

## 수직축 선형 영구자석 동기전동기의 질량 추정

李鎭雨\*, 池俊根†, 睦亨洙\*\*

## Mass Estimation of a Permanent Magnet Linear Synchronous Motor Applied at the Vertical Axis

Jin-Woo Lee, Jun-Keun Ji and Hyung-Soo Mok

## 요 약

선형 서보 응용분야에 사용되는 속도제어기를 정밀하게 조정하기 위해서는 부하를 포함한 가동부 전체의 정밀한 질량이 필요하다. 본 논문에서는 수직축 선형 영구자석 동기전동기의 가동부 질량을 추정하기 위한 방법으로 축차 최소자승 추정 알고리즘을 적용한 질량 추정방법을 제안한다. 먼저 수직축 선형 영구자석 동기 전동기의 기계적인 동적 시스템에 대한 DARMA(deterministic autoregressive moving average)모델을 유도하고, 유도된 DARMA모델에 축차 최소자승 추정 방법을 적용한 질량 추정방법을 제안하며, Matlab/Simulink를 이용한 시뮬레이션 및 실험 결과를 제시하여 제안한 방법으로 수직축 질량을 무부하 및 부하 시 모두 정밀하게 추정할 수 있음을 보였다.

## ABSTRACT

Tuning of the speed controller in the linear servo applications needs the accurate information of a mover mass including a load mass. Therefore this paper proposes the mass estimation method of a permanent magnet linear synchronous motor(PMLSM) applied at the vertical axis by using the recursive Least-Squares estimation algorithm. First, this paper derives the deterministic autoregressive moving average(DARMA) model of the mechanical dynamic system used at the vertical axis. The application of the Least-Squares algorithm to the derived DARMA model gives the mass estimation method. Matlab/Simulink-based simulation and experimental results show that the total mover mass of a PMLSM applied at the vertical axis can be accurately estimated at both no-load and load conditions.

**Key Words** : Mass estimation, Least-square algorithm, Linear permanent magnet motor, Vertical axis

## 1. 서 론

반도체 및 FPD(Flat Panel Display) 제조장비 등과

같은 고성능 서보 응용분야에 사용되는 선형 영구자석 동기전동기의 고정도 제어를 위해서는 속도제어기의 정밀한 조정이 필요하며, 이를 위해서는 선형 전동기의 정밀한 가동부 질량이 요구된다.

상수 추정방법으로 널리 적용되고 있는 축차 최소자승 추정법(Recursive Least-Squares Estimation Method)은 수렴특성이 우수하고 잡음에 강인한 특성을 갖고 있으며<sup>[1]</sup>, 이를 적용한 유도전동기<sup>[2],[3]</sup>와 직류 전동기<sup>[4]</sup>에 대한 연구 및 칼만 필터를 활용한 유도전

†교신저자 : 정회원, 순천향대 전기통신공학과 교수  
E-mail : jkji@sch.ac.kr

\*정회원, 두원공과대학 메카트로닉스과 부교수

\*\*정회원, 건국대 전기공학과 부교수

접수일자 : 2008. 8. 14      1차 심사 : 2008. 10. 16  
2차 심사 : 2008. 11. 3      심사완료 : 2008. 11. 12

동기<sup>[5]</sup>에 대한 연구는 추정 관성을 이용한 속도제어 성능개선을 보이고 있으나, 추정 정밀도에 대한 자세한 결과는 제시하고 있지 않다. 그리고 수평축에 사용되는 선형 영구자석 동기전동기의 질량 추정은 연구되었으나<sup>[6]</sup>, 수직축의 경우에 대한 연구는 보고되지 않은 것으로 보인다. 수직축은 수평축과 달리 중력에 의한 하중이 항상 작용하고 있기 때문에 이를 고려한 질량 추정방법이 필요하다.

본 논문에서는 수직축 선형 영구자석 동기전동기의 가동부 질량을 추정하기 위하여 축차 최소자승 추정법을 적용하기 위한 기계적인 동적 시스템에 대한 DARMA (Deterministic Auto Regressive Moving Average) 모델을 제시하고, 유도된 DARMA 모델의 상수를 축차 최소자승 추정법을 적용하여 추정하며, Matlab/Simulink를 이용한 상수 추정 시뮬레이션과 실험을 통하여 하중이 항상 작용하고 있는 수직축 선형 영구자석 동기전동기의 정밀한 가동부 질량 추정이 가능함을 보이고자 한다.

## 2. 수직축 PMLSM의 가동부 질량 추정

축차 최소자승 추정법을 적용한 수직축 PMLSM의 가동부 질량 추정을 위하여 먼저 기계적 동적 시스템에 대한 DARMA 모델을 구하고, 이 모델에 축차 최소자승법을 적용하여 하중이 항상 작용하고 있는 수직축 PMLSM의 가동부 질량을 추정하도록 한다.

### 2.1 수직축 기계적 동적 시스템의 모델링

하중이 항상 작용하고 있는 수직축 선형 영구자석 동기전동기의 기계적인 동적 시스템은 일반적으로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서,  $F_e$ : 선형 전동기의 발생 추력,  $m$ : 가동부의 질량,  $v$ : 가동부의 속도,  $B$ : 마찰계수,  $F_g$ : 중력에 의한 하중에 해당하는 힘이다.

식 (1)에서 추력  $F_g$ 를 좌변으로 이항하여 정리하면 식 (2)와 같다.

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

입력에 ZOH(Zero-Order-Hold)를 가진 식 (2)를 샘플링 주기  $T_s$ 로 샘플링한 시스템은 식 (3)과 같다<sup>[7]</sup>.

플링 주기  $T_s$ 로 샘플링한 시스템은 식 (3)과 같다<sup>[7]</sup>.

$$u(k) = -a \cdot u(k-1) + b \cdot (F_e(k-1) - F_g(k-1)) \quad (3)$$

여기서,  $a = -\exp(-T_s \cdot B/m)$ ,

$$b = (1 - \exp(-T_s \cdot B/m))/B \text{ 이다.}$$

한편, 가동부의 질량을 모르는 상태에서 식 (3)의 하중에 의한 힘  $F_g$ 는 미지수이므로 이를 입력으로 하고 있는 식 (3)을 직접 사용하여 상수추정을 할 수 없다. 따라서 상수 추정을 위하여  $F_g$ 를 입력이 아닌 미지수로 보고 식 (3)을 다시 정리하면 식 (4)와 같다.

$$u(k) = -a \cdot u(k-1) + b \cdot F_e(k-1) + c \quad (4)$$

여기서  $c = -b \cdot F_g(k-1)$  이다.

그리고 식 (4)의 기계적인 동적 시스템에 대한 DARMA 모델을 상수 추정을 위한 알고리즘에 직접 적용할 수 있는 벡터 형식으로 나타내면 식 (5)와 같다.

$$u(k) = \phi(k-1)^T \cdot \theta_0 \quad (5)$$

여기서  $\phi(k-1)^T = [-u(k-1), F_e(k-1), 1]$ ,

$$\theta_0^T = [a, b, c] \text{ 이다.}$$

### 2.2 축차최소자승추정법에 의한 수직축질량추정

식 (5)의 DARMA 모델에 축차 최소자승 추정법<sup>[1]</sup>을 적용하면 다음과 같다.

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{P(k-2)\phi(k-1)}{1 + \phi(k-1)^T P(k-2)\phi(k-1)} \quad (6)$$

$$\cdot [v(k) - \phi(k-1)^T \hat{\theta}(k-1)]$$

$$P(k-1) = P(k-2) \quad (7)$$

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

여기서,  $k \geq 1$ , 초기치는 각각  $\hat{\Theta}(0)^T = [\hat{a}_i, \hat{b}_i, \hat{c}_i]$ ,  $\Phi(0)^T = [-u(0), F_e(0), 1]$ ,  $P(-1) = P_i$ : 양의 한정행렬(Positive Definite Matrix)이다.

축차 최소자승 추정법을 적용하여 추정한 상수  $\hat{\Theta} = [\hat{a}, \hat{b}, \hat{c}]^T$ 를 이용하여 기계적 동적 시스템의 마찰계수, 가동부 질량, 하중을 각각 식 (3)과 식 (4)로부터 구하면 식 (8)과 같다.

$$\hat{B} = \frac{1+\hat{a}}{\hat{b}}, \quad \hat{m} = \frac{-T_s \cdot \hat{B}}{\log(-\hat{a})}, \quad \hat{F}_g = -\frac{\hat{c}}{\hat{b}} \quad (8)$$

상수 추정에 대한 수렴조건은 실험에서 적용이 용이하도록 식 (6)에서 실제 전동기의 측정 속도와 추정 속도의 오차인  $[v(k) - \phi(k-1)^T \hat{\theta}(k-1)]$ 가 일정범위내로 수렴하면 추정이 완료된 것으로 설정한다.

### 3. 수직축 질량 추정 시뮬레이션 및 실험

제안한 수직축 PMLSM의 가동부 질량 추정 방법의 타당성을 검증하기 위하여 사용한 선형 영구자석 동기전동기의 사양은 표 1과 같으며, 전동기에 장착된 선형 엔코더의 분해능은  $1[\mu\text{m}/\text{pulse}]$ 이다. TI사의 120MHz TMS320VC33 DSP를 사용한 제어장치는 M/T방법을 이용하여 속도를 측정하고, 전류제어기는 전향보상과 반와인드업(Anti-Windup) 기능을 가진 대역폭  $5000[\text{rad}/\text{s}]$ 의 동기좌표계 PI제어기를 사용하며, 전류 제어기의 샘플링 주기는  $50[\mu\text{s}]$ 이다.

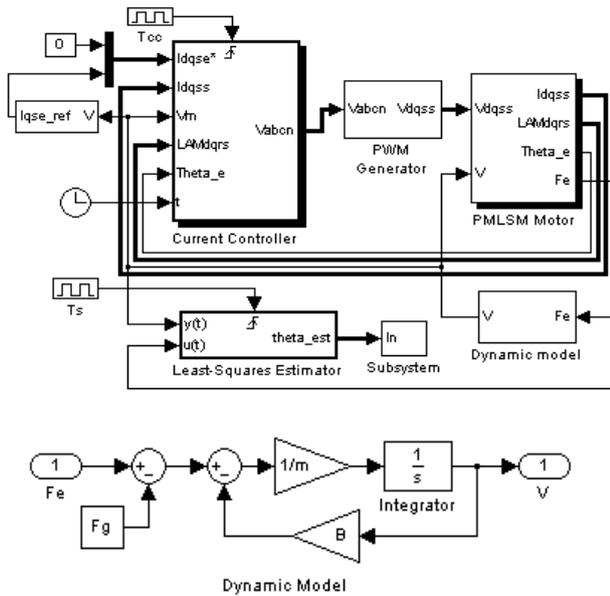


그림 1 축차 최소자승 추정법에 의한 수직축 PMLSM의 가동부 질량 추정을 위한 Simulink 블록도

Fig. 1 Simulink block diagram for a mover mass estimation of a PMLSM applied at the vertical axis by the recursive least-squares estimation algorithm

그림 1은 수직축 PMLSM의 상수추정 특성을 시뮬레이션하기 위한 Matlab/Simulink 블록도이며, 기계적

표 1 PMLSM의 사양

Table 1 Specifications of a PMLSM

정격추력	84.5[N]	Rs	3.79[Ω]
정격전류	2[A]	Ls	13.45[mH]
극수	8	가동자	3.3[kg]
추력상수	42.25[N/A]	극간격	12[mm]

인 동적 시스템은 식 (2)를 기준으로 모델링 하였다. 시뮬레이션에서 상수 추정기의 입력은 그림 1에 나타난 바와 같이 PMLSM의 발생추력과 실제속도이다.

그림 2는 가동자의 질량 추정에 대한 시뮬레이션 결과로서 전동기의 발생추력, 속도, 그리고 가동자의 추정 질량을 각각 나타낸 것이고, 그림 3은 3[kg] 부하질량을 추가한 경우에 대한 것이며, 시뮬레이션에서 추정한 질량은 각각 3.3[kg], 6.3[kg]으로서 가동부 질량을 정밀하게 추정함을 알 수 있다. 단 시뮬레이션에서 마찰계수는  $0.85[\text{N}/\text{m}/\text{s}]$ 이다. 시뮬레이션에서는 가동부 위치에 대한 제한이 없으므로 속도가 각각  $\pm 0.5[\text{m}/\text{s}]$ 에 이르면 속도를 바꾸도록 그림 2와 그림3의 시뮬레이션 파형에 나타난 바와 같이 각각  $\pm$ 정격추력의 구형파 지령치를 인가하였다.

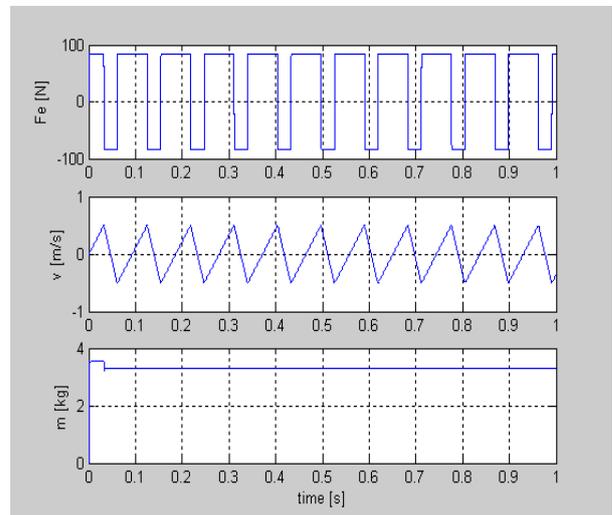


그림 2 무부하시 수직축 PMLSM의 가동부 질량 추정 시뮬레이션 결과(Fe: 추력, v: 속도, m: 추정질량)

Fig. 2 Simulation results of mover mass estimation of a PMLSM applied at the vertical axis at no-load (Fe: Thrust Force, v: Velocity, m: Estimated mass)

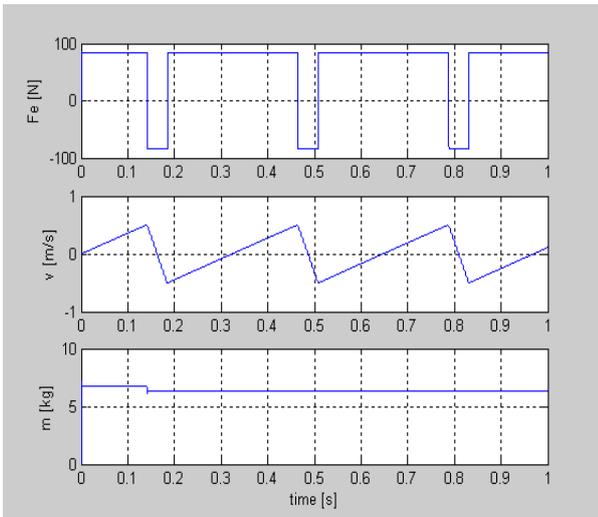


그림 3 부하시 수직축 PMLSM의 가동부 질량 추정 시뮬레이션 결과(Fe: 추력, v: 속도, m: 추정질량)

Fig. 3 Simulation results of mover mass estimation of a PMLSM applied at the vertical axis at load (Fe: Thrust Force, v: Velocity, m: Estimated mass)

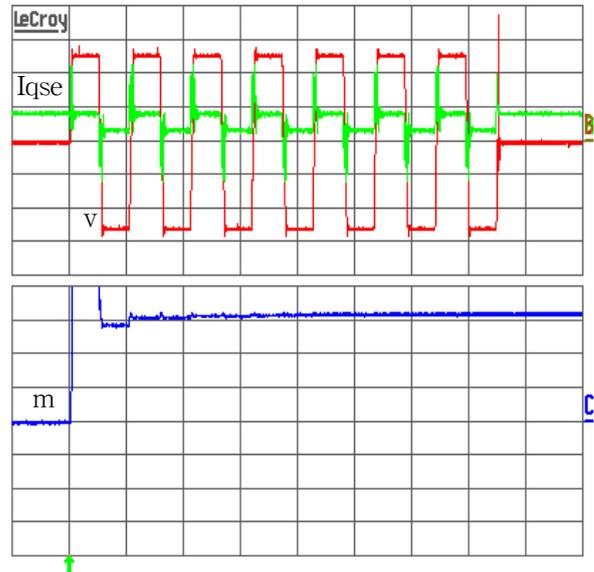


그림 5 부하시 수직축 PMLSM의 가동부 질량 추정 실험 결과 (Iqse: 추력분 전류[4A/div.], v: 속도[0.2m/s/div.], m: 추정질량[2kg/div.], 시간[1s/div.])

Fig. 5 Experimental results of mover mass estimation of a PMLSM applied at the vertical axis at load (Iqse: Thrust force producing current[4A/div.], v: Velocity[0.2m/s/div.], m: Estimated mass[2kg/div.], time[1s/div.])

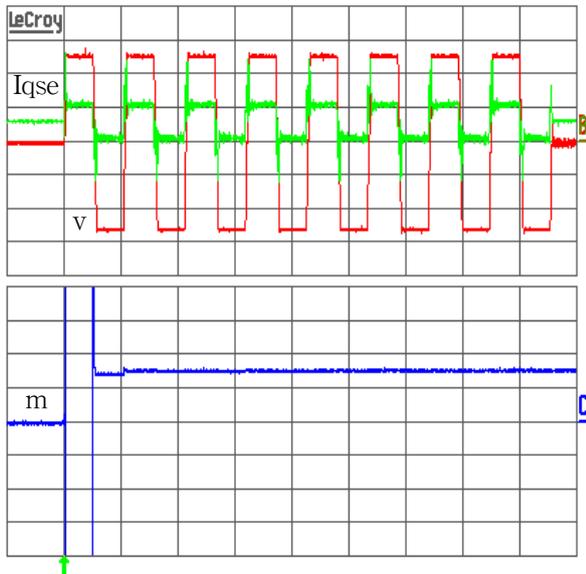


그림 4 무부하시 수직축 PMLSM의 가동부 질량 추정 실험 결과(Iqse: 추력분 전류[2A/div.], v: 속도[0.2m/s/div.], m: 추정질량[2kg/div.], 시간[1s/div.])

Fig. 4 Experimental results of mover mass estimation of a PMLSM applied at the vertical axis at no-load (Iqse: Thrust force producing current[2A/div.], v: Velocity[0.2m/s/div.], m: Estimated mass[2kg/div.], time[1s/div.])

그림 4와 그림 5는 시뮬레이션에 대응하는 실험결과로서 전동기의 추력성분 전류, 속도, 그리고 가동부의 추정질량을 각각 나타내고 있으며, 추정된 질량은 각각 3.06[kg]과 6.34[kg]으로 약 10[%]내의 작은 오차를 보이고 있다. 한편 시뮬레이션과 달리 실험에서는 과도한 위치이탈을 방지할 필요가 있기 때문에 그림4와 그림 5의 실험과형에 나타난 바와 같이 일정한 정역 속도패턴에 따른 질량 추정 실험을 수행하였다. 이상의 시뮬레이션과 실험 결과에 의하면 축차 최소자승 추정 알고리즘을 적용한 제안한 질량 추정방법으로 하중이 항상 작용하고 있는 수직축 선형 영구자석 동기 전동기의 가동부 질량을 무부하 및 부하 시 모두 정밀하게 추정함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 축차 최소자승 추정법을 적용한 수직축 선형 영구자석 동기전동기의 가동부 질량 추정방법을 제안하였으며, 기계적 동적 시스템에 대한 DARMA모델을 제시하고, 시뮬레이션과 실험을 통하

여 제안한 방법으로 하중이 항상 작용하고 있는 수직축 PMLSM의 가동부 질량을 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] 이진우, "선형 영구자석 동기전동기의 최소자승법을 적용한 질량 추정", *전력전자학회 논문지*, 제11권 제2호, pp. 159-163, 2006. 4.

[7] 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 두원공과대학 메카트로닉스과 부교수. 현재 당 학회 학술이사.



**지준근(池俊根)**

1964년 8월 13일생. 1986년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1994년~현재 순천향대 전기통신공학과 교수. 현재 당 학회 평의원.



**목형수(睦亨洙)**

1963년 10월 31일생. 1986년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1993년~1997년 서울산업대 제어계측공학과 전임강사, 조교수. 1997년~현재 건국대 전기공학과 부교수. 현재 당 학회 조사이사.