2002년도 대한전자공학회/대한전기학회 시스템 및 제어분야 합동 추계학술대회 논문집(2002.11.30)

PMSM으로 구성된 모터-기구부 시스템의 전달함수 추정에 관한 연구

박 승 규, 최 용 권, *박 두 환, 안 호 균
창원대학교 전기공학과
전화 : 055-279-7514 / 핸드폰 : 011-9302-7514

A study on Transfer Function Identification of Motor-Mechanical System with PMSM

Seung Kyu Park, Young Kwon Choi, Doo Hwan Park, Ho Kyun Ahn
E-mail : skypark@sarim.changwon.ac.kr

Abstract

In this paper, a simulation system, which is almost same with the real motor-mechanical control system, is established. The real system is identified by using the data from DSP(TMS320F240). The RLS(Recursive Least Square) algorithm is used for the identification and MATLAB Simulink program is used for simulation. The exact simulation system obtained by using the proposed method is very useful for analysis and design of motor-mechanical control systems.

I. 서론

본 논문에서는 공장자동화, 로봇 시스템에 많이 활용되고 있는 PMSM으로 구성된 모터-기구부 시스템의 실제 전달함수 추정에 관한 연구로 PMSM과 기구부를 모델링한 동특성 방정식과 전류제어, 속도제어, 위치제어 그리고 RLS(Recursive Least Square)를 사용하여 MATLAB과 SIMULINK로 프로그램화하고, 시뮬레이션 하여 실제 시스템의 전달함수를 추정하고, 그 유용성을 확인하였다. 본 논문에서는 모터와 기구부의 파라메터 추정에 있어서 모터와 기구부를 분리하여 RLS를 적용시키고 파라메터 추정에 필요한 데이터를 실제시스템으로부터 확보되는 데이터로부터 계산하여 추정에 사용하였다는 점에서 그 의의를 찾을 수 있다고 본다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 주요시스템의 구성과 제어기에 대해 설명하고, 제3장에서는 추정 알고리즘을 이용하여 전달함수를 추정하고, 제어시뮬레이션에 대해서 설명하고, 제4장에서는 시뮬레이션 결과에 대해서 설명한다. 끝으로 5장에서는 본 논문의 결론에 대해 서술한다.

II 전체 시스템 개요

본 연구에서의 모터 기구부는 다음 블록도와 같은 X-Y이동축과 회전축으로 구성되어 있는 3축 이송시스템에서 단축만 고려해 본 것이다. 제어기 하드웨어는 DSP로 구성되어 있으며 데이터는 속도데이타와 전류데이타만 확보될 수 있도록 시스템이 구축되어 있다.

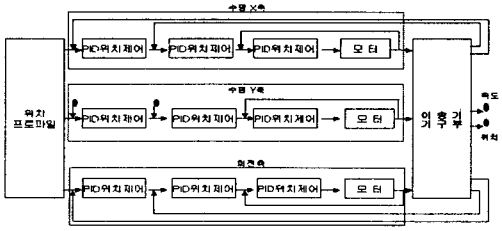

그림 1 이송기 전체 제어시스템의 블록 선도

위의 시스템에서 DSP에 탑재되어 있는 전류, 속도, 위치제어기 들은 모두 다음과 같은 PI제어기로 구성이 되어 있다.

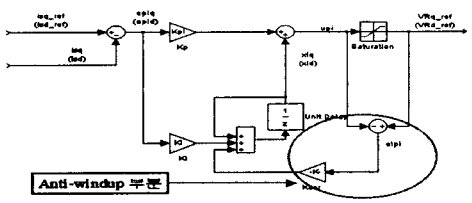

그림 2 PI 제어기의 블록 다이어그램

위의 PI제어기는 파라메터 추정에 사용되는 전압데이타를 확보하기 위해서 DSP에서 사용되는 제어기와 정확하게 일치하도록 시뮬링크로 구성될 것이다.

Ⅲ. 추정 알고리즘 및 제어 시뮬레이션

이 장에서는 전달함수를 추정하기 위한 기초작업과 추정 알고리즘인 RLS에 대해서 설명하고 주어진 실험데이타를 근거로 전달함수를 추정하기 위한 데이터 확보 프로그램 추정된 전달함수의 타당성을 확인하는 Matlab/Simulink프로그램과 추정된 시스템을 이용한 전체 제어시스템 시뮬레이션에 대해서 설명한다.

3.1 파라메터 추정대상과 추정알고리즘

본 논문에서 추정하고자 하는 시스템의 구성은 다음과 같다.

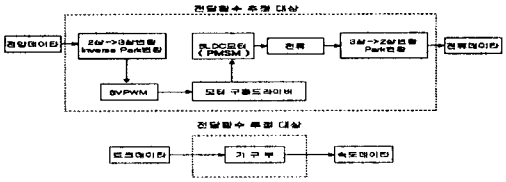

그림 3 추정 대상 시스템

위 그림에서 추정해야 할 것은 전압-전류간의 전달함수, 전류(토크)-속도간의 전달함수이다. 모터에 대한 전류와 속도에 관한 상태방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d\,i_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_q} i_q - \omega\, i_d - \frac{K_e}{L_q}\omega + \frac{1}{L_q} V_q \quad (3.1)$$

$$\frac{d\,i_d}{dt} = \omega\, i_q - \frac{R_s}{L_q} i_d + \frac{1}{L_q} V_q \quad (3.2)$$

$$\dot{\omega}_m = \frac{K_t}{J_m} i_q - \frac{B_m}{J_m}\omega_m \quad (3.3)$$

여기서 ω_m 모터 속도이다.

정리하면 다음과 같다.

$$\dot{\omega}_m = \theta_1 i_q - \theta_2 \omega_m \quad (3.4)$$

여기서 $\theta_1 = \frac{K_t}{J_m}$, $\theta_2 = \frac{B_m}{J_m}$

위 식에서 전압-전류간의 전달함수는 d축 전류가 0으로 제어가 된다는 가정하에서 직류모터 모델과 같은 형태의 2차 전달함수로 추정되며 전류-속도간 전달함수는 1차 전달함수로 추정이 된다.

모터-기구부가 연결된 형태의 속도방정식은 다음과 같다.

$$\dot{\omega} = \frac{K_t}{(J_m+J_{me})} i_q - \frac{(B_m+B_{me})}{(J_m+J_{me})}\omega - \frac{1}{J_{me}} T_L \quad (3.5)$$

위 식 3.5에서 $\frac{K_t}{(J_m+J_{me})} = \theta_a$, $\frac{(B_m+B_{me})}{(J_m+J_{me})} = \theta_b$, $\frac{1}{J_{me}} = \theta_c$로 하면 식 3.6과 같다.

$$\dot{\omega} = \theta_a i_q + \theta_b \omega + \theta_c T_L \quad (3.6)$$

모터자체만의 전압-전류 전달함수와 전류-속도 전달함수를 추정함으로써 모터의 파라메터를 구할 수 있으며 모터-기구부의 전류-속도 전달함수를 추정함으로써 다음과 같은 관계식에 의해 기구부의 파라메터를 구할 수 있다.

$$J_{me} = \frac{(\theta_a-\theta_1)}{K_t} \;,\; B_{me} = \theta_b(J_m+J_{me}) - \theta_2 J_m$$

실제시스템의 제어에 있어서 디지털제어를 실행하고 있으며 실험 데이터가 이산치 데이터이기 때문에 이산치 전달함수를 구해야하므로 위의 연속치 계통을 다음과 같이 이산치 형태로 표현해야만 한다.

$$\omega_m(k+1) = \theta_{d1}\, i_q(k) - \theta_{d2}\, \omega_m(k) \quad (3.7)$$

$$\omega(k+1) = \theta_{da}\, i_q(k) - \theta_{db}\, \omega(k) + \theta_{dc}\, T_L \quad (3.8)$$

위의 전달함수 표현에서 실제 계통과 같은 입력을 인가했을 때 동일한 출력을 얻을 수 있도록 파라메터를 결정해 주어야 하며 본 논문에서의 파라메터 추정은 RLS 알고리즘을 사용한다. 위의 식들을 RLS알고리즘을 사용할 수 있도록 다음과 같이 표현한다.

$$\omega(k+1) = \theta_{da}\, i_q(k) - \theta_{db}\, \omega(k) + \theta_{dc}\, T_L = \theta\,\varphi \quad (3.9)$$

위에서 파라메터 벡터 θ는 미지의 값이고 회귀벡터 φ는 실험계통으로부터 확보할 수 있는 데이터이다. 본 연구에서는 파라메터를 추정하는데 있어서 가장 일반적으로 사용되는 알고리즘인 RLS 알고리즘을 사용한다.

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + K(t)(y(t) - \varphi^T(t)\hat{\theta}(t-1)) \quad (3.10)$$

$$K(t) = P(t)\,\varphi(t) = P(t-1)\varphi(t)(I+\varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t))^{-1} \quad (3.11)$$

$$P(t) = P(t-1) - P(t-1)\varphi(t)(I+\varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t))^{-1}\varphi^T(t)P(t-1) = (I-K(t)\varphi^T(t))P(t-1) \quad (3.12)$$

여기서, $K(t) = P(t)\varphi(t)$, $\varepsilon(t) = y(t) - \varphi^T(t)\hat{\theta}(t-1)$

3.2 모터-기구부 입출력 데이터 확보

3.1절에서 설명된 RLS를 이용하여 모터-기구부의 전달함수 파라메터를 추정하기 위해서는 입출력 데이터의 확보가 필요하다. 즉 전압데이터와 전류 및 속도데이터가 필요하다. 실험과정에서 확보된 데이터는 전류와 속도데이터이이고 실제 실험에서 전압데이터는 제어기에 의해서

계산되어진 값이기 때문에 다음과 같은 프로그램에 의해서 전압데이터를 계산하였다.

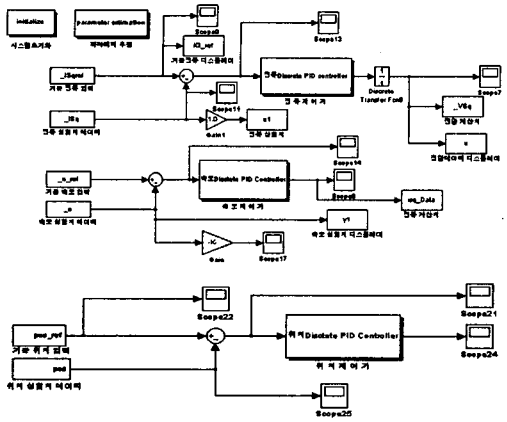

그림 4 모터 및 기구부 입출력데이터 확보 Simulink 프로그램

위의 프로그램에서 세 개의 입력 블록은 다음의 m-파일에 저장된 실험데이터를 불러올 수 있도록 한 것이고 한 개는 파라메터 추정 확인프로그램을 불러오기 위한 것이다. 입력 데이터인 전압 데이터를 확보하는데 있어서 DSP에서 실행된 전류 PID제어기의 샘플링시간은 62.5 μ sec이었으나 확보된 데이터는 1msec이었기 때문에 시뮬링크상에서 다시 62.5 μsec샘플링시간 데이터로 변환하여 실행하였다.

3.3 추정된 전달함수 모델을 이용한 제어 시뮬레이션

3.2절에서 추정된 전달함수가 실제계통과 일치여부를 확인한 후 추정된 전달함수를 사용하여 제어시스템을 구현하면 실제 시스템과 일치하는 아래와 같은 제어시스템 시뮬레이션을 구성할 수 있다. 제어기는 실제시스템에서도 정도의 차이는 있겠지만 계산이기 때문에 시뮬레이션과 일치하며 모터와 기구부 전달함수만 실제계통과 일치하면 전체 제어계통이 실제시스템과 일치하게 되는 것이다.

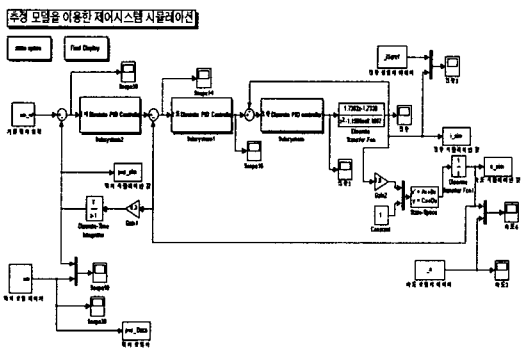

그림 5 추정 모델을 이용한 제어시스템 시뮬레이션

Ⅳ 시뮬레이션 결과

이송시스템은 수평Y축, 회전축, 수평X축의 동작이 연관되어 있으므로 각각 단축 구동에 대한 실험 데이터를 이용하여 시뮬레이션 하였다. 본 논문에서는 수평X축 구동에 대한 실험 데이터를 이용하여 시뮬레이션 실행 결과에 대해서 설명한다. 시뮬레이션에 사용한 모터 파라미터는 다음표와 같다.

표 모터 파라미터

PERFORMANCE		ELECTRICAL	
Nominal Speed	8800 rpm	Resistance(선간)	15.2 Ohm
Nominal Power	0.45 kw	Inductance(선간)	18.8 mH
Max Speed	10500 rpm	MECHANICAL	
Torque Constant	0.40 Nm/Arms	Inertia	0.16 kg-cm^2
Back EMF Constant	0.33 Vpk/rad/s		

실제 이송시스템에서 측정된 전류는 다음과 같다.

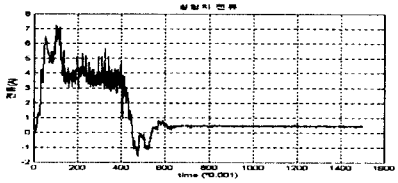

그림 6 실험치 전류

모터추정이 정확하게 되었는지를 확인하기 위하여 실제 모터에 인가된 것과 같은 전압입력을 추정된 모터에 인가하였을 때의 전류를 전류 추정치라고 하자. 아래그림은 전류 추정치를 나타내고 있다.

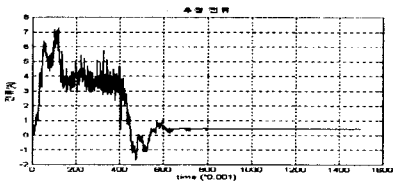

그림 7 추정 전류

위의 결과를 보면 전류 추정치는 실제 전류와 거의 일치함으로써 추정된 모터의 전달함수가 실제 계통과 거의 일치함을 알 수 있다. 추정된 모터 전달함수와 속도 실험치는 다음과 같다.

$$\text{모터 전달함수} = \frac{3.6962z - 3.6664}{z^2 - 0.7340z - 0.2141} \qquad (4.1)$$

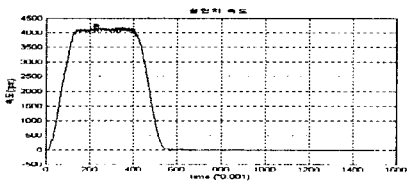

그림 8 실험치 속도

추정된 기구부의 정확성을 확인하기 위하여 추정된 기구부

의 입력을 실험치와 같게 하였을 때의 속도는 다음과 같다.

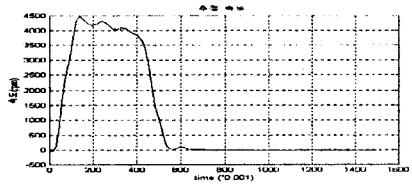

그림 9 추정 속도

위 그림에서 속도 실험치와 속도 추정치는 정속도 부분에서 정확하게 일치하지 않음을 볼 수 있다. 이것은 전압과 속도관계가 노이즈의 입출력에 대해서는 전달함수로 표현하기 어려운 요소가 존재한다는 것을 나타낸다. 그러나 이 추정모델을 사용한 시뮬레이션의 유용성 여부는 다음에 설명이 되어있다. 실제 시스템과 다른 부분은 모터부분 기구부와 기구장치부라고 보아도 무방한 상황에서 시뮬레이션이 이루어졌다. 추정된 모터-기구부 모델을 사용하여 전체 제어시스템을 시뮬레이션 했을 때의 전류 값은 다음과 같다.

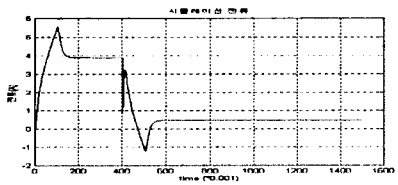

그림 10 시뮬레이션 전류

시뮬레이션 전류 값을 보면 노이즈의 영향이 배제되어 있음을 알 수 있으며 실험 전류치와 매우 근사함을 알 수 있다. 시뮬레이션 전류치는 기준위치 입력을 전체 기준 입력으로한 계통에서 위치제어성능을 만족하기 위한 제어입력 값이다. 제어성능이 실험치와 같은 정도로 보장될 때 시뮬레이션 전류가 실험치와 어느 정도 근사한 값이냐의 여부가 시뮬레이션의 유용성을 판가름하게 된다. 위 그림에서의 시뮬레이션 전류치와 실험 전류치는 초기 과도부분과 0.4초 부분에서 일치하지 않는 부분이 있으나 실험에서 입력전류를 살펴보면서 제어 파라메터를 결정하는 과정 등에서 본다면 실험을 대신할 수 있는 정도라고 판단할 수 있다. 아래 그림은 제어시스템 시뮬레이션에 있어서 속도 시뮬레이션 값을 보여주고 있으며 실험치와 매우 일치함을 보여주고 있다.

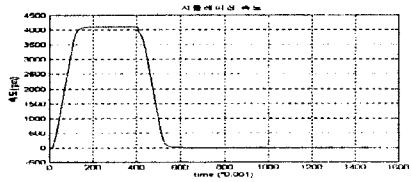

그림 11 시뮬레이션 속도

본 논문에서는 두 개의 모델을 추정한다. 전압과 전류간의 전달함수와 기구부 속도방정식이다. 아래 그림은 위치에 대한 실험치와 시뮬레이션 값을 나타내고 있다. 실험치와 시뮬레이션 결과는 정확하게 일치하고 있음을 알 수 있다. 이상으로 살펴볼 때 추정된 계통을 이용하여 구성한 시뮬레이션 시스템이 제어시스템 설계에 유용하게 사용될 수 있을 정도로 실제시스템과 일치하고 있음을 알 수 있다.

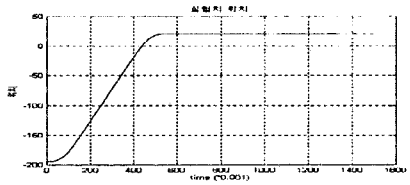

그림 12 실험치 위치

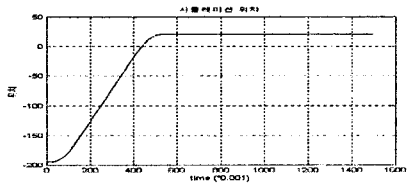

그림 13 시뮬레이션 위치

V. 결론

본 논문에서는 RLS 알고리즘을 적용하여 다축 이송시스템에 대한 모터-기구부 모델을 추정하고 그 모델을 이용하여 시뮬레이션을 실행하였다. 전체적으로 볼 때 시뮬레이션 시스템이 모터-기구부 실험계통과 상당히 일치하는 결과를 얻음으로써 그 유용성을 확인하였고, 실험에서 확보할 수 있는 데이터가 한정되어 있는 경우 파라메터 추정에 필요한 데이터를 확보하여 파라메터를 추정한다는 면에서 그 유용성이 더 커진다고 생각할 수 있다.

본 연구는 한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술연구센터의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌(또는 Reference)

[1]. K.J.Astrom et al ., "Implementation of a PID Controller on a DSP"

[2]. K. J.Astrom et al .,"Adaptive Control", Adison-Wesley, 1989

[3]. Chee-Mun Ong, "Dynamic simulation of electric machinery Matlab/Simulink",Prentice-Hall,1998

[4]. Implementation of Speed Field Oriented Control of 3-Phase PMSM Motor Using 'F240, Texas Instrument, 1999

[5]. D.Y.Ohm, "A PDFF Controller for Tracking and Regulation in Moton Control", Proceeding of 18th PCIM Conference, Intelligent Motion, Philadelphia, pp.26-36, Oct 21-26, 1990