

SRM 구동용 인버터 토폴로지의 특성비교에 관한 연구

\*오성업, 정승주, 오인석, 성세진

충남대학교 전기공학과

A Study on Characteristic Comparison of Inverter Topologies for SRM Drive

Sung-up Oh, Seung-ju Jeong, In-Suk Oh, Se-jin seong

Chungnam National University

Abstract

In this paper, several inverter power circuit that are suitable for switched reluctance motor(SRM) drives are analyzed and compared with each other, Because the converter choice depends on the motor design, the analysis and selection are done for 6/4 SRM.

Not considered in this paper is another class of inverter topologies for motor with bifilar windings. The proposed converter is applied to 3phase, 6/4 SRM.

시뮬레이션은 MATLAB을 이용하여 행해졌고, 실험은 3상, 6/4 SRM에 적용되었다.

2. 기본원리

그림 2.1은 6개의 고정자극과 4개의 회전자극을 가진 이중돌극형 6/4 SRM의 구성도를 나타낸다.

상 A를 여자시키면 회전자는 토크턴스가 최소로 되는 방향으로 회전하게 된다. 그 다음 상 A의 여자를 제거하고 상 B를 여자시키면 계속적으로 회전하게 된다. 이와 같은 방법으로 상 A, B, C순으로 여자시키면 모터는 회전하게 된다.

1. 서론

최근 산업의 메카트로닉스화함에 따라 다기능, 고성능을 가진 전동기의 개발이 활발히 이루어지고 있다. 이러한 측면에서 SRM이 크게 주목받고 있고, 그에 대한 출력 해석이나 인버터의 구성 등에 관한 연구가 진행되고 있다.

SRM은 구조가 간단하고, 다기능화가 용이하며, 고효율 전동시스템이며, 경제성이 높고, 시스템 제어성이 강한 장점을 가지고 있다. 이러한 장점 때문에 선진국에서는 가전 기기나 자동차등을 중심으로 실용화되고 있는 실정이다.

SRM 구동은 기계적 에너지 변환을 주도하는 자기적 구조인 VRM과 스위칭 펄스 인가 전원을 만드는 Switching power unit인 인버터와 회전자의 위치검출과 운전조건을 제어하는 Control device로 구성된다.

본 논문에서는 SRM 구동을 위한 인버터 토폴로지에 대한 특성에 대하여 고찰한다. 이러한 인버터를 설계함에 있어서 꼭 필요한 조건이 있는데, 먼저 권선 전류물 제어하기 위하여 저속 구동시에는 전압 또는 전류의 PWM 제어가 바람직하고, 고속에서의 높은 감자 전압과 전류 중첩을 갖는 상전류의 독립적인 제어가 필요하고, 전류 펄스 충격으로부터의 교류전원은 분리되어야 하며, 감자 기간 동안 인버터와 전동기 사이의 충분한 회생 에너지 교환을 갖게 하여야 한다.

인버터의 전류 정격은 기동토크 조건에 의하여 결정되는 반면, 전압정격은 최대 전동기 속도에 의해 결정된다. 그리고 SRM은 회전자 초기 위치에 의존하여 정격토크보다 낮은 기동토크를 발생함에 유의하여야 한다.

본 논문에서는 기존의 인버터 토폴로지들을 이론적으로 해석하였고, 클래식 인버터를 시뮬레이션과 실험을 통해 비교, 검토하였다.

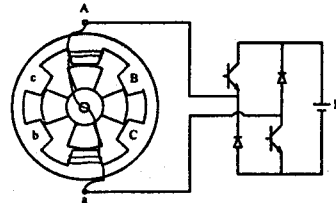


그림 2.1 6/4 SRM의 구성도

여기서 한 상의 전압 방정식을 생각해 보면 다음과 같다.

$$V = R \cdot i(t) + \frac{d\lambda}{dt} \quad , (\lambda = L(\theta) \cdot i(t)) \quad (1)$$

위 식을 전개하면,

$$V = [ R + \frac{dL(\theta)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} ] i(t) + L(\theta) \frac{di}{dt} \quad (2)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad \text{라 하면,}$$

$$V = [ R + \frac{dL(\theta)}{d\theta} \omega ] i(t) + \omega L(\theta) \frac{di}{dt} \quad (3)$$

V: 인가전압, R: 한상의 내부저항, i(t): 고정자권선 전류

λ: Flux linkage, L(θ): 인덕턴스

와 같이 나타낼 수 있다.

그리고 회전자의 회전에 의해서 생기는 토크는 다음과 같다.

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad (4)$$

식 (4)에서 보듯이 토오크는 전류의 극성에 무관하다는 것을 알 수 있다.

### 3. 인버터 토폴로지

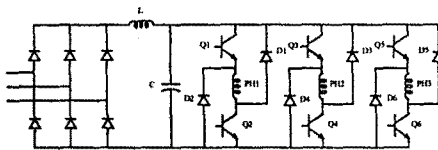
인버터 토폴로지에 대한 많은 연구가 진행되고 있으나, 현재까지 경제성과 성능, 효율적인 측면을 모두 만족시키는 인버터 토폴로지는 아직까지 없다. 다만 토폴로지에 따라 속도, 토오크, 출력, 효율, 경제성 등을 감안하여 각각의 특성을 가지고 있다. 그 중 대표적인 몇 가지의 인버터 토폴로지에 대해 알아보기로 한다.

인버터 토폴로지는 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, single-rail 인버터와 dual-rail인버터로 나눌 수 있다. Single-rail 인버터는 모터 상의 자화 및 감자에 대해 같은 전압을 가지고, dual-rail 인버터는 자화 및 감자에 대해서 둘의 전압이 사용된다. 전자의 경우를 가지는 인버터로는 클래식, 밀러 인버터이고, 후자의 경우는 C-dump 인버터와 Buck-Boost 인버터와 Sood's 인버터와 R-dump 인버터 등이 있다.

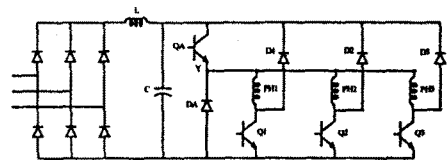
표 1은 인버터 토폴로지의 특성을 간략하게 정리한 것이고, 그림 3.1은 인버터 토폴로지의 대표적인 회로들이다.

Inverter Type	장 점	단 점	비 고
Classic Inverter	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 고효율이다.</li> <li>· 전류감쇄가 빠르다.</li> <li>· 다양한 제어가 가능하다.</li> <li>· 각 상의 전류제어가 독립적</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 소자 수의 증가로 인한 제어 회로와 구동 회로가 증가</li> <li>· 소자를 통한 전압강하가 증가</li> <li>· 고속에서 유지 전류가 많이 들</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 상수가 적은 모터에 유리</li> <li>· 고전압, 대용량 구동에 적합</li> </ul>
Miller's Inverter	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 낮은 인버터 kVA</li> <li>· 전류 중첩을 허용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 주 스위치가 ON이면 강제 감자가 불가능하다.</li> </ul>	
Buck-Boost Inverter	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 높은 감자전압</li> <li>· PWM 제어를 피할 수 있다.</li> <li>· 전류 중첩을 허용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 전압정격이 높다.</li> <li>· 수동구성소자들이 많다.</li> </ul>	
C-dump Inverter	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 소자의 수가 적다.</li> <li>· 각 상의 전류제어가 독립적</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 인덕터, 커패시터가 증가</li> <li>· 제어가 어렵고, 복잡하다.</li> <li>· 소자의 정격전압이 높다.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 에너지를 C에 저장하였다가 DC전원으로 환원한다.</li> </ul>
R-dump Inverter	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 회로구성이 간단</li> <li>· 소자의 수가 적다.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 효율이 낮다.</li> <li>· 늦은 전류 감쇄</li> <li>· OFF각이 제한됨</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 저효율, 저출력 구동에 적합</li> <li>· 충전된 에너지가 저항으로 소모</li> </ul>

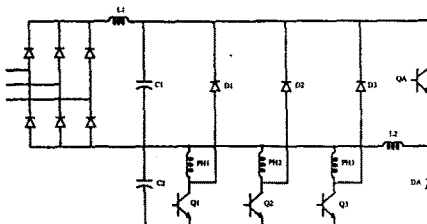
표 1. 인버터 토폴로지의 비교특성



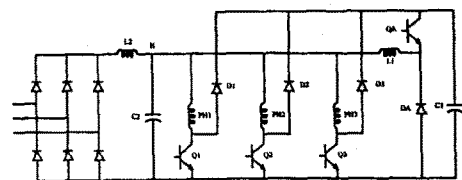
(a) 클래식 인버터(Classic Inverter)



(b) 밀러 인버터(Miller's Inverter)



(c) Buck-Boost 인버터(Buck-Boost Inverter)

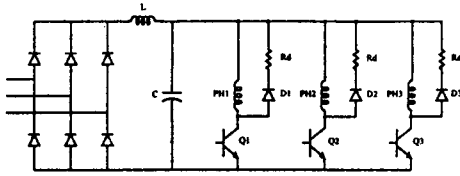


(d) C-dump 인버터(C-dump Inverter)

### 4. 시뮬레이션 및 실험 결과

#### 4.1 제어 시스템의 구성

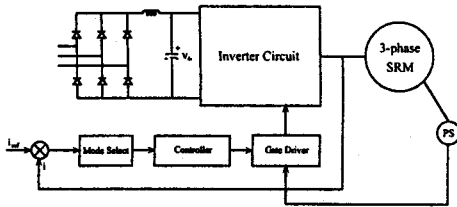
SRM의 토오크는 상전류의 여자에 의해 발생하는데, 시간당 평균 토오크를 효율적으로 얻기 위해서는 회전자의 위치에 따라 적절하게 전류를 공급해야 한다. SRM의 회전기 구조는 간단하나 실용적인 구동 시스템은 다소 복잡하다. 일반적으로 SRM의 구동 방식은 저속에서는 전류제어를 위해 전압 초핑 또는 PWM제어를 통해 토오크를 제어하고, 고속에서는 여자시간 감소로 스위칭각을 조정할 수 없으므로 단일 펄스를 사용하고 위상각 제어를 통해 토오크를 제어한다. 가변속 여자제어를 위한 제어방식은 전압제어 방식과 전류제어 방식이 있다. 전압제어 방식은 듀티비의 조절로 전압크기를 제어하는 방식으로 제어시스템의 구성이 간편한 것이 특징이다. 이에 비해 전류제어 방식은 전압제어방식 보다 복잡하나 토오크제어 성능이 우수하다고 알려져 있다. 본 연구에서는 보다 효율적인 구동을 위해 다음과 같은 제어시스템을 시뮬레이션을 통하여 알아보았다.



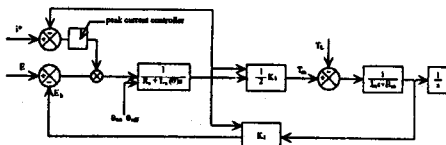
(e) R-dump 인버터(R-dump Inverter)

그림 3.1 대표적인 인버터 Topologies

그림 4.1은 인버터의 고효율 구동을 위한 제어시스템을 나타낸다.



(a) 전체 시스템



(b) 제어시스템의 블록선도

그림 4.1 고효율 구동을 위한 제어시스템

시뮬레이션은 고효율 구동에 적합한 클래식 인버터 회로를 통하여 이루어졌고, 실험결과와 비교되었다.

#### 4.2 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 매트랩(Matrab)을 이용하여 수행하였다. 그림 4.2는 ON각을  $-7^\circ$ , OFF각을  $14^\circ$  로 주어졌을 때의 시뮬레이션 파형을 보여준다.

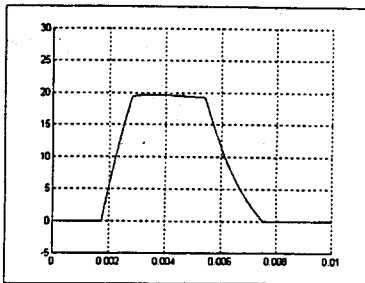


그림 4.2 ON =  $-7^\circ$ , OFF =  $14^\circ$  일때의 파형

그림에서 볼 수 있듯이 아주 안정하게 제어된 파형을 볼 수 있다. 이러한 제어방식으로 부하에서 요구하는 기준전류와 모터권선에 흐르는 전류를 비교하여 안정된 파형을 얻을 수 있다.

#### 4.3 실험결과

본 논문에서 실험은 클래식 인버터 회로에 실험을 위하여 제작된 3상 6/4극의 SRM이 사용되었다. 회전자의 위치각을 검출하기 위하여 전동기의 축상에 Absolute Encoder를 부착하였고, 엔코더 콘트롤러는 일본 Koyo사의 프로그래머블 컨트롤러인 FC-20을 사용하였고, 주 스위칭 소자로는 IGBT가 사용되었다.

그림 4.3은 ON각을  $-7^\circ$ , OFF각을  $14^\circ$  로 주어졌을 때의 파형이다.

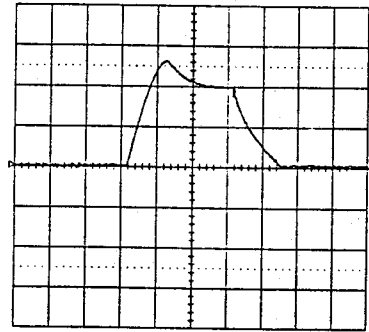


그림 4.3 ON =  $-7^\circ$ , OFF =  $14^\circ$  일때의 전류파형(1116rpm)

#### 5. 결론

본 연구에서는 SRM 및 인버터 구동회로를 포함하는 전체시스템의 정확한 해석 및 모델링을 통해 고효율의 인버터와 제어시스템을 구성하였다. 본 연구에서 얻어진 시뮬레이션에서 향상된 효율을 가진 파형을 얻을 수 있었다.

앞으로 본 연구는 SRM 및 인버터 구동회로를 포함하는 전체시스템의 특성을 해석하여 효율이 최대가 되는 최적 운전 컴퓨터 프로그램을 개발하고 실제 구동회로를 설계, 제작하여서 시험을 통하여 최적운전에 관한 결과를 평가함으로써 기존의 다른 전동기 구동 시스템보다 여러가지 장점을 가지는 새로운 전동기 구동시스템의 개발 및 응용에 관한 이론을 확립하고자 한다.

#### 참고문헌

- [1] P.J. Lawrenson, et al., "Variable-Speed Switched Reluctance Motors", IEE Proc., Vol. 127, Pt.B, No. 4, pp. 253-265, July 1980.
- [2] S.Vukosavicand, and V.R. Stefanovic, "SRM Inverter Topologies ; A Comparative Evaluation", IEEE Trans Ind. Appl., Vol. 27, No. 6, pp. 1034-1047, Nov/Dec. 1991.
- [3] R.M. Davis, W.F. Ray, R.J. Blake, "Inverter Drive for Switched Reluctance Motor:Circuits and Component Ratings", IEE, Vol. 128, pp. 126-136, 1981.
- [4] A.E. Fitzgerald, et al., "Electric Machinery", McGraw-Hill Pub. pp. 446-484, 1991.
- [5] Giuseppe S. Buja, et al., "Variable Structure Control of An SRM Drive", IEEE Trans, Vol. 40, No. 1, pp. 56-63, 1991.2.