DBpia

ISSN 1975-8359 [Print] / ISSN 2287-4364 [Online]
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 68, no. 12, pp. 1631~1635, 2019
https://doi.org/10.5370/KIEE.2019.68.12.1631

A Strategy of Tilting Force Compensation Algorithm through Lateral Displacement Restoring Force of Individual Motor Control for Low-depth Railway

저심도 도시철도용 개별 모터의 횡변위 복원력제어를 통한 틸팅력 보상 알고리즘 제어 전략

Jun-Hui Won · Young-Woo Noh · Seung-Taek Oh · Ju Lee
원준희* · 노영우* · 오승택* · 이주†

Abstract

In connection with the introduction of new public transportation due to urbanization, research on low-depth urban railways has been actively conducted. When the independently driving type is applied to such a low-depth urban railway, the independent torque control of the left and right wheels can be performed independently, but the mechanical resilience is weak because there is no wheeling. In order to make up for this drawback, a control method through the lateral displacement restoring force is proposed. It is proposed to an algorithm that makes restoring force stronger by controlling each motor of left and right wheels individually. This algorithm is also verified through MATLAB / SIMULINK.

Key Words

PMSM torque control, Lateral displacement restoring force, Independently driving railway

1. 서 론

최근 에너지 절약 정책의 일환으로 전동기의 고효율화 정책으로 인한 가전, 기계, 자동차 및 로봇 응용 산업분야 등에서 기존의 전동기에 비하여 고 출력, 고 효율 및 고 성능의 특징을 가지는 영구자석형 동기전동기(PMSM: Permanent Magnet Synchronous Motor)의 연구가 늘어나고 있다[1][2].

이를 이용하여 제품의 성능을 개선하려는 연구가 활발히 진행 중 이다. 이에 따른 전동기의 저 소음, 저 진동 등의 요구치가 높아지고 있다. 또한 PMSM은 저속 고 토크 또는 고속 영역 에서 운전하는 특징을 가지고 있으며 같은 크기의 유도전동기(Induction motor)대비 부피당 출력밀도가 높다. 그러므로 동일 출력대비 부피가 감소하므로 시스템의 소형화 및 경량화까지 할 수 있다.

철도차량에서 주로 쓰이는 유도전동기보다 PMSM이 저심도 도시철도차량에 더 적합하므로 이에 대한 연구가 필요하다. 본 논문에서 연구한 방식은 기존 유도전동기 모델의 1C4M 방식과는 다르게 영구자석 동기전동기의 제어는 개별 모터마다 제어기가 필요하므로 1C1M의 방식을 채택하여 전동기를 독립적으로 제어하였다. 이는 독립적으로 좌우를 제어가 가능하게 만들어 도시의 사거리의 좌회전 구간인 곡선부에서 좌우 토크차이를 통한 매끄러운 곡선주행을 가능하게 만들어 줄 수 있으나 독립구동차량의 경우에는 윤축이 없으므로 직선로에서 기계적인 복원력이 약하다는 단점을 가지고 있다.

이러한 단점을 보완하기 위해 복원력을 강하게 하여 좌우 각각의 모터를 정밀 제어하여 복원력을 강하게 만들어 기계적인 복원력을 전기적인 토크의 복원력으로 보상해 주는 알고리즘을 제안한다[3]. 또한 레이저센서로 위치정보를 받아와 차량의 센터링을 할 수 있도록 제어가능하고 이를 통해 액추에이터와 같은 추가적인 현가장치 없이 모터만으로 센터링을 할 수 있도록 한다.

2. 본 론

2.1 PMSM의 토크방정식

영구자석 동기전동기의 토크는 dq축 전압 방정식을 이용한

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Hanyang Univerity, Korea.
E-mail: julee@hanyang.ac.kr
https://orcid.org/0000-0003-0251-6492
* Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Hanyang Univerity, Korea.
https://orcid.org/0000-0003-0588-7627 https://orcid.org/0000-0002-3649-8870
https://orcid.org/0000-0002-5889-2780
Received : October 2, 2019 **Accepted** : November 14, 2019

Copyright © The Korean Institute of Electrical Engineers
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
This paper was nominated for the best paper at 2019 Summer Conference of the Korean Institute of Electrical Engineers, and it was approved and published by the Editorial Committee after review of the electrical society.

www.dbpia.co.kr

전동기의 입력 전력으로부터 구할 수 있다. dq축 좌표계에서 입력 전력은 아래와 같다[4].

$$P=\frac{3}{2}(v_d i_d+v_q i_q) \tag{1}$$

dq축 전압방정식을 식 (1)에 대입하면 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}P&=\frac{3}{2}\left(\left(R_s i_d+\frac{d\lambda_d}{dt}-\omega_r\lambda_q\right)i_d+\left(R_s i_q+\frac{d\lambda_q}{dt}+\omega_r\lambda_d\right)i_q\right)\\&=\frac{3}{2}\left(R_s(i_d^2+i_q^2)+i_d\frac{d\lambda_d}{dt}+i_q\frac{d\lambda_q}{dt}+\omega_r\Phi_a i_q\right.\\&\left.+\omega_r(L_d-L_q)i_d i_q\right)\end{aligned} \tag{2}$$

여기서 $R_s(i_d^2+i_q^2)$ 은 고정자 동손, $i_d\frac{d\lambda_d}{dt}+i_q\frac{d\lambda_q}{dt}$ 은 자계에너지 변동분, $\omega_r\Phi_a i_q+\omega_r(L_d-L_q)i_d i_q$ 은 기계적 출력 영구자석 동기전동기의 토크는 기계적 출력을 ω_r로 나누어주면 식 (3)의 토크식을 구할 수 있다. [5][6]

$$T=\frac{3}{2}(\Phi_a i_q+(L_d-L_q)i_d i_q) \tag{3}$$

여기서 구한 식 (3)의 토크식은 뒤에 나오는 틸팅력의 계산값을 통해 필요토크를 발생시켜 복원제어를 진행한다.

2.2 독립구동 차량의 틸팅력 계산

기존 독립구동차량에 대한 연구에 있어서 평탄면에서 외력이 작용했을 때의 연구가 주된 연구로 진행 되었다[7~9]. 하지만 순시적인 부하상태가 아닌 지속적인 부하로 작용하는 틸팅 상태에서의 연구를 진행하였다.

먼저 틸팅각을 연산하는 방식이 아래 그림 1에 표현되어있다. 그림 1의 (a)에서의 초기각 θ_1으로 아래 식 (4)로 연산이 된다.

$$\theta_1=\arctan\left(\frac{D_V}{D_L}\right) \tag{4}$$

그림 1의 (b)에서의 틸팅각 θ_t은 측정된 값에서 초기각을 빼주면 아래 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$\theta_t=\arctan\left(\frac{D_V}{D_L}\right)-\theta_1 \tag{5}$$

독립구동차량이 경사로에 있는 경우의 영향 받게 되는 틸팅력을 그림 2를 기반으로 아래의 식 (6), (7), (8)과 같이 구현하였다.

$$\sum F_x=0\,,\,F_{x_1}+F_{x_2}=ma_1 \tag{6}$$

$$\sum F_g=0\,,\,F_{g_1}+F_{g_2}=mg \tag{7}$$

$$\sum M=0\,,\,ma_l y_m+2F_{y_1}\frac{w}{2}=mgx_m \tag{8}$$

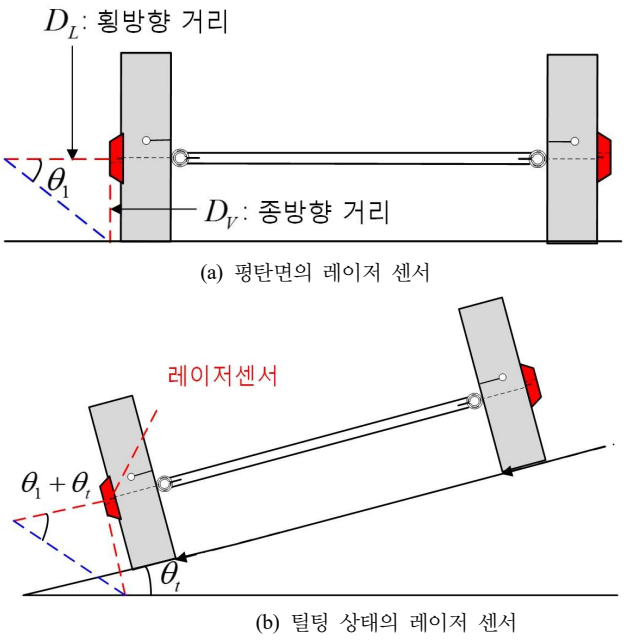


그림 1 독립구동차량의 틸팅력 계산
Fig. 1 The calculation of tilting force of independently driving railway

이를 통해 힘을 받게 되는 가속도 값을 구하면 아래 식 (9)과 같다.

$$a_l=\frac{mgx_m-2F_{y_1}}{my_m} \tag{9}$$

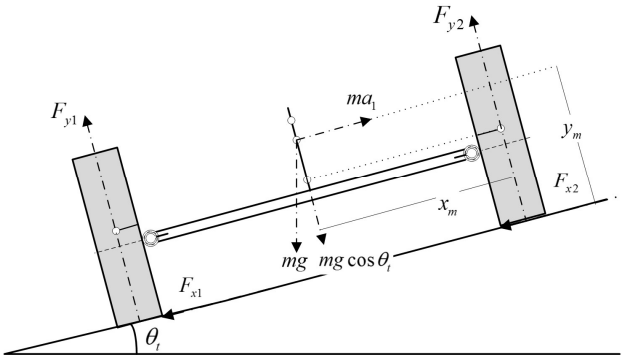


그림 2 독립구동차량의 틸팅력 계산
Fig. 2 The calculation of tilting force of independently driving railway

기존 시스템에서는 윤축이 존재한 형식이라 토크제어를 하면 모터1대로 두 바퀴가 같이 구동이 된다. 하지만 윤축을 없애고 각륜에 In-wheel 모터를 넣으면 그에 따라 토크차이를 보였을 때 편마모 보정이 가능하다. 기존 토크 방식은 부하마다 토크차이가 발생한다. 다만 이는 철로 위의 차량이 센터링에

www.dbpia.co.kr

제어가 전혀 안되는 상황이므로 레일의 중심으로 돌아 오려는 복원력이 존재하지 않고 중력에 따라 마찰된다. 여기서 일반적인 좌우바퀴 토크제어를 통해 마모 보정이 가능할 수 있다.

하지만 그 토크차이를 얼마만큼 줄 것 인지 연산이 되어야 제어가 가능하다. 이를 센서를 통해 제어를 할 경우 센터를 맞추기 위한 제어를 지속적으로 하게 되기 때문에 레일의 중심으로 돌아 올 수 있다. 횡방향으로 복원력이 작용하도록 레이저 센서를 통해 레일의 중심으로 이동하였는지 확인이 가능하고 중심으로 돌아 갈 수 있도록 제어를 하기 때문에 기존 토크전류제어 대비 보다 더 정확하고 필요한 수치를 연산할 수 있다.

2.3 독립구동차량의 횡 변위 복원 Topology 제안

$$F_{Drive-res} = F_{Tilt-res} + F_{Air-res} + F_{Curved-res} + F_{Wheel-res} \tag{10}$$

식 (4)~(6)에서 구한 힘이 식 (8)에서 구한 주행 마찰력이 영향을 미친다. 주행 마찰력은 공기저항 마찰력, 곡선주행 마찰력, 경사로 마찰력, 휠과 레일사이의 마찰력의 합으로 계산 할 수 있다.

이를 고려하여 복원력을 구하는 토폴로지를 구성하면 그림 3과 같다. 그림 3에서 보듯이 차량의 레이저 센서에서 측정되는 횡 변위를 통해 틸팅 각을 연산한 후 필요한 요구 토크 값을 계산한다. 횡 변위 복원 알고리즘에 입력 시 틸팅력에 대한 횡 변위 복원 토크를 만들어낸다. 여기서 생성된 토크는 토크/전류 변환을 통해 PMSM 전류벡터알고리즘에 들어가서 지령 전압을 생성하고 이는 2상3상변환을 통하여 3상 전압형 인버터에 들어가게 된다. 그 후 각각 4개의 바퀴를 제어한다. 여기서 위치센서를 통해 위치정보를 2상/3상, 3상/2상변환에 입력된다. 또한 전류센서를 통해 지령전류 값과 피드백 값의 차이로 전류제어를 한다.

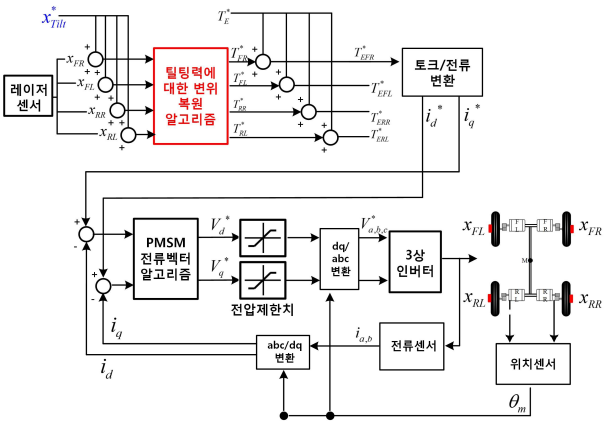


그림 3 독립구동차량의 틸팅력에 대한 복원력 토폴로지
Fig. 3 The restoring force topology for tilting force of independently driving railway

2.4 독립구동차량의 틸팅력 복원 알고리즘

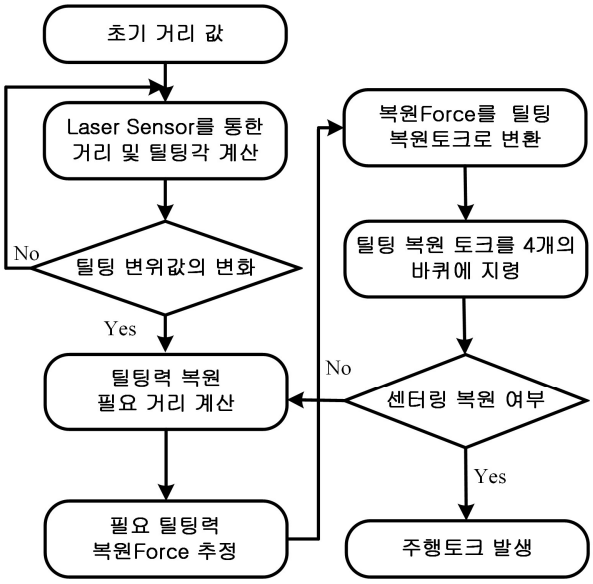


그림 4 독립구동차량의 틸팅력 복원 알고리즘
Fig. 4 The tilting force algorithm of independently driving railway

그림 4는 그림 3에서 빨간색으로 하이라이트 된 독립 구동차량의 틸팅력 복원 알고리즘을 나타낸 그림이다. 여기서 초기 거리값을 받아서 이를 센싱 된 값과 비교하여 변했을 경우 복원에 필요한 거리를 계산하여 필요한 복원 힘을 추정한다. 그 후 복원 힘을 통하여 복원 토크로 계산한 다음 계산된 복원 토크값을 4개의 바퀴에 개별적으로 지령을 내려주어 틸팅력에 저항하여 복원력이 생성되므로 차량의 레일 위 센터링 유지를 도와준다.

표 1 독립구동용 PMSM의 사양
Table 1 The specification of PMSM of Independently driving railway

파라미터	값	단위
극수/슬롯수	10/12	
축 길이	60	mm
고정자 외경	80	mm
DC전압	48	V
최대전기자전류	10	
전기자권선 저항	0.06	ohm
전기자권선 인덕턴스	328.5	
쇄교자속	18.6	mWb
기저속도	2400	rpm
최대토크	2.26	Nm

표 1은 독립구동용 PMSM의 사양이며 이를 기반으로 Matlab/Simulink 시뮬레이션을 진행하였다. 또한 이 모델은 실차대비

www.dbpia.co.kr

길이 1:5 부피 1:125의 비율로 축소한 실차 시스템 검증용 프로토 타입 모델이다. 기존 유도기모델의 사양은 [10]에서 확인할 수 있다.

2.5 시뮬레이션 및 결과

표 1을 통하여 시뮬레이션을 진행하기에 앞서 그림 5의 트랙의 마찰정도를 설정하여 트랙의 비등방성을 묘사하였다. 그림 6과 같이 왼쪽으로 기울어지는 방향으로 틸팅각을 설정하고 0~0.4초까지 0도로 지정하고 0~0.8초까지 틸팅각을 최대 6.5도까지 증가시키고 0.8~1.2초까지 이 각도를 유지한 후 1.2~1.6초까지 다시 틸팅각을 줄여주고 1.6초부터 2초까지는 틸팅각을 0으로 놓고 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 결과 파형을 보게 되면, 그림 7와 같이 시뮬레이션 결과파형이 도출 된다.

그림 7(a)에서 외력이 발생하는 0.38초서부터 변화가 시작된다. 이를 통해 외력에 복원하기 위한 토크가 발생하게 되어 원래 센터에 있던 72의 위치에 위치하기 위한 제어를 시작하게 되고 1초에 가까워지면 어느정도 수렴하다가 다시 1.2초 때 부터 틸팅각을 0도로 줄여주면 다시 센터링을 하기 위해서 횡변위를 맞춰주는 제어를 하기 시작한다.

이를 통해 2초정도면 센터링을 완성 시킨다. 기존 외력에 틸팅력까지 포함되어있어 평탄로에서 복원 할 때 보다 더 많은 시간이 소요가 되지만 결국에는 센터로 수렴하게 된다. 그림 7(b)에서는 외력 발생 후 좌우바퀴의 토크가 다르게 발생하여 왼쪽으로 틸팅되어 있기 때문에 이로 인한 틸팅에 대한 복원토크가 왼쪽 바퀴에서의 토크가 더 발생해서 오른쪽 바퀴는 토크를 줄여 전체적인 힘의 방향이 틸팅으로 인해 왼쪽으로 쏠려 있던 힘을 오른쪽으로 복원시키는 힘이 작용된다. 다시

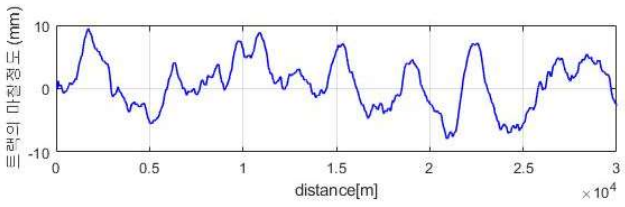


그림 5 트랙의 마찰정도
Fig. 5 The friction of track

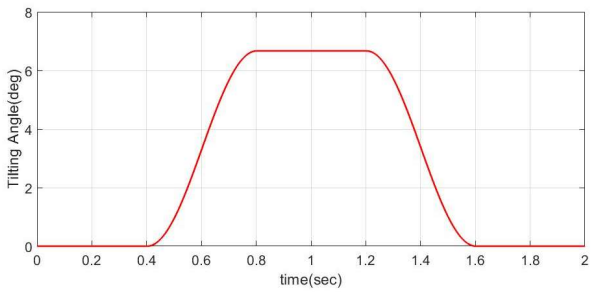
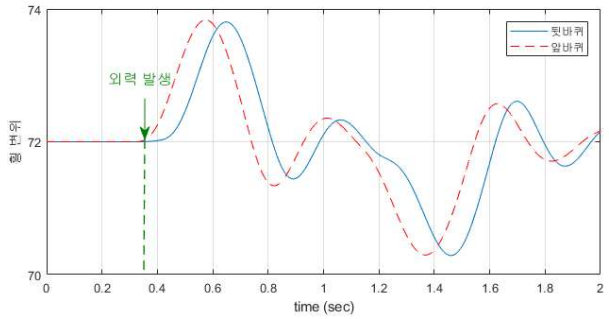
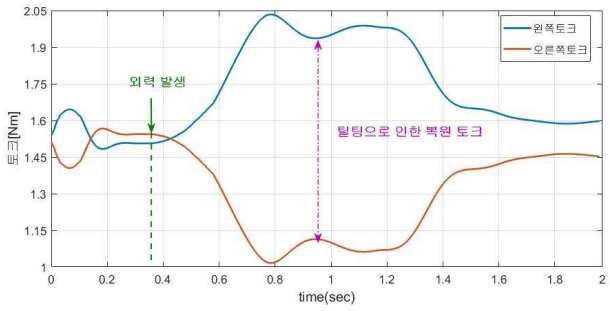


그림 6 틸팅각 설정 데이터
Fig. 6 The tilting angle setting data



(a)변위결과



(b)토크 결과

그림 7 시뮬레이션 결과
Fig. 7 The simulation result

1.2초 이후 틸팅각을 줄여주게 되면 점차 좌우 토크의 차이는 줄어들게 된다. 또한 왼쪽과 오른쪽의 토크차이가 틸팅으로 인한 복원토크가 생성됨을 확인 할 수 있다.

3. 결 론

윤축이 없는 독립구동 모델의 경우 선로 상의 불균일함이 있을 경우 기계적인 복원이 윤축이 있을 때보다 현저히 약하다. 이러한 구조적인 문제를 전기적인 제어방법으로 변위 복원 알고리즘을 제시함으로써 복원력 생성을 통해 센터링을 하였다. 시뮬레이션에서 입증한 바와 같이 틸팅력 복원 알고리즘을 적용하면 전기적인 복원력이 생성되어 틸팅과 같은 경사 외란에도 강인하게 운행할 수 있음을 보였다. 추후의 연구는 틸팅과 동시에 곡선주행까지 완료하는 연구를 진행할 예정이다.

Acknowledgements

이 논문은 국토부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구사업임 (19TBIP-C143153-02)

References

[1] S.-G. Lee, J.-N. Bae, and W.-H. Kim “Study on Calculation Process of Current and Current Phase Angles Considering Control for Traction IPMSMs,” Journal of The Korean Society for Railway, vol. 21, no. 2, pp. 159-165, 2018.

www.dbpia.co.kr

[2] K. H. Jin, S. J. Kim, D. H. Yi, S. H. Kwon, et al., "Maximum torque operation of IPMSM drives for the next generation high speed railway system," Journal of the Korean Society for Railway, vol. 13, no. 5, pp. 493-499, 2010.

[3] Jun-Hui Won, Jong-Suk Lim, Seung-Taek Oh, Hyun-Jong Eom, Ju Lee, Sol kim, and Seung-Joo Kim, "A Research on PMSM Independent Drive Tilting Force Restoring Control Algorithm for Low Depth City Railway," in The Korean Institute of Electrical Engineers Conference, 2019.

[4] S. Y. Cho, H. Ahn., H. C. Liu, H.-S. Hong, J. Lee, and S.-C. Go, "Analysis of Inductance According to the Applied Current in SpokeType PMSM and Suggestion of Driving Mode," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 53, no. 6, pp. 1-4, 2017.

[5] M. Lin and C. G. Chen, "Design and Implementation of a Direct Torque Controlled Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive Based on a Novel Flux Model," IEEE PEDS 2011, pp. 394-398, 2011.

[6] A. Wang, L. Zhang, and S. Dong, "Dynamic Performance Improvement based on a New Parameter Estimation Method for IPMSM used for HEVs," in IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pp. 1825-1829, 2011.

[7] Han-Woong Ahn, Hyun-Jong Park, Junhui Won, Soyeon Cho, Hyungwoo Lee, and Ju Lee, "A Study on Lateral Displacement Control by Design of Independent-wheel Type Machine," in The Korean Institute of Electrical Engineers Conference, pp. 645-646, 2015.

[8] Yonho Cho, Wonsang Lee, and Jaeho Kwak, "Running performance improvements of the independently rotating wheel type railway vehicle using robust control," in The Korean Society For Railway Conference, pp. 1303-1308, 2014.

[9] Jinhyun Park, Ho-Un Jeong, Junhyung Park, and Sung-Ho Hwang, "Torque Distribution Strategy for Energy Efficiency improvement of Independently Driven Vehicle," in The Korean Society Of Automotive Engineers Conference, pp. 1165-1165, 2015.

[10] Hyun-Gyu Hwang, Hee-Chul Park, Eun-Kyu Lee, and Sun-Bum Kwon, "A study on refurbishing VVVF Inverter for train of Busan metro line 2," in The Korean Society for Urban Railway Conference, pp. 1407-1413, 2011.

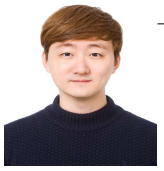
저자소개

원준희 (Junhui Won)

1989년 12월 16일생. 2013년 홍익대학교 전자전기공학부 졸업. 2013~현재 한양대학교 전기공학과 석박사통합과정.
Tel : 02-2220-0349
E-mail : sb965110@naver.com

노영우 (YoungWoo Noh)

1980년 5월 11일생. 2012~현재 LG이노텍, 2018년~ 현재 한양대학교 전기공학과 박사과정
Tel : 02-2220-0349
E-mail : anthony80@naver.com



오승택 (SeungTaek Oh)

1991년 7월 15일생. 2016년 한경대학교 전기전자제어공학부 졸업(학사). 2018년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2018년 ~ 현재 한양대 대학원 전기공학과 박사과정.
Tel : 02-2220-0349
E-mail : ost9107@naver.com

이주 (Ju Lee)

1963년 8월 30일생. 1986년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988 ~ 1993년 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대학교 System 정보과학연구과 졸업(박사). 1997년 한국철도기술연구원 선임연구원. 1997년 ~ 현재 한양대학교 전기생체공학부 교수.
Tel : 02-2220-0342
E-mail : julee@hanyang.ac.kr

www.dbpia.co.kr