

에너지 변환법을 이용한 스위치드 릴럭턴스 모터의 직접 토크 제어

류한승, 김윤현, 김솔, 이주, 김석태, 김영태
 한양대학교 전기공학과, 기술표준원, 국립원주대학

Advanced Torque Control Of Switched Reluctance Motor

Han Seoung Lyoo, Youn Hyun Kim, Sol Kim, Ju Lee, Suk Tae Kim, Young Tae Kim
 Dept. of Electrical Engineering, Hanyang Univ., Agency for Tech and Standard, Wonju College

Abstract - This paper suggests the torque control method that is possible to control Switched Reluctance Motor(SRM) directly without the various data. The proposed control method uses the real-time estimated torque that is based on the Linearized mechanical Work Operation(LMWO). The suggested torque control strategy is verified by simulation and experiments in this paper.

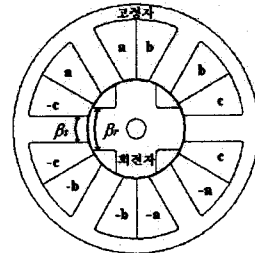


그림 1. 스위치드 릴럭턴스 모터 모델

1. 서 론

SRM의 발생 토크는 릴럭턴스를 이용하므로 고정자 상권선에 흐르는 전류와 그때 작용하는 인덕턴스에 의해 결정된다. 따라서 발생 토크를 분석하기 위해서는 상권선의 전류와 인덕턴스 변화율을 고려한 해석이 반드시 수행되어야 한다. SRM 토크 제어의 어려움은 각 상마다 제어의 독립성을 가지고 있어 2상의 중복 구간에서 토크 리플이 발생된다는 점이다.

여러 문헌에 토크 리플을 줄이기 위해 여러 가지 방법들이 제시되었다. 각 상의 독립전류를 PWM 전류 제어를 수행 [2]하거나, FUZZY LOGIC 제어[3], 또는 신경망 이론[4] 등을 이용하여 SRM의 토크 리플을 줄이는 방법들이 대표적 형태이다. 기존의 토크 제어방법은 회전자 위치정보와 전류에 대한 토크의 정보를 실험을 통해 미리 알고 있어야 하므로 반복적인 실험을 하여야 하는 번거로움과 실험 오차가 발생하였을 때 보정이 힘들며 제어대상이 바뀔 때마다 이러한 데이터를 다시 측정하여야 하는 어려움이 있어 범용적인 제어를 하기가 힘든 단점을 가지고 있다.

따라서, 본 논문에서 제시하는 토크 제어 방식은 SRM 특성 데이터가 없이도 직접 토크 제어가 가능한 방법으로 에너지 변환법을 고려한 추정 토크식을 이용하여 토크를 실시간으로 계산함으로써 실험을 통해 데이터를 얻어야 하는 번거로움이 없으며 제어대상이 바뀌어도 범용적으로 적용이 가능하다. 그러나 직접 토크 제어 방법은 추정 토크가 정확히 계산되어야만 하고 계산에 의한 추정 토크를 지령 토크와 비교하여 오차를 제어기를 통해 보상해 줌으로써 토크를 직접적으로 제어할 수 있다. 따라서, 이 제어방식을 통해 정확한 토크 제어를 수행함으로써 토크 리플의 최소화하고 속도 제어의 성능을 향상시킬 수 있다.

본 논문에서 제시한 직접 토크 제어의 신뢰성을 검증하기 위해 수치 해석 방법과 등가회로를 이용한 시뮬레이션을 통해 가능성을 검증하였으며 TMS320C240을 이용한 실험을 통해 토크 리플의 감소와 속도 제어 성능이 향상됨을 입증하였다.

2. 본 론

2.1 SRM의 구조에 따른 토크 특성

그림 1은 일반적인 6/4 SRM 모델을 보여준다. 여기서, β_s 와 β_r 은 각각 고정자 극호와 회전자 극호를 나타

낸다.

SRM의 각 상전류는 독립적임으로 각각의 상전류에 의해 발생하는 토크 합이 전체 토크가 된다. 만약 3상 구동 SRM인 경우 전체토크는 식(1)과 같이 된다.

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

여기서, T_{total} 는 전체 토크를 나타내고 T_a , T_b 와 T_c 는 각 상전류에 의해 발생하는 각 상의 토크를 나타낸다. SRM의 동작에 있어서 각 상의 여자는 인덕턴스가 증가할 때 여자 시켜 정토크를 발생시키고, 반대로 인덕턴스가 감소할 때 여자 시키면 부토크가 발생된다. 이와 같은 동작 원리로부터 3상 6/4모델의 SRM은 한 상에서 다음 상으로 스위칭 될 때 큰 토크 덩이 기하학적 구조에 따라 발생하므로 토크 리플이 발생할 수 있다. 따라서 고정자 극호와 회전자 극호의 크기에 따라 여러 형상의 토크가 발생된다. 그림 2는 고정자 극호와 회전자 극호의 변화에 따른 토크의 파형을 보여준다. 그림 2(a)의 경우, 이상적으로 스위칭을 하여도 기하학적 구조에 의해 토크 덩이 발생되어 큰 토크 리플이 발생된다. 그림 2 (b),(c)의 경우, 상승 인덕턴스 구간에서 전류가 일정하여도 실제로는 토크가 일정하지 않게 되는데 이는 실제 인덕턴스 변화율이 일정하지 않기 때문이다. 그림 2.(b)의 경우에는 인덕턴스 평활 구간에서 이상적으로 인덕턴스 변화율이 0 이 아니므로 상 전체 구간에서 토크 리플이 존재한다. 그림 2.(c)의 경우는 상승 인덕턴스가 중복되는 구간에서 전류(commutation)되므로 이 구간에서 두 상에 의한 토크가 함께 존재한다. 따라서 두 상의 합 토크가 일정하게 발생되도록 토크 제어를 하지 않으면 이 구간에서 토크 리플이 발생된다. 따라서 토크 리플을 제거하기 위해 정밀한 토크 제어가 필요하다.

본 논문에서는 그림 2(b),(c)의 경우처럼 이상적으로 토크 리플이 발생되지 않는 모델($\beta_s = 30^\circ$, $\beta_r = 50^\circ$)을 선정하여 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다.

2.2 토크 추정 이론

본 논문에서는 에너지 변환 이론에 근거한 제어기에서 간단하게 이용할 수 있는 토크 추정 방법을 제시한다. 에너지 손실을 무시한다면 에너지 변환 식은 식(2)과 같이 나타낼 수 있다.

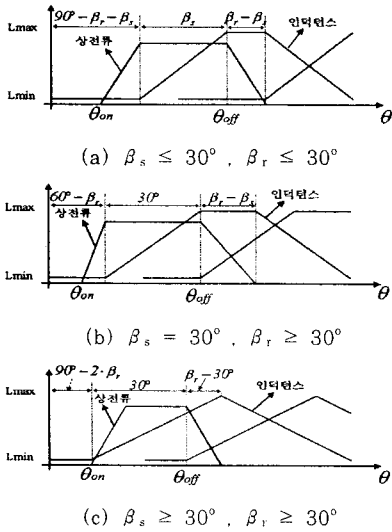


그림 2. 고정자, 회전자 극수에 따른 토크 특성

$$\Delta W_{in} = \Delta W_{out} + \Delta W_{store} \quad (2)$$

여기서, ΔW_{in} , ΔW_{out} 과 ΔW_{store} 는 각각 전기적입력 에너지, 저장 에너지, 출력 에너지의 변화분을 나타낸다. 예를 들어 SRM이 그림 3의 t_1 시점에서 t_2 시점으로 동작점이 변하는 동안 계에 입력되는 전기 에너지 변화분은 그림 3에서 면적(A+B)에 해당하며 결과는 식(3)과 같다.

$$\Delta W_{in-phase} \cong \text{면적}(A+B) = \frac{1}{2}(i_1 + i_2) \times (\lambda_2 - \lambda_1) \quad (3)$$

저장에너지 변화분은 그림 3에서 면적[(A+B)-(C+D)]에 해당하며 결과는 식(4)과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta W_{store-phase} &\cong \text{면적}[(A+B)-(C+D)] \\ &= \frac{1}{2}[(\lambda_2 \times i_2) - (\lambda_1 \times i_1)] \end{aligned} \quad (4)$$

따라서, 출력 에너지 변화분은 식(2)에 의해 입력에너지와 저장에너지 변화분의 차와 같다. 따라서, 식(5)과 같이 되며, 추정 토크는 식(6)과 같이 쓸 수 있으며 쇄교자속은 식(7)에 의해 계산되어진다.

$$\begin{aligned} \Delta W_{out} = \Delta W_{in} - \Delta W_{store} &= \text{면적}(B+D) \\ &= \frac{1}{2}(i_1 \times \lambda_2) - (i_2 \times \lambda_1) \end{aligned} \quad (5)$$

$$T_{phase} = \frac{\Delta W_{out}}{\Delta \theta} = \frac{\Delta W_{out}}{w \Delta t} \quad (6)$$

$$\lambda = \int (v - Ri) dt \quad (7)$$

여기서, w 와 Δt 는 각각 각속도와 샘플링 시간을 나타내고 v 와 R 은 상전압과 상저항을 나타낸다.

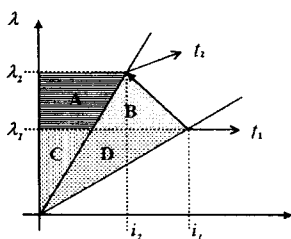


그림 3. 에너지 변환루프의 선형 근사 모델

2.3. 직접 토크 제어와 시뮬레이션 결과

그림 4는 토크 제어기의 블록 선도를 보여주며 그림과 같이 각 상은 독립적으로 제어된다. 각상의 토크 제어기는 토크제어기, 전류제어기, 추정 토크 연산기로 이루어지고, 쇄교자속은 일반 전압과 상전류에 의해 계산되어지며 토크는 쇄교자속과 상전류에 의해 계산되어진다.

본 논문에서 제시한 토크 제어성능을 입증하기 위해 시뮬레이션은 ACSL(Advanced Continuous Simulation Language)을 이용하여 구현하였고 시뮬레이션 모델 대상은 $\beta_s = 30^\circ$, $\beta_r = 50^\circ$ 를 선택하였다. 토크 제어기는 각상의 인덕턴스 상승구간에서 수행하였으며, 제어기의 샘플링 시간은 10kHz이다.

그림 5는 유한요소법(FEM)으로 계산된 토크와 추정 토크를 비교한 파형으로 일치함을 볼 수 있다. 그림 6과 7은 $\beta_s = 30^\circ$, $\beta_r = 50^\circ$ 모델에 대한 전류 및 토크 제어시의 시뮬레이션 결과이다. 그림 6은 전류 제어기만 수행하였을 때의 전류, 토크 파형을 나타내는데 그림에서 보듯이 스위치 전환 구간에서 토크 리플이 다른 구간에 비해 상대적으로 크게 발생하는 것을 볼 수 있다. 그림 7은 전류 제어기와 토크 제어기를 동시에 수행하였을 때의 전류와, 토크 파형을 보여준다. 그림 6과 7을 비교해 보면 스위치 전환 구간에서 토크 제어기를 수행하였을 때 토크 리플이 현저히 감소함을 볼 수 있다.

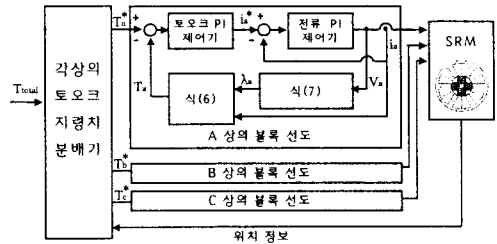


그림 4. 토크 제어의 블록 선도

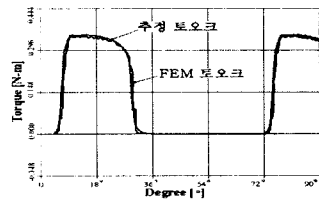
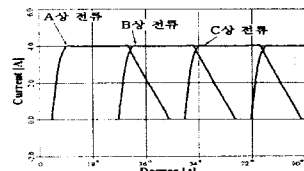
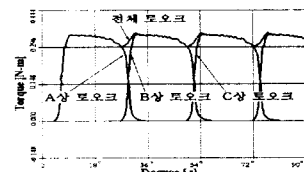


그림 5. $\beta_s = 30^\circ$, $\beta_r = 50^\circ$ 모델에 대해 한 상에 대한 FEM에 의한 토크와 추정 토크 비교

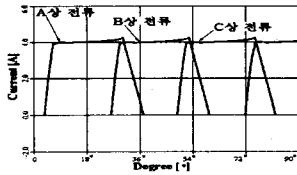


(a) 전류 파형

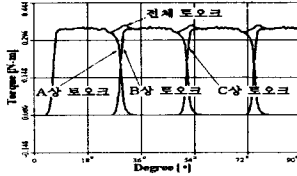


(b) 토크 파형

그림 6. $\beta_s = 30^\circ$, $\beta_r = 50^\circ$ 모델에 대해 전류 제어만 했을 때의 전류, 토크 파형

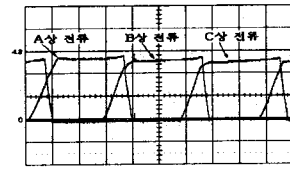


(a) 전류 파형

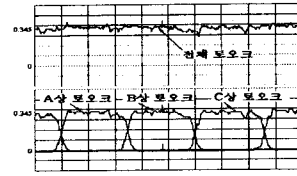


(b) 토크 파형

그림 7 $\beta_s = 30^\circ$, $\beta_r = 50^\circ$ 모델에 대해 전류, 토크 제어했을 때의 전류, 토크 파형



(a) 전류 파형



(b) 토크 파형

그림 10 $\beta_s = 30^\circ$, $\beta_r = 50^\circ$ 모델에 대해 전류, 토크 제어했을 때의 전류, 토크 실험 파형

2.4 실험 결과

본 논문에서 제시한 토크 제어기의 성능을 시험하기 위해 그림 8과 같이 구현하여 실험하였다. 제어기는 TMS 320C240 DSP를 이용하여 모든 토크 제어수행을 디지털화하였고 회전자의 위치 검출을 위해 엔코더를 사용하였으며, 각 상의 전류는 HALL C/T를 사용하여 검출하였다. 또한, 인버터는 상당 2개의 IGBT를 사용하여 그림 8과 같이 구현하였다. 전류제어기와 토크제어기의 샘플링 시간은 각각 10KHz, 3.3KHz 이다. 그림 9와 10은 $\beta_s = 30^\circ$, $\beta_r = 50^\circ$ 모델을 이용하여 실험한 토크와 전류파형이다. 그림 9는 전류제어기만 수행하였을 때의 전류, 토크파형이고 그림 10은 토크제어기까지 수행시의 전류, 토크 파형을 보여주는데 시뮬레이션 결과와 양상이 일치함을 볼 수 있다. 그러나 토크 리플의 크기가 시뮬레이션 보다 크게 나타나는 이유는 가공 오차에 의해 모터와 부하 연결축이 정렬되지 않아 발생하는 문제로 예상된다.

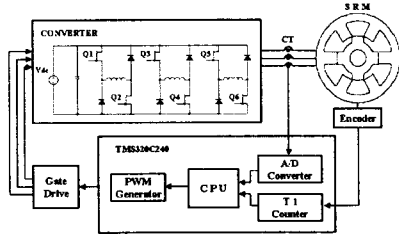
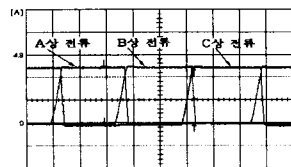
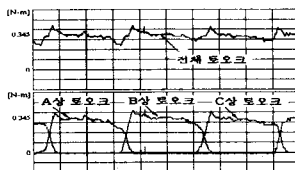


그림 8 실험장치의 블록 선도



(a) 전류 파형



(b) 토크 파형

그림 9 $\beta_s = 30^\circ$, $\beta_r = 50^\circ$ 모델에 대해 전류 제어만 했을 때의 전류, 토크 실험 파형

3. 결 론

본 논문은 SRM의 토크를 에너지 변환법을 이용하여 추정하고 이를 직접적으로 토크 제어 수행하는 방법을 제시하였다. 미리 정보를 입수해야 하는 번거로움이 없고 간단한 연산식에 의해 실시간으로 토크를 계산할 수 있다. 에너지 변환법에 의한 토크와 유한 요소법에 의한 토크를 비교함으로써 토크 추정 방법의 타당성을 검증하였고, 이 추정 토크를 이용하여 토크 리플을 개선하는데 효과적임을 실험을 통하여 검증하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] T.J.E Miller, "Switched Reluctance Motors and Their Control," Oxford Magna Physics Publishing and Clarendon Press, 1993.
- [2] Iqbal Husain and Ehsani, "Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor Drives by PWM current Control", IEEE Trans. On Power Electronics, vol.11, no. 1, pp.83-88, 1996
- [3] Sayeed Mir, Malik E. Elbuluk and Iqbal Husain, "Torque-Ripple Minimization in SRM Using Adaptive Fuzzy Control", IEEE Trans. ON Industry Applications, vol. 35, no. 2, pp.461-468, 1999
- [4] Changhing Shang, donald R and Barry W, "Adapting CMAC Neural Networks with Constrained LMS Algorithm for Efficient Torque Ripple Reduction in SRM", IEEE Trans. On Control Systems Technology, vol. 7, no. 4, pp.401-413, 1999.