

영구자석 선형동기전동기의 초기자극 위치 추정 알고리즘

尹元一[†], 李榮鎬[‡], 崔鐘宇^{***}, 金興根^{***}

Algorithm for the Initial Pole Position Estimation of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor

Won-Eel Yun, Young-Ho Lee, Jong-Woo Choi, and Heung-Geun Kim

요 약

본 논문에서는 영구자석 선형동기전동기의 초기 자극위치를 추정하는 알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘은 전동기 파라미터를 사용하지 않고 두 제어 축에 같은 추력 지령을 인가하여 각 제어 축에 의해서 발생하는 이동거리의 최대 값을 관측하고 관측된 최대 위치 변위의 오차를 PI 제어함으로써 초기 자극 위치를 빠르고 정확하게 찾는 것이다. 제안된 알고리즘을 시뮬레이션과 실험을 통해 타당성을 검증하였다

ABSTRACT

This paper has proposed an algorithm for the initial pole position estimation of a permanent magnet linear synchronous motor(PMLSM). The algorithm finds the initial pole position observing the maximum values of a position generated by the new proposed two reference frames for the same force input. So, the proposed algorithm does not utilize the motor parameters and is insensitive to them. Moreover, the proposed algorithm is easily realized because the proposed method is just using PI controller

Key Words : Linear Motor, Position Estimation

1. 서 론

근래에 영구자석 동기전동기는 서보드라이버를 비롯한 산업현장에 널리 적용되고 있다. 동기전동기는 기동 시의 부드러운 출발과 정밀한 토크 제어를 위해 정확한 자극의 초기 위치정보가 필요하다. 만약 자극의 초기위치를 잘못 알고 있다면 전동기는 불안정한 상태가 되고 기동 시 잘못된 방향으로 움직이거나 제어범위를 벗어날 수 있다. 산업현장에서 이용되고 있는 직

선 운동용 산업기기에는 회전형 전동기와 이 회전기의 회전 운동을 직선 운동으로 변환시키는 기계적인 부가장치를 결합한 이중 구조의 구동시스템이 주로 이용되고 있다. 이는 시스템구성이 복잡하고 고속응답성 내구성 및 정밀위치제어에 한계가 있어 선형전동기를 이용하는 시스템에 대한 관심은 높아가고 있다. 영구자석 선형전동기는 이동자의 위치를 측정하는 위치센서와 자극의 위치를 감지하는 비싼 자극센서가 요구된다^[1-16]. 하지만 이것 역시 먼지, 열, 노이즈 그리고 기계적인 진동에 취약해서 잘못된 자극위치를 읽는 상황을 초래할 수 있다^[9].

따라서 본 논문에서는 영구자석 선형동기전동기의 초기 자극위치를 추정하는 알고리즘을 제안 하였다. 이 알고리즘은 전동기 파라미터의 사용 없이 두 제어 축에 같은 추력 지령을 인가하여 각 제어 축에 의해서

[†]교신저자 : 학생회원, 경북대 대학원 전기공학과 석사과정
E-mail : wolly2k@hanmail.net

[‡]정회원, LG전자

^{***}정회원, 경북대 전자전기공학부 조교수

^{***}정회원, 경북대 전자전기공학부 교수

접수일자 : 2004. 7. 26

1차 심사 : 2004. 8. 25

심사완료 : 2004. 9. 13

발생하는 이동거리의 최대 값을 관측하고 관측된 최대 위치 변위의 오차를 PI 제어함으로써 초기 자극 위치를 빠르고 정확하게 찾는 것이다. 시뮬레이션과 실험을 통하여 제안된 알고리즘의 타당성을 검증하였다. 실험결과에서 초기자극의 위치를 0.3초 안에 정확하게 추정하는 것을 볼 수 있다.

2. 본 론

2.1 영구자석 선형동기전동기의 모델링

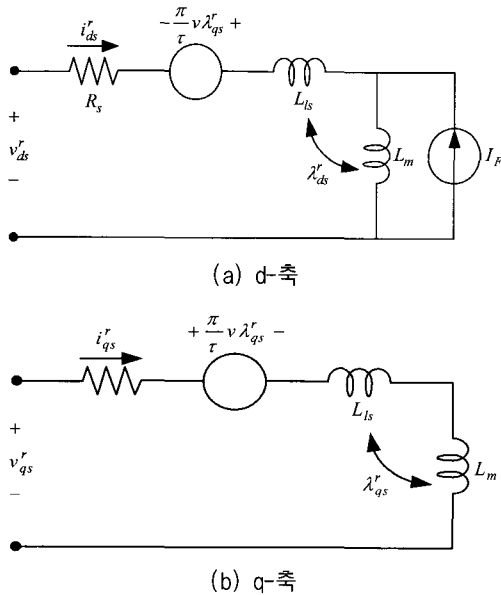


그림 1 영구자석 선형전동기의 등가회로
Fig. 1 Equivalent circuit of PMLSM

그림 1은 영구자석 선형전동기의 등가회로를 보여준다. d축과 q축 동기좌표계 고정자 전압방정식은 식 (1)과 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$v_{ds}^r = r_s i_{ds}^r + L_{ls} \frac{di_{ds}^r}{dt} + L_m \frac{d(i_{ds}^r + I_f)}{dt} - \frac{\pi}{\tau} v \lambda_{qs}^r \quad (1)$$

$$v_{qs}^r = r_s i_{qs}^r + L_{ls} \frac{di_{qs}^r}{dt} + L_m \frac{di_{qs}^r}{dt} + \frac{\pi}{\tau} v \lambda_{ds}^r \quad (2)$$

영구자속과 고정자 전류에 의한 쇄교 자속은 다음 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \lambda_{ds}^r &= L_{ls} i_{ds}^r + L_m (i_{ds}^r + I_f) = L_s i_{ds}^r + L_m I_f \\ &= L_s i_{ds}^r + \lambda_{PM} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\lambda_{qs}^r = L_{ls} i_{qs}^r + L_m i_{qs}^r = L_s i_{qs}^r \quad (4)$$

여기서, v_{ds}^r, v_{qs}^r : d축과 q축 고정자 전압

i_{ds}^r, i_{qs}^r : d축과 q축 고정자 전류

$\lambda_{ds}^r, \lambda_{qs}^r$: d축과 q축 고정자 쇄교 자속

r_s : 고정자 저항

L_{ls} : 고정자 누설 인덕턴스

L_m : 상호 인덕턴스

L_s : 고정자 인덕턴스

I_f : 영구자석의 등가 전류

λ_{PM} : 영구 자속에 의해 유기된 쇄교자속

τ : 자극 간격

v : 이동자의 속도

결과적으로 동기좌표계에서 고정자 전압 방정식은 다음 식 (5)와 식 (6)으로 주어진다.

$$v_{ds}^r = r_s i_{ds}^r + L_s \frac{di_{ds}^r}{dt} - \frac{\pi}{\tau} v L_s i_{qs}^r \quad (5)$$

$$v_{qs}^r = r_s i_{qs}^r + L_s \frac{di_{qs}^r}{dt} + \frac{\pi}{\tau} v L_s i_{ds}^r + \frac{\pi}{\tau} v \lambda_{PM} \quad (6)$$

영구자석 선형전동기의 기계방정식은 아래 식 (7)로 주어진다.

$$F_e = \frac{3\pi}{2\tau} \lambda_{PM} i_{qs}^r = K_f i_{qs}^r \quad (7)$$

여기서 $K_f = \frac{3\pi}{2\tau} \lambda_{PM}$ 는 추력상수 이다.

2.2 초기 자극 위치 추정 방법

2.2.1 지령추력과 실제추력

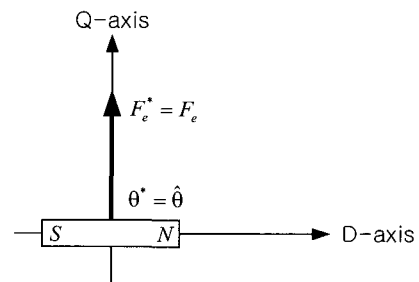


그림 2 $\theta^* = \hat{\theta}$ 일때 지령추력과 실제추력

Fig. 2 Reference force and actual force when $\theta^* = \hat{\theta}$

그림 2에서 보는 것과 같이 실제 자극위치 θ^* 와 추정된 자극위치 $\hat{\theta}$ 가 만약에 같다면 지령추력 F_e^* 는 실제 추력 F_e 와 같게 나타날 것이다.

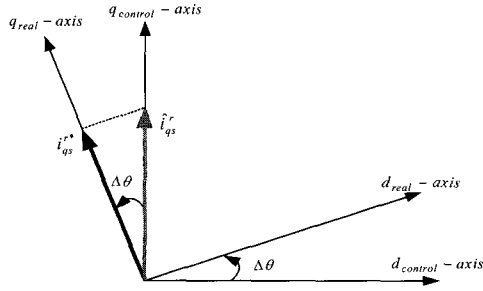


그림 3 실제 q축과 제어 q축 전류
Fig. 3 Real q-axis and control q-axis

하지만 그림 3에서의 것과 같이 실제 자극위치 θ^* 와 추정된 자극위치 $\hat{\theta}$ 사이에 차이 ($\Delta\theta = \theta^* - \hat{\theta}$)가 생기게 된다면 지령추력 F_e^* 는 실제 추력 F_e 와 다르게 될 것이다. 실제 q축 전류와 추력상수에 의해 추력 F_e 는 식 (8)로 표현된다.

$$F_e = K_f i_{qs}^{r*} \quad (8)$$

실제 축과 제어 축에서의 q축 전류는 식 (9)와 같은 관계가 성립된다.

$$i_{qs}^{r*} = \hat{i}_{qs}^r \cos \Delta\theta \quad (9)$$

그러므로 실제로 발생하는 추력은 다음과 같이 나타내게 된다.

$$F_e = K_f \hat{i}_{qs}^{r*} \cos \Delta\theta = F_e^* \cos \Delta\theta \quad (10)$$

위에서 보듯이 실제 자극위치와 추정된 자극위치 사이의 차이 ($\Delta\theta = \theta^* - \hat{\theta}$)가 0이 된다면 실제추력과 지령추력은 같은 값을 가지게 된다.

2.2.2 지령추력과 위치

그림 4는 자극의 초기위치 추정을 위한 추력 지령을 보여준다. 이동자의 위치가 초기위치로 되돌아 오게 하기 위하여 추력 지령의 평균값은 0이 되어야 한다.

그러므로

$$t_2 = 2t_1 + \Delta t \quad (11)$$

이 만족되어야 한다.

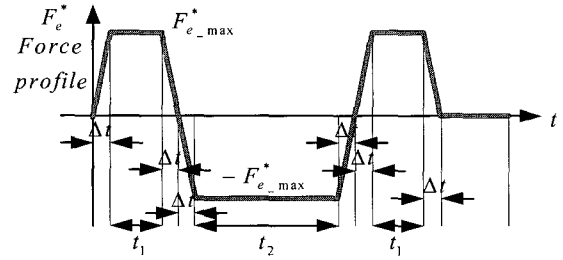


그림 4 지령추력
Fig. 4 Force reference

만약 실제 축과 제어 축 사이의 각 위치의 차이 ($\Delta\theta = \theta^* - \hat{\theta}$)가 0이 라면 정격 추력지령과 그때의 이동자의 속도 및 위치의 파형은 그림 5와 같게 된다. 이때 속도와 위치의 최대 값은 각각 V_{max}^* , P_{max}^* 로 나타낸다.

또한 실제 축과 제어 축 사이에 각 위치의 차이가 있다면 그림 6에서 보는 것과 같이 실제로 나타나는 추력은 지령 추력에 비하여 감소한다.

그리고 속도의 최대 값과 위치의 최대 값 역시 감소된다.

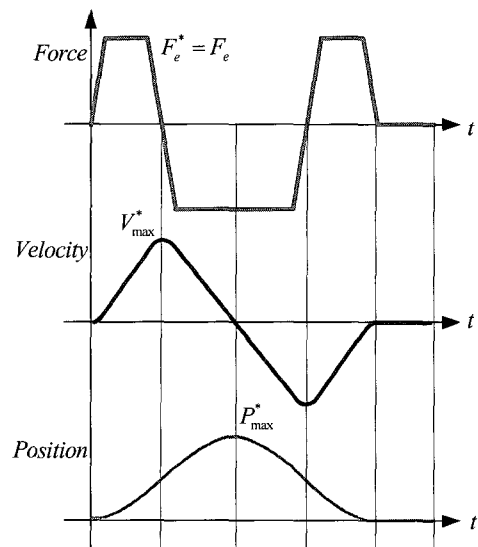


그림 5 각 위치의 차이가 0 일 때의 속도와 위치 파형
Fig. 5 Mechanical behaviour when the angle error is zero

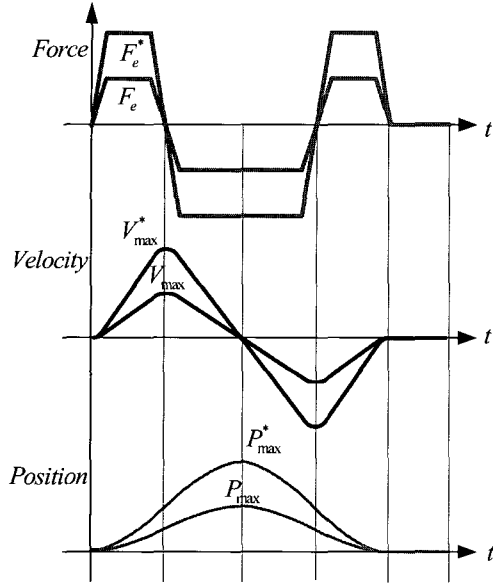


그림 6 각 차이가 0이 아닐 때 속도와 위치 파형
Fig. 6 when the angle error is not zero

기계 방정식은 식 (12)와 같이 주어진다.

$$M \frac{dv}{dt} + Bv + F_L = F_e \tag{12}$$

여기서, M : 질량
 B : 마찰 계수
 F_L : 부하 추력

질량과 마찰 계수가 상수이고 부하추력이 0이라면 기계방정식은 선형적인데 만약 그렇다면 추력은 다음 식 (13)으로 나타 낼 수 있다

$$F_e = F_e^* \cos \Delta\theta \tag{13}$$

결과적으로, 속도와 위치의 최대값은 각각 식 (14)와 식 (15)와 같다.

$$V_{\max} = V_{\max}^* \cos \Delta\theta \tag{14}$$

$$P_{\max} = P_{\max}^* \cos \Delta\theta \tag{15}$$

2.2.3 초기 자극위치 추정 방법

초기 자극위치를 추정하기 위하여 이 논문에서는 두 축 테스트를 실행하였다.

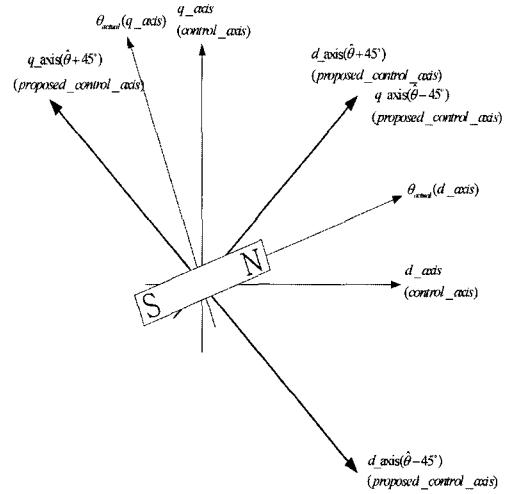


그림 7 두개의 지령 축
Fig. 7 Two reference axes

한 개의 축은 $\hat{\theta} + 45^\circ$ 이고 다른 하나의 축은 $\hat{\theta} - 45^\circ$ 에 기준을 둔 축이다. 여기서 $\hat{\theta}$ 는 추정 각이다.

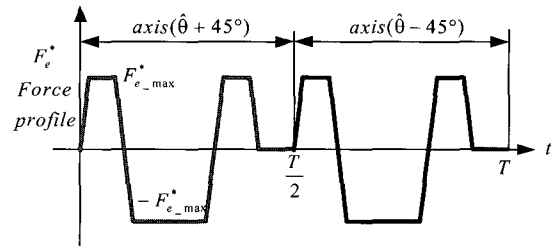


그림 8 제안된 알고리즘에 의한 추력지령
Fig. 8 Force reference used in the algorithm

$\hat{\theta} + 45^\circ$ 축에 기준해 발생하는 추력은 다음과 같다.

$$F_{e1} = F_e^* \cos(\theta^* - (\hat{\theta} + 45^\circ)) = F_e^* \cos(\Delta\theta - 45^\circ) \tag{16}$$

그리고 $\hat{\theta} - 45^\circ$ 축에 기준해 발생하는 추력은

$$F_{e2} = F_e^* \cos(\theta^* - (\hat{\theta} - 45^\circ)) = F_e^* \cos(\Delta\theta + 45^\circ) \tag{17}$$

과 같다. 위 추력 식에 의해 두 축 테스트에 의한 최대이동 거리는 다음과 같이 주어진다.

$$P_{\max 1} = P_{\max}^* \cos(\Delta\theta - 45^\circ) \tag{18}$$

$$P_{\max 2} = P_{\max}^* \cos(\Delta\theta + 45^\circ) \tag{19}$$

만약 제어 축과 실제 축이 같게 ($\Delta\theta = \theta^* - \hat{\theta} = 0$) 된다면 두 최대 이동거리는 같게 된다. 하지만 두 축이 같지 않고 차이 ($\Delta\theta \neq 0$)가 생기게 된다면 두 최대 이동거리는 다른 값이 되고 두 최대 이동거리의 차는 식 (20)과 같이 된다.

$$P_{\max 1} - P_{\max 2} = P_{\max}^* \cos(\Delta\theta - 45^\circ) - P_{\max}^* \cos(\Delta\theta + 45^\circ) = \sqrt{2}P_{\max}^* \sin(\Delta\theta) \quad (20)$$

이 두 최대 이동거리의 차는 실제 축과 제어 축 사이의 각 차이에 대한 정보를 가지고 있다.

식 (20)에서 $\Delta\theta$ 가 매우 작다면 이 식은 식 (21)과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$P_{\max 1} - P_{\max 2} \approx \sqrt{2}P_{\max}^* \Delta\theta \quad (21)$$

이상에서 추력 지령 반주기 마다 측정된 최대이동거리를 추력 지령 한주기 마다 PI제어 하여 오차를 0으로 가게 하면 $\Delta\theta$ 는 0으로 되고 추정된 $\hat{\theta}$ 는 실제 위치 θ^* 를 따라 가게 된다.

이와 같이 제안한 자극 초기위치 추정 알고리즘을 블록도로 나타내면 그림 9와 같다.

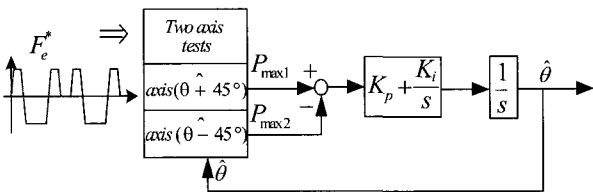


그림 9 제안된 알고리즘의 전체 블록도
Fig. 9 Algorithm for estimating the initial pole position

2.2.4 시뮬레이션 분석 및 결과

표 1 영구자석 선형동기전동기의 파라메타
Table 1 Parameters of PMLSM

정격 추력	511[N]
정격 전류	6.83[A, rms]
추력 상수	74.88[N/Arms]
극 간격	30[mm]
질량	9.2[kg]
상 인덕턴스	2.9[mH]
상 저항	1.4[Ω]

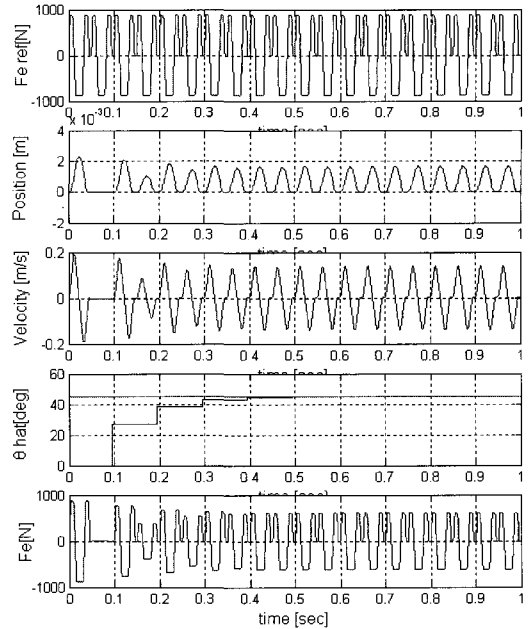


그림 10 실제 각이 45°일 때 시뮬레이션 파형
Fig. 10 Simulation result when the real angle is 45°

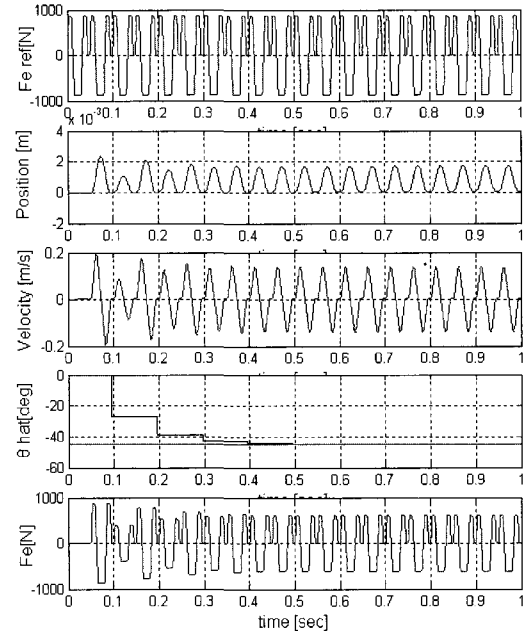


그림 11 실제 각이 -45°일 때 시뮬레이션 파형
Fig. 11 Simulation result when the real angle is -45°

제안된 선형동기 초기 자극 위치 추정 알고리즘의 실현가능성을 증명하기 위해 매트랩-시뮬링크를 이용하여 시뮬레이션을 실행하였으며 사용된 파라메타는 표

1과 같다. 이것은 실제 실험에서 사용된 영구자석 선형전동기의 파라메타와 동일하다.

그림 10과 그림 11은 각각 실제 각이 45°와 -45°일 때의 시뮬레이션 결과이다.

위에서부터 추력 지령, 이동자의 위치, 속도, 추정된 각, 실제추력을 나타낸다. 시뮬레이션에서 제안된 알고리즘은 0.5초 내에 실제위치를 추정하고 있다.

그리고 정상상태 오차가 0.03°이하이다. 이는 제안된 알고리즘의 타당성을 보여주는 것이다.

2.2.5 실험 결과

실험은 위의 시뮬레이션과 같은 파라메타를 가진 영구자석 선형동기전동기를 사용하였다. 그리고 그림 12에서 보는 것과 같이 실험 장치를 구성하여 실험 하였다.

그림 13과 그림 14는 각각 실제 각이 45°와 -45°일 때의 실험 결과를 보여주고 있다.

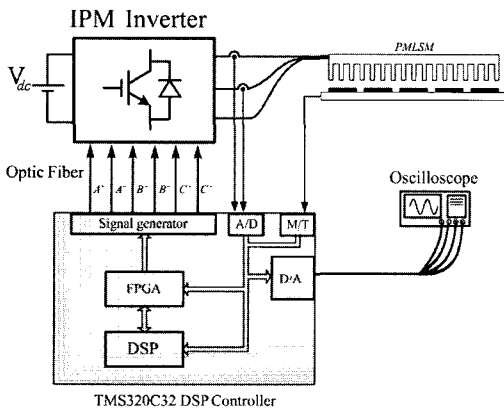


그림 12 영구자석 선형동기전동기의 실험장치 구성
Fig. 12 Experimental setup

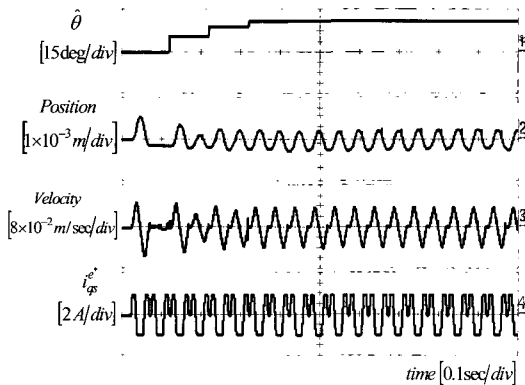


그림 13 실제 각이 45°일 때 실험 파형
Fig. 13 Experimental result when the real angle is 45°

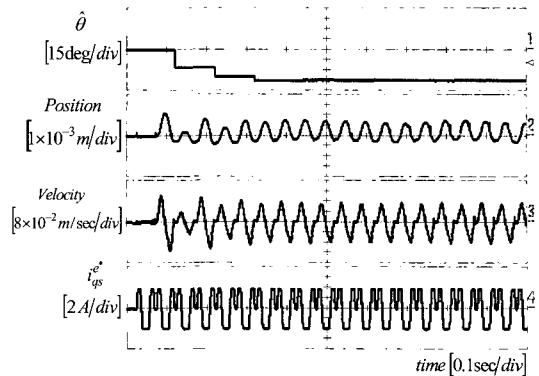


그림 14 실제 각이 -45°일 때 실험 파형
Fig. 14 Experimental result when the real angle is -45°

그림 13과 그림 14는 위에서부터 추정된 각, 이동자의 위치, 속도 그리고 q축 전류 지령을 보여주고 있다. 실제 실험에서도 시뮬레이션과 비슷하게 0.3초 이내로 실제위치를 추정하는 것을 볼 수 있다.

또한 수mm의 작은 이동으로 실제 위치를 추정하는 것을 확인하였다.

이는 제안된 알고리즘이 효과적이라는 것을 보여주고 있다.

3. 결론

본 논문은 자극 센서를 사용하지 않고 영구자석 선형동기전동기의 초기 자극위치를 추정하는 알고리즘을 제시하였다. 이 알고리즘은 전동기 파라미터의 사용 없이 두 제어 축에 같은 추력 지령을 인가하여 각 제어 축에 의해서 발생하는 이동거리의 최대 값을 관측하고 관측된 최대 위치 변위의 오차를 PI 제어함으로써 초기 자극 위치를 빠르고 정확하게 찾는 것이다. 또한 제안된 알고리즘은 시스템 구현이 아주 간단하고 추가적인 하드웨어 없이 단지 1개의 PI 제어기를 이용해 초기 자극의 위치를 추정할 수 있다. 시뮬레이션과 실험을 통하여 실제 초기 각을 추정하는 것을 확인하였다. 실험결과에서 볼 수 있듯이 제시한 초기 자극위치 추정알고리즘은 0.3초 이내로 자극의 실제위치를 추정함으로써 그 응답 특성이 빠르고 정상상태 오차가 무시할 수 있을 정도로 작을 뿐 아니라 전동기의 이동자가 수mm이하로 작게 움직임으로써 실제 자극위치를 추정하는 것을 확인하였다. 제안된 알고리즘은 기존의 방법과 달리 파라메타에 둔감하고 작은 이동으로 초기위치를 추정할 수 있어서 실제 산업현장 등에 응용이 가능할 것으로 기대된다.

이 논문은 2001년도 경북대학교의 연구비에 의하여 연구되었음.

This research was supported by Kyungpook National University Research Fund, 2001.

참 고 문 헌

[1] R. Wu, G. R. Slemon "A permanent magnet motor drive without a shaft sensor", Industry Applications, IEEE Transactions on, Volume: 27 Issue: 5, Sept.~Oct. 1991. pp. 1005~1011.

[2] N. Matsui and M. Shigyo "Brushless DC motor-control without position and speed sensors," Industry Applications, IEEE Transactions on , Volume: 28 Issue: 1, Jan.~Feb. 1992. pp. 120~127. IA, 1992.

[3] Ostlund and M. Brokemper "Sensorless rotor-position detection from zero to rated speed for an integrated PM synchronous motor drive," Industry Applications, IEEE Transactions on , Volume: 32 Issue: 5, Sept.~Oct. 1996. pp. 1158~1165IA, 1996.

[4] Jang Mok Kim; Seog-Joo Kang; Seung-Ki Sul "Vector control of interior permanent magnet synchronous motor without a shaft sensor", Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1997. APEC '97 Conference Proceedings 1997., Twelfth Annual , Volume: 2, 23~27 Feb. 1997. pp. 743~748 Vol.2.

[5] Schmidt, P.B.; Gasperi, M.L.; Ray, G.; Wijenayake, A.H. "Initial rotor angle detection of a nonsalient pole permanent magnet synchronous machine" Industry Applications Conference, 1997. Thirty-Second IAS Annual Meeting, IAS '97., Conference Record of the 1997 IEEE , Volume: 1, 5~9 Oct. 1997. pp. 459~463 Vol.1.

[6] T. Noguchi, K. Yamada, S. Kondo, and I. Takahas-hi "Initial rotor position estimation method of sensorless PM synchronous motor with no sensitivity to armature resistance", Industrial Electronics, IEEE Transactions on , Volume: 45 Issue: 1, Feb. 1998. pp. 118~125 IE, 1998.

[7] S. Nakashima, Y. Inagaki, and I. Miki "Sensorless initial rotor position estimation of surface permanent-magnet synchronous motor", Industry Applications, IEEE Transactions on , Volume: 36 Issue: 6, Nov.~Dec. 2000 pp. 1598~1603.

[8] Jung-Ik Ha; Ide, K.; Sawa, T.; Seung-Ki Sul "Sensorless position control and initial position estimation of an interior permanent magnet motor", Industry Applications Conference, 2001. Thirty-Sixth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2001 IEEE , Volume: 4, 30 Sept.-4 Oct. 2001. pp. 2607~2613 Vol.4.

[9] Tae-Woong Kim; Watanabe, J.; Sonoda, S. "New Initial Pole Position Estimation of Surface PM-LSM Using Reference Currents". Industry Applications Conference, 2001. Thirty-Sixth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2001 IEEE , Volume: 2, 30 Sept.~4 Oct. 2001 pp. 821~828 Vol.2.

[10] Matsui, N.; Takeshita, T. "A novel starting method of sensorless salient-pole brushless motor" Industry Applications Society Annual Meeting, 1994., Conference Record of the 1994 IEEE, 2-6 Oct. 1994 pp. 386~392 Vol.1.

[11] French, C.; Acarnley, P. "Control of permanent magnet motor drives using a new position estimation technique" Industry Applications, IEEE Transactions on , Volume: 32 Issue: 5, Sept~Oct. 1996. pp. 1089~1097.

[12] A. B. Kulkarni and M. Ehsani "A Novel Position Sensor Elimination Technique for the Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive." IEEE Trans. on Ind. Appl. Vol~28, No.1, pp. 144~150, 1992.

[13] Matsui, N.; Takeshita, T.; Yasuda, K. "A new sensorless drive of brushless DC motor" Industrial Electronics, Control, Instrumentation, and Automation, 1992. 'Power Electronics and Motion Control', Proceedings of the 1992 International Conference on, 9~13 Nov. 1992. pp. 430~435 Vol.1.

[14] Matsui, N. "Sensorless PM brushless DC motor drives". Industrial Electronics, IEEE Transactions on , Volume: 43 Issue: 2, April 1996 pp. 300~308.

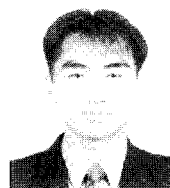
[15] Matsui, N.; Takeshita, T. "A novel starting method of sensorless salient-pole brushless motor" Industry Applications Society Annual Meeting, 1994., Conference Record of the 1994 IEEE, 2~6 Oct. 1994 pp. 386~392 Vol.1.

[16] "전기기기제어론" 저자 설승기, 도서출판 브레인 코리아, 2002.

저 자 소 개

윤원일(尹元一)

1974년 1월 10일생. 1999년 대구대 물리학과 졸업. 현재 경북대 대학원 전기공학과 석사과정.





이영호(李榮鎬)

1975년 5월 26일생. 2001년 경북대 전기공학과 졸업. 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 LG전자 근무.



최종우(崔鐘宇)

1969년 2월 25일생. 1991년 서울대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 경북대 전자전기공학부 조교수. 당 학회 편집위원.



김흥근(金興根)

1956년 4월 24일생. 1980년 서울대 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1990년~1991년 미국 Univ. of Wisconsin~Madison 방문교수. 현재 경북대 전자전기공학부 교수.