

Switched Reluctance Motor 구동용 Converter의 무손실 Snubber

김원호 하성운 임근희
한국전기연구소

A lossless snubber for SRM converters

Wonho Kim Sungwoon Ha Geunhie Rim
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - The effect of the snubber circuit is to control the voltage spikes applied across switching devices during turn-off.

This paper describes a loss-less snubber of a converter for Switched Reluctance Motors. The feasibility of the snubber circuitry is experimentally verified using a laboratory prototype.

1. 서론

Switched Reluctance Motor(이하 SRM)는 회전력을 얻기 위해 상 권선에 순차적인 pulse 형태의 전압을 가하며 특히, 저속운전 시에는 전류 제한을 위해 이 pulse 형태의 전압을 고속으로 chopping 하므로 스위치 off 시에 발생하는 전압 spike를 억제하기 위하여 스위치 양단에 turn-off snubber가 필요하다.

스위치 off 시의 높은 전압을 억제하기 위해 SRM 구동용 converter에 주로 사용하는 snubber는 RC 및 RDC 두가지의 snubber가 주로 사용되나 전력 소비 측면이나 효율면에서 RDC snubber가 더욱 유리하다. 특히, dc-link 전압이 높거나 스위칭 주파수가 높을 경우에 RDC snubber는 방전 시에만 저항을 통해 에너지를 방출하므로 훨씬 유리한 장점을 지니고 있다. 그러나, RDC snubber도 결국은 저항을 통한 에너지 방출의 형태를 취하며 스위칭 주파수가 높은 경우에는 그와 비례하는 스위칭 손실이 발생하므로 효율면에서 불리한 단점을 지니고 있으므로 본 연구에서는 커패시터만으로 스위치 turn-off 시의 과전압을 효율적으로 제거함과 동시에 무손실 효과를 얻을 수 있는 snubber를 소개한다. 이 snubber는 SRM의 한 상을 구성하는 스위치에 한 개의 커패시터를 사용하므로써 아주 간단하므로 제작상의 유리한 점을 지니고 있다. 본 논문에서는 이 snubber의 동작을 구체적으로 입증하기 위해 RC 및 RDC snubber의 경우와 비교하여 분석해보며 상권선에 인가되는 전압에 따라 실험적으로 그 효율성을 분석하였다.

2. SRM의 동작원리

SRM의 동작은 고정자 회로의 전류를 회전자 위치에 맞추어 단순한 형태의 on, off 제어를 행하므로 인해 회로에 의해 필요한 고속스위칭용 반도체 소자의 개발과 제어기술이 요구된다.

고정자의 권선은 대각선 방향으로 위치한 고정자의 두 극에 한 상의 코일이 직렬로 연결되어 있으며 이 두 고정자극이 여자되면 전자석원리에 의해 가장 가까운 회전자극이 그 두 고정자극들과 일직선이 되는 방향으로 움직인다. 이 때, 다른 회전자극들은 다

른 고정자극들과 일직선 상태에서 벗어나게 된다. 이러한 방법으로 고정자권선을 차례대로 여자시키면 회전자가 그에 따라 연속적인 회전력을 얻게 되는 것이다. 고정자의 돌극 대 회전자의 돌극 위치가 변하면 자기회로의 reluctance(또는, inductance)가 변하게 되며 이 돌극들이 일직선상에 있을때 reluctance는 최저값을 가진다. 이러한 특성때문에 Variable Reluctance Machine이라 불려 지기도 한다.

SRM의 저속도 운전시에 peak 전류를 제한하기 위하여 현재 광범위하게 사용되는 방법은 스위칭 소자의 고속 스위칭을 통하여 모터의 상권선에 인가되는 구형파 형태의 전압 파형을 고속 스위칭을 통하여 on, off 제어를 하는데 이를 chopping 작용이라고 한다. 그러나, 이 chopping 작용은 구동 시스템 내에 여러가지 나쁜 영향을 미칠 수 있다. Chopping 작용이 미치는 가장 큰 영향은 고속 스위칭에 의한 스위칭 손실이며 이 외에도 발생할 수 있는 문제는 고속스위칭을 위한 스위치 자체의 부담이나 chopping간의 짧은 시간 내에 발생할 수 있는 제어 불능인 여러가지 회로적 조건에 의해 불규칙적인 토오크나 소음이 발생하는 등의 문제점이 따른다. 이러한 chopping 작용은 결과적으로 큰 값을 갖는 DC 입력전압을 hard switching하는 동작이므로 스위칭 시에 높은 전압 spike가 발생한다.

고속운전 시에는 SRM의 제어가 점도각과 도전각에 의해 이루어진다. 이 때에는 역기전력이 인가 전압보다도 높아 상대적으로 전류의 상승률이 낮고 또한, inductance의 변화율도 커지므로 전류의 상승율을 저하시키는 또다른 요인으로 작용한다. 따라서, commutation 시절 이전부터 전류가 감소될 수 있으므로 고속에서 더 많은 전력을 얻기 위해서는 점도각을 앞쪽으로 당겨 정 토오크 구간내에서 충분한 크기의 전류가 확보되도록 한다. 도전각은 부가 토오크의 변화에 맞춘다. 도전각을 알맞게 조정하여 펄스전류가 부 토오크 구간(negative torque region)에서는 충분히 작도록 하여 잔류전류에 의한 부토오크를 최소화하여 시스템 효율의 저하를 막아야 한다. 고속 운전 시에는 chopping 작용이 행해지는 저속도 운전의 경우 만큼은 아니지만 결국, pulse 형태의 전압을 스위칭함으로써 인한 전압 spike 발생 가능성은 여전히 남아있다.

3. 효율에 미치는 snubber의 영향

SRM 구동을 위한 converter에 있어서 snubber에 의한 효율 저하 문제도 상당히 중요한 요소가 된다. 특히, snubber 회로가 부가된 스위칭 소자에 있어서 스위칭 주파수가 높아질 수록 손실은 더욱 증가하게 되며 SRM과 같이 높은 DC 입력전압을 chopping하는 경우에는 더욱 문제가 심각해질 수 밖에 없다. 본 절에서는 snubber에 의해 시스템에 미치는 영향에 대하여 자세히 알아보고 RC 및 RDC snubber를 기준으로한 손실에 관해 설명한다.

3.1 RC 및 RDC Snubber

간단한 구조 때문에 turn-off snubber로서 가장 많이 사용되는 것이 RC 및 RDC snubber이다. 그림 1.은 가장 대중화되어 있는 SRM converter 중의 하나인 asymmetric bridge converter의 단일 leg에 RDC snubber가 연결된 형태를 나타낸 그림이다.

그림의 스위치 S1과 S2의 스위칭 동작에 따라서 snubber의 동작은 두가지로 나뉘어진다.

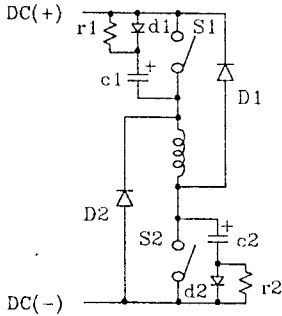


그림 1. Asymmetric bridge converter의 단일 leg에 연결된 RDC snubber

먼저, snubber의 충전 mode로서 S1과 S2가 turn-off 동작을 하는 순간 snubber capacitor c1과 c2를 통하여 전압이 충전되는 동작이다. 이 때, 충전 loop는 입력 DC(+) - d1 - c1 - 권선의 순으로 c1에 spike 전압 성분이 충전되며 권선 - c2 - d2 - 입력 DC(-)의 순으로 역시 c2에 spike 전압이 충전된다.

다음은 snubber 방전 mode로서 S1과 S2가 turn-on 동작을 하는 순간 snubber capacitor c1과 c2에 충전되었던 전압이 저항을 통하여 소비전력으로 방출되는 동작이다. 이 때, 방전 loop는 입력 c1(+) - r1 - S1 - c1(-)의 순으로 c1의 전압을 소비하며 c2(+)- S2 - r2 - c2(-)의 순으로 역시 c2의 전압이 방전된다.

스위치 off 시의 높은 전압을 억제하기 위해 SRM 구동용 converter에 주로 사용하는 snubber로서는 RDC type이 전력 소비 측면이나 효율면에서 RDC snubber가 더욱 유리하다. 특히, dc-link 전압이 높거나 스위칭 주파수가 높을 경우에 RDC snubber는 방전 시에만 저항을 통해 에너지를 방출하므로 훨씬 유리한 장점을 지니고 있다.

3.2 Snubber의 설계

Snubber의 component를 선정하는데 있어서는 RC 시정수가 스위치의 최소 on 시간보다 1/3 이하의 조건이 만족되어야 한다. 이는 snubber에 충전된 전압이 완전히 방전이 되고난 이후에 스위치가 turn-off되면 이에 의해 발생하는 전압 spike 성분을 억제할 수 있게 하기 위함이다. 또한, snubber의 동작이 효과적으로 이루어짐과 동시에 스위칭 소자의 손상을 막기 위하여 snubber의 구성소자들은 되도록 스위치에 근접하여 연결되어지도록한다.

또한, snubber capacitor는 ESR(Equivalent series resistance)과 ESL(Equivalent series inductance)의 크기가 작은 것을 선택하는 게 좋으며 저항은 무유도저항을 쓴다. 그리고, RCD snubber를 사용할 경우에 diode는 fast recovery type을 사용해야 한다.

이상의 조건들을 기준으로 간단한 snubber의 설계법을 설명하자면 다음과 같다.

- 1) 최소값을 갖는 capacitor의 선택

$$C_{min} = \frac{i_{max} t_c}{V_{max}} \dots\dots\dots (1)$$

이 때, V_{max} , i_{max} 는 turn-off 시 스위칭소자의 최대 허용전압 및 전류이며 t_c 는 최대전압의 지속시간이다.

- 2) 최대저한값의 설정

$$R_{max} = \frac{t_{ain}}{3 C_{min}} \dots\dots\dots (2)$$

이 때, t_{ain} 은 스위칭소자의 최소 turn-on 시간이다.

- 3) 저항에서 소비되는 전력을 계산

$$W = i_{max}^2 R_{max} \dots\dots\dots (3)$$

결론적으로, 스위칭 주기동안 정항 R에서 소비되는 손실은 다음과 같다.

$$P_{sn} = \frac{1}{2} C_{min} V_{max}^2 f_s (\text{RDC snubber}) \dots\dots\dots (4)$$

$$P_{sn} = C_{min} V_{max}^2 f_s (\text{RC snubber}) \dots\dots\dots (5)$$

이 때, f_s 는 스위칭 주파수. 위의 식 (4)와 (5)에서 비교할 수 있듯이 RDC snubber가 효율 측면에서 우수함을 알 수 있다.

그러나, RDC snubber도 결국은 저항을 통한 에너지 방출의 형태를 취하며 스위칭 주파수가 높은 경우에는 그와 비례하는 스위칭 손실이 발생하므로 효율면에서 불리한 단점을 지니고 있다.

4. 무손실 snubber 및 실험결과

4.1 무손실 snubber의 구조

본 연구에서는 커패시터만으로 스위치 turn-off 시의 과전압을 효율적으로 제거함과 동시에 무손실 효과를 얻을 수 있는 snubber를 소개한다. 이 snubber는 SRM의 한 상을 구성하는 스위치에 한 개만의 커패시터를 사용하므로써 아주 간단하므로 제작상의 유리한 점을 지니고 있다.

그림 2.는 역시 SRM converter 중의 하나인 asymmetric bridge converter의 단일 leg에 capacitor만으로 구성된 snubber가 연결된 형태를 나타낸다.

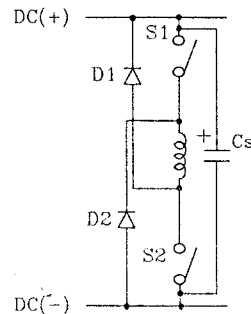


그림 2. Asymmetric bridge converter의 단일 leg에 연결된 무손실 snubber

이 snubber는 스위칭 소자가 동시에 turn-off하면 Cs 양단을 통하여 spike 전압 성분을 충전하며 스위치가 turn-on될 경우에는 Cs 양단을 통하여 충전되었던 에너지가 SRM의 상권선을 여자시키기 위한 에너지로 다시 반환되는 동작을 한다. 따라서, 어떠한 경우에 있어서도 에너지 손실이 발생할 수 있는 mechanism은 없다.

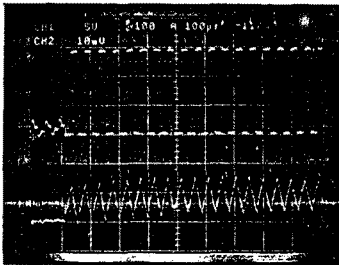
4.2 실험 결과

실험에 사용된 SRM의 정격은 다음과 같다.

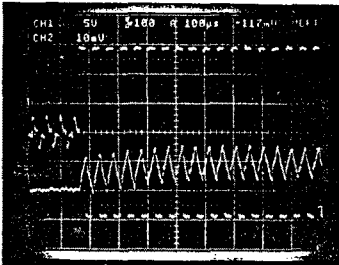
Pole configuration : 8/6
 Stator phase : 4
 Rate output : 150 W
 Input voltage : AC 110 V
 Rated speed : 3600 RPM

그림 3.의 (a)와 (b)는 스위칭 소자에 RDC snubber를 사용했을 경우, 각각 스위치와 상권선에 인가되는 전압과 전류의 파형을 나타낸 그림이며 그림 4.의 (a)와 (b)는 무손실 snubber를 사용했을 경우에 각각의 스위치와 상권선에 인가되는 전압 및 전류의 파형을 나타낸 그림들이다.

두개의 경우를 파형으로 비교해볼 때, 무손실 snubber의 경우에 있어서 RDC snubber와 전압 spike를 억제하는 능력에 있어서 거의 똑같음을 알 수 있다. 그러나, 무손실 snubber의 사용에 있어 고려해야 할 점은 DC 전압과 parasitic inductance 성분에 의해 oscillation이 발생할 수 있으며 대용량 converter에 있어서는 그 사용 여부가 다소 문제점이 될 수 있다.

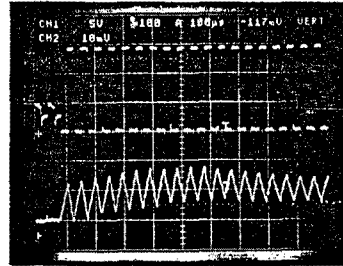


(a) 스위칭 소자 양단의 전압 및 전류 파형

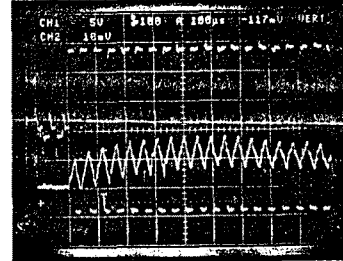


(b) 상권선 양단의 전압 및 전류 파형

그림 3. RDC snubber를 사용했을 경우, 각각 스위치와 상권선에 인가되는 전압과 전류의 파형



(a) 스위칭 소자 양단의 전압 및 전류 파형



(b) 상권선 양단의 전압 및 전류 파형

그림 4. 무손실 snubber를 사용했을 경우, 각각의 스위치와 상권선에 인가되는 전압 및 전류의 파형

5. 결론

무손실 snubber에 관련한 이상의 결과에서 얻을 수 있는 잇점은 다음과 같다.

- 1) 커패시터만으로 스위치 turn-off 시의 과전압을 효율적으로 제거할 수 있으므로 제작 생산적인 측면에서 유리하다.
- 2) 강제로 충전에너지를 소비시키는 저항이 없으므로 무손실 효과를 거둘 수 있다.
- 3) 스위칭 주파수에 따르는 손실의 변동이 없다.

참고문헌

1. G. H. Rim, W. H. Kim - Korea Electrotechnology Research Institute, Kyung Nam, Korea, "Buck-stage Based Choppingless Converter for Switched Reluctance Motors", Patent pending.
2. G.H. Rim et al., "A Novel Converter Topology for Switched Reluctance Motor Drives Improving Efficiency and Simplifying Control Strategy", to be presented in PESC '94 in Taipei, Taiwan, Jun. 20-24, 1994
3. G. H. Rim et al., "A Choppingless Converter for a Switched Reluctance Motor with Unity Power Factor and Sinusoidal Input Current", to be presented in PESC '94 in Taipei, Taiwan, Jun. 20-24, 1994