Harmonics and Magnet Eddy Current, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 45(2), pp.659-665.
- [4] K. Yamazaki, Y. Fukushima, M. Sato (2009) Loss Analysis of Permanent-Magnet Motors with Concentrated Windings--Variation of Magnet Eddy-Current Loss due to Stator and Rotor Shapes, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 45(4), pp. 1334-1342.
- [5] S.J. Kim, H.W. Lee, K.S. Kim, J.N. Bae, J.B. Im, C.J. Kim, J. Lee (2009) Torque Ripple Improvement for Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Considering Parameters with Magnetic Saturation, *IEEE Trans. Magn.*, 45(10), pp. 4720-4723.
- [6] S.M. Hong (2011) Research of the core technologies for high power density traction system, Korea Railroad Research Institute.
- [7] H.W. Lee, C.B. Park, B.S. Lee (2012) Core-loss Reduction on Permanent Magnet for IPMSM with Concentrated Winding, *Journal of the Korean Society for Railway*, 15(2), pp. 135-140.
- [8] K.C. Kim, K.S. Kim, H.J. Kim, J. Lee (2009) Demagnetization Analysis of Permanent Magnets According to Rotor Types of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, *IEEE Trans. Magn.*, 45(6), pp. 2799-2802.

접수일(2012년 3월 8일), 수정일(2012년 6월 20일),
게재확정일(2012년 7월 9일)

Chan-Bae Park : cbpark@krri.re.kr

Advanced Traction and Noncontact Feeding System Research Team,
Korea Railroad Research Institute, #176, Cheoldo Bangmulgwan-ro,
Uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-757, Korea

Hyung-Woo Lee : krhwlee@krri.re.kr

Advanced Traction and Noncontact Feeding System Research Team,
Korea Railroad Research Institute, #176, Cheoldo Bangmulgwan-ro,
Uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-757, Korea

Byung-Song Lee : bslee@krri.re.kr

Advanced Traction and Noncontact Feeding System Research Team,
Korea Railroad Research Institute, #176, Cheoldo Bangmulgwan-ro,
Uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-757, Korea