

스위치드 릴럭턴스 모터의 토크 리플 저감을 위한 직접 토크 제어

김윤현*, 이민명*, 이주**
 한밭대학교 전기공학과, 한양대학교 전기공학과

Direct Torque Control of Switched Reluctance Motor for Torque Ripple Reduction

Youn Hyun Kim*, Min Myung Lee*, Ju Lee**
 Dept. of Electrical Engineering, Hanbat Univ, Dept. of Electrical Engineering, Hanyang Univ

Abstract - 본 연구는 스위치드 릴럭턴스 모터의 토크 리플 저감을 위한 제어 방법으로써 비선형 토크 추정에 의한 직접 토크 제어법을 제안하고 제안된 방법의 유용성에 대하여 실험과 시뮬레이션에 의하여 확인하였다. 또한 직접 토크 제어기법의 핵심인 전류제어의 성능 개선을 위하여 비간섭 전류제어법을 제시하고 그 성능을 검토하였다. 본 연구 결과는 SRM의 응용에 유용하게 이용될 것으로 판단된다.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 모터(Switched Reluctance Motor : SRM)은 구동원리상 일정 형태를 가지지 않는 펄스형태의 상 토크 파형에 의해 토크 리플이 크다는 치명적인 단점을 가지고 있다. 따라서 토크 리플은 소음, 진동의 원인이 되므로 토크 리플의 문제점을 해결하지 않으면 고정밀 구동으로서의 성능을 발휘하기가 어려워 90년대 들어와서 토크 리플 저감 제어 알고리즘, 속도 응답성 향상 제어 등의 전류제어구동, 토크 제어구동에 많은 노력이 있었다.

토크 리플을 저감하기 위한 제어 방법은 전류파형을 제어하여 토크를 제어하는 방법이 일반적으로 이용되고 있으며 문헌에서 현재 가장 많이 인용되고, 적용되고 있는 방법으로는 미리 계산 또는 측정된 최적 토크 분담 함수(torque sharing function 또는 torque contour function)를 사용하는 제어 방법이 소개되고 있다[1]. 토크 분담 함수를 최대 효율 운전에 목적을 두고 이용한 연구도 있으나 일반적으로 토크 리플을 저감시키는 목적으로 사용하고 있고 그 중 대표적인 실행 방법으로 두 상의 과도 토크를 부드럽게 처리해 토크 리플을 저감시키는 토크 분할 함수를 사용한 방법이 있다[2]. 그러나 이 토크 분담 함수 방법은 일부 모델에는 적용가능하나 모든 모델에는 적용이 용이하지 않다. 즉 설계된 결과를 고려하지 않고 토크를 제어하는 방법으로 일부 SRM의 극호 조합에서는 가능하나 다른 모델에서는 비현실적인 전류 파형이 도출되어 원하지 않은 결과를 얻을 수 있다. 또한 이 방법은 실제 제어기의 계산 부하를 감소시키지만 토크-분담 함수를 오프 라인(off-line)으로 계산하기 때문에 모델의 변경 시 적용이 불가능하고, 토크-분담 함수를 위한 정보를 수집하고 저장하는데 많은 노력과 저장 공간이 필요하다. 예로 위치 정보와 토크 정보가 각각 90개와 30개 정도의 분해능으로 수행한다면 약 2,700개 정도의 정보를 입수하고 저장하여야 한다. 따라서 계산이

나 측정에 의한 정보 수집과정에서 오차가 발생할 가능성도 높아진다. 최근에는 토크 분담 함수 방법의 문제점을 극복하고자 추정 토크를 기본으로 하여 실시간으로 토크를 직접제어를 하여 토크 리플을 감소시키는 연구도 있었다. 그러나 이 방법도 추정 토크가 선형 근사 모델인 수반에너지를 기반으로 유도되었고 결과 수식도 복잡하여 실시간으로 수행하기에 어려운 점이 많으며 또한 제어기에 필요한 계수를 미리 실험에 의해 구해야 하는 등 여러 가지 문제점을 안고 있다. 따라서 현재까지는 교류전동기의 벡터제어와 같은 정립된 이론이 없고 좀더 간편하면서 정확한 토크 제어 방법이 요구되고 있는 실정이다.

이상의 토크 리플 저감을 위한 기존 연구의 고찰을 통해 기존의 토크 분담 함수 방법은 앞서 기술한 바와 같이 여러 문제점을 가지고 있으므로 본 논문에서는 토크 추정을 기반으로 하는 새로운 토크 리플 저감을 위한 토크 제어 방법과 전류제어 방법을 제안하였다. 본 논문은 제안하는 새로운 전류제어기와 추정토크를 기반으로 하는 토크 리플 최소화를 위한 새로운 직접 토크 제어기 그리고 토크 추정 이론에 대해 본문에서 기술하였고 시뮬레이션과 실험에 의해 제안된 제어법의 효용성을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 비선형 추정 토크 기반의 직접 토크 제어기

그림 1은 본 연구에서 제안하는 직접 토크 제어에 의한 SRM의 가변속 구동 제어기의 구성도를 보여주고 있다. 직접 토크 제어는 SRM의 토크를 추정하여 추정 토크를 기반으로 토크를 직접 제어하는 방법이다. 토크의 추정은 SRM의 입력 전류와 미리 조사한 인덕턴스 프로파일의 의해 토크 값을 추정하였다. 그림에서 속도 오차 e 에 의해 토크 지령치 T_e^* 가 토크 제어기에 입력되면 직접 토크 제어기는 요구 토크를 발생시키기 위한 전류 증감분을 연산에 의해 계산하고 비 간섭 제어기는 요구 전류 증감분만큼 전류가 증감되도록 전류 제어를 수행한다. 이 때 직접 토크 제어기는 모든 위치에서 수행되며 각 상의 비 간섭 전류 제어는 보통 각 제어기에서 결정된 여자 구간 범위 내에서만 수행된다. 직접 토크 제어기는 에너지 변환 원리에 근거를 둔 토크 식을 이용하여 토크 오차에 대한 출력 전류 증감분을 계산하는 방법으로서 산술 연산만으로 구성되어 연산이 간단하다.

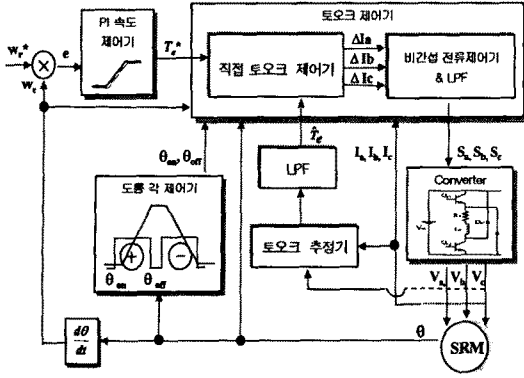


그림 1 토크 제어형 SRM 가변속 제어기

에너지 변환원리에 의한 현재의 추정 토크 식은 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{T}_e = \frac{\lambda(n)i(n-1) - \lambda(n-1)i(n)}{\Delta\theta} \quad (1)$$

또한 다음 단계(n+1)에서 발생해야 할 토크, 즉 지령 토크 값은 (2)과 같다.

$$T_e^* = \frac{\lambda(n+1)i(n) - \lambda(n)i(n+1)}{\Delta\theta} \quad (2)$$

여기서 $\lambda(n)$, $i(n)$ 은 각각 현재의 쇄교자속과 전류이고, $\lambda(n+1)$, $i(n+1)$ 는 각각 다음 (n+1)단계에서 흘러주어야 할 쇄교자속과 전류를 나타낸다.

식 (1),(2)에 $\lambda = L_i$ 를 대입하고 L 을 식(3)과 같이 위치에 대해 1차원적으로 근사화 시키면 식(4),(5)과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$L = \Delta L a \theta_r + L_{\min} \quad (3)$$

여기서 $\Delta L = L_{\max} - L_{\min}$, $\alpha = \frac{1}{\theta_a - \theta_u}$,
 $\theta_r = \theta - \theta_b$ 이다.

$$\begin{aligned} T_e^* &= \{[\Delta L a \theta_r(n+1) + L_{\min}]i(n+1)i(n) \\ &\quad - [\Delta L a \theta_r(n) + L_{\min}]i(n)i(n+1)\} / \Delta\theta \\ &= \frac{\Delta L a i(n+1)i(n)[\theta_r(n+1) - \theta_r(n)]}{\Delta\theta} \\ &= \Delta L a i(n+1)i(n) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \hat{T}_e &= \{[\Delta L a \theta_r(n) + L_{\min}]i(n)i(n-1) \\ &\quad - [\Delta L a \theta_r(n-1) + L_{\min}]i(n-1)i(n)\} / \Delta\theta \\ &= \frac{\Delta L a i(n)i(n-1)[\theta_r(n) - \theta_r(n-1)]}{\Delta\theta} \\ &= \Delta L a i(n)i(n-1) \end{aligned} \quad (5)$$

따라서 토크 오차는 식 (6)과 같이 된다.

$$T_e^* - \hat{T}_e = C \cong \Delta L a i(n+1)i(n) - \Delta L a i(n)i(n-1) \quad (6)$$

식 (6)을 $i(n+1)$ 에 대해 다시 정리하고 양변에 각각 $i(n)$ 을 빼면 식(7)과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta i(n+1) &= \frac{C}{\Delta L a i(n)} - [i(n) - i(n-1)] \\ &= K \frac{C}{i(n)} - \Delta i(n) \end{aligned} \quad (7)$$

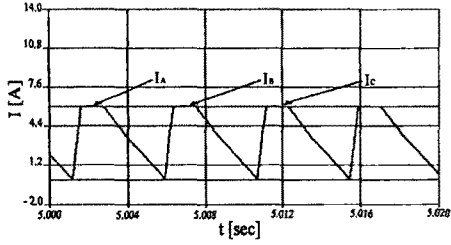
식 (7)의 전류 증감분은 비 간섭 제어기에 입력되어 비 간섭 제어기에 의해 요구 토크를 발생시키기 위한 출력 전압 지령치 $V^*(n+1)$ 을 출력한다.

2.2 시뮬레이션에 의한 성능 검토

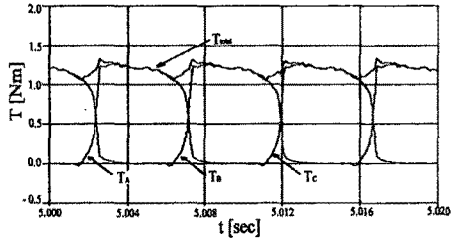
그림 2와 3은 정격 부하 1.2[Nm], 지령 속도 1,000[RPM]에서의 비 간섭 전류 제어에 의한 램프속도 응답 특성에 대한 시뮬레이션 결과들과 직접 토크 제어기를 사용한 SRM 가변속 제어의 시뮬레이션 결과 파형들을 보여주고 있다. 그림에서 정속 시의 전류 파형도 그림 2(a)와 같이 일정하게 흘러 비 간섭 전류 제어가 잘 동작함을 알 수 있다. 그러나 그림 2(b)와 같이 토크 파형은 전반적으로 토크 리플이 존재함을 알 수 있고, 따라서 전류 제어만으로는 토크 리플을 감소시킬 수 없으며, 토크 리플을 저감시키는 토크 제어 방법이 필요하다는 것을 알 수 있다. 그림 3(b)의 정속 구간의 토크를 보면 전류 제어만에 의한 SRM의 가변속 제어보다 상당히 토크 리플이 감소하였으며 전체 토크의 합이 리플이 없도록 각 상의 토크가 분배되어 그에 해당하는 각 상의 전류가 그림 3(a)와 같이 흐르고 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 토크 추정 방법을 기반으로 하는 직접 토크 제어에 의한 SRM의 가변속 제어는 토크 리플 저감의 토크 성능 개선에 매우 효과적임을 알 수 있다.

2.3 실험에 의한 성능 검토

그림 16은 전류 제어만의 가변속 제어에 의한 램프속도 응답 특성에 대한 실험결과 파형과 직접 토크 제어기에 의한 가변속 제어의 실험 결과 파형들이다. 지령속도는 시뮬레이션과 마찬가지로 1,000[RPM]으로 정속 구간에서의 부하는 1.2[Nm]가 인가되도록 와전류 제동기에 여자 전류를 입력하였다. 그림 4(a)의 정속 구간에서의 전류 파형을 보면 비 간섭 전류제어가 잘 수행되어 평활한 전류가 흐르나, 시뮬레이션과 마찬가지로 토크 파형을 보면 여전히 토크 리플이 존재함을 그림 4(b)에서 확인할 수 있었으며 그림 5(b)의 직접 토크 제어에 의한 정속 구간의 토크 파형을 보면 전류제어에 의한 SRM의 가변속 제어보다 상당히 토크 리플이 감소하였음을 보여 주고 있다. 위 실험 결과로부터 본 연구에서 제안한 토크 추정 방법을 기반으로 하는 직접 토크 제어기 SRM의 가변속 제어에 유용하며 특히 토크 리플 저감에 매우 효과가 크다는 것을 시뮬레이션과 마찬가지로 증명할 수 있었다.

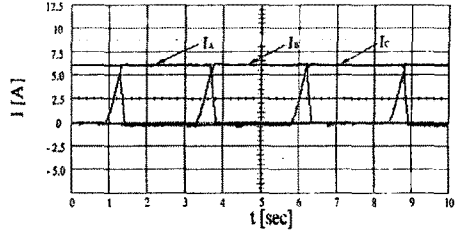


a) 정속 구간 전류 파형

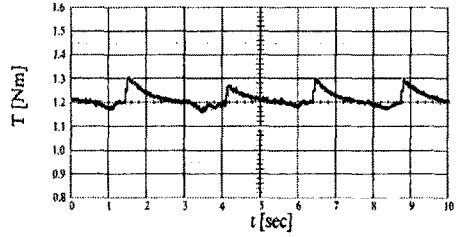


b) 정속 구간 토크 파형

그림 2 전류제어만에 의한 가변속 제어시 시뮬레이션 결과

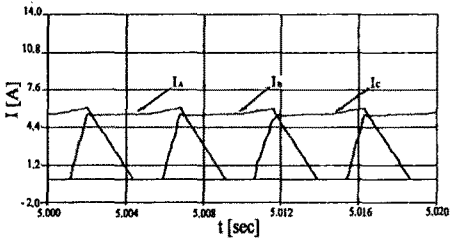


a) 정속 구간 전류

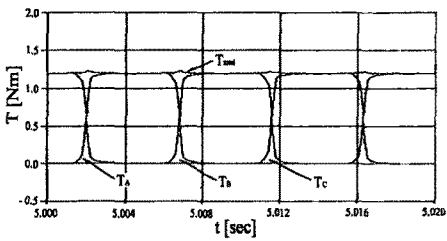


b) 정속 구간 토크 파형

그림 4 전류 제어시 실험 결과

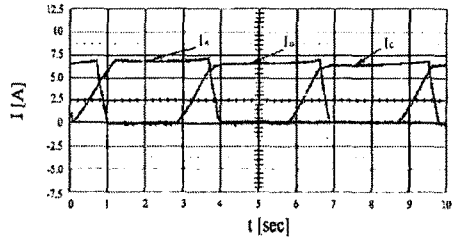


a) 정속 구간 전류 파형

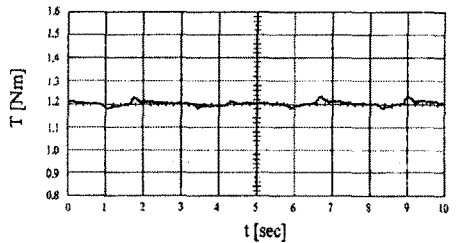


b) 정속 구간 토크 파형

그림 3 토크 제어에 의한 가변속 제어시 시뮬레이션 결과



a) 정속 구간 전류



b) 정속 구간 토크 파형

그림 5 직접 토크 제어시의 실험 결과 파형

3. 결 론

본 연구에서는 토크 리플 저감을 위한 제어 방법으로 추정 토크를 기반으로 하는 직접 토크 제어 방법을 제안하였다. 토크 추정은 에너지 변환 원리를 기본으로 하는 비선형을 고려한 추정 방법을 사용하여 그 성능을 검토하였다. 본 연구에서는 시뮬레이션을 통해 직접 토크 제어기의 성능을 분석하였고 제어 대상 SRM과 드라이브를 제작, 실험을 수행하여 토크 리플의 저감 향상을 확인할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] P.C. Kjaer, J.J. Gribble and T.J.E. Miller, "High grade control of switched reluctance machines", in Conf. Rec. IEEE IAS Annu. Meeting, 1996, pp.92-100
- [2] K. Russa, I. Husain and Elbuluk, "Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Machines Over a Wide Speed Range", IEEE Industrial Application Society Annual Meeting, New Orleans, LA. October 5-9, 1997, pp.668 675