SRM의 상 인덕턴스를 이용한 센서리스 직접토크 제어

김상엽, 김재훈, 김래영†
한양대학교

Sensor-less Direct Torque Control using Inductance Peak Detection for Switched Reluctance Motor

Sang Yub Kim, Jae Hoon Kim, Rae Young Kim†
Hanyang University

ABSTRACT

본 논문은 스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, 이하 SRM)의 상 인덕턴스를 추정하여 최고점과 최저점을 검출하는 방식으로 위치 센서를 이용하지 않는 직접토크 제어를 제안한다. 최고점으로부터 최저점의 위치 정보를 계산하여 이를 기준으로 회전 중인 회전자의 위치정보를 얻는다. 또한, 회전자의 위치정보를 필요로 하는 토크 계산 및 토크분배함수(Torque Sharing Function, 이하 TSF)는 상 인덕턴스 최저점 검출과 연관하여 계산하였다. 제안한 알고리즘은 시뮬레이션을 통하여 가능성을 입증하였다.

1. 서 론

SRM은 자석을 포함하지 않는 전동기로써 간단한 구조, 저가 등을 장점으로 지니며 최근 넓은 분야에서 사용되고 있다. 하지만 회전자와 고정자의 돌극형 구조로 인한 비선형적인 자기 특성은 토크 리플의 원인이 된다, 따라서, 일정한 토크를 유지하기 위한 토크리플 저감 기술 들이 제안 되었다[1]. 한편, 전동기를 구동 및 토크 제어를 위해서는 상 전환 시점과 토크 계산을 위한 회전자의 위치정보가 필요로 하게 된다. 그러므로 회전자 위치 정보를 얻기 위해서 전동기의 특성을 나타내는 Look Up Table (LUT)를 사용하거나, 위치 센서를 사용하게 된다[2][3]. LUT를 활용할 경우, 드라이브가 특정 모터에 한정되거나 저장하기위한 별도의 메모리 공간이 필요로 하게 된다. 또한, 센서를 사용할 경우, 시스템의 비용과 크기가 증가된다는 단점이 존재한다. 이 단점들을 보완하고자 제안한 방식은 전동기의 전압방정식을 이용하여 상 인덕턴스를 얻고 이를 통해 위치 정보를 알아내어 토크제어를 하는 알고리즘이다.

본 논문에서는 4/2 SRM의 상 인덕턴스의 특성을 통해 얻은 회전자의 위치를 이용하고 TSF를 포함하는 토크제어 시스템을 제안하였다. 제안된 기법은 시뮬레이션을 통하여 알고리즘의 타당성을 검증하였다

2. SRM의 센서리스 직접토크 제어

센서리스 직접토크를 위한 시스템의 블록도는 그림1과 같이 제안된다. 시스템은 크게 센서리스, 토크제어 부분으로 나눌 수 있다. 토크제어를 위한 토크 지령 값은 TSF를 통해 형성되며, 제어기는 토크 히스테리시스 제어기를 사용하였다.

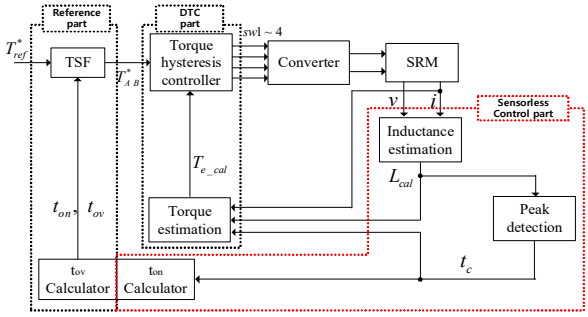

그림 1 센서리스 직접토크제어 시스템 블록도
Fig. 1 The block diagram for sensor-less direct torque control

1.1 센서리스 제어방식

SRM의 고정자와 회전자가 가지고 있는 돌극형 구조로 인해 인덕턴스는 위치에 따라 비선형적인 성질을 가진다. 그리고 다음 식 1에서의 전압 방정식으로부터 식2와 같이 인덕턴스를 얻을 수 있다.

$$V_{ph} = Ri_{ph} + \frac{d\lambda}{dt} \tag{1}$$

$$L(\theta) = \frac{\int_0^t (v_{ph} - Ri_{ph})dt}{i_{ph}} \tag{2}$$

인덕턴스를 위치 및 시간에 따라 표현하면 그림2와 같이 나타낼 수 있다.

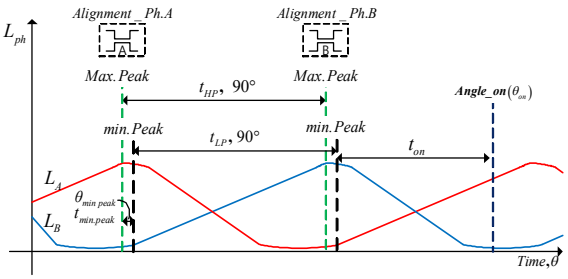

그림 2 시간 및 위치에 따른 인덕턴스 프로파일
Fig. 2 A inductance profile for position and time

인덕턴스의 기울기에 따라 역토크가 발생할 수 있기 때문에 선행각 제어가 필요하다. 따라서 제안하는 센서리스 방식에서의 상전환은 계산된 값에 따라 인덕턴스가 감소하기 전에 실시한다.

그림2에서 회전자와 고정자가 Align되는 상황에서 인덕턴스는 가장 큰 값을 가지고 Unalign되는 상황에서는 가장 작은 값을 가지게 된다. 따라서 4/2 SRM에서 가장 큰 값의 인덕턴스를 가지는 두 상 사이의 기계각은 90°이며, 매 제어 주기마다 상승하는 카운터를 이용하면 t_{HP}라는 시간을 얻을 수 있다. 또한, 인덕턴스가 상승을 시작하는 시점의 기계각을 $\Theta_{min.peak}$, 시간을 $t_{min.peak}$라 정의하면 식3에 의해서 $\Theta_{min.peak}$을 얻을 수 있다.

$$\theta_{\min.peak} = \frac{t_{\min.peak}}{t_{HP}} \bullet 90^{\circ} \tag{3}$$

원하는 상전환 시점은 식3에 의해 얻은 각을 이용하면 인덕턴스가 상승하기 시작하는 시점으로 부터의 시간을 식4와 같이 구할 수 있다.

$$t_{on} = \frac{t_{LP}}{90^{\circ}} \bullet (\theta_{on} - \theta_{\min.peak}) \tag{4}$$

선행각 제어를 하게 될 경우 인덕턴스가 최고점까지 도달하기 전에 상전환을 하게 되므로 최고점 검출이 불가능하다. 따라서 인덕턴스가 증가하는 시점의 기계각을 얻은 후에 그 시점으로부터 계산된 시간으로 상전환을 하게 된다.

1.2 직접토크 제어 방식

직접 토크 제어를 위한 순시토크는 릴럭턴스 토크만을 가지기 때문에 식5와 같이 표현 할 수 있으며, 위치에 대한 인덕턴스의 변화량은 시간에 대한 인덕턴스의 변화량으로 치환하여 순시토크는 식6과 같이 구할 수 있다.

$$T = \frac{1}{2}\frac{dL(\theta)}{d(\theta)} i_{ph}^2 \tag{5}$$

$$T = \frac{1}{2}\frac{dL(\theta)}{dt}\frac{1}{w_m} i_{ph}^2, \quad w_m = \frac{t_{LP}}{90} \bullet \frac{180}{\pi} \tag{6}$$

따라서, 센서리스 제어를 이용한 순시토크는 식6과 같이 구하고 이를 히스테리시스 제어기에서 매 제어 주기마다 지령 값과 비교하여 스위칭 명령을 출력한다.

1.2.1 토크 분배 함수 (TSF)

TSF는 효과적인 토크 리플 저감 기술로써 회전자 위치에 따라 적합한 지령 값을 얻을 수 있다. TSF의 종류는 사용되는 함수에 의해 정의되며, 그 중 Cubic TSF는 비교적 높은 효율 및 실시간 계산이 필요한 시스템에서 적합하다고 분석되고 있다[4]. 본 논문에서는 위치정보에 의한 함수를 식7과 같이 인덕턴스가 증가하기 시작하는 시점으로 부터의 시간에 대한 함수로 제안한다.

$$TSF(t) = \begin{cases} 0, & (0 \le t \le t_{on}) \\ f_{up}^{c}(t), & (t_{on} \le t \le t_{on} + t_{ov}) \\ T_{ref}, & (t_{on} + t_{ov} \le t \le t_{LP}) \\ T_{ref}, & (t_{LP} \le t \le t_{off}) \\ f_{dn}^{c}(t), & (t_{off} \le t \le t_{off} + t_{ov}) \\ 0, & (t_{off} + t_{ov} \le t \le t_{LP}) \end{cases} \tag{7}$$

위의 함수는 두 상을 여자 시키는 동안의 시간으로 표현되었다. $f_{up}^{c}(t)$와 $f_{dn}^{c}(t)$는 increasing과 decreasing 구간의 cubic function을 나타내며, t_{ov}는 overlap angle의 시간을 나타낸다.

3. 시뮬레이션 결과

알고리즘 검증을 위한 시뮬레이션은 MATLAB을 이용하였으며, 4/2 SRM과 Asymmetric bridge converter를 모델링하여 구성하였다.

그림3에서 나타나는 commutation point는 인덕턴스 최저점으로부터 계산된 상전환 시점이다. 이를 이용하여 TSF를 형성하고 토크제어를 할 경우 마지막 파형과 같이 토크가 제어됨을 확인 가능하다.

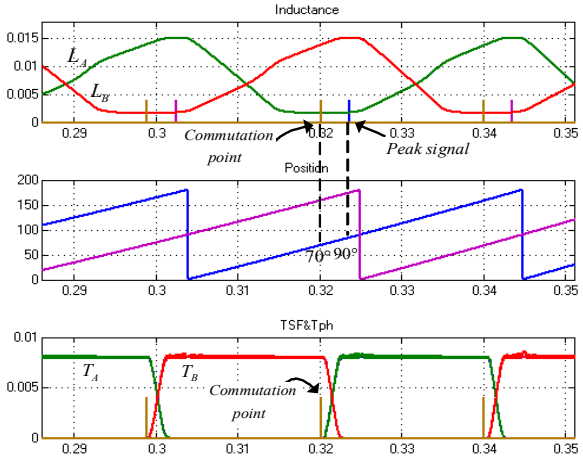

그림 3 인덕턴스 최고점과 계산된 상전환 시점, 토크제어
Fig. 3 Inductance with peak point, commutation point and controlled torque waveform

4. 결 론

본 논문에서는 직접토크제어 시스템에서 회전자의 위치에 따라 변하는 인덕턴스의 특성을 이용한 센서리스 방식을 제안하였다. 제안된 알고리즘의 특징은 특정 모터에 국한되지 않고 파라미터 변동에 인한 영향이 없으며 별도의 회로를 요구하지 않는다는 점이다. 또한 제안된 기법을 시뮬레이션을 통하여 가능성을 검증하였으며, 향후 상전환 및 토크에 대한 분석을 통해 좀 더 효율적인 제어를 위한 연구가 진행될 예정이다.

참 고 문 헌

[1] Suryadevara, R., Fernandes, B.G.,"Control techniques for torque ripple minimization in switched reluctance motor: An overview,"Industrial and Information Systems (ICIIS), 2013 8th IEEE International Conference.,pp. 24 29, Dec.

[2] C. R. Neuhaus, N. H. Fuengwarodsakul, and R. W. De Doncker, "Predictive PWM based direct instantaneous torque control of switched reluctance drives,"in Proc. 37th IEEE Power Electron. Spec. Conf., Jeju, Korea, Jun. 2006, pp. 3240 3246.

[3] R. B. Inderka, R. W. A. A. De Doncker, "DITC Direct instantaneous torque control of switched reluctance drives," IEEE Transactions onIndustry Applications, Vol. 39, No. 4, Jul. /Aug. 2003, pp. 1046 1051.

[4] Xue X. D., Cheng K. W. E., Ho S. L., "Optimization and Evaluation of Torque Sharing Functions for Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor Drives", IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 24, No. 9, September 2009, pp. 2076 2090.