

SRM의 여자전압제어를 위한 멀티레벨 인버터

이주현, 박성준*, 안진우
 경성대학교, 전남대학교*

Multi-level Inverter for the Excitation Voltage Control of SRM

Ju-Hyun Lee, Sung-Jun Park*, Jin-Woo Ahn
 Kyungsung University, Chonnam National University*

ABSTRACT

Energy recovery in the regenerative region is very important when SRM is used in traction drive. This paper suggests multi-level inverter which is useful for motoring and regenerative operation. The proposed method is verified through simulations and experiments.

단, R : 권선의 저항, L : 인덕턴스, i : 상전류,
 $\omega = d\theta/dt$: 회전자 각속도

SRM의 토크는 인덕턴스가 변하는 구간에서 발생하며, 이때 발생하는 토크는 자기회로 내 코에너지(Coenergy)개념을 도입한 식 (2)와 같이 상권선에 흐르는 전류의 제곱과 회전자 위치각에 대한 인덕턴스의 변화율에 비례한다.

1. 서 론

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

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, SRM)를 고효율로 운전하기 위해서는 단일 펄스 구동방식이 제안되었다.^[3] 평활 전류 구동방식에서 평활전류 정착을 위한 여자전압은 회수에너지를 저장한 콘덴서전압을 이용하는 방식이 대부분이다. 이러한 방식에서 SRM이 전동기 영역으로 동작할 경우에는 콘덴서에 저장된 에너지 모두를 전동기 영역에서 소모할 수 있으나, 발전모드가 장시간 유지되면 콘덴서의 에너지는 더 이상 저장할 수 없는 상태가 되는 단점이 있다.

식 (2)로 부터 SRM의 발생토크는 전류의 제곱에 비례하고 위치각에 대한 인덕턴스의 기울기에 비례함을 알 수 있다. 토크가 전류의 제곱에 비례함으로써 상전류의 방향과 무관하게 토크를 발생시킬 수 있으며, 인덕턴스의 기울기에 따라서 토크의 부호가 달라지므로 회전방향에 대하여 역방향의 토크인 부토크(negative torque)가 발생하는 회전자의 위치각이 존재하게 된다.

본 연구에서는 전동기 및 발전기영역의 서로 다른 파라미터를 갖는 두 모드에서 신속히 평활전류 모드로 동작할 수 있는 인버터회로를 제안하고, 제동 시 발생하는 회생에너지를 효과적으로 사용할 수 있는 스위칭 방식을 도출하여 이 인버터의 제어 성능을 실험을 통하여 증명하였다.

2.2 인덕턴스 변화에 따른 동작모드

2. SRM의 특성 및 자기에너지

SRM의 동작모드는 토크의 극성따라 결정되며, 인덕턴스의 변화율이 正(정)인 구간에 상전류를 흘리면 정토크가 발생하는 전동기영역이 되고, 변화율이 負(부)인 구간에 상전류를 흘리면 부토크가 발생하는 발전기 영역이 된다. 이러한 두 영역에서 전류의 신속한 확립과 소호의 조건은 다르게 나타난다.

2.1 SRM의 여자특성

그림 1의 전동기 영역에서는 상권선의 최소 인덕턴스의 영향으로 전류의 확립은 순간적으로 이루어지지 않고 시간 지연이 생기며, 이를 보상하기 위해서 인덕턴스가 증가하는 시점보다 앞선 각(θ_{ad})에서 상 스위치를 온 하여야 한다.

SRM의 고정자 권선에 전압을 인가할 경우 상당 전압방정식은 식(1)과 같다.

파형 B는 적정 θ_{ad} 인 θ_B 에서 상 스위치를 온 함으로써 평활전류를 형성함을 알 수 있으며, 파형 A는 평활전류를 형성하기 위한 적정각 보다 큰 θ_A

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

에서 상 스위치를 온 하여 과여자가 됨을 나타내고 있고, C의 파형은 적정 각보다 적은 θ_C 에서 상 스위치를 온 하여 부족여자가 됨을 나타내고 있다.

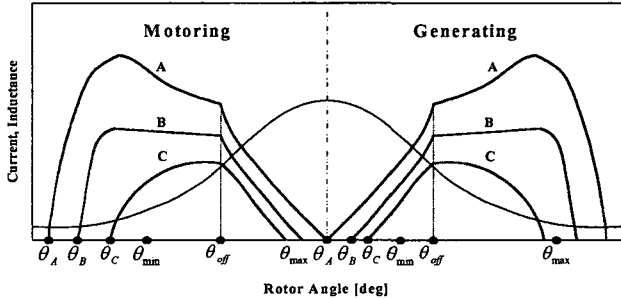


그림 1 스위칭 온 각도 변화에 따른 SRM 및 SRG의 상전류 파형
Fig. 1 Current waveforms by changing switching-on angle in SRM & SRG

그러므로 인덕턴스 증가 구간에서 정토크의 발생을 효과적으로 하기 위해서는 전동기의 속도와 여자전압의 크기에 따른 적정 온 각을 구할 필요가 있다. 또한 발전기 영역에서는 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.

인덕턴스 증가 구간 및 감소구간에서 전동기 모드 및 발전기 모드를 효과적으로 하기 위해서는 다음과 같은 조치가 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 토크 발생을 위해 충분한 전류를 확립하기 위해서는 그 구간 이전의 최소 인덕턴스 구간($\theta_0 \sim \theta_{min}$)에서 스위치 온을 행하여야 한다. 인덕턴스의 최소구간에서 온을 행할 경우 전류정착에 의한 전동기의 출력은 증가시킬 수 있으나, 동손이 증가하는 단점을 안고 있다. 또한 이러한 동손의 증가를 고려하지 않고 전류가 확립되지 못하면 전류확립 시 단일 펄스 형태의 높은 전압을 인가할 수 있는 외부회로를 추가하여 전류정착을 도울 수 있다.

(2) 발전기 영역에서 인덕턴스 하강 구간($\theta_{max} \sim \theta_{min}$)에서 전류정착을 위해서 스위치-온이 될 경우 전동기 영역으로 동작하며 스위치를 오픈한 시점부터 발전기 영역이 된다. 따라서 전동기 영역으로 동작하는 시간을 최소화하기 위해서는 높은 전압을 인가할 수 있는 외부회로를 추가하는 것이 필요하다.

(3) 발전기 영역에서 SRM은 역기전력 항에 전류를 포함함으로써 인해 발전기 영역 운전 시 부하전류에 따라 발전전압은 현저하게 변하게 되어 안정

적인 운전이 어렵다.

3. SRM의 최적 운전을 위한 여자전압 제어

SRM이 전동기 영역으로 동작할 경우 그림 2(a)와 같이 신속한 평활전류 정착을 위해서 DC-Link 전압보다 높은 전압을, 평활전류 정착 후에는 평활전류와 전동기의 속도에 맞는 DC-Link 전압을 인가하여야 하며, 전류 소호 시에는 높은 역전압으로 신속한 전류소호를 행하여야 한다. 또한 저속영역에서 전류제어를 행할 시에는 영전압을 인가할 수 있는 전력회로가 필요로 한다. 따라서 강인한 전류제어를 위해서는 높은 여자전압인 정의 C-Dump 전압, DC-Link 전압, 영전압, 높은 감자전압인 부의 C-Dump 전압의 4레벨 인버터를 구성하여야 한다.

발전기 영역에서는 그림 2(b)에서 보는 바와 같이 전동기 모드를 최소화하기 위해 신속한 전류정착용인 높은 C-Dump 전압과 DC-Link측으로 발전기모드로 동작하기 위한 DC-Link 전압이 필요하다. SRM을 발전기로 동작할 시 단일 펄스모드로 동작하면 한 상당 1회의 발전모드가 동작하므로 정격의 발전출력을 발생하기 어렵다. 이를 극복하기 위해 불연속 PWM모드로 동작하여 한 상당 수회의 발전모드를 덤으로 출력을 증대할 수 있다. 따라서 SRM을 전동기 영역과 발전기 영역에서 효율적인 여자제어를 위해서는 5개의 전압 레벨이 필요하다.

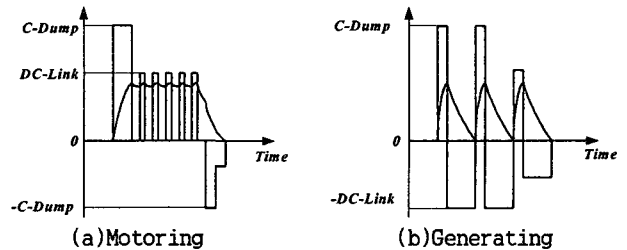


그림 2 5-레벨 여자전압제어
Fig. 2. 5-level excitation voltage control

이와 같은 조건을 만족하면서 발전기 모드에서 전류정착을 위한 높은 전압과 발전동작을 위한 전원전압을 인가할 수 있도록 그림 3과 같은 회로를 제안하였다.

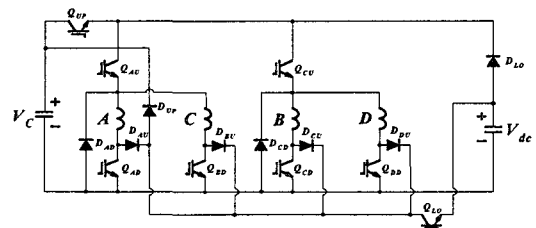


그림 3. 4상 SRM용 5-레벨 인버터
Fig. 3. 5-level inverter for 4-phase SRM

각 스위치의 온, 오프에 따른 구동회로의 동작은 5개의 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 전원에서부터 스위치 Q_{LO} 에 의해 선택할 수 있는 회로가 되며, 발전영역에서는 기존의 C-Dump회로와 달리 발전영역이 장기간 유지되어도 발전기의 회수엔너지를 초과없이 전원측으로 회생할 수 있다.

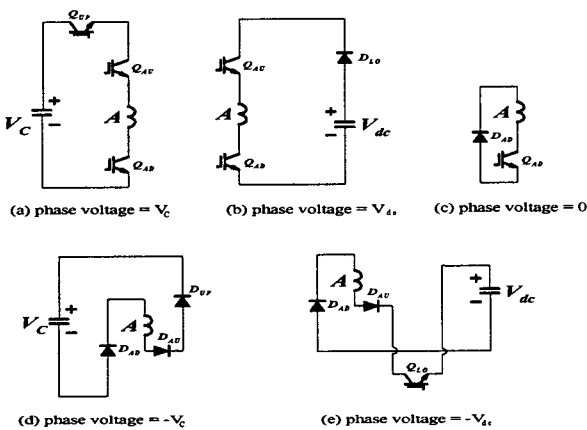
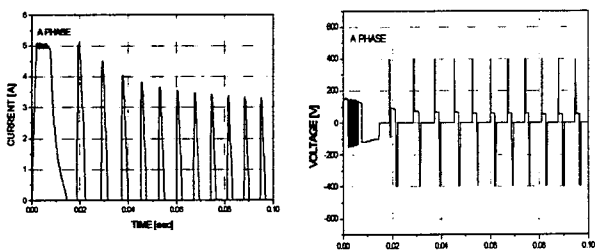


그림 4. 인버터 동작에 따른 각 모드
Fig. 4. Modes according to inverter operation

4. 실험 및 결과

4.1 특성평가를 위한 실험

그림 5는 인버터 동작에 따른 인가 상전압, 상전류, 토크 및 속도에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다.



(a) Applied voltage (Phase A) VER: 200V/div., HOR: 10msec/div.
(b) Phase current (Phase A) VER: 1A/div., HOR: 10msec/div.

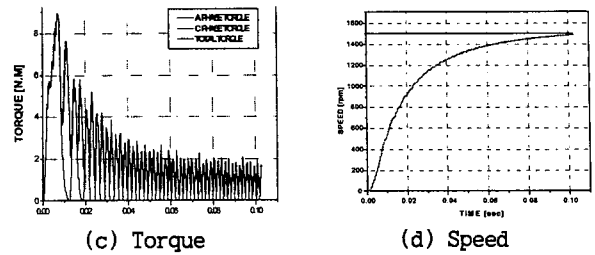
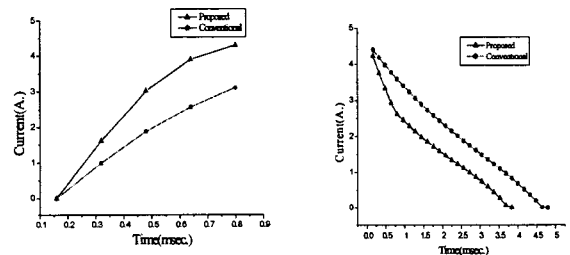


그림 5 제안된 인버터의 특성 해석
Fig. 5 Characteristics of the proposed inverter

그림 5(a)에서 보는 바와 같이 신속한 상전류 정착 및 소호를 위해 전원전압에 1.8배의 높은 콘덴서 전압을 인가하고 있다. 모터의 토크는 그림 5(c)에서 보는 바와 같이 리플이 매우 심하게 나타나고 있으나 전동기의 관성력에 의해서 속도변동은 그림 5(d)에서 보는 바와 같이 크지 않음을 알 수 있다.

제안된 인버터와 기존의 인버터의 일정한 전류에 대한 전류 정착시간 및 전류 소호시간에 대한 시뮬레이션 결과를 그림 6에서 나타내고 있다. 그림 6(a)에서 알 수 있듯이 전원전압의 1.8배의 크기의 콘덴서 전압하에서 기존의 일반적인 인버터에 비해 제안된 Multi-Level 인버터가 일정한 전류레벨에서 1.8배 이상 전류가 빨리 정착하는 것을 알 수 있다.



(a) Build-up Time (b) Demagnetizing Time
그림 6 인버터에 따른 전류 정착 및 소호시간
Fig. 6 Build-up and demagnetizing time according to each inverter

그림 7은 속도에 따른 제안된 인버터와 기존의 인버터의 출력특성을 비교하였다. 여기서 도통각은 일정하게 하였다. 정격출력에서 콘덴서 전압을 전원전압의 1.8배가 되도록 Q_{UP} 및 Q_{LO} 스위치의 도

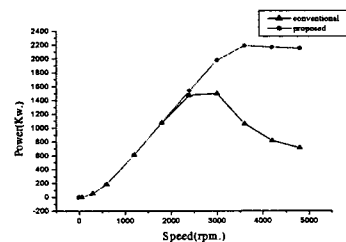


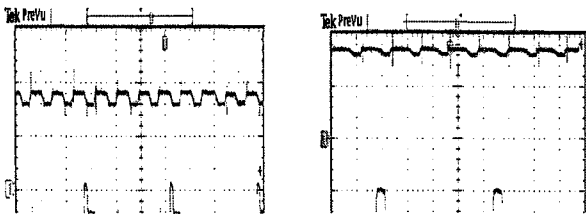
그림 7 속도에 따른 두 인버터의 출력특성 비교
Fig. 7 Power characteristics of each inverter according to the Speed

통비를 조정했을 때, 기존의 인버터에 비해 제안된 인버터의 출력특성이 1.8배정도 증가하였으며 고속 영역에서 안정된 출력을 낼 수 있다. 기존 인버터의 경우에도 스위칭 각의 조정으로 어느 정도의 출력보정은 가능하나 이 특성그림은 같은 조건에서 여자특성이 우수함을 보인 것이다.

4.2 제안된 인버터의 실험

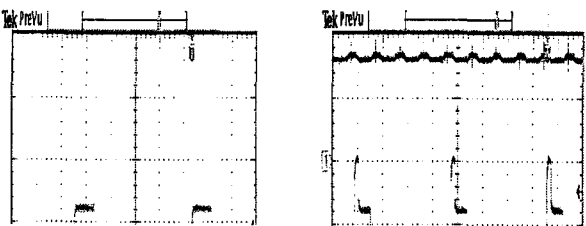
실험에 사용된 SRM은 고정자와 회전자의 극이 8/6이고 2[Hp] 5000[rpm], 300[V]이며, 이를 구동시키기 위해 5-level 인버터를 사용하여, 실험장치를 구성하였다.

그림 8은 SRM을 전동기 및 발전기 모드로 동작할 시 전압 및 전류 및 콘덴서 전압 파형을 나타내고 있다. 그림 8(a)는 SRM을 전동기 모드로 구동할 시 권선 저항손을 적게 하기 위해서 어드벤스 각도를 영으로 설정하고 상전류 정착과 소호를 신속히 하기 위해 높은 여자전압과 감자전압을 인가할 때, 위로부터 콘덴서 전압, 상전압, 상전류 파형이다.



(a) Motoring mode
(Upper:DC link voltage,
Mid:phase voltage,
Lower:phase current)

(b) Regenerating mode
(Upper:DC link voltage
Mid:phase voltage,
Lower:phase current)



(c) Phase voltage and current in conventional inverter (Upper:DC link voltage, Lower:phase current)

(d) Phase voltage and current in proposed inverter (Upper:DC link voltage, Lower:phase current)

그림 8 각 모드에서의 상전압 상전류 및 콘덴서 전압파형 (전압:200V/div., 전류: 2.5A/div.)

Fig. 8 Voltage, current according to each mode (voltage:200V/div., current: 2.5A/div.)

그림 8(b)는 인덕턴스 상승구간에서의 여자 전류 확립 및 발전전류의 발산을 막기 위해 높은 여자전압을 인가할 때, 위에서부터 콘덴서 전압, 상전압, 상전류 파형이다. 그림 8(c)는 기존의 비대칭형 브리지 인버터에서 전동기 모드로 구동시 상전압 및

상전류 파형이고, 그림 8(d)는 제안된 5-level 인버터에서 전동기 모드로 구동 시 상전압, 상전류 파형이다. 그림 8(c)와 (d)는 동일한 드웰각 및 전압에 실험이 이루어 졌으며 기존의 비대칭형 브리지 인버터에 비해 제안된 인버터의 전류 정착 및 소호가 빨라짐을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 높은 여자전압으로 신속한 전류 정착과 높은 감자전압으로 신속히 전류를 소호함으로써 도통비를 증대시킬 수 있도록 기존의 비대칭형 브리지 인버터와 스위칭 소자수가 동일하면서 다양한 레벨의 여자전압 형성이 가능한 인버터 토폴로지를 제안하였고, 그 결과 전동기 영역 시 기존의 비대칭 브리지 인버터에 비해 도통비가 20% 정도 증대하였음을 알 수 있었다. 또한 SRM을 발전기 모드로 동작시켰을 경우 전류의 레벨이 임계치 이상으로 발산하는 경우 높은 콘덴서 전압으로 상전류의 발산을 막아 시스템을 안정화시킬 수 있었으며, 높은 콘덴서 전압은 전동기 모드를 최소화하여 발전기모드의 시간을 상대적으로 증대할 수 있어 에너지를 효과적으로 사용할 수 있었다.

본 연구는 BB21의 지원에 의하여 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] 안진우, 스위치드 릴럭턴스 전동기, 오성미디어,2001.
- [2] J. W Ahn, et al, " Digital PLL Technique for Precise Speed Control of SRM Drive", Proceedings of IEEE/PESC, pp. 815-819, 1999
- [3] 추영배, 황영문; "자기에너지 회수에 의한 VRM의 여자특성개선," 대한전기학회 논문지 44권2호, pp.203-209, 1995.2
- [4] 이상훈, 박성준, 안진우, 김철우; "SRM의 최대도통비를 갖는 여자전압제어," 대한전기학회 하계학술대회, pp.977-979, 2001.
- [5] J.-W. Ahn et al; "Five-Level Inverter for Optimal Excitation of SRM Drive," Proceedings of IEEE/ISIE, vol. 3, pp.1401-1406, 2001.6