

Z축 선형 영구자석 동기전동기의 초기 자극위치 추정 알고리즘

李鎭雨[†]

Initial Pole Position Estimation Algorithm of a Z-Axis PMLSM

Jin-Woo Lee

요 약

본 논문에서는 홀센서와 같은 자극위치 센서를 사용하지 않는 Z축 선형 영구자석 동기전동기의 초기 자극위치 추정에 관한 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 Z축의 경우에 존재하는 중력에 의한 자체하중의 영향을 고려하고, 부하질량 변동에 따른 추정특성 변화를 회피하기 위한 방법을 제시하며, 2단계로 구성되어 있다. 1단계에서는 미리 정한 각도 간격의 시험 q축에 전류를 인가하여 구한 이동거리를 사용하여 근사적인 q축을 추정한다. 2단계에서는 1단계의 추정치를 초기치로 이용하며, 부하질량의 영향을 받지 않도록 하기 위하여 3개의 시험 q축에 인가한 전류에 따른 추력에 대응하는 값을 이용하여 자극위치를 정밀하게 추정한다. 그리고 Z축 PMLSM에 대한 실험 결과를 통하여 제안된 초기 자극위치 추정방법으로 부하질량 조건에 관계없이 정밀하게 자극위치를 추정함을 검증하였다.

ABSTRACT

This paper deals with the estimation method on the initial pole position of a z-axis permanent magnet linear synchronous motor(PMLSM) without magnetic pole sensors such as Hall sensors. The proposed method takes account of the gravitational force at z-axis and also the load conditions. The algorithm consists of two steps. The first step is to approximately estimate the initial q-axis by monitoring the movements due to the test current at predefined different test q-axes. The second step is to estimate the real q-axis as accurately as possible by using the outputs corresponding to torques due to the test current at three different test q-axes in order to avoid the effect of load mass variations. Experimental results on the z-axis PMLSM show good estimation characteristics of the proposed method irrespective of load mass conditions.

Key Words : initial pole position estimation, z-axis, magnetic pole sensor, permanent magnet, linear motor

1. 서 론

최근 고성능 서보제어에 사용되는 선형 영구자석 동기전동기의 백터제어를 위해서는 자극위치에 대한 정확한 정보가 필요하다. 따라서 대부분의 상용 서보 모

터는 서보제어를 위한 고분해능 엔코더(encoder)와 자극위치 검출을 위한 홀센서(Hall Sensor)를 사용한다. 홀센서를 사용하면 초기 자극위치를 전기각으로 $\pm 30^\circ$ 오차범위 내로 추정 가능하며, 이 추정각도를 이용하여 제어를 시작한 후에 새로운 홀센서 신호가 입력되면 정확한 자극위치를 이용하여 제어한다^[1]. 그러나 자극위치 센서를 사용하지 않는 것이 가격, 부피, 신뢰성 등의 면에서 유리하기 때문에 적절한 방법으로 자극위치 정보를 얻기 위한 연구가 진행되고 있다^{[1]~[6]}. 또한

[†]교신저자 : 정회원, 두원공과대학 메카트로닉스과 부교수
E-mail : jinwoo@doowon.ac.kr
접수일자 : 2007. 8. 16 1차 심사 : 2007. 10. 5
심사완료 : 2007. 12. 11

기구적으로 홀센서를 장착하기 어려운 샤프트(shaft) 리니어 모터의 경우에는 초기각 추정 기능이 절실히 요구된다.

기존의 자극위치를 찾는 방법으로 일정 직류전류를 인가하는 방법^[1], 전기각 90°의 위상차를 가진 2개의 전류 값을 이용하는 방법^[2], 작은 정현파 위치지령을 인가한 상태에서 정상상태 응답을 이용하여 초기 자극 위치를 추정하는 방법^[3], 수치해석법인 이분법(bisection method)을 이용하여 자극위치를 추정하는 Dither Commutation Initialization 방법^[1], q 축을 기준으로 $\pm 45^\circ$ 위치에서 발생하는 추력의 크기가 같다는 개념을 이용하는 방법^[4], 할선법(secant method)을 적용하여 추력이 영인 자극위치를 추정하는 방법^[5], 전기각 90°의 위상차를 가진 2축에서 발생하는 추력을 이용하는 방법^[6]이 제시되었다. 그러나 기존의 연구에서는 Z축 전동기에 대한 언급이 없으며, 이 부분에 대한 연구결과는 보고 되지 않은 것으로 보인다.

본 논문에서는 Z축 PMLSM 전동기의 초기 자극위치 추정을 위하여 먼저 Z축의 특성을 고려한 초기 자극위치 1차 추정방법을 제시하고, 1차 추정 초기 자극위치를 초기치로 하여 정밀한 초기 자극위치 추정이 가능하고 부하의 영향을 받지 않는 초기 자극위치 2차 추정방법을 제시하며, 실험을 통하여 제안한 방법의 타당성을 입증한다.

2. Z축 PMLSM의 초기 자극위치 추정

Z축 PMLSM의 초기 자극위치를 추정하기 위하여 먼저 Z축의 특징을 기반으로 한 1차 추정방법을 살펴보고, 1차 추정 자극위치를 이용하여 부하질량의 영향을 받지 않는 2차 추정 알고리즘을 살펴보기로 한다.

2.1 초기 자극위치 1차 추정방법

그림 1은 Z축에 장착되어 사용되는 PMLSM 전동기의 초기위치를 나타낸 것으로 $Z = 0$ 에 위치해 있기 때문에 양의 Z축 방향으로의 이동이 가능하나 음의 방향으로의 이동이 불가능하다. 또한, 전동기 가동부의 자체하중에 의한 힘(F_g)이 그림 1과 같이 작용하고 있기 때문에 양의 Z축 방향으로 전동기가 움직이기 위해서는 전동기에서 발생하는 추력이 F_g 보다 커야 한다.

그림 2는 자극기준 동기좌표계 상에서 일정 전류를 정지한 전동기에 인가할 때 자극위치에 따라 발생하는 전동기의 추력 F 와 그림 1의 F_g 를 나타낸 것이다. 한편, 그림 1과 같이 $Z = 0$ 에 위치한 전동기의 초기 자

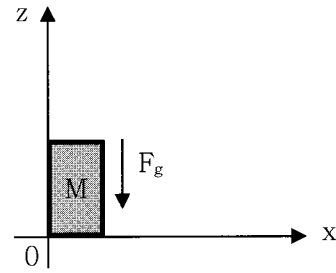


그림 1 Z축 PMLSM의 초기위치
Fig. 1 Initial position of a z-axis PMLSM

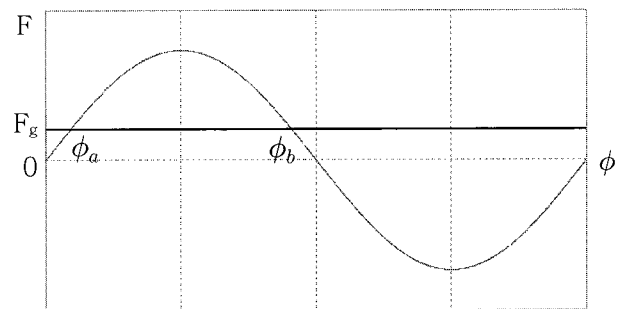


그림 2 일정전류에 대한 자극위치에 따른 PMLSM의 추력과 자체하중에 의한 힘(F_g)
Fig. 2 Thrust Force of a PMLSM with respect to the magnetic pole position under the same motor current and the gravitational force(F_g)

극위치는 전동기 구조 및 기계적인 부착 방법에 따라 결정되며, 그림 2의 자극위치 범위 내에서 임의의 자극위치를 가질 수 있기 때문에 전동기의 효과적인 추력제어를 위해서는 초기 자극위치를 적절하게 추정 또는 측정하는 방법이 요구된다. 그리고 Z축에 사용되는 전동기는 가동자의 자체하중에 의해서 항상 영보다 큰 힘 F_g 가 그림 2와 같이 작용하고 있고, 또한 전동기가 양의 Z축 상에서만 움직일 수 있기 때문에 이를 고려한 Z축 전동기에 대한 자극위치 초기각 추정 알고리즘이 필요하다.

그림 2에서 자극기준 동기좌표계 d 축과 q 축의 위치는 각각 $\phi = 0, \phi = \pi/2$ 인 자극위치이다. 초기 자극위치를 알 수 없는 영구자석 동기전동기가 그림 1의 초기위치에 있는 경우 양의 Z축으로 움직일 수 있는 자극기준 동기좌표계 추정 \hat{q} 축의 위치는 그림 2에서 자극위치 $\phi_a < \phi < \phi_b$ 구간이며, 초기의 추정 \hat{q} 축의 자극위치는 이 범위 내에서 설정되어야 한다.

그림 2에서 전동기 q 축을 기준으로 임의의 $\pm \alpha/2$ 의

위치에서 발생하는 추력의 크기는 서로 같다. 따라서 같은 추력이 발생하는 두 자극위치(ϕ_1, ϕ_2)를 $\phi_a < \phi < \phi_b$ 의 자극위치 범위 내에서 구하면 전동기 q 축의 정확한 자극위치는 항상 식 (1)과 같이 구할 수 있으므로 이 원리를 적용하여 초기 자극위치를 추정하기로 한다.

$$\phi_i = (\phi_1 + \phi_2) / 2 \tag{1}$$

먼저 그림 2의 자극위치에 대한 추력특성을 바탕으로 미리 정한 간격의 시험 q 축에 전류를 인가하여 구한 이동거리를 사용하여 근사적인 자극위치 $\hat{\phi}_a, \hat{\phi}_b$ 를 구하고, 자극기준 동기좌표계 추정 \hat{q} 축의 초기 자극위치를 식 (2)와 같이 구한다.

$$\hat{\phi}_i = (\hat{\phi}_a + \hat{\phi}_b) / 2 \tag{2}$$

식 (2)에 의한 추정 \hat{q} 축과 실제 전동기 q 축, 그리고 주어진 초기자극위치에 따른 q_i 축의 관계를 나타내면 그림 3과 같으며, 초기 추정 \hat{q} 축으로부터 전동기 q 축을 추정하는 2차 추정방법은 다음과 같다.

2.2 초기 자극위치 2차 추정방법

그림 3의 동기좌표계에 표시한 추정 \hat{q} 축을 기준으로 $\alpha/2$ 의 위치에 있는 \hat{q}_a 축에 시험전류를 인가하여 발생 추력 f_a 를 구하고, $-\alpha/2$ 의 위치에 있는 \hat{q}_b 축에 시험전류를 인가하여 발생 추력 f_b 를 구한다. 그리고 \hat{q}_b 축에 대해서 기지의 δ 각만큼 앞선 \hat{q}_c 축에 시험전류를 인가하여 발생 추력 f_c 를 구한다. 초기 자극위치와 추력의 관계로부터 새로운 추정 \hat{q} 축은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{\phi}_i(k+1) = \hat{\phi}_i(k) + \frac{\delta}{2} \frac{f_a - f_b}{f_c - f_b} \tag{3}$$

한편, 식 (3)에서 전동기의 발생추력을 사용하고 있으나, 별도의 센서를 사용하여 추력을 측정하지 않는 경우에는 초기 자극위치를 모르기 때문에 전동기 발생

추력을 구할 수 없으나, 식 (4)의 전동기의 기계적 동적방정식을 이용하면 추력에 대응하는 값을 구하는 것이 가능하므로 이 값을 적용하여 추정할 수 있다.

$$F_e = m \frac{dv}{dt} + Bv + F_g + F_d \tag{4}$$

여기서, F_e 는 전동기의 발생추력, m 은 가동부의 질량, B 는 마찰계수, v 는 전동기 가동자의 속도, F_g 는 가동부 자체하중에 의한 힘, F_d 는 부하를 포함하는 외란에 대응하는 힘이다.

식 (4)의 해를 구하면 전동기의 속도가 얻어지고, 이동거리를 나타내는 위치는 속도를 적분하여 구할 수 있다. 그러므로 전동기의 속도 및 위치는 전동기 추력의 함수가 되기 때문에 추력에 대응하는 특성을 갖는다. 한편, 식 (3)에서 $(f_a - f_b) / (f_c - f_b)$ 은 비례식으로 무차원이기 때문에 추력을 직접 사용하는 대신에 추력에 대응하는 값을 사용하는 것이 가능하다. 결론적으로 추력에 대응하는 값을 사용하면 식 (3)에 의한 초기각 추정이 가능하다.

본 논문에서는 이동거리를 제한하기 위해 단조 증가하는 추정 \hat{q} 축 전류에 의한 이동거리가 목표치에 도달하면 이동거리를 측정하고 경과시간을 측정한 후 추력에 대응하는 값으로 이동거리를 시간으로 나눈 값을 사용한다^[6]. 이 경우에 이동거리와 시간을 사용하기 때문에 추력에 대응하는 값이 전동기 질량의 영향을 받는다. 그러나 식 (3)에서 $(f_a - f_b) / (f_c - f_b)$ 의 비례식을 사용하기 때문에 전동기 부하 질량의 영향이 비례식에 의하여 상쇄되기 때문에 식 (3)에 의한 초기각

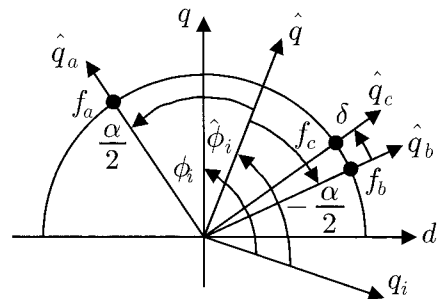


그림 3 Z축 PMLSM의 초기 자극위치 추정을 위한 동기좌표계의 추정 q축과 3개의 시험 q축
 Fig. 3 An estimated q-axis and three test q-axes in the synchronous reference frame for the initial pole position estimation of a z-axis PMLSM

추정방법은 전동기 부하 질량의 영향을 받지 않게 된다.

한편 식 (3)의 두 번째 항이 일정범위내로 수렴하면 초기각 추정을 완료하도록 한다.

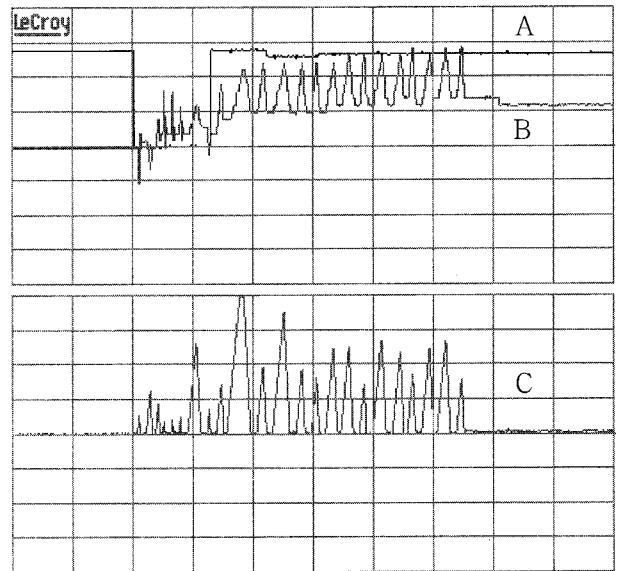
3. Z축 초기 자극위치 추정 실험 결과 및 고찰

제안한 Z축 PMLSM의 초기 자극위치 추정 방법의 타당성을 검증하기 위하여 실험에 사용한 PMLSM 및 Linear Scale의 사양은 표 1과 같으며, TI사의 120[MHz] TMS320VC33 DSP를 사용한 제어장치의 전류제어 주기는 50[μ s]이고, IGBT 인버터의 스위칭주기는 100 [μ s]이며, 전류제어기 대역폭은 13,000 [rad/s]이며, 디지털 출력 표시부를 가지고 있다.

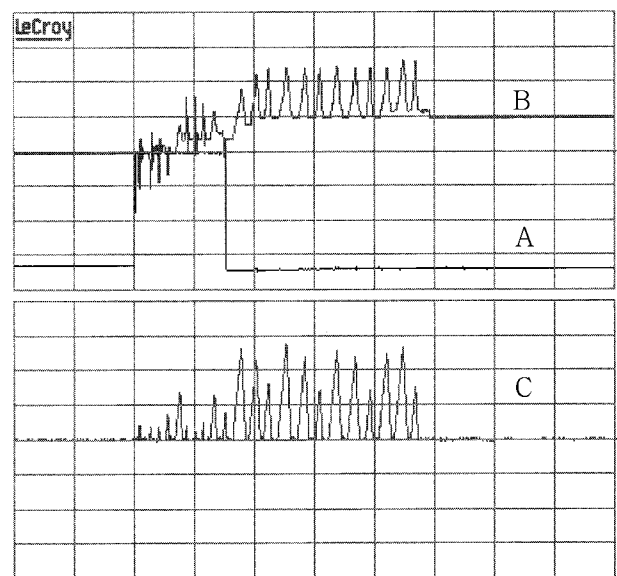
그림 4는 무부하 상태의 Z축 PMLSM에서 초기 자극위치가 각각 전기각 136.4°와 -159.6°에 대한 추정과정을 실험파형으로 나타낸 것이고, 추정 오차는 각각 5.55°와 4.8°이다. 그리고 그림 5는 2.7[kg]의 질량을 부착한 부하 상태에서의 초기 자극위치가 각각 전기각 164.85°와 -147.85°에 대한 실험파형이며, 추정 오차는 각각 4.85°와 5.95°이다. 실험파형에서 자극위치 파형 A는 초기에 홀센서에 의한 초기 자극위치를 나타내고 있으며, q축 전류파형 C에서 전류가 인가되는 구간이 1차/2차 추정 구간이며, 1차 추정구간은 자극위치 파형 A에서 자극위치 값이 영인 구간이며, 1차 추정 후 2차 추정 구간에서 추정치가 설정 범위 내로 수렴하면 추정을 완료한다. 자극위치 파형 A와 추정오차로부터 추정 자극위치와 초기 자극위치가 약 6° 이내로 잘 일치함을 알 수 있으며, 이동거리 파형 B로부터 추정 구간에서 이동거리가 약 $\pm 15\mu$ m 이내로 매우 적은 것을 알 수 있다. 따라서 제안한 방법에 의하여 Z축 PMLSM의 초기 자극위치를 부하조건에 관계없이 짧은 이동거리 내에서 잘 추정함을 알 수 있다.

표 1 PMLSM 및 Linear Scale의 사양
Table 1 Specifications of PMLSM and Linear Scale

정격추력	84.5[N]	Rs	3.79[Ω]
정격전류	2[Arms]	Ls	13.45[mH]
극수	8	가동자	2.66[kg]
추력상수	42.25[N/Arms]	극간격	12[mm]
Linear Scale : 1[μ m/pulse]			



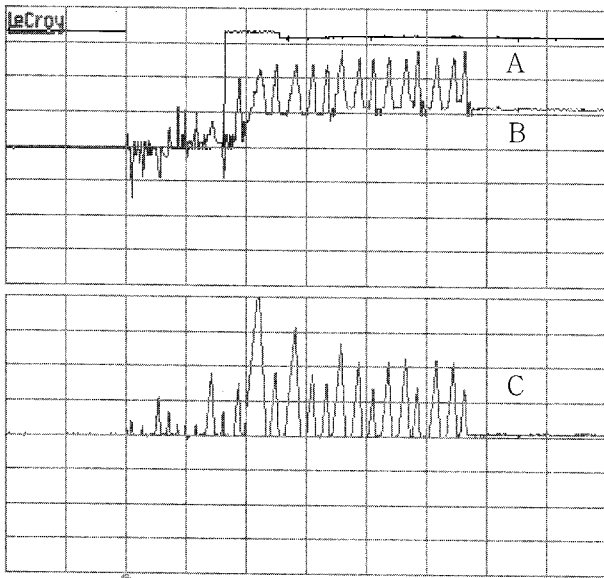
(a) 초기 자극위치 136.4°
(a) initial pole position of 136.4°



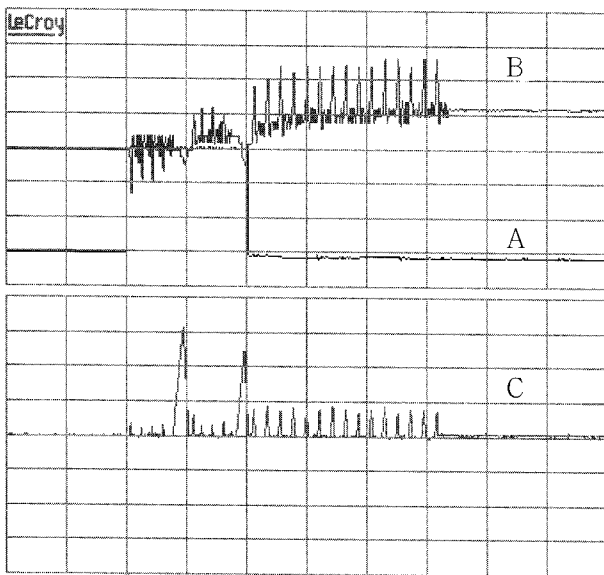
(b) 초기 자극위치 -159.6°
(b) initial pole position of -159.6°

그림 4 무부하시 Z축 PMLSM의 초기 자극위치 추정 실험파형 (A: 자극위치[50°/div], B: 이동거리[5 μ m/div], C: Iqse[1A/div], 시간[0.2s/div])

Fig. 4 Experimental waveforms on the initial pole position estimation of a z-axis PMLSM at no-load (A: magnetic pole position [50°/div], B: mover position[5 μ m/div], C: Iqse[1A/div], time scale[0.2s/div])



(a) 초기 자극위치 164.85°
(a) initial pole position of 164.85°



(b) 초기 자극위치 -147.85°
(b) initial pole position of -147.85°

그림 5 부하시 Z축 PMLSM의 초기 자극위치 추정 실험파형 (A: 자극위치[50°/div], B: 이동거리[5μm/div], C: Iqse[1A/div], 시간[0.2s/div])

Fig. 5 Experimental waveforms on the initial pole position estimation of a z-axis PMLSM at load (A: magnetic pole position [50°/div], B: mover position[5μm/div], C: Iqse[1A/div], time scale [0.2s/div])

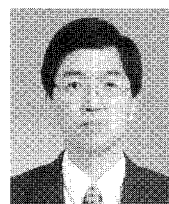
4. 결 론

본 논문에서는 새로운 Z축 PMLSM의 초기 자극위치 추정방법으로 Z축의 경우에 존재하는 중력에 의한 자체하중의 영향을 고려하고, 부하질량 변동에 따른 추정특성 변화를 회피하기 위한 추정 방법을 제시하였으며, 실험을 통하여 부하상태에 관계없이 짧은 이동거리 내에서 초기 자극위치를 정밀하게 추정할 수 있음을 검증하였다.

참 고 문 헌

- [1] Installation & Operational Manual: Omega Series - Digital PWM Brushless Servo Amplifiers, Glentek Inc. pp.65-68, 2002.
- [2] T. W. Kim, J. Watanabe, S. Sonoda, and J. Hirai, "Initial Pole Position Estimation of Surface PM-LSM", *Journal of Power Electronics*, Vol. 1, No. 1, pp.1-8, 2001, April.
- [3] D. H. Jung and I. J. Ha, "An Efficient Method for Identifying the Initial Position of a PMSM with an Incremental Encoder", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 45, No. 4, pp.682-685, 1998, Aug.
- [4] Choi J.-W., Yun W.-E. and Kim H.-G., "Initial pole-position estimation of linear motor", *IEE Proceedings of Electric Power Applications*, Vol. 152, No. 4, pp. 997-1002, 2005, July.
- [5] J. W. Lee, "A Novel Method of Estimating an Initial Magnetic Pole Position of a PMSM", *IEEE Proceedings of PESC*, pp. 702-707, 2006, June.
- [6] K. Ide, H. S. Song, M. Takaki, S. Morimoto, and S. K. Sul, "Fast Initial Pole-Position Estimation for Non-Salient PM-LSM based on Agreement of Two Reference Frames", *IEEE Proceedings of PESC*, pp. 1497-1503, 2006, June.

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(공학박). 1991년~1999년 삼성종합기술원 수석연구원. 1999년~현재 두원공과대학 메카트로닉스과 부교수, 당 학회 학술이사.