

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2021.21.3.123>

JIIBC 2021-3-17

저가형 아날로그 구동장치를 이용한 Switched Reluctance Motor의 스위칭 Duty 가변제어

Variable Switching Duty Control of Switched Reluctance Motor using Low-Cost Analog Drive

윤용호*

Yongho Yoon*

요약 산업응용에서 정확한 속도 및 전류 제어를 위해 SRM (Switched Reluctance Motor)은 특성상 드라이브에서 고정자의 상 여자와 회전자의 위치를 동기화시키는 것이 매우 중요하다. 따라서 적절한 스위칭 동작을 위해 정확한 회전자 위치정보는 필수적이기에 위치 센서가 필요하다. 회전자 위치에 따라 적정 고정자 권선을 여자 시켜 회전력을 발생시키고 속도와 위치정보를 이용하여 전동기를 제어하기 위해서 일반적으로 엔코더 (Encoder), 레졸버 (Resolver) 같은 위치센서를 사용한다. 그러나 이러한 센서들은 1) 가격적 측면에서 센서들의 가격이 상당히 크기 때문에 전체 시스템 비용에서 전동기 시스템이 차지하는 비율이 높다. 또한 2) 기계적 측면에서 엔코더나 레졸버와 같은 위치센서들을 고정자측에 부착하여 크기 및 무게를 증가시키고 있다. 결론적으로 SRM을 구동하기 위해서는 회전자 위치정보에 따른 제어가 기본적으로 이루어져야 하며 적용 분야를 고려해서 환경에 따른 SRM 구동 시스템을 설계하는 것이 중요하다. 따라서 본 논문에서는 기존의 엔코더 (Encoder), 레졸버 (Resolver)를 사용하는 일반적인 제어시스템에서 벗어나서 저가형 아날로그 구동장치를 설계하여 스위칭 Duty 가변 제어를 통한 SRM의 구동 및 제어 특성을 연구하고자 한다.

Abstract For accurate speed and current control in industrial applications, SRM (Switched Reluctance Motor) is very important to synchronize the stator phase excitation and rotor position in the drive due to its nature. In general, position sensors such as encoder and resolver are used to generate rotational force by exciting the stator winding according to the rotor position and to control the motor by using speed and position information.

However, for these sensors, 1) the cost of the sensors is quite large in terms of price, so the proportion of the motor system to the total system cost is high. 2) In terms of mechanical, position sensors such as encoders and resolvers are attached to the stator to increase the size and weight. In conclusion, in order to drive the SRM, control based on the rotor position information should be basically performed, and it is important to design the SRM driving system according to the environment in consideration of the application field. Therefore, in this paper, we intend to study the driving and control characteristics of SRM through variable switching duty control by designing a low-cost analog driving device, deviating from the general control system using the conventional encoder and resolver.

Key Words : Switched Reluctance Motor, Position Sensor, Rotor Position Information, Variable Switching Duty Control

*정회원, 광주대학교 전기전자공학부
접수일자 2021년 1월 11일, 수정완료 2021년 4월 3일
게재확정일자 2021년 6월 4일

Received: 11 January, 2021 / Revised: 3 April, 2021 /
Accepted: 4 June, 2021

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

I. 서 론

산업응용에서 정확한 속도 및 전류 제어를 위해 SRM (Switched Reluctance Motor)은 특성상 드라이브에서 고정자의 상 여자와 회전자의 위치를 동기화시키는 것이 매우 중요하다. 따라서 적절한 스위칭 동작을 위해 정확한 회전자 위치정보는 필수적이기에 위치 센서가 필요하다^[1]. 회전자 위치에 따라 적정 고정자 권선을 여자 시켜 회전력을 발생시키고 속도와 위치정보를 이용하여 전동기를 제어하기 위해서 일반적으로 엔코더 (Encoder), 레졸버 (Resolver) 같은 위치센서를 사용한다.

절대형 엔코더 (Absolute Encoder), 레졸버 (Resolver)는 초기기동 가능과 높은 분해능 (High Resolution)으로 위치제어 등 정밀제어가 가능하지만, 경제성 면에서 전동기와 시스템의 비용을 증가시키는 문제점을 가지고 있다. 반면에 증분형 엔코더 (Incremental Encoder)의 경우 회전자 위치정보를 이용한 부가적인 초기기동 회로가 필요하며, 열악한 환경에서 전동기 및 전체 시스템의 신뢰성을 저감시킬 수 있는 문제점을 가지고 있다. 또한 SRM의 회전자는 철 성분으로 구성되어있어 Hall-Sensor를 사용할 경우 홀 효과(Hall-Effect)에 의한 회전자 위치검출을 위해 별도의 영구자석을 설치해야 하는 문제점도 있다.

결과적으로 회전자 위치제어 및 SRM 제어를 위해 기존 사용되고 있는 센서들은 1) 가격적 측면에서 센서들의 가격이 상당히 크기 때문에 전체 시스템 비용에서 전동기 시스템이 차지하는 비율이 높다. 또한 2) 기계적 측면에서 엔코더나 레졸버와 같은 위치센서들을 고정자측에 부착하여 크기 및 무게를 증가시키고 있다. 따라서 기존 위치검출 센서들의 문제점을 고려하여 전동기와 시스템의 비용을 줄이기 위해 새로운 형태의 엔코더 (Encoder)인 각도 제어를 위한 엔코더, 센서리스 (Sensorless) 제어가 연구되어 특정 환경에서 사용되고 있다. 그러나 이러한 제어 방법은 정확한 상의 검출이 어려워 전 운전 범위에서 최적의 운전에 한계가 있다. 특히 센서리스 (Sensorless) 제어의 경우 각 상 스위치의 적절한 제어를 위해서 위치 신호를 계산하고 상여자 신호를 발생하는 데에 마이크로 프로세서의 연산주기에 따른 시간이 많이 소요되어 고속 운전이 제한될 수 있는 문제점을 가지고 있다^[2,3].

SRM을 구동하기 위해서는 회전자 위치정보에 따른 제어가 기본적으로 이루어져야 하며 적용 분야를 고려해서 환경에 맞는 SRM 구동 시스템을 설계하는 것이 중요하다. 따라서 본 논문에서는 기존의 엔코더 (Encoder), 레졸버 (Resolver)를 사용하는 일반적인 제어시스템에서

벗어나서 저가형 아날로그 구동장치를 설계하여 스위칭 Duty 가변제어를 통한 SRM의 구동 및 제어 특성을 연구하고자 한다.

II. SRM 구동원리와 위치센서를 이용한 여자^[4]

SRM은 고정자상에 전류가 흐르면 회전자를 최대 인덕턴스 값을 가지는 위치가 될 때까지 인덕턴스가 증가하는 방향으로 회전시키려는 토크가 발생하며 토크 식은 식 (1)과 같이 정리할 수 있다. 식 (1)에서 발생 토크는 상전류의 공급에 비례하고 위치각에 대한 인덕턴스의 기울기에 비례함을 알 수 있다. 토크가 전류의 공급에 비례하므로 상전류의 방향과 무관하게 토크를 발생시킬 수 있으며, 인덕턴스의 변화율에 따라서 정토크 (Positive Torque) 또는 부토크 (Negative Torque)가 발생할 수 있다.

$$T = \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{dL}{d\theta} \quad (1)$$

따라서 그림 1과 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. 또한 부토크의 발생을 억제하고 효과적인 회전력을 얻기 위해 반드시 회전자의 위치각을 검출하여 위치각에 따르는 스위칭 여자가 필요하다.

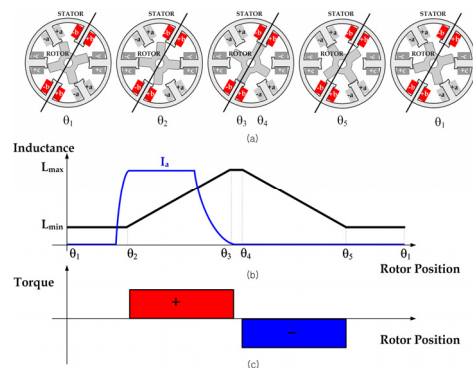


그림 1. 회전자 위치에 따른 인덕턴스 profile, 상전류, 발생토크
Fig. 1. Inductance profile, phase current and generated torque according to rotor position

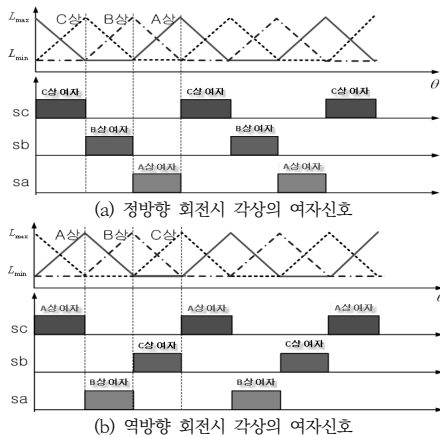


그림 2. 회전방향에 따른 각상의 여자신호
 (sa, sb, sc : 각상의 위치센서 신호)
 Fig. 2. Excitation signal of each phase according to the direction of rotation

그림 2는 SRM 회전 방향에 따른 각상의 여자구간을 나타낸 그림으로 각상의 인덕턴스가 증가하는 구간에서 위치센서 sc, sb, sa가 각각 High 신호일 경우 C, B, A 상을 순차적으로 여자 한다면 회전자는 정방향으로 회전하게 된다. 반대로 sc, sa, sb가 각각 High 신호일 경우 A, B, C 상을 여자시 역방향으로 회전하는 결과를 보여주고 있다. 따라서 SRM의 구동원리에 따라 인덕턴스가 증가하는 구간에서 각상에 대한 회전자 위치를 검출하여 위치에 따른 여자를 시키기 위해 위치센서의 신호가 이용되고 있다.

III. 아날로그 회로를 이용한 스위칭 Duty 가변 제어^[4,5,6]

SRM의 회전자 위치판별을 위해 본 논문에서 구성한 원판디스크 및 광센서를 통한 방법은 저가로 구현할 수 있으며 각 상별 여자 시점을 정확히 알 수 있고 초기 기동도 가능한 장점을 가지고 있다. 그러나 분해능이 낮아 정밀 속도제어의 문제점을 가지고 있지만, 속도에 따라 스위칭 Duty 가변제어가 가능할 수 있도록 저가의 구동회로를 이용하여 설계하였다. 이러한 방식은 일정 주파수의 톱니파를 기준전압과 비교하여 PWM을 만드는 방식으로 속도에 따라 가변되는 스위칭 Duty 신호와 입력된 광센서의 신호를 이용하는 구조로 설계됐다.

스위칭 Duty 가변제어를 위해 3상 6/4 pole SRM 구

조를 기반으로 설계된 디스크 원판 디자인(a), 회전자에 부착된 디스크 원판(b), 스위칭 Duty 가변제어를 위해 설계된 PWM 생성회로(c), 디스크 원판과 광센서가 설치된 실제 SRM(d)의 형상을 그림 3에서 각각 보여주고 있다. 표 1과 같이 본 논문에서 사용된 SRM은 6/4 pole 구조에 고정자 극호(β_s), 회전자 극호(β_r)가 각각 30° , 32° 의 사양을 가지고 있다. 따라서 SRM의 사양에 맞춰 인덕턴스가 증가하는 구간에서 각상의 여자시점을 결정하고 PWM을 생성하기 위해 디스크 원판에 음영처리를 하여 광센서를 통해 수광부와 발광부의 신호를 얻도록 설계하였다.

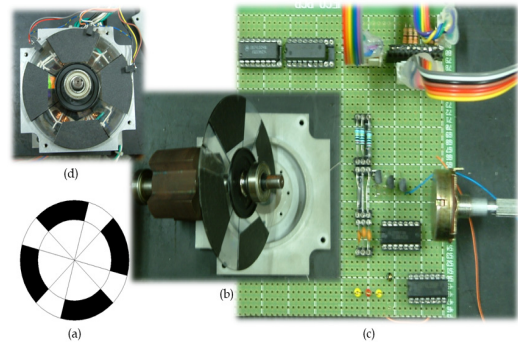


그림 3. 스위칭 Duty 가변제어를 위해 설계된 아날로그 회로
 Fig. 3. Analog circuit designed for variable switching duty control

표 1. SRM 사양
 Table 1. SRM specification

전동기 출력	250 [W]
최 대 속 도	3,000 [rpm]
고정자 극수	6 [극]
회전자 극수	4 [극]
권 선 저항	0.02166 [Ω]
최대 인덕턴스	1.332 [mH]
최소 인덕턴스	0.241 [mH]
고정자 극호(β_s)	30°
회전자 극호(β_r)	32°

IV. 시뮬레이션 및 실험 결과

그림 3과 같이 제작된 아날로그 회로를 이용한 스위칭 Duty 가변제어의 특성을 살펴보기 위해 그림 4와 같이 일정 주파수의 톱니파를 생성할 수 있도록 모델링을 하였고 세부적인 설계내용은 다음과 같다.

- (1) 구형파 신호를 이용하여 미분기를 거쳐 출력으로 얻어진 신호는 설계된 톱니파 발생회로를 통해 톱니파를 생성한다.
- (2) 생성된 톱니파 신호와 속도에 따른 기준전압 (V_{ref})이 비교기를 통해 출력된 Duty 신호 (V_{duty})를 얻을 수 있다.
- (3) 비교기를 통해 출력된 Duty 신호(V_{duty})는 모의 광센서 출력신호와 AND 게이트를 통해 각상의 PWM 신호를 생성한다.

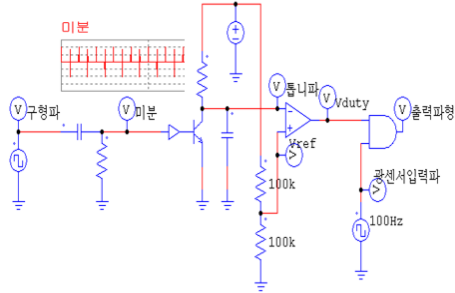


그림 4. 스위칭 duty 가변제어를 위해 설계된 모델링 회로
Fig. 4. Modeling circuit designed for variable switching duty control

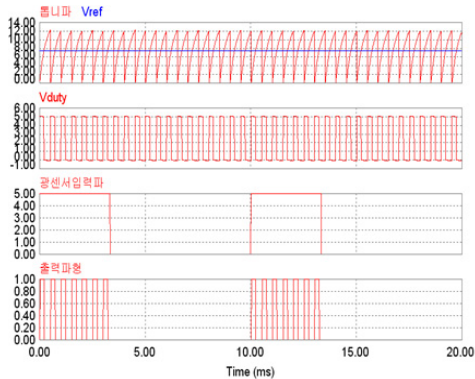


그림 5. 스위칭 duty 가변제어를 위해 설계된 모델링 회로의 결과 파형
Fig. 5. The resulting waveform of a modeling circuit designed for variable switching duty control

스위칭 Duty 가변제어 특성을 살펴보기 위해 그림 4와 같이 모델링된 각부 시뮬레이션 결과 파형을 그림 5에서 보여주고 있다. 생성된 톱니파와 기준전압(V_{ref})간의 비교를 통해 얻은 Duty 신호(V_{duty})가 회전자 위치에 따른 모의 광센서 출력신호와 조합을 통해 PWM 출력신호를 순차적으로 보여주고 있다. 그림 4와 5를 통해 얻은 모델링의 결과파형을 기본으로 하여 3상 6/4 pole

SRM에 적용하기 위해 3개의 모의 광센서를 이용하여 각상의 PWM 출력신호를 얻기 위해 모델링한 결과를 그림 6에서 보여주고 있다.

모델링상 SRM 구동속도를 임의의 100Hz와 각상의 출력신호를 실제 SRM에 설치된 광센서 출력신호와 동일하게 증첩없이 60° 위상차가 발생하도록 설정하였고 이에 따른 모델링 결과파형을 그림 7에서 확인할 수 있다. 톱니파와 기준전압(V_{ref})을 이용하여 만들어진 Duty 신호(V_{duty})는 3개의 임의의 광센서 신호와 함께 각상을 회전자 위치에 따라 여자 시킬 수 있는 PWM 출력신호를 얻음으로써 본 논문에서 구성한 SRM 구동을 위한 스위칭 Duty 가변제어의 적절성을 확인할 수 있다.

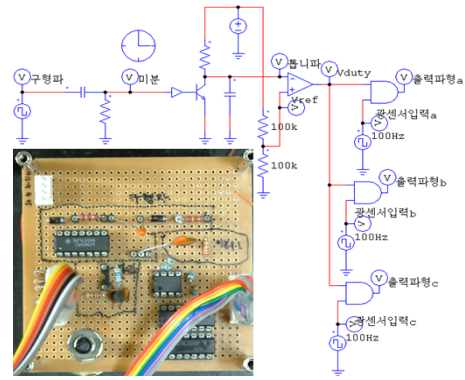


그림 6. 3상 스위칭 duty 가변제어를 위해 설계된 모델링 회로
Fig. 6. Modeling circuit designed for variable control of three-phase switching duty

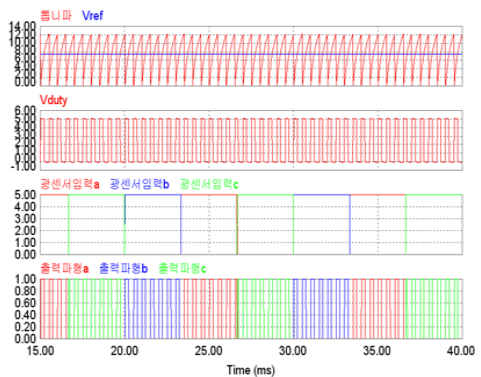


그림 7. 스위칭 duty 가변제어를 위해 설계된 모델링 회로의 결과 파형
Fig. 7. The resulting waveform of a modeling circuit designed for variable switching duty control

그림 8은 SRM의 스위칭 Duty 가변제어를 위해 저가형 아날로그 구동장치를 이용한 전체 하드웨어 구성물로

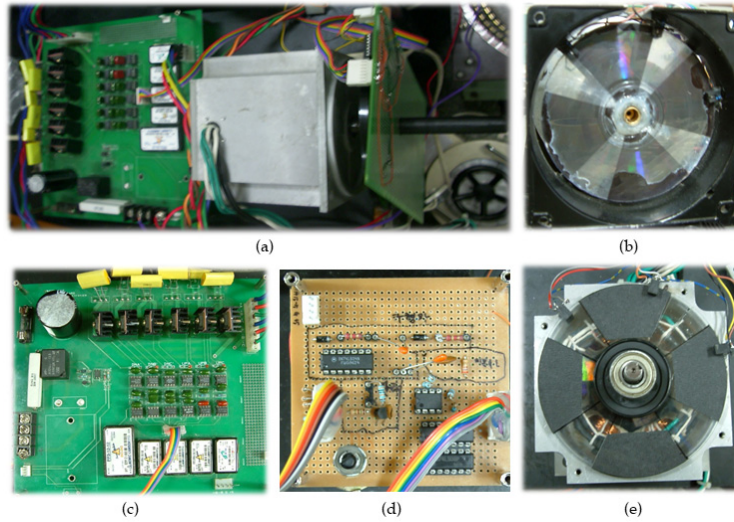


그림 8. 스위칭 Duty 가변제어를 적용한 SRM 전체 시스템
 Fig. 8. SRM whole system applying variable switching duty control

디스크 원판이 적용된 SRM과 구동용 컨버터(a), SRM 구동시 제작된 디스크 원판의 회전모습(b), 구동용 컨버터로 사용된 비대칭브릿지 컨버터(c), 구형파신호를 이용한 톱니파 발생회로(d), 디스크 원판과 광센서가 설치된 SRM(e)의 형상을 각각 보여주고 있다.

스위칭 Duty 가변제어를 적용한 SRM 전체 시스템을 통해 SRM 구동시 인덕턴스 profile에 따른 각 상의 여자신호를 결정하기 위해 사용된 디스크 원판과 광센서 출력신호를 그림 9에서 보여주고 있다. 그림 2에서 설명한 회전방향에 따른 각상의 여자신호와 같이 제작된 디스크 원판과 광센서를 이용한 각 상의 여자신호가 정확히 검출되는 결과를 확인할 수 있다.

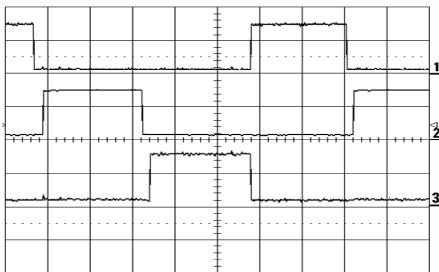
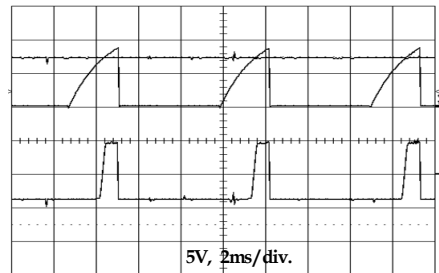


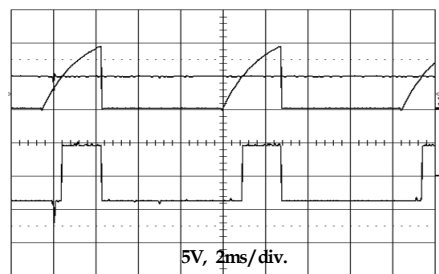
그림 9. 디스크 원판과 광센서를 이용한 출력신호 (1V, 1ms/div.)
 Fig. 9. Output signal using disk and optical sensor

그림 10~11은 생성된 톱니파 신호와 F/V 컨버터를 용하여 속도에 따라 가변되는 기준전압(V_{ref})이 비교기

를 통해 출력되는 Duty 신호(V_{duty})의 결과를 각각 보여주고 있다.



(a)



(b)

그림 10. 기준전압(V_{ref}), 톱니파신호, duty 신호(V_{duty})
 Fig. 10. Reference voltage, sawtooth signal, duty signal

따라서 설계된 구동회로를 통해 속도변화에 따른 기준전압(V_{ref})과 톱니파를 통해 생성된 Duty 신호의 가변으로 SRM의 속도제어가 이루어짐을 알 수 있다. 또한 그림

11(a)의 경우 기준전압(V_{ref})과 생성된 톱니파사이의 기준(명령)속도대비 실제 속도가 큰 경우로 Duty 신호가 0으로 출력되어 기준(명령)속도를 추정하는 것을 알 수 있다. 반면에는 것을 알 수 있다.

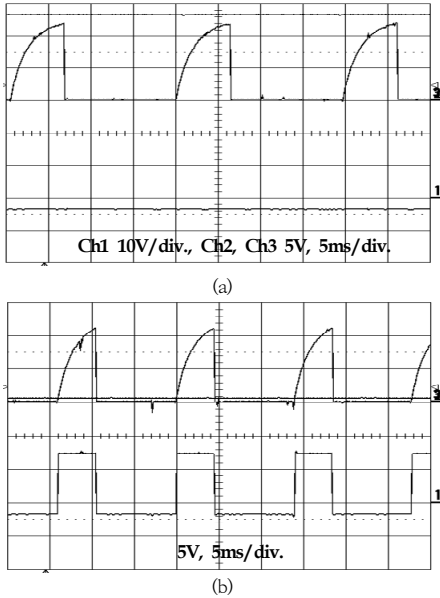


그림 11. 기준전압(V_{ref}), 톱니파신호, duty 신호(V_{duty})
Fig. 11. Reference voltage, sawtooth signal, duty signal

V. 결 론

본 논문에서 저가형 아날로그 구동장치를 설계하여 스위칭 Duty 가변제어를 통한 SRM의 구동 및 제어 특성을 살펴보고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

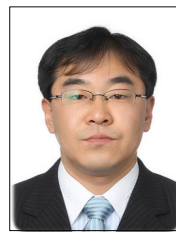
- 1) 일정 주파수의 톱니파를 기준전압과 비교하여 PWM 을 만드는 방식으로 속도에 따라 가변되는 스위칭 Duty 신호에 의해 속도제어가 가능하다.
- 2) 기존의 엔코더 (Encoder), 레졸버 (Resolver)를 사용하는 제어시스템에서 벗어나서 저가형 아날로그 구동장치를 이용하여 구동 시스템의 비용을 절감할 수 있다.
- 3) SRM을 구동하기 위해서는 적용 분야를 고려해서 환경에 맞는 구동 시스템을 설계하는 것이 중요하다.

References

- [1] T. J. E Miller, Switched Reluctance Motors and Their Control, Oxford University press, 1993.
- [2] J. R. Hendershot and T. J. E. Miller, Design of Brushless Permanent-Magnet Motor, Oxford Science, 1994.
- [3] S. I. Jung, "A Study on Rotor Position Detection and Securing Initial Position for Switched Reluctance Motor (SRM)", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC) Vol. 20, No. 3, pp.141-146, 2020. DOI: <https://doi.org/10.7236/IIBC.2020.20.3.141>
- [4] Y. H. Yoon, B. K. Lee, J. Hur, Y. C. Kim, C. Y. Won, and D. W. Yoo, "Implementation of Low Cost and Advanced Slotless Brushless DC Motor Drive Using PLL Algorithm", Electric Power Components and Systems, Vol. 33, No. 10, PP. 967-984, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1080/15325000600596726>
- [4] 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.
- [5] Y. J. An and C. J. Joe, "Development of Electronic Position Sensor for SRM Drive", Trans. KIEE Vol. 44, No. 2, pp. 210-213, 1995.

저 자 소 개

윤 용 호(정회원)



- 성균관대학교 메카트로닉스공학과(공학박사)
- 삼성탈레스 종합연구소 전문연구원
- 현재 : 광주대학교 전기전자공학부 교수
- 주관심분야 : 전동기 제어 및 신재생 에너지

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