

SRM의 고속운전을 위한 새로운 멀티레벨 인버터의 구동특성

李東熙*, 安珍雨†

Performance of Multi-level Inverter for High-Speed SR Drive

Dong-Hee Lee and Jin-Woo Ahn

요 약

본 논문에서는 비대칭 컨버터에 비하여 전력소자의 수를 감소하면서도, 고속 운전에 적합한 새로운 멀티레벨 인버터를 제안한다. 제안된 인버터는 기존의 비대칭 컨버터에 비하여 전력소자의 수를 감소시킬 수 있는 특징이 있으며, SRM의 감자구간에서 릴링되는 에너지와 전원에서 공급되는 에너지를 교차적으로 활용하는 방식을 적용함으로써, C-dump 인버터에 비해 커패시터의 정격전압을 낮출 수 있는 장점이 있다. 또한, 제안된 멀티레벨 인버터의 동작 모드는 비대칭 컨버터에 비하여, 충전 레벨의 전원을 정역으로 활용하여 빠른 여자(Excitation)와 감자(Demagnetization) 모드를 가지게 되므로, 제어의 활용성이 매우 높다. 따라서, SRM의 고속 운전에 필요한 여자전류의 빠른 확립을 통하여 응답시간을 개선시키며, 토크 발생구간을 확장 시킬 수 있다.

제안된 멀티레벨 인버터 구동형 SRM의 운전특성은 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다.

ABSTRACT

In this paper, a novel multi-level inverter for low cost high speed switched reluctance(SR) drive is proposed. The proposed multi-level converter has reduced number of power switches and diodes than that of a conventional asymmetric converter for SRM and smaller voltage rating of the dump capacitor comparing with energy efficient c-dump converter. It can supply five operating modes that is boosted, DC-link, zero, negative bias and negative boosted voltage. The proposed multi-level converter has fast excitation and demagnetization modes of phase current, so dynamic response can be achieved.

The proposed multi-level converter is verified by computer simulation and experimental results.

Key Words : SRM(Switched Reluctance Motor), Multi-level inverter, High-speed operation

1. 서 론

SRM(Switched Reluctance Motor)은 기계적인 견고성과, 구조의 단순성 및 경제성으로 인하여, 산업용 및 가전용 전동력 응용 시스템의 적용에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다¹⁻²⁾. 다른 전동기에 비하여 비교적

높은 소음과 진동특성에도 불구하고, 특히, 고속 운전 특성이 요구되는 팬 및 송풍기와 같은 응용 분야에서 펄스형 전원을 이용하는 SRM의 단순성으로 인하여 그 활용이 점점 증가하고 있다¹⁻²⁾.

SRM의 구동을 위해서는 회전자 위치에 적합한 여자 전원을 인가하기 위한 전력 변환장치가 요구된다. 보다 효율적인 구동을 위한 다양한 형태의 인버터가 연구되었으나, 각 상의 독립적인 제어성 및 높은 신뢰성으로 인하여 비대칭 컨버터가 가장 널리 적용되고 있다²⁻⁵⁾. 한편 전력 소자의 수를 감소하기 위한 C-dump 인버터의 경우에는 전력 소자의 수는 감소

†교신저자 : 정희원, 경성대 전기전자메카트로닉스 교수

E-mail : jwahn@ks.ac.kr

*정희원, 경성대 전기전자메카트로닉스 전임강사

접수일자 : 2007. 3. 12 1차 심사 : 2007. 5. 7

심사완료 : 2007. 5. 16

시킬 수 있지만, 제어의 독립성이 떨어지고, 부가적인 인덕터가 요구되는 문제점이 있다^[2-9]. 또한, 고속운전을 위한 4-level 인버터의 경우에는 제어의 독립성 및 고효율 특성에 유리하지만, 비대칭 컨버터에 비해 전력소자의 수가 증가하는 단점이 있다^[7].

본 논문에서는 비대칭 컨버터에 비하여 전력소자의 수를 감소하면서도, 고속운전에 적합한 새로운 멀티레벨 인버터를 제안한다. 제안된 인버터는 기존의 비대칭 컨버터에 비하여 전력소자의 수를 감소시킬 수 있는 특징이 있으며, SRM의 감자기간에서 휠링되는 에너지와 전원에서 공급되는 에너지를 교차적으로 활용하는 방식을 적용함으로써, C-dump 인버터에 비해 커패시터의 정격전압을 낮출 수 있는 장점이 있다. 또한, 제안된 멀티레벨 인버터의 동작 모드는 비대칭 컨버터에 비하여, 충전 레벨의 전원을 정역으로 활용하여 빠른 여자(Excitation)와 감자(Demagnetization) 모드를 가지게 되므로, 제어의 활용성이 매우 높다. 따라서, SRM의 고속운전에 필요한 여자전류의 빠른 확립을 통하여 응답시간을 개선시키며, 토크 발생구간을 확장시킬 수 있다.

제안된 멀티레벨 인버터 구동형 SRM의 운전특성은 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다.

2. 일반적인 SRM 구동 회로의 특성

SRM의 구동을 위하여 다양한 형태의 전력변환 장치들이 연구되었다^[1-2]. 하지만, 4-상한 구동 특성을 가지면서, 각 상의 독립성 및 신뢰성이 높은 비대칭 컨버터가 가장 널리 적용되고 있다. 비대칭 컨버터는 그림 1과 같이 상당 2개의 스위칭 소자와 다이오드로 구성된다.

그림 2는 비대칭 컨버터의 동작모드를 설명하고 있으며, 상 권선에 에너지를 공급하는 여자(Excitation)모드와 프리-휠링(Free-wheeling)모드 및 감자(Demagnetization)모드로 동작하게 된다.

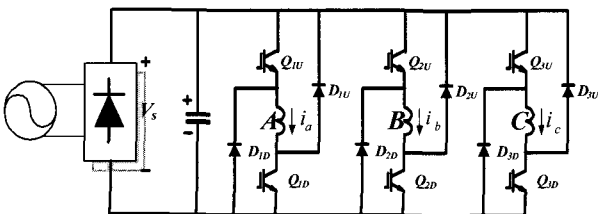


그림 1 일반적인 비대칭 컨버터의 구조
Fig. 1 A conventional asymmetric converter

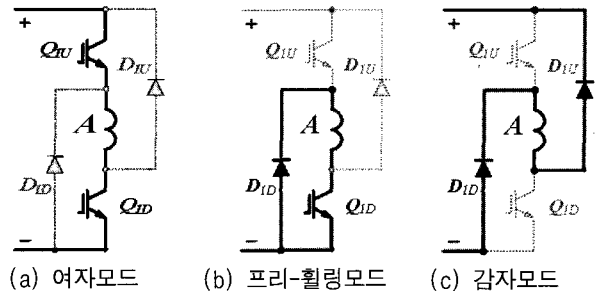


그림 2 비대칭 컨버터의 동작모드
Fig. 2 Operating modes of asymmetric converter

SRM의 여자 구간에서는 여자모드와 프리-휠링 모드를 사용하여, 여자전류를 제어하게 되며, 전류의 제어를 위해서는 PWM 방식을 적용하게 된다. 감자 구간에서는 상스위치 두 개를 모두 턴-오프하여 상 권선의 자계 에너지를 빠르게 소호시키게 된다.

비대칭 컨버터의 경우에는 비대칭 컨버터는 신뢰성이 높고, 각 상의 독립 제어에 유리한 반면에 사용 소자의 증대와 상간 절연을 위한 게이트회로 설계에 따른 경제성 측면에서 어려운 점이 있다^[7-10].

그림 3과 그림 4는 Sayeed Mir^[11, 12] 등이 제안한 Energy Efficiency C-dump 인버터의 구조와 동작 모드를 나타내고 있다.

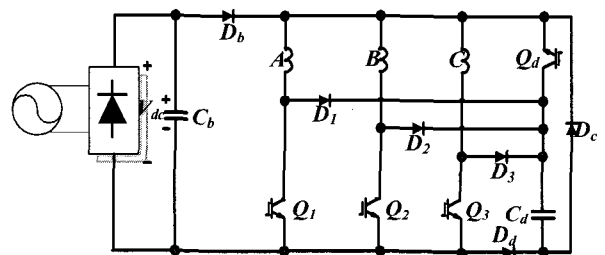


그림 3 Energy Efficiency C-dump 인버터
Fig. 3 Energy Efficiency C-dump inverter

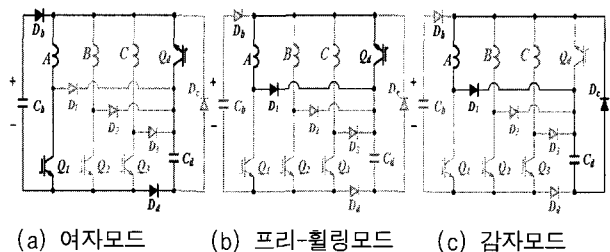


그림 4 Energy Efficiency C-dump 인버터의 동작모드
Fig. 4 Operating modes of energy efficiency C-dump inverter

Energy Efficiency C-dump 인버터는 감자 상태의 상권선 에너지를 덤프 커패시터에 저장하고 다음 상의 여자 구간에서 덤프 커패시터에 저장된 에너지를 활용하여 에너지 효율을 높이는 방식이다. 이 방식은 상 스위치 개수를 줄일 수 있으나 덤프 커패시터의 내압이 높고 제어의 자유도가 낮아지는 단점이 있다.

3. 제안된 고속 SRM 구동형 멀티레벨 인버터

본 논문에서는 비대칭 컨버터에 비하여 전력소자의 수를 감소하면서도, 고속 운전에 적합한 새로운 멀티레벨 인버터를 제안한다. 제안된 멀티레벨 인버터는 DC-link단의 필터 커패시터 외에 상 권선의 감자 에너지를 충전하여 재활용하기 위한 부스터 커패시터를 가지는 구조로, 다음 상의 여자 상태에는 부스터 커패시터의 전압과 DC-link 전압을 같이 인가하여, 높은 여자 전압으로 빠른 여자 전류의 확립이 가능하며, 감자 시에는 부극성의 높은 감자 전압을 통하여 감자 전류를 빠르게 소호시키며, 이 에너지를 다시 부스터 커패시터에 저장하게 된다.

그림 5와 그림 6은 제안된 멀티레벨 인버터의 구조 및 동작 특성을 나타내고 있다. 그림 5의 구조에서 제안된 인버터 토폴로지는 각 상당 하나의 스위칭 소자와 다이오드를 가지며, 부스터 스위치, DC-link 스위치 및 다이오드와 휠링 다이오드를 공유하는 구조로 설계되어 있다. 또한 DC-link 이외에, 부스터 단에 SRM의 감자 에너지를 저장하기 위한 부스터 커패시터가 직렬로 위치한다.

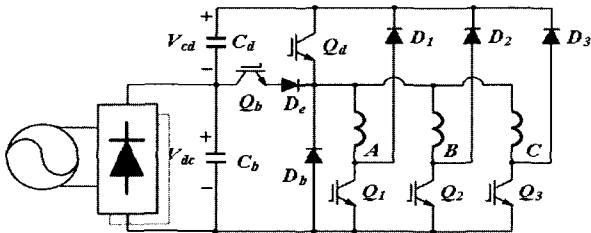


그림 5 제안된 멀티레벨 인버터
Fig. 5 The proposed multi-level inverter

그림 1과 그림 5의 비교에서, 제안된 멀티레벨 인버터는 비대칭 컨버터에 비하여 전력 스위칭 소자와 다이오드의 수를 감소시킬 수 있다. 특히, 제안된 멀티레벨 인버터는 그림 6에서 설명되는 5가지의 동작 모드를 가지므로, 제어의 유연성을 한층 높일 수 있다.

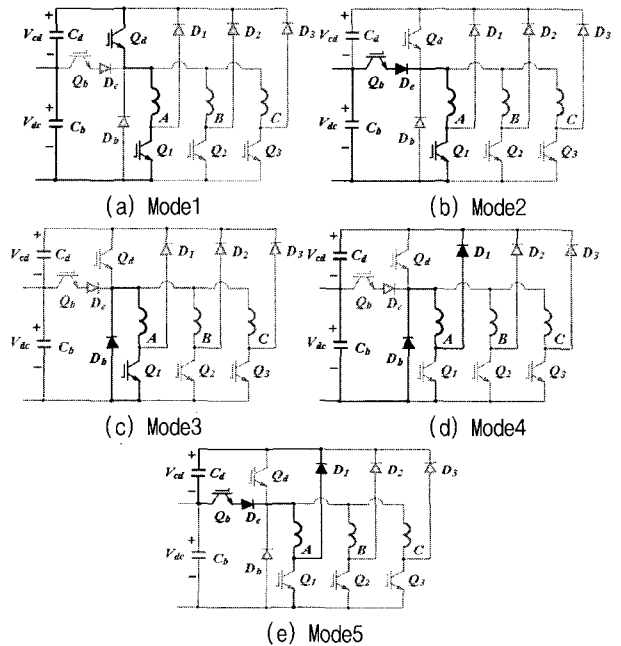


그림 6 제안된 멀티레벨 인버터의 동작 모드
Fig. 6 Operating modes of the proposed multi-level inverter

제안된 멀티레벨 인버터의 동작 모드는 다음과 같다.

3.1 Mode1 : 빠른 여자모드

모드 1은 부스터 커패시터 스위치 Q_d 와 상권선 스위치 Q_1 이 턴-온 되며, 링크단 스위치 Q_b 가 오프 되는 상태로, 상 권선에 인가되는 전압 V_{as} 은 다음과 같다.

$$V_{as} = V_{dc} + V_{cd} \tag{1}$$

상 권선 전압이 부스터 커패시터의 전압과 DC-link 전압의 합으로 높은 여자 전압이 인가되므로, 빠른 여자 전류의 확립이 가능하다. 이때, 부스터 커패시터에 충전되는 전압의 크기는 부스터 스위치와 DC-link 스위치의 턴-온 및 턴-오프 각도 제어에 의해 조절될 수 있으며, 여자 전류의 확립 시간은 부스터 전압 V_{cd} 의 크기에 반비례하여 감소하게 된다. 부스터 커패시터의 충전 전압을 DC-link단 전압 V_{dc} 와 같은 값으로 제어하는 경우, 여자 전류의 확립 시간은 기존의 비대칭 컨버터 보다 1/2로 감소하게 된다. 일반적으로 빠른 여자 모드는 여자 전류의 확립 구간에서만 사용되고, SRM의 정방향 토크 발생 구간에서 여자전류의 확립

구간을 고려하면, 부스터 커패시터 C_d 의 용량은 DC-link단 커패시터 C_b 의 1/4 정도로도 충분하며, 커패시터의 내압은 DC-link단 커패시터의 내압으로 설계하여도 충분하다.

3.2 Mode2 : 여자모드

모드 2는 기존의 비대칭 컨버터의 여자모드와 동일하게 DC-link 전압이 인가되는 동작 상태이다. 커패시터 스위치 Q_d 를 턴-오프하고, 상권선 스위치 Q_1 및 링크단 스위치 Q_b 를 턴-온 시키며, 상 권선에 인가되는 전압 V_{as} 은 다음과 같다.

$$V_{as} = V_{dc} \tag{2}$$

3.3 Mode3 : 프리-휠링 모드

모드 3은 상 권선 스위치 Q_1 을 턴-온하고, 부스터 스위치 Q_d 및 링크단 스위치 Q_b 를 모두 턴-오프한 상태이다. 비대칭 컨버터의 프리-휠링 모드와 동일하게 동작하며, 상 권선의 자계 에너지는 자연 소호하게 된다.

$$V_{as} = 0 \tag{3}$$

일반적으로 토크맥동을 줄이기 위해 영전압을 이용한 PWM 모드에서 사용된다.

3.4 Mode4 : 빠른 감자모드

모드 4는 상 권선의 스위치 및 부스터 스위치와 DC-link 스위치가 모두 오프되는 상태이다. 이 경우 전동기의 상 권선 전압은 음의 DC-link 전압과 부스터 전압이 인가된다.

$$V_{as} = -(V_{dc} + V_{cd}) \tag{4}$$

따라서, 상 권선 전류는 급격히 감소되어 영이 되고, 전동기의 에너지는 부스터 커패시터와 DC-link 커패시터로 환류된다. 빠른 감자 특성으로 인하여, SRM의 상 권선 전류는 부토크 영역으로 확장하지 않고, 턴-오프 각도를 확장하여 정토크 영역을 넓게 활용할 수 있게 된다.

3.5 Mode5 : 감자모드

모드 5는 감자 에너지를 부스터 커패시터로 환류하

는 상태로 부스터 스위치 Q_d 와 상 권선 스위치 Q_1 을 턴-오프하고, DC-link 스위치 Q_b 가 턴-온 되는 상태이다. 이 모드는 Energy efficiency C-dump 인버터의 감자모드와 동일하게, 음의 부스터 전압이 상 권선에 인가되며, 감자 에너지는 부스터 커패시터에 저장된다.

$$V_{as} = -V_{cd} \tag{5}$$

제안한 인버터는 다양한 동작모드의 조합에 의해 SRM의 고속 운전과 제어의 유연성이 높아지며, 전력 소자의 절감이 가능하다. 하지만, 부스터 스위치와 DC-link 스위치를 각 상에서 상호 공유하게 되므로, 전류(commutation)구간 동안 감자를 위한 충분한 음의 전압을 제공할 수 없는 단점이 있다. 따라서, 제안한 멀티레벨 인버터의 효율성을 높이기 위해서는 선행각과 소호각의 적절한 제어가 필요하다.

4. 시뮬레이션 및 실험결과

제안된 멀티레벨 인버터의 동작 특성을 확인하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다.

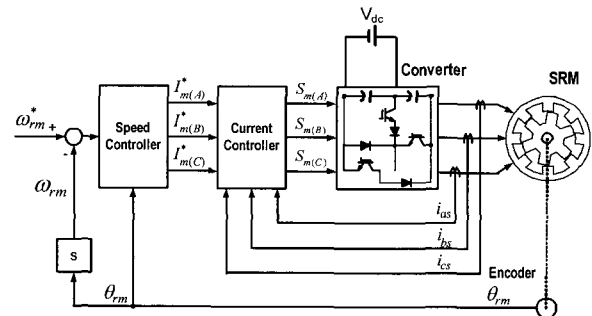


그림 7 SRM 속도 제어 블록도
Fig. 7 Block diagram of SRM speed controller

그림 7은 본 논문에서 제안된 멀티레벨 인버터를 적용한 SRM의 속도제어 블록도를 나타내고 있다. 속도 제어기는 속도오차에 따라 속도 제어기를 적용하여 회전자 위치에 따라 각 상의 지령 전류를 생성하며, 내부 전류제어기는 전류 지령치에 따라 각 상의 상 스위칭 신호를 발생시킨다.

본 논문에서는 인버터 스위칭 토폴로지를 검증하기 위하여 비교적 간단한 PI형 속도 제어기를 적용하였으며, 전류 제어기는 히스테리시스 방식의 제어기를 적용하였다. 부스터 커패시터의 충전전압은 200[V]가 되

도록, SRM의 턴-온 및 턴-오프각과 부스터 스위치 및 DC-link단 스위치를 제어하였다.

4.1 시뮬레이션 결과

SRM은 동작조건에 따라 PWM 또는 단일펄스모드로 동작한다. 제안한 멀티레벨 인버터와 비대칭형 인버터의 동작을 비교하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다. 그림8과 9는 PWM과 단일펄스 모드에서의 동작특성을 비교한 결과이다.

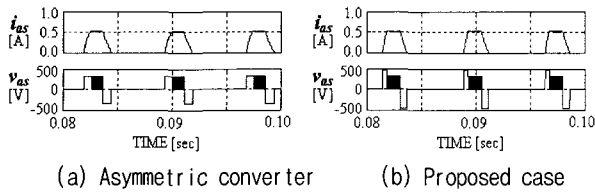


그림 8 PWM 모드의 시뮬레이션 결과(1000[rpm])
Fig. 8 Simulation results in PWM control mode (1000[rpm])

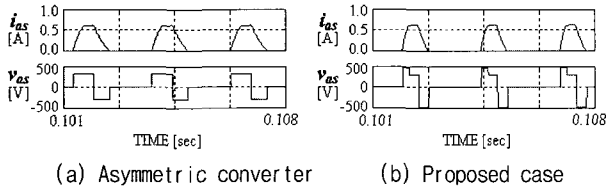


그림 9 단일 펄스 모드의 시뮬레이션 결과(3000[rpm])
Fig. 9 Simulation results in single pulse control mode (3000[rpm])

그림 8의 PWM 운전 방식에서 제안된 방식이 여자 전류의 확립과 소호에서 유리함을 확인 할 수 있으며, 이는 제안된 방식의 빠른 여자모드와 빠른 감자모드가 가능하기 때문이다. 따라서 토크전류를 신속하게 생성할 수 있으며, 부토크를 발생하는 tail 전류를 억제하여 토크발생 구간을 넓힐 수 있다.

그림 9의 단일 펄스모드에서도 같은 원리로 동적 응답 특성을 향상시킬 수 있다.

4.2 실험결과

시험에 사용된 전동기는 12/8극 200W 3상 SRM이다. 그림 10은 실험 장치를 보여준다. 제어기는 TI사의 TMS320F2812를 사용하였으며 전압과 전류신호는 DSP에 내장된 12bit ADC를 사용하였다. 회전자 위치와 속도는 512ppr 엔코더를 사용하여 검출 하였다. 회전자 속도는 DSP의 QEP기능에 의해 1.6[ms]마다 얻어지고, 전류제어를 위한 샘플링주기는 100[μs]이다.

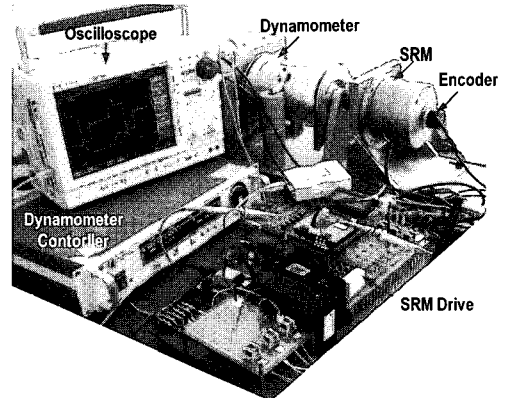
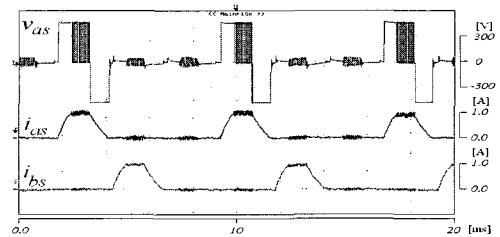
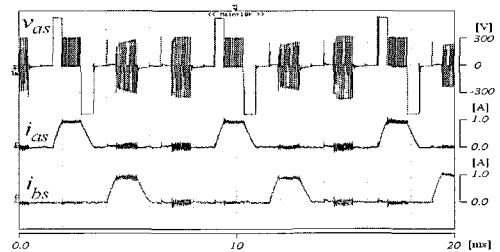


그림 10 실험 장치의 구성
Fig. 10 Experimental configurations

그림 11은 속도1000rpm, 부하 0.35Nm에서 PWM 제어모드로 동작하는 경우의 실험결과이다. 제안한 방식은 여자전류 확립시 DC-link 전압에 더하여 부스터 전압이 가해져 전류확립 시간이 줄어들고, 소호시에도 더 큰 음의 감자 전압을 인가할 수 있어 소호시간을 단축할 수 있음을 확인할 수 있다. 시뮬레이션과 다르게 여자되지 않는 상에 약간의 간섭현상을 볼 수 있으나, 이는 여자되지 않는 상의 권선이 floating 상태로 유지하기 때문이며, 인덕턴스의 변화가 없는 위치이므로 토크에 미치는 영향이 없어 그 영향은 무시할 수 있다.

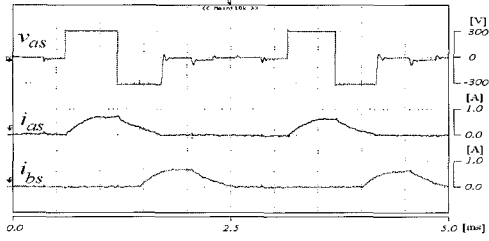


(a) Conventional asymmetric converter

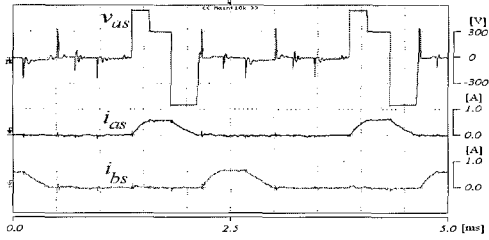


(b) Proposed multi-level inverter

그림 11 PWM 모드의 실험 결과(1000[rpm], 0.35[Nm])
Fig. 11 Experimental results in PWM control mode (1000[rpm], 0.35[Nm])



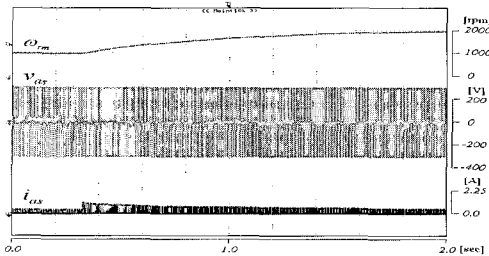
(a) Conventional asymmetric converter



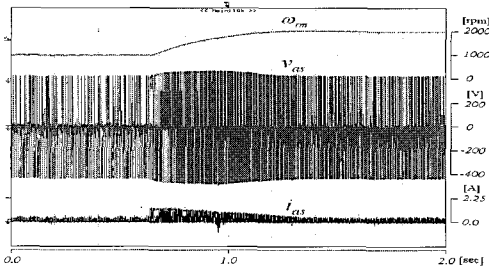
(b) Proposed multi-level inverter

그림 12 단일펄스 모드의 실험 결과(3000[rpm], 0.16[Nm])
 Fig. 12 Experimental results in single pulse control mode (3000[rpm], 0.16[Nm])

그림 12는 단일 펄스모드로 동작하는 실험결과이다. PWM 모드와 같은 원리로 여자과 감자시간을 단축할 수 있어 구동성능의 향상과 고속에서의 운전에 유리하다.

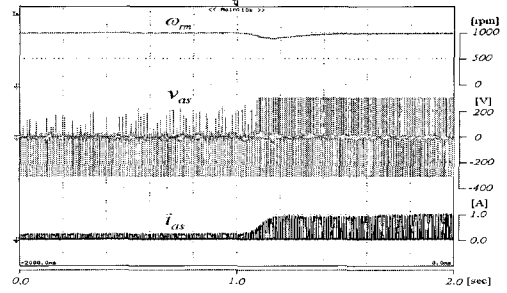


(a) Conventional asymmetric converter

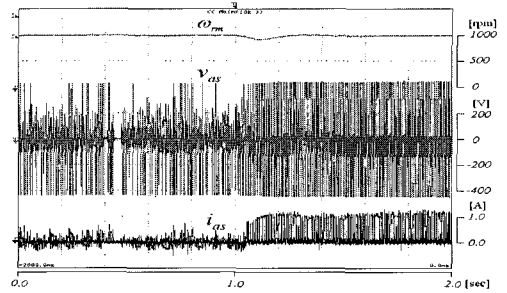


(b) Proposed multi-level inverter

그림 13 속도 지령 변화에 따른 응답특성(1000 → 2000[rpm], 0.16[Nm])
 Fig. 13 Experimental results in speed reference changing(1000 → 2000[rpm], 0.16[Nm])



(a) Conventional asymmetric converter



(b) Proposed multi-level inverter

그림 14 부하 변화에 따른 응답특성(무부하 → 0.7[Nm])
 Fig. 14 Experimental results in load changing(no load → 0.7[Nm])

그림 13과 14는 과도 응답특성을 비교 실험한 것이다. 그림 13은 속도를 1000에서 2000 rpm으로 변경한 경우의 특성을 보여준 것으로 제안한 방식이 덤프 캐패시터의 부가적 전압에 의해 전류확립시간과 토크 응답시간이 짧아짐을 확인 할 수 있다. 그림 14는 무부하에서 정격부하로 변했을 때의 특성을 비교한 것이다. 제안한 방식은 부하의 급작스런 변화에도 속도의 변화가 적음을 알 수 있다. 이는 상대적으로 높은 상전압의 순시적 대응과 이에 따른 전류의 증가로 응답 시간을 줄일 수 있기 때문이다.

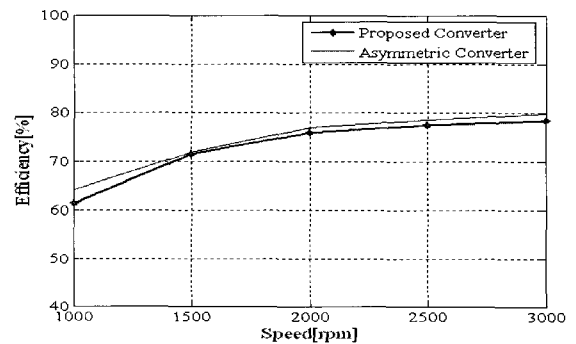


그림 15 PWM 제어모드에서의 효율 비교
 Fig. 15 Efficiency comparison in PWM mode

그림 15는 제안한 방식과 비대칭형의 PWM 제어시의 효율을 비교한 것이다. 제안한 방식이 기존의 비대칭형에 비해 1000rpm에서 1.5% 정도의 낮은 것으로 측정되었으며, 이는 여자 및 감자시의 빠른 전류변화에 따른 철손의 증가에 기인한 것으로 사료된다. 하지만, 제안한 인버터는 비대칭 컨버터에 비해 경제성이 높고, 제어의 유연성이 좋은 장점을 가지게 된다.

6. 결 론

본 논문에서는 경제성과 SRM의 구동성능을 고려한 새로운 멀티레벨 인버터를 제안하였다. 제안한 멀티레벨 인버터는 Energy efficiency C-dump형 인버터에 비해, 스위칭 소자가 1개 더 필요하나, 높은 여자 전압 및 감자 전압을 형성하기 위한 부스터 커패시터의 내압이 낮으며, 전류(commutation) 구간에서의 제어의 유연성이 높다. 또한, 비대칭형 보다 전력소자와 다이오드 갯수를 줄여 소자를 절감할 수 있으며, 상 여자 전압을 5레벨로 제어할 수 있어 여자와 감자시간을 단축할 수 있다. 따라서, SRM의 동적 응답성을 높일 수 있고, 일정 토크를 발생하는 토크 발생 영역을 확장하여 운전속도 영역을 넓힐 수 있으며 SRM의 고속운전에 유리하다.

참 고 문 헌

[1] 안진우, 스위치드 릴럭턴스 전동기, 오성미디어, 2004
 [2] S. Vukosavic. and V.R.Stefanovic, , "SRM inverter topologies: a comparative evaluation," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 27, no.6, pp.1034-1047, Nov.-Dec, 1991.
 [3] M. Ehsani, J.T. Bass, T.J. Miller, and R.L. Steigerwald, "Development of a unipolar converter for variable reluctance motor drives," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-23, No.5, pp.545-553, May/June 1987.
 [4] T.J.E. Miller, et al., Regenerative Unipolar Inverter for Switched Reluctance Motors Using One Switching Device per Phase, U.S. Patent No. 4684867, Aug. 4 1987.
 [5] R. Krishnan, and S. Lee, "Analysis and Design of a Single Switch per Phase Inverter for Switched Reluctance Motor drives," IEEE PESC, pp.485-492, 1994.
 [6] Y. H. Yoon, Y. C. Kim, S. H. Song, C. Y. Won, "Control of C-dump Converters fed from Switched Reluctance Motors on an Automotive Application,"

Journal of Power Electronics, vol.5, no.2, April 2005, pp. 120-128

[7] Jianing Liang, Dong-Hee Lee, Jin-Woo Ahn, Young-Joo An, "A Novel 4-level Converter for High Speed SR Drive", The 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, TuB2-4, pp. 1478-1483, June, 2006.
 [8] R. M. Davis and R.J. Blake, "Inverter drive for switched reluctance motor circuits and component ratings," IEE Proc., pp. 126-136, 1981.
 [9] T.J.E. Miller, "Converter volt-ampere requirements of the switched reluctance motor drive," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 21, No. 5, pp. 1136-1144, Sept. 1985.
 [10] R. M. Davis et al., Electric Power Converter Circuit, U.S. Patent No. 4563619, Jan.7, 1986.
 [11] S. Mir, I. Husain, and M. E. Elbuluk, "Energy-efficient C-dump converters for switched reluctance motors," IEEE Trans. Power Electron., vol.12, no.5, pp.912-921, Sept. 1997.
 [12] P.K. Sood, Power Converter for a Switched Reluctance Motor, U.S. Patent No.5115181, May 9, 1992.

저 자 소 개



이동희(李東熙)

1970년 11월 11일생. 1996년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 2002년~2005년 OTIS-LG 서보 R&D 선임연구원. 2005년~현재 경성대 전기·전자·메카트로닉스공학부 전임강사.



안진우(安珍雨)

1958년생. 1984년 부산대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1995년 12월~1996년 2월 영국 글래스고우대 방문연구원. 1998년 8월~1999년 8월 미국 위스콘신대 방문교수. 1992년~현재 경성대 전기전자메카트로닉스공학부 교수. 2005년~현재 차세대 전동기 기술 연구 센터장. 당 학회 평의원.