

SRM의 회생제동을 위한 멀티레벨 인버터

이상훈, 안극섭, 박성준*, 안진우
경성대학교, *동명대학

Multi-Level Inverter for Regenerative Breaking of SRM

S. H. Lee, G. S. Ahn, S. J. Park *, J. W. Ahn
Kyungsung Univ., * Dongmyung College

ABSTRACT

Energy recovery in the regenerative region is very important when SRM(Switched Reluctance Motor) is used in traction drive. This is because that to reduce energy loss during mechanical breaking and/or to have a high efficiency drive during breaking. To control excitation voltage 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 which is useful for motoring and regenerative operation in SRM.

The proposed method is verified by experiment.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, SRM)는 일반적인 전동기에 비하여 기계적인 구조가 간단하고, 효율이 높으며, 광범위한 속도영역에서 운전특성이 우수한 장점을 가지고 있기 때문에 전력용 반도체 소자의 기술 개발이 급속히 이루어짐에 따라 그 실용적 가치가 한층 더 높아지고 있다.

SRM의 고효율 운전 및 제동을 위해서는 회생영역에서의 에너지 회수가 매우 중요하다. 기존의 SRM 고효율 운전을 위해서는 단일펄스 구동 방식이 제안되었다.^[1] 종래의 평활 전류 구동방식에서는 발전모드가 장시간 유지되면 콘덴서의 에너지는 더 이상 저장할 수 없는 상태가 되고, 발전모드 운전시 부하전류에 따라 발전전압은 현저하게 변하게 되어 안정적인 운전이 어렵다. 이는 콘덴서에 저장된 전압이 능동부하로서의 역할을 제대로 수행하지 못할 경우 자칫 직류 직권 발전기의 경우와 같이 발전전류가 발산하는 치명적인 약점을 가지게 된다. 또한 평활전류를 형성하는 시점도 전동기영역과 발전기 영역에서는 다르게 나타나므로 전동기 영역에서 설정한 파라메타는 발전기 영역에서는 적절한 값이 되지

못한다. 본 연구에서는 전동기 및 발전기영역의 서로 다른 파라메타를 갖는 두 모드에서 신속히 평활전류 모드로 동작할 수 있는 인버터회로를 제안하고, 제동시 발생하는 회생에너지를 효과적으로 사용할 수 있는 스위칭 방식을 도출하여 이 인버터의 제어성능을 실험을 통하여 증명하였다.

2. 본 론

2.1 SRM의 동작원리

SRM은 고정자 또는 회전자 중 한 쪽에 여자에너지를 인가할 때 릴럭턴스 토크를 발생시키는 회전체이다. 릴럭턴스 토크는 여자에너지를 인가한 상의 릴럭턴스가 최소화되려는 특성을 가진다. 그러므로 자계구조는 전동기가 회전함에 따라 릴럭턴스가 변화하는 돌극형이 필요하지만 기하학적 구성에는 한계가 있으므로, 일정한 회전 구간마다 연속적인 펄스 여자전원의 인가가 필요하다.

전동기의 토크 식을 구하기 위하여 coenergy, W_c' 의 개념을 도입하면 이중돌극형 SRM의 자기구조상 자기회로의 coenergy W_c' 는 식 (1)과 같다.

$$W_c' = \frac{1}{2} i^2 \cdot L(\theta, i) \quad (1)$$

여기서 i 는 상권선의 전류, L 은 인덕턴스를 의미하며, 한 상에 대한 토크 T_e 는 회전자의 위치각, θ 에 대한 coenergy의 편미분항으로서 식 (2)과 같이 구해진다.

$$T_e = \frac{dW_c'}{d\theta} = \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{dL}{d\theta} \quad (2)$$

식 (2)로부터 SRM의 발생토크는 전류의 제곱에 비례하고 위치각에 대한 인덕턴스의 기울기에 비례함을 알 수 있다.

SRM에서 정확한 스위칭 동작으로 원하는 토크를 발생시키기 위해서는 상전류에 대한 해가 필수적이다. 전동기에서 상전류를 해석하기 위한 기초가 되는 상 전압 방정식은 아래와 같다.

$$V_i = Ri(t) + i(t) \frac{dL(\theta)}{d\theta} \omega + L(\theta) \frac{di(t)}{dt} \quad (3)$$

ω : 회전자 각속도

식 (3)의 상전압 방정식에서 우변의 두 번째 항은 SRM의 역기전력에 해당된다. 따라서 역기전력 항은 아래 식으로 표현된다.

$$e = \frac{dL(\theta)}{d\theta} \omega i(t) = K \omega i(t) \quad (4)$$

$$\text{단 } K = \frac{dL(\theta)}{d\theta}$$

식 (4)에서 보는 바와 같이 역기전력은 직류전동기와 동일한 형태를 취하고 있으며, 식 (2)의 토크 식은 직류 직권전동기와 동일한 형태를 취하고 있다. 따라서 SRM의 속도-토크 특성은 직류 직권전동기와 동일한 특성을 갖고 있다.

2.2 SRM의 여자구간에 따른 전류파형

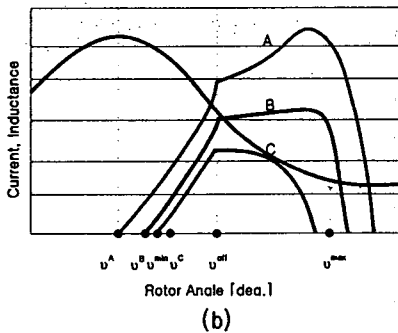
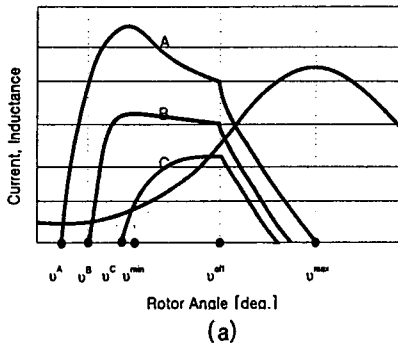


그림 1 스위칭 온 각도 변화에 따른 상전류 파형
(a) 전동기 영역 (b) 발전기 영역

Fig. 1 Current waveforms by changing switching-on angle
(a) motoring region (b) generating region

SRM에서 그림 1(a)의 전동기 영역에서는 상권선의 최소 인덕턴스의 영향으로 전류의 확립은 순간적으로 이루어지지 않고 시간 지연이 생기게 된다. 이를 보상하기 위해서는 인덕턴스가 증가하는 시점보다 앞선 각(어드벤스 각: θ_{ad})에서 상 스위치를 온 하여야 한다.

또한 발전기 영역에서 동작하는 그림 (b)에서는 상권선의 최대 인덕턴스의 영향으로 전동기 영역보다 전류의 확립을 위한 시간 지연이 많이 발생하게 되고, 이를 보상하기 위해서 인덕턴스가 감소하는 시점보다 앞선 각(어드벤스 각: θ_{ad})에서 상 스위치를 온 하여야 한다. 그러나 일반적인 SRM에서는 인덕턴스의 최대영역은 적절한 상전류를 형성할 수 있도록 큰 영역을 갖지 못하고 있으므로 원하는 상전류를 형성하기 위해서는 제한된 θ_{ad} 에서 인가전압의 크기를 조정하는 방법이 고려될 수 있다.

2.3 SRM의 발전특성

SRM의 발전모드 특성은 앞에서 언급하였듯이 직류직권 발전기와 동일한 특성을 갖고 있다. 직류직권 발전기의 등가회로 및 외부특성곡선은 그림 2와 같다.

그림에서 R_L 은 부하저항이며 R_e 는 정류자를 포함한 발전기의 등가저항이며, 곡선 O'N은 무부하 특성곡선이다. 횡축상의 임의의 점 I에 수직인 선과 만나는 점을 U, Q라하고, TI=UQ가 되는 점을 T로 잡는다. 이렇게 횡축상의 여러점을 작도하면 외부특성곡선 O'TS가 얻어진다. 외부특성곡선에서 부하전류에 따라서 단자전압이 현저하게 변하게 되어 발전기용으로는 잘 사용되지 않는다.

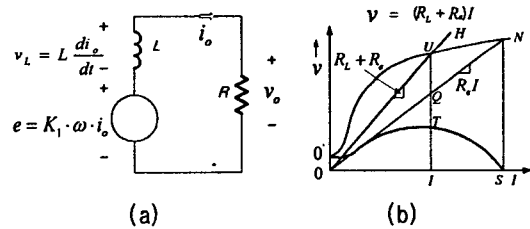


그림 2 직류직권 발전기의 등가회로 및 외부특성곡선
(a) 등가회로 (b) 외부특성곡선

Fig. 2 Equivalent circuit and characteristic curve of series DC generator

(a) equivalent circuit
(b) characteristic curve

SRM을 발전기로 사용될 경우 그림 3에서와 같이 저항부하가 아닌 직류전원이 된다. 발전 시작시 부하전류의 초기치를 $i_o(0)$ 라하고 전류해를 구하면 식 (5)과 같다.

$$i_o(t) = \frac{v_o}{K_1 \omega - R} + \left[\frac{v_o}{R - K_1 \omega} - i_o(0) \right] e^{-\frac{K_1 \omega}{L} t}$$

$$i_o(0) = \frac{v_o}{K_1 \omega - R} \quad (5)$$

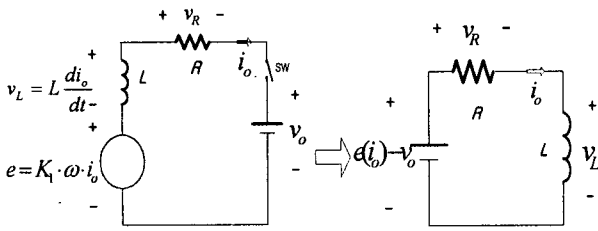


그림 3 SR 발전기의 등가회로
Fig. 3 Equivalent circuit for generating region of SR

식 (5)에서 알 수 있듯이 전류가 어느 이상이 되면 전류가 발산하게 되어 SRM 구동용 컨버터가 소손되게 된다. 이러한 전류의 발산을 방지하여 발전기 영역에서 안정된 동작을 위해서는 무엇보다도 신속한 전류소호를 위해 높은 전압을 인가할 수 있는 회로가 요구된다.

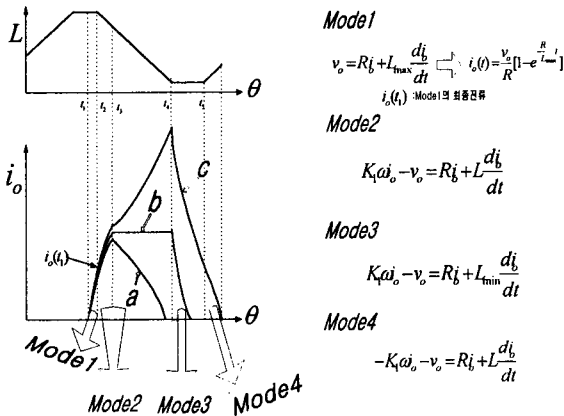


그림 4 SRM의 발전모드별에 따른 전류파형
Fig. 4 Current waveform by changing of switching-on angle

발전기 영역에서 SRM은 그림 4와 같이 역기전력 항에 전류를 포함함으로써 직류직권 발전기와 동일한 특성을 갖고 있어 발전기 영역 운전시 부하전류에 따라 발전전압은 현저하게 변하게 되어 안정적인 운전이 어렵다. 특히 부하가 능동부하(콘덴서 전압)인 경우 초기 전류에 따라 안정된 동작의 범위가 결정되므로 과전류 제한을 위해서는 외부에 높은 전원이 필요하게 된다.

모드 1은 인덕턴스 최대영역에서 전류정착을 위한 모드이며, 이 구간에서는 인덕턴스의 기울기가 없어 상전류에 의한 역기전력이 존재하지 않는다. 모드 2는 역기전력 전압보다 여자전압이 높은 상태로 전류의 증가가 2차함수로 급속이 이루어지는 영역이다. 모드 3은 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 모드이며, 이 모드의 시작점의 전류값에 따라 전류의 수렴 및 발산여부가 결정된다.

2.4 여자전압제어를 위한 5-레벨 인버터

그림 5는 전동기 및 발전기 모드에서 평활전류 정착 및 소호조건을 성립하기 위한 구동회로의 전압의 형태이다.

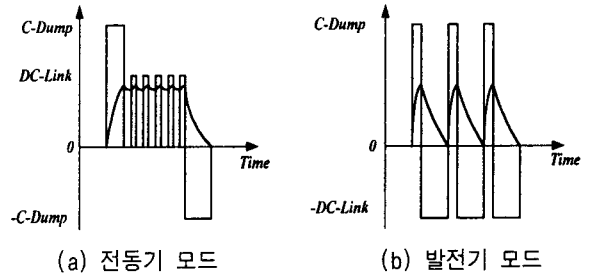


그림 5 5-레벨 여자전압제어
Fig. 5 5-level excitation voltage control

이와 같은 전동기 모드에서 전류정착을 위한 높은 전압과 발전동작을 위한 전원전압을 인가할 수 있도록 회로를 그림 6과 같이 제안하였다.

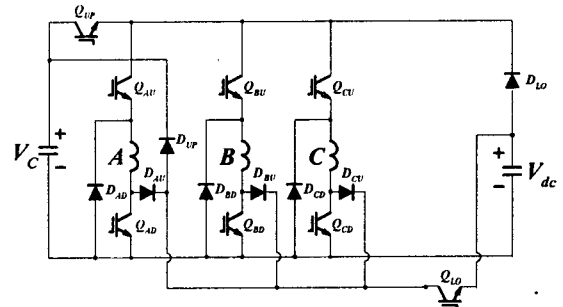


그림 6 SRM 견인구동을 위한 5-레벨 인버터
Fig. 6 5-level inverter for SRM traction drive

이 회로에서는 일반적인 C-Dump와 달리 여자전압의 크기를 콘덴서전압과 전원전압을 인가할 수 있음은 물론 부의 콘덴서전압과 부의 전원전압을 인가할 수 있는 구조로 되어있어, 전동기 영역 및 발전기영역의 동작에 적합한 회로가 된다. 그림 7에서 스위치 Q_{UP}, Q_{AU}, Q_{AD}가 온된 경우는 콘덴서전압이 상권선에 인가되며, 스위치 Q_{AU}, Q_{AD}가 온된 경우는 전원전압이 상권선에 인가되며, 스위치 Q_{AD}가 온된 경우는 다이오드 D_{AD}에 의해 전류회로가 구성되어 영(zero)전압이 상권선에 인가된다. 스위치 모두가 오프되면 다이오드 D_{UP}, D_{AU}, D_{AD}에 의해 회로가 구성되어 콘덴서전압의 반대극성이 상권선에 인가되며, 스위치 Q_{LO}가 온된 경우는 부의 전원전압의 상권선에 인가된다.

이 회로의 동작은 전원전압과 C-Dump전압 두 전원으로 부터 스위치 Q_{LO}에 의해 선택할 수 있는 회로가 되며, 발전영역에서는 기존의 C-Dump회로와 달리 발전영역이 장기간 유지되어도 발전기의 회수에너지를 초과없이 전원 측으로 회생할 수 있다.

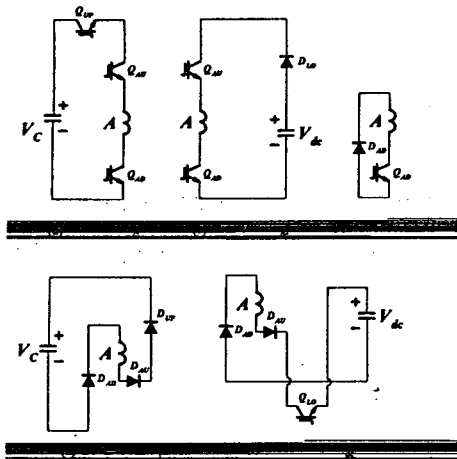


그림 7 인버터 동작에 따른 각 모드
Fig. 7 Modes according to inverter operation

3. 실험 결과 및 고찰

제안된 인버터 제어방식의 타당성을 입증하기 위해 그림 8과 그림 9와 같은 실험 결과를 도출하였다. 그림 8은 전류소호기능 및 여자전류 확립기능이 우수하여 토크 사용능력을 확대 할수 있음을 알 수 있다.

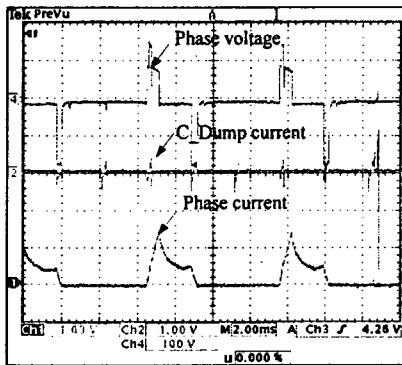


그림 8 제안된 인버터의 인가전압과 상전류파형 [3.5Kw]
Fig. 8 Voltage and current waveforms of proposed inverter[3.5Kw]

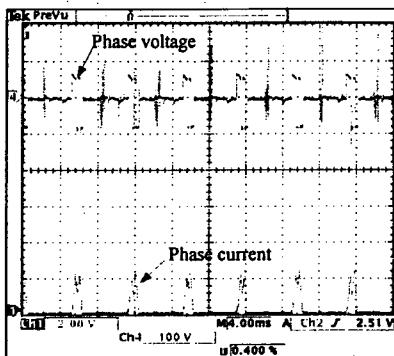


그림 9 2500[rpm]에서 제동특성
Fig. 9 Characteristic of breaking at 2500[rpm]

그림 9는 안정된 회생제동을 위해서 전류제어모드에 의한 발전영역에서의 상전류 파형을 나타내었다.

4. 결 론

본 연구는 기존의 인버터에서 SRM이 발전영역으로 동작시 임계의 전류크기가 되면 전류가 발산하는 문제점을 개선하기 위해 5레벨의 전압형성이 가능한 인버터를 제안하였다.

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

향후로 SRM의 발전모드의 정밀한 해석 및 분석과 고정도의 온, 오프제어기법에 대한 연구가 있었야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] B. K. Bose, T. J. E. Miller, P. M. Szeszsy 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] C. Wu and C. Pollock, "Analysis and Reduction of Vibration and Acoustic Noise in the Switched Reluctance Drive", *IEEE Trans. Industrial Applications*, vol. 31, no. 1, pp. 91~98, 1995.