

선형 영구자석 동기전동기의 최소자승법을 적용한 질량 추정

李 鎭 雨[†]Mass Estimation of a Permanent Magnet Linear Synchronous Motor
by the Least-Squares Algorithm

Jin-Woo Lee

요 약

선형 서보 응용분야에서 속도제어기를 정밀하게 조정하기 위해서는 부하 및 가동자의 질량을 항상 정확하게 알고 있어야 한다. 본 논문에서는 선형 영구자석 동기전동기의 가동부 질량을 추정하기 위하여 상수추정 알고리즘으로 최소자승법을 적용한 질량 추정방법을 제안하였다. 먼저 최소자승법을 적용하기 위한 기계적인 동적 시스템에 대한 DARMA(deterministic autoregressive moving average)모델을 유도하고, 유도된 DARMA모델에 최소자승법을 적용한 시뮬레이션 및 실험 결과를 제시하여 제안한 방법으로 질량을 정밀하게 추정할 수 있음을 보였다.

ABSTRACT

In order to tune the speed controller in the linear servo applications an accurate information of a mover mass including a load mass is always required. This paper suggests the mass estimation method of a permanent magnet linear synchronous motor(PMLSM) by using the parameter estimation method of Least-Squares algorithm. First, the deterministic autoregressive moving average(DARMA) model of the mechanical dynamic system is derived. Then the application of the Least-Squares algorithm shows that the mass can be accurately estimated both in the simulation results and in the experimental results.

Key Words : parameter estimation, mass estimation, least-squares algorithm, permanent magnet, linear motor

1. 서 론

반도체 및 FPD(Flat Panel Display) 제조장비 등과 같은 서보 응용분야에 사용되는 선형 영구자석 동기전동기의 고정도 제어를 위해서는 속도제어기를 정밀하게 조정하는 것이 요구되며, 이를 위해서는 가동부의 질량을 정확하게 아는 것이 필요하다.

상수 추정방법으로 널리 적용되고 있는 최소자승법은 수렴특성이 우수하고 잡음에 강인한 특성을 갖고 있으며^[1], 이를 적용한 유도전동기^[2,3]와 직류전동기^[4]에

대한 연구 및 칼만 필터를 활용한 유도전동기^[5]에 대한 연구는 추정 관성을 이용한 속도제어 성능개선을 보이고 있으나, 추정 정밀도에 대한 자세한 결과는 제시하고 있지 않다.

본 논문에서는 선형 영구자석 동기전동기의 가동부 질량을 추정하기 위하여 최소자승법을 채택하고, 최소자승법을 적용하기 위한 기계적인 동적 시스템에 대한 DARMA(deterministic autoregressive moving average)모델을 제시하며, 유도된 DARMA모델에 최소자승법을 적용한 시뮬레이션 및 실험을 통하여 적절한 추정성능을 얻기 위한 방법에 대한 고찰과 결과를 제시하여 정밀한 질량 추정을 위한 최소자승법의 적용가능성을 보이고자 한다.

[†]교신저자 : 정회원, 두원공과대 메카트로닉스과 부교수

E-mail : jinwoo@doowon.ac.kr

접수일자 : 2005. 9. 14

1차 심사 : 2006. 2. 7

심사완료 : 2006. 2. 24

2. PMLSM의 가동부 질량 추정

최소자승법을 적용한 PMLSM의 가동부 질량을 추정하기 위해서는 먼저 기계적 동적 시스템에 대한 DARMA모형을 구하고, 유도된 모델에 최소자승법을 적용하여 가동부 질량을 추정한다.

2.1 기계적 동적 시스템에 대한 DARMA모델

선형 영구자석 동기전동기의 기계적인 동적 시스템은 일반적으로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = m \frac{dv}{dt} + B \cdot v + F_d \quad (1)$$

여기서, F : 전동기의 발생 추력, m : 가동부의 질량, v : 가동부의 속도, B : 마찰계수, F_d : 부하 추력을 포함하는 외란에 해당하는 추력이다.

식 (1)에서 질량과 마찰계수를 구하기 위해서는 전동기의 속도와 전동기의 발생 추력 F 및 추력 F_d 를 모두 알아야 한다. 그러나, 일반적으로 질량 추정을 하는 중에는 추력 F_d 를 영이라고 가정할 수 있으므로 이를 식 (1)에 적용하면 식 (2)를 얻을 수 있다.

$$F = m \frac{dv}{dt} + B \cdot v \quad (2)$$

입력에 ZOH(zero-order-hold)를 가진 식 (2)를 샘플링 주기 T_s 로 샘플링한 시스템은 식 (3)과 같으며,^[6] 식 (3)은 최소자승법의 적용이 가능한 DARMA모델이다.

$$v(k) = -a \cdot v(k-1) + b \cdot F(k-1) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } a &= -\exp(-T_s \cdot B/m) \\ b &= (1 - \exp(-T_s \cdot B/m))/B \end{aligned}$$

2.2 최소자승법에 의한 질량 추정

식 (3)의 DARMA모델에 최소자승법^[1]을 적용하면 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{\theta}(k) &= \hat{\theta}(k-1) + \frac{P(k-2)\phi(k-1)}{1 + \phi(k-1)^T P(k-2)\phi(k-1)} \\ &\cdot [v(k) - \phi(k-1)^T \hat{\theta}(k-1)] \end{aligned} \quad (4)$$

$$P(k-1) = P(k-2)$$

$$- \frac{P(k-2)\phi(k-1)\phi(k-1)^T P(k-2)}{1 + \phi(k-1)^T P(k-2)\phi(k-1)} \quad (5)$$

여기서, $k \geq 1$, 초기치는 각각 $\hat{\theta}(0) = [\hat{a}_0, \hat{b}_0]^T$, $P(-1) = P_0$: 양의 한정 행렬(Positive Definite Matrix), $\phi(0) = [-v(0), F(0)]^T$ 이다.

최소자승법을 적용하여 추정한 상수 $\hat{\theta} = [\hat{a}, \hat{b}]^T$ 를 이용하여 기계적 동적 시스템의 마찰계수와 질량을 식 (3)으로부터 구하면 식 (6)과 같다.

$$\hat{B} = \frac{1 + \hat{a}}{\hat{b}}, \quad \hat{m} = \frac{-T_s \hat{B}}{\log(-\hat{a})} \quad (6)$$

상수 추정에 대한 수렴조건은 실험에서 적용이 용이하도록 식 (4)에서 실제 전동기의 속도와 추정된 속도의 오차 $[v(k) - \phi(k-1)^T \hat{\theta}(k-1)]$ 가 일정범위 내로 수렴하면 추정이 완료된 것으로 설정한다.

3. 가동부 질량 추정 결과 및 검토

제안한 PMLSM의 가동부 질량 추정 방법의 유용성을 검증하기 위하여 사용한 선형 영구자석 동기전동기의 사양은 표 1과 같으며, 전동기에 장착된 Linear Scale의 분해능은 1[μ m/pulse]이다. TI사의 120MHz TMS320VC33 DSP를 사용한 제어장치는 M/T방법을 이용하여 속도를 측정하고, 전향보상과 Anti-Windup 기능을 가진 대역폭 5000[rad/s]의 동기좌표계 PI제어기로 전류를 제어하며, 전류제어기의 샘플링 주기는 50[μ s]이다.

표 1 PMLSM의 사양
Table 1 Specifications of a PMLSM

정격추력	84.5[N]	Rs	3.79[Ω]
정격전류	2[Arms]	Ls	13.45[mH]
극수	8	가동자	3.2[kg]
추력상수	42.25[N/Arms]	극간격	12[mm]

그림 1은 최소자승법을 적용한 상수추정 특성을 시뮬레이션하기 위한 MATLAB/Simulink 블록도이며, 기계적인 동적 시스템은 식 (2)를 기준으로 모델링 하였다. 상수추정기의 입력은 그림 1과 같이 정격추력의 구형과 지령치에 대한 전동기의 발생추력과 전동기의 속도이다.

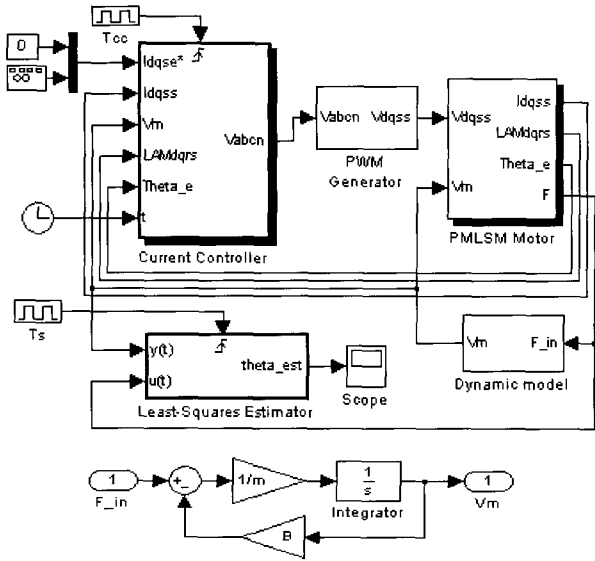


그림 1 최소자승법을 적용한 PMLSM의 질량 추정을 위한 Simulink 블록도
 Fig. 1 Simulink Block Diagram for a mass estimation of a PMLSM by using the Least-Squares algorithm

그림 2는 가동자의 질량 추정에 대한 시뮬레이션 결과로서 가동자의 추정 질량과 전동기의 추력성분 전류와 속도를 나타낸 것이고, 그림 3은 3[kg] 부하질량을 추가한 경우에 대한 것이며, 시뮬레이션에서 추정된 질량은 각각 3.2[kg], 6.2[kg]이므로 가동부 질량을 잘 추종함을 알 수 있다. 여기서, 시뮬레이션에 사용된 마찰계수 (B)는 0.85[N/m/s]이다.

그림 4와 그림 5는 각각 그림 2와 그림 3에 대응하는 실험결과로서 추정된 질량은 각각 3.16[kg], 6.35[kg]이므로 시뮬레이션과 같이 가동부 질량을 잘 추종함을 알 수 있다.

한편, 시뮬레이션에서는 식 (2)를 구현한 기계적인 동적 시스템의 입력추력과 전동기의 속도를 직접 이용하여 상수추정을 하기 때문에 속도나 추력의 크기에 관계없이 우수한 상수 추정결과를 얻을 수 있다. 그러나 실험에서는 식 (2)에 포함되지 않는 비선형적인 마찰 등에 의한 추력 F_d 가 존재하고, 전류추정 관련 오차 및 추력상수 오차에 의한 입력추력 오차가 존재하며, M/T방법에 의한 속도 측정오차 등이 존재하기 때문에 상수추정 정밀도가 떨어진다. 따라서 본 논문에서는 이러한 오차의 영향을 최소화하기 위하여 추력 지령치로 정격추력의 크기를 갖는 구형파를 사용하고, 속도추정의 오차를 최소화하기 위하여 속도범위를 \pm 정격속도로 설정하여 실험을 진행하였다.

표 2는 무부하 상태(0[kg]) 및 각각 1[kg], 2[kg], 5[kg]의 부하질량을 조합하여 가동자에 장착한 상태에서 5회 측정된 가동부 질량 추정 실험결과를 나타낸 것이며, 각각의 부하질량에 대한 추정 부하질량(\hat{m}_L)은 평균치를 기준으로 최대오차가 4[%]로 매우 우수한 추정 성능을 보여 주고 있다. 따라서 제안한 최소자승법을 적용한 상수 추정방법으로 선형 영구자석 동기전동기의 가동부 질량을 매우 정밀하게 추정할 수 있음을 알 수 있다.

표 2 PMLSM의 가동부 질량추정 실험 결과
 Table 2 Experimental results on the mass estimation of a PMLSM with different loads

부하	0[kg]	1[kg]	3[kg]	5[kg]	6[kg]	8[kg]
1회	3.29	4.29	6.37	8.41	9.43	11.60
2회	3.29	4.31	6.37	8.45	9.45	11.62
3회	3.30	4.31	6.35	8.37	9.47	11.62
4회	3.30	4.31	6.36	8.40	9.47	11.65
5회	3.31	4.31	6.38	8.44	9.47	11.63
평균	3.30	4.31	6.36	8.41	9.46	11.62
\hat{m}_L	-	1.01	3.06	5.11	6.16	8.32

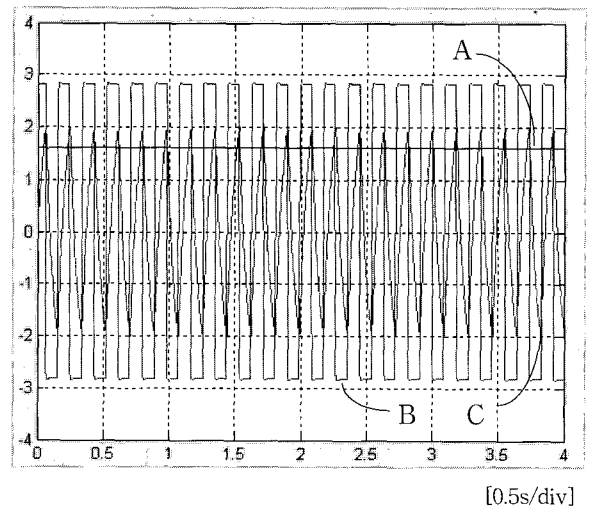


그림 2 무부하시 질량 추정 시뮬레이션 결과 (파형 A: 추정질량[2kg/div], 파형 B: 추력성분 전류 [1A/div], 파형 C: 속도[0.5m/s/div])
 Fig. 2 Simulation results of mass estimation at no-load (trace A: estimated mass[2kg/div], trace B: Force current component [1A/div], trace C: velocity[0.5m/s/div])

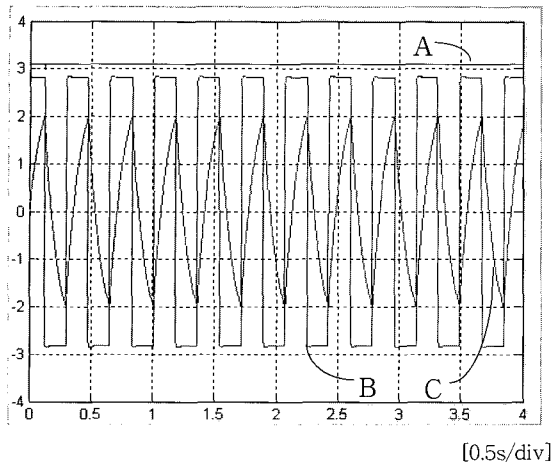


그림 3 부하시 질량 추정 시뮬레이션 결과 (파형 A: 추정질량[2kg/div], 파형 B: 추력성분 전류 [1A/div], 파형 C: 속도[0.5m/s/div])
 Fig. 3 Simulation results of mass estimation at load (trace A: estimated mass[2kg/div], trace B: Force current component [1A/div], trace C: velocity[0.5m/s/div])

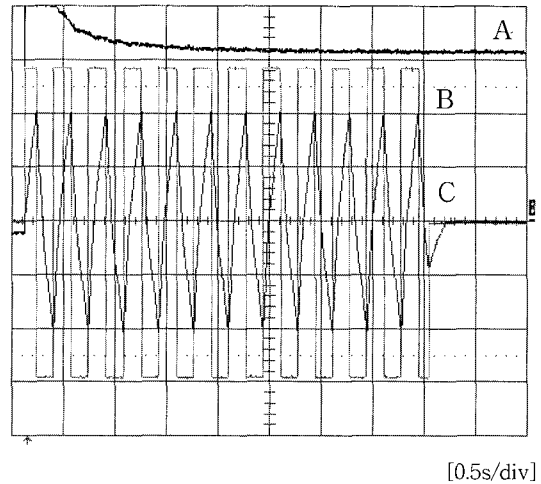


그림 5 부하시 질량 추정 실험 결과 (파형 A: 추정질량[2kg/div], 파형 B: 추력성분 전류 [1A/div], 파형 C: 속도[0.5m/s/div])
 Fig. 5 Experimental results of mass estimation at load (trace A: estimated mass[2kg/div], trace B: Force current component [1A/div], trace C: velocity[0.5m/s/div])

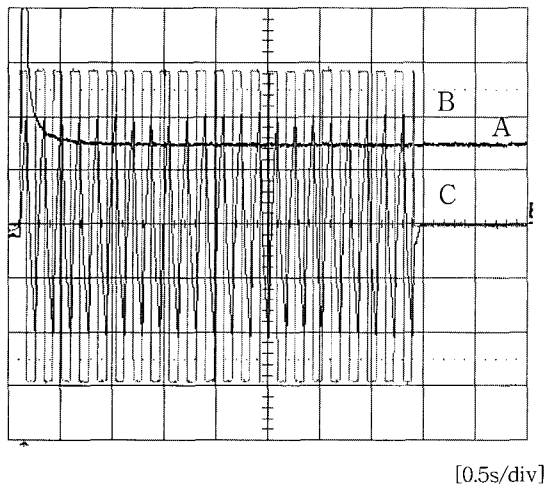


그림 4 무부하시 질량 추정 실험 결과 (파형 A: 추정 질량[2kg/div], 파형 B: 추력성분 전류 [1A/div], 파형 C: 속도[0.5m/s/div])
 Fig. 4 Experimental results of mass estimation at no-load (trace A: estimated mass[2kg/div], trace B: Force current component [1A/div], trace C: velocity[0.5m/s/div])

4. 결 론

본 논문에서는 최소자승법을 적용한 선형 영구자석 동기전동기의 가동부 질량 추정방법을 제안하였으며,

기계적 동적 시스템에 대한 DARMA모형을 제시하고, 시뮬레이션과 실험 결과를 통하여 제안한 방법으로 가동부 질량을 오차 4% 범위내로 정밀하게 추정할 수 있음을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] Graham C. Goodwin and K. S. Sin, Adaptive Filtering Prediction and Control, Prentice-Hall Inc, pp. 7-105, 1984.
- [2] Faa-Jeng Lin, "Application of EKF and RLS estimators in induction motor drive", IEEE PESC Record, vol. 1, pp. 713-718, 1996, June.
- [3] T. J. Kweon and D. S. Hyun, "High-Performance Speed Control of Electric Machine Using Low-Precision Shaft Encoder", IEEE Trans. Power Electron., vol. 14, no. 5, pp. 838-849, 1999, Sept.
- [4] J. K. Ji and S. K. Sul, "DSP-Based Self-Tuning IP Controller with Load Torque Compensation for Rolling Mill DC Drive", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 42, no. 4, pp. 382-386, 1995, Aug.
- [5] S. J. Hong, H. W. Kim and S. K. Sul, "A Novel Inertia Identification Method for Speed Control of Electric Machine", Proceedings of the IEEE IECON, vol. 2, pp. 1234-1239, 1996, Aug.

- [6] Karl J. Astrom and B. Wittenmark, Computer Controlled Systems - Theory and Design, Prentice-Hall Inc, pp. 34- 64, 1984.

저 자 소 개



이진우(李鎭雨)

1963년 1월 26일생. 1985년 충남대 전기공학과 졸업. 1987년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1991년~1999년 삼성종합기술원 수석연구원. 1999년~현재 두원공과대 메카트로닉스과 부교수. 당 학회 학술이사.