

Study on 3D Rotor Leakage Magnetic Flux in Interior Permanent Magnet Synchronous Motor

Sung Gu Lee and Yun-Hyun Cho*

Department of Electrical Engineering, Dong-A University, Busan 49315, Korea

(Received 27 June 2021, Received in final form 29 June 2021, Accepted 29 June 2021)

In the rotor of the interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM), leakage flux that cannot link the coil of the stator among the magnetic flux generated by the permanent magnet (PM). Among the rotor leakage flux generated in the IPMSM, the 2D component passing through the rib can be considered through the 2D finite element analysis (FEA). However, in the rotor leakage flux of an IPMSM, there is a component of a 3D path that cannot be considered by a 2D FEA. This 3D rotor leakage magnetic flux is generated between the rotor core regions separated by PMs, and its path is 3D through air, which is a non-magnetic substance located at the upper and lower ends of the rotor core in the axial direction. In this study, a 3D FEA model with an axial air dummy is proposed to analyze the cause of 3D leakage magnetic flux in a IPMSM and to accurately consider it. Also, how the calculation result of the 3D leakage magnetic flux according to the height of the axial air dummy is affected was analyzed. Finally, the effect of 3D rotor leakage magnetic flux on no-load back electromotive force and cogging torque was confirmed through comparison of 2D FEA and 3D FEA of IPMSM with specific specifications.

Keywords : interior permanent magnet synchronous motor, rotor leakage magnetic flux, 3D leakage magnetic flux

매입형 영구자석 전동기에서 발생하는 3차원 회전자 누설자속에 관한 연구

이성구 · 조윤현*

동아대학교 전기공학과, 부산시 사하구 낙동대로 550번길 37, 49315

(2021년 6월 27일 받음, 2021년 6월 29일 최종수정본 받음, 2021년 6월 29일 게재확정)

매입형 영구자석 전동기의 회전자에서는 영구자석에서 발생하는 자속 중 고정자의 코일을 쇠고하지 못하는 누설자속이 발생한다. 매입형 영구자석 전동기에서 발생하는 회전자 누설자속 중 rib을 경유하는 2차원 성분은 2차원 유한요소해석을 통해 고려될 수 있다. 하지만 매입형 영구자석 전동기의 회전자 누설자속에는 2차원 유한요소해석으로는 고려할 수 없는 3차원 경로의 성분이 존재한다. 이 3차원 회전자 누설자속은 영구자석으로 분리된 회전자 코어 영역들 사이에서 발생하며, 이의 경로는 회전자 코어의 축방향 상하단에 위치한 비자성체인 공기를 경유하는 3차원이다. 본 연구에서는 매입형 영구자석 전동기에서 3차원 누설자속이 발생하는 원인을 분석하고, 이를 정확하게 고려할 수 있는 axial air dummy가 추가된 3차원 유한요소 해석모델을 제안하였다. 또한, axial air dummy의 높이에 따라 3차원 누설자속의 계산결과가 어떻게 영향을 받는지를 분석하였다. 마지막으로 특정 사양을 가지는 매입형 영구자석 전동기의 2차원 유한요소해석과 3차원 유한요소해석의 비교를 통해 3차원 회전자 누설자속이 무부하 역기전력과 코깅토크에 미치는 영향을 확인하였다.

주제어 : 매입형 영구자석 전동기, 회전자 누설자속, 3차원 누설자속

I. 서 론

매입형 영구자석 전동기의 회전자 코어에 영구자석이 삽입되는 회전자 구조는 원심력에 의한 자석의 비산 가능성을 낮

출 수 있으나, 강자성체인 회전자 코어에서 누설자속을 발생시키는 원인이 된다[1,2]. 표면부착형 영구자석 전동기의 회전자 누설자속의 경로는 회전자 코어 내 2차원 평면에 한정된다. 그래서 2차원 유한요소해석으로 이로 인한 성능특성 저하를 정확하게 고려할 수 있다. 하지만 매입형 영구자석 전동기는 2차원 유한요소해석으로는 고려할 수 없는 3차원 경로의 추가적인 회전자 누설자속이 존재한다[3]. 해당 회전

자 누설자속은 영구자석의 N극에 인접한 회전자 코어 영역에서 시작되어 축방향에 위치한 공기를 경유하여, 영구자석의 S극에 인접한 회전자 코어 영역으로 들어가는 3차원 경로를 따라 형성된다. 이 3차원 경로의 회전자 누설자속은 3차원 유한요소해석으로만 고려될 수 있다. 본 연구에서는 매입형 영구자석 전동기에서 추가적으로 발생하는 3차원 누설자속의 원인을 규명하고, 3차원 유한요소해석으로 해당 누설자속을 고려하기 위해 회전자의 최상단과 최하단에 air dummy를 추가하는 모델링 기법을 제안하였다. 또한 3차원 누설자속의 정확한 해석을 위해 축방향에 추가되어야 하는 air dummy의 사이즈에 대한 기준을 제시하였다. 해당 내용에 대한 검증은 특정 사양을 가지는 매입형 영구자석 전동기에 대한 2차원과 유한요소해석과 3차원 유한요소해석을 통해 수행되었다.

II. 매입형 영구자석 전동기의 회전자 3차원 누설자속

Fig. 1(a)과 Fig. 1(b)는 표면부착형 영구자석 전동기의 회전자와 매입형 영구자석 전동기의 회전자를 각각 나타내고 있

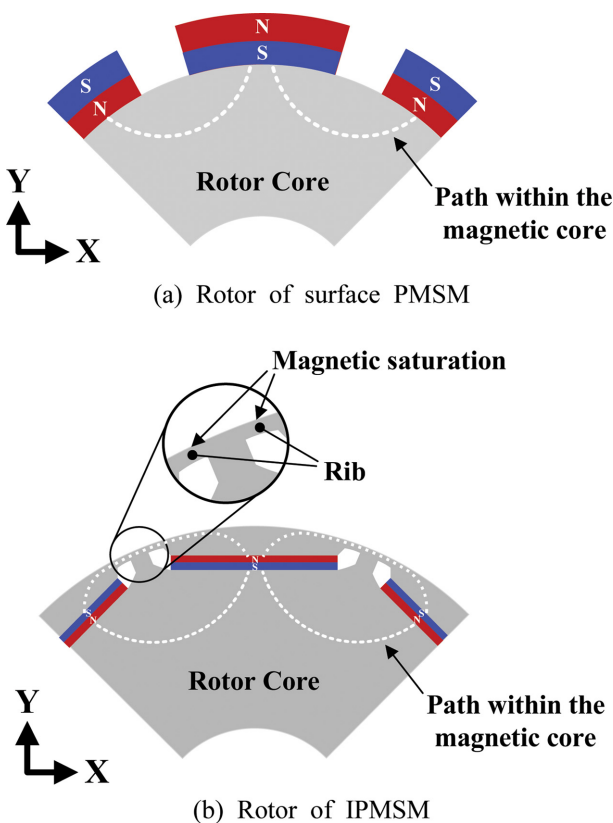


Fig. 1. (Color online) Comparison of rotor shape of surface PMSM and IPMSM.

다. 표면부착형 영구자석 전동기에서 모든 영구자석은 2개의 극인 N극과 S극 중 오직 1개만 강자성체인 회전자 코어에 부착되고, 2개의 극 중 나머지 1극들 사이는 비자성체인 공기로 서로 분리된다. 이와 달리 Fig. 1(b)의 매입형 영구자석 전동기에서는 회전자에 위치한 영구자석의 모든 극이 자속이 흐르기 쉬운 강자성체인 회전자 코어로 서로 연결되어 있다. 이와 같은 구조의 차이로 표면부착형 영구자석 전동기에서는 인접한 영구자석들 극 간 누설자속이 거의 발생하지 않는 반면, 매입형 영구자석 전동기의 인접한 영구자석들 사이에서는 상당한 크기의 누설자속이 발생한다.

매입형 영구자석 전동기의 회전자 코어에서 발생하는 누설자속을 최소화하기 위하여, Fig. 1(b)에 나타낸 것과 같이 영구자석의 N극에 접하는 회전자 코어 영역과 S극에 접하는 회전자 코어 영역은 rib라고 불리는 영역을 통해 연결된다. Rib의 두께와 매입형 영구자석 전동기의 회전자 코어 내에서 발생하는 누설자속의 양 사이에는 비례관계가 존재한다. 그래서 rib의 두께는 코어 타발을 위한 프레스 금형에서의 제조성과 회전 원심력에 의한 rib의 기계적인 안전도가 허용되는 최소 수치로 설계된다. 결과적으로 매입형 영구자석 전동기의 rib 영역은 자기포화 되어 비자성체와 비슷한 수준의 비투자

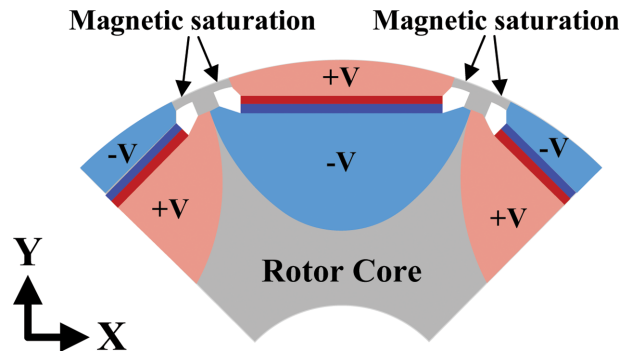


Fig. 2. (Color online) Magnetic potential difference in rotor core of IPMSM.

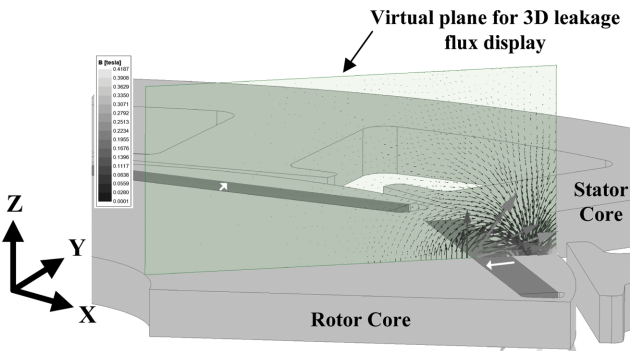


Fig. 3. (Color online) 3D leakage magnetic flux in rotor core (3D FEA result).

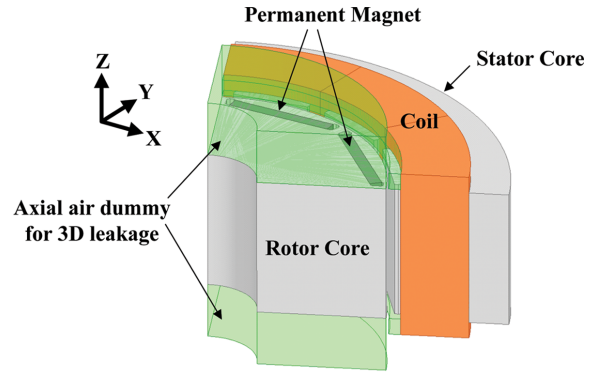
을 가진다. 그래서 Fig. 2와 같이 자기 포화된 rib과 영구 자석으로 인해 회전자 코어는 자기적으로 여러 영역으로 분리되며, 각 영역들은 영구자석의 기자력에 의해 magnetic potential 차이가 발생한다. 이와 같은 magnetic potential 차이로 인해 Fig. 3에 나타난 것과 같이 회전자 코어 상단의 공기를 경유하는 3차원 경로로 누설자속이 발생한다. Fig. 3은 3차원 유한요소해석을 이용한 실제 해석결과로, 3차원에서 발생하는 누설자속의 벡터도를 가상의 단면에 나타낸 것이다.

III. 3차원 누설자속 고려한 3차원 유한요소해석 모델링

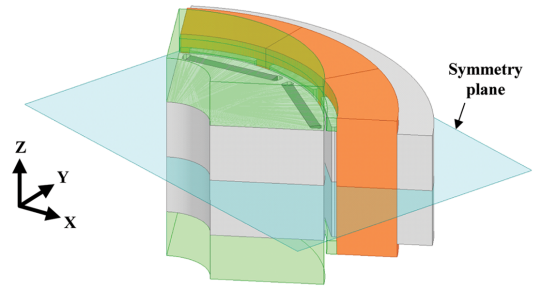
영구자석 매입형 전동기의 회전자에서 발생하는 누설자속 중 회전자 코어의 2차원 평면 내 rib를 경유하는 2차원 성분은 2차원 유한요소해석을 통하여 정확하게 고려될 수 있다. 하지만 앞서 설명된 3차원 누설 성분은 이의 경로가 3차원이므로, 2차원 유한요소해석으로는 고려할 수 없다. 3차원 누설자속에 의한 매입형 영구자석 전동기의 성능 저하를 정확하게 해석하기 위해서는 3차원 유한요소해석이 필요하다. 하지만 3차원 누설자속의 경로상에 적절한 air dummy가 추가되지 않은 해석 모델을 이용한 3차원 유한요소해석으로는 회전자 3차원 누설자속을 정확하게 고려할 수 없다. 3차원 누설자속 성분을 정확하게 고려하기 위해서는, Fig. 4(a)에 나타난 것과 같이 3차원 누설자속이 지나가는 영역에 해당하는 회전자 코어의 최상단과 최하단에 air dummy가 추가된 3차원 해석모델이 필요하다. 3차원 유한요소해석은 긴 해석시간이 필요하므로, 가능한 해석모델의 크기를 줄이는 것이 유리하다. 스쿠 구조가 적용되지 않은 전동기는 Fig. 4(b)에 나타난 것과 같이 적층길이 방향 정중양을 기준으로 상하 대칭성이 존재한다. 그래서 Fig. 4(a)의 full 해석모델을 적층 정중양에 대한 대칭성을 이용하여 Fig. 4(c)에 나타난 것과 같이 전체 적층길이의 1/2만 모델링한 half 모델로 축소할 수 있다. Fig. 4(c)의 half 모델을 이용할 경우 half 모델의 정중양면에는 자기장의 수직성분이 0이라는 symmetry 경계조건이 적용되어야 한다.

회전자 코어에서 발생하는 3차원 누설자속을 정확하게 고려하기 위해서는, 실제 발생하는 3차원 누설자속의 경로를 모두 반영할 수 있을 정도의 충분한 높이의 air dummy가 필요하다. Axial air dummy의 높이가 매입형 영구자석 전동기의 3차원 누설자속에 미치는 영향을 확인하여 위하여, Table I에 주어진 사양에 대한 3차원 유한요소해석이 수행되었다.

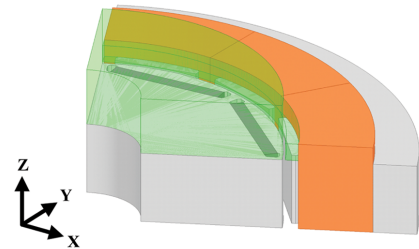
3차원 유한요소해석은 Fig. 5에 표현된 mesh를 가지는 해



(a) 3D full model with air dummy for 3D leakage flux consideration



(b) Symmetry about the stacked center of a motor without a skew structure



(c) 3D half model with air dummy for 3D leakage flux consideration

Fig. 4. (Color online) 3D FEA model to consider 3D rotor leakage flux.

Table I. IPMSM specification for 3D leakage flux influence verification.

Spec.	Value	Unit
Number of poles	8	-
Number of slots	12	-
Outer Diameter of stator	100	mm
Outer Diameter of rotor	60	mm
Air gap	0.6	mm
Stack length	25	mm
Size of PM	W18 × 2T	mm
Magnetic residual of PM	1.2	T
Thickness of rib	0.5	mm

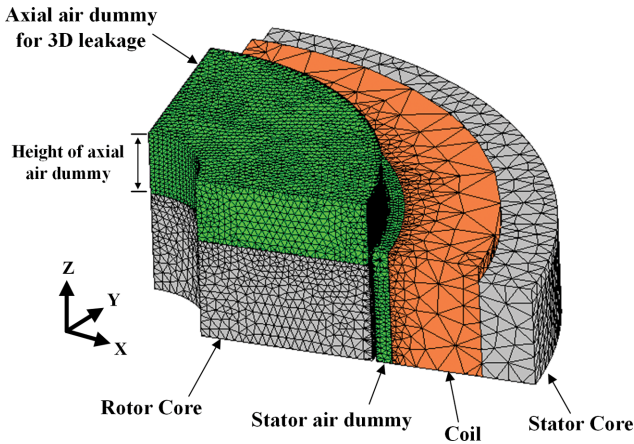


Fig. 5. (Color online) Mesh of 3D FEA model.

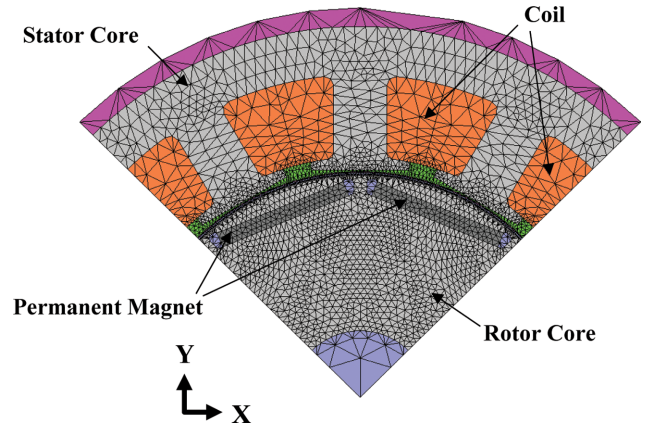


Fig. 7. (Color online) Mesh of 2D FEA model.

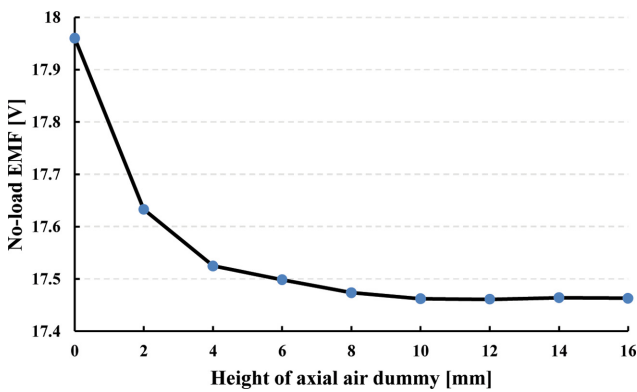


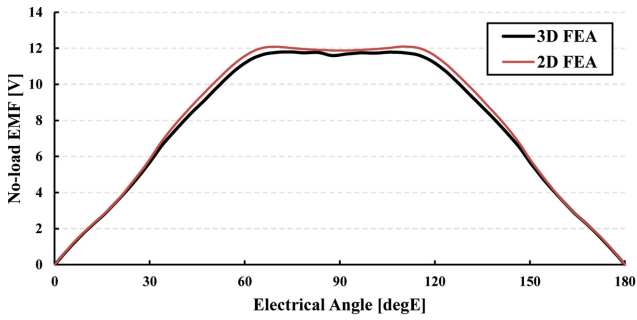
Fig. 6. (Color online) Comparison of the magnitude of the no-load back electromotive force according to the height of the axial air dummy.

석모델이 사용되었으며, axial air dummy 높이가 0 mm에서 16 mm로 변화될 때 1,000 rpm에서의 무부하 역기전력의 실효값의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에 나타나 있듯이 axial air dummy가 0 mm에서부터 10 mm까지는 axial air dummy의 높이가 증가할수록 무부하 역기전력의 크기가 감소하였다. 이는 회전자 3차원 누설자속에 의해서 전동기의 유효 쇄교자속이 감소하기에 발생하는 현상으로, 10 mm 미만의 높이를 가지는 axial air dummy들은 Table 1 사양을 가지는 전동기의 3차원 회전자 누설자속을 정확하게 고려할 수 없다는 것을 나타낸다. Axial air dummy의 높이가 10 mm 이상인 경우에는 dummy의 높이가 증가하더라도 더 이상의 무부하 역기전력 감소가 없다. 결과적으로 Table 1의 사양의 매입형 영구자석 전동기의 3차원 회전자 누설자속을 정확하게 고려하기 위해서는 최소 10 mm 높이의 axial air dummy가 사용된 3차원 해석이 필요하다. 하지만 10 mm는 Table 1의 사양을 가지는 매입형 영구자석 전동기의 3차원 회전자 누설자속의 정확한 계산에 필요한 axial air dummy 높이이며,

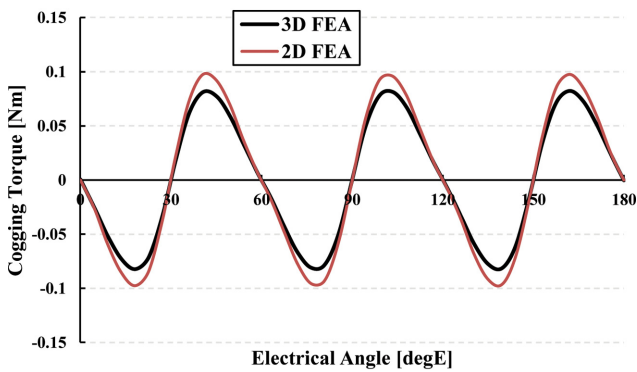
Table 1과는 다른 사양의 매입형 영구자석 전동기의 경우에는 10 mm가 아닌 다른 값이 사용되어야 한다. 이런 경우에는 Fig. 6에 나타난 axial air dummy 높이 변화에 따른 무부하 역기전력 혹은 쇄교자속의 변화에 대한 고찰이 필요하다.

앞서 살펴본 바와 같이 매입형 영구자석 전동기에서는 2차원 유한요소해석으로는 고려될 수 없는 3차원 경로의 회전자 누설자속이 발생하며, 이의 정확한 고려를 위해서는 충분한 높이의 axial air dummy가 추가된 3차원 유한요소해석이 수행되어야 한다. Table 1의 사양에 대한 2차원 유한요소해석과 3차원 유한요소해석 결과 비교를 통하여 매입형 영구자석 전동기의 3차원 회전자 누설자속이 전동기의 성능특성에 미치는 영향을 확인할 수 있다. 이를 위해 Fig. 7에 나타난 2차원 해석모델을 이용한 2차원 유한요소해석과 Fig. 5의 3차원 해석모델을 이용한 3차원 유한요소해석 결과를 비교하였다. 이때 Fig. 7의 2차원 해석모델은 Fig. 5의 3차원 해석모델과 동등한 수준의 mesh를 갖도록 모델링되었다. 또한 3차원 해석모델의 axial air dummy 높이는 12 mm로서, 이는 3차원 누설자속을 정확히 고려하기에 충분한 수치이다.

2차원과 3차원 유한요소해석으로 계산된 1,000rpm에서의 무부하 역기전력을 Fig. 8(a)에 나타내었다. 3차원 회전자 누설자속을 고려할 수 없는 2차원 해석으로 계산된 무부하 역기전력은 17.96[Vrms]이며, 3차원 누설자속을 고려할 수 있는 3차원 해석결과는 17.46[Vrms]로 2차원 해석결과 대비 3차원 해석결과가 약 2.7[%] 작았다. 이는 3차원 회전자 누설자속의 영향으로 고정자 쇄교자속이 감소하기 때문이다. Fig. 8(b)에 2차원과 3차원 해석으로 계산된 코깁토크를 비교하였다. 코깁 토크 역시 무부하 역기전력처럼 3차원 누설자속을 고려할 수 있는 3차원 해석이 2차원 해석보다 더 작은 값을 나타내었다. 2차원 해석으로 계산된 코깁 토크의 피크 투 피크 값은 195[mNm]이며, 3차원 해석은 165[mNm]로, 3차원 해석이 2차원 해석보다 약 15.6[%] 작았다.



(a) No-load back electromotive force (based on rotor speed 1,000[rpm])



(b) Cogging torque

Fig. 8. (Color online) Comparison of 2D and 3D FEA results.

IV. 결 론

매입형 영구자석 전동기는 영구자석이 회전자 코어에 삽입되는 회전자 구조로 인하여, 2차원 해석으로는 고려할 수 없는 3차원 경로의 누설자속이 회전자에서 발생한다. 해당 3차원 회전자 누설자속에 의한 전동기의 성능저하를 정확하게 고려하기 위해서는 axial air dummy가 추가된 해석모델이 사용된 3차원 유한요소해석이 필요하다. 이때 axial air dummy의 높이는 충분히 큰 값을 가져야 매입형 영구자석 전동기에서 발생하는 3차원 누설자속을 정확하게 계산할 수 있다. 매입형 영구자석 전동기의 무부하 역기전력, 코깅토크와 같은 주요 성능특성 해석 시 2차원 유한요소해석으로 계산된 결과는 3차원 회전자 누설자속이 고려된 3차원 유한요소해석 결과보다 더 큰 값으로 계산된다.

감사의 글

본 연구는 2021년 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019R1C1C1011266).

References

- [1] M. Cirani, S. Eriksson, and J. Thunberg, IEEE Trans. Ind. Appl. **50**, 1847 (2014).
- [2] C.-C. Hwang and Y. H. Cho, IEEE Trans. Magn. **37**, 3021 (2001).
- [3] S. G. Lee, J. Lee, and W. Kim, IEEE Trans. Magn. **53**, 1 (2017).