

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2023.23.4.143>  
JIIBC 2023-4-22

## 스위치드 릴럭턴스 전동기 최적운전을 위한 연구

# Research for Optimal Operation of Switched Reluctance Motors

정성인\*

Sungin Jeong\*

**요약** SRM의 특성 중 비선형성으로 인해 최대토크 및 최소 토크 맥동 형성을 위한 적정 운전이 어렵다. 또한 고정 스위칭각 제어 때 속도 가변에 따른 토크 형성이 불안정하여 효율을 저하시키는 문제점을 가지고 있다. 따라서 속도 가변에 따른 능동적인 스위칭각 제어가 필요하다. 본 논문에서는 SRM의 비선형성으로 인한 문제점으로부터 선행각(Advance angle)의 자동제어에 의한 토크 리플 저감과 이에 따른 출력 토크 향상에 의한 구동 성능개선을 위한 방법에 대해 모색하였다. 또한 히스테리시스 전류제어기 성능에 따른 스위칭 가변으로 인한 SRM의 최적 운전에 대해 살펴보았다.

**Abstract** Among the characteristics of SRM, due to nonlinearity, it is difficult to properly operate to form maximum torque and minimum torque pulsation. In addition, in the case of fixed switching angle control, torque formation according to speed variation is unstable, thereby reducing efficiency. Therefore, active switching angle control according to speed variation is required. Therefore, active switching angle control according to speed variation is required. In this paper, a method for improving driving performance by reducing torque ripple by automatic control of the advance angle and increasing output torque was sought from the problem caused by the nonlinearity of the SRM. In addition, the optimal operation of SRM due to the switching variable according to the performance of the hysteretic current controller was examined.

**Key Words** : Switched Reluctance Motor(SRM), Optimal Operation, Switching Angle Control, Hysteresis Current Controller

## 1. 서론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, SRM)는 비선형적인 특성이 있는데, 모터의 중요한 특성인 인덕턴스의 크기는 회전자 위치와 전류에 따라 변하고, 인덕턴스의 포화 현상으로 인해 다른 모터

에 비하여 높은 토크 리플이 발생한다. 특히, 상 전환 구간에서 가장 크게 나타나는데, 모터의 소음과 진동의 원인이 되므로, SRM의 토크 리플을 줄이는 것이 필수적이다<sup>[1]</sup>.

SRM의 특성 중 비선형성으로 인해 최대토크 및 최소 토크 맥동 형성을 위한 적정 운전이 어렵다. 또한 고정

\*정회원, 광주대학교 전기공학과  
접수일자 2023년 6월 21일, 수정완료 2023년 7월 21일  
게재확정일자 2023년 8월 4일

Received: 21 June, 2023 / Revised: 21 July, 2023 /  
Accepted: 4 August, 2023

\*Corresponding Author: si.jeong@gwangju.ac.kr  
Department of Electrical Engineering, Gwangju University,  
Gwangju, Korea

스위칭각 제어 때 속도 가변에 따른 토크 형성이 불안정하여 효율을 저하시키는 문제점을 가지고 있다. 따라서 속도 가변에 따른 능동적인 스위칭각 제어가 필요하다. 본 논문에서는 SRM의 비선형성으로 인한 문제점으로부터 선행각(Advance angle)의 자동제어에 의한 토크 리플 저감과 이에 따른 출력 토크 향상에 의한 구동 성능개선을 위한 방법에 대해 모색하였다. 또한 히스테리시스 전류제어기 성능에 따른 스위칭 가변으로 인한 SRM의 최적 운전에 대해 살펴보았다.

그림 1은 6/4 pole 구조의 SRM과 구동용 드라이버를 보여주고 있으며 선행각의 자동제어, 히스테리시스 전류제어기의 스위칭 가변을 적용하여 이에 대한 전동기 최적 운전에 대해 실험을 수행하였다.

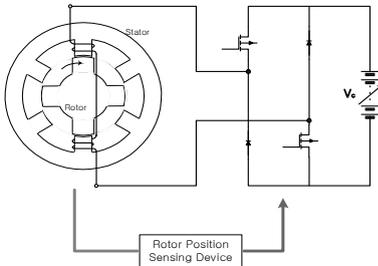


그림 1. 스위치드 릴럭턴스 전동기와 구동 드라이버  
Fig. 1. Switched reluctance motor and drive driver

## II. SRM의 스위칭각 제어를 통한 최적제어

### 1. 일정 토크 각( $\theta_{TQ}$ ) 제어<sup>[2]</sup>

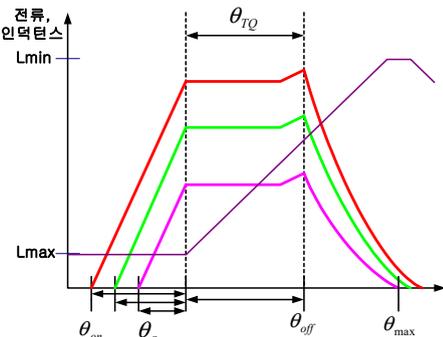


그림 2. 일정 토크각 제어  
Fig. 2. Constant torque angle control

토크 각도( $\theta_{TQ}$ )는 인덕턴스가 증가하는 구간에서 스위치가 도통 되어있는 각도로서 토크가 발생하는 유효구

간이다. 부하의 증감에 관계없이 토크 각도를 일정하게 제어한다는 것은 유효토크구간을 일정하게 하는 것과 같다. 자기포화가 없는 선형적인 조건에서는 소호 되는 전류가 부(-) 토크의 영향이 미치지 않는 범위까지 토크 각도를 최대한 크게 하는 것이 좋다. 그렇게 되면 토크 맥동은 작아지면서 최대출력이 극대화될 수 있다.

그림 2는 토크 각도 일정 제어에 의한 부하에 따른 전류 파형을 보여주고 있다. Flat-top 전류를 만들기 위한 부하에 따른 적절한 선행각도가 설정되어 일정 전류로 지속되다가 부하와 관계없이 일정한 토크 각도를 유지하면서 스위치-오프를 행한다.

### 2. 일정 드웰(Dwell) 각 제어<sup>[3]</sup>

토크 발생 구간에서 부하전류가 크고 고정자와 회전자의 중첩이 커짐에 따라 포화가 심화되어서 전류의 상승이 발생한다면 효율 저하를 가져오므로 포화점의 직전에 스위치-오프하는 것이 좋다. 따라서 부하전류가 커짐에 따라 포화점은 앞당겨지게 되므로 Flat-top 전류 형상을 만들기 위해 부하에 따라서 선행각을 크게 조정함과 동시에, 포화영역에서의 전류상승을 억제하기 위해 토크 각도를 작게 조정하면 효율이 더 향상된다.

그림 3은 일정 드웰(Dwell) 각 제어방식에서 동작하는 상전류 파형을 보여주고 있다. 부하전류에 따른 선행각도의 증가 폭과 토크 각도의 감소 폭을 일정하게 하여 그들의 합인 드웰각도를 일정하게 하는 방식이다.

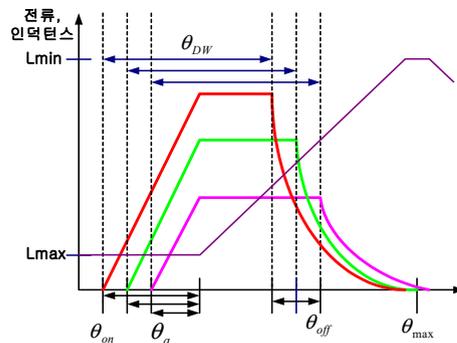


그림 3. 일정 드웰각 제어  
Fig. 3. Constant dwell angle control

### 3. 제안된 가변 스위칭각 제어

앞서 일정 토크 각 제어와 일정 드웰각 제어에 대해 논하면서 각 제어방식의 단점으로 역(-) 토크 발생, 효율 감소, 과부하시 불안정 등의 내용을 고려하여 가변 스위칭각 제어방식에 대해 다음의 내용으로 제안할 수 있다.

- (1) 스위치의 턴온 이후 최초로 발생하는 최대전류  $I_{peak}$ 를 검출
- (2) 이때의 위치계산  $\theta_{peak}$
- (3) 조건  $I_{peak} = I_{ref}$ ,  $\theta_{peak} = \theta_m$ 을 만족하도록 제어기 설계
- (4) 전체 여자각은 최대 여자각 한도 내에서 임의로 선정(드웰각 고정)
- (5) 기본적인 턴온 각도는 식 (1)으로 정리할 수 있다.

$$\theta_{on} = \theta_m - \frac{L_{min} I_{ref} \omega}{V_{dc}} \quad (1)$$

$\theta_{on}$  : 스위칭 턴온 각도

$\theta_m$  : 회전자와 고정자가 정렬되기 시작하는 각 (최대토크 발생지점)

$\frac{L_{min} I_{ref} \omega}{V_{dc}}$  : 지령전류에 대한 두 각도 사이의 변동분

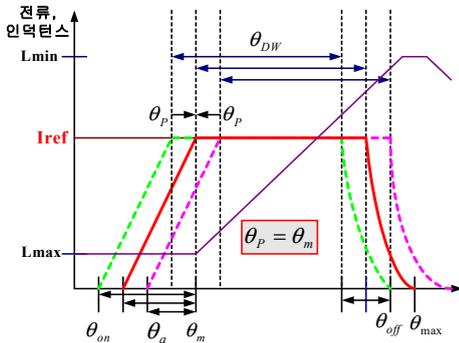


그림 4. 제한한 가변 스위칭 각 제어  
 Fig. 4. Proposed variable switching angle control

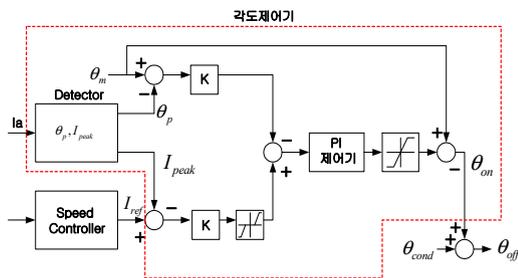


그림 5. 제어알고리즘  
 Fig. 5. Control algorithm

따라서 제한한 가변 스위칭각 제어방식은 그림 4와 같이 속도 및 부하 변동에 대해 자동으로 스위칭 각을 제어

하는 방식으로 항상 최대토크 지점에 맞춰 제어되므로 구동 성능을 높이고 부(-) 토크의 발생 가능성 또한 적다<sup>[4]</sup>.

또한 제안된 가변 스위칭각 제어방식은 모터의 파라미터나 자기동조 방식 없이 턴 온각을 조절하는 간략화된 알고리즘을 그림 5와 같이 구성할 수 있다.

### III. 히스테리시스 전류제어기를 이용한 최적제어

히스테리시스(Hysteresis) 전류제어기는 각상의 전류 오차가 크기에 근거하여 전동기에 인가될 전압을 결정하는 일종의 뱅뱅 제어기이다. 각 상전류의 오차가 정해진 허용오차 범위 폭 즉 히스테리시스 폭 내에 있도록 각 상의 전원과 부하 사이의 스위칭 소자의 온, 오프 상태를 제어한다<sup>[5]</sup>.

일반적으로 SRM에서 사용되는 히스테리시스 제어는 저속영역에서 이상적인 값의 전류를 얻을 수 있고 빠른 응답성과 간단한 구조로 되어있는 장점을 가지고 있다. SRM의 토크는 식 (2)에서 전류의 제곱에 비례하므로 전류를 일정(Flat-Top)하게 유지하는 것이 중요하다.

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

$T$  : 토크,  $i$  : 상전류

$\frac{dL}{d\theta}$  : 회전자 위치에 따른 인덕턴스 변화량

$$V_{UT} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} (+V_{sat}) \quad (3)$$

$$V_{LT} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} (-V_{sat})$$

또한 히스테리시스 밴드의 폭을 결정하는 Upper-Threshold, Lower-Threshold 전압은 식 (3)과 같은 전압 방정식으로 구해진다.

여기서 히스테리시스 전압  $V_H$ 는 식 (4)와 같다.

$$V_H = V_{UT} - V_{LT} \quad (4)$$

그림 6은 히스테리시스 제어기에 대한 모델링된 회로

로 2개의 Op-Amp를 이용하여 Upper-threshold, Lower- threshold 전압을 각각 설정하여 히스테리시스 밴드의 폭을 결정할 수 있다. 또한 설정한 히스테리시스 밴드를 통해 2개의 Op-Amp 출력에 대해 RS-FF를 이용하여 최종적으로 히스테리시스 제어기의 출력신호를 그림 7과 같이 얻을 수 있다.

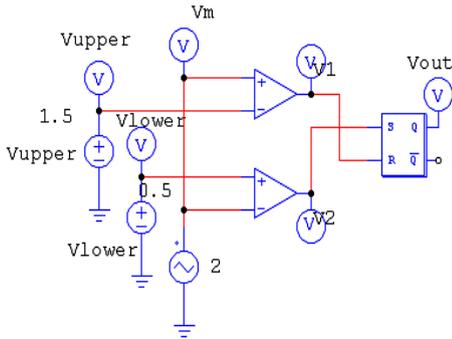


그림 6. 히스테리시스 전류제어기  
Fig. 6. Hysteresis current controller

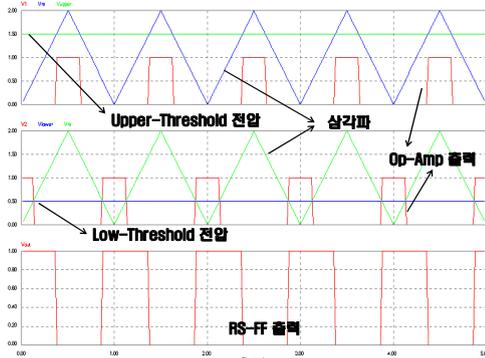


그림 7. 히스테리시스 전류제어기의 각부 출력신호  
Fig. 7. Output signal of each part of hysteresis current controller

#### IV. 실험결과

##### 1. 제안된 가변 스위칭 각 제어

그림 8~10은 본 연구를 통해 제안된 가변 스위칭 각 제어를 통한 실험 결과를 보여주고 있다. 제어각의 변화에 따른 속도측정 실험은 고정된 부하에서 각각의 선행각 및 드웰각을 변화시켜 최대속도를 측정함으로써 적절한 스위칭 각을 찾아낼 수 있도록 하였다. 선행각과 드웰각은 EPROM을 사용하여 EPROM 내에 기록된 데이터를

를 바꾸어 가면서 실험하였다. 또한 EPROM에는 위치센서에서 출력되는 카운터 값에 따라 여자상을 결정하는 데이터 값이 기록되어 있고 이 데이터 값을 변경함에 따라 각 위치에서 결정되는 선행각 및 드웰각을 조절할 수 있다.

그림 8에서 선행각 7°보다는 그림 9에서의 11°가 또 11°보다는 그림 10에서 선행각 13°일 때가 초기에 전류의 확립이 좋음을 보여주고 있다. 이러한 부하에 따른 적절한 선행각의 선택은 전동기의 권선에 평활한 전류를 흘려줌으로써 전류에 비례하는 전동기 토크 리플을 줄일 뿐만 아니라 시스템의 응답성을 좋게 한다<sup>[6]</sup>.

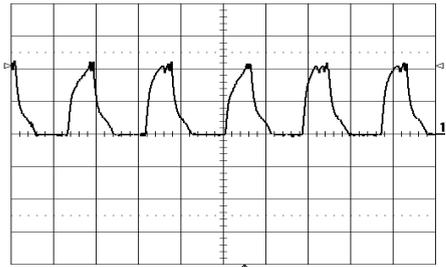


그림 8. 상전류 파형 (선행각 7°, 2A/5ms/div.)  
Fig. 8. Phase current waveform

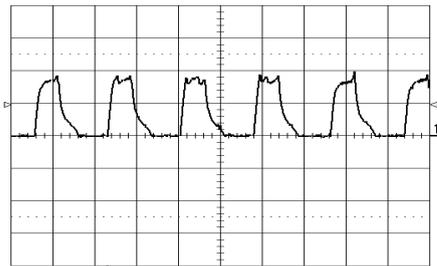


그림 9. 상전류 파형 (선행각 11°, 2A/5ms/div.)  
Fig. 9. Phase current waveform

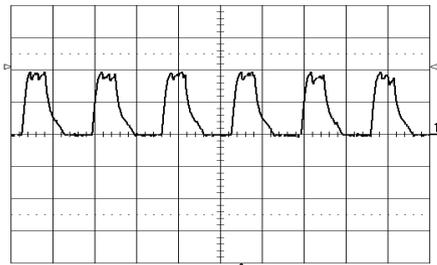


그림 10. 상전류 파형 (선행각 13°, 2A/5ms/div.)  
Fig. 10. Phase current waveform

6/4 Pole SRM의 경우  $30^\circ$  이상 주계 되면 전류의 증첩이 일어난다. 따라서 이렇게 드웰각을 늘림으로써 전류를 증첩시켜 평균 전류를 상승시켜 주는 이유는 더 큰 토크를 발생시키고자 하는 목적뿐만 아니라 토크 골을 줄임으로써 토크 리플을 줄일 수 있다는 장점이 있다. 하지만 과도한 드웰각은 전류의 꼬리를 길게 하여 부(-)토크를 발생시킬 수도 있으므로 주의해야 한다. 본 논문에서는 선행각  $13^\circ$  상태에서 드웰각의 크기를 그림 11~14와 같이  $30^\circ$ ,  $33^\circ$ ( $2^\circ$  중첩),  $35^\circ$ ( $5^\circ$  중첩),  $37^\circ$ ( $7^\circ$  중첩)로 변화시키면서 출력을 관찰하였다. 이러한 결과로 역토크가 발생하지 않고 안정적으로 동작하는  $3^\circ$ ( $33^\circ$  드웰각)로 중첩각에서 최적의 운전 상태를 찾을 수 있다.

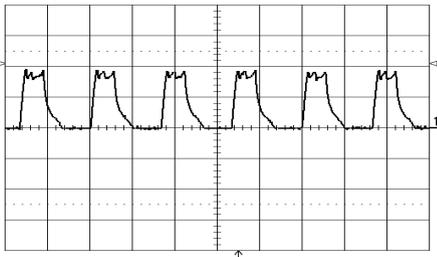


그림 11. 상전류 파형 (드웰각  $30^\circ$ , 중첩 없음,  $2A/5ms/div.$ )  
 Fig. 11. Phase current waveform

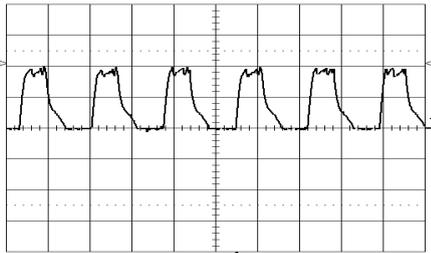


그림 12. 상전류 파형 (드웰각  $33^\circ$ ,  $3^\circ$  중첩,  $2A/5ms/div.$ )  
 Fig. 12. Phase current waveform

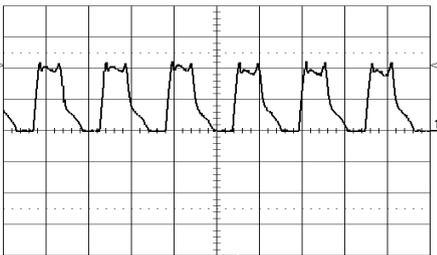


그림 13. 상전류 파형 (드웰각  $35^\circ$ ,  $5^\circ$  중첩,  $2A/5ms/div.$ )  
 Fig. 13. Phase current waveform

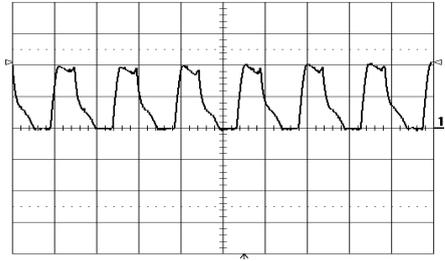


그림 14. 상전류 파형 (드웰각  $37^\circ$ ,  $7^\circ$  중첩,  $2A/5ms/div.$ )  
 Fig. 14. Phase current waveform

## 2. 히스테리시스 전류제어기 밴드에 따른 실험

그림 15~17은 식 (3), (4)를 통해 히스테리시스 전류제어기의 밴드폭을 조절하여 스위칭에 따른 전류파형과 gate 신호를 보여주고 있다. 히스테리시스 제어기의 밴드를 작게 하였을 경우 전류를 더 평활하게 만들 수 있다는 장점이 있지만 많은 스위칭으로 인한 손실을 감수해야 하고, 밴드를 크게 하였을 경우 응답이 늦어져 전체 시스템 불안정하게 만들 수 있다. 이러한 원인 때문에 선행각과 마찬가지로 최적의 밴드를 찾는 과정이 필요하다.

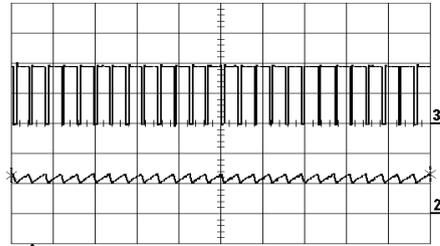


그림 15. Gate 신호 및 스위칭에 따른 전류파형 (히스테리시스 전류제어기의 밴드를 작게 하였을 때)  
 (Ch 2 :  $2A/50ms/div.$ , Ch 3 :  $5V/50ms/div.$ )  
 Fig. 15. Gate signal and current waveform according to switching (when the hysteresis current controller's band is reduced)

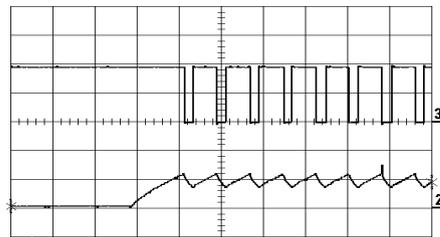


그림 16. Gate 신호 및 스위칭에 따른 전류파형 (히스테리시스 전류제어기의 밴드가 중간 크기일 때)  
 (Ch 2 :  $2A/50ms/div.$ , Ch 3 :  $5V/50ms/div.$ )  
 Fig. 16. Gate signal and current waveform according to switching (When the band of the hysteresis current controller is medium)

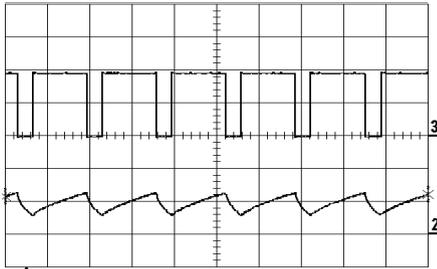


그림 17. Gate 신호 및 스위칭에 따른 전류파형  
(히스테리시스 전류제어기의 밴드를 크게 하였을 때)  
(Ch 2 : 2A/50ms/div., Ch 3 : 5V/50ms/div.)

Fig. 17. Gate signal and current waveform according to switching (When the band of the hysteresis current controller is increased)

## V. 결 론

본 논문에서는 SRM의 토크 리플 저감과 이에 따른 출력 토크 향상에 의한 구동 성능개선을 위한 방법에 대해 모색하였다. 또한 히스테리시스 전류제어기 성능에 따른 스위칭 가변으로 인한 SRM의 최적 운전에 대해 살펴보았다. 따라서 이러한 실험 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 부하에 따른 적절한 선행각의 선택은 전동기의 권선에 평활한 전류를 흘려줌으로써 전류에 비례하는 전동기 토크 리플을 줄일 뿐만 아니라 시스템의 응답성을 좋게 한다.
- (2) 히스테리시스 제어기의 밴드를 작게 하였을 경우 전류를 더 평활하게 만들 수 있다는 장점이 있지만 많은 스위칭으로 인한 손실을 감수해야 하고, 밴드를 크게 하였을 경우 응답이 늦어져 전체 시스템 불안정하게 만들 수 있다.
- (3) 선행각과 마찬가지로 히스테리시스 전류제어기의 최적 밴드를 찾는 과정이 필요하다.

## References

- [1] Y. S. Lee, J. M. Noh, D. J. Lee, J. H. Kim, H. G. Seon and M. S. Han, "Development of SRM Drive System for Built-in Car Vacuum Cleaner," Trans. on KIPE, vol. 22, no. 3, pp. 193~198, 2017.  
DOI: <https://doi.org/10.6113/TKPE.2017.22.3.193>
- [2] R. Krishnan, "Switched reluctance motor drives," CRC, 2001.
- [3] K. Russa, I. Husain, and M. Elbuluk, "A self-tuning controller for Switched reluctance motor," IEEE Trans. Power Electronic, vol. 15, no. 3, pp 545~552, 2000.
- [4] Maged N. F. Nashed, Kazuhiro Ohyama, Kenichi Aso, Hiroaki Fujii and Hitoshi Uehara, "Automatic Turn-off Angle Control for High Speed SRM Drives," Journal of Power Electronics, vol. 7, no. 1, pp. 81~88, 2007.
- [5] Y. H. Yoon, Y. C. Kim, S. H. Song, and C. Y. Won, "Control of C-dump Converters fed from Switched Reluctance Motors on an Automotive," Journal of Power Electronics, vol. 5, no. 2, pp. 120~128, 2005.
- [6] S. I. Jeong, "Driving Characteristics according to  $\Delta$ -Connection and Y-Connection of a Switched Reluctance Motor," Trans. on KIEE, vol. 70, no. 6, pp. 918~923, 2021.  
DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2021.70.6.918>

## 저 자 소 개

### 정 성 인(정회원)



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