

## 부분공진 소프트 스위칭기법을 적용한 스윛치드 리럭턴스 모터의 구동회로

김 지수 이 병두 김 성두 정 기현\*\* 강육중\* 고희석\* 이수훈\* 이현우\*  
Daewoo중공업 신화산업\*\* 경남대학교\*

### Converter for Switched reluctance Motor Applied Soft Switching Mode by Partial Resonant Method

J.S.Kim, B.D.Lee, S.D.Kim, G.H.Jung\*\*, U.J.Kang\*, H.S.Koh\*, S.H.Lee\*, H.W. Lee\*  
Daewoo Heavy Industries, Shinwha Industries\*\*, Kyounghnam University\*

**Abstract** - Switched Reluctance Motor is simple structure which used Accel/Decel application field because of cheap cost and High efficiency.

For driving this motor, it is essential to need position sensor and driving converter, so, many topology and sensor have been studied untill now.

Asymmetric Bridge Converter which has been known for the best control and efficiency is used chopping to control current of motor coil according to changing of motor speed.

But this is embossed as a fault because it come to bring switching loss due to rapid switching frequency.

In this paper, I applied to Soft Switching Mode by Partial Resonant Method to compensate these fault and to show the usability of low switching device.

### 1. 서 론

SRM(Switched Reluctance Motor)은 현재 국내에서도 연구가 일부 진행되고 있는 모터의 일종으로서, 스위칭 제어장치가 결합된 특수형태의 모터로 분류되어진다. SRM은 고정자와 회전자 모두가 돌극형 구조를 하고 있으며 각기 다른 개수의 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. SRM의 구동원리는 고정자의 각 상을 순차적으로 여자시킬 때 고정자와 쇄교자석이 최대가 되려는 방향으로 회전자가 회전하려는 특성을 이용한 것으로 회전자의 위치에 따라 고정자의 해당 권선을 여자 시킴으로서 토크를 얻는 방식이다.

즉, 스위칭 소자를 ON, OFF시켜 해당권선에 전압을 인가하여 전류의 크기를 조절함에 따라 그때의 전류 크기와 비례하는 쇄교 자속수에 의해 가변속 운전이 가능하게 되는 것이다.

SRM은 구조상의 특징으로 인해 제작 생산적인 측면에서 상당한 이점을 지니고 있으며 또한, 직류모터와 같은 기동특성이 좋고 토오크가 큰 반면에 정기적으로 부러쉬를 교환하는 등 유지, 보수의 필요성이 적으며 유도전동기와 비교할 때에는 구동장치의 구조가 간단하며 단위 체적당 토오크, 효율 및 컨버터의 정격 등 많은 부분에서 우수한 특성을 지니고 있다.

또한, 광범위한 변속범위와 초저속 운전을 요구하는 부분에 있어서는 아주 우수한 특성을 나타내므로 화학공장의 혼합기와 원심 분리기 등에는 아주 적합하다고 할 수 있으며 그 밖의 많은 분야에서 미국이나 유럽 각지의 선진국들을 중심으로 사용분야가 증가 일로에 있다.

그런, SRM을 사용함에 있어서는 반드시 구동을 위한

컨버터가 있어야 하며 회전자의 정확한 위치를 검출하기 위한 위치센서가 필요하다는 단점 때문에 이와 관련한 컨버터의 효율향상이나 센서없는 구동에 관한 연구가 현재에도 많이 진행되고 있다.

지금까지 제어 성능과 효율면에서 가장 우수한 것으로 알려진 비대칭 브릿지 컨버터(Asymmetric Bridge Converter)는 Motor의 속도변화에 따른 상권선의 전류의 크기를 제어하기 위해서 초평의 원리를 사용했으나 이것은 빠른 스위칭주파수에 의한 스윛칭 손실이 가장 큰 단점으로 부각되었다.

본 논문에서는 부분공진형 소프트 스위칭 기법을 사용하여 이러한 단점을 보완하고 모터측 권선에는 저속스융칭 소자의 사용가능성을 제시함으로써 원가 절감과 스위칭 손실에 따른 시스템효율의 향상시킬수 있는 새로운 컨버터의 토폴로지를 제안하고 입증하고자 한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 SRM의 기본 특성

SRM 고정자 권선의 단방향 전류를 제어하기 위하여 많은 컨버터 토폴로지가 제안되어 왔는데 이는 컨버터의 비용절감과 성능향상화를 두 전제로 한다. 그런데, 이 두 전제는 상충부분이 컨버터의 선택에 있어서 서로 상충되는 양면이 되고 있다.

즉, 한 상에 한 개의 스위칭 소자를 가지고 컨버터들은 주로 소자와 부품수의 최소화를 목적으로 하여 저성능을 요하는 곳에 사용되어지며 상당 두 개의 소자를 가지는 컨버터는 비용증가에도 불구하고 성능이 뛰어나고 제어 방식의 다양성을 추구할 수 있으므로 인해 많이 사용되는 토폴로지이다.

이 절에서는 지금까지 알려져 있는 여러 종류의 컨버터 토폴로지중에서 가장 제어특성이 용이한 Asymmetric bridge 컨버터에 대한 최소 정격사항과 중요 제어성능을 정리하고자 한다.

#### 2-1-1 Asymmetric bridge 컨버터

그림2.1는 상 당 두 개의 스위치와 다이오드를 가지는 Asymmetric bridge 컨버터를 나타낸 그림으로서 크게 3단계의 동작 모우드를 가진다.

모우드 1 : 두 스위치를 모두 Turn-ON시켜 DC 전원 전압을 권선에 인가함으로써 여자시키는 단계이다.

모우드 2 : 권선에 전류가 흐르고 있을 때 제어방식에 따라서 한 개의 스위치를 Turn-OFF하여 전류가 다이오드와 스위치 및 권선을 순환하게 하거나 또는, 두 개의 스위치를 모두 Turn-OFF하여 권선전류가 두 개의 다이오드를 통해서 흐르도록 하여 전원측으로 에너지를 될 수 있다는 것이다. 실제 저속운전에서는 모터에 발생되는 역기전력이 작으므로 상대적으로 큰 입력전압이 전류상승의 증가 요인이 되며 또는 모터가 저속으로 회전 할 경우에는 고정자와 회전자의 위치변화에 의한 인덕턴스 상승률이 느리므로 이 또한 전류 상승률 증가의 큰 요인으로 작용하게 된다.

환원시키는 방법으로 결국은 두가지 방법모두 전류의 감소를 목적으로 한다.

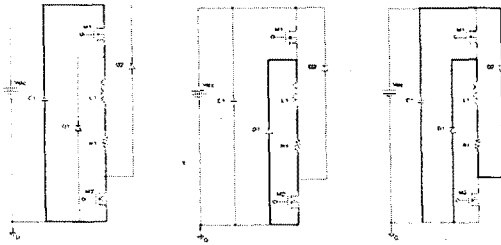


그림 2.1 비대칭 브릿지 컨버터 모드 1, 2 & 3

모우드 3 : 여기서 두 스위치를 동시에 Turn-OFF하여 轉流시키는 단계인데, 해당 상의 인덕턴스가 부의 기울기를 가지기 전에 전류를 완전히 소멸시키는거나 아주 적은 량이 되도록 해야한다.

그렇지 않으면 부의 토오크를 발생시키게 되 이 모터의 평균토오크가 줄어들게되며 에너지 변환효율도 감소하게 된다.

이 컨버터의 특징이라고 할 수 있는 것은 SRM 컨버터 중에서 제어의 다양성이 가장 뛰어나며 각상의 전류제어가 독립적이어서 두상의 전류중첩이 가능하다.

고전압, 대용량에 적합하며 스위치의 정격전압이 상대적으로 낮다.

단점으로는 상당 스위치가 수가 두 개라도 점과 그에 따르는 제어 및 드라이브 회로의 증가, 상단 스위치에 대한 드라이브의 전원이 각각 절연되어야 하는 번거로움 등이 있다.

### 2.1.2 Asymmetric Converter Simulation

그림 2.2는 비대칭 브릿지 컨버터의 RPM변화에 따른 상전류, 상전압, 그리고 스위칭 주파수를 나타내는 파형이다.

결과에서 보여지는 바와 같이 현재까지 제안되어진 대부분의 컨버터 토폴로지는 입력측에 전파전류를 거쳐 캐패시터에 의해 평활된 전원이 있으며 그 후단에 실제 스위칭을 행하는 컨버터가 SRM의 상권선에 연결되어진 형태이다.

그러나 이렇게 입력측의 전압을 일정하게 유지 시켜 높은 상태에서 모터의 가변속 운전을 시키는데에는 여러 가지 문제점이 따르게 된다.

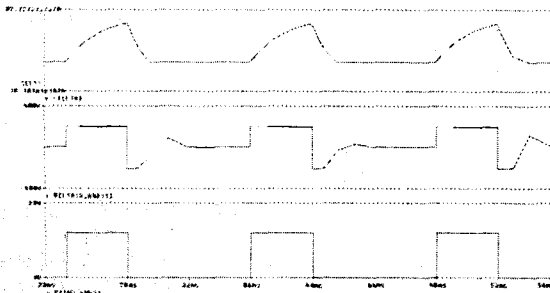


그림 2.2 비대칭 브릿지 회로 시뮬레이션 파형(600RPM)

시뮬레이션 결과에서 나타난 바와 같이 저속 RPM에서는 높은 상전류가 흐르게 되고 고속으로 갈수록 상전류의 값이 점차로 낮아지게 됨을 볼 수 있다. 따라서 이러한 큰 전류상승률을 막기 위해 주로 쇼핑작용으로 전류값을 제한해야하는데 이럴 경우, 스위칭 동작에 의한 손실과 고주파 스위칭에 의한 부담이 커져 시스템의 효율

이 떨어지게 된다.

SRM제어를 위해 현재까지 제안되어진 많은 토폴로지에 대해 살펴 보았을 때 가장 큰 문제점이라고 할 수 있는 것은 저속운전시의 전류제안을 위해 고속스윙칭을 사용하여 쇼핑을 하지 않으면 안 된다 것이며 위의 시뮬레이션 결과에 따라 분명히 고찰되어질 수 있겠다.

이러한 쇼핑동작의 필요성은 항상 고정된 입력전압으로 말미암아 모터의 저속운전시와 같이 큰 전압을 필요치 않은 경우는 고정자의 상을 여자시키는 경우에 권선에 흐르는 과대한 전류를 방지하기 위하여서이다.

### 2.2 부분공진 소프트 스위칭

본 논문에서 제안하는 부분공진 소프트 스위칭 (PRSS: Partial Resonant Soft Switching)회로 토폴로지를 그림 2.3에 나타낸다.

부분공진 회로의 방식은 ZCS 공진 방식과 ZVS 공진 방식을 조합한 기능을 가지며, 회로구조는 스너버 소자들의 배치로 구성된다고 할 수 있다. 스위칭 소자 S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>와 병렬로 공진용 콘덴서 C<sub>r</sub>이 연결되어 있으며, 직렬로 공진용 인덕터 L<sub>r</sub>이 접속된다.

스위치의 턴-온, 턴-오프 시에 대한 각 파라미터의 전압 및 전류파형은 그림 2.4과 같으며, 스위치 동작을 살펴 보면 다음과 같다.

• SW-ON시 : 초기조건으로 인덕터 L<sub>r</sub>의 전류 I<sub>L</sub>는 영이며, 콘덴서 C<sub>r</sub>에는 전압 V<sub>c</sub>로 충전되어 있다고 가정하면, 스위치 온 직전의 인덕터에 흐르는 전류 I<sub>L</sub>는 영이므로 스위치 S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>의 온 동작은 영전류 스위칭을 이룬다.

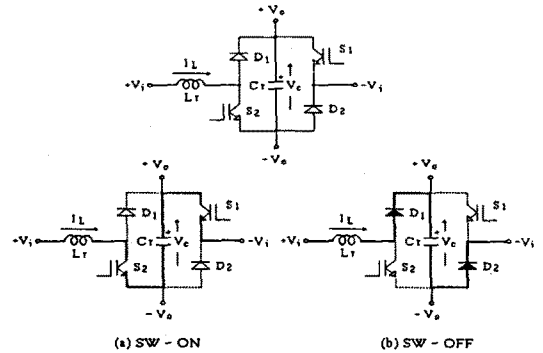


그림 2.3 PRSS 회로 토폴로지

• SW-OFF시 : 스위치 오프 직전의 조건으로 콘덴서 C<sub>r</sub>의 전압 v<sub>c</sub>는 영이며 인덕터 L<sub>r</sub>에는 전류 I<sub>a</sub>가 흐른다고 가정하면, 스위치 오프 직전의 콘덴서에 전압은 영이므로 스위치 S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>의 오프 동작은 영전압 스위칭을 이룬다. 스위치의 오프 동작에 의해서 다이오드 D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>가 도통되고 LC 직렬공진회로가 다시 형성되어 콘덴서 전압 v<sub>c</sub>는 증가하고, 인덕터 전류 i<sub>L</sub>는 에너지를 방출한다.

이상에서와 같이 공진회로는 공진 한주기 동안 지속적으로 이루어지지 않고 스위치 턴-온과 턴-오프 시에 공진주기 일부분에서 부분적으로 형성되므로 "부분공진 소프트 스위칭 기법"이라 한다. 이것은 공진 소자들의 용량분담과 스트레스를 줄이고 출력전류가 증가할 경우 공진 손실을 감소 시켜준다. 그리고 부분공진의 기법에 의해 사용된 스위치들은 소프트 스위칭으로 되므로 시스템의 효율을 증대시키고 dv/dt, di/dt에 의한 전자유도 잡음 등을 줄일 수 있다.

제한한 부분공진 회로의 구성을 보면 사용된 공진용 인덕터는 일반적인 승압형 컨버터에 사용되는 에너지 축적용 인덕터로 대체할 수 있으며, 공진용 콘덴서는 스위칭

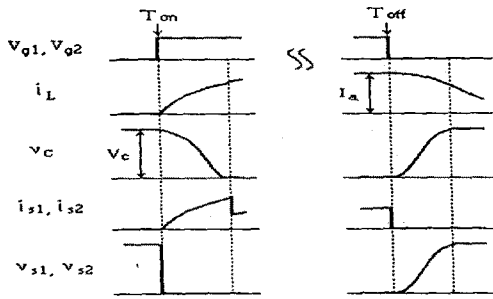


그림 2.4 PRSS 회로의 동작파형

모드 전력변환기에 이용되는 스너버 회로의 스너버 콘덴서로 대체할 수 있다. 그러므로 인덕터는 승압과 공진용으로 이용되고 스너버 콘덴서가 공진용 소자로 이용됨으로써 회로구조가 간단하다. 그리고 회로내에 사용된 제어소자들의 적정배치로 인해 소자들은 용량분담이 줄고, 제어기법이 간단하다. 또한 스너버 콘덴서는 공진회로부의 동작에 의해 콘덴서에 축적된 에너지를 전원측으로 회생시켜 무손실 스너버 콘덴서로 되어 변환기의 효율을 더욱 증대시키는 장점이 있다. 스위칭 주파수를 높게 하므로써 아래의 잇점들이 주어진다.

- ① 고조파의 감소
- ② 리플전류의 감소
- ③ 소음 경감
- ④ 전동기 부하에서 토크 리플이나 발열의 억제
- ⑤ 제어성의 향상
- ⑥ 소형·경량화

### 2.3 부분공진형 소프트 스위칭 기법을 적용한 컨버터

그림 2.5에 부분공진형 소프트스위칭 기법을 이용한 SRM 모터의 컨버터에 대한 회로도도 나타낸 것이다. 새로이 제안하는 컨버터방식은 그림에서 보는 바와 같이 입력전압원과 SRM 컨버터 사이에 부분공진형 소프트스위칭을 위한 스위치(회로도에서 사각형으로 둘러 싸여진 부분)가 있는 구조이다.

상권선 여자시 속도와 무관하게 평활 콘덴서에 알맞은 전압을 승압시킬 수 있으므로 그에 병렬로 연결된 SRM 모터의 상권선에 연결된 스위치에 의해 모터의 회전에 따라서 필요한 전류만이 권선에 흐를 수 있도록 전압을 공급하는 역할을 하게 되는 것이다.

이 부분공진형 소프트 스위칭기법으로 고정된 입력측의 전원에 관련된 문제를 해결 할 수 있으며 SRM 컨버터 사이에 입력전압 크기를 가변하여 모터의 속도에 알맞은 전압을 모터의 고정자에 권선에 인가하는 방식으로 되어 있다.

#### 2-3-1 시뮬레이션

그림 2.6-7에서 파형은 위에서부터 모터 상권선의 전압 파형, 공진 콘덴서의 전압 파형, 모터 상권선에 흐르는 전류 파형, SRM 상권선에 연결된 스위치의 온-오프 신호를 나타내었으며 300RPM에서 1500RPM까지의 각각의 파형들을 출력하여 비교 검토 하였다.

이 시뮬레이션에서는 도전각과 점화각을 속도(스위칭 주기) 추기와 비례하도록 하여 얻은 결과이며 실제의 모터 제어에서는 모터측에 엔코더나 레졸버 등으로 모터회전자의 위치를 감지하고 F/V변환기 등으로 모터의 상권선에 흐르는 전압을 기준 전압과 비교하여 도전각과 점화각을 제어하는 형식을 취하고 있으므로 약간의 결과적 차이가 있을 것이나 이 논문에서 구현하고자 하는 "고정된 입력전원에 따른 상권선에 흐르는 전류의 제한"에는 많은 영향을 주지 않으므로 시뮬레이션 결과는 타당하다고 할 수 있다.

이상의 결과에서 RPM의 변화에 따른 모터 상전류의 변화는 저속과 고속의 모터 상태의 변화에도 어느정도 비례적으로 나타남을 볼수 있으며 앞서 제안한 컨버터 토폴로지의 구상과 일치됨을 볼수 있다.

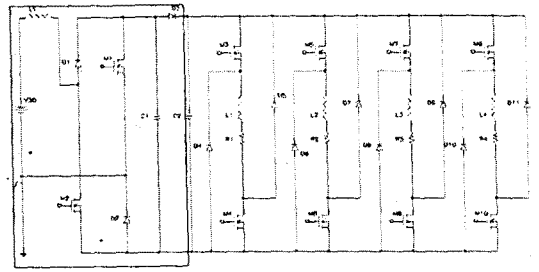


그림 2.5 부분공진형 소프트 스위칭 기법을 이용한 SRM 컨버터의 전체 회로도

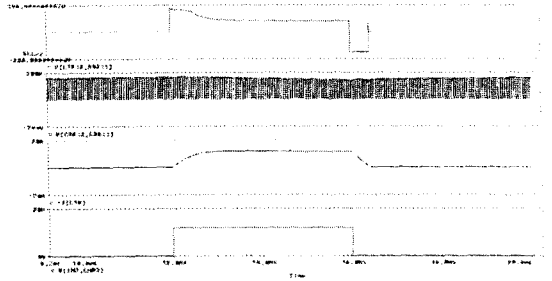


그림 2.6 부분공진형 소프트 스위칭 기법을 이용한 SRM 컨버터의 각 시뮬레이션 파형(600RPM)

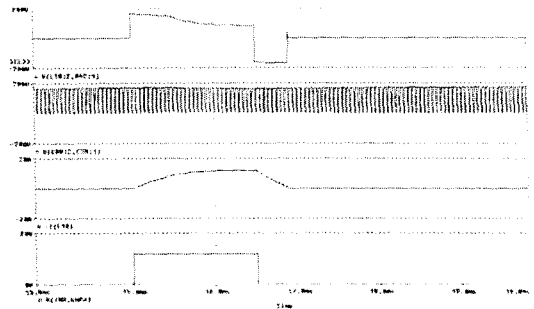


그림 2.7 부분공진형 소프트 스위칭 기법을 이용한 SRM 컨버터의 각 시뮬레이션 파형(1500 RPM)

## 3. 결 론

Switched Reluctance Motor는 넓은 운전영역에서 효율이 높은 전동기이다. 그러나 초평여자방식에서 발생하는 스위치 손실은 상대적으로 효율을 감소시키게 된다. 본 논문에서는 기존의 컨버터 토폴로지와 제시된 토폴로지의 관련 수식을 검토하고 시뮬레이션 함으로써 각각의 속도 및 토크에 따라 적절한 전압을 상권선에 인가되면 효율이 상승됨을 알수 있었으며 그러한 시스템을 구현하기 위한 새로운 토폴로지를 제안하고 시뮬레이션 하였다.

#### [참고 문헌]

- (1) Takashi Kenjo: "Stepping motors and The microprocessor control", Clarendon Press, 1993
- (2) 梨木政行 外3名 : "スリット回転子を用いたフラックスリア型リラクタンスモータの磁界解析と実験", T.IEE Japan, Vol.116-D, No.6, 1996
- (3) 大野脂義 外2名 : "スイッチドリラクタンスモータの動作性に関する実験", 電気学会回機研究会資料 RM-96-5 1995
- (4) T.J.E Miller : "Switched Reluctance Motor and Their Control", Oxford Press, 1993