

# SRM의 토크 제어 기술

장도현

(호서대 전기정보통신공학부 교수)

## 1. 서론

SRM은 직류기와 교류기와는 달리 DC 전원 또는 AC 전원을 직접 투입하여 회전시킬 수는 없다. SRM은 이를 회전시키기 위한 구동 시스템이 필요하며 회전자 위치 센서, 제어기, 및 컨버터로 구성된다.

회전자 위치 센서는 고정자에 대한 회전자의 위치를 전달하는 계기이다. 제어기는 시간과 상 여자 전류의 파형을 제어하기 위해 적당한 여자 전압을 고정자에 인가하기 위한 신호 발생 회로이다. 정교한 제어기는 마이크로프로세서 또는 DSP 등을 이용하여 주어진 속도에 대해 원하는 토크를 얻기 위해 최적의 상태로 운전할 수 있도록 여자 신호를 발생한다. 컨버터는 DC 전원, 전력 스위치, 전력 다이오드 등으로 구성되며, 제어기에 의해 결정되는 시간에 따라 각 상 스위치에 DC 전원을 인가시켜 토크를 발생 또는 제어한다.

3상 교류전동기의 전압형 인버터의 토폴로지가 그림 1(a)와 같이 한 상당 2개의 전력스위치와 다이오드로 이루어진 표준형인 반면, SRM의 컨버터 토폴로지는 한 상당 1개의 전력스위치와 다이오드로 구동이 가능하며 그 외 많은 토폴로지가 개발되었다. 그림 1(b)는 일반적으로 SRM에서 대표적으로 사용되는 비대칭 브릿지 컨버터로서 제어의 다양성이 가장 뛰어나며, 각 상의 전류제어가 독립적이어서 두 상의 전류중첩이 가능하다. 고전압, 대용량에 적합하며 스위치의 정격전압이 상대적으로 낮다.

SRM의 토크 제어의 성공 여부는 상권선에서 흐르는 전류의 활용에 있다. SRM의 저속 운전시 상전류는 전압 PWM 방식이나 히스테리시스 제어방식에 의해 전류의 크기가 조정되어 토크가 제어된다. 속도가 증가할수록 역 EMF가 증가하여 더 이상 단자 전압으로는 전류를 제어할 수 없게 된다. 이때 토크는 단일 펄스 전압방식에 의해 제어한다. 본 자료에서는 이러한 SRM의 일반적인 토크 제어에 관해 고찰하였다.

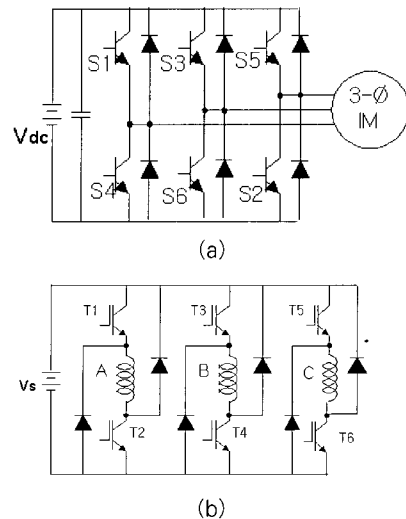


그림 1. (a) 3상 교류전동기-전압형 인버터  
(b) SRM-비대칭 브릿지 컨버터

## 2. SRM의 토크-속도 특성

SRM의 토크-속도 특성은 그림 2와 같이 세 영역으로 나눌 수 있다.

일정 토크 영역(constant torque region)에서 기저 속도(base speed)  $\omega_b$ 는 최대 전류의 조건에서 운전할 수 있는 최대 속도를 의미한다. 이 영역에서는 상 전압의 턴온 각 및 듀웰각(dwell angle)을 일반적으로 고정시킨 상태에서 전류의 크기를 조절하여 토크 또는 속도를 제어한다.

일정전력영역(constant power region)는 속도가  $\omega_b$ 보다 증가하여 역 EMF가 증가할 때 최고 자속 및 토크는 감소하는 영역을 의미한다. 이 영역에서는 듀웰각 동안 연속적으로 통전시키고 턴 온 또는 턴오프 시점을 조정하여 토크를 제어한다. 입력전력이 일정한계가 있으므로 토크는 속도에 반비

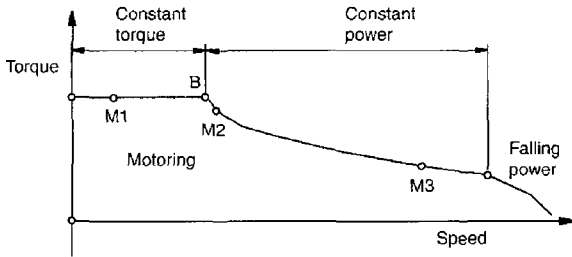


그림 2. SRM의 토크-속도 특성

레하고 듀얼 각은 극 피치 각의 1/2 이하에서 형성된다. 전력저감영역(falling power region)은  $\omega_p$  이상의 초고속 제어 영역으로서 경부하에서 속도를 증가시키기 위해 턴온각이 더욱 앞으로 이동하였을 때 일정 전력은 유지할 수 없고 토크는 갑자기 감소하는 영역이 형성된다. 턴온 시점이 회전자 극-피치의 반(1/2) 이상 앞으로 이동할 때 이전의 스위치의 상전류는 제거되지 못한 채 현 스위치의 상전류가 흐르기 시작하여 발생하는 현상이다.

### 3. SRM의 운전 특성

SRM의 평균 토크를 제어하기 위해서는 전류 펄스 파형의 크기를 조정하여야 한다. 여기서는 속도에 따라 형성되는 SRM의 운전 특성을 살펴보기로 한다.

#### 3.1 저속시 운전특성

SRM의 저속 운전시 발생하는 유기기전력 (EMF)  $e$ 는 공급 직류전압  $V_s$ 에 비해 작으며, 전류는 초핑(chopping)에 의해 조정된다. 전압 강하를 무시할 경우 컨버터의 입력 단자에는  $V_s, 0, -V_s$ 의 전압이 인가되며, 권선단자에서 자속 및 전류를 높이거나 낮추기 위한 전위차는  $(V_s - e), 0, (-V_s - e)$ 가 된다.

그림 3(a)는 저속 운전시 초핑 제어에 의해 나타나는 전류 파형, 토크파형, 쇄교자속 파형으로서 속도를 500rpm으로 유지한다고 가정하였으며 6/4 SRM을 대상으로 하였다. 전류 파형의 턴 온 각과 턴 오프 각은 각각  $45^\circ$  및  $80^\circ$ 이며, 8A를 유지한다. 이에 따른 토크는 인덕턴스의 상승되는 시점에서 급히 토크가 상승하여 그 이후 일정 값을 유지하며 스위치가 턴오프되는 시점에서 급격히 하강한다. 쇄교자속  $\Psi$ 은 턴 온 각에서 턴오프 각까지 영(zero)의 크기에서 최대값으로 거의 선형적으로 상승하며, 그 이후 급격히 하강한다.

이러한 과정은 그림 3(b)의 에너지 변환 루프에서도 설명되어 있다. 한 번의 스트로크에 의해 형성되는 면적  $W$ 는 전원 에서 SRM에 공급되는 에너지를 의미하며, 면적  $W$ 에 의해 SRM의 평균 토크를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_{el[avg]} = mN_r \frac{W}{2\pi} \tag{1}$$

여기서,  $m$ 은 상수이며,  $N_r$ 은 회전자의 극수이다.

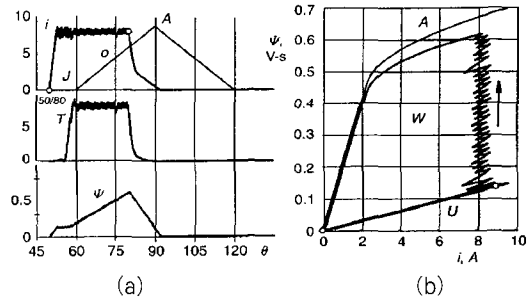


그림 3. 저속 운전시 SRM 운전특성  
(a) 전류, 토크, 쇄교자속 파형  
(b) 에너지 변환 루프

#### 3.2 고속시 운전특성

SRM의 고속 운전시에는 EMF가 증가하여 권선 단자에서 초핑하기 위한 전위차가 불충분해진다. 따라서, 상전압을 단일 펄스화하고 턴온각 또는 턴오프각을 앞으로 이동시켜 토크를 제어한다. 그림 4(a)는 고속운전시 단일펄스제어방식으로 구동하였을 때 나타나는 전형적인 전류, 토크, 쇄교자속 파형으로서 속도는 1300 rpm으로 가정하였으며, 턴온 각과 턴오프 각을 각각  $45^\circ$  및  $80^\circ$ 로 고정하였다. 턴온 시점에서는  $di/dt = V_s/L$ 에 의해 전류가 급격히 증가하다가 인덕턴스가 증가하는 시점에서 역 EMF가 나타나면서 전류는 오히려 서서히 감소한다. 스위치가 턴오프될 때  $-V_s$ 의 전압이 컨버터에 인가되면서 전류는 급격히 감소되며 결국 영전류에 이른다. 4(b)는 그림 2의 곡선중에서 점 M2에 해당되는 것

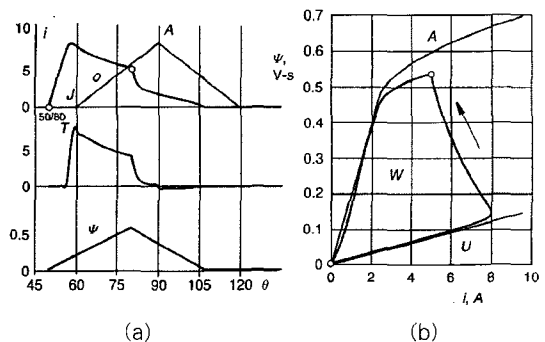


그림 4. 고속운전시 SRM 운전특성  
(a) 전류, 토크, 쇄교자속 파형  
(b) 에너지 변환 루프

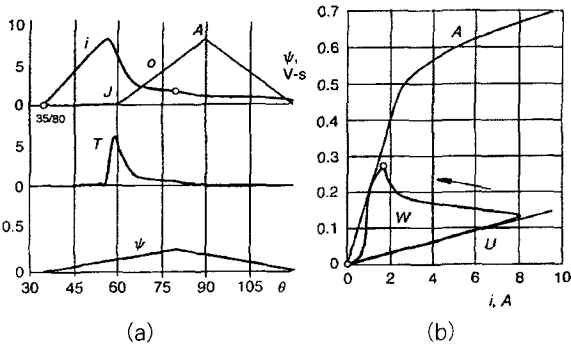


그림 5. 초고속운전시 SRM 운전특성  
(a) 전류, 토크, 쇄교자속 파형  
(b) 에너지 변환 루프

으로서 SRM의 속도가 빠를수록 시작점에서 다시 영전류로 되돌아가는 시간은 줄어들어 에너지변환 면적  $W$ 도 줄어드는 특징을 보여주고 있다.

### 3.3 초고속시 운전특성

속도를 더욱 증가시키기 위한 방식으로서는 턴온각을 앞으로 이동시키고, 역토크를 감소시키기 위해 턴오프 각을 앞으로 이동하게 된다. 가령, 점 M2에서 점 M3로 이동하였을 때 역 EMF는 점 M2에 비해 더욱 커져 상전류는 크게 억제되고 토크는 줄어든다.

점 M2에서 행해지는 속도보다 M3로 이동하여 더욱 고속 화하기 위해서는 턴온각을 앞으로 이동시킬 필요가 있다. 그림 5(a)는 점 M3로 이동하여 초고속으로 운전할 때 나타나는 전류, 토크, 쇄교 자속 파형으로서, 이 때 속도는 3900 rpm으로 증가되었으며 턴온각과 턴오프각을 각각  $35^\circ$  및  $80^\circ$ 로 고정하였다. 그림 4(a)와 비교할 때 최대 토크는 작으며 쇄교 자속의 기울기도 작다. 그림 5(b)의 에너지 변환루프의 면적  $W$ 는 그림 4(b)와 비교하여 약 1/3로 감소한다.

## 4. 전류제어기술

전류제어기술은 크게 3장에서 언급한 바와 같이 고속에서 적용하는 단일 펄스 방식과 저속에서 적용하는 초핑 방식으로 나눌 수 있다. 본 장에서는 그림 1(b)와 같은 비대칭 브리지 컨버터를 대상으로 하고 있으며, 이 때 한 스트로크에서 그림 6과 같이 3개의 통전 형태를 가진다. 그림 6(a)와 같이 두 개의 스위치가 ON될 경우 전원  $V_s$ 가 SRM 권선에 인가되며, 한 개의 스위치가 ON될 경우 그림 6(b)와 같이 환류 회로가 형성되며, 그림 6(c)와 같이 두 개의 스위치가 OFF될 경우 권선내 에너지가 전원으로 회생되어 전원  $-V_s$ 가 권선에 인가되는 회생회로를 형성한다.

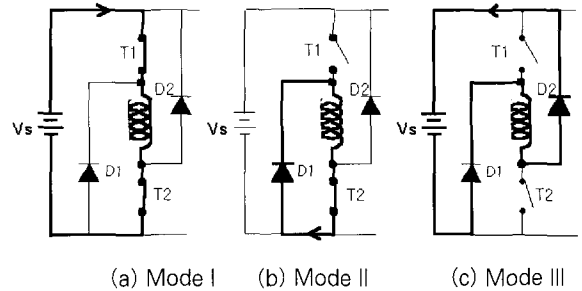


그림 6. 한 상에서의 통전상태

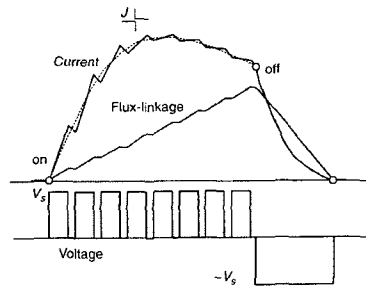


그림 7. 전압 PWM - 소프트 초핑

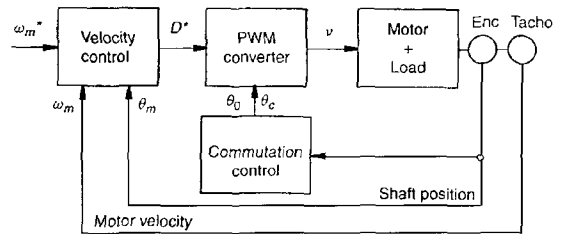


그림 8. 전압 PWM 컨버터 구동 시스템

### 4.1 단일펄스방식

SRM의 고속 운전에서 사용되는 단일 펄스 방식은 이미 3.2절 및 3.3절에서 언급한 바 있다. 턴온각  $\theta_o$ 은 비정렬 위치에 있고 두 개의 스위치가 ON되어 통전되는 드웰각  $\theta_{dw}$  ( $=\theta_c - \theta_o$ ) 동안 전원  $V_s$ 가 권선에 인가된다. 턴오프각  $\theta_c$ 에서는 두 개의 스위치가 OFF되어 전원  $-V_s$ 가 권선에 인가되어 전류가 급격히 감소되어 영전류에 이른다. 단일펄스방식에서 전류 또는 토크를 제어하기 위해서는 턴온각 또는 턴오프 각을 가변시킨다.

### 4.2 전압 PWM 제어방식

전압 PWM 제어방식은 소프트 초핑(soft chopping) 방식과 하드 초핑(hard chopping)방식으로 나누어진다.

소프트 초핑은 한 상에 연결된 두 개의 스위치 중에서 하나의 스위치가 초핑되는 방식이므로 듀웰각 사이에서 한 스위치가 ON 또는 OFF가 교대로 실행한다. 스위치가 ON될 경우 그림 6(a)와 같이 전원이 권선에 인가되어 회로가 형성되어 상전류는 증가하나, 스위치가 OFF될 경우 그림 6(b)와 같이 환류다이오드에 의해 환류회로가 형성되어 상전류는 감소하게 된다.

하드 초핑은 두 개의 스위치에 의해 ON 또는 OFF가 교대로 실행되는 방식을 의미한다. 두 개의 스위치가 OFF될 경우 그림 6(c)와 같이 두 개의 환류 다이오드에 의해 턴오프되어 상전류는 감소하게 된다. 하드 초핑을 수행시 전류 리플이 소프트 초핑보다 크고 스위칭 주파수가 높다. 또한 소프트 초핑은 잡음이 더 작고, 필터 커패시터의 크기도 줄일 수 있다. 이러한 상대적인 장점에 의해 소프트 초핑이 하드 초핑보다 일반적으로 사용된다.

그림 7은 전압 PWM을 소프트 초핑에 의해 구동하여 상전류, 쇄교자속, 상전압 파형을 보여주는 것으로서 스위칭 주파수는 고정되어 있으며 상전압의 크기는 통류율 D에 의해 결정된다. 듀웰각 사이에서 소프트 스위칭하며, 듀웰이 끝난 후 두 스위치가 OFF되어 그림 6(c)의 회생회로가 형

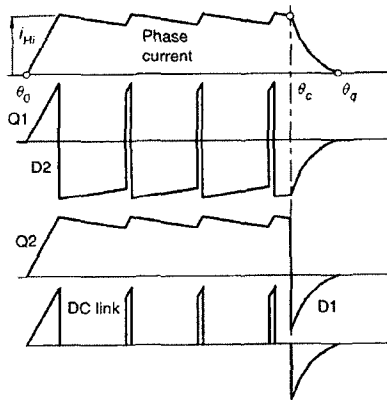


그림 9. 히스테리시스 전류제어방식에 의한 전류 파형

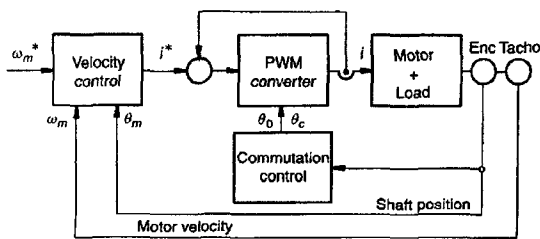


그림 10. 소프트 초핑 - 히스테리시스 전류제어방식에 의한 SRM 컨버터 구동 시스템

성된다. 따라서 듀웰각 중 상전압의 평균값은  $(D \times V_s)$ 가 되며, 상 전류는 턴온각  $\theta_0$ 에서 회전자극과 고정자극이 겹치기 시작하는 점까지 거의 선형적으로 커지며 회전자극과 고정자극이 겹쳐 인덕턴스 기울기가 커지는 영역에서는 전류 파형이 일정하거나 작아진다. 또한, 쇄교 자속의 경우 스위치 턴온시 영의 값에서부터 증가하여 턴오프각  $\theta_c$ 에서 최대값이 되며, 턴오프 이후 회생회로가 형성될 때 전류는 선형적으로 감소된다.

그림 8은 소프트 초핑의 전압 PWM에 의해 속도 제어를 하기 위한 구동 시스템으로서 통류율 D\*에 의해 전압 크기를 조정하고 속도를 제어한다.

### 4.3 히스테리시스 전류제어방식

히스테리시스 전류제어방식이란 SRM의 저속 운전시 상전류가 주어진 최소 전류의 값  $i_L (= i_{base} - \Delta i/2)$  보다 작을 때 전력 스위치를 ON시키며, 최대 전류의 값  $i_H (= i_{base} + \Delta i/2)$  보다 클 때 OFF시키는 방식을 의미하며, 이미 그림 3에서 보여준 바가 있다. 기본전류  $i_{base}$ 에 의해 출력전류의 크기를 조정하며, 히스테리시스 밴드(hysteresis band)  $\Delta i$ 를 줄일수록 스위칭 주파수는 증가하며 전류 리플은 감소한다. 이때 한 상당 전력 스위치 2개 중 한 개를 ON 또는 OFF하는 소프트 초핑 방식과 2개 모두 ON 또는 OFF하는 하드 초핑 방식이 가능하다.

그림 9는 히스테리시스 전류제어방식을 소프트 초핑할 때 나타나는 상전류와 각 소자의 전류를 보여주고 있다. 상전류가  $i > i_H$  일 때 한 스위치가 OFF되며,  $i < i_L$ 일 때 ON된다.

그림 10은 소프트 초핑-히스테리시스 전류제어방식에 의해 속도 제어를 하기 위한 구동 시스템으로서 전류센서에 의해 SRM의 입력 전류를 센싱하고 이에 의해 상전류의 크기를 일정하게 조정하고 속도를 제어한다.

### 참고 문헌

- [1] T.J.E. Miller, Switched Reluctance Motors and Their Control. Oxford, England: Oxford Pr Press 1993.
- [2] T.J.E. Miller, Electronic Control of Switched Reluctance Machines Oxford, England: Newnes, 2001.
- [3] R. Krishnan, Switched Reluctance Motor Drives, CRC Press, 2001.
- [4] Iqbal Husain, Sensor elimination and converter topology simplification in switched reluctance motor drives for commercial applications: Ph.D.

Dissertation, Dept. of Electrical Eng., Texas A&M University, May 1993.

- [5] 안진우, 스위치드 리럭턴스 전동기, 오성미디어, 2001.
- [6] 기술조사 보고서, 리럭턴스 모우터 기술현황, 대한전기학회, 1994.

## 〈 저 자 소 개 〉



### 장도현(張都鉉)

1956년 8월 24일생. 1980년 한양대 전기공학과 졸업. 1982년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1993년~1994년 미국 Texas A&M Univ. 객원교수. 현재 호서대 전기공학과 교수.

당 학회 편집위원.