

SRM drive의 새로운 제동제어에 대한 연구

강유정, 오석규*, Chen Hao, 안진우
경 성 대. *진주산업대

A New Braking control of SRM Drive

Yu-Jung.Kang, Suk-Gyu.Oh, Chen Hao, Jin-Woo.Ahn
Kyungsung Univ., Chinju Nat'l Univ.,

Abstract - 본 논문은 SRM의 4상한 운전 조건 중 주 스위치의 고정된 스위치 온과 오프각을 가진 PWM 제동제어 방식에 대해 해석하였다. 평균 제동 토크는 포화되지 않은 자기회로에서 계산되어진다. 또한 여자구간과 커뮤테이션 구간에서의 에너지를 해석하였다. 제안한 PWM 제동제어 방식을 6/4SRM에 적용하여 그 타당성을 검증하였다.

1. 서 론

SRM은 20여년의 짧은 연구기간에 비해 높은 효율, 넓은 운전범위, 간단한 자기회로 등의 장점으로 인해 활발히 연구 개발되는 전동기이다. 또한 SRM은 가변속 전동기구조로서 4상한 동작이 가능한 전동기이다. 지금까지의 SRM 드라이브의 연구초점은 구동에 맞추어져 왔다. 그러나 SRM의 적용범위가 넓어짐에 따라 급제동 및 회생제동에 대한 연구가 필요하게 되었고 이 분야는 구동에 비해 상당히 까다로운 동작으로 여겨져 왔다. 특히 전기자동차와 같은 곳에 적용되는 견인용 전동기는 제동시의 회생제동제어가 필수적이다. SRM 드라이브의 제동토크는 인덕턴스 감소구간에서 상권선을 통하여 흐르는 전류가 흐르는 동안에 만들어진다. 제동토크는 전동기의 속도를 줄이거나 갑자기 설 때 필요로 한다. 이때 기계적인 에너지는 전기적인 에너지로 변환되어 전 원 축으로 환원된다.

본 논문에서는 SRM의 구동에 있어서 원활한 4상한 동작을 위하여 새로운 제동, 회생에 대해 해석하고 새로운 PWM 제동 제어방법을 제안하여 이에 대한 타당성을 실험과 해석을 통하여 검증하였다.

2. SRM의 제동

상권선의 저항과 누설자속을 무시하고 SRM의 자기회로가 포화되었다면, 상인덕턴스는 그림 1과 같다. 여기서 Lmin 은 상인덕턴스의 최소값이고 Lmax 는 상인덕턴스의 최대값이다. $\theta_a, \theta_b, \theta_c, \theta_d$ 는 상인덕턴스에 영향을 끼치는 고정자와 회전자 극호에 관계되는 각도를 나타내는 변수이다. θ_r 은 회전자의 극절이고, θ_1 은 주스위치의 온각이고 θ_2 는 주스위치의 오프각이고, θ_3 는 전류각을 각각 나타내고 있다. 제동동작 상태에서 SRM의 상전류는 아래와 같다.

$$i = \frac{U(\theta - \theta_1)}{\Omega[L_{min} + K(\theta - \theta_a)]}, \quad (\theta_1 \leq \theta \leq \theta_b)$$

$$i = \frac{U(\theta - \theta_1)}{\Omega L_{max}}, \quad (\theta_b \leq \theta \leq \theta_c)$$

$$i = \frac{U(\theta - \theta_1)}{\Omega[L_{max} - K(\theta - \theta_c)]}, \quad (\theta_c \leq \theta \leq \theta_2) \quad (1)$$

$$i = \frac{2U(\theta_2 - \theta_1) - U_c(\theta - \theta_1)}{\Omega[L_{max} + K(\theta - \theta_c)]}, \quad (\theta_2 \leq \theta \leq \theta_d)$$

$$i = \frac{2U(\theta_2 - \theta_1) - U_c(\theta - \theta_1)}{\Omega L_{min}}, \quad (\theta_d \leq \theta \leq \theta_3)$$

and

$$K = \frac{L_{max} - L_{min}}{\theta_d - \theta_c} = \frac{L_{max} - L_{min}}{\theta_b - \theta_a}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = K, \quad (\theta_1 \leq \theta \leq \theta_b)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = 0, \quad (\theta_b \leq \theta \leq \theta_c) \quad (2)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = -K, \quad (\theta_c \leq \theta \leq \theta_d)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = 0, \quad (\theta_d \leq \theta \leq \theta_3)$$

여기서 U 는 상전압이고 U_c 는 감자전압이다. 또한 Ω 는 회전자각속도이다.

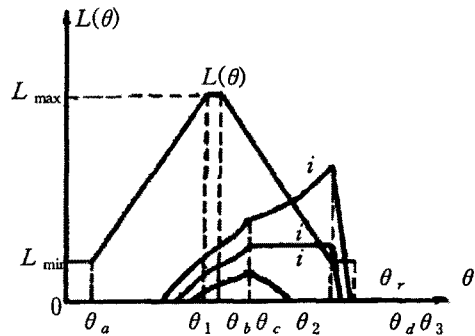


그림 1. 상인덕턴스와 상전류

m상 SRM의 평균 전자기적 토크는 아래와 같다.

$$T_{av} = \frac{m}{2\theta_r} \int_0^{\theta_r} i^2 \frac{\partial L}{\partial \theta} d\theta \quad (3)$$

따라서 평균 제동토크는

$$T_{bav} = -T_{av} = \frac{1}{\Omega^2} (C_0 + C_1 U + C_2 U^2) \quad (4)$$

여기서, C_0, C_1 그리고 C_2 는 스위치 온각과 스위치 오프각을 고정하였을 때의 인버터와 전류방식에 따른 전동기의 고유 상수이다. 따라서 평균제동 토크는 상권선에 인가된 상전압 즉 PWM제어에 의해 제어된다. 상권선에 인가된 상전압은 PWM의 시비율에 의해 제어된다.

3. 에너지와 전류 해석

3.1 에너지 해석

여자기간 : 인덕턴스가 상승하는 구간 ($\theta_1 \leq \theta \leq \theta_b$)에서 전원에 의해 공급된 전기에너지는 일부는 SRM의 자기회로의 매개로 기계적인 출력으로 변환되고 나머지는 자기회로에 자기에너지로서 축적된다. 최대인덕턴스 구간 ($\theta_b \leq \theta \leq \theta_c$)에서 전원에서 공급된 전기에너지는 전부 자기에너지로 축적되고 이 때에는 기계적인 출력은 없다.

감자기간 : 감자기간 ($\theta_c \leq \theta \leq \theta_2$)에서는 전원에서 공급된 전기에너지와 드라이브와 부하의 기계에너지는 전부 자기에너지로 변환된다.

전류구간 : 인덕턴스 감소구간 ($\theta_1 \leq \theta \leq \theta_b$)에서는 드라이브와 부하의 기계에너지와 자기회로에 저장된 자기에너지는 연속으로 흐르는 전류와 자기장을 매개로 하여 전부 전기에너지로 변환된다. 그리고 인덕턴스 최소구간 ($\theta_d \leq \theta \leq \theta_3$)에서 자기회로에 저장된 자기에너지만이 연속으로 흐르는 전류에 의해 전기에너지로 변환되어 전원으로 회생된다. 만약 인덕턴스가 증가하는 구간 ($\theta_3 > \theta_r + \theta_a$)에서도 전류가 계속 흐르면 저장된 자기에너지는 기계적인 출력으로 변환될 것이다. 이것으로 인하여 평균 제동토크는 감소하게 된다. 따라서 이 상태는 피하여야 한다.

3.2 상전류 해석

주 스위치의 도통구간은

$$\theta_w = \theta_2 - \theta_1 \quad (5)$$

식 (1)과 그림 1에서 상전류의 최대값, i_{max} 과 회전자 위치 θ_i 는 다음과 같다.

1) θ_2 에서 θ_d 까지 구간에서 회전 EMF는 감자 전류보다 크면

$$i_{max} = \frac{1}{\Omega} (K_1 U \theta_w + K_2 \theta_1 - K_3), \quad \theta_i = \theta_d \quad (6)$$

여기서 K_1, K_2 그리고 K_3 는 Lmin, θ_d 그리고 U_c 와 관계가 있는 상수이다.

2) θ_2 에서 θ_d 까지 구간에서 회전 EMF는 감자 전류보다 작으면

$$i_{max} = \frac{1}{\Omega} \frac{(U - K_1) \theta_w}{K_2 - K_3 \theta_2}, \quad \theta_i = \theta_2 \quad (7)$$

여기서 K_1, K_2 그리고 K_3 는 Lmin, Lmax, $\theta_a, \theta_b, \theta_c$ 그리고 U_c 와 관계가 있는 상수이다.

3) θ_2 에서 θ_d 까지 구간에서 회전 EMF는 감자 전류

와 같다면

$$i_{max} = \frac{1}{\Omega} \frac{U \theta_w}{K'_1 - K'_2 \theta_2}, \quad \theta_i = \theta_2 \quad (8)$$

$$i_{max} = \frac{U_c}{K \Omega}, \quad \theta_i = \theta_2 \sim \theta_d \quad (9)$$

여기서 K'_1 그리고 K'_2 는 Lmin, Lmax, θ_a, θ_b , 그리고 θ_c 와 관계가 있는 상수이다.

평균 제동토크가 감소하지 않도록 하기 위해 전류를 인덕턴스 상승하는 구간까지 흐르게 하는 것을 피하기 위해 θ_1 와 θ_2 는

$$\theta_1 + \frac{2U}{U_c} \theta_w \leq \theta_r + \theta_a \quad (10)$$

와 같아야 한다.

4. PWM 제동제어 방식

3상 6/4 SRM을 제안한 제어방식을 증명하기 위해 사용하였다. 그리고 그림 2는 인버터의 한상의 주회로를 보여주고 있다. 주 스위치의 스위치 온각과 오프각은 고정되어 있고 상권선에 인가되는 전압을 제어하기 위해 위단 스위치를 PWM제어로 시비율에 따라 가변한다.

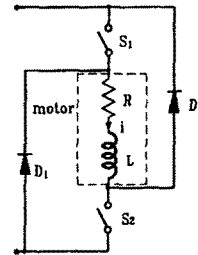


그림 2 인버터의 한상 주회로

주 스위치의 온각은 25. 로 고정되어 있고 스위치 오프각은 65. 로 고정하였다. (0. 는 회전자와 고정자가 만나기 시작하는 시점의 각이다) PWM제어의 주파수는 4KHz로 설정하였다. 입력전압은 $U_c = 90V$ 이고 감자전압은 $U_c = U_s = 90V$ 이고 정격출력은 65N.m 이다. 그림 3은 PWM제어방식을 채택한 시험기의 제동 토크특성을 보여주고 있다. 그리고 그림 4는 395rpm 에서의 상전류 파형을 보여주고 있다.

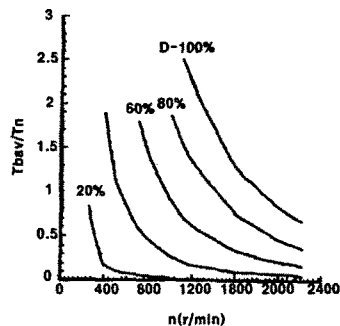


그림 3. 제동 토크의 특성

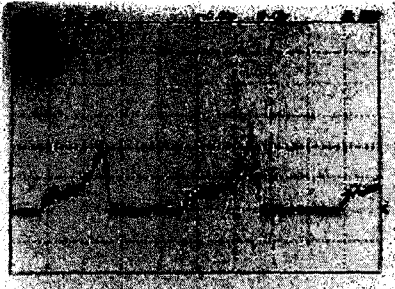


그림 4 상전류 파형

일정속도에서 인덕턴스가 감소하는 구간에서의 전류가 증가하는 동안 제동토크는 증가된다. 속도가 감소하면 인덕턴스가 감소하는 구간에서 전류는 증가하고 제동토크는 증가할 것이다. 왜냐하면 속도가 감소함에 따라 EMF가 줄어들고 저장된 자기에너지는 여자구간에서 증가하기 때문이다.

5. 결 론

SRM은 가변속 전동기로서 4상한 운전이 요구되어진다. 특히 SRM의 회생제동은 견인용 전동기로서 필수적인 요건이다.

본 논문에서는 고정된 주 스위치의 온, 오프각을 가진 PWM 제동방식을 제안하였고 에너지 흐름과 상전류에 대한 해석을 하였다. 또한 6/4 SRM을 이용한 실험을 통하여 제안한 방식이 유용했음을 증명하였다.

감사의 글

본 연구는 과학재단 목적기초연구(No. R01-2001-00300) 지원에 의해 수행되었음.

(참 고 문 헌)

- [1] Chen, H and Xie, G.: Theory and practice of PWM control for switched reluctance motors. Journal of China University of Mining & Technology. Vol.26, 1997, No.3, pp.23-27
- [2] Buja G S and Valla M I.: Control characteristics of the SRM drives--Part I: Operation in the Linear Region. IEEE Trans.on Industrial Electronics. Vol.38, 1991, No.5, pp. 313-321
- [3] Liu D. et al.: Switched Reluctance Drive. Engineering Industry Press, Beijing, China, 1994, pp. 56-59
- [4] Chen H, Jiang J. et al.: Commutation of Switched Reluctance Motor Drives. Proceedings of 7th International Power Electronics & Motion Control Conference. Vol.2, 1996, Budapest, pp. 443-446