

대면적 비접촉 스테이지에의 구동기 적용을 위한 선형유도기의 변형된 2축 벡터 제어기

The Modified Two-axis Vector Controller of Linear Induction Motor to Apply to the Non-contact Stage with Large Workspace

정 광 석*, 이 상 현
(Kwang-Suk Jung and Sang-Heon Lee)

Abstract : To effectively cope with a complexity of kinematic metrology due to workspace enlargement of the planar stage, the linear induction motor is suggested as its new driving source. Especially, the linear induction motor under uniform plate type of secondary doesn't inherently have a periodical force ripple which is generally shown in the brushless DC motor. But, it presents a poor transient characteristic at zero or low speed zone owing to time delay of flux settling, resulting in slow response. To improve the servo property of linear induction motor and apply successfully it to the precision stage, this paper discusses a modified vector control methodology. The controller has a novel input form, fixed d-axis current, q-axis current and forward-fed DC current, to control thrust force and normal force of the linear induction motor independently. Influence of the newly introduced input and the feasibility of controller are validated experimentally.

Keywords : planar stage, linear induction motor, flat panel display, vector control, D-Q decomposition, lumped parameter model

I. Introduction

평판 디스플레이(FPD : Flat Panel Display) 산업에서 다면취 공법에 따른 패널 생산 원가 절감을 위해 패턴 증착을 위한 유리(reticle) 또는 전극 형성을 위한 유전층 기판은 더욱 대형화되고 있으며 이는 TFT-LCD를 비롯한 FPD 전, 후공정 장비의 대형화를 가속화시키고 있다[1,2]. 이 중에서 전 영역 노광을 위한 포토리소그래피(photo-lithography) 광학 요소와 공정 전반에 걸쳐 이용되는 스테이지의 대면적화는 관련 공정 분야의 국산화에 가장 큰 걸림돌이 되고 있다. 실제로 외산 스테이지의 경우 대부분 현지에서 조립(극단 위치에서 반복 정밀도 $1\mu\text{m}$ 이내, Nikon 8세대 TFT-LCD 노광기의 경우 $0.6\mu\text{m}$ 이하)되어 시스템 일체형으로 수입되고 있다. 그러나 현재 이러한 원판의 크기가 어디까지 대형화할지에 대한 전망은 다양하게 언급되고는 있으나 중요한 점은 대형화와 상반되게 원판 화소 정밀도는 더욱 더 향상되고 있다는 것이다.

현재 대부분의 대면적 스테이지의 구동 원리로 채택되고 있는 선형 BLDC(Brushless DC) 모터의 경우 지금까지 개발된 선형 구동 원리 중 대역폭과 단위 체적당의 힘 밀도 측면에서 가장 우수한 것으로 입증되고 있으나 작업 영역 증대에 따라 단일 요소의 오차가 에어 베어링 안내 메커니즘 및 적층 구조로 인해 이동자의 오차로 중첩되어 나타나므로 기구학적 계측 또는 메트랄러지(metrology)에 상당한 애로점이 따른다. 이러한 계측의 전문성 부족과 이에 따른 기술 축적의 미비로 국내에서의 그동안의 다양한 스테이지 개발 노력에도 불구하고 성공적으로 대형 평판 디스플레이 공정에 적용

시키지 못한 결정적 계기가 되고 있다[3]. 이러한 오차에 대한 보정(calibration)은 대면적화 진행에 따라 더욱더 엄격한, 고도의 전문성을 필요로 할 것이며 따라서 기존의 접근 방법과는 다르게, 이러한 메트랄러지에 대한 부하(load)를 최소화할 수 있으면서 대형화되어 가는 스테이지의 작업 영역에 효과적으로 대응할 수 있는 구동 원리의 개발이 절실히 요구된다고 할 수 있다.

이러한 방법의 일환으로 본 논문에서는 스테이지 구동 원리로 선형 유도기(LIM : Linear Induction Motor)의 적용을 제안한다. 유도형 구동 원리는 산업 현장에서 약 80% 이상의 점유율을 갖고 있을 정도로 많은 장점에도 불구하고 그 동안 영속(zero speed), 저속 영역과 과도 구간에서의 조악한 응답 특성(poor response characteristic)으로 정밀 스테이지의 구동 방식으로는 채택되지 못하였으나 최근 전력전자 반도체 기술의 눈부신 발전과 회전 유도 모터에 대해 성숙화 되어온 공간 벡터 제어(spatial vector control) 기술 등의 덕택으로 서보 구동기로서 활발히 응용되고 있다. 비접촉 평면 스테이지에 LIM을 서보 구동기로서 적용하기 위해서는 저속 성능에 대한 개선과 함께 LIM의 추력, 수직력(normal force)간의 정밀한 2축 독립 제어가 필요하다. 특히 이동자가 공간상에 부상되어 구동된다면 LIM의 고정자/이동자 간의 저주파 흡인력은 능동 제어 대상이 된다. 본 논문은 기존 벡터 제어기의 입력을 변형시킨 새로운 방식의 벡터 제어기를 설계하고 이를 구축된 LIM에 적용하여 평면 스테이지의 구동기로서의 LIM의 가능성을 모색한다.

II. Induction motor as a servo driver of the stage

1. Inherent problems of induction motor

유도형 구동방식은 코일에 인가된 AC 전원의 시변(time-variant) 특성을 통해 도체에 유도된 와전류와 코일 자기장간의 상호 작용에 의해 발생하는 추력을 이용하는 방법이다. 일반적으로 유도기의 드라이버는 속도 모드에 대응되는 형

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2007. 8. 30., 채택확정 : 2008. 2. 11.

정광석 : 충주대학교 기계공학과(ksjung@ejnu.ac.kr)

이상현 : 안동대학교 기계공학부(shlee@andong.ac.kr)

※ 이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2006-311-D00308).

태가 주종을 이뤄왔으며 토크는 유도기 관성에 의해 저주파 필터링되어 속도 형태로 나타나기 때문에 주관심 대상은 되지 않았다. 그러나 로봇 등에 이용되는 회전형 AC 서보 시스템에서는 위치 제어가 관건이기 때문에 과도 구간에서의 토크 제어가 필수적이고 따라서 드라이버 역시 회전형 AC 서보 시스템에서는 비약적인 발전을 하고 있다. 그러나 선형 유도기 즉, LIM을 대상으로 이러한 서보 특성을 부가한 초정밀 구동 방식은 전술한 바와 같이 정지(stall) 상태에서의 정적 특성과 저속 구간에서의 과도 응답 특성이 선형 BLDC에 비해 열악하기 때문에 지금껏 논의에서 제외되어 왔다. 그러나 LIM은 고정자와 이동자 간의 균일한 상대 조건이 여타 구동기에 비해 월등히 뛰어나고 일정 공극 하에서는 힘 이득(force gain)이 고정되어있는 강건한 구조이며 제 성능이 단지 서보 시스템에 좌우되는 형태이다.

표 1에 평면 스테이지 구동 원리의 주종을 이루는 선형 BLDC와 LIM을 대상으로 하여 단동(stand-alone) 형태와 평면 스테이지에 적용될 경우 각각에 대한 특성을 비교한 결과를 나타내었다. 이 때 평면 스테이지는 이동자가 공간상에 부상되어 구동되는 비접촉 시스템을 상정하였으며 예상할 수 있듯이 단동 형태의 경우 BLDC가 대부분 우수한 것으로 입증되지만 스테이지에 적용할 경우 스테이지 구동기로서 요구되는 다양한 제특성 즉, 비접촉 구동의 용이성과 바이어스 강성의 부가 그리고 영역 확대에 대한 대응 능력 등은 LIM의 새로운 가능성을 보여준다. 특히 추력 리플과 2축 독립 제어성 측면에서의 특징 외에 부족한 단동 성능이 보완된다면 현재의 대면적 평면 스테이지가 요구하는 엄격한 제 성능을 충족시킬 수 있는 또 다른 해결책이 될 수 있을 것으로 판단된다.

2. Overview of two-axial control methodologies of LIM

본 절에서는 LIM의 이동자에 작용하는 추력과 수직력을 독립 제어하기 위해 제안되어 온 다양한 방법들의 대한 분석과 이를 기반으로 비접촉 평면 스테이지의 구동 원리로 적용

표 1. BLDC와 선형 유도기의 특성 비교.

Table 1. Characteristic comparison of BLDC and LIM.

Category	Performance index	BLDC vs. LIM
Stand-alone characteristic	Force density	>
	Cross-over frequency	>
	Transient property	>
	Power circuit complexity	≈
	Controller complexity	<
	Force ripple	>
When imbedded in planar stage	Independent controllability of thrust and normal force	<
	Metrology complexity	>
	Force uniformity	<
	Contact-free actuation	<
	Impressing of preload	<
Implementation cost	Workspace enlargement	<
		<

하기 위한 새로운 2축 독립 제어 방법을 소개한다.

일반적으로 LIM의 입력은 3상 AC 전원이며 3상 전원을 구성하는 다양한 인덱스; 예로 각 상의 크기, 주파수 등의 일차 변수가 있으며 이를 기초로 한 조합 변수인 d, q축 전류와 슬립 주파수 등의 2차 변수가 있다. 3상 전원은 중성점(neutral point)이 보통 0이며 따라서 독립 변수는 상 전원 두 개와 주파수 등의 세 개가 존재한다. 그러나 LIM의 두 축력이 이러한 세 개의 독립 변수들과 일대일 관계를 갖지 않고 강하게 연성되어있기 때문에 위의 제변수들 외에 2차 변수들을 서로 조합하여 제어하는 방법들이 제안되어왔으며 기존 문헌에 언급되어있는 2축 독립 변수들을 고려되는 LIM의 사영 개념도와 함께 그림 1에 그리고 각 방법들의 제반 문제들을 표 2에 나타내었다. 그림에서 수직력의 경우 저주파 흡인력을 나타내며 -z 방향으로의 이동자의 중력만이 작용하는 구조이다.

우선 추력, 부상력의 주파수 특성을 이용한 방법은 고주파로 부상력을 제어하고 저주파로 추력 제어와 이동자의 무게를 보상하는 방법으로 요약될 수 있는데 부상력은 저주파에서는 흡인력의 형태로 그리고 고주파에서는 반발력의 형태로 전 주파수 대역 모두에 관련되어있으므로 완전한 연성 보상을 실현하지는 못하였다[4]. PWM 인버터에 미리 보정된 영역별 d, q축 전류의 벡터 합 중 최적의 스위칭 벡터를 선택

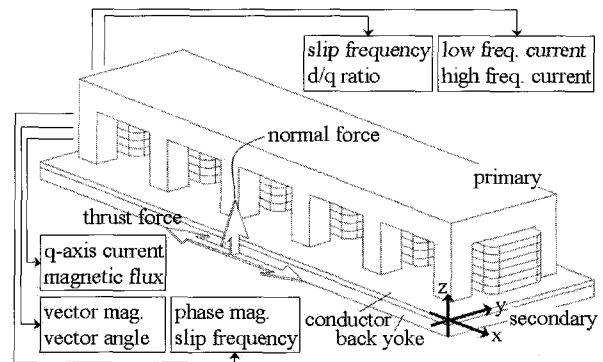


그림 1. LIM의 사영도와 다양한 이축 제어기의 제어 변수.

Fig. 1. Perspective layout of LIM and control variables of various two-axial controllers.

표 2. 선형 유도기 2축 독립 제어기의 제반 문제들.

Table 2. Drawbacks of two-axial control methods of LIM.

Methodology	Drawbacks or Constraints
Matching of slip frequency for normal/thrust force ratio	<ul style="list-style-type: none"> Poor transient characteristic Excessive calibration load for operating band
Superposition of low and high frequency current inputs	<ul style="list-style-type: none"> High coupling of magnetic forces due to high freq. input
Optimal switching vector impressed in PWM driver	<ul style="list-style-type: none"> Discontinuity of magnetic force in transition zone
Vector control of magnetic flux and thrust force	<ul style="list-style-type: none"> Poor low-speed characteristic due to flux settling time
DC bias forward feeding	<ul style="list-style-type: none"> Intermittent oscillation of thrust force

하여 인가하는 기법이 제안되었으나 전이구간에서의 불연속 문제는 난제로 남아있으나 다단 속도 제어에서는 간이한 구조로 인하여 탁월한 성능을 나타낸다[5,6]. 일반적으로 벡터 제어기법은 자속(magnetic flux) 전류와 토크 혹은 추력 전류를 분리해서 제어하는 방법으로 따라서 공극 자속 제어를 통해 부상력을 제어하고 추력은 슬립 주파수 등에 의해 제어하는 방법들이 이용되어왔는데 후술하는 바와 같이 자속 정착(settling)에 따른 시간 지연으로 인해 저속 성능에 제약이 따른다[7]. 또한 추력과 부상력의 상대 비(ratio)와 슬립 주파수 간의 관계식을 이용하여 슬립 주파수 설계치와 추진 방향 오차에 따른 추력 입력량이 주어지면 위 관계식에 의해 자동적으로 부상 방향 입력의 크기가 결정되는 비연성 제어 기법도 제안되었다. 그러나 이 방법은 모든 작동 조건에 대해 보정(calibration) 시험을 수행해야 한다는 단점이 있으며 따라서 영역 사이의 값은 보간(interpolation)에 의해 결정된다[8].

이상에서와 같이 기존 연구는 대부분 수송용 또는 단순 이동용 선형 유도기를 대상으로 수행되어왔으며 주파수 대역 별로 그리고 설계 속도 또는 위치 측정 방법에 따라서 다양한 접근법이 존재하지만 극저속 영역의 힘/위치 제어를 목적으로 2축력 독립 제어가 수행된 사례는 발표되지 않았다. 그러나 본 저자들은 이전 연구에서 유도형 축방향 회전 구동기를 대상으로 기존 3상 전원에 DC 전류를 편의시킨 형태의 제어법을 수행한 바 있다[9]. 기존 입력 패턴과는 달리 별도의 제어 입력을 추가한 후 중첩시켜 회전 구동기의 회전 운동과 부상 운동의 2축력 독립 제어를 수행하였는데 DC 전류는 이동자의 무게 보상을 포함하는 공극 방향 운동 전체를 제어하는 입력으로 이용되었고 따라서 일정 크기 이내에서의 제한된 DC 전류로 회전 토크에의 영향을 최소화하였지만 간헐적인, 주기적인 연성으로 반복 성능 구현에는 다소 무리가 있었으며 유도기의 느린 응답 특성을 보상하는 데에는 한계가 있었다. 이러한 부분을 발전시켜 본 연구에서는 공극 섭동(perturbation) 제어에만 상기 DC 입력을 이용하고 고정자 하단의 자속 측정을 통해, 수정된 입력 형태의 직접 벡터 제어 기법을 LIM의 2축력 독립 제어에 이용하고자 한다.

III. Physical modeling of LIM forces

유도기의 고정자 혹은 이동자 자속의 순간위치를 측정하고 자속 축인 d축을 이와 동기시켜 이를 통해 q축, 즉 토크 축 자속을 소거할 수 있도록 하여 유도기의 자속 전류, 토크

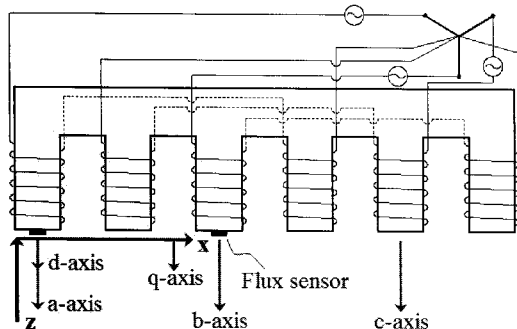


그림 2. 3상 2극 LIM의 기준 좌표계.
Fig. 2. Coordinate frame of three phase, two pole LIM.

전류를 직류 분권 전동기와 같이 독립적으로 제어할 수 있도록 하는 것이 벡터 제어의 근간이 된다. 본 장에서는 회전에 적용되어 온 집중 변수 모델링 과정을 참조하여 상기 자속의 위치와 이에 동기된 좌표계에서의 LIM의 추력과 수직력에 대한 모델링 작업을 수행한다. 이 때 선형 시스템에 일반적인 모서리 효과(edge effect) 등은 제안 시스템의 작동영역이 영속 혹은 극저속 영역으로 제한되므로 무시한다.

모델 대상인 3상 2극의 단동 LIM와 기준 좌표계를 그림 2에 묘사하였다. 그림에서 x, z축은 물리적인 변위 좌표계를 나타내며 a, b, c는 3상 고정자 좌표계 그리고 d, q는 2상 고정자 좌표계를 나타낸다.

우선, 자속의 순시 위치에 이동자의 d-자속 축을 동기시키기 위해 고정 좌표계를 기준으로 하여 이동자 자속의 공간상 위치 θ_e 를 구하면 다음과 같다.

$$\theta_e = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda_{qs}^p}{\lambda_{ds}^p} \right) \tag{1}$$

위 식에서 상첨자 p는 고정자를 나타내며 하첨자 우측의 s는 이동자를 나타낸다. 그러나 이동자 자속은 물리적으로 측정하기 어렵고 대신 공극 자속(air-gap flux)을 이용하기 위해 임의의 좌표계 ω 에서 표현된 자속 간의 다음 관계식을 적용한다[10].

$$\lambda_{dqm}^\omega = L_m i_{dqp}^\omega + L_m i_{dqs}^\omega \tag{2}$$

$$\lambda_{dqs}^\omega = L_m i_{dqp}^\omega + L_s i_{dqs}^\omega \tag{3}$$

여기에서 하첨자 우측의 m은 공극을 나타내고 L_m, L_s 는 각각 여자 인덕턴스(excitation inductance)와 이동자 인덕턴스를 나타낸다. (2)의 i_{dqs}^ω 를 (3)에 대입하면 고정자 좌표계에서의 이동자 자속은 공극 자속을 기준으로 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda_{dqs}^p = \frac{L_s}{L_m} \lambda_{dqm}^p - (L_s - L_m) i_{dqp}^p \tag{4}$$

위 식에서 $L_s - L_m = L_{ls}$ 이고 이동자의 누설(leakage) 인덕턴스 L_{ls} 는 일반적으로 L_s, L_m 의 10% 이하이기 때문에 무시할 수 있고 따라서 (1)의 이동자 자속의 순시 위치는 다음과 같이 공극 자속을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\theta_e \approx \tan^{-1} \left(\frac{\lambda_{qm}^p}{\lambda_{dm}^p} \right) \tag{5}$$

위 공극 또는 이동자 자속과 동기된 좌표계 'e'에서 바라본 추력 F_T 와 수직력 F_N 은 q축 자속 λ_{qm}^e 즉, λ_{qs}^e 이 소거되므로 로렌쯔 법칙과 맥스웰 응력 텐서를 이용하여 다음 식과 같이 간략하게 유도될 수 있다. 수직력의 경우 저주파 feeding 가정에 의해 고주파에서 지배적이 되는 와전류 반발력은 제외하였다.

$$F_T = \frac{3 P L_m}{2 L_s} \frac{1}{2\tau} \lambda_{ds}^e i_{qp}^e \tag{6}$$

$$F_N = \frac{1}{\mu_0 A} (\lambda_{dm}^e)^2 = \frac{1}{\mu_0 A} (\lambda_{ds}^e)^2 \quad (7)$$

위 식에서 P 와 τ 는 극 수와 극 파장 거리를 의미한다. 또한 μ_0 와 A 는 각각 공기 중의 자기 투자율과 자속이 통과하는 고정자 단면적을 나타낸다.

IV. Modified vector control

전장에서 유도된 LIM의 추력, 수직력 모델을 대상으로 새로운 입력 조합에 근거하여 두 힘을 독립적으로 제어하는 방법을 제안한다. 특히 이동자 d축 자속은 두 힘에 모두 관련되어있으므로 d축 전류는 일정하게 유지시키는 것이 바람직하다. 본 장에서는 이동자의 저속 성능을 향상시키고 2축력간의 연성을 극소화할 수 있는 새로운 입력 형태를 제안하고 구축된 LIM 시험 장치를 이용하여 검증한다.

1. Forward feeding of external input for air-gap control
 임의의 좌표계 ω 에서 이동자의 d축 전압 방정식은

$$\frac{d\lambda_{ds}^{\omega}}{dt} = -R_s i_{ds}^{\omega} + (\omega - \omega_s) \lambda_{qs}^{\omega} \quad (8)$$

와 같이 표현되는데 여기에서 R_s, ω_s 는 이동자 저항과 이동자의 이동 주파수($\omega_s = \dot{x}/2\tau$)를 나타낸다. (3)의 i_{ds}^{ω} 를 위 식에 대입하고 이동자 자속에 동기된 좌표계를 기준으로 표현하면

$$\frac{d\lambda_{ds}^e}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} \lambda_{ds}^e + L_m \frac{R_s}{L_s} i_{dp}^e \quad (9)$$

이다. 따라서 (9)를 이용하면 d축 자속과 d축 고정자 전류간의 관계를 얻을 수 있다. 그러므로 d축 전류를 이용하여 d축 자속을 제어할 수 있고 (7)에서와 같이 수직력 제어가 가능하다. 또한 q축 전류를 이용하여 수직력에 영향없이 (6)에서와 같이 추력을 제어하는 것이 가능한데 이러한 내용이 기존 벡터 제어의 내용이다. 그러나 이 때 d축 자속은 추력, 수직력에 모두 영향을 주기 때문에 기존 벡터 제어와 같이 이동자장의 수직 방향으로 기계적인 베어링에 의해 구속되는 시스템과 달리 공간상에 부상되어 구동되는 비접촉 LIM의 경우에는 이러한 제어 방법만으로는 두 축간의 연성에 의해 많은 제약이 따른다. 이러한 점을 개선하기 위해 본 논문에서는 수직력 제어를 위한 새로운 방법을 적용한다.

우선 그림 1, 2에 묘사된 LIM의 좌표축을 기준으로 공극 방향 z축에 대한 이동자의 운동 방정식을 다음과 같이 표현하자.

$$F_z = m\ddot{z} = -mg + F_N + F_{dc} \quad (10)$$

위 식에서 mg 는 이동자의 무게를 그리고 F_N 은 (7)의 수직력을 의미한다. 새롭게 도입한 F_{dc} 는 고정자 d축 전류에 편의된 직류 전류를 의미한다. 만약 위 식에서 d축 자속에 의한 수직력으로 공칭 공극에서의 이동자 무게를 보상하면 결국 F_{dc} 는 이동자의 z축 방향 섭동 제어에만 관련되는 항이 된다. 이러한 방법은 d축 자속 전류에 의한 추력에의 연성을 극소화 할 수 있으며 부상된 LIM의 추력, 수직력을 독

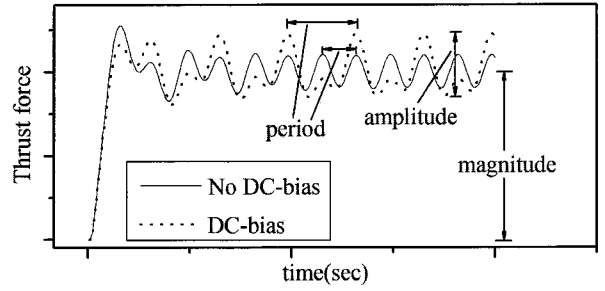


그림 3. DC 바이어스 전류에 의한 추력의 변화.
 Fig. 3. Variation of thrust force caused by DC biased to AC.

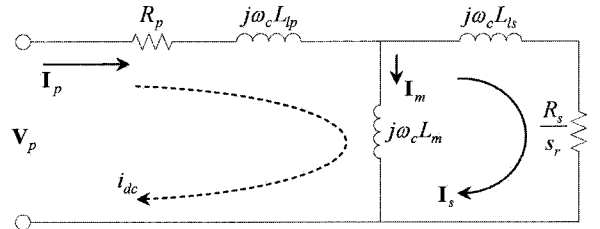


그림 4. 입력 전류 경로를 묘사하는 LIM의 상당 등가 회로.
 Fig. 4. Per-phase equivalent circuit of LIM showing each current path.

립 제어할 수 있는 단초를 제공한다. AC 구동기에서 입력에 편의된 DC 전류는 일반적으로 추력 크기에 대한 영향없이 흡인력을 증가시키지만 동시에 추력의 진폭(oscillating amplitude)을 더욱 크게 한다. DC 편의된 AC 입력에 대한 유도기 추력에의 영향을 그림 3을 통해 확인할 수 있듯이 바이어스 전류의 영향으로 추력의 절대 크기에는 변함이 없지만 진폭이 증가하는 것을 확인할 수 있으며 또한 주기 역시 두 배가 됨을 확인할 수 있다[9].

바이어스 전류에 의한 영향은 그림 4와 같은 유도기의 상당 등가 회로(per-phase equivalent circuit)를 통해서도 예상할 수 있다. 바이어스 전류는 직류이므로 고정자와 여자 전류에만 관련되고 여자 자속의 진폭이 커지면 직류 인가에 아무런 영향을 받지 않는 이동자 와전류와의 로렌츠 추력 진폭이 증가하게 된다. 그림에서 R_p, ω_c, s_r 는 각각 고정자의 저항, 전원 각 주파수, 슬립률(slip ratio)을 나타내며 I_p, I_m, I_s 는 고정자, 여자, 이동자 전류 벡터를 나타낸다.

그러나 제안된 방법에서 바이어스 DC 전류는 저자의 이전 연구에서처럼 수직력 보상에 이용되는 것이 아니라 이미 d축 자속 전류에 의해 보상된 이동자의 공극 방향으로의 섭동 제어에 관련된 미소 량이다. 실제 바이어스 양의 크기는 후술하는 시험 결과에서처럼 전 행정 구동시의 평균값이 0에 근사화된다. 따라서 위 그림과 같은 추력에의 영향과 추가로 다른 여타 자기력과의 연성 항은 무시할 만큼 적다. 이를 기초로 F_{dc} 를 제어 입력 형태로 표시하면

$$F_{dc} = -\tilde{\mathbf{k}}_z \cdot \tilde{\mathbf{z}} \quad (11)$$

와 같다. 여기에서 $\tilde{\mathbf{k}}_z$ 와 $\tilde{\mathbf{z}}$ 는 각각 제어 이득 행렬과 공극 방향으로의 상태 변수 벡터이다. 이 때 전술한 바와 같이 d

축 전류에 의한 d축 자속은 이동자 무게 보상에만 관련되며

$$\lambda_{ds}^e = \sqrt{\mu_0 A mg} \quad (12)$$

로 요약될 수 있다. 또한 이동자 자속 λ_{ds}^e 가 (12)와 같이 되도록 (9)에서 i_{dp}^e 를 일정하게 유지시킨다고 가정하면

$$i_{dp}^e = \frac{\lambda_{ds}^e}{L_m} \left(1 - e^{\wedge} \left(-\frac{R_s}{L_s} t \right) \right)^{-1} \quad (13)$$

와 같다.

추력의 경우 이동자는 공간상에서 이중 적분기의 동특성을 가지므로 지배 방정식의 형태는

$$F_x = m\ddot{x} = -\tilde{k}_x \cdot \bar{x} = F_T \quad (14)$$

와 같다. 여기에서 \tilde{k}_x 와 \bar{x} 는 이동 방향으로의 이득 행렬과 상태 변수 벡터를 나타낸다. 따라서 이에 관련된 q축 전류 i_{qp}^e 는 (6)과 (14)를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$i_{qp}^e = -\frac{8\tau L_s \tilde{k}_x \cdot \bar{x}}{3P L_m \lambda_{ds}^e} \quad (15)$$

위의 변형된 입력으로 공간상에 부상되어 구동되는 LIM의 블록선도를 그림 5에 나타내었다. 앞서 언급한 바와 같이 이동자 공칭 무게를 보상하도록 이동자 d축 자속이 결정되면 이를 통해 d축 전류가 결정되고, 이와 동시에 추력 방향 오차에 의해 q축 전류가 결정되면 이동자 자속 위치각에 의해 동기화 되어 고정자 측으로 좌표 변환된 후 공극 방향 섭동량 제어 입력인 DC 전류와 중첩되고 2상-3상 좌표 변환된 후 인버터를 통해 LIM에 입력된다. 이동자 자속의 위치는 고정자 아래에 위치한 자속 센서에 의해 측정, 연산되는데 그림 3에서 알 수 있듯이 장착 공간의 문제로 q축 좌표계와 30도의 위상차가 존재한다. 따라서 측정된 자속량은 일차적으로 위상 연산 관계를 통해 d, q 좌표계로 변환되어야 한다. 블록선도에서 k_{dc} 는 공칭 공극에서 선형화된 DC 흡인력의 힘 이득을 나타낸다.

2. Validation of the suggested method

전 절에 논한 제어 방법을 검증하기 위해 그림 7과 같은 시스템을 구축하였다. 제어 대상을 2축만으로 제한하기 위해 이동자 하단에 x축 선형 가이드를 그리고 그 아래에 z축 선형 가이드를 적층 형태로 부착하였으며 공극량 측정은 정전 용량형 센서를 그리고 추진량 측정은 레이저 변위계를 이용한다. 또한 전술한 바와 같이 이동자 자속 측정을 위해 두 개의 자속 센서가 고정자 하단에 설치되어있으며 이동자는 평판 형태의 전도판과 강자성 철크로 구성되어있다. 이용된 LIM은 L_s, L_m, L_b 가 각각 0.46, 0.4, 0.06mH인 3상 2극 형 자속 유도 모터이다.

실험 비교 대상은 우선 기존의 벡터 제어에 의한 계단 응답과 제안된 제어기의 응답성이다. 기존 벡터 제어의 경우 이동자 시정수(time constant) 제한에 따른 d축 자속의 정착 지연으로 영속, 저속 성능에 제약이 많았으나 제안된 방법의

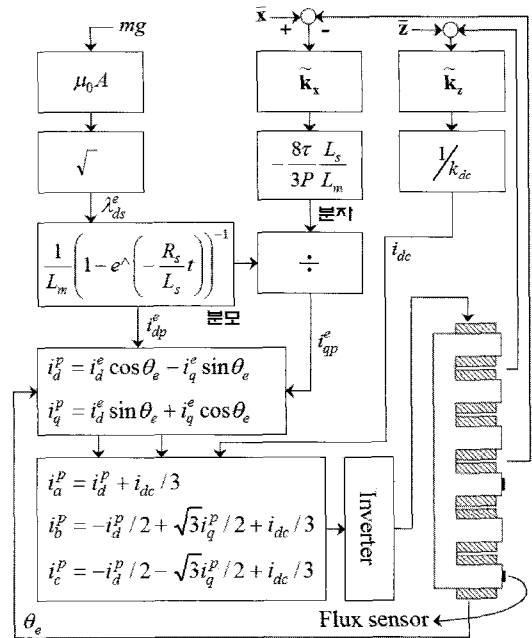


그림 5. 변형된 벡터 제어기의 블록선도.

Fig. 5. Block diagram of the modified vector control with a novel input combination.

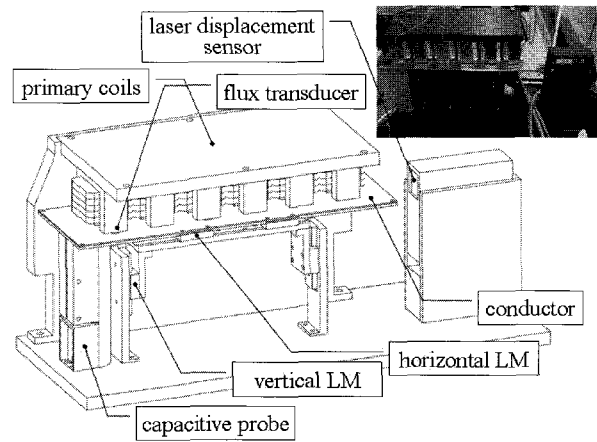


그림 6. 제안된 제어법 검증을 위한 실험 장치.

Fig. 6. Test facility for experimental validation of the suggest method.

경우 이동자 무게 보상을 위해 기 정착되어있는 자속으로 정지(stall) 상태에서의 응답 특성이 개선되었음을 알 수 있다. 이에 대한 시험 결과를 그림 6에 나타내었다. 벡터 제어의 경우 공극 방향으로 고정시킨 상태에서 그리고 제안된 방법의 경우 이동자를 부상시켜 공극을 일정하게 유지시킨 후 추력 방향으로의 20 μm 계단 입력에 대한 응답 결과이며 이때 추력과 수직력간의 연성량을 확인해 볼 수 있는 공극 섭동 제어 입력인 DC 전류의 변화 선도를 그림의 하단에 나타내었다. 두 조건 모두 동일한 제어 이득 값을 이용하였는데 빠른 응답성에 더해 0.05초에서의 순간적인 계단 입력 상황에서도 공극량의 변동이 거의 존재하지 않고 따라서 축간의 연성이 거의 존재하지 않는 2축 독립 제어가 원활히 수행되고 있음을 알 수 있다. 계단 입력 인가시 그림 하단의 원형

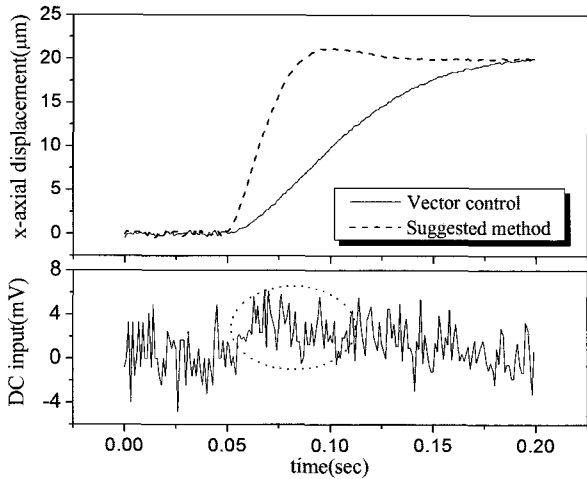


그림 7. 계단 입력 응답 시험을 통한 직접 벡터 제어와 제안된 방법의 비교 그리고 공극 섭동 제어 입력의 변화.
 Fig. 7. Comparison of the general direct vector control and the suggested method for the case of step input test.

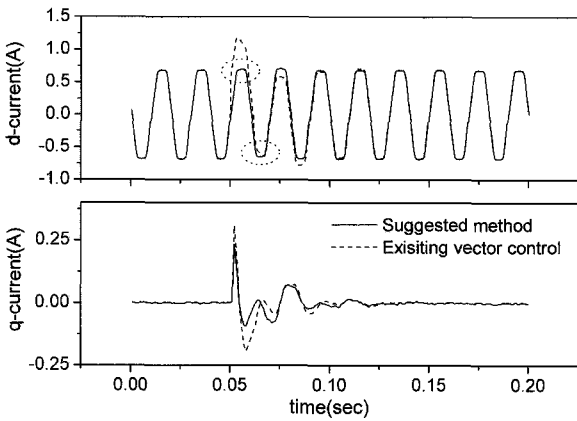


그림 8. 그림 8의 계단 입력을 위한 d, q축 전류의 변화.
 Fig. 8. Variation of d and q-axis current for the step test of Fig. 8.

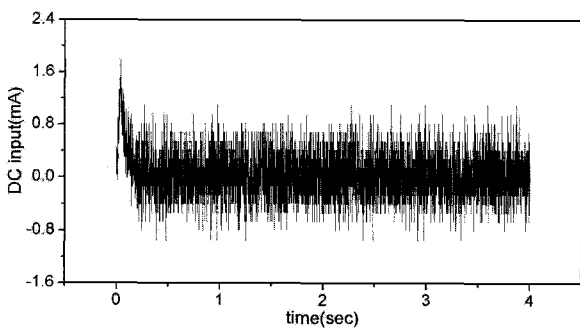


그림 9. 저속의 정속 구동시 공극 제어용 DC 바이어스 전류의 변화 선도.
 Fig. 9. Variation of DC bias current for control of air-gap perturbation in case of low-speed actuation.

점선으로 묘사된 영역에서 약간의 섭동(바이어스 전압 분해능의 약 1.5배)이 존재하는 것으로 나타나는데 이러한 부분이 실제 연성에 의한 것인지 축력과 구조물간의 기구학적 오차에 의한 것인지는 본 시험만으로는 판단하기에는 다소 무

리가 있다.

그림 7의 계단 시험시 코일에 인가되는 전원 각 주파수는 50Hz이고 이 때 고정자 d, q축 전류는 그림 8과 같은 형태를 갖는다. 상단 그림의 원형 점선으로 묘사된 부분은 계단 입력 초기에 q축 전류에 의한 영향을 간접적으로 묘사하는데 전술한 바와 같이 이러한 미세한 왜곡이 기구학적 문제에 기인하는지 아니면 자속 센서의 오차에 의한 자속각의 왜곡에 기인하는지 더욱 세세한 고찰이 필요할 것으로 판단된다. 중요한 점은 자속 보상을 위한 d축 전류와 추력 발생을 위한 q축 사이의 연성량이 거의 무시될 수 있을 정도로 저감되었다는 사실이며 이는 영속, 저속 영역에서 자속 부하 변동없이 즉, 공극 자속축 제어를 위한 d축 전류의 변화 없이 유도기가 안정되게 이용될 수 있다는 것을 의미한다.

정속 구동시의 성능 검증을 위해 2.5mm/s의 저속 시험시의 공극 섭동 제어량 변화 선도를 그림 9에 나타내었다. 추력 방향으로의 q축 전류 초기 인가시 약 40% 정도 순간적인 상승을 제외하면 전 구간에 걸쳐 바이어스 전압의 오차 한계인 10mV 안에 놓여 있는 것을 알 수 있는데, 따라서 DC 편 전류의 시평균 값(time-averaged value)은 거의 0이 됨을 알 수 있다. 그러므로 전술한 바와 같이 바이어스 전류로 인한 추력과 수직력에의 영향은 거의 존재하지 않음을 알 수 있으며 결론적으로 제안된 방법으로 공간상에 부상되어 구동되는 LIM의 추력, 수직력 제어가 만족스럽게 비연성화 되어 있음을 확인할 수 있다.

V. Conclusion

본 논문은 조악한 응답 특성으로 정밀 시스템의 구동기로는 이용되지 않았던 선형 유도기 즉 LIM을 대면적 평면 스테이지의 구동기로 적용시키기 위해 LIM이 갖는 열악한 제 특성을 보완하기 위한 방법을 제시하였다. 이는 LIM이 갖는 힘 리플이 존재하지 않는 균일한 추력 특성과 영역 확장이 용이하다는 이점에 기인한다. 대면적 스테이지의 경우 일반적으로 공기 베어링 등에 의해 기계적인 접촉없이 구동되므로 LIM의 고정자와 이동자 사이에 작용하는 추력, 수직력을 정밀하게 독립 제어할 수 있다면 기존 스테이지 구축시 요구되는 고도의 전문적 조립 기술과 메탈러지 부하를 절감시킬 수 있는 단초를 제공하기 때문이다.

영속, 저속 영역에서의 제특성을 향상시키기 위해 본 연구에서는 LIM의 입력으로 기존 d, q축 전류외에 d축 전류에 편 의된 직류 전류를 이용한다. LIM의 이동자를 공간상에 부상시켜 구동시킬 경우에는 일반적인 벡터 제어기법으로는 자속 전류가 2축력에 모두 연성되어있어서 적용하는 데에 한계가 있고 따라서 d축, 즉 자속축 전류로는 공칭 공극에서 이동자의 무게 보상에만 이용하고 이동자의 공극 섭동량은 상기 언급한 DC 바이어스 전류를 이용한다. 이는 2축력 독립제어의 수월성 측면뿐만 아니라 자속 전류가 구동 전 구간에서 이동자 무게 모상을 위해 정착되어있으므로 기존 유도기가 갖는 자속 정착에 따른 시간 지연으로 인한 느린 응답 특성을 개선시킬 수 있는 기회를 제공한다.

제한한 입력 방법의 타당성과 제 입력 변수들의 영향을 분석하기 위해 구축된 LIM 장치를 대상으로 계단 응답 시험과 저속 구동 시험이 수행되었다. 시험 결과 기존 벡터 제어기

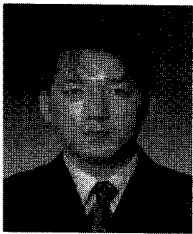
에 비해 응답 특성의 뚜렷한 개선이 확인되었으며 이 때 공극 섭동 제어 입력량은 바이어스 직류 전압의 최소 분해능 수준으로 제한되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 축간 연성량이 무시될 수 있을 정도로 적다는 것을 의미하며 이러한 현상은 저속 구동 시험에서도 확인되었다. 따라서 직류 전류량은 시평균값이 거의 0이며 AC 전원의 옴셋으로 인해 영향 받는 추력의 과도한 진폭은 무시할 수 있음을 알 수 있다. 결론적으로 새롭게 도입된 입력 패턴으로 LIM의 2축 독립 제어법이 성공적으로 입증되었으며 향후 대면적 스테이지에의 구동기로서 확장 적용할 예정이다.

참고문헌

- [1] 한혁, 서민호, “평판디스플레이 요소장비-LCD 장비,” KISTI TCI report, 2006.
- [2] 김민영, “해외 선진국의 반도체 장비 기술 동향,” KISTI 미래선도기술 이슈분석보고서, 2006.
- [3] 김재열, 이일형, “초정밀 시스템의 나노위치제어기술,” KISTI Technical trend report, 2002.
- [4] T. Morizane, N. Kimura and K. Taniguchi, “Simultaneous control of propulsion and levitation of linear induction motor in a

novel maglev system,” *Proceedings of Power Electronics and Motion Control Conference*, vol. 1, pp. 127-131, August 2000.

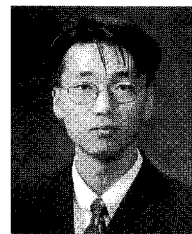
- [5] I. Takahashi and Y. Ide, “Decoupling control of thrust and attractive force of a LIM using a space vector control inverter,” *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 29, no. 1, pp. 161-167, 1993.
- [6] H. Amirkhani, A. Shoulaie, and P. Ramezanpoor, “A new thrust estimation method for on-line control of thrust and flux a LIM using a fuzzy space-vector controller,” *Proceedings of Inter. Conf. on Control Applications*, pp. 932-936, September Italy, 1998.
- [7] R. Wai, R. Duan, W. Liu, and S. Yu, “Nonlinear decoupled control for linear induction motor servo drive,” *The 27th Annual Conf. of IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 635-640, 2001.
- [8] K. Yoshida and T. Yoshida, “Soft touch mass-reduced-mode control of attractive force in SLIM vehicle propulsion,” *IEEJ Trans. IA*, vol. 123, no. 5, pp. 575-581, 2003.
- [9] 정광석, 이상현, “유도형 축방향 모터의 6축력 제어를 이용한 대회전 구현용 통합 구동기,” 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제 12 권, 제 8 호, pp. 798-804, 2006. 8.
- [10] P. Vas, *Sensorless Vector and Direct Torque Control*, OXFORD University PRESS, 1996.



정 광 석

1995년 연세대학교 기계공학과(공학사). 1997년, 2001년 연세대학교 기계공학과(공학석사/공학박사). 1997년 LG산전. 2001년~2002년 8월 LG생산기술원. 2002년 9월~현재 충주대학교 기계공학과 교수. 관심분야는 서피스 모터/엔코더, FPD

대면적 스테이지, 초정밀 계측 및 제어, 광메카트로닉스 등.



이 상 현

1996년 연세대학교 기계설계학과(공학사). 1998년, 2004년 연세대학교 기계공학과(공학석사/공학박사). 2004년 3월~2005년 2월 미국 오하이오 주립대학교 박사후 연구원. 2005년 3월~현재 안동대학교 기계공학부 교수. 관심분야는 메

카트로닉스, 초정밀 계측 및 위치결정기구 개발 등.