Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 17, No. 11 pp. 755-760, 2016

http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.11.755
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

진화론적 알고리즘을 이용한 코깅토크가 적은 풍력발전기의 설계

박주경[1], 차귀수[1*], 이희준[2], 김용섭[3]
[1]순천향대학교 전기공학과, [2]미르텍알앤디, [3]맥시스

Design of a wind turbine generator with low cogging torque by using evolution strategy

Ju-Gyeong Park[1], Guee-Soo Cha[1*], Hee-Joon Lee[2], Yong-Sub Kim[3]
[1]**Electrical Engineering, Soonchunhyang University**
[2]**MirtechRnd**
[3]**Mecsys**

요 약 근래에는 신재생에너지를 이용한 독립적인 발전기의 수요가 증가하고 있는 추세이며 그 중에서 소형 풍력발전기의 개발 또한 활발하게 이루어지고 있다. 이러한 소형 풍력발전기는 목적에 따라 단순화 및 소형화가 가능하도록 영구자석이 주로 쓰인다. 하지만 영구자석 동기기는 구조적인 원인으로 인하여 코깅토크를 수반하고 이는 소음과 진동의 원인이 된다. 코깅토크는 영구자석이나 코어의 형상에 의해 변하며 적절한 설계기법으로 코깅토크를 저감시킬 수 있다. 본 논문에서는 영구자석의 형상변화를 통해 소형 풍력발전기에 많이 사용되는 표면부착형 영구자석 동기전동기의 코깅토크를 저감시키는 설계기법을 제시하였다. 코깅토크를 줄일 수 있는 영구자석의 형상을 구하는 데에는 확률론적 최적화기법의 일종인 진화론적 최적화기법을 사용했다. 최적화 기법을 적용할 때에 설계변수로는 영구자석의 폭을 조절하는 각도와, 영구자석의 외경을 조절하는 반지름을 설정하였다. 제시된 설계기법을 사용해서 극/슬롯의 조합이 8극/18슬롯이고 출력이 300W급인 풍력발전기를 설계하고 코깅토크와 출력전압 등의 특성을 계산했다. 계산결과에 의하면 초기모델에 비해 최적화모델에서 코깅토크와 토크리플 모두가 감소해서, 본 연구에서 제시한 설계기법이 코깅토크를 줄이는 데에 효과가 있음을 확인하였다.

Abstract The demand for independent generators using renewable energy has been increasing. Among those independent generators, small wind turbine generators have been actively developed. Permanent magnets are generally used for small wind turbine generators to realize a simple structure and small volume. On the other hand, cogging torque is included due to the structure of the permanent magnet synchronous machine, which can be the source of noise and vibration. The cogging torque can be varied by the shape of the permanent magnet and core, and it can be reduced using the appropriate design techniques. This paper proposes a design technique that can reduce the cogging torque by changing the shape of the permanent magnets for SPMSM (Surface Permanent Magnet Synchronous Motor), which is used widely for small wind turbine generators. Evolution Strategy, which is one of non-deterministic optimization techniques, was adopted to find the optimal shape of the permanent magnets that can reduce the cogging torque. The angle and outer diameter of permanent magnet were set as the design variable. A 300W class wind turbine generator, whose pole/slot combination was 8 poles/18 slots, was designed with the proposed design technique. The properties of the generator, including the cogging torque and output voltage, were calculated. The calculation results showed that the cogging torque of the optimized model was reduced compared to that of the initial model. The design technique proposed by this paper can be an effective measure to reduce the cogging torque.

Keywords : Cogging torque, Design technique, Evolution strategy, Torque ripple, Wind turbine generator

본 논문은 중소기업청에서 지원하는 2015년도 산학연협력 기술개발사업 No.20150762의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.
*Corresponding Author : Guee-Soo Cha(Soonchunhyang Univ.)
Tel: +82-41-530-1334 email: gsoocha@sch.ac.kr
Received May 30, 2016 Revised (1st September 7, 2016, 2nd October 26, 2016)
Accepted November 10, 2016 Published November 30, 2016

1. 서론

오늘날 신재생에너지 개발의 필요성이 대두되며 국·내외에서 풍력발전시스템에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 주로 수 MW급의 대형 풍력발전기 위주의 개발이 진행되었지만, 근래에는 도심이나 농어촌 지역에서 독립적으로 사용할 수 있는 소형 풍력발전기의 필요성이 증가하고 있는 추세이다.

이러한 소형 풍력발전기는 용도에 따라 작고 가볍게 제작될 필요가 있다. 영구자석 동기기 PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor)은 계자권선 및 계자전류가 필요하지 않기 때문에 구조의 단순화 및 소형화가 가능하며, 손실이 적어지는 효과로 운전 효율이 높아지기 때문에 소형 풍력발전기에서 많이 쓰인다. 또한 토크밀도가 높고 고토크 저속운전에 유리하며 고조파 영향이 작기 때문에 코깅토크와 토크리플 저감을 요구하는 정밀형 전동기에 주로 사용된다[1, 2].

일반적으로 PMSM은 내부 매입형 영구자석 동기 전동기 IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)과 표면부착형 영구자석 동기전동기 SPMSM (Surface Permanent Magnet Synchronous Motor)으로 나뉜다. IPMSM의 경우 자석이 회전자 내부에 매입되어 구조적으로 안정하고 강인하나, 공극이 일정하지 못하여 토크리플이 크고 제어와 설계가 어렵다는 단점이 있다. 반면에 SPMSM은 회전자 표면에 자석이 있어, 공극이 일정하여 토크리플이 작고 고토크의 저속운전으로 정밀성이 요구되는 시스템에 적용이 가능하다[3]. 따라서 본 논문에서는 토크리플이 작은 SPMSM형 전동기를 설계하였다. 또한 영구자석을 이용하는 소형 풍력발전기에서 가장 큰 문제는 기동토크이며 높은 기동토크는 풍력 터빈의 기동을 방해한다. 영구자석형 발전기의 기동토크는 코깅토크, 히스테리시스 토크, 발전기 베어링 마찰에 필요한 토크 등을 포함하며 코깅토크가 대부분을 차지한다. 토크리플 및 코깅토크는 풍력발전기의 소음 및 진동에도 큰 영향을 준다[4]. 따라서 발전기 설계 시 코깅토크와 토크리플을 최소화 시킬 수 있는 설계기법이 필요하며 풍력발전기의 코깅토크를 저감시킬 수 있는 최적화 설계에 대한 연구를 실시하였다.

2. 풍력발전기 설계

본 논문에서 설계한 발전기는 장하분배법을 이용한 기초설계, 수치해석 프로그램을 이용한 세부설계, 수치해석과 최적화 알고리즘을 사용한 최적화설계의 순서로 진행하였다.

2.1 풍력발전기 기초설계

장하분배법은 전동기/발전기 용량을 전기장하 및 자기장하의 곱으로 표현하고 미증가비례법으로 적절한 장하의 배분을 통해 전동기/발전기를 설계하는 방법이다[4]. 장하분배법을 이용해서 동기기를 설계하기 위해서는 우선 발전기의 극과 슬롯이 결정되어야한다. 보통 극수는 짝수로 설정되며 발전기의 코깅토크 및 출력에 따라 적합한 극수와 슬롯의 조합이 존재하여 사용하는 용량과 목적에 따라 적당한 극수와 슬롯의 설정이 필요하다[5-6].

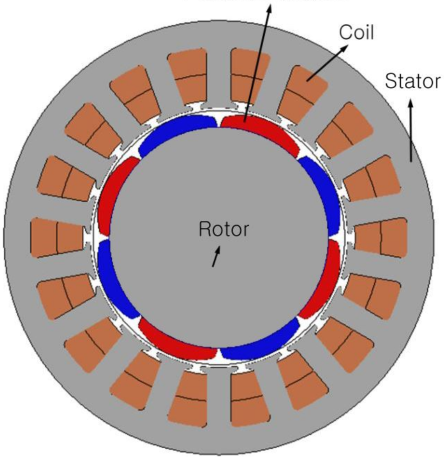


Fig. 1. Structure of a SPMSM wind turbine generator

Table 1. Specifications of SPMSM wind turbine generator

Parameter	Value	Unit
Rotor Outer Radius	34	mm
Permanent Magnet Height	5	mm
Air Gap	1	mm
Stator Outer Radius	66.8	mm
Rotor & Stator Depth	28	mm
Slot of Coil	18	EA
Coil Turn per Slot	57	Turn
Pole of Magnet	8	Pole
Rotor & Stator Material	S18 (35PN440)	-
Permanent Magnet Material	N39SH (Br 1.26T)	-

Fig. 1은 SPMSM 풍력발전기의 구조를 나타내며 코깅토크를 고려하여 8극-18슬롯의 극/슬롯 조합을 선택하

였고 장하분배법을 이용하여 고정자를 설계하였다. 발전기에 사용된 영구자석은 N39SH(Br : 1.26T, Hc : 936kA/m), 고정자 및 회전자의 철심재료는 S18(35PN440)이 사용되었다. 본 논문에서 설계한 풍력발전기는 출력이 300W급으로 기본계산을 통해 풍력발전기 전체 외경과 적층길이를 선정하였다. 구조에 대한 자세한 설계사양은 Table. 1에 나타내었다.

2.2 풍력발전기 고정자 결선

본 논문의 풍력발전기에서 발생하는 3상의 기전력은 U, V, W상으로 정의하였다.

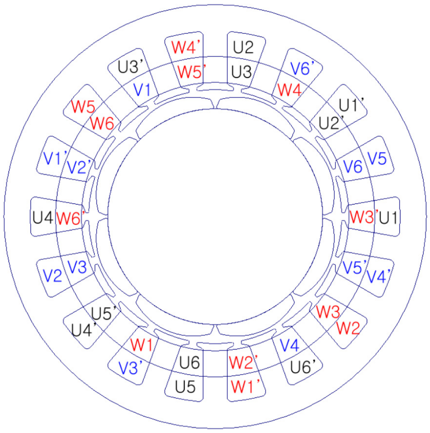


Fig. 2. Arrangement of stator winding

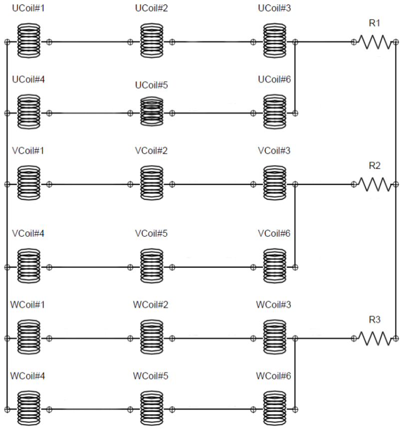


Fig. 3. Connection of stator winding

Fig. 2에 풍력발전기의 고정자 권선배치를 나타내었으며 2층권으로 권선하였다. U상을 기준으로 U1에서 전류가 나오는 방향이면 U1'에서 전류가 들어가며 각 상당 코일이 6개로 총 18개의 코일이 존재한다. 각 상의 코일은 Fig. 3과 같이 1~3, 4~6까지 직렬로 연결되고 다시 코일 1~3과 4~6은 병렬로 연결하여 2병렬회로로 권선하였다.

3. 풍력발전기 코깅토크 저감

코깅토크를 저감시킬 수 있는 일반적인 방법은 고정자나 회전자에 스큐를 주는 방법, 고정자의 치/슬롯 구조를 변화시키는 방법, 슬롯의 형상을 변화시키는 방법, 공극의 길이 증가, 보조슬롯의 사용 등이 있다[7, 8]. 본 논문에서는 영구자석의 형상을 변화시켜가며 코깅토크를 저감시키는 최적화 설계기법에 대한 연구를 진행하였다. 유한요소해석 프로그램과 진화론적 최적화 알고리즘을 사용하여 영구자석 형상에 따른 코깅토크를 해석하고 최적화 형상을 도출하였다.

3.1 최적화 설계기법

최적화 설계기법은 진화론적 최적화 알고리즘을 사용하며 Fig. 4에 알고리즘의 순서도를 나타내었다. 이 알고리즘은 초기형상을 설정하고 랜덤으로 생성되는 다음 세대의 형상을 비교한 뒤, 목표하는 값에 더 알맞은 형상을 부모세대로 설정하고 목표 값에 이르게 되면 프로그램을 종료하여 부모세대의 값이 최종 형상으로 결정되는 순서도를 따른다[9].

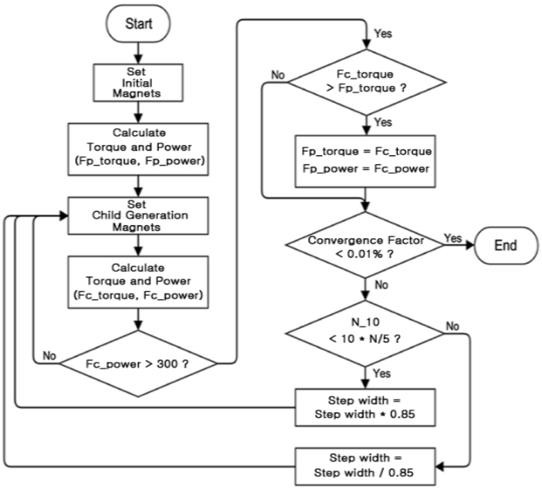


Fig. 4. Flow of Evolution strategy

본 논문에서는 앞서 언급한 진화론적 최적화 설계기법을 적용하여 영구자석의 형상을 랜덤으로 변화시키면서 최적화 형상(코깅토크가 가장 최소화되는 형상)을 찾아내는 알고리즘을 연구하였다. 영구자석형 발전기는 영구자석의 형상변화에 따라 자속의 분포가 달라진다. 또한 영구자석의 형상에 의해 변화된 자속분포는 발전기의 코깅토크를 달라지게 한다. 이에 따라 달라지는 코깅토크를 확인하고 코깅토크가 줄어드는 방향으로 영구자석의 형상을 최적화시키는 설계기법을 연구하였다. 최적화 설계 과정에서 영구자석의 형상을 랜덤으로 변화시키려면 자석의 형상을 바꿀 수 있도록 하는 설계변수가 필요하다. 최적화 설계기법에 적용한 영구자석의 설계변수로는 영구자석의 폭을 조절하는 각도 θ와 외경을 조절하는 반지름 R로 설정하였다. Fig. 5에는 설계변수로 정한 θ와 R을 표시하였고 빗금 친 부분은 설계변수에 따라 그려진 영구자석의 형상이다.

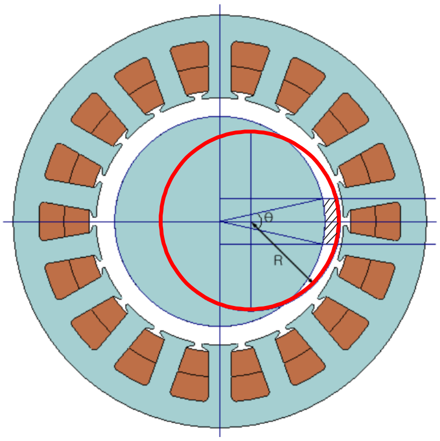


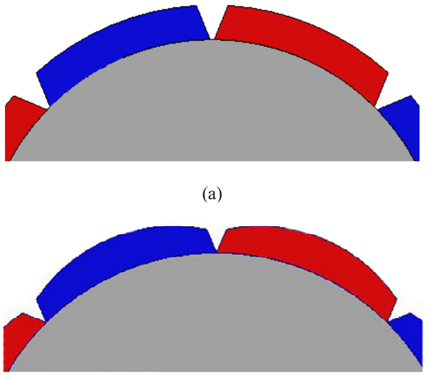
Fig. 5. Design variables θ and R of permanent magnet

3.2 최적화 결과

최적화 설계기법으로 유한요소해석과 진화론적 최적화 알고리즘을 사용하여 최적화 모델의 영구자석 형상을 도출하였다.

Fig. 6에는 영구자석의 형상변화를 표시하였다. Fig. 6 (a)는 초기의 영구자석 형상을 나타내며 설계변수의 변화에 따라 Fig. 6 (b)의 최적화모델로 영구자석 형상이 변화되었다.

유한요소법으로 계산한 최적화 모델의 자력선분포는 Fig. 7과 같으며 고정자와 회전자 사이의 공극에서 약 1.2T, 치의 중간에서 약 1.7T, 치의 포화부분에서 약 2T의 자장이 발생했다.



(a)

(b)

Fig. 6. Shape of permanent magnet
(a) Initial (b) Optimal

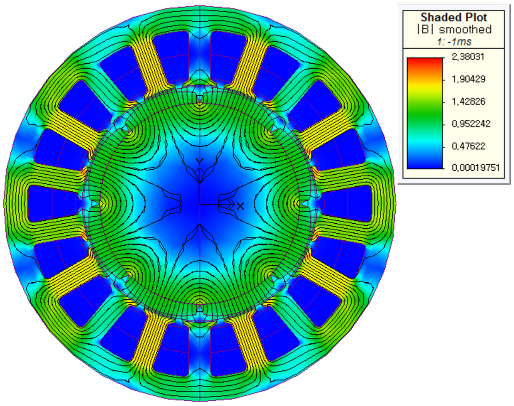


Fig. 7. Flux distribution of the wind turbine generator

Fig. 8은 시간에 따른 무부하 전압을 나타낸 것으로 실선으로 표시한 그래프는 초기모델, 원형 심벌을 표시한 그래프는 최적화모델이다. 초기모델 및 최적화 모델에서 무부하 전압은 최대치가 각각 36.8V, 35.5V이다.

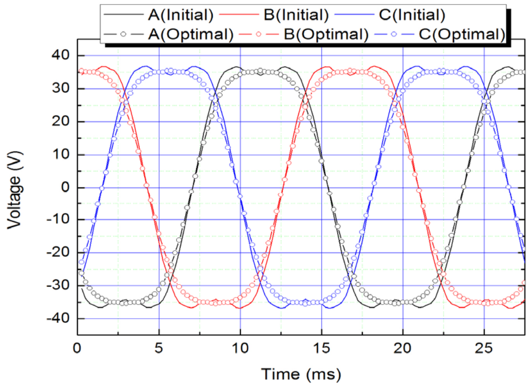
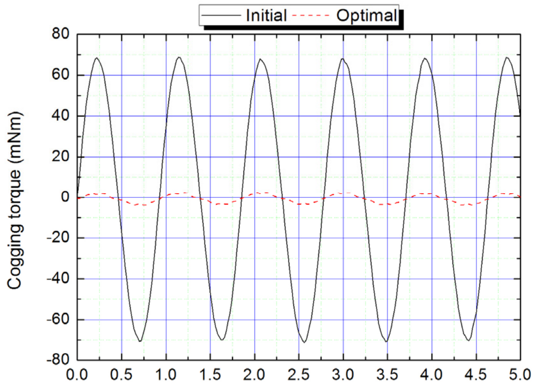
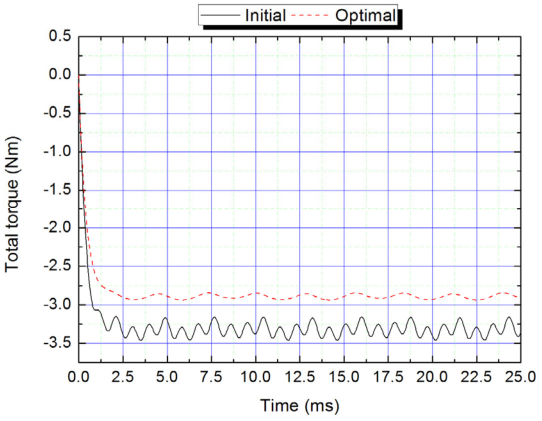


Fig. 8. Output voltage of the wind turbine generator

Fig. 9는 코깅토크와 전체토크를 나타낸 것으로 시간에 따라 초기모델과 최적화모델을 비교하였다. Fig. 9 (a)는 시간에 따른 코깅토크를 나타낸 것으로 초기모델 및 최적화모델에서 각각 68.4mNm, 1.9mNm로 최적화 모델의 코깅토크는 초기모델에 비해 크게 저감되었다. Fig. 9 (b)는 시간에 따른 전체토크를 나타낸 것으로 정상상태에서 초기모델과 최적화모델의 토크리플은 각각 9.15%, 3.19%이다.



(a)



(b)

Fig. 9. Cogging torque and total torque of the wind turbine generator
(a) Cogging torque (b) Total torque

4. 결론

코깅토크는 영구자석을 이용하는 소형 풍력발전기에서 가장 큰 문제인 기동토크의 대부분은 차지하고 있고 소음 및 진동에도 큰 영향을 준다. 본 논문에서는 유한요소해석과 진화론적 알고리즘을 사용하여 소규모 풍력발전기에 많이 사용되는 표면부착형 영구자석 동기기의 코깅토크를 줄이는 설계기법을 제시하였다. 제시한 설계기법을 이용해서 8극-18슬롯조합으로 된 300W급 풍력발전기에서 코깅토크가 적은 영구자석의 최적형상을 구하였다. 이렇게 설계된 최적화 모델의 풍력발전기는 초기모델의 풍력발전기에 비해서 코깅토크가 큰 폭으로 감소했고 전부하시의 토크리플도 감소해서, 본 연구에서 제시한 설계기법이 코깅토크를 줄이는 데에 효과가 있음을 확인하였다.

References

[1] D. K. Kim, H. G. Jeong, H. S. Park, "Improved back-EMF of 30kW Interior Permanent Magnet Synchronous Generator for Small Hydropower Generation," *Trans. KIEE*, vol. 63, no. 5, pp. 660-665, 2014.
DOI: http://dx.doi.org/10.5370/kiee.2014.63.5.660

[2] C. C. Chan, K. T. Chau, "Novel Permanent Magnet Motor Drives for Electric Vehicles," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 43, no. 2, pp. 331-339, 1996.
DOI: http://dx.doi.org/10.1109/41.491357

[3] J. H. Kim, S. G. Kang, S. Y. Jung, "Design of SPMSM for Eelectric Power Steering in vehicle Considering Cogging Torque reduction," *2015 KIEE 46th Conference*, pp. 123-124, 2015.

[4] T. Takeuchi, "DAIGAKUKATEI DENKI SEKKEIGAKU," *Korean language edition*, pp. 27-64, Dong-Il publishing Co, 1994.

[5] J. R. Hendershot. Jr, T. J. E. Miller, "DESIGN OF BRUSHLESS PERMANENT-MAGNET MOTORS," *MagnaPhysics*, pp. 3-1~3-74, 1994.

[6] H. J. Lee, Y. M. Kim, J. S. Oh, M. H. Ku, K. H. Baek, G. S. Cha, "1kW Class of Small Wind Generators Cogging Torque Reduction Method of Research," *2012 KIEE Conference*, pp. 288-290, 2012.

[7] I. H. Park, D. S. Kim, G. S. Park, "A Study on Reducing Cogging Torque by Core Shapes in Permanent Magnet Motors," *Journal of Korean Magnetics Society*, vol. 20, no. 2, pp. 61-67, 2010.
DOI: http://dx.doi.org/10.4283/JKMS.2010.20.2.061

[8] BL. Chikouche1, K. Boughrara, R. Ibtiouen, "Cogging Torque Minimization of Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Machines Using Hybrid Magnet Shapes," *Progress In Electromagnetics Research B*, vol. 62, pp. 49-61, 2015.
DOI: http://dx.doi.org/10.2528/PIERB14112302

[9] M. Kasper, "Shape Optimization by Evolution Strategy," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 28, no. 2, pp. 1556-1559, 1992.
DOI: http://dx.doi.org/10.1109/20.123995

박 주 경(Ju-Gyeong Park) **[준회원]**

- 2015년 2월 : 순천향대학교 전기공학과 (공학사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 전기공학과 (석사과정)

<관심분야>
전기기계, 전자회로

김 용 섭(Yong-Sub Kim) **[정회원]**

- 2005년 2월 : 순천향대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2009년 8월 : 코모텍 부설연구소 과장
- 2014년 9월 : 충무정밀 부설연구소 과장
- 2014년 9월 ~ 현재 : 맥시스 시스템제어팀 팀장

<관심분야>
전기기계, 전동기 및 엑츄에이터

차 귀 수(Guee-Soo Cha) **[정회원]**

- 1987년 2월 : 서울대학교 전기공학과 (공학박사)
- 1987년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 전기공학과 교수

<관심분야>
전기기계, 에너지변환

이 희 준(Hee-Joon Lee) **[정회원]**

- 2001년 2월 : 순천향대학교 전기공학과 (공학박사)
- 2010년 2월 : 순천향대학교 BK교수
- 2014년 2월 ~ 2016년 2월 : 경북전문대 부교수
- 2011년 2월 ~ 현재 : 미르텍알앤디 대표이사

<관심분야>
전기기계, 에너지변환, 반도체공학