

전기자 형태의 회전자를 갖는 하이브리드 마그네틱 기어의 구조에 관한 연구

김찬승* · 박의종* · 김용재**

A Study on the Structure of Hybrid Magnetic Gear with Armature Type Rotor

Chan-Seung Gim* · Eui-Jong Park* · Yong-Jae Kim**

요약

풍속이 급변할 경우 전력계통 시스템과 기계시스템의 안전을 위해 풍력발전기를 제동시킨다. 이 때, 풍력발전기 내부의 기어박스에서 기어 이의 접촉하중으로 인한 기어의 손상 및 파손이 발생하며, 브레이크를 이용한 제동시 블레이드의 동력을 그대로 전달받아 마찰열 상승, 브레이크의 성능 저하 등의 문제가 있다. 본 논문은 풍력발전 시스템의 동력전달장치인 기계식 기어의 접촉에 의한 문제를 해결하기 위해 동력 차단 시스템을 결합시킨 하이브리드 마그네틱 기어의 형상을 제안한다. 이차원 유한해석법을 활용하여 하이브리드 마그네틱 기어의 형상에 따른 토크와 손실 분석을 통해 풍력발전 시스템에 적합한 하이브리드 마그네틱 기어의 형상을 도출하였다.

ABSTRACT

When the wind speed changes rapidly, the wind turbine is stopped for the safety of the power system and the mechanical system. At that moment, the wind turbine gearbox is damaged and broken due to the contact load of the gearbox. In addition, the problems such as increasing frictional heat and deterioration of the brake occur, because the power of the blades is transmitted directly to the brakes. This paper proposes a hybrid magnetic gear shape that solves the problem caused by the contact of the mechanical gear, which is the power transmission device of the wind power generation system, and the power cutoff system. The shape of the hybrid magnetic gear suitable for the wind power generation system is derived through the torque and loss analysis according to the shape of the hybrid magnetic gear by using the two dimensional finite analysis method.

키워드

Wind Turbine, Magnetic Gear, Torque, Iron Loss, Finite Element Analysis
풍력 발전기, 마그네틱 기어, 토크, 철손, 유한 요소 해석

1. 서론

재생에너지 3020 정책이 시행됨에 따라 풍력발전

분야는 국내에서 각광받고 있는 산업이며, 풍력발전시스템에 적용되는 발전기는 크게 동기발전기와 유도발전기를 채용한 두 가지 형태로 존재한다[1]. 발전기

* 조선대학교 전기공학과(ozaki9291@gmail.com, puji1988@chosun.ac.kr)

** 교신저자 : 조선대학교 전기공학과

• 접수일 : 2018. 09. 07

• 수정완료일 : 2018. 10. 26

• 게재확정일 : 2018. 12. 15

• Received : Sep. 07, 2018, Revised : Oct. 26, 2018, Accepted : Dec. 15, 2018

• Corresponding Author : Yong-Jae Kim

Dept. of Electrical Engineering, Chosun University,

Email : kimyj21@chosun.ac.kr

운용 시 유도 발전기는 반드시 계통과 연계시켜 운전되어야 하지만, 동기발전기는 계통연계 없이 독립운전이 가능한 이점이 있다. 그러나 유도발전기는 동기발전기에 비해 설비단가, 크기, 유지보수에 유리하여 풍력 발전을 포함한 신재생에너지의 전력설비에 주로 유도발전기를 채용하고 있다[2].

유도발전기는 설계 및 제작, 유지 보수의 편리성을 고려하여 권선형 대비 간단한 구조를 갖는 농형 구조를 사용한다. 그리고 회전자계를 외부 전원으로로부터 받아서 회전자를 회전자계보다도 약간 빠른 회전속도(통상 1-2%)로 구동하여 전력을 발생시킨다[3]. 만일, 동기속도 이하에서 유도발전기를 계통에 투입시키면 돌입전류가 최대 부하전류 이상으로 급격히 증가하여 전압 강하를 발생시키기 때문에, 콘덴서를 접속하여 무효전력을 공급해 주어야 한다[4-5].

상기 문제들을 해결하기 위한 [6-8]와 같은 선행연구들이 수행되고 있으며, 기존의 연구들은 블레이드 제어를 통해 블레이드의 날과 바람이 닿는 면적을 변화시킴으로써 부하 및 회전속도를 제어하거나 인버터 제어를 통한 전력 제어 등 다양한 방법들을 제안하였다. 하지만 회전중인 풍력터빈의 블레이드 제동 시 발생하는 부하의 변동은 블레이드와 발전기 사이에서 동력을 전달하는 기어에 기계적인 스트레스를 발생시킨다. 현재 풍력발전시스템에 사용되는 기계식 기어는 정확한 속도비와 높은 전달 효율로 동력을 전달하지만 제동 시 기어 이의 접촉 구간에서 발생하는 전달 하중의 급격한 변화로 기어 이의 표면피팅을 유발하며, 방지할 경우 기어의 파손을 초래한다[9].

이와 같은 문제점을 보완하기 위해 최근 [10-14]과 같은 물리적인 접촉이 없으며 자기적인 결합으로 기어의 특성을 나타내는 마그네틱 기어에 대한 연구가 이루어지고 있다. 마그네틱 기어는 기계적으로 이격된 상태에서 영구자석의 자력을 이용한 비접촉 동력전달 방식을 채택한 차세대 기어이다. 이러한 마그네틱 기어는 풍력터빈의 블레이드와 연결된 구동축을 직접 제동하지 않고 발전기와 연결된 피동축만을 제동함으로써 발전기를 정지시킬 수 있는 장점이 있다. 하지만 상기의 제동 방식은 두 회전자의 영구자석 사이에서 발생하는 강한 흡인력, 반발력에 의해 회전자 정지 시 강한 디텐트 토크가 발생하기 때문에 브레이크를 사용한 피동축 제동에 어려움을 유발한다[15].

따라서, 본 논문에서는 자력을 차단시킴으로써 자석의 흡인력과 반발력을 줄이고 피동축 제동에 도움이 되는 하이브리드 마그네틱 기어를 제안한다. 하이브리드 마그네틱 기어는 슬롯에 코일을 감는 전기자 구조를 활용하여 전원 인가 시 일반적인 마그네틱 기어와 동일하게 운전하며, 전원 차단 시 회전자 사이에서 발생하는 힘을 줄여 브레이크 제동에 유리한 기기이다. 크기 및 운전 효율을 고려하여 내측회전자와 외측회전자 중 하나를 전기자로 대체하였으며, 이에 따라 나타나는 기어의 특성을 비교분석하여 토크밀도, 손실, 효율에 유리한 하이브리드 마그네틱 기어의 구조를 도출하였다.

II. 풍력 발전 시스템

2.1 풍력발전기의 일반적 구조

풍력발전기란 블레이드로 전달된 공기의 운동에너지를 풍력터빈 내 발전기로 전달하여 전기에너지로 변환시키는 기술이다. 풍력발전기는 날개축이 회전하는 방향에 따라 수평형과 수직형으로 구분 짓는다. 그림 1은 풍력발전기의 일반적인 구조이며, 대기의 운동에너지를 이용하여 회전하는 Blade와 Hub로 구성되어 있는 회전부, 회전속도를 증속시켜 발전기를 구동하는 증속부(기어박스), 발전기와 각종 안전장치를 제어하는 제어부, 유압 브레이크 장치와 전력 제어 장치 및 철탑 등으로 구성된다[2],[4].

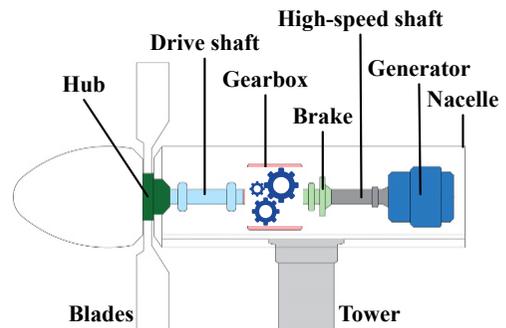


그림 1. 풍력발전기의 구조
Fig. 1 Structure of wind turbine

2.2 풍력 유도 발전기의 발전

풍력발전은 전력계통이 부하가 되어 발전전력을 계통에 넘겨주어 유도기가 전동기로 동작하던 발전기로 동작하던 여자전류를 공급받아야 한다. 여자전류를 공급하기 위해서는 발전기 출력단에 캐패시터를 병렬로 연결하는 자기여자 방식과 인버터를 이용한 여자방식이 존재한다. 캐패시터를 이용한 자기여자 방식은 풍속의 변화에 따라 출력전압이 변화하며 임계속도에서는 유기전압이 발생되지 않아 발전기 가동을 정지해야 한다. 인버터를 이용한 여자방식의 경우 배터리를 이용하여 초기 여자전류를 공급하고 동기속도 이상으로 회전 시 인버터에 의한 여자전류를 공급하여 전력을 배전계통으로 공급하는 발전기로 운용한다. 하지만 비동기 속도에서 계통에 투입할 경우 돌입전류의 유입으로 부하전류의 급격한 증가와 계통 전압의 급격한 감소로 정상 상태에서 계통의 전체 전류가 감소하므로 구동을 멈추어야 한다[2, 5].

III. 마그네틱 기어

3.1 마그네틱 기어의 구조 및 원리

풍력발전 시스템에서는 풍속이 급격히 변화하거나, 높은 속도로 회전할 경우 풍력발전 시스템의 효율을 고려하여 풍력발전기를 정지시키며, 정지 시 기어박스에서는 기어 이의 접촉하중의 변화에 따른 접촉응력의 변화로 기어의 마모 및 파손의 위험이 있다[9]. 이에 따라 기계식 기어를 대체하기 위한 비접촉식 자기적 동력전달이 가능한 마그네틱 기어에 대한 연구가 이루어지고 있으며, 그림 2는 일반적인 마그네틱 기어를 나타낸다.

마그네틱 기어는 크게 3개의 영역으로 분류할 수 있으며, 그림 2와 같이 내측회전자, 외측회전자, 폴피스로 구성된다. 내측회전자와 외측회전자는 영구자석을 부착할 수 있는 철심과 회토훈계 영구자석으로 구성되며, 동력을 전달 받아 서로 반대방향으로 회전한다. 마그네틱 기어의 독특한 구조물인 폴피스는 내측회전자와 외측회전자를 자기적으로 결합시켜주는 역할을 하며, 공간고조파를 발생시켜 마그네틱 기어가 일정한 기어비를 가지고 접촉 없이 자기적으로 동력을 전달할 수 있도록 한다.

마그네틱 기어의 폴피스의 개수 N_s 는 식 (1)에 의해 결정되며, p_1 , p_2 는 마그네틱 기어의 내측회전자와 외측회전자의 쌍극수를 나타낸다.

$$N_s = p_1 + p_2 \quad (1)$$

마그네틱 기어의 기어비 G_r 은 식 (1)에 의해 결정되고, ω_1 , ω_2 는 내측회전자와 외측회전자의 회전속도를 나타내며, 음의 부호는 내측회전자와 외측회전자의 회전방향이 서로 반대방향임을 의미한다.

$$G_r = \frac{p_2}{p_1} = -\frac{\omega_1}{\omega_2} \quad (2)$$

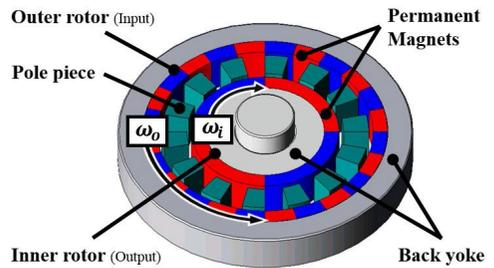


그림 2. 일반적인 마그네틱 기어의 구조
Fig. 2 Structure of conventional magnetic gear

IV. 하이브리드 마그네틱 기어

4.1 전기자를 적용한 하이브리드 마그네틱 기어

일반적인 마그네틱 기어는 제동 시 영구자석과 폴피스의 상호작용에 의한 강력한 토크가 발생하며 이는 브레이크를 이용한 제동 시 강한 마찰을 일으키는 원인이 된다. 이에 따라 제동 과정에서 발생하는 마찰열은 브레이크 시스템의 디스크 및 패드의 열 변형, 마멸 및 열 크랙 등의 문제를 발생시켜 제동능력 저하, 시스템의 안정성을 위협한다[15].

본 논문에서는 이러한 문제 해결을 위해 회전자의 구조를 전기자 형태로 채택한 하이브리드 마그네틱 기어를 제안한다. 그림 3과 같은 하이브리드 마그네틱 기어를 선정하여 특성을 비교분석하였으며, 그림

3-(a)는 내측회전자에 전기자를 사용한 Model A 나타내며, 그림 3-(b)는 외측회전자에 전기자를 사용한 Model B를 나타낸다. 두 모델의 증속비는 1:3.333이며, 외측회전자는 1200rpm, 내측회전자는 4000rpm의 속도로 회전하며 동력을 전달한다.

표 1은 두 모델의 제원을 나타내며, 전기자 코일에 흐르는 전류밀도는 1.59A/mm²이다. 영구자석의 사용량에 따라 기어의 체적 및 출력 등이 결정되므로, 두 모델의 영구자석 사용량을 비슷한 수준으로 맞추었다.

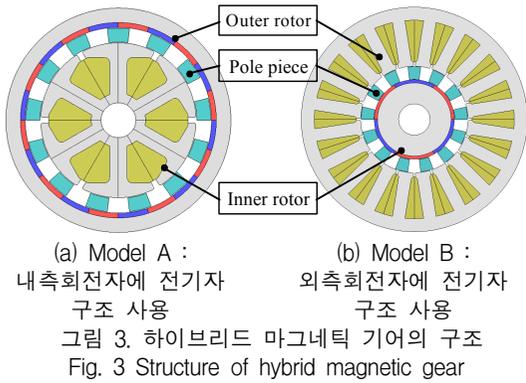


표 1. Model A, B의 제원
Table 1. Specifications of model A and model B

	Model A	Model B	Unit
Magnet B _r	1.28		T
Steel material	35JN230		-
Inner rotor diameter	100	76	mm
Outer rotor diameter	145	215	mm
Stack length	82	125	mm
Weight	6.90	28.84	kg
Volume	Magnet	85.76	86.00
	Total	455.94	530.84

4.2 정상상태에서의 입력 및 출력 토크 비교

앞 서 선정된 모델 A, B의 특성을 비교 분석하기 위하여 2D-FEA 모델을 활용한 유한요소해석법을 이용하였으며, 두 모델을 분석함으로써 기어 특성에 유리한 하이브리드 마그네틱 기어의 구조를 선정하고자 한다. 본 논문에서는 모델 A, B의 토크, 손실 특성을

분석하고, 전류를 차단 시 발생 토크를 확인하였다.

그림 4와 그림 5는 Model A와 B의 정상상태 시 출력을 나타낸다. 그림 4는 발전기와 연결되는 내측회전자의 전달토크를 나타내며, Model A의 출력 토크는 2.44Nm이며 Model B의 출력 토크는 2.42Nm로 두 모델의 출력 토크는 0.02Nm의 차이를 보인다. Model A의 출력 토크리플은 10.4%이며, Model B는 Model A 대비 70.8%p 큰 81.2%의 토크리플을 갖는다.

그림 5는 구동축으로써 블레이드와 직접 연결되는 외측회전자에서 발생하는 토크를 나타낸다. Model A의 구동 토크는 9.17Nm의 값을 가지며, Model B의 구동 토크는 10.55Nm의 값을 갖는다. 2.4Nm의 동일 토크를 출력하기 위해서 Model B의 구동 토크가 Model A 대비 1.38Nm의 더 크다. 구동 시 외측회전자의 토크리플은 Model A는 9.8%이며, Model B는 0.4%로써 Model A의 토크리플이 9.4%p의 큰 값을 가진다.

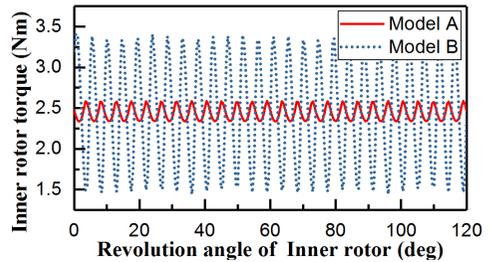


그림 4. Model A, B의 내측 회전자 토크
Fig. 4 Inner rotor torque of model A and B

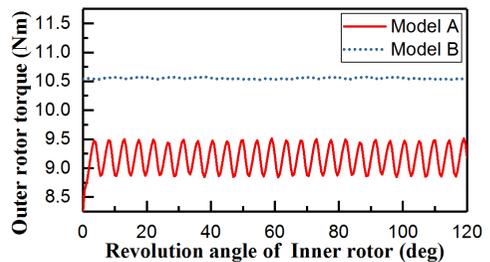


그림 5. Model A, B의 외측 회전자 토크
Fig. 5 Outer rotor torque of model A and B

4.3 정상상태에서의 철손 비교

영구자석을 사용하는 회전기에서 발생하는 철손은 효율 및 온도 상승의 원인이 되므로 본 절에서는

두 모델의 정상상태 시 발생하는 철손을 비교분석하였다. P_i 는 철손을 나타내며 P_h , P_e 는 각각 히스테리시스 손과 와류손을 나타낸다. 철손은 식 3과 같이 히스테리시스 손과 와류손의 합으로 결정된다.

$$P_i = P_h + P_e \quad (3)$$

히스테리시스 손은 식 4에 의해 결정되며, \sum_e 각 요소들의 합을 나타내며, H 는 자계의 세기, B 는 자속밀도, V_e 는 유한요소의 부피 즉, 철의 전체 체적을 나타낸다.

$$P_h = \sum_e \left[\left(H \cdot \frac{dB}{dt} \right) \times V_e \right] \quad (4)$$

철손은 식 5에 의하여 결정되며, d 는 강판의 두께, f 는 회전주파수, k 는 강판의 비례상수, ρ 는 강판 재질의 비저항, D 는 강판 재질의 밀도를 나타낸다.

$$P_e = \frac{\pi^2 B^2 d^2 f^2}{6k\rho D} \quad (5)$$

표 2와 그림 6은 위 식에 근거하여 채교하는 자속에 의해 발생하는 철손을 나타내며, Model B가 Model A보다 559.76W만큼 큰 664.00W의 손실을 가지는 것을 확인할 수 있다.

4.4 전기자 코일 전류 차단 시 발생 토크 비교

본 절에서는 두 모델의 전류 차단 시 발생하는 토크를 비교하여 브레이크 제동에 유리한 모델 형상을 확인하였다. 그림 7은 각 모델의 전기자 코일에 인가되는 전류를 차단하여 피동축 제동 시 발생하는 토크를 나타내며, 피동축 제동 시 내측회전자에 가해지는 Model A의 최대 토크는 0.32Nm이며, Model B의 최대 토크는 0.29Nm이다.

V. 결론

본 논문에서는 풍력발전기의 기계식 기어에서 발생하는 손실 방지와 제동 시 풍력발전 시스템의 안전을

위하여 마그네틱 기어의 피동축 제어 시 발생하는 토크를 완화시킬 수 있는 하이브리드 마그네틱 기어를 제안하였다. 이에 따라 전기자를 외측회전자에 적용하는 것과 내측회전자에 적용하는 것에 따른 두 개의 구조에 대한 형상 분석을 수행하였다.

전체 영구자석 사용량과 전류밀도, 점적률, 토크가 같은 2D-FEA모델을 설계하여 체적, 토크 특성, 손실

표 2. Model A, B의 철손
Table 2. Iron loss of Model A and B

Iron loss (W)	Model A	Model B
Inner Yoke	65.09	3.18
Outer Yoke	19.97	629.84
Pole Pieces	19.18	30.98
Total	104.24	664.00

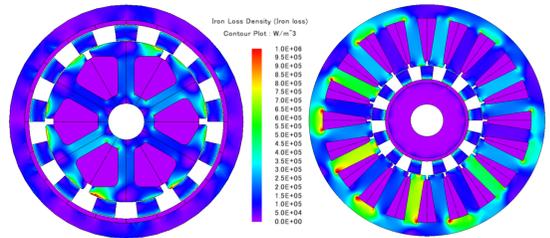


그림 6. Model A, B의 철손
Fig. 6 Iron loss of Model A and B

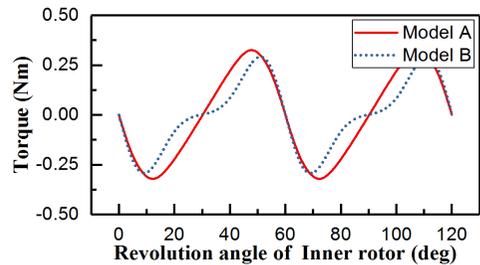


그림 7. 제동 시 Model A, B의 발생 토크
Fig. 7 Torque when Model A and B stopped

에 대하여 비교하였다. 그 결과, 내측회전자에 전기자를 적용한 모델 A의 체적은 외측회전자를 전기자로 대체한 모델 B 대비 3025.24cm³만큼 작았으며, 동일한 출력토크를 얻기 위한 구동토크가 1.37Nm만큼 낮았다. 철손 또한 559.76W만큼 적은 104.24W이며, 전

류 차단 시 피동축에서 발생하는 최대 토크는 0.32Nm이다.

본 논문에서 제안한 하이브리드 마그네틱 기어는 정상상태 구동 시 체적, 토크, 철손 측면에서 내측회전자를 전기자 형태로 가져가는 것이 바람직하다고 사료되며, 추후 연구를 통해 다양한 기어비 모델과 최적화 설계를 통해서 본 연구의 신뢰성, 정확성을 확보하고자 한다.

감사의 글

이 연구는 2017년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(10076577)

References

- [1] Huh and J. Lee, "A Study on The Modeling and Operation Control of A Variable Speed Synchronous Wind Power System," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 10, no. 8, 2015, pp. 935-944.
- [2] J. Kim, Y. Park, I. Kim, and Y. Kim, "Characteristics Analysis of Induction Generator with a Change in Rotor Speed," *Trans. of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 60, no. 12, 2011, pp. 2225-2229.
- [3] S. Heier, *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*, Hoboken: John Wiley & Sons, 1998.
- [4] K. Pankaj and J. Nelson, "Application Guidelines for Induction Generators," *IEEE Int. Electric Machines and Drives Conf.*, Milwaukee, Wisconsin, USA: May 1997, pp. WC1/5.1 - WC1/5.3
- [5] J. Kim, "Characteristics Analysis of 3-phase Induction Generator at the Unbalanced Load Operation," *Trans. of the Korean Institute of Electrical Engineers P*, vol. 56, no. 3, 2007, pp. 123-128.
- [6] K. Lee, W. Cho, J. Back, and I. Choy, "Design and Verification of Disturbance Observer based Controller for Windturbine with Two Cooperative Generators," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 12, no. 2, 2017, pp. 301-308.
- [7] Y. Lee, G. Lee, and Y. Nam, "Hydraulic Pitch Control device and Brake for Wind Turbines," *J. of Drive and Control*, vol. 8, no. 1, 2011, pp. 60-65.
- [8] J. Kim, Y. Park, and J. Kim, "Reduction of Inrush Current during Grid Interconnection of Squirrel Cage Induction Generator," *Proc. of KIIEE Annual Conf.*, Jeongseon, Korea, May 2017, pp. 14.
- [9] J. Lee, K. Lee, D. Lee, D. Lee, and S. Hwang, "Contact Stress Analysis of a Pair of Mating Spur Gears," *J. of Korean Society for Precision Engineering*, vol. 9, no. 4, 2010, pp. 59-65.
- [10] T. Lubin, S. Mezani, and A. Rezzoug, "Analytical Computation of the Magnetic Field Distribution in a Magnetic Gear," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 46, no. 7, 2010, pp. 2611-2621.
- [11] E. Park, S. Kim, S. Jung, and Y. Kim, "Correlation Analysis between Air Gaps and Torque Characteristics of Magnetic Gear," In *2016 Electrical Machinery and Energy Conversion Systems Society Spring Conf. of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Jeju, Korea, Mar. 2016, pp. 223-225.
- [12] K. Atallah, and D. Howe, "A Novel High-Performance Magnetic Gear," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 37, no. 4, July 2001, pp. 2844-2846.
- [13] C. Kim, E. Park, S. Kim, and Y. Kim, "An Study on Pole Piece Shape for Improving Torque Ripple of Magnetic Gears," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 12, no. 6, 2017, pp. 1065-1070.
- [14] S. Kim, D. Kim, D. Lee, C. Gim, and Y. Kim, "Analysis of Efficiency and Loss due to Number of Poles in Magnetic Gears," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 13, no. 5, 2018, pp. 1023-1028.
- [15] J. Nam, H. Ryou, and S. Cho, "Study for Characteristic of Frictional Heat Transfer in Rotating Brake System," *J. of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 18, no. 10, 2017, pp. 817-822.

저자 소개



김찬승(Chan-Seung Gim)

2017년 조선대학교 전기공학과
졸업
2017년~현재 조선대학교 대학원
전기공학과 석사과정

※ 관심분야 : 전기기기 설계 및 해석



박의중(Eui-Jong Park)

2013년 조선대학교 전기공학과
졸업
2015년 조선대학교 대학원 전기
공학과 석사 졸업
2017년 조선대학교 대학원 전기
공학과 박사과정 수료

2017년-현재 조선대학교 박사수료 후 연구원

※ 관심분야 : 전기기기, 모터 설계 및 해석



김용재(Yong-Jae Kim)

1996년 조선대학교 전기공학과
졸업
2003년 일본 무사시 공업대학 대
학원공학연구과 전기공학 석사졸
업

2006년 일본 무사시 공업대학 대학원공학연구과
전기공학 박사졸업

2007년-현재 조선대학교 전기공학과 교수

※ 관심분야 : 전기기기, 모터 설계 및 해석

