

6-Switch IGBT Module을 이용한 SRM 구동 시스템

金淵忠[†], 尹溶湖^{**}, 李元喆^{***}, 李秉國^{****}, 元忠淵[†]

SRM Drive System Using 6-switch IGBT Module

Yuen-Chung Kim, Yong-Ho Yoon, Won Cheol Lee, Byoung-Kuk Lee, and Chung-Yuen Won

요 약

본 논문에서는 일반적으로 교류 전동기 구동을 위해 널리 사용되고 있는 6-switch IGBT module을 3상 SRM에 적용한 새로운 구동 방법을 제안한다. 비대칭 브리지 컨버터의 경우 사용되는 소자수가 많고 복잡한 제어 및 구동 회로를 요구하며 이로 인하여 전체적인 시스템 가격은 상승하게 된다. SRM구동을 위한 비대칭 브리지 컨버터의 구동 방법과 비교하여 본 논문에서 제안한 구동방법은 전체적인 시스템의 크기와 가격을 줄일 수 있다. 따라서 유도기, BLDC 모터, 그 외의 모터등과 비교할 수 있는 SRM 구동을 위한 새로운 토폴로지가 될 수 있다. 제안된 회로의 타당성을 검증하기 위해 비대칭 브리지 컨버터를 적용한 시스템과의 비교 실험을 진행하였다.

ABSTRACT

In this paper, a new control scheme to use 6-switch IGBT module for 3-phase switched reluctance motors(SRM) is proposed. Compared with the conventional asymmetric bridge converter topology, it can minimize the entire system size and cost. Therefore, it may have a new topology for SRM to compare the other ac motors, such as induction motors, brushless dc motors, and so on. The validity of the proposed method is verified by simulation, and experimental results.

Key Words : Switched Reluctance Motor, 6-switch IGBT module, Bipolar current control method

1. 서 론

SRM(Switched Reluctance Motor)은 구조가 간단하고 구동 특성의 우수하여 가격이 낮은 응용분야에 사용되고 있다. 그러나 SRM 구동용 컨버터로 널리 사용되고 있는 비대칭 브리지 컨버터의 경우 사용되는 소자수가 많고 복잡한 제어 및 구동 회로를 요구한다.

따라서 전동기 자체의 제조 단가는 다른 전동기에

비해 저렴하나 드라이브 제작에 많은 비용이 들어가므로 전체 시스템의 가격을 상승시키는 결과가 된다.

또한 일반적인 SRM 구동용 컨버터는 한 상씩 여자시키기 위해 상·하단 스위치 사이에 권선이 놓이는 구조를 가지지만 스위칭 소자를 모듈화하는 것은 어렵다^[1-3]. 따라서 스위칭 소자 및 환류 다이오드를 위한 방열판의 크기가 커지고 그에 따른 생산 비용이 증가하게 된다.

이러한 SRM 구동 드라이버의 원가 상승을 절감하기 위해 기존에 발표된 논문에서는 6-switch IGBT module을 사용하였지만 기존의 SRM 구조로는 모듈화된 스위칭 소자를 사용하는 것이 어려워 전동기의 형상 및 권선방식을 변경하여 제작하였다^[4].

이에 본 논문에서는 6-switch IGBT module을 이용한 범용 6/4 pole SRM에 대한 구동 방법을 제안하고

[†]교신저자 : 정회원, 성균관대 정보통신공학부 교수

E-mail : won@yurim.skku.ac.kr

^{*}정회원, 성균관대 신기술에너지센터 연구원

^{**}정회원, 성균관대 메카트로닉스공학과 박사과정

^{***}정회원, 성균관대 전기전자공학과 박사과정

^{****}정회원, 성균관대 정보통신공학부 연구교수

접수일자 : 2005. 8. 22 1차 심사 : 2005. 9. 9

2차 심사 : 2005. 9. 20 심사완료 : 2005. 10. 10

그 타당성을 입증하기 위해 비대칭 브리지 컨버터를 사용한 SRM 구동시스템과의 비교하기 위하여 모드 분석, 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다.

2. 제안된 SRM 구동 방법

그림 1은 본 논문에서 제안한 SRM을 구동하기 위한 6-switch IGBT module을 이용한 컨버터 회로를 보여주고 있다. 3상 교류전동기처럼 각 상권선의 한쪽 단자는 공통으로 묶어서 Y-결선으로 구성하였다. 따라서 2상 여자방식 SRM에 사용되는 컨버터도 일반적인 3상 컨버터회로와 유사하다.

SRM에서의 전동력 발생은 여자된 자기회로에서 자기 릴럭턴스가 최소화되는 작용으로 이루어지므로 연속적인 운전을 하기 위해서는 회전 방향으로 각 상을 주기적으로 여자시킬 때 이루어진다. 이때 기존의 SRM 구동 방식은 순차적으로 한 순간에 한 상을 여자하는 구동방식을 채택하고 있다. 본 논문에서는 기존 방식과는 달리 동시에 2상을 여자시켜 자기 릴럭턴스 뿐만 아니라 두 상의 상호작용에 의해서도 릴럭턴스 토크를 발생시키는 SRM의 새로운 여자방식을 제안하였다.

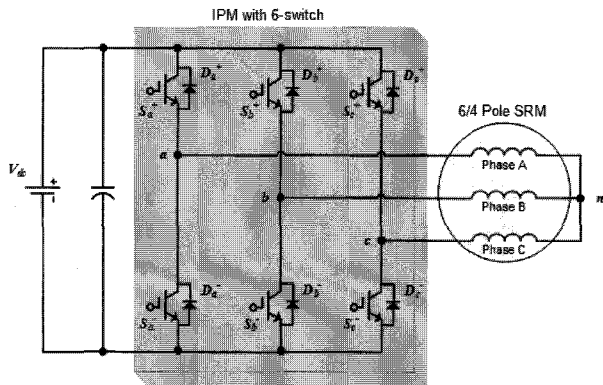


그림 1 SRM 구동용 6-switch IGBT module
Fig. 1 6-switch IGBT module for SRM

2.1 모드 분석

제안된 컨버터의 전체 동작 모드는 그림 2와 같이 크게 3개의 모드로 나눌 수 있다.

2.1.1 모드 1

S_a^+ 와 S_b^- 가 turn on 상태일 때 상 A에서 상 B로 도통하게 되며 이 때 상 A에는 정방향의 전류가 흐르게 되고 상 B에는 역방향의 전류가 흐르게 된다.

2.1.2 모드 2

S_b^+ 와 S_c^- 가 turn on 상태일 때 상 B에서 상 C로 도통하게 된다. 이 때 상 B에 흐르는 전류가 정방향이므로 상 B에 대한 토크 성분만 발생한다.

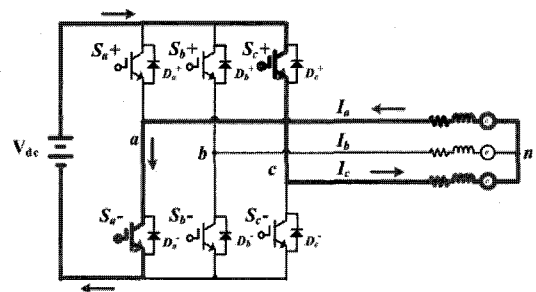
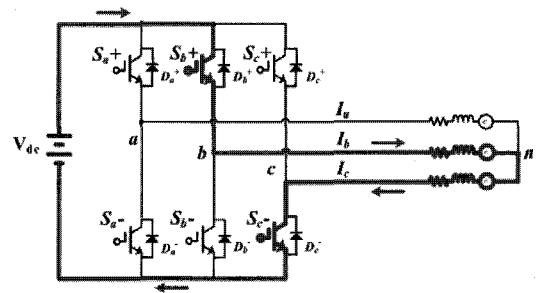
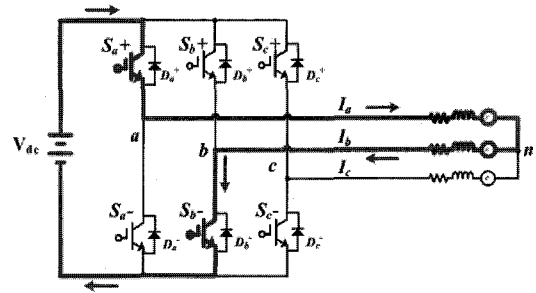


그림 2 제안한 회로의 동작 모드
Fig. 2 Operating mode of a proposing circuit

2.1.3 모드 3

S_c^+ 와 S_a^- 가 turn on 상태일 때 상 C에서 상 A로 도통하게 된다. 이 때 상 C에 흐르는 전류가 정방향이므로 상 C에 대한 토크 성분만 발생한다.

이를 정리하면 표 1과 같이 A, B → B, C → C, A 순으로 여자하게 된다. 상단 스위치는 양의 전류가 흐르고 하단 스위치는 음의 전류가 흐르게 되며 토크 발생은 양의 전류가 인가되는 상에서만 발생하게 된다.

표 1 6-switch IGBT module 동작 순서
Table 1 Operating sequence of 6-switch IGBT module

동작 모드	여자 상	Switch ON	Torque 생성
모드 1	A, B	S_a^+, S_b^-	상 A
모드 2	B, C	S_b^+, S_c^-	상 B
모드 3	C, A	S_c^+, S_a^-	상 C

2.2 6-switch 인버터 제어 알고리즘

동작 모드에 따르면 3상 전류 및 인덕턴스 프로파일 그리고 그에 따른 발생 토크는 그림 3과 같이 나타난다. 그림에서 보여주듯이 인덕턴스 프로파일의 음의 기울기를 갖는 영역에서는 부 토크를 발생시키므로 전류를 인가하지 않으며 인덕턴스의 상승 구간 및 기울기가 0인 구간에서 각각 양의 전류와 음의 전류를 인가하도록 하였다.

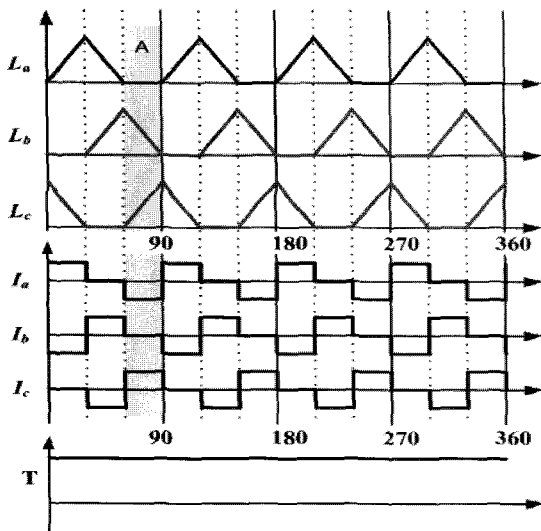


그림 3 제안한 회로를 위한 Bipolar 전류 제어 기법
Fig. 3 Bipolar current control method for a proposing circuit

그림 3의 A지점에서처럼 인덕턴스 프로파일의 기울기가 0인 구간동안 음의 전류가 흐르게 되며 이것은 Bipolar 스위칭을 가능하게 한다. 그러나 음의 전류는 토크 생성에 기여할 수 없으며 전동기의 동손을 유발하게 된다.

그림 3의 Bipolar 전류 제어 기법에 따른 세부 동작을 살펴보면 그림 2의 각 모드는 다음의 상세 동작 모드로 나눌 수 있다. 그림 4에 그림 2(a)에 대한 상세 동작 모드를 나타내었다.

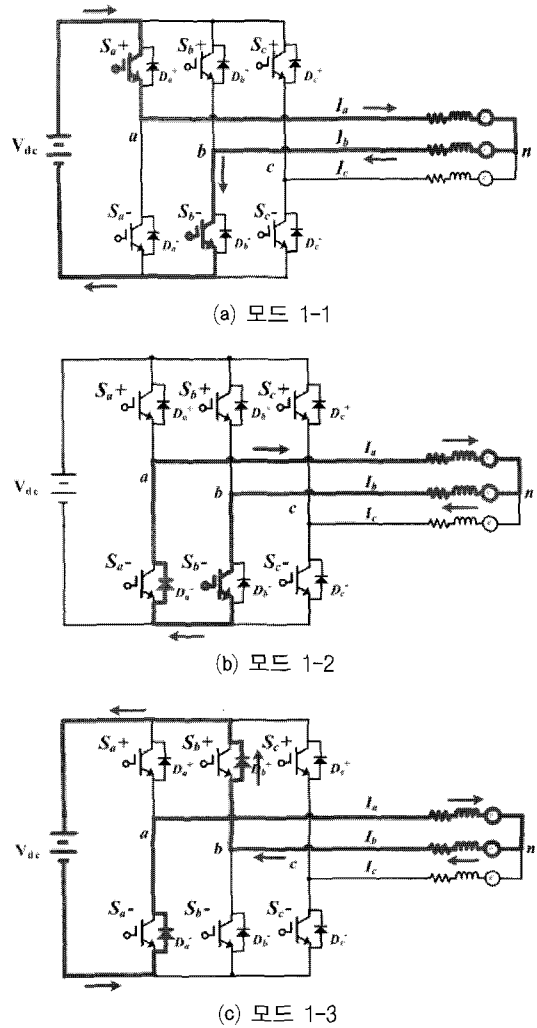


그림 4 그림 2(a) 모드 1의 상세 동작 모드
Fig. 4 Detail operating mode of Fig. 2 (a)

2.2.1 모드 1-1 ($t_0 \sim t_1$ 구간)

S_a^+ 와 S_b^- 스위치를 동시에 턴-온하여 입력 전원 V_{dc} 로부터 전기에너지를 공급받아 고정자 권선의 자기에너지로 변환하는 상태이다. 이 때 상 A와 상 B의 고정자 권선이 여자된다. 이때의 전압 방정식은 식 (1)로 표현할 수 있다.

$$\frac{V_{dc}}{2} = Ri + L(\theta) \frac{di}{dt} + e_L \tag{1}$$

2.2.2 모드 1-2 ($t_1 \sim t_2$ 구간)

S_b^- 스위치는 턴-온 상태에서 S_a^+ 스위치를 턴-오프 하여 S_b^- 스위치와 S_a^- 스위치의 내부 다이오드

를 통하여 권선의 전류를 순환시키는 모드이다. 이때의 전압 방정식은 식 (2)로 표현할 수 있다.

$$0 = Ri + L(\theta) \frac{di}{dt} - e_L \quad (2)$$

2.2.3 모드 1-3 ($t_3 \sim t_4$ 구간)

S_a^+ 스위치와 S_b^- 스위치를 모두 턴-오프하여 입력 전원 V_{dc} 로 고정자 권선에 저장되어 있던 자기 에너지를 전기에너지로 변환하는 상태이다. 또한 전류를 소호시키는 모드로 해당상의 인덕턴스가 음의 기울기를 가지기 전에 전류를 완전히 소멸시키거나 아주 적은 양이 되도록 해야 한다. 그렇지 않으면 부 토크를 발생시키게 되어 전동기의 평균 토크가 줄어들어 에너지 변환효율도 감소하게 된다. 이때의 전압 방정식은 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$-\frac{V_{dc}}{2} = Ri + L(\theta) \frac{di}{dt} - e_L \quad (3)$$

표 2 그림 2(a)의 동작 모드
Table 2 Operating mode of Fig. 2(a)

동작 모드	스위치 상태	전류 도통 소자	동작 구간
모드 1-1	S_a^+ : On S_b^- : On	S_a^+, S_b^-	$t_0 \sim t_1$
모드 1-2	S_a^+ : Off S_b^- : On	D_a^-, S_b^-	$t_1 \sim t_2$
모드 1-3	S_a^+ : Off S_b^- : Off	D_a^-, D_b^+	$t_3 \sim t_4$

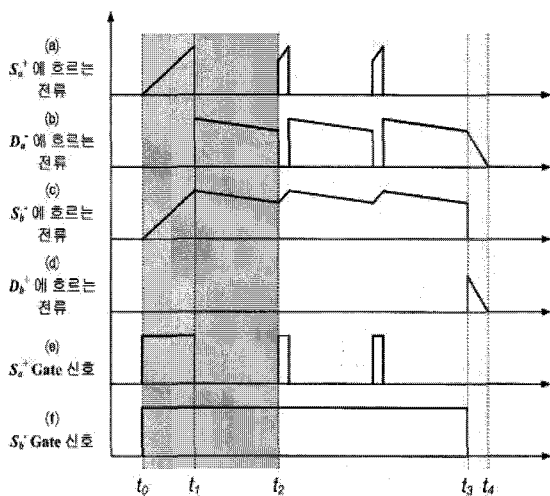


그림 5 그림 2(a)의 전류 및 스위칭 파형
Fig. 5 Current and switching waveform of Fig. 2(a)

그림 4에서 설명한 동작 모드에 대해 정리하면 표 2와 같다.

그림 5는 그림 2(a) 모드 1에 대한 각 스위칭 소자 및 다이오드에 흐르는 전류 및 스위칭 파형을 나타낸다.

3. 시뮬레이션

본 논문에서는 제안한 방식의 타당성을 검증하기 위해 SRM 구동 방식의 일반적인 컨버터인 비대칭 브리지 컨버터를 이용한 회로와 비교하였다.

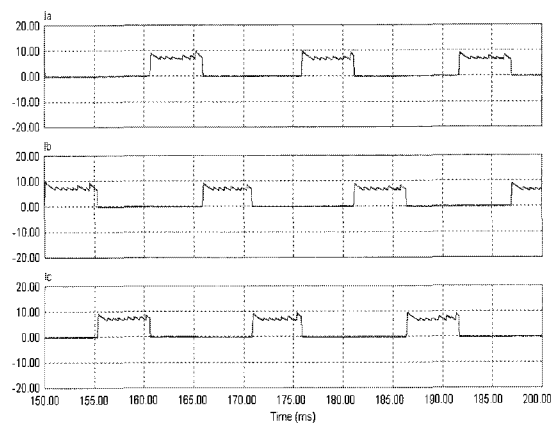


그림 6 1000[rpm]에서 상전류 (10A/div, 5ms/div)
Fig. 6 Phase current at 1000[rpm]

그림 6은 비대칭 브리지 컨버터를 이용하여 1000 [rpm]에서상 A, B, C에 흐르는 전류 파형으로써 본 논문에서 제안한 6-switch IGBT module을 이용한 2상 여자방식과는 달리 양의 전류만 나타남을 알 수 있다.

그림 7은 1000[rpm]에서 2000[rpm]으로 속도를 변화시켰을 때의 응답 속도를 보여주고 있다.

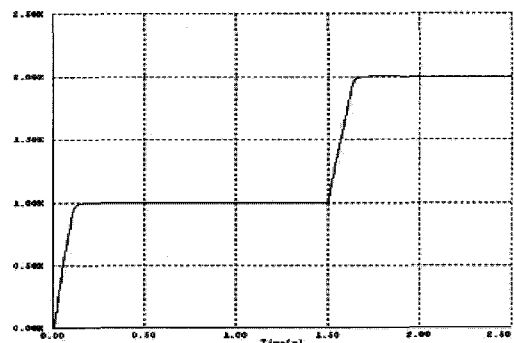


그림 7 속도 응답 특성(1000 → 2000[rpm])
(X : 0.5s/div, Y : 500rpm/div)

Fig. 7 Speed response characteristic

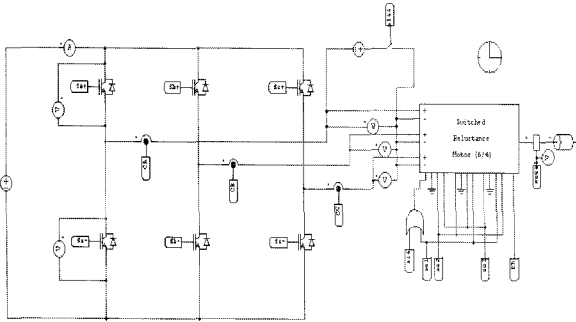


그림 8 6-switch IGBT module 회로와 SRM
Fig. 8 6-switch IGBT module circuit and SRM

그림 8은 본 논문에서 제안한 6-switch IGBT module을 SRM에 적용한 부분으로서 SRM의 상 A, B, C의 권선 한 쪽을 Y결선한 구조이다.

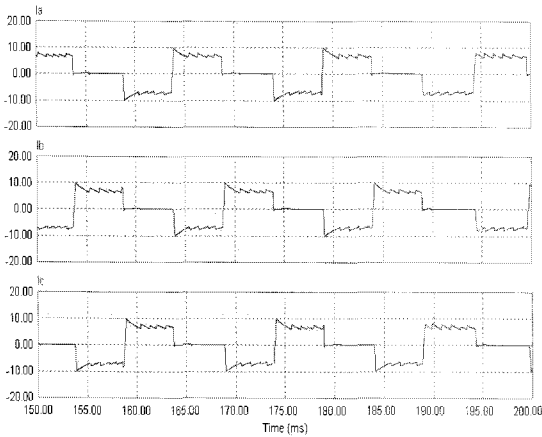


그림 9 1000[rpm]에서 상전류 (10A/div, 5ms/div)
Fig. 9 Phase current at 1000[rpm]

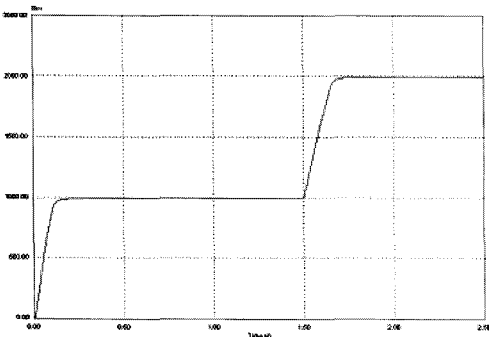


그림 10 속도 응답 특성 (1000 → 2000[rpm])
(X : 0.5s/div, Y : 500rpm/div)
Fig. 10 Speed response characteristic

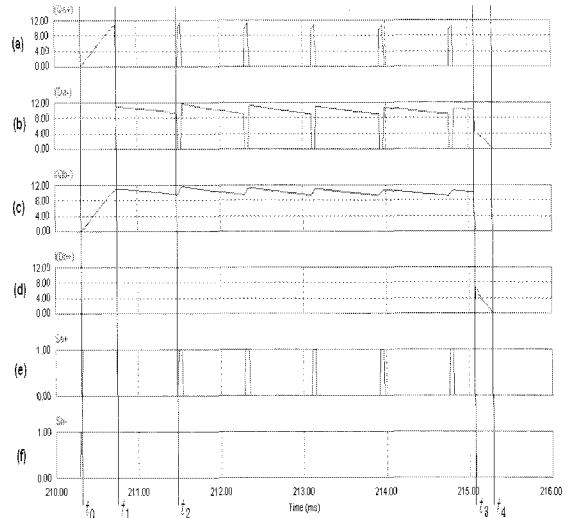


그림 11 그림 2 (a)의 전류 및 스위칭 파형
Fig. 11 Current and switching waveform of Fig. 2(a)

그림 9는 1000[rpm]에서 상 A, B, C에 흐르는 전류 파형으로서 비대칭 브리지 컨버터를 이용한 그림 7과 달리 음의 전류가 흐르는 것을 볼 수 있다. 이는 6-switch IGBT module의 특성으로 3상 중 1상에 정방향의 전류가 흐르면 나머지 2상 중 1상으로 역방향의 전류가 흘러야 하기 때문이다.

그림 10은 그림 7과 같이 1000[rpm]에서 2000[rpm]으로 속도를 변화시켰을 때의 응답속도로서 기존 비대칭 브리지 컨버터를 사용했을 때와의 동일한 응답성을 보여주고 있다.

그림 11은 그림 2(a) 모드 1에 대한 세부 동작을 시뮬레이션으로 나타낸 파형으로 그림 5에 나타난 모드 분석 결과와 일치함을 알 수 있다. (a)는 A상 상단 스위치에 흐르는 전류 (b)는 A상 하단 스위치 내부 다이오드에 흐르는 전류, (c)는 B상 하단 스위치에 흐르는 전류, (d)는 B상 상단 스위치 내부다이오드에 흐르는 전류파형이다. 또한 (e)와 (f)는 A상 상단 스위치 및 B상 하단 스위치의 게이트 신호 파형을 나타낸다.

4. 실험 결과

그림 12는 비대칭 브리지 컨버터 및 6-switch IGBT module을 이용한 SRM 속도 제어 대한 전체 시스템의 구성도로서, DC 입력단, 구동부, 제어부, SRM으로 되어 있다. 3상 6/4극 SRM의 구동을 위한 드라이브 회로는 일반적으로 사용되고 있는 비대칭 브리지 컨버터

대신에 교류 전동기용으로 상용화된 6-switch IGBT Module (IPM)을 사용하였다.

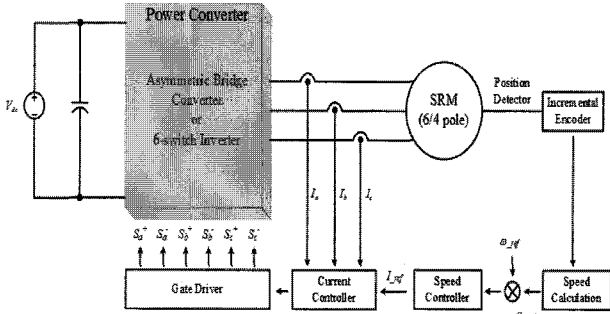


그림 12 시스템 블록도
Fig. 12 System block diagram

표 3은 본 논문에서 사용된 전동기 사양이다.

표 3 전동기 파라미터
Table 3 Specification of SRM

정격 출력	250[W]	상 권선저항	0.02166[Ω]
정격 전압	12[V]	최대 인덕턴스	1.332[mH]
상 수	3[상]	최소 인덕턴스	0.241[mH]
고정자 극수	6[pole]	회전자 극수	4[pole]

그림 13은 비대칭 브리지 컨버터를 이용한 시스템을 1000[rpm]에서 동작할 때의 상전류 파형이다. 각 상전류는 순차적으로 한 상씩 여자시키는 전형적인 SRM의 상전류 파형을 보여주고 있다.

그림 14는 속도를 1000[rpm]에서 2000[rpm]으로 상승시켰을 때 속도 응답 파형이다.

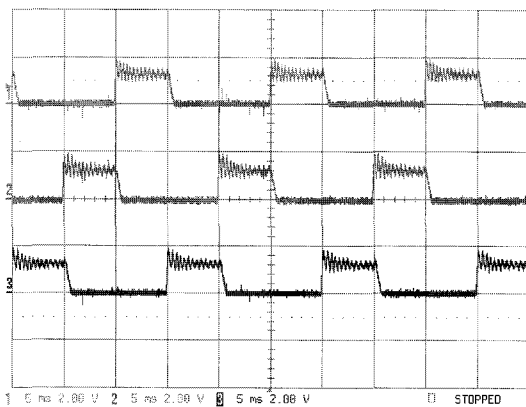


그림 13 1000[rpm]에서 상전류 (10A/div, 5ms/div)
Fig. 13 Phase current at 1000[rpm]

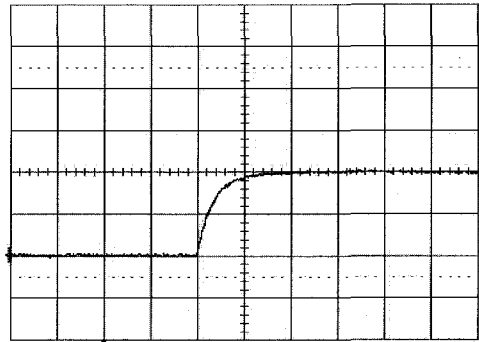


그림 14 속도응답특성 (1000 → 2000[rpm])
(500rpm/div, 0.2ms/div)
Fig. 14 Speed response characteristic

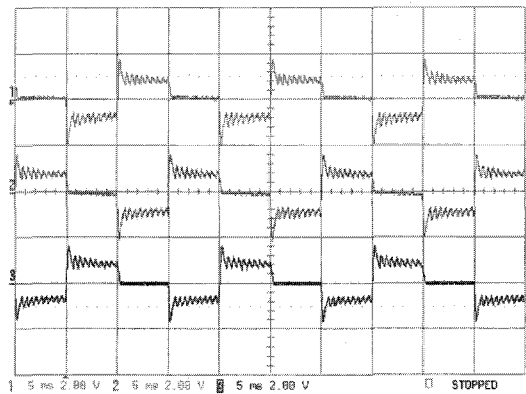


그림 15 1000[rpm]에서 상전류 (10A/div, 5ms/div)
Fig. 15 Phase current at 1000[rpm]

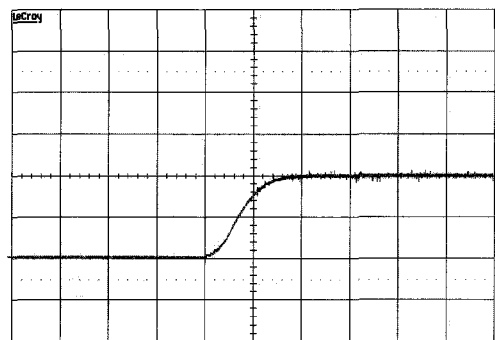


그림 16 속도응답특성 (1000 → 2000[rpm])
(500rpm/div, 0.2ms/div)
Fig. 16 Speed response characteristic

그림 15는 6-switch IGBT module을 이용한 시스템을 1000[rpm]에서 동작할 때의 상전류 파형이다. 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 있기 때문에 발생하는 현상이다.

그림 16은 SRM 속도를 1000[rpm]에서 2000[rpm]으로 상승시켰을 때 속도 응답 파형이다. 비대칭 브리지 컨버터를 이용한 그림 14의 응답 특성과 유사한 결과를 확인할 수 있다.

SRM은 구조가 단순하고, 견고하며, 단위 체적당 고효율의 장점을 가지고 있으나 토오크 발생시 맥동 토오크 및 소음·진동의 단점을 가지므로 실용화의 제약을 가지고 있다. 따라서 SRM의 소음·진동에 대한 해석은 매우 중요하다고 할 수 있다.

소음 및 진동 측정에 사용된 장비는 OROS사의 2채널 OR25 PC-Pack II이다. 소음 측정은 마이크로폰을 진동기와 50cm 거리를 두고 설치하였다. 가청 주파수 대역인 0Hz~20kHz 까지 측정하였으며, 진동 측정은 표면에 압전소자로 이루어진 Accelerometer를 부착하여 0Hz~5kHz 대역까지 측정하였다.

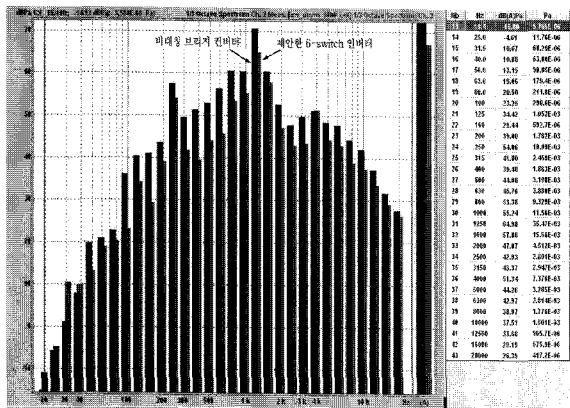


그림 17 1,000[rpm] 운전시 소음측정
Fig. 17 Acoustic noise characteristic at 1000[rpm]

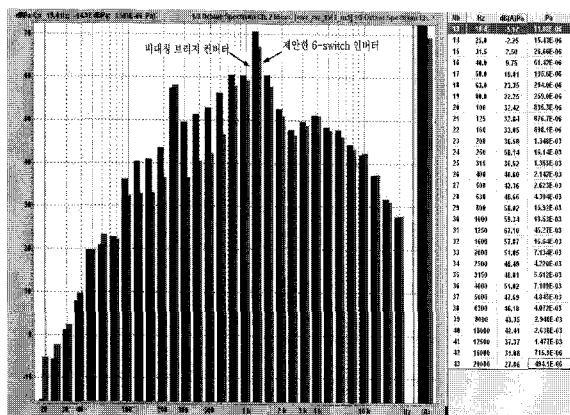
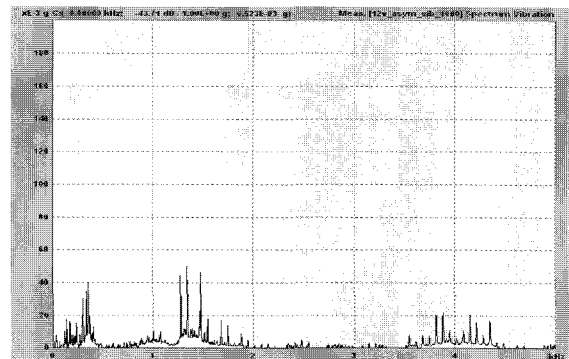


그림 18 2,000[rpm] 운전시 소음측정
Fig. 18 Acoustic noise characteristic at 2000[rpm]

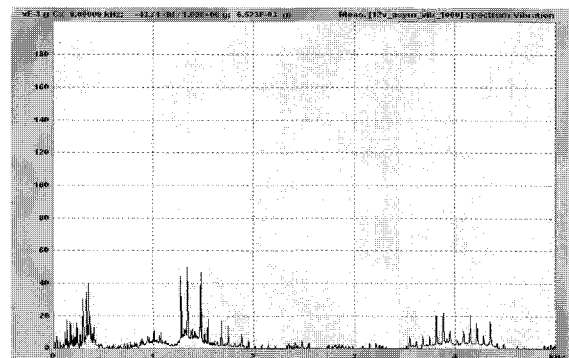
그림 17과 18은 1,000[rpm]과 2,000[rpm]에서의 비대칭 브리지 컨버터 구동시와 제안한 6-switch 인버터 구동시의 소음 측정 비교 결과이다.

그림 19와 20은 비대칭 브리지 컨버터를 이용한 경우와 제안한 6-switch 인버터를 이용한 경우의 SRM의 진동측정결과를 나타낸다. SRM 구동시 중요한 진동 및 소음은 상 전류의 스위치 오프시 급격한 방사방향의 가진력 변화로 인해 고정자 자극 및 프레임의 가진원에 기인한다[6]. 실험에 의하면 소음은 제안한 6-switch 인버터 구동시 기존 방식에 비해 평균적으로 약간 더 낮으며, 진동은 약간 높은 피크값을 가지는 것을 알 수 있었다. 그러나 앞서 언급하였듯이 SRM 구동시 진동 및 소음을 생기게 하는 주요 원인은 방사방향의 가진력 변화 때문이다.

따라서 제안한 6-switch 인버터를 SRM 구동에 적용시 비대칭 브리지 컨버터에 비해 토크 리플 및 효율 특성은 떨어지지만 소음/진동이나 효율이 크게 중요하지 않은 특정 응용분야에서는 적용이 가능할 것으로 판단된다.

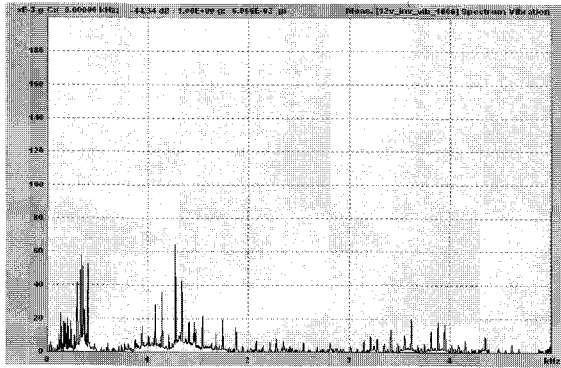


(a) 1000rpm 운전시

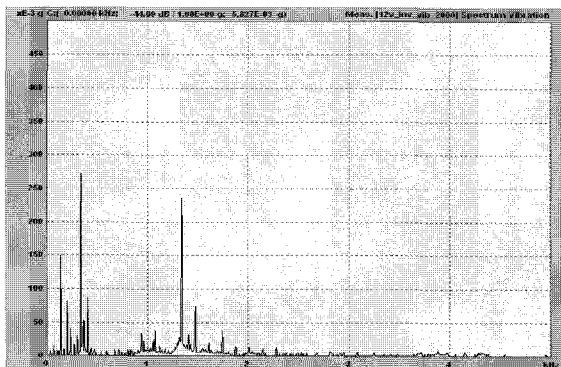


(b) 2000rpm 운전시

그림 19 비대칭 브리지 컨버터 구동시 진동측정
Fig. 19 Vibration characteristic asymmetric bridge converter



(a) 1000rpm 운전시



(b) 2000rpm 운전시

그림 20 6-switch 인버터 구동시 진동특성
Fig. 20 Vibration characteristic of 6-switch inverter

그림 21은 본 논문에서 제안한 6-switch IGBT module을 이용한 SRM 전체 구동 시스템을 나타내고 있다.

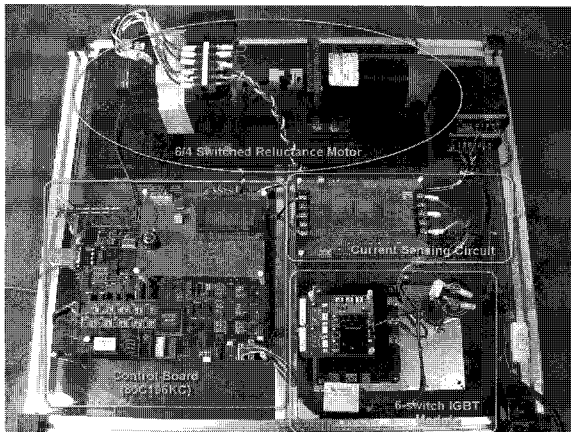


그림 21 실험 세트
Fig. 21 Experimental test setup

5. 결 론

일반적인 SRM 구동용 비대칭 브리지 컨버터는 제어 성능 및 효율이 우수하나 상당 스위칭 소자수가 많으며 상용화된 스위칭 소자 모듈이 존재하지 않아 주변 회로가 복잡하게 되어 전체 구동 시스템의 규모가 커지고 비용이 상승하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 일반적인 6-switch IGBT module을 적용하여 3상 SRM을 구동할 수 있는 2상 여자 방식을 제안하였다.

제안된 회로 및 제어 방식의 타당성을 검증하기 위해 비대칭 브리지 컨버터 구조에 대한 비교 실험을 진행하였다. 결과적으로 비대칭 브리지 컨버터에 비해 토크 리플 및 효율특성은 떨어지지만 소음/진동이나 효율이 크게 중요하지 않은 특정 응용분야에서는 적용이 가능할 것으로 사료된다.

이 논문은 에너지관리공단(04-02-N0201-02)의 에너지 절약기술연구사업 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] T. J. E. Miller, Electric Control of Switched Reluctance Machines, Newnes, 2001.
- [2] R. Krishnan, Switched Reluctance Motor Drives, CRC Press, 2001.
- [3] G. H. Rim, K. C. Lee and W. Kang, "Comparisons of Converter Topologies for Switched Reluctance Motors", *Journal of KIEE*, Vol.6, Sept. 1993, pp. 1-9.
- [4] J. W. Ahn and S. G. Oh, "A Three-phase Switched Reluctance Motor with Two-phase Excitation," *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 35, No. 5, pp. 1067-1075, 1999.
- [5] C. Y. Wu and C. Pollock, "Analysis and Reduction of Vibration and Acoustic Noise in the Switched Reluctance Drive", *IEEE Trans. on Trans. on Industry Applications*, Vol.31, No. 1, pp. 91-98, 1995.
- [6] Byoung-Kuk Lee, Ehsani, M, "Advanced Simulation Model for Brushless DC Motors Drives", *Journal of Power Electronics*, Vol. 3, No. 2, pp. 124-138, 2003.
- [7] 문재원, 오석규, 안진우, 이일천, 황영문, "2상 여자방식에 의한 SRM의 운전특성에 관한 연구," *전력전자학회 논문지*, 제 3권 제 4호, pp. 412-417, 1998.

- [8] 박상현, 김태성, 이병국, 현동석, “4스위치 3상 BLDC 전동기의 토크 리플 저감을 위한 전류제어 알고리즘”, *전력전자학회 논문지*, 제 9권 제 2호, pp. 126-132, 2004.

저 자 소 개



김연중(金淵忠)

1995년 성균관대 공대 전기공학과 졸업.
1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
2001년 동 대학원 전기전자 및 컴퓨터공학부 졸업(공학). 현재 성균관대 신기술에너지센터 연구원.



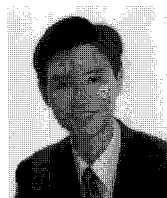
윤용호(尹溶湖)

2002년 성균관대 메카트로닉스 공학과 졸업(석사). 2002년 LG전자 연구원. 2003년~현재 동 대학원 메카트로닉스공학과 박사과정.



이원철(李元喆)

2003년 성균관대 전기전자컴퓨터공학부 졸업. 2004년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.



이병국(李秉國)

1994년 한양대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 미국 Texas A&M University 전기공학과 졸업(공학). 2001년 12월~2003년 1월 미국 Texas A&M University Postdoctoral Research Associate. 2003년 4월~2005년 8월 한국전기연구원 전력전자 그룹 선임연구원. 2005년 9월~현재 성균관대 정보통신공학부 연구교수. 당 학회 편집위원.



원충연(元忠淵)

1978년 성균관대 전기공학과 졸업. 1980년 서울대 공대 대학원 전기공학과(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1991년 12월~1992년 12월 미국 테네시주립대학 전기공학과 방문교수. 2003년 1월~2004년 12월 전력전자학회 부회장. 1988년~현재 성균관대 정보통신공학부 교수.