

트레드밀에 사용되는 3상 유도전동기의 슬립 기반 센서리스 제어 저속성능 향상

이수형¹, 이상희¹, 문태양¹, 한희민¹, 김준석[†]

Low-Speed Performance Improvement of Slip Based Sensorless Control for Three-Phase Induction Motor Used in Treadmill

Su-Hyoung Lee¹, Sang-Hee Lee¹, Tae-Yang Mun¹, Hee-Min Han², and Joohn-Sheok Kim[†]

Abstract

Recent high-end treadmills are demanding stable performance at lower speeds. In this study, a slip control-based induction motor sensorless algorithm for treadmills, which have heavy load variations, is proposed. A modified Gopinath flux estimator is used to evaluate the rotor flux. Results indicate that a good speed regulation performance is achieved even at a low speed of approximately 3 Hz with a nominal exercise load of 90 kg body weight. The slip calculation method in the stationary coordinate system is adopted to improve the control stability. The proposed algorithm is verified throughout the simulation study using PSIM, and the experimental test consists of a commercial treadmill system.

Key words: Induction motor, Sensorless control, Treadmill system, Gopinath flux estimator

1. 서 론

트레드밀은 운동 부하 장치의 하나로 주로 체중감량 및 재활운동의 목적이나 운동선수들의 훈련용으로 개발되어왔다. 트레드밀은 최근까지도 가정용 및 클럽용으로 걷기, 조깅, 달리기 등 자신의 체력수준에 따라 속도를 임의로 조정할 수 있는 이점으로 인하여 전 세계적으로 많은 수요가 있다.

트레드밀은 사업장용과 가정용으로 나뉘며 그중에서도 내구성에 중점을 둔 사업장용 트레드밀이 대부분을 차지하며 장시간 운전하는 경우가 많다^[1]. 이러한 이유로 구조가 간단하며 고장이 적고 가격이 상대적으로 저렴한 유도전동기가 트레드밀에 주로 사용된다. 최근 트레드밀의 고급화 경향에 맞추어 전 속도 영역에서 안정적인 속도 제어 성능이 요구된다. 다른 전동기 응용 분야와는 달리 트레드밀에서는 전동기와 연결된 벨트 위를 사용자가 걸거나 뛰면서 전동기의 부하가 큰 범위로

급변하는 특성이 있다. 안정적인 속도제어 성능을 보장하기 위해서 속도센서가 부착되어야 하지만 가격과 부착의 어려움 등 구조적 문제로 인해 대부분의 트레드밀에서는 유도전동기 센서리스 제어가 적용되고 있다.

유도전동기는 폴리를 사용하여 트레드밀의 주행 벨트와 연결되며 폴리의 비율에 따라 다르기는 하지만, 주행 벨트의 선속 기준으로 시속 0.6~15Km/h의 속도영역을 만족하기 위해 출력주파수 기준으로 3~75Hz의 넓은 범위의 속도제어 성능이 요구된다.

일반적인 트레드밀에서는 제어가 간단하여 쉽게 구현되는 V/F제어 기반의 스칼라 제어 방식이 사용되고 있으며, 통상적으로 회전자의 전기각속도와 슬립각속도의 합으로 주어지는 동기 각속도에 비례하는 전압명령을 출력하는 비교적 간단한 제어 알고리즘이 적용되고 있다. 전류제어 기반의 전통적인 유도전동기 센서리스 알고리즘의 경우 급변하는 부하에 대해 민감하게 반응하는 경우가 많고, 특히 출력주파수 기준으로 3Hz 미만의 저속영역에서 속도가 정역을 반복하는 불안정한 동작이 나타날 수 있기 때문에 트레드밀 제어시스템에 적용하기가 곤란한 경우가 많다. 이에 비해 V/F제어의 경우 부하가 급변하여도 단방향으로의 비교적 안정적인 운전이 가능한 장점이 있다.

부하가 급변하는 트레드밀에서 3Hz이하의 주파수에 해당하는 저속영역에서도 안정적인 속도제어 특성을 얻기

Paper number: TKPE-2019-24-1-4

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†]Corresponding author: jskim@incheon.ac.kr, Dept. of Electrical Eng., Incheon National University
Tel: +82-32-835-8435 Fax: +82-32-835-0773

¹Dept. of Electrical Eng., Incheon National University
Manuscript received Nov. 2, 2018; revised Nov. 4, 2018;
accepted Nov. 8, 2018

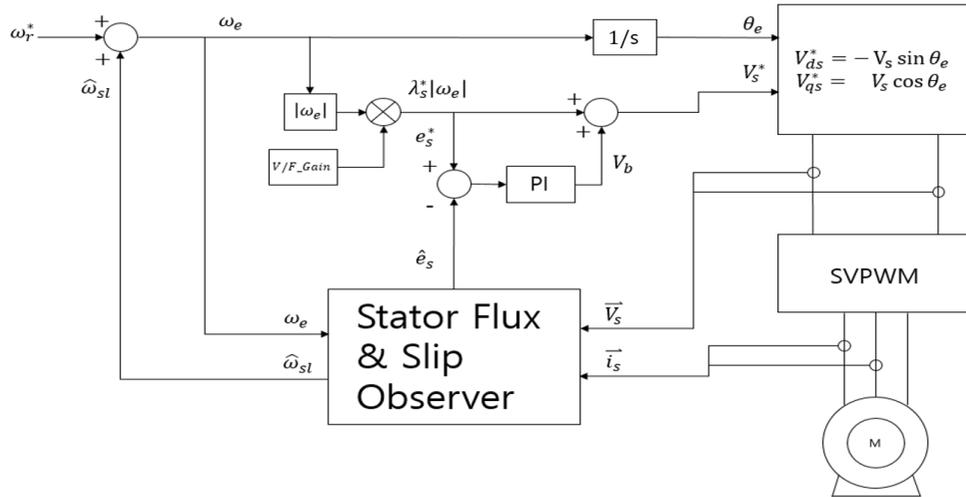


Fig. 1. Slip control-based induction motor sensorless scalar control system.

위해서는 정확한 슬립각속도를 연산할 필요가 있으며 일반적으로 자속추정기반의 슬립각 연산방식이 주로 사용된다. 전동기의 전압 및 전류 정보로부터 자속을 추정하고 추정된 자속과 전류를 이용하여 슬립을 연산하기 때문에, 자속이 정확하게 연산 되지 않는 경우 속도의 오차가 발생하게 되며, 부정확한 자속각으로 인하여 손실이 증가하고 요구되는 토크를 발생시키지 못하는 문제가 발생한다^[2].

본 연구에서는 전기각 출력주파수 3~75Hz의 속도영역에서 부하가 급변하는 경우에도 안정적인 속도제어가 가능한 슬립주파수제어 기반의 센서리스 알고리즘에 대하여 논한다. 기존의 슬립주파수 추정에 대한 다양한 연구 결과를 바탕으로 특수한 부하체계를 갖는 트레드밀에 적용할 수 있는 자속추정 알고리즘에 대하여 연구를 진행하였으며, 3Hz의 저속에서도 안정적인 속도제어가 가능한 센서리스 제어시스템 구현을 목적으로 연구가 진행되었다.

연구의 결과, 슬립제어 기반의 스칼라형 제어구조^[5]를 통해 전류제어 없이도 안정적인 속도제어 성능을 구현한 트레드밀용 유도전동기 센서리스 제어시스템을 구현하였다. 부하급변의 조건에서 안정적인 슬립을 연산하기 위해 다양한 방식의 자속추정기^[3]를 검토하였으며, 전류모델과 전압모델을 복합적으로 사용하는 변형된 고퍼나스형 자속 관측기를 적용하였다. 고퍼나스형 자속관측기와 정지좌표계상에서 슬립을 연산하는 슬립연산 알고리즘^[4]을 적용하여 부하가 급변하는 조건에서 전기각주파수 3Hz(90r/min, 트레드밀 주행속도 0.6km/h)의 저속에서도 안정적인 일정속도 제어가 가능한 제어알고리즘을 구현하였다.

수식에 사용된 물리량의 밑 첨자 s는 고정자 r은 회전자 위치의 물리량을 나타내며 d, q는 각각 d축, q축의 변수를 나타낸다. 윗 첨자 e는 동기좌표계($\omega = \omega_e$)를 나타내며, s는 정지좌표계($\omega = 0$), r은 회전자 좌표계($\omega = \omega_r$)

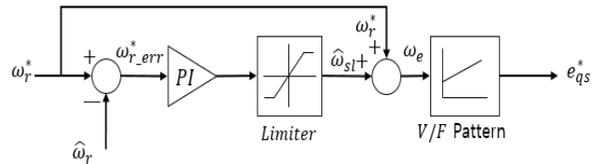


Fig. 2. Existing scalar speed feedback control algorithm.

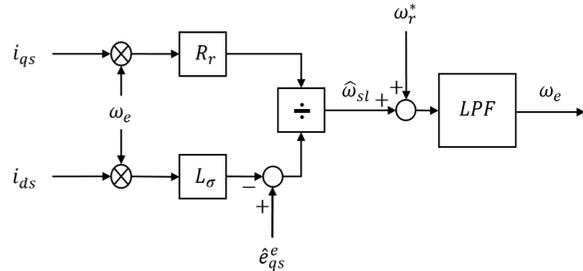


Fig. 3. Vector control based slip estimator.

를 나타낸다. *표시는 기준 값을 의미한다.

구현된 알고리즘은 PSIM을 이용한 시뮬레이션을 통하여 타당성을 검증하였고 상업용 트레드밀을 이용한 부하실험을 통해 그 성능을 검증하였다.

2. 기존 유도전동기 센서리스 제어

2.1 슬립제어 기반 스칼라 제어^[4]

통상적인 방식의 슬립제어 기반의 스칼라 제어기가 그림 1에 도시되어 있다. 속도명령에 해당하는 기준각속도 ω_r^* 이 입력되면 추정슬립 $\hat{\omega}_{sl}$ 을 추정하여 1차측 동기주파수 ω_e 를 발생하며, 적분(적분연산자 1/s)을 통해 동기각 θ_e 을 연산한다. 전압은 주파수에 비례하는 형태의 전형적인 V/F제어 구조를 갖고 있다. 과도상태에서의 토크를 보상하기 위해 슬립추정 중에 발생하는 전동기

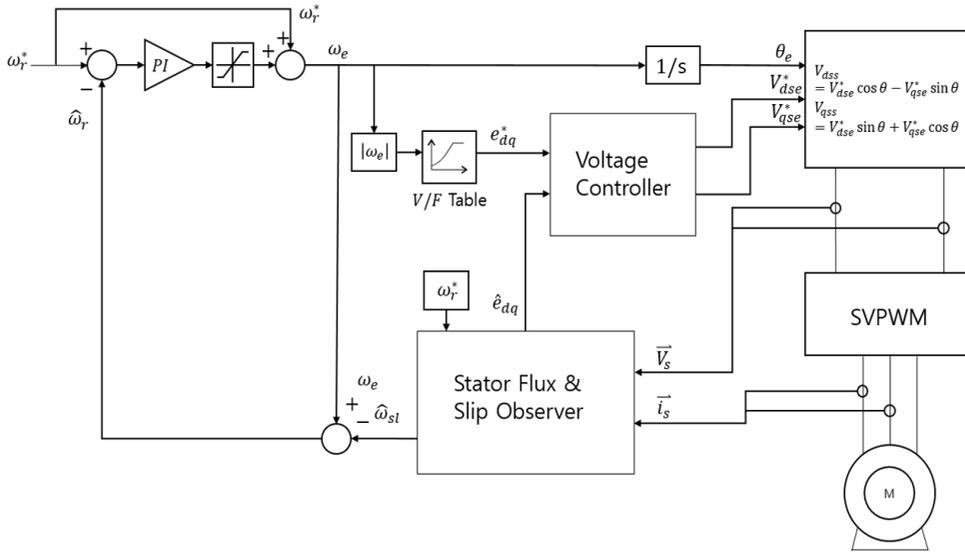


Fig. 4. Sensorless control of induction motor for treadmill system.

의 기준전압을 이용하여 간단한 PI제어기를 사용하여 전압 V_b 을 보정하는 기능이 추가되어 있다. 이러한 방식에서는 전동기 슬립이 부하의 크기에 비례하는 특성이 있으므로 슬립을 정확하게 추정하여 보상하면 평균적인 속도제어 성능을 얻을 수 있으나, 속도제어기가 없기 때문에 기준속도와와의 편차가 발생하는 문제가 있다.

2.2 피드백형 스칼라 제어^[5]

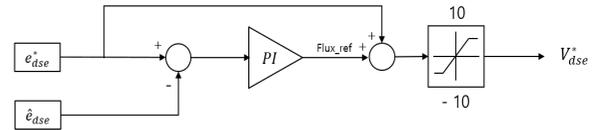
속도제어기가 없는 단점을 보완하기 위해 트레드밀 시스템의 속도제어는 그림 2와 같은 속도제어 구조를 적용할 수 있다. 전류제어를 수행하지는 않지만, 가상적인 d-q좌표계를 이용한 벡터제어형 슬립 연산을 통해 동기각 주파수를 연산한다. 그림 3과 같이 고정자 자속 기준 벡터제어와 같은 자속 조건($\lambda_{qs} = 0, \lambda_{ds} = \text{일정}$)을 만족하는 경우 다음 수식이 성립한다.

$$e_{ds} = 0, \frac{e_{qs}}{\omega_e} = \text{일정} \quad (1)$$

여기서 e_{ds}, e_{qs} 는 동기좌표계 고정자 전압방정식에서 저항 드롭 성분을 제외한 d-q축 역기전력을 나타낸다. 이때 추정 슬립주파수 $\hat{\omega}_{sl}$ 은 아래의 식 (2)과 같이 회전자 저항 R_r , 동기좌표계 고정자 d-q축 전류 i_{ds}^e, i_{qs}^e 와 전압정보로부터 추정된 동기좌표계 고정자 q축 역기전력 \hat{e}_{qs}^e , L_σ 에 대한 식으로 나타낼 수 있다. σ 는 자화성분에 관여하지 않는 자속성분의 비를 나타내며 L_σ 는 고정자와 회전자 권선의 누설 인덕턴스의 합 $L_{ls} + L_{lr}$ 으로 근사한다.

$$\hat{\omega}_{sl} = \frac{R_r i_{qs}^e}{(\lambda_{ds} - L_\sigma i_{ds}^e)} = \frac{\omega_e R_r i_{qs}^e}{\hat{e}_{qs}^e - \omega_e L_\sigma i_{ds}^e} \quad (2)$$

Flux_Control



Torque_Control

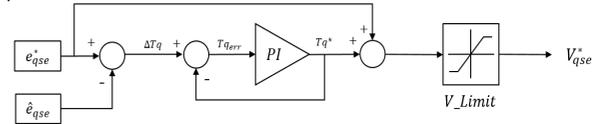


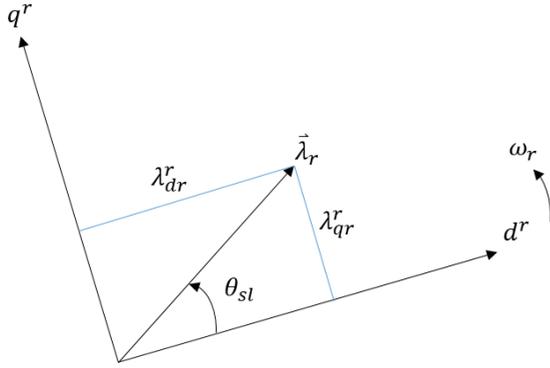
Fig. 5. Voltage controller for treadmill system.

이러한 정상상태를 가정한 슬립연산 방식은 부하가 일정한 경우 비교적 안정적인 동작이 가능하지만, 부하가 급변하는 과도상태에서는 올바른 슬립을 연산하기 어렵다.

3. 트레드밀용 센서리스 제어

3.1 트레드밀용 센서리스 제어 알고리즘

본 연구에서는 부하변동에도 안정적인 속도제어 성능을 얻기 위하여 슬립연산기^[4] 및 속도제어기^[5]를 적용하여 그림 4와 같은 트레드밀용 유도전동기 센서리스 제어기를 구성하였다. 3Hz대의 저속에서도 안정적인 제어 성능을 보장하기 위해 슬립제어 기반의 스칼라형 제어 구조를 갖고 있으며, 전류제어 없이 전압제어만을 통해 속도제어를 수행한다. 속도제어기를 통해 생성된 동기주파수 ω_e 에 비례하는 전압명령을 V/F Table을 통해 생성하며 그림 5와 같은 전압제어기를 적용하여 d-q좌표계 상에서 요구되는 전압을 발생시킨다. 전압제어기는 동기좌표계상의 토크분 전압 V_{qs}^{*e} 와 자속분 전압 V_{ds}^{*e}

Fig. 6. Rotor flux in the $d^r - q^r$ reference frame.

을 출력하며 이때 자속분 기준전압은 0V~1V 로 일정하게 유지하도록 하며 저항 드롭 성분에 대한 보정제어를 수행한다. 과도상태에서 자속에 해당하는 d축 전류를 제한하기 위해 자속분 전압제어출력을 3마력급 전동기의 파라미터를 고려하여 -10~10V로 제한하였다. 토크분 기준전압은 속도제어기 출력에 따라 비례하는 전압 명령에 식 (3)과 같이 ΔTq 에 따른 PI제어기 출력을 토크 보상분 전압으로 더하여 출력한다.

$$\hat{e}_{qs}^e = V_{qs}^{*e} - i_{qs}^{*e} R_s \quad (3)$$

$$\Delta Tq \cong e_{qs}^{*e} - \hat{e}_{qs}^e$$

슬립제어 기반의 센서리스 제어의 성능은 자속관측기와 슬립관측기(Stator Flux & Slip Observer) 성능에 크게 좌우되므로 트레드밀 시스템에 적용하기 위해서는 더욱 성능이 우수한 알고리즘에 대한 고려가 필요하다.

3.2 트레드밀용 슬립 추정 알고리즘

트레드밀 시스템에서 저속 운전시의 부하 동특성을 개선하기 위해서는 부하변동에 강인하며 우수한 추종 성능을 가지는 슬립관측기를 사용할 필요가 있다. 센서리스 제어의 경우 저속에서 정확한 자속각을 얻을 수 없기 때문에 동기좌표계에서 구현된 슬립연산식을 사용할 경우 제어의 안정성이 크게 떨어지는 문제가 발생한다. 본 연구에서는 그림 6과 같이 슬립을 회전자 자속각으로부터 직접 연산하는 방식^[4]을 적용하였다.

슬립각 θ_{sl} 은 회전자 기준 좌표계에서 다음 식으로 나타난다.

$$\theta_{sl} = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda_{qr}^r}{\lambda_{dr}^r} \right) \quad (4)$$

고정자 자속 벡터가 d축에 동기 된 상태라면 슬립각의 내외적 관계를 이용하여 고정자 자속에 대해 정리된 슬립주파수는 다음 식으로 표시된다.

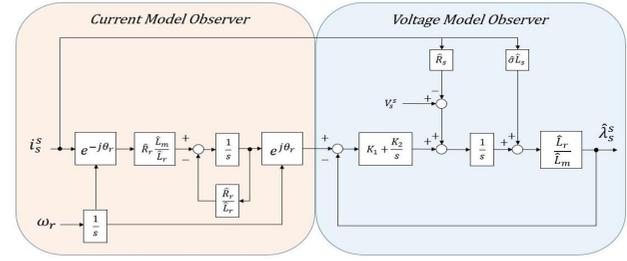


Fig. 7. The Closed-loop gopinath flux observer.

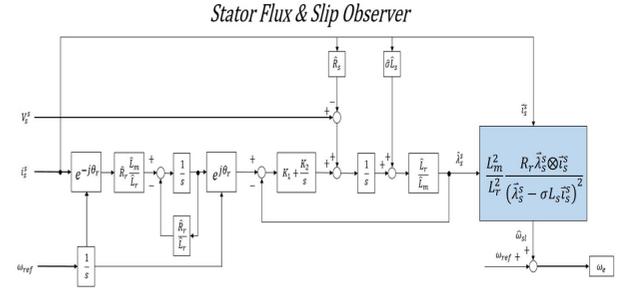


Fig. 8. Modified stator flux & slip observer.

$$w_{sl} = \frac{L_m^2}{L_r^2} \frac{R_r \lambda_s^s \otimes i_s^s}{(\lambda_s^s - \sigma L_s i_s^s)^2} \quad (5)$$

위 슬립연산 알고리즘은 동기좌표계 변환 없이 슬립연산이 가능한 장점이 있다. 다른 슬립연산과 같이 위 방식 역시 R_r , L_m 과 같은 전동기의 제정수가 필요한 문제가 있으나 트레드밀의 전동기가 자주 교체되지 않기 때문에 정확한 초기값을 설정할 경우 큰 문제가 되지 않는다. 또한 비교적 양호한 환경에서 사용하는 트레드밀의 특성상 온도변화로 인한 제정수의 변동 역시 크지 않다. 식 (5)를 통해 연산된 슬립주파수 \hat{w}_{sl} 는 필터를 거쳐 속도추정에 사용된다.

3.3 부하변동에 강인한 자속 관측기

정확한 슬립연산을 위해서는 자속 정보가 요구되며 자속 추정 알고리즘의 성능이 제어성능을 좌우한다. 본 연구에서는 제정수에 대한 의존성이 크지 않은 전압 적분형 자속추정기를 적용하였다. 그러나 널리 알려진 바와 같이 3Hz대역의 저속영역에서는 전압 정보의 신뢰성이 크게 감소하기 때문에 저속영역에서 자속정보를 보정할 필요가 있다. 이에 대한 다양한 기존 연구^{[6]-[8]}를 참조하여 연구를 진행한 결과, 그림 7과 같은 전압형 모델과 전류형 모델을 혼합한 고피나스형 자속 추정기가 저속영역에서의 자속 추정 성능이 우수한 것으로 확인되었다^{[6]-[8]}.

고피나스형 자속 추정기는 고속영역에서는 전압형 추정기를 사용하고 저속에서는 전류형 추정기를 사용하는 방식이며, 전압 모델과 전류모델에 대해 식 (6)과 같은

TABLE 1
SIMULATION AND EXPERIMENT PARAMETERS

| Parameter | Value |
|------------------------------|-----------|
| DC link Voltage V_{dc} | 300V |
| Rated Power | 2.2kW/3HP |
| Moter Pole | 4Pole |
| Rated Current A_{rms} | 8A |
| Rotor Inductance L_r | 105.43mH |
| Stator Inductance L_s | 105.43mH |
| Mutual Inductance L_m | 101 mH |
| DC Capacitor C_{DC} | 1980 uF |
| Switching Frequency f_{sw} | 16 kHz |
| Sampling Period T_{samp} | 62.5 us |

특성함수를 갖게 되며 관측기 중간에 위치한 PI제어의 차단주파수를 조절하여 가중치를 설정할 수 있다^[7].

$$F(j\omega_e) = \frac{\omega_e^2}{\sqrt{(K_I - \omega_e^2)^2 + (K_P \omega_e)^2}} e^{j\alpha} \quad (6)$$

$$\left(\alpha = \frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \frac{K_I - \omega_e^2}{K_P \omega_e}\right)$$

고피나스형 자속 관측기가 매우 우수한 성능을 갖는 것은 널리 알려진 사실이지만 전류형 모델에 전동기의 속도정보가 사용되는 단점이 있다. 센서리스 제어의 경우 정확한 속도 정보를 얻을 수 없기 때문에 자속을 추정 한 후 슬립을 계산하고 이를 이용하여 속도를 추정하는 방식이 사용된다. 따라서 추정된 속도를 다시 자속 관측기에 사용할 경우 제어의 안정성이 담보되지 못하는 문제가 발생한다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 실제 속도 정보가 아닌 기준 속도를 사용하는 변형된 고피나스형 자속관측기를 구성하였다. 기준속도를 사용하므로 전류형 자속관측기 자체는 정상적으로 동작하지 않는다. 그러나 식 (6)의 절환주파수를 3Hz에 설정하고 3Hz 이상의 주파수에서만 전동기를 동작시키면 전류형 자속추정기 부분은 전압을 적분하여 자속을 추정하는 전압형 추정기에 대한 기준값을 제공하는 용도로만 사용되므로 저속에서 전압 정보에 포함된 DC성분으로 인하여 전압 적분기가 포화되는 문제를 쉽게 해결할 수 있다.

그림 8에 변형된 고피나스형 자속관측기를 적용하여 슬립을 연산하는 알고리즘을 도시하였다. 전술한 바와 같이 자속관측기의 절환주파수를 전기각주파수 3Hz로 설정하였으며 전류형 모델은 실질적으로 전압적분기의 포화를 억제하는 역할만 수행한다. 물론 3Hz(90r/min, 주행속도 0.6km/h)이하의 속도에서 자속추정기가 정상 동작하지 않는 문제가 있으나 트레드밀의 경우 별도의 알고리즘 없이 V/F제어를 기반으로 기동한 이후 3Hz

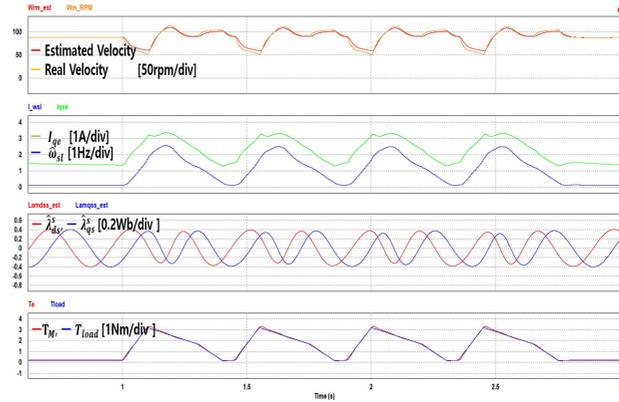


Fig. 9. Simulation result of the proposed algorithm with 3Hz(90r/min) speed command.

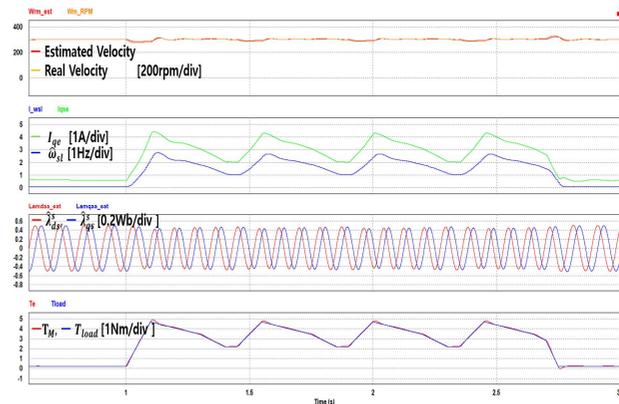


Fig. 10. Simulation result of the proposed algorithm with 10Hz(300r/min) speed command.

이하의 속도로 동작하는 경우가 없기 때문에 큰 문제가 되지 않는다.

4. 시뮬레이션 연구

본 연구에서 적용한 제어기의 성능을 입증하기 위하여 표 1에 표시된 4극 3마력 급 유도전동기를 사용하여 PSIM을 이용한 시뮬레이션 연구를 수행하였다. 상업용 트레드밀 시스템의 경우 중저급의 MCU가 적용되는 점을 감안하여 자속 추정 및 슬립제어는 1ms주기로 수행하며 추정 역기전력에 대한 전압 보상 제어는 5ms주기로 수행한다. 스위칭 주파수는 16kHz를 사용하여 스위칭에 의한 소음을 최소화하였다. 현장의 상황에 가까운 시뮬레이션 환경을 구성하기 위하여 90kg 무게의 성인 남성에게 대한 운동부하를 실험적으로 실측한 부하를 시뮬레이션에 적용하였다.

그림 9는 3Hz(90r/min, 주행속도 0.6km/h) 동작조건에서 변형된 고피나스 자속관측기의 자속추정 성능 및 슬립연산 능력, 속도제어 성능을 보이는 시뮬레이션 결과이다. 첫 번째 파형은 전동기속도 ω_{rm} 및 추정된 속도 $\hat{\omega}_{rm}$, 두 번째 파형은 q축 동기좌표계 전류 I_q^e 와 추정

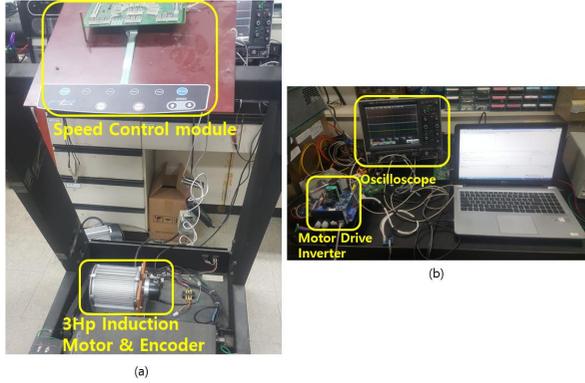


Fig. 11. Experiment equipments.

슬립 $\hat{\omega}_{sl}$, 세 번째 파형은 추정된 고정자 d-q축 자속 $\hat{\lambda}_{ds}^s / \hat{\lambda}_{qs}^s$ 및 실제 고정자 자속 $\lambda_{ds}^s / \lambda_{qs}^s$ 를 나타내며 네 번째 파형은 트레드밀 운동부하를 모델링한 T_{load} 와 전동기 토크 T_m 을 나타낸다. 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 부하가 변하는 상황에서도 자속 추정기가 실제 자속과 거의 동일한 자속을 추정하고 있으며 속도추종 성능도 매우 양호한 것을 알 수 있다. 성인 남성이 트레드밀의 주행 벨트에 발을 디딜 때 마다 부하가 인가되며 발을 디는 순간으로부터 0.1초 동안 40rpm의 오차를 갖지만 곧바로 속도를 회복하며 일정속도를 유지하는 것을 볼 수 있다. 전동기-폴리-주행벨트로 이루어진 트레드밀의 특성상 상당히 큰 댐핑 효과가 있기 때문에 순간적인 40r/min의 속도 감속은 운동하는 인체가 거의 느끼지 못한다. 특히 벨트부분에 전동기 자체의 관성보다 약 4배 이상 큰 관성의 롤러가 앞뒤로 2개가 부착되기 때문에 실제적인 댐핑 효과가 매우 큰 편에 속한다.

그림 10은 속도 명령 10Hz(300r/min, 주행속도 2km/h)에서의 운전 특성을 확인하기 위한 시뮬레이션 파형이다. 파형의 순서는 그림 9와 동일하다. 전동기의 회전속도가 증가함에 따라 운동부하는 동일한 90kg의 체중에서 조금 커진 형태로 인가되며 그림 9와 비교하여 약 0.1초의 동일한 속도 회복 시간을 나타내며 속도 오차는 22rpm 미만으로 감소하였다. 속도오차가 감소하는 이유는 속도가 비교적 높아서 전압 적분을 통한 자속의 정밀도가 높아지고 이에 따라 매우 정확한 슬립을 연산할 수 있기 때문인 것으로 분석된다.

시뮬레이션 결과를 통해 제안된 시스템이 트레드밀에서 요구하는 최저 3Hz의 속도에서도 안정적인 속도 제어성능을 갖고 있음을 확인할 수 있다.

5. 실험 결과 및 분석

제안된 트레드밀용 제어 알고리즘의 성능을 실험적으로 검증하기 위하여 그림 11의 실제 상업용 트레드밀을 이용하여 실험을 진행하였다. 실험조건은 표 1과 동일하

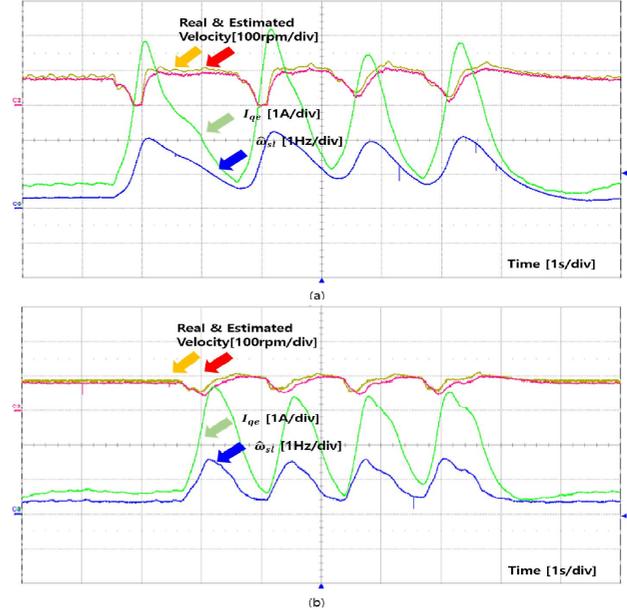


Fig. 12. Experiment results of comparing speed control performance at 90r/min(0.6km/h) speed command.

(a) conventional control algorithm.

(b) proposed control algorithm.

다. Cortex-M4 계열의 보급형 MCU인 Infineon Technologies사의 XMC4400 MCU가 탑재된 상업용 인버터를 이용하여 제어를 구성하였다. 선트저항을 이용하여 전류를 검출하며 MCU에 내장된 12bit ADC 모듈을 사용하여 전류를 측정하였다. Dead-time 보상 알고리즘을 적용하여 PWM 정밀도를 높였으며, 전압정보는 PWM을 발생시키기 위한 전압 기준값을 커브피팅을 통해 보정하여 사용하였다. 제어에는 사용하지 않지만 성능을 검증하기 위한 용도로 1024펄스급 중공축형 엔코더를 부착하여 전동기의 실제속도를 측정하였다. 실험파형은 MCU에서 연산되는 변수를 12bit DAC를 통해 출력하여 파형관측기로 관측한 것이다.

그림 12는 3Hz(90r/min 주행속도 0.6km/h)속도 명령에 대한 기존 제어 알고리즘과^[5] 제안된 알고리즘의 성능비교를 위한 실험 결과가 도시되어 있다. 인체 운동부하이므로 완벽히 동일한 조건은 아니지만 90kg 체중의 인체가 동일속도에서 동일한 보폭으로 운동한 경우를 비교한 것이다. 운동부하에서 그림의 (a)파형이 기존 알고리즘으로 동작하는 경우이며, (b)파형이 제안된 알고리즘에 의한 동작 파형이다. 파형은 위쪽부터 전동기 속도 ω_{rm} , 추정 속도 $\hat{\omega}_{rm}$, 추정 슬립 $\hat{\omega}_{sl}$, 동기좌표계상의 q축 전류 \hat{i}_{qe} 가 도시되어 있다. (a)파형의 경우 전동기가 거의 정지했다가 90r/min으로 회복하는 현상이 발생함을 볼 수 있다. 댐핑 요소가 많은 트레드밀의 특성상 주행속도가 직접적으로 0이 되는 것은 아니지만 인체가 속도의 변화를 느낄 수 있는 수준에 해당한다. 이러한 현상은 급격한 부하변화에서 과도상태의 슬립을 올바르게

게 추정하지 못하기 때문에 나타나는 현상으로 해석되며 트레드밀의 성능을 크게 저해하는 요소로 작용한다. (b)의 경우와 같이 제안된 방식에서는 약간의 지연이 있기는 하지만 슬립의 변화를 빠르게 감지하여 이를 보상해주기 때문에 상대적으로 속도의 편차가 작은 것을 확인할 수 있다. 약 30~40r/min의 순시 속도 편차는 폴리-벨트(롤러)로 이루어진 트레드밀에서 인체가 벨트의 속도 변화를 거의 느낄 수 없는 수준에 해당한다. 실제 벨트의 순시적인 주행속도를 측정할 방법이 마땅하지 않기 때문에 이를 실험 결과로 제시하지 못함을 양해하기 바란다.

그림 13은 3Hz(90r/min 주행속도 0.6km/h)의 속도 명령에서 제안된 알고리즘의 자속관측기 동특성을 검증하기 위한 실험 파형으로 위쪽부터 추정 속도 $\hat{\omega}_{rm}$, 추정된 고정자 d-q축 자속 $\hat{\lambda}_{ds}^s/\hat{\lambda}_{qs}^s$, a상전류 i_{as} 를 표시한다. 변형된 고피나스 자속관측기를 적용하여 전기각 주파수 3Hz의 저속에서도 시뮬레이션과 거의 동일한 형태의 우수한 자속 추종 성능을 보이고 있음을 확인할 수 있다 (실제 자속을 확인할 수 없기 때문에 시뮬레이션과의 비교만 가능함).

그림 14는 속도명령을 전기각주파수 10Hz(300r/min, 주행속도 2km/h)로 인가한 경우에 대한 실험 결과이다. 주행속도 2km/h는 인체가 천천히 걷는 속도에 해당하며 토크분 전류인 q축 전류 최댓값이 약간 증가하였음을 볼 수 있다. 아울러 동일 보폭을 가정할 때 부하가 인가되는 시간이 짧아지기 때문에 평균 부하가 많이 높아진 것을 볼 수 있다. 실제 속도 대비 약간의 지연이 존재하지만 비교적 정확한 속도 추정이 이루어짐을 볼 수 있으며 운동 초기부분을 제외하면 대부분의 구간에서 약 20r/min미만의 속도 편차를 갖는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 트레드밀에 인가되는 부하는 체중에 비례하므로 90kg 미만의 사용자가 동일한 실험을 했을 경우 속도 오차가 더 감소할 것으로 예상된다.

그림 15는 고속영역(전기각주파수 44Hz, 속도명령 1300r/min, 주행속도 8.6km/h)에서의 제어기 동특성을 나타내는 실험 파형이다. 8.6km/h의 속도는 상당히 빠른 달리기에 해당하며 90kg 체중의 운동 부하에 따라 약간의 순시 속도 오차가 발생하지만 매우 안정적인 속도에 어 성능을 보이고 있다.

그림 16은 실제 운동 부하 상황에서는 나타나지 않지만 저속 속도영역에서의 트레드밀의 성능을 검증하는 하나의 방법으로 인체가 발을 이용하여 전력으로 벨트를 구속한 경우에 대한 실험 파형이다. 90r/min의 운전 중에 최대의 힘으로 벨트를 구속하기 때문에 전동기의 속도는 급격하게 0으로 감소하지만 0속도로 감속된 후 약 0.3초 이내에 다시 정상속도를 회복하는 것을 볼 수 있다. 이러한 성능 실험에 별도의 검증 규격이 존재하지는 않지만 현장에서는 대략 1초 이내에 속도를 회복하

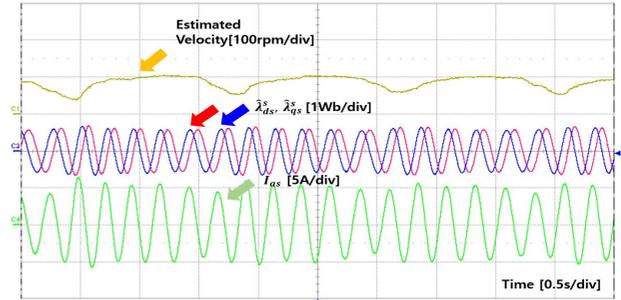


Fig. 13. Experiment results of the proposed algorithm at 90r/min(0.6km/h) speed command (to show estimated speed & flux).

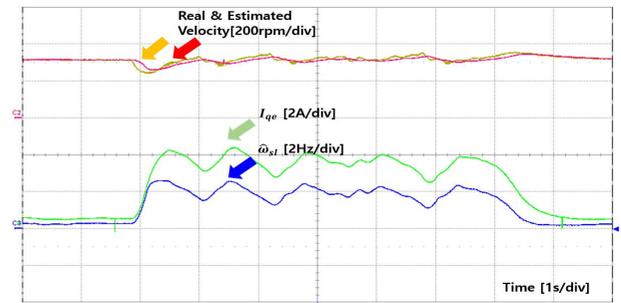


Fig. 14. Experiment results of the proposed algorithm at 300r/min(2km/h) speed command (to show estimated speed & slip, q-axis current).

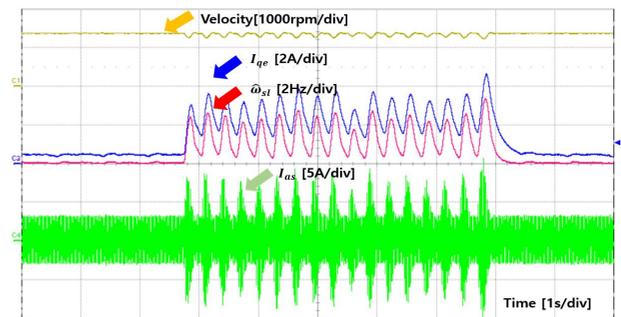


Fig. 15. Experiment results of the proposed algorithm at 1300r/min(8.6km/h) speed command (to show estimated speed & flux).

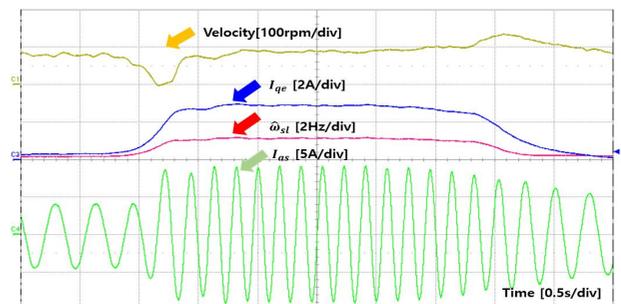


Fig. 16. Experiment results of the proposed algorithm at 90r/min(0.6km/h) speed command with maximum brake torque (to show estimated speed & flux).

면 매우 우수한 성능으로 평가를 받는다. 본 실험은 인체가 트레드밀에 탑재되었을 때 부하가 있는 상태에서 기동하는 능력을 검증하는 방법이기도 하다.

실험을 통해 저속 및 고속 주행에서의 트레드밀 동작에 대한 제어 알고리즘의 성능을 검증하였으며 부하가 급변하는 조건에서 3Hz의 저속에서도 속도 추종성능이 크게 개선되고 안정적인 토크제어 성능을 나타냄을 확인하였다.

6. 결 론

본 연구에서는 부하가 급변하는 트레드밀에 적용할 수 있는 슬립제어 기반 유도전동기 센서리스 알고리즘을 제안하였다.

인체가 직접 접촉하는 트레드밀의 특성으로 인하여 저속영역에서 불안정성이 내포된 전류제어 기반의 전형적인 센서리스 알고리즘을 배제하고 단방향으로만 속도가 발생하는 슬립제어 기반의 센서리스 알고리즘을 적용하였다. 저속에서도 안정적인 슬립추정을 위해 변형된 고피나스형 자속추정기를 사용하였으며, 전기각주파수 3Hz의 저속에서 급변하는 부하조건에서도 안정적인 자속추정이 가능함을 보였다. 정지좌표계에서 연산이 가능한 슬립연산방식을 적용하여 제어의 안정성을 높였으며 90kg 체중의 운동 부하에서도 안정적인 속도제어 성능을 구현하였다. 제시된 알고리즘은 상업화가 가능한 중저급 MCU를 사용한 인버터 시스템과 상업용 트레드밀에 적용하여 그 성능을 실험적으로 입증하였다.

전동기의 제정수는 실험적 고찰을 통해 확정된 것으로 전동기가 바뀌는 경우 적절한 제정수를 자동으로 설정할 수 있는 오토튜닝 기능이 추가적으로 필요하며 이에 대한 연구를 진행 중이다.

본 연구는 2018년 인천대학교 교내 연구 과제 지원에 의해서 이루어졌습니다.

References

- [1] J. S. Lee, "Modal analysis of treadmill machine," *Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 7, No. 4, pp. 539-544, 2006.
- [2] H. H. Lee and Y. Khojakhan, "New loss minimization vector control for induction motors," *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 60, No. 6, pp. 1140-1145, Jun. 2011.
- [3] P. L. Jansen and R. D. Lorenz, "A physically insightful approach to the design and accuracy assessment of flux observers for field oriented induction machine drives," *IEEE Trans. On Ind. Appl.*, Vol. 30, No. 1, pp. 101-110, Jan./Feb. 1994.

- [4] C. C. Wang and C. H. Fang, "Sensorless scalar-controlled induction motor drives with modified flux observer," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 18, pp. 181-186, May 2003.
- [5] S. S. Han, "Slip estimated sensorless vector controller," *JKIICE*, Vol. 14, No. 10, pp. 2299-2304, 2011.
- [6] G. J. Jo and J. W. Choi, "Realization of voltage model flux observer by using the closed-loop gopinath flux observer of induction motors," *Proceedings of the KIEE*, pp. 183-186, Oct. 2015.
- [7] J. Holtz, "Sensorless control of induction motor drives," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 90, pp. 1359-1394, Aug. 2002.
- [8] Y. H. Park, J. W. Choi, H. G. Kim, J. K. Kim, Y. T. Choi, E. C. Nho, and T. W. Chun, "A study on the characteristics of thyristor controlled shunt compensator," *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 8, No. 4, pp. 299-306, Aug. 2003.



이수형(李守炯)

1992년 3월 18일생. 2017년 인천대 전기공학과 졸업. 2017년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



이상희(李常熙)

1993년 2월 6일생. 2017년 인천대 전기공학과 졸업. 2017년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



문태양(文泰陽)

1993년 2월 6일생. 2017년 인천대 전기공학과 졸업. 2017년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



한희민(韓熙珉)

1971년 2월 13일생. 1996년 인천대 전자공학과 졸업. 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2010년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



김준석(金峻奭)

1965년 12월 12일생. 1989년 서울대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1996년~현재 인천대 전기공학과 교수.