ISSN 1975-8359(Print) / ISSN 2287-4364(Online)
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 63, No. 12, pp. 1732~1736, 2014
http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2014.63.12.1732

Halbach magnet array 구조를 이용한 철도차량용 구동 전동기의 출력밀도 향상 설계 방법

Output Density Increasing Design for Railway Vehicle Traction Motor using Halbach Magnet Array Structure

이 기 덕* · 전 현 우* · 이 주* · 이 형 우†
(Ki-Doek Lee · Hyun-Woo Jun · Ju Lee · Hyung-Woo Lee)

Abstract - Generally, traction motors for railway vehicles are inferior to that of electric vehicle in terms of output density. Traction motors for railway vehicles are relatively free of spatial constraints than motors electric vehicles, but in terms of whole system efficiency, increasing output density of traction motor is helpful. In this paper, using Halbach magnet array structure, output density of traction motor for 40kW class tram was elevated. This paper introduce detailed design process of the Halbach magnet array structure applied model, and check the affects on output characteristics by parameters like rotor shape, airgap diameter and pole ratio. Also, electrical output characteristics were compared between typical SPMSM model and Halbach magnet array model, which has same output size.

Key Words : Traction motor, Halbach magnet array, Output density

1. 서 론

전기철도나 전기 자동차와 같은 시스템에서 사용되는 견인용 전동기는 전체 시스템 효율 향상을 위해 출력 밀도 향상에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 최근 영구자석 응용 기술의 발전으로 최근 다양한 분야에서 영구자석 전동기의 활용이 크게 늘어나는 추세이며, 이는 전동기의 효율 및 출력밀도를 향상시키는데 커다란 기여를 하고 있다. 특히 철도 차량용 구동용 전동기 분야에서 출력밀도 향상을 위해 영구자석형 전동기가 최근 경전철부터 고속철도까지 광범위하게 사용되고 있는 추세이다.

현재까지 연구되고 있는 고출력 밀도 설계 기법으로는 희토류 영구자석을 이용한 전동기의 자기장하를 증가시키는 방법, 분할코어를 이용하여 점적률을 두 배 이상 증가시키는 기술 등이 연구되었다[1,2]. 또한 영구자석형 전동기(PMSM)에서 최적의 극호율 선택으로 역기전력 고조파 저감을 통한 출력밀도 향상 방법도 소개되어있다[3]. 그러나 전기장하 증가는 시스템의 사이즈 및 동손에 의한 효율 문제 등을 감안할 때, 출력밀도 향상에 있어 한계점이 존재한다고 말할 수 있으며, 높은 보자력을 지닌 희토류 영구자석 재질 적용을 통한 자기장하 증가를 통한 출력밀도 향상도 그 한계가 존재한다. 일반적으로 알려진 견인용 전동기의 출력밀도는 고속철도의 경우 0.7~0.8kW/kg, 일반철도의 경우 0.3~0.4kW/kg으로 전기자동차용 견인 전동기의 일반적 출력밀도 1.5~2.0kW/kg에 비해 통상적으로 많이 뒤떨어져 있는 값을 가진다.

본 논문에서는 철도차량용 견인 전동기의 출력밀도 향상을 위한 방법으로 Halbach magnet array로 알려진 영구자석 배열을 이용하여 희토류 계열 영구자석형 전동기에서 추가적인 출력밀도 향상을 이끌어 내었으며, 전자기적 특성을 분석하여 기존 비교 모델에 대하여 Halbach magnet array 적용을 통해 어느 정도 수준의 출력밀도 향상이 가능한지에 대해 보였다.

2. 본 론

2.1 영구자석형 동기전동기 기본모델 소개

그림 1은 기존 비교 대상이 된 철도차량용 견인 전동기의 사양으로써, 본 논문에서는 노면 전차급 40kW 표면부착형 영구자석 전동기(Surface permanet magnet synchronous motor)를

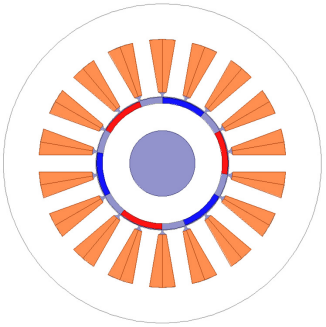


그림 1 초기 일반적 PMSM의 2D 단면도
Fig. 1 2D cross sectional view of the compared initial PMSM model

† Corresponding Author : Dept. of Railway System Engineering, Korea National University of Transportation, Korea.
E-mail : krhwlee@ut.ac.kr
* Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea
Received : October 16, 2014; Accepted : November 10, 2014

비교대상으로 선정하였다. 가급적 우수한 잔류자속밀도와 보자력 특성을 고려하여 영구자석은 SH N42 grade의 NdFeB 영구자석을 적용하였다.

영구자석 극호율은 고조파 함유율과 토크 리플 특성을 고려하여 0.7로 선정하였다. 고정자 치의 형상 및 shoe 구조는 아래 표 1에서 주어진 조건 안에 최적 설계가 이루어 졌으며, 본 논문에서 비교대상이 되는 Halbach magnet array구조 모델과 동일 전기장하를 적용하기 위해 슬롯 면적은 본 비교모델과 Halbach magnet array 모델에서 동일하다. 입력 전류는 100Arms이며, 이 때 전류밀도는 강제 공랭식 구조로 5A/mm2로 적용하였다.

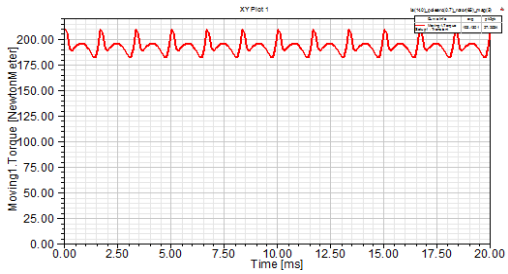
표 1 초기 일반적 PMSM 설계사양

Table 1 Specifications of the initial PMSM model

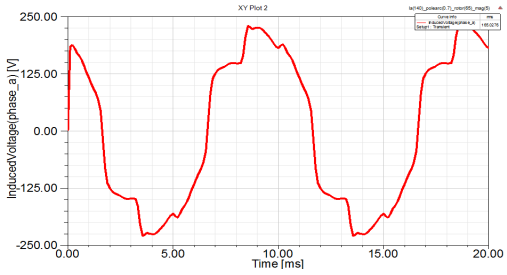
변수	값	단위
type	SPMSM	
phase / poles	3 / 6	-
number of slots	18	-
output	40	kW
rated speed	2000	rpm
stator outer diameter	288	mm
rotor diameter	126	mm
shaft diameter	30	mm
stack length	195	mm
input current limit	100	Arms
phase voltage limit	177	Vrms
core material	S08	-
magnet material	NdFeB (Br=1.280T)	-
core material density	7.85	g/cc
magnet material density	7.5	g/cc
shaft material density	8	g/cc
pole ratio	0.7	-

그림 2는 본 비교모델의 전자기적 특성을 나타낸다. 그림 2(a) 는 base speed 2,000rpm에서의 공극 토크로서, 193.13Nm로 목표 출력인 40kW에 약간의 여유를 갖으며 만족한다. 이 때, 토크 리플의 크기는 27.25Nm로 리플율은 14.11%이지만 회전자의 기구적 관성을 고려했을 때 해당 크기는 허용범위 내로 볼 수 있다. 그림 2(b)는 base speed에서의 역기전력 파형으로 전압제한 값 177Vrms를 넘지 않는다. 그림 2(c)는 해당 속도에서의 철손 및 와전류 손 크기로 각각 222.43W, 119.01W로 나타났다.

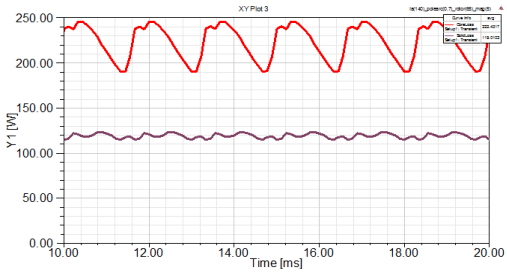
위의 출력을 발생하기 위한 초기 일반적 형상의 SPMSM은 최적 설계과정을 거친 결과 회전자 직경 126mm, 적층길이 195mm의 사이즈를 갖게 된다.



(a) torque



(b) induced voltage



(c) loss(core loss, eddy current loss)

그림 2 초기 일반적 PMSM 모델의 전자기적 특성

Fig. 2 magnetic characteristics of the compared initial PMSM model

2.2 Halbach magnet array 구조를 적용한 PMSM 회전자 구조

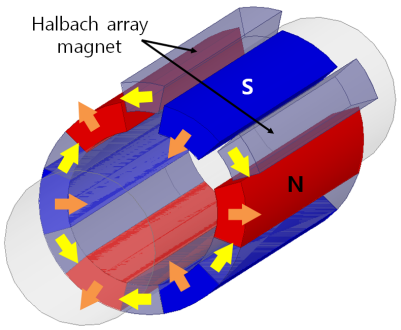


그림 3 Halbach magnet array의 회전자 구조

Fig. 3 rotor structure of Halbach magnet array magnet model

그림 3은 Halbach magnet array 구조를 적용한 PMSM 회전자 구조를 나타낸다. 극, 슬롯 수는 비교 모델인 일반형 IPMSM과 동일한 6극 18 슬롯 구조이다. 적용된 Halbach magnet array 구조는 그림 3에서 회전자 N극과 S극 사이의 회색으로 나타난 부분으로 N, S극의 착자 방향과 90°의 차이를 가지고 있다. 그림에서 화살표의 방향은 각 magnet segment의 착자 방향을 나타내고 있다. 회전자 구조는 비자성체 재질인 shaft의 표면에 Halbach magnet array의 영구자석이 부착된 형상으로, shaft 직경은 이전모델과의 비교를 위해 비교 모델과 동일한 직경을 갖는다. Core, shaft 및 NdFeB magnet 재질은 비교 대상 모델과 같은 재질을 적용

한다. 표 2는 Halbach magnet array 모델의 설계제약조건을 나타낸다.

표 2 Halbach magnet array PMSM모델 설계제약
Table 2 Constraints of the Halbach magnet array PMSM model design

변수	값	단위
type	SPMSM	
phase / poles	3 / 6	-
number of slots	18	-
stack length	195	mm
shaft diameter	30	mm
input current limit	100	Arms
phase voltage limit	177	Vrms
core material	S08	-
shaft material	sus303	-
magnet material	NdFeB (SH_N42) (Br=1.280T)	-
core material density	7.85	g/cc
magnet material density	7.5	g/cc
shaft material density	8	g/cc

2.3 Halbach magnet array PMSM 회전자 구조의 세부 설계

Halbach magnet array 적용 모델의 회전자는 비교 대상이 되는 일반적 SPMSM 모델에서와 동등한 두께의 shaft를 갖는다. Halbach magnet array 적용 모델은 영구자석 자체로 자속 흐름의 path가 생성되므로 비교대상의 SPMSM과 같이 회전자의 core가 필요하지 않다. 때문에 shaft의 표면에 바로 영구자석을 부착할 수 있으며 이를 통해 회전자 사이즈의 축소가 가능하다. 이것은 동등 출력에서 전체 부피를 줄임으로써 출력밀도 상승을 달성할 수 있게 한다. Halbach magnet array 모델의 회전자는 비자성체 shaft 재질이 된다. FEM 해석 시 shaft 재질은 비교 대상 SPMSM과 Halbach magnet array모두 vacuum으로 설정하였다.

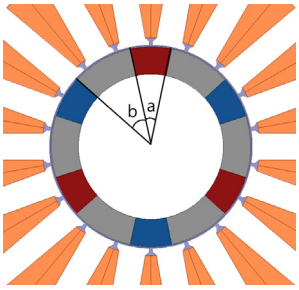
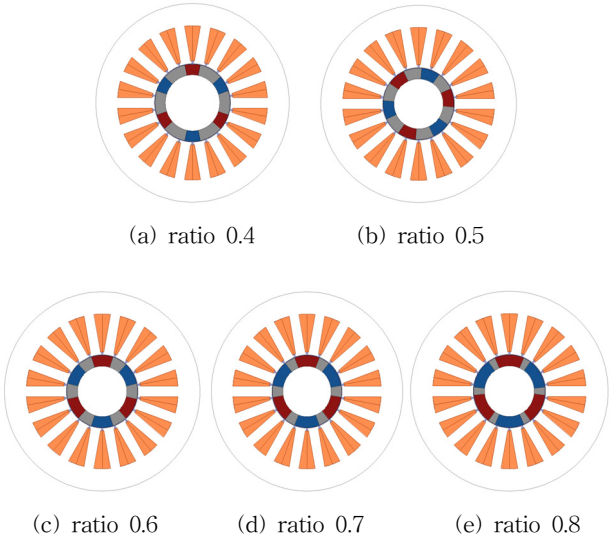


그림 4 Halbach array 모델의 영구자석 배열 및 극호율
Fig. 4 magnet array and pole ratio of Halbach array model



(a) ratio 0.4 (b) ratio 0.5

(c) ratio 0.6 (d) ratio 0.7 (e) ratio 0.8

그림 5 Halbach magnet array 모델의 극호율 변화
Fig. 5 change of pole ratio of Halbach magnet array model

그림 4는 앞서 2.2에서 소개한 Halbach magnet array 적용 모델의 회전자 영구자석의 pole ratio를 어떻게 선택할 것인가에 대한 내용을 소개한다. 여기서 말하는 pole ratio란, 영구자석의 N극, S극이 차지하는 극호율과 사이의 Halbach magnet array의 영구자석이 차지하는 극호율의 비율로 (영구자석 N극이 차지하는 각도) / (영구자석 N극이 차지하는 각도 + Halbach magnet array 영구자석이 차지하는 각도)를 말한다. 극호율은 출력, 토크 리플 및 기전력 파형 등에 영향을 미치는 주요 변수 중 하나로 Halbach magnet array 적용 모델의 출력밀도 상승을 위해 고려되어야 하는 주요한 요소이다. 본 논문에서는 pole ratio 0.4부터 0.8까지 0.1씩 변화하며 pole ratio의 변화에 따른 특성을 검토하였다.

또한 전기기기에서 출력은 아래 식에서 확인할 수 있듯이 공극너비의 제곱에 비례하므로 동일한 최외각 사이즈와 전기비장하를 제한으로 생각할 때 회전자 직경 역시 출력에 가장 큰 영향을 미치는 요소 중 하나이다.

$$K_0\pi^2 D^2 l(ac)(B)\frac{f}{2P}c\cos\phi = K_0\pi^2 D^2 l(ac)(B)n c\cos\phi$$

(D=공극 직경, l=적층 길이, ac=전기장하, B=자기장하, n=극 쌍수)

때문에 동일 극호율에 대해 회전자 반경이 변화함에 따라 발생하는 출력을 확인해 볼 필요가 있다. 본 논문에서는 회전자 직경 및 pole ratio의 변화에 대한 출력 및 토크 리플의 크기 변화를 확인하였으며, 그 결과가 아래 표 3에 함께 나타나있다.

표 3 Halbach magnet array 모델의 회전자 직경 및 극호율에 따른 출력 특성

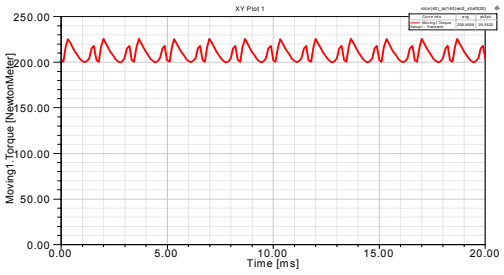
Table 3 output characteristic of Halbach magnet model according to rotor diameter and pole arc ratio

회전자 직경 / 극호율		30mm	35mm	40mm
0.4	Torque	173.55	185.51	205.58
	Ripple	87.76	101.69	117.81
0.5	Torque	172.33	184.67	204.83
	Ripple	58.54	68.84	79.56
0.6	Torque	167.81	179.89	209.47
	Ripple	20.45	25.71	25.56
0.7	Torque	160.23	171.72	191.19
	Ripple	67.20	76.23	83.52
0.8	Torque	149.64	160.19	165.91
	Ripple	59.75	65.02	70.56

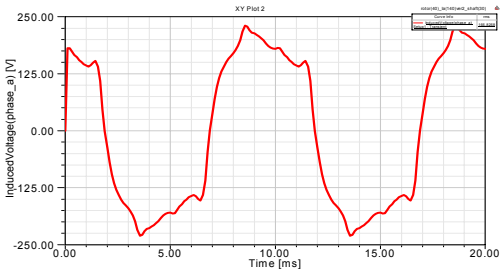
위 표 3은 pole arc의 변화에 따라 공극직경을 변화해 가며 발생되는 토크 및 리플을 나타낸 것으로, pole arc는 0.4부터 0.8까지, 공극 직경은 목표 출력인 40kW에 근접하는 출력을 낼 수 있는 40mm 근방의 사이즈에 대해 5mm단위로 확인하였다. 위 결과에서 목표 출력에 가장 근접한 결과는 회전자 직경 40mm에 pole arc 0.6 모델이었다. 위의 결과와 비교되는 기준 모델인 기존 SPMSM의 사양은 pole arc 0.7, 회전자 직경 60mm로 두 모델 모두 목표 출력의 40kW에 거의 만족하였다. 위의 결과에서 각 모델에서 발생하는 토크 리플은 대부분 40~50%에 육박하고 있으나 pole arc 0.6에서 만큼은 약 15% 정도로 다른 모델에 비해 매우 작은 리플 크기를 보이고 있다.

토크 리플에 기여하는 성분으로는 운전 시 전류에 의한 성분 외에 코깅 토크에 의한 성분이 주요하다[4]. 코깅토크는 자석의 중심축과 슬롯 영역 주변자계의 작용에 의해서 발생되는 것이 주요 요인으로, 영구자석에 의한 기자력의 고조파와 슬롯에 의한 공극 퍼미언스 고조파의 상호작용에 의해 발생한다[5]. 또한, 자석의 중심축이 고정자 치의 중심이나 슬롯의 중심축에 일치할 때 발생하지 않고, 슬롯 단부와 일치될 때 최대값을 갖는다. 위 표 3에서, pole arc 0.6 모델은 radial 방향의 자속이 나오는 N, S극의 끝 부분이 각 극과 조합을 이루는 슬롯 단부와 일치되어 있다. 반면, pole arc 0.6 이외의 모델은 영구자석의 끝 부분이 슬롯 단부에 걸쳐져 있다. 이 때문에 해당 영구자석 부분에 의한 공극자속과 고정자 치 및 슬롯과의 주변자속에 의한 맥동이 발생하며[4], 이것으로 인해 타 pole ratio에서는 상대적으로 큰 토크 리플이 발생하게 된다. 토크 리플은 특히 전동기의 출력밀도를 높이기 위해 고 에너지의 자석을 사용하거나, 위의 경우처럼 자속 집중효과를 극대화하여 공극자속밀도를 증가하였을 때, 그 영향이 더욱 증가한다. 때문에 본 논문에서 제안된 Halbach magnet array 모델은 토크 리플이 크게 발생할 가능성이 많기 때문에 가급적 토크 리플을 저감할 수 있는 pole ratio 0.6을 선택하였다.

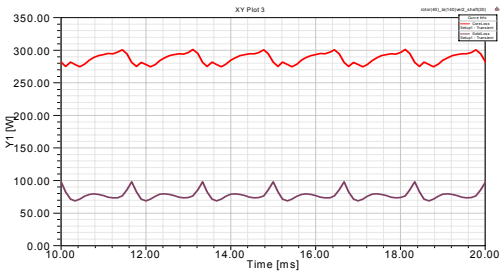
3 기존 SPMSM과 Halbach magnet array PMSM 모델의 특성 결과 비교



(a) torque



(b) induced voltage



(c) loss(core loss, eddy current loss)

그림 6 Halbach magnet array PMSM모델의 전자기 특성

Fig. 6 magnetic characteristics of the Halbach magnet array PMSM model

그림 6은 Halbach magnet array 모델의 전자기적 특성을 나타낸다. 그림 6(a) 는 base speed 2,000rpm에서의 공극 토크로서, 209.47Nm로 목표 출력인 40kW에 약 10%정도의 여유를 갖으며 만족한다. 이 때, 토크리플의 크기는 25.56Nm로 리플율은 12.20%로, 27.25Nm의 크기로 약 14.11%의 리플율을 보였던 비교모델과 거의 동일한 정도이다. 그림 6(b)는 base speed에서의 역기전력 파형으로 종전 모델과 비슷한 수준으로 전압제한 값 177Vrms를 넘지 않는다.

그림 6(c)는 해당 속도에서의 철손 및 와전류손 크기로 각각 287.00W, 77.85W로 나타났다.

표 4에는 기존 SPMSM모델과 Halbach magnet array 모델에 요구되는 재질의 밀도 및 부피에 따른 총 질량이 비교되었다. 또한 전자기적 출력과의 비교를 통해 두 비교모델간의 무게에 따른 출력밀도를 구하였다. 동등수준 출력으로 비교하였을 때, 총 질량은 Halbach magnet array모델이 기존 SPMSM모델에 비하여 약 21.1% 작았다. 그 이유는 Halbach magnet array 구조의 특성 상, 더 많은 영구자석의 사용이 가능해 공극 자속밀도가 증가되어 동등 출력을 내기위한 공극 사이즈가 줄어들었으며, 이에 따라 총 고정자 외경 또한 줄어들어 Core의 사용량이 현저

표 4 대상모델의 출력밀도 비교

Table 4 comparison of output density of the models

재질		Typical SPMSM model	Halbach magnet array model	단위
Magnet	재질	NdFeB(42grade)		
	밀도	7.5		g/cm^3
Core	재질	electrical steel(50PN1300)		
	밀도	7.6		g/cm^3
Coil	재질	copper		
	밀도	8.9		g/cm^3
Shaft	재질	stainless steel		
	밀도	8.06		g/cm^3
net. weight		86.62	68.34	kg
Output		40.45	43.87	kW
Output density		0.47	0.64	W/g

히 줄어들었기 때문이다. 이에 따라 동등 수준 출력 내에서 Halbach magnet array 모델은 기존 SPMSM모델에 비하여 약 36.17%의 출력밀도 증가를 보였다.

3. 결 론

본 논문에서는 일반적인 형상의 SPMSM 전동기 모델에 대하여, Halbach magnet array 모델의 전동기의 출력특성을 비교하였다. 비교대상이 되는 Halbach magnet array 모델의 도출을 위하여, 전동기 출력에 영향을 미치는 설계변수의 영향을 고려하였으며, 특히 pole ratio 변화에 따른 토크리플에서의 영향을 집중 검토하였다. 자속 집중 효과를 극대화하여 공극 자속밀도를 최대화 한 위의 Halbach magnet array 모델의 경우 비교대상이 된 일반적 형상의 표면부착형 영구자석 전동기에 비해 더 큰 토크 리플이 발생할 수도 있으나, 적절한 pole ratio의 선택으로 기존 모델과 거의 동등한 수준의 ripple ratio를 얻을 수 있었다. Halbach magnet array 구조의 특성 상, 동일 사이즈 제약 내에서 더 많은 영구자석 사용이 가능하였다. 이에 따라 공극 자속밀도가 증가하여 동등 출력을 내기 위해 필요로 하는 사이즈가 줄어들었으며, 결과적으로 출력밀도의 증가가 가능하였다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 한국교통대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임

References

[1] F. Magunssen, P. Thelin, Sadarangani (2003) Design of compact permanent magnet machines for a novel HEV propulsion system, Proceedings of Electric Vehicle Symposium, USA.

[2] K.-C. Kim (2008) A study on the optimal design and control performance of interior permanent magnet synchronous motor for EV/HEV, Ph.D Dissertation, Hanyang University, Korea (in Korean).

[3] K.-J. Lee (2004) A study on the design of interior permanent magnet synchronous motor for HEV, Ph.D Dissertation, Hanyang University, Korea (in Korean).

[4] K. J Lee. (2003) Effect of pole to slot ratio on cogging torque and EMF waveform in permanent magnet motor with fractional-slot. The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers.

[5] T.M. Jahns, Pulsating torque minimization techniques for permanent magnet ac motor drives-A review. IEEE Trans. on Power Electronics.

저 자 소 개

이 기 덕(Ki-Doek Lee)

1983년 5월 3일 생. 2009년 인천대학교 전기공학과 졸업. 2011년 한양대학교 대학원 공대 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 02-2220-0349 Fax : 02-2295-7111

E-mail : leekidoek@naver.com

전 현 우(Hyun-Woo Jun)

1987년 8월 27일 생. 2012년 한양대학교 전기공학과 졸업. 2014년 동 대학원 공대 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 02-2220-0349 Fax : 02-2295-7111

E-mail : jhwinc@naver.com

이 주(Ju Lee)

1963년 8월 30일 생. 1986년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 공대 전기공학과 졸업(석사). 1997년 일본 Kyusyu University 대학원 공대 전기공학과 졸업(박사). 1997~현재 한양대학교 공대 전기공학과 정교수.

Tel : 02-2220-0349 Fax : 02-2295-7111

E-mail : julee@hanyang.ac.kr

이 형 우(Hyung-Woo Lee)

1974년 1월 11일 생. 1998년 한양대학교 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 공대 전기공학과 졸업(석사). 2003년 Texas A&M University, College Station 졸업(박사). 2004년 Theoretical and Applied Mechanics, Cornell University (박사 후 과정). 2005년 한양대학교 BK division 계약교수. 2013~현재 한국교통대학교 철도차량 시스템공학과 조교수.

Tel : 070-8855-1652

E-mail : krhwlee@ut.ac.kr