

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2021.21.4.117>  
JIIBC 2021-4-17

# 기계언어를 통한 Switched Reluctance Motor(SRM)의 Modeling과 특성

## Modeling and Characteristics of Switched Reluctance Motor (SRM) through Machine Language

윤용호\*

Yongho Yoon\*

**요약** 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 전동기 개발 및 관련 제어연구가 필요한 실정이다. 뿐만 아니라, 실질적인 전동기에 의한 구동은 좁은 정격영역에서의 최고효율의 증대 요구와 전체 전기구동 영역에서의 평균 효율 증대, 평균 출력의 증대 요구로 이어지고 있다. 이러한 움직임에 의해 영구자석이 필요 없는 릴럭턴스 전동기 (Reluctance Motor)가 하나의 대안으로 검토되고 있다. 본 논문에서는 희토류 영구자석 전동기를 대체할 수 있는 미래기술 개발과, 희토류 저감형 전동기와 탈 희토류 전동기의 기술 선점을 요구하는 시대적 이슈 (Issue)에 맞춰 영구자석이 필요 없는 스위치드 릴럭턴스 전동기 (Switched Reluctance Motor, SRM)에 대해 기계언어(C 언어)를 통한 modeling과 그에 따른 SRM의 특성을 연구하고자 한다.

**Abstract** Permanent magnet synchronous motors can secure high power density and efficiency, but have problems in that the materials required for manufacturing are expensive and design is somewhat more difficult than induction motors. Therefore, it is necessary to develop an optimal motor that considers both efficiency and maintenance convenience and related control research. In addition, driving by a practical motor leads to a request to increase the highest efficiency in a narrow rated range, an increase in average efficiency in the entire electric driving range, and an increase in average output. Due to this movement, a reluctance motor that does not require a permanent magnet is being considered as an alternative. In this paper, in line with the issues of the times that require the development of future technology that can replace rare earth permanent magnet motors and the technological preemption of rare earth reduction motors and rare earth motors, switched reluctance motors without permanent magnet For motor, SRM), modeling through machine language (C language) and the characteristics of SRM accordingly are to be studied.

**Key Words** : Switched Reluctance Motor (SRM), Machine Language (C Language), Modeling and Characteristics

\*정회원, 광주대학교 전기전자공학부  
접수일자 2021년 7월 8일, 수정완료 2021년 7월 30일  
게재확정일자 2021년 8월 6일

Received: 8 July, 2021 / Revised: 30 July, 2021 /  
Accepted: 6 August, 2021

\*Corresponding Author: yhyoon@gwangju.ac.kr  
School of Electrical and Electronic Engineering,  
Gwangju University, Korea

## I. 서 론

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 전동기 개발 및 관련 제어연구가 필요한 실정이다. 뿐만 아니라, 실질적인 전동기에 의한 구동은 좁은 정격영역에서의 최고효율의 증대 요구와 전체 전기구동 영역에서의 평균 효율 증대, 평균 출력의 증대 요구로 이어지고 있다. 이러한 움직임에 의해 영구자석이 필요 없는 릴럭턴스 전동기 (Reluctance Motor)가 하나의 대안으로 검토되고 있다.

그림 1~2의 개발 방향 및 이슈(Issue)와 같이 현재의 회로류 영구자석 전동기를 대체할 수 있는 미래기술 개발을 준비하게 되었고, 회로류 저감형 전동기와 탈 회로류 전동기의 기술 선점을 요구하고 있다<sup>[1]</sup>.



그림 1. 구동용 전동기의 개발 방향  
Fig. 1. DC Direction of development of motors for drive

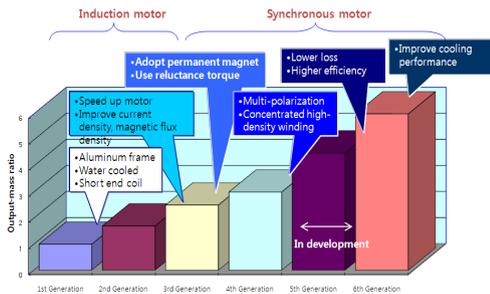


그림 2. 전동기 성능향상을 위한 개발 이슈  
Fig. 2. Development issues for improving the performance of motors

본 논문에서는 회로류 영구자석 전동기를 대체할 수 있는 미래기술 개발과, 회로류 저감형 전동기와 탈 회로류 전동기의 기술 선점을 요구하는 시대적 이슈 (Issue)에 맞춰 영구자석이 필요 없는 스위치드 릴럭턴스 전동

기 (Switched Reluctance Motor, SRM)에 대해 기계 언어(C 언어)를 통한 모델링과 그에 따른 SRM의 특성을 연구하고자 한다.

## II. PSIM 프로그램에서의 SRM Modeling

PSIM 시뮬레이션 프로그램에서는 3상 SRM을 모델링한 library를 그림 3과 같이 제공하여 SRM의 변수값들을 입력할 수 있고 구동용 컨버터와 회전자 위치검출 회로를 추가적으로 이용하여 그림 4와 같이 SRM 구동 및 제어회로를 모델링할 수 있다<sup>[2]</sup>.

따라서 PSIM 및 특정 프로그램에서 제공된 library를 이용하여 전동기 구동 및 제어회로를 설계하여 그에 따른 결과를 확인할 수 있다. 그러나 제공된 특정 library만 이용할 수 있기 때문에 여러 변수값을 가지고 있는 전동기를 적용하는데 한계가 있으며 프로그램 구입 및 업데이트에 해당되는 경제적 비용도 고려해야 되는 문제점이 있다.

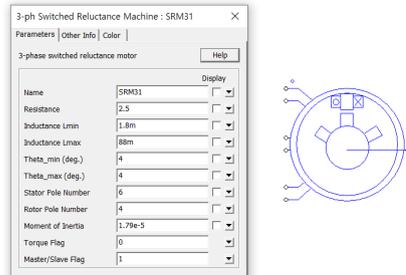


그림 3. PSIM 프로그램에서 제공하는 3상 SRM library  
Fig. 3. SRM library provided by PSIM program

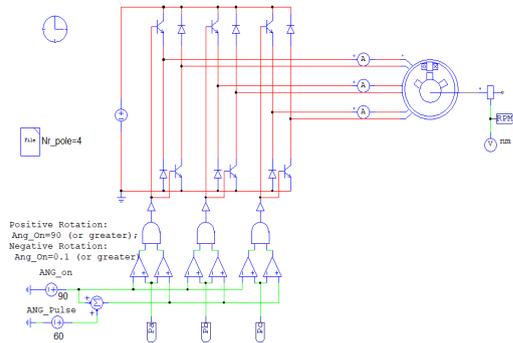


그림 4. PSIM 프로그램에서 제공된 SRM library를 이용한 전동기 구동 및 제어 모델링  
Fig. 4. Motor drive and control modeling using the SRM library provided in the PSIM program

### III. 기계언어를 이용한 SRM Modeling

본 논문에서는 II절에서 언급한 기존 시뮬레이션용 프로그램의 문제점을 고찰하여 기계언어(C 언어)를 통해 비선형 인덕턴스 특성을 갖는 SRM을 모델링 하였으며 다음의 내용들을 가정하였다. 또한 모델링 과정에서 미분 방정식의 해를 구하기 위해 Runge-Kutta 방법을 사용하였으며 제어부의 샘플링 시간은  $50\mu s$ 로 하였다.

- ① SRM의 입력측 DC링크 전압의 맥동은 무시한다.
- ② SRM은 자기포화가 없다고 가정한다.
- ③ 비대칭 브리지 컨버터에서 스위치 및 다이오드의 손실은 무시한다.

#### 1. Modeling을 위한 수식화<sup>3-5)</sup>

기계언어(C 언어)를 통해 모델링에 사용된 SRM의 한 상의 전압 방정식은 다음과 같다.

$$V_s = R_e i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (1)$$

$$\pm M(\theta, i') \frac{di'}{dt} \quad (2)$$

$$\frac{dL(\theta, i)}{dt} = \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega \quad (2)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{di}{d\theta} \omega \quad (3)$$

식 (2), (3)을 식 (1)에 대입하면,

$$V_s = R_e i + L(\theta, i) \frac{di}{d\theta} \omega \quad (4)$$

$$+ i \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega \pm M(\theta, i') \frac{di'}{d\theta} \omega$$

여기서,

$V_s$  : DC 인가 전압.

$R_e$  : 고정자의 권선 저항 및 컨버터 소자 저항의 합.

$L(\theta, i)$  : 인덕턴스.

$i$  : 여자상의 순시전류.

$i'$  : 앞상의 여자 순시전류.

$\theta$  : 고정자와 회전자 상대위치.

$M(\theta, i)$  : 인접한 상의 상호 인덕턴스.

$\omega$  : 회전자 회전 각속도.

이고, 이상적인 스위치를 사용하며, 자기포화가 없는 인덕턴스를 가정하면 식 (4)는 다음과 같이 간략화 할 수 있다.

$$V_s = R_e i + L(\theta) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(\theta)}{d\theta} \omega \quad (5)$$

( $R$  : 고정자 권선 저항.)

회전자 극수  $N_r$ 이 4개일 때 한 상의 인덕턴스의 변환 주기는  $90^\circ$ 가 된다. 자기포화를 무시하여, 전류의 크기와 관계없이 인덕턴스가 항상 일정한 최대값  $L_{max}$ 와 최소값  $L_{min}$ 을 갖는다고 가정하면, 한 상의 인덕턴스는 고정자와 회전자 극호(pole-arc)  $\beta_s, \beta_r$ 에 따라 고정자극과 회전자극이 겹치기 시작하는 시점을  $\theta = 0$ 으로 하였을 때 다음과 같다.

$$L_1(\theta) = \quad (6)$$

$$\begin{cases} L_{min} + K\theta & (\theta \leq \beta_s) \\ L_{max} & (\beta_s \leq \theta \leq \beta_r) \\ L_{min} - K(\theta - \beta_r - \beta_s) & (\beta_r \leq \theta \leq \beta_r + \beta_s) \\ L_{min} & (\beta_r + \beta_s \leq \theta \leq \tau) \end{cases}$$

또한  $j$ 번째 상의 인덕턴스는 기준 인덕턴스로부터 식 (7)과 같이 얻을 수 있다.

$$L_j(\theta) = L_1 \left[ \theta - \frac{\tau}{N_r} (j-1) \right] \quad (7)$$

여기서,  $K$ 는 인덕턴스 파형 중 증가하는 부분의 인덕턴스의 기울기이며, 다음과 같다.

$$K = \frac{L_{max} - L_{min}}{\beta_s} \quad (8)$$

$$T_j = \frac{1}{2} \frac{dL(\theta)}{d\theta} i_j^2 \quad (9)$$

$$= \begin{cases} \frac{1}{2} K i_j^2 & (0 \leq \theta \leq \beta_s) \\ 0 & (\beta_s \leq \theta \leq \beta_r) \\ -\frac{1}{2} K i_j^2 & (\beta_r \leq \theta \leq \beta_r + \beta_s) \\ 0 & (\beta_r + \beta_s \leq \theta \leq \tau) \end{cases}$$

또한, 자기포화가 없다고 가정하면  $j$ 번째 상에서 발생 되는 한 상의 토크는 식 (9)와 같이 표현되며, 3상 SRM 의 합성 토크는 식 (10)과 같이 구해진다.

$$T = \sum_{j=1}^3 T_j = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 \frac{dL_j(\theta)}{d\theta} i_j^2 \quad (10)$$

선형적인 부하를 갖는 전동기의 기계 방정식은

$$T = T_L + B\omega + J \frac{d\omega}{dt} \quad (11)$$

로 표현되며, 식 (5), (10), (11)로부터 SRM의 동특성 방정식을 구하면 식 (12)와 같다.

$$\frac{di_j}{dt} = \frac{V_j}{L_j(\theta)} - \frac{Ri_j}{L_j(\theta)} - \frac{dL_j(\theta)}{d\theta} \frac{i_j}{L_j(\theta)} \quad (12)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \left[ -B\omega + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 \frac{dL_j(\theta)}{d\theta} i_j^2 - T_L \right]$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega$$

## 2. 기계언어를 이용한 SRM Modeling 결과<sup>[6]</sup>

기계언어(C 언어)를 통해 모델링한 SRM의 특성을 살펴보기 위해 OriginLab 프로그램을 이용하여 데이터 들을 그래프화 하였다. 그림 5는 본 논문에서 3상 6/4 pole의 특정 변수를 가지고 있는 SRM의 모델링 결과로 인덕턴스 Profile을 보여주고 있다<sup>[4]</sup>. 식 (6)과 (7)을 통해 회전자 위치에 따른 인덕턴스의 최대값  $L_{max}$ 와 최소값  $L_{min}$ 을 가지고 있는 SRM의 인덕턴스 특성을 확인할 수 있다. 또한 3상 SRM의 합성 토크 식 (10)에 대한 결과로 그림 6과 같이 무부하시 구동에 따른 토크리플이 포함된 SRM의 전형적인 토크 그래프를 보여주고 있다.

그림 7과 8은 기준속도( $W_{ref}$ ) 증감 및 감속에 대한 속도 변화시 속도응답( $W_{real}$ )과 기준전류( $I_{ref}$ ) 파형의 결과를 보여주고 있다. 1,000→1,500rpm, 1,500→1,000rpm으로 기준속도 변화시 설계된 제어기에 의해 기준전류의 변화량과 기준속도를 추종하는 응답의 결과를 보여주고 있다.

인덕턴스 [H]

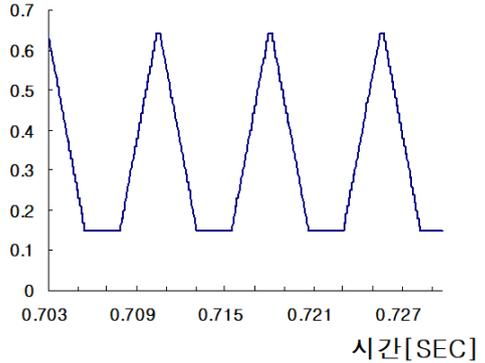


그림 5. 3상 6/4 pole SRM의 인덕턴스 profile  
Fig. 5. Inductance profile of 3 phase 6/4 pole SRM

토크 [T]

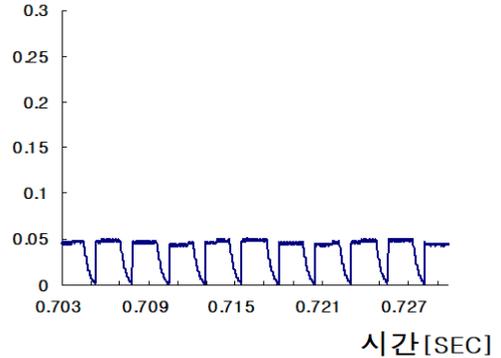


그림 6. SRM의 토크 파형 (무부하)  
Fig. 6. Torque waveform of SRM (no load)

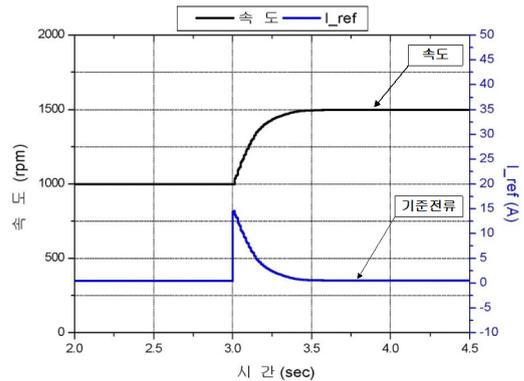


그림 7. 속도 변화시 속도 및  $I_{ref}$ (기준전류) 파형 (1,000rpm → 1,500rpm)  
Fig. 7. DC motor closed loop control system

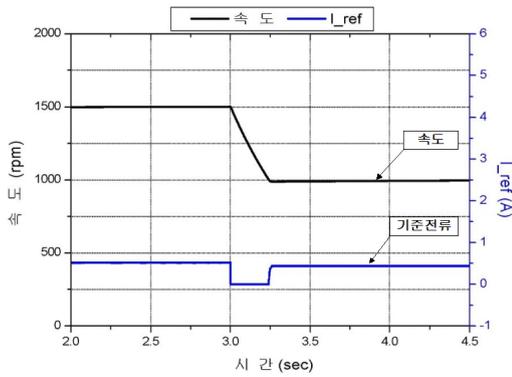


그림 8. 속도 변화시 속도 및 I\_ref(기준전류) 파형  
 (1,500rpm → 1,000rpm)  
 Fig. 8. DC motor closed loop control system

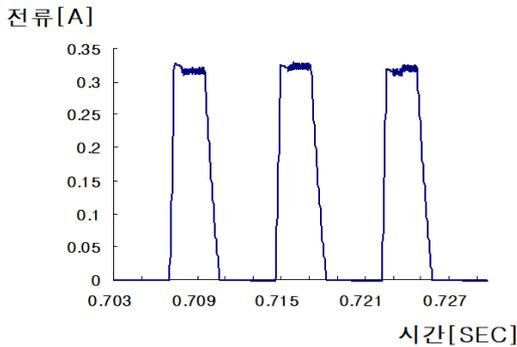


그림 9. SRM의 상전류 파형 (히스테리시스 전류제어)  
 Fig. 9. Phase current waveform of SRM (hysteresis current control)

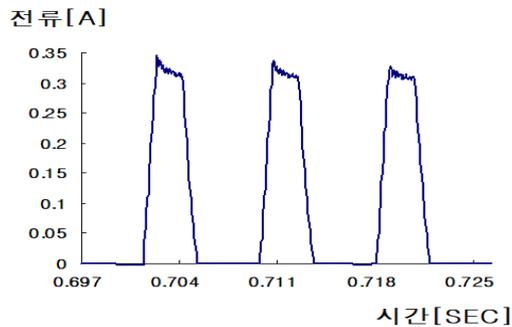


그림 10. SRM의 상전류 파형 (전압 PWM 제어)  
 Fig. 10. Phase current waveform of SRM (voltage PWM control)

모델링된 SRM을 이용하여 구동 및 제어특성을 확인하기 위해 제어부 및 구동부를 포함한 전체 시스템에서 히스테리시스 전류제어 방식과 전압 PWM제어 방식을 수행하여 그에 따른 특성을 살펴보았다. 그림 9, 10은 기

준속도 2,000rpm (중첩각 0°)일 때 히스테리시스 전류제어 방식과 전압 PWM제어 방식에 대한 각각의 전류파형 모델링 결과를 보여주고 있다.

그림 9에서는 히스테리시스 전류제어기를 사용했을 때 상의 전류가 Flat-Top하게 흐르는 것을 보여주므로써 설계된 히스테리시스 전류제어기의 Upper-Lower band 안에서 전류제어가 이루어지고 있음을 알 수 있다. 전류가 히스테리시스 하위 밴드(Lower band)에 도달하게 되면 전류를 평활하게 하기위해 제어기는 스위치를 On하게 되고 다시 전류가 히스테리시스 상위 밴드(Upper band)에 도달하게 되면 스위치를 Off하는 방식으로 전류가 Flat-Top 하게 흐르고 있다. 반면 그림 10에서는 전압 PWM시 그림 9의 상전류 결과와 달리 전류가 Flat-Top 하지 못하고 감소하는 부분이 발생하는 결과를 볼 수 있다.

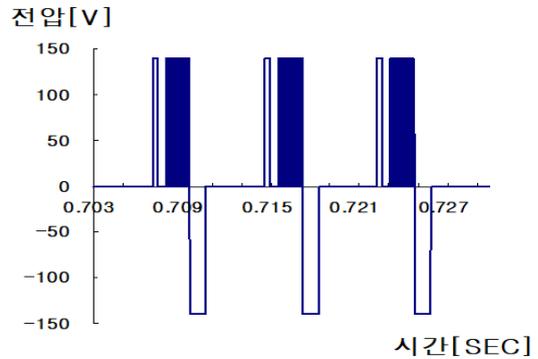


그림 11. SRM의 상전압 파형 (히스테리시스 전류제어)  
 Fig. 11. Phase voltage waveform of SRM (hysteresis current control)

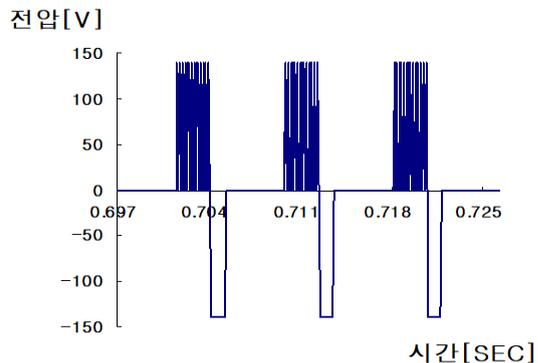


그림 12. SRM의 상전압 파형 (전압 PWM 제어)  
 Fig. 12. Phase voltage waveform of SRM (voltage PWM control)

그림 11, 12는 각 제어방식의 구동에 따른 SRM의 상 전압파형으로 인덕턴스 Profile이 양(+)의 기울기가 존재하는 영역에서 스위칭 소자의 On-Off에 따른 양의 값을 가지는 상전압을 볼 수가 있다. 또한 인덕턴스 Profile이 음의 기울기를 가지는 영역에서 빠른 전류의 소호를 위해 스위칭 소자를 Off 시킴으로써 음(-)의 상전압 특성을 확인할 수 있다.

SRM의 토크는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있으므로 인덕턴스의 기울기가 일정하다면 전류를 Flat-Top하게 흐르게 함으로써 일정한 토크를 얻을 수가 있게 된다. 따라서 그림 9~12의 리모델링의 결과로 전압 PWM 제어 방식에 비해 히스테리시스 전류제어를 통해 토크 리플의 저감의 효과를 얻을 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 기존 시뮬레이션용 프로그램의 문제점을 고찰하여 기계언어(C 언어)를 통해 비선형 인덕턴스 특성을 갖는 SRM을 모델링을 하였고 제어부와 구동부를 포함한 전체 시스템에 대한 특성에 대해 고찰하였다. 따라서 기존 특정 프로그램에서 제공하는 전동기library만 이용하는 제약과 여러 변수들을 가지고 있는 전동기들의 특성을 확인 할 수 없는 문제들을 본 연구를 통해 연구된 모델링 프로그램을 통해 다양한 특성의 연구 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

## References

- [1] Y. S. Chae, Technology Development Trend of Reluctance Motors for Automobiles, Global Auto News 2013.
- [2] PSIM User's Manual, Powersim Inc.
- [3] T. J. E Miller, Switched Reluctance Motors and Their Control, Oxford University press, 1993.
- [4] J. M. Noh and J. H. Kim, "Automated Inductance Measurement of a Switched Reluctance Motor Using Voltage Integration Method," Trans. KIEE, Vol. 64, No. 8, pp. 1180 ~ 1185, 2015.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2015.64.8.1180>

- [5] S. I. Jeong, "Modeling of Switched Reluctance Motor (SRM) Drive and Control System using Rotor Position Information Sensor", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (JIIBC), Vol. 21, No. 3, pp.137-142, 2021.  
DOI: <https://doi.org/10.7236/JIIBC.2021.21.3.137>
- [6] Y. H. Yoon, "Control of SRM with Modified C-dump Converter in Cooling System of Automobiles," Trans. KIEE, Vol. 66, No. 8, pp. 1297~1302, 2017.  
DOI: <http://doi.org/10.5370/KIEE.2017.66.8.1297>

## 저 자 소 개

### 윤 용 호(정회원)



- 성균관대학교 메카트로닉스공학과(공학박사)
- 삼성탈레스 종합연구소 전문연구원
- 현재 : 광주대학교 전기전자공학부교수
- 주관심분야 : 전동기 제어 및 신재생에너지

※ 이 연구는 2021년도 광주대학교 대학 연구비의 지원을 받아 수행되었음.