

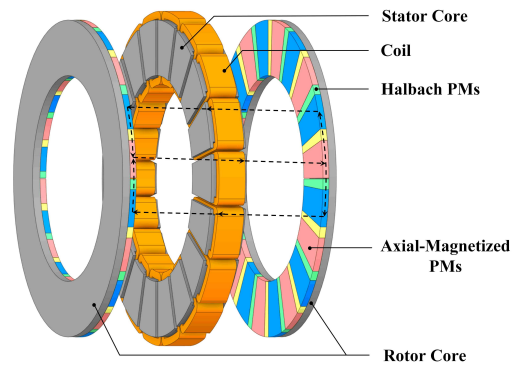
자화 배열에 따른 YASA 타입 축 방향 영구자석 전동기의 전자기 해석 및 설계

김사빈*, 우수빈*, 김민성*, 박준범**, 최장영**, 신경훈*
국립창원대*, 충남대**

Electromagnetic analysis and design of yokeless and segmented armature type axial flux permanent magnet motor according to magnetization patterns

Sa-Bin Kim*, Su-Bin Woo*, Min-Sung Kim*, Jun-Beom Park**, Jang-Young Choi**, Kyung-Hun Shin*
Changwon National University*, Chungnam National University**

Abstract - This paper analyzes and compares electromagnetic performances such as power density, torque, and efficiency of a Yokeless And Segmented Armature(YASA) type Axial Flux Permanent Magnet Motor(AFPMM) according to magnetization patterns. By varying the magnetization arrangement, magnetization angle, and number of magnet segments, this study analyzes the electromagnetic performance of a YASA type AFPMM under both no-load and on-load conditions for different magnetization patterns. Finite element method(FEM) is employed to evaluate the potential for performance enhancement.



〈그림 1〉 YASA 타입 AFPMM의 형상

〈표 1〉 YASA 타입 AFPMM의 구조적 사양

Parameter	Value [Unit]	Parameter	Value [Unit]
Number of poles	20	Air gap length	0.6[mm]
Number of slots	18	Rated speed	3,000[rpm]
Core outer diameter	100[mm]	Number of turns	12
Core inner diameter	65[mm]	Maximum current	20[A _{max}]
Height of armature core	20[mm]	Pole-arc ratio	0.98
Magnet thickness	2[mm]	Number of strands	10
Grade of PM	N42SH	Grade of electrical steel	Somaloy 700-3P

1. 서 론

전동화 시스템의 고효율 밀도 및 경량화 수요가 증가함에 따라, 축방향 자속 영구자석 전동기(Axial Flux Permanent Magnet Motor, AFPMM)는 차세대 전동화 시스템의 주요 기술로 주목받고 있다. AFPMM은 디스크 형태의 구조로, 짧은 축방향 길이와 넓은 회전자 외경을 갖는다. 특히, 요크리스 및 분할형 전기자(Yokeless And Segmented Armature, YASA) 구조는 고정자 요크가 없고 짧은 단부 영역으로 인해 전기적 손실을 저감하고 토크 밀도를 극대화할 수 있다. 그러나 AFPMM은 내·외측의 누설 자속으로 인해 유효 자속이 감소하고, 이를 보상하기 위해 회전자 오버행 및 자석 두께가 증가하는 구조적 한계를 가진다.

이러한 자속의 누설은 자석의 자화 방식에 따라 달라지며, 최적의 자화 배열을 도출하는 것은 AFPMM 성능 향상을 위한 핵심 설계 기술 중 하나이다. 대표적인 자화 방식으로는 수직 배열과 할박 배열이 있으며, 수직 배열은 자속 경로 형성을 위해 회전자 내에 연자성체가 필요하다. 이로 인해 회전자의 무게 및 AFPMM의 부피가 증가하여, 출력 밀도가 감소하는 단점이 있다. 반면에 할박 배열은 자속을 공극 방향으로 집중시키고, 누설 자속을 억제하는 구조적 특성을 갖고 있어 회전자 요크 두께를 줄일 수 있기 때문에 출력 성능 및 밀도를 향상시킬 수 있다[2].

따라서, 본 연구에서는 수직 배열과 할박 배열을 갖는 YASA 타입 AFPMM의 전자기 해석 및 성능을 비교하였다. 할박 배열은 자화 각도와 자석 분할 수에 따라 성능이 다르므로 자화 배열에 따라 성능에 미치는 영향을 분석하여, 고효율 밀도 AFPMM 설계를 위한 방법을 제안한다.

2. 자화 배열 방식에 따른 전자기 성능 해석

2.1 YASA 타입 AFPMM의 구조적 사양 및 주요 설계 변수

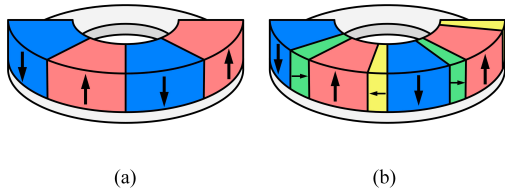
그림 1은 YASA 타입 AFPMM의 기본 모델 형상을 나타낸다. 기본 모델은 20극 18슬롯으로 구성되었으며, 단일 고정자-이중 회전자(Single Stator Double Rotor, SSDR) 구조를 적용하였다. 고정자를 기준으로 양측에 회전자와 자석을 배치하였으며, YASA 구조의 특성에 따라 고정자와 회전자는 동일한 외경을 갖도록 설계하였다.

표 1은 AFPMM의 기본 모델에 대한 구조적 사양을 나타낸다. 해석 모델들은 회전자 및 고정자의 형상, 자석 사용량을 동일하게 유지하며, 영구자석의 배열 방식과 주요 설계 변수인 자화 각도 및 자석 분할 수를 변화시켜 전자기 해석을 수행하였다.

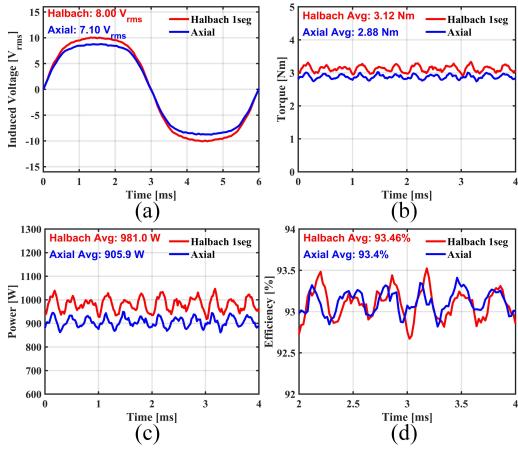
2.2 영구자석 배열 방식에 따른 전자기 성능 비교

그림 2는 영구자석 배열 방식에 따른 AFPMM 형상을 나타낸다. 그림 2(a)는 자석이 축 방향으로 자화된 구조로, 설계가 단순하고 제작이 용이하다는 장점이 있으나, 자속이 기계 내부뿐만 아니라 외부로도 방사되어 누설 자속이 증가하는 단점이 있다. 반면, 그림 2(b)는 자화 방향을 일정한 각도로 회전시켜 배열함으로써 자속을 공극 방향으로 집중시켜 공극 내 자속 밀도를 증가시킨다. 이러한 배열은 자속 집중 효과를 극대화하여 전자기 성능 향상에 유리한 조건을 제공한다.

그림 3은 배열 방식에 따른 전자기 성능을 비교한 결과이다. 무부하 역기전력은 자화 방향에 따른 자속 집중도를 나타내며, 토크와 출력은 토크 및 출력 밀도의 증감 여부, 효율은 손실 발생을 확인할 수 있는 지표로 활용되었다. 해석 결과로부터 할박 배열이 수직 배열에 비해 전자기 성능에서 우수한 특성을 보인다.



〈그림 2〉 영구자석 배열 방식에 따른 형상:
(a) 수직 배열 (b) 1분할 할박 배열



〈그림 3〉 영구자석 배열 방식에 따른 전자기 성능 결과:
(a) 역기전력 (b) 토크 (c) 출력 (d) 효율

2.3 할박 배열의 자화 각도에 따른 전자기 특성 해석

그림 4는 자화 각도에 따른 할박 배열을 나타낸다. 자화 방향의 회전 각도가 작아질수록 자속 분포가 더욱 연속적이고 정현파에 가까워진다. 정현적인 공극 자속밀도의 형성은 누설 자속과 고조파 성분이 감소하는 효과로 이어지게 된다. 그림 4(a)는 2분할 할박 배열을 나타내며, 그림 4(b)는 설계 변수인 30°, 45° 자화 각도를 나타낸다.

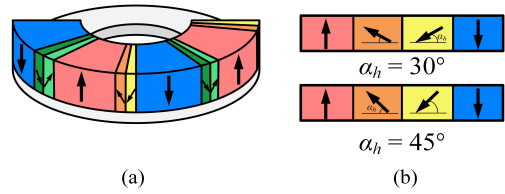
그림 5는 자화 각도에 따른 전자기 성능 비교 결과를 나타낸다. 해석 결과, 30° 배열은 역기전력의 크기, 평균 토크 및 출력 면에서 전반적으로 우수한 성능을 보였다. 이는 30° 배열이 자속을 공극 방향으로 집중시켜 더 높은 유도 전압과 유효 자속을 형성했기 때문이다.

표 2는 자화 각도에 따른 전자기 손실을 비교한 것이다. 45° 자화 배열은 30° 배열에 비해 손실이 낮게 나타났다. 이는 45° 배열에서 자속이 공극 전체에 더 넓게 분포되어 자속 변화율이 완화된 자속 및 철심 내에서의 와전류 발생이 감소하기 때문이다. 자속의 집중도는 다소 낮아지지만, 고조파 성분과 누설 자속이 억제되어 철손이 줄어드는 효과가 발생한다. 또한, 자화 각도가 증가함에 따라 출력은 다소 감소하는 경향을 보인다.

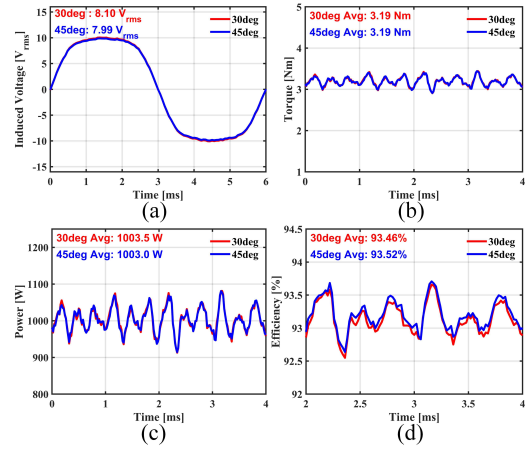
표 3은 자화 배열 방식에 따른 전자기 성능을 나타낸다. 이를 통해 자화 배열 방식이 전자기 성능에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 동일한 모델 내에서 자화 각도의 변화에 따라 자속 분포가 달라지며, 전자기 성능 특성에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 자화 배열에 따른 YASA 타입 AFPMM의 전자기 성능을 분석하였다. 수직 배열과 할박 배열을 비교한 결과, 할박 배열이 상대적으로 우수한 특성을 나타냈다. 또한, 자석 분할 수가 증가할수록 자속 분포의 정현파성이 향상됨을 확인하였다. 출력 성능 측면에서는 2분할 30° 배열이 가장 우수한 결과를 보였으며, 평균 토크와 출력이 가장 높은 수치를 기록하였다. 반면, 45° 배열은 상대적으로 손실이 더 낮아 전체적인 효율은 더 높은 것으로 나타났다.



〈그림 4〉 자화 각도 및 자석 분할 수에 따른 배열:
(a) 2분할 할박 배열 (b) 자화 각도



〈그림 5〉 자화 각도에 따른 전자기 성능 결과:
(a) 역기전력 (b) 토크 (c) 출력 (d) 효율

〈표 2〉 자화 각도에 따른 전자기 손실 비교

Performance Metric	Core loss	Solid loss	[Unit]
Halbach(30°)	25.0942	3.1729	[W]
Halbach(45°)	24.5461	2.9103	[W]

〈표 3〉 자화 배열 방식에 따른 전자기 성능 비교

Performance Metric	Axial	1-Seg. Halbach	2-Seg. Halbach (30°)	2-Seg. Halbach (45°)
Back-EMF	7.10[V _{rms}]	8.00[V _{rms}]	8.10[V _{rms}]	7.99[V _{rms}]
Torque	2.88[N·m]	3.12[N·m]	3.19[N·m]	3.19[N·m]
Output power	905.9[W]	981.0[W]	1003.5[W]	1003[W]
Efficiency	93.4[%]	93.46[%]	93.46[%]	93.52[%]

이러한 결과는 자화 배열의 최적화가 AFPMM의 성능 향상에 핵심적인 설계 요소임을 보여준다. 향후에는 다양한 운전 조건, 열 특성, 내구성 등을 포함한 확장 연구를 통해 실용적인 설계 기준으로 발전할 수 있을 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] M. Shokri, N. Rostami, V. Behjat, J. Pyrhönen and M. Rostami, "Comparison of performance characteristics of axial-flux permanent-magnet synchronous machine with different magnet shapes," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 51, no. 12, pp. 1-6, 2015.
- [2] Z. Zhang, C. Wang and W. Geng, "Design and optimization of Halbach-array PM rotor for high-speed axial-flux permanent magnet machine with ironless stator," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 67, no. 9, pp. 7269-7279, 2020.