

SRM의 최대 도통비를 갖는 여자전압 제어기법

이 상훈, 박 성준*, 안 진우, 김철우**
 경성대, 동명대*, 부산대학교 **

Excitation Voltage Control with a maximum Conduction Ratio of SRM

S. H. Lee, S. J. Park *, J. W. Ahn, C. U. Kim**
 Kyungseung Univ., Dongmyung College *, Pusan Nat'l. Univ. **

Abstract - The application of SRM(Switched Reluctance Motor) is dramatically increasing due to a simple mechanical structure, high efficiency and a good high speed characteristics. Generally, turn-off angle of power switch must be limited the demagnetization period. To control high conduction ratio in motor operation and regenerative voltage in the generator operation in the SRM, multi-level voltage control is effective. This paper proposes multi-level inverter to have a maximum conduction ratio of SRM. The proposed method is verified by experiment.

동 토오크가 발생하며 순차적이고 적절한 상여자를 통해 연속적인 회전력을 얻기 위해 스위칭 인버터가 필요하다.

SRM의 각 상에서 발생한 토오크는 식 (1)과 같다.

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} \tag{1}$$

SRM에서 릴럭턴스 토오크를 최대한 이용하기 위하여 보통 고정자와 회전자 모두 돌극형(salient type)으로 하여 인덕턴스의 변화율이 최대가 되도록 하고 스위치-온 시점과 스위치-오프 시점에서 부하전류에 대응하는 전류의 확립과 소호를 신속히 하여 토오크 발생 구간을 최대한 활용하여야 한다[2,3].

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, SRM)는 고효율, 고속운전, 간단한 전자기적 구조, 그리고 용이한 가변속제어 등의 장점을 가지고 있어 전력용 반도체 소자의 기술 개발이 급속히 이루어짐에 따라 그 실용적 가치가 한층 더 높아지고 있으나 전자기적 구조설계의 최적화, 제어장치와의 결합성, 제어 방식의 향상, 소음 진동과 맥동토오크의 최소화 등 몇가지 해결해야 할 문제점이 있다. 특히, SRM은 이중돌극형 자기적 구조를 가지고 있고 펄스형 전원에 의해 구동됨으로 제어장치와의 결합성을 재고하고 운전특성을 향상시킬 수 있는 제어방식에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1].

SRM은 비선형적인 특성이 강하고 전류파형이 많이 변하므로 제어가 부하의 변화에 대응 하기가 어렵다. 최근 이러한 취약성을 근본적으로 해결하기 위하여 SRM과 자기적 구조가 거의 같은 돌극형 동기전동기에서의 출력특성인 전력각 제어기능의 개념을 도입하여 드웰 각 조절을 하는 방법의 새로운 제어방식이 제안되었다. 그러나 드웰각의 폭은 전력소자의 전류정격 및 평활 전류 소호를 위한 시간을 확보하기 위하여 스위치 오프 각은 설정치로 한정된다. 이로 인해 토오크 발생영역에서 도통비는 일반적으로 0.6이하가 된다. 따라서 평활 전류의 전류소호시간을 단축시켜 도통비를 증가시키면 SRM의 출력은 증대 될 것이다.

본 논문에서는 제안된 인버터로 순간적으로 높은 전압으로 전류강착영역을 최소화하도록 설계하고 높은 감자 전압으로 신속한 전류소호가 이루어짐으로, 이 두 영역을 최소화하여 토오크 영역의 사용범위가 크게 되어 전동 출력을 증대시키는 제어기법을 제안하고 실험에 의하여 검증하였다.

2. 본 론

2.1 SRM의 동작원리

SRM은 돌극형 자기구조를 가지며 단방향 여자방식으로 구동된다. 고정자 상권선에 여자 에너지를 인가했을 때 자기구조에 의해 릴럭턴스를 최소화하는 방향으로 구

2.2 일반적인 SRM 인버터의 스위칭 모드 해석

SRM제어용 인버터로 가장 많이 사용되고 있는 비대칭 브릿지 인버터의 동작모드의 그림 1에 나타내었다. 이 인버터는 상당 두 개의 스위치와 다이오드를 가지며 크게 3단계의 동작모드를 가진다.

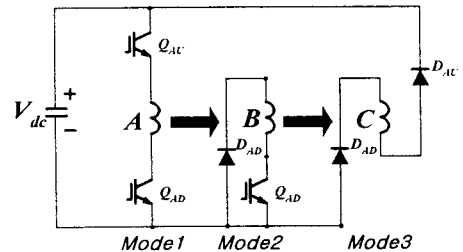


그림 1 비대칭 브릿지 인버터의 동작모드
 Fig. 1 Operation mode of asymmetric bridge converter

모드 1은 두 스위치를 모두 턴 온 시켜 DC 전원 전압(V_dc)을 권선에 인가하여 전류를 흐르게 한다. 모드 2는 전류제어기에서 사용되는 모드로 단방향 전류제어기 권선에 흐르고 있을 전류를 한 개의 다이오드와 스위치 및 권선을 순환하게 한다. 모드 3은 두 스위치를 모두 턴 오프하여 권선전류가 두 다이오드를 통해서 전원측으로 에너지를 환원시키는 방법으로 전류가 감소되도록 한다. 이 때 해당 상의 인덕턴스가 음의 기울기(negative slope)를 가지기 전에 전류를 완전히 소멸시키거나 아주 적은 양이 되도록 해야 한다. 그렇지 않으면 부(negative)토오크를 발생시키게 되어 전동기의 평균 토오크가 줄어들게 되며 에너지 변환효율도 감소하게 된다.

SRM의 스위칭각 제어에는 모드 1의 영역에의해 출력토오크는 영역의 제곱에 비례하는 특성으로 이 영역의 크기로 출력을 제어하는 것이 보통이다. 따라서 모드 1 영역에 따른 출력특성을 고려해 볼 필요성이 있다.

2.3 스위칭 오프각에 따른 에너지 변환 특성

그림 2는 스위치 오프각에 따른 에너지 변환과정을 도식화 한 것이다. 그림 2(a)는 일반적인 스위칭방식에서 정격부하 일 때 자기 에너지변환 과정을 보여 주고 있으며 그림 2는 오프 각을 증대하였을 때의 자기 에너지변환 과정을 나타내고 있다.

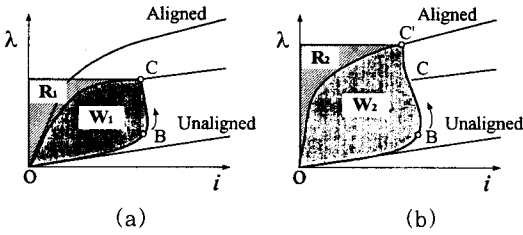


그림 2 스위치 오프각 따른 에너지 변환의 특성

(a) 작은 오프각 (b) 큰 오프각

Fig. 2 Characteristic of energy conversion due to switch off angle

(a) low switching off angle
(b) high switching off angle

그림 2(b)의 기계적 출력(W_2)이 그림 2(a)의 기계적 출력(W_1)보다 상당히 증가함을 알 수 있다. 또한 에너지 비도 그림 2(b)가 큼을 알 수 있다.

그림 3은 스위치 오프 각에 따른 상전류 파형의 형태를 나타내고 있다. 스위치 오프가 최대 인덕턴스 점에 가까울수록 토오크 각도가 크게되어 토오크 발생영역의 활용도가 높아져 정토크의 발생에 유리하나 너무 늦추어지면 부토크의 영향을 받을 수 있어 토오크 맥동을 유발하고 기계적 출력이 오히려 감소할 수 있다.

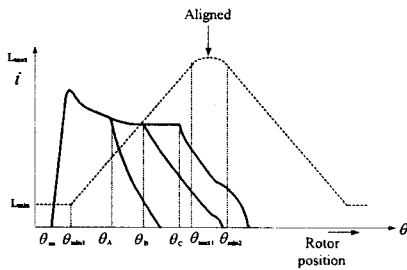


그림 3 스위칭 각도 변화에 따른 상전류 파형

Fig. 3 Current waveform according to the switching angle

그림 3에서 θ_A 에서 스위치를 오프한 경우는 경부하인 경우의 동작모드이며 그 에너지 변환루프는 그림 3(a)와 같다. 이 경우 부토크 발생을 방지하기 위한 전류소호 시간은 충분하나 그림 3(a)에서 알 수 있듯이 에너지변환 비가 낮아 효율저하에 큰 요인이 되고 있다. θ_B 에서 스위치를 오프한 경우는 정격부하인 경우의 동작모드이며 그 에너지 변환루프는 그림 3(b)와 같다.

이 경우 조금의 부토크는 발생하지만 기계적 출력은 최대가 되는 스위치 오프각이 된다. 일반적인 SRM정격은 이 점에서 스위치를 오프 할 때 출력을 정격출력으로 설계하며, 구동에서도 스위치 오프 최대각은 θ_B 로 고정하여 운전한다. θ_C 에서 스위치를 오프한 경우로 정토크 발생량은 θ_B 에서 오프한 경우보다 크지만 전류소호를 위한 시간의 부족으로 부토크가 발생하여 출력은 오히려 감소하게 된다. 이러한 부토크의 발생으로 출력감소를 억제하기 위해서는 신속한 전류소호가 가능한 전류회로가 요구되고 있다. 그러므로 부하 토오크와 운전 속

도에 관계없이 상전류의 형상이 평활한 전류가 되도록 스위치 온각을 결정하고 정토크 출력에 미치는 부토크의 영향을 최소화하도록 하는 인버터의 구성과 적정 스위칭 각도를 조정하여야 릴럭턴스 토오크를 효과적으로 이용할 수 있다.

2.4 신속한 전류소호가 가능한 새로운 인버터

그림 1과 같은 기존의 전형적인 인버터구조는 여자전압과 감자전압의 크기가 동일하여 높은 역전압을 인가할 수가 없어 평활전류를 신속히 소호할 수가 없다. 이와같이 스위치 오프각을 크게 하여 출력 및 에너지비를 증대시키기 위해서는 신속한 전류소호가 필요하다. 따라서 높은 감자전압을 인가할 수 있는 구조를 가지는 6/4 SRM용 인버터를 그림 4(a)에 제안한다.

6/4 SRM과 같이 상수가 홀수 인 경우에는 상전류의 오버랩(overlap)으로 인하여 다른 상과 스위치를 공유할 수 없으나, 8/6 SRM과 같이 상이 짝수인 경우에는 이웃하지 않는 상과 스위치를 공유할 수 있으므로 그림 4(b)와 같이 결선하여 사용하는 것이 바람직하다. 제안된 인버터에서 높은 감자전압을 위해 SRM에서 발생하는 무효전력을 사용하여 콘덴서로 회수하고 남은 무효전력은 DC 링크단으로 Q_{LO} 에 의해 회수된다. 초기전원 투입시 다이오드 D_S 를 통하여 콘덴서에 전압을 충전시키며 스위치 소호시 회수된 에너지는 상스위치 턴-온시 신속한 전류정착을 위해 윗단 스위치 (Q_{UP})의 온, 오프제어에 의해서 사용된다.

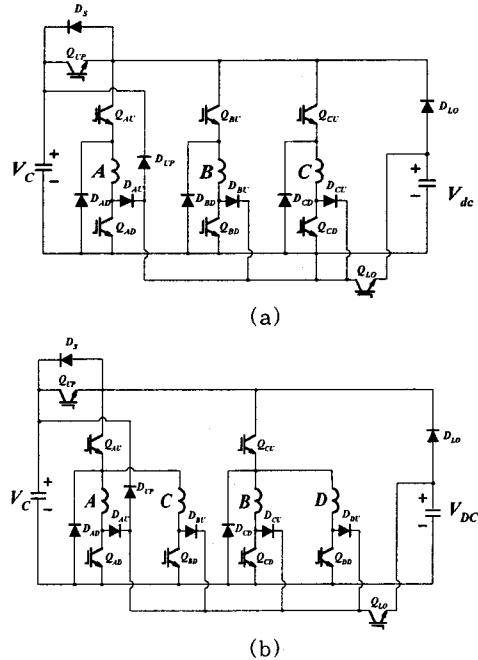


그림 4 제안된 인버터

(a) 6/4 SRM 구동용 (b) 8/6 SRM 구동용

Fig. 4 Proposed inverter

(a) Case 6/4 SRM (b) Case 8/6 SRM

각 스위치의 온, 오프에 따른 구동회로의 동작은 4개의 모드로 나누어 설명할 수 있으며, 각 모드에 대한 회로는 그림 5와 같다. 스위치 Q_{UP} , Q_{AU} , Q_{AD} 가 턴-온된 경우는 콘덴서전압이 상권선에 인가되며, 스위치 Q_{AU} , Q_{AD} 가 턴-온된 경우는 정원전압이 상권선에 인가되며, 스위치 Q_{AD} 가 턴-온된 경우는 다이오드 D_{AD} 에 의해 전류회로가 구성되어 영(zero)전압이 상권선에 인가된다.

스위치 모두가 턴-오프되면 다이오드 D_{UP} , D_{AU} , D_{AD} 에 의해 회로가 구성되어 콘덴서 전압의 반대극성이 상권선에 인가되며, 스위치 Q_{LO} 가 턴-온된 경우는 부의 전압 전압이 상권선에 인가된다.

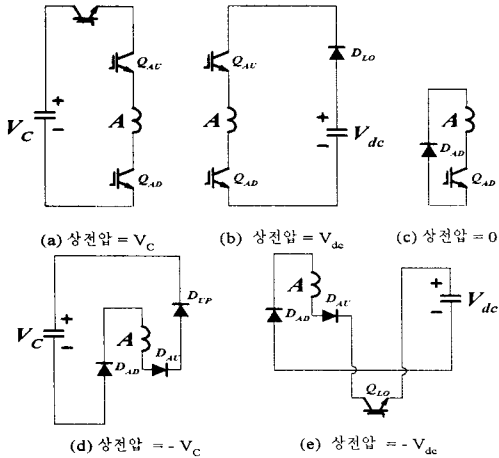


그림 5 인버터 동작에 따른 각 모드
Fig. 5 Operational modes according to behavior of inverter

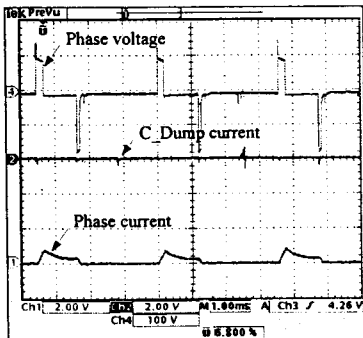
SRM에서 전동기 영역으로 동작할 경우 그림 5(a)와 같이 신속한 평활전류 정착을 위해서 DC 링크전압보다 높은 전압을 인가하여야 하며, 평활전류 정착 후에는 평활전류와 전동기의 속도에 맞는 DC 링크전압을 인가하여야 하며 전류 소호시에는 높은 역전압으로 신속한 전류 소호를 행하여야 한다.

또한 저속영역에서 전류제어를 행할 시에는 지령전류보다 큰 경우 윗링 모드를 두기 위해서 영전압을 인가할 수 있는 전력회로를 필요로 한다. 따라서 강인한 전류제어를 위해서는 높은 여자전압인 정의 C-Dump 전압, DC 링크전압, 영전압, 높은 감자전압인 부의 C-Dump 전압의 4레벨 인버터를 구성하여야 한다.

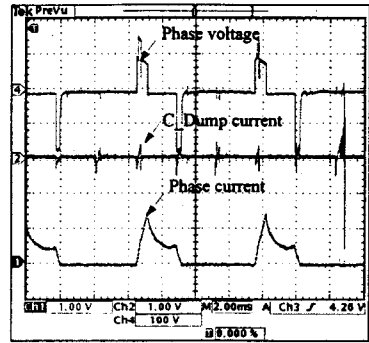
3. 실험 및 고찰

그림 6은 높은 감자전압으로 신속한 전류소호 기능을 갖는 제안된 인버터의 특성을 파악하기 위한 인가전압과 그때 상권선에 흐르는 상전류 및 에너지 회수용 콘덴서에 흐르는 전류의 파형이다.

이때 실험조건은 지령속도 4000[rpm]일 때 700[W] 및 3.5[kW]일 때 정상상태의 실험 결과이다.



(a)



(b)

그림 6 제안된 인버터의 인가전압과 상전류파형
(a) 700[W] 부하시 (b) 3.5[kW] 부하시
Fig. 6 Voltage and current waveforms of proposed inverter
(a) at 700[W] load (b) at 3.5[kW] load

700[W] 부하시 여자구간, 윗링구간, 감자구간은 약 $7^\circ, 23^\circ, 2^\circ$ 로 나타났으며, 3.5[kW] 부하시 여자구간, 윗링구간, 감자구간은 약 $10^\circ, 20^\circ, 5^\circ$ 로 나타났다. 그림에서 알 수 있듯이 신속한 감자를 위해 여자전압의 2배의 감자전압을 인가하도록 하였으며, 감자시 회수된 콘덴서의 높은 전압은 여자시 신속한 전류정착을 위해서 사용되며 그 변위는 회수된 에너지에 비례한다.

그림 6(a)는 회수되는 양이 매우 적으므로 그 변위가 그림 6(b)에 비하여 상당히 적음을 알 수 있다. 따라서 제안된 인버터는 전류소호기능 및 여자전류 확립기능이 우수하여 토오크 사용영역을 확대 할 수 있음을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구는 높은 감자전압으로 신속히 전류를 소호하므로써 도통비를 증대시킬 수 있도록 5레벨의 전압 형성이 가능한 인버터와 스위칭 방식을 실험을 통하여 확인하였다.

실험결과 전동기영역에서는 기존의 클래식 타입에 비해 도통비를 20[%]정도 증가 시킬수 있었으며 발전기 영역시 전류의 레벨이 임계영역 이상이 될 경우 콘덴서의 높은 충전전압으로 안정화 하였다.

(참고 문헌)

- [1] B. K. Bose, T. J. E. Miller, P. M. Szeszny and W. H. Bocknell, "Microcomputer Control of Switched Reluctance Motor", *IEEE Trans. Industrial Application*, vol. 22, no. 4, pp. 708-715, 1986.
- [2] I. Husain and M. Ehsani, "Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Drives by PWM Current Control", *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 11, no. 1, pp. 91-98, 1996.
- [3] Lawrenson PJ et al : "Variable-speed switched reluctance motors", *Proceedings IE Vol 127, PT, B*, pp. 253-265