

스위치드 릴럭턴스 전동기 구동을 위한 새로운 공진형 컨버터

*김정성, °김현중, *양이우, *김영석
*인하대학교, °유한전문대

A Novel Resonant Converter for driving Switched Reluctance Motor

*Jung-sung Kim, °Hyun-joong Kim, *Iee-woo Yang *Young-seok Kim,
*Inha University, °Yuhan Junior Colloge

Abstract

In order to obtain better performance for a SRM(switched reluctance motor) drive, the commutation from one phase to another must be as fast as possible. In this paper a novel converter for SRM drive is proposed, which can accelerate the turn-off and turn-on time by using two capacitors to form a resonant circuit with the motor inductance. Two capacitors recover rapidly stored energy in the off going phase and establish rapidly the current rising in the on going phase. As a result, the current tail can be shortened and the dwell angle in the positive torque region can be extended. And comparing with the asymmetric converter, this converter has higher energy availability in energy conversion process and less number of switches.

1. 서론

SRM(Switched Reluctance Motor)는 회전자나 고정자에 영구자석이 없이 각각에 극을 갖는 이중 돌극구조를 가지고, 회전자와 고정자사이의 자기저항(Reluctance)의 변화에 의하여 토크가 발생하는 전동기이다[1].

SRM은 구조적으로 유도 전동기나 동기 전동기보다 구조가 간단하며 기동 토크가 크고 가변속이 용이할 뿐만 아니라 속도 변화 범위가 매우 넓으며 신뢰도가 높다는 장점이 있다. 그리고

SRM은 한 방향의 전류만으로 구동이 가능하므로 구동장치는 적은 수의 전력소자를 이용하여 구성할 수 있어서 경제적이다. [2]

8/6 SRM의 시스템 개략도는 그림1과 같다.

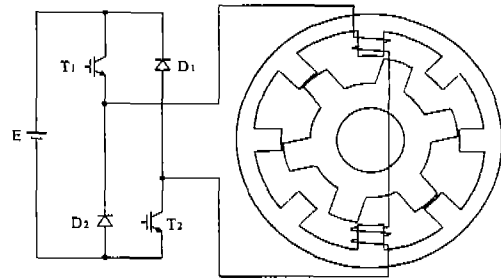


그림 1 SRM Drive system (8/6)

본 논문에서는 범용으로 사용하는 비대칭 컨버터보다 스위칭 소자수를 2개 줄이고(8/6 컨버터 기준), 에너지 이용률을 더 높일 수 있는 새로운 컨버터를 제안하였다. SRM의 구동에서 고속이나 중부하시에는 더 많은 토크를 요구한다. 이를 위해서는 정토크영역에서의 dwell 각을 확장해야 하는데, 스위치 On시 전류의 상승시간과 스위치 Off시 전류의 소호시간이 제약조건이 된다. 제안한 컨버터에서는 상권선과 공진을 이루도록 캐패시터를 사용하여 전류의 상승시간과, 소호시간을 가능한 줄이도록 하였다. 이를 통해 토크발생영역의 이용폭을 보다 넓게 할 수 있다. 이에 대한 타당성을 simulation을 통해 확인한다.

2. SRM의 토크발생

SRM의 회전자 각에 따른 토크의 발생은 그림 2와 같으며 순시 토크 식은 식(1)과 같다

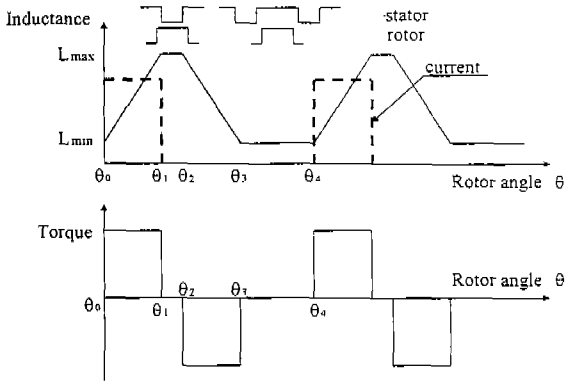


그림 2 회전자 각에 따른 토크발생

$$T(\theta, i) = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad (1)$$

(i : 전류, L : Inductance, θ : rotor angle)

식(1)에서 보는 바와 같이 토크는 인덕턴스의 변화율에 비례하고 전류의 제곱에 비례한다. 그런데 인덕턴스의 변화율이 SRM의 회전자극호와 고정자극호에 의해 결정되므로 결국 토크의 크기는 전류의 크기에 따라 크게 달라진다. 고속이나 중부하시에서는 보다 많은 토크가 필요하게 되고 이는 인덕턴스의 변화율이 positive인 구간(정토크 영역)에서 보다 많은 전류를 확보해야 한다. 즉, Dwell angle을 확장해야 하는데 스위치 off시 전류의 tail과 스위치 On시 전류의 상승시간이 제약조건이 된다. 전류의 tail이 부토크영역을 침범하지 않도록하기 위해서 정토크의 사용영역은 상대적으로 줄어들게 된다. 그리고 전류의 상승시간 때문에 advance angle을 두고 전류를 흘리게 되고, 이 advance angle동안에서는 인덕턴스의 변화율이 0이므로 토크가 발생되지 않는다.

그러므로 만일 전류의 Off시 tail구간을 줄일수 있다면 보다 넓은 정토크 사용영역을 확보하게 되고, On시의 상승시간을 짧게 할 수 있다면 advance angle을 짧게 하여 토크를 발생시키지 못하는 전류를 줄이게 되므로 에너지 효율을

증대할 수 있다.

3. 제안하는 Converter

3.1 제어원리

그림 3의 비대칭 컨버터보다 빠른 전류시간을 얻기 위해 그림 4와 같은 공진형 컨버터가 고안되었었다. [3]

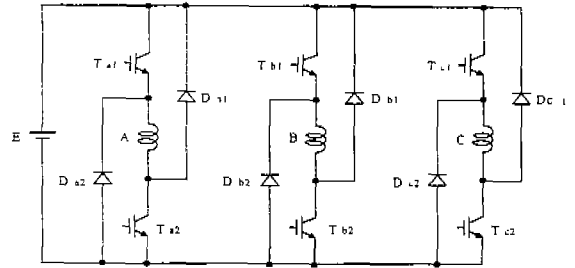


그림 3 비대칭 컨버터(6/4)

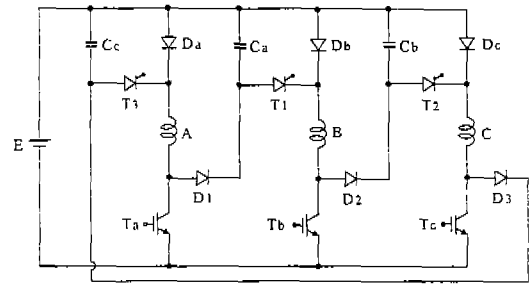


그림 4 공진형 컨버터(6/4)

그러나 그림 4의 공진형 컨버터는 상당 2개의 스위치와 많은 소자 수를 가지고 있음에도 불구하고 상간 전류의 중첩이 불가능하고 독립적이지 못한 단점을 가지고 있다. 이와 같은 단점을 없애고 8/6 SRM을 기준으로 하여 상당 1.5개의 스위치만을 필요로 하는 새로운 공진형 컨버터를 그림 5와 같이 제안하였다.

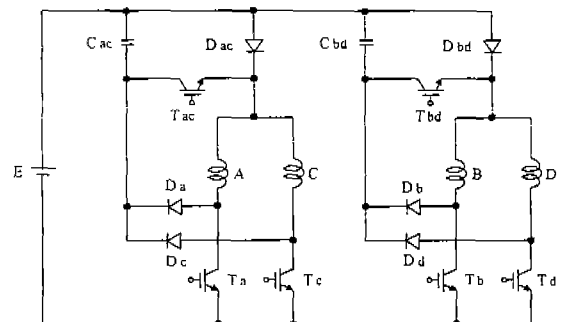


그림 5 제안한 공진형 컨버터(8/6)

A상과 C상이 한 쌍을 이루고 B상과 D상이 한 쌍을 이루어 각각 캐패시터 C_{ac} , C_{bd} 를 통해 서로 에너지 교환을 이루도록 하였다. 이는 전류의 중첩을 가능하도록 한다. 즉 그림4의 공진형 컨버터가 A→B→C의 순으로 여자된다고 할 때 반드시 Off되는 상의 전류가 완전히 0으로 된 후 다음 상을 On 시켜야만 했다. 이는 전류중첩을 불가능하게 하였다. 그러나 제안한 공진형 컨버터는 A,C상과 B,D상이 쌍이 되어 독립적으로 여자될 수 있기 때문에 전류중첩이 가능하다.

스위치 Off시 상권선과 캐패시터가 공진을 이루어 권선의 축적된 에너지를 빠르게 캐패시터에 전달하도록 하여 전류를 빠르게 소호시키고 쌍으로 연결된 다음상 여자시 전원전압과 캐패시터에 축적된 전압을 동시에 인가함으로써 전류확립 시간을 빠르게 할 수 있다.

3.2 제안한 Converter의 Mode별 해석

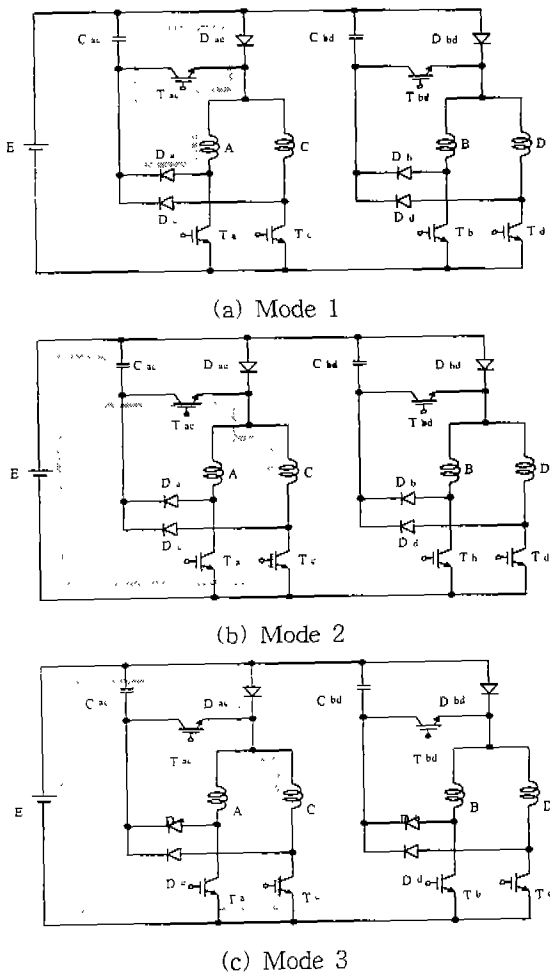


그림 6 Mode별 전류 path

A상과 C상에서의 모드로 해석할 때,

<Mode 1> - E, D_{ac} , A, T_a 를 통해 전류가 흐르다 소호되는 mode로서, T_a 가 Off되면 C_{ac} 와 A상 권선이 공진을 이루며 A상에 축적된 에너지가 C_{ac} 로 전달되며 전류는 빠르게 소호된다

<Mode 2> - T_{ac} 와 T_c 가 동시에 On되면 E, C_{ac} , T_{ac} , C, T_c 의 loop를 형성하며 전원전압과 C_{ac} 의 전압이 함께 C상에 인가되고 또한 C상 권선과 C_{ac} 가 공진을 이루게 되어 C상 전류는 빠르게 확립한다.

<Mode 3> - C_{ac} 의 전압이 0으로 되면 T_{ac} 를 Off한다. E, D_{ac} , C, T_c 의 loop를 형성하며 C상 권선에는 전원전압 E만이 인가된다.

위의 mode는 A상과 C상의 관계이고 실제로는 B,D상의 쌍과 번갈아 가며 이루어지게 된다. 여자순서를 A, B, C, D로 하게 되면 상전류의 중첩을 이룰 수 있다.

3.3 Energy 이용률 해석

권선의 축적되어 있던 에너지는 전원으로 회수되지 않고 캐패시터를 통해 쌍으로 연결된 상권선의 여자에 다시 이용하기 때문에 에너지 이용률(Energy availability)높일 수 있다. 이를 Energy conversion loop를 통해 해석하면 다음과 같다.

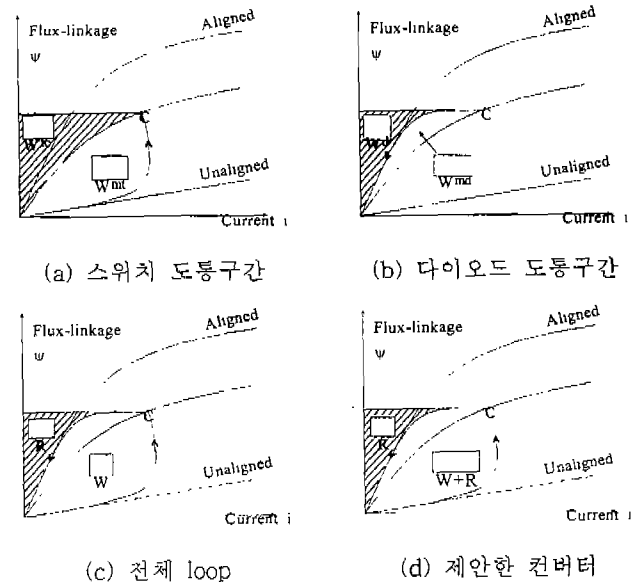


그림 7 Energy conversion loop

(a),(b),(c) 비대칭 컨버터의 경우
(d) 제안한 컨버터의 경우

비대칭 컨버터의 경우, 그림 7(a)의 스위치 도통 기간에서 0~C의 궤적을 그리다가 C점에서 commutation을 한다. 이때 C점에서 공급된 총 에너지 $U = W_{mt} + W_{fc}$ 이다. (W_{mt} : 기계적으로 한 일 W_{fc} : 권선에 축적된 에너지) 그리고 (b) 다이오드 도통 기간에서는 C~0의 궤적을 그린다. 이때 W_{md} 만큼의 기계적인 일을 하고 W_d 만큼의 에너지가 전원으로 회수된다. 이를 (c)의 전체 loop로 보면 기계적으로 한 일 $W = W_{mt} + W_{md}$, 전원으로 회수된 Energy를 R이라 할 때 energy 이용률 E는 식 (2)와 같이 된다. [4]

$$E = \frac{W_{mt} + W_{md}}{W_{mt} + W_{fc} + W_d} = \frac{W}{W + R} \quad (2)$$

(d)의 제안한 컨버터의 경우, 전원으로 energy가 회수되지 않고 캐패시터로 축적되었다가 쌍으로 연결된 다음상의 여자에 사용한다. 따라서 R이 기계적인 일로 재사용되므로 기계적으로 한 일은 $W + R$ 이 된다고 할 수 있다. 그러므로 에너지 이용률은 식(3)이 된다.

$$E = \frac{W + R}{W + R + R} = \frac{W + R}{W + 2R} \quad (3)$$

두 컨버터의 에너지 이용률을 비교해 볼 때 전류파형과 commutation시간은 다르지만 동일한 입력 Power를 갖는다고 가정할 때, 두 컨버터의 Energy 이용률 E를 비교하면 식(4)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{\text{제안한 컨버터의 } E}{\text{비대칭 컨버터의 } E} &= \frac{(W + R)/(W + 2R)}{W/(W + R)} \\ &= \frac{W^2 + 2RW + R^2}{W^2 + 2RW} > 1 \quad (4) \end{aligned}$$

따라서 에너지 이용률 면에서 제안한 컨버터가 비대칭 컨버터보다 높은 에너지 이용률을 가지고 있다고 할 수 있다.

4. Simulation 및 결과

simulation의 대상이 된 SRM의 사양은 다음과 같다.

회전자 극수 : 6극 고정자 상수 : 4상
회전자 극호 : 22.5° 고정자 극호 : 21.5°

정격 전류 : 5A 정격 토크 : 10N.m
정격 전압 : 240V 정격 회전수 : 4000rpm
최소인덕턴스 0.09mH 최대인덕턴스 : 0.071mH
캐패시터 용량 : 3μF

인덕턴스의 변화율을 선형적이라 가정하고 simulation을 하였을 때 제안한 컨버터와 비대칭 컨버터의 전류 파형은 그림 8과 같이 얻었다. 인덕턴스 프로파일은 한 상만을 나타내고 전류파형은 각상의 것을 나타낸다.

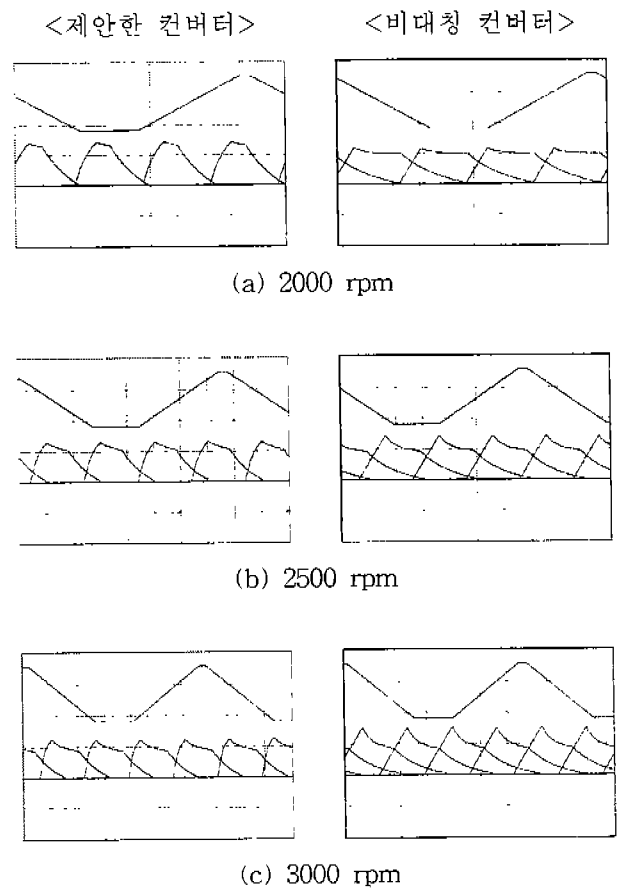


그림 8 simulation파형
(5A/div, 0.5ms/div)

simulation을 통해서 볼 때 예상했던 대로 고속일수록 제안한 컨버터에서 Off되는 상의 전류 tail과 비대칭 컨버터의 전류 tail보다 짧고 On되는 상의 전류 상승시간이 제안한 컨버터가 비대칭 컨버터보다의 전류 상승시간보이 훨씬 적은 것을 알 수 있다.

5. 결론

SRM의 구동에서 고속이나 중부하에서는 보다 많은 토크를 필요로 한다. 본 논문에서는 캐패시터와 전동기의 상권선이 공진회로를 구성하여 스위치 On, Off시 전류의 상승과 소호시간을 크게 줄일 수 있는 새로운 공진형 컨버터를 제안하였다. 이를 통해 정토크 영역의 이용폭을 넓힐 수 있었다. simulation을 통해 이러한 제어전략의 타당성을 확인하였다. simulation의 결과와 같이 제안한 컨버터는 고속이나 중부하에서 유리한 점을 가지고 있다. 보다 좋은 동특성을 얻기 위해서는 commutation시간을 최대한 줄이는 것뿐만 아니라 정밀한 전류(current)제어가 이루어져야 한다. 이는 스위치 T_{ac} , T_{bd} 를 chopping하여 제어될 수 있다. 추후 실험을 통한 제안한 컨버터의 타당성을 검토하고 여러 제어기를 적용하여 보다 정밀한 전류제어를 해야하는 과제가 있다.

본 과제는 한국전력공사의 전력기술 기초연구(97-065)지원에 의하여 수행되었음을 알립니다.

6. 참고문헌

- [1] T.J.E. Miller, *Brushless Permanent-magnet and Reluctance Motor Drives*, CLARENDON PRESS OXFORD, 1989, 149-191.
- [2] L. Vukosavic and V.R. stefanovic, "SRM Inverter Topologies : A Comparative Evaluation," IEEE Trans. Indu. Appl., vol. 27, no. 6, pp. 1034-1047, Nov./Dec. 1991.
- [3] Hoang Le-Huy and Philippe Viarouge, "A Novel Unipolar Converter for Switched Reluctance Motor", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 5, no. 4, Oct. 1990. pp. 469-475
- [4] T.J.E. Miller, *Switched Reluctance Motors and Their Control*, MAGNA PHYSICS PUBLISHING AND CLARENDON PRESS OXFORD, 1993, pp. 7-23