

침상침하용 재봉틀을 위한 PMSM 구동시스템 개발

Development of a PMSM Drive System for Industrial Sewing Machine

김 상 훈* 박 내 춘**
Kim, Sang-Hoon Park, Nae-Chun

Abstract

In this paper, a surface mounted permanent magnet synchronous motor(SPMSM) drive system for industrial sewing machine was developed. Even through a low-resolution encoder is used for a low cost, using a full order observer enables to estimate accurate speed and position. And it also compensates a disturbance torque caused by the belt between a load and a motor. In order to control precisely stop positions of a needle, a speed trajectory is calculated from the acceleration pattern which is obtained from the position reference. The performance of the developed system is verified by experimental results.

키워드 : PMSM, 재봉틀
Keywords : PMSM, sewing machine

1. 서론

재봉틀 구동 시스템은 고성능, 다기능을 요구한다. 특히 정지시 침(針)의 정밀한 위치제어가 요구되는데, 이를 위해서는 구동 전동기의 순시 토크제어가 필요하다[1]. BLDCM(Brushless DC Motor)는 제어가 간단하고, 가격이 저렴하다는 장점으로 인해 공업용 재봉틀에 널리 사용되고 있으나, 전류(轉流)시 발생하는 맥동 토크로 인하여 소음 발생 및 성능 저하를 일으키는 문제가 있다[2]. 최근 들어 제어기와 영구자석 가격의 하락으로 효율 및 출력 밀도가 높고 토크 리플이 작은 표면부착형 영구자석 동기전동기 (Surface-Mount Permanent

Magnet Synchronous Motor : SPMSM)를 사용하는 응용분야가 늘어나고 있다[2].

본 논문에서는 SPMSM을 이용한 저가의 고성능 재봉틀 구동 시스템을 개발하였다. 순시 토크제어를 위해 벡터제어 기법을 사용하였고, 정지시 정확한 위치제어를 하기 위해 가속도 패턴으로 부터 속도 지령계적을 구하여 전동기의 속도를 제어하는 방법을 사용하였다. 저가의 시스템에서는 높은 정밀도의 엔코더를 사용할 수 없기 때문에 전자원관측기를 이용하여 낮은 정밀도의 엔코더(360 [PPR])로부터 얻은 속도를 가지고 정확한 속도와 회전자의 위치를 추정하였다.

재봉틀은 통상 모터의 회전축과 벨트(belt)로 연결되어 구동되는데, 벨트의 밀림과 진동 등의 현상으로 인해 정확한 위치제어를 하는 데에 어려움이 발생한다. 따라서 본 연구에서는 벨트에 의해 발생되는 외란토크 성분을 추정하여 이를 q 축 전류에 보상하여 오차를 제거하는 방법을 제안하였다.

* 강원대학교 전기전자공학부 교수, 공학박사, 교신저자

** 강원대학교 전기전자공학부, 박사과정

개발된 구동 시스템은 실제 재봉틀에 장착하여 그 효율성을 검증하였다.

2. SPMSM의 모델링 및 벡터 제어[3]

2.1 SPMSM의 모델링

회전자 좌표계로 표현된 SPMSM의 전압 방정식은 다음과 같다.

$$v_{ds}^r = R_s i_{ds}^r + \frac{d\lambda_{ds}^r}{dt} - \omega_r \lambda_{qs}^r \quad (1)$$

$$v_{qs}^r = R_s i_{qs}^r + \frac{d\lambda_{qs}^r}{dt} + \omega_r \lambda_{ds}^r \quad (2)$$

또한 발생 토크는 식 (3)과 같다.

$$T_e = \frac{P}{2} \frac{3}{2} \phi_f i_{qs}^r \quad (3)$$

회전자의 쇄교 자속 ϕ_f 는 영구자석으로부터 공급되어 일정하므로, 고정자 전류의 토크 전류 성분인 q축 전류를 제어함으로써 전동기의 순시 토크를 직접 제어할 수 있다.

전동기가 부하를 구동할 때의 기계적인 운동방정식은 식 (4)와 같다.

$$T_e = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m + T_L \quad (4)$$

2.2 SPMSM의 벡터제어

벡터제어 기법은 교류전동기의 고정자 전류를 공간상에서 90°의 위상차를 가진 자속 성분 전류와 토크 성분 전류로 분리시켜 각각 독립적으로 제어함으로써, 효과적으로 전동기의 순시 토크를 제어하는 기법이다. 자속 성분 전류와 토크 성분

전류가 공간상에서 90°를 유지하기 위해서는 3상 고정자 전류를 d-q축 좌표계의 2개 전류로 분리하고, d축을 자속이 발생하는 회전자(영구자석)의 위치에 맞추고 이를 회전자의 속도와 동일한 속도로 회전시켜 주어야 한다. 이를 위해 레졸버나 절대형 엔코더 같은 위치 센서로 회전자의 위치 정보를 얻을 필요가 있다.

SPMSM에서는 자속 발생을 위한 d축의 자속 성분 전류가 필요하지 않으며, 식 (3)에서 알 수 있듯이 자속 성분 전류는 토크 발생에 아무런 기여를 하지 않기 때문에 고정자 전류를 최대한으로 이용하기 위해서는 모든 고정자 전류를 토크 성분 전류인 q축 전류가 되도록 한다. 그림 1에 보이듯이 모든 고정자 전류를 토크 성분 전류인 q축 전류가 되도록 하고, d축 전류는 0으로 제어한다.

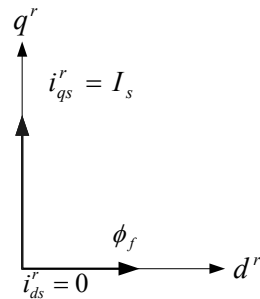


그림 1 벡터 제어시의 전류

3. 재봉틀 구동 시스템

개발한 전체 시스템의 구성은 그림 2와 같다. 정지위치에 따른 가속도 패턴에 의해서 속도 지령치를 만들고 관측기를 통해 추정된 속도와 비교하

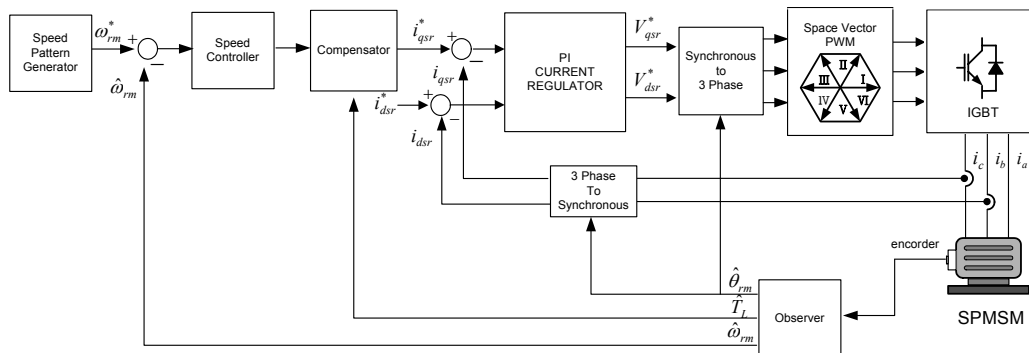


그림 2 제어 시스템 블록도

여 전류 지령치를 생성한다. 이 전류 지령에 추정된 외란 토크를 가지고 속도 오차를 보상하는 성분이 더해진다. 전류제어기로는 동기좌표계 비례적분(PI) 전류 제어기를 사용하였고, 전압변조기법은 공간 전압 벡터 PWM 기법을 사용하였다.

3.1 회전자 초기 위치 추정

연구자석 동기 전동기를 기동시키기 위해서는 회전자의 초기 위치의 정보가 필수적이다. 초기 위치를 잘못 추정할 경우 회전자는 역방향으로 회전하거나 기동에 실패할 가능성이 있다. 회전자의 절대적인 위치 정보를 얻기 위해서는 회전자에 레졸버나 절대형 엔코더와 같은 위치 센서를 부착하여야 한다. 그러나 이러한 위치 센서들을 사용하게 되면 전체 시스템의 가격이 상승하게 된다. 재봉틀 구동 시스템과 같은 저가의 시스템에서는 증분형 엔코더만을 사용하므로 부가적으로 초기 위치를 추정하는 방법이 필요하다. 본 논문에서는 고정자 인덕턴스의 변화를 이용한 초기 위치 추정 방법을 사용하였다[4]. 이 방법은 전압 펄스에 대하여 반응하는 전류의 변화율을 이용하여 회전자의 초기 위치를 추정하기 때문에, 전동기의 전기적, 기계적 상수에 영향을 받지 않으며, 부가적인 주입 신호가 없으므로 구현이 간단하다.

3.2 위치 제어

공업용 재봉틀에서는 정지시 침의 정확한 위치 제어가 필요하다.

통상 재봉틀에는 침상(針上)과 침하(針下)의 침의 위치검출을 위한 펄스를 발생하는 ‘싱크로’ 장치가 있다. 이 펄스는 1회전당 1펄스가 발생하므로 전동기에 연결된 증분형 엔코더로 원하는 위치에 침을 정지시키기가 어렵다.

그러나 통상 전동기의 축과 재봉틀은 고무벨트로 연결되어 있는데, 이 벨트의 밀립과 진동으로 인하여 침상신호에서 다음 침상신호까지의 엔코더 펄스 수는 항상 수 %의 오차가 존재하여 정확한 위치에 침을 정지시키기가 어렵다.

따라서 위치제어기로 비례 제어기나 슬라이딩 모드제어기 등을 사용할 경우 속도지령치가 불연속으로 변화하고, 가속도가 불연속이 되어 위치제어에 큰 오차를 발생하게 된다.

본 연구에서는 가속도가 연속적으로 변화도록 가속도 패턴을 계산하고 이에 따라 속도지령을 발생하여, 침상 또는 침하신호가 발생하기 직전에 가속도, 속도, 위치오차가 동시에 0이 되도록 제어한다. 본 논문에서 사용된 침의 정지를 위한 가속도 패턴은 그림 3과 같다. 정밀한 위치제어를 위해서는 가속도가 연속적일 것이 요구된다. 가속도가 급격히 변화하면 실제속도가 지령속도를 추종하기 위해 지연이 발생하여 위치의 오차가 발생하게 된다.

따라서 가속도 패턴을 사다리꼴로 만들고, 그에 따른 속도 지령 패턴을 만들어 제어한다.

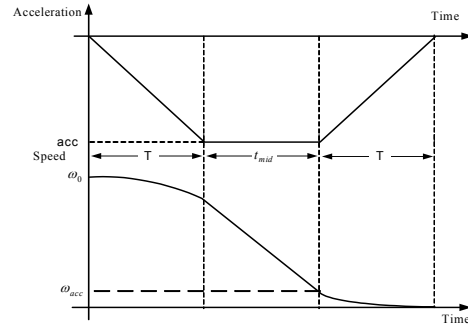


그림 3 가속도와 속도 패턴

3.3 속도 추정

정밀한 속도제어를 위해서는 높은 정밀도의 엔코더를 필요로 하지만 재봉틀 구동 시스템과 같은 저가의 시스템에서는 낮은 정밀도의 엔코더를 사용한다. 본 연구에서는 360[PPR]의 엔코더의 속도 정보를 가지고 전차원 관측기를 이용하여 속도와 회전자의 위치를 보다 정확하게 추정하였다.

기계 시스템의 운동 방정식을 이용한 전차원 관측기의 구성이 식 (5)와 같다[5].

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_{rm} \\ \dot{\omega}_{rm} \\ \dot{T}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B}{J} & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{rm} \\ \omega_{rm} \\ T_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J} \\ 0 \end{bmatrix} T_s + \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{bmatrix} [\theta_{rm} - \hat{\theta}_{rm}] \quad (5)$$

상태변수는 위상각 θ_{rm} , 속도 ω_{rm} , 부하토크 T_L 이고, 각 상태는 엔코더로 부터 측정된 위상각 $\hat{\theta}_{rm}$ 과 시스템 모델을 통하여 추정된 위상각 $\hat{\theta}_{rm}$ 사이에 오차를 제어기를 통하여 줄여 나가는 제어 시스템으로 이해될 수 있다. 이를 연속 시간 영역에서 블록도로 나타내면 그림 4와 같다.

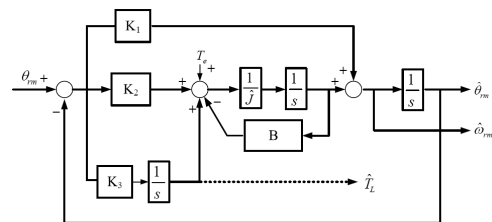


그림 4 전차원 관측기

3.4 외란 토크 보상

재봉틀과 같이 벨트를 사용하는 시스템에서는 벨트의 밀림과 진동으로 저속에서 많은 속도 오차를 유발시키게 된다. 본 논문에서는 벨트에 의한 외란 토크 \hat{T}_L 를 추정하여 실제 토크와 외란토크의 오차를 q축 전류 지령에 보상하여 속도의 오차 성분을 제거하였다.

4. 시뮬레이션

제안한 방법의 효용성을 고찰하기 위하여 Matlab/ Simulink를 이용하여 재봉틀 구동시스템에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에서 사용한 SPMSM 전동기의 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 550W SPMSM 파라미터

출력	550 [W]
극수	4
정격 속도	3000[rpm]
정격 토크	1.7 [Nm]
정격 전류	3.5 [A]
고정자 저항	1.65 [Ω]
고정자 인덕턴스	4.43 [mH]
역기전력 상수	0.31[V/(rad/sec)]
관성 모멘트	0.000208 [Kg m^2]

그림 5는 가속도 패턴에 의해 발생한 속도지령과 실제속도를 나타내고 있다. 칩의 정확한 위치 제어를 위해서 사다리꼴의 가속도 패턴을 만들고, 이에 따라 속도지령을 발생하여, 침상/침하신호가 발생하기 직전에 가속도, 속도, 위치오차가 동시에 0이 되도록 제어 되는 것을 확인할 수 있다.

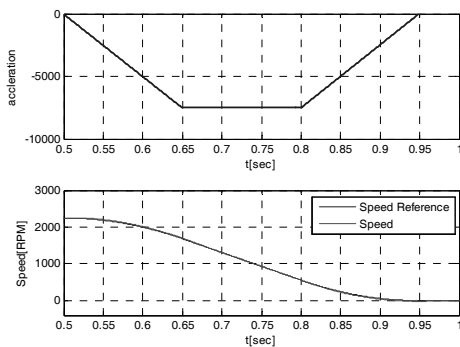


그림 5 시뮬레이션 결과

5. 실험

5.1 실험 장치 구성

본 논문에서 제안한 구동 기법을 실제 SPMSM을 이용한 재봉틀에 적용하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 재봉틀 시스템은 그림 6과 같다.

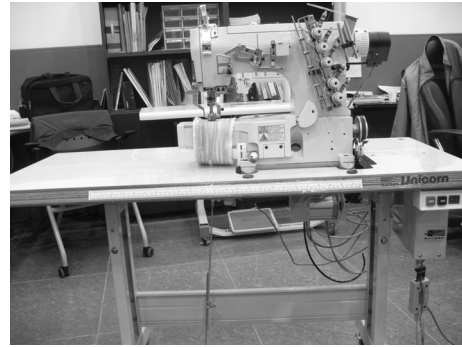


그림 6 재봉틀 구동 시스템

제어기는 ST사의 ARM7 계열의 32bit MCU (STR755FV2)를 사용하였고, 스위칭 소자로는 Fairchild사의 600[V], 20[A]의 IGBT (FSBB20CH60C)를 사용하였다. 스위칭 주파수는 10[kHz]이고, 재봉틀 구동시스템에 사용된 SPMSM의 사양은 시뮬레이션에서와 동일하다.

5.2 실험 결과

그림 7은 속도 지령에 대한 실제 속도와 q축 전류 파형을 나타내고 있다. 속도 지령은 재봉틀의 패달로 부터 인가되고, 칩의 정확한 위치 제어는 그림 3과 같은 속도와 가속도 패턴을 이용하여 수행하였다.

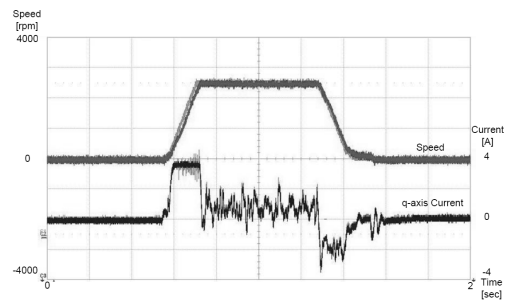


그림 7 속도와 q축 전류

재봉틀 구동시 벨트의 진동과 밀림 등이 외란 토크로 작용하여 속도에 맥동이 발생하게 된다. 그림 8은 100[rpm]으로 전동기를 구동할 때 속도와 q축 전류, 그리고 속도의 FFT 분석을 나타내고 있

다. 100[rpm]으로 회전할 때 동기 주파수는 3.33 [Hz]이고, 속도를 FFT 분석한 결과 벨트에 의하여 기본과 이하의 낮은 주파수의 성분들이 많이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 성분들은 위치 제어에 큰 오차를 유발하고 소음을 발생시키는 원인이 된다.

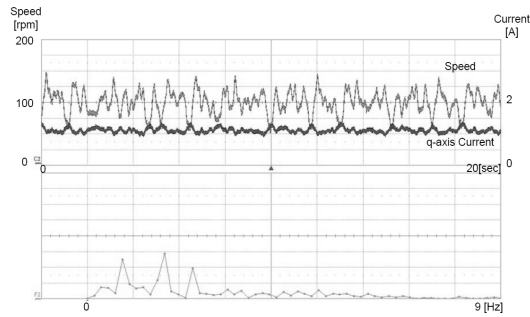


그림 8 속도와 q축 전류, 속도 FFT 분석

그림 9는 관측기를 이용하여 외란 토크를 추정하고 외란 토크 성분을 q축 전류에 보상하였을 때의 속도와 q축 전류 그리고 속도의 FFT 분석 결과를 나타내고 있다. 벨트의 진동과 밀림으로 인한 고조파 성분들이 많이 제거되어 속도 맥동이 크게 감소함을 알 수 있다.

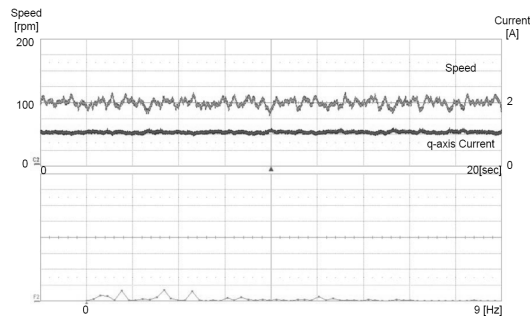


그림 9 속도와 q축 전류, 속도 FFT 분석

6. 결론

본 논문에서는 SPMSM을 사용한 저가의 고성능 재봉틀 구동시스템을 개발하였다. 속도 관측기를 이용하여 속도를 추정하였고, 벨트에 의한 외란 토크를 추정하여 보상하였다.

개발된 구동시스템을 실제 재봉틀에 장착한 실험을 통해 기존의 BLDCM을 사용하는 시스템보다 저소음의 고성능의 제어가 가능한 것을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] 강석주, 김준석, 설승기, 김덕근, “저가형 BLDCM 구동장치를 이용한 정밀위치제어”, *전기학회논문지*, 제44권, 제4호, pp. 447~452, 1995. 4.
- [2] Xiao, Xi; Zhang, Meng; Li, Min; Li, Yongdong, “An improved servo control system for high speed flat industrial sewing machine,” *Technology and innovation Conference*, pp. 1898~1901, 2006.
- [3] 김상훈, *DC, AC, BLDC 모터 제어*, 북두출판사, 2010.
- [4] 이윤규, “인덕턴스의 포화현상을 이용한 IPMSM의 회전자 초기 위치 추정,” *강원대 공학 석사학위논문*, 2010.
- [5] Robert D. Lorenz, “High resolution velocity estimation for all digital AC servo drives,” *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, Vol. 27, No. 4, July/Aug., pp. 701~705, 1991.