

경량화 및 토크 특성 향상을 위한 외전형 전동기 설계 연구

박예지, 진창성*
원광대학교 전기공학과

Design of External Type Motor to Reduce Weight and Improve Torque Characteristics

Ye-Ji Park, Chang-Sung Jin*
Department of Electrical Engineering, Wonkwang University

요약 본 논문에서는 외전형 영구자석 동기전동기의 영구 자석 및 할바 자석 어레이 조합에 따른 특성 분석을 진행하였다. 다양한 산업분야에서 고효율의 전동기가 요구됨에 따라 고효율 및 경량화 된 전동기 설계 연구가 필요하다. 이때, 전동기의 중량은 영구자석, 철심, 권선 사용량 및 무게가 영향을 끼치고, 효율에는 동손과 철손 등을 포함한 손실과 토크가 영향을 미친다. 그러므로 전동기의 비출력을 향상시키기 위해서는 영구 자석의 성능을 높이고 철심의 무게를 가볍게 해야 한다. 이를 만족하기 위해 영구자석의 극수를 향상시키거나 할바 자석 어레이를 적용하는 방법 등이 존재한다. 할바 어레이를 적용하게 되면 자속의 방향이 한쪽으로 집중되기 때문에 자속의 경로 역할을 하는 요크 사용량도 저감시킬 수 있다. 그러므로 전동기의 경량화 및 출력 특성 향상에 기여할 수 있게 된다. 따라서, 이 논문에서는 할바 자석 어레이 적용 및 영구자석 배열에 따른 전동기에 대해 분석하고 유한요소해석법 (FEM, finite element method)을 이용하여 최종 모델에 할바 어레이를 적용함에 따라 출력밀도가 약 15% 향상됨을 확인하였다.

Abstract This study examined the characteristics of an external type permanent magnet synchronous motor according to the combination of permanent magnets and Halbach array. As motors with the required characteristics are in demand in various industrial fields, research on designing highly efficient and lightweight motors is necessary. At this time, the weight of the motor is affected by the amount and weight of the permanent magnet, iron core, and winding coil, and the efficiency is affected by the torque and losses, including copper loss and iron loss. Therefore, the performance of the permanent magnet must be increased, and the weight of the iron core must be decreased to improve the specific power of the motor. Increasing the number of poles or applying a Halbach array can satisfy this. As a result, the direction of the magnetic flux is concentrated to one side, so the amount of yoke used as a path for the magnetic flux can also be reduced. Hence, the weight of the motor can be reduced and its output characteristics improved. Therefore, this study analyzed the motor according to the Halbach array and permanent magnet arrangement. The finite element method confirmed that the power density was improved by approximately 15% by applying the Halbach array.

Keywords : Permanent Magnet, Halbach Array, Magnetic Flux, Power Density, SPMSM

본 논문은 2022학년도 원광대학교의 교비지원에 의해 수행됨.

*Corresponding Author : Chang-Sung Jin(Wonkwang Univ.)

email: csjin76@wku.ac.kr

Received November 29, 2023

Revised December 18, 2023

Accepted February 6, 2024

Published February 29, 2024

1. 서론

현재 다양한 어플리케이션에서 소형화 및 고출력을 위하여 외전형 전동기의 연구 개발이 진행 되고 있으며, 특히 외전형 전동기는 팬, 송풍기, 드론, 인휠모터 등에 주로 사용되고 있다. 대표적으로 전기자동차에 적용되는 인휠 모터 시스템의 상용화 및 대중화를 실현시키기 위해서 소형화, 경량화, 고효율, 고출력 등의 특성을 만족하는 전동기 개발이 요구되고 있다. 또한, 현재 다양한 산업 분야로 활용도가 올라가고 있는 드론의 경우에서도 드론의 체공시간 향상을 위하여 경량화 및 고출력을 만족하는 전동기 개발이 이루어지고 있다.

전동기 회전 유형에 따라서 Fig. 1과 같이 구분 할 수 있다. 외전형 전동기의 경우 내전형 동기 전동기와 비교 하였을 때 회전자의 반지름이 커서 관성이 크기 때문에 정속운전에 적합하다. 또한, 영구자석이 요크 안쪽에 위치하므로 비산의 문제가 없어 고속운전에도 적합하며, 마지막으로 영구자석 사용량을 비교적 크게 가져갈 수 있기 때문에 제자속을 향상시킬 수 있고, 큰 토크를 기대할 수 있다[1-3].

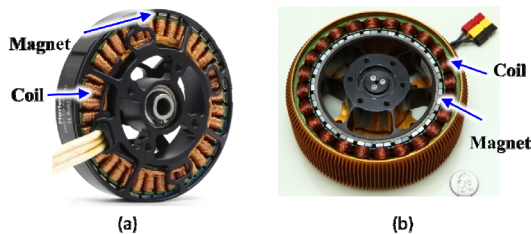


Fig. 1. Motor type according to rotor location
(a) External type motor (b) Internal type motor

현재까지 연구되고 있는 설계 기법으로는 희토류 영구자석을 이용한 전동기의 자기장하를 증가시키는 방법, 분할코어를 이용하는 기술 등이 연구되었다. 또한 영구자석의 최적의 극호율 선택으로 출력밀도를 향상시키는 설계 방법도 존재한다. 그러나 전기장하의 증가는 전동기 사이즈 및 동손 증가 문제 등을 감안할 때 출력 밀도 향상에 있어 한계점이 존재하게 되며, 높은 보자력을 지닌 희토류 영구자석 재질 적용을 통한 자기장하 증가를 통한 출력밀도 향상도 그 한계가 존재한다[4,5].

이러한 문제점을 해결하면서 출력 특성을 향상시키기 위해서는 영구자석의 성능을 향상시키고 철심의 무게를 최소화해야 한다. 극수가 증가하면 고정자와 회전자의 요크 두께를 줄일 수 있고, 이로 인한 철심 중량 저감 효과가 크기 때문에 다극으로 설계하는 것이 유리하다. 또한, 할바 어레이 자석을 적용하면 자속 집중 효과와 함께 회전자 요크 사용이 최소화되므로 무게를 크게 저감시킬 수 있다[6-8].

따라서 본 논문에서는 경량화 및 고출력화를 만족할 수 있도록 하는 다극 구조 및 할바 어레이 자석 적용에 따른 전자계 특성을 분석하는 설계 연구를 진행하였다.

2. 본론

2.1 기초모델 사양

영구자석의 다극 구조 및 할바 자석 어레이 적용에 따른 전동기 특성 분석을 진행하기 위해 현재 상용되고 있는 30mNm 정격 토크의 드론용 외전형 전동기의 사양을 Table 1과 같이 도출 하였다.

Table 1. Design specifications for commercial Drone Motor

Specification	Value	Unit
Torque	30	mNm
Speed	5600	rpm
Power	16	W
Back-EMF	580	mV
Rotor diameter	24	mm
Stator diameter	20.6	mm
Length	8	mm
Weight	17.8	g

Table 1을 이용하여 다극 구조 및 할바 자석 어레이 적용을 위해 Table 2와 같이 동일한 권선계수를 가지는 극수와 슬롯수 및 총 직렬 턴수를 선정하였다.

Table 2. Motor pole slot combination and design specification

Spec.	14p12s	28p24s	42p36s	56p48s	Unit
winding factor	0.966				-
number of serial turns	60				-
Resistance	0.36	0.21	0.33	0.34	Ω

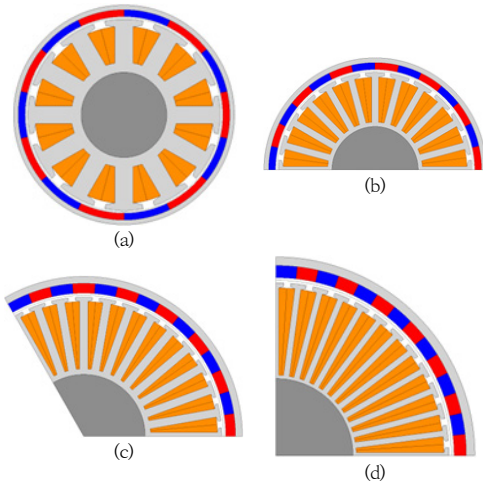
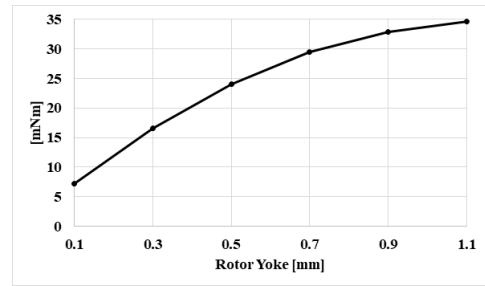


Fig. 2. Motor design
(a) 14p12s (b) 28p24s (c) 42p36s (d) 56p48s

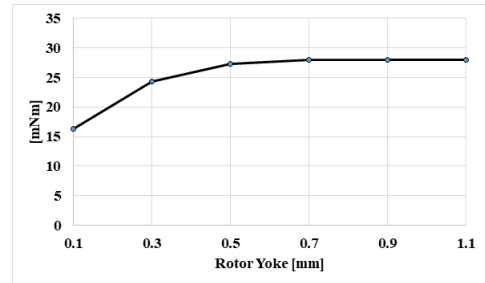
Table 2의 사양을 바탕으로 하는 4개의 전동기 모델을 Fig. 2와 같이 선정하였다. 경량화 및 고효율을 더 만족하는 모델을 도출하기 위하여 2.2절부터 유한요소해석을 통한 전자계 특성을 비교하였다.

2.2 극 슬롯 조합에 따른 출력 향상 한계 분석

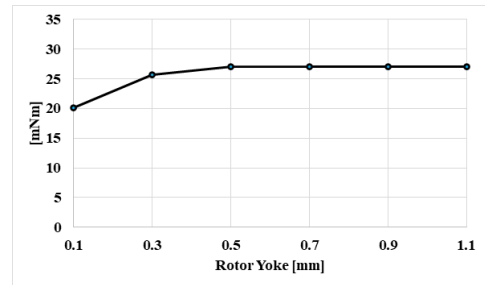
Fig. 2의 전동기 모델에 대하여 FEM 해석을 통해 요크 두께에 따른 토크를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 확인할 수 있듯이 상대적으로 다극에 포함되는 42극 36슬롯 모델과 56극 48슬롯 모델에서는 요크 두께를 계속 증가시켜도 약 25mNm 토크 이상 증가시키는데 한계점이 존재하는 것을 볼 수 있다. 반면, 저극에 속하는 14극 12슬롯 모델과 28극 24슬롯 모델에서는 요크 두께를 증가시키에 따라 토크도 꾸준하게 증가하므로 요구 토크가 고토크이더라도 만족시킬 수 있다.



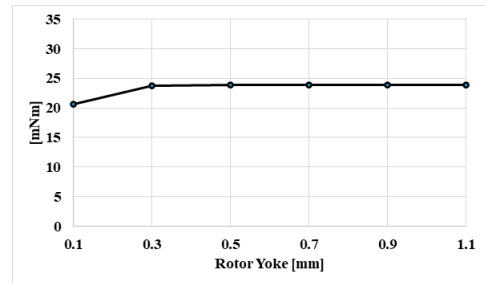
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3. Torque depending on yoke thickness
(a) 14p12s (b) 28p24s (c) 42p36s (d) 56p48s

일반적으로 전동기의 다극 다슬롯 구조는 저극 저슬롯 구조에 비해 회전자 요크의 포화도가 낮기 때문에 철심 사용량을 저감하여 경량화에 유리하게 된다. 그러나 다극 다슬롯 구조에서 극간 누설이 존재하기 때문에 출력 특성 향상에 한계가 존재한다는 문제점이 있다.

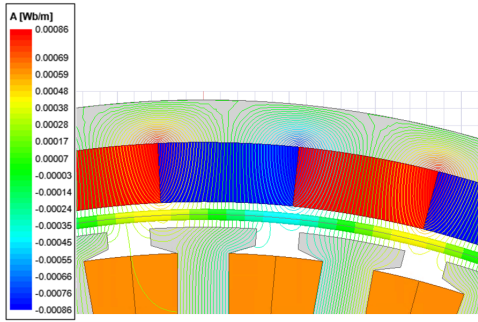


Fig. 4. Leakage flux between poles of 42p36s

Fig. 4는 다극 구조에서 발생하는 극간누설을 나타내었다. 즉, Fig. 3에서 나타나는 다극 다슬롯 구조에서의 토크 향상 한계의 원인으로 극간누설이 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 요구 토크가 고토크가 될 수록 다극 다슬롯 구조에서 존재하는 설계의 한계점을 저극 구조를 이용하면 고토크의 출력도 만족시킬 수 있게 된다. 그러나 요크 두께 증가에 따른 중량이 증가한다는 것이 문제점으로 발생하기 때문에 이를 해결할 필요가 있다.

2.3 할바 자석 어레이

할바 자석 어레이를 적용하게 되면 Fig. 5와 같이 영구자석 자속을 한방향으로 집중시킬 수 있다. 따라서 외전형에서 회전자의 요크의 사용량을 감소시킬 수 있으며, Eq. (1)과 (2)에 따라서 집중된 자속 ϕ_g 에 의해 토크 향상을 기대할 수 있다.

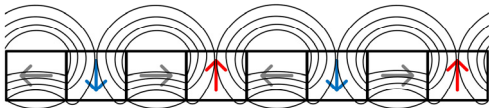


Fig. 5. Flux flow in Halbach array

$$e = N \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d\lambda}{dt} = p\omega_m \frac{2N_c\phi_g}{\pi} \quad (1)$$

$$T = \frac{2ei}{\omega_m} \quad (2)$$

Where, e denotes Back-EMF, N denotes coil turns, ϕ_g denotes air-gap flux, T denotes torque

Fig. 6은 14극 12슬롯 구조와 28극 24슬롯 구조에 대해서 경량화 설계를 진행하기 위해 할바 자석 어레이를 적용시켜 나타내었다.

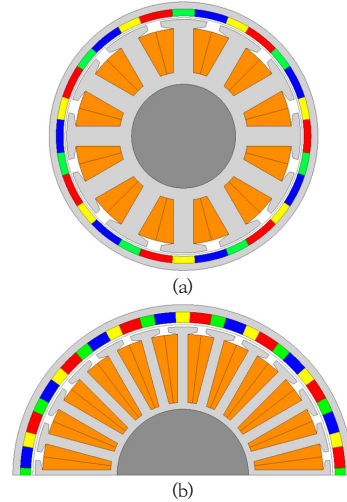


Fig. 6. Motor design with halbach array
(a) 14p12s (b) 28p24s

할바 자석 어레이를 적용하게 되면 주자속 쪽으로 자속이 집중됨에 따라, 회전자 요크를 얇게 하는 것이 가능하게 된다. 따라서, 기초 사양의 요구 토크를 만족하는 극 슬롯 구조에 할바 자석 어레이를 적용시킴으로써 출력 특성과 경량화 특성을 동시에 만족시킬 수 있다.

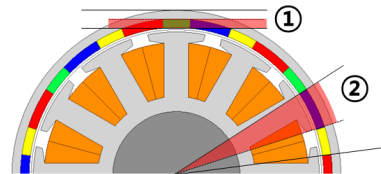
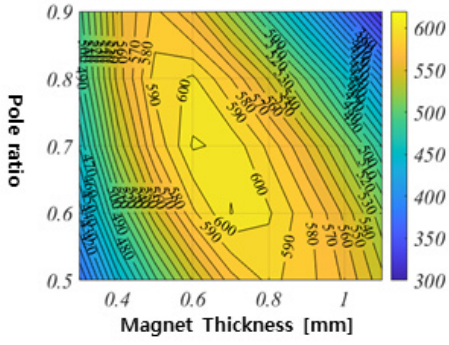
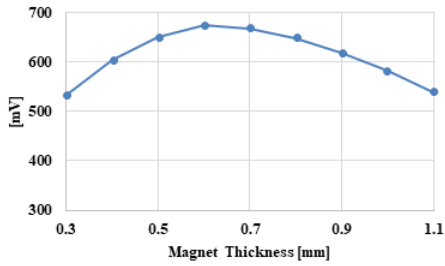


Fig. 7. Design variables of Halbach array structure

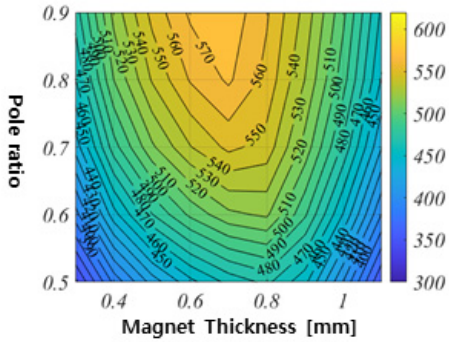
할바 어레이를 적용한 14극 12슬롯 모델과 28극 24슬롯 모델에 대한 설계 변수를 Fig. 7과 같이 극호출과 자석 두께로 선정하였고, 동일 외경에서 자석 두께가 증가하면 요크 두께가 감소하게끔 하였다. 또한, 출력 특성 비교를 진행하기 위해 할바 어레이를 적용하지 않은 동일한 극 슬롯 구조인 Fig. 2 (a), (b)도 함께 분석을 진행하였다.



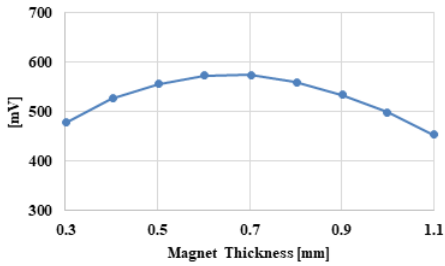
(a)



(b)

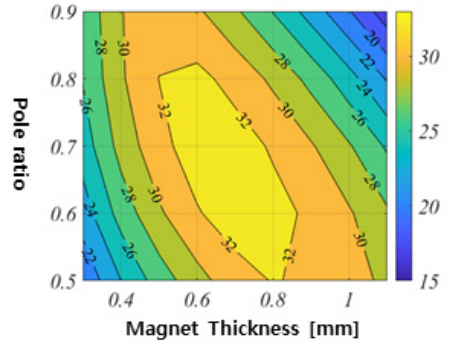


(c)

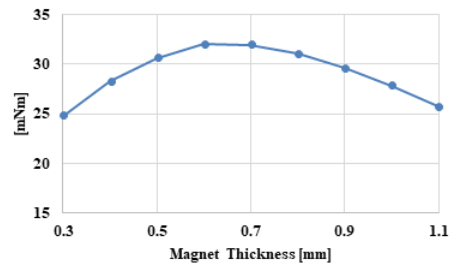


(d)

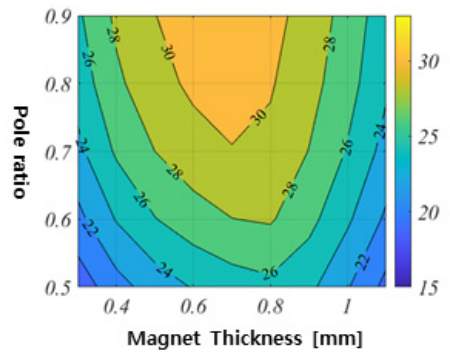
Fig. 8. Back-EMF according to design variables
 (a) halbach array 14p12s (b) non-halbach 14p12s
 (c) halbach array 28p24s (d) non-halbach 28p24s



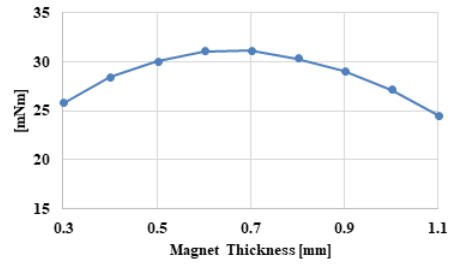
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 9. Torque according to design variables
 (a) halbach array 14p12s (b) non-halbach 14p12s
 (c) halbach array 28p24s (d) non-halbach 28p24s

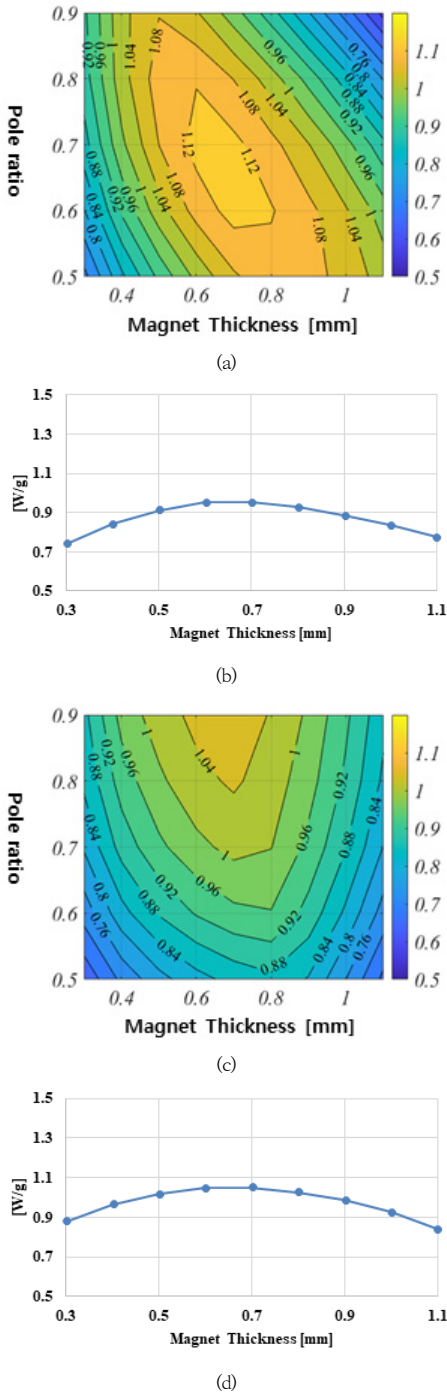


Fig. 10. Power density per weight according to design variables
 (a) halbach array 14p12s (b) non-halbach 14p12s
 (c) halbach array 28p24s (d) non-halbach 28p24s

Fig. 8~10에는 극 슬롯 조합과 할바 어레이 적용 유무에 따른 총 4개 모델에 대한 무부하 역기전력과 토크, 비출력밀도를 각각 나타내었다. 할바 어레이를 적용한 모델에 대해서는 Fig. 6과 같이 영구자석 두께뿐만 아니라 극호율에 따라 특성도 나타내었다.

Fig. 8과 Fig. 9의 (a), (b)를 비교하면 확인할 수 있듯이 14극 12슬롯 구조에서는 무부하 역기전력과 토크 모두 할바 어레이를 적용한 모델에서 제일 개선되는 지점이 존재한다. 또한, 토크가 향상되는 만큼 비출력밀도도 할바어레이를 적용했을 때 더욱 향상되는 것을 Fig. 10에서 확인 할 수 있다.

반면에 28극 24슬롯 모델에서는 할바 어레이를 적용한 경우보다 적용하지 않았을때 제일 개선되는 지점이 존재하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 타켓 전동기가 소형 전동기이므로, 이미 다극인 28극 구조에 할바 자석을 추가로 배치하여 영구자석 자체의 사이즈가 작아지게 되므로 발생하는 영구자석 자속량이 감소한 영향이 있는 것으로 판단할 수 있다.

2.4 최종 모델 특성

Fig. 11과 Table 3에서는 상술한 과정을 거쳐 할바 어레이가 적용된 최종 모델의 형상과 비교를 위한 할바 어레이를 적용하지 않은 모델 형상을 나타내었다.

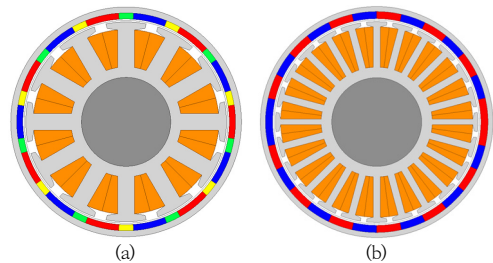


Fig. 11. (a) 14p 12s Final motor design (b) 28p 24s compare motor design

최종 모델은 14극 12슬롯 구조에 할바 어레이를 적용한 형상이다. 이때 출력 특성은 Table 1의 기존 모델들과 28극 24슬롯 모델과 비교하였을 때 토크, 출력 모두 향상 되었다. 또한, 14극 12슬롯과 28극 24슬롯 구조에 할바 어레이를 적용했을때와 적용하지 않았을때의 출력 밀도를 비교할 수 있다. 14극 12슬롯 구조는 할바 어레이를 적용하게 되면 출력밀도가 향상되었으며 28극 24슬롯 구조는 할바 어레이의 이점이 나타나지 않는 것을 확인 할 수 있다.

Table 3. Final model power characteristics

Specification	14p12s	28p24s	Unit
Torque	33.02	31.09	mNm
Power	18.21	16.6	W
Back-EMF	611.41	573.88	mV
Efficiency	81.4	80.7	%
Core loss	0.80	0.97	W
Copper loss	3.81	2.24	W
Weight	16.04	15.90	g
Power density without halbach array	0.96	1.05	W/g
Power density with halbach array	1.13	1.04	W/g

3. 결론

본 논문에서는 외전형 전동기의 극 슬롯 조합 및 할바 자석 어레이 적용에 따른 특성을 분석하였다. 먼저 다극 다슬롯 구조의 경우 요크의 포화도가 낮아짐에 따른 철심 사용량 저감이라는 이점을 가질 수 있다. 그러나 다극 구조에서 발생하는 극간 누설로 인하여 요구토크가 고토 크일수록 성능을 만족시키기 어렵다는 문제점이 있다. 이를 보완하기 위한 방안으로 저극의 할바 어레이를 적용시킨 모델에 대해 개선 설계를 진행하였다. 할바 어레이를 적용한 모델과 적용하지 않은 모델에 대하여 출력 특성을 분석하였다. 14극 12슬롯 구조의 전동기에서는 할바 어레이를 적용했을 때 무부하 역기전력, 토크가 향상되었다. 이때 요크의 철심 사용량 또한 저감되어 중량도 감소되었으며, 이는 비출력밀도도 향상 되는 것으로 나타났다. 반면에 28극 24슬롯 구조는 영구자석 사이즈 감소로 인한 출력 저하가 할바 어레이를 적용으로 얻게 되는 출력 향상보다 크기 때문에 할바 어레이를 적용하지 않은 경우에서 출력 특성이 더 향상되었다. 따라서, 전동기의 중량 자체는 할바 어레이가 없는 28극 24슬롯 모델이 더 가볍지만 비출력밀도를 비교하게 되면 출력이 더 우수한 14극 12슬롯의 할바 어레이를 적용한 모델이 더 우수한 특성을 가지는 것을 알 수 있다.

References

- [1] Mucahit Soyaslan, "External Rotor BLDC Motor Design for a Light Electric Vehicle: 24 Slot/22 Pole Combination", 2023 18th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), Varna, Bulgaria, Art no. 23548123, pp.1-4, Jun. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELMA58392.2023.10202463>
- [2] Wenzhe Deng, Shuguang Zuo, Wei Chen, Zhe Qian, Cheng Qian, Wenping Cao, "Comparison of Eccentricity Impact on Electromagnetic Forces in Internal- and External-Rotor Permanent Magnet Synchronous Motors" RIEEE Transactions on Transportation Electrification, Vol.8, No.1, pp.1242-1254, Mar. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1109/TTE.2021.3112521>
- [3] Mengmeng Tian, Xiuhe Wang, Wenliang Zhao, Hailiang Cai, Pu Zhao, "Study on the Pole-slot Combination of Low Power Series Pole Changing Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor" 2023 IEEE 18th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Ningbo, China, Art no. 23706229, pp.1-5, Aug. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIEA58696.2023.10241775>
- [4] B.V. Ravi Kumar, K. Siva Kumar, "Design of A New Dual Rotor Radial Flux BLDC Motor with Halbach Array Magnets for an Electric Vehicle" 2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Trivandrum, India, Art no. 16852360, pp.1-5, Dec. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/PEDES.2016.7914552>
- [5] Junlong Li, Yongxiang Xu, Jibin Zou, Qian Wang, Weiyang Liang, "Analysis and Reduction of Magnet Loss by Deepening Magnets in Interior Permanent-Magnet Machines With a Pole/Slot Ratio of 2/3" IEEE Transactions on Magnetics, Vol.51, No.11, pp.1-4, Nov. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2015.2445787>
- [6] Lorenzo Piscini, Daniel Matt, Anthony Gimeno, "Comparison of different Surface Mounted Permanent Magnet patterns", 2018 IEEE Student Conference on Electric Machines and Systems, Huzhou, China, Art no. 18437938, pp.1-7, Dec. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/SCEMS.2018.8624677>
- [7] Licong Duan, Hailing Lu, Chaohui Zhao, Hebiao Shen, "Influence of Different Halbach Arrays on Performance of Permanent Magnet Synchronous Motors" 2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA), Dalian, China, Art no. 19913637, pp.1-5, Jun. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICAICA50127.2020.9182625>
- [8] Tobias Tymosch, Manuel Fischer, Vasken Ketchedjian, Yutaka Terao, Hiroyuki Ohsaki, "Analysis of Superconducting Synchronous Motors With Halbach Array Field Excitation" IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.31, No.2, pp.1-5, Mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2020.3041314>

박 예 지(Ye-Ji Park)

[정회원]



- 2017년 2월 : 한경대학교 전기전자제어공학부 졸업
- 2017년 3월 ~ 2023년 8월 : 한양대학교 공과대학 전기공학과 (공학 박사)
- 2023년 9월 ~ 현재 : 원광대학교 전기공학과 박사후연구원

<관심분야>

전기기기, 전동기 설계

진 창 성(Chang-Sung Jin)

[정회원]



- 2001년 3월 ~ 2003년 2월 : 한양대학교 공과대학 전기공학과 (공학 석사)
- 2003년 2월 ~ 2007년 6월 : 대우일렉트로닉스 선임연구원
- 2007년 3월 ~ 2011년 2월 : 한양대학교 공과대학 전기공학과 (공학 박사)
- 2011년 2월 ~ 2018년 3월 : 한화지상방산 국방로봇팀 책임연구원
- 2018년 4월 ~ 현재 : 원광대학교 전기공학과 조교수

<관심분야>

전기기기, 모터 설계 및 제어