2001년도 대한전기학회/대한전자공학회 시스템및제어분야 합동 추계학술대회 논문집 (2001.11.24)

반도체 제조장비용 Stage를 위한 1축 선형 브러시리스 DC 모터의 정밀 위치제어에 관한 연구

전영환*, 김지원**, 전진홍***, 전정우****, 강도현*****
한국전기연구원

A Study on Precision Position Control of 1 Axis Linear BLDC Motor for a Stage

Y.H. Chun*, J.W. Kim**, J.H. Jeon***, J.W.Jeon****, D.H. Kang*****
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - 일반적으로 반도체 제조 공정은 매우 복잡하고 다양한 공정들로 구성된다. 이러한 공정 중 stage 부분은 웨이퍼에 회로 패턴을 기입하기 위하여 웨이퍼를 미리 지정된 위치로 이송하는 공정으로 매우 높은 정밀도가 요구되고 있다. Stage에 대해서는 x, y, z축 뿐아니라 각 축에 대한 회전까지도 고려한 6축 제어가 수행되어야 한다. 본 논문에서는 stage에 대한 정밀제어의 기반기술로서 선형 BLDC 모터를 이용하여 1축 위치제어 시스템의 제어에 관하여 연구하였다. 선형 BLDC 모터의 이동중 발생하는 추력리플을 보상하여 제어기 설계시 선형 시스템으로 고려하여 제어기를 설계할 수 있도록 하는 방법을 제안하였으며, 실험을 통하여 1[μm]의 해상도를 갖는 위치검출 엔코더를 이용하여 5[μm]의 정밀도를 얻을 수 있었다.

1. 서 론

산업이 발달함에 따라 단순 반복이나 여러 악조건하의 일등은 인간을 대신하여 기계가 수행하게 되었다. 이에 따라 구동부에는 안정하고 되도록 소형이면서 토크가 상대적으로 큰 전동기가 요구되고 있다. 여러 가지 형태의 전동기 중에서 영구자석형 브러시리스 DC 모터는 제어의 간편성 때문에 고성능을 요구하는 시스템에 많이 사용되고 있다[1]. 그러나 BLDC 모터는 영구자석의 위치에 따라서 자속밀도가 변하고 이에 따라서 추력(thrust force) 리플(Ripple)이 발생하게 된다. 따라서 이러한 추력 리플을 보상하는 것이 BLDC 전동기의 정확한 제어를 위해서는 필수적이다. 기존의 연구에서는 BLDC 전동기의 역기전력을 측정하여 이를 보상하거나 BLDC 전동기의 구동 신호의 시퀀스를 조정하여 추력 리플을 보상하는 방법 등에 대한 연구가 진행되어 왔다[2,3]. 그러나 BLDC 전동기를 수학적 모델로 표시하는데 있어서 모델 내부에 추력리플이 비선형적인 요소로 포함되어 있기 때문에 일반적인 선형제어 기법을 적용하는데 어려운 점이 있다. 본 논문에서는 스트레인 게이지를 이용하여 BLDC 전동기의 추력을 영구자석의 상대위치 변화에 따라서 측정하고, 측정된 데이터를 이용하여 BLDC 전동기의 모델중 비선형 요소를 보상함으로서 BLDC 전동기의 수학적 모델을 일반적인 선형 모델로 고려하여 제어기를 설계할 수 있도록 하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법의 유효성을 입증하기 위하여 선형 BLDC 전동기를 이용한 위치 제어 시스템의 실험장치를 제작하고 제안된 방법을 적용하여 위치제어 실험을 수행하였다. 실험결과 1[μm] 해상도의 위치검출 센서를 이용하여 5[μm] 정밀도의 위치 제어를 구현하였다.

2. 본 론

2.1 BLDC 전동기의 수학적 모델

일반적으로 3상 BLDC 전동기는 DC 전동기와 유사하게 모델링 될 수 있다. 따라서 식 (1)과 같이 전기적인 부분의 수학적 모델을 표시할 수 있다.

$$\bar{v} = R\bar{i} + L\frac{d\bar{i}}{dt} + \bar{e} \tag{1}$$

여기서, $\bar{v} = [v_a\ v_b\ v_c]^T$, $\bar{i} = [i_a\ i_b\ i_c]^T$, $\bar{e} = [e_a\ e_b\ e_c]^T$, R, L은 각각 상전압, 상전류, 상별 역기전력, 권선저항 및 권선 인덕턴스를 나타낸다.
다음으로 전류와 추력과의 관계식에서 일반적으로 DC 전동기의 경우에는 정비례 관계에 있지만 BLDC 전동기에서는 영구자석의 상대위치에 따른 자속 밀도의 변화에 의해서 추력은 전류와 영구자석의 상대위치의 함수로 식 (2)와 같이 표시할 수 있다.

$$f = F(i_a, x_a) + F(i_b, x_b) + F(i_c, x_c) \tag{2}$$

식 (2)에서 f, (x_a, x_b, x_c) 및 F는 각각 BLDC 전동기의 추력, 상별 영구자석의 상대위치 및 전류와 영구자석의 상대위치에 대한 추력의 관계식을 나타낸다.
다음으로 기계적 모델링 부분인 추력과 실제 선형 BLDC 전동기의 속도 및 위치와의 관계는 일반 DC 전동기와 같이 식 (3)으로 표시할 수 있다.

$$f = M\frac{dw}{dt} + Bw \qquad w = \frac{dy}{dt} \tag{3}$$

식 (3)에서 M, B, w, y는 각각 이동부의 질량, 마찰계수, 속도 및 절대위치를 나타낸다.
이상과 같이 구성된 수식을 Laplace 변환하여 블록도로 표시하면 그림 1과 같이 표시할 수 있다.

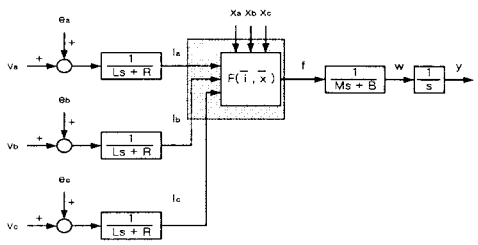

그림 1. BLDC 전동기의 수학적 모델 블록도

그림 1의 블록 다이어그램에서 빗금으로 표시된 부분이 BLDC 전동기의 모델 중 비선형성을 나타내는 부분이다.

2.2 모델 선형화 방법

BLDC 전동기의 입력전류와 영구자석의 상대위치에 대한 추력을 측정하기 위하여 BLDC 전동기에 인가하는 전압 시퀀스를 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 보는바와 같이 각 상이 60°와 120°사이와 240°와 300°에서 인가되는 전압이 각각 +V와 -V이고 나머지 위치에서는 ±V/2가 되도록 하였다. 본 논문에서는 입력 전류와 영구자석의 상대위치에 따른 추력의 측정을 위하여 각 상별로 30[mm]의 영구자석이 배열된 선형 BLDC 전동기를 대상으로 측정하였다. 따라서 각 상별 한주기는 60[mm]가 되지만 30[mm]를 기준으로 하여 서로 추력의 부호만 다르기 때문에 실제적으로는 30[mm]까지에 대한 데이터만 1[mm] 간격으로 측정하였다. 전류변화는 1[A]에서 5[A]까지 1[A]씩 증가시키며 측정하였다.

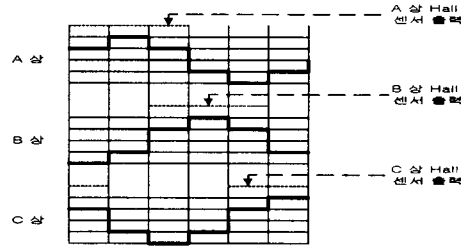

그림 2. BLDC 전동기 구동을 위한 전압 시퀀스

그림 2와 같은 전압 시퀀스를 인가하여 전동기를 구동하고, 이때 입력되는 전류와 A상 영구자석의 상대위치에 따라 스트레인 게이지를 이용하여 측정한 추력을 그림 3에 나타내었다.

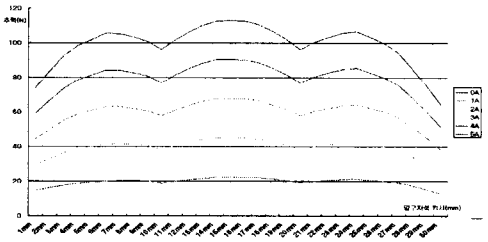

그림 3. 입력전류와 A상 영구자석의 상대위치에 따른 BLDC 전동기의 추력

여기서 각 전류 사이의 구간을 선형화 시켜서 생각하면 그림 4와 같이 추력, 각 상의 상대위치 및 전류를 각각 하나의 축으로 하여 공간상에서의 데이터가 존재하는 범위를 얻을 수 있다.

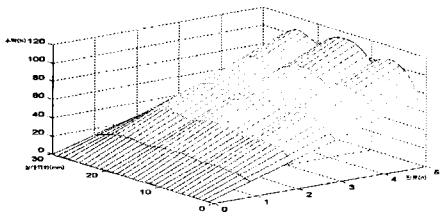

그림 4. 추력의 3차원 그래프

그림 4에서 BLDC 전동기의 추력은 입력 전류와 영구자석의 상대위치를 입력변수로 하는 비선형 출력을 갖는 것을 알 수 있다. 따라서 이를 보상하기 위해서는 제어루프상에서 추력 컴맨드와 영구자석의 상대위치를 입력으로 하여 그림 4의 데이터로부터 전류 컴맨드를 얻어내는 알고리즘을 적용하면 결국 루프내의 비선형 부분이 서로 상쇄되어 BLDC 전동기를 선형 모델로서 다룰 수 있게 된다. 여기서 한가지 언급할 것은 그림 2의 전압 시퀀스를 인가하는 경우 임의의 시간 t_0에서는 +V 또는 -V 크기의 전압이 인가되는 상은 오직 하나의 상이 된다는 것이다. 즉, 임의의 시간 t_0에서는 3상의 전류를 모두 제어할 필요 없이 +V 또는 -V 크기의 전압을 인가하게 되는 상에 대해서만 전류제어가 이루어지면 되는 것이다.

먼저 홀(Hall) 센서로부터 제어되어야하는 상이 어떤것인지에 대한 정보와 그 상의 영구자석 상대위치를 얻을 수 있다. 그러면 입력된 상대위치 정보로부터 간단한 프로그램에 의해서 그림 3의 그래프내에 존재하는 가장 가까운 양쪽 위치 값을 검출할 수 있고 이를 각각 x_1과 x_2라고 한다. 마찬가지로 입력된 추력 컴맨드와 x_1, x_2로부터 그림 3의 table에 존재하는 가장 가까운 힘의 값을 검출할 수 있고 이를 각각 f_{1_1}, f_{1_2}, f_{2_1} 그리고 f_{2_2}라고 한다. 이것은 결국 추력 컴맨드와 상대위치를 이용하여 그림 4내에서 전류가 존재하는 그림 5와 같은 하나의 평면을 구한 것이 되고 평면의 네 꼭지점은 각각 A(x_1, f_{1_1}, i_{1_1}), B(x_1, f_{1_2}, i_{1_2}), C(x_2, f_{2_1}, i_{2_1}) 그리고 D(x_2, f_{2_2}, i_{2_2})가 된다.

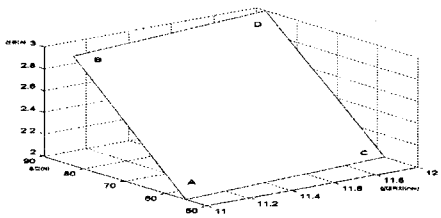

그림 5. 출력전류 컴맨드가 존재하는 공간상의 평면

공간상의 평면의 방정식은 평면내의 세 점 A, B, C를 알면 다음과 같이 구할 수 있다. 먼저 A 점을 기준으로 하는 벡터 AB와 벡터 AC는 다음 식과 같다.

벡터 AB : $(x_1 - x_1, f_{1_2} - f_{1_1}, i_{1_2} - i_{1_1}) = (a_1, b_1, c_1)$

벡터 AC : $(x_2 - x_1, f_{2_1} - f_{1_1}, i_{2_1} - i_{1_1}) = (a_2, b_2, c_2)$

벡터 AB와 벡터 AC의 외적으로부터 A, B, C 점을 포함하는 평면 (A,B,C)에 대한 법선 벡터를 다음 식과 같이 구할 수 있다.

평면(A,B,C)에 대한 법선벡터 : AB×AC = n

평면의 방정식 공식으로부터 각 축에 대한 계수는 다음과 같이 구할 수 있다.

O : $(b_1 * c_2 - b_2 * c_1,\ c_1 * a_2 - c_2 * a_1,\ a_1 * b_2 - a_2 * b_1)$ = (l,n,m)

따라서 평면(A,B,C)의 방정식은, 다음 식과 같이 표시할 수 있으며, 여기서 x_1, f_{1_1}, i_{1_1}은 각각 공간상에서의 A 점의 위치를 나타낸다.

$$l*(x - x_1) + m*(y - f_{1_1}) + n*(z - i_{1_1}) = 0$$

따라서 전체적인 제어 루프는 그림 6과 같이 나타낼 수

있다.

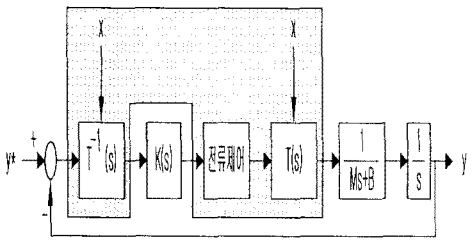

그림 6. 시스템 제어 루프

그림 6에서 $T(s)$는 전류와 영구자석의 상대위치를 입력으로 하여 추력을 발생하는 비선형 변환 모델을 나타내면 $T^{-1}(s)$는 본 논문에서 제안된 방법을 이용하여 추력 컴맨드와 영구자석의 상대위치를 입력으로 하여 전류 컴맨드를 발생하는 모델을 나타낸다. 따라서 측정된 데이터가 정확하고 데이터 측정주기를 작게 함으로서 루프내에서 두 개의 비선형 모델이 상쇄될 수 있는 것이다. 또한 "*전류제어*"로 표시된 부분은 인가전압 시퀀스를 포함하는 전류제어 루프로서 일반적으로 전동기 제어에서 응답속도가 바깥쪽 루프에 비해 매우 빠르므로 전류제어가 정확하게 수행된다는 가정하에 제어루프내의 전달함수를 1로 가정할 수 있다. 따라서 $K(s)$로 표시된 위치제어기 설계시 비선형 부분이 사라지고 남은 "$\frac{1}{s}\frac{1}{Ms+B}$"를 플랜트로 하여 선형 제어기법을 적용할 수 있는 것이다.

2.3 실험

본 논문에서 구성한 시스템의 구성도를 그림 7에 나타내었다.

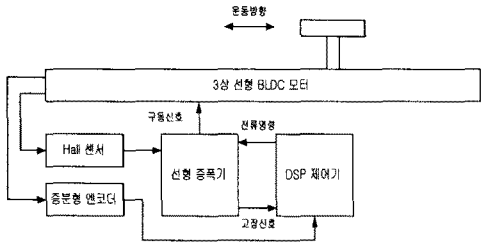

그림 7. 실험 시스템 구성도

그림 7의 구성도에서 직선운동을 하는 3상 선형 브러시리스 모터는 영구자석이 각각 30 [mm] 간격으로 배치되어 있으며, 각 coil은 195 [turn]으로 구성되어 있다. 모터가 움직이는 경우 각 영구자석의 상대위치를 검출하기 위하여 Hall 센서가 설치되어 있고 모터의 위치 및 속도를 검출하기 위한 선형 증분형 엔코더가 설치되어 있다. 선형 증분형 엔코더는 4[μm]의 해상도를 갖는데, 본 논문에서는 이를 4체배 하여 1[μm]의 해상도로 사용하였다. 본 논문에서 사용한 3상 브러시리스 모터의 사양은 표 1과 같다.

표 1. 선형 브러시리스 DC 전동기 사양

파라메터	저항	인덕턴스	상호 인덕턴스	극수	공극	코일 턴수	가동부 질량	마찰계수	영구자석 자속밀도
값	12.1[Ω]	5.81 [mH]	0.285 [mH]	1	0.001 [m]	195	0.93 [kg]	0.012	1.2[T]

다음으로 본 논문에서는 좀더 정밀한 위치제어를 위하여 선형 브러시리스 모터의 드라이버로 PWM 컨버터를 대신하여 선형 증폭기를 사용하였다. 본 논문에서 사용한 선형 증폭기는 AEROTECH 社의 BAL-10-40-B 모델이다. 이 모델은 ±40 V_{DC}의 전압을 출력할 수 있으며, 최대 출력 전류는 10A이고 정격 출력 전류는 5A이다. 이 선형 증폭기는 내부에 전류 제어 루프를 포함하고 있으며, 외부와는 25 pin "D" type 커넥터를 통하여 인터페이스 할 수 있다. 본 논문에서 사용한 선형 증폭기의 사양은 표 2와 같다.

표 2. 선형 증폭기 사양

파라메터	출력전압	정격전류	최대전류	인터페이스	구동모드
값	±40 [V_{DC}]	5[A]	10[A]	25 pin D-type	전류제어

DSP 제어기와 선형 증폭기간에는 shutdown 신호와 전류 컴맨드 그리고 고장 신호가 인터페이스 되도록 하였으며, 전류 컴맨드는 DSP 제어기의 DA 컨버터 출력을 사용하였다. DSP 제어기는 주 CPU로 TI 社의 TMS320C32-60 DSP를 사용하였고, 전류 컴맨드 출력을 이용하여 Analog Device 社의 AD667 12-bit DA 컨버터를 사용하였다. 선형 증폭기와 엔코더 신호 수신을 위해서는 8Mhz 대역폭을 갖는 광소자를 적용하였다. 또한 ALTERA 社의 EPM9560RC240-20 EPLD를 사용하여 DSP 제어기 내부 어드레스 디코딩이나 기타 디지털 회로를 구현하였다. 실제적으로 전동기의 위치제어시 전류제어기의 바깥쪽 루프에 위치제어기만 사용하는 것보다 위치제어기와 속도제어기를 동시에 사용하는 것이 성능면에서 유리하기 때문에 본 논문에서는 위치제어기와 속도 제어기를 함께 사용하였다. 여기서 위치 제어기로는 P 제어기를 이용하였고 속도제어기로는 PI 제어기를 이용하였다. 실험 결과를 그림 8에 나타내었고 그림 9에서는 그림 8의 결과에서 정상상태 오차를 알아보기 위하여 그림 8에서 "B" 부분에 해당하는 정상상태 부분을 확대하여 나타내었다.

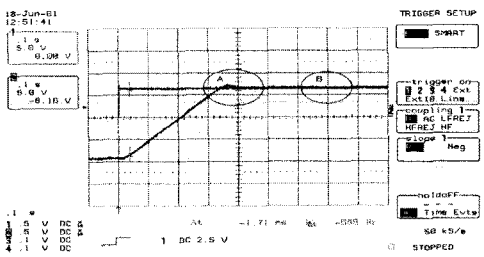

그림 8. 위치제어 실험시 시스템 응답

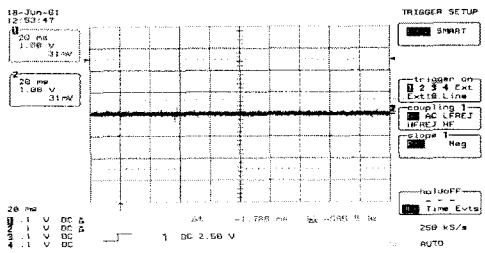

그림 9. 위치제어 실험시 정상상태 응답

그림 10에서는 5[μm]/div의 해상도로 나타내었는데, 정상

상태의 오차가 0인 것을 확인할 수 있었다. 실제적으로 1 [μm]/div의 해상도로 확인할 경우 약 $\pm 1 \sim 3$[μm] 정도의 오차가 발생하는 것을 확인하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 선형 BLDC 전동기에 대해서 입력전류와 영구자석의 상대위치에 따른 추력을 측정하고, 측정된 데이터를 이용하여 BLDC 전동기의 모델중 비선형 부분을 상쇄시킴으로서 선형 제어 이론의 적용을 보다 손쉽게 접근할 수 있는 방법을 제시하였다. 또한 실험장치를 구성하고 제시된 방법을 적용하여 실험을 해 본 결과 제시된 방법의 유용성을 확인하였다. 본 논문에서는 30 mm 간격의 영구자석에 대하여 1 mm 간격으로 전류에 따른 힘을 측정하고 1 mm 간격사이는 선형화 하여 사용하였는데 이를 좀 더 세밀하게 측정할 수 있다면 좀 더 정확한 추력 리플의 보상이 가능할 것으로 생각된다.

[참 고 문 헌]

[1] S. J. Park, H. W. Park, M. H. Lee, F. Harashima, "A New Approach for Minimum-Torque-Ripple Maximum-Efficiency Control of BLDC Motor", IEEE Trans. on IE, Vol. 47, No. 1, FEB, 2000

[2] M.F. Rahman, K.S. Low, K.W. Lim, "Approaches to the Control of Torque and Current in a Blushless DC Drive". 6th International Conference on Electrical Machines and Drives, pp.594-599, 1993

[3] PRAGASEN PILLAY, RAMU KRISHNAN, "Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent - Magnet Motor Drives, Part II: The Brushless DC Motor Drive", IEEE Transaction on Industry Applications, VOL.25, NO.2, pp.274-279, MARCH/APRIL 1989.

[4] C. T. Choi, K. S. Hong, J. W. Kim, J. S. Kim, "Control of Linear Motor Machine Tool Feed Drives for End Milling:Robust MIMO Approach", KSME International Journal, Vol. 13, No. 10, pp 727-737, 1999

[5] 고종선, 조광열, 윤명중, "외란에 둔감한 브러쉬없는 직류 전동기(BLDC Motor)의 디지털 위치제어", 전기학회논문지, 39권, 1호, 1990년 1월

[6] 전자부품연구원, "Punching Machine용 리니어 모터의 자기회로 해석 및 설계 파라메터 추출", 공업기반기술 개발사업 최종보고서, pp. 60-75, 1999년 8월

[7] 황주호, 최대봉, 이후상, 김중천, "리니어모터 이송계의 고속 위치결정", 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp 341-345, 1999