

SRM의 여자전압제어를 위한 5-레벨 인버터

이 상훈, 박 성준\*, 안 진우  
경성대, \*동명대

5-Level Inverter for Excitation Voltage Control of SRM

S. H. Lee, 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 braking and/or to have a high efficiency drive during braking. 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 suggests multi-level inverter which is useful for motoring and regenerative operation in SRM.

1. 서 론

전력용 반도체 소자의 기술 개발이 급속히 이루어짐에 따라 고속 스위칭과 소자의 대용량화가 가능하게 되고, 산업의 메카트로닉스화에 따라 다기능, 고성능을 가진 전동기의 개발이 활발히 이루어지고 있다. SRM에 대한 연구는 선진국을 중심으로 가전기기, 전기자동차, 항공기 및 산업전반에 그 응용영역을 확대해 가고 있다. [1] [2] 스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, SRM)는 각 상이 분리되어 단락사고(shoot-through fault)에 대해 안정적이며, 직류전동기의 속도-토크 특성을 가지고 있다. 또한 기동특성이 매우 좋으며, 넓은 속도범위를 가지고 있어 빈번한 정지를 하는 전기자동차 등의 견인구동에 적합하다.

SRM을 고효율로 운전하기 위해서는 단일펄스 구동방식이 제안되었다[3]. 이러한 종래의 평활 전류 구동방식에서 평활전류 정착을 위한 여자전압은 회수에너지를 저장한 콘덴서전압을 이용하는 방식이 대부분이다. 이러한 방식에서 SRM이 전동기 영역으로 동작할 경우에는 콘덴서에 저장된 에너지 모두를 전동기영역에서 소모할 수 있으나, 발전모드가 장시간 유지되면 콘덴서의 에너지는 더 이상 저장할 수 없는 상태가 되는 단점을 가지고 있다. 또한 평활전류를 형성하는 시점도 전동기영역과 발전기 영역에서는 다르게 나타나며 발전기 영역이 더욱 불리하다. 따라서 전동기 영역에서 설정한 파라메타는 발전기 영역에서는 적절한 값이 되지 못한다. 본 연구에서는 전동기 및 발전기영역에서 평활전류 모드로 동작할 수 있는 인버터회로를 제안하고, 발전에너지를 효과적으로 사용할 수 있는 스위칭 방식을 도출하였다.

2. 본 론

2.1 SRM의 동작과 전류

SRM은 회전자 및 고정자가 모두 돌극형 구조로 되어 있으며, 고정자에만 집중권으로 되어있다. SRM의 고정자 권선에 전압을 인가할 경우 상당 전압방정식은 식 (1)과 같다.

$$V = Ri + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega \quad (1)$$

단, R : 권선의저항, L : 인덕턴스, i : 상전류

$\omega = d\theta/dt$  : 회전자 각속도

이때 SRM의 릴럭턴스 토크는 자기회로의 릴럭턴스가 최소화되는 방향으로 발생하며, 이때 발생하는 토크는 식 (2)에서와 같이 상권선에 흐르는 전류의 제곱과 회전자 위치각에 대한 인덕턴스의 변화율에 비례한다.

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

SRM에서 릴럭턴스 토크를 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 토크 발생 구간을 최대한 활용하여야 한다.

전동기 영역의 그림 1(a)에서는 상권선의 최소 인덕턴스의 영향으로 전류의 확립은 순간적으로 이루어지지 않고 시간 지연이 생기게 되며, 이를 보상하기 위해서 인덕턴스가 증가하는 시점보다 앞선 각( $\theta_{ad}$ )에서 상 스위치를 온 하여야 한다. B의 파형은 적정  $\theta_{ad}$ 인  $\theta_A$ 에서 상 스위치를 온 함으로써 평활전류를 형성함을 알 수 있으며, A의 파형은 평활전류를 형성하기 위한 적정각보다 큰  $\theta_A$ 에서 상 스위치를 온 하여 과여자가 됨을 나타내고 있고, C의 파형은 적정 각보다 적은  $\theta_C$ 에서 상 스위치를 온 하여 부족여자가 됨을 나타내고 있다. 그러므로 인덕턴스 증가 구간에서 정토크의 발생을 효과적으로 하기 위해서는 전동기의 속도와 여자전압의 크기에 따른 적정 온각을 구할 필요가 있다.

또한 발전기 영역에서 동작하는 그림 1(b)에서는 상권선의 최대 인덕턴스의 영향으로 전동기 영역보다 전류의 확립을 위한 시간 지연이 많이 발생하게 되고, 이를 보상하기 위해서 인덕턴스가 감소하는 시점보다 앞선 각( $\theta_{ad}$ )에서 상 스위치를 온 하여야 한다. 그러나 일반적인 SRM에서는 인덕턴스의 최대영역은 적절한 상전류를 형성할 수 있도록 큰 영역을 갖지 못하고 있으며, 설사 이러한 조건을 만족시키는 전동기를 설계 제작하더라도 최대, 최소 인덕턴스 비가 적어 상대적으로 출력이 적은 전동기가 되어 바람직하지 못하게 된다. 따라서 원하는 상전류를 형성하기 위해서는 제한된  $\theta_{ad}$ 에서 인가전압의 크기를 조정하는 방법이 고려될 수 있다.

인덕턴스 증가 구간 및 감소구간에서 전동기 모드 및 발전기 모드를 효과적으로 하기 위해서는 다음과 같은 조건이 필요하다.

(1) 전동기 영역에서 인덕턴스 상승 구간( $\theta_{min} \sim \theta_{max}$ )

에서 스위치-온이 될 경우 인덕턴스의 영향으로 인하여 전류의 확립이 충분하지 않다. 따라서 토오크 발생을 위

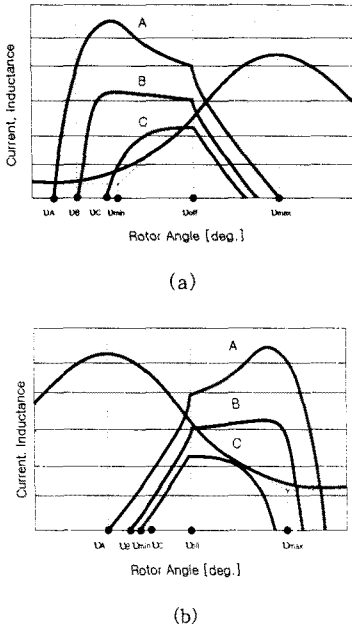


그림 1 스위칭 온 각도 변화에 따른 상전류 파형  
(a) 전동기 영역 (b)발전기 영역  
Fig. 1 Current waveforms by changing switching-on angle  
(a) motoring region (b)generating region

해 충분한 전류를 확립하기 위해서는 그 구간 이전의 최소 인덕턴스 구간( $\theta_0 \sim \theta_{min}$ )에서 스위치 온을 행하여야 한다. 이러한  $\theta_{ad}$ 의 증가에도 불구하고 전류가 확립되지 못하면 전류확립시 높은 전압을 인가할 수 있는 외부회로를 추가하는 것이 바람직하다.

(2) 발전기 영역에서 인덕턴스 하강 구간( $\theta_{max} \sim \theta_{min}$ )에서 스위치-온이 될 경우 전동기 영역에서 보다 상대적으로 큰 인덕턴스의 영향으로 인하여 전류의 확립이 충분하지 못하다. 따라서 토오크 발생을 위해 충분한 전류를 확립하기 위해서는 그 구간 이전의 최소 인덕턴스 구간( $\theta_0 \sim \theta_{min}$ )에서 스위치 온을 행하여야 한다. 이러한  $\theta_{ad}$ 의 증가에도 불구하고 전류가 확립되지 못하면 전류확립시 높은 전압을 인가할 수 있는 외부회로를 추가하는 것이 필요하다.

이와 같이 SRM에서 빠른 평활전류 형성을 위하여 높은 여자전압을 인가하고 평활전류 형성후에 낮은 전압을 인가하는 방식에 대한 연구가 활발히 이루어져왔으며, 그 대표적인 방식이 콘덴서를 이용한 C-Dump이다. 그러나 일반적인 이러한 방식에서는 SRM의 소호시 발전되는 에너지를 전부를 콘덴서에 저장하고 이 높은 전압의 에너지를 평활전류 정착을 위해 사용하는 방식이다. 이러한 방식은 기본적으로 전동기영역에서 전류소호시 순간적으로 발생하는 발전모드를 이용하는 방식이며 발전영역이 장시간 유지되면 콘덴서의 전압은 설정전압 이상이 되어 축적된 에너지는 초퍼에 의해 전원 측으로 에너지를 전달하여야 한다. 이러한 방식은 에너지 회수를 위하여 장치를 추가해야 하며, 회수되는 에너지가 많을수록 효율은 저하한다. 이는 에너지 회수시 전류루우프가 콘덴서 측으로만 존재하기 때문이다. 따라서 이러한 방식은 발전기로 동작하는 SRM에는 적합하지 못하게 된다.

## 2.2 견인구동을 위한 새로운 구동회로

SRM구동회로는 전동기 및 발전기 영역 양쪽에서 적절한 운전조건에 의해 결정되어야 한다. 전동기 영역에서 평활전류 정착시는 발전기 영역에서 평활전류정착시보다 상대적으로 적은 인덕턴스로 인하여 시간지연이 적게 된다. 따라서 평활전류 정착시 고려할 사항은 발전기 영역에서 그 조건이 성립하면 일반적으로 전동기 영역에서도 성립한다. 따라서 기존의 대부분 사용되고 있는 전동기 영역에서의 여자조건으로는 발전기영역에서의 여자조건을 성립하기가 상당히 어려운 실정이다.

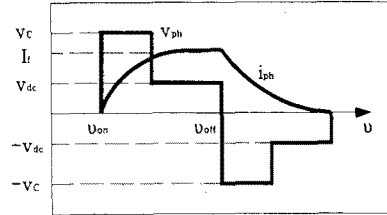


그림 2. 5-레벨 여자전압제어  
Fig. 2. 5-level excitation voltage control

평활전류 소호조건에서는 발전기 영역보다 전동기 영역이 시간지연이 상대적으로 크게 나타나며 전동기영역에서의 소호조건이 성립하면 발전기 영역에서의 소호조건이 성립한다. 또한 평활전류 정착 이후에는 여자하기 위한 높은 전압이 인가되는 것이 아니라 전동기의 역기전력과 동일한 전원전압이 인가될 수 있도록 하여야 한다. 이와 같은 조건을 성립하기 위한 구동회로의 전압의 형태는 그림 2와 같다.

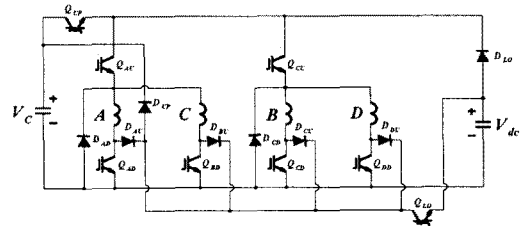


그림 3. SRM 견인구동을 위한 5-레벨 인버터  
Fig. 3. 5-level inverter for SRM traction drive

이와 같은 조건을 만족하면서 발전기 모드에서 전류정착을 위한 높은 전압과 발전동작을 위한 전원전압을 인가할 수 있도록 회로를 제안하였다. 이 회로는 8/6과 같은 상 스위치의 중점이 존재하지 않는 상은 두 스위치 중 한 스위치를 공통으로 사용할 수 있어 스위치를 절감할 수 있는 회로가 된다. 이 회로에서는 일반적인 C-Dump와 달리 여자전압의 크기를 콘덴서전압과 전원전압을 인가할 수 있음은 물론 부의 콘덴서전압과 부의 전원전압을 인가할 수 있는 구조로 되어있어, 전동기영역 및 발전기영역의 동작에 적합한 구동회로가 된다. 각 스위치의 온, 오프에 따른 구동회로의 동작은 4개의 모드로 나누어 설명할 수 있으며, 각 모드에 대한 회로는 그림 4와 같다. 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 초과 없이 전원으로 회생할 수 있다.

그림 5는 실측한 인덕턴스 프로파일을 나타내고 있으며, 그림 6은 인버터 동작에 따른 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다.

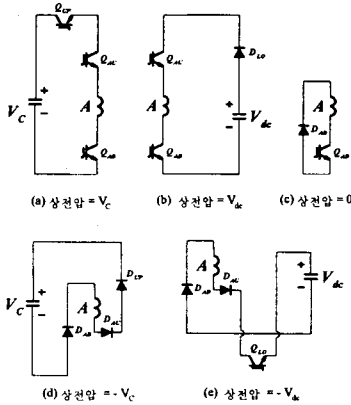


그림 4.인버터 동작에 따른 각 모드  
Fig. 4. Modes according to inverter operation

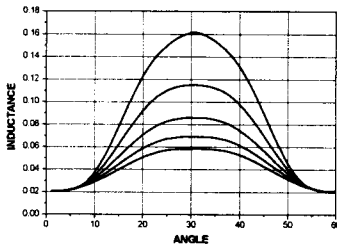


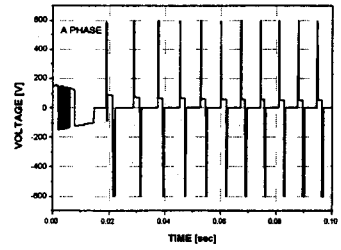
그림 5. 인덕턴스 프로파일  
Fig. 5 Inductance profiles

### 3. 결 론

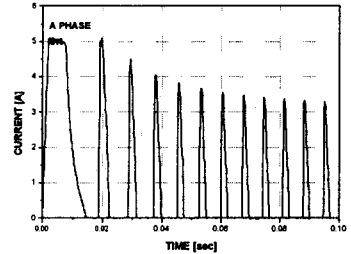
종래의 평활 전류 구동방식에서 평활전류 정착을 위한 여자전압은 회수에너지를 저장한 콘덴서 전압을 이용하였다. 그러나 이 경우 발전영역에서 발전전압을 제어하는 데 어려움이 있다. 본 연구에서는 이러한 단점을 보완할 수 있도록 전동기 및 발전기 영역에서 평활전류로 동작할 수 있는 인버터 회로를 제안하고, 발전에너지를 효과적으로 사용할 수 있는 스위칭 방식을 도출하였다.

### (참 고 문 헌)

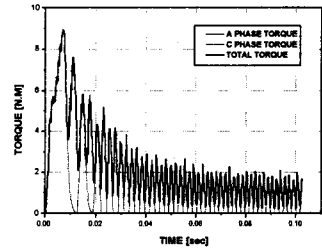
- [1] B. K. Bose, T. J. E. Miller, P. M. Szeszsy and W. H. Bocknell, "Microcomputer Control of Switched Reluctance Motor", *IEEE Trans. Industrial Application*, vol. 22, no. 4, pp. 708-715, 1986.
- [2] I. Husain and M. Ehsani, "Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Drives by PWM Current Control", *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.



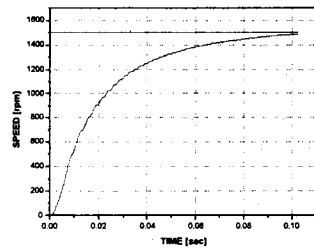
(a) 인가전압 (A상)



(b) 상전류 (A상)



(c) 토크



(d) 속도

그림 6. 시뮬레이션 결과  
Fig. 6. Simulation results