

論文96-33B-12-12

ZVT 방식을 적용한 SRM 구동용 컨버터

(A ZVT Applied SRM Converter)

金元鎬*, 趙貞九*, 金鍾洙*, 林根熙*

(Won-Ho Kim, Jung-Goo Cho, Jong-Soo Kim, and Geun-Hie Rim)

요 약

본 연구에서는 SRM(Switched reluctance motor) 구동에 ZVT(Zero voltage transition)를 적용한 컨버터를 제시하였다. 이 컨버터는 모터 구동용 컨버터의 전단에 ZVT 보조 회로를 사용하여 모터 구동용 컨버터의 모든 스위치가 상전류를 조절하기 위해 고속의 스위칭 동작을 해야 할 필요성을 없앴다. 따라서, 모터 구동용 컨버터의 스위칭 소자는 스위칭 속도가 느린 저가의 제품을 쓸 수 있으며 고속의 스위칭 동작이 없기 때문에 시스템의 효율을 향상시킬 수 있다. 또한, ZVT 보조 회로의 고속 스위칭 동작은 시스템의 동특성 향상과 더불어 모터의 권선에 흐르는 상전류 리플을 줄여주기 때문에 모터의 소음을 저감시키는 특성을 얻는다.

Abstract

A ZVT(Zero voltage transition) converter for SRM(Switched reluctance motor) drives is proposed in this study. By adding a ZVT-chopping switch in the front-end, all switches in the machine side converter can be operated without any chopping to regulate phase current. This allows the use of low-cost and slow-switching devices for the machine side converter. The ZVT circuitry allows high frequency operation of the chopping switch, which enhances the system dynamics and phase-current ripples. High efficiency of the integrated converter is obtained due to low switching losses.

I. 서 론

SRM(Switched reluctance motor)은 현재 국내에서도 연구^{[1] [5]}가 활발히 진행되고 있는 모터의 일종으로서, 스위칭 제어 장치가 결합된 특수 형태의 모터로 분류되어진다.

SRM은 고정자와 회전자 모두가 돌극형 구조를 하고 있으며 각기 다른 갯수의 극을 가진다. 특히, 고정자 부분에만 권선이 감겨져 있으며 회전자 부분에는 어떠한 형태의 권선이나 영구자석도 존재하지 않으므로 이러한 간단한 구조의 형태를 SRM의 가장 큰 특징으로 볼 수 있다.

SRM은 구조상의 특징으로 인해 제작 생산적인 측면에서 상당한 잇점을 지니고 있으며 또한, 직류 모터

와 같이 기동특성이 좋고 토오크가 큰 반면에 정기적으로 브러시를 교환하는 등 유지, 보수의 필요성이 적으며 인버터로 구동하는 유도전동기와 비교할 때는 구동장치의 구조가 간단하며 단위 체적당 토오크, 효율 및 컨버터의 정격 등 많은 부분에서 우수한 특성을 지니고 있다. 또한, 광범위한 가변속 범위의 초저속 운전을 요구하는 부분에 있어서는 아주 우수한 특성을 나타내므로 화학공정의 혼합기나 원심분리기 등에는 아주 적합하다고 할 수 있으며, 그 밖의 많은 분야에서 미국이나 유럽 각지의 선진국을 중심으로 사용분야가 증가일로에 있다.^{[6] [9]}

그러나, SRM을 사용함에 있어서는 반드시 구동을 위한 컨버터가 있어야 하며 회전자의 정확한 위치를 검출하기 위한 위치센서가 필요하다는 단점 때문에, 이와 관련된 컨버터의 효율 향상이나 센서없는 구동에 관한 연구가 현재에도 많이 진행되고 있다. 이러한 SRM의 장점들을 최대한도로 이용하려면 모터는 물론

* 正會員, 韓國電氣研究所

(Korea Electrotechnology Research Institute)

接受日字:1996年9月5日, 수정완료일:1996年11月21日

컨버터와 제어회로에 대한 전반적인 이해가 뒤따라야 한다.

본 논문에서는 SRM 구동을 위한 새로운 ZVT (Zero voltage transition) 컨버터^{[10]-[11]}를 제시하였다. 이 컨버터는 모터 구동용 컨버터의 전단에 ZVT 보조 회로를 사용하여 모터 구동용 컨버터의 모든 스위치가 상전류를 조절하기 위해 고속의 스위칭 동작을 해야 할 필요성을 없앴다. 따라서, 모터 구동용 컨버터의 스위칭 소자는 스위칭 속도가 느린 저가의 제품을 쓸 수 있으며 고속의 스위칭 동작이 없으므로 인해 시스템의 효율을 향상시킬 수 있다. 또한, ZVT 보조 회로의 고속 스위칭 동작은 시스템의 동특성 향상과 더불어 모터의 권선에 흐르는 상전류 리플을 줄임으로 인해 모터의 소음을 저감시키는 특성을 얻는다.

실험을 위한 모터는 400W - 3600rpm(AC 입력 110V)급이며 극구조는 8/6 형태의 모터를 사용하였다.

II. ZVT 컨버터의 구조

SRM의 구동원리는 고정자의 각 상을 순차적으로 여자시킬 때 고정자와 쇄교자속이 최대가 되려는 방향으로 회전자가 회전하려는 특성을 이용한 것으로, 회전자의 위치에 따라 고정자의 해당 상권선을 여자시킴으로서 토크를 얻는 방식이다. 즉, 스위칭 소자를 턴 온, 턴 오프시켜 해당권선에 전압을 인가하여 전류의 크기를 조절함에 따라 그 때의 전류 크기와 비례하는 쇄교 자속수에 의해 가변속 운전이 가능하게 되는 것이다. SRM 구동용 컨버터로서 그림 1.에 나타난 것처럼 각각의 상마다 두 개의 스위치를 가지는 구조가 산업 응용 분야에 광범위하게 사용되고 있다. 그림 1.의 컨버터를 기준으로하여 SRM의 회전원리에 대해 간단히 설명한다.

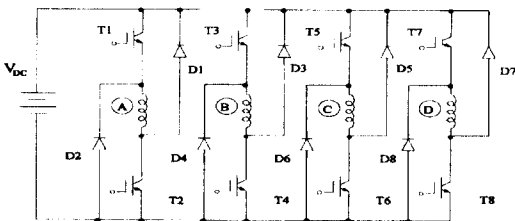


그림 1. 상당 2개의 스위치를 쓰는 SRM 컨버터
Fig. 1. Conventional two switches/phase converter for SRM drive.

SRM에서 발생하는 토크는 상권선에 흐르는 여자 전류의 크기에 따라 달라지기 때문에 모터의 속도나 토크는 지령 전류에 의해 제어될 수 있다. 따라서, 스위치 T1과 T2를 턴 온하면 상 권선 A에 입력 DC 전압인 V_{DC} 가 인가되므로 상전류가 흐르기 시작한다. 상전류가 지령값 이상으로 증가할 때 두 스위치 T1과 T2는 턴 오프되고 이 때, 모터 권선에 흐르는 전류는 다이오드 D1과 D2를 통해 전원으로 되돌려진다. 그러나, 제어 방식을 다르게 하여 두 스위치 중 어느 것 하나가 턴 오프되면 다이오드 하나와 다른 스위치에 의해 루프를 구성하며 상전류가 순환하게 된다. 이 두가지 제어 방식은 정전압 SRM 구동 방식으로서 전류 제어를 위해 스위치들을 연속적으로 턴 온, 턴 오프함으로써 큰 스위칭 손실을 야기시킨다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 다단식 SRM 컨버터^[1]로 이루어진 새로운 컨버터가 출현하게 되었는데, 이 컨버터는 V_{DC} 를 원하는 전압 레벨로 제어하기 위해 앞단에 벅 컨버터(Buck converter)를 사용하며, 벅 컨버터의 스위칭 손실과 전압 스파이크는 에너지 회생 스너버^[2]를 사용하여 최소화 한다. 이 컨버터의 장점은 벅 컨버터를 사용함으로써 SRM 구동용 컨버터에서 사용되는 스위치는 저속의 소자로서 전도 손실과 비용의 절감을 가져올 수 있으나 벅 컨버터의 수동소자(커패시터, 인덕터)들에 의해 부피와 가격이 커지는 단점이 있다. 본 연구에서 제안된 컨버터는 벅 컨버터를 사용한 SRM 구동용 컨버터의 발전된 개념으로서 ZVT 보조 회로를 사용하여 모터측 컨버터의 스위칭 소자들은 기존의 저속 스위칭 동작만 이루어지며 ZVT 보조회로가 고속의 스위칭 동작에 의해 전류 제어를 하게 된다. 이 소프트 스위칭 방식은 수동소자들의 크기에 있어 소형, 경량화를 가능하게 하게 하며 시스템의 동특성이나 모터의 소음 저감에 기여한다.

그림 2.는 ZVT 보조 회로를 포함하는 제안된 컨버터의 전체 구조를 보여준다. 제안하는 컨버터는 기본적으로 ZVT 보조 회로 부분과 모터의 상권선에 전류를 인가하기 위한 모터 구동용 컨버터로 구성된다. ZVT 보조 회로는 공진 스위치(Sr), 다이오드(Dr), 공진 커패시터(Cr) 그리고, 작은 공진 인덕터(Lr)로 구성되어 있다. 공진 스위치는 적은 양의 과도 에너지만을 감당하므로 정격이 주 스위치(S1)에 비해 작아도 되지만 고속의 스위칭 동작을 해야하므로 MOSFET를 사용하였다.

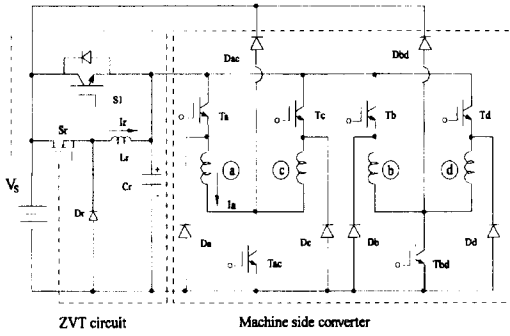


그림 2. 제안된 새로운 ZVT 컨버터
Fig. 2. Proposed novel ZVT converter.

모터측 컨버터의 특징으로는 스위칭 소자 수가 적고 빠른 상전류의 변화와 전류 오버랩(Overlap) 같은 전류 제어 능력이 우수한 것을 들 수 있다. 또한, 스위치 턴 오프 시에 상권선에 흐르는 전류는 역도오프 발생 방지를 위해 되도록이면 빠른 속도로 없애야 하며 특히, 고속에서는 이러한 기능이 더욱 중요해지는데 제안된 컨버터에서 이 기능은 프리휠링 다이오드 Dac와 Dbd를 입력 DC 전압에 연결함으로써 구현하였다. 컨버터의 구조는 두개의 상 (a,c)과 (b,d)로 이루어져 있다. Tac와 Tbd는 각각 상 (a,c)과 (b,d)에 공유되어 있어 각각의 상전류 독립 제어가 가능하다. SRM 구동에 있어 각 상권선의 독립 전류 제어와 전류 오버랩 제어는 컨버터의 성능을 평가하는 중요한 요소 중의 하나이다. SRM 컨버터의 대부분은 초저속 모터나 저 성능 구동을 제외하고는 이러한 기능이 반드시 필요하다.

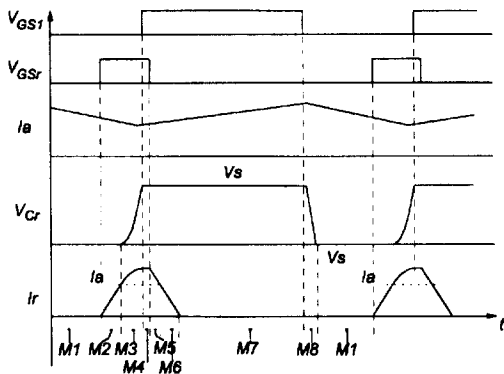


그림 3. 새로운 ZVT 컨버터의 동작 파형
Fig. 3. Operation waveforms for the novel ZVT converter.

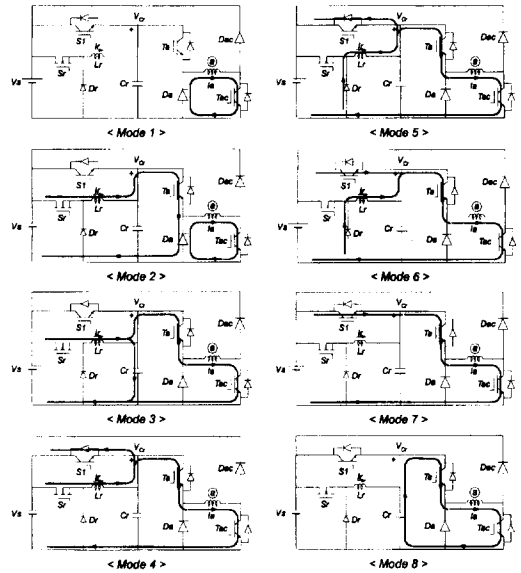


그림 4. 새로운 ZVT 컨버터의 동작 모드
Fig. 4. Operation modes for the novel ZVT converter.

ZVT 보조 회로는 효율, EMI 노이즈 감소, 스너버 제거 및 모터측 컨버터의 저가 스위칭 소자 사용에 의한 컨버터 성능 향상을 기대할 수 있다.

III. 컨버터의 동작

제안된 ZVT 회로의 안정된 동작을 설명하기 위해 모든 부품과 스위치가 이상적이라고 가정한다. 각 동작 사이클은 여덟 동작 모드로 구성되며 동작 모드와 파형은 그림 3.과 그림 4.에 각각 나타나 있다. A상을 여자시키는 경우로 예를 든다.

모드 1:

모든 스위치들은 턴 오프된 상태이며 상권선 ①에는 Da - ① - Tac - Da의 루프로 SRM의 역기전력에 의해서 상전류 Ia가 서서히 감소한다.

모드 2:

공진 스위치 Sr를 턴 온하여 Vs - Sr - Lr - Ta - Da - Vs의 루프로 공진 전류 Ir가 상승하는 구간이다. 공진 전류의 크기가 다이오드 Da에 흐르고 있는 상전류 Ia보다 작으므로 Da는 계속 도통상태에 있다. Ir은 Da를 통해서 선형적으로 증가된다.

모드 3:

Ir이 Ia보다 커지는 순간 Da는 턴 오프되고 Lr과 Cr

는 공진한다. 따라서, $V_s - S_r - L_r - C_r - V_s$ 의 루프를 통해 C_r 에 점차적으로 전압이 충전되게 되며 V_{Cr} 가 V_s 의 크기만큼 증가할 때까지 이 구간은 계속된다. 이 경우, 인덕터 전류와 캐패시터 전압은 다음과 같이 표현된다:

$$I_r(t) = (V_s / Z_r)\sin \omega_r t + I_0 \quad (1)$$

$$V_{Cr}(t) = V_s(1 - \cos \omega_r t) \quad (2)$$

여기서 $\omega_r^2 = 1 / L_r C_r$, $Z_r^2 = L_r / C_r$

모드 4:

V_{Cr} 이 V_s 크기 까지 증가되면 S1의 내부 다이오드가 도통하여 I_r 은 $S_r - L_r - S1$ 의 내부 다이오드 - S_r 의 경로를 따라서 흐르게 된다. 이 구간 동안은 전류가 프리휠링하는 구간으로서 전류는 일정값으로 유지된다. 이 때, 스위치 S1 양단간의 전압이 영이므로 주 스위치 S1을 영전압에서 턴 온시킨다. S1이 턴 온된 이후 공진스위치 S_r 을 턴 오프 한다.

모드 5:

다이오드 D_r 이 도통하여 I_r 은 $V_s - D_r - L_r - S1$ 의 내부 다이오드 - V_s 의 경로를 따라서 선형적으로 감소하다가 상전류 I_a 보다 크지는 순간 S1이 도통되어 전류 방향이 바뀐다.

모드 6:

공진 전류 I_r 은 $V_s - D_r - L_r - S1$ 의 내부 다이오드 - V_s 의 경로를 따라서 선형적으로 완전히 감소한다.

모드 7:

컨버터는 파워 모드로 동작되기 시작하고 상권선에 흐르는 전류 I_a 는 $V_s - S1 - T_a - \text{①} - T_{ac} - V_s$ 의 루프를 따라서 증가하기 시작한다.

모드 8:

주어진 듀티 사이클에 의해 S1도 턴 오프되고 커패시터 C_r 에 충전된 전압은 $C_r - T_a - \text{①} - T_{ac} - C_r$ 의 경로를 따라서 급속히 감소한다. V_{Cr} 이 영이 될 때 D_a 는 도통된다. C_r 에 충전된 전압이 S1을 턴 오프하는 순간에 V_s 의 크기와 같으므로 턴 오프 시에도 스위칭 손실이 작아진다.

이상은 ZVT 모듈이 고속으로 스위칭하고 있는 경우의 한 싸이클만 설명한 것으로 이 때, 모터측 컨버터의 스위치는 해당 여자 권선을 여자하기 위하여 턴 온 된 상태이다. 해당 권선의 여자 순서를 바꾸는 경우에 있어서도 ZVT 동작은 계속 이루어지고 있는 상태에서

모터측 스위치들의 턴 온, 턴 오프 상태만 바뀐다.

IV. 실험 결과

실험에 사용된 모터는 400W - 3600rpm(AC 입력 110V)급이며 극 구조는 8/6 형태의 모터를 사용하였다.

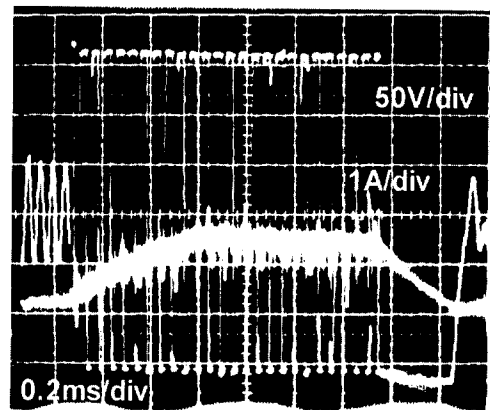
그림 1.에 나타난 컨버터는 스위치의 턴 온, 턴 오프 방식에 따라 다음과 같이 다른 두 가지 방식으로 제어가 가능하다.

제 I 방식

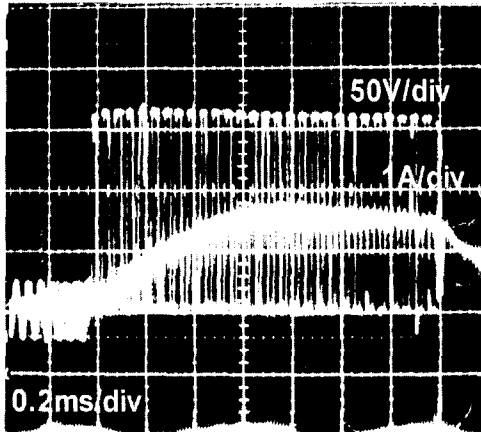
A상을 여자시키는 경우, 스위치 T1과 T2를 턴 온하면 상전류가 흐르게 되며 만약, 상전류가 지령치 이상 증가하면 두 스위치는 턴 오프된다. 이 때, 권선에 흐르는 전류를 없애기 위해 다이오드 D1과 D2는 전류 루프를 만들어 전원으로 되돌려 보낸다. 권선 양단의 상전류 및 전압 파형이 그림 5. (a)에 나타나 있다. 이 방식은 권선에 인가되는 전압의 변화가 전원 전압의 두 배가 되므로 높은 전류 리플과 EMI 문제를 야기시킨다.

제 II 방식

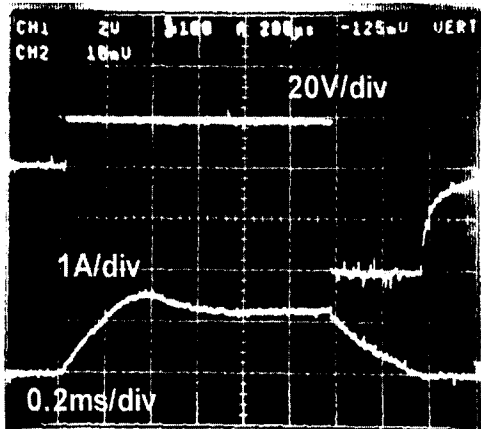
이 방식은 스위치 T1과 T2 두 스위치 중 하나만 턴 오프하는 방식이다. 이 방식은 상전류를 D1 또는, D2로 순환하게 하므로 상전류 리플을 감소시키는 장점이 있다. 그러나, 이 방식도 T1과 T2를 동시에 턴 오프하여 상전류가 D1 및 D2를 통해 입력측으로 되돌려진다. 그림 5. (b)에서 이 방식으로 제어되는 경우의 전압과 전류파형을 나타내었다. 권선이 여자되는 동안 권선 양단에 걸리는 전압은 전원 전압이 스위치에 의해 초평되어 공급된다.



(a)



(b)



(c)

그림 5. 상전압 및 상전류의 실험 파형

(a) 제어 방식 I에 의한 상전압 및 전류 파형 (b) 제어 방식 II에 의한 상전압 및 전류 파형 (c) 벡 컨버터에 의한 상전압 및 전류 파형

Fig. 5. Experimental phase current & voltage waveforms.

(a) Waveforms of current & voltage of a phase winding with method I. (b) Waveforms of current & voltage of a phase winding with method II. (c) Waveforms of current & voltage of a phase winding with buck converter

그림 5. (c)는 벡 컨버터를 사용한 경우^[11]의 실험 전압과 전류 파형이 나타나 있다. 이 컨버터는 모터의 상권선에 흐르는 전류를 제어함에 있어 고속의 초핑 동작 없이 속도에 비례하는 크기의 전압을 상권선에 인가하는 방식이다. 그러므로, PWM 제어에 의한 스위칭 손실이 발생하지 않는 장점이 있다.

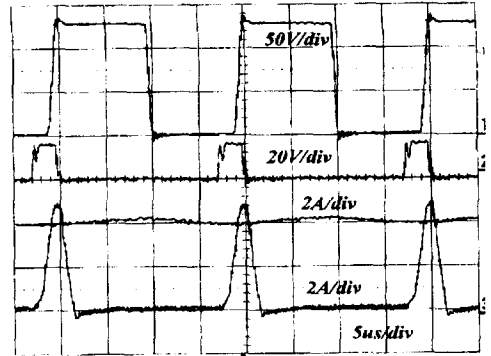
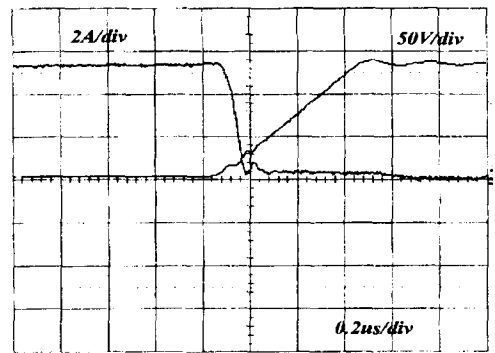
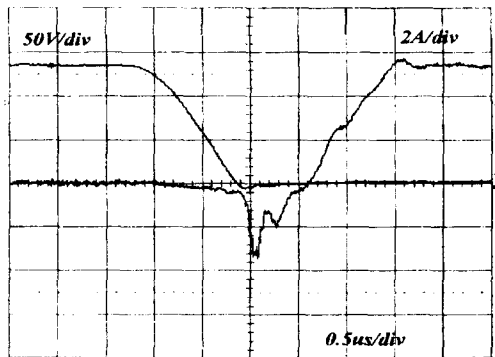


그림 6. ZVT 컨버터 각 부의 동작 파형

Fig. 6. Key waveforms for the ZVT converter.



(a)



(b)

그림 7. 주 스위치의 스위칭 특성

(a) 주 스위치 오프 시의 양단간 전압 및 전류 파형 (b) 주 스위치 온 시의 양단간 전압 및 전류 파형

Fig. 7. Switching characteristics of the main switch.

(a) Turning off voltage & current of the main switch, (b) Turning on voltage & current of the main switch.

그림 6.은 본 논문에서 제안된 ZVT 컨버터에 의해 SRM이 구동될 때의 동작 파형을 보여준다. 각각의 파형은 상부로부터 Cr 양단간 전압, 공진 스위치의 게이트 전압, 모터에 흐르는 상전류 및 공진전류를 나타낸다. Ta와 Tac는 권선이 여자되는 동안 계속적으로 턴 온되고 주 스위치 S1이 상전류를 제어하기 위해 턴 온, 턴 오프된다. 실험 파형에서 보는 바와 같이 Cr 양단간 전압 파형은 50kHz 스위칭 상태에서도 아주 깨끗하며 ZVT 공진 모듈은 짧은 시간만 동작하므로 전체적인 전도 손실은 아주 낮은 값을 유지한다. 그림 7.은 S1이 턴 온되는 경우와 턴 오프되는 경우에 있어서의 스위치 양단간 전압 및 전류 파형을 나타낸다. 주 스위치 S1 양단의 턴 오프 전압은 전류가 거의 0으로 떨어질 때 증가 하기 시작한다. 턴 온하는 순간 주 스위치의 전류는 내부 다이오드를 통해 전원으로 흐르고 그 때, 스위치 양단간의 전압은 0이 된다. 그림 8.은 공진 전류와 상권선 전류를 나타낸다. 공진 전류의 피크치 리플은 그림에서 보는 바와 같이 상전류의 피크 파형을 추종하고 있음을 알 수 있으며 모터의 부하변화에 따라 상전류의 크기가 변할 경우에도 공진전류의 피크 리플은 이상적으로 추종함을 알 수 있다.

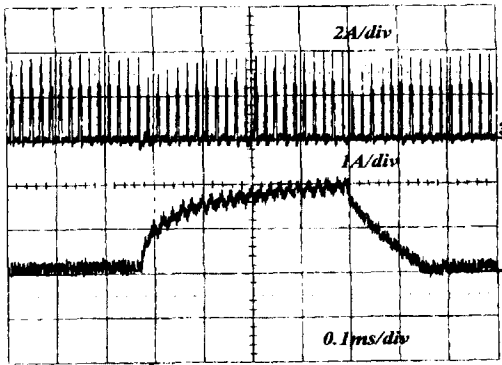


그림 8. 각각 공진 인덕터와 상권선에 흐르는 전류의 파형
Fig. 8. Resonant inductor and phase current.

V. 결론

본 논문에서는 ZVT 스위칭 개념을 도입한 새로운 SRM 구동용 컨버터를 제시하고 그 성능과 특징을 기술하였다.

이 컨버터의 특징을 요약하면

- (a) 소프트 스위칭 방식의 도입으로 시스템의 효율 향상
- (b) 소프트 스위칭에 의한 스위칭 노이즈의 저감
- (c) ZVT 모듈의 고속 스위칭 동작에 의한 시스템 동특성 향상
- (d) 전류 리플을 저하에 따른 SRM 구동 소음 감소

참고 문헌

- [1] G. H. Rim, W. H. Kim at al, "A Novel Converter Topology for Switched Reluctance Motor Drives Improving Efficiency and Simplifying Control Strategy", PESC '94 Conference Record, pp 937-942, 1994.
- [2] E. S. Kim at al, "A 12kW Switching Mode Power Supply with Free Input Voltage", APEC '94 Conference Record, pp 839-846, 1994.
- [3] 장 도현, "수정형 R-덤프 컨버터 구동 스위치드 리럭턴스 전동기의 효율 및 특성 해석", 전기학회 논문지, 제 44 권, 제 12 호, pp 1601-1609, 1995
- [4] 안 진우, 박 한웅, 황 영문, "SRM 구동을 위한 새로운 제어방식", 전기학회 논문지, 제 45 권, 제 4 호, pp 526-529, 1996
- [5] 류 홍제, 김 학성, 강 욱, 원 충연, "피지 PI 제어를 사용한 스위치드 리럭턴스 전동기의 속도 제어", 전기공학회 논문지, vol. 33-B, no. 2, pp 209-216, 1996
- [6] P. N. Materu, R. Krishnan, "Steady State Analysis of the Variable Speed Switched Reluctance Motor Drive", IEEE Trans. on IE, vol. 36, no. 4, pp 523-529, 1989.
- [7] S. Vukosavic et al, "SRM Inverter Topologies : A Comparison Evaluation", IEEE Trans. on IA, vol. 27, no. 6, pp 1037-1047, 1991.
- [8] M. Eshani et al, "Development of a Unipolar Converter for Switched Reluctance Motor Drive", IEEE Trans. on IA, vol. 23, no. 3, pp 545-553, 1987.
- [9] T. J. E. Miller, "Converter Volt-ampere Requirements of the Switched Reluctance Motor Drive", IEEE Trans. on IA, vol. 20, no. 5, pp 1136-1144, 1985.

- [10] G. Hua, C. S. Leu and F. C. Lee, "Novel Zero Voltage Transition PWM Converters", PESC '92 Conference Record, pp 55-61, 1992.
- [11] J. G. Cho, F. C. Lee, "Novel Zero Voltage Transition PWM dc/dc Converter for High Power Application", APEC '96 Conference Record, pp 143-149, 1996.

 저 자 소 개



金元鎬(正會員)

1968년 6월 20일생. 1991년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 ~ 현재 한국전기연구소 전력변환연구팀 연구원.

趙貞九(正會員) Journal of Electrical Engineering and Information Science, vol. 1, no. 3, pp. 79-86, September, 1996



金鍾洙(正會員)

1959년 12월 26일생. 1982년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 경남대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정. 1982년 ~ 현재 한국전기연구소 전력변환연구팀 선임연구원.

林根熙(正會員) Journal of Electrical Engineering and Information Science, vol. 1, no. 3, pp. 79-86, September, 1996