

질량추정과 외란추력 관측기를 이용한 자동피킹 시스템 구동용 선형 유도모터의 강인제어 기법

(A Robust Control Scheme of Linear Induction Machine for Automatic Picking System Using Mass Estimation and Disturbance Force Observer)

최정현* · 유동상 · 김경화**

(Jung-Hyun Choi · Dong-Sang Yoo · Kyeong-Hwa Kim)

Abstract

To operate an automatic picking system in distribution center with high precision and high dynamics, this paper presents a robust control scheme of a linear induction motor (LIM) using the mass estimation and disturbance force observer. The force disturbance which gives a direct influence on the control performance of LIM is estimated in real-time through the disturbance observer and compensated by a feedforward manner. To get a satisfactory performance even under the mass variation by reducing the disturbance force due to the mismatched mass during the speed transient such as the acceleration and deceleration periods, a mass estimation algorithm is proposed. A Simulink model for LIM is developed and the validity of the proposed scheme is verified through the comparative simulation studies using Matlab - Simulink.

Key Words : Linear Induction Motor, Automatic Picking System, Disturbance Force Observer, Mass Estimation

* 주저자 : 서울과학기술대학교 전기정보공학과 석사과정

** 교신저자 : 서울과학기술대학교 전기정보공학과 부교수

* Main author : Master's course, Dept. of Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology

** Corresponding author : Associate Professor, Dept. of Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology

Tel : 02-970-6406, Fax : 02-978-2754

E-mail : k2h1@seoultech.ac.kr

접수일자 : 2013년 2월 6일

1차심사 : 2013년 2월 13일, 2차심사 : 2013년 2월 28일

심사완료 : 2013년 3월 11일

1. 서 론

최근 물류 환경 및 소비자의 소비 패턴 변화에 대응하기 위하여 소량, 다품종 제품의 주문 발송을 효과적으로 처리할 수 있는 자동피킹 시스템(Automatic Picking System: APS)과 같은 첨단물류장비에 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.

자동피킹 시스템의 구조는 크게 물품을 보관하는 충

전부와 주문된 품목과 수량만큼 물품을 배출하는 배출기로 구분할 수 있으며, 배출기의 경우 각 품목에 개별 배출기를 설치하는 고정식 배출기와 몇 개의 품목을 이동하면서 각 품목의 필요 수량을 배출하는 이동식 배출기로 구분할 수 있다. 따라서 고정식은 다빈도 주문 품목에 적합하며 이동식은 저빈도 주문 품목을 이동하며 각 물품을 배출하는데 적합하다[2]. 현재까지의 자동피킹 시스템은 고정식이 대부분이나 최근 시스템의 단가, 에너지 절약 및 경제적 측면에서 유리한 이동식 배출기 개발이 활발히 이루어지고 있다.

자동피킹 시스템의 이동식 배출기를 구현하기 위해서는 선형 구동 메커니즘이 필요하다. 선형 구동력을 얻기 위해서는 회전형 모터와 기계적 변환 장치를 조합하는 방식과 선형 모터를 직접 적용하는 방식으로 구분할 수 있다. 이 때 회전형 모터로부터 선형 구동력을 발생시키는 기계적 변환 장치로는 스크류, 체인, 기어 시스템 등이 사용되고 있으며, 이러한 기계적 장치들은 마찰에 의한 에너지의 손실과 소음이 필연적으로 발생하는 단점이 있다[3-6]. 반면에 직선형 구동력을 직접 발생시키는 선형 모터는 기계적인 변환장치를 필요로 하지 않아 구조가 간단하고 에너지 손실이나 소음을 발생하지 않을 뿐만 아니라 운전 속도에도 제한을 받지 않는 특유의 이점을 가지고 있다[7-9]. 따라서 자동피킹 시스템에 이동식 배출기를 적용하기 위해서는 선형 모터의 채용이 절대적으로 유리하며 이를 위해서는 선형 모터의 고성능 제어기 설계 및 구동시스템에 대한 연구가 요구된다.

한편 대부분의 서보 제어 시스템은 초기 설치 시 적절한 이득이나 파라미터의 튜닝 단계를 필요로 한다. 이는 동일 정격의 모터라 할지라도 제조 환경 및 사용 부하 조건에 따라 시스템 파라미터가 달라지기 때문이며 이러한 튜닝 작업을 위해서는 대부분 많은 시간이 소요되는 반복 실험에 의한 시행착오 기법이 사용되는 실정이다[10].

최근에 외란 관측기와 전향 보상 제어를 적용한 서보 제어 시스템의 강인 제어 기법이 광범위하게 적용되어 왔다[11-12]. 이 기법은 외란 관측기만을 이용해 파라미터를 추정하여 비교적 연산량이 적은 장점이 있으나 큰 부하 관성 변화, 빠른 과도 특성 및 연

산양 증가로 인한 샘플링 주기 증가 시 미지 외란의 변화율이 더 이상 샘플링 주기 내에서 작다고 가정하기 어려워져 추정치에 오차 증가 및 이로 인한 제어 성능 저하의 원인이 된다. 특히 관성 불일치로 인해 발생하는 외란 토크는 가속도에 비례하므로 변화율이 커 기존의 관측기 및 적응형 방법으로는 추정이 쉽지 않다[10].

본 논문에서는 물류 이송, 피킹 및 분류 단계에서 고정밀도를 유지할 수 있는 자동피킹 시스템의 이동식 배출기 구동을 위한 선형 유도 모터의 고성능 강인 제어기 설계 기법을 제시하며 제안된 기법은 질량추정과 외란추력 관측기 알고리즘을 통해 구현된다. 우선 선형 유도 모터의 제어 성능에 직접적 영향을 주는 외란추력이 외란 관측기를 이용하여 추정되어 제어 명령에 전향제어 방식으로 보상된다. 외란 관측기는 추정될 미지의 파라미터가 상수 혹은 샘플링 주기에 비해 변화율이 작은 경우 효과적이거나 선형 모터에서 질량 및 점성 마찰 계수와 같은 파라미터 변화가 크거나 빠른 과도 응답이 요구되는 경우 추정치에 오차가 증가하여 제어 응답성이 저하된다. 가속 시 질량 불일치에 의한 외란추력을 줄여 큰 질량 변화 하에서도 효과적인 제어 성능을 제공하기 위해 질량 추정 알고리즘이 병행하여 구현된다. 제안된 방식의 유용성과 파라미터 변동에 대해 강인한 제어 특성을 입증하기 위해 Matlab - Simulink를 이용한 비교 시뮬레이션 결과가 제시된다. Simulink는 선형 유도 모터의 라이브러리(Library)를 제공하지 않으므로 시뮬레이션을 위해 직접 선형 유도 모터의 모델이 미분 방정식으로부터 개발되어 사용되었다.

2. 선형 유도 모터 모델

편측형 선형 유도 모터의 구조는 그림 1과 같으며 1차측이 규소강판으로 된 적층 철심과 슬롯 및 전류를 흘릴 수 있는 권선으로 되어 있고, 2차측은 도체판과 철심에 해당하는 back-iron으로 구성되어 있다[5]. 회전형 유도모터의 회전 자계와 같이, 선형 유도 모터는 1차 코일에 3상 교류를 흘리면 진행자계가 발생되고, 2차측에 전류를 유기시켜 추력을 발생시키게 된다.

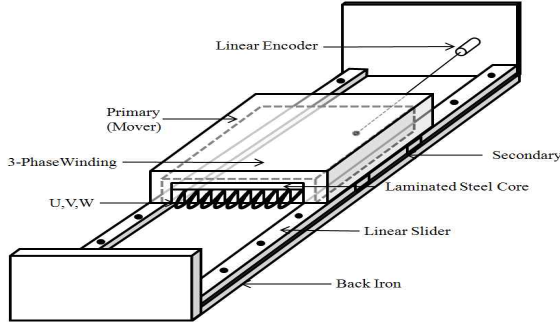


그림 1. 선형 유도 모터의 구조
Fig. 1. Configuration of linear induction motor

선형 유도 모터의 동적 모델은 3상 Y-결선 회전형 유도 모터의 모델로부터 유도할 수 있으며, 동기좌표 계 상에서 전압방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다 [13-14].

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + p \lambda_{qs} + \frac{\pi v_e}{h} \lambda_{ds} \quad (1)$$

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + p \lambda_{ds} - \frac{\pi v_e}{h} \lambda_{qs} \quad (2)$$

$$0 = v_{qr} = R_r i_{qr} + p \lambda_{qr} + \frac{\pi v_{sl}}{h} \lambda_{dr} \quad (3)$$

$$0 = v_{dr} = R_r i_{dr} + p \lambda_{dr} - \frac{\pi v_{sl}}{h} \lambda_{qr} \quad (4)$$

여기서 v_{qs} 와 v_{ds} 는 q축과 d축 1차측 전압, v_{qr} 과 v_{dr} 은 q축과 d축 2차측 전압, i_{qs} 와 i_{ds} 는 q축과 d축 1차측 전류, i_{qr} 과 i_{dr} 은 q축과 d축 2차측 전류, λ_{qs} 와 λ_{ds} 는 q축과 d축 1차측 자속, λ_{qr} 과 λ_{dr} 은 q축과 d축 2차측 자속, R_s 는 1차측 저항, R_r 은 2차측 저항, h 는 극 간격, v_e 는 동기 선형 속도(Synchronous linear velocity), v_{sl} 은 선형 슬립 속도(Linear slip velocity) 및 p 는 미분 연산자이다.

회전형 유도 모터의 슬립은 동기 각속도와 전기적 회전 각속도의 차이로 구해지며 선형 유도 모터에서는 이동자(Mover)의 선형속도가 v_m 일 때 슬립 속도 ω_{sl} 및 선형 슬립 속도 v_{sl} 은 v_m 과 v_e 로부터 다음과 같이 구해진다[4].

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

여기서 n_p 는 극수이다. 식 (1)~(4)의 전압방정식과 자속방정식을 이용하여 1차측의 q축 및 d축 전류와 2차측의 q축 및 d축 자속을 상태변수로 사용한 상태방정식은 다음과 같다[14].

$$p i_{qs} = - \left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r} \right) i_{qs} - \frac{\pi}{h} v_e i_{ds} + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r T_r} \lambda_{qr} - \frac{n_p L_m \pi}{\sigma L_s L_r h} v_m \lambda_{dr} + \frac{1}{\sigma L_s} v_{qs} \quad (6)$$

$$p i_{ds} = \frac{\pi}{h} v_e i_{qs} - \left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r} \right) i_{ds} + \frac{n_p L_m \pi}{\sigma L_s L_r h} v_m \lambda_{qr} + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r T_r} \lambda_{dr} + \frac{1}{\sigma L_s} v_{ds} \quad (7)$$

$$p \lambda_{qr} = \frac{L_m}{T_r} i_{qs} - \frac{1}{T_r} \lambda_{qr} - v_{sl} \lambda_{dr} \quad (8)$$

$$p \lambda_{dr} = \frac{L_m}{T_r} i_{ds} + v_{sl} \lambda_{qr} - \frac{1}{T_r} \lambda_{dr} \quad (9)$$

여기서 $T_r = \frac{L_r}{R_r}$ 은 2차측 시정수, $\sigma = 1 - \left(\frac{L_m^2}{L_s L_m} \right)$ 은 누설계수, L_s 는 1차측 인덕턴스, L_r 은 2차측 인덕턴스, L_m 은 자화 인덕턴스이다. 추력과 기계적 부하와의 관계는 다음과 같이 나타난다.

$$F_e = K_t (\lambda_{dr} i_{qs} - \lambda_{qr} i_{ds}) = (M p + D) v_m + F_L \quad (10)$$

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

회전형 유도 모터의 자속 기준 제어와 같이 2차측 자속을 d축으로 일치 시키면, $\lambda_{qr} = 0$ 및 $\dot{\lambda}_{qr} = 0$ 이 성립하고 2차측 자속은 d축 상에만 존재한다. 이러한 관계를 이용하여 식 (3)과 (8)로부터 자속 기준 제어를 위

해 필요한 2차측 d축 자속과 슬립 관계식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\lambda_{dr} = \frac{L_m / T_r}{p + 1 / T_r} i_{ds} \quad (11)$$

$$\omega_{sl} = -\frac{R_r i_{qr}}{\lambda_{dr}} = \frac{(1 / T_r) i_{qs}}{\lambda_{dr} / L_m} \quad (12)$$

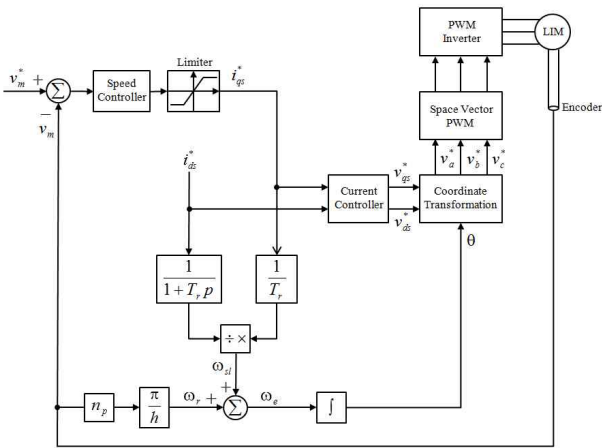


그림 2. 선형 유도 모터의 간접 자속 기준 제어 블록도
Fig. 2. Block diagram of an indirect field-oriented control (FOC) of linear induction motor

그림 2는 선형 유도 모터의 간접 자속 기준 제어 블록도를 나타낸다. 속도 제어기의 출력이 q축 전류 명령을 발생하며 자속명령으로부터 d축 전류 명령이 발생된다. 자속 기준 제어의 성능은 전류 제어 성능에 의존하며 전류 제어로는 동기좌표계에서의 PI 비결합 전류 제어기[15] 사용되어 전압 명령이 발생되며 전압 명령은 대칭 공간 벡터 PWM 기법[16] 의해 인가된다. 간접 자속 기준 제어에서 dq 변환에 사용되는 2차측 자속의 위치는 이동자의 선형속도 v_m 과 슬립 속도 ω_{sl} 에 의해 구해지며, ω_{sl} 은 식 (11)과 식 (12)에 전류 명령을 대입하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\omega_{sl} = \frac{(1 / T_r) i_{qs}^*}{\frac{1}{1 + T_r p} i_{ds}^*} \quad (13)$$

디지털 방식으로 식 (13)을 구현하기 위해 Bilinear transformation이 사용되며 이 때 미분 연산자는 다음과 같이 치환된다[17].

$$p = \frac{2}{T} \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \quad (14)$$

여기서 T 는 전류 제어 주기, z 는 z 연산자이다. 그림 3은 간접 자속 기준 제어를 위해 Simulink에서 디지털 방식으로 구현한 슬립 계산 및 2차측 자속 위치의 계산 블록을 나타낸다. 식 (13)에 의해 계산된 슬립 속도 ω_{sl} 로부터 동기 각속도가 계산되며 동기 각속도를 디지털 적분기로 적분하여 2차측 자속의 위치가 계산된다.

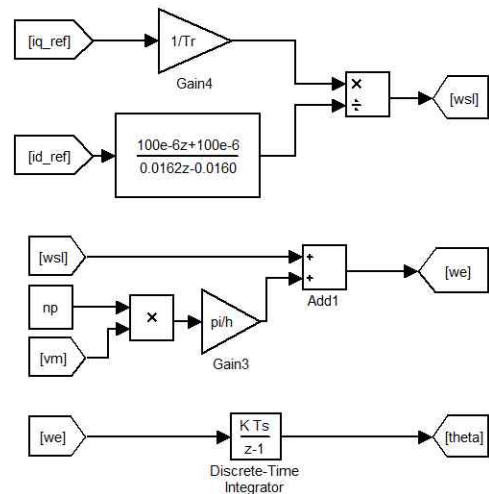


그림 3. Simulink에서의 간접 자속 기준 제어를 위한 디지털 방식의 슬립 계산 블록
Fig. 3. Digital slip calculation block for indirect field-oriented control

자속 기준 제어 하에서 추력 $F_e = K_t \lambda_{dr} i_{qs}$ 이 되며 식 (10)의 속도 동특성은 다음과 같이 표현된다.

$$p v_m = -\frac{D}{M} v_m + \frac{K_t}{M} \lambda_{dr} i_{qs} - \frac{1}{M} F_L \quad (15)$$

그림 4는 제어기 성능 평가를 위해 Simulink로 구현된 선형 유도 모터의 모델 블록도를 나타낸다.

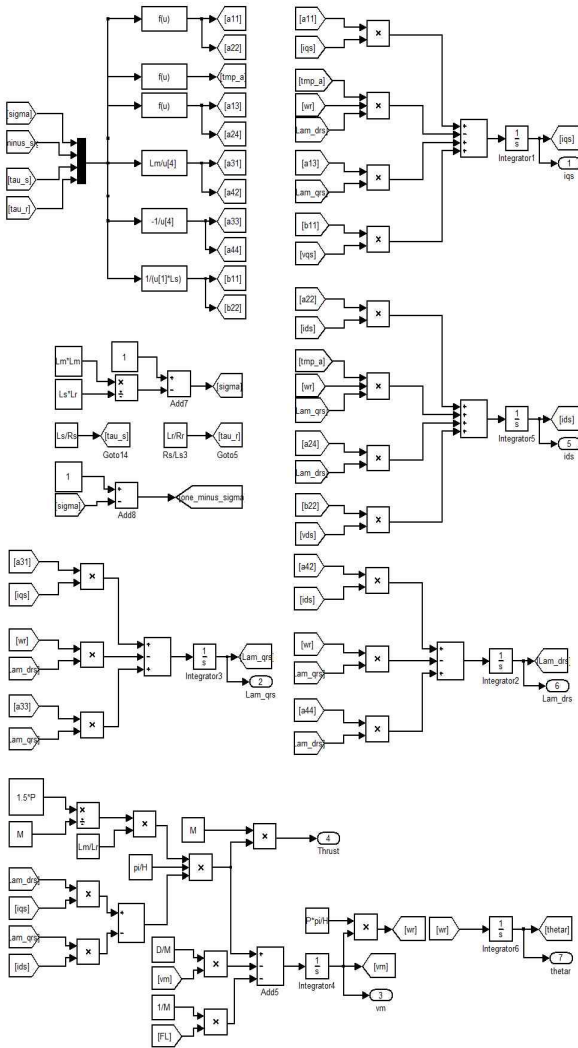


그림 4. 선형 유도 모터의 Simulink 모델
Fig. 4. Developed Simulink model for linear induction motor

3. 외란추력 관측기와 질량추정을 이용한 강인제어

선형 유도 모터를 적용한 자동피킹 시스템에서 고정 밀도와 고속 처리를 위해서는 외란 및 질량 등의 파라미터 변화에도 제어기가 고 속응성을 유지하는 것이 중요하다. 만약 외란의 영향이 존재하거나 이동하는 물체의 질량이 변화하게 되면 과도 응답과 같은 제어 성능의 저하가 발생하며 이러한 변화에도 강인한 제어 성능을 얻기 위해 외란추력 관측기와 질량추정 알

고리즘이 병행하여 사용된다. 외란 관측기는 비교적 적은 연산양으로도 보상성능이 우수하며 관성 모멘트의 작은 변화에 기인한 시변 외란까지도 어느 정도 보상할 수 있어 회전형 혹은 선형 서보 제어 시스템에 폭넓게 적용되어 왔다[11].

외란추력은 식 (15)의 속도 동특성을 사용하여 쉽게 추정할 수 있으며 기본 개념은 추정될 파라미터를 미지 상수 혹은 제어 주기 내에서 변화율이 작다고 가정하는 것이다. F_L 이 미지 상수이거나 변화율이 작을 때 샘플링 주기 내에서 $\dot{F}_L=0$ 으로 가정한다. 선형 유도 모터 제어 시스템은 외란추력 이외에도 이동자의 질량과 점성마찰계수의 변화에 의한 외란 항을 가진다. 추후 질량 추정 알고리즘에 이용하기 위해 총 외란 성분을 고려하면 식 (10)의 추력 관계는 다음과 같이 나타난다.

$$F_e = K_t \lambda_{dr} i_{qs} = M_o \dot{v}_m + D_o v_m + F_d \quad (16)$$

$$F_d = \Delta M \dot{v}_m + \Delta D v_m + F_L \quad (17)$$

여기서 $\Delta M = M - M_o$, $\Delta D = D - D_o$, F_d 는 총 외란 및 “o”는 nominal 값을 나타낸다. F_d 는 F_L 만 존재할 때 미지 상수가 되며 또한 ΔM 의 작은 값에 대해서도 변화율이 작아 제어 샘플링 주기 내에서 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$\dot{F}_d = 0 \quad (18)$$

식 (16)과 (18)을 이용해 외란 추정을 위한 시스템을 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (19)$$

$$y = Cx \quad (20)$$

여기서 $x = [v_m \ F_d]^T$

$u = i_{qs}$, $y = v_m$, $C = [1 \ 0]$

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{D_o}{M_o} & -\frac{1}{M_o} \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} K_t \lambda_{dr} / M_o \\ 0 \end{pmatrix}$$

식 (19)와 (20)은 가관측 조건을 만족하므로 전 상태 관측기를 다음과 같이 구성할 수 있다[18].

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L[y - C\hat{x}] \quad (21)$$

여기서 $L = [L_1 \ L_2]^T$ 은 관측기의 이득이다. 추정 오차 $e = x - \hat{x}$ 로 정의되면 오차 동특성은 다음과 같이 구해진다.

$$\dot{e} = (A - LC)e \quad (22)$$

식 (22)로부터 특성 방정식이 다음과 같이 구해지며 관측기의 이득을 이용하여 특성근을 설정할 수 있다.

$$s^2 + \left(\frac{D_o}{M_o} + L_1\right)s - \frac{1}{M_o}L_2 = 0 \quad (23)$$

상수 외란추력 F_L 만 존재하는 경우 식 (21)에 의해 실시간으로 쉽게 관측될 수 있지만 질량 변화가 크거나 속도 과도 특성이 빠른 경우 식 (18)은 더 이상 만족되기 어려워 외란추력 추정치는 상당한 오차를 가지며 제어 성능을 저하시키는 원인이 된다. 또한 질량 불일치로 인해 발생하는 외란추력은 가속도에 비례하므로 변화율이 커 기존의 관측기 및 적응형 방법으로 추정하기 어렵다. 이러한 상황에서 제어가 만족스러운 특성을 주기 위해서는 이동자의 질량을 직접 추정할 필요가 있다.

질량추정 알고리즘은 외란추력 관측기를 이용하여 이루어진다. 외란 관측기는 특성 상 F_L 이외에 파라미터 변동에 기인한 외란 항을 포함하는 F_d 를 추정하게 되는데 관측기에서 추정된 \hat{F}_d 을 이용하여 질량이 추정될 수 있다. 질량은 주기적 속도 명령을 인가하고 이 때 추정된 \hat{F}_d 과 가속도 정보를 이용하여 한 주기 내에서 주기적분을 통해 추정된다.

식 (17)에서 질량 M 만을 분리하여 추정하기 위해 F_d 대신 \hat{F}_d 을 사용하여 양변에 v_m 을 곱한 후 주기적분을 수행하면 다음을 구할 수 있다.

$$\int_{(k-1)T_s}^{kT_s} \hat{F}_d \cdot \dot{v}_m dt = \Delta M \int_{(k-1)T_s}^{kT_s} (\dot{v}_m)^2 dt + \Delta D \int_{(k-1)T_s}^{kT_s} v_m \dot{v}_m dt + F_L \int_{(k-1)T_s}^{kT_s} \dot{v}_m dt \quad (24)$$

여기서 T_s 는 속도명령의 주기이다. 주기적 명령의 orthogonal 특성에 의해 다음식이 만족된다[10].

$$\int_{(k-1)T}^{kT} v_m \dot{v}_m dt = 0 \quad (25)$$

$$\int_{(k-1)T}^{kT} \dot{v}_m dt = 0 \quad (26)$$

식 (24)~(26)과 $\hat{M}(k+1) = \hat{M}(k) + \Delta M$ 의 관계를 이용하면 이동자의 질량이 다음과 같이 추정될 수 있다.

$$\hat{M}(k+1) = \hat{M}(k) + \frac{\int_{(k-1)T_s}^{kT_s} \hat{F}_d \cdot \dot{v}_m dt}{\int_{(k-1)T_s}^{kT_s} (\dot{v}_m)^2 dt} \quad (27)$$

식 (21)과 식 (27)에서 추정된 \hat{F}_d 과 \hat{M} 을 이용하여 제안된 기법의 속도 제어기는 다음과 같이 구해진다.

$$i_{qs}^* = \frac{\frac{D_o}{M} + \frac{1}{M}\hat{F}_d - k_w(v_m - v_m^*) + \dot{v}_m^*}{K_t \lambda_{dr} / \hat{M}} \quad (28)$$

식 (28)의 속도 제어가 사용되고 속도 오차가 $e_v = v_m - v_m^*$ 로 정의될 때 \hat{F}_d 과 \hat{M} 이 F_d 와 M 에 수렴하게 되면 속도 오차 동특성은 $(s + k_w)e = 0$ 이 되며, 이때 k_w 은 속도 오차 동특성의 극점이 된다.

4. 비교 시뮬레이션 결과

이 절에서는 질량추정과 외란추력 관측기를 이용한 자동피킹 시스템 구동용 선형 유도 모터의 강인 제어 성능을 입증하기 위해 비교 시뮬레이션 결과가

제시된다. 그림 5는 질량추정과 외란추력 관측기 알고리즘을 적용한 제안된 방식의 블록 다이어그램을 나타낸다. 전체 시스템은 선형 유도 모터, 속도 제어기, 전류 제어기, 자속기준 제어기 및 제안된 질량추정과 외란 관측 알고리즘으로 구성되며, 전류 제어로는 동기좌표계 PI 비결합 전류제어가 사용된다 [15]. 샘플링 시간은 100 μ sec로 설정되며 전압명령 인가를 위해 공간벡터 PWM 기법이 사용된다[16]. 외란 관측기에 의해 \hat{F}_d 이 실시간으로 추정되면 이 값은 식 (27)을 이용하여 T_s 동안 주기적분을 통해 질량을 추정하고 전체 추정치 정보와 식 (28)의 속도 제어기로부터 전류 명령이 계산된다. 질량 추정이 효과적으로 이루어지기 위해서는 일정 수준의 속도 응답이 만족되어야 하며, 선형 유도모터의 파라미터와 응답 동특성을 고려하여 속도명령의 주기 $T_s=0.8$ 초로 선정된다.

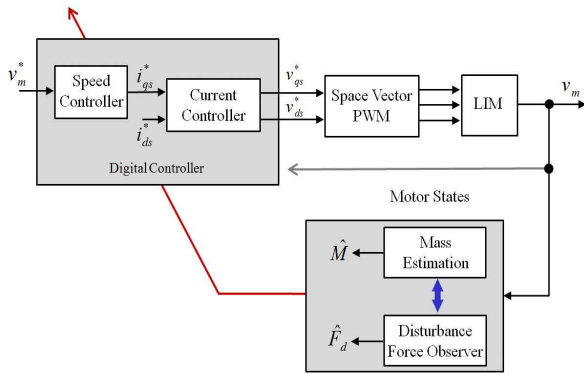


그림 5. 제안된 속도 제어 기법의 블록 다이어그램
Fig. 5. Overall block diagram for the proposed control scheme

그림 6은 Simulink로 구현한 자동피킹 시스템 구동용 선형 유도 모터의 제어 구조를 나타낸다. 전체 시뮬레이션은 Matlab - Simulink를 이용하여 구현되며 Simulink는 선형 유도 모터 라이브러리를 제공하지 않으므로 식 (6)~(10)의 상태방정식으로부터 Simulink 모델이 개발되었다. 시뮬레이션에 사용된 선형 유도 모터는 3상, Y-결선, 2극, 3 kW 정격을 가지며 기타 파라미터는 표 1에 나타난다.

표 2는 비교 시뮬레이션을 위해 사용한 PI 속도 제

어기 및 외란추력 관측기의 이득을 나타낸다. PI 속도 제어기는 오버슈트 없는 과제동 특성을 갖도록 극점이 -13.19 와 -1.31 로 설계되었으며, 관측기의 이득은 식 (22)의 관측기 오차가 영으로 빠르게 감소하도록 부족계동 특성의 극점 $-150 \pm j150$ 이 되도록 설계되었다.

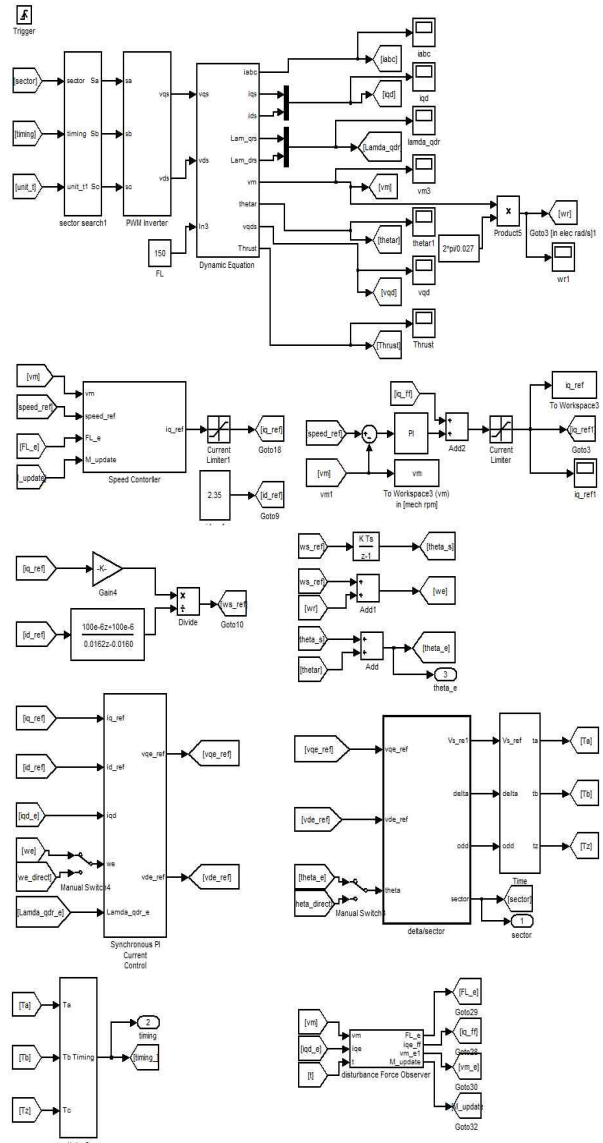


그림 6. Simulink 기반의 자동피킹 시스템 구동용 선형 유도 모터의 시뮬레이션 구조
Fig. 6. Simulation configuration of a linear induction motor for automatic picking system using Simulink

표 1. 선형 유도 모터의 파라미터
Table 1. Parameters of linear induction motor

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

표 2. PI 속도 제어기 및 외란추력 관측기의 이득
Table 2. Gains for the PI speed controller and observer

K_p (PI Controller)	4.2
K_I (PI Controller)	48
L_1 (Observer)	287
L_2 (Observer)	-125000

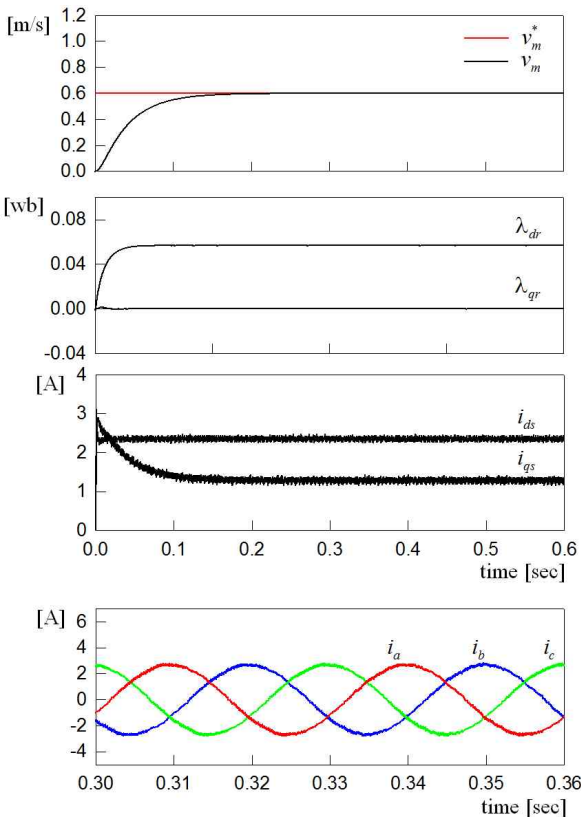


그림 7. 기본 동작 조건 하에서 PI 제어기의 응답 특성
Fig. 7. Control performance of the PI controller under the nominal conditions

그림 7은 선형 속도명령 0.6m/s일 때 기본 동작 조건 하에서 PI 속도 제어기를 사용한 경우의 응답 특성이다. 그림 7의 첫 번째 파형은 속도 응답, 두 번째 파형은 q축과 d축의 2차측 자속인 λ_{qr} 과 λ_{dr} 을 나타내며, 오버슈트 없이 속도 제어기 이득이 설계 되었으며 간접 자속 기준 제어가 잘 이루어져 모든 2차측 자속은 d축에만 존재하고 $\lambda_{qr} = 0$ 이 됨을 확인할 수 있다. 세 번째 파형은 1차측의 q축과 d축 전류인 i_{qs} 와 i_{ds} 이며 네 번째 파형은 정상상태에서의 3상 전류 파형을 나타낸다.

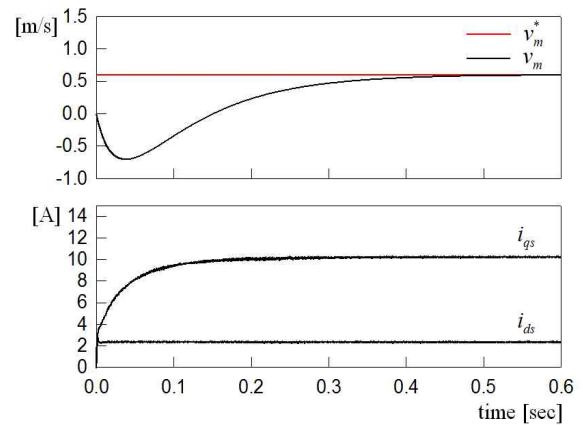


그림 8. $F_L = 150N$ 의 외란추력 변화 시 PI 제어기의 응답 특성
Fig. 8. Control performance of the PI controller under the disturbance force of $F_L = 150N$

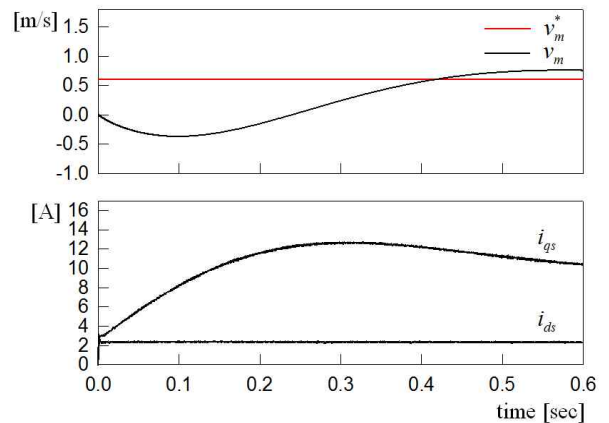


그림 9. $F_L = 150N$, $M = 5M_o$ 일 때의 PI 제어기의 응답 특성
Fig. 9. Control performance of the PI controller under $F_L = 150N$ and $M = 5M_o$

그림 8은 그림 7과 동일한 조건에서 외란추력이 $F_L = 150\text{N}$ 으로 변화한 경우의 응답 특성이다. 상수 외란의 존재로 과도상태가 길어지고 속도 응답 성능이 현저히 저하됨을 확인할 수 있다. 그림 9는 그림 7과 동일한 조건에서 외란추력과 이동자의 질량변화가 동시에 일어날 때의 PI 제어기 응답 특성이다. 그림 8보다 과도상태가 길어지고 속도 응답의 성능 저하가 나타남을 확인할 수 있다.

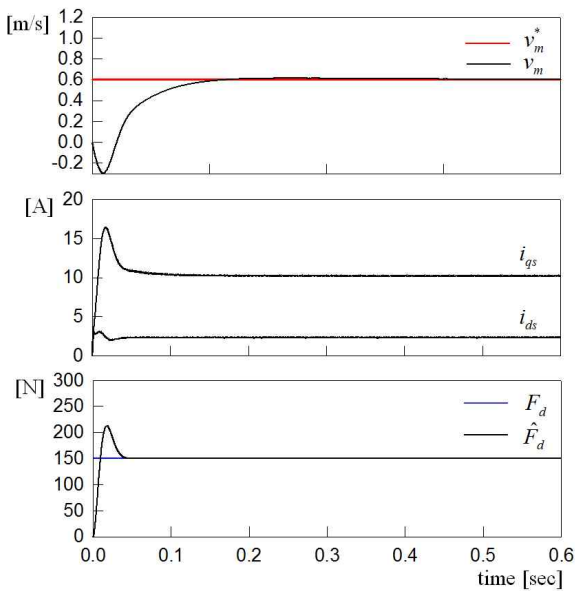


그림 10. $F_L = 150\text{N}$ 의 외란추력 변화 시 외란추력 관측기로 보상한 경우의 응답 특성
Fig. 10. Control performance using disturbance force observer under the disturbance force of $F_L = 150\text{N}$

이러한 성능 저하를 개선하기 위해 외란추력 관측기가 사용되어 제어를 보상할 수 있으며 그림 10은 그림 8과 동일한 조건인 $F_L = 150\text{N}$ 이 존재할 때 외란의 추정치 \hat{F}_d 을 이용하여 전향 보상한 경우의 응답 특성을 나타낸다. 관측기의 극점은 속도 제어기 극점의 5배로 설계 되었으며 외란추력이 효과적으로 보상되어 응답 특성이 그림 8에 비해 개선되며 그림 7과 유사하게 나타남을 볼 수 있다.

그림 11은 외란추력 $F_L = 150\text{N}$ 과 이동자의 질량변화가 동시에 일어날 때 외란추력 관측기를 사용하여

제어를 보상한 경우의 응답 특성이다. 총 외란 F_d 는 식 (17)로부터 계산되며 질량의 변화 시 관측기가 어느 정도까지는 질량 불일치에 의한 외란을 추정할 수 있으나 시변 외란을 실시간으로 정확히 추정하는 데에는 한계를 지닌다. 따라서 그림 11의 마지막 그림과 같이 외란 추정 오차가 발생하고 이로 인해 속도 응답에 과도상태가 길어지게 됨을 확인할 수 있다.

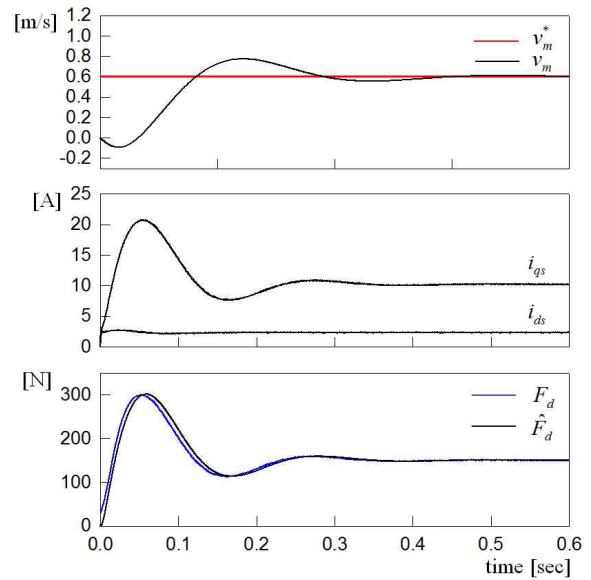
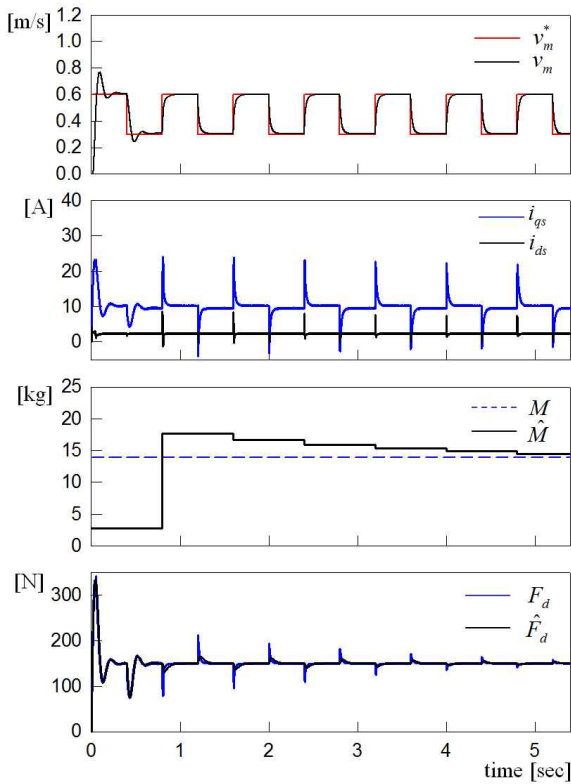


그림 11. 질량 및 외란추력 변화 시 외란추력 관측기로 보상한 경우의 응답 특성 ($F_L = 150\text{N}$, $M = 5M_o$)

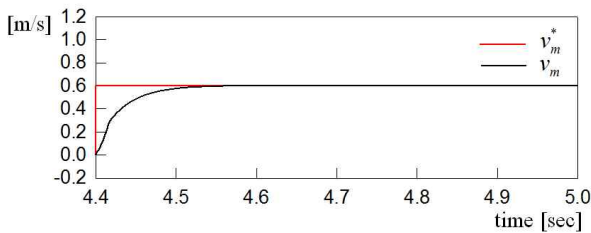
Fig. 11. Control performance using disturbance force observer under the variation of mass and disturbance force

그림 12는 외란추력 $F_L = 150\text{N}$ 과 이동자의 질량변화가 동시에 일어날 때 제안된 기법의 응답 특성을 나타낸다. 그림 12 (a)는 추정 구간 동안의 응답을 나타내며 이동자의 질량은 구형과 속도 명령과 외란 관측기의 추정치를 이용하여 식 (27)과 같이 추정된다. 질량이 추정됨에 따라 식 (17)의 F_d 는 $F_L = 150\text{N}$ 의 상수 외란으로 나타나게 되며 외란 관측기의 추정치 또한 피크치가 줄어들고 상수외란에 수렴하는 추정 특성을 가지게 된다. 추정된 질량과 외란은 제어기에 의해 보상되어 첫 번째 추정이 완료되는 0.8초 이후에는 속도 응답 특성이 오버슈트 없이 설계된 특성을 유지함을 확

인할 수 있다. 그림 12 (b)는 추정이 완료된 후 그림 11 과 동일 조건에서의 속도 과도응답 특성을 나타낸다.



(a) Estimating process



(b) Speed response

그림 12. 질량 및 외란추력 변화 시 제안된 기법의 응답 특성 ($F_L = 150\text{N}$, $M = 5M_o$)

Fig. 12. Control performance of the proposed scheme under the variation of mass and disturbance force

5. 결 론

본 논문에서는 물류 이송과 피킹 단계에서 고 정밀

도 및 고 속응성을 유지할 수 있는 자동피킹 시스템 응용 선형 유도 모터의 강인 제어 기법을 제시하였으며, 강인 제어기 설계를 위해 질량추정과 외란추력 관측기 알고리즘을 고려하였다. 선형 유도 모터의 구동 성능에 직접적 영향을 주는 외란추력이 외란 관측기를 통해 실시간 추정되어 제어 명령에 전향제어로 보상된다. 이러한 기법으로 미지 외란 및 질량의 작은 변화 등과 같은 파라미터 변동 하에서 강인한 제어 성능을 얻을 수 있다. 서보 시스템의 가/감속 시 질량 불일치에 의한 외란추력을 줄여 큰 질량 변화 하에서도 효과적인 제어 성능을 얻기 위해 질량추정 알고리즘이 외란추력 관측기와 병행하여 구현된다. 제안된 방식의 유용성을 입증하기 위해 Matlab - Simulink를 이용한 비교 시뮬레이션이 수행되었으며 이를 위해 선형 유도 모터의 상태방정식으로부터 Simulink 모델이 구현되었다. 비교 시뮬레이션 결과를 통해 제안된 기법이 비교적 적은 연산량으로도 미지 외란 및 질량 변화 하에서도 강인한 제어 특성을 제공함을 확인할 수 있다.

본 연구는 경기도의 경기도지역협력연구센터(GRRC) 사업의 일환으로 수행하였음.(GRRC환경2012-B02, 스마트물류기술연구센터)

References

- [1] <http://www.ssi-schaefer.us/>
- [2] <http://www.sihis.com/>
- [3] J. F. Gieras, Linear Induction Drives. Oxford: Clarendon Press, 1994.
- [4] 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.
- [5] 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 Transactions of Korean Institute of Power Electronics, vol. 11, no. 3, pp. 266-273, 2006.
- [6] 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.
- [7] C. J. Ree, "Conveyor system equipped with and driven by a moving primary-typed SLIM", Journal of The Korean

Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, vol. 11, no. 5, pp. 53-61, 1997.

[8] D. R. Shin, T. W. Heo, J. H. Park, K. Y. Heo, T. K. Roh, and J. I. Woo, "Vector control using a slip angle frequency for the thrust control of SLIM used a conveyor by the inverter based DSP", Journal of The Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, vol. 14, no. 3, pp. 29-37, 2000.

[9] J. I. Woo, T. K. Roh, D. R. Shin, and I. B. Roh, "A operating by the direct thrust control of SLIM in conveyor system", Journal of The Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, vol. 12, no. 3, pp. 59-66, 1998.

[10] 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.

[11] M. Iwasaki and N. Matsui, "Robust speed control of IM with torque feedforward control", IEEE Trans. Indus. Electr., Vol. 40, No. 6, pp. 553-560, 1993.

[12] O. Baranbones, 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.

[13] P. C. Krause, Analysis of Electric Machinery. New York: McGraw-Hill, 1986.

[14] D. W. Novotny and R. D. Lorenz, Introduction to field orientation and high performance AC drives. IEEE IAS Tutorial Course, 1986.

[15] 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, Jul. 1986.

[16] H. W. Van Der Broeck, H. 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] K. Ogata, Discrete-time Control Systems. Prentice-Hall, 1987.

[18] R. C. Dorf and R. H. Bishop, Modern Control Systems. Prentice-Hall International Editions, 2005.

◇ 저자소개 ◇



최정현 (崔正鉉)

1988년 8월 15일생. 2013년 2월 서울과학기술대학교 전기공학과 졸업. 2013년 3월 ~현재 서울과학기술대학교 대학원 전기공학과 석사과정.



유동상 (劉同相)

1962년 4월 12일생. 1985년 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1987년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1992년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(박사). 1992~2000년 LG생산기술원 책임연구원. 2000년~현재 국립한경대학교 전기전자제어공학과 교수. 관심분야는 강인제어, 로보틱스, 자동화.



김경화 (金庚和)

1969년 3월 11일생. 1991년 2월 한양대 전기공학과 졸업. 1993년 2월 KAIST 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1998년 2월 동 대학원 졸업(박사). 1998~2000년 삼성전자 선임연구원. 2000~2002년 KAIST 연구교수. 2002년~현재 서울과학기술대학교 전기정보공학과 부교수.