

## Hall Sensorless 선형 영구자석 동기 전동기의 초기각 보정에 관한 연구

이진하, 박철우, 최철, 김철우  
부산대학교 전기공학과

### A study of Initial Angle Adjustment on Hall Sensorless Linear Permanent Magnet Synchronous Motor

Chin-Ha Lee, Chul-Woo Park, Cheol Choi and Cheol-U Kim  
Pusan National Univisity

ABSTRACT - This paper describes the initial angle adjustment method on Hall Sensorless Linear Permanent Magnet Synchronous Motor. The implementation of the controller is designed on the DSP TMS320C32 board. PMLSM is operated by using 4-point absolute positions profile with each velocity, acceleration and deceleration. To achieve Hall Sensorless characteristics, Moving Coil Type PMLSM is used and initial angle adjustment algorithm is adapted.

#### 1. 서 론

회전형 영구자석 동기 전동기를 직선운동 시스템에 적용하기 위해서는 벨트, 랙피니언, 볼스크류등의 부가장치를 구성해야 하지만 가동 코일형 선형 영구자석 동기 전동기(PMLSM)는 직접 구동식이므로 부가적인 장치가 필요없게 된다. 또한 구동부가 비접촉식이므로 소음 및 마모가 없는 장점을 가지고 있으며 선형 운동을 필요로 하는 반도체 장비를 중심으로 수요가 점차 증가하고 있는 추세이다. 그러나 선형 영구자석 동기 전동기가 갖는 제어용 신호는 전원,UVW,ABZ가 있고, 특히 가동 코일형인 경우 코일에 Hall Sensor를 취부하는데 어려움이 많으며, 또한 이 신호를 제어 시스템에 전달하기 위해서는 고가의 가동형 전선을 사용해야 한다. 따라서, 본 논문에서는 Hall Sensorless에 의한 초기각 보정 알고리즘을 적용하여 코일의 Hall Sensor 작업 및 고가의 신호선 처리 작업 문제를 해결 하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 PMLSM의 수학적 모델링<sup>[1]</sup>

Sinewave형 선형 영구자석 동기 전동기의 경우 회전형 동기 전동기(PMSM)와 기본적인 제어 이론 및 모델링은 거의 동일하며 그림1.과 같이 d-q 동기좌표계에서 등가화 할 수 있다. 또한 전압 방정식은 동기 각속도에 관한 식(1)~(2)로 나타낼 수 있다. 식(3)~(4)는 각각 동기 좌표계 d-q축에 유기

되는 자속을 나타내고 있다.

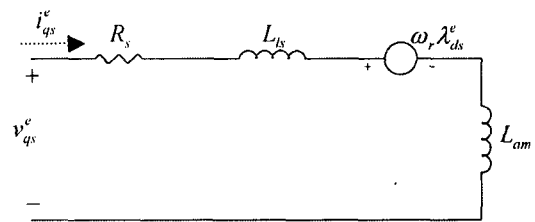


그림1. 동기 각속도로 표현된 동기좌표계상에서의 PMLSM 등가회로

$$v_{ds}^e = R_s i_{ds}^e + p \lambda_{ds}^e - \omega_r \lambda_{qs}^e \quad (1)$$

$$v_{qs}^e = R_s i_{qs}^e + p \lambda_{qs}^e + \omega_r \lambda_{ds}^e \quad (2)$$

$$\lambda_{ds}^e = L_s i_{ds}^e + \lambda_{PM} \quad (3)$$

$$\lambda_{qs}^e = L_s i_{qs}^e \quad (4)$$

여기서  $\omega_r$ : 동기 각속도,  $R_s$ : 1차측 저항,  $L_s (= L_{ls} + L_{om})$ : 1차측 인덕턴스,  $\lambda_{PM} (= L_{om} I_f)$ : 영구자석분 쇠교 자속,  $I_f$ : 영구자석의 동기 전류원이다.

일반적으로 선형 영구자석 동기 전동기의 전압 방정식은 실제 무버의 속도에 관한 식으로 표현되며, 또한 약제자제어 수행을 제외하면 자속분 전류가 필요 없으므로 d축 전류를 0으로 제어한다( $i_{ds}^e = 0$ ). 따라서 식(1)~(3)은 식(5)~(7)으로 표현되며 추력은 전기적인 입출력 관계를 나타내는 식(8)과 식(7)에 의해서 식(9)로 표현된다.

$$v_{ds}^e = -\frac{\pi}{\tau} u \lambda_{qs}^e \quad (5)$$

$$v_{qs}^e = r_s i_{qs}^e + L_s p i_{qs}^e + \frac{\pi}{\tau} u \lambda_{PM} \quad (6)$$

$$\lambda_{ds}^e = \lambda_{PM} \quad (7)$$

$$P = F v = \omega_{em} T = \omega_r \lambda_{ds}^e i_{qs}^e \quad (8)$$

$$F = \frac{3\pi}{2\tau} \lambda_{PM} \times i_{qs}^c \quad (9)$$

여기서  $u$  [mm/s] ( $= \omega r / \pi$ ): 무버의 속도,  $\tau$  [mm]: pole pitch,  $\omega r = \omega r$  [rad/s]이다.

## 2.2 Hall Sensor를 이용한 PMLSM 제어 시스템<sup>[2]</sup>

무빙 코일형의 선형 영구자석 동기 전동기의 경우 무빙 코일 내부에 역기전력 중심에 맞추어 Hall Sensor를 취부한다. 이는 초기 기동시에 무버 코일에 내장 처리된 Hall Sensor 신호를 이용하여 제어 시스템에서 무버의 초기위치 정보판별 Data 처리용으로 사용한다. 또다른 목적은 운전 중에 무버 위치변동에 따른 위치 Data 보정용으로 사용한다. 그림2는 Hall Sensor를 이용한 시스템의 역기전압, U상 Hall Sensor 신호, 전기각(Theta)을 측정된 파형이다. 그림3에는 무버의 초기위치 정보판별을 위한 UVW Hall Sensor 신호들의 벡터 테이블을 보였다.

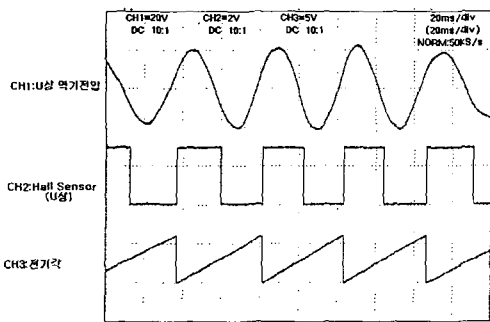


그림2. U상 역기전압, Hall Sensor 신호(U상) 및 전기각 파형

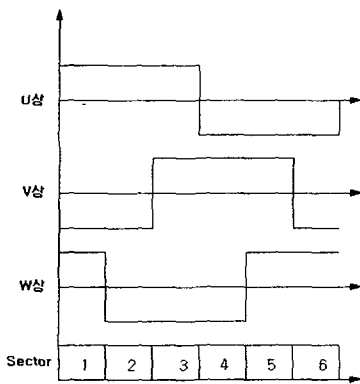


그림3. UVW Hall Sensor 벡터 테이블

그림 3의 벡터 테이블은 UVW 신호에 따라 전기각 1주기를 6구간(Sector)으로 나눌 수 있으며 1구간의 범위는 전기각 기준으로 60도가 되고, 초기 기동시에 중간값을 선정하는 방법으로 오차를 반으로 줄일 수 있으며, 이때의 토크는 정격대비하여 86.6%가 된다.

## 2.3 제안된 Hall Sensorless PMLSM 제어 시스템

그림 4는 초기각 설정단계(Stage1), 전기각 보정 처리단계(Stage2)에 관한 플로우 차트를 보였다.

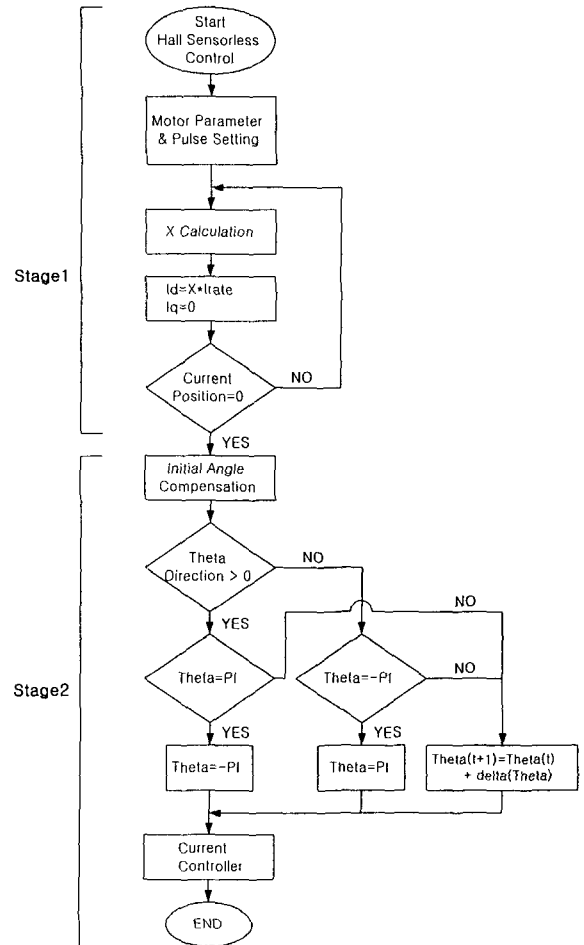


그림4. Hall Sensorless 초기각 설정 및 전기각 리셋 플로우 차트

### 2.3.1 Hall Sensorless 초기각 설정 제어 시스템

선형 영구자석 동기 전동기의 무버는 그림 4의 초기각 설정단계에 의해서, 코일에 동기 좌표계상의 d축으로 일정량의 전류를 인가하면 pole pair pitch 영역 내에서 인가한 전류와 반대되는 극성을 갖는 가장 전자력의 세기가 강한 위치로 이동하게 된다. 그리고 이동된 위치에서 초기각 보정에 의해 Closed Loop 제어로 들어감으로써 이동된 위치로부터 제어가 가능하게 된다. 이러한 위치는 pole pair pitch 내에 오직 한곳만이 존재하며 역기전압 U상의 정점이 된다. 여기서 중요한 것은 그림 4의 초기각 설정단계에 나타나 있는 미지의 X값을 선형 영구자석 동기 전동기의 특성에 맞게 선정하는 것이다. 그림 5는 1:1 관성부하에서 초기각 수행시 Open Loop 제어에 의한 d축 전류지령 이후, Closed Loop 제어에 의한 q축 전류 지령 파형이다.

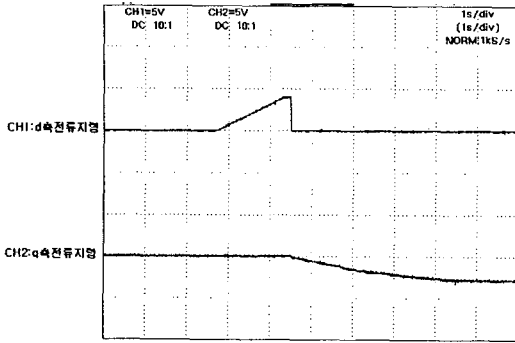


그림5. d축 전류 지령(Open Loop) 및 q축 전류 지령(Closed Loop) 파형

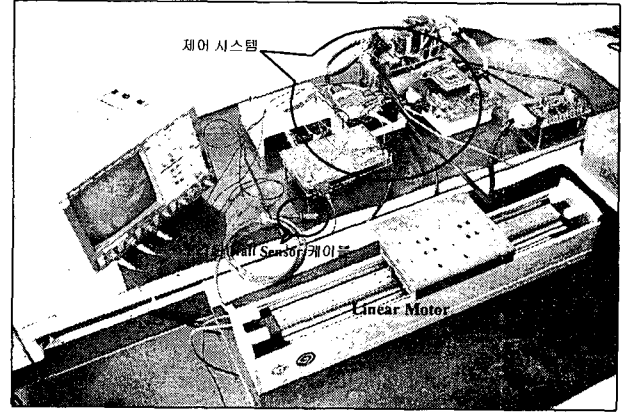


그림7. Hall Sensor 케이블을 분리한 실험 장치

### 2.3.2 Hall Sensorless 전기각 리셋 제어 시스템

2.2절에서와 같이 Hall Sensor 신호는 무버의 초기위치 정보 판별 목적과 위치 Data를 보정해주는 목적으로 사용된다. 일반적인 경우 전기각 리셋을 Hall Sensor 신호를 이용하여 하드웨어적으로 처리한다. 그림 4의 전기각 보정 처리단계에서는 소프트웨어적으로 전기각을 리셋하기 위한 플로우 차트를 나타내고 있다. 그림 6은 Hall Sensorless 제어 시스템에서의 U상 역기전압과 전기각 파형을 나타내고 있으며, U상의 (+)반전 시점에서 전기각의 리셋이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

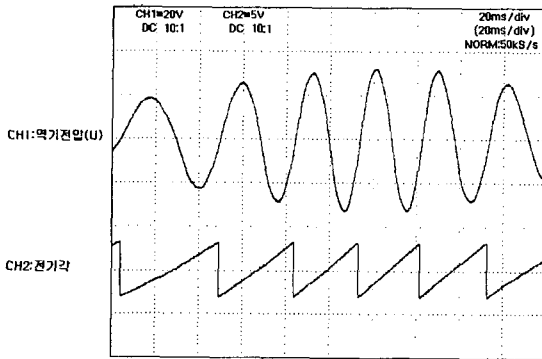


그림6. Hall Sensorless 제어 시스템에서의 역기전압 및 전기각 파형

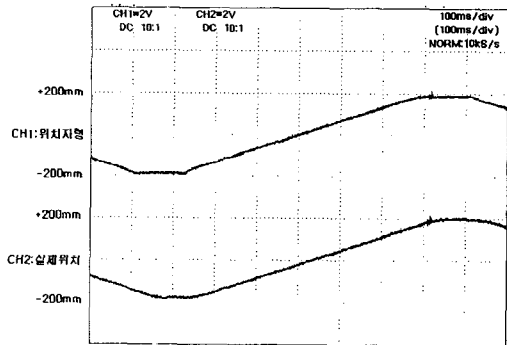
## 2.4 실험

### 2.4.1 실험 장치

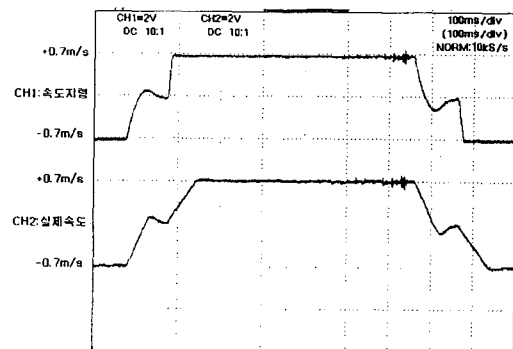
그림 7은 Hall Sensor 케이블을 분리한 상태에서 무빙 코일형 선형 영구자석 동기 전동기를 구동하기 위한 실제 실험 장치의 사진을 보여주고 있다. 또한 선형 영구자석 동기 전동기의 Linear scale encoder의 보호를 위해서 1,2차 절연회로를 구성하여 실험을 하였다.

### 2.4.2 실험 결과

실험은 무부하 상태와 1:1 관성부하 상태를 나누어 수행하였다. 그림 8은 무부하 상태에서의 지령치와 실제치에 대한 위치, 속도를 나타내고 있다. 그림 9는 1:1 관성부하에서의 지령치와 실제치에 대한 위치, 속도를 나타내고 있다.



(a) 위치 지령값, 실제값

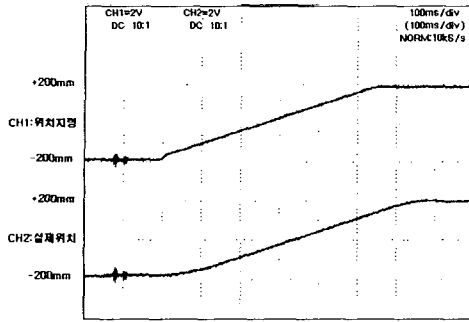


(b) 속도 지령값, 실제값

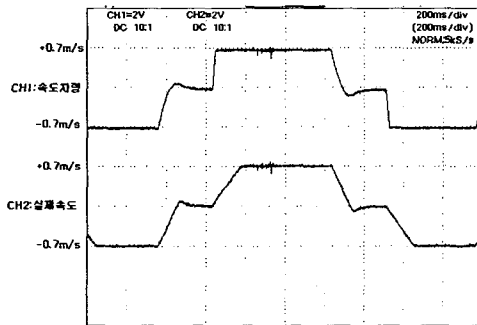
그림 8. 무부하시 운전시험

## 참 고 문 헌

- [1] I.Bolder And Syed A. Nasar, "Linear Electric Actuators And Generators", pp. 91~134.
- [2] 日本工業技術 센터 "리니아모터設計應用の 要占", pp. 135~189.
- [3] 서울대 박사학위 논문 "급가속용 선형 동기 전동기의 특성해석 및 최적설계", 1999. 8.



(a) 위치 지령값, 실제값



(b) 속도 지령값, 실제값

그림 9. 1:1 관성부하시 운전시험

[부록] 모터 사양

	단 위	값
정격추력( $F_{rate}$ )	N	73.2
정격전류( $I_{rate}$ )	$A_{rms}$	1.4
추력상수( $K_t$ )	$N/A_{rms}$	52.3
역기전력 상수	$V/(m/sec)$	34.9
Pole Pitch	mm	21
Phase resistance	$\Omega$	7.6
Phase inductance	mH	2.9
이동자 질량	kg	3

## 3. 결 론

앞서와 같이 Hall Sensorless 구동을 위한 전처리 작업을 두단계로 나누어 수행하였으며, 기존의 일반적인 방법에서는 초기 자극각 검출을 위해 Hall Sensor를 무버에 부착하여 이 신호를 가동코일을 통해 제어 장치에 접속 하였으나, 본 논문에서는 선형 영구자석 동기 전동기의 특성에 맞추어 적합한 전류를 인가하여 물리적으로 초기각을 설정하여 이때의 위치정보를 제어 시스템에 전달하였고, 운전시에는 소프트웨어적으로 전기각을 리셋 처리함으로써 Hall Sensorless 선형 영구자석 동기 전동기 구동을 수행 하였다.