



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2019년 2월
석사학위 논문

풍력발전용 비접촉식 하이브리드 타입 동력전달장치에 관한 연구

조선대학교 대학원

전 기 공 학 과

김 찬 승

풍력발전용 비접촉식 하이브리드 타입 동력전달장치에 관한 연구

A Study on Non-Contact Hybrid Type Power
Transmission Device for Wind Power Generation System

2019년 2월 25일

조선대학교 대학원

전 기 공 학 과

김 찬 승

풍력발전용 비접촉식 하이브리드 타입 동력전달장치에 관한 연구

지도교수 김 용 재

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2018년 10월

조선대학교 대학원

전 기 공 학 과

김 찬 승

김찬승의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 조금배  (인)

위원 조선대학교 교수 김재홍  (인)

위원 조선대학교 교수 김용재  (인)

2018년 11월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT	vi
I. 서론	1
II. 이론적 고찰	3
A. 기계식 기어의 한계	3
B. 마그네틱 기어	6
1. 마그네틱 기어의 구조 및 원리	6
2. 마그네틱 기어의 한계	8
III. 하이브리드 마그네틱 기어의 모델링	9
A. 하이브리드 마그네틱 기어의 제안모델	9
B. 제안모델의 전자계 특성 해석	11
C. 하이브리드 마그네틱 기어의 모델 결정	16

IV. 여자형 내측회전자 하이브리드 마그네틱 기어 17

- A. 설계 사양 및 변수 선정 17
- B. 기어비에 따른 전자계 특성해석 24

V. 결론 32

참고문헌 34

LIST OF TABLES

Table 1. Specifications of hybrid magnetic gear	12
Table 2. Loss of hybrid magnetic gears	13
Table 3. The least number of permanent magnet poles of the inner & outer rotor each gear ratio	18

LIST OF FIGURES

Fig. 1. Structure of wind turbine	4
Fig. 2. 2008-2012 aggregated downtime per wind turbine subsystem (Source : NREL)	4
Fig. 3. Structure and exploded view of general magnetic gear	5
Fig. 4. Magnetic gear	6
Fig. 5. Structure of hybrid magnetic gear with excitation type inner rotor	10
Fig. 6. Structure of hybrid magnetic gear with excitation type outer rotor	10
Fig. 7. Contour plot of iron loss density of hybrid magnetic gear with excitation type inner rotor	14
Fig. 8. Contour plot of iron loss density of hybrid magnetic gear with excitation type outer rotor	14
Fig. 9. Contour plot of eddy current loss density of hybrid magnetic gear with excitation type inner rotor	15
Fig. 10. Contour plot of eddy current loss density of hybrid magnetic gear with excitation type outer rotor	15
Fig. 11. Hybrid magnetic gear model shapes in the same gear ratio	19
Fig. 12. B-H curve of the soft magnetic material(35JN230)	20
Fig. 13. Magnetic flux density of hybrid magnetic gear according to pole piece length	21

Fig. 14. Magnetic flux lines of hybrid magnetic gear according to pole piece length 21

Fig. 15. When the number of poles of the hybrid magnetic gear having the same total surface area is changed, the flux saturation of hybrid magnetic gears 22

Fig. 16. When the number of poles of the hybrid magnetic gear having the same total surface area is changed, the generated mesh of hybrid magnetic gears 23

Fig. 17. Power density of coaxial magnetic gear according to gear ratio 25

Fig. 18. Loss that occurs when the hybrid magnetic gear is operating each gear ratio 27

Fig. 19. Efficiency of the hybrid magnetic gear according to gear ratio 28

Fig. 20. Power density of the hybrid magnetic gear according to the number of poles 29

Fig. 21. Efficiency of the hybrid magnetic gear according to the number of poles 30

Fig. 22. Weighted score that considers both output density and efficiency of hybrid magnetic gear 31

ABSTRACT

A Study on Non-Contact Hybrid Type Power Transmission Device for Wind Power Generation System

Chan-Seung Gim

Advisor : Prof. Yong-Jae Kim, Ph. D.

Department of Electrical Engineering

Graduate School of Chosun University

When the wind speed changes rapidly, the wind turbine is stopped for the safety of power system and the mechanical system. At that moment, the wind turbine gearbox is damaged and broken due to high contact load of the gearbox. In addition, the problems such as increasing frictional heat and deterioration of the brake arise because the power of the blades is transmitted directly to the brake. 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. An optimized structure of the hybrid magnetic gear suitable for the wind power generation system is derived through the torque and loss analysis. Two excitation methods were compared and a better one was picked up from the loss analysis. The power density and efficiency have been analyzed and compared for all possible combinations of gear ratio and pole numbers in the selected excitation method. Two dimensional finite element method(FEM) was utilized for the analysis.

I. 서론

풍력발전은 환경문제, 에너지 고갈 문제가 대두됨에 따라 국제적으로 각광받고 있는 신재생에너지시스템 중 하나이다. 국제 풍력 에너지 협의회인 GWEC(Global Wind Energy Council)의 보고서에 따르면 2001년 23,900MW 수준이던 국제 풍력발전 설비용량이 2017년 539,581MW로 꾸준히 증설되고 있다[1]. 이러한 국제 동향에 발맞춰 국내에서는 재생에너지 3020 에너지 정책을 통해 2016년 1GW 수준이던 국내 풍력발전 설비용량을 2030년까지 17.7GW로 증설하기 위한 프로젝트가 진행중이다[2]. 풍력발전기에 대한 관심이 높아짐에 따라 풍력발전기의 전력공급 안정성과 신뢰성에 대한 문제가 대두되고 있으며, NREL(National Renewable Energy Laboratory) 및 IET Renewable Power Generation, E&T Magazine, Wind Energy 등에서 발표한 풍력발전시스템의 고장분석 결과에 따르면 전체 고장 원인의 15%, 고장시간의 20% 이상이 기어박스에서 발생함이 보고되었다[3-7]. 기어박스의 고장은 물리적인 접촉으로 인한 진동, 마찰 및 과부하에 의한 기어 이(Gear tooth)의 파손 등에 기인하며 [8-12]과 같은 기어의 파손을 예측 및 예방하기 위한 다양한 연구들이 수행되고 있다. 기어박스의 고장 문제는 물리적인 접촉이 원인이기 때문에 본 논문에서는 자력을 이용한 비접촉식 동력전달로 물리적인 접촉에 의한 문제가 발생하지 않는 마그네틱 기어를 제안하였다.

마그네틱 기어는 영구자석의 흡인력과 반발력을 이용하여 동력을 전달하기 때문에 기어 내부의 접촉에 따른 진동 및 파손의 문제에서 자유롭다. 하지만, 접촉 없이 동력을 전달하기 때문에 영구자석의 힘을 넘어서는 토크 발생 시 동력이 제대로 전달되지 못하고 탈조되는 문제가 있다. 이는 풍력발전기를 강한 바람에서 보호하기 위해 브레이크(Brake)를 작동시키면 마그네틱 기어의 탈조에 의한 진동 및 소음의 문제가 발생할 수 있음을 의미한다. 따라서 물리적인 접촉이 없는 마그네틱 기어의 장점을 살리면서 탈조에 의한 문제를 방지할 수 있는 새로운 구조의 마그네틱 기어에 대한 연구를 진행하고자 한다.

본 논문에서는 영구자석 대신 철심을 여자시켜 자속을 만들어내는 여자형 회전자를 사용하여 여자전류에 따른 자속의 변화로 기어비, 토크제어, 동력차단 등 운전 제어가 가능한 새로운 구조의 마그네틱 기어를 제안하고, 이를 하이브리드 마그네틱 기어로 명명하였다. 먼저, 여자형 내측회전자 타입과 여자형 외측회전자 타입의 두 가지 하이브리드 마그네틱 기어 구조를 제안하고, 2D 유한요소해석법(FEA:Finite Element Analysis)을 이용한 전자장 시뮬레이션을 통해 전체 기기의 크기와 효율에 유리한 구조를 채택하여 하이브리드 마그네틱 기어의 기본 구조를 선정하였다. 다음으로 동일한 출력조건 하에서 기어비와 극수가 다른 2D-FEA 모델을 설계하고, 기어비 및 극수의 분배에 따른 출력 및 효율 특성을 비교분석하였으며, 이를 통해 사이즈와 동특성에 유리한 하이브리드 마그네틱 기어의 기어비와 극수 조건을 도출하고자 한다.

II. 이론적 고찰

A. 기계식 기어의 한계

그림 1은 풍력발전기의 일반적인 구조를 나타낸다. 주요 구성 요소로는 회전을 담당하는 블레이드(Blades)와 허브(Hub), 블레이드의 동력을 발전기(Generator)로 전달 및 변환시키는 기어박스(Gearbox), 풍력발전기의 제동을 위한 브레이크(Brake)가 있으며, 그 밖에 블레이드와 기어박스를 연결하는 Drive shaft, 기어박스과 발전기를 연결하는 High-speed shaft 및 나셀(Nacelle), 타워(Tower)로 구성된다[12].

풍력발전기의 구성 요소 중 기어박스는 블레이드로부터 저속, 고 토크 형태의 동력을 입력받아 발전기를 구동하기에 충분한 고속, 저 토크의 동력으로 변환하는 역할을 한다. 기어박스 내 기계식 기어는 축바퀴의 기어 이(Gear tooth)를 서로 맞물려 힘을 전달함으로써 동력 전달이 가능하며, 기어 잇 수의 조합에 따라 회전축의 속도 비를 자유롭게 정확하게 선택할 수 있다. 그러나 기어 이의 물리적인 접촉에 의한 진동, 소음, 마찰에 의한 발열, 기어 이의 마모 및 파손 등의 문제가 발생한다[13]. 이를 예방하기 위해 윤활유와 같은 기름을 주입하거나 기어의 수명 시간을 예측하여 지속적인 모니터링과 기어의 교체가 이루어진다. 특히 마찰에 의한 기어의 손상 및 파손은 기계식 기어의 가장 큰 문제로 풍력발전기의 경우 기어손상은 장시간 운전 정지, 발전 계통 시스템의 문제를 야기할 수 있다. 그림 2는 2013 NREL(National Renewable Energy Laboratory) 보고서의 2008년부터 2012년까지 풍력발전시스템에서 발생한 총 고장시간에 대한 그래프이며, 2008년에서 2012년 동안 전체 고장시간의 20% 이상이 기어박스에 의한 사고임을 확인할 수 있다[5].

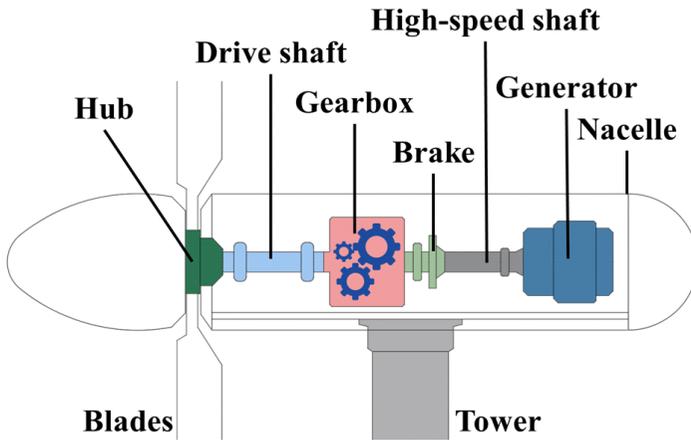


Fig. 1. Structure of wind turbine

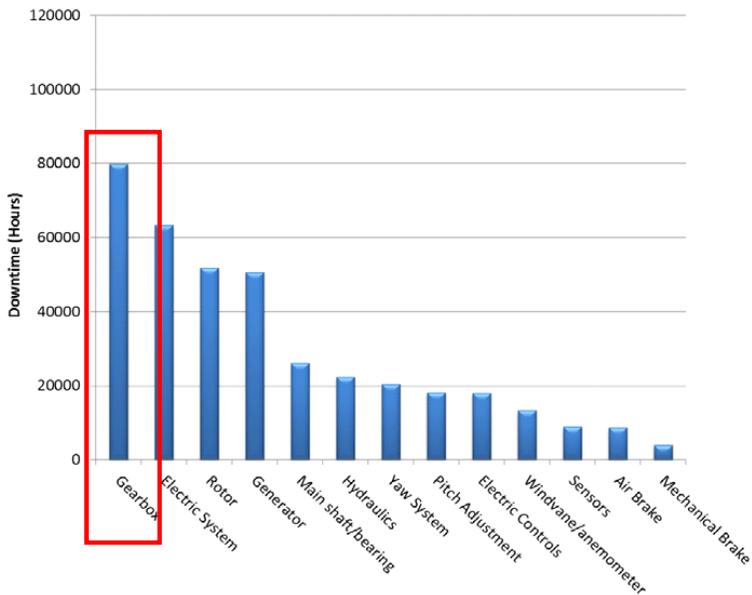


Fig. 2. 2008-2012 aggregated downtime per wind turbine subsystem (Source : NREL)

이러한 기계식 기어의 물리적인 접촉에 의한 문제를 개선하고, 동력을 전달할 수 있는 그림 3과 같은 새로운 형태의 기어인, 마그네틱 기어가 K.Atallah 등에 의하여 제안되었다[14]. 마그네틱 기어는 비접촉식 동력전달이 가능하여 소음 및 진동을 최소화할 수 있으며, 접촉에 의해 발생하는 분진 및 마찰이 없기 때문에 윤활유가 필요하지 않아 보수점검에 용이하다. 또한, 과부하 시 접촉면이 존재하지 않아 기계식 기어에서 발생하는 기어의 파손이 없다. 이러한 장점들은 기어 및 전체 시스템의 안정성 및 신뢰성 향상에 기여하며, 마찰에 의한 열손실, 기어 손상이 없어 고효율 구동과 더불어 최대토크를 정확히 전달할 수 있는 이점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 기어박스의 물리적인 접촉에 기인한 문제를 개선하고자 마그네틱 기어를 제안하였으며, 풍력발전시스템에 마그네틱 기어를 적용하기 위한 연구를 수행하였다.

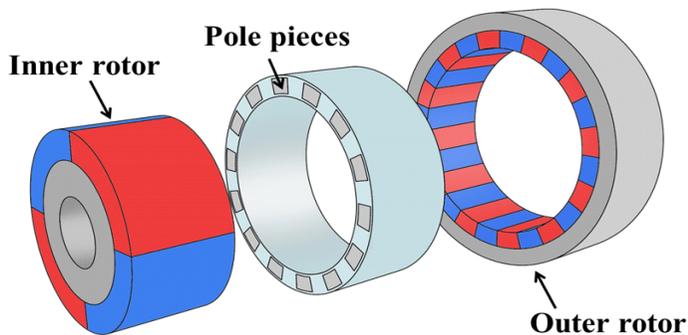


Fig. 3. Structure and exploded view of general magnetic gear

B. 마그네틱 기어

1. 마그네틱 기어의 구조 및 원리

마그네틱 기어는 서로 독립적으로 회전이 가능한 동심원 형태의 세 가지 회전자로 구성되어 있다. 각각의 회전자는 독립적으로 회전이 가능하며, 그림 4와 같이 Inner rotor, Outer rotor, Pole piece 총 3개의 영역으로 구성된다. Inner rotor와 Outer rotor에는 각각 영구자석이 부착되어 있으며, 높은 출력밀도를 얻기 위해 NdFeB계열의 영구자석을 사용한다. Inner rotor와 Outer rotor 사이에 존재하는 Pole piece는 두 회전자 사이의 공극자속을 변조시킴으로써 마그네틱 기어가 일정한 기어비를 유지하며 구동될 수 있도록 도와주는 역할을 한다[14-17].

Pole piece가 고정되어 있을 경우 Inner rotor와 Outer rotor가 서로 반대방향으로 회전하여 감속기 또는 증속기로 이용되며, Outer rotor가 고정된 경우 Inner rotor와 Pole piece가 같은 방향으로 회전한다. 본 논문에서는 Pole piece가 고정된 마그네틱 기어의 구동에 대한 연구를 수행하였으며, 이러한 구동에서 Outer rotor는 저속으로 회전하며 Inner rotor는 고속으로 회전한다[17].

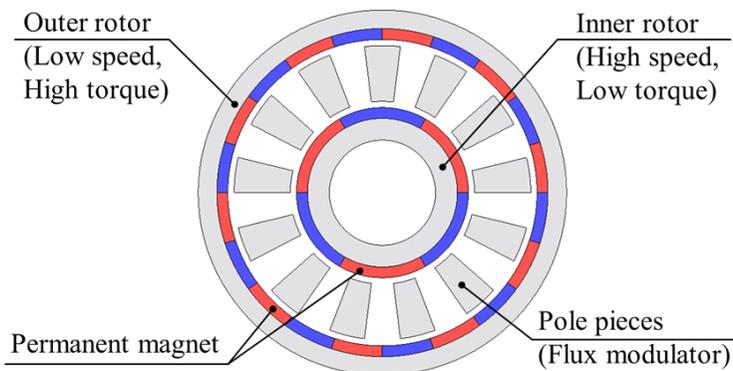


Fig. 4. Magnetic gear

마그네틱 기어의 Inner rotor의 영구자석 쌍극수가 p_{ir} , Outer rotor의 영구자석 쌍극수가 p_{or} 일 때, 식 (1)에 의하여 Pole piece의 개수 n_{pp} 가 결정된다[14-17].

$$n_{pp} = p_{ir} + p_{or} \quad (1)$$

또한, Inner rotor의 회전속도가 ω_{ir} , Pole piece의 회전속도가 ω_{pp} , Outer rotor의 회전속도가 ω_{or} 일 때, 식 (2)와 같이 정의된다[14-17].

$$\omega_{ir} = \frac{n_{pp}}{p_{ir}}\omega_{pp} - \frac{p_{or}}{p_{ir}}\omega_{or} \quad (2)$$

이러한 마그네틱 기어는 Pole piece가 고정된 상태에서 구동하는 방법과 Outer rotor가 고정된 상태에서 구동하는 방법으로 구분되기 때문에 하나의 마그네틱 기어에서 두 개의 기어비를 구현할 수 있다. 따라서 Pole piece를 고정한 상태에서의 기어비는 식 (3)과 같고 Outer rotor를 고정한 상태에서의 기어비는 식 (4)와 같다[14-17].

$$G_1 = \frac{p_{or}}{p_{ir}} \quad (3)$$

$$G_2 = \frac{n_{pp}}{p_{ir}} \quad (4)$$

2. 마그네틱 기어의 한계

풍력발전기는 강한 돌풍이 불 경우 설비와 시스템의 안전을 위해 브레이크를 이용하여 전체 시스템을 정지시킨다. 이 때, 블레이드로부터 동력을 전달 받아 저속, 고 토크로 운전하는 블레이드 측의 Drive shaft를 직접 제동할 경우 높은 정지 토크가 요구되기 때문에, 고속, 저 토크로 운전하는 High-speed shaft를 제동시켜 브레이크의 안정성 및 신뢰성을 확보한다. 하지만 마그네틱 기어가 적용된 풍력발전기의 High-speed shaft를 제동시킬 경우 다음의 문제를 고려해야 한다. 블레이드로부터 마그네틱 기어의 자력을 뛰어넘는 동력이 전달되면 자석의 흡인력에 의한 구속이 불가능하여 마그네틱 기어가 탈조된다. 즉, Drive shaft와 연결된 회전자는 지속적으로 회전하지만, 자석의 흡인력에 의하여 회전 시 힘을 받게 되며, 이는 기기의 진동 및 소음을 유발한다.

이러한 마그네틱 기어의 탈조 문제를 방지하면서 풍력발전기를 정지시키기 위해 다음 두 가지의 방법을 고려할 수 있다. 첫째, Drive shaft를 직접 제동하여 블레이드의 입력을 차단하는 방법이 존재한다. 그러나 High-speed shaft 대비 높은 제동토크가 요구되므로 브레이크 설비 및 유지보수 비용이 상승하는 문제가 존재한다. 둘째, 마그네틱 기어의 최대 토크를 높이는 방법이 있다. 하지만 영구자석의 힘을 이용한 마그네틱 기어는 자력이 고정되어 있기 때문에 최대 토크를 높이기 위해서는 마그네틱 기어의 사이즈 증대가 불가피하다. 따라서 본 논문에서는 자력 변동이 가능하여 경우에 따라 제어도 가능하도록 영구자석을 철심과 코일로 구성된 전자석으로 대체한 마그네틱 기어를 제안한다. 영구자석을 전자석으로 대체함에 따라 회전자의 구조가 모터의 일반적인 전기자 구조와 동일하고, NdFeB 계열의 영구자석이 가지는 높은 자속밀도를 이용하기 위해 Inner rotor 혹은 Outer rotor만을 변형한 새로운 구조의 마그네틱 기어를 제안하며, 이를 하이브리드 마그네틱 기어라 명명한다.

III. 하이브리드 마그네틱 기어의 모델링

A. 하이브리드 마그네틱 기어의 제안모델

하이브리드 마그네틱 기어는 영구자석을 전자석으로 대체한 마그네틱 기어이다. 철심과 코일로 구성된 전자석은 여자전류를 이용하여 자석의 세기를 쉽게 조절할 수 있기 때문에 자력의 변동이 불가한 기존의 영구자석형 마그네틱 기어의 한계를 개선할 수 있다. 영구자석을 자력을 제어할 수 있는 전자석으로 대체할 경우, 정격 이상의 토크가 발생하는 상황에서 여자전류를 증가시킴으로써 마그네틱 기어의 최대 토크 증가와 함께 운전영역의 확장이 가능해진다. 또한, 여자전류를 차단하여 자력을 이용한 동력 전달을 차단하거나 회생제동에 의한 브레이킹 시스템까지 구성할 수 있다. 따라서 하이브리드 마그네틱 기어는 기계식 기어의 물리적인 접촉으로 발생하는 문제와 마그네틱 기어에서 발생하는 제동 문제를 동시에 개선할 수 있다. 본 논문에서는 마그네틱 기어의 두 회전자 중 하나의 회전자에만 전자석을 적용한 모델을 검토하였다. 그림 5는 전자석을 적용한 회전자(여자형 회전자)를 Inner rotor에 적용시킨 구조(여자형 내측회전자)를, 그림 6은 여자형 회전자를 Outer rotor에 적용시킨 구조(여자형 외측회전자)를 나타내며, 각각의 형상은 Magnetic geared machine의 구조를 차용하였다[18-19]. 하이브리드 마그네틱 기어의 특성분석에는 2-D 유한요소법을 이용한 전자장 시뮬레이션을 사용하였다. III-C에서는 두 구조의 비교를 통해 사이즈 및 효율에 유리한 구조를 선정하였고, IV장에서는 선정한 구조의 기어비 및 극수에 따른 출력밀도와 효율특성을 분석하였다.

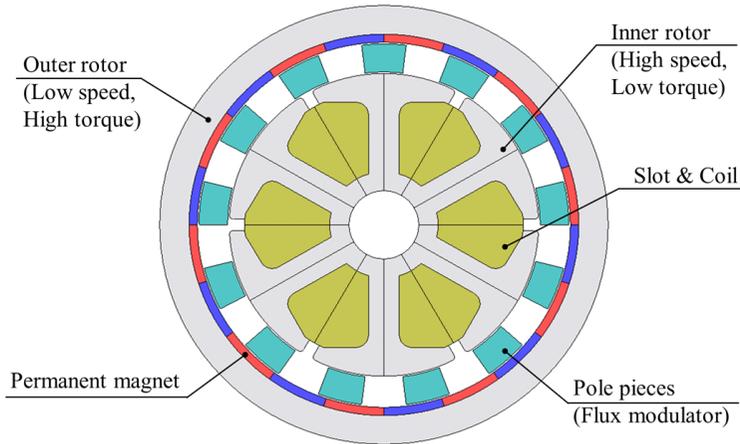


Fig. 5. Structure of hybrid magnetic gear with excitation type inner rotor

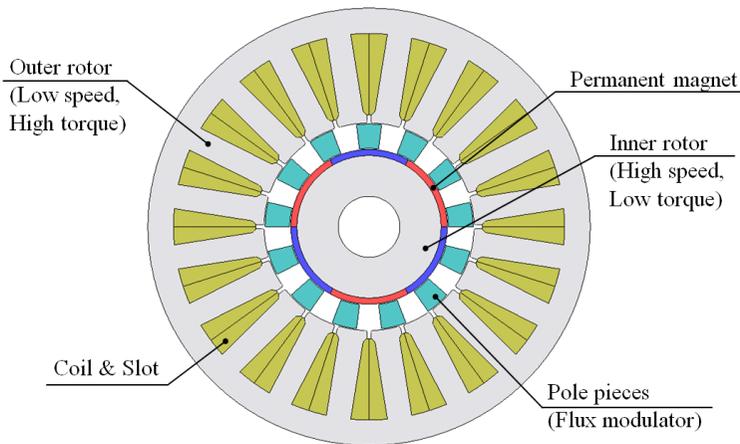


Fig. 6. Structure of hybrid magnetic gear with excitation type outer rotor

B. 제안모델의 전자계 특성 해석

전자계 해석을 통해 신뢰성 있는 효율을 예측하기 위해서는 손실 해석이 필요하다. 본 논문에서는 2-D 유한요소해석법을 이용하여 철심에서 발생하는 철손과 영구자석에서 발생하는 와류손, 그리고 코일에서 발생하는 동손을 해석하였다. 철손은 히스테리시스 손실과 와류손의 전체 손실로 결정되며, 각 요소별 히스테리시스 손실과 와류손은 식 5와 식 6의 지배방정식에 의해 결정된다[20-21].

$$P_h = k_h f B_m^k [W/m^2] \quad (5)$$

$$P_e = k_e f^2 B_m^2 [W/m^2] \quad (6)$$

여기서, P_h , P_e 는 각각 히스테리시스 손실과 와류손을 의미한다. B_m 은 자속밀도를 나타내며, 자속밀도는 단위면적당 자속의 양으로 결정되고 단위는 wb/m^2 이다. k_h 와 k_e , k 는 재료의 성질에 따라 정해지는 Steinmetz 상수이며, f 는 회전 주파수를 나타낸다.

코일에서 발생하는 동손은 다음 식 7에 의해 산정된다.

$$P_{coil} = I^2 r \quad (7)$$

여기서, P_{coil} 은 여자형 회전자에서 발생하는 동손을 나타내며, I 는 여자전류, r 은 코일의 저항을 의미하며, 코일의 저항은 다음 식 8에 의해 결정된다.

$$r = \rho \frac{l_{coil}}{A_{coil}} \quad (8)$$

여기서, ρ, A, l 은 각각 코일의 비저항, 코일의 길이, 코일의 단면적이다.

표 1은 두 모델을 비교하기 위해 설계한 하이브리드 마그네틱 기어의 제원을 나타낸다. 출력과 영구자석의 총 사용량이 동일한 조건 하에서 하이브리드 마그네틱 기어의 전체 사이즈 및 철 사용량을 비교하기 위하여 두 모델의 출력은 1kW, 영구자석의 사용량은 86cm³으로 동일하게 설계되었으며, 슬롯에 감긴 코일의 점적률은 38%이고 전류밀도는 5A/mm² 으로 고정하였다.

Table 1. Specifications of hybrid magnetic gear

		Excitation type		Unit
		Inner rotor	Outer rotor	
Inner rotor diameter		84	61.5	mm
Outer rotor diameter		126	135	
Stack length		85	156	
Volume	Inner yoke	184	338	cm ³
	Pole pieces	115	133	
	Outer yoke	247	935	
	Coil	28	31	
	Magnet	86	86	
	Total	660	1,523	
Weight		5.04	11.61	kg
Magnet B _r		1.0		T
Steel material		35JN230		-
Revolution speed	Inner rotor	4000		rpm
	Outer rotor	1200		
Slot fill factor		38		%
Current density		5		A/mm ²

표 2는 하이브리드 마그네틱 기어 구동 시 발생하는 손실들을 나타내며, 그림 7은 여자형 내측회전자의 철손, 그림 8은 여자형 외측회전자의 철손, 그림 9는 여자형 내측회전자의 와류손, 그림 10은 여자형 외측회전자의 와류손을 나타낸다. 철손의 경우 여자형 내측회전자 모델과 여자형 외측회전자 모델 모두 여자형 회전자의 철심에서 철손이 가장 높게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 여자형 외측회전자 모델이 여자형 내측회전자 모델 대비 철손은 323W만큼 큰 값을 나타내며, 영구자석에서 발생하는 와류손은 59W만큼 높은 값을 보인다.

Table 2. Loss of hybrid magnetic gears

		Excitation type		Difference (A - B)
		Inner rotor(A)	Outer rotor(B)	
Iron loss(W)	Inner Yoke	24	1	23
	Outer Yoke	9	351	-342
	Pole Pieces	10	14	-4
	Total	43	366	-323
Joule loss(W)	Permanent magnet	51	110	-59
	Coil	17	5	12
	Total	68	115	-47
Iron loss(W) + Joule loss(W)		111	481	-370

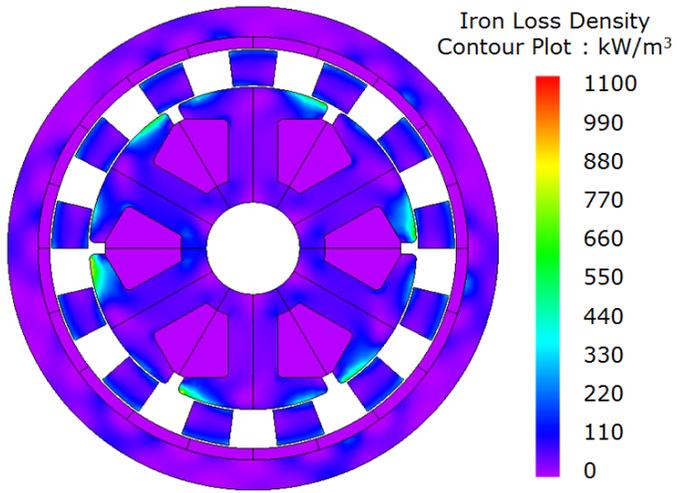


Fig. 7. Contour plot of iron loss density of hybrid magnetic gear with excitation type inner rotor

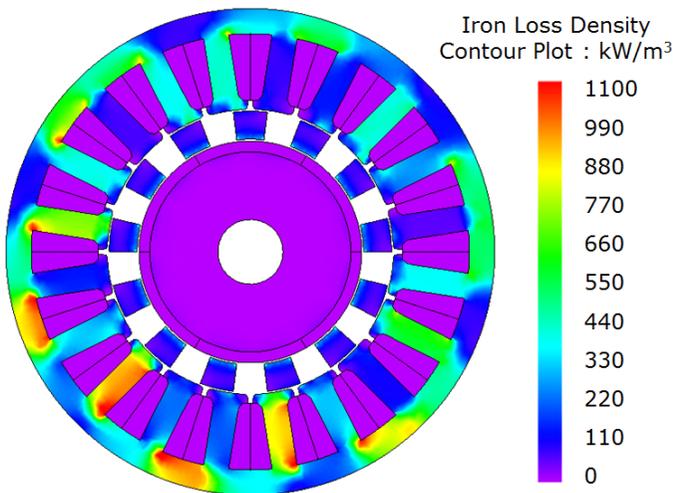


Fig. 8. Contour plot of iron loss density of hybrid magnetic gear with excitation type outer rotor

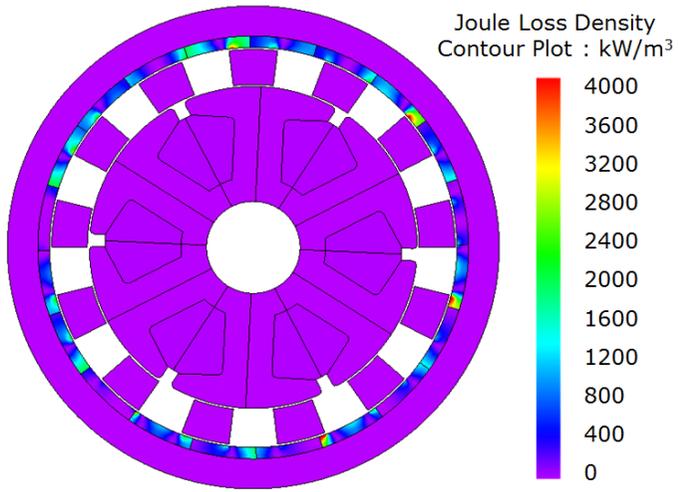


Fig. 9. Contour plot of eddy current loss density of hybrid magnetic gear with excitation type inner rotor

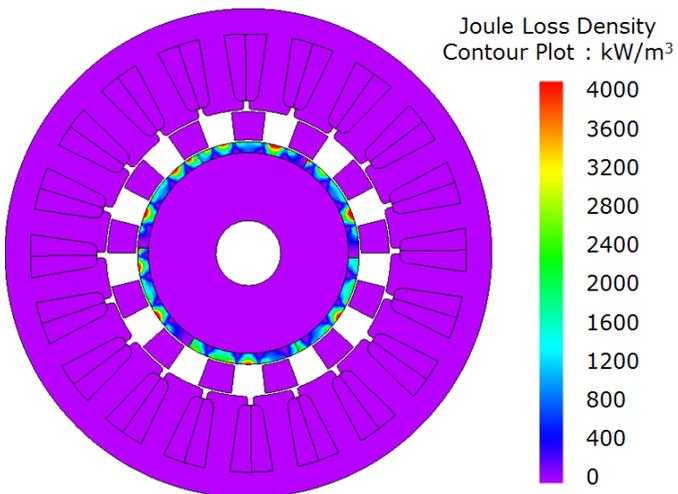


Fig. 10. Contour plot of eddy current loss density of hybrid magnetic gear with excitation type outer rotor

C. 하이브리드 마그네틱 기어의 모델 결정

Ⅲ-B을 통해 동일한 토크, 회전속도, 출력, 자석사용량을 갖는 하이브리드 마그네틱 기어 설계 시 여자형 외측회전자 모델 대비 여자형 내측회전자 모델이 손실 측면에서 우수함을 확인하였다.

먼저, 시뮬레이션 결과 철손은 여자형 내측회전자 모델이 43W, 여자형 외측회전자 모델은 366W로 여자형 외측회전자 모델이 넓은 면적에서 철손이 발생함에 따라 323W만큼 더 높은 철손을 보인다. 그리고 영구자석에 발생하는 와류손은 여자형 내측회전자 모델이 51W, 여자형 외측회전자 모델은 110W로 여자형 외측회전자 모델이 59W만큼 더 높은 영구자석의 와류손을 보인다. 마지막으로 전체 전자계 손실은 여자형 내측회전자 모델은 111W, 여자형 외측회전자 모델은 481W이다. 즉, 여자형 외측회전자 모델이 370W만큼 높은 손실을 보이므로 동력 전달 및 전체 시스템의 효율에 불리하다. 또한, 1kW급의 출력을 낼 수 있는 여자형 외측회전자 모델의 무게가 표 1과 같이 여자형 내측회전자 모델 대비 6.57kg만큼 높은 11.61kg이기 때문에 대용량 발전 시스템 설계 시 단가 상승의 문제를 야기할 수 있다. 즉, 손실 및 동력 전달 효율과 전체적인 기어의 사이즈 및 무게 측면에서 여자형 내측회전자 모델을 사용하는 것이 유리함을 확인하였다.

다음 장에서는 영구자석 극수와 기어비에 따라 달라지는 여자형 내측회전자 모델의 전자계 특성분석을 수행하였다. 기어의 효율과 크기는 전체 풍력발전시스템의 효율과 사이즈를 결정짓는 요소이기에 기기 설계 시 매우 중요한 고려사항이다. 따라서 동일한 출력 조건 하에서 하이브리드 마그네틱 기어의 기어비 및 극수 변화에 따른 출력과 손실 분석을 통해 하이브리드 마그네틱 기어 설계 시 높은 출력밀도와 효율을 얻기 위한 기어비 및 극수 선정 범위를 제안한다.

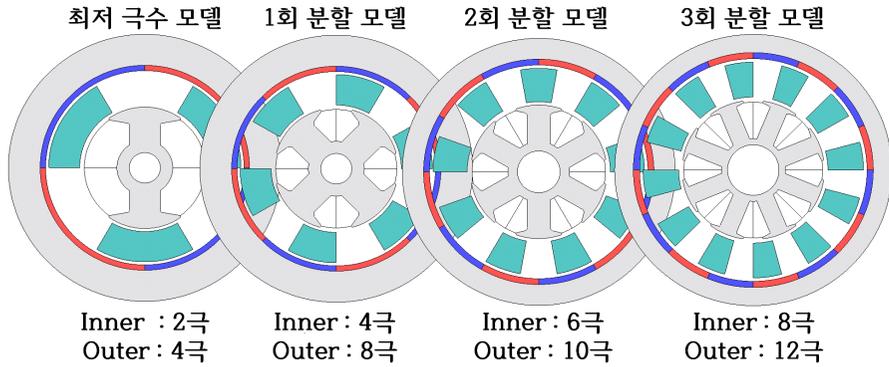
IV. 여자형 내측회전자 하이브리드 마그네틱 기어

A. 설계 사양 및 변수 선정

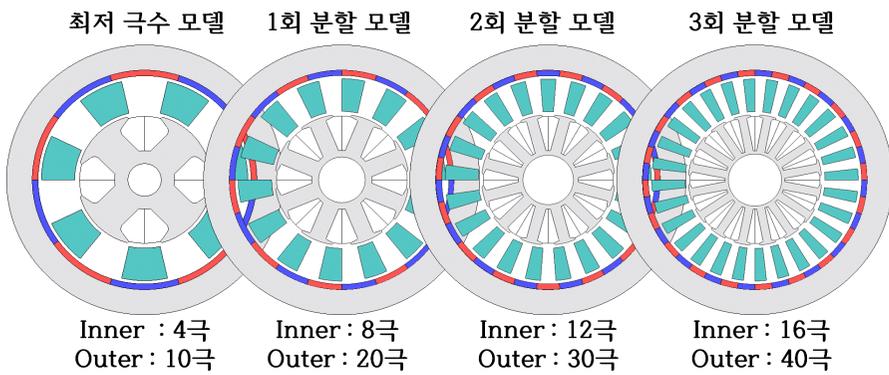
마그네틱 기어는 식 3과 같이 Inner 및 Outer rotor의 극수에 따라 기어비가 결정되며 기어비는 하나일지라도 이를 구성하는 극수 조합은 다양하다. 만약 2:1의 기어비를 나타낼 경우 2극(Inner), 4극(Outer)인 기어와 4극(Inner), 8극(Outer)인 기어와 같이 기어의 극수는 다를 수 있기 때문에 동일한 기어비에서 극수에 따른 특성 분석이 이루어져야 한다. 본 장에서는 동일한 출력조건 하에서 기어비와 극수 분배에 따른 하이브리드 마그네틱 기어의 출력밀도와 손실을 분석하여 기어의 사이즈 및 동력전달 효율에 유리한 기어비 및 극수 조건을 도출하였다. 1kW 풍력발전시스템을 대상으로 점적율은 38%, 전류밀도는 $5A/mm^2$ 으로 설계하였으며, 표 3과 같이 1.5-9.5까지 0.5 간격으로 17가지 기어비를 선정하고 이를 구성하는 최저 극수 조합을 확인하였다. 극수 분배에 따른 특성 분석을 위해 극수를 분할시켜 2배, 3배, 4배 증가시킨 모델을 선정하고, 전체 68개 모델에 대한 특성 분석을 수행하였으며, 각 모델의 폴피스(Pole piece) 개수는 식 1에 근거하여 결정된다. 그림 11-a는 전체 모델 중 기어비가 2:1인 최저 극수 모델과 극수를 1회, 2회, 3회 분할시킨 모델을 나타내며, 그림 11-b는 기어비가 2.5:1인 최저 극수 모델과 극수를 1회, 2회, 3회 분할한 모델을 나타낸다.

Table 3. The least number of permanent magnet poles of the inner & outer rotor each gear ratio

Gear ratio	Least number of poles		Number of pole pieces
	Outer rotor	Inner rotor	
1.5	6	4	5
2	4	2	3
2.5	10	4	7
3	6	2	4
3.5	14	4	9
4	8	2	5
4.5	18	4	11
5	10	2	6
5.5	22	4	13
6	12	2	7
6.5	26	4	15
7	14	2	8
7.5	30	4	17
8	16	2	9
8.5	34	4	19
9	18	2	10
9.5	38	4	21



(a) Hybrid magnetic gear models within 2:1 gear ratio



(b) Hybrid magnetic gear models within 2.5:1 gear ratio

Fig. 11. Hybrid magnetic gear model shapes in the same gear ratio

그림 12는 하이브리드 마그네틱 기어의 철심으로 사용된 35JN230 재질의 B-H Curve를 나타낸다. 철심은 자속을 모아줌과 동시에 자속의 통로 역할을 한다. 일반적으로 공기보다 수천-수만배 이상의 비투자율(철:5,000~20,000, 공기:1.00004)을 갖기 때문에 기기의 출력향상에 유리하지만 그림 12과 같이 자속을 무한히 흘리지는 못한다. 특히 자속이 포화되기 시작하는 1.3T 이상의 구간에서 비선형적인 자속밀도 변화는 자속에 의한 전자계 특성이 비선형적으로 이루어져 기기의 특성 파악 및 변화를 예측하기에 어려움이 따른다. 또한 자속의 포화는 출력포화와 함께 히스테리시스 손실과 와류손의 증가로 기기의 효율이 감소하는 문제가 발생한다.

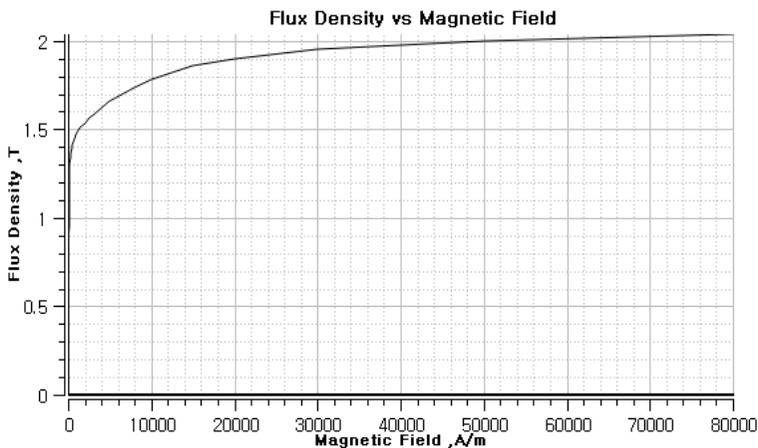


Fig. 12. B-H curve of the soft magnetic material(35JN230)

그림 13-a와 같이 높은 자속밀도를 보이는 폴피스 영역의 자속밀도를 낮추기 위해 13-b와 같이 폴피스의 두께를 조절하여 철심의 포화영역이 최소가 되도록 설계하였으며, 폴피스의 두께는 20mm, 공극의 길이 2mm, 자석의 두께는 3.5mm이다. 그림 13과 그림 14는 각각 폴피스 길이에 따른 2:1 기어비 모델의 자속 포화도와 자속선도를 나타낸다.

모델의 사이즈 결정을 위해 전체 모델의 자속밀도 분석을 진행하였다. 전체 모델 중 기어비가 2:1이며 영구자석과 폴피스의 두께가 동일한 4개 모델의

자속밀도 분포를 분석한 결과를 그림 15에 나타내었으며, 유한요소해석을 위해 생성된 메시(Mesh) 영역은 그림 16과 같다. 그림 15-a는 기어비가 2:1을 만족하는 최저 극수 모델, 그림 15-b는 그림 15-a의 극수를 2배수만큼 증가시킨 모델이며, 그림 15-c는 3배, 그림 15-d는 4배 증가시킨 모델이다. 그림 15와 같이 기어비가 동일한 경우 극수 증가에 따라 철심의 자속밀도가 낮아지며, 출력밀도 비교를 위해 낮은 자속밀도를 보이는 철심의 잉여 요크 두께를 줄여 설계하였다.

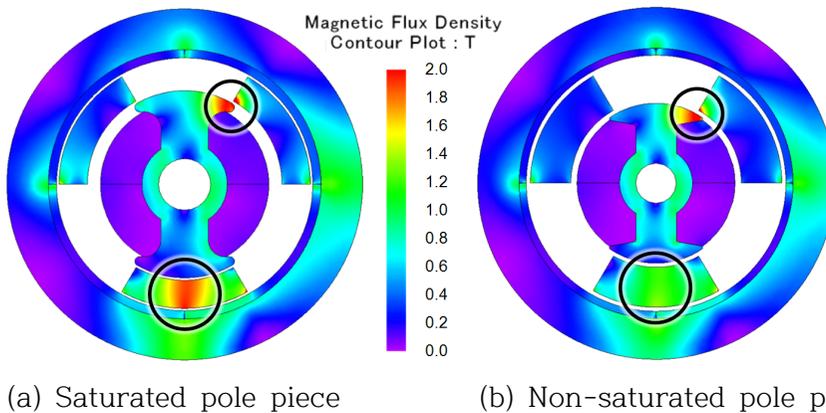


Fig. 13. Magnetic flux density of hybrid magnetic gear according to pole piece length

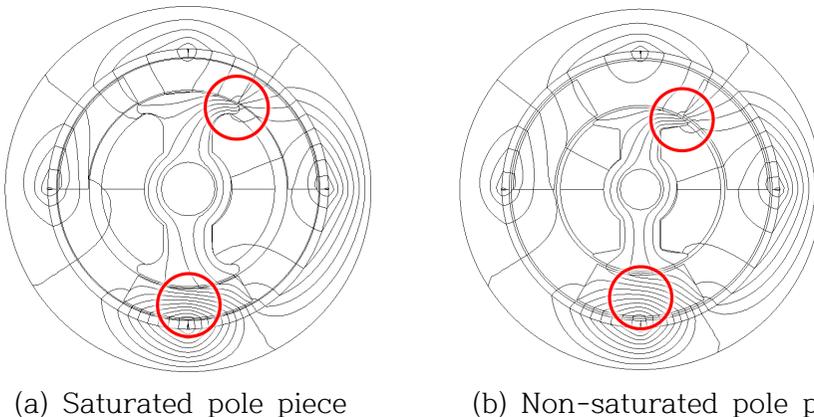


Fig. 14. Magnetic flux lines of hybrid magnetic gear according to pole piece length

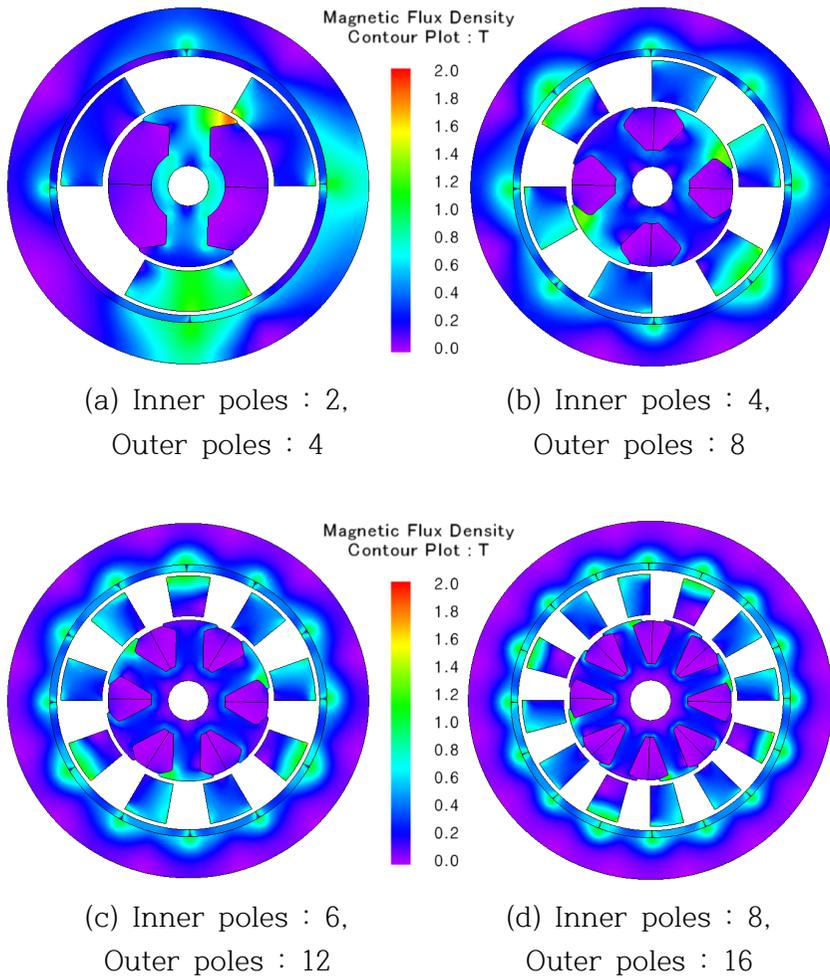
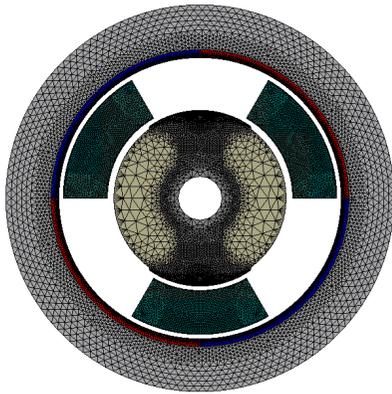
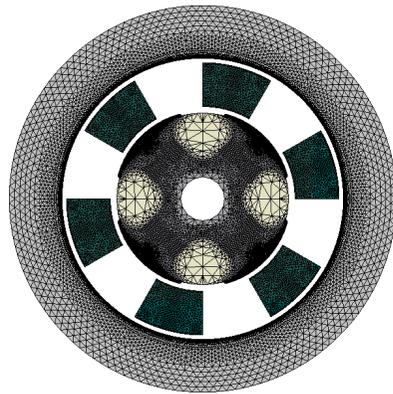


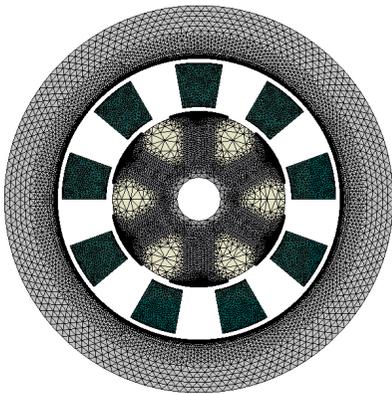
Fig. 15. When the number of poles of the hybrid magnetic gear having the same total surface area is changed, the flux saturation of hybrid magnetic gears



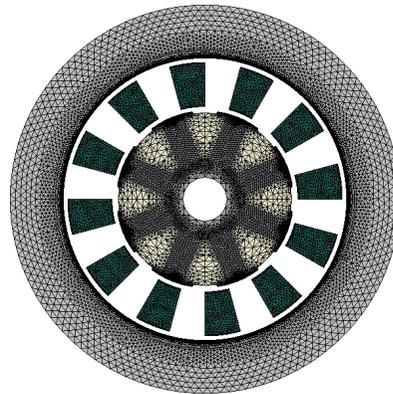
(a) Inner poles : 2,
Outer poles : 4



(b) Inner poles : 4,
Outer poles : 8



(c) Inner poles : 6,
Outer poles : 12



(d) Inner poles : 8,
Outer poles : 16

Fig. 16. When the number of poles of the hybrid magnetic gear having the same total surface area is changed, the generated mesh of hybrid magnetic gears

B. 기어비에 따른 전자계 특성해석

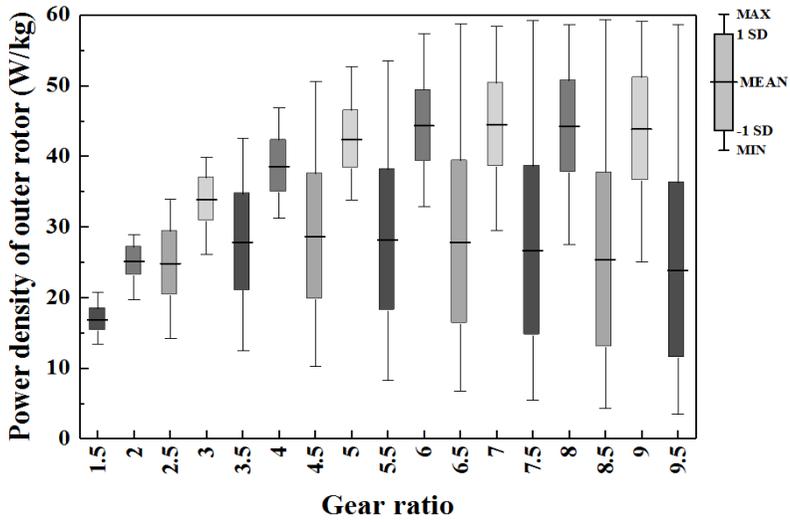
그림 17은 기어비에 따른 하이브리드 마그네틱 기어의 출력밀도를 나타낸다. 그림 17-a에 Outer rotor의 출력밀도를, 그림 17-b에 Inner rotor의 출력밀도를 나타내었다. 각 회전자의 출력밀도 D_p 는 식 9와 같으며, M 은 하이브리드 마그네틱 기어의 전체 무게, P 는 각 회전자의 출력을 의미한다.

$$D_p = \frac{P_r}{M} \quad (9)$$

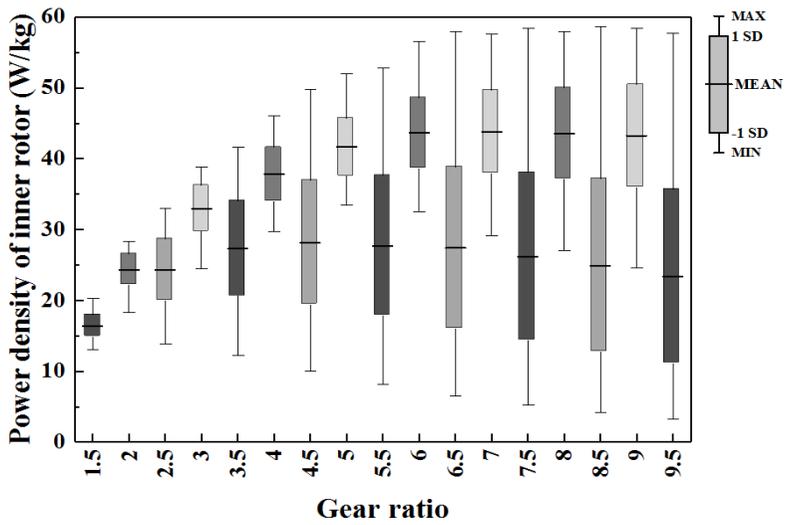
L

그림 17의 막대그래프 박스의 끝단은 동일 기어비 내에서 극수에 따른 출력밀도의 표준편차를, 중앙의 가운데 선은 평균값을 의미하며, 막대그래프의 연장선은 각 기어비에서의 최소값, 최대값을 나타낸다. 극수 분할에 따른 출력밀도의 표준편차가 가장 작은 기어비는 1.5:1이며, 1.5:1 기어비를 제외한 비정수 기어비 모델이 정수 기어비 모델 대비 극수 분할에 따른 출력밀도의 표준편차가 큰 것을 확인할 수 있다. 그리고 비정수 기어비를 가지는 모델들의 최소 출력밀도는 기어비가 2.5:1일 때 기준으로 기어비가 증가함에 따라 출력밀도가 감소하지만, 최대 출력밀도는 기어비의 증가에 따라 증가하는 경향을 보인다.

가장 높은 출력밀도를 보이는 모델의 기어비는 8.5:1이며 Outer rotor는 59.39W/kg, Inner rotor는 58.6W/kg의 가장 높은 출력밀도를 갖는다. 평균 출력밀도가 가장 높은 모델의 기어비는 7:1이며 Outer rotor는 44.46W/kg, Inner rotor는 43.79W/kg의 출력밀도를 갖는다.



(a) Outer rotor power density



(b) Inner rotor power density

Fig. 17. Power density of coaxial magnetic gear according to gear ratio

그림 18-a는 기어비에 따른 하이브리드 마그네틱 기어의 철손을 분석한 결과를 나타낸다. 하이브리드 마그네틱 기어의 철손은 비정수 기어비가 정수 기어비보다 분할된 극수의 개수에 따른 철손의 표준편차가 큰 것을 확인할 수 있다. 하이브리드 마그네틱 기어는 기어비가 증가함에 따라 철손이 감소하여 기어비가 4:1일 때 7.4W의 가장 낮은 철손값을 가지며, 이후 기어비의 증가에 따라 철손이 증가한다. 또한 기어비가 4:1인 모델의 평균값은 5.92W로 전체 기어비에서 가장 작은 수치를 나타낸다.

그림 18-b는 기어비에 따른 하이브리드 마그네틱 기어의 자석에서 발생하는 와류손을 나타낸다. 자석의 와류손은 철손과 다르게 1.5 기어비를 제외한 비정수 기어비에서 발생하는 손실의 표준편차가 정수 기어비에서 발생하는 손실의 표준편차보다 작음을 확인할 수 있다. 또한 기어비가 증가함에 따라 자석의 와류손이 감소하는 경향을 보이며, 하이브리드 마그네틱 기어의 기어비가 6.5:1일 때 2.6W의 가장 낮은 자석의 와류손을 갖는다.

그림 19는 하이브리드 마그네틱 기어 구동 시 발생하는 철손과 자석의 와류손을 모두 고려하여 분석한 기어비 변화에 따른 효율을 나타낸다. 하이브리드 마그네틱 기어는 자석의 와류손 분포가 큰 정수 기어비 모델에서 극수변화에 따른 효율 변화가 높았으며, 기어비가 5:1일 때 99%의 가장 높은 동력전달 효율을 보인다.

기어비에 따른 하이브리드 마그네틱 기어의 전자계적 특성은 출력밀도, 철손, 와류손, 효율에서 모두 달랐으며, 동일 기어비 내 극수분할에 따른 표준편차의 크기 또한 특성마다 전부 상이한 결과를 나타냄에 따라 극수에 따른 특성 분석을 수행하였다.

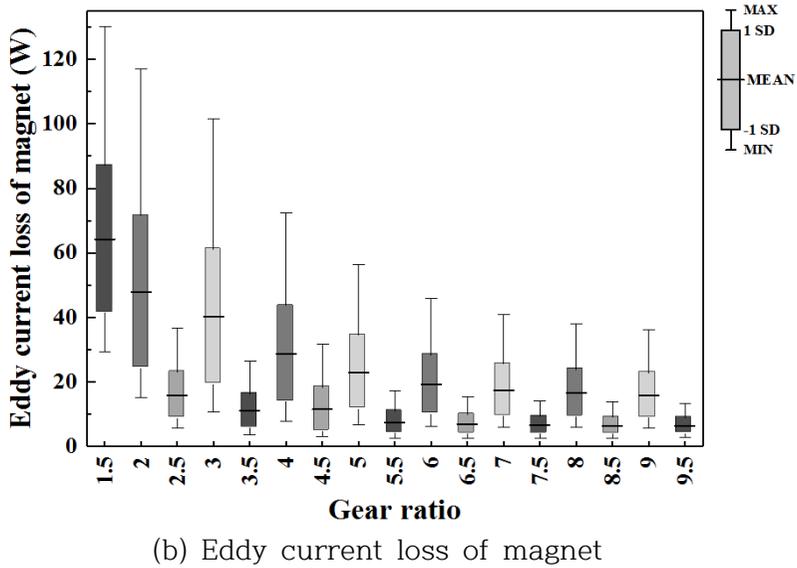
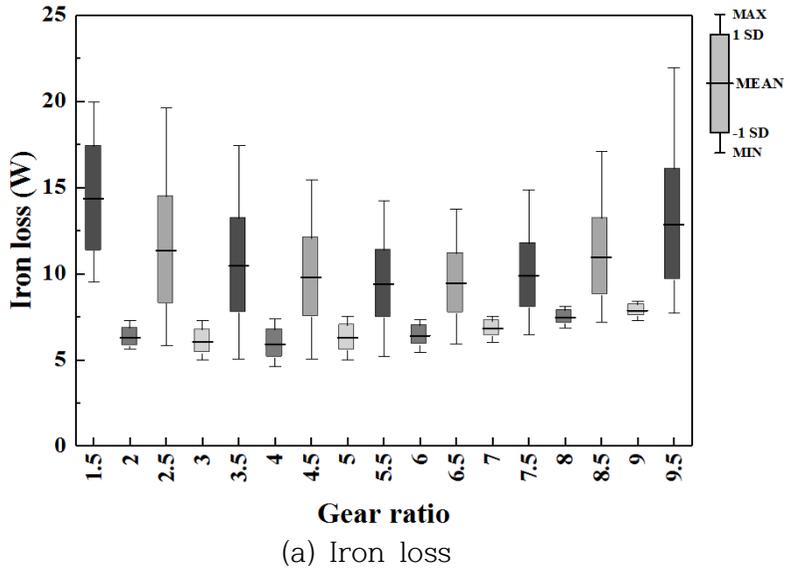


Fig. 18. Loss that occurs when the hybrid magnetic gear is operating each gear ratio

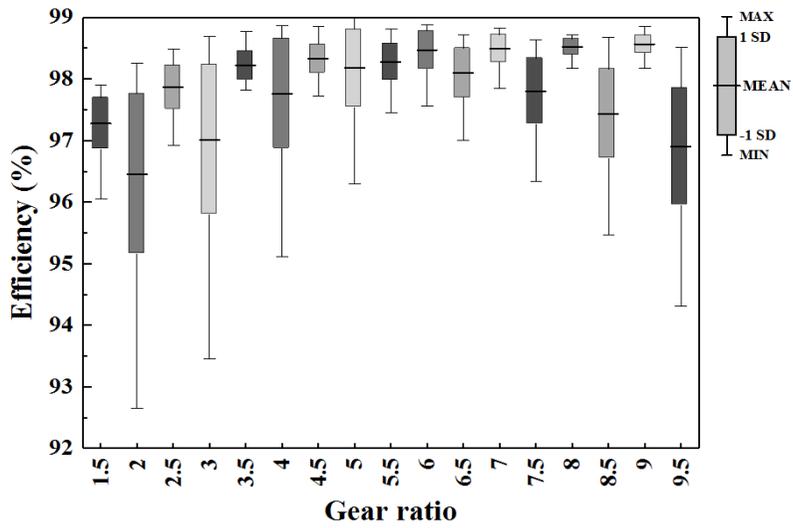


Fig. 19. Efficiency of the hybrid magnetic gear according to gear ratio

동일한 기어비를 갖지만 극수에 따라 모델의 특성이 전부 상이한 결과를 보이기 때문에 특정 기어비에서 우수한 특성을 나타낸다고 결정짓기에는 어려움이 있다. 따라서 극수의 개수에 따른 하이브리드 마그네틱 기어의 특성분석을 수행하였다. 그림 20은 하이브리드 마그네틱 기어의 Inner rotor와 Outer rotor의 극수 변화에 따른 출력밀도의 분포를 나타내며, Outer poles는 Outer rotor의 극수 개수, Inner poles는 Inner rotor의 극수 개수를 의미한다. 출력밀도는 Inner rotor가 4극일 때 최대가 되고 극수가 증가할수록 감소하는 경향을 보였으며, 상위 5% 이내의 출력밀도를 보이는 모델들의 Inner rotor는 4극 Outer rotor는 26-36극 이내의 극수 조합을 갖는다.

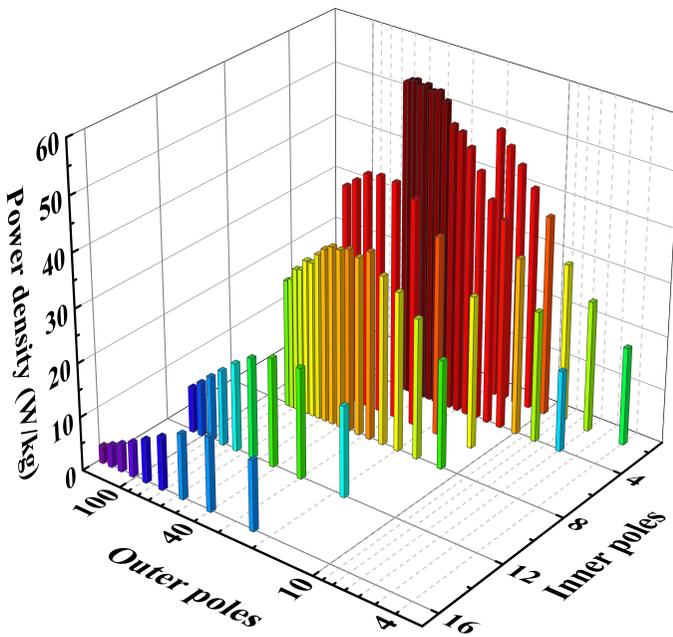


Fig. 20. Power density of the hybrid magnetic gear according to the number of poles

그림 21은 하이브리드 마그네틱 기어의 Inner rotor와 Outer rotor의 극수 변화에 따른 동력 전달효율의 분포를 나타낸다. 그림 21을 통해 Inner rotor의 극수보다 Outer rotor의 극수 변화에 따른 효율 변화가 높은 것을 확인할 수 있다. 그리고 상위 5% 이내의 효율을 보이는 모델들의 Inner rotor는 6-8극, Outer rotor는 30-40극 이내의 극수 조합을 갖는다.

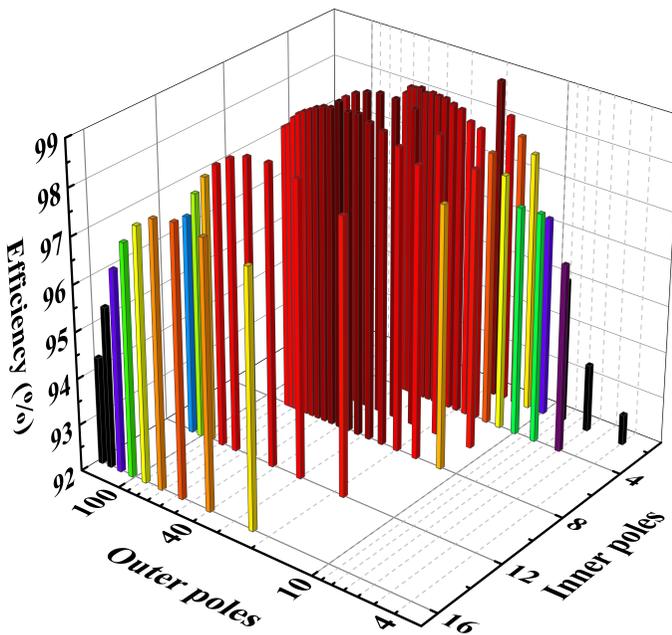


Fig. 21. Efficiency of the hybrid magnetic gear according to the number of poles

출력밀도가 높은 모델과 효율이 높은 모델의 극수가 서로 상이하기 때문에 우수한 특성을 보이는 극수 선정에 어려움이 따른다. 따라서 두 가지 조건을 충족시키는 우수한 모델을 선정하고자 출력밀도와 효율에 각각 가중치를 두어 계산한 결과를 비교하였다. 각 모델의 가중치 계산은 식 10에 의해 이루어졌으며, S_W 은 각 모델의 가중치를 두어 합산한 점수, D_p 와 E_e 는 각 모델의 출력밀도와 효율을 의미한다. w_p 와 w_e 는 각각 출력밀도의 가중치, 효율의 가중치를 의미하며, 58.6W/kg은 전체 모델에서 가장 높은 출력밀도를 의미한다.

$$S_W = \frac{w_p D_p}{58.6 \text{ W/kg}} + \frac{w_e E_e}{100\%} \quad (10)$$

각 지표들의 가중치는 적용 분야에 따라 다르게 적용될 필요가 있으며, 풍력발전시스템의 경우 출력밀도보다 시스템의 효율이 중요하므로 w_p 는 0.7, w_e 는 0.3으로 적용하여 전체 모델의 점수를 계산하였다. 그림 22는 출력밀도와 효율 각 지표에 가중치를 적용하여 계산한 결과를 나타낸다. 각 기어비 내 4개의 막대그래프는 순서대로 각각 최저 극수 모델, 1회 분할 모델, 2회 분할 모델, 3회 분할 모델의 점수를 나타낸다. 전체 모델 중 상위 5개 모델의 극수를 확인한 결과, Inner rotor는 4극, Outer rotor는 26-36극이었다.

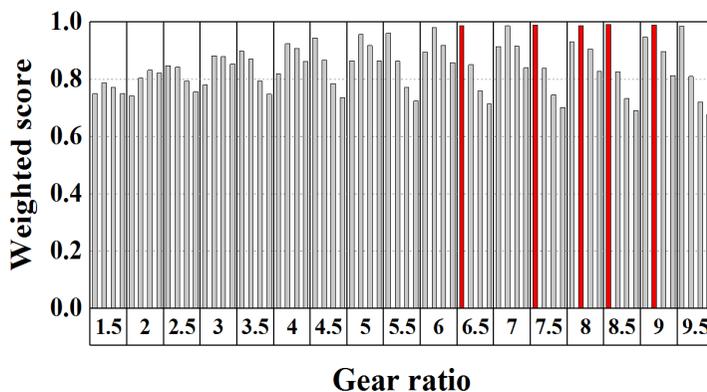


Fig. 22. Weighted score that considers both output density and efficiency of hybrid magnetic gear

V. 결론

본 논문에서는 풍력발전기의 기계식 기어의 접촉에 의한 문제를 해결하고 더 나아가 풍력발전기의 동력제어에 도움이 될 수 있는 비접촉식 동력전달장치인 하이브리드 마그네틱 기어를 제안하였다. 하이브리드 마그네틱 기어는 기존의 영구자석형 마그네틱 기어의 한 회전자를 여자형 철심과 코일로 대체하여 최대 전달 토크 제어가 가능한 구조를 가진 새로운 비접촉식 동력전달 장치이다.

하이브리드 마그네틱 기어는 여자형 철심과 코일로 구성된 여자형 회전자를 Inner rotor 혹은 Outer rotor에 적용하는 경우에 따라 두 가지 구조를 가지며, 2-D 유한요소해석법을 이용한 전자계 해석을 통해 동력 전달 효율 및 기어의 사이즈에 유리한 구조를 선정하였다. 그 결과, 출력이 1kW로 동일한 두 모델의 크기를 비교하였을 때 Inner rotor를 여자형 회전자로 적용한 모델의 무게는 Outer rotor를 여자형 회전자로 적용한 모델 대비 6.57kg만큼 작았으며, 철손은 323W, 영구자석에서 발생하는 와류손은 59W만큼 더 작은 값을 보였다. 따라서 하이브리드 마그네틱 기어 설계 시 여자형 회전을 Inner rotor에 적용한 모델이 전체 기어의 사이즈, 효율 특성에서 유리함을 알 수 있다.

하이브리드 마그네틱 기어는 자력을 이용하여 동력을 전달하기 때문에 기어비와 Inner rotor와 Outer rotor의 극수 변화에 따른 특성 분석이 필수적으로 수행되어야 하며, 본 논문에서는 전체 시스템 사이즈와 효율에 유리한 기어비 혹은 극수 선정을 위한 전자계 특성 분석을 수행하였다. 1kW급의 하이브리드 마그네틱 기어를 기어비에 따라 여러 가지 극수로 나누어 분석하였으며, 출력밀도가 가장 높은 기어비는 8.5:1이며, 토크리플이 가장 낮은 기어비는 8:1, 동력 전달효율이 가장 높은 기어비는 5:1임을 확인하였다.

하지만 동일 기어비에서 극수 분할에 따라 각 특성의 변화폭이 다르고 특성 값이 서로 상이하였기 때문에 좋은 특성을 나타내는 기어비를 선정하는 것에는 한계가 있다. 그리고 상위 5% 이내의 출력밀도와 효율을 보이는 모델 역시 동일하지 않았기에 가중치를 두어 계산한 각 모델의 점수를 비교하였다. 그 결과, 본 논문에 사용된 모델의 경우 Inner rotor의 극수는 4극, Outer rotor의 극수는 26-36극 사이에서 선정하는 것이 유리함을 확인하였다.

본 논문은 풍력발전기의 기계식 기어와 마그네틱 기어의 한계를 극복할 수 있는 하이브리드 마그네틱 기어에 기초연구를 수행하여, 전체 시스템 크기와 효율에 유리한 기어비와 극수의 범위를 도출하였다. 이를 통해 출력밀도와 효율을 고려한 하이브리드 마그네틱 기어의 기어비와 극수 선정 방법에 대한 기준을 마련하였으며, 추후 하이브리드 마그네틱 기어에 대한 연구 시 기어비와 극수 선정을 위한 기초자료로써 활용 가능할 것이라 사료된다.

참 고 문 헌

[1] GWEC(GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL), "Global Wind Statistics 2017," Feb. 2018.

[2] 산업통상자원부, "재생에너지 3020 이행계획(안)," 제2회 재생에너지 정책협의회, Dec. 2017.

[3] M. Wilkinson, B. Hendriks, F. Spinato, K. Harman, E. Gomez, H. Bulacio, J. Roca, P. Tavner, Y. Feng, and H. Long, "Methodology and results of the reliawind reliability field study," EWEC 2010, Warsaw, Poland, April 2010.

[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] C. Kaidis, B. Uzunoglu, and F. Amoiralis, "Wind turbine reliability estimation for different assemblies and failure severity categories," IET Renewable Power Generation, doi: 10.1049/iet-rpg.2015.0020, Nov. 2015.

[6] S. Faulstich, B. Hahn, and P. Tavner, "Wind turbine downtime and its importance for offshore deployment," Wind energy, vol. 14, 3, pp. 327-337, April. 2011.

[7] I. Dinwoodie, "Operation and maintenance of offshore wind farm," E&T Magazine, Accessed July. 17, 2017.

[8] J. Lee, K. Lee, D. Lee, D. Lee, and S. Hwang, "Contact Stress Analysis of a Pair of Mating Spur Gears," J. of KSPE, Vol. 9, No. 4, pp. 59-65.

[9] F. Zhao, Z. Tian, X. Liang, and M. Xie, " An Integrated Prognostics Method for Failure Time Prediction of Gears Subject to the Surface Wear Failure Mode," IEEE Transactions on Reliability, Vol. 67, No. 1, pp. 316-327, Mar. 2018.

[10] Z. Xiao, and L. Huan, "Dynamic analysis of planetary gears with gear crack of semi-direct drive wind turbine," 2017 International Conference on Applied System Innovation (ICASI), Date of Conference, Sapporo, Japan. May 2017.

[11] N. Nikhar, S. Patankar, and J. Kulkarni, "Gear tooth fault detection by autoregressive modelling," 2013 Fourth International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies (ICCCNT), Tiruchengode, India, July 2013.

[12] 민영실, 이형우, "2MW급 풍력발전기 사이클로이드 피치감속기 설계에 대한 연구," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 39, No. 9, pp. 895~902, Nov. 2015.

[13] 조진래, 정기용, "유연편을 적용한 2.5MW급 풍력발전기용 기어박스의 동응답 해석," J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea, Vol. 29, No. 1, pp.37-44, Feb. 2016.

[14] K. Atallah, and D. Howe, " A Novel High-Performance Magnetic Gear," IEEE Trans. Magn., vol. 37, no. 4, pp. 2844-2846, July. 2001.

[15] K. Atallah, S. Calverley, and D. Howe, "High-performance magnetic gears," *J. Magn. Magn. Mater.*, Vol. 272-276, No. 1, pp. E1727E1729, May 2004.

[16] 김찬호, 김성진, 정상용, 김용재, "희토류 영구자석 저감을 위한 돌극형 비접촉 기어의 구동 특성분석", 2014 대한전기학회 제45회 하계학술대회, pp. 783-784, July 2014.

[17] C. Kim, S. Jung, and Y. Kim, "A comparative analysis of power density for single-stage and dual-stage magnetic gear with rare-earth magnets and non rare-earth magnets," *Int. J. of Applied Electromag. and Mechanics*, Vol. 51, Mo. 1, pp. 83-89, April 2016.

[18] N. Niguchi, and K. Hirata, "Torque-Speed Characteristics Analysis of a Magnetic-Geared Motor Using Finite Element Method Coupled With Vector Control," *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 49, No. 5, pp. 2401-2404, May 2013.

[19] Y. Fan, H. Jiang, M. Cheng, and Y. Wang, "An Improved Magnetic-Geared Permanent Magnet In-Wheel Motor for Electric Vehicles," *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Lille, France, Sep. 2010.

[20] 이지영, "영구자석형 고효율 횡자속 선형 전동기의 특성해석에 대한 연구," 박사학위논문, 창원대학교 대학원, 2006.

[21] P. Hargreaves, B. Mecrow, and R. Hall, "Calculation of Iron Loss in Electrical Generators Using Finite-Element Analysis," *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol. 48, No. 5, pp. 1460-1466. Sep. 2012.