

토오크 사용영역의 극대화를 위한 Single-Salient Type SRM의 구동회로및 제어방식에 관한 연구

* 박성준*, 변영복**, 권순재***, 김철우*

(* 부산대학교, ** 전기연구소, *** 부산공업대학교)

A Study on the Drive Circuit and Control Method for Single-Salient Type SRM Motor with Maximum Torque Region

* Sung-Jun Park*, Young-bok Byun**, Soon-Jae Kwon***, Chul-U Kim*

(* Pusan Univ., ** KERI, *** Pusan Inst.Univ)

Abstract

This paper describes a drive circuit and control method for SRM motor with maximum torque region. The proposed switching method is tested by experiment on single salient type SRM motor. As a result, The SRM drive with the proposed scheme is effective in increasing of torque region.

1. 서론

스위치드 리턴스 전동기(SRM)는 제조공정의 간단성과 구동회로의 구조의 간단성으로 인해 SRM에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

SRM은 고정자와 회전자 인덕턴스 변화율과 전류의 절대치에 의하여 토오크를 만든다. 이러한 SRM의 구동회로가 구비해야 할 조건은 낮은 속도영역에서 각 상전류를 제한하기 위한 전압 또는 전류형 PWM제어가 필요하고, 역토오크의 발생을 방지하기 위해 여자중인 상전류의 소호가 신속히 이루어져야 한다. 도동비를 1로하기 위해서는 각 상의 인덕턴스가 최대인 각에서 스위치를 오픈시켜야 하기 때문에 전류소호를 위한 시간은 SRM의 운전특성에 불리하게 작용한다. 이를 극복하기 위해 제안된 다양한 구성회로들은 classic inverter를 비롯하여 Miller inverter, buck-boost inverter, C-dump inverter, sood inverter 등 많은 방식들을 들 수 있지만 이미 각 형태의 특징과 장단점 그리고 문제점과 사용한계에 이르기까지 종합적인 평가가 보인 바 있다. [2]

기존의 대부분의 구동회로는 전원전압과 같은 크기의 역전압이 인가되도록 하고 있고 이로 인하여 전류소호를 위해 최대 인덕턴스에 도달하기 전 상당히 앞선 각에서 스위치를 오픈시킴으로써 인덕턴스 증가영역에서의 도동비는 대개 0.6 - 0.7정도에 불과하다. 이는 토오크의 사용영역 극대화와 상전류 소호시 발생하는 역동 토오크의 관점에서는 불리하다. 따라서 기존의 설계된 SRM에서 토오크 사용영역의 극대화를 위해서는 인덕턴스가 최대가 되는 점에서 스위치를 오픈하여 인덕턴스의 변화율이 부가되기 전에 전류는 완전히 소호되어야 한다. 이 조건을 만족하기 위해서는 상전선에 흐르는 전류가 급격히 감소를 할 수 있는 구동회

로가 필수적이다.

본 논문에서는 단일 펄스 모우드로서 전 속도영역을 제어하기 위해 여자전압을 제어할 수 있고 상전류의 급격한 감소기능을 가지므로써 토오크 사용영역의 극대화가 가능한 구동회로를 제안한다. 또한, 제안된 구동회로에 의해 상전류의 신속한 감소로 SRM의 감자특성을 보다 이상적으로 하였으며 그 개선효과를 실측 결과로서 확인하였다.

2. 제어원리

2.1 토오크 발생 특성

SRM의 토오크는 자기적 코어 에너지 개념으로부터 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$T(\theta, i) = \frac{\partial W'(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (1)$$

단 T : 토오크, θ : 회전자 위치, i : 상전류,

$W'(\theta, i)$: 자기적 코어 에너지

고정자와 회전자 사이의 상호인덕턴스가 무시된다면 식(1)은 식(2)로 표현될 수 있다.

$$T(\theta, i) = K_1 \frac{i^2}{2} \quad (2)$$

단 $L(\theta, i)$: 고정자와 회전자간의 인덕턴스

$$K_1 : \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \text{ (인덕턴스의 변화분)}$$

식(2)에서 보는 바와 같이 토오크는 전류의 제곱과 인덕턴스의 변화분으로 표현되며 역 토오크의 발생이 없는 전동기 영역에서만 사용하기 위해서는 인덕턴스가 증가하는 영역에서 전류를 흘려야 한다. 정속도 구동시 인덕턴스의 변화분이 일정한 영역에서는 토오크는 전류의 제곱에 비례하므로 전류의 변화분이 토오크의 맥동에 직접적으로 영향을 준다.

인덕턴스가 증가하기 시작하는 각에서 전류를 확립시키기 위해 인덕턴스가 증가하기 시작하는 점 보다 앞선 각에서 스위치를 온한다. 여자전압과 감자전압의 절대치가 같은

classic inverter와 같은 구동회로에서는 負 토크의 발생을 방지하기 위해 인덕턴스의 최대가 되는 점 보다 앞선각에서 스위치를 오프하나 전류 소호시 맥동 토크의 발생은 필수적이다. 따라서, 위와 같은 제어방식은 토크의 사용영역 극대화 와 토크맥동의 관점에서는 불리하다.

2.2 가변 전압에 의한 토크 제어

SRM의 한 상에 대한 전압 방정식은 식(3)과 같다.

$$V = Ri + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (3)$$

해석을 간단히 하기 위해 자기포화를 무시하면 정 속도(W_r) 영역에서는 식(3)의 좌변 3번째 항인 미분항이 상수가 되므로 평활전류(float topped current) i_p 는 고정자 저항을 무시하면 식(4)와 같고 고려하면 식(5)와 같이 표현할 수 있다.

$$i_p = \frac{V_f}{K_1 W_r} \quad (4)$$

$$i_p = \frac{V_f}{R + K_1 W_r} \quad (5)$$

단 i_p : 평활전류, V_f : 여자전압 W_r : 전동기의 속도

식(4) 및 식(5)에서 보는 바와 같이 평활전류는 상권선에 인가되는 전압의 크기와 전동기의 속도에 따라 변한다. 따라서 여자전압을 제어함으로써 원하는 평활전류를 초핑없는 단일 펄스 모우드로 토크를 제어할 수 있다.

SRM의 토크는 식(4) 및 식(5)의 평활전류를 식(2)에 대입하면 식(6) 및 식(7)과 같이 표현할 수 있다.

$$T(\theta) = \frac{K_1}{2(K_1 W_r)^2} V_f^2 \quad (6)$$

$$T(\theta) = \frac{K_1}{2(R + K_1 W_r)^2} V_f^2 \quad (7)$$

그림 1은 회전자의 위치각에 대한 이상적인 인덕턴스 profile과 감자전압의 크기때론 상전류파형이다.

그림 1에서 보는 바와 같이 인덕턴스의 최소구간의 점에서 원하는 평활전류를 정착하기 위한 θ_a 는 식(3)의 좌변 3번째 항이 소거되므로 고정자 저항을 무시하면 식(8)과 같고 고려하면 식(9)와 같이 표현할 수 있다.

$$\theta_a = \frac{L_{\min}}{K_1} \quad (8)$$

$$\theta_a = -\frac{W_r L_{\min}}{R} \ln\left(1 - \frac{R}{R + K_1 W_r}\right) \quad (9)$$

단 L_{\min} : 인덕턴스의 최소값

식(8) 및 식(9)에서 보는 바와같이 평활전류를 정착시키기 위해서는 인덕턴스가 증가하기 시작하는 각보다 θ_a 만큼 앞선각에서 여자전압을 인가하여야 한다.

인덕턴스 증가영역에서의 도동비를 1로하기 위해 인덕턴스의 최대구간의 시작점에서 평활전류를 소호하기 시작하여 끝점 안에 소호를 완료하기 위한 최소의 강제 감자전압은 고정자 저항을 무시하면 식(10)과 같고 고려하면 식(11)과 같이 표현할 수 있다.

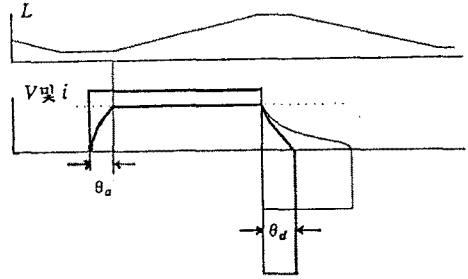


그림 1 인덕턴스 프로파일 및 상전류와 상전압파형

$$\theta_d = \frac{L_{\max} V_f}{K_1 V_b} \quad (10)$$

$$\theta_d = -\frac{W_r L_{\max}}{R} \ln\left(\frac{1}{1 - \frac{R V_f}{(R + K_1 W_r) V_b}}\right) \quad (11)$$

단 θ_d : 상전류 소호각, L_{\max} : 인덕턴스의 최대값, V_b : 감자전압

식(10) 및 식(11)의 θ_d 가 기존의 SRM에서 인덕턴스 최대영역각 보다 적게되도록 V_b 를 설정하여 부 토크의 발생없이 도동비를 1로 제어가능 하다.

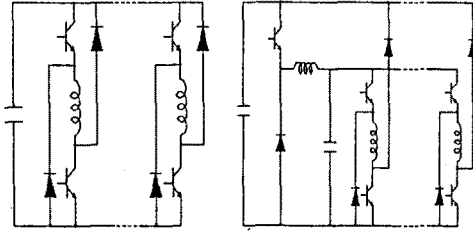
저속영역에서는 고정자 저항의 영향으로 평활전류를 정착하기 위한 각이 상대적으로 커지지만 어느정도의 속도영역 이상에서는 저항에 의한 전압강하를 무시할 수 있어 식(9)는 식(8)로 근사화되어 모우더의 속도에 관계없이 일정함을 알 수 있다. 따라서 평활전류 정착에 의한 맥동토크 방지를 위해서는 인덕턴스 최소치영역이 식(8)의 θ_a 보다는 커야 한다.

감자전압과 여자전압의 크기가 같은 classic inverter에서는 負토크의 발생없이 도동비를 1할 조건은 전류소호를 위한 각과 평활전류 정착을 위한 각의 비율은 L_{\max} / L_{\min} 의 비의 관계로 커지므로 인덕턴스 최대영역이 최소영역보다 상대적으로 크져 실용적인 전동기가 되지 못한다. 식(10) 및 식(11)에서와 같이 여자전압에 대한 감자전압의 비를 크게할 수 있는 구동회로는 전류 소호각을 줄여($\theta_d = \theta_c / K_1$) 토크의 사용영역 극대화를 실현할 수 있다. 따라서 감자전압은 구동회로의 전력소자가 허용하는 한 크게하여 인덕턴스의 최대영역 안에 전류를 소호시킬 필요가 있다.

3. 제이기의 구성

그림 2-(a)의 구동회로는 classic inverter형으로서 SRM 구동의 가장 기본적인 회로이며 SRM의 특성해석 및 동작해석에 대하여 대표적인 대비모델로 사용되고 있다.

그림 2-(b)의 구동회로는 제안된 회로이며 1상한 다운 초퍼(down chopper)의 출력단 전압(V_f)에 의해 전동기의 여자전압을 제어하며 전류 소호시는 다이오우드를 통하는 전류패스를 형성하기 때문에 높은 감자전압(V_b)이 인가되는 구동회로를 구성하였다.

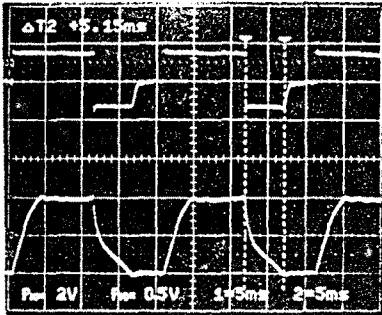


(a) classic inverter (b) 제안된 구동회로
그림 2. 구동회로

감자전압(V_b)은 기존의 설계된 전동기의 최대 인덕턴스의 각 변위에 의해 결정되며 여자전압(V_f)의 제어는 One-Chip 마이크로프로세서(8097)에서 지령속도와 실제속도 차에 대한 PI제어의 출력으로 PWM단자를 사용하였다. 또한 여자전압(V_f)의 인가 시기는 식(9)에 의해 계산된 값을 테이블에 의해 결정된다. 소호각은 속도에 관계없이 여자전압의 크기여해 최대토크를 출력할 수 있는 각에서 부터 시작한다.

4. 실험결과

그림 3(a)는 classic inverter에서 도동비를 1로 했을 때의 상전압(120[V]) 및 전류파형이다. 이때 전류 소호시간은 5.15[ms]이며 부토크가 발생한다. 그림 3(b)는 제안된 구동회로에서 여자전압에 대한 감자전압의 비를 2로 했을 때이며 상전압 및 전류파형이다. 전류 소호시간은 classic



(a) classic inverter



(b) 제안된 구동회로

그림 3. 상전압 및 전류파형

inverter에 비해 약37[%]로 감소함을 알 수 있고 출력토크에는 부토크의 발생영역이 나타나지 않으며 classic inverter보다 9[%]의 토크 증대가 됨을 알 수 있었다.

그림에서 보는 바와 같이 감자전압을 크게하면 할수록 전류소호시간은 단축되지만 전력소자의 내압이 허용하는 범위에서 설정되어야 한다.

5. 결론

본 논문에서는 높은 감자전압에 의한 전류의 신속한 소호로 상전류파형을 보다 이상적으로 개선시키는 방법을 제시하고 실험을 통하여 그 효과를 확인하였다.

또한 다운 초퍼(down chopper)의 출력단전압(V_f)에 의해 전동기의 여자전압을 제어하며 전 속도영역을 단일 펄스 모우드로 제어할 수 있었고, 높은 감자전압을 설정하므로 상전류의 급격한 감소기능을 견뎌므로써 토오크의 극대화가 가능하였다.

Classic inverter에 비해 소자의 정격전압이 높아져야 한다는 사실이 단점으로 지적될 수 있지만 스위칭각의 변화 없이 단일 펄스 모우드로 속도제어를 제어하므로 초평에 의한 속도제에 비해 전력소자의 스위칭 손실 및 스위칭각 변화에 의한 배동 토크의 증대를 보상할 수 있었다.

참고문헌

- [1] M.Ehasani, J.T.Bass, T.J.E.Miller, R.L.Steigerwald, "Development of a unipolar Converter for Variable Reluctance Motor drives," IEEE Trans. Inst. Appl., Vol. IA-23, No. 3, pp. 545-553, May/June 1987.
- [2] Slobodan Vukosavic, Victor R. Stefanovic, "SRM Inverter Topologies : A Comparative Evaluation," IEEE Trans. Inst. Appl., Vol. 27, No. 6, pp. 1034-1047, November/December 1991.
- [3] Charles Pollock, Barry W. Williams, "A Unipolar Converter for a switched Reluctance Motor," IEEE Trans. Inst. Appl., Vol. 26, No. 2, pp. 222-228, March/April 1990.
- [4] R.M.Davis, W.F.Ray, R.J.Blake, "Inverter Drive for Switched Reluctance Motor. Circuits and Component ratings," IEE Proc. Inst. Elec. Eng., Vol. 128, pt. B, No. 2, pp. 126-136, March 1981.
- [5] P.J.Lawrenson, et al., "Variable-Speed Switched Reluctance Motors," IEE Proc., Vol. 127, Pt. B, No. 4, pp. 253-265, July 1980.
- [6] Hassan Moghbelli, et al., "Performance of a 10-HP Switched Reluctance Motor and Comparison with Induction Motors," IEEE Trans. Inst. Appl., Vol. 27, No. 3, pp. 531-538, May/June 1991.