

고성능 자동피킹 시스템을 위한 선형 유도 모터의 고이득 관측기 기반의 강인 추종 제어

High Gain Observer-based Robust Tracking Control of LIM for High Performance Automatic Picking System

최정현* · 김정수* · 김상훈** · 유등상** · 김경화*

Jung-Hyun Choi, Jung-Su Kim, Sanghoon Kim, Dong Sang Yoo, and Kyeong-Hwa Kim[†]

*서울과학기술대학교 전기정보공학과, **한경대학교 전기전자제어공학과

[†] Department of Electrical and Information Engineering,
Seoul National University of Science and Technology

요 약

고정밀도와 고속응성의 물류 이송을 위한 자동피킹 시스템 (Automatic Picking System; APS) 구동용 선형 유도 모터 드라이브의 설계 기법 및 고이득 관측기 기반의 강인 속도 제어 기법이 제안된다. APS에 존재하는 외란추력, 질량 및 마찰 계수 등의 기계적 파라미터 불확정성은 시스템의 속도 제어 성능에 직접적인 영향을 주며 이러한 불확정성 하에서도 강인한 속도 응답 성능을 보유하는 속도 제어가 요구된다. 시스템의 불확정성을 효과적으로 추정할 수 있는 고이득 관측기를 통해 외란이 추정되며 시스템의 불확정성을 제거하기 위해 추정된 외란이 제어입력에 전향제어 방식으로 보상된다. 기존의 외란 관측기가 질량 변화에 기인한 시변 외란을 효과적으로 보상하는 데에 한계가 있는 반면 제안된 속도 제어 시스템은 외란추력 및 질량 변화 하에서도 강인한 속도 추종 성능을 제공한다. 선형 유도 모터의 모델을 위한 Simulink 라이브러리가 상태방정식으로부터 개발되며 이를 활용한 Matlab - Simulink 기반의 비교 시뮬레이션을 통해 제안된 방식이 강인한 속도 응답 성능을 가지며 고정밀도와 고속응성을 요구하는 APS에 적합함이 입증된다.

키워드 : 전력전자, 자동피킹 시스템, 고이득 관측기, 선형 유도 모터, 파라미터 불확정성

Abstract

To implement an automatic picking system (APS) in distribution center with high precision and high dynamics, this paper presents a high gain observer-based robust speed controller design for a linear induction motor (LIM) drive. The force disturbance as well as the mechanical parameter variations such as the mass and friction coefficient gives a direct influence on the speed control performance of APS. To guarantee a robust control performance, the system uncertainty caused by the force disturbance and mechanical parameter variations is estimated through a high gain disturbance observer and compensated by a feedforward manner. While a time-varying disturbance due to the mass variation can not be effectively compensated by using the conventional disturbance observer, the proposed scheme shows a robust performance in the presence of such uncertainty. A Simulink library has been developed for the LIM model from the state equation. Through comparative simulations based on Matlab - Simulink, it is proved that the proposed scheme has a robust control nature and is most suitable for APS.

Key Words : Power Electronics, APS, High Gain Observer, Linear Induction Motor, Parameter Uncertainty

1. 서 론

변화하는 물류 환경 및 소비 패턴에 대응하기 위해, 산업 현장에서는 소량 및 다품종 제품 생산을 효과적으로 처리할 수 있는 자동피킹 시스템(Automatic Picking System; APS)과 같은 첨단물류 시스템에 대한 개발이 큰 이슈가 되고 있다[1]-[3]. 국내 경제 발전과 소비 경향에 따라 최근 구매자의 제품 선호가 다양해지고 있으며 소형의 고가 제품 주문 및 배송이 크게 증가하고 있다. 이러한 변화에 대응하기 위해 산업 현장에서 신뢰성 있는 물류 배송 시스템의 구축에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며 고정밀도와 고속응성의 APS가 최적의 물류운송 시스템으로 주목받고 있다. APS의 구조는 크게 물품을 보관하는 충전부와 주문된 품목과

Received: Aug. 25, 2014

Revised : Jan. 28, 2015

Accepted: Feb. 4, 2015

[†] Corresponding author(k2h1@seoultech.ac.kr)

- 본 연구는 경기도의 경기도지역협력연구센터(GRRC) 사업의 일환으로 수행하였음. [(GRRC한경2012-B02), 지능적 물류검사에 적합한 비전검사 알고리즘 및 유무선 통합제어 시스템 개발]

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

수량만큼 물품을 배출하는 배출기로 구분할 수 있으며, 배출기의 경우 시스템의 단가, 에너지 절약 및 경제적 측면에서 유리한 이동식 배출기 개발이 활발히 이루어지고 있다.

APS의 이동식 배출기 구현을 위해서는 선형 구동 메커니즘이 필요하며 선형 구동력을 얻기 위해서는 회전형 모터에 체인 및 기어 등을 이용하여 선형 구동력을 얻는 방법과 선형 모터를 직접 적용하는 방식으로 구분된다. 이 때 회전형 모터로부터 선형 구동력을 발생시키는 방법은 기계적 장치들의 마찰에 의한 에너지 손실과 소음이 발생한다는 단점이 있는 반면, 선형 모터를 직접 적용하는 방법은 추가적인 기계 변환장치가 필요하지 않기 때문에 구조가 간단하고 에너지 손실 및 소음이 크게 줄일 수 있다[4]-[7]. 따라서 APS에 이동식 배출기를 구현하기 위해서는 선형 모터의 채용이 절대적으로 유리하며 이를 위해서는 선형 모터의 고성능 제어기 설계 및 구동시스템에 대한 연구가 요구된다[8].

최근 AC 서보기기의 고정밀도 및 고응답성을 유지하기 위한 다양한 제어기 설계 기법들에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이러한 기법들은 부하, 외란 및 기계적 파라미터 변화 시에도 공칭 조건과 유사한 성능을 제공하기 위해 외란 관측기, 자동 튜닝 및 가변구조 제어 등과 같은 여러 강인 제어 기법을 적용하였다[9]-[14].

기존의 외란 관측기 기반의 보상기법은 미지의 상수 외란에 대해서는 효과적인 보상이 가능하여 고성능의 속도 제어 특성을 얻을 수 있지만 외란의 변화율이 작다는 가정이 요구된다[9]-[11]. 하지만 관성 및 질량 변화 등에 기인한 시변 외란에 대해서는 제어 샘플링 주기 이내에 외란의 변화가 작다고 가정하기 어려워 기존의 외란 관측기로는 시변 외란을 효과적으로 보상하는 데에 한계가 있다. 관성 및 질량의 변화에 따른 시변 외란에 대해서도 강인한 제어 성능을 유지하기 위해 회전자 관성을 추정하는 자동 튜닝 기법이 연구 되었으나[12] 이러한 기법은 주기적인 속도 및 위치 명령을 인가해야 하는 한계를 가질 뿐 아니라 한 주기 후에 추정치가 구해지는 특성을 가져 일반 서보 제어기나 APS의 이동식 배출기로 적용하기는 적합하지 않다. 가변구조 제어 방식은 슬라이딩 평면을 이용하여 기계적 파라미터 변동 및 시변 외란에 대해서도 강인한 응답특성을 제공하지만[13]-[14] 정상상태에서 고주파 성분의 채터링 문제가 존재하며 기계적인 진동과 이로 인한 추가적인 문제를 발생시킬 수 있다.

현재 대부분의 강인제어기 설계 및 구현에 관한 연구는 회전형 서보기기에 집중되고 있으며 선형 모터 및 이를 적용한 APS의 고성능 강인 제어 연구는 다소 부족하여 이에 대한 직접적 연구가 요구되고 있다.

본 논문에서는 물류 이송, 피킹 및 분류 단계에서 고정밀도를 유지할 수 있는 APS의 이동식 배출기를 구현하기 위해 선형 유도 모터의 강인 속도 제어기 설계기법이 연구되며 제안된 기법은 시스템의 불확정성을 효과적으로 추정할 수 있는 고이득 관측기를 통해 외란을 추정하여 보상한다. 본 연구에서 적용된 고이득 관측기는 기존 외란 관측기의 한계를 극복하여 기계적 파라미터 변화 및 시변 외란을 효과적으로 추정할 수 있다. 전체의 제어기는 공칭 모델을 이용한 제어입력과 파라미터 변화를 보상하기 위해 관측기 추정치를 이용한 제어입력으로 구성된다. 파라미터 변동 및 외란의 존재 시 제안된 방식의 강인한 속도제어 성능을 입증하기 위해 Matlab - Simulink를 이용한 비교 시뮬레이션 결과가 제시된다. Simulink는 선형 유도 모터의 라이브러리(Library)를 제공하지 않으므로 선형 유

도 모터 모델을 위한 Simulink 라이브러리가 개발되어 비교 시뮬레이션 연구를 위해 사용하였다.

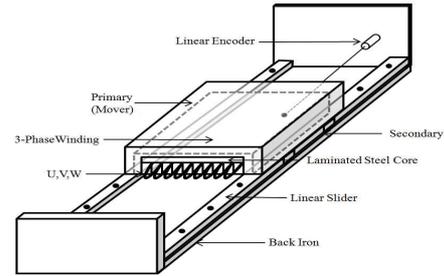


그림 1. 선형 유도 모터의 구조
Fig. 1. Configuration of linear induction motor

2. 선형 유도 모터 모델

편측형 선형 유도 모터의 구조는 그림 1과 같다. 1차측은 규소강판으로 된 적층 철심과 슬롯 및 권선으로, 2차측은 도체판과 철심에 해당하는 Back-iron으로 구성되어 있다 [6]. 1차 코일에 인가된 3상 교류전류가 진행자계를 발생시키고, 진행자계에 의해 2차측에 전류가 유기기되어 추력이 발생된다. 선형 유도 모터의 모델은 3상 회전형 모터로부터 유도되며 동기좌표계 상에서 1차측의 q축 및 d축 전류와 2차측의 q축 및 d축 자속을 상태변수로 사용하면 상태방정식은 다음과 같이 나타난다[15]-[17].

$$p i_{qs} = - \left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r} \right) i_{qs} - \frac{\pi}{h} v_c i_{ds} \quad (1)$$

$$+ \frac{L_m}{\sigma L_s L_r T_r} \lambda_{qr} - \frac{n_p L_m \pi}{\sigma L_s L_r h} v_m \lambda_{dr} + \frac{1}{\sigma L_s} v_{qs}$$

$$p i_{ds} = \frac{\pi}{h} v_c i_{qs} - \left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r} \right) i_{ds} \quad (2)$$

$$+ \frac{n_p L_m \pi}{\sigma L_s L_r h} v_m \lambda_{qr} + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r T_r} \lambda_{dr} + \frac{1}{\sigma L_s} v_{ds}$$

$$p \lambda_{qr} = \frac{L_m}{T_r} i_{qs} - \frac{1}{T_r} \lambda_{qr} - \frac{\pi}{h} v_{sl} \lambda_{dr} \quad (3)$$

$$p \lambda_{dr} = \frac{L_m}{T_r} i_{ds} + \frac{\pi}{h} v_{sl} \lambda_{qr} - \frac{1}{T_r} \lambda_{dr} \quad (4)$$

여기서 $T_r = \frac{L_r}{R_r}$: 2차측 시정수

$\sigma = 1 - \left(\frac{L_m^2}{L_s L_r} \right)$: 누설계수

L_s, L_r : 1차측 및 2차측 인덕턴스

L_m : 자화 인덕턴스

v_{qs}, v_{ds} : 1차측 q축 및 d축 전압

i_{qs}, i_{ds} : 1차측 q축 및 d축 전류

$\lambda_{qr}, \lambda_{dr}$: 2차측 q축 및 d축 자속

R_s, R_r : 1차측 및 2차측 저항

h : 극 간격
 v_e : 동기 선형 속도
 v_m : 이동자의 선형 속도
 v_{sl} : 선형 슬립 속도
 p : 미분연산자
 n_p : 극 수

슬립 속도 ω_{sl} 및 선형 슬립 속도 v_{sl} 은 다음의 관계를 갖는다[5].

$$\omega_{sl} = \frac{\pi}{h} v_{sl} = \frac{\pi}{h} (v_e - n_p v_m) \quad (5)$$

추력과 기계적 부하와의 관계는 다음과 같다.

$$F_e = K_t (\lambda_{dr} i_{qs} - \lambda_{qr} i_{ds}) = (Mp + D) v_m + F_L \quad (6)$$

여기서 $K_t = \frac{3n_p \pi L_m}{2hL_r}$ 는 추력상수, F_e 는 전자기적 추력, M 은 질량, D 는 점성마찰계수 및 F_L 은 외란이다.

자속 기준 제어에서 2차축 자속을 d축에 일치시키면 $\lambda_{qr} = 0$ 및 $\lambda_{dr} = \lambda_{qs}$ 이 되며 이러한 관계 및 식 (3)-(5)로부터 자속 기준 제어를 위한 2차축 d축 자속과 슬립 관계식은 다음과 같이 구할 수 있다[16].

$$\lambda_{dr} = \frac{L_m / T_r}{p + 1/T_r} i_{ds} \quad (7)$$

$$\omega_{sl} = \frac{(1/T_r) i_{qs}}{\lambda_{dr} / L_m} \quad (8)$$

그림 2는 선형 유도 모터의 간접 자속 기준 제어 블록도를 나타낸다. 속도 제어기의 출력이 q축 전류 명령을 발생하며 d축 전류 명령은 자속명령으로부터 발생된다. 전류 제어로는 동기좌표계 PI 비결합 전류 제어가 사용되며[17] 전압 명령은 대칭 공간벡터 PWM 기법에 의해 인가된다[18].

간접 자속 기준 제어에서 좌표 변환을 위해서는 슬립 속도 ω_{sl} 가 계산되어야 하며 ω_{sl} 은 식 (7)과 식 (8)에 전류 명령을 대입하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\omega_{sl} = \frac{(1/T_r) i_{qs}^*}{1 + T_r p} i_{ds}^* \quad (9)$$

식 (9)는 Bilinear Transformation에 의해 이산화 되며 미분 연산자는 다음과 같이 치환된다[19].

$$p = \frac{2}{T} \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \quad (10)$$

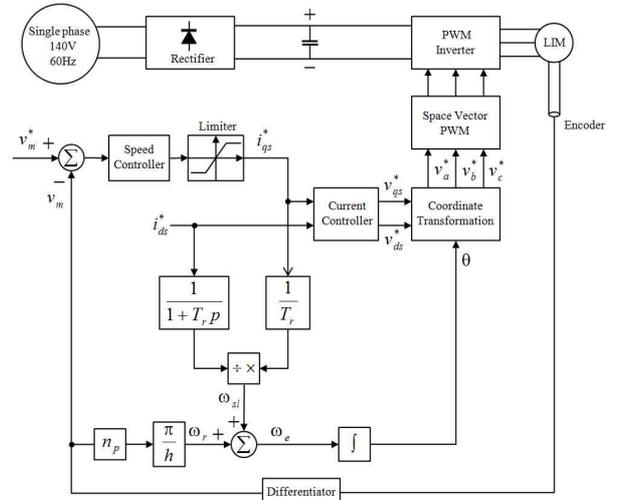


그림 2. 선형 유도 모터의 간접 자속 기준 제어 블록도
 Fig. 2. Block diagram of an indirect field-oriented control (FOC) of linear induction motor

여기서 T 는 전류제어 주기, z 는 z 연산자이다. 식 (10)을 이용하여 ω_{sl} 은 다음과 같이 디지털 방식으로 구해진다.

$$w_{sl} = \frac{a_1 + a_2 z^{-1}}{1 + z^{-1}} \cdot \frac{i_{qs}^*}{i_{ds}^*} \quad (11)$$

여기서, $a_1 = \frac{1}{T_r} + \frac{2}{T}$, $a_2 = \frac{1}{T_r} - \frac{2}{T}$ 이다.

식 (5)와 식 (11)로부터 그림 2의 동기 각속도 ω_e 가 구해지고 이를 디지털 적분기로 적분하여 θ 가 계산된다.

3. 고이득 외란 관측기를 이용한 강인제어

APS의 고정밀도와 고속응성을 위해서는 질량 및 외란 등의 변화에도 제어기가 강인한 성능을 유지해야 한다. 즉, 기계적 파라미터 변화에도 불구하고 속도 제어기가 야기하는 과도응답이 길어지거나 정상상태 오차가 발생하는 등의 성능 저하가 일어나지 않고 APS가 일정한 출력 응답성을 제공해야 한다. 이를 보장하기 위해 이 절에서는 고이득 외란 관측기 (High-gain Disturbance Observer)를 이용한 선형 유도 모터의 강인 제어기가 설계된다. 그림 3은 제안하는 강인 추종 제어의 블록도를 나타내며 여기서 $P(s)$ 는 불확정성을 포함하는 실제 선형 유도 모터의 모델, $P_n(s)$ 는 선형 유도 모터의 공칭 모델, $C(s)$ 는 불확정성이 없는 공칭 모델 $P_n(s)$ 를 위한 출력 추종 제어기를 나타낸다. 점선으로 둘러싸인 \hat{d} 를 만드는 부분은 시스템의 불확정성을 추정하기 위한 고이득 관측기를 나타내고 $Q(s)$ 는 안정한 필터를 나타낸다.

그림 3과 같이 제안된 제어기 설계 과정은 공칭 모델 (Nominal Model)을 위한 제어 u_r 를 설계하는 부분과 불확정성을 보상하기 위한 고이득 외란 관측기를 설계하는 두 부분으로 구성되어 있다.

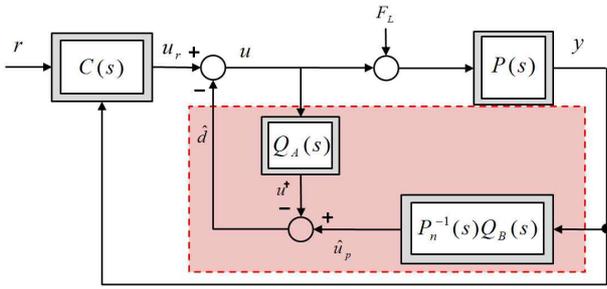


그림 3. 제안된 외란관측기를 포함한 제어 입력
Fig. 3. Control input structure of the proposed scheme

식 (6)으로부터 그림 3의 $P(s)$ 에 해당하는 선형 유도 모터의 속도 상태 방정식은 다음과 같이 나타낸다.

$$\dot{v}_m(t) = -\frac{D_o}{M}v_m(t) + \frac{K_t}{M}u(t) - \frac{1}{M}F_L \quad (12)$$

여기서 D_o 는 점성마찰계수의 공칭값, $u(t)$ 는 제어 입력이며 M 은 불확정성을 포함한 파라미터이고 F_L 은 외란이다. 식 (12)로부터 그림 3의 $P_n(s)$ 에 대응되는 불확정성을 제외한 공칭 모델의 상태 방정식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= -\frac{D_o}{M_o}x(t) + \frac{K_t}{M_o}u_r(t) \\ y(t) &= x(t) \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 $x(t)$ 는 v_m , M_o 는 질량의 공칭값, $u_r(t)$ 은 공칭 모델에 대한 제어 입력이며, 공칭 모델이므로 외란은 $F_L=0$ 이 적용되었다. 제안된 전체 제어 입력의 일부에 해당하는 u_r 을 설계하기 위하여 가상의 공칭 모델인 식 (13)을 고려한다. 이러한 공칭 모델에 대한 출력 추종 제어기 u_r 을 설계하기 위하여 본 논문에서는 LQR (Linear Quadratic Regulator) 기법을 이용하며 이를 위해 다음과 같은 이차 비용 함수(Quadratic Cost Function)를 고려한다.

$$J = \int_0^{\infty} (x-x_{\infty})^T Q (x-x_{\infty}) + (u_r-u_{\infty})^T R (u_r-u_{\infty}) dt \quad (14)$$

여기서 J 는 비용 함수, Q 와 R 은 양수, r 은 출력 명령치이며, $x_{\infty}=r$ 과 $u_{\infty} \equiv \frac{D_o}{K_t}r$ 는 출력 추종 $y=r$ 이 달성되었을 때의 상태 변수와 제어 입력 변수의 정상 상태 값을 나타낸다. LQR 이론에 따라 이 비용함수를 최소화하는 제어 입력은 다음과 같이 주어진다.

$$u_r - u_{\infty} = -R^{-1}B^T P(x - x_{\infty}) = -K(x - x_{\infty}) \quad (15)$$

따라서 공칭 모델에 대한 LQR 기반의 출력 추종 제어 입력은 다음과 같이 나타낼 수 있다[20].

$$u_r = -K(x - x_{\infty}) + u_{\infty} = -Kx + (K + \frac{D_o}{K_t})r \quad (16)$$

식 (16)의 LQR 기반의 출력 추종 제어 u_r 은 공칭 모델 (13)에 대해서 만족할 만한 출력 추종 성능을 준다. 하지만 실제 선형 유도 모터 모델은 식 (13)이 아닌 식 (12)의 형태로 나타나며, 공칭 모델에서 설계된 제어기 u_r 은 파라미터 변동에 의한 불확정성을 포함한 실제 모델에 대해서는 만족스러운 성능을 제공하기 어렵다. 이러한 불확정성을 추종하여 제거하기 위하여 다음과 같은 고이득 외란 관측기가 선형 유도 모터의 속도 제어에 적용된다[21].

$$\begin{aligned} \dot{p} &= -\frac{\alpha_0}{\tau}p + \frac{\alpha_0}{\tau}u \\ u^{\dagger} &= p \\ \dot{q} &= -\frac{\alpha_0}{\tau}q + \frac{\alpha_0}{\tau}y \\ \hat{u}_p &= -\frac{1}{g}(\frac{\alpha_0}{\tau} + \phi)q + \frac{\alpha_0}{\tau} \frac{1}{g}y \\ \hat{d} &= \hat{u}_p - u^{\dagger} \end{aligned} \quad (17)$$

여기서 p 와 q 는 고이득 관측기의 상태 변수이고, u 는 LQR과 고이득 외란 관측기가 결합된 시스템에 실제 인가되는 제어 입력이고 y 는 시스템의 출력, α_0 와 τ 는 외란관측기 파라미터를 나타낸다. 식 (17)에서 고이득 외란 관측기의 출력은 \hat{d} 이며, 이는 시스템 불확정성의 추정치가 된다. 추정된 시스템의 불확정성 \hat{d} 를 이용하여 실제 시스템의 불확정성을 제거하기 위하여 시스템에 인가되는 제어입력은 다음과 같다.

$$u = u_r - \hat{d} \quad (18)$$

식 (18)에 사용된 \hat{d} 은 시스템의 불확정성을 상쇄하게 되며, 제어입력 u 가 불확정성을 포함한 시스템 $P(s)$ 에 적용되었을 때의 출력을 u_r 이 공칭 모델 $P_n(s)$ 에 적용되었을 때의 출력에 수렴하게 하는 작용을 (공칭 성능 회복, Nominal Performance Recovery) 한다. 이를 통해 강인한 출력 추종을 달성할 수 있으며 일반적으로 제어 파라미터 τ 가 작을수록 수렴하는 속도는 빨라진다. 고이득 관측기를 설계하였으므로 τ 값이 아주 작은 경우 관측기 상태 변수가 너무 커지고 그 영향이 시스템의 상태 변수에 나쁜 영향을 주게 되는 peaking이 생길 수 있는데 본 논문에서는 이를 방지하기 위해서 비선형 시스템 이론에서 잘 알려진 포화 함수를 사용하였다[21]. 또한 고이득 외란 관측기 (17)은 [21]에서 제안된 비선형 고이득 외란 관측기의 선형시스템을 위한 특별한 형태이고 본 논문에서 고려하는 자동피킹 시스템의 속도 제어 시스템은 문헌 [21]에서 안정도 해석을 위해 사용한 모든 가정(안정화 공칭 제어기, 부드러운 시스템 모델, 연속인 출력 설정치)을 만족하므로 (17)을 사용한 폐루프 시스템은 안정하다.

4. 비교 시뮬레이션 결과

이 절에서는 고이득 외란 관측기를 이용한 APS 구동용 선형 유도 모터의 강인제어 성능을 입증하기 위해 비교 시뮬레이션 결과가 제시된다. 시뮬레이션은 Matlab - Simulink를 이용하여 구현되며 Simulink는 선형 유도 모터 라이브러리를 제공하지 않아 모델의 상태방정식으로부터 선형 유도 모터의 Simulink 모델이 개발되었다. 전체 시스템은 선형 유도 모터, 고이득 관측기 기반의 속도제어기, 동기좌표계 PI 비결합 전류제어, 자속 기준 제어기 및 인버터로 구성된다. 샘플링 시간은 100 [μsec]이며 선형 유도 모터에 전압명령 인가를 위해 공간벡터 PWM 기법이 사용된다[18].

시뮬레이션에 사용된 선형 유도 모터는 3상, Y-결선, 3극, 200W의 정격을 가지며 파라미터는 표 1에 나타난다. 제안된 강인제어기의 성능을 입증하기 위해 표2와 같은 5가지의 시험 조건에서 속도 응답 특성이 비교된다.

표 1. 선형 유도 모터의 파라미터
Table 1. Parameters of Linear Induction Motor

R_s	0.2028 Ω	h	0.042 m
R_r	0.2757 Ω	M	31 kg
L_s	3.374 mH	D	15.05 kg/s
L_r	3.374 mH	K_t	13.86 Nm/wb·A
L_m	3.047 mH		

표 2. 시뮬레이션 시험 조건
Table 2. Test Conditions for Simulation

Test Conditions	
A	$M=M_o, F_L=0$ (Nominal Condition)
B	$M=2M_o, F_L=0$
C	$M=3M_o, F_L=0$
D	$M=3M_o, F_L=50N$
E	$M=4M_o, F_L=50\sin wt$

속도 제어기를 위해서 본 논문에서는 세 가지 제어기를 비교하였다. 즉, 기존에 흔히 사용되는 PI 제어기, 루엔버거 관측기와 PI 제어를 결합한 제어기, 그리고 본 논문에서 제안하는 LQR과 고이득 외란관측기를 모의 실험에서 사용하였다. 각 제어기의 설계 파라미터는 다음과 같다.

PI 제어기: $k_p = 10.17, k_I = 4.6$

PI 제어기+관측기: $k_p = 10.17, k_I = 4.6,$

$$\text{관측기 이득} = \begin{bmatrix} 395 \\ -162025 \end{bmatrix}$$

LQR+고이득 외란 관측기: $Q=30, R=0.3,$ LQR 게인 $K=9.997, \alpha_0=2, \tau=0.6$ (수식 (16)과 (17) 참조).

또한 LQR과 고이득 외란 관측기를 결합한 경우 고이득 관측기로 인한 peaking 현상을 막기 위해서 고이득 관측기 출력을 포화 함수(saturation function)를 거치도록 하였다. 즉 실제 모의 실험에서 사용한 LQR, 고이득 외란 관측기와 포화 함수를 결합한 다음과 같은 제어기를 사용하였다.

$$u = u_r - \text{sat}(\hat{d})$$

여기서 $\text{sat}(\cdot)$ 는 적절한 크기를 가지는 포화 함수이다. 포화함수의 범위는 과도 응답 구간에서 비정상적으로 큰 제어 입력을 방지하고 정상 상태에서 제어 입력이 포화되지 않도록 본 논문에서는 $-50 \sim 50$ 으로 설정하였다.

그림 4는 파라미터 변동이 없는 공칭 조건에서 속도명령이 0.6 [m/s]일 때 각각 PI 제어기, 기존의 외란 관측기를 이용한 보상 [9], [10] 및 제안된 고이득 외란 관측기를 이용하여 얻은 속도 제어기의 응답 특성이다. 공칭 조건에서 3개의 속도제어기 모두 비슷한 과도응답 특성을 가지며 오버슈트 없이 약 1.2초 이내에 속도명령에 도달함을 알 수 있다.

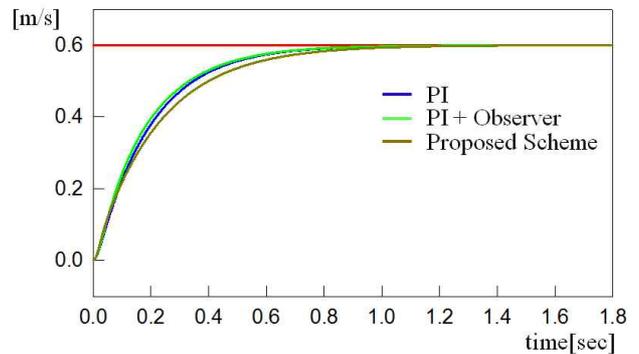
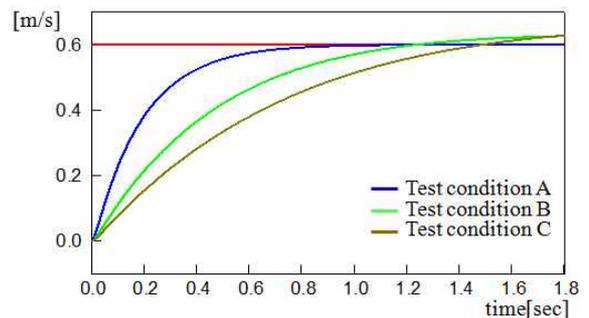
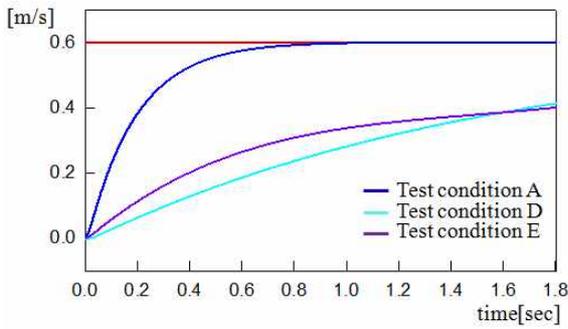


그림 4. 공칭 조건에서 각 속도 제어기의 응답 특성.
Fig. 4. Control performance of each speed controller under the nominal condition

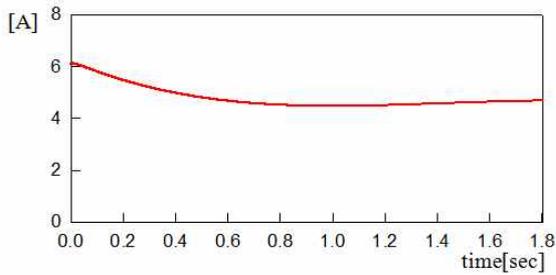
그림 5는 표 2의 5가지 시험 조건에 대해 PI 속도 제어기를 사용하였을 때의 속도 응답 특성을 나타낸다. 그림 5(a)에서 시험 조건 A는 공칭 조건, 시험 조건 B는 질량이 2배로 변화한 경우를 나타내며 시험 조건 C는 질량이 3배로 변화한 경우의 속도 응답 특성을 나타낸다. 시험 조건 A에서는 그림 4와 같이 원하는 과도응답 특성이 나타나지만, 시험 조건 B와 C에서는 질량이 증가함에 따라 필요한 전류를 선형 유도 모터에 충분히 공급할 수 없어 과도응답이 길어짐을 확인할 수 있다. 그림 5(b)는 공칭 조건인 시험 조건 A와 함께 질량 및 외란 변화가 동시에 일어나는 시험 조건 D와 시험 조건 E에 대한 속도 응답 특성을 나타낸다. 과도응답이 매우 길어지며 공칭 조건에서 설계된 PI 제어기의 이득 값으로는 질량 및 외란 변화 시 원하는 속도 응답 특성을 얻을 수 없음을 확인할 수 있다.



(a)



(b)



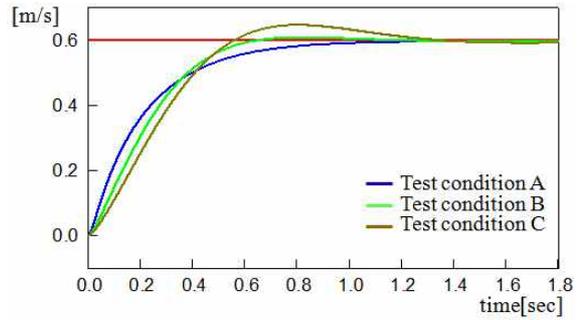
(c)

그림 5. 5가지 시험 조건에서 PI 제어기의 속도 응답 특성.
Fig. 5. Control performance of the PI speed controller under five test conditions

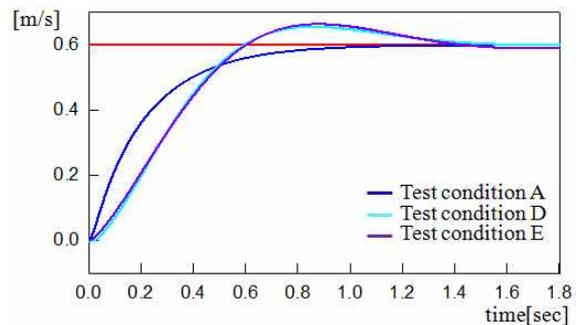
그림 6은 5가지 시험 조건에 대해 PI 속도제어기와 기존의 외란 관측기를 사용하였을 때의 속도 응답 특성을 나타낸다. 외란 추력 F_L 이 관측기에 의해 추정되며 관측기의 극점은 속도 제어기의 5배로 설계되어 추정치 \hat{F}_L 이 전향제어 방식으로 보상된다. 그림 5(a)와 같이, 그림 6(a)는 시험 조건 A, B 및 C에 대한 속도 응답 특성을 나타내며 그림 6(b)는 시험 조건 A, D 및 E에 대한 속도 응답 특성을 나타낸다. 그림 6(a)의 시험 조건 A에서의 응답은 그림 4와 동일하며 약 1.2 초 이내에 속도명령에 도달하는 것을 확인할 수 있다. 기존의 외란 관측기는 미지의 상수 외란 혹은 변화율이 작은 시변 외란에 대해서도 어느 정도의 보상이 가능하여 시험 조건 B와 같은 작은 질량 변화에 대해서 그림 5(a)에 비해 향상된 속도 응답 특성을 주지만 시험 조건 C와 같이 질량이 현저히 증가하여 제어 시스템에 큰 시변 외란이 인가되는 경우 더 이상 강인성을 유지하지 못하고 속도 응답에 큰 오버슈트와 긴 과도 응답 특성을 준다. 그림 6(b)와 같이 시스템 파라미터 및 외란의 변화가 더 증가하는 경우 과도 응답 특성의 성능 저하는 더 심화되어 매우 큰 오버슈트와 과도 응답이 매우 길어짐을 확인할 수 있다.

그림 5와 그림 6에서 같이 파라미터의 변화 시 기존 제어 기법의 성능 저하를 개선하기 위해 사용된 고이득 외란 관측기 기반 선형 유도 모터의 속도응답 특성이 그림 7에 제시된다. 그림 7은 그림 5 및 그림 6과 동일한 시험 조건에서 평가한 속도 응답 특성으로 변화된 파라미터에 대해 제안된 외란 관측기를 이용하여 제어 입력으로 보상함으로써 모든 시험 조건에 대해 속도응답의 성능 저하가 없으며 거의 유사한 응답 특성을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 제안된 선형 유도 모터의 속도 제어 시스템은 큰 파라미터 및 외란의 변화에도

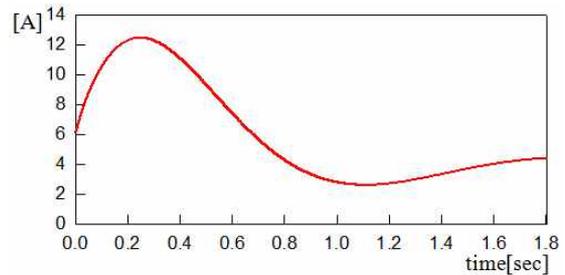
강인한 응답 특성을 얻을 수 있어 APS에서 요구하는 고속응답과 고정밀도를 갖출 수 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 6. 5가지 시험 조건에서 기존의 외란관측기+PI 속도 제어기가 사용된 응답 특성.

Fig. 6. Control performance of the PI speed controller with the conventional disturbance observer under five test conditions

그림 8은 제안된 방식의 시험 조건 5에서의 자속, q축 전류 및 상전류 응답 특성을 나타낸다. 첫 번째 파형은 자속 응답으로 q축과 d축의 2차속 자속 λ_{qr} 과 λ_{dr} 을 나타낸다. 선형 유도 모터의 간접 자속 기준 제어가 잘 이루어져 모든 2차속 자속은 d축에만 존재하고 $\lambda_{qr} = 0$ 이 됨을 확인할 수 있다. 두 번째 파형은 1차속 q축 전류 i_{qs} 를 나타내며, 과도상태에서 증가된 질량을 보상하기 위해 큰 전류를 공급하고 속도명령에 도달하였을 때 외란성분의 전류를 유지하는 것을 확인할 수 있다. 세 번째 파형은 정상상태에서의 3상전류 파형을 나타낸다.

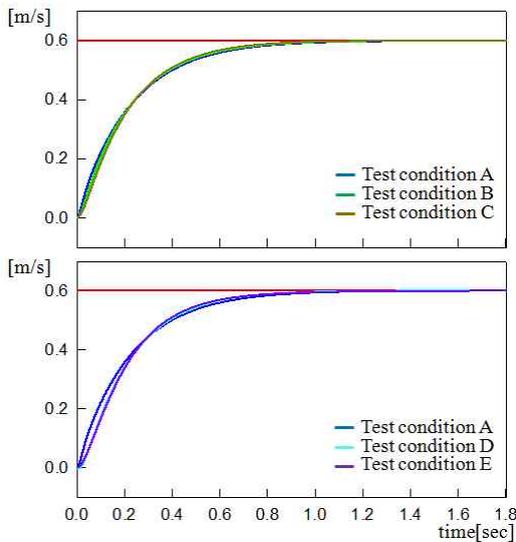


그림 7. 5가지 시험 조건에서 제안된 LQR+고이득 외란관측기 기반의 속도 제어기의 응답 특성.

Fig. 7. Control performance of the proposed high-gain disturbance observer-based speed controller under five test conditions

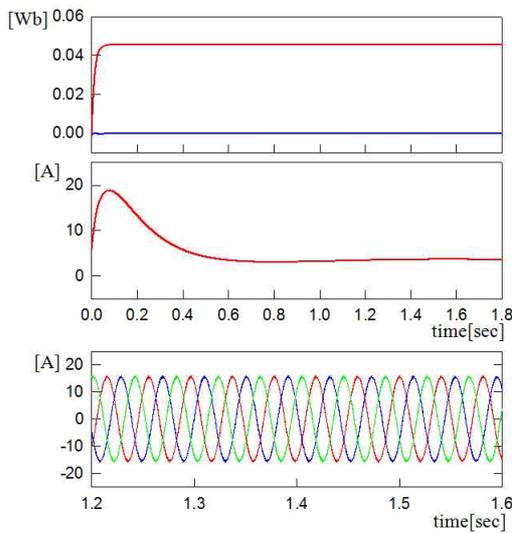


그림 8. 시험조건 5에서 제안된 기법의 자속, q축 전류(제어 입력 u) 및 상전류 응답 특성

Fig. 8. Responses of flux, q-axis current, and phase currents under the test condition 5

5. 결 론

본 논문에서는 APS 응용을 위해 고정밀도 및 고속응성을 유지할 수 있는 선형 유도 모터의 강인 속도 제어 기법을 제시하였다. 선형 유도 모터의 속도 제어 성능에 직접적인 영향을 주는 기계적 파라미터 변화 및 시변 외란에도 강인한 속도 제어 응답을 제공하기 위해 고이득 외란 관측기가 설계된다. 제어기로는 LQR 기법을 이용하여 공칭 조건에서 이차 비용 함수를 최소화하는 제어 입력이 설계된다. 파라미터 변화에 기인한 시스템의 불확정성을 제거하기 위해 고이득 외란 관측기가 적용되며 추정된 외란의 전향제어를 통해 시스템의 불확정성이 제거된다. 기존의 외란 관측기가 질량 변화 시 외란을 효과적으로 보상하는 데에 한계가 있는 반면 제안된 속도 제어 시스템은 외란추력 및 질량 변화 하에서도 강인한 속도 추종 성능을 제공한다. 선형 유도 모터의 모델을 위한 Simulink 라이브러리가 상태방정식으로부터 개발되었으며 제안된 방식의 유용성을 입증하기 위해 다섯 가지 시험조건에서 Matlab - Simulink를 이용한 비교 시뮬레이션이 수행되어 속도 응답 성능이 평가된다. 비교 시뮬레이션 결과를 통해 제안된 기법이 미지 시변 외란 및 질량과 등의 기계적 파라미터 변화 하에서도 강인한 속도 제어 특성을 제공함을 확인할 수 있다.

수를 최소화하는 제어 입력이 설계된다. 파라미터 변화에 기인한 시스템의 불확정성을 제거하기 위해 고이득 외란 관측기가 적용되며 추정된 외란의 전향제어를 통해 시스템의 불확정성이 제거된다. 기존의 외란 관측기가 질량 변화 시 외란을 효과적으로 보상하는 데에 한계가 있는 반면 제안된 속도 제어 시스템은 외란추력 및 질량 변화 하에서도 강인한 속도 추종 성능을 제공한다. 선형 유도 모터의 모델을 위한 Simulink 라이브러리가 상태방정식으로부터 개발되었으며 제안된 방식의 유용성을 입증하기 위해 다섯 가지 시험조건에서 Matlab - Simulink를 이용한 비교 시뮬레이션이 수행되어 속도 응답 성능이 평가된다. 비교 시뮬레이션 결과를 통해 제안된 기법이 미지 시변 외란 및 질량과 등의 기계적 파라미터 변화 하에서도 강인한 속도 제어 특성을 제공함을 확인할 수 있다.

References

- [1] <http://www.ssi-schaefer.us/>
- [2] <http://www.sihis.com/>
- [3] <http://www.yamaha-motor.co.jp/robot/lineup/lcm100/>
- [4] J. F. Gieras, Linear Induction Drives. Oxford: Clarendon Press, 1994.
- [5] F. J. Lin, H. J. Shieh, K. K. Shyu, and P. K. Huang, "On-line gain tuning IP controller using real-coded genetic algorithm", *Electric Power System Research*, vol. 72, pp. 157-169, 2004.
- [6] H. W. Lim, B. Chae, M. H. Choi, K. Y. Lee, G. B. Cho, and H. L. Baek, "The stabilized speed control modeling of single-side linear induction motor considering end-effect", *The Korean Institute of Power Electronics*, vol. 11, no. 3, pp. 266-273, 2006.
- [7] W. Xu, Y. Zhang, C. Zeng, and X. Xiao, "Rotor field oriented control of linear induction machine based on fuzzy self-adapting PI controller", *IEEE Inter. Symposium on Industrial Electronics*, pp. 731-736, 2012.
- [8] J. H. Choi, S. H. Kim, D. S. Yoo, and K. H. Kim, "A DSP-based robust position controller of a single-sided linear induction motor for automatic picking system", *Inter. Journal of Con. and Auto*, vol. 7, no. 6, pp. 325-338, 2014.
- [9] O. Barambones, P. Alkorta, J. M. G. de Durana, and E. Kremers, "A robust position control for induction motors using a load torque observer", *Mediterranean Conference on Control & Automation*, pp. 278-283, 2012.
- [10] H. C. Sung, Y. H. Joo, and J. B. Park, "Robust digital redesign for observer-based system", *Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 17, no. 3, pp. 285-440, 2007.
- [11] S. K. Chung, J. H. Lee, J. S. Ko, and M. J. Youn, "Robust speed control of brushless direct-drive motor using integral variable structure control", *IEE Proc. Electr. Power Appl.*, vol. 142, no. 6, pp. 361-370, 1995.
- [12] S. Kobayashi, I. Awaya, H. Kuromaru, and K. Oshitani, "Dynamic model based auto-tuning digital servo driver", *IEEE Trans. on Indus. Electr.*, vol. 42, no. 5, pp. 462-466, 1995.
- [13] D. S. Yoo, "Design of integral sliding mode control for

underactuated mechanical systems", *Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 23, no. 3, pp. 190-279, 2013.

[14] M. K. Song, Y. H. Joo, and J. B. Park, "Sliding mode observer for fuzzy system: An LMI approach", *Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 16, no. 4, pp. 389-527, 2006.

[15] H. S. Song, O. G. Lee, J. T. Lee, and J. J. Woo, "A study on the speed controller with high accuracy of and induction motor by fuzzy algorithms", *Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 3, no. 2, pp. 3-71, 1993.

[16] D. W. Novotny and R. D. Lorenz, Introduction to Field Orientation and High Performance AC Drives. *IEEE IAS Tutorial Course*, 1986.

[17] T. M. Rowan and R. J. Kerkman, "A new synchronous current regulator and an analysis of current-regulated PWM inverters", *IEEE Trans. Ind. App.*, vol. 22, no. 4, pp. 678-690, 1986.

[18] H. W. van der Broeck, H. C. Skudelny, and G. V. Stanke, "Analysis and realization of a pulsewidth modulator based on voltage space vectors", *IEEE Trans. Ind. App.*, vol. 24, no. 1, pp. 142-150, 2008.

[19] K. Ogata, Discrete-time Control Systems. *Prentice-Hall*, 1987.

[20] B.D.O. Anderson and J. B. Moore, Optimal Control: Linear Quadratic Methods, Prentice-Hall, 1989

[21] J. H. Back and H. B. Shim, "Adding robustness to nominal output-feedback controllers for uncertain nonlinear systems: A nonlinear version of disturbance observer". *Automatica*, vol. 44, no. 10, pp. 2528-2537, 2008.

2008년 : 영국 Leicester 대학교 박사후 연구원
2009년~현재 : 서울과학기술대학교 전기정보공학과 조교수

관심분야 : MPC, Robust Control, Coordinated Control, Control of Energy Systems

Phone : +82-2-970-6547

E-mail : jungsu@seoultech.ac.kr



김상훈(Sang Hoon Kim)

1987년 : 고려대학교 전자공학과 공학사
1989년 : 고려대학교 전자공학과 공학석사
1999년 : 고려대학교 전자공학과 공학박사
1989년~1994년 : LG반도체 선임연구원
1999년~현재 : 국립환경대학교 전기전자 제어공학과 교수

관심분야 : 영상신호처리, 컴퓨터비전, 지능제어로봇

Phone : +82-31-670-5290

E-mail : kimsh@hknu.ac.kr



유동상(Dong Sang Yoo)

1985년 : 서울대학교 전기공학과 공학사
1987년 : KAIST 전기 및 전자공학과 공학석사
1992년 : KAIST 전기 및 전자공학과 공학박사
1992년~2000년 : LG생산기술원 책임연구원
2000년~현재 : 국립환경대학교 전기전자 제어공학과 교수

관심분야 : 강인제어, 로봇틱스, 자동화.

Phone : +82-31-679-5322

E-mail : dsyoo@hknu.ac.kr

저 자 소 개



최정현(Jung-Hyun Choi)

2013년 : 서울과학기술대학교
전기공학과 공학사
2013년~현재 : 서울과학기술대학교 대학
원 전기정보공학과 석사
과정

관심분야 : AC Machine Drive, Inverter, Robust Control

Phone : +82-10-4514-5884

E-mail : jhchoi7601@naver.com



김정수(Jung-Su Kim)

1998년, 2000년, 2005년 : 고려대학교 전
기공학과 학사, 석사, 박사
2005년 : 서울대학교 박사후 연구원
2006년~2007년 : 독일 Stuttgart 대학교
박사 후 연구원



김경화(Kyeong-Hwa Kim)

1991년 : 한양대학교 전기공학과 공학사
1993년 : KAIST 전기 및 전자공학과
공학석사
1998년 : KAIST 전기 및 전자공학과
공학박사
1988년~2000년 : 삼성전자 선임연구원

2000년~2002년 : KAIST 연구 교수

2002년~현재 : 서울과학기술대학교 전기정보공학과 교수

관심분야 : AC Machine Drive, Inverter, Renewable Energy, Robust Control

Phone : +82-2-970-6406

E-mail : k2h1@seoultech.ac.kr