

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2022.22.2.123>
JIIBC 2022-2-18

가변 히스테리시스 전류제어 모델링을 통한 SRM 구동특성

SRM Driving Characteristics through Modeling of Variable Hysteresis Current Control

정성인*

Sungin Jeong*

요 약 SRM(Switched Reluctance Motor)의 토크는 인덕턴스의 기울기에 비례하여 발생하기 때문에 비선형 토크 특성을 가지며 토크 맥동이 크고 소음이 심한 단점을 가지고 있다. 특히 SRM의 상용화에 가장 큰 장애 요인으로 작용하고 있는 것은 회전축에서 발생하는 맥동 토크로 이에 의해 기기자체는 물론이고 주변장치에까지 여러 가지 악영향을 미친다. 따라서 맥동 토크를 저감시키는 방법으로 다양한 방안이 국내외 연구자들에 의하여 발표되었고 히스테리시스 제어기의 경우 초핑 제어에 비해 평활한 전류를 흘려줄 수 있다는 장점이 있다는 연구결과가 있다. 그러나 히스테리시스 밴드를 결정함에 있어서 밴드가 너무 작을 경우 많은 스위칭으로 인한 스위칭 손실과 엔코더의 사용 시 불안정한 초기 기동을 야기할 수 있는 등의 단점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 속도오차에 따른 히스테리시스 밴드의 변화를 통하여 보다 안정적이고 빠른 속도응답을 가지면서 정상상태에서 토크 리플을 줄일 수 있는 가변 히스테리시스 제어기에 대하여 연구하였다.

Abstract The torque of the SRM((Switched Reluctance Motor)) is proportional to the inductance slope, so it has a non-linear torque characteristic, and has a disadvantage in that the torque pulsation is large and noise is severe. In particular, the biggest obstacle to the commercialization of SRM is the pulsating torque generated from the rotating shaft, which has various adverse effects not only on the device itself but also on the peripheral devices. Therefore, various methods for reducing the pulsating torque have been published by domestic and foreign researchers, and there is a study result that the hysteresis controller has an advantage in that it can flow a smooth current compared to the chopping control. However, in determining the hysteresis band, if the band is too small, it has a disadvantage in that it may cause a switching loss due to many switching and an unstable initial start when the encoder is used. Therefore, in this paper, a variable hysteresis controller that can reduce torque ripple in a steady state while having a more stable and fast speed response through the change of the hysteresis band according to the speed error.

Key Words : Switched Reluctance Motor, Torque Ripple, Variable Hysteresis Current Controller, Speed Control

*정회원, 광주대학교 AI자동차학과
접수일자 2022년 1월 1일, 수정완료 2022년 3월 3일
게재확정일자 2022년 4월 8일

Received: 1 January, 2022 / Revised: 3 March, 2022 /
Accepted: 8 April, 2022

*Corresponding Author: si.jeong@gwangju.ac.kr
Dept. of AI Automotive Engineering, Gwangju University,
Gwangju, Korea

I. 서 론

SRM(Switched Reluctance Motor)은 회전자에는 권선, 정류자 또는 영구자석 등이 없고, 고정자에만 집중 권으로 권선이 감겨있기 때문에 범용 유도전동기보다 제작비가 절감되는 장점이 있다(그림 1). 또한 고효율성 전동기로서 범용 유도전동기보다도 효율이 높지만 생산가격은 상대적으로 낮다. 따라서 고효율 전동기를 개발하기보다는 경제적 측면에서 유리하며 토크-속도특성은 스테핑모터와 직류 직권 전동기의 고유특성을 갖고 있어서 기동에서 정상속도까지 원활한 운전이 가능하다.

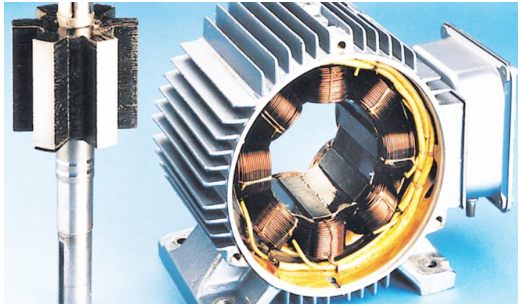


그림 1. SRM 형상
Fig. 1. SRM shape

이러한 장점에도 SRM은 전류의 크기와 회전자, 고정자의 상대적 위치에 따라 인덕턴스가 매우 비선형적으로 변하는 특성이 있다. 또한 토크는 이 인덕턴스의 기울기에 비례하여 발생하기 때문에 비선형 토크 특성을 가지며 토크 맥동이 크고 소음이 심한 단점을 가지고 있다. 특히 SRM의 상용화에 가장 큰 장애 요인으로 작용하고 있는 것은 회전자에서 발생하는 맥동 토크로 이에 의해서 기기 자체는 물론이고 주변장치에까지 여러 가지 악영향을 미친다^[1].

따라서 맥동 토크를 저감시키는 방법으로 다양한 방안이 국내외 연구자들에 의하여 발표되었다. 그중 대표적인 것으로, 고정자나 회전자의 구조와 같은 설계사 양을 변화시키는 방법으로 향상된 자계 분석을 통한 성능 좋은 모터를 제작하는 것이다. 또한 인가전압, 전류의 크기, 턴 온과 턴 오프 및 부하 등의 운전 파라미터들을 최적으로 조합시켜 운전하는 전기적 제어를 통한 리플 저감으로 나눌 수 있다.

그리고 전기적 제어 방법에는 일정한 주파수의 전압을 온-오프 함으로써 전류의 상승을 억제하는 초핑제어와 일정 밴드 내에서의 전류의 상태에 따른 스위치의 온-오프

를 결정하는 히스테리시스 제어로 구분할 수 있다.

초핑 제어의 경우 마이크로프로세서를 이용할 경우 속도계산 이외에 부가적인 회로가 필요 없다는 장점이 있으나 일정한 주파수를 가짐으로 인한 초기의 전류 상승을 도모하지 못하는 등의 단점을 가지고 있다^[2].

히스테리시스 제어기의 경우는 초핑 제어에 비해 평활한 전류를 흘려줄 수 있다는 장점이 있다. 그러나 전류를 피드백 받기 위한 CT(Current Transformer)와 같은 부가적인 회로 이외에 히스테리시스 밴드를 결정하면서 밴드가 너무 작을 때 많은 스위칭으로 인한 스위칭 손실과 엔코더의 사용 시 불안정한 초기 기동을 초래할 수 있는 등의 단점이 있다.

이러한 단점을 고려하여 설정된 히스테리시스 제어기의 밴드 내에서의 토크 리플을 줄이는 것은 그만큼의 한계를 가지게 된다. 따라서 본 논문에서는 속도오차에 따른 히스테리시스 밴드의 변화를 통하여 더 안정적이고 빠른 속도 응답을 가지면서 정상상태에서의 토크 리플을 줄일 수 있는 가변 히스테리시스 제어기를 연구하였다.

II. 히스테리시스 전류제어기^[3,4]

1. 히스테리시스 전류제어

SRM은 릴럭턴스(Reluctance)를 이용하여 토크를 발생시키므로 토크 맥동이 크고, 그것으로 인한 진동과 소음이 실용화에 큰 장애가 되고 있다. 이러한 이유로 토크 맥동을 저감하여 진동과 소음을 줄이고자 하는 연구들이 활발하게 이루어지고 있다.

SRM의 토크는 식 (1)에서 전류의 제곱에 비례하므로 전류를 일정(Flat-Top)하게 유지하는 것이 중요하다. 따라서 토크 맥동을 저감하기 위해 실제 전류를 피드백 받아 계산된 제어량과 비교하여 전압을 초핑하는 히스테리시스 전류제어기를 사용할 수 있다.

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

히스테리시스(Hysteresis) 제어기는 각상의 전류 오차가 크기에 근거하여 전동기에 인가될 전압을 결정하는 일종의 뱅뱅 제어기이다. 각 상전류의 오차가 정해진 허용오차 범위 밴드(band), 즉 히스테리시스 밴드 내에 있도록 스위칭 소자의 온, 오프 상태를 제어한다.

구조가 간단하고, 구현이 쉬우며, 과도 응답 특성이

우수한 장점이 있다. 일반적으로 SRM에서 사용되는 히스테리시스 제어는 저속영역에서 이상적인 값의 전류를 얻을 수 있고 빠른 응답성과 간단한 구조로 설계할 수 있는 장점이 있다. 반면에 컨버터의 스위칭 주파수가 히스테리시스 밴드, 직류 링크 전압, 전동기 정수 및 동작점에 따라 크게 변하는 단점을 가지고 있다.

SRM의 최적 구동을 위해 전류는 허용된 밴드 안에서 초평을 하고 히스테리시스 밴드의 크기는 SRM의 저속영역에서 스위칭 손실과 전도 손실, 코아 손실, 토크 리플의 상당한 영향을 미친다. 따라서 스위칭 주파수로 인한 소자의 열파괴를 방지하기 위해 히스테리시스 밴드를 충분히 크게 설정해야 하는데 이것은 정상상태의 전류 리플을 증가시키는 요인이 된다. 결과적으로 히스테리시스 제어기는 스위칭 주파수가 동작점에 따라 크게 변화하므로 대용량 전류제어기로는 부적합하고 저가(低價) 구현을 위한 고주파 스위칭 시스템에 적합하다.

2. 히스테리시스 전류제어기 설계

히스테리시스 제어기 설계는 전류센서(CT : Current Transformer)로부터 얻어진 실제전류(I_{real})와 마이크로프로세서에서 계산된 기준전류(I_{ref})에 대해 Op-amp를 이용하여 구현할 수 있다. 실제전류와 기준전류의 오차량(error)은 OP-amp 반전단자의 입력성분으로 가해지고, 다시 OP-amp의 출력은 저항으로 분압 되어 비반전단자의 입력으로 들어가 히스테리시스 밴드를 형성하게 된다.

실제 전류와 기준전류 사이의 오차 값과 밴드의 비교를 통해 밴드 내에서 일정한 전류가 유지되도록 게이트 신호가 온-오프를 반복하도록 그림 2와 같이 설계할 수 있다.

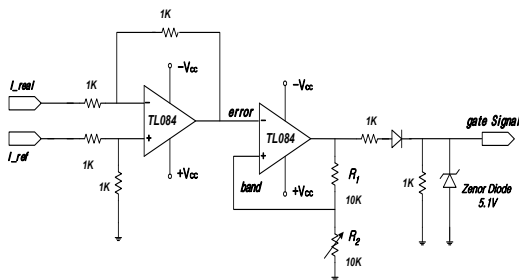


그림 2. 히스테리시스 전류제어기
 Fig. 2. Hysteresis current controller

그림 2에서 제어기 설계를 위한 상위밴드(V_{UT} , Upper-Threshold 전압), 하위밴드(V_{LT} , Lower-Threshold 전압)와 히스테리시스 전압 V_H 는 히스테리시스 밴드를 형성한다. 따라서 밴드의 폭을 결정하는 상위밴드와 하위밴드 전압은 식 (2)의 전압 방정식으로 구할 수 있으며

$$V_{UT} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}(+V_{sat}) \quad (2)$$

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

여기서 히스테리시스 전압 V_H 는 식 (3)과 같다.

$$V_H = V_{UT} - V_{LT} \quad (3)$$

가변저항을 통한 R_2 의 값을 조정하여 히스테리시스 밴드를 가변 할 수 있고 밴드는 토크 맥동과 관련이 있으므로 부하에 따라 적절하게 조정되어야 한다. 밴드가 아주 작게 되면 스위칭 주파수가 높아지고 그 만큼의 손실이 증가하기에 스위칭 손실과 맥동을 고려하여 상·하의 밴드값을 설계하는 것이 중요하다.

III. 가변 히스테리시스 전류제어기 설계

일반적인 히스테리시스 전류제어기는 가변저항을 통하여 밴드를 조절하기 때문에 모터의 기동 중 부하 상태에 따른 밴드의 조절이 힘들다. 또한 각 상의 밴드를 같게 맞추는 것이 어려워 토크의 불균형이 발생할 수 있고, 초기에 밴드가 작으면 기동이 되지 않으므로 적절한 히스테리시스 밴드를 기동전에 적절히 선정해주어야 한다. 따라서 고정된 밴드는 토크 리플을 줄이는 것에 한계가 있을 뿐만 아니라, 갑작스러운 속도의 변화와 그에 따른 오차를 보상하는 것이 속도 제어기에서 나오는 기준전류(I_{ref})에 의해서만 가능하므로 히스테리시스 밴드가 작을 경우 응답이 늦어지게 된다^[5].

따라서 본 논문에서는 엔코더에서의 안정적인 초기 기동과 빠른 속도 응답을 얻으면서 토크 리플을 줄이기 위해 그림 3과 같이 가변 히스테리시스 제어기를 통해 상태에 따라 가변밴드를 형성할 수 있도록 하였다. 일반적인 히스테리시스 제어기와 마찬가지로 가변 히스테리시스

스 제어기는 D/A를 통해 나오는 기준전류(I_{ref})와 실제 전류(I_{real})의 오차값(error)을 이용한다. 또한 상위밴드와 하위밴드를 선택하기 위해 Op-Amp의 포화(Saturation) 전압을 이용하여 스위치를 온-오프 한다. 스위치가 온 되었을 경우 마이크로프로세서에서 계산된 값이 오프 되었을 때는 0V의 값이 밴드(band)에 입력되어 오차가 일정한 범위에서 유지할 수 있도록 반복되도록 설계하였다.

추가적으로 가변 히스테리시스 제어기의 가변밴드값은 그림 4와 같이 마이크로컨트롤러를 통하여 엔코더 펄스를 계수하고 속도를 계산하여 오차에 따른 밴드를 D/A 신호로 하여 비교기의 출력신호로 얻어질 수 있다.

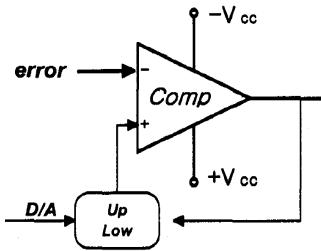


그림 3. 가변 히스테리시스 전류제어기
Fig. 3. Variable hysteresis current controller

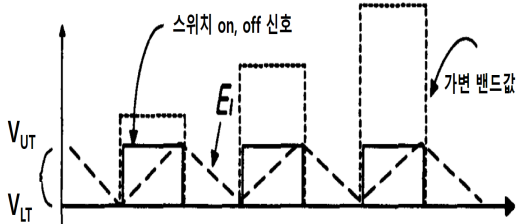


그림 4. 가변 히스테리시스 전류제어기의 가변밴드 개념도
Fig. 4. Variable band conceptual diagram of variable hysteresis current controller

IV. 모델링을 통한 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 SRM과 구동용 컨버터인 비대칭브리지 컨버터(Asymmetric bridge converter), PI 속도 제어기와 각각의 전류제어기(가변 히스테리시스 전류제어기, 히스테리시스 전류제어기)에 대해 C-언어를 이용하여 모델링을 하였다. 따라서 모델링을 통한 가변 히스테리시스 전류제어기와 히스테리시스 전류제어기 적용 시 SRM의 속도 응답과 토크 리플 특성을 살펴보기 위해 표 1에서 열거한 전동기 사양을 토대로 시뮬레이션 결과를

확인하였다^[6].

그림 5는 표 1에서 나타난 전동기 사양을 이용하여 모델링된 SRM의 인덕턴스 프로파일(Profile)로 회전자 위치에 따른 인덕턴스의 최대값 L_{max} 와 최소값 L_{min} 을 가지고 있는 SRM의 인덕턴스 특성을 확인할 수 있다.

표 1. SRM 사양
Table 1. SRM specification

| 항 목 | 사 양 |
|---------------------|-------------|
| 전동기 출력 | 750 [W] |
| 최 대 속도 | 3,000 [rpm] |
| 고정자 극수 | 6 [극] |
| 회전자 극수 | 4 [극] |
| 권 선 저항 | 4.2 [Ω] |
| 최대 인덕턴스 | 645 [mH] |
| 최소 인덕턴스 | 150 [mH] |
| 고정자 극호(β_s) | 30° |
| 회전자 극호(β_r) | 32° |

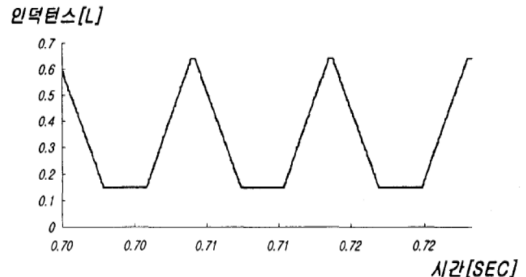
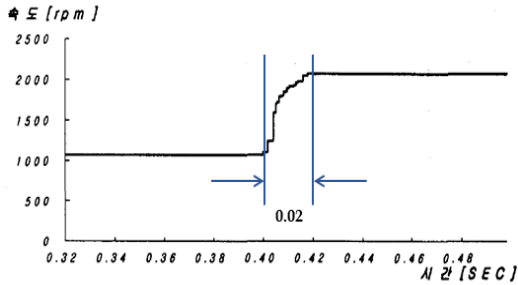


그림 5. 모델링을 통한 SRM의 인덕턴스 프로파일
Fig. 5. Inductance profile of SRM through Modeling

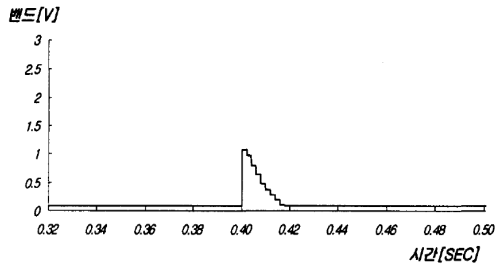
SRM의 지령 속도 1,000rpm 및 2,000rpm으로 속도 가변 때 모델링을 통한 시뮬레이션 결과에 대해 히스테리시스 전류제어기와 가변 히스테리시스 전류제어기의 특성을 비교하였다.

그림 6(a)와 그림 7은 가변 히스테리시스 제어기와 히스테리시스 제어기를 사용하였을 때의 속도 응답 파형으로 가변 히스테리시스 제어기가 속도 변화에 따른 정상 상태에 도달하는 제어 응답 특성이 개선된 결과를 보여 주고 있다. 그림 6(a)에서 가변 히스테리시스 전류제어기를 적용하여 SRM의 기준속도를 1,000rpm에서 2,000rpm로 속도 가변시 속도응답에 도달하는데 0.02초가 소요되면서 정상상태로 운전하는 결과를 볼 수 있다. 반면에 그림 7에서 기존의 히스테리시스 전류제어기를 적용 시 동일조건으로 속도응답에 도달하는데 0.04초로 가변 히스

테리시스 전류제어기의 결과에 2배가 소요되는 것을 알 수 있다. 또한 그림 6(b)는 가변 히스테리시스 제어기의 밴드값 변화에 관한 결과로 속도 가변시 기준속도와 실제 속도의 오차량에 따른 밴드값이 가변으로 변화하는 결과를 보여주고 있다. 그림 6(b)의 결과와 같이 속도 가변에 따른 히스테리시스 밴드값이 변화함에 따라 SRM이 정상 상태에 도달하는 제어 응답특성이 기존의 히스테리시스 전류제어기보다 우수한 특성을 가지고 있음을 알 수 있다.



(a) 속도 가변에 따른 응답속도



(b) 속도 가변에 따른 밴드값 변화

그림 6. 가변 히스테리시스 전류제어기를 통한 속도 응답과 밴드 값

Fig. 6. Speed response and band value through variable hysteresis current controller

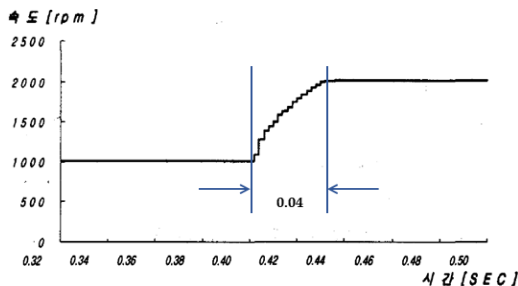


그림 7. 히스테리시스 전류제어기를 통한 속도 응답

Fig. 7. Speed response through hysteresis current controller

그림 8과 9는 각각의 제어기인 가변 히스테리시스 제어기와 히스테리시스 제어기를 사용하여 SRM을 정상상태 운전 시 토크특성 그래프로 가변 히스테리시스 전류제어기를 통한 토크리플이 저감된 결과를 보여주고 있다.

따라서 본 논문에서 사용된 가변 히스테리시스 전류제어기는 과도상태에서 정상상태로 응답하는 오차량에 따라 히스테리시스 밴드값이 가변적으로 동작하여 기존 전류제어기에 비해 응답성이 우수하며 SRM의 토크 리플 또한 저감되는 결과를 확인할 수 있다.

결과적으로 히스테리시스 전류제어기의 고정된 밴드는 토크 리플을 줄이는 것에 한계가 있을 뿐만 아니라, 속도의 변화와 그에 따른 오차를 보상하는 것이 속도 제어기에서 나오는 기준전류(I_{ref})에 의해서만 가능하므로 히스테리시스 밴드가 작으면 응답 특성이 낮은 결과를 그림 6과 8에서 보여주고 있다.

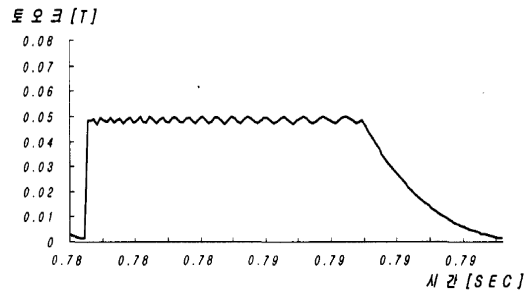


그림 8. 정상상태 토크 (가변 히스테리시스 전류제어기)

Fig. 8. Modeling circuit designed for variable switching

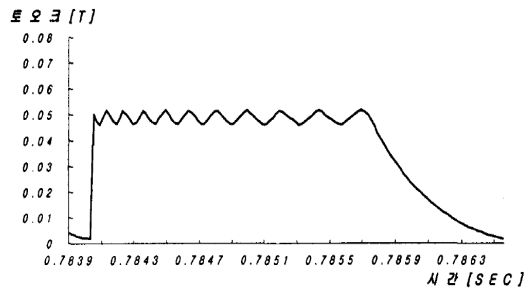


그림 9. 정상상태 토크 (히스테리시스 전류제어기)

Fig. 9. Modeling circuit designed for variable switching

V. 결 론

SRM은 맥동이 크고 소음이 심한 단점을 가지고 있다. 특히 SRM의 상용화에 가장 큰 장애 요인으로 회전축에

서 발생하는 맥동 토크로 인해 기기 자체는 물론이고 주변장치에까지 여러 가지 악영향을 미친다.

따라서 맥동 토크를 저감시키는 방법으로 본 논문에서는 속도오차에 따른 히스테리시스 밴드의 변화를 통하여 더욱 안정적이고 빠른 속도 응답을 가지면서 정상상태에서의 토크 리플을 줄일 수 있는 가변 히스테리시스 제어기를 연구하였다.

이러한 연구를 바탕으로 모델링을 통한 속도 가변에 따른 제어 응답 특성을 확인할 수 있었다. 또한 과도상태에서 정상상태로 응답하는 오차량에 따라 히스테리시스 밴드값이 가변적으로 동작하므로 써 토크 리플 저감을 통한 SRM 구동 시스템의 신뢰성을 확보할 수 있다.

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 AI자동차학과 조교수
- 주관심분야 : 전기구동 퍼스널 e-모빌리티 부품 및 시스템

References

- [1] T. J. E Miller, Switched Reluctance Motors and Their Control, Oxford University press, 1993.
- [2] Xavier Rain, Olivier Bethoux, "Comparative study of various current controllers for the switched reluctance machine," IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, pp. 1-6, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1109/VPPC.2010.5729145>
- [3] Rajarathnam, A.V. Rahman, K.M. Ehsani, M., "Improvement of Hysteresis Control in Switched Reluctance Motor Drives", International Conference IEMD '99, pp.537~539, 1999.
- [4] M. H Kim, W. S Baik, N. H. Kim, K. H. Choi, D. H. Kim, "A Position Control System of SRM using Digital Hysteresis Controller", Trans. KIPE, vol. 7, no. 3, pp. 253~261, 2002.
- [5] P. Srinivas, "Hysteresis Current Control of Switched Reluctance Motor Drive Using Linear Model," Trans. IJAREEIE, vol. 5, no. 7, pp. 6415~6419, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.15662/IJAREEIE.2016.0507041>
- [6] Y. H. Yoon, "Modeling and Characteristics of Switched Reluctance Motor (SRM) through Machine Language", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC), vol. 21, no. 4, pp. 117-122, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.7236/IIBC.2021.21.4.117>

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