

자동피킹 시스템 구동용 선형 유도 모터 드라이브 설계 및 적분형 가변구조 제어 기반의 강인 위치 제어기 설계

Design of Linear Induction Machine Drive and Robust Position Controller based on Integral Variable Structure Scheme for Automatic Picking System

최정현* · 유동상** · 김경화†

Jung-Hyun Choi, 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

고 정밀도와 고 속응성의 물류 이송을 위한 자동피킹 시스템 (Automatic Picking System; APS) 구동용 선형 유도 모터 드라이브의 설계 및 강인한 위치 제어 기법이 제안된다. 모델 불확실성에 대한 강인한 위치 제어기 설계를 위해서 적분형 가변구조 제어 기법이 고려된다. APS의 외란추력, 질량 및 마찰계수 등의 기계적 파라미터 변화는 위치 제어 성능에 직접적 영향을 주며 이러한 불확실성 하에서도 강인한 위치 응답 성능을 보유하는 위치 제어기가 설계된다. 선형 유도 모터의 모델을 위한 Simulink 라이브러리가 상태방정식으로부터 개발되며 이를 활용한 Matlab - Simulink 기반의 비교 시뮬레이션을 통해 제안된 방식이 강인한 위치 응답 성능을 가지며 고 정밀도와 고 속응성을 요구하는 APS에 적합함이 입증된다.

키워드 : 자동피킹 시스템, 적분형 가변구조 제어, 선형 유도 모터, 파라미터 불확실성, 위치 제어

Abstract

To implement an automatic picking system (APS) in distribution center with high precision and high dynamics, this paper presents a design of a linear induction motor (LIM) drive and robust position controller based on integral variable structure control (IVSC) scheme. The force disturbance as well as the mechanical parameter variation such as the mass and friction coefficient gives a direct influence on the position control performance of APS. To guarantee a robust control performance in the presence of such uncertainty, a robust position controller is designed. A Simulink library is developed for the LIM model from the state equation. Through this model and comparative simulation based on Matlab - Simulink, it is proved that the proposed scheme has a robust control nature and is most suitable for APS.

Key Words : APS, IVSC, Linear Induction Motor, Parameter Uncertainty, Position Control

1. 서 론

최근 물류 환경 및 소비자의 소비 패턴 변화에 대응하기

접수일자: 2013년 9월 1일

심사(수정)일자: 2013년 9월 7일

게재확정일자 : 2013년 10월 24일

† Corresponding author

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 (일부) 지원으로 수행되었습니다.

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.

위하여 소량, 다품종 제품의 주문 발송을 효과적으로 처리할 수 있는 자동피킹 시스템(Automatic Picking System; APS)과 같은 첨단물류 시스템에 대한 개발이 매우 활발하다[1]-[2]. 국내 경제 발전의 영향으로 소형의 고가 제품들에 대한 주문 및 배송이 크게 증가하고 있는 반면 신뢰성 있는 물류배송 시스템의 구축에 관한 연구는 여전히 미진한 상태이다. APS의 배출기 구조는 고정식 배출기와 이동식 배출기로 구분할 수 있으며, 현재에는 에너지 절약 및 경제적 측면에서 유리한 이동식 배출기 개발이 주류를 이루고 있다.

APS에서 선형 구동 메커니즘 방식의 이동식 배출기를 구현하기 위해서 기존의 회전형 모터와 기계 변환 장치를 조합하여 구성할 수 있다. 하지만 이러한 구성은 스크루, 체인 및 기어 시스템 등과 같은 기계적 변환 장치에서의 마찰에 의한 손실과 소음이 과도하여 최근에는 기계적인 변환장치 없이 직접 선형 구동력을 발생시키며 에너지 손실이나 소음을 저감할 수

있는 선형 모터의 적용이 선호되고 있다[3]-[6]. 따라서 APS에 선형 모터 채용을 통한 이동식 배출기를 구현하기 위해서는 선형 모터의 고성능 위치 제어기 설계 및 구동시스템에 대한 연구가 요구된다.

최근 서보 제어 시스템의 강인 제어 기법을 구현하기 위해 외란 관측기 및 자동 튜닝 기법 등이 적용되어 왔다 [7]-[9]. 외란 관측기를 이용한 파라미터 추정 은 미지의 외란 및 소량의 기계적 파라미터 변화에 대해서는 보상이 가능하지만 관성 불일치로 인해 발생하는 외란 토크는 가속도에 비례하고 변화율이 커 기존의 관측기로는 추정이 쉽지 않다. 또한 자동 튜닝 기법은 다소 복잡하고 많은 연산이 필요하여 제어기의 부하가 커지는 측면이 존재한다.

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 고성능 강인 위치 제어기 설계기법이 제시된다. 제안된 기법은 적분형 가변구조 제어기(Integral Variable Structure Control; IVSC)로 이루어진다[10]-[12]. 가변구조 제어기는 현재의 오차 또는 상태 변수들의 값에 따라 스위칭 논리에 의한 불연속함 제어입력을 적용함으로써 응답의 속응성과 정밀도를 향상 시키는 특징을 가진다. 본 논문에서 적용하는 적분형 가변구조 제어기법은 초기 값에서 슬라이딩 평면까지의 도달시간이 없이 과도상태에서도 강인성이 향상되는 특징을 가진다. 가변구조 제어의 단점인 불연속 제어입력에 의해 발생하는 고주파 성분의 채터링 현상을 보완하기 위해 연속함 근사를 적용하였다.

제안된 방식이 파라미터 변동에 대해 강인한 위치제어 성능을 주며, APS의 선형 구동 메커니즘에 가장 적합한 제어기임을 입증하기 위해 Matlab - Simulink를 이용한 비교 시뮬레이션 결과가 제시된다. Simulink는 선형 유도 모터의 라이브러리(Library)를 제공하지 않으므로 선형 유도 모터 모델을 위한 Simulink 라이브러리가 개발되어 비교 시뮬레이션 연구를 위해 사용하였다.

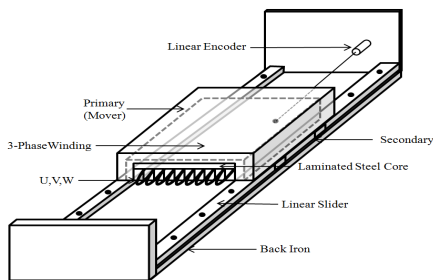


그림 1. 선형 유도 모터의 구조
Fig. 1. Configuration of linear induction motor

2. 선형 유도 모터 모델

편측형 선형 유도 모터의 구조는 그림 1과 같다. 1차측은 구조상관으로 된 적층 철심과 슬롯 및 권선으로 구성되어 있으며, 2차측은 도체판과 철심에 해당하는 back-iron으로

구성되어 있다[5].

선형 유도 모터에서는 1차 코일에 3상 교류전류를 인가하여 진행자계를 발생시키고, 이 진행자계에 의해 2차측에 전류가 유기되어 추력이 발생된다. 선형 유도 모터의 모델은 3상 Y-결선 회전형 모터로부터 유도되며 동기좌표계 상에서 1차측의 q축 및 d축 전류와 2차측의 q축 및 d축 자속을 상태변수로 사용하면 상태방정식은 다음과 같이 나타난다 [13]-[14].

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

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

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

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

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

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

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[4].

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

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 $K_t = \frac{3n_p \pi L_m}{2h L_r}$ 는 추력상수, F_e 는 전기자기적 추

력, M 은 질량, D 는 점성마찰계수 및 F_L 은 외란 이다.

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

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

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

그림 2는 선형 유도 모터의 간접 자속 기준 제어 블록도를 나타낸다. 위치 제어기의 출력이 q축 전류 명령을 발생하며 자속명령으로부터 d축 전류 명령이 발생된다. 전류 제어로는 동기좌표계 PI 비결합 전류 제어기[15] 사용되며 전압 명령은 대칭 공간벡터 PWM 기법에[16] 의해 인가된다.

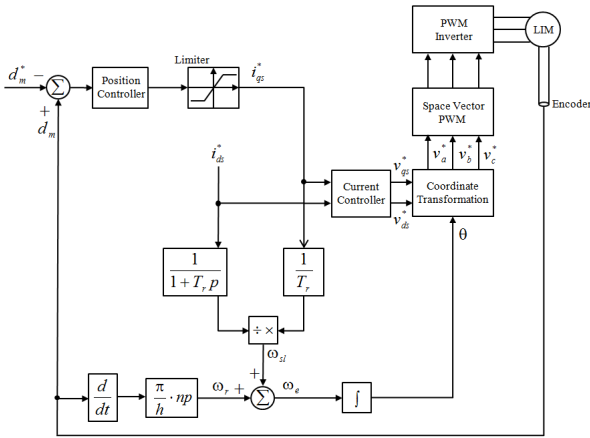


그림 2. 선형 유도 모터의 간접 자속 기준 제어 블록도
Fig. 2. Block diagram of an indirect field-oriented control (FOC) of linear induction motor

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.

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

식 (9)는 Bilinear transformation에 의해 이산화 되며 미분 연산자는 다음과 같이 치환된다[17].

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

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

식 (11)과 v_m 으로부터 동기 각속도 ω_e 가 계산되며 이를 디지털 적분기로 적분하여 θ 가 계산된다. 그림 3은 제어기 성능 평가를 위해 Simulink로 구현된 선형 유도 모터의 모델 블록도를 나타낸다.

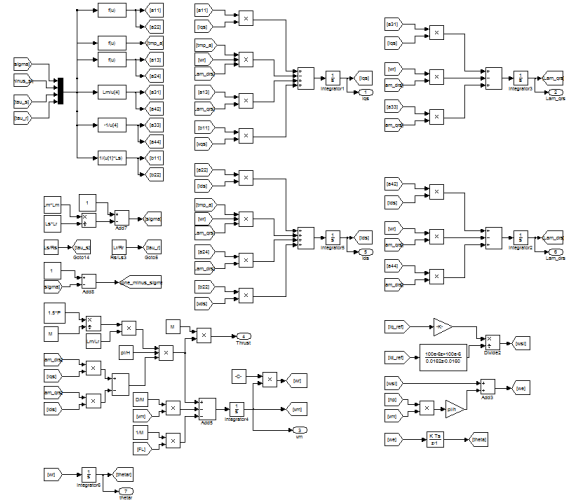


그림 3. 선형 유도 모터의 Simulink 모델
Fig. 3. Developed Simulink model for linear induction motor

3. 적분형 가변구조제어를 이용한 강인제어

APS의 고정밀도와 고속 처리를 위해서는 외란 및 질량 등의 파라미터 변화에도 제어기가 고 속응성 및 강인성을 유지해야만 한다. 외란 및 질량 등의 기계적 파라미터 변화 시 기존의 위치 제어기는 정상상태 오차가 발생하거나 과도응답이 길어지는 성능 저하가 일어나 APS 사용자가 원하는 고 속응성과 고 정밀도를 유지할 수 없게 된다. 이러한 파라미터 변화에도 APS의 강인한 위치 제어 성능을 보장하기 위해 적분형 가변구조 제어 기반의 선형 유도 모터의 위치 제어기가 설계된다.

적분형 가변구조 제어는 등가제어 입력 및 특정 상태 내에 시스템 특성이 유지되도록 하는 스위칭 제어 입력으로 구성되며, 파라미터 및 외란의 변화에 대해 강인한 제어 특성을 유지하는 장점을 가지고 있다. 부하 및 파라미터 변동에 대한 강인성 시험을 위해 다음과 같이 질량, 마찰계수, 외란 변화가 가정된다.

$$\begin{aligned} M_{\min} < M_o < M_{\max} \\ D_{\min} < D_o < D_{\max} \\ F_{L,\min} < F_{Lo} < F_{L,\max} \end{aligned}$$

여기서 “o”는 nominal 값을 나타내며, 첨자 ‘min’과 ‘max’는 각각 파라미터의 최솟값과 최댓값을 나타낸다. 자속 기준 제어 하에서 $\lambda_{gr} = 0$, 추력 $F_e = K_t \lambda_{dr} i_{qs}$ 이 되므로 nominal 값을 이용하여 식 (6)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_e = K_t \lambda_{dr} i_{qs} = M_o p v_m + D_o v_m + f \quad (12)$$

여기서 f 는 다음과 같이 정의된다.

$$f = (M - M_o) p v_m + (D - D_o) v_m + F_L \quad (13)$$

기존의 가변구조 제어에서의 슬라이딩 평면은 다음과 같이 나타난다.

$$s = x_2 + c x_1 = 0 \quad (14)$$

여기서 c 는 슬라이딩 면의 계수, x_2 및 x_1 은 각각 속도와 위치의 상태 오차를 나타낸다. 기존의 가변구조 제어는 상태 오차가 슬라이딩 모드에 도달하기 전까지의 과도상태 동안에 강인한 제어 특성을 유지할 수 없다. 이러한 문제를 해결하기 위해 기존 가변구조 제어에 적분 항을 추가하여 도달기간 없이 슬라이딩 모드가 발생하도록 한다. 2차 시스템에 적분 항을 추가함으로써 슬라이딩 평면 (14)는 다음과 같이 나타난다.

$$s = x_2 + \beta x_1 + c \int_{-\infty}^t x_1 d\tau = 0 \quad (15)$$

여기서 β 는 슬라이딩 면의 계수이다. 이동자의 이동거리를 d_m , 위치 오차를 $x_1 = d_m - d_m^*$, 그리고 속도 오차를 $x_2 = v_m - v_m^*$ 이라 하면 상태 오차 방정식은 다음과 같다.

$$p x_1 = x_2 \quad (16)$$

$$p x_2 = -\frac{D_o}{M_o} x_2 + \frac{K_t}{M_o} \lambda_{dr} u - \frac{1}{M_o} f \quad (17)$$

여기서 “*”는 명령치를 나타내며, $u = i_{qs}$, $v_m = p d_m$ 및 $p v_m^* = v_m^* = 0$ 이다. 식 (15)의 슬라이딩 모드에서 시스템 동특성은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p x_2 = -(\beta p x_1 + c x_1) \quad (18)$$

식 (18)에서 슬라이딩 면의 계수 β 와 c 를 이용하여 시스템의 동특성을 설정할 수 있다. 적분형 가변구조 제어는 적분 초기 값에 의해 시스템의 동특성이 달라지기 때문에 전체 과도상태에서 슬라이딩 모드를 발생시키기 위해서는 $t=0$ 일 때의 적분 초기 값을 설정하여야 한다. $t=0$ 일 때의 슬라이

딩 평면은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_2(0) + \beta x_1(0) + c \cdot I_o = 0 \quad (19)$$

식 (19)에서 $x_2(0)$ 과 $x_1(0)$ 은 각각 상태 오차의 초기 값이며 I_o 는 적분기의 초기 값을 나타낸다. 식 (19)로부터 전체 과도 구간에서 슬라이딩 모드가 일어나도록 하는 I_o 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I_o = -\left(\frac{x_2(0) + \beta x_1(0)}{c}\right) \quad (20)$$

그림 4는 APS를 위한 적분형 가변구조 제어를 나타낸다. 제어입력은 등가제어 입력항과 스위칭 제어 입력항의 두 가지로 다음과 같이 구성된다.

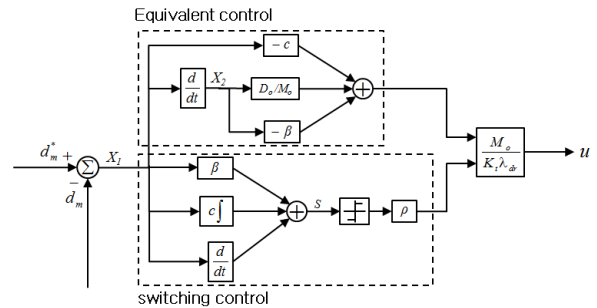


그림 4. 제안된 기법의 제어 입력

Fig. 4. Control input structure of the proposed scheme

$$u = u_{eq} + \Delta u \quad (21)$$

여기서 u_{eq} 는 등가 제어입력이며 Δu 는 스위칭 제어입력이다. 등가입력은 $f=0$ 및 $\dot{s}=0$ 의 조건과 식 (17)로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$u_{eq} = \frac{M_o}{K_t \lambda_{dr}} \left(\frac{D_o}{M_o} x_2 - \beta x_2 - c x_1 \right) \quad (22)$$

스위칭 제어입력 Δu 는 불연속 함수이며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta u = \frac{M_o}{K_t \lambda_{dr}} \rho \cdot \text{sgn}(s) = \frac{M_o}{K_t \lambda_{dr}} \rho \cdot \frac{s}{|s|} \quad (23)$$

여기서 ρ 은 스위칭 함수의 이득이다. 스위칭 함수가 슬라이딩 모드에 존재하기 위해서는 $s \dot{s} < 0$ 의 조건을 만족해야 하며, 식 (22)와 (23)을 이용하면 위의 조건은 다음과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} \dot{s}s &= s \left(-\frac{D_o}{M_o}x_2 + \frac{K_t\lambda_{dr}}{M_o}u - \frac{1}{M_o}f + \beta x_2 + cx_1 \right) \quad (24) \\ &= s \left(\rho \cdot \text{sgn}(s) - \frac{1}{M_o}f \right) < 0 \end{aligned}$$

식(24)로부터 이득 ρ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\rho \begin{cases} < \frac{1}{M_o}f_{\min} & \text{if } s > 0 \\ < -\frac{1}{M_o}f_{\max} & \text{if } s < 0 \end{cases} \quad (25)$$

위칭 제어입력은 $\text{sgn}(s)$ 에 따른 불연속 성분을 가지므로 슬라이딩 모드에서 스위칭 함수에 따른 큰 채터링이 발생한다. 채터링을 줄이기 위해 스위칭 함수는 불연속함수를 지수 함수를 포함한 연속함수로 근사하여 다음과 같이 나타낸다.

$$\text{sgn}(s) = \frac{s}{|s| + e^{at}} \quad (26)$$

스위칭 함수를 연속함으로 바꿔 줌으로써 상태오차가 슬라이딩 평면에 도달한 후 채터링 현상 없이 스위칭 제어입력이 원점으로 이동함을 알 수 있다.

4. 비교 시뮬레이션 결과

이 절에서는 적분형 가변구조 제어를 이용한 APS 구동용 선형 유도 모터의 강인제어 성능을 입증하기 위해 비교 시뮬레이션 결과가 제시된다. 그림 5는 Simulink로 구현한 APS 구동용 선형 유도 모터의 제어 구조를 나타낸다. 전체 시뮬레이션은 Matlab - Simulink를 이용하여 구현되며 Simulink는 선형 유도 모터 라이브러리를 제공하지 않으므로 식 (1)-(4)의 상태방정식으로부터 Simulink 모델이 개발되었다. 전체 시스템은 선형 유도 모터, 적분형 가변구조 기반의 위치 제어기, 전류 제어기, 자속기준 제어기 및 인버터로 구성된다. 전류 제어로는 동기좌표계 PI 비결합 전류제어가 사용된다[15]. 샘플링 시간은 100 [μsec]로 설정되며 전압명령 인가를 위해 공간벡터 PWM 기법이 사용된다[16].

시뮬레이션에 사용된 선형 유도 모터는 3상, Y-결선, 2극, 3 kW 정격을 가지며 파라미터는 표 1에 나타난다. 강인제어 성능을 입증하기 위해 다음의 5가지의 시험조건에서 제어기 성능이 평가된다.

- Test condition 1: $M = M_o, D = D_o, F_L = 0$
- Test condition 2: $M = 2M_o, D = D_o, F_L = 0$
- Test condition 3: $M = M_o, D = D_o, F_L = 50[\text{N}]$
- Test condition 4: $M = 2M_o, D = 1.2D_o, F_L = 50[\text{N}]$
- Test condition 5: $M = 3M_o, D = 1.2D_o, F_L = 50[\text{N}]$

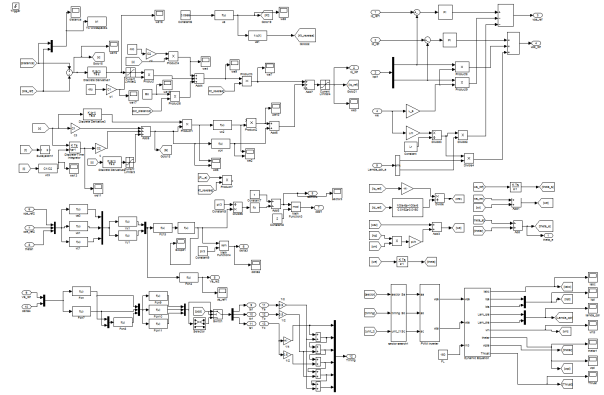


그림 5. Simulink 기반의 APS 구동용 선형 유도 모터의 시뮬레이션 구조
Fig. 5. Simulation configuration of a linear induction motor for APS using Simulink

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

R_s	5.4 Ω	h	0.027 m
R_r	3.5 Ω	M	2.78 kg
L_s	28.5 mH	D	36.0455 kg/s
L_r	28.5 mH	K_t	148.35 Nm/wb·A
L_m	24.2 mH		

그림 6은 각 시험 조건에서 위치명령이 1[m]인 경우의 PI 위치 제어기의 응답 특성이다. 파라미터가 nominal 값인 시험조건 1에서는 영의 정상상태 오차 및 원하는 과도응답 특성을 얻는 반면 파라미터 및 외란 추력이 변화는 시험조건 2, 3, 4, 및 5에서는 정상상태 오차가 발생하거나 응답의 속응성이 저하되어 PI 위치 제어기로는 고 정밀도와 고 속응성을 갖는 APS구축이 어려움을 확인할 수 있다. 그림 6에서 특히 외란의 인가 시에 오차가 발생하고 응답특성이 현저히 저하됨을 알 수 있다.

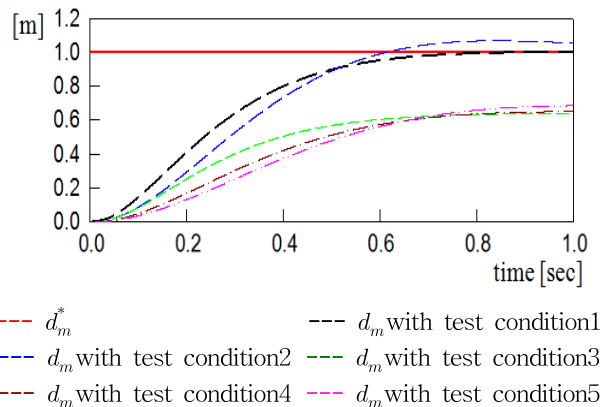


그림 6. 각 시험조건에서 PI 위치 제어기의 응답 특성
Fig. 6. Control performance of the PI position controller under respective test conditions

그림 7은 시험조건 5에서 PI 위치 제어기가 사용될 때의 전류, 자속 및 추력 응답 특성을 나타낸다. 첫 번째 파형은 1차축 q축과 d축 전류인 i_{qs} 와 i_{ds} , 두 번째 파형은 2차축 q축과 d축 자속인 λ_{qr} 과 λ_{dr} , 및 세 번째 파형은 추력 특성을 나타낸다. 위치 제어기의 응답 특성과 상관없이 간접 자속 기준 제어 및 전류 제어가 잘 이루어져 2차축 자속은 d축에만 존재하고 $\lambda_{qr} = 0$ 이 됨을 확인할 수 있다.

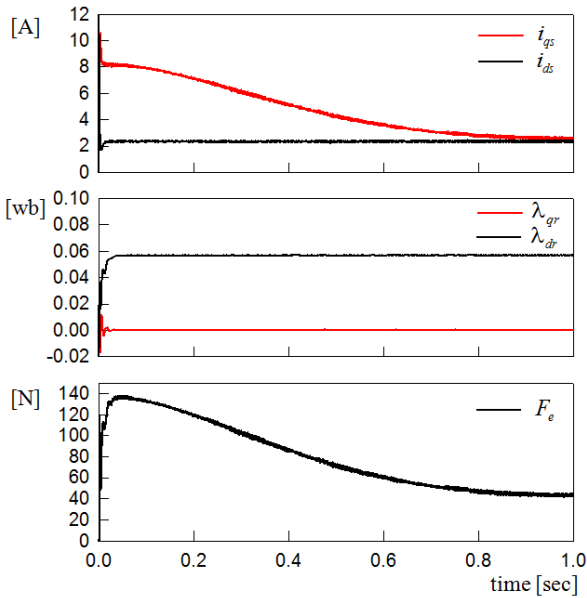


그림 7. 시험조건 5에서의 전류, 자속 및 추력 응답 특성
Fig. 7. Current, flux and thrust responses under the test condition 5

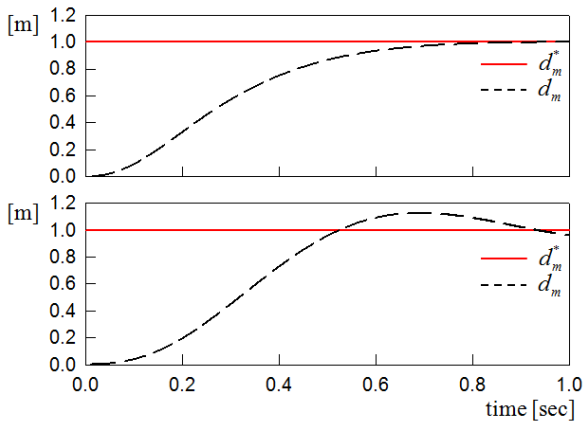


그림 8. 시험조건 3과 시험조건 5에서의 외란관측기가 사용된 PI 위치 제어기의 응답 특성
Fig. 8. Control performance of the PI position controller with force observer under the test conditions 3 and 5

그림 6에서와 같은 PI 제어기의 성능 저하를 개선하기 위해 외란추력 관측기가 사용되어 보상할 수 있으며 그림 8은 시험조건 3과 시험조건 5에서 PI 제어기에 외란추력 관측기

가 추가된 경우의 응답 특성을 나타낸다. 외란 추력 F_L 이 관측기에 의해 추정되며 관측기의 극점은 위치 제어기의 7배로 설계되어 추정치 \hat{F}_L 이 전향제어 방식으로 보상된다. 시험조건 3과 같이 외란의 변화만 있는 경우 외란 관측기에 의해 효과적으로 전향 보상될 수 있어 그림 6의 시험조건 1과 동일한 제어 성능을 얻을 수 있게 된다. 하지만, 시험조건 5에서와 같이 질량과 외란이 동시에 변화하는 경우 관측기가 질량 변화에 의해 발생하는 가속추력 성분을 실시간으로 정확히 추정하는 데에 한계를 지니며 외란 추정 오차가 발생하게 된다. 따라서 그림 8의 두 번째 파형과 같이 위치 응답의 과도 상태가 길어지며 속응성이 떨어짐을 확인할 수 있다.

그림 9는 그림 8의 시험조건 5에서의 전류, 자속 및 추력 응답 특성을 나타낸다.

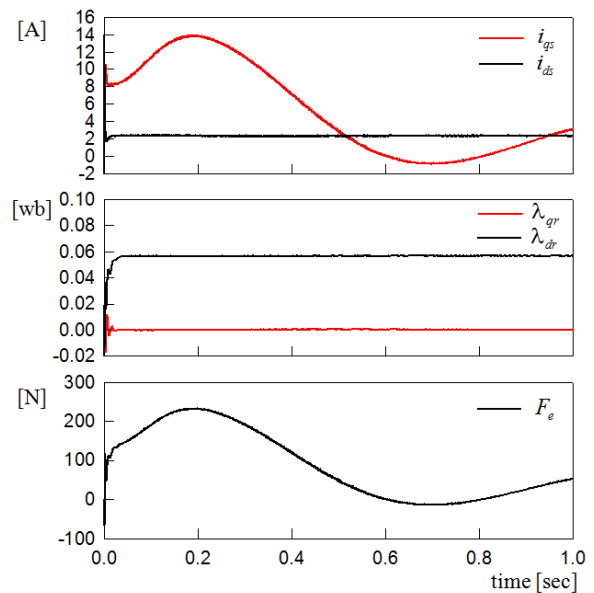


그림 9. 시험조건 5에서의 전류, 자속 및 추력 응답 특성
Fig. 9. Current, flux and thrust responses under the test condition 5

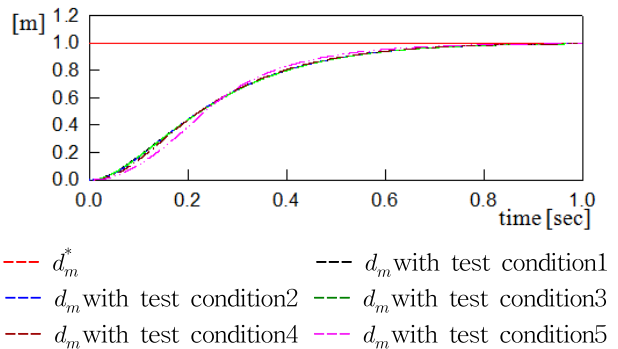


그림 10. 각 시험조건에서 IVSC 위치 제어기의 응답 특성
Fig. 10. Control performance of IVSC position controller under respective test conditions

그림 10은 그림 6과 같이 각 시험조건에서 적분형 가변구

조 제어기를 사용한 경우의 응답 특성이다. 그림 6이나 그림 8과 같은 응답의 성능 저하 없이 모든 시험조건에서 거의 유사한 위치 응답 특성과 강인성을 확인 할 수 있다. 식 (15)에 의해 도달기간 없이 슬라이딩 모드가 발생 할 수 있으며 상태 오차가 슬라이딩 평면에 항상 유지될 수 있다. 따라서 파라미터 및 외란의 변화에도 강인한 위치 응답 특성을 얻을 수 있어 APS에서 요구하는 고 속응성과 고 정밀도를 갖출 수 있다.

그림 11은 적분형 가변구조 제어기가 사용될 때 시험조건 5에서의 전류, 자속 및 추력 응답 특성을 나타낸다. 식 (26)과 같이 스위칭 제어 입력에 연속함수를 사용함으로써 q축 전류 i_{qs} 에 채터링 현상이 발생하지 않음을 확인할 수 있다.

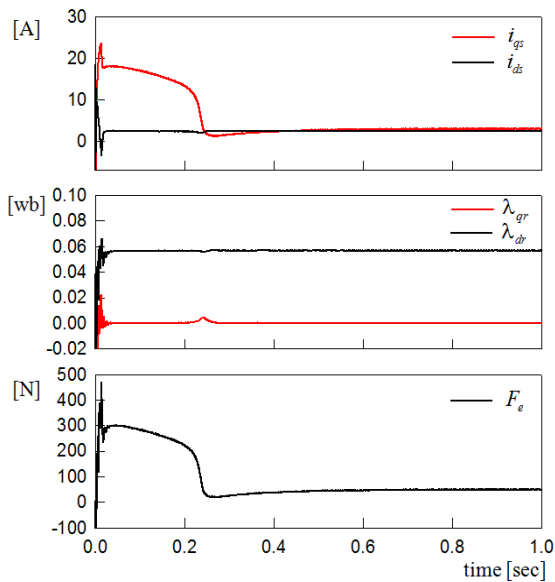


그림 11. 시험조건 5에서의 전류, 자속 및 추력 응답 특성
Fig. 11. Current, flux and thrust responses under the test condition 5

5. 결 론

본 논문에서는 물류 이송과 피킹 단계에서 고 정밀도 및 고 속응성을 유지할 수 있는 APS 응용 선형 유도 모터의 강인 제어 기법을 제시하였다. 선형 유도 모터의 위치 제어 성능에 직접적 영향을 주는 외란추력과 가/감속 시 질량 불일치 혹은 마찰 계수 등의 기계적 파라미터 변화가 고려되었으며 이러한 조건에서도 강인한 위치 제어 특성을 제공하기 위해 적분형 가변구조 제어기가 설계된다. 적분형 제어기를 통해 도달기간 없이 상태오차가 슬라이딩 평면에 도달할 수 있으며 연속함 근사에 의해 채터링 현상 없이 전류를 제어할 수 있다. 선형 유도 모터의 모델을 위한 Simulink 라이브러리가 상태방정식으로 부터 개발되었다. 제안된 방식의 유용성을 입증하기 위해 다섯 가지 시험조건에서 Matlab - Simulink를 이용한 비교 시뮬레이션이 수행되어 위치 응답 성능이 평가 된다. 비교 시뮬레이션 결과를 통해 제안된 기법이 비교적 적은 연산량으로 미지 외란 및 질량과 마찰계수 등의 기계적 파라미터 변화 하에서도 강인한 위치 제어 특성을 제공함을 확인할 수 있다.

References

- [1] <http://www.ssi-schaefer.us/>
- [2] <http://www.sihis.com/>
- [3] Jacek F. Gieras, *Linear Induction Drives*. Oxford: Clarendon Press, 1994.
- [4] Faa J. Lin, Hsin J. Shieh, Kuo K. Shyu, and Po K. Huang, "On-line gain tuning IP controller using real-coded genetic algorithm", *Electric Power System Research*, vol. 72, pp. 157-169, 2004.
- [5] Hong W. Lim, Bong Chae, Moon H. Choi, Kang Y. Lee, Geum B Cho, and Hyung 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
- [6] Wei Xu, Yunhong Zhang, Cengbi Zeng, and Xianyong 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.
- [7] Shinichi Kobayashi, Ichiro Awaya, Hiroshi Kuromaru, and Katsumi Oshitani, "Dynamic model based auto-tuning digital servo driver", *IEEE Trans. on Indus. Electr.*, vol. 42, no. 5, pp. 462-466, 1995.
- [8] Oscar Barambones, Patxi Alkorta, Jose M. G. de Durana, and Enrique Kremers, "A robust position control for induction motors using a load torque observer", *Mediterranean Conference on Control & Automation*, pp. 278-283, 2012.
- [9] Hwa C. Sung, Young H. Joo, and Jin B. Park, "Robust digital redesign for observer-based system", *Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 17, no. 3, pp. 285-440, 2007.
- [10] Dong 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.
- [11] Sam J. Seo, Ho J. Seo, Gwi T. Park, and Dong S. Kim "Design of a self-tuning fuzzy sliding mode controller", *Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 6, no. 1, pp. 3-311, 1996.
- [12] Min K. Song, Young H. Joo, and Jin B. Park, "Sliding mode observer for fuzzy system: An LMI approach", *Korean Institute of Intelligent Systems*, vol. 16, no. 4, pp. 389-527, 2006.
- [13] Ho S. Song, Oh G. Lee, Joon T. Lee, and Jung 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.
- [14] D. W. Novotny and R. D. Lorenz, *Introduction to field orientation and high performance AC drives. IEEE IAS Tutorial Course*, 1986.

- [15] Timothy M. Rowan and Russel 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, Jul. 1986.
- [16] Heinz. W. Van Der Broeck, Hans C. Skldelny, 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, Jan./Feb. 2008.
- [17] Katsuhiko Ogata, *Discrete-time Control Systems. Prentice-Hall*, 1987.



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 : 국립한경대학교 전기전자제어공학과 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 대학원

전기정보공학과 석사과정

관심분야 : AC Machine Drive, Inverter, Robust Control

Phone : +82-10-4514-5884

E-mail : jhchoi7601@naver.com



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