

Study on the Reduction of Eddy Current Loss of Permanent Magnet Synchronous Motor considering PWM

Ye-Seo Lee

Department of Next Generation Energy System Convergence, Gachon University, Seongnam 13120, South Korea

Kwang-soo Kim*

Department of Electrical and Electronic Education, Gyeongsuk National University, Andong 36729, South Korea

(Received 21 October 2025, Received in final form 4 December 2025, Accepted 5 December 2025)

Synchronous motors with PWM control are the main ones. When a motor is driven through PWM control, the current waveform considering PWM control shows a different waveform from the sinusoidal current waveform used for general Finite Element Method (FEM) analysis. It is a waveform with harmonics in a sinusoidal current waveform, and this harmonic component has a great effect on eddy current loss generated in permanent magnets, and this eddy current loss causes demagnetization in permanent magnets and affects motor performance. In this paper, the magnet division method is selected as a method to reduce eddy current loss per unit volume, and the reduction of eddy current loss per unit volume according to the decrease in length of the magnet is confirmed. In addition, the effect of harmonics on the eddy current loss of the permanent magnet is confirmed by comparing the current waveform considering PWM with the sinusoidal current waveform. The validity of the above points is verified through FEM.

Keywords : Synchronous motors, Eddy current loss, Pulsewidth modulation, Finite element analysis

PWM을 고려한 영구자석 동기전동기의 와전류 손실 저감에 관한 연구

이예서

가천대학교차세대스마트에너지시스템융합학과, 경기도 성남대로 1342, 13120

김광수*

국립경국대학교 전기전자교육과, 경북 경동로 1375, 36729

(2025년 10월 21일 받음, 2025년 12월 4일 최종수정본 받음, 2025년 12월 5일 게재확정)

PWM 제어로 모터를 구동할 경우 스위칭에 의해 전류 고조파가 발생한다. 이에 따라 PWM 제어 시 모터에 인가되는 전류 파형은 일반적인 유한요소 해석(FEM)에서 가정하는 이상적인 정현파와 달리 고조파 성분을 포함한다. 해당 고조파는 영구자석의 와전류 손실에 크게 영향을 미치며, 와전류 손실 증가는 영구자석의 감자를 유발하여 모터의 성능 저하로 이어진다. 본 논문에서는 단위 체적당 와전류 손실 저감을 위해 자석 분할법을 적용하고, 자석 길이 감소에 따른 단위 체적당 와전류 손실 변화량을 확인한다. 또한, PWM을 고려한 전류 파형과 정현적인 전류 파형을 비교하여, 고조파가 영구자석 와전류 손실에 미치는 영향을 확인한다.

주제어 : 동기전동기, 와전류손, PWM, 유한요소해석

I. 서 론

최근 온실가스 배출 저감과 재생 불가능 에너지 절약을 위해 효율에 대한 규제가 강화되고 있다. 이에 따라 높은 출력 밀도와 높은 효율을 가지는 영구자석 동기전동기에 대한 연구가 진행되고 있다[1].

영구자석 동기전동기는 높은 출력밀도와 낮은 손실을 특징으로 산업용 어플리케이션에 주로 사용되는 전동기로, 표면부착형 영구자석 전동기(SPMSM)과 매입형 영구자석 전동기(IPMSM)로 구분된다. SPMSM은 자석이 회전자 코어 표면에 배치되며 구조가 단순하여 제작이 용이하다는 장점이 있는 반면[2], 자석이 회전자 코어 내부에 위치하는 IPMSM은 자속 집중 효과로 자속 밀도가 높아 고효율 어플리케이션에 적합하다[3]. IPMSM은 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크를 모두 활용할 수 있고 약자속 제어가 가능하여 더 넓은 속도 범위에서 구동할 수 있다[4]. 이에 따라 IPMSM의 성능 향상을 위한 최적화 및 노치 설계 연구[5], 저가형 페라이트 자석 적용 연구[6]가 진행되었다.

그러나 최근 제어 방식으로 널리 사용되는 PWM 인버터 제어 시, 스위칭으로 인해 발생한 고조파 자속이 회전자 자석 내부에 시변 자속을 유도한다. 이러한 시변 자속은 영구자석 내부에 전류를 발생시키고, 이는 와전류 손실로 이어진다. 이러한 와전류 손실은 자석 내부에 열을 생성하는데, IPMSM의 경우 회전자가 고정자 코어 내부에 위치하므로 방열 경로가 제한적이며 열 방출에 불리하다. 방출되지 못한 열은 영구자석의 열적 감지를 유발하여 모터의 성능 저하로 이어진다. 또한, 자석의 와전류손실은 공극 자속 밀도를 감소시

켜 성능 저하에 추가적인 영향을 미친다. 따라서 IPMSM의 와전류 손실 저감에 대한 연구가 필요하다[7].

본 논문에서는 높은 출력밀도와 높은 효율을 가지는 V-Shape 영구자석 동기전동기에 대하여, 회전자 영구자석 와전류 손실 저감을 위한 자석 분할법을 적용하고, 고조파에 의한 성능을 분석하기 위한 PWM 제어 연동 해석 방법을 제안한다. 제안한 자석 분할법과 PWM 제어 연동 해석의 타당성은 유한요소해석(FEA)을 통해 검증된다.

II. PWM 제어 연동 해석 방법

영구자석 동기전동기는 제어 시 주로 PWM 제어를 적용한다. PWM 제어는 다양한 산업 응용에서 사용되는 기법으로 [8], 출력 전압의 주파수와 크기를 변조한다. 게이팅 펄스를 생성하여 각 상의 스위치를 온, 오프 하며, 디지털 출력을 통해 아날로그 회로를 구동하므로 모터 제어에 효과적이다.

PWM 제어에는 스위칭을 위한 스위칭 주파수가 존재하며, 이에 기인한 전류 고조파는 모터의 소음을 유발하고 추가적인 고조파 성분을 생성한다[9]. 또한 PWM 제어는 불필요한 고조파 및 스위칭 손실을 최소화하기 위한 스위칭 패턴을 결정하는데, 이 과정에서 스위칭 패턴으로 인해 전류 파형에 고조파 성분이 포함된다. 해당 고조파 성분은 전동기 내 고조파 성분을 증가시키고, 이는 모터의 소음뿐 아니라 성능 및 손실에도 영향을 미친다[10]. 따라서 전동기 설계 시 고조파 영향에 대한 정밀한 분석이 필요하다.

종래의 유한요소해석(FEA) 기반 모터 해석은 이상적인 전류 파형(정현파)을 인가하는 방식으로 수행되어 왔다. 그러나

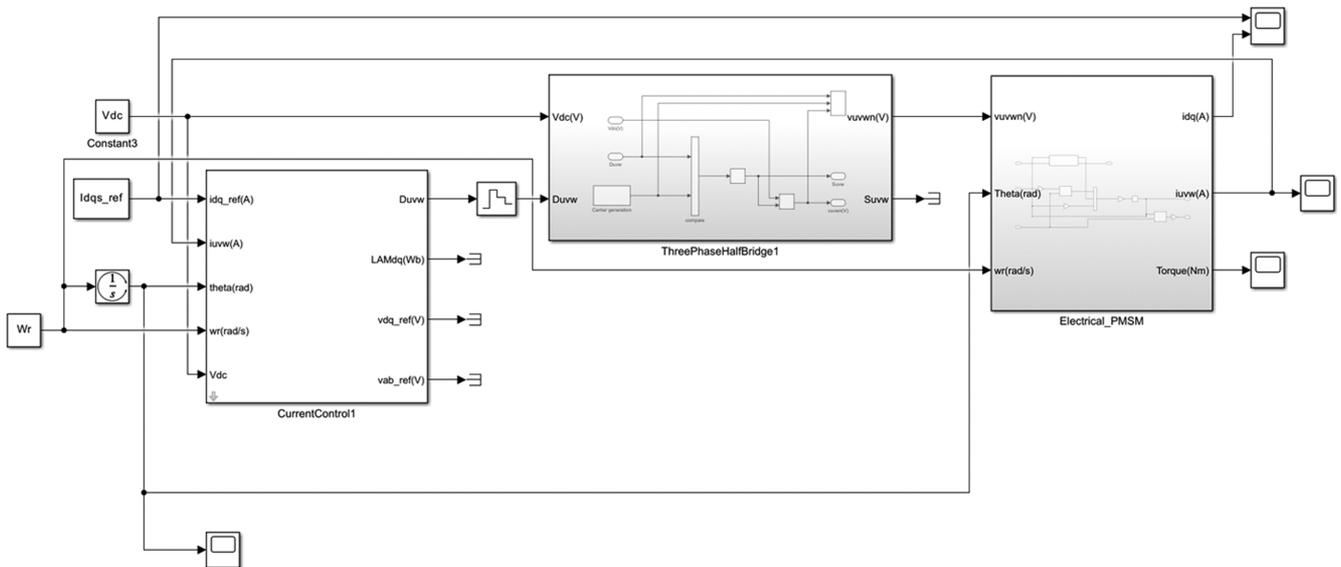


Fig. 1. PWM control circuit diagram for PWM control-integrated analysis.

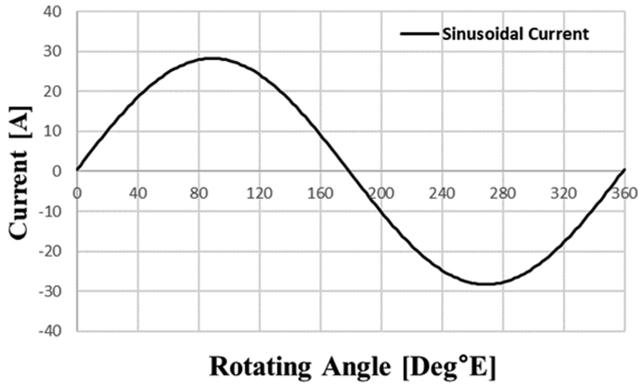


Fig. 2. Sinusoidal Current Waveform.

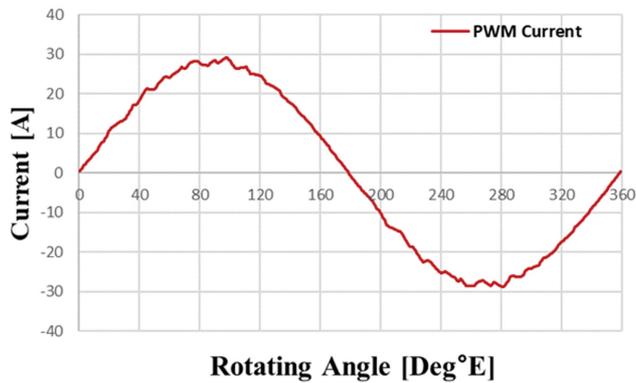


Fig. 3. (Color online) Current Waveform considering PWM control.

PWM 제어 하에서 구동되는 경우에는 제어에 기인한 고조파 성분이 전류 파형에 포함되므로, 이상적인 전류 인가만으로는 오차가 발생할 수 있다. 이에 본 논문은 PWM 제어를 고려한 모터 해석 방법을 제안한다.

Fig. 1은 PWM 연동 해석을 위한 PWM 제어 회로도를 나타낸다. 본 회로도는 MATLAB/Simulink를 이용하여 구성하였다. PWM 제어 회로도 구성을 위해서는 모터의 속도, 저항, 토크, 역기전력 등의 사양 및 성능 지표와 제어를 위한 인덕턴스, 인버터 스위칭 주파수 등이 필요하고, 이를 통해 PWM 제어 시 예상 전류 파형을 도출할 수 있다. Fig. 2는 정현파 전류 파형을, Fig. 3은 PWM 제어를 고려한 전류 파형 예시를 각각 나타낸다.

III. 와전류 손실 분석

1. 자속의 경로에 따른 와전류손

정지한 도체에 시간에 따라 변화하는 자속이 형성되면, 자속 변화로 인해 유도기전력이 발생하는데, 이러한 시변 자속은 도체에 와전류를 발생시키고, 와전류로 인해 도체 내부에 열 손실인 와전류 손실이 발생한다. 전동기에 사용되는 영구

자석이 유한한 전기전도도를 가질 경우, 고정자 권선 전류에 의해 형성된 자속이 영구자석 내 자속 변화를 유발하고, 그 결과 자석 내부에 전류가 흐르게 된다. 영구자석에서 와전류 손실이 발생하면 자석의 온도가 상승하여 열적 감자를 초래하고, 이는 전동기 성능에 치명적인 영향을 미친다[11]. 식(1)은 자속 경로에 따른 와전류 손실을 나타낸다.

$$P = \int \rho J^2 dV = \frac{c^3 h l}{12 \rho} \left(\frac{dB}{dt} \right)^2, p = \frac{c^2}{12 \rho} \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 \quad (1)$$

여기서, P 는 와전류손, ρ 는 저항률, J 는 전류 밀도, c 는 자속이 지나가는 경로에 수직으로 맞닿아 있는 자석의 가로 길이, h 는 자석의 높이, l 은 자석의 두께, B 는 자속밀도이고, p 는 단위 체적당 와전류 손실을 나타낸다.

식(1)에 따르면, 도체의 길이가 감소할수록 단위 체적당 와전류 손실은 감소된 도체 길이의 제곱에 비례하여 감소한다. 이를 적용하면 3상 모터의 고정자 권선 전류에 의해 자속 변화가 유도되는 회전자 영구자석의 길이를 줄임으로써 와전류 손실을 저감할 수 있다. 본 연구에서는 영구자석의 단위 체적당 와전류 손실 저감을 위해 자석 분할법을 채택하였다.

2. 고조파에 따른 와전류 손실

동기전동기는 회전자 회전 속도와 고정자 회전자계의 속도가 동일하므로 이상적으로는 와전류 손실이 발생하지 않는다. 그러나 고조파가 존재할 경우 고조파 성분에 기인한 영구자석의 와전류 손실이 발생한다. 식(2)는 고조파에 따른 와전류 손실을 나타낸다[12].

$$W_{mag} = \sum_n \left(\int_{magnet} \frac{J_n^2}{2\sigma} dv \right) \quad (2)$$

여기서, J_n 는 와전류의 n 차 시간 고조파 진폭이다.

식(2)에 따르면, 전류의 n 차 고조파 진폭이 증가할수록 자석에서 발생하는 와전류 손실이 증가한다. 따라서 PWM 제어를 적용하는 영구자석형 동기전동기의 설계에서는 보다 정확한 해석 결과를 위해 PWM 제어를 고려한 전류 파형을 적용하여 확인해야 한다.

IV. FEA를 통한 와전류 손실 분석

1. IPMSM 전동기 사양

Fig. 4는 반도체 어플리케이션의 IPMSM 형상을 나타내고, Table I은 사양을 나타낸다.

2. 자석 분할에 따른 와전류 손실 저감

본 논문은 영구자석에서 발생하는 와전류 손실 저감을 위

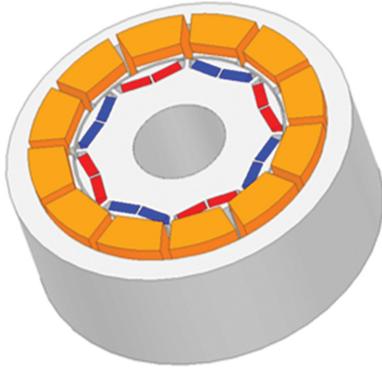


Fig. 4. (Color online) Geometry of the IPMSM.

Table I. Specifications of the model.

Parameter	IPMSM	Unit
Poles / Slots	8 / 12	-
Rated Power	5	kW
Rated Speed	6,000	rpm
Current	20	Arms
Series Turns per phase	76	-
Parallel Branches	4	-

Table II. Performance versus segmentation count.

Parameter	1 Seg	2 Seg	3 Seg	4 Seg	5 Seg	Unit
Torque	10.42	10.42	10.43	10.37	10.32	Nm
Torque Ripple	9.5	7.8	7.6	6.6	6.5	%
Core Loss	96.5	96.3	94.5	94.4	93.0	W
Eddy Current Loss	5.8	1.7	0.8	0.4	0.3	W

해 자석 분할법을 적용하였다. 식(1)에 따라 자속 경로에 수직으로 맞는 자석의 길이가 짧아질수록 단위 체적당 와전류 손실이 감소한다. 자석 분할 시 제작 가능 최소 두께를 고려해야 하며, 본 연구에서는 무분할 모델부터 5분할 모델까지를 검토하였다. Table II는 분할 횟수에 따른 성능을, Fig. 5는 분할 횟수에 따른 토크 및 와전류 손실의 경향을 나타낸다.

분할 수가 증가할수록 쇄교자속은 감소하나, 쇄교자속 감소를 대비 와전류 손실 감소율이 크기 때문에 축 토크는 증가하는 경향을 보인다. 다만 분할 수가 4분할을 초과하면 쇄교자속 감소율이 상대적으로 커져 축 토크가 감소한다. 이에 따라 최종 모델로 4분할을 선정하였다.

Fig. 6은 자석 분할 모델의 형상을, Table III은 분할 전·후 모델의 FEA 결과를 비교한다. 영구자석에서 발생하는 와전류는 주로 축방향 성분을 가지므로 2D FEA만으로는 정확한 와전류 손실 평가가 어렵다. 따라서 정확한 분석을 위해 3D 해석을 수행하였다. 동일 사양에서 자석만 분할한 경우 토크 리플과 철손은 증가하나, 영구자석 와전류 손실은 크게 감소

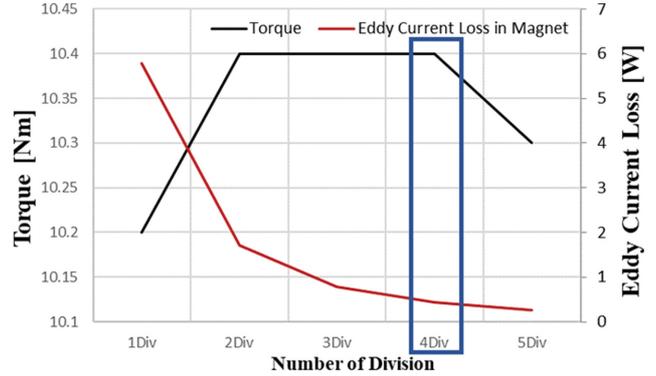


Fig. 5. (Color online) Trend of torque and eddy-current loss with segmentation count.

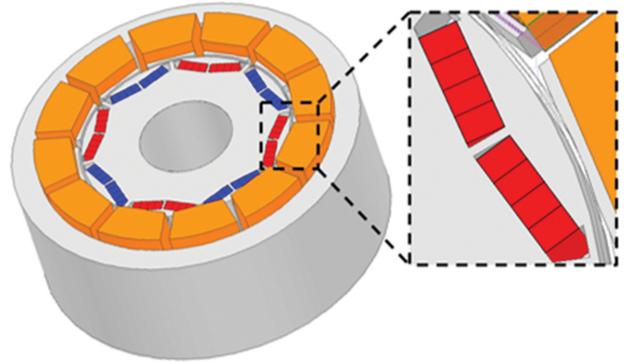


Fig. 6. (Color online) Geometry of the model with segmented magnets.

Table III. FEA results of the two models.

Parameter	Unsegmented model	Segmented model	Unit
Torque	10.42	10.7	Nm
Torque Ripple	9.5	8.0	%
Core Loss	96.5	98.8	W
Eddy Current Loss	5.8	0.42	W

한다. 본 연구에서는 철손이 6.8% 증가하는 반면 와전류 손실은 98.8% 감소하여 축 토크가 증가함을 확인하였다. 또한 자석 길이를 1/4로 감소할 경우 수식(1)에 따라 와전류 손실이 1/16로 감소하여, 자석 분할에 의한 와전류 손실 저감의 타당성을 확인하였다.

3. PWM 연동 해석을 통한 와전류 손실 분석

Fig. 7은 4분할 모델의 전류 파형(정현파 대비 PWM 고려)을, Fig. 8은 PWM 고려 시 전류 고조파를 나타낸다.

식(2)에 따르면 전류의 n차 고조파 성분이 클수록 와전류 손실이 증가한다. 정현파 전류의 경우 기본파 외 고조파가 존재하지 않지만, PWM을 고려한 전류는 기본파 이외의 고조파가 존재하여 와전류 손실이 증가한다. 따라서 PWM 제어

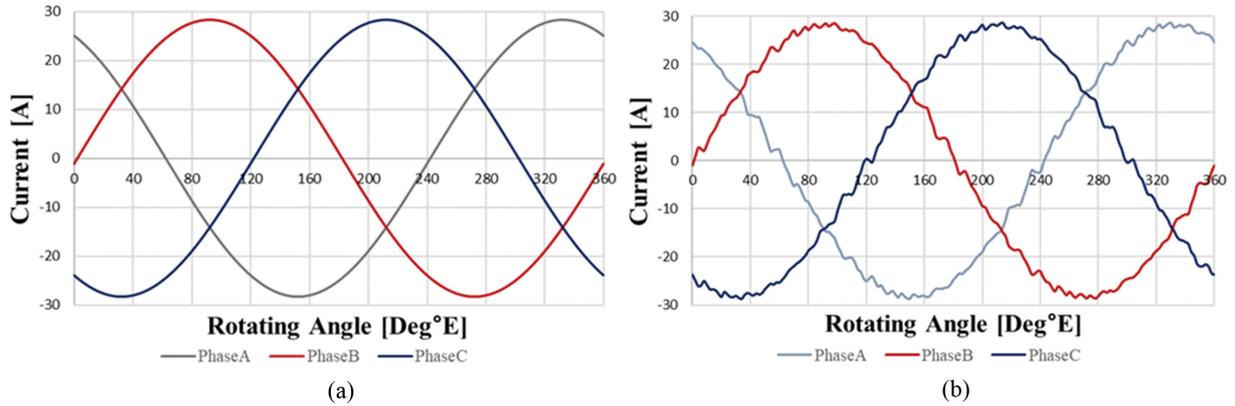


Fig. 7. (Color online) Current waveform: (a) sinusoidal; (b) PWM-controlled for the 4-segment model.

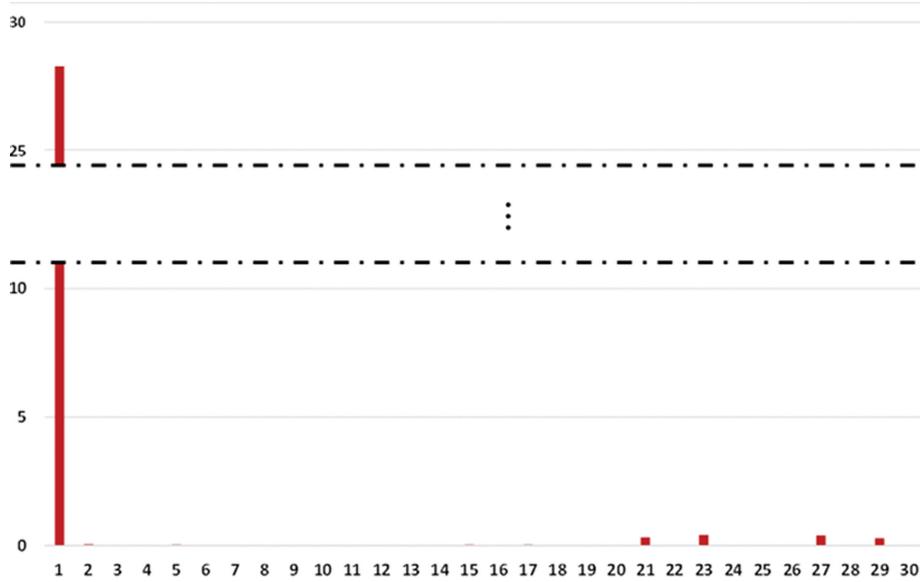


Fig. 8. (Color online) Current harmonics considering PWM.

Table IV. FEA results of the segmented-magnet model (with Sinusoidal and PWM Current).

Parameter	Sinusoidal Current	PWM Current	Unit
THD of the line voltage	10.1	52.2	%
Torque Ripple	8.0	16.3	%
Eddy Current Loss	0.416	0.604	W

를 고려한 해석이 필요하다. Table IV는 자석 분할 모델에 대해 정현파 전류와 PWM 전류를 각각 적용했을 때의 FEA 결과를 제시한다. PWM 전류의 고조파로 인해 부하 시 선간 전압 THD는 정현파 대비 약 417%, 토크 리플은 약 103% 증가하였다. 또한 영구자석 와전류 손실은 PWM 전류 적용 시 0.604 W로, 약 45% 증가하였다. 본 결과는 정확한 손실 분석을 위해 PWM 제어를 연동한 해석의 필요성을 나타낸다.

V. 결 론

본 논문은 자석 분할법을 통한 영구자석 와전류 손실 저감 방안을 제시하고, PWM 제어를 고려한 전류 파형 기반의 고조파 유발 와전류 손실 해석 방법을 제안하였다. 영구자석에서 발생한 와전류는 열손실로 이어져 회전자 온도를 상승시키므로, 도체 길이에 따른 단위 체적당 와전류 손실 특성을 분석하여 자석 분할법을 선택하였다. 또한 PWM 전류는 인버터 캐리어 주파수에 기인한 고조파 성분을 포함하며, 이 성분은 영구자석 와전류 손실에 영향을 미친다. 이에 따라 고조파 영향 분석 및 정확한 손실 예측을 위해 PWM 제어를 고려한 전류 파형을 사용한 해석 방법을 제안하였다. 제안한 자석 분할법과 PWM 연동 해석의 타당성은 FEA를 통해 검증하였다.

사 사

이 논문은 2022년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2022R111A3068863).

References

- [1] Y. Xu, M. Ai, Z. Xu, W. Liu, and Y. Wang, IEEE Transactions on Applied Superconductivity **31**, 1 (2021).
- [2] W. Zhao, Z. Yang, Y. Liu, and X. Wang, IEEE Transactions on Magnetics **57**, 1 (2021).
- [3] N. Zhao and W. Liu, IEEE Transactions on Magnetics **51**, 1 (2015).
- [4] J.-H. Seo, D.-K. Woo, T.-K. Chung, and H.-K. Jung, IEEE Transactions on Magnetics **46**, 3213 (2010).
- [5] R. Xu and W. Tong, CES Transactions on Electrical Machines and Systems **6**, 352 (2022).
- [6] K.-Y. Yoon and B.-I. Kwon, IEEE Transactions on Magnetics **52**, 1 (2016).
- [7] S. A. Saleh, T. S. Radwan, and M. A. Rahman, IEEE Transactions on Power Delivery **22**, 2108 (2007).
- [8] J. Du, Y. Li, Z. Yu, and Z. Wang, IEEE Transactions on Applied Superconductivity **31**, 1 (2021).
- [9] S.-H. Kim, Electric Motor Control DC, AC, and BLDC motors, Elsevier Science, Amsterdam (2017) pp. 265~267.
- [10] B.-C. Kim, J.-H. Lee, and D.-W. Kang, IEEE Transactions on Applied Superconductivity **30**, 1 (2020).
- [11] Y. Zhang, K. Lu, and Y. Ye, IEEE Transactions on Magnetics **48**, 3005 (2012).
- [12] K. Yamazaki and A. Abe, IEEE Transactions on Industry Applications **45**, 659 (2009).