

새로운 컨버터 토폴로지에 의한 스위치드 리럭턴스 모터의 구동에 관한 연구

강 옥*, 김학성**, 류홍제**, 원충연**
*오산전문대학, **성균관대학교

A study on the Switched Reluctance Motor drive by a New Converter Topology

Kang Wook*, Kim Hackseong**, Ryoo Hongje**, Won Chungyuen**
*Osan Technical College, **Sungkyunkwan Univ.

ABSTRACT

This paper proposed a new converter topology improving the split source type converter. In this converter, two switches and six diodes add to the split source type converter. The proposed converter has a performance minimized a negative torque, putting a phase current off by double impressed voltage 2Vdc. Hence, a new converter results in increase of the average output power and improves converter efficiency in heavy load and high speed.

Theoretical prediction is verified by experimental results got with a new proposed converter and 8/6 poles SRM.

1. 서 론.

Switched Reluctance Motor(이하 SRM)은 능형 유도전동기보다도 구조가 간단하여, 견고하고 가격이 저렴한 장점 및 단위 체적당 토크 및 효율면에서 우수한 특성을 가지는 기기이다.[1]-[4] 이러한 SRM을 구동하기 위해서는 구동용 컨버터 회로가 필요하며, 컨버터 회로의 가격절감 및 성능향상을 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 현재 상당 한개의 스위치 및 한개의 다이오드를 가지는 분압형 컨버터는 각 상의 상호 인덕턴스 등의 영향으로 효율이 떨어지고, 리플이 심한등의 단점으로 성능 및 효율면에서 인정을 받지 못하나, 가격면에서는 가장 저렴한 특징이 있다. 또한 상당 두개의 스위치 및 다이오드를 갖는 비대칭 브릿지 컨버터의 경우, 각상의 전류제어가 독립적이며, 전류의 중첩이 가능하고, 성능 및 효율이 가장 우수하여, 비용의 증가에도 불구하고 가장 널리 사용되고 있다.[5]-[7]

본 연구에서는 분압형 컨버터 회로를 기본으로 스위치를 두개, 다이오드를 6개 추가하여 각 상간의 영향으로 인한 간섭을 제거하고, 전류의 독립적인 제어로 중첩이 가능한 우수한 성능을 가지는 새로운 컨버터 토폴로지를 제안하였다. 또한 전류의 전류(commutation)시 인가전압의 두배의 전압으로 급속히 소호시켜 역토크의 발생을 최소화 시킴으로써, 고속 중부하시에 더욱 장점을 나타낼 수 있도록 하였다. 제안된 토폴로지는 실험을 통하여 기존의 분압형 및 비대칭 브릿지 컨버터와 비교하여, 분압형 회로보다는 월등하며, 비대칭 브릿지 컨버터 회로와는 비슷한 성능을 나타내고, 고속 중부하시는 더 우수한 성능을 나타냄을 확인하였다.

2. 제안된 컨버터 토폴로지.

SRM 한상의 전압방정식은 다음과 같다.[8]

$$V_{ak} = R_e i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(\theta, i)}{dt} \pm M(\theta, i') \frac{di'}{dt} \quad (1)$$

$$\frac{dL(\theta, i)}{dt} = \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega \quad (2)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{di}{d\theta} \omega \quad (3)$$

식(2),(3)을 식(1)에 대입하면,

$$V_{ak} = R_e i + L(\theta, i) \frac{di}{d\theta} \omega + i \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega \pm M(\theta, i') \frac{di'}{d\theta} \omega \quad (4)$$

여기서,

V_{dc} : DC 인가 전압.

R_e : 고정자 권선저항 및 스위치저항의 합.

L(θ, i) : 인덕턴스.

i : 여자상의 순시전류.

i' : 앞상의 여자 순시전류.

θ : 고정자와 회전자의 상대위차.

M(θ, i) : 인접한 상의 상호 인덕턴스.

ω : 회전자의 회전 각속도.

또한 회전자의 회전에 의해 발생하는 토크는 다음과 같다.

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (5)$$

식 (4)와 (5)에서 토크는 전류의 극성과 무관하고 인덕턴스의 기울기에 따라 그 부호가 결정되며, 각 상의 상호 인덕턴스 성분은 여기전력을 증가시켜 DC전압강하를 일으키며, 역토크를 발생시키는 부분에도 경로만 형성되면, 유도전류가 흘러 평균토크를 감소시키게 됨을 알 수 있다.[1],[5]-[8]

그림 1에 제안된 컨버터 토폴로지를 나타내었다. 제안된 토폴로지의 동작모드를 A상(C상)을 예로 설명하면 다음과 같다.

모드 1 : C1의 전압을 A상(또는 C상)에 인가하여, 그 상을 여자시키는 모드이다.
(C₁→T₁₂→A상(C상) 권선→D₁₁(D₂₂)→T₁(T₂)→C₁)

모드 2 : 전압을 일정하게 유지하기 위해 초핑하는 모드이다. T₁₂와 T₁(T₂)를 동시에 on-off하여 전원측으로 에너지를 환원시키는 방법과 T₁(T₂)만을 on-off 시켜 전류를 자체 내에서 순환시키는 두가지 방법이 있으나, 전원측으로 에너지를 환원시키는 방법이 스위칭 손실이 크게 되므로 자체 내에서 순환시키는 방법이 더 유리하다.

(on : 모드 1과 동일.

off : A상(C상)→D₁(D₂)→T₁₂→A상(C상))

모드 3 : T₁₂와 T₁(T₂)를 동시에 off하여인가전압의 두배의

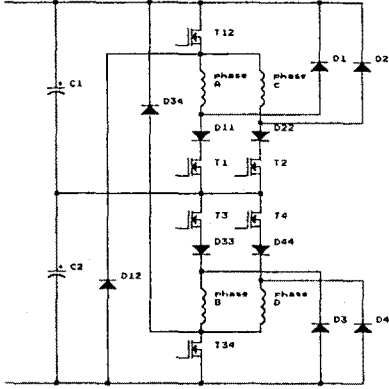


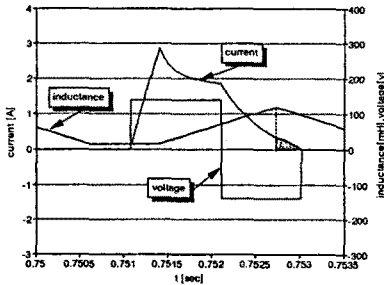
그림 1. 제안된 새로운 컨버터 토폴로지.

전압으로 여자전류를 소호시키는 모드이다.
(A상(C상)→D1(I2)→C1→C2→D12→A상(C상))

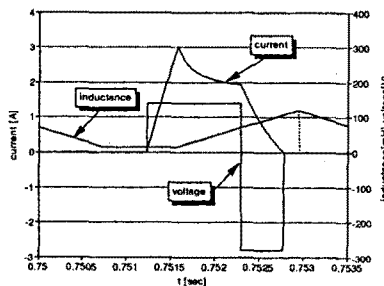
여기서 다이오드 D11, D22, D33, D44는 앞에서 설명한 상호인덕턴스의 영향을 제거하여 상간의 간섭으로 인한 원하지 않는 전류의 생성을 억제하고 전압강하를 줄이기 위해 사용하였다.

그림 2와 3에 전형적인 인덕턴스의 변화와 이상적인 스위치를 가정했을 경우, 비대칭 브릿지 컨버터와 제안된 컨버터에 의한 전류의 생성 및 소호과정을 나타내었다.

그림 2의 경우는 인가전압을 140V, 부하토크 0.4N.m, 점호각(advance angle)을 6°로 하고 도전각(conduction angle)을 15°로 하여 순차적으로 스위칭하였을 경우 고정자 한상의 전류파형이고, 그림 3의 경우는 인가전압을 140V, 부하토크 0.4N.m, 점호각(advance angle)을 6°로 하고 도전각(conduction angle)을 21°로 하여 이웃한 두상의 전류를 중첩하여 스위칭하였을 경우 고정자 한상의 전류파형이다. 여기서 빗금 친 부분은 역토크를 발생시키는 전류이다. 그림에서 알 수 있듯이 제안된 토폴로지의 경우 전류소호시 인가전압의 두배의 전압을 사용하므로 역토크의 발생이 최소화되나, 또한 정토크를 내는 부분에서도 전류가 빨리 소멸되어 정토크도 감소시키기도 한다. 중부

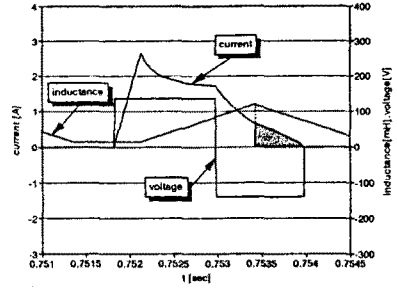


(a) 비대칭 브릿지 컨버터를 사용한 경우.

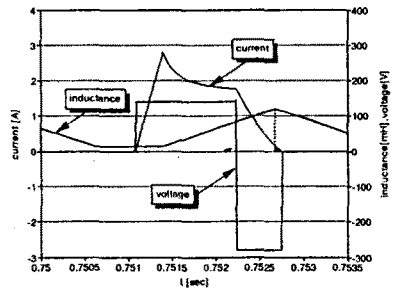


(b) 제안된 컨버터를 사용한 경우.

그림 2. 고정자 한상의 전류파형.(점호각 6°, 도전각 15°)



(a) 비대칭 브릿지 컨버터를 사용한 경우.



(b) 제안된 컨버터를 사용한 경우.

그림 3. 고정자 한상의 전류파형.(점호각 6°, 도전각 21°)

고속운전은 전류를 중첩시켜 도전각을 늘려줌으로써 높은 출력을 얻을 수 있는데 이런 경우 제안된 토폴로지가 도전각을 더 증가시킬 수 있어 월씬 유리함을 알 수 있다.

3. 실험 방법 및 시스템 구성.

그림 4에 실험을 위한 전체 시스템 구성을 나타내었다.

SRM은 200W급 8/6pole SRM을 사용하였으며, SRM 한상의 인가전압은 단상 전원을 전파정류하여 D.C 140V를 인가하였고, SRM과 D.C Generator의 속을 연결하여 부하를 변화시키면서 출력전류와 전압을 측정하였다. 컨버터회로를 제외한 나머지 부분은 모두 동일한 조건으로 하였으므로, 효율 및 출력 계산에는 직류발전기의 동손과 브러쉬 전압강하만 고려하여 포함시켰다. Microcontroller 에서는 엔코더의 펄스를 Timer2로 일정시간 count하여 현재속도를 계산한 후 PI 제어를 거쳐 적절한 PWM을 내보내 부하의 변동에도 항상 3000rpm로 속도를 유지할 수 있도록 하였고, 부하는 3000rpm를 유지할 수 있는 한도내에서 변화시키며 측정하였다. 도전각 및 점호각은 EPROM을 사용 look-up table로 저장하여 사용하였다.

4. 실험결과.

그림 5는 점호각을 6° 앞당겨주고, 도전각을 15°로 하였을때, 부하의 변화에 따른 분압형 컨버터, 비대칭 브릿지 컨버터, 제안된 컨버터의 효율을 측정한 결과이다. 여기서 알 수 있듯이 제안된 컨버터가 분압형 컨버터보다는 월등한 성능을 나타내

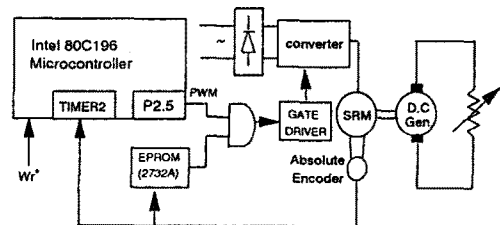


그림 4. 전체 시스템 구성도.

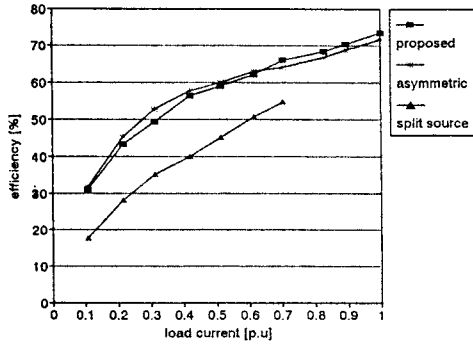


그림 5. 부하변동에 따른 효율 비교.(3000rpm, 도전각 15°)

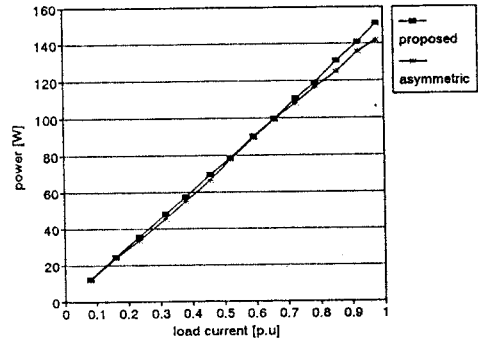
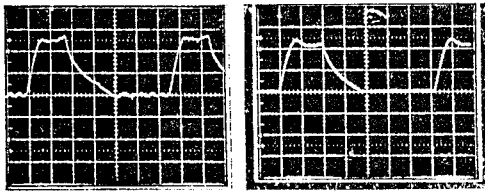


그림 7. 부하변동에 따른 출력 비교.(3000rpm, 도전각 20°)



(a) (b)



(c)

그림 6. 상전류 파형.(3000rpm,도전각:15°,1A/div,0.5ms/div)

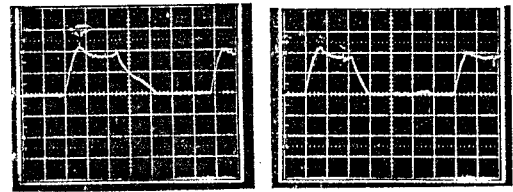
- (a) 분압형 컨버터를 사용한 경우.
- (b) 비대칭 브릿지 컨버터를 사용한 경우.
- (c) 제한된 컨버터를 사용한 경우.

며, 비대칭 브릿지 컨버터와 비교하였을 경우 경부하시는 약간 떨어지나 부하의 증가에도 역토크가 발생되지 않도록 해 주므로 0.65 p.u 부하에서부터는 효율이 더 높아짐을 확인할 수 있다. 이 때의 각각의 전류파형을 그림 6에 나타내었다. 그림 7의 경우는 전류를 증첩하여 도전각을 20°로 늘려 주었을 경우의 부하에 따른 출력을 비대칭 브릿지 컨버터를 사용한 경우와 비교한 파형이다. 이 경우 같은 부하에 대해 제한된 토폴로지가 역 토크가 적게 발생되므로 더 많은 출력을 낼 수 있음을 알 수 있다. 이 때의 전류 파형을 그림 8에 나타내었다.

5. 결 론.

본 논문에서는 짝수상을 갖는 SRM의 구동을 위한 새로운 컨버터 토폴로지를 제안하여 기존의 컨버터와 비교하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 분압형 컨버터와 비교할 때 월등히 우수한 성능을 나타냄을 확인하였다.
- (2) 비대칭 브릿지 컨버터와 비교할 때 경부하에서는 효율이 약간 뒤지나 중부하시는 더 좋은 성능을 나타낸다.
- (3) 고속 중부하시와 같이 높은 출력을 내고자 할때 도전각을 늘려줄 경우 비대칭 브릿지 컨버터보다 전체적으로 우수한 성능을 나타낸다.
- (4) 스위치가 상당 1.5개 다이오드가 상당 2.5개로 전체적으로 비대칭 브릿지 컨버터와 비슷하고, capacitor가 하나 추가된다.(다이오드의 경우 인접상간의 간섭만 제거할 경우, 상당 2개로 줄일 수 있다.)
- (5) 짝수의 상을 갖는 SRM에만 적용가능하다.



(a) (b)

그림 8. 상전류 파형.(3000rpm,도전각:20°, 1A/div, 0.5ms/div)

- (a) 비대칭 브릿지 컨버터를 사용한 경우.
- (b) 제한된 컨버터를 사용한 경우.

6. 부 록.

본 논문에서 사용된 모터의 사양은 다음과 같다.

| | |
|----------------------|--------------------------|
| TYPE | -----SWITCHED RELUCTANCE |
| NUMBER OF PHASES | ----- 4 |
| NUMBER OF ROTOR POLE | ----- 6 |
| VOLTAGE | ----- 160 V.D.C. |
| RATED OUTPUT | ----- 200 WATT |
| RATED MAX SPEED | ----- 5000 RPM |
| TORQUE | ----- 3.4 LB-IN |
| CURRENT | ----- 1.7 AMPS |

7. 참고문헌.

- (1) 임근희, "Switched Reluctance Motor의 개발 및 응용", 전기공업 9월호, pp.29-43, 1993.
- (2) 강욱, 김학성, 원충연, 김원호, 임근희, "Switched Reluctance Motor 구동을 위한 Analog Controller에 관한 연구", 대한전기학회, 하계 학술대회, pp. 837-839, 1993. 7.
- (3) 강욱, 김학성, 류홍제, 김덕현, 원충연, "One-Chip Microcontroller에 의한 Switched Reluctance Motor의 속도 제어", 대한전자공학회 전력전자연구회, pp. 67-70, 1993. 8.
- (4) P. J. Lawrenson, J. M. Stephen, P. T. Blenkinsop, J. Codar and N. N. Fulton, "Variable Speed Switched Reluctance Motors", IEE, proc. vol. 127, July 1980.
- (5) Krishnan Ramu, "Switched Reluctance Motor Drives", IEEE, Proc. of APEC'91.
- (6) T. J. E. Miller, "Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives", Oxford University Press, 1989.
- (7) Geun-Ilie Rim, Wook Kang, "Comparison of converter Topologies for Switched Reluctance Motors", journals of KIEE, vol. 6, no. 2, pp. 1-9, 1993.
- (8) P. N. Materu, "Design and Steady-State Analysis of the Switched Reluctance Motor drive", Ph. D. Dissertation, Dept. of Electrical Engineering, VPI & Su, Blackburg Va, 24061, jul. pp. 105-110, 1989.