

스위칭각 조정방식에 의한 SRM의 고속 제어기 설계

여형기, 이상락, 유지운, 박기태
고려대학교 전기공학과

High Speed Control of a Switched Reluctance Motor Using a Leading Angle Manipulation

Hyeong-Gee Yeo, Sang-Lak Lee, Ji-Yoon Yoo, Gwi-Tae Park
Dept. of Electrical Eng., Korea University

Abstract - The SRM can be operated on the high speed range in which the back-emf is greater than the DC link voltage. However, the phase current of the SRM should be controlled through the selection of an exciting angle since it can not be controlled by a chop of the DC link voltage in the high speed range. In this paper, a PI and a bang-bang controller are employed in order to control the speed of the SRM and the leading angle of the SRM is adapted as a control input. The performances of two controllers are evaluated by computer simulation. The results show that the bang-bang controller is more attractive than the PI controller in the cost and performance aspects.

은 회전자와 고정자의 극의 상대적 위치에 따라 달라지며 고정자 권선을 여자시키면 회전자는 자기저항을 최소가 되는 방향으로 회전을 하게 된다. 이때 a상의 인덕턴스는 회전자의 위치에 대한 함수로 다음과 같이 표현된다.

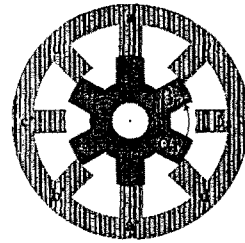


그림 1 4상 8/6극 SRM의 단면도

$$L_a(\theta) = \begin{cases} L_{\min} + K\theta & (0 \leq \theta \leq \beta_s) \\ L_{\max} & (\beta_s \leq \theta \leq \beta_r) \\ L_{\max} - K(\theta - \beta_r) & (\beta_r \leq \theta \leq \beta_s + \beta_r) \\ L_{\min} & (\beta_s + \beta_r \leq \theta \leq \alpha_r) \end{cases} \quad (1)$$

이때 K는 다음과 같이 정의된다.

$$K = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{\beta_s} \quad (2)$$

한편 에너지 변환에 의한 j상의 순시 토크는 식(3)과 같이 표현된다.

$$T_j = \frac{1}{2} i_j^2 \frac{d}{d\theta} L_j(\theta) \quad (3)$$

a상에 의하여 발생된 순시 토크는 식(1)을 식(3)에 대입하여 다음과 같이 구해진다.

$$T_a = \begin{cases} \frac{1}{2} K i_a^2 & (0 \leq \theta \leq \beta_s) \\ 0 & (\beta_s \leq \theta \leq \beta_r) \\ -\frac{1}{2} K i_a^2 & (\beta_r \leq \theta \leq \beta_s + \beta_r) \\ 0 & (\beta_s + \beta_r \leq \theta \leq \alpha_r) \end{cases} \quad (4)$$

전동기의 순시 토크는 각 상에서 발생된 순시 토크의 합으로 구할 수 있으며 속도 및 위치를 포함한 전동기의 동태 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{di_j}{dt} &= \frac{1}{L_j(\theta)} \cdot [R + \frac{dL_j(\theta)}{d\theta} \cdot i_j \cdot \omega + v_j] \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J} \cdot [-B\omega + \sum_j T_j - T_L] \\ \frac{d\theta}{dt} &= \omega \end{aligned} \quad (5)$$

1. 서론

고속용 전동기는 소형 경량으로 큰 출력을 낼 수 있기 때문에 다양한 응용 분야에서 관심이 증대되고 있다.[1][2] 고속용 전동기는 회전자의 발열량이 작아야 소형화가 가능하고 강한 원심력을 견디기 위해서는 회전자의 구조가 단순하고 견고해야 한다. 농형 유도기는 회전자가 견고하고 단순하나 속도가 높아지면 회전자 전류에 의한 철손의 증가로 운전 범위가 대략 5,000[rpm] 정도로 제한된다. 최근에는 NdFeB 영구 자석을 회전자에 매입한 브러시리스 직류기가 주목받고 있으나 전동기 제작비가 고가이기 때문에 상용화에는 거리가 있는 실정이다. 스위치드 릴럭턴스 모터(Switched Reluctance Motor : SRM)는 릴럭턴스가 주기적으로 변하는 특성을 이용하여 회전자 위치에 대한 고정자 권선의 여자 구간을 조절하면 일반 전동기와는 달리 역기전력이 전원 전압보다 큰 고속으로도 운전이 가능하다. 제작비가 저렴한 SRM은 회전자에 영구 자석이나 권선이 없어서 기계적으로 견고하고 Moghbelli[4] 등에 의하면 넓은 속도 범위에 대하여 고효율을 발휘하기 때문에 중·고속 경용으로 적합한 전동기이다. 그러나 고속에서는 전원 전압의 효용으로 여자 전류의 제어가 불가능하기 때문에 전동기의 속도는 여자각으로 제어해야 한다. 본 논문에서는 SRM의 고속 제어를 위하여 전류 파형을 분석하고 turn-on각, turn-off각과 토크의 관계를 정성적으로 분석하였다. 또한 turn-on각을 제어 입력으로 설정한 PI 제어기와 bang-bang 제어기를 제안하고 시뮬레이션을 통하여 그 유용성을 입증하고자 한다.

2. 동태 방정식

그림 1에 4상 8/6극 SRM의 구조를 나타내었다. 공극의 자기저항

상기 식에서 첨자 j 는 a, b, c, d상을 표시하는 index이며 T_n 은 부하 토크, v_j 는 각 상의 입력 전압이다.

3. 고속 운전시의 전류 파형

SRM의 토크는 식(3)에서와 같이 전류의 제곱에 비례하므로 토크를 제어하려면 그림 2(a)와 같이 전원 전압을 조절하여 전류의 크기를 제어 해야 한다. 그림 2(a)는 전류-전압 파형에 따라 4개의 구간으로 구분된다. 구간1은 상전류를 지령치 i_{ref} 에 신속히 도달하도록 역기전력이 없는 구간에서 미리 turn-on하는 구간으로, 권선 저항을 무시하면 $\theta=0$ 일 때 전류가 i_{ref} 가 되도록 θ_{on} 은 다음과 같이 결정된다.

$$\theta_{on} = \frac{L(\theta)\omega}{V_d} i_{ref} \quad (6)$$

구간 2는 순시 전류가 i_{ref} 와 같아지도록 전원 전압을 조절하는 구간이며, 구간 3은 전류를 신속히 0으로 만들기 위해 부의 전압을 가하는 구간이다. 상전류는 권선의 인덕턴스 성분 때문에 θ_c 가 되어야 소호된다. θ_c 가 β_s 보다 커지면 식(4)에서와 같이 부의 토크를 발생하게 되어 토크 리플이 커지고 평균 토크가 감소하게 되므로 θ_{off} 를 적당히 앞당겨서 θ_c 가 가급적 β_s 를 넘지 않도록 해야 한다. 전동기의 속도가 증가하여 역기전력이 전원 전압보다 커지면 전원 전압의 최대치를 인가해도 그림 2(b)와 같이 전류가 계속 감소하므로 앞에서와 같은 방법으로는 전류의 크기에 대한 제어가 불가능하다.

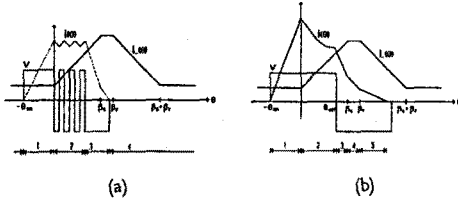


그림 3 전류 파형 (a) 저속운전시 (b)고속운전시

이 경우 전류의 순시치는 제어가 불가능하고 turn-on각 θ_{on} 의 조절을 통하여 전류의 peak값 또는 평균값만을 제어할 수 있다.

전류가 흐르는 구간을 그림 2(b)와 같이 전압 및 인덕턴스 파형에 따라 5개 구간으로 구분하여 권선 저항을 무시하고, 속도가 일정하다는 가정하에 각각의 구간에서 전류식을 구하면 다음과 같다.

$$i(\theta) = \begin{cases} \frac{V}{\omega} \frac{\theta_{on} + \theta}{L_{min}} & (-\theta_{on} \leq \theta < 0) \\ \frac{V}{\omega} \frac{\theta_{on} + \theta}{L_{min} + K\theta} & (0 \leq \theta < \theta_{off}) \\ \frac{V}{\omega} \frac{\theta_{on} + 2\theta_{off} - \theta}{L_{min} + K\theta} & (\theta_{off} \leq \theta < \beta_s) \\ \frac{V}{\omega} \frac{\theta_{on} + 2\theta_{off} - \theta}{L_{max}} & (\beta_s \leq \theta < \beta_r) \\ \frac{V}{\omega} \frac{\theta_{on} + 2\theta_{off} - \theta}{L_{max} - K(\theta - \beta_r)} & (\beta_r \leq \theta < \beta_s + \beta_r) \end{cases} \quad (7)$$

식(7)에서 전류가 0으로 되는 각 θ_c 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_c = \theta_{on} + 2\theta_{off} \quad (8)$$

4. 고속 운전시의 토크 특성

앞절에서 고찰한 바와 같이 고속 운전시의 전류는 θ_{on} 과 θ_{off} 만으로 제어될 수 있다. 식(7)에서 알 수 있듯이 전류의 피크 값은 오로지 θ_{on} 에 의하여 결정되고 θ_{off} 는 한 주기 동안의 전류의 평균값을 결정하는 역할을 한다. 전동기의 토크는 회전자의 위치 변화에 따

라 인덕턴스가 변하는 구간, 즉 구간2, 3, 5에서 식(4)와 같이 발생하며 이때의 순시 토크는 식(7)의 전류식을 식(4)에 대입하여 구할 수 있다.

한 주기 동안에 발생된 토크의 평균치는 식(4)의 순시 토크를 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$T_{avg} = \frac{1}{\alpha_r} \int_0^{\alpha_r} T(\theta) d\theta \quad (9)$$

전동기의 속도가 5,000 [rpm]일 때, 식(4)의 평균 토크와 θ_{on} 과의 관계를 그림 3에 도시하였다. 평균 토크와 θ_{on} 의 정성적 관계는 식(4)와 식(9)를 고찰함으로써 유추할 수 있다. 즉 토크는 전류의 제곱에 비례하고 전류의 피크치는 θ_{on} 에 비례하므로 결국 평균 토크는 θ_{on} 의 제곱에 비례함을 유추할 수 있다.

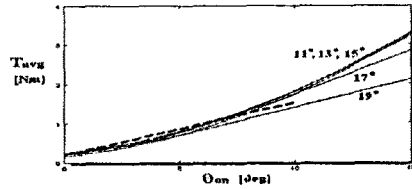


그림 3 θ_{on} 에 따른 토크특성

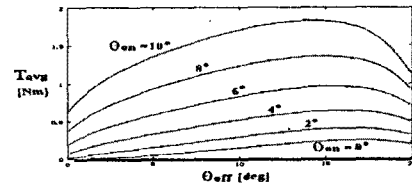


그림 4 θ_{off} 에 따른 토크특성

θ_{on} 과 평균 토크와의 관계는 그림 4와 같다. 그림에서 θ_{on} 이 증가함에 따라 최대 토크가 발생하는 θ_{off} 는 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 θ_{on} 이 증가함에 따라 식(8)에 의하여 θ_c 가 부의 토크를 발생하는 구간까지 증가하여 이 부의 토크의 영향이 커진 결과로 해석된다. 따라서 최대 토크를 얻기 위해서는 θ_{off} 를 14° ~ 17° 사이로 결정해야 한다.

θ_{on} 을 변화시키면서 전동기를 자유 가속시킨 시뮬레이션 결과를 그림 5에 도시하였다. Leading angle이 없는 경우($\theta_{on}=0$), 전동기의 속도가 최대 3,750[rpm]까지 가속될 수 있으나 leading angle을 증가시키에 따라 전동기의 속도를 6,000[rpm] 이상으로도 가속이 가능함을 알 수 있다.

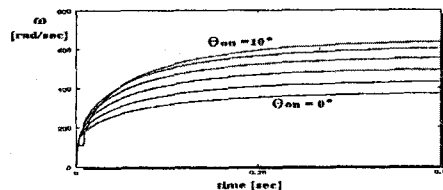


그림 5 θ_{on} 에 따른 전동기의 자유가속 응답

5. 속도 제어 및 시뮬레이션

그림 3에서 평균 토크는 θ_{on} 의 제곱에 비례하는 관계로 나타나나 θ_{on} 이 10° 이상이 되면 기동시에 과전류가 흐를 수 있다. 이를 방지하기 위해 θ_{on} 의 최대값을 10°로 제한하면 그림 3의 점선과 같이 직선으로 근사화할 수 있다. 이는 전동기의 입력을 θ_{on} 은

로 설정할 때 토크 출력이 입력에 비례하는 계통으로 간주할 수 있다. 이러한 관계를 이용하여 PI제어기를 구성하여 표1의 전동기에 대한 속도를 제어하는 계통의 블록 선도도와 시뮬레이션 결과를 그림 6에 수록하였다. 그림에서 전동기의 속도 응답이 대체적으로 지령치를 잘 추종하고 있으나 정상 상태에서 속도 오차를 보이며, $t=0.5$ [sec] 일 때 부하(T_L)를 증가하면 속도 오차가 더욱 심하게 되는 것을 알 수 있다.

표 1 시스템 파라미터

시스템	파라미터
전동기	고전자 극수 = 8, $\beta s = 20^\circ$
	회전자 극수 = 6, $\beta r = 25^\circ$
	정격 전압 = 460 V
	$L_{max} = 110$ mH, $J = 0.0016$ Kg ²
	$L_{min} = 10$ mH, $B = 0.004$ Nms/rad
PI 제어기	$K_p = 0.25, K_i = 0.3$
Bang-bang 제어기	$\theta_1 = 10^\circ, \theta_2 = 0^\circ$

PI제어를 위해서는 분해능이 높은 위치 센서가 필수적이거나 SRM이 출현하게 된 주요 요인중 하나가 가격 경쟁력인 점을 감안할 때, PI 제어는 SRM의 장점을 저감하는 결과를 유발한다. 이를 극복하기 위하여 저가의 인코더를 사용하면 분해능이 저하되어 PI제어가 곤란해지나 이때는 bang-bang 제어가 대안으로 채택될 수 있다. 즉 θ_{on} 을 식(10)과 같이 속도 오차에 따라 2개의 값을 갖도록 제어하면 분해능이 작은 인코더를 사용할 수 있다.

$$\theta_{on} = \begin{cases} \theta_1 & (\omega < \omega_{ref}) \\ \theta_2 & (\omega \geq \omega_{ref}) \end{cases} \quad (10)$$

기동시의 응답 특성이 PI제어와 유사하도록 θ_1 과 θ_2 를 선택하여 시뮬레이션한 결과를 시스템 블록 선도도와 함께 그림 7에 수록하였다. 그림 6과 비교하면 제어가 정상 상태 오차가 현저히 줄었으며, 부하를 증가하였을 때의 응답도 더 우수한 것을 알 수 있다. 그러나 bang-bang 제어 계통은 근본적으로 토크 리플이 심하여 정상 상태에서 속도 리플을 유발시키는 단점이 있다.

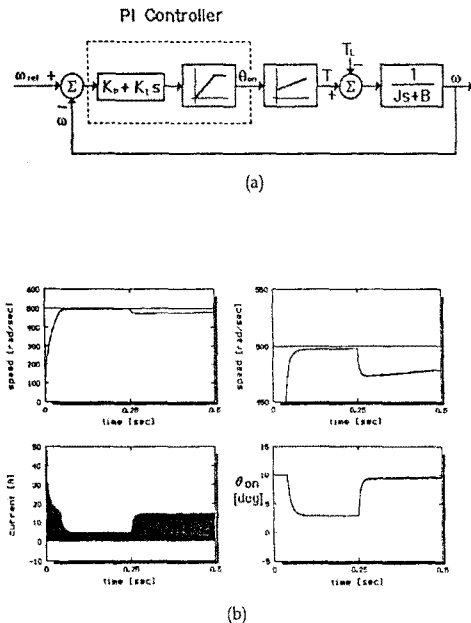


그림 6 (a) PI 제어 계통 (b) 시뮬레이션 결과

6. 결론

본 연구에서는 SRM의 고속 운전시 turn-on각과 turn-off각에 의한 전류 파형과 토크 특성을 분석하고 이를 활용하여 역기전력이 전원 전압보다 큰 고속에서의 속도를 제어하기 위한 제어기의 구성을 제안하였다. 전동기의 turn-on각(θ_{on})을 입력으로 설정하고 PI제어기와 bang-bang제어기를 설계하여 시뮬레이션을 수행한 결과 가격 경쟁력 면에서 유리한 bang-bang제어가 제어 성능도 우수한 것으로 판명되었다.

본 연구에서는 bang-bang제어기의 제어 입력(θ_1, θ_2)을 임의로 적당한 값을 선정하였으나 전동기의 토크 리플을 저감하면서 동시에 우수한 과도 응답 특성을 발휘하는 최적의 제어 입력을 구하는 알고리즘의 개발이 요망된다.

참고문헌

- [1] Tadashi Fukao, "Principles and Output Characteristics of Super High-Speed Reluctance Generator System," *IEEE Trans. on IA*, vol.22, no.4, Jul/Aug. 1986.
- [2] Isao Takahashi et al., "A Super High Speed PM Motor Drive System by a Quasi-Current Source Inverter," *IAS'93*, pp. 657-662, 1993.
- [3] M. A. Rahman, "Modern Electric Motors in Electronic World," *Proc. of IECON'93*, pp.644-648, 1993.
- [4] Hassan Moghbelli et al., "Performance of a 10-Hp Switched Reluctance Motor and Comparison with Induction Motors," *IEEE Trans. on IA*, vol.27, no.3, May, 1991.
- [5] Giuseppe S. Buja et al., "Variable Structure Control of an SRM Drive," *IEEE Trans. on IE*, vol.40, no.1, Feb. 1993.
- [6] R. Krishnan, "Switched Reluctance Motor Drives : Theory, Practice, and Applications," *An invited paper of MOTION-TECHNICS*, Sept. 1989.

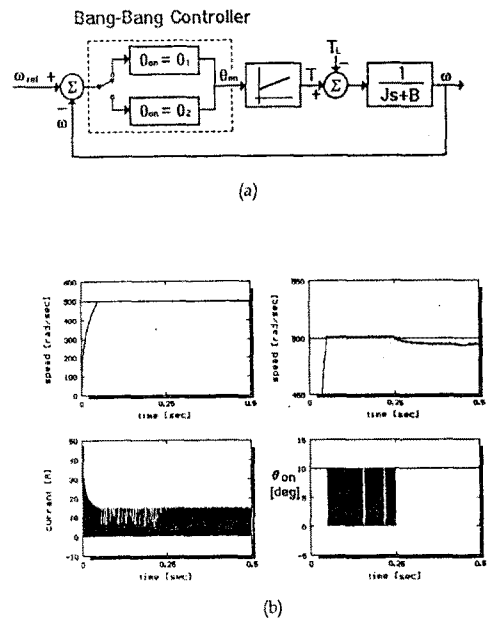


그림 7 (a) Bang-bang 제어계통 (b) 시뮬레이션 결과