

PI제어기를 이용한 센서리스 속도제어 방식의 SRM 모델링 및 시뮬레이션

김진영*, 최재동**, 김갑동*, 황영성*, 성세진
 충남대학교 전기공학과*, 한국항공우주연구소**

SRM modeling and simulation of senserless speed control method using PI controller

Jinyoung Kim*, Jaedong Choi**, Kabdong Kim*, Youngseong Hwang*, Sejin Seong*
 Chungnam National University, Korea Aerospace Research Institute**

ABSTRACT

This paper presents a circuit analysis and control example of favored configuration 6/4 SRM. SRM modeling and analysis are necessary for experiment. Thus this paper proposes a SRM modeling with PI controller (of driving converter), input voltage chopping and inductance profile when rotor position transformed. Through this simulation, the designer can predict operating states of systems over a broad range of operating conditions.

1. 서 론

SRM은 각 상의 회전자 위치 θ 에 따라 상 인덕턴스의 변화가 비정현파라는 점과 전류에 의한 토크 발생비가 전류와 회전자 위치에 의한 함수로 폭넓은 범위에 걸쳐 변한다는 점에서 비선형 기기라 할 수 있다. 이러한 복잡한 비선형 기기를 이상적인 파라미터로 시뮬레이션하기 위해서는 해결할 수 없는 부분이 존재하게 된다. 따라서 본 논문에서는 6/4 SRM 모터의 특성을 실제와 유사하게 구현할 수 있는 Matlab/Simulink tool을 이용하여 모델링하였다. 특히, 가변속 구동을 위한 PI제어기를 갖는 SRM에 대하여 모델링 하였다. 먼저 입력측 DC전압은 DC전원을 공급받으며 이 직류 입력전원은 벽-컨버터에 공급되어 초핑동작에 의해 부하변화에 따른 가변 전압원으로 변환되어진다. 이때 컨버터의 스위치 온, 오프 동작의 듀티비 결정은 PI제어기로부터 발생되어지는 이득에 의해 결정되어진다. PI제어기의 이득은 SRM으로부터 케환되어지는 속도와 기준속도 비교에 따른 오차발생 결과에 의해 결정되어진다. 벽-컨버터로부터 발생된 전압은 인버터로 공급되어고 인버터는 공급된 전압을 스위치

은 각과 오프 각에 따라 제어하게 되며 그에 따라 SRM의 상전류 확립 시점과 오프 시점이 결정되게 된다. 본 논문에서는 각 상의 회전자 위치에 따른 인덕턴스와 전류 그리고 토크 또 그 토크에 따른 SRM속도식에 의한 스피드를 표현하는 것에 중점을 두었다. 또한 모델링 결과의 타당성을 검토하기 위해 속도의 피드백을 이용한 센서리스 방식의 속도제어가 제안되었다.

2. SRM의 수학적 모델링

2.1 토크의 발생

그림 1은 3상 6/4 SRM의 한상에 대한 동작원리를 나타낸다. SRM의 한 상에 대한 토크식을 구하기 위해 coenergy W_c 를 도입한다. 식 (1)의 W_c 로부터 회전자 위치(θ)에 대한 coenergy의 편미분항으로 식 (2)를 나타낼수 있다.

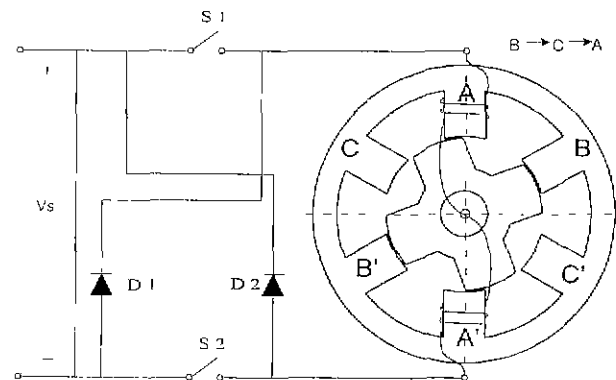


그림 1 3상 6/4 SRM의 1상에 대한 개략도

$$W_c = \frac{1}{2} i^2 L(\theta) \tag{1}$$

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

여기서, i 는 상권선 전류, $L(\theta)$ 는 회전자 위치에 따른 인덕턴스이다. 따라서 3상 출력 토크 T_{out} 은 다음과 같다.

$$T_{out} = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{\partial L(\theta)}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{\partial L(\theta-30^\circ)}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i_c^2 \frac{\partial L(\theta-60^\circ)}{\partial \theta} \quad (3)$$

식 (3)으로부터 발생토크는 전류의 제곱에 비례하고 회전자 위치에 대한 인덕턴스의 변화율에 비례함을 알 수 있다. 이 식에 의한 Matlab/Simulink 상에서 모델링한 토크의 시스템 블록도가 그림 2와 같다.

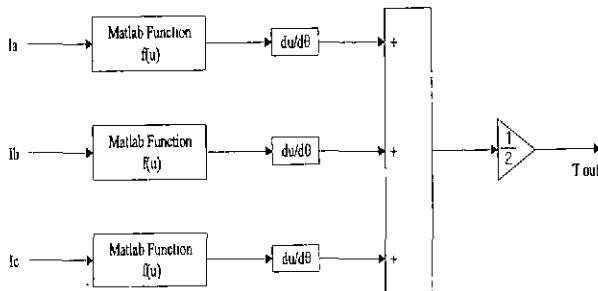


그림 2 토크방정식에 의한 모델표현

2.2 전류파형의 발생과 해석

고정자 전류를 제어하기 위한 간단한 스위칭 회로는 그림 1에 나타내었다. 상권선에 전압이 인가될 때 상권선의 전압방정식은 식 (4)와 같다.

$$V_s = Ri(t) + \frac{d\lambda}{dt} \quad (4)$$

여기서 인덕턴스는 회전자 위치에 따라 변하는 회전자 위치각의 함수로 주어지므로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_s = Ri(t) + i(t) \frac{dL(\theta)}{d\theta} \omega + L(\theta) \frac{di(t)}{dt} \quad (5)$$

그림 3은 프리휠링이 있는 경우에 전동기에 에너지가 공급되어 구동후 전원이 차단 되어 자기에너지가 전원으로 반환되는 펄스주기 1주기 동안의 동작을 나타낸 것이다.

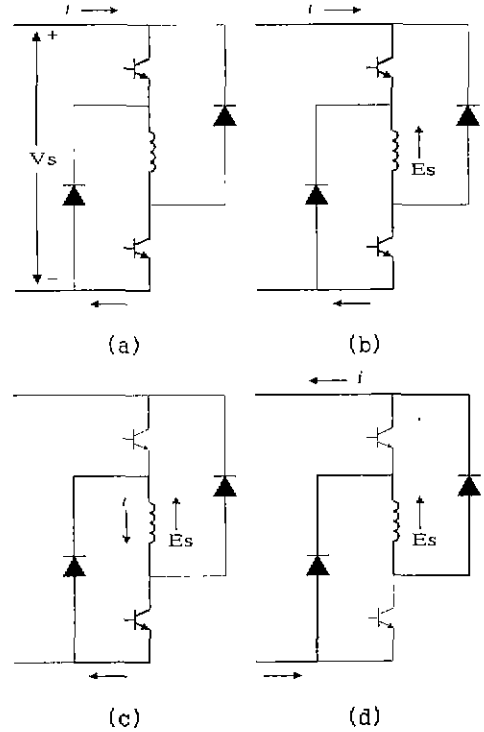


그림 3 SRM 구동용 스위칭 인버터의 동작

2.2.1 여자모드(exciting mode)

그림 3(a)는 여자모드를 나타낸 것으로 이 모드에서는 고정자극과 회전자극이 중첩되지 않은 상태에서 전압을 인가하는 경우로 속도기전력은 영이 되므로 토크는 발생하지 않는다. 인가전압은 최소 인덕턴스 L_{min} 을 유지하여 쉽게 전류가 확립되는 구간이다. 이때의 회로방정식은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i(\theta) = \frac{V_s}{R} \left[1 - e^{-\frac{R}{L_{min}} \frac{(\theta - \theta_m)}{\omega}} \right] \quad (6)$$

2.2.2 구동모드(driving mode)

그림 3(b)는 고정자극과 회전자극이 중첩되기 시작하면서 인덕턴스가 상승하는 구간으로 토크가 발생하여 전동기가 구동되는 구간이다. 이 모드에서의 회로방정식은 권선저항 전압강하, 속도, 역기전력 그리고 리액턴스 전압강하의 항으로 구성된다. 식 (5)에서 속도가 일정하고 인덕턴스 변화의 기울기가 일정하면, 전류를 제외한 나머지는 상수가 되므로 $R_s = \frac{dL(\theta)}{d\theta}$ 로 놓으면 식 (7)과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$i(\theta) = \frac{V_s}{R+R_s} \left[1 - e^{-\frac{R+R_s}{L(\theta)} \frac{(\theta - \theta_m)}{\omega}} \right] \quad (7)$$

2.2.3 프리휠링 모드(free-wheeling mode)

그림 3(c)는 상권선에 흐르는 전류 및 인가되는 전압을 제한하기 위해 하나의 상 스위치를 오픈하여 상권선을 전원과 분리시키고 상권선에 흐르던 전류를 프리휠링 다이오드를 통하여 환류시키는 모드이다.

2.2.4 감자모드(demagnetizing mode)

그림 3(d)는 감자모드로 모든 스위치를 오픈하여 자기에너지가 전원으로 반환되며 전류가 감쇄하는 상태이다. 이때 스위치를 인덕턴스가 증가하는 구간에서 오픈하면 회로방정식은 식 (8)과 같다.

$$-V_s = Ri(\theta) + i(\theta) \frac{dL(\theta)}{d\theta} \omega + L(\theta) \frac{di(\theta)}{dt} \quad (8)$$

만약 여기에 스위치 오픈시점($\theta = \theta_{off}$)에서 초기전류값을 I_{off} 라 하면 전류값에 대한 회로방정식은 식 (9)와 같다.

$$i(\theta) = I_{off} - \frac{V_s}{R + R_s} \left[1 - e^{-\frac{R + R_s}{L(\theta)} (\theta - \theta_{on}) / \omega} \right] \quad (9)$$

위의 네 개 동작모드에서 여자모드와 구동모드는 같은 회로상태를 가지므로 크게 여자모드, 프리휠링모드, 감자모드의 세가지로 구분하여 해석할 수 있다. 위의 전류식들 관계에 의해 스위치-온 구간인 i -power 부분과 i -switch off 부분으로 나누어 모델링한 것이 그림 5(a상)이다.

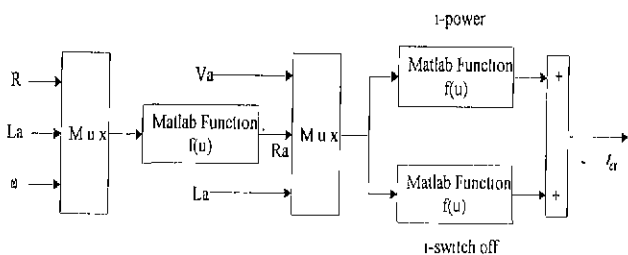


그림 4 A상에 대한 SRM 모델링 블록도

표 1은 모델링을 위한 설계 전동기의 파라미터들을 나타낸 것이다.

3. 시뮬레이션 결과

그림 5는 Matlab/simulink 상에서 SRM의 전체적

표 1 모델링 전동기의 설계정수

고정자/회전자 극수	6/4	기저부하[HP]	1.0
고정자 외경	135 mm	기저속도[rpm]	80
고정자 내경	87.5 mm	공극	0.32 mm
고정자 극호	30°	상당 권선수	100
회전자 극호	45°	도체 직경	1.0 mm
고정자 극 높이	13.7 mm	최소 인덕턴스	7.9 mH
회전자 극 높이	12.4 mm	최대 인덕턴스	65.2 mH

인 모델링 블록도를 나타낸 것이다. 전체적으로 제어부의 모델링 부분과 모터측의 모델링 부분으로 크게 나누어짐을 보여준다.

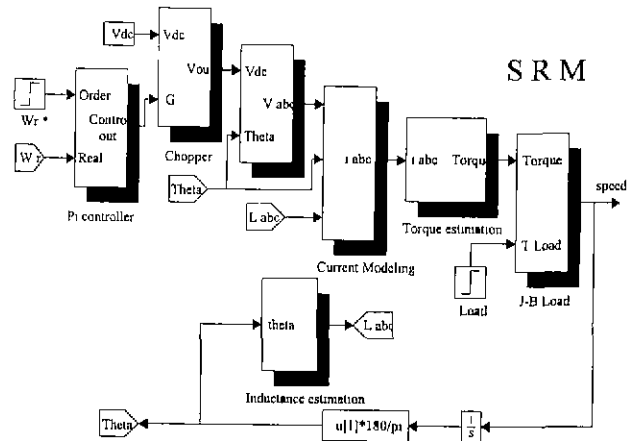


그림 5 SRM의 전체 Simulink 모델 블록도

수학적 모델링과 PI제어기를 부착한 상태에서 지령속도 w^* 과 귀환된 실제속도 w 의 비교에 의한 속도 응답특성을 그림 6에 나타냈다. 그림 7~10도 역시 1000rpm의 무부하 조건에서 정격 부하까지의 시뮬레이션 결과들을 나타낸다.

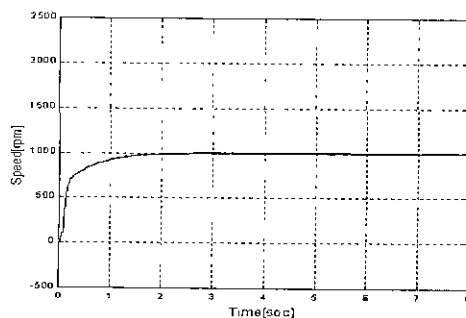


그림 6 1000rpm에서의 속도파형

그림 11과 12는 무부하에서의 속도도달과 30%의 토크부하에서의 속도를 비교한 것이다. 무부하 조

건에서는 500[rpm]에 도달하는데 걸리는 시간이 약 0.12[sec]이며, 30%의 부하 조건에서는 약 0.17[sec]로 0.05[sec]의 시간 지연이 일어남을 보인다.

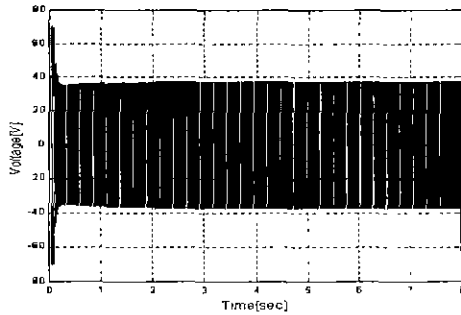


그림 7 평균전압 파형

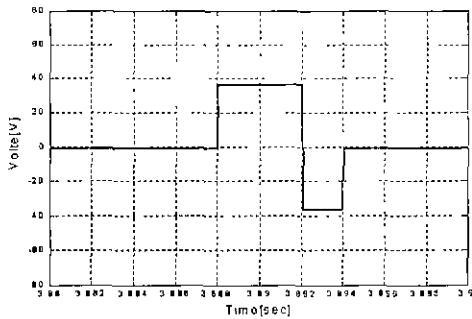


그림 8 한 상 전압 파형

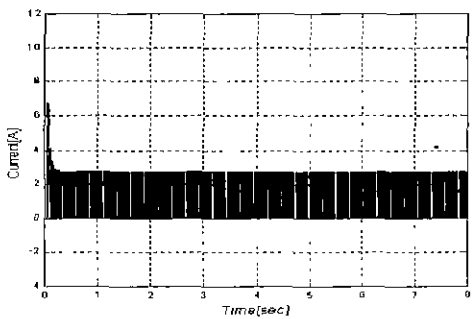


그림 9 평균전류 파형

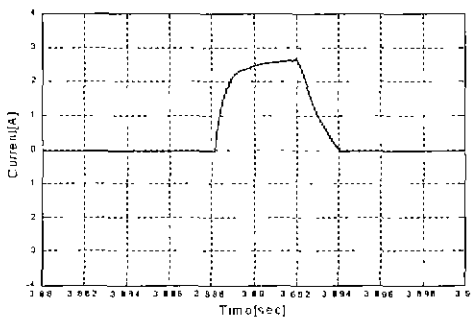


그림 10 한 상 전류 파형

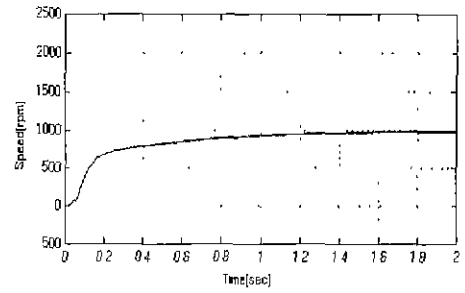


그림 11 무부하에서의 속도

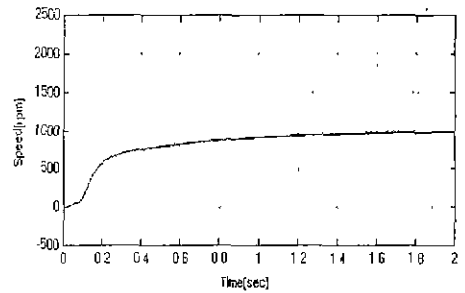


그림 12 30%의 토크부하에서의 속도

4. 결 론

본 논문은 SRM의 실제 설계상수를 적용하여 Matlab/Simulink를 이용한 모델링과 그 결과 파형을 보여준다. 제어기로는 속도의 센서리스 제어를 위해 PI제어기를 사용하였다. 실제 실험과는 달리 모터 구동상의 내부 리액턴스 값의 변동의 예측에 가장 큰 어려움이 있다. 따라서 이 부분이 시뮬레이션의 중요한 부분으로 이어지고 그에 따라 모델링의 결과를 예측할 수 있으며 그 파형을 나타내었다.

참 고 문 헌

- [1] G. Franceschini, S. Pirani, M. Rinaldi, and C. Tassoni, "Spice-Assisted Simulation of Controlled Electric Drives : An Application to Switched Reluctance Drives," *IEEE*, Vol. 27, No. 6, pp. 1103-1110 NOVEMBER/DECEMBER 1991.
- [2] Mohamad N SbdulKadir and AbdulHalim Mohd. Yatim, "Maximum Efficiency of Switched Reluctance Motor by Controlling Switching Angles," *International Conference Power Electronics and Drive Systems Proceeding*, 1997, pp. 199-204
- [3] 오인석, "SRM 토크맥동 저감에 관한 연구," 충남대학교 전기공학과 박사학위논문, 1998년. 8월.