

## 속도 센서없는 SRM의 최적제어에 관한 연구

엄기명\*, 송병섭\*, 김연충\*, 원충연\*, 이상석\*\*

\*성균관대학교, \*\*(주)PEC TECH

## A Study on the Optimal Control of SRM without Speed Sensor

K.M.EOM\*, B.S.SONG\*, Y.C.KIM\*, C.Y.WON\*, S.S.LEE\*\*

\*Sung Kyun Kwan University, \*\*PEC TECH CO. LTD

## ABSTRACT

Switched Reluctance motors(SRM) attract much attention in motor because they are reliable and inexpensive. With advance in power electronics and high-speed processors, the performance of SRM has been enhanced greatly. But they require rotor position information to operate. In many systems, rotor position sensors are undesirable and have disadvantages. To overcome the disadvantages include by position sensors, a number of sensorless methods for SRM's have been proposed by researchers. This paper describes a method for indirect sensing of rotor position in SRM's pulsewidth modulation voltage control. The method required no priori knowledge of motor parameters excepts for the numbers of stator and rotor poles. The detection method uses the change of the derivative of the phase current to detect the position.

## 1. 서 론

Switched Reluctance motors(SRM)는 고정자와 회전자의 극의 형상이 단순하고 권선또한 고정자에만 집중권으로 되어 있어 구조가 간단하고, 토크 특성이 우수하며, 고속회전이 가능한 전동기이다. 그러나 구조의 특성상 토크 리플이 발생하며, 모터의 위치에 따른 인덕턴스의 비선형성과 그리고 스위칭을 위한 회전자의 위치 정보가 필요하다는 단점을 가지고 있다.

이러한 위치정보를 알기 위해서 증분형 엔코더, 절대 엔코더, 광센서방식의 여러 가지의 위치검출의 방식을 사용되고 있지만, 모터의 구동 드라이버의 가격 상승이 문제가 된다. 현재까지의 이러한

가격 상승의 문제점을 해결하기 위해서 위치 센서리스에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 지금까지의 회전자 위치검출방식은 전류와 전압의 위상차를 이용하는 Phase Modulation이나, Frequency Modulation은 사전의 인덕턴스 정보를 필요로 한다.<sup>[1][2][3]</sup>

본 논문에서는 모터의 상수 이외에는 특별한 정보가 필요없이 전류의 변화량의 관찰을 통하여 회전자의 위치를 판별하였다. 그리고 프로세서는 16bit의 80C196KC를 사용하였고, 단일펄스로 속도제어를 위해 비대칭 브리지 컨버터 앞단에 Buck 컨버터를 이용하여 SRM의 속도 센서리스를 통한 최적의 속도제어를 구현하고자한다.

## 2. SRM의 기본원리

## 2.1 SRM의 동작원리

SRM은 그림 1과 같이 회전자 및 고정자가 모두 돌극형 구조로 되어 있다. SRM은 자기저항이 최소가 되는 방향으로 회전하려는 전자석의 원리를 이용한 전동기로 순차적으로 여자상을 바꾸어 줌으로써 회전자를 지속적으로 회전시키게 된다.<sup>[1]</sup>

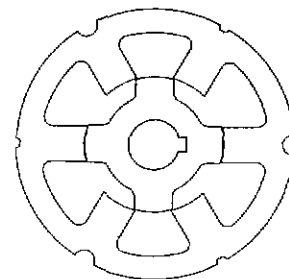


그림 1. 6/4극 SRM의 구조

## 2.2 SRM의 제어방법

SRM의 제어에 사용되는 것으로는 closed-loop 전

류제어나 open-loop PWM 전압제어와 각도제어의 방법이 많이 사용되고 있다.

### 2.2.1 전류제어<sup>[1]</sup>

(1) 히스테리시스 전류제어-실제전류를 피드백 받아 계산된 제어량과 비교하여 전압을 초핑하는 방법이다. 일반적으로 많이 사용되는 전류 제어방법이다.

(2) Delta modulation-전류가 전류의 기준전류 ( $i_{ref}$ )에 따라 조정되는 것으로 최대 스위칭 주파수가 제한이 되는 것으로 bang-bang 전류제어라고도 한다.

(3) 전류조정 PWM-기준전류 ( $i_{ref}$ )의 PWM을 사용하여 전류를 조정하는 방식이다.

### 2.2.2 전압제어<sup>[1][5]</sup>

(1) 단일펄스 방법-그림 2와 같이 한상에 단일펄스를 인가하여 구동하는 방식이다. 이 같은 경우에는 전류의 리플을 줄일수 없다.

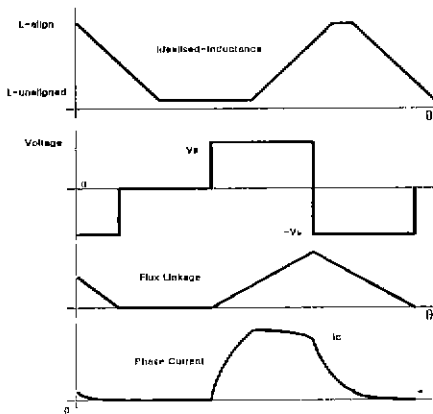


그림 2 단일 펄스 파형

(2) 초핑에 의한 방법(전압 PWM)-주로 기본속도 이하의 속도의 제어하는데 사용되는 방법으로 이때는 역기전력과 전동기의 인덕턴스 증가가 느리게 일어나므로 인가전압에 의한 전류의 상승률이 커 전류의 크기를 초핑에 의하여 원하는 속도에 맞게 유지해 주는 제어방법이다. 여기에는 하드초핑과 소프트초핑의 방법이 있다. 두가지의 경우에서 소프트 초핑이 전류의 리플을 줄일수 있다는 장점을 가지고 있다.

### 2.2.3 각도제어

그림 3은 기본속도 이상의 고속 또는 증부하시에는 구동하기에 충분한 토크를 얻기 위하여 어드밴스 각과 드웰각을 조절하여 사용하는 방식이다. 즉 어드밴스각을 조절하여 점호시점을 앞당겨 충분한 전류의 상승시간을 도모하고, 드웰각을 조절하여 토크

오류 발생영역을 최대한 이용하여 역토크가 발생하는 구간에서 전류의 크기를 최소화시켜 역토크 발생을 억제시키는 방법이다.<sup>[1][5]</sup>

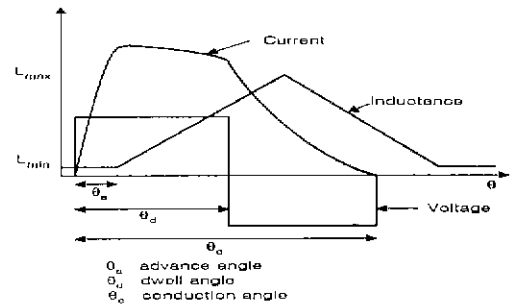


그림 3 SRM의 각도제어

## 3. SRM의 센서리스

### 3.1 센서리스 원리

본 논문에서는 고정 스위칭 주파수 전압 PWM을 사용하여 제어하고자 한다. 우선 전압 PWM 방식에서의 전형적인 전류 파형은 그림 4와 같다.

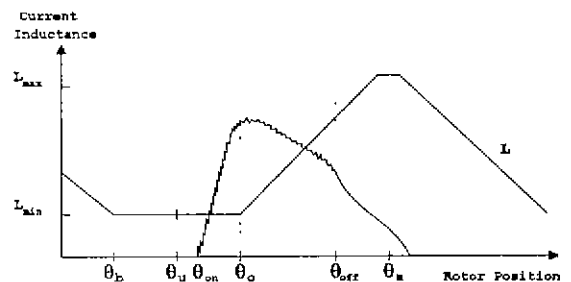


그림 4 전압 PWM 방식에서의 전류파형

우선 SRM의 전압방정식은 다음과 같이 표현된다.

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

여기서  $di/dt$ 는 상의 인덕턴스가 증가하는 부분 즉 고정자와 회전자에 교차하는 지점인  $\theta_0$ 에서 증가율이 거의 제로이거나 감소가 된다.  $\theta_0$ 를 지나기 직전 '0-'라 하고,  $\theta_0$ 를 지난직후를 '0+'라고 하고, 권선저항에 의한 전압 강하를 무시할 경우 수식 (1)은 다음과 같은 방정식을 세울 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{0-} &= \omega \cdot L_{0-} \frac{di_{0-}}{d\theta} + \omega \cdot i_{0-} \frac{dL_{0-}}{d\theta} \\ V_{0+} &= \omega \cdot L_{0+} \frac{di_{0+}}{d\theta} + \omega \cdot i_{0+} \frac{dL_{0+}}{d\theta} \end{aligned} \quad (2)$$

$\theta_0$ 이전(0-)의 인덕턴스 값은 비정렬 위치의 인덕턴스값

$L_u$ 와 같고 그때의 변화량은 0이므로 수식 (2)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{0-} &= \omega \cdot L_{0-} \frac{di_{0-}}{d\theta} \\ V_{0+} &= \omega \cdot L_{0+} \frac{di_{0+}}{d\theta} + \omega \cdot i_{0+} \frac{dL_{0+}}{d\theta} \end{aligned} \quad (3)$$

$\theta_0$  이전에 이미 ON이 된 상태이므로

$$V_{0-} = V_{0+} \quad (4)$$

이고, 수식 (4)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\left( \frac{di_{0-}}{d\theta} - \frac{di_{0+}}{d\theta} \right) = \frac{i_{0+} \cdot \frac{dL_{0+}}{d\theta}}{L_u} \quad (5)$$

여기서 우변이 양수이므로 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\frac{di_{0-}}{dt} > \frac{di_{0+}}{dt} \quad (6)$$

수식 (6)에서  $di/dt$ 의 변화를 관찰함으로써 회전자 한 축이 고정자와 맞닿을 때마다 그 위치를 추정할 수 있는 것이다. 교차각은 다음과 같다.

$$\Delta\theta = \left[ \frac{360}{N_r(N_s/2)} \right]^\circ \quad (7)$$

본 논문에 사용될 시스템의 경우 회전자 ( $N_r$ )가 4극이고 고정자 ( $N_s$ )가 6극이므로  $30^\circ$ 마다 회전자의 위치를 파악할 수 있고 1회전시 12개의 펄스를 얻을 수 있다.<sup>[2][3]</sup>

### 3.2 전류의 기울기를 이용한 위치검출

본 논문에서는 그림 5와 같이 구성하여 위치를 검출하였다.

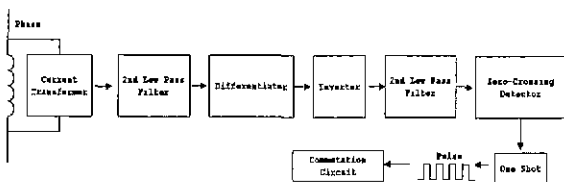


그림 5 회전자 위치 검출을 위한 시스템 구성도

여기서 미분기를 이용하여  $di/dt$ 를 계산하였고, 두 개의 Low-pass Filter는 스위칭 주파수와 노이즈를 줄이기 위해서 사용하였으며, Zero-Crossing Detector는  $di/dt$ 가 0이 되면 펄스를 얻기 위하여 사용하였다.

### 3.3 기동절차

전류의 기울기를 이용하여 회전자의 위치를 판별하는 방식은 전동기가 정지시에는 응용이 불가능하므로 이에따른 초기의 기동이 필요하게 된다.<sup>[1][2]</sup>

본 논문에서는 open-loop방식을 이용하여 초기기동을 구현하였다. 이 방식은 무부하 상태에서 회전하고자 하는 방향의 순서로 상을 여자시켜 센서리스 펄스를 얻을수 있을 때, 즉 기준속도 이상이 되

었을 때에는 closed-loop로 변환하여 속도제어를 구현하였다.

그림 6은 본 논문에 사용된 컨버터와 전류센서의 위치를 나타내고 있다.

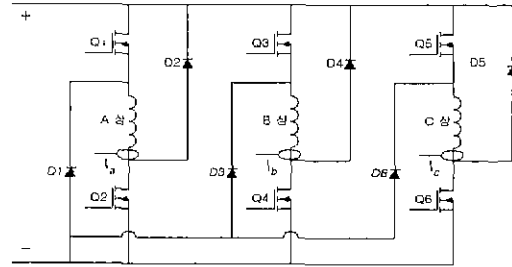


그림 6 비대칭 브리지 컨버터와 전류센서의 위치

## 4. 시스템 구성

### 4.1 시뮬레이션

그림 7은 PSIM을 이용한 시뮬레이션 회로도를 나타내고 있다. Buck 컨버터는 위치검출을 통해서 얻어진 적은 신호로도 전동기의 속도변화에 대응하기 위해서 사용하였고, 컨버터는 효율 및 제어성능이 우수한 비대칭 브리지 컨버터를 사용하였다. 본 논문에 사용된 전동기의 상수는 표1과 같다.

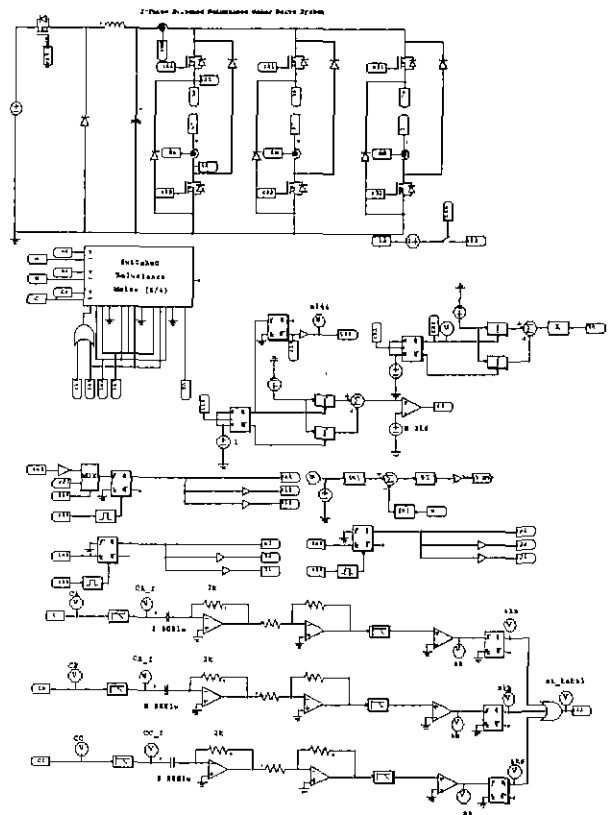


그림 7 시뮬레이션 회로도

#### 4.2 시뮬레이션 결과

시뮬레이션에 있어서 입력전원측 DC링크 전압의 맥동은 무시하였고, SRM의 자기포화는 없다고 가정하였으며, 컨버터에서 스위치 및 다이오드는 이상적인 소자를 사용하였다.

그림 8은 di/dt를 이용해서 얻은 1회전당 12개의 펄스이고, 그림 9는 정상상태에서의 센서리스 펄스 파형과 3상의 전류파형이다. 그림 10은 속도센서를 사용하여 PI제어기를 사용한 속도파형이고, 그림 11은 센서리스 기법을 적용한 속도응답파형이다. 그림 11에서 알수 있듯이 초기의 응답은 느리지만 잘 추종하는 것을 확인할 수 있었다.

표 1 전동기 상수

상수	3상	정격속도	2500rpm
출력	500[W]	권선저항	10.5[Ω/상]
정격전압	300[Vdc]	최대 인덕턴스	645[mH]
정격전류	2.5[A]	최소 인덕턴스	150[mH]
고정자 극수	6 pole	고정자 극호	30[Mdeg]
회전자 극수	4 pole	회전자 극호	32[Mdeg]

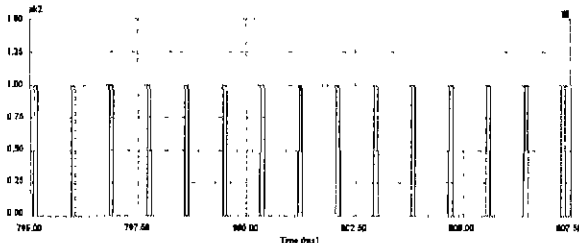


그림 8 센서리스에서 얻은 1회전당 12펄스 파형

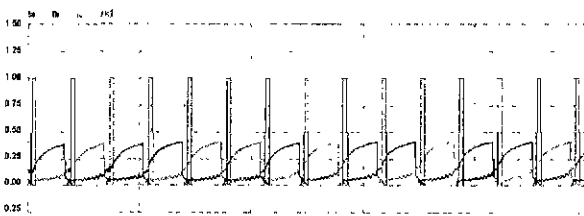


그림 9 센서리스 펄스와 3상의 전류파형  
(Ia:A상전류, Ib:B상전류, Ic:C상전류, sk2:센서리스 펄스)

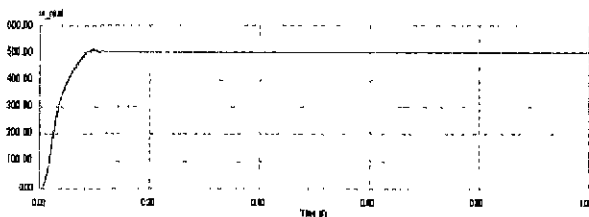


그림 10 속도센서의 피드백을 통한 속도응답 파형

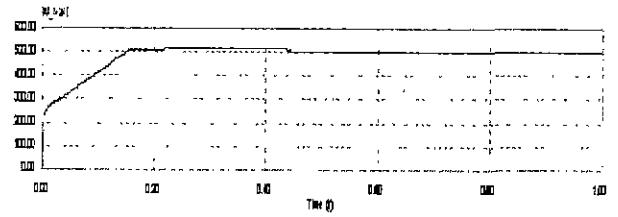


그림 11 센서리스를 통한 속도응답 파형

## 5. 결론

본 논문은 6/4pole의 500[W]급 SRM의 센서리스 방식의 위치정보를 알기위해서 전류의 기울기 즉, di/dt를 이용해서 위치정보를 알아내었고, 1회전당 12개의 펄스를 얻을수 있었다.

그리고 단일펄스로 구동시 원활한 속도제어를 위해서 비대칭 브리지 앞단에 Buck 컨버터를 사용하였다. 시뮬레이션 결과에서 단일펄스 스위칭과 PI 제어기를 이용하여 최적의 속도응답을 확인할 수 있었다.

이 논문은 2000년도 8차 산·학연 공동기술개발 지역컨소시엄' 과제로 수행되었습

## 참고 문헌

- [1] T. J. E Miller, Switched Reluctance Motors and Their Control, Oxford University press, 1993.
- [2] Gabriel Gallegos-Lopez, Philip C. Kjaer, Timothy J. E. Miller, "A New Sensorless Method for Switched Reluctance Motor Drives" pp. 832 ~ 840 IEEE Trans Ind. Applications, Vol.34, No.4, July/August,1998.
- [3] P. P. Acarnley, R. J. Hill, and C. W. Hooper, "Detection of rotor position in stepping and Switched reluctance motors by monitoring of current waveforms IEE E", Trans. Ind. Electron. Vol. 32, pp215-222, June, 1985.
- [4] I Husain and M.Ehsani, "Rotor Position sensing in Switched Reluctance Motor drivers by Measuring mutually induced voltage", IEEE Trans. Ind. App, Vol. 30, pp665~672, May/June, 1994.
- [5] 김 보형, "스위치드 리럭턴스 전동기의 지능형 속도제어에 관한 연구", 성균관대학교, 석사학위논문, 1998.
- [6] Young Joo. An, Cheol Je. Joe, "Development of Electronic Position Sensor for SRM Drive", KIEE, Trans, Vol 44, No. 2, pp. 210~213, Feb, 1995.