

영구자석 선형동기전동기의 초기각 추정 알고리즘

이영호*, 최종우, 김흥근
경북대학교

Algorithm for a Initial Pole Position Estimation of PMLSM

Young-Ho, Lee, Jong-Woo Choi, and Heung-Geun Kim
Kyungpook University

ABSTRACT

This paper explained algorithm for a initial pole position estimation of a permanent magnet linear synchronous motor(PMLSM). Generally this motor is considered initial pole position with a position sensor such as incremental encoder for the precise initial pole position estimation and high performance. But this is based on the principle that the initial pole position is accomplished by the PI controller using the maximum values of a position error generated by the new proposed two reference frames and also by using a rated force for input. the proposed algorithm does not utilize the general methods such as impedance ratio, EMF and using the magnetic saturation. In other words, this can be applied without respect to variety of the motor structure because of insensitivity to the motor parameters. In conclusion, simulation results are presented to confirm performance of initial pole position estimation method.

1. 서 론

유도전동기와는 달리 동기전동기와 선형전동기는 기동 시 부드러운 출발과 정확한 서보 드라이브를 위해서 또한, 에너지절약과 고효율을 얻기 위해 적절한 제어방법이 필요한데 이러한 결과를 얻기 위해서는 회전자 위치의 정확한 위치정보를 알아내는 것이 서보전동기에서는 필수적이다. 그러나 산업계에서는 저비용과 콤팩트한 사이즈를 요구하므로 대체로 비용이 비싼 센서의 부착은 꺼리고 있는 상황이다. 특히 영구자석 선형전동기는 비싼 폴 센서가 요구되지만 이것 또한 먼지, 열, 노이즈 그리고 기계적인 진동에 쉽게 취약함을 들어내어 잘못된 위

치를 읽는 상황을 초래할 수가 있다. 또한 폴 센서의 정확한 위치를 알지 못할 경우 충분한 토크를 얻을 수 없어 시스템의 불안정을 초래하거나 기동시 전동기가 잘못된 방향으로 움직여서 제어자체가 깨어지는 상황을 불러일으킬 수 있다.

최근 들어 영구자석 동기전동기의 회전자의 위치를 추정하는 방법들이 연구되고 있다. 그러나 대부분의 추정 방법들이 매입형 영구자석 동기전동기의 회전자 위치를 알아내는 방법이고 단지 몇몇 논문들만이 표면부착형 영구자석 동기전동기에 관련된 것이다. 그러나 후자의 경우 기본적으로 역기전력 성분을 이용한 방법과 자속포화를 이용한 방법들이 있지만 저속에서 역기전력 성분이 작을 경우 쉽게 추정하기가 곤란하다는 단점이 있다. 근래의 연구에서 자속포화 방법이 주목을 받고 있지만 이 또한 고정자코어와 고정자슬롯의 형태에 쉽게 달라지며 이러한 방법들은 코깁과 같은 외부의 교란이 있을 경우 추정 정확도가 쉽게 영향을 받으므로 문제점을 가지고 있다. [1~9]

본 연구에서는 지금까지 논의된 방법들에서 자주 사용되었던 전동기 파라미터의 사용 없이 단지 PI 제어기를 추가함으로써 별도의 하드웨어의 추가 없이 단지 1, 4상함에 토크지령을 인가하여 각 제어축에 의해서 발생하는 이동거리의 최대값을 계산하여 위치 변위에 대한 오차의 크기를 PI제어함으로써 실제 폴의 위치를 정확히 추정하는 방법을 제시하며 시뮬레이션 및 실험을 통하여 제시된 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 초기각 추정의 기본 원리

초기각 추정의 기본 원리는 그림 1과 같이 두 개의 새로운 d, q제어축을 새롭게 정의한다. 정격주력(F_{e_ref})을 시스템에 인가하여 제안한 두 제어축

에 의해 이동한 위치의 최대 변위를 계산하여 PI제어기를 거침으로써 $\hat{\theta}$ 의 정보를 알아낸다. 정격추력을 각 한주기에 걸쳐 제안한 두 제어축에 번갈아 인가함으로써 위치의 최대값을 메모리에 기억한 뒤 두 주기에 한번씩 PI제어를 수행함으로써 오차를 줄여가는 방법이다.

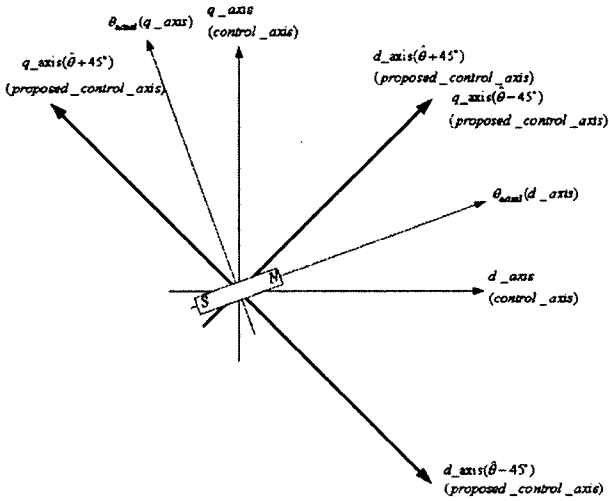


그림 1 초기각 추정을 위한 기준좌표계
Fig. 1 Reference frames for a initial pole position estimation

2.1.1 기준 정격추력의 기본 패턴

정격추력의 한 주기는 그림 2와 같이 함으로써 이동거리를 최소화하고 높은 추정 정확도를 얻을 수 있다.

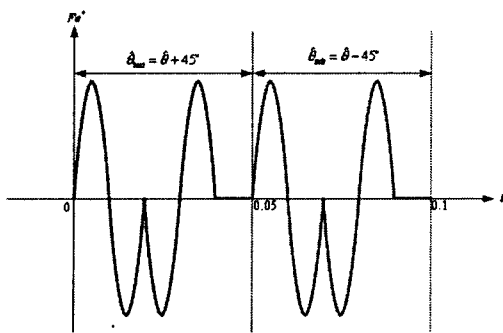


그림 2 기준 정격 추력의 기본 패턴(Fe^*)
Fig. 2 Basic Pattern of The Rated Force Reference(Fe^*)

아래의 그림 3과 같이 전동기의 실제축(θ^*)과 제어축($\hat{\theta}$)이 같다면 즉 $\theta^* = \hat{\theta}$ 이면 정격추력(Fe^*)과 실제추력(Fe)은 같은 값을 가질 것이며 그 때 전동기의 이동 거리는 최대가 될 것이다.

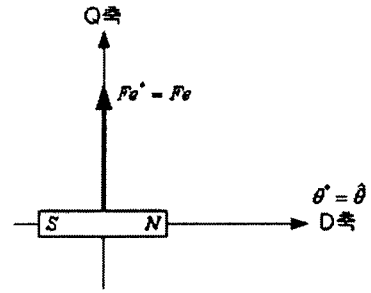


그림 3 기준 정격추력의 기본 패턴(Fe^*)
Fig. 3 Basic Pattern of The Rated Force Reference(Fe^*)

2.2 제안된 초기각 추정 방법

새로운 두 개의 제어축인 $\hat{\theta}_{init}$ 를 각각 다음과 같이 정의 한다.

$$\hat{\theta}_{init} = \hat{\theta} + 45^\circ \quad (1)$$

$$\hat{\theta}_{init} = \hat{\theta} - 45^\circ \quad (2)$$

만약 $\hat{\theta}$ 의 초기값이 $\hat{\theta} = 0^\circ$ 이라면 제어축은 각각 다음과 같다.

$$\hat{\theta}_{init} = +45^\circ \quad (3)$$

$$\hat{\theta}_{init} = -45^\circ \quad (4)$$

2.2.1 실제 폴의 위치가 θ^* 일 때 $\hat{\theta}$ 의 추정과정

아래의 그림 4와 같이 실제 폴의 위치가 다음과 같을 때 초기값이 $\hat{\theta} = 0^\circ$ 이라면 제어축의 초기값은 식 (3), (4)와 같이 됨을 알 수가 있고 그 때의 발생 추력은 $Fe_1 \gg Fe_2$ 임을 이해할 수 있다.

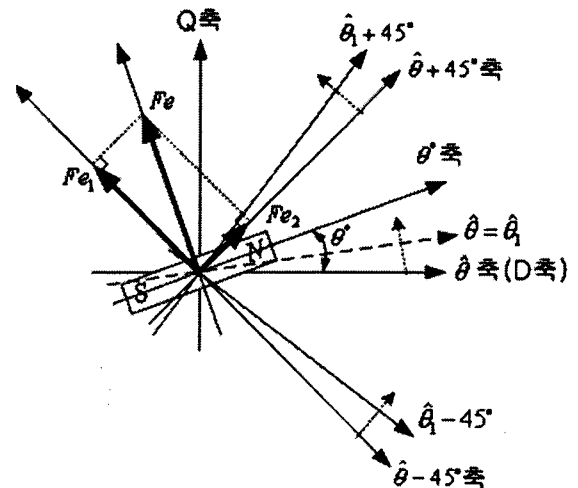


그림 4 $\hat{\theta} = \hat{\theta}_1$ 일 때의 제어축과 발생추력
Fig. 4 Control axes and generalized force when $\hat{\theta} = \hat{\theta}_1$

PI제어를 초기 한번 수행했을 때 새롭게 갱신된 $\hat{\theta}$ 를 $\hat{\theta}_1$ 라고 하면 그 때의 제어축은 아래 식과 같다.

$$\hat{\theta}_{init} = \hat{\theta}_1 + 45^\circ \quad (5)$$

$$\hat{\theta}_{init} = \hat{\theta}_1 - 45^\circ \quad (6)$$

PI제어를 수행한 후 갱신되는 $\hat{\theta}$ 를 $\hat{\theta}_{new}$ 라 하고 한 주기 이전에 발생한 $\hat{\theta}$ 를 $\hat{\theta}_{old}$ 라 하면 실제 전류제어기에 들어가는 $\hat{\theta}_{init}$ 는 다음과 같다.

$$\hat{\theta}_{init} = \hat{\theta} - 45^\circ = (\hat{\theta}_{new} + \hat{\theta}_{old}) - 45^\circ \quad (7)$$

$$\hat{\theta}_{init} = \hat{\theta} - 45^\circ = (\hat{\theta}_{new} + \hat{\theta}_{old}) - 45^\circ \quad (8)$$

$$\hat{\theta} = \hat{\theta}_{new} + \hat{\theta}_{old} \quad (9)$$

따라서 $\hat{\theta}$ 가 $\hat{\theta} \approx \theta^*$ 에 가까워짐에 따라서 F_{e1} 와 F_{e2} 는 거의 같은 추력을 가질 것을 예측할 수 있다. 즉 각각의 추력은 다음과 같이 될 것이다.

$$F_{e1} \approx F_{e2} \quad (10)$$

2.2.2 실제 폴의 위치가 $-\theta^*$ 일 때 $\hat{\theta}$ 의 추정과정 아래의 그림 5와 같이 실제 폴의 위치가 $-\theta^*$ 라 가정할 때 $F_{e1} \ll F_{e2}$ 일 것이고 $\hat{\theta}$ 가 $\hat{\theta} \approx -\theta^*$ 에 가까워짐에 따라서 F_{e1} 와 F_{e2} 는 역시 거의 같은 추력을 가질 것을 예측할 수 있다. 즉 식(10)과 같은 것이다.

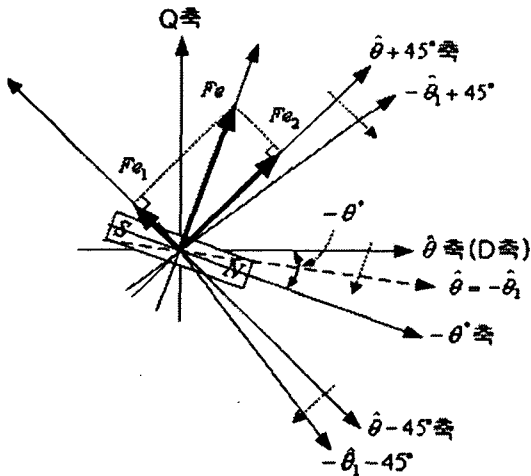


그림 5 $\hat{\theta} = -\hat{\theta}_1$ 일 때의 제어축과 발생추력
Fig. 5 Control axes and generalized force when $\hat{\theta} = -\hat{\theta}_1$

2.2.3 실제 폴의 위치가 θ^* 일 때 $\hat{\theta}$ 의 전체 추정과정

앞에서 설명한 초기값 추정 방법을 종합해 보면 전체 흐름은 그림 6으로서 설명할 수가 있다.

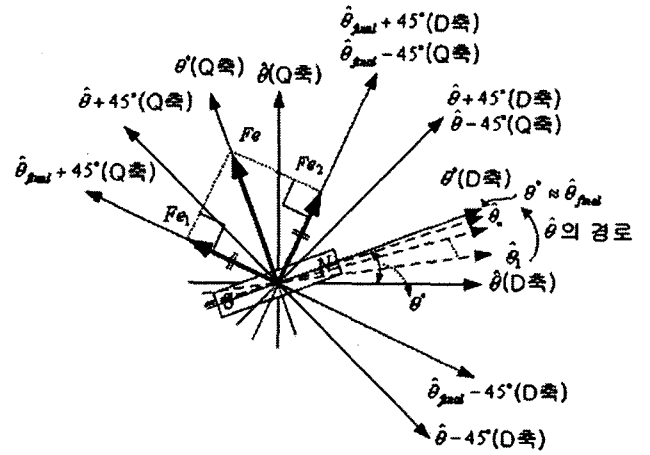


그림 6 초기값 추정 전체경로
Fig. 6 Total Estimation Route of Proposed Initial Pole Position

초기값이 $\hat{\theta} = 0^\circ$ 이라고 가정했을 때 각 제어축에서 얻은 이동거리의 최대값의 오차를 PI제어함으로써 결과적으로 그림 6과 같이 $\hat{\theta}$ 는 $\theta^* \approx \hat{\theta}_{final}$ 와 같이 되고 각 제어축에서 발생하는 추력 또한 같은 값으로 된다 ($F_{e1} \approx F_{e2}$)

이것을 일반화하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_1 &= \hat{\theta}_1 + 0^\circ, \\ \hat{\theta}_2 &= \hat{\theta}_{new} + \hat{\theta}_1 \\ \hat{\theta}_3 &= \hat{\theta}_{new} + \hat{\theta}_2 \\ &\vdots \\ \hat{\theta}_{final} &= \hat{\theta}_{new} + \hat{\theta}_n \\ \theta^* &\approx \hat{\theta}_{final} \end{aligned} \quad (11)$$

2.2.4 제안된 초기값 추정 블록도

지금까지 설명한 제안된 초기값 추정 알고리즘을 블록도로 나타내면 다음과 같다.

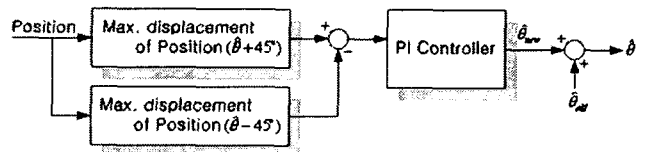


그림 7 제안된 초기값 추정 블록도
Fig. 7 Block diagram of Proposed Initial Pole Position Estimation

2.3 시뮬레이션 및 결과

그림 8은 제안한 알고리즘이 포함된 영구자석 선형동기전동기의 전체 제어시스템 블록도이다.

기존의 전류제어기에 제안한 알고리즘 블록만을 추가한 형태이므로 부가적인 하드웨어 없이 시뮬레이션 및 실험 모두 같은 제어 구조를 사용할 수가 있다.

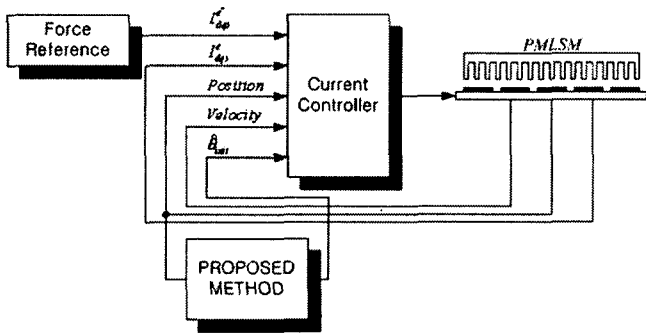


그림 8 제어시스템 블록도
Fig. 8 Block diagram of Control System

표 1에서는 시뮬레이션에 사용된 영구자석 선형 동기전동기의 정격 및 상수를 나타내었다.

표 1 선형전동기의 정격 및 상수
Table 1 Rates and Parameters of Linear Motor

정격추력	877.25[N]	관성질량(M)	40[kg]
정격전류	12.32[A]	상 인덕턴스(Ls)	2.1[mH]
추력상수	71.23[N/Arms]	상 저항(Rs)	1.2[ohm]
폴간격	0.03[m]		

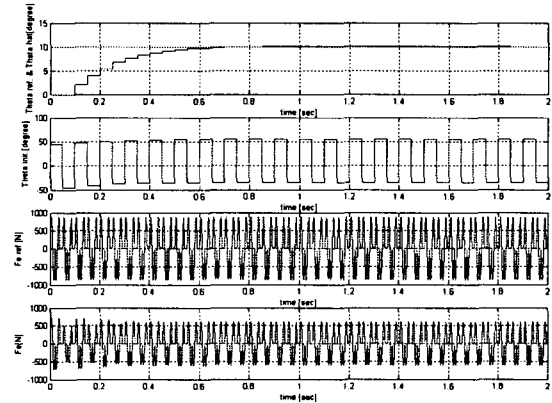
제안한 알고리즘 블록과 입력 기준추력은 매트랩-시뮬링크의 S-Function을 이용하여 C 프로그래밍 언어로 구현하였다.

전류제어기의 제어 주파수는 10KHz로 구성하였으며 전류제어기의 출력은 공간벡터PWM을 이용하였으며 최소거리 과변조기법을 이용하여 그 출력을 제한하였다.

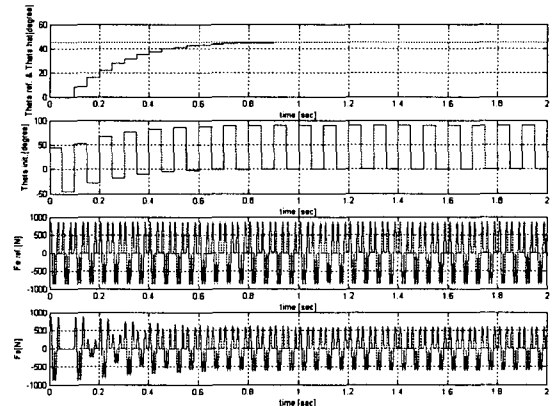
시뮬레이션은 $\hat{\theta}_{init} = \hat{\theta} \pm 10^\circ$ 와 $\hat{\theta}_{init} = \hat{\theta} \pm 45^\circ$ 로 구분하여 실시하였다.

그림 8에서 입력부분인 기준추력(Force Reference)은 표1에 표현된 것처럼 정격추력(877.25[N])을 인가하였으며 속도와 위치의 부드러운 이동을 위해서 시뮬레이션의 실행시 기준추력은 정현파 형태의 파형을 한 주기로 하였다. 물론 기준추력은 구형파나 삼각파 그리고 사다리꼴 파형 어느 것이든 무관하다. 또한 기준추력의 한주기 주파수는 전류제어기의 대역폭(3,000[rad/s])의 약 1/10에 해당하는 50Hz로 하여 주파수 대역에 크기

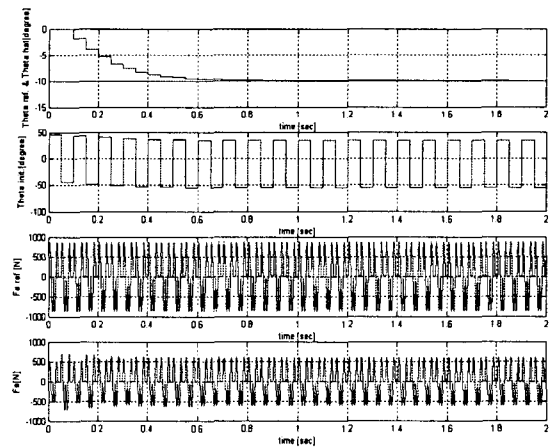
와 위상의 영향이 없도록 하였으며 무부하 조건에서 시뮬레이션을 실시하였다.



(a) $\theta^* = +10^\circ$ 일 때 $\hat{\theta}$ 와 추력(F_e)

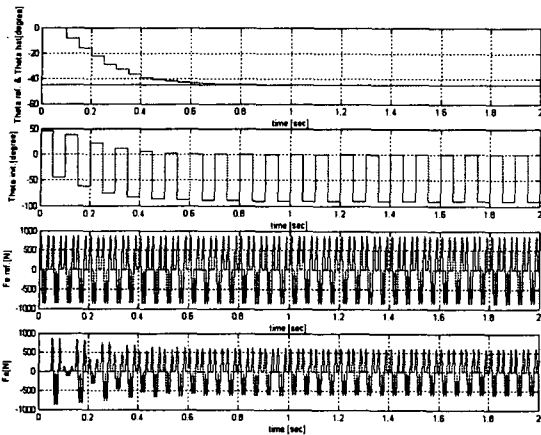


(b) $\theta^* = +45^\circ$ 일 때 $\hat{\theta}$ 와 추력(F_e)



(c) $\theta^* = -10^\circ$ 일 때 $\hat{\theta}$ 와 추력(F_e)

참 고 문 헌



(b) $\theta^* = -45^\circ$ 일 때 $\hat{\theta}$ 와 추력(F_e)

[1] θ^* 와 $\hat{\theta}$, [2] $\hat{\theta}_{init}$, [3] F_e^* , [4] F_e (순서대로)

그림 9 초기각 추정 파형

Fig. 9 Waveform of Initial Pole Position Estimation

3. 결 론

본 논문에서는 위치 센서 없이 선형전동기의 초기 폴의 위치를 효과적으로 추정하는 알고리즘을 제시하였다. 기존의 회전형 영구자석 동기전동기에서 초기각 추정을 위해 제시한 임피던스 비율을 이용한 방법[9]과 EMF를 이용한 방법 그리고 자속포화를 이용한 방법[1], [3~8]과 달리 전동기의 파라미터에 전혀 무관하며 시스템 구현이 매우 간단하고 추가적인 하드웨어 없이 단지 PI제어기를 이용해 초기각을 추정하는 방법을 제시하였으며 제안된 초기각 추정 알고리즘의 성능을 시뮬레이션을 통하여 분석하였다. 본 논문에서 제시한 알고리즘의 초기 폴의 위치를 추정하는 응답특성이 대략 1초 안으로 그 응답특성이 빠르고 정상상태에서 오차범위가 0.03도(0.0025mm)로 무시할 수 있을 정도의 아주 정확한 추정 특성을 가지고 있음을 확인 하였다.

제안한 알고리즘은 전동기의 파라미터를 전혀 필요로 하지 않고 초기 폴의 위치를 정확히 추정할 수 있어서 회전형 표면부착형 동기전동기 및 릴럭턴스 전동기 등에서 응용이 가능할 것으로 기대된다.

향후 본 논문에서 제시한 초기 폴의 위치를 추정하는 방법과 시뮬레이션을 바탕으로 실험을 통하여 본 논문에서 제안한 알고리즘의 신뢰성을 검증하고자 한다.

- [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. Page(s): 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. Page(s): 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. Page(s): 1158-1165 IA, 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, Proceedings 1997*, Twelfth Annual, Volume: 2, 23-27 Feb. 1997. Page(s): 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. Page(s): 459-463 vol.1
- [6] T. Noguchi, K. Yamada, S. Kondo, and I. Takahashi "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. Page(s): 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 Page(s): 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. Page(s): 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 Page(s): 821-828 vol.2