

SRM의 전동 및 발전동작을 위한 새로운 인버터의 개발

박한웅*, 박성준**, 원태현***, 정기화*, 김철우****, 황영문****
 *해군사관학교, **거제대학, ***동의대학, ****부산대학교.

Development of a Novel Inverter Circuit for Motoring and Generating Operation in SRM Reluctance Machine

*Han-Woong Park, **Sung-Jun Park, ***Tae-Hyun Won, ****Kee-Hwa Jung, ****Cheul-U Kim, ****Young-Noon Hwang
 *Korea Naval Academy, **Koje College, ***Dongeui College, ****Pusan National University

Abstract - 회수에너지를 저장한 콘덴서전압을 이용하여 평활전류 구동방식에서 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 치명적인 약점을 갖고 있다. 따라서 본 연구에서는 전동기 영역 및 발전기영역에서 평활전류 모드로 동작할 수 있는 인버터회로를 제안하고, 발전에너지를 효과적으로 사용할 수 있는 스위칭 방식을 들출하였다.

1. 서 론

SRM(Switched Reluctance Motor)은 단일 여자기기(singly excited machine)로 구조가 간단하고 저렴하며 각 상의 분리로 단락사고(shoot-through fault)에 대해 안정적이며, 직류전동기의 속도-토크 특성을 가지고 있고 넓은 속도가변범위 및 고속, 정역 회전특성이 우수하고 강인하다는 특성을 가지고 있어 선진국을 중심으로 가전기기, 전기자동차, 항공기 및 산업전반에 그 응용영역을 확대해 가는 연구와 개발이 진행되고 있다. SRM의 임의 부하토크와 운전속도에서도 정토크 발생 구간을 효과적으로 이용하고 부토크의 발생을 억제하여 전동기를 고효율로 운전할 수 있을 뿐만 아니라 토크 맥동을 줄일 수 있는 방법으로 평활 전류 구동 방식이 제안되었다[1]. 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 치명적인 약점을 갖고 있다. 또한 평활전류를 형성하는 시점도 전동기영역과 발전기 영역에서는 다르게 나타나며 발전기 영역이 더욱 악조건을 갖고 있다. 따라서 종래의 전동기 영역에서 설정한 파라메타는 발전기 영역에서는 적절한 값이 되지 못한다.

본 연구에서는 전동기 영역 및 발전기영역에서 평활전류 모드로 동작할 수 있는 인버터회로를 제안하고, 발전에너지를 효과적으로 사용할 수 있는 스위칭 방식을 들출하였다.

2. 본 론

2.1 SRM의 동작 원리와 구동 전류

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

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

단, $\omega = \frac{d\theta}{dt}$: 회전자 각속도

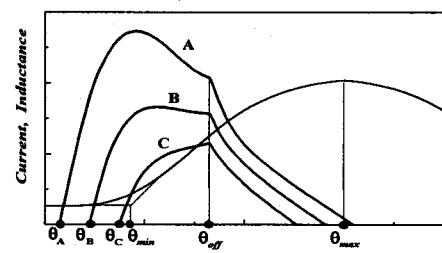
이때 SRM의 릴럭턴스 토크는 자기회로의 릴럭턴스가 최소화되는 방향으로 발생하며, 이때 발생하는 토크는 식 (2)에서와 같이 상권선에 흐르는 전류의 제곱과 회전자 위치각에 대한 인덕턴스의 변화율에 비례한다.

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

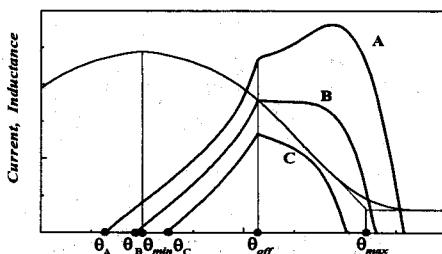
SRM에서 릴럭턴스 토크를 최대한 이용하기 위하여 보통 고정자와 회전자 모두 돌극형(salient type)으로 하여 인덕턴스의 변화율이 최대가 되도록 하고 스위치-온 시점과 스위치-오프 시점에서 부하전류에 대응하는 전류의 확립과 소호를 신속히 하여 토크 발생 구간을 최대한 활용하여야 한다.

토크의 극성은 인덕턴스 변화율에 의해 결정되며, 인덕턴스의 변화율이 正(정)인 구간에 상 전류를 흘리면 정토크가 발생하는 전동기영역이 되고, 변화율이 負(부)인 구간에 상전류를 흘리면 부토크가 발생하는 발전기영역이 된다. 이러한 두 영역에서 전류의 신속한 확립과 소호의 조건은 다르게 나타난다.

그럼 1은 자기적 포화가 없는 인덕턴스 프로파일을 가진 경우로 전동기 영역 및 발전기 영역으로 동작시 시위치-온 시점에 따른 상전류 파형을 나타내고 있다.



(a) 전동기 영역(Motoring region)



(b) 발전기 영역(Generating region)

그림 1 스위칭 온 각도 변화에 따른 상전류 파형

Fig. 1 Current waveform by changing switching on angles

전동기 영역에서 동작하는 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(θ_{ad})에서 상 스위치를 온 하여야 한다. B의 파형은 적정 θ_{ad} 인 θ_A 에서 상 스위치를 온 함으로써 평활전류를 형성함을 알 수 있으며, A의 파형은 평활전류를 형성하기 위한 적정각보다 큰 θ_A 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. 그러므로 인덕턴스 증가 구간에서 정토크의 발생을 효과적으로 하기 위해서는 전동기의 속도와 여자전압의 크기에 따른 적정 운작을 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(θ_{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 θ_{ad} 에서 인가되는 전압의 크기를 키우는 방법이 고려될 수 있다.

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 토오크 발생을 위해 충분한 전류를 확립하기 위해서는 그 구간 이전의 최소 인덕턴스 구간($\theta_0 \sim \theta_{min}$)에서 스위치 온을 행하여야 한다. 이러한 θ_{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 상당히 큰 인덕턴스의 영향으로 인하여 전류의 확립이 충분하지 않다. 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 θ_{ad} 의 증가에도 불구하고 전류가 확립되지 못하면 전류확립시 높은 전압을 인가할 수 있는 외부회로를 추가하는 것이 바람직하다.

이와 같이 SRM에서 빠른 평활전류를 형성을 위하여 높은 여자전압을 인가하고 평활전류형성 후에 낮은 전압을 인가하는 방식에 대한 연구가 활발히 이루어져 왔으며, 그 대표적인 방식이 콘덴서를 이용한 C-Dump이다. 그러나 일반적인 이러한 방식에서는 SRM의 소호시 발전되는 에너지 전부를 콘덴서에 저장하고 이 높은 전압의 에너지를 평활전류 정작을 위해 사용하는 방식이다. 이러한 방식은 기본적으로 전동기영역에서 전류소호시 순간적으로 발생하는 발전모드를 이용하는 방식이며 발전영역이 장시간 유지되면 콘덴서의 전압은 설정전압 이상이 되어 축적된 에너지는 쿠퍼에 의해 전원 측으로 에너지를 전달하여야 한다. 이러한 방식은 에너지 회수를 위하여 쿠퍼를 한 단을 추가하여야 함으로 회수되는 에너지가 많을수록 그 효율은 저하한다. 이는 에너지회수시 전류루프가 콘덴서 측으로만 존재하기 때문이다. 따라서 이러한 방식은 발전기로 동작하는 SRG에는 적합하지 못하게 된다.

2.1.1 SRM 및 SRG용 구동회로

SRM구동회로는 전동기 영역 및 발전기 영역 양쪽에서 적절한 운전조건에 의해 결정되어야 한다. 전동기 영

역에서 평활전류 정착시는 발전기 영역에서 평활전류정착시 보다 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 설정이다.

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 역기 전력과 동일한 전원전압이 인가될 수 있도록 하여야 한다. 이와 같은 조건을 성립하기 위한 구동회로의 전압파형의 형태는 그림 2와 같은 형태가 된다.

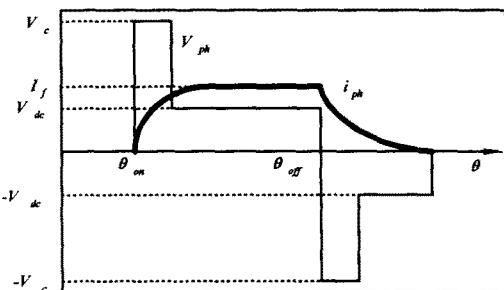
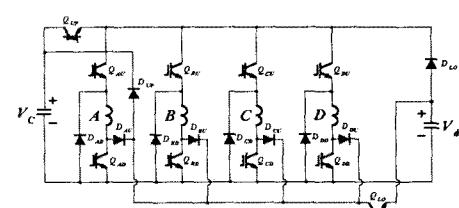


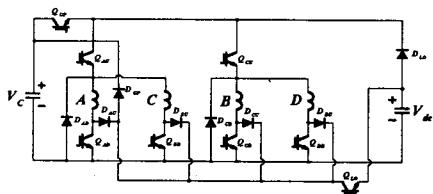
그림 2. 적절한 인가전압의 형태

Fig. 2. Waveform of desirable applied voltage

이와 같은 조건을 만족하면서 발전기 모드에서 전류정착을 위한 높은 전압과 발전동작을 위한 전원전압을 인가 할 수 있는 회로는 그림 3과 같은 회로를 생각할 수 있다. 이 회로의 (a)는 일반적인 SRM에 적용할 수 있으며, 그림(b)는 8/6과 같은 상 스위치의 중첩이 존재하지 않는 상은 두 스위치 중 한 스위치를 공통으로 사용할 수 있어 스위치를 절감할 수 있는 회로가 된다. 여기서는 그림 (a)를 기준으로 그 동작을 설명한다. 이 회로에서는 일반적인 C-Dump와 달리 여자전압의 크기를 콘덴서전압과 전원전압을 인가 할 수 있음은 물론 부의 콘덴서전압과 부의 전원전압을 인가 할 수 있는 구조로 되어있어, 전동기 영역 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 QUP, QAU, QAD가 온된 경우는 콘덴서전압이 상권선에 인가되며, 스위치 QAU, QAD가 온된 경우는 전원전압이 상권선에 인가되며, 스위치 QAD가 온된 경우는 다이모드 DAD에 의해 전류회로가 구성되어 영(zero)전압이 상권선에 인가되며, 스위치 모두가 오프되면 다이오드 DUP, DAU, DAD에 의해 회로가 구성되어 콘덴서전압의 반대극성이 상권선에 인가되며, 스위치 QLO가 온된 경우는 부의 전원전압의 상권선에 인가된다.



(a) 제안된 구동회로 1(Proposed inverter 1)



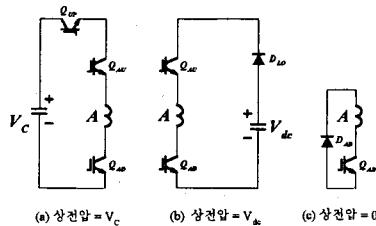
(b) 제안된 구동회로2(Proposed inverter 2)

그림 3. SRM 구동을 위한 제안된 인버터

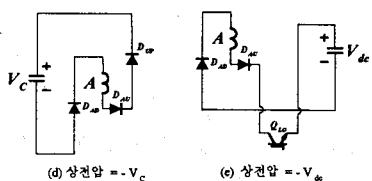
Fig. 3. Proposed inverters for SRM drive

이 회로의 동작은 전원전압과 C-Dump전압 두 전원으로부터 스위치 Q_{LO} 에 의해 선택할 수 있는 회로가 되며, 발전영역에서는 기존의 C-Dump회로와 달리 발전영역이 장기간 유지되어도 발전기의 회수에너지를 초과 없이 전원 측으로 전달할 수 있는 구동장치가 된다.

그림 5는 실측한 인덕턴스 프로파일을 나타내고 있다.



(a) 상전압 = V_c (b) 상전압 = $-V_c$ (c) 상전압 = 0



(d) 상전압 = $-V_c$ (e) 상전압 = $-V_d$

그림 4. 각 스위치의 온, 오프에 따른 여자전압
Fig. 4. Exciting voltage to Switch on/off

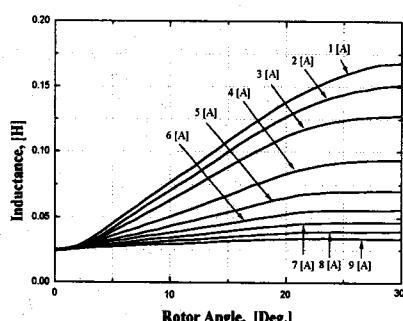
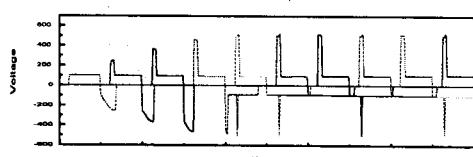
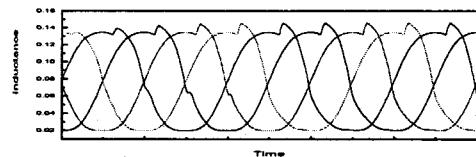


그림 5. 인덕턴스 측정 과정

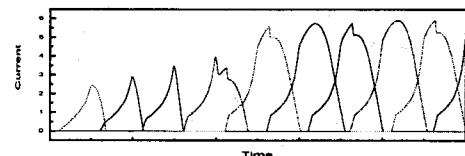
Fig. 5 Measured inductance profiles



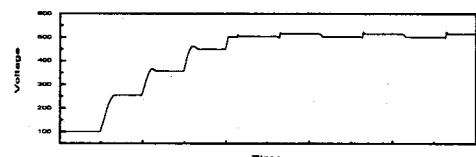
(a) 인가전압 (Apply voltage)



(b) 인덕턴스(Inductance)



(c) 상전류(Phase current)



(d) 콘덴서 전압(Condenser voltage)

그림 6 SRM의 각부 파형

Fig. 6. Waveforms of SRM

그림 6은 본 제안된 전력회로에 의해 제어된 SRG에서 기동상태에서 인가전압, 인덕턴스, 전류, 감자용 콘덴서 전압을 나타내고 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 종래의 평활 전류 구동방식에서 평활전류 정착을 위한 여자전압은 회수에너지를 저장한 콘덴서 전압을 이용하는 방식의 단점을 보강할 수 있도록 전동기 영역 및 발전기영역에서 평활전류 모드로 동작할 수 있는 인버터회로를 제안하고, 발전에너지를 효과적으로 사용할 수 있는 스위칭 방식을 들출하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] B. K. Bose, T. J. E. Miller, P. M. Szezesny 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.