

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2022.22.4.127>

JIIBC 2022-4-18

반도체 변압기 및 스위치드 릴럭턴스 전동기(SRM)를 적용한 철도차량 추진제어

Propulsion Control of Railway Vehicle using Semiconductor Transformer and Switched Reluctance Motor

정성인*

Sungin Jeong *

요약 철도차량에 탑재된 전장품 중 가장 큰 하중을 차지하는 것은 주변압기로 낮은 운전 주파수(60Hz)로 인해 전력 밀도가 0.2~0.4 MVA/ton 정도로 낮아 경량화에 중요한 요소로 작용하고 있다. 따라서 철도차량용 주변압기를 개선하기 위해 몰드 변압기, 반도체 변압기 등에 관한 연구가 국내외적으로 활발히 진행 중이다. 한편 국내외 철도차량에 대부분 적용되는 견인전동기로 최근에는 유도전동기를 대체하여 영구자석 동기전동기(PMSM)를 적용하려는 시도가 이루어지고 있다. 영구자석 동기전동기(PMSM)는 유도전동기에 비해 높은 출력밀도와 효율 확보가 가능하지만 제작에 필요한 재료의 가격이 비싸고 설계가 유도전동기 대비 다소 어렵다는 단점이 있다. 이러한 문제점을 고려하여 본 논문에서는 소형 경량화가 가능한 반도체 변압기를 적용하고, 철도차량의 경량화, 고효율화 등의 요구사항에 맞춰 구조가 간단하면서 회전수가 높고 고투크, 저비용인 SRM을 적용할 수 있는 연구내용을 제안하고자 한다.

Abstract Among the electrical components mounted on railroad cars, the largest load is the main transformer, which has a low power density of 0.2~0.4 MVA/ton due to the low operating frequency(60Hz), which is an important factor for weight reduction. Therefore, research on molded transformers, semiconductor transformers, etc. is being actively conducted at Domestic and foreign in order to improve the main transformer for railway vehicles. Meanwhile, attempts are being made to apply a permanent magnet synchronous motor (PMSM) to replace an induction motor as a traction motor that is mostly applied to domestic and foreign railway vehicles. Permanent magnet synchronous motors (PMSMs) can secure higher power density and efficiency compared to induction motors, but have disadvantages in that the materials required for manufacturing are expensive and design is somewhat difficult compared to induction motors. Considering these problems, in this paper, we suggest that a small and lightweight semiconductor transformer is applied, and a simple structure, high torque, low cost SRM can be applied in accordance with the requirements such as weight reduction and high efficiency of railroad vehicles. content.

Key Words : Railway Vehicle, Semiconductor Transformer, SRM, Traction Motor, Small and Lightweight

*정회원, 광주대학교 AI자동차학과
접수일자 2022년 7월 6일, 수정완료 2022년 7월 28일
게재확정일자 2022년 8월 5일

Received: 6 July, 2022 / Revised: 28 July, 2022 /

Accepted: 5 August, 2022

*Corresponding Author: si.jeong@gwangju.ac.kr

Dept. of AI-Automotive Engineering,
Gwangju University, Gwangju, Korea

I. 서 론

대도시의 대표적인 교통수단인 철도차량(지하철, 고속전철 등)의 경량화는 차량의 운행 시 에너지 효율 개선 및 선로 운영에 따른 비용 절감을 위해 중요하다. 기존 연구에 따르면 철도차량의 중량을 100kg 줄일 때 4.33 MJ의 에너지를 절약할 수 있고, 매년 7t의 탄소 배출량 감소를 기대할 수 있다. 또한, 철도차량의 중량을 5% 감소시킬 때 발생하는 전력 사용 비용 및 선로 보수비용 절감에 따른 경제적 이득은 매년 약 19억 원에 달한다. 따라서 철도차량의 경량화를 위해 차체 재료, 추진제어장치 및 보조 전원장치인 전장품, 대차 구조의 개선 등에 관한 많은 연구가 이뤄지고 있다.

주 변압기 및 차량에 탑재된 형상을 보이고 있는 그림 1과 같이 교류전원 구간을 운행하는 철도차량에 탑재된 전장품 중 가장 큰 비중을 차지하는 주 변압기(Main Transformer)는 낮은 운전 주파수(60Hz)로 인해 전력 밀도가 0.2~0.4 MVA/ton 정도로 낮아 경량화에 중요한 요소로 작용하고 있다. 또한, 대용량 유입 변압기가 주로 사용되어 절연 및 냉각을 위해 오일을 사용되고 있으나 오일의 공기 접촉에 따른 오염으로 절연 성능 열화 및 사고 위험, 환경오염 등의 문제점을 가지고 있다. 따라서 이러한 철도차량용 주 변압기의 단점을 개선하기 위해 몰드 변압기, 반도체 변압기 등에 관한 연구가 국내 외적으로 활발히 진행 중이다.

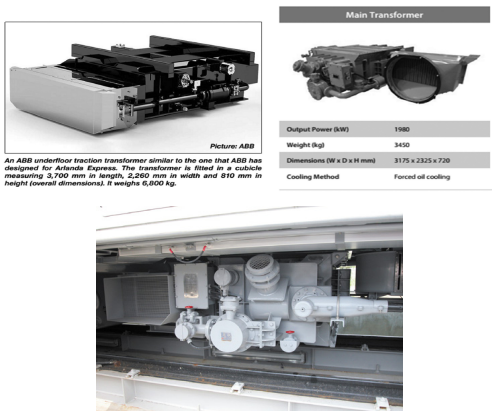


그림 1. 주 변압기 및 차량에 탑재된 형상
Fig. 1. Main transformer and shape mounted at vehicle

한편 국내의 철도차량에 대부분 적용되는 견인전동기는 유지보수 측면에서 직류전동기 보다 장점이 많아 3상 농형 유도전동기가 사용되고 있다. 그러나 유도전동기

(IM)는 부피가 크고 무거우며 효율이 낮다는 단점이 있다. 따라서 최근에는 유도전동기를 대체하기 위해 유도전동기에 비해 높은 출력밀도와 효율 확보가 가능한 영구자석 동기전동기(PMSM)를 적용하려는 시도가 이루어지고 있다. 그러나 제작에 필요한 재료의 가격이 비싸고 설계가 유도전동기 대비 다소 어렵다는 단점이 있다^[1].

이러한 문제점을 고려하여 본 논문에서는 ①대용량 주 변압기를 대체하여 소형 경량화가 가능한 반도체 변압기를 적용하고자 한다. 또한, 견인용 전동기는 유도전동기 및 영구자석 전동기를 대체하여 ②히트루 저감형 전동기와 탈 히트루 전동기의 기술 선점을 요구하는 개발 동향, 철도차량의 경량화, 고효율화 등의 요구사항에 맞춰 구조가 간단하면서 회전수가 높고 고토크, 저비용인 SRM을 적용할 수 있는 연구를 제안하고자 한다.

II. 철도차량 추진제어 연구동향

1. 반도체 변압기를 이용한 철도 추진제어시스템 (국외)^[2]

반도체 변압기는 이미 1980년대에 나왔으나, 반도체 스위치 기술의 한계로 인해 개발이 지연되다가 최근에 고압/대전류용 Si-IGBT 및 특히 SiC 기술의 급격한 발달로 구현 가능해지자 주목받는 기술로 국내 철도분야 연구는 미미한 실정이다. 철도분야에 적용하고자 하는 국외사례를 보면, 일반적으로 25kVrms 전차선 전압을 직렬 연결된 AC/DC 멀티레벨 컨버터를 통해 Medium voltage 급 직류로 변환한 후 수 kHz 이상의 운전 주파수를 가진 인버터, 고주파 변압기, 컨버터를 통해 직류 전원(DC Source)을 얻는다. 이 전원은 다시 견인전동기 구동을 위한 3상 인버터를 통해 철도차량에 필요한 추진제어 동력원이 된다. 이와 별도로 다른 채널을 통해 보조 전원장치(SIV)에서 교류전원을 생성하여 승객에게 서비스를 제공하는 냉난방 장치, 객실 전원 등에 적정 전압을 공급한다.

그림 2에서는 (a) 1C4M (인버터 유닛 1기가 전동기 4기를 제어)을 통한 기존 철도차량 추진제어시스템과 (b) 반도체 변압기를 이용한 추진제어시스템의 구성도를 보여주고 있다.

2. 구동용 전동기 특징 및 동향^[3]

한편 구동용 전동기는 그림 3과 같이 여러 가지 종류

가 있지만, 연료 소비를 줄이고 연비 향상을 위한 높은 출력과 함께 내부의 공간을 효율적으로 활용하기 위하여 소형화 및 경량화가 반드시 수반되어야 하므로 전체 운전 기간에서 고효율, 높은 효율, 높은 신뢰성은 필수적이다. 뿐만 아니라, 철도차량 견인용 전동기로 최근에는 회전자에 희토류 영구자석을 삽입하여 높은 효율과 출력밀도를 얻을 수 있는 매입형 영구자석 전동기(IPM) 또는

표면부착형 영구자석 전동기(SPM)처럼 영구자석이 사용된 전동기의 연구가 활발히 이루어지고 있다.

또한 철도 차량용 견인전동기의 경우 최근에는 철도차량의 고속화, 경량화, 고효율화가 증시되면서 기존의 부피가 크고 무거우며 효율이 낮은 유도전동기에서 상기술적 한계를 극복하기 위해 영구자석형 동기전동기의 가격 및 내구성, 영구자석 자기회로의 최적 설계 등의 연

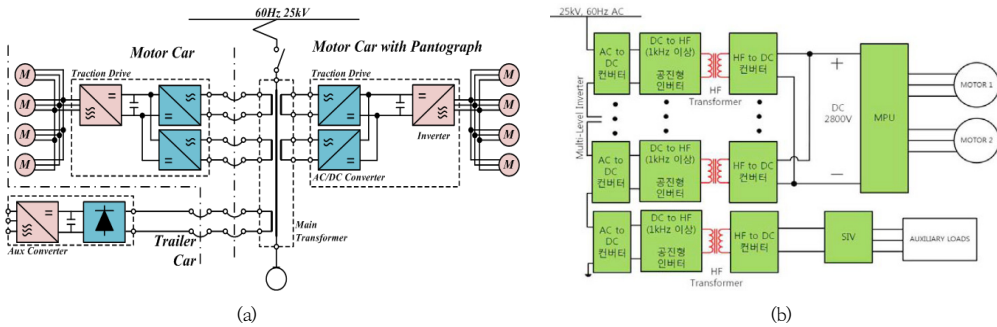


그림 2. (a)기존 1C4M 철도차량 추진제어시스템과 (b)반도체 변압기를 이용한 추진제어시스템
 Fig. 2. (a) Existing 1C4M railway vehicle propulsion control system and (b) Propulsion control system using semiconductor transformer

구분	SPM	IPM	SynRM	SRM	IM
구조					
효율	○	○	△	△	X
회전수	△	○	○	○	○
고토크	○	○	○	○	X
가격	X	△	○	○	○
토크리플	○	○	○	X	○
장단점	<ul style="list-style-type: none"> 고효율, 저소음 계속 고 Torque 특성 - 저속특성우수 제조공정 상 불리, 차질의 불 균일 온도 특성 불리(저속 고크기) 고출력 시 이형 발열용 Can 요구 (SPM) 상용화된 제어IC 및 Switching Module 존재 	<ul style="list-style-type: none"> 온도 특성 우수 BLDC대비 Low Cost BLDC대비 효율 저하 	<ul style="list-style-type: none"> 간단한 Rotor 구조 온도 특성 우수 BLDC대비 Low Cost 소음/진동 BLDC대비 효율 저하 다양한 Topology 적용 	<ul style="list-style-type: none"> 견고한 구조 장수 운전이 가능 장시간 연속운전이 가능 효율 유지비 온도 특성 불리 	
발전토크	← Magnet Torque Increasing Magnet Flux			→ Increasing Saliency Reluctance Torque	Induction Torque
개발방향	- Cost down - High Speed		PM/Reluctance Hybrid Motor 인버터(레머기) 구동 시스템에 최적	- High Efficiency - High Power Density (Weight/Volume)	

그림 3. 구동용 전동기 종류 및 특징
 Fig. 3. Types and characteristics of driving motors

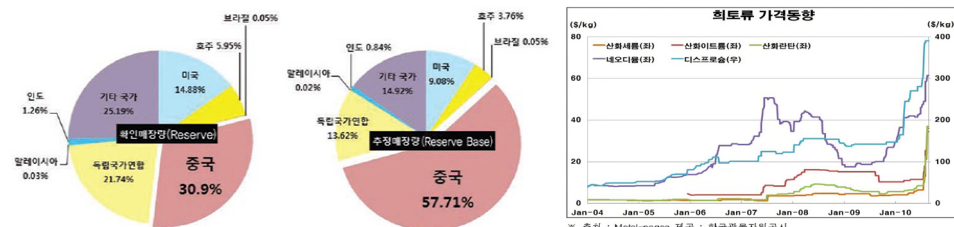


그림 4. 세계 희토류 매장량 및 가격 추세
 Fig. 4. World rare earth reserves and price trends

구가 추진되고 있다.

그러나 영구자석 동기전동기는 높은 출력밀도와 효율 확보가 가능하나, 제작에 필요한 재료의 가격이 비싸고 설계가 유도전동기 대비 다소 어려운 문제점을 가지고 있다. 따라서 효율 및 유지보수 편의성 등이 모두 고려된 최적의 견인전동기 개발 및 관련 최적 제어연구가 필요한 실정이다. 뿐만 아니라, 실질적인 전동기에 의한 구동은 좁은 정격영역에서의 최고효율의 증대요구와 전체 전기구동 영역에서의 평균 효율 증대, 평균 출력의 증대요구로 이어지고 있다. 따라서 차량용 견인전동기 구동 전동기는 구동 원으로서 초기에는 발생 토크에 중점을 두고 개발이 시작되어, 현재는 단위 체적당 발생 토크, 운전영역에서의 효율 증대를 위한 관점에서 개발이 이뤄지고 있다.

3. 비 희토류 영구자석을 적용할 수 있는 전동기 기술^[4]

영구자석을 사용하기 때문에 릴럭턴스 전동기나 유도전동기에 비해 효율이 높고 출력밀도가 높은 장점이 있으나 회전자에 영구자석을 삽입함으로써 고속운전 및 영구자석의 감자로 인한 신뢰성 감소, 희토류 금속의 원가 상승 등이 문제시되고 있다. 따라서 희토류 영구자석을 사용하는 전동기에 대한 활발한 연구개발에 병행하여 동등 수준의 성능을 유지하면서 희토류 영구자석의 사용량을 감소하거나 비 희토류 영구자석을 적용할 수 있는 신기술에 대한 고찰이 크게 확대되고 있다.

그림 4와 같이 영구자석에 사용되는 희토류의 공급량에서 97%를 차지하는 중국의 2008년 수출 제한 조치를 계기로 희토류 가격은 2011년에 2008년 대비 거의 8배에 해당하는 희토류의 가격 급등이 발생하여 세계적 이슈로 떠올랐다. 이러한 세계적 움직임에 의해 영구자석이 필요 없는 릴럭턴스 전동기(Reluctance Motor)가 하나의 대안으로 검토되고 있으며, 특히 일본의 경우 Switched Reluctance Motor(SRM)에 관한 연구가 최근 들어 더욱 가속도 내고 있다.

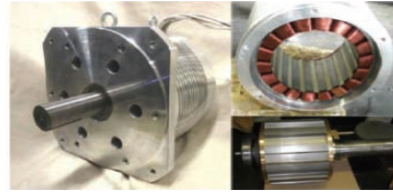
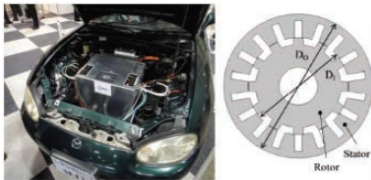


그림 5. Mazda의 HEV 구동용 스위치드 릴럭턴스 전동기
Fig. 5. SRM for driving HEVs from Mazda

그림 5는 희토류 가격 문제를 해결하기 위해 일본 도쿄대학에서 연구한 HEV용 SRM의 사례로서 Mazda의 Roadster(MX-5) 차체에 맞춰 전동기가 설계되었고, 매입형 영구자석 동기전동기와 성능을 비교하고 있다. 그 결과 최대 출력 54kW에서 영구자석 동기전동기와 동등 수준인 95.4%의 효율을 달성하였다. 본 연구는 영구자석이 완전히 배제된 순수 SRM의 사례로서 탈 희토류와 관련된 개발의 중요한 동향이라고 볼 수 있다.

그림 6은 LeTourneau의 대형 포크레인인 L-1350의 바퀴 구동을 위해 사용된 Nidec SR Drives의 SRM을 보여 주고 있다. 모든 바퀴에 300kW 정격의 SRM을 각각 한 대씩 모두 총 4대가 사용되었고, 해당 포크레인은 바닥에서 천정까지 16m의 높이를 갖고 있으며, 총 무게는 180t에 해당한다.



그림 6. LeTourneau 포크레인 L-1350 바퀴 구동용 SRM
Fig. 6. LeTourneau fork crane L-1350 SRM for wheel drive



그림 7. 견인 구동용 전동기의 개발 방향
Fig. 7. Development direction of electric motor for traction drive

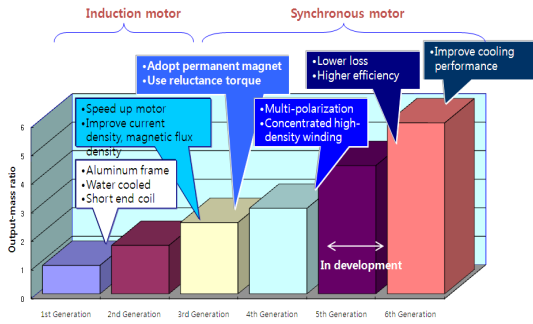


그림 8. 견인 구동용 전동기 성능향상을 위한 개발 이슈
 Fig. 8. Development issues for improving the performance of traction drive motors

희토류의 매장량 부족과 가격 급등에 따른 전동기의 경쟁력 약화를 우려하는 다양한 국가에서 그림 7~8의 개발 방향 및 이슈와 같이 현재의 희토류 영구자석 전동기를 대체할 수 있는 미래기술 개발을 준비하게 되었고, 이는 희토류 저감형 전동기와 탈 희토류 전동기의 기술 선점을 요구하게 되었다. 희토류 사용량의 90% 이상을 수입에 의존하는 우리로서는 대체기술 개발이 시급하며, 특히 미래 먹거리 산업인 전기철도 차량 분야에서 탈 희토류 모터 기술의 개발 경쟁은 더욱 거세질 전망이다.

III. 반도체 변압기 및 SRM을 적용한 철도차량 추진제어 연구 제안^[5,6]

II절 “철도차량 추진제어 연구동향”에서 살펴본 내용과 같이 기존 철도 추진제어시스템에 적용되어 사용되고 있는 문제점에 대해 본 논문에서는 기존 적용되어 사용되고 있는 주 변압기와 영구자석형 동기전동기를 대체할 수 있는 연구방법을 다음과 같이 제안한다.

- (1) 대용량 주변압기를 대체하여 소형 경량화가 가능한 반도체 변압기를 적용한다.
- (2) 철도차량의 경량화, 고효율화 등의 요구사항에 맞춰 구조가 간단하면서 회전자수가 높고 고토크, 저비용인 SRM을 적용한다.

1. SRM의 Braking Mode 응답성

국내에서 운행되고 있는 철도차량(지하철, 고속전철 등)은 전차선으로부터 교류전원을 공급받아 대용량 주변압기 및 주변환장치(컨버터, 인버터)를 거쳐 견인용 전동

기인 유도전동기(Induction Motor) 또는 영구자석 동기전동기(PMSM) 제어를 통해 가감속이 이루어진다.

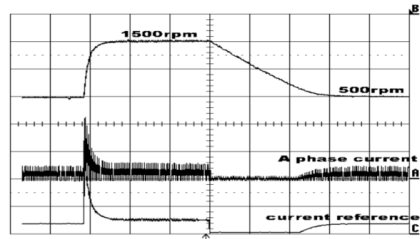


그림 9. Braking Mode 미 적용시 속도제어 응답성
 Fig. 9. Speed control response when braking mode is not applied

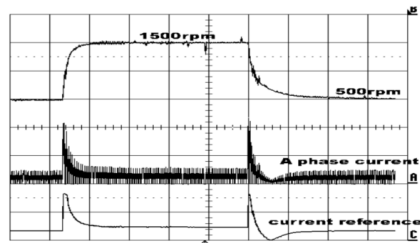


그림 10. Braking Mode 적용시 속도제어 응답성
 Fig. 10. Speed control response when braking mode is applied

그림 9~10은 SRM을 이용하여 1500→500rpm으로 Braking Mode를 미적용 및 적용시 속도제어 응답에 따른 속도, 상전류(phase current) 및 상전류 명령(current reference) 파형을 각각 보여주고 있다. 그림 9의 결과와 비교하여 Braking Mode 적용시 응답성이 빠른 결과를 그림 10을 통해서 확인할 수 있기에 철도차량 제동(Braking)시 회생제동(전동기모드→발전 드) 구현을 통한 회생 에너지를 효율적으로 활용할 수 있는 결과를 나타내고 있다.

2. 철도차량 추진제어 연구내용

그림 11은 반도체 변압기 및 SRM을 적용한 철도차량 추진제어 시스템 전체 구성도 및 사양으로 실험 및 그 타당성을 보여주기 위해 연구실 수준에서 실험 가능한 내용을 제안하였다. 또한 이러한 실험들을 진행하는데 있어서 철도차량 주행에 따른 불안정 전원공급 및 광범위 입력전압 변동(±15%), 회생 에너지를 고려한 컨버터 설계가 고려되어야 한다.

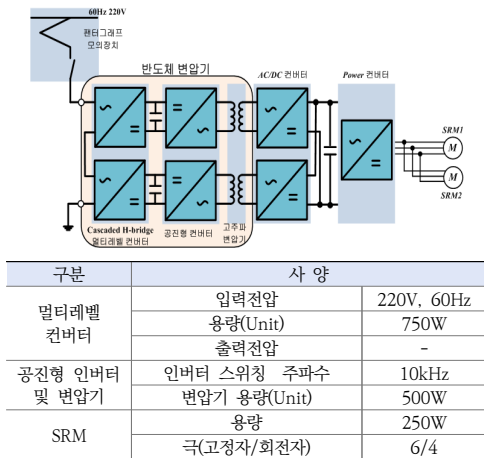


그림 11. 제안한 철도차량 추진제어 시스템 전체 구성도 및 사양
 Fig. 11. Overall configuration and specifications of the proposed railway vehicle propulsion control system

IV. 연구성과 활용방안

- 현재 철도분야에 활용이 적용되고 있지 않지만, 연구 제안 성과물인 SRM은 비접촉식 회전자이므로 철도분야에 적용되고 있는 직류전동기, BLDC, 유도전동기, PMSM 대체용으로 활용 가능
- 기존의 주변압기/컨버터/인버터/전동기로 구성된 추진제어 시스템의 경량화, 고효율화를 통한 생산성 향상 및 철도차량 축중 감소에 따른 차량/인프라(궤도, 노반 등) 유지 보수성 향상
- 반도체 변압기 및 SRM 적용 시, 철도 운영기관에서 사용하는 전체 전력량 절감 효과
- 영구자석이 완전히 배제된 순수 SRM의 사례로서 탈 희토류와 관련된 개발의 중요성을 확보하고 있으며 타 분야에 활용성이 매우 높음

V. 결 론

본 논문에서는 반도체 변압기 및 스위치드 릴럭턴스 전동기(SRM)를 적용한 철도차량 추진제어 연구내용을 제안하였다. 따라서 절연형 DC/DC 컨버터 (Inverter/

Transformer/Converter)에 사용되는 변압기가 수 kHz 이상의 운전 주파수를 갖도록 하므로, 기존 60Hz 주 변압기에 비해 무게 및 크기를 획기적으로 줄일 수 있어 철도차량 경량화 및 승객 용량 증대에 따른 경제적 이득 및 기술 확보가 기대된다. 또한 견인용 전동기로 스위치드 릴럭턴스 전동기(SRM)를 적용함으로써 희토류 영구자석의 사용량을 감소하거나 비 희토류 영구자석을 적용할 수 있는 신기술에 대한 고찰이 크게 확대될 것으로 사료된다.

References

- [1] Propulsion system technology development plan report for improving the stability of railway vehicles and reducing the weight, KAIA, 2016.
- [2] Lee S. W., Kim S. M. and Kim M. Y., "Development status of semiconductor transformers for railway vehicles," KIPE Magazine, vol. 22 no. 2 pp. 33~ 37, 2017.
- [3] Park C. B. and Jeong K. W., "Technology trend of electric equipment for propulsion of railway vehicles," KIPE Magazine, vol. 21, no. pp 27~34, 2016.
- [4] Korea Society of Automotive Engineers Auto Journal, October 2013.
- [5] Namazi, Mohammad Masoud, Saghaiannejad, Seyed Morteza, Rashidi, Amir, Ahn, Jin-Woo, "Maximum Power Recovery of Regenerative Braking in Electric Vehicles Based on Switched Reluctance Drive," Journal of Electrical Engineering and Technology, vol. 13, no. 2, pp. 800~811, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5370/JEET.2018.13.2.800>
- [6] T. J. E Miller, Switched Reluctance Motors and Their Control, Oxford University press, 1993.

저 자 소 개

정 성 인(정회원)



- 2001년 : 동국대학교 전기공학과(공학사)
- 2003년 : 한양대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2015년 : Technical University Braunschweig 전기정보물리공학 (공학박사)
- 2018년 3월 ~ 현재 : 광주대학교 AI 자동차학과 교수

• 주관심분야 : 전기구동 퍼스널 e-모빌리티 부품 및 시스템

※ 이 연구는 2022년도 광주대학교 대학 연구비의 지원을 받아 수행되었음.