

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2021.21.3.129>

JIIBC 2021-3-18

스위치드 릴럭턴스 전동기(SRM) 구동용 Converter Topology 연구

A Study on Converter Topology to Drive Switched Reluctance Motor (SRM)

윤용호*

Yongho Yoon*

요 약 스위치드 릴럭턴스 전동기 (Switched Reluctance Motor, SRM)는 전류의 크기와 회전자와 고정자의 상대적 위치에 따라 인덕턴스가 매우 비선형적으로 변하는 특성이 있고, 토크는 이 인덕턴스의 기울기에 비례하여 발생하기 때문에 비선형 토크 특성을 가지며 토크 맥동이 크고 소음이 심한 단점도 있다. 이러한 문제점들을 고려하고 경제성과 회로의 간단화를 위하여 기존의 비대칭 컨버터 (Asymmetric Bridge Converter)에서 효율과 성능을 개선할 수 있는 구동용 토폴로지(Topology)에 대한 연구들이 많이 진행되었다. 따라서 본 논문에서는 SRM 구동용 토폴로지로 적용하여 사용되고 있는 각 컨버터들을 비교, 분석함으로써 성능을 확인하고자 한다. 비교, 분석에 적용된 구동용 컨버터는 가장 널리 사용되고 있는 비대칭 브리지 컨버터 (Asymmetric Bridge Converter)와 C-dump 컨버터 형태의 구조를 가진 Conventional C-dump, Modified C-dump, Energy efficient C-dump, 공진형 C-dump 컨버터, 그리고 일반 전동기의 범용으로 사용되고 있는 6-Switch 인버터이다.

Abstract Switched Reluctance Motor (SRM) has a characteristic that the inductance changes very nonlinearly depending on the magnitude of the current and the relative position of the rotor and stator, and the torque is generated. In consideration of these problems, many studies have been conducted on a topology for driving that can improve efficiency and performance in an existing asymmetric bridge converter in order to simplify the circuit and economic efficiency. Therefore, in this paper, we want to check the performance by comparing and analyzing each converter used by applying it as a topology for SRM driving. The driving converters applied to the comparison and analysis are Conventional C-dump, Modified C-dump, Energy efficient C-dump, Resonant C-dump converter with C-dump converter type structure and the most widely used asymmetric bridge converter and 6-Switch inverter that used for general motors.

Key Words : SRM, Converter Topology, Efficiency, Performance, Simplify

*정회원, 광주대학교 전기전자공학부
접수일자 2021년 2월 3일, 수정완료 2021년 4월 6일
게재확정일자 2021년 6월 4일

Received: 3 February, 2021 / Revised: 6 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

우수한 고전압 대전류 고속 스위칭 반도체 소자의 개발과 전력전자 기술의 향상으로 가변전압, 가변주파수 전원을 바탕으로 하는 유도전동기의 가변속 전동기구 사용이 증가하고 있다. 이러한 추세와 함께 근래에 와서는 구조적으로 유도전동기보다 간단하고 구동 특성이 우수한 스위치드 릴럭턴스 전동기 (Switched Reluctance Motor, SRM)에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

SRM은 유도전동기, 동기전동기, 직류전동기 등의 일반적인 전동기에 비하여 제작비가 절감 및 효율이 높은 장점을 가지고 있기에 실용적 가치가 높다^[1,2]. 반면에 전류의 크기와 회전자와 고정자의 상대적 위치에 따라 인덕턴스가 매우 비선형적으로 변하는 특성이 있고, 토크는 이 인덕턴스의 기울기에 비례하여 발생하기 때문에 비선형 토크 특성을 가지며 토크 맥동이 크고 소음이 심한 단점도 있다. 이러한 문제점들을 고려하고 경제성과 회로의 간단화를 위하여 기존의 비대칭 컨버터 (Asymmetric Bridge Converter)에서 효율과 성능을 개선할 수 있는 구동용 토폴로지(Topology)에 관한 연구들이 많이 진행되었다.

따라서 본 논문에서는 SRM 구동용 토폴로지로 적용하여 사용되고 있는 각 컨버터를 비교, 분석함으로써 성능을 확인하고자 한다. 비교, 분석에 적용된 구동용 컨버터는 가장 널리 사용되고 있는 비대칭 브리지 컨버터와 C-dump 컨버터 형태의 구조를 가진 Conventional C-dump, Modified C-dump, Energy efficient C-dump, 공진형 C-dump 컨버터, 그리고 일반 전동기의 범용으로 사용되고 있는 6-Switch 인버터이다.

II. SRM 구동용 컨버터 토폴로지 (Topology)

특성 분석

SRM 구동을 위해서는 구동용 컨버터가 필요하며 컨버터의 조건은 다음과 같다.

- 1) 회전자의 위치에 따른 적절한 고정자 상에 전압을 인가시켜줄 수 있어야 한다.
- 2) 여자 상의 전류의 크기를 제한하거나 일정하게 유지해줄 수 있어야 한다.
- 3) 여자 상의 전류 소호를 위해 역전압을 인가시켜줄 수 있어야 한다.

현재까지 SRM을 제어하기 위한 컨버터 토폴로지 (Topology)에 관한 많은 연구가 진행되었고, 최근에도 공진을 이용한 컨버터를 비롯하여 토폴로지에 관한 연구가 활발히 진행 중이다. 지금까지 사용된 컨버터 토폴로지는 스위치 소자 수를 줄여 컨버터의 비용을 줄이거나 제어성을 향상시키려는 방향으로 발전되었으며 현재까지 널리 알려진 각 구동용 컨버터 토폴로지의 특성은 다음과 같이 정리할 수 있다.

1. 비대칭 브리지 컨버터 (Asymmetric Bridge Converter)

비대칭 브리지 컨버터는 그림 1과 같이 상당 두 개의 스위치와 두 개의 환류 다이오드를 가지는 구조로 효율이 높고 다양한 제어가 가능하며, 각 상의 전류제어가 독립적이어서 두 상의 전류 중첩이 가능하다. 또한 한 상의 고장 발생 시에도 다른 상에 큰 영향이 없으며, 소자의 정격전압이 상대적으로 낮아지는 등 제어성이 가장 우수한 것으로 알려져 있다. 고전압, 대용량 SRM의 구동에 특히 유리하며, 단점으로는 소자 수가 상대적으로 많고 드라이브 회로가 복잡해지는 것을 들 수 있고 이러한 내용을 표 1과 같이 정리할 수 있다^[1].

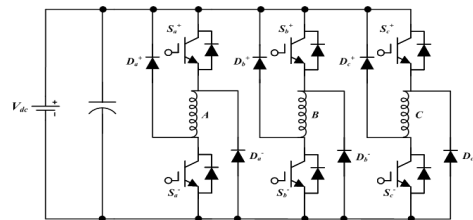


그림 1. 비대칭 브리지 컨버터

Fig. 1. Asymmetric bridge converter

표 1. 비대칭 브리지 컨버터 특성

Table 1. Asymmetric bridge converter characteristics

장점	<ul style="list-style-type: none"> • 빠른 에너지 환원 • 제어의 다양성 	스위치	상당 2개
		Diode	상당 2개
단점	<ul style="list-style-type: none"> • 상당 2개의 SW, D • 빠른 전압강하 	Voltage	$> 2V_{dc}$
		Current	$\frac{I_p}{\sqrt{n}}$
제어	매우 용이함	기 타	고전압, 대용량 구동용

2. C-dump 컨버터

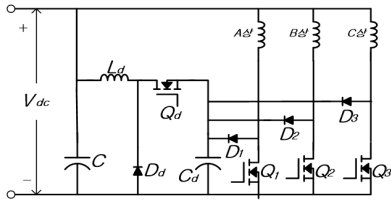


그림 2. C-dump 컨버터
 Fig. 2. Conventional C-dump converter

C-dump 컨버터는 상수보다 하나씩 더 많은 스위치와 다이오드를 가지며, 부가적으로 커패시터와 인덕터가 추가되는 그림 2와 같은 구조로, 에너지를 커패시터에 저장하였다가 직류전원에 환원하는 방식의 컨버터이다. 커패시터에 흐르는 전류로 인하여 상대적으로 높은 정격의 소자가 필요하며, 에너지 환원 때의 손실이 추가된다. 기술적으로는 효과적이거나 제어가 복잡해지며, 덤프 회로에 고장이 생길 때 덤프 커패시터 C_d 에 아주 높은 전압이 충전되기 쉽고, 그 피해가 커지게 될 위험이 있다. C-dump 컨버터의 특성은 표 2와 같다.

표 2. C-dump 컨버터 특성
 Table 2. Conventional C-dump converter characteristics

장점	상대적으로 높은 효율	스위치	상당 n+1
		Diode	상당 n+1
단점	<ul style="list-style-type: none"> 소자 수 1개씩 증가 높은 전압정격 소자 필요 	Voltage	$> 2V_{dc}$
		Current	$\frac{I_p}{\sqrt{n}}$
제어	No freewheeling control	기 타	감자 시 빠른 소호

3. Modified C-dump 컨버터^[3]

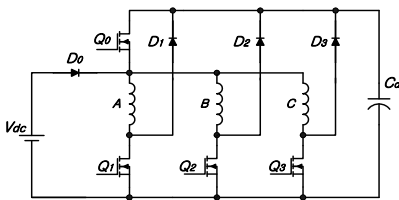


그림 3. Modified C-dump 컨버터
 Fig. 3. Modified C-dump converter

그림 3은 기존의 C-dump 컨버터를 보완한 Modified C-dump 컨버터의 구조를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 상수보다 하나 더 많은 스위치와 다이오드를 가지고 부가적으로 커패시터가 추가되는 구조이다.

따라서 기존의 인덕터를 제거하여 에너지를 커패시터에 저장하였다가 바로 다음 상의 여자 시에 전달하는 방식의 컨버터로서 제어의 복잡성을 개선했다.

전류 확립 시 인가전압의 2배의 덤프 커패시터 전압을 이용하므로 빠른 전류의 확립을 가져올 수 있는 장점이 있다. 반면 한 상의 전류가 완전히 소호된 후 다음 스위치를 여자 시켜야 하므로 상전류의 중첩을 시킬 수 없어 토크 발생영역을 충분히 활용하지 못하고 공통스위치의 높은 정격과 발열 문제를 안고 있다 (표 3).

표 3. Modified C-dump 컨버터 특성
 Table 3. Modified C-dump converter characteristics

장점	<ul style="list-style-type: none"> 작은 소자 수 제어 복잡성 개선 	스위치	상당 n+1
		Diode	상당 n+1
단점	<ul style="list-style-type: none"> 소자 수 증가 상 중첩이 안 되어 발열문제 발생 	Voltage	$> 2V_{dc}$
		Current	$\frac{I_p}{\sqrt{n}}$
제어	No freewheeling control	기 타	-

4. Energy efficient C-dump 컨버터^[4]

상수보다 하나 더 많은 스위치와 다이오드, 덤프 커패시터 그리고 전원 측에 직렬로 블로킹 다이오드가 추가되는 형태로 그림 4는 Energy efficient C-dump 컨버터의 구조를 보여주고 있다. SRM의 초핑(Chopping)모드 동안에 다른 복잡한 제어 없이 상전류의 환류가 가능하다.

그 결과로써 제어의 단순함을 가져오고 스위칭 소자의 전압정격은 기존의 C-dump 컨버터나 Modified C-dump 컨버터에서 공급전압의 2배(2Vdc)가 걸리는 것에 비해 1배(Vdc)가 걸리므로 소자의 비용을 줄일 수 있는 장점이 있다. 또한 Modified C-dump 컨버터에서 가능하지 않았던 각 상전류를 중첩할 수 있게 함으로써 토크 발생영역을 충분히 활용할 수 있다. 따라서 이러한 내용을 표 4와 같이 정리할 수 있다.

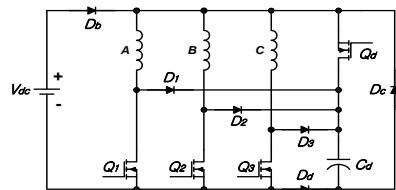


그림 4. Energy efficient C-dump 컨버터
 Fig. 4. Energy efficient C-dump converter

표 4. Energy efficient C-dump 컨버터 특성
Table 4. Energy efficient C-dump converter characteristics

장점	<ul style="list-style-type: none"> • 소자 수 감소 • 단순 제어 가능 	스위치	상당 n+1
		Diode	상당 n+1
단점	<ul style="list-style-type: none"> • 부가 회로 필요 • 상당 스위치, 다이오드 추가 	Voltage	V_{dc}
		Current	$\frac{I_p}{\sqrt{n}}$
제어	용이함	기 타	-

5. 공진형 C-dump 컨버터^[5]

스위치의 턴 온시 ZCS(Zero Current Switching)와, 턴 오프시 ZVS(Zero Voltage Switching) 및 ZCS의 기능에 의해 하드스프링 따른 스위치의 손실을 줄일 수 있다. 따라서 다른 형태의 C-dump 컨버터와 비교 시 스위칭 손실에 따른 효율을 증대시킬 수 있는 장점이 있어 높은 성능의 운전이 가능하다.

또한 상전압은 상권선에 축적되어 있던 전류에 의해서 상전압의 크기가 결정되어 고속운전에서는 더욱 높은 전압이 인가된다. 그러므로 고속운전에서 전류(Commutation) 시에도 빠른 전류소호를 이루어 역 토크의 발생 구간은 존재하지 않는 장점이 있다. 반면에 공진 기능을 이용하는 회로의 복잡성과 공진을 통한 발열과 소음의 문제점들을 예로 들 수 있다. (표 5).

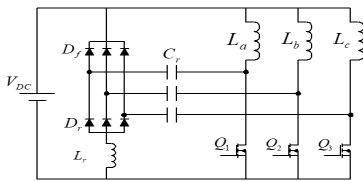


그림 5. 공진형 C-dump 컨버터
Fig. 5. Resonant C-dump converter

표 5. 공진형 C-dump 컨버터
Table 5. Resonant C-dump converter characteristics

장점	<ul style="list-style-type: none"> • ZCS, ZVS • 스위칭 손실 감소 • 효율향상 	스위치	상당 n
		Diode	상당 n+3
단점	<ul style="list-style-type: none"> • 공진회로 추가 • 회로의 복잡성 	Voltage	$> 2V_{dc}$
		Current	$\frac{I_p}{\sqrt{n}}$
제어	No freewheeling control	기 타	감자시 빠른 소호

6. 6-스위치 인버터^[6]

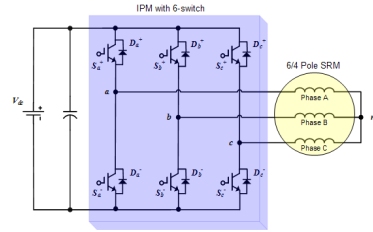


그림 6. 6-스위치 인버터
Fig. 6. 6-switch inverter

그림 6은 6-switch IGBT module을 이용한 컨버터 회로로 3상 교류 전동기처럼 각 상권선의 한쪽 단자는 공통으로 묶어서 Y-결선으로 구성되어있다. 따라서 기존 방식과 달리 동시에 2상을 여자시켜 자기 릴럭턴스 뿐만 아니라 두 상의 상호작용으로 릴럭턴스 토크를 발생시키는 구조이다. 인덕턴스 프로파일의 음의 기울기를 갖는 영역에서는 부 토크를 발생시키므로 전류를 인가하지 않으며 인덕턴스의 상승 구간 및 기울기가 0인 구간에서 각각 양의 전류와 음의 전류를 인가하는 Bipolar 전류제어 기법이 필요하다. 또한 그림 7의 A 지점에서처럼 인덕턴스 프로파일의 기울기가 0인 구간 동안 음의 전류가 흐르지만, 토크 생성에 기여할 수 없으며 전동기의 동손을 유발하는 문제점도 있다.

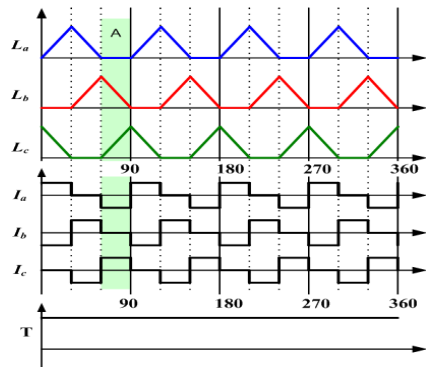


그림 7. 인덕턴스 프로파일에 따른 전류제어
Fig. 7. Current control according to inductance profile

III. SRM 구동용 컨버터 토폴로지 (Topology) 실험결과 분석

1. 비대칭 브리지 컨버터 (Asymmetric Bridge Converter)

그림 8은 비대칭 브리지 컨버터를 이용하여 SRM을 1,000rpm으로 구동시 상전류 파형으로 각 상전류는 순차적으로 한 상씩 여자시키는 전형적인 SRM의 상전류 파형을 보여주고 있다.

그림 9는 히스테리시스 전류제어를 통한 상전류와 게이트신호, 상전압 파형으로 실제전류(I_{real})와 계산된 제어량(I_{ref}) 사이의 오차(error)가 OP-amp 반전단자의 입력으로 가해지고, 다시 OP-amp의 출력은 저항으로 분압되어져 비반전 단자의 입력으로 들어가 히스테리시스 밴드를 형성하게 된다. 이렇게 실제 전류, 제어량 사이의 오차 값과 밴드의 비교를 통해 밴드 내에서 일정한 전류가 유지되도록 게이트 신호가 온-오프를 반복하도록 구성할 수 있다.

그림 10은 그림 8에서 설명한 비대칭 브리지 컨버터를 적용시 상전류 파형과 동일하게 히스테리시스 전류제어를 통해 구현된 각상의 상전류 파형을 보여주고 있다. 또한 그림 3의 공통스위치(Q_0)와 A상의 스위치(Q_1)가 턴 오프하여 권선에 저장되어 있던 에너지와 입력전압의 합인 24V가 덤프 커패시터에 공급되다가 공급전압인 12V 레벨까지 감소하게 되면 다음 상인 C상을 여자 시키므로써 덤프 커패시터의 에너지가 방전하는 결과를 그림 11에서 보여주고 있다.

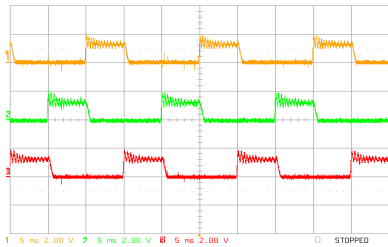


그림 8. 상전류 (1,000rpm, 10A, 5ms/div.)
 Fig. 8. Phase current

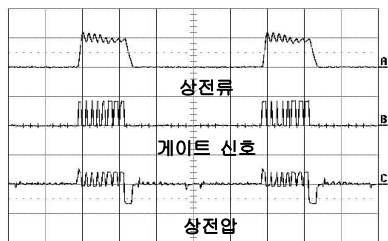


그림 9. 상전류, 게이트 신호, 상전압 파형
 Fig. 9. Phase current, gate signal, phase voltage waveform

2. Modified C-dump 컨버터

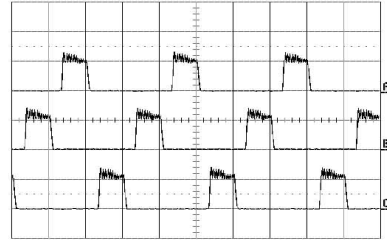


그림 10. 상전류 (1,000rpm, 10A, 5ms/div.)
 Fig. 10. Phase current

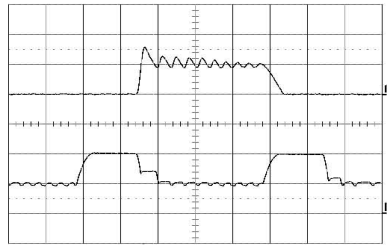


그림 11. 상전류와 덤프 커패시터 양단전압
 (1,000rpm, 10A, 12V, 1ms/div.)
 Fig. 11. Phase current and voltage across dump capacitor

3. Energy efficient C-dump 컨버터

그림 12 역시 상전류 파형으로 앞서 설명한 다른 컨버터와 동일하게 히스테리시스 전류제어를 통하여 제어가 되고 있음을 확인할 수 있으며 비대칭 컨버터와 동일하게 중첩제어가 가능하여 토크 맥동을 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 Modified C-dump 컨버터에서는 덤프 커패시터의 전압이 입력전압의 2배인 24V까지 충전하였다가 방전하였지만 Energy efficient C-dump 컨버터에서는 입력전압의 1배인 12V보다 약간 큰 전압으로 충전하였다가 입력전압인 12V로 방전하는 결과를 그림 13을 통해서 확인할 수 있다.

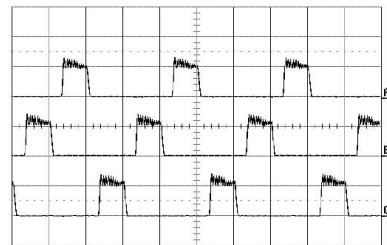


그림 12. 상전류 (1,000rpm, 10A, 5ms/div.)
 Fig. 12. Phase current

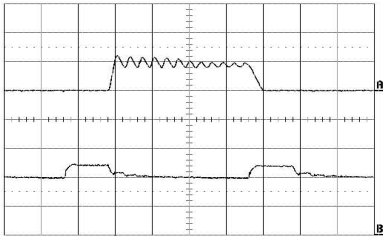


그림 13. 상전류와 덤프 커패시터 양단전압
(1,000rpm, 10A, 6V, 1ms/div.)
Fig. 13. Phase current and voltage across dump capacitor

4. 공진형 C-dump 컨버터

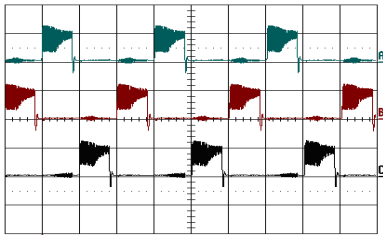


그림 14. 상전류 (500rpm, 10A, 10ms/div.)
Fig. 14. Phase current

그림 14는 500rpm에서의 3상 전류파형으로 하드쇼핑에 의한 방식이 적용되어 히스테리시스 전류제어 폭이 넓게 이루어지고 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 그림 15는 한 상의 스위치 전압 및 전류파형으로 스위치의 턴 온시 ZCS(Zero current switching)를 이루고, 턴 오프시 ZVS(Zero voltage switching) 및 ZCS 동작을 확인할 수 있다. 하드쇼핑에 의해서 우려되는 스위치의 손실이 무손실의 스위칭을 통해 전체시스템의 효율을 향상시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.

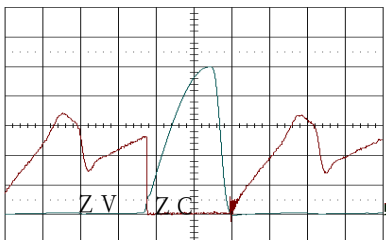


그림 15. 한 상의 스위치 전압 및 전류파형(ZCS, ZVS)
(전압 : 10V/div, 전류 : 5A/div, 50us)
Fig. 15. Energy efficient C-dump converter

5. 6-스위치 인버터

6-switch IGBT module을 적용시 상전류 파형으로 (그림 16) 비대칭 브리지 컨버터를 사용할 때와는 달리 각 상에 음의 전류가 흐르는 것을 볼 수 있다. 이는 6-switch IGBT module을 이용한 특성으로 SRM 3상의 권선 한 쪽이 Y-결선으로 이루어져 있어서 발생하는 현상이다.

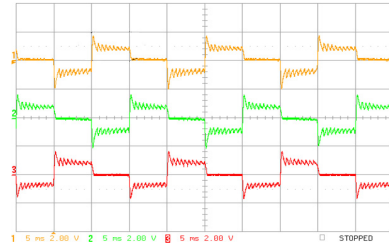


그림 16. 상전류 (1,000rpm, 10A, 5ms/div.)
Fig. 16. Phase current

IV. 결 론

SRM은 인덕턴스가 매우 비선형적으로 변하는 특성이 있어, 토크 맥동이 크고 소음이 심한 단점도 있다. 이러한 문제점들을 고려하고 경제성과 회로의 간단화를 위하여 기존의 비대칭 컨버터뿐만 아니라 효율과 성능을 개선할 수 있는 여러 종류의 구동용 토폴로지의 특성을 살펴보았다.

References

- [1] R. Krishnan, "Switched Reluctance Motor Drives", CRC Press, 2000.
- [2] J.S. Yoon, D.H. Kim, H.U. Shin, K.B. Lee, "Torque Ripple Minimization for Switched Reluctance Motors Using a Fuzzy Logic and Sliding Mode Control", Trans. KIEE, vol. 63, no. 10, pp 1384~1392, 2014.
DOI: <http://doi.org/10.5370/KIEE.2014.63.10.1384>
- [3] A. Hava, V. Blasko, and T. A. Lipo, "A modified C-dump converter for variable reluctance machines", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 28, 1992.
DOI: <http://doi.org/10.1109/IAS.1991.178342>
- [4] Sayeed Mir, "Energy efficient C-dump Converters for Switched reluctance Motors", IEEE Transaction on Power Electronics vol. 12, no. 5, pp.912~921 1997.
DOI: <http://doi.org/10.1109/63.623010>

- [5] K.W.E. Cheng, Y.P.B. Yeung, C.Y. Tang, X.D. Xue, D. Sutanto, "Topology analysis of switched reluctance drives for electric vehicles", Proc. Power Electron Variable Speed Drives, PP. 512~517, 2000.
DOI: <http://doi.org/10.1049/cp:20000300>
- [6] Y.C. Kim, Y.H. Yoon, W.C. Lee, B.K. Lee, and C.Y. Won, "SRM Drive System Using 6-switch IGBT Module", Journal of KIPE, vol. 10, no. 6, pp. 569~577, 2005.

저 자 소 개

윤 용 호(정회원)



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

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