

속도센서가 없는 유도전동기의 고정자자속 기준제어를 위한 강인한 속도제어기 설계

金大一*,申明昊,玄東石

A Design of Robust Speed Controller for Speed Sensorless SFO System of an Induction Motor

Dae-Il Kim, Myoung-Ho Shin, and Dong-Seok Hyun

요 약

기존의 속도센서가 없는 유도전동기의 고정자자속 기준제어 구동시스템에서, 추정된 속도는 저역통과필터의 사용으로 과도기에 지연이 생긴다. 이 지연으로 인한 응답속도의 과도한 오버슈트를 방지하기 위하여 속도제어기의 이득은 작아야 하는데, 이 때문에 부하토크의 영향을 크게 받게 된다. 본 논문에서는 부하토크 관측기와 전향제어를 사용하여 속도센서가 없는 시스템을 위한 강인한 속도제어기를 설계하였다.

ABSTRACT

This paper investigates the problem of the speed controller of conventional speed sensorless stator flux-oriented(SFO) induction motor drive, and proposes a robust speed controller to solve the conventional problem. In the proposed method, a robust speed controller for speed sensorless SFO system is designed by taking advantage of disturbance torque observer and using feedforward.

Key words : speed control, speed sensorless, feedforward control, disturbance torque observer, SFO system

1. 서 론

PI 속도제어기를 가진 벡터제어 유도전동기는 고성능 AC 서보시스템으로 많은 분야에 사용되고 있다^{1) [3]}. Iwasaki와 Matsui는 부하토크 관측기와 토크 전향제어를 사용한 유도전동기의 강인한 속도제어방법을 제안하였다⁴⁾. 이 방법에서 부하토크는 기계방정식에 기초한 최소차수 상태관측기⁵⁾에 의해 추정된다.

속도센서가 없는 유도전동기의 고정자자속 기준제어에서 추정된 속도가 이산화 될 때, 이산화에 의한 모델링 오차 때문에 회전자속도 추정에 오차가 발생하는데, 추정된 속도에 포함된 이산화 오차를 제거하기 위하여 저역통과필터를 사용한다⁶⁾. 그런데, 저역통과필터의 사용으로 과도상태에서 추정된 속도가 지연되는 현상이 발생한다. 이 때 속도센서를 사용하는 시스템의 속도제어기 이득값을 속도센서가 없는 시스템의 속도제어기에 사용하면, 추정된 속도의 지연으로 속도응답에 과도한 오버슈트가 발생하므로 이득값을 작게 해야 한다. 그러나, 이 때문에 부하토크의 영향을 크게 받아 속도응답특성이 나빠지는 문제가 발생하게 된다.

본 논문에서는 부하토크 관측기와 전향제어를 사용하여 속도센서가 없는 시스템을 위한 강인한 속도제어

*한양대학교 전기공학과 석사과정
E-mail : kimdi@ihanyang.ac.kr
접수일자 : 2002. 7.23
1차심사요청일 : 2002. 7.30
심사완료일 : 2002.10. 8

기를 제안한다. 시뮬레이션과 실험결과를 통해서, 제안한 속도제어기가 부하토크의 영향에 강인한 속도응답 특성을 가짐을 증명한다.

2. 기존의 방법과 속도 추정

그림 1은 기존의 속도센서가 없는 속도제어기의 블록도를 나타낸다. 고정자자속 기준제어에서 동기각속도는 정지 2상 $\alpha - \beta$ 좌표계에서 식 (1)과 같다.

$$\hat{\omega}_e = \frac{(v_{\beta s} - R_s i_{\beta s}) \hat{\lambda}_{\alpha s} - (v_{\alpha s} - R_s i_{\alpha s}) \hat{\lambda}_{\beta s}}{|\hat{\lambda}_s|^2} \quad (1)$$

여기서, R_s 는 고정자 저항, $v_{\alpha s}, v_{\beta s}$ 는 고정자 전압의 α, β 축 성분, $i_{\alpha s}, i_{\beta s}$ 는 고정자 전류의 α, β 축 성분, $\lambda_{\alpha s}, \lambda_{\beta s}$ 는 고정자 자속의 α, β 축 성분, ‘ $\hat{\cdot}$ ’은 추정값.

추정된 슬립각속도는 회전 2상 d-q 좌표계에서 식 (2)와 같으며, 추정된 회전자 속도는 식 (3)과 같다.

$$\hat{\omega}_{sl} = \frac{(1 + \sigma \tau_r p) L_s i_{qs}}{\tau_r (\hat{\lambda}_{ds} - \sigma L_s i_{ds})} \quad (2)$$

$$\hat{\omega}_r = \frac{2}{p} (\hat{\omega}_e - \hat{\omega}_{sl}) \quad (3)$$

여기서, L_s 는 고정자 자기인덕턴스, σ 는 총 누설계수, L_m 은 자화 인덕턴스, L_r 은 회전자 자기인덕턴스, p 는 미분 연산자, τ_r 은 회전자 시정수, R_r 은 회전자 저항.

식 (1)은 이산화 될 때 모델링오차를 포함하게 되고, 이 때문에 추정된 회전자 속도 (3)에 오차가 발생하게 되는데, 이 오차는 저역통과필터(그림 1 참조)를 사용해서 제거한다^[6]. 그러나 저역통과필터의 사용으로 인해서 추정된 속도는 과도상태에서 지연되며, 이 때문에 속도제어기의 이득을 작게 해야 하는데, 그로 인해 부하토크에 의한 속도응답특성이 나빠지는 문제가 발생한다.

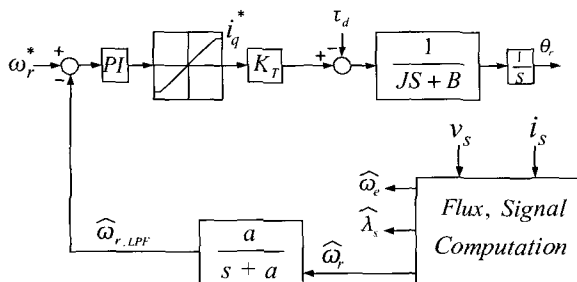


그림 1 속도센서가 없는 기존의 속도제어기 블록도
Fig. 1 Block diagram of conventional speed controller

3. 부하토크 관측기를 이용한 전향제어

속도계 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$J \frac{d\omega}{dt} + B\omega = u - \tau_d \quad (4)$$

여기서, ω 는 각속도, u 는 구동토크, τ_d 는 부하토크, J 는 관성모멘트.

샘플링주기에 비해서 τ_d 의 변화가 매우 작으므로 다음과 같이 τ_d 는 샘플링주기 동안 일정하다고 가정한다.

$$\frac{d\tau_d}{dt} = 0 \quad (5)$$

식 (4), (5)로부터 상태방정식을 쓰면 다음과 같다.

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu \quad (6)$$

$$y = Cx \quad (7)$$

여기서, $A = \begin{bmatrix} 0 & -1/J \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, x = [\omega \ \tau_d]^T, C = [1 \ 0]$

$$B = [1/J \ 0]^T.$$

τ_d 를 추정하기 위한 상태관측기는 식 (8), (9)와 같으며, 식 (8), (9)를 라플라스변환을 하면 식 (10)과 같다.

$$\frac{dz}{dt} = -\lambda z + \lambda^2 J_n \omega + \lambda u \quad (8)$$

$$\hat{\tau}_d = z - J_n \lambda \omega \quad (9)$$

$$\hat{\tau}_d(s) = \frac{\lambda}{s+\lambda} u(s) - J_n \lambda \frac{s}{s+\lambda} \omega(s) \quad (10)$$

내부변수를 식 (11), (12)로 정의하면, 추정된 부하토크는 $\hat{\tau}_d(t)$ 는 식 (13)과 같다.

그림 2는 부하토크 관측기의 블록도를 나타낸다.

$$\frac{dq_0(t)}{dt} = -\lambda q_0(t) + \lambda u \quad (11)$$

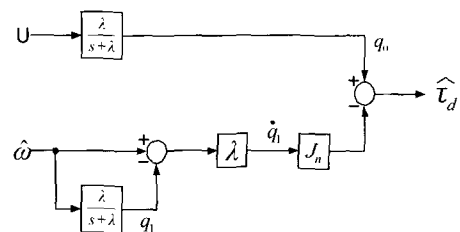


그림 2 부하토크 관측기
Fig. 2 Disturbance torque observer

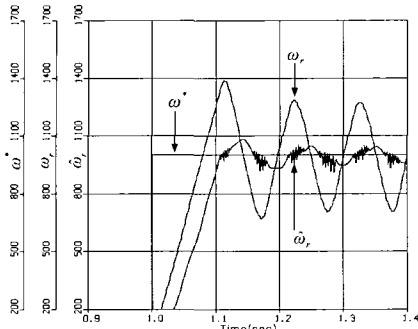


그림 5 그림 4의 제어기 이득을 사용한 속도센서가 없는 시스템의 속도응답
 Fig. 5 Speed response of speed sensorless system with the same controller gains of Fig.4

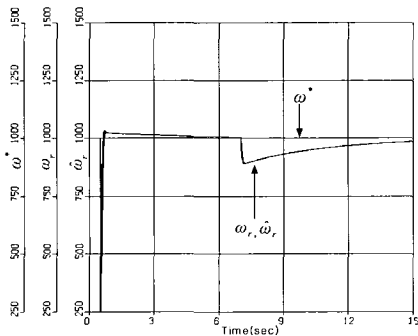


그림 6 전향보상을 하지 않은 속도센서가 없는 시스템의 속도응답
 Fig. 6 speed response of speed sensorless system without feedforward

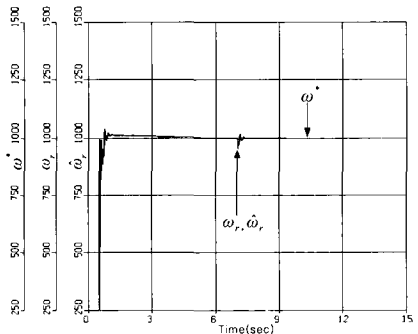


그림 7 전향보상을 한 속도센서가 없는 시스템의 속도응답
 Fig. 7 Speed response of speed sensorless system with feedforward

그림 7은 제안한 전향보상을 가지는 속도센서가 없는 시스템의 속도응답을 나타내고 있다. 그림 6과 그림 7은 속도센서가 없는 시스템에서 0.5초에서 속도지

령 1000[rpm]을, 그리고 7초에서 부하토크 3[Nm]를 인가한 결과이다. 그림 6과 그림 7에서, 제안한 전향보상을 한 속도제어기는 전향보상이 없는 것에 비해서 부하토크에 의한 언더슈트를 약 1/3정도로 줄였고 빠른 속도응답특성을 나타냄을 알 수 있다.

6. 실험 결과

제안한 방법의 타당성을 입증하기 위하여 TMS320C31을 사용한 인버터를 사용하여 실험하였다. 사용한 전동기는 표1의 3상 유도전동기이다. DC링크전압은 325[V]이며, 스위칭주파수는 4[kHz]이다. 전류제어주기는 125[μs], 속도제어주기는 1.25[ms]이며, 전동기의 회전 속도 검출을 위하여 1024[ppr] 엔코더를 사용하였다.

그림 8은 측정된 속도 ω_r 을 제어했을 때의 속도응답파형이다. 저역통과필터의 사용으로 과도상태에서 추정된 속도 $\hat{\omega}_r$ 이 지연되고 있다. 속도지령은 1000[rpm] → 1700[rpm]이며, PI제어기 이득은 K_p 가 0.1, K_i 가 1.0 이고, LPF의 차단주파수는 30[rad/s]이다.

그림 9는 그림 8의 PI제어기 이득을 가진 속도센서가 없는 시스템의 속도응답이다. 추정된 속도의 지연 때문에 속도응답이 진동함을 나타내고 있다. 따라서 PI제어기 이득을 작게 해야 함을 알 수 있다.

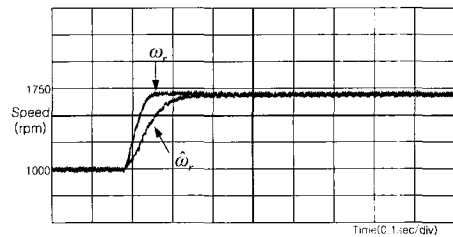


그림 8 저역통과필터의 사용에 의한 추정된 속도
 Fig. 8 Estimated speed in transient by use of the LPF.

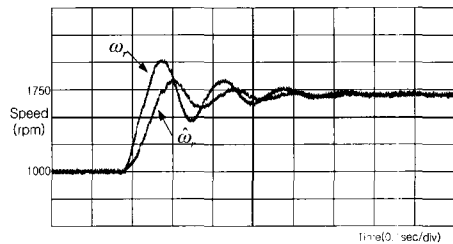


그림 9 그림 8과 같은 제어기 이득을 가진 속도센서가 없는 시스템의 속도응답 ($K_p = 0.1, K_i = 1.0$)
 Fig. 9 Speed response of speed sensorless system with the same controller gains of Fig.8

그림 10은 PI제어기 이득을 K_P 는 0.015, K_I 는 0.004로 감소시킨 경우의 결과이다. 속도응답의 진동이 제거되었음을 알 수 있다.

그림 11과 그림 12는 속도센서가 없는 시스템에서 부하토크에 의한 속도응답을 나타내고 있다. 속도지령은 1700[rpm]이고 부하토크는 5[Nm]를 인가하였다.

그림 11은 기존의 시스템의 속도응답파형이다. PI제어기 이득이 작으므로 부하토크의 영향을 크게 받아 언더슈트가 크고, 속도지령을 추종하는데 많은 시간(9초 이상)이 걸림을 알 수 있다.

그림 12는 제안한 방법을 사용한 경우의 결과이다. 언더슈트가 감소되었고, 속도지령추종이 매우 빨라짐(약 0.5초)을 알 수 있다.

그림 13과 14는 약계자영역에서 속도센서가 없는 시스템의 부하토크영향에 의한 속도응답특성을 나타내고 있다. 속도지령은 2500[rpm]이고 부하토크는 5[Nm]를 인가하였다. 제안한 방법에서 언더슈트가 감소되었고 빠른 속도응답특성을 가짐을 볼 수 있다.

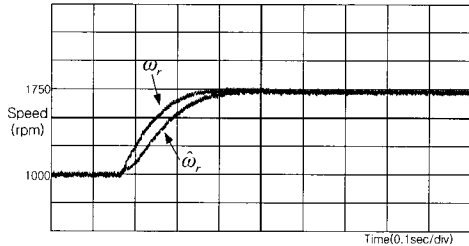


그림 10 속도센서가 없는 시스템의 속도응답 ($K_P = 0.015, K_I = 0.004$)
 Fig. 10 Speed response of speed sensorless system ($K_P = 0.015, K_I = 0.004$)

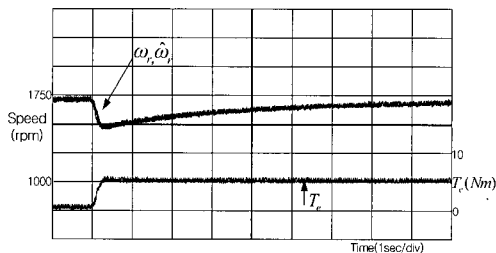


그림 11 전향보상을 하지 않은 속도센서가 없는 시스템의 속도응답
 Fig. 11 speed response of speed sensorless system without feedforward.

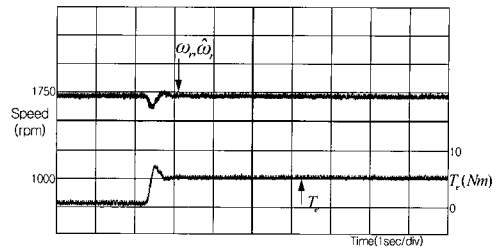


그림 12 전향보상을 한 속도센서가 없는 시스템의 속도응답
 Fig. 12 Speed response of speed sensorless system with feedforward

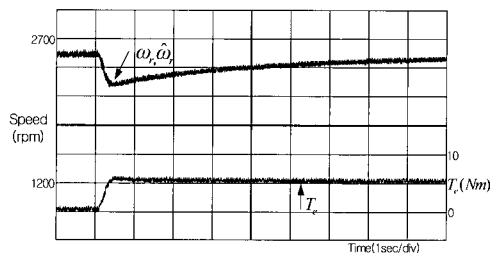


그림 13 약계자영역에서 전향보상을 하지 않은 속도센서리스 시스템의 속도응답
 Fig. 13 Speed response of speed sensorless system without feedforward (in the field weakening region)

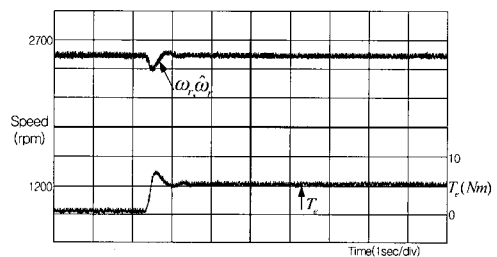


그림 14 약계자영역에서 전향보상을 한 속도센서리스 시스템의 속도응답
 Fig. 14 Speed response of speed sensorless system with feedforward (in the field weakening region)

7. 결 론

본 논문에서는 기존의 속도센서가 없는 유도전동기의 고정자자속 기준제어시스템에서 저역통과필터의 사용으로 과도기에 지연이 생기기 때문에 PI제어기 이득을 작게 해서 발생한 문제점을 고찰하였으며, 부하토크 관측기와 토크전향제어를 사용하여 부하토크에 강인한 속도응답특성을 가지는 속도제어기를 제안하였

다. 시뮬레이션과 실험결과, 제안한 속도제어기가 부하 토크의 영향에 강인한 속도응답특성을 가짐을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] 김남준, 현동석, "유도전동기 저속운전특성 개선을 위한 순시속도 및 기계관성모멘트 추정", 전력전자학회 논문지, 제1권, 제1호, pp. 12~19, 1996.
- [2] 이재왕, 김상훈, "관성능률 추정과 가속도 진향보상을 이용한 유도전동기의 속도제어 성능향상", 전력전자학회 논문지, 제6권, 제1호, pp. 90~97, 2001.
- [3] 서영수, 성대용, 임영배, "부하토크 피드포워드 제어를 이용한 유도전동기의 속도제어", 전력전자학회 논문지, 제3권, 제2호, pp. 99~106, 1998.
- [4] M. Iwasaki and N. Matsui, "Robust speed control of IM with torque feedforward control", IEEE Trans. on IE, vol. 40, pp. 553~560, Dec. 1993.
- [5] I. Awaya, Y. Kato, I. Miyake, and M. Ito, "New Motion Control with Inertia Identification Function Using Disturbance Observer", IEEE IECON '92, pp. 77~81, 1992.
- [6] L. Ben-Brahim and A. Kawamura, "A Fully Digitized Field-Oriented Controlled Induction Motor Drive Using Only Current Sensors", IEEE Trans. on IE, vol. 39, no. 3, pp. 241~249, 1992.
- [7] X. Xu, R. D. Doncker, and D.W. Novotny, "A Stator Flux Oriented Induction Machine Drive", IEEE PESC '88, pp. 870~876, 1988.
- [8] T.G. Habetler and D.M. Divan, "Control Strategies for Direct Torque Control Using Discrete Pulse Modulation", IEEE IAS '89, pp. 514~522, 1989.
- [9] M.H. Shin, D.S. Hyun, S.B. Cho, and S.Y. Choe, "An Improved Stator Flux Estimation for Speed Sensorless Stator Flux Orientation Control of Induction Motors", IEEE Trans. on PE, vol. 15, no. 2, pp. 312~318, 2000.



申明昊(申明昊)

1967년 11월 27일생. 1989년 한양대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1991년~1996년 삼성종합기술원 근무(선임연구원). 현재 서울산업대학교 전기공학과 전임강사.



玄東石(玄東石)

1950년 4월 8일생. 1973년 한양대 전기공학과 졸업. 1978년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1984년~1985년 미국 토레도대학 교환교수. 1988년~1989년 원한공과대학 교환교수. 현재 한양대 전자전

기컴퓨터공학과 교수. 당 학회 회장 역임.

저 자 소 개



金大一(金大一)

1974년 1월 7일생. 1999년 조선대 전기공학과 졸업. 2000년~현재 한양대 대학원 전기공학과 석사과정.