

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2021.21.3.137>

JIIBC 2021-3-19

회전자 위치정보 센서를 이용한 Switched Reluctance Motor (SRM)의 구동 및 제어 시스템 Modeling

Modeling of Switched Reluctance Motor (SRM) Drive and Control System using Rotor Position Information Sensor

정성인*

Sungin Jeong*

요 약 최근에는 회전자에 희토류 영구자석을 삽입하여 높은 효율과 출력밀도를 얻을 수 있는 매입형 영구자석 (IPM : Interior Permanent Magnet) 전동기 또는 표면부착형 영구자석 (SPM : Surface Permanent Magnet) 전동기처럼 영구자석이 사용된 전동기의 연구가 활발히 이루어지고 있다. 영구자석을 사용하기 때문에 릴럭턴스 전동기나 유도전동기와 비교해 효율이 높고 출력밀도가 높은 장점이 있으나 회전자에 영구자석을 삽입함으로써 고속운전 및 영구자석의 감자로 인한 신뢰성 감소, 희토류 금속의 원가 상승 등이 문제시되고 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)를 구동시키기 위한 구동 제어에 연구하고자 한다. PSIM 시뮬레이션 프로그램에서 제공하는 3상 SRM library를 이용하여 회전자 위치 정보 센서를 이용한 SRM의 구동 및 제어 시스템 모델링 (Modeling)을 연구하고자 한다.

Abstract In recent years, permanent magnets such as IPM (Interior Permanent Magnet) motors or SPM (Surface Permanent Magnet) motors that can obtain high efficiency and power density by inserting rare earth permanent magnets into the rotor are used. Research on the used electric motor is being actively conducted. Since it uses a permanent magnet, it has the advantage of high efficiency and high power density compared to reluctance motors and induction motors, but by inserting a permanent magnet into the rotor, it operates at high speeds and decreases reliability due to demagnetization of the permanent magnets, and increases the cost of rare earth metals. In this paper, in accordance with the development of future technology that can replace rare-earth permanent magnet motors and technological preoccupation of rare-earth reduction type motors and de-rare-earth motors, switched reluctance motors that do not require permanent magnets (Switched Reluctance Motors) Motor, SRM) to drive driving control. Using the 3-phase SRM library provided by the PSIM simulation program, we will study the driving and control system modeling of SRM using the rotor position information sensor.

Key Words : Switched Reluctance Motor (SRM), Rotor Position, Design Circuit and Modeling, Driving and Control System

*정회원, 광주대학교 미래자동차공학과
접수일자 2021년 4월 27일, 수정완료 2021년 5월 27일
게재확정일자 2021년 6월 4일

Received: 27 April, 2021 / Revised: 27 May, 2021 /

Accepted: 4 June, 2021

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

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

I. 서 론^[1]

최근에 회전자에 히토류 영구자석을 삽입하여 높은 효율과 출력밀도를 얻을 수 있는 매입형 영구자석 (IPM : Interior Permanent Magnet) 전동기 또는 표면부착형 영구자석 (SPM : Surface Permanent Magnet) 전동기처럼 영구자석이 사용된 전동기의 연구가 활발히 이루어지고 있다. 영구자석을 사용하기 때문에 릴럭턴스 전동기나 유도전동기와 비교해 효율이 높고 출력밀도가 높은 장점이 있으나 회전자에 영구자석을 삽입함으로써 고속 운전 및 영구자석의 감자로 인한 신뢰성 감소, 히토류 금속의 원가 상승 등이 문제시되고 있다.

따라서 히토류 영구자석을 사용하는 전동기에 대한 활발한 연구개발에 병행하여 동등 수준의 성능을 유지하면서 히토류 영구자석의 사용량을 감소하거나 비 히토류 영구자석을 적용할 수 있는 신기술에 대한 고찰이 크게 확대되고 있다. 본 논문에서는 히토류 영구자석 전동기를 대체할 수 있는 미래기술 개발과, 히토류 저감형 전동기와 탈 히토류 전동기의 기술 선점을 요구하는 시대적 이슈 (Issue)에 맞춰 영구자석이 필요 없는 스위치드 릴럭턴스 전동기 (Switched Reluctance Motor, SRM)를 구동시키기 위한 구동 제어에 연구하고자 한다.

SRM은 그림 1과 같이 인덕턴스가 증가하는 구간에서 고정자 각 상을 여자 (Excitation) 시켜 상전류 (Phase Current)를 흘려주어 전체 토크 리플을 줄이는 것이 중요하다.

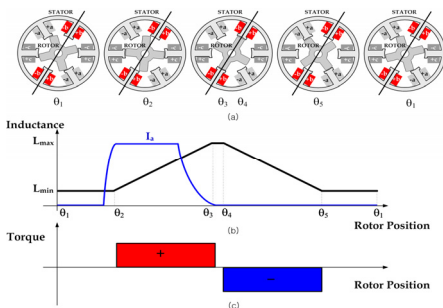


그림 1. 회전자 위치에 따른 인덕턴스 profile, 상전류, 발생토크
Fig. 1. Inductance profile, phase current and generated torque according to rotor position

이러한 토크 리플을 줄이기 위해 위치센서를 이용하여 인덕턴스가 증가하는 방향으로 고정자를 여자 시켜야 한다. 또한 부토크의 발생을 억제하고 효과적인 회전력을 얻기 위해 반드시 회전자의 위치각을 검출하여 위치각에

따르는 스위칭 여자가 필요하다^[2,3]. 따라서 PSIM 시뮬레이션 프로그램에서 제공하는 3상 SRM library를 이용하여 회전자 위치정보 센서를 이용한 SRM의 구동 및 제어 시스템 모델링 (Modeling)을 연구하고자 한다.

본 논문에서 SRM 구동 및 제어 시스템 모델링은 1) SRM 회전자 위치정보 및 비대칭 브리지 컨버터 구동부, 2) 상(相) 위치 신호 발생부, 3) PWM 신호 발생부 회로들에 관해 설계 및 모델링을 수행하였다.

II. SRM 회전자 위치정보 및 비대칭 브리지 컨버터 구동부 모델링^[4]

그림 2는 PSIM 시뮬레이션 프로그램에서 제공하는 3상 SRM을 modeling한 library를 이용하여 SRM을 구동하기 위한 구동용 컨버터부와의 연결, 회전자 theta angle 계산에 따른 상 위치 클럭신호, 상 위치에 따른 위치 신호를 발생시키기 위한 회로 부분과의 연결된 설계 회로를 보여주고 있다. SRM library와 연동된 se1, se2, se3, th는 A상 제어, B상 제어, C상 제어, 회전자의 위치정보를 결정하여 위치제어 부분과 연계는 신호를 각각 나타낸다.

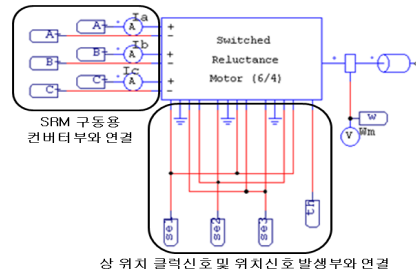


그림 2. 3상 SRM 구동부 및 상 위치에 따른 제어부 모델링
Fig. 2. 3-phase SRM driving part and control part modeling according to the position of the phase

1. 회전자 위치에 따른 여자신호 모델링



그림 3. 구동 및 제어 시스템 모델링에 적용된 3상 SRM 제원
Fig. 3. Specifications of 3-phase SRM applied to drive and control system modeling

사용된 SRM은 3상 6/4 pole 전동기로 출력 250W, 고정자 극호(β_s) 30° , 회전자 극호(β_r) 32° 의 제원을 가지고 있으며 그림 3과 같이 제공된 SRM library에서 추가적인 제원들의 값들을 보여주고 있다. 또한 SRM은 설계된 고정자 극호(β_s)와, 회전자 극호(β_r)의 정보를 바탕으로 그림 4와 같이 회전자 위치에 따른 인덕턴스 profile을 나타낼 수 있으며 4단계를 구분하여 인덕턴스 값을 고려할 수 있다.

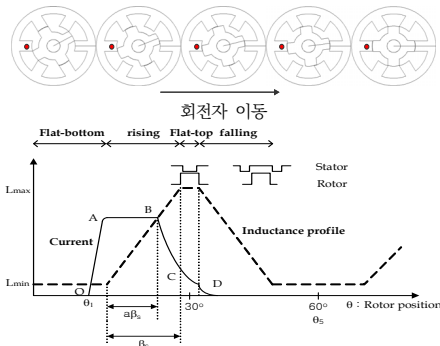


그림 4. 회전자 이동에 따른 SRM 인덕턴스 profile
 Fig. 4. SRM inductance profile according to rotor movement

그림 4에서 회전자 위치변화에 따른 인덕턴스 변화는 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 회전자의 1회전당 인덕턴스 변화 횟수=회전자의 극수
- 인덕턴스의 변화량은 회전자의 극수 (N_r) 및 고정자와 회전자의 Pole-Arc(β_s, β_r)의 함수
- 마주보는 고정자의 Pole이 한 개의 Phase
- 고정자가 여자 (Exciting) \Rightarrow 전자석의 원리에 의해 회전자이동
 - Aligned Position : L_{max}
 - Unaligned Position : L_{min}
- 회전자 이동 \Rightarrow 토크의 발생 (기계적 출력)
- 토크는 전류의 제공에 비례 \Rightarrow 기동특성이 우수 (직류전동기의 특성)

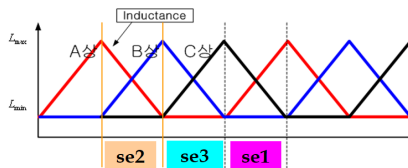


그림 5. 3상 SRM 인덕턴스 profile
 Fig. 5. 3-phase SRM inductance profile

그림 2에서 상 위치 클럭신호 및 위치신호 발생부와 연결된 se1, se2, se3는 그림 5에서와 같이 각 상의 인덕턴스 증가구간 (rising stage)에서 여자 시키기 위한 A상, B상, C상 각상의 제어신호를 나타내며 th 신호는 회전자의 위치정보를 결정하며 II. 2절 SRM 회전자 위치제어부 모델링의 부분과 연계 동작할 수 있도록 설계하였다.

2. SRM 회전자 위치제어부 모델링

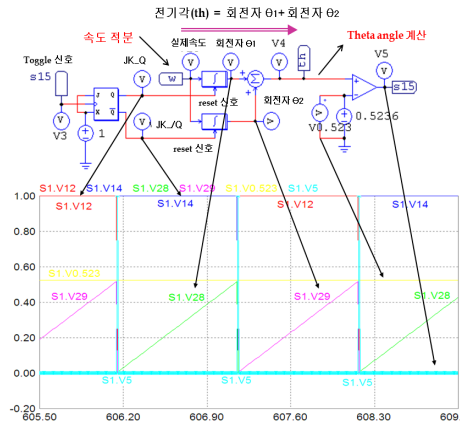


그림 6. 회전자 전기각 (theta angle) 검출을 위한 모델링 회로와 각부 결과파형

Fig. 6. Modeling circuit for detecting the theta angle and the resulting waveform of each part

SRM 제어하기 위해서는 회전자의 절대위치 검출이 필요하다. 회전자의 초기위치를 검출하는 방법으로 모터가 정지한 상태에서 전기각 읍셋을 추정하는 방법을 이용하거나 위치 센서나 전류 센서없이 회전자의 초기위치를 검출하는 방법들이 있다^[5].

본 논문에서는 회전자의 전기각 계산 및 검출을 위해 그림 6과 같이 모델링을 하였으며 SRM의 고정자 극호 (β_s) 30° 를 고려하여 회전자 전기각 (theta angle)이 30° 마다 초기화 (Reset) 될 수 있도록 설계하였고 모델링한 각 회로의 출력신호 결과파형을 추가적으로 보여주고 있다. 또한 속도 센서를 통해 얻은 실제속도는 s15의 toggle 신호와 함께 적분회로를 통해 회전자 전기각을 계산할 수 있고 각상을 순차적으로 여자 시키기 위해 s15의 toggle 신호가 다시 궤환하는 구조로 되어 있다.

3. SRM 구동용 컨버터 모델링

SRM 구동을 위해서는 구동용 컨버터가 필요하며 범용으로 상당 두 개의 스위치와 두 개의 환류 다이오드를 가지는 비대칭 브리지 컨버터 (Asymmetric Bridge

Converter)를 일반적으로 사용하고 있다. 그림 7은 모델링한 비대칭 브리지 컨버터의 회로로 그림 2에서 보여준 SRM library와 각 상별로 연결이 되었고 순차적으로 여자를 시키기 위해 비대칭 브리지 컨버터 각 상의 상단 및 하단 스위칭 신호를 PWM 발생부 모델링 회로로부터 받도록 설계하였다.

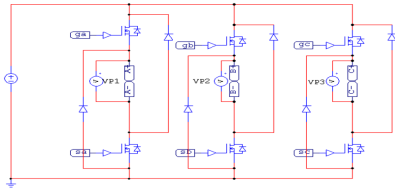


그림 7. 비대칭 브리지 컨버터 모델링 회로
Fig. 7. Asymmetric bridge converter modeling circuit

비대칭 브리지 컨버터 각 상의 상단 스위치 PWM 신호(g_a)와 하단 스위치 PWM 신호(S_a)는 그림 8과 같이 인덕턴스가 증가하는 구간에서 고정자 각 상을 여자 (Excitation) 시켜 상전류 (Phase Current)를 흘려주어 전체 토크 리플을 줄이는 것이 중요하다. 이러한 토크 리플을 줄이기 위해 위치센서를 이용하여 인덕턴스가 증가하는 방향으로 고정자를 여자 시켜야 한다.

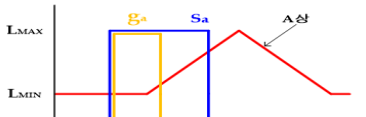


그림 8. SRM 인덕턴스 profile에 따른 비대칭 브리지 컨버터 PWM 신호 (g_a : 상단 스위치 PWM 신호, S_a : 하단 스위치 PWM 신호)
Fig. 8. Asymmetric bridge converter PWM signal according to SRM inductance profile

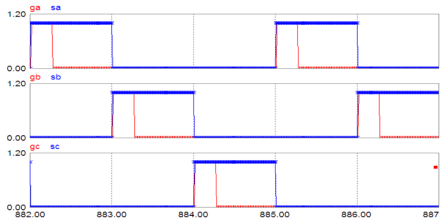


그림 9. 비대칭 브리지 컨버터의 상/하단 스위치 PWM 신호(g_a : 상단스위치 PWM 신호, S_a : 하단스위치 PWM 신호)
Fig. 9. Up/down switch PWM signal of asymmetric bridge converter

또한 부토크의 발생을 억제하고 효과적인 회전력을 얻기 위해 반드시 회전자의 위치각을 검출하여 위치각에 따르는 스위칭 여자가 필요하다. 상(相) 위치 클럭신호 발생부와 상(相) 위치에 따른 위치신호 발생부 모델링 회로를 통해 얻어지는 각상 (A, B, C상)의 상단 및 하단 스위치 PWM 신호를 그림 9에서 확인할 수 있고 전류제어를 위해 히스테리시스 전류제어기를 이용하여 인덕턴스 증가영역에서 상/하단 스위치의 소프트 스위칭기법을 적용하였다.

III. 상(相) 위치 신호 발생부 모델링^[4]

1. 상(相) 위치 클럭 신호 발생부

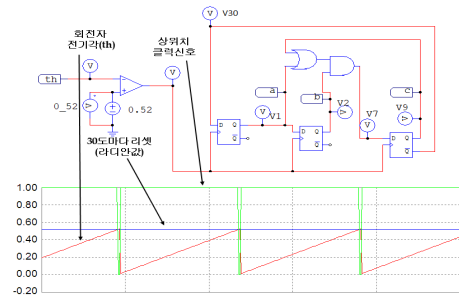


그림 10. 상(相) 위치 클럭신호 발생 모델링 및 결과파형
Fig. 10. Phase position clock signal generation modeling and result waveform

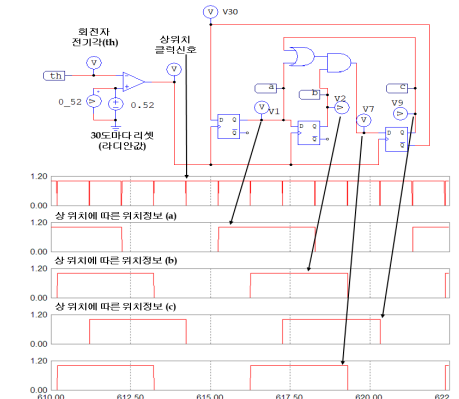


그림 11. 상(相) 위치 클럭 신호를 이용한 상(相) 위치에 따른 위치정보 결과파형
Fig. 11. Position information result waveform according to the phase position using the phase position clock signal

그림 6 회전자 전기각 (theta angle) 검출 모델링 회로를 통해 생성된 회전자 전기각 정보(th)는 고정자 극호 (β_s)를 고려하여 30°마다 초기화할 수 있도록 라디안 (Radian)으로 계산된 0.52값과 함께 비교기를 통해 최종적으로 그림 10과 같이 상(相) 위치 클럭 신호를 발생시킬 수 있는 모델링 회로를 설계하였다. 설계된 모델링 회로를 통해 각부의 결과 파형을 추가로 확인할 수 있으며 생성된 상(相) 위치 클럭 신호는 III 나절 “상(相) 위치에 따른 위치 신호 발생부”의 정보로 사용되는 상(相) 위치에 따른 위치정보 (a), (b), (c)의 결과 파형을 그림 11에서 볼 수 있다.

2. 상(相) 위치에 따른 위치 신호 발생부

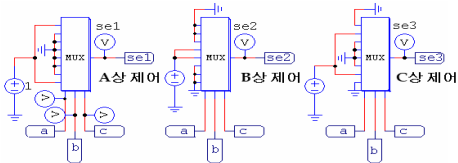


그림 12. 상(相) 위치에 따른 위치 신호 발생 모델링
 Fig. 12. Position signal generation modeling according to phase position

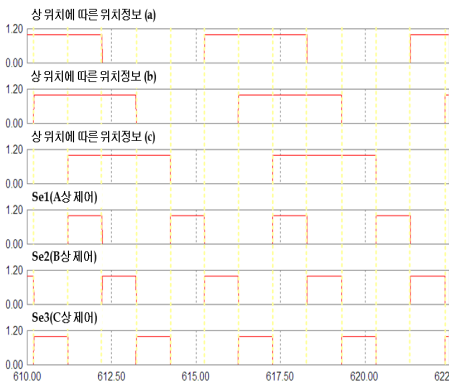


그림 13. 상(相) 위치에 따른 위치 신호 발생 모델링 결과파형
 Fig. 13. Position signal generation modeling result waveform according to phase position

그림 10~11에서 생성된 상(相) 위치에 따른 위치정보 (a), (b), (c)의 신호는 그림 12에서 설계된 MUX 단자의 select 신호로 사용이 되며 최종적으로 그림 2에서 설명한 se1(A상 제어), se2(B상 제어), se3(C상 제어) 신호를 생성하여 회전자 위치에 따른 각 상의 여자신호를 얻을 수 있도록 설계하였다. 모델링된 회로의 결과 파형에 대해 그림 11에서 얻은 상(相) 위치에 따른 위치정보 (a), (b), (c)의 신호와 se1(A상 제어), se2(B상 제어), se3(C상 제어) 신호들을 각각 그림 13에서 결과를 확인할 수 있다.

상 제어) 신호들을 각각 그림 13에서 결과를 확인할 수 있다.

IV. PWM 신호 발생부 모델링^[4]

II. 3절 “SRM 구동용 컨버터 모델링”에서 언급한 비대칭 브리지 컨버터 각 상(相)의 하단스위치 PWM 신호를 생성하기 위해 그림 14와 같이 모델링 회로를 설계하였다. 그림 11을 통해 상(相) 위치에 따른 위치정보의 결과를 얻을 수 있듯이 PWM 신호 발생 모델링 회로도 기존 동일한 회로를 적용하여 각 상(相)의 스위칭 신호의 결과를 그림 15와 같이 얻을 수 있다. 설계된 회로를 통해 생성된 여자신호 (x), (y), (z) 각각은 MUX 단자의 select 신호로 사용이 되고 출력의 결과로 각 상(相)의 하단스위치 PWM 신호를 만들어 낸다.

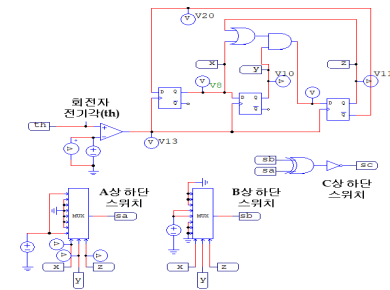


그림 14. 비대칭 브리지 컨버터 각 상의 하단스위치 PWM 신호 발생 모델링

Fig. 14. Modeling of the PWM generator of the lower switch on each phase of the asymmetric bridge converter

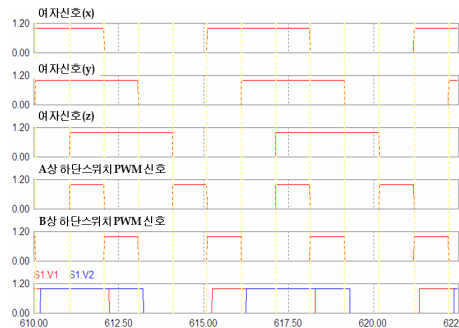


그림 15. 하단스위치 PWM 신호 발생 모델링 결과파형
 Fig. 15. Lower switch PWM signal generation modeling result waveform

그림 16은 상단스위치 PWM 신호 발생 모델링 및 결

과파형으로 설계된 PI 제어기의 출력값과 기준전압에 해당되는 톱니파의 비교된 출력값이 기준 생성된 하단스위치 PWM신호와의 계산에 의해 하단스위치 PWM신호를 만들 수 있다[6]. 따라서 그림 9에서 나타난 비대칭 브리지 컨버터의 상하단 스위치 PWM신호는 그림 15~16의 모델링 회로를 통해 얻어진 결과임을 알 수 있다.

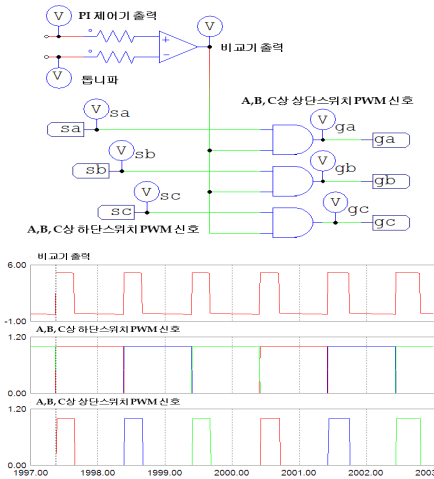


그림 16. 상단스위치 PWM 신호 발생 모델링 및 결과파형
Fig. 16. Lower switch PWM signal generation modeling result waveform

V. 결 론

본 논문에서는 PSIM 시뮬레이션 프로그램에서 제공하는 3상 SRM library를 이용하여 회전자 위치정보 센서를 이용한 SRM의 구동 및 제어 시스템 모델링 (Modeling)을 연구하였다. SRM 구동 및 제어 시스템과 관련된 1) SRM 회전자 위치정보 및 비대칭 브리지 컨버터 구동부, 2) 상(相) 위치 신호 발생부, 3) PWM 신호 발생부 모델링 회로들은 실제 하드웨어를 통한 구동과 제어시스템 결과에 사전 정보로 활용될 수 있다. 또한 희토류 영구자석 전동기를 대체할 수 있는 미래기술 개발을 선점하는데 있어서 모델링 연구를 통한 영구자석 이 필요 없는 SRM의 제어 및 구동시스템 기술적인 측면뿐 아니라, 세계적인 기술경쟁력, 시장성 등의 측면에서도 경제적 효과를 기대할 수 있다.

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

References

- [1] Y. S. Chae, Technology Development Trend of Reluctance Motors for Automobiles, Global Auto News 2013.
- [2] T. J. E Miller, Switched Reluctance Motors and Their Control, Oxford University press, 1993.
- [3] J. R. Hendershot and T. J. E. Miller, Design of Brushless Permanent-Magnet Motor, Oxford Science, 1994.
- [4] PSIM User's Manual, Powersim Inc.
- [5] K. S. Park, S. H. Shin, H. K. Lee, Y. D. Yoon, and G. H. Lee, "A Study on a Rotor Position Sensor Offset Detection Method in a Permanent Magnet Synchronous Generator," Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol. 20, No 9, pp. 914-921, 2014
DOI:https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2014.14.0038
- [6] Y. H. Yoon, K. H. Jeong, J. M. Kim, C. Y. Won and J. W. Kim, "A Low Cost Position Sensing Method with Optical Sensors for Switched Reluctance Motor," Journal of Power Electronics, Vol. 5, No. 3, pp. 240-246, 2005.

저 자 소개

정 성 인(정회원)



- 2001년 : 동국대학교 전기공학과(공학사)
- 2003년 : 한양대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2015년 : Technical University Braunschweig 전기정보물리공학과 (공학박사)
- 2018년 3월 ~ 현재 : 광주대학교 미래자동차공학과 조교수
- 주관심분야 : 전기구동 퍼스널 이-모빌리티 부품 및 시스템