

단상 SRM(Switched Reluctance Motor)의 고속 구동 제어에 관한 연구

박희관°, 박재범, 임승빈, 최재학, 안준선, 이 주
한양대학교 전기공학과

A Study on the control of High-Speed drive for Single Phase Switched Reluctance Motor

Hee-kwan Park°, Jae-bum Park, Sung-bin Lim, Jae-hak Choi, Joonseon Ahn, Ju Lee
Dept. of E.E. at Hanyang Univ.

Abstract- In this paper, A fixed turn-on, variable turn-off control method considering the reference speed and load is shown with verification by using MATLAB Simulink. The proposed method uses simple operation and is suitable to the system of low-cost application and also advantageous for reducing the torque ripple.

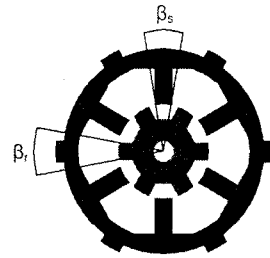


그림 1. 단상 6/6 SRM

1. 서 론

일반적인 가정용 청소기와 세탁기에 사용되는 전동기는 상용 전원 AC 220[V]를 사용하고 낮은 제작비로 고속 구동이 가능한 유니버설 전동기(Universal Motor)가 대부분 사용되는데, 유니버설 전동기는 브러시를 가지며 이 부분에서 기계적인 마모가 일어나 유지보수가 필요하고, 마찰로 인한 손실 발생 및 잡음이 발생하여 주위의 전자기에 장애를 주기도 하는 단점이 있다.[1] 이러한 단점들을 극복하기 위하여 최근에는 브러시-정류자 구조의 기계적인 상전환(phase commutation) 작용을 전력용 반도체 스위치를 이용한 전기적인 상전환 작용으로 대체시켜 높은 효율을 갖는 스위치드 릴럭턴스 전동기가 사용되고 있다. 본 연구에서는 청소기용 단상 SRM을 기존의 제어시스템보다 연산량을 줄여 저가의 제어시스템으로도 효율적인 구동이 가능한 제어방식을 제안하였다. 속도지령과 부하의 영향을 고려하여 드웰각을 조정하는 고정 턴-온, 가변 턴-오프 제어 방식을 제안하고, 제한한 방식의 타당성을 검증하기 위해 MATLAB Simulink를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

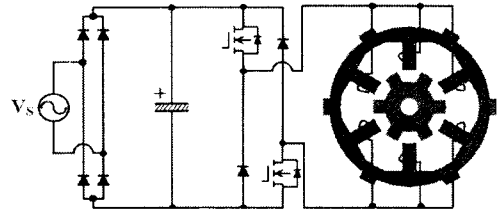


그림 2. 단상 비대칭 브릿지 컨버터

표 1은 시뮬레이션의 모델인 되는 단상 SRM의 주요 사양이다.

표 1. 단상 SRM의 주요사양

항 목	값	항 목	값
정격 전압	190V	정격 출력	1.5KW
정격 전류	15.7A	정격 속도	4000RPM
상 저항	1.095Ω	상 수	1 Phase
고정자 자극수	6	고정자 극호	22°
회전자 자극수	6	회전자 극호	22°
최소 인덕턴스 (FEM값)	0.302mH	최대 인덕턴스 (FEM값)	1.542mH

2. 본 론

2.1 연구 모델

SRM은 고정자와 회전자 양쪽이 돌극 형상으로 이루어진 이중 돌극 구조이며, 권선은 간단한 집중권으로 고정자에만 감겨있다. 그림 1은 본 연구에서 사용한 고정자와 회전자의 극수가 같은 단상(6/6) SRM의 단면도이다. 그림 2는 본 연구에서 적용한 단상 비대칭 브릿지 컨버터를 나타낸다. 권선은 스위치로 쓰고 있는 양쪽 파워소자와 직렬로 연결되어 있다.[2]

2.2 동작 원리

SRM은 고정자 권선이 여자 될 때, 단일 자계가 발생하고 릴럭턴스 토오크는 회전자가 최소 릴럭턴스 위치로 움직이도록 발생하는 원리에 의해 동작하는 전동기이다. 전류가 고정자의 상권선에 흐르면, 상권선에 흐르는 전류는 자속을 발생시키고, 생성된 자로에 의해 회전자는 릴럭턴스가 최소인 방향과 인덕턴스가 최대인 방향으로 움직이게 된다. 즉, 토오크는 회전자가 여자된 고정자의 극에 정렬하는 방향으로 발생되며 발생 토오크의 방향은 고정자가 여자된 상에 대한 회전자 위치에 의해 결정되고, 전류 방향과는 무관하다.

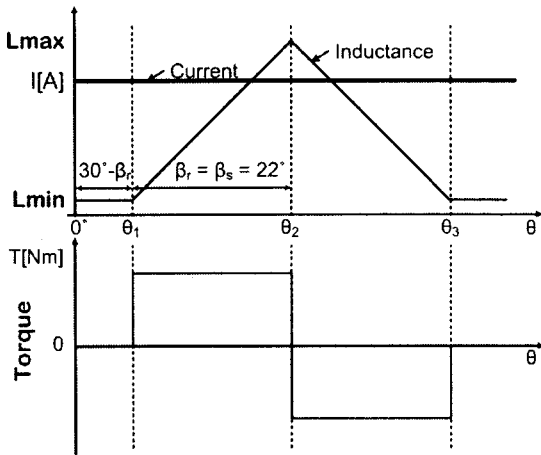


그림 3. 단상 SRM 한상의 토크 발생 원리

그림 3은 기하학적인 파라미터인 β_r 과 β_s 의 조합에 따라 토크 발생 원리를 나타낸다. 회전자 치가 고정자 치와 비정렬 위치에 있는 한국의 시작을 0° 로 설정하였으며, 회전자 치와 고정자 치가 정렬 위치에 있는 인덕턴스가 최대값을 가질 때를 30° 로 설정하였다. 토크는 인덕턴스의 기울기에 따라서 부호가 달라지므로 회전방향에 대하여 역방향 토크인 부토크가 발생하는 회전자의 위치각도가 존재한다.[3] 만약, 그림 3과 같이 상권선에 일정한 여자전류를 흐르게 하면, 인덕턴스가 증가하는 구간($\theta_1 \sim \theta_2$)에서는 정토크가 발생할 것이고, 인덕턴스가 감소하는 구간($\theta_2 \sim \theta_3$)에서는 정토크와 똑같은 크기의 부토크가 발생하게 된다. 따라서, 일정한 여자를 하면 정토크와 부토크는 서로 상쇄되어서 전동기의 축 토크는 0이 되므로 전동력을 얻을 수 없다. 그러므로, 부토크의 발생을 방지하고, 효과적인 전동토크를 발생시키기 위해서는 회전자의 위치에 따라 인덕턴스가 상승하는 구간, 즉 정토크가 발생하는 구간에만 전류를 인가하여야 하므로, 인덕턴스 프로파일의 변화에 따라 전압을 인가, 차단하는 턴온(θ_{on}), 턴오프(θ_{off})각이 중요한 의미를 가지게 된다.

2.3 전동기 모델링

SRM의 한 상의 단자에 걸리는 순시전압은 패러데이의 법칙에 의해 권선에 쇄교하는 자속과 관련이 있고 식 (1)과 같이 표현된다.

$$V = Ri + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} \quad (1)$$

여기서, λ 는 쇄교 자속, R 은 상저항, i 는 상전류, θ 는 회전자의 위치를 나타낸다.

SRM은 이중 돌극 구조이고, 쇄교 자속은 회전자 위치와 전류의 함수이므로 식 (2)로 표현된다.

(2)

전기적인 순시입력을 에너지 흐름으로 나타내면 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$V_i = Ri^2 + \left(\frac{d}{dt} \frac{1}{2} Li^2 \right) + \frac{i}{2} \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega \quad (3)$$

일반적으로 자기 포화를 무시하면 co-energy와 발생 토크는 다음 식 (4)와 식 (5)로 표현된다.

$$W_c = \int \lambda(\theta, i) di = \int L(\theta) i di \quad (4)$$

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad (5)$$

또한, 속도는 식 (6)으로 표현할 수 있다.

$$\omega = \int \frac{T_m - T_L}{J} dt \quad (6)$$

여기서, T_m 는 한 상의 토크, T_L 는 부하토크, J 는 관성이다.[4][5][6] 위 식들을 적용하여 Matlab Simulink 로 모델링한 단상 SRM을 그림 4에 제안하였으며, 기본적인 파라미터인 L_{max} 와 L_{min} , 상저항 R 에 대한 수치는 FEM 해석에 의한 값을 적용하였다.

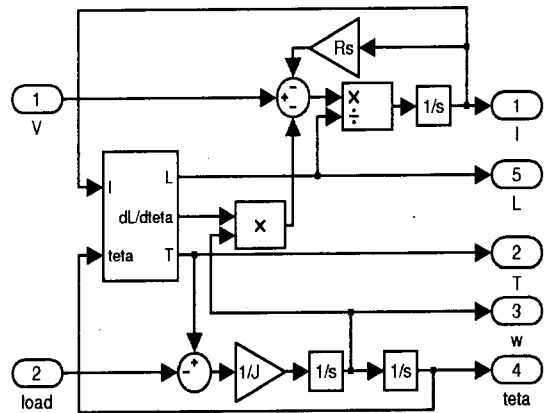


그림 4. 단상 SRM의 시뮬레이션 모델

2.4 제안한 제어방식

본 연구에서 사용한 단상(6/6) SRM은 40,000rpm 이상의 속도가 가능한 고속용 전동기이다. 저가의 구동 시스템으로 구현하기 위하여 하나의 위치센서만을 사용하였다. 사용한 위치센서는 그 출력을 턴온(5°)에 고정시켰으며, 턴오프각은 가변되도록 하였다. 그림 5는 속도에 따른 전류를 나타낸 시뮬레이션 결과이다. 저속에서는 전류 피크치 도달이 빠르고 턴오프 후에도 전류가 빠르게 소진되는 반면 고속에선 턴오프 시점이 전류의 피크치이고, 턴오프 후에도 전류가 늘어지면서 느리게 소진되는 것을 알 수 있다. 고속 구동시 늘어지는 전류가 인덕턴스 하강 부분까지 존재할 경우 부토크가 발생되어 전체 토크가 감소하게 되어 속도지령(ω^*)까지 도달하는 시간이 늘어나게 된다. 따라서, 드웰각을 조정하여 늘어지는 전류에 의한 부토크 발생을 억제하는 것이 중요하다.

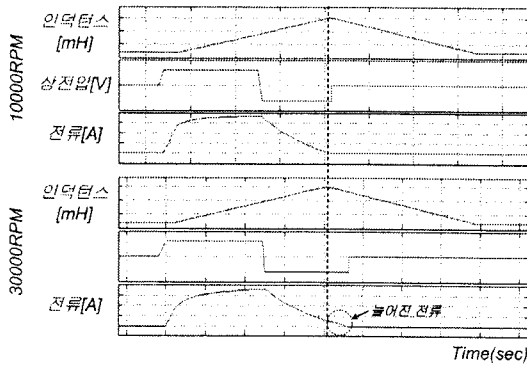


그림 5. 속도에 따른 전류(원펄스)

고속모드시 부토크를 최소화하면서 최대 토크를 내기 위해 제안한 방식은 식 (6)과 같다.

$$\theta_{dwell} = \theta_{max} - \frac{w^*}{K} \quad (6)$$

여기서, θ_{dwell} 은 드웰각, θ_{max} 는 최대 드웰각 ($\beta_s = \beta_r = 22^\circ$), w^* 는 속도지령이다. 계수 K 는 상수값으로 부하와 속도지령에 따라 변화하도록 테이블화 하였다. 그림 6은 제안된 제어방식의 흐름도를 나타내었다. 속도 오차가 0보다 크면 제안한 방식을 이용하고, 0보다 작으면 드웰각이 0이 되도록 하여, 속도지령 (w^*)에 수렴하도록 하였다. 그림 7은 속도지령과 부하에 따른 K 값의 변화를 나타낸 그림이다. 그림 8은 제안된 제어방식의 시뮬레이션 모델이다.

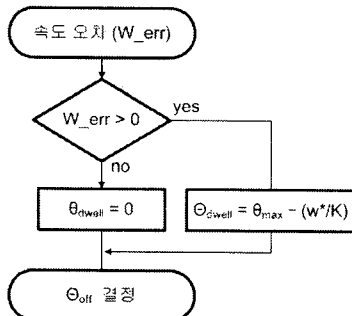


그림 6. 제안된 제어방식의 흐름도

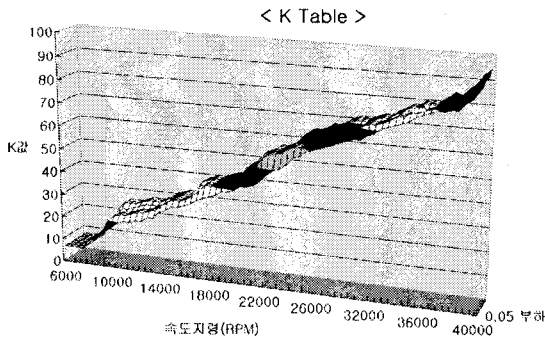


그림 7. K 테이블

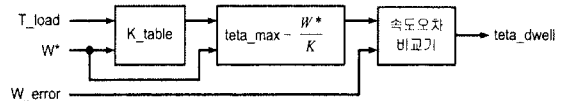
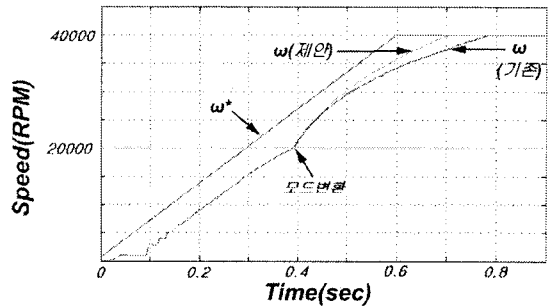


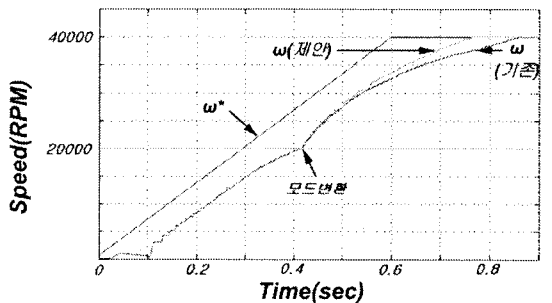
그림 8. 제안된 제어방식의 시뮬레이션 모델

2.5 시뮬레이션

단상 SRM의 초기 기동시 비대칭 브릿지 컨버터의 스위칭 소자에 과전류가 인가되는 것을 방지하기 위하여 PWM으로 서서히 전압을 상승시켜 기동하였으며, 고속에선 원펄스로 전압을 인가하는 제어방식으로 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 9는 적용한 제어방법의 타당성을 검증하기 위하여 제안된 방식과 기존의 PI제어기를 이용한 고정 턴온(5°), 가변 턴오프의 부하시 실속도의 지령 속도 도달시간에 대한 비교 결과이다. PWM에서 원펄스로 제어모드 변환시 드웰각에 대한 듀티비가 서로 다르면 스위칭 소자에 과전류가 흐를 수 있게 되므로, 과전류가 흐르지 않는 적절한 모드변환 시점인 20000RPM에서 제어모드를 변환하였다. 그림 9(a)에서 보는 바와 같이 속도지령에 도달하는 시간은 제안된 방식이 0.70s, 기존의 PI 제어기 방식이 0.79s로 약 13%정도 향상된 것을 보이고 있다. 그림 9(b)는 부하를 0.3[N]으로 변화시킨 것으로 제안된 방식이 더 빨리 속도지령에 도달한다는 것을 알 수 있다. 그림 10은 정상상태에서의 속도리플을 나타낸다. 기존의 PI제어기와 제안한 방식이 부하에 상관없이 거의 같은 리플 형상을 보이면서 속도지령에 수렴하고 있는 것을 알 수 있다.

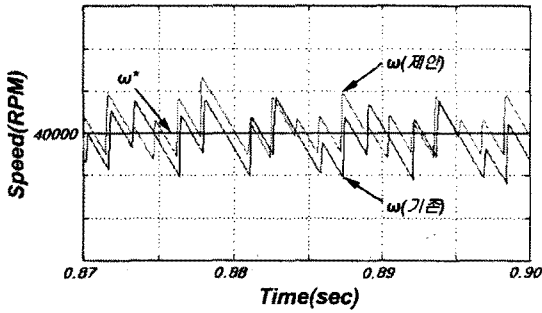


(a) 40000RPM, 부하 0.1[N]

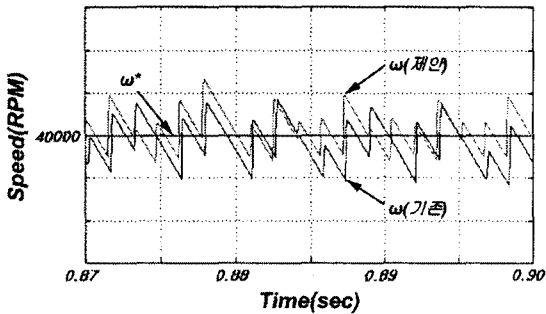


(b) 40000RPM, 부하 0.3[N]

그림 9. 부하에 따른 지령 속도 응답



(a) 40000RPM, 부하 0.1[N]



(b) 40000RPM, 부하 0.3[N]

그림 10. 정상상태시의 속도리플

3. 결 론

본 연구에서는 고속 구동에 적합한 단상 SRM의 제어 방식을 제안하였다. 제안된 방식은 속도지령과 부하에 따른 테이블화된 값을 이용하여 드웰각을 조정하는 제어 방식으로 연산량이 적어 저가의 시스템 구현이 용이하다. 기존의 PI 제어를 이용한 제어방식과 제안한 제어 방식을 부하시 속도지령에 따른 정상 상태 도달시간과 정상상태 후의 속도 리플 비교를 MATLAB Simulink의 시뮬레이션을 통하여 살펴보았으며, 고속 구동시 제안한 방식이 더 우수한 추종 성능을 보이는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 중점추진 과제인 신·재생에너지 발전의 계통연계 기초기술개발 연구 (과제번호 : R-2004-B-125)의 지원으로 수행되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] Kenjo, T., and Nagamori, S., "Permanent magnet and brushless DC motors", Clarendon Press, Oxford, 1985.
- [2] T.J.E. Miller "Electric control of Switched Reluctance Machines", Jordan hill, oxford: Reed Educational and Professional Publishing Ltd: A division of Reed Educational, 2001.
- [3] 안진우, 스위치드 릴럭턴스 전동기, 오성미디어, 2001년
- [4] 김윤현, "토오크 리플 저감을 위한 SRM 최적 설계 및 직접 토오크 제어." 박사학위논문, 한양대학교, 2002.

- [5] T.J.E. Miller, Switched Reluctance Motors and their control, Hillsboro, OH: Magna Physics Publishing and London: Oxford University Press, 1993.
- [6] T.J.Miller, "Converter Volt-Ampere Requirements of the Switched Reluctance Motor Drive." IEEE Trans. Indu. Appl., vol IA-21, no. 5, pp. 1136-1144, Sep/Oct. 1985.