고성능 전류 제어기를 이용한 스위치드 릴럭턴스 모터의 구동 성능의 관한 연구

이영욱*, 김윤현*, 이주*, 김영태**, 김석태**, 김준호***
한양대학교 전기공학과*, 국립원주대학**, 기술표준원***

The Research About Driving Performance Improvement of Switched Reluctance Motor Using High Performance Current Controller

Young Wook Lee*, Youn Hyun Kim*, Ju Lee*, Young Tae Kim**, Suk Tae Kim**, Jun Ho Kim***
Dept. of Electrical Engineering, Hanyang Univ.*, Wonju College**, ATS***

Abstract - This paper suggests the current control method that is possible to control Switched Reluctance Motor(SRM) with high performance current controller. The proposed control method is the way that uses the powerful current cintroller developed the speed emf with a proper voltage in an each inductance region instead of the existed PI controller. The suggested current control strategies are verified by simulations and experiments in this paper.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor)는 구조가 간단하고, 고정자와 회전자가 이중 돌극으로 구성된 구조로써 고정자에 여자에너지를 인가할 때 자기적 구조에 의존하여 발생하는 릴럭턴스 토오크로서, 여자에너지를 인가한 상의 릴럭턴스가 최소화되려는 특성에 기인한다[1]. 따라서 발생 토오크를 분석하기 위해서는 상권선의 전류와 인덕턴스 변화율을 고려한 해석이 반드시 수행되어야 한다. SRM 토오크 제어의 어려움은 각 상마다 제어의 독립성을 가지고 있어 2상의 중복 구간에서 토오크 리플이 발생된다는 점이다.
여러 논문에서 제시되었던 토오크 리플[3]을 줄이기 위해 서는 SRM의 서보형 제어기를 위해서 토오크 제어가 필요하다[2]. 그러나, SRM의 전류와 토오크가 비례관계가 아니고 전류의 자승과 위치의 함수이며, 또한 자계의 비선형성 특성의 영향을 받으므로 전류제어기 만으로는 정확한 토오크 제어를 수행할 수 없다. 따라서 유도기 등대부분의 전동기 제어에서 일반적으로 PI 전류 제어기가사용되고 있으며, 일반 전동기는 속도 기전력이 연속적인 함수로 발생한다. 즉 인덕턴스 일정구간에서는 속도 기전력이 거의 없다가 상승 인덕턴스나 하강 인덕턴스 구간에서 + 속도 기전력, - 속도 기전력으로 발생하므로 전류제어기 입장에서는 갑작스런 부하로 작용되는 영향을 받는다. 이러한 SRM만의 특징에 의해 PI 전류 제어기는 제어 응답성이 떨어지므로 본 연구에서는 이를 극복할 수 있는 방법으로 고성능 전류제어기를 제안하여 구현하였다. 본 논문에서 제시한 고성능 전류기의 신뢰성을 검증하기 위해 유한요소법을 이용한 시뮬레이션을 통해 가능성을 검증하였으며 TMS320C240을 이용한 실험을 통해 토오크 응답성과 구동 성능이 향상됨을 입증하였다.

2. 본 론

2.1 SRM의 구조에 따른 토크 특성

그림 1은 일반적인 6/4 SRM 모델을 보여준다. 여기서, β_s와 β_r은 각각 고정자 극호와 회전자 극호를 나타낸다. SRM의 각 상전류는 독립적임으로 각각의 상전류에 의해 발생되는 토오크 합이 전체 토오크가 된다. 만약 3상 구동 SRM의 경우 전체토오크는 식(1)과 같이 된다

$$T_{total} = T_a + T_b + T_c \quad (1)$$

여기서, T_{total}는 전체 토오크를 나타내고 T_a, T_b, T_c 는 각 상전류에 의해 발생되는 각 상의 토오크를 나타낸다.

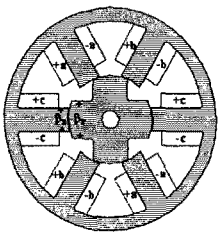
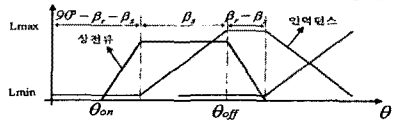
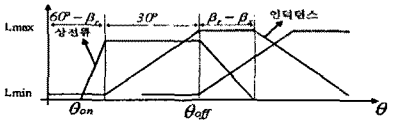


그림 1. 스위치드 릴럭턴스 모터 모델

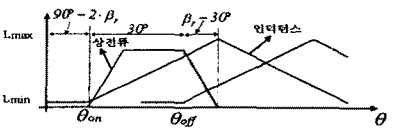
SRM의 동작에 있어서 각 상의 여자는 인덕턴스가 증가할 때 여자 시켜 정토오크를 발생시키고, 반대로 인덕턴스가 감소할 때 여자 시키면 부토오크가 발생된다. 그림 2(a)의 경우, 각 상의 상승 인덕턴스 구간이 연속적으로 연결되지 않기에 이상적으로 전류를 흘러도 기하학적 구조에 의해 토오크 리플이 두상이 겹치는 구간에서 큰 토오크 리플이 발생된다. 그림 2(b)의 경우에는 실제로는 인덕턴스 평활 구간에서 이상적으로 인덕턴스 변화율이 0이 아니고 또한 인덕턴스 증가, 감소 구간이 실제로는 비 선형적으로 증가, 감소하기 때문에 실제로는 상 전체 구간에서 토오크 리플이 존재한다.그림 2.(c)의 경우는 인덕턴스가 비선형적이고 일정하지 못하여 토오크 리플이 발생되며 상승 인덕턴스가 중복되는 구간에서 전류(commutation)되므로 이 구간에서 두 상에 의한 토오크리플이 함께 존재한다. 본 논문에서는 두상이 겹치는 구간에서 고성능 전류제어가 가능하므로 그림 2(b),(c)의 경우처럼 이상적으로 토오크 리플이 발생되지 않는 모델 (β_s = 30°, β_r = 50°)모델을 선정하여 수행하였다.



(a) $\beta_s \le 30°$, $\beta_r \le 30°$



(b) β_s = 30°, $\beta_r \ge 30°$



(c) $\beta_s \ge 30°$, $\beta_r \ge 30°$

그림 2. 고정자, 회전자 극호에 따른 토크 특성

2.2 고성능 전류제어기 이론

본 연구에서 수행한 SRM의 고성능 전류제어기에 관한 이론적 설명은 다음과 같이 정리하였다.
SRM의 기본 전압 방정식은 아래와 같다.

$$v = Ri + L\frac{di}{dt} + i\frac{dL}{d\theta}\omega \qquad (1)$$

식(1)의 전압방정식으로부터 다음단계의 요구전류 i(n+1)에 대해서 다시 정리하면 식(2)와 같다.

$$i(n+1) = dt\left(\frac{V^*(n+1) - (R + \frac{dL}{d\theta}\omega)i(n)}{L(n)}\right) + i(n) = \Delta i + i(n) \qquad (2)$$

식(2)에서 오차 전류 Δi는 다음과 같이 다시 쓸수 있다.

$$\Delta i = \left(\frac{V^*(n+1) - (R + \frac{dL}{d\theta}\omega)i(n)}{L(n)}\right)dt \qquad (3)$$

식(3)으로부터 다음 단계의 출력 전압 $V(n+1)^*$를 식(4)와 같이 계산할 수 있다.

$$V^*(n+1) = (R + \frac{dL}{d\theta}\omega)i(n) + \frac{L(n)}{dt}\Delta i \qquad (4)$$

따라서 식(4)의 고성능 전류제어기의 출력전압 $V(n+1)^*$은 그림과 같이 L(n)이 변화는 구간에 대해 위치 별로 다음과 같이 4구간으로 나누어 나타낼수 있다.

a) Ⅰ: 최소 인덕턴스(L_min)구간

L(n)값은 L_min이고, 그 크기는 일정하므로 식(4)에 $\frac{dL}{d\theta}$은 0이 된다. 따라서 출력전압 $V(n+1)^*$ 은 식(5) 와 같이 된다.

$$V^*(n+1) = R\,i(n) + \frac{L_{\min}}{dt}\Delta i = K_1\,i(n) + K_2\,\Delta i \qquad (5)$$

b) Ⅱ: 상승 인덕턴스 구간

L(n)의 값은 선형으로 증가한다고 가정하면, 출력전압 $V(n+1)^*$은 식(6)과 같이 표현 할 수 있다. ΔL은 최대 인덕턴스와 최소 인덕턴스의 차이고, θ_u는 상승 인덕턴스 구간이 시작하는 위치, θ_a 상승 인덕턴스 구간이 시작하는 위치, θ_a는 상승 인덕턴스 구간이 끝나는 위치를 나타낸다

$$V^*(n+1) = (R + \frac{dL}{d\theta}\omega)i(n) + \frac{(\Delta L(n)\times(\theta-\theta_u)/(\theta_a-\theta_u) + L_{\min})}{dt}\Delta i = K_3\,i(n) + [K_4\,(\theta-\theta_u) + K_2]\,\Delta i \qquad (6)$$

C) Ⅲ: 최대 인덕턴스(L_max) 구간

L(n)의 값은 L_max이고, 그 크기는 일정하므로 최소 인덕턴스 구간과 마찬가지로 $\frac{dL}{d\theta}$은 0이 되고, 따라서 출력 전압 $V(n+1)^*$은 식(7)과 같이 표현 될 수 있다.

$$V^*(n+1) = R\,i(n) + \frac{L_{\max}}{dt}\Delta i = K_1\,i(n) + K_5\,\Delta i \qquad (7)$$

d) Ⅳ :하강 인덕턴스 구간

L(n)의 값은 선형적으로 감소하며, 기울기도 상승 인덕턴스 구간과 같다고 가정하면 출력 전압 $V(n+1)^*$ 은 식(8)과 같이 표현 할 수 있다.

$$V^*(n+1) = (R - \frac{dL}{d\theta}\omega)i(n) + \frac{(-\Delta L(n)\times(\theta-\theta_b)/(\theta_a-\theta_u) + L_{\min})}{dt}\Delta i = K_6\,i(n) + [-K_4\,(\theta-\theta_b) + K_5]\,\Delta i \qquad (8)$$

위 식(5)~(8)에서 K_1 부터 K_6 다음과 같으며 저항, 인덕턴스 등의 parameter의 오차에 대해 조정 가능한 고성능 전류제어기의 게인 값들에 해당한다.

$$K_1 = R, K_2 = \frac{L_{\min}}{dt}, K_3 = R + \frac{dL}{d\theta}\omega$$

$$K_4 = \frac{\Delta L(n)}{dt\cdot(\theta_a-\theta_u)}, \quad K_5 = \frac{L_{\max}}{dt}$$

$$K_6 = R - \frac{dL}{d\theta}\omega$$

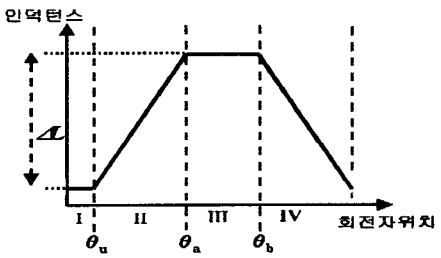


그림 3. 전류 제어 구간

2.3. 고성능 전류제어기와 시뮬레이션 결과

그림 4는 고성능 전류제어에 의한 SRM의 가변속 구동 제어기의 구성도를 보여주고 있다. 그림과 같이 각 상은 독립적으로 제어되고, 속도 오차 e에 의해 전류 지령치 I*의 크기를 증감시키는 방법으로 속도 제어를 수행한다. 이 때 각 상의 전류 제어는 전압 지령 제어기와 마찬가지로 도통 각 제어기에서 결정된 여자 구간 범위 내에서만 수행되며 각 상의 Iref가 0인 구간은 파워 소자를 Turn Off한다.

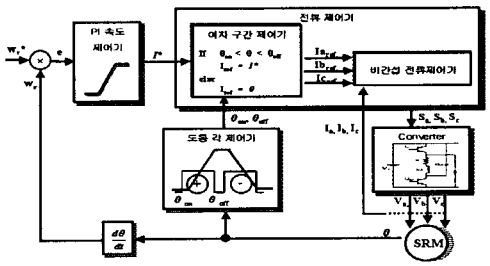
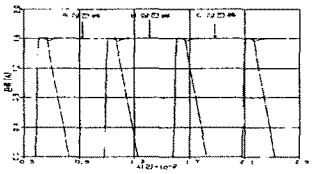
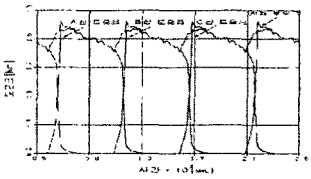


그림 4. 전류 제어형 SRM 고성능 전류 제어기 블럭선도

본 논문에서 제시한 고성능 전류제어기을 입증하기 위해 시뮬레이션은 ACSL[3]을 이용하여 구현하였다. 그림 5과 6은 β_s = 30°, β_r = 50° 모델에 대한 PI 전류제어 및 고성능 전류제어시의 시뮬레이션 결과이다. 그림 5은 일반적인 PI 전류제어기만 수행하였을 때의 전류, 토오크 응답 파형을 나타내는데 약간의 오버슈트와 언더슈트가 발생하고 있다. 그림 6은 고성능 전류 제어기를 수행하였을 경우 파형으로 그림 5보다는 전류, 토오크 응답 특성이 많이 개선되었음을 알수 있다. 그리고, 시뮬레이션 결과 PI제어기만으로 구현하였을 경우보다 고성능 전류 제어기를 구성하였을 경우 안정된 전류 응답 특성을 얻을수 있었으며, 부적절한 PI제어 게인에 대해서도 토크 응답 특성이 많이 개선됨을 알 수 있었다.

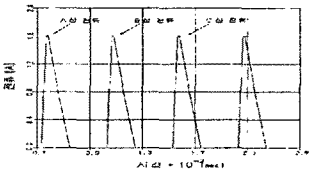


(a) 전류 파형

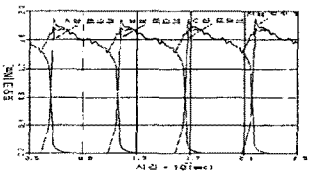


(b) 토오크 응답 파형

그림 5. β_s = 30°, β_r = 50° 모델에 대해 PI전류 제어했을 때의 각상의 전류와 토오크 응답 파형



(a) 전류 파형



(b) 토오크 응답 파형

그림 6. β_s = 30°, β_r = 50° 모델에 대해 고성능 전류 제어했을 때의 각상의 전류와 토오크 응답 파형

2.4 실험 결과

본 논문에서 제시한 고성능 전류제어기의 성능을 실험하기 위해 그림 7과 같이 구현하여 실험하였다. SRM의 회전자의 위치 검출을 위해 엔코더를 사용하였으며,SRM의 전류를 검출하기 위해 전압형 홀CT를 사용한다. TI사의 모터 구동 전용 DSP인 TMS 320C240 DSP[4]를 이용하여 모든 제어수행을 디지털화하였다.

또한, 상당 2개의 FET를 사용하여 그림 7과 같이 구현하였고, 제어기에 요구되는 기능을 수행하기 위해 필요한 하드웨어 구성 요소는 PWM 발생장치, A/D변환부, 전류 검출부, 속도 검출부, 파워소자의 구동회로, 디지털 전원을 공급하기 위한 SMPS등이 있다. 그림 8와 9은 β_s = 30°, β_r = 50° 모델을 이용하여 실험한 전류, 토오크 응답 파형이다. 그림 8은 PI 전류제어기만 수행하였을 때의 전류, 토오크 응답 파형이고, 그림 9는 고성능 전류 제어기 수행시의 전류, 토오크 응답 파형을 보여주는데 시뮬레이션 결과와 양상이 일치함을 볼 수 있다.

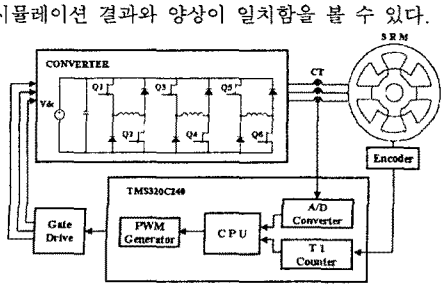
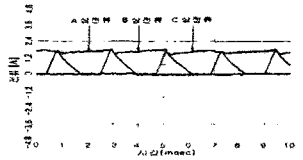
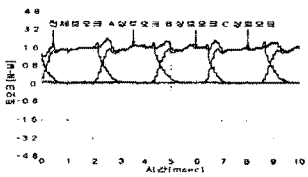


그림 7. 실험장치의 블록 선도

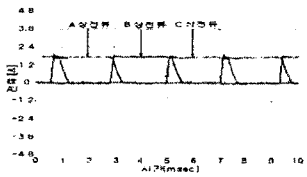


(a) 전류 파형

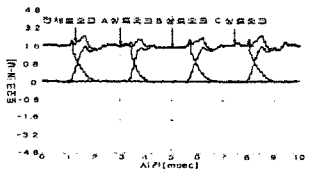


(b) 토오크 응답 파형

그림 8. β_s = 30°, β_r = 50° 모델에 대해 PI전류 제어했을 때의 각상의 전류와 토오크 응답 실험 파형



(a) 전류 파형



(b) 토오크 응답 파형

그림 9. β_s = 30°, β_r = 50° 모델에 대해 고성능 전류 제어했을 때의 각상의 전류와 토오크 응답 실험 파형

3. 결 론

본 논문에서는 PI제어기 및 고성능 전류제어기를 구성하여 전류 제어를 하였으며 PI제어기만을 사용했을 경우보다 토크 응답에서 좋은 성능을 나타냄을 알수 있었다. 기존의 PI제어기에서는 부적절한 게인이나 전동기 파라미터가 변동할 경우 동특성이 나빠지는 단점을 가지고 있지만, 고성능 전류제어기를 추가할 경우 이러한 PI제어기의 단점을 어느정도 보완해줌과 동시에 전동기 파라미터 변동에 강인한 특성을 나타냄을 알수 있었다. 또한 SRM 시뮬레이션과 실험이 모두 전류 지령치를 잘 추종하는 우수한 제어 성능을 보이고 있다.그러나, 고성능 전류 제어기로 인해 평활 전류를 유지할 수 있음을 실험을 통해서 알수 있지만, 토크 리플은 여전히 존재해 전류 제어만으로는 토크리플을 저감시킬수 없음을 알수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지정 국제공동연구(과제번호: M1-0011-0021)지원으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

[1] T. J. E. Miller, Switched Reluctance Motors and their control, Hillsboro, OH : Magna Physics Publishing and London : Oxford University Press, 1993.

[2] Iqbal Husain and Ehsani, "Torque Ripple Minimization in Swithced ReluctanceMotor Drives by PWM current Control", IEEE Trans. On Power Electronics, vol 11.

[3] ADVANCED CONTINUOUS SIMULATION LANGUAGE (ASCL) REFERENCE MANUAL Mitchell and Gauthier, 1987,

[4] TMS320F/C240 DSP Controllers CPU and Instruction Set.