

유도전동기 센서리스 벡터제어를 위한 적응슬라이딩모드 제어기

김영춘¹, 조문택^{2*}, 주해종³

¹국립공주대학교 기계자동차공학부, ²대원대학교 전기전자계열, ³동국대학교 공과대학

Sensorless Vector Control for IM Adaptive Sliding Mode Controller

Young-Choon Kim¹, Moon-Taek Cho^{2*} and Hae-Jong Joo³

¹Machine Car Engineering, KongJu National University

²Electrical & Electronics Engineering, Daewon University College

³College of Engineering, Dongguk University

요약 본 논문은 슬라이딩 모드 관측기를 이용한 적응 속도 센서리스 벡터제어에 대해 제안한다. 적응 슬라이딩 모드 관측기는 전압식을 이용한 전동기 고정자 기준좌표에 의해 회전자 자속성분이 관측된다. Lyapunov 함수에 의해 얻어지는 추가적인 관계로부터 전동기의 속도가 구해진다. 성능 확인을 위해 전통적인 PI 제어기와 슬라이딩 모드 관측기의 추가적인 특성에 대해 시뮬레이션과 실험을 통해 비교하였다. 분석과 비교에 의한 결과에 의하면 시스템의 유용성을 확인할 수 있었다.

Abstract In this paper, using the adaptive sliding mode observer for speed sensorless vector control is proposed. Adaptive sliding mode observer of the motor stator coordinate system using the voltage equations of the rotor flux components are observed. Motor speed was obtained by the Lyapunov function is estimated by the relationship further. In order to establish such a control scheme based on the way conventional PI controller and sliding mode observer annexing characteristics of the system through simulation and experiment were compared. According to analysis by comparison with the usefulness of the system was confirmed.

Key Words : Adaptive Sliding Mode, Sensorless Vector, Layapunov Fuction, Observer

1. 서론

유도전동기 제어를 위한 적응 관측기에서 속도 등 알 수 없는 파라미터들은 적응제어 이론을 기초로 한 부가적인 방정식에 의해서 추정된다[1,2]. 이것은 안정성에 대한 분석적인 상태들을 알게 한다. 이러한 제안들 중에서 적응 슬라이딩 모드 관측기는 그것이 외란, 파라미터 미분, 그리고 시스템 노이즈에 강인하기 때문에 선호된다[3-5].

전동기의 파라미터가 온도에 비례하여 변동하거나, 실제 값과 다르게 나타날 때 추정된 자속과 속도는 실제 값에서 벗어나며, 이것들을 극복하기 위하여 파라미터의 변화와 제어입력이 불연속적으로 변화하는 비선형 제어의

특성과 슬라이딩 모드의 특성에 적응하는 적응제어 특성의 제어의 설계가 요구된다.

본 논문에서 적응 슬라이딩 모드 제어를 이용한 유도전동기의 센서리스 벡터제어 기법을 제시한다. 적응 슬라이딩 모드 제어기 설계를 위하여 극배치법을 이용하여 등가제어 시스템으로서의 초평면을 설계하고, 초평면 상태를 항상 구속시키기 위해서 비선형 입력인 적응 슬라이딩 모드 제어를 설계한다[6]. 또한 고주파 진동모드를 제어에 의해 여진하지 않도록 고주파수 영역의 입력이득에 저역필터를 추가하여 고주파진동을 억제한다. 적응 슬라이딩 모드 관측기는 전동기 전압방정식을 이용하여 2상 고정자 기준좌표에 의해 회전자 자속성분을 관측한다. 전동기 속도는 Lyapunov함수에 의해서 얻어진 추가적인 관

*교신저자 : 조문택(mtcho@mail.daewon.ac.kr)

접수일 11년 09월 25일

수정일 11년 10월 07일

게재확정일 11년 11월 01일

계에 의해서 추정된다[7]. 이와 같은 이론을 입증하기 위하여 기존의 PI제어기에 의한 방법과 적응슬라이딩 모드 관측기를 부가한 시스템의 특성을 시뮬레이션을 통해 비교, 분석하여 제안된 시스템의 유용성을 연구하였다.

2. 적응 슬라이드모드 관측기 설계

유도전동기 운전을 위한 적응 슬라이딩 모드 관측기는 회전자 자속 추정을 위한 슬라이딩 모드와 속도 추정 알고리즘의 두 부분으로 구성된다.

2.1 회전자 자속 슬라이딩 모드 관측기

적응 슬라이딩 모드 관측기의 슬라이딩 모드 제어를 위해 사용되는 변수는 전류와 자속이 된다. 유도전동기의 모델 방정식에 회전자 속도를 고려해서, 유도전동기의 고전자 좌표계에서 상태방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{x} = Ax + Bv_s \quad (1)$$

여기서, $x = [i_s \ \psi_r]^T$ 는 상태벡터, i_s, v_s, ψ_r 는 고정자 전류, 전압, 회전자 자속 벡터이고, 시스템 행렬은 다음과 같이 정의 한다.

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{11} = aI, \quad A_{12} = cI - dJ, \quad A_{21} = eI, \quad A_{22} = -\varepsilon A_{12},$$

$$B_1 = b_1$$

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$a = -\left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{M^2 \sigma_r}{\sigma L_s L_r}\right), \quad c = \frac{\sigma_r}{\varepsilon}, \quad d = \frac{\omega_r}{\varepsilon},$$

$$e = \sigma_r M$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma L_s L_r}{M}, \quad b_1 = \frac{1}{\sigma L_s}, \quad \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r},$$

$$\sigma_r = \frac{R_r}{L_r}$$

고정자 전류를 고려할 때 회전자 자속 추정을 위한 슬라이딩 모드 관측기는 다음과 같다.

$$\dot{\hat{x}} = \hat{A} \hat{x} + Bv_s + K \operatorname{sgn}(\hat{i}_s - i_s) \quad (2)$$

여기서, K 는 이득행렬이고, 다음과 같다.

$$K = \begin{bmatrix} -K_1 \\ -LK_1 \end{bmatrix}, \quad K_1 = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix}, \quad L = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} \\ l_{21} & l_{22} \end{bmatrix}$$

파라미터 변동을 고려한 오차 식은 다음과 같다.

$$\dot{\hat{x}} = Ae + \Delta A \hat{x} + K \operatorname{sgn}(\hat{i}_s - i_s) \quad (3)$$

여기서, $e = \hat{x} - x = [e_i \ e_\psi]^T$

$$e_i = \hat{i}_s - i_s$$

$$e_\psi = \hat{\psi}_r - \psi_r$$

$$\Delta A = \begin{bmatrix} \Delta A_{11} & \Delta A_{12} \\ \Delta A_{21} & \Delta A_{22} \end{bmatrix}$$

슬라이딩 모드(이득 K 가 충분히 크다), 오차 식은 다층처럼 간단하게 가정할 수 있다.

$$e_i = \dot{e}_i = 0 \quad (4)$$

식 (3)으로부터

$$0 = A_{12}e_\psi + \Delta A_{11}\hat{i}_s + \Delta A_{12}\hat{\psi}_r - z \quad (5)$$

$$\dot{e}_\psi = A_{22}e_\psi + \Delta A_{21}\hat{i}_s + \Delta A_{22}\hat{\psi}_r + Lz \quad (6)$$

여기서, $z = -K_1 \operatorname{sgn}(\hat{i}_s - i_s)$

식 (5), 식 (6)으로부터 슬라이딩모드 조건에서 회전자 자속에 대한 오차방정식은 다음과 같다.

$$\dot{e}_\psi = (A_{22} + LA_{12})e_\psi + (\Delta A_{21} + L\Delta A_{11})\hat{i}_s + (\Delta A_{22} + L\Delta A_{12})\hat{\psi}_r \quad (7)$$

속도정보는 알고 있다고 가정하고 다른 파라미터의 변동은 고려하지 않는다면 식 (7)로부터 슬라이딩 조건에서 회전자 자속 관측기의 오차방정식은 다음과 같다.

$$\dot{e}_\psi = (A_{22} + LA_{12})e_\psi \quad (8)$$

2.2 회전자 속도추정 알고리즘

파라미터의 변동으로서 회전자 속도를 고려하면, 행렬 ΔA 는 다음처럼 적용한다.

$$\Delta A_{11} = 0 \quad \Delta A_{12} = -\frac{\Delta \omega_r}{\varepsilon} J$$

$$\Delta A_{21} = 0 \quad \Delta A_{22} = \Delta \omega_r J$$

$$\Delta \omega_r = \widehat{\omega}_r - \omega_r$$

Lyapunov 함수를 다음과 같이 선택한다.

$$V = e_\psi^T e_\psi + W \quad (9)$$

여기서, 함수 W 는 Lyapunov 안정도 이론에 의하여 추정파라미터의 수렴을 확인하기 위하여 결정되어진다. Lyapunov 유사함수의 시간에 대한 미분은 다음처럼 표현할 수 있다.

$$\dot{V} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 \quad (10)$$

여기서,

$$\dot{V}_1 = z^T \Lambda^T A_{12}^{-1} z \quad (11)$$

$$\dot{V}_2 = z^T \Lambda^T A_{12}^{-1} \frac{\Delta \omega_r}{\varepsilon} \mathcal{J} \widehat{\psi}_r + \dot{W} \quad (12)$$

그리고 $\Lambda = L - \varepsilon I$.

식 (12)의 조건이 $-\infty$ 로 될 때 안정될 것이다.

만약 $\dot{V}_1 < 0$ 면 $\dot{V}_2 = 0$ 이다. $\dot{V}_1 < 0$ 조건은 안정되게 선택되어진다.

$$\Lambda^T = -\gamma A_{12}, \quad \gamma > 0 \quad (13)$$

이 가정에 대하여 조건 $\dot{V}_2 = 0$ 이 주면

$$\dot{W} = \gamma z^T \frac{\Delta \omega_r}{\varepsilon} \mathcal{J} \widehat{\psi}_r \quad (14)$$

식 (14)를 해석하면 W 는 다음처럼 선택된다.

$$W = \frac{\Delta \omega_r^2}{2\mu\varepsilon}, \quad \mu > 0 \quad (15)$$

식 (14)와 (15)의 비교에 의하여, 속도 추정에 관한 방정식은 다음처럼 얻어진다.

$$\widehat{\omega}_r = \mu\gamma [k_1 \text{sgn}(\widehat{i}_{s\alpha} - i_{s\alpha}) \cdot \widehat{\psi}_{r\beta} - k_2 \text{sgn}(\widehat{i}_{s\beta} - i_{s\beta}) \cdot \widehat{\psi}_{r\alpha}] \quad (16)$$

2.3 적응관측기의 설계

식(13)을 통해 행렬 L 에서 관측이득을 정하고, 회전자 속도 추정의 수렴이 확인된다. 조건을 정의하면 다음과 같다.

$$\Lambda^T \leq -\gamma A_{12}, \quad \gamma > 0 \quad (17)$$

$$L = -xI - yJ \quad (18)$$

식 (18)에서

$$x = (q-1)\varepsilon + \frac{\gamma\sigma_r}{\varepsilon} \quad (19)$$

$$y = \frac{\gamma\omega_r}{\varepsilon}$$

여기서, 식 (19)의 첫 번째 조건은 $q \geq 0$ 설계 파라미터에 관하여 표현된다.

속도는 관측 가능한 파라미터로 가정하고, 슬라이딩모드 조건의 오차 식은 식(20)에 의해 주어졌다

$$A_\psi = A_{22} + \Lambda A_{12} = -\alpha I + \beta J \quad (20)$$

$$-\alpha = -cx - dy - \sigma_r \quad (21)$$

$$\beta = dx - cy + \omega_r$$

그리고 페루프 오차 시스템의 고유치는

$$\lambda_{1,2} = -\alpha \pm j\beta \quad (22)$$

속도에 대한 수렴 조건은 도입할 때 식 (19), (21), (22)에 의하여 고유치를 얻는다.

$$\lambda_{1,2} = -q\left(\sigma_r + \frac{\gamma}{q} \frac{\sigma_r^2}{\varepsilon^2} + \frac{\gamma}{\varepsilon} \frac{\omega_r^2}{\varepsilon^2}\right) \pm j\omega_r \quad (23)$$

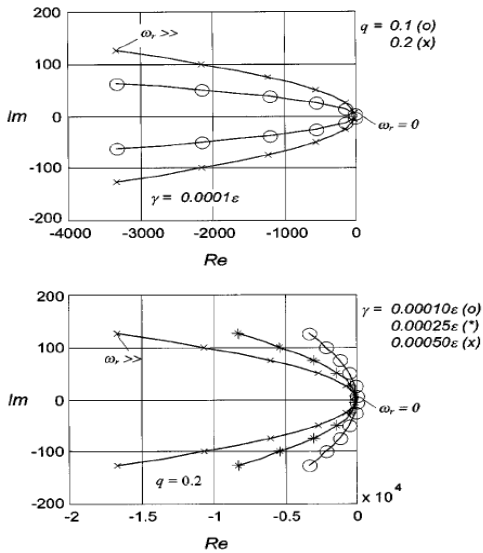
이 관계에서 적응 슬라이딩 모드 관측기는 대단히 안정함을 증명한다.

적응 관측기의 설계 파라미터는 식 (19)의 q, γ , 그리고 식 (16)의 μ 이다. q, γ , 는 회전자 자속 추정의 성능을 개선하기 위해 선택하고, μ 는 적응속도의 동적응답에 영향을 준다. 설계 파라미터 q, γ , 이 미치는 영향을 복소평면위에 고유치의 위치로 그림 1에 나타낸다.

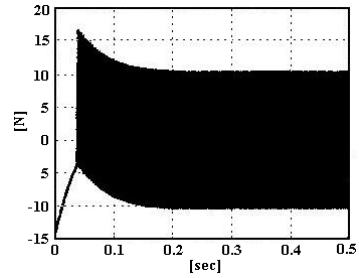
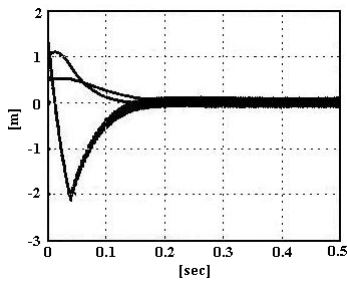
3. 제어기의 응답특성 및 시뮬레이션

슬라이딩모드 제어를 이용하여 임의의 초기치에서 원점에 수렴하는 조정기를 설계한 결과 그림 2에 보여지는 것과 같이 0.04초 부근에서 절환 함수가 0이 되는 것에서 슬라이딩모드가 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 제어 입력이 심하게 절환되어 제어입력의 채터링(chattering)이 발생하고 있는 것을 알 수 있다.

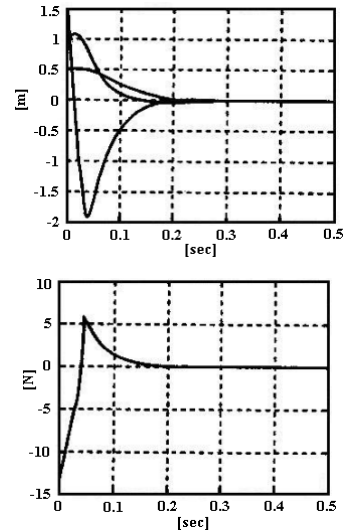
이것은 입력의 빠른 절환에 의해 제어대상을 모델화할 때 무시했던 고주파수 영역을 여진하고 spillover등의 발진의 원인이 될 가능성이 있다. 그래서 제어입력의 채터링 억제 대책으로 저역필터를 입력단에 추가한 초기치 응답을 그림 3에 나타내었다.



[그림 1] 페루프 오차시스템 회전자 자속의 고유치
[Fig. 1] Eigenvalue of close loop error system rotor flux



[그림 2] 최종 슬라이딩모드 제어에 의한 초기치 응답
[Fig. 2] Initial value response by final sliding mode Control



[그림 3] 최종 슬라이딩모드의 초기치 응답(채터링 억제대책이 있는 경우)
[Fig. 3] Initial value response by final sliding mode

그림 2에서 나타난 심한 채터링이 완전히 없어졌어도 선형제어처럼 되는 것을 알 수 있다. 그러나 절환함수를 보면 0이 되기 때문에 슬라이딩모드가 있는 것을 확인 할 수 있다.

4. 실험 및 고찰

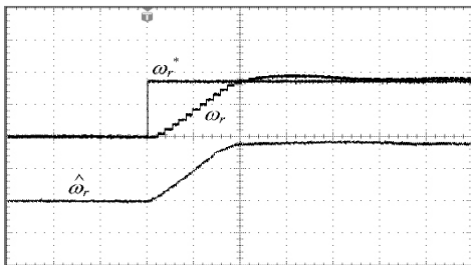
제안된 시스템은 파라미터 변동에 대하여 적응 슬라이딩-모드의 관측기의 강인함을 상세히 전체 거동을 증명하기 위하여 실험을 했다. 0(zero)에서 정격속도까지 전체범위에서 부하토크를 걸어두고 실험했다. 크기조정을 위하여 기준 값은 임의로 놓고 유도전동기의 파라미터는 표 1과 같다.

[표 1] 유도전동기 파라미터

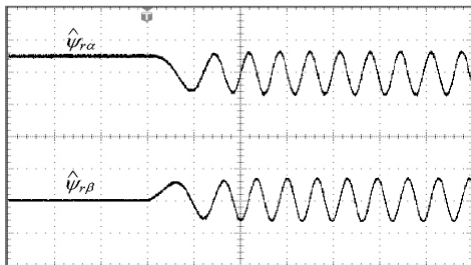
[Table 1] Induction motor parameters

구분	값
용량	0.3[kw]
전압, 전류	220[V], 12.9[A]
회전수	1720[rpm]
R_s	0.9210
R_r	0.5830
$L_s L_r$	0.0671
L_m	0.0650
J	0.0418
B	0.0045

그림 4와 그림 5는 슬라이딩 이득 $k_1 = k_2 = -0.04$ 속도적응 파라미터 $\mu\gamma = 0.086$, $q = 0.2$, $\gamma = 0.0001\epsilon$ 을 갖는 식 (16) 설계조건에 정합하는 행렬 L 의 관측기 이득을 갖는 시스템의 과도상태를 보여준다.



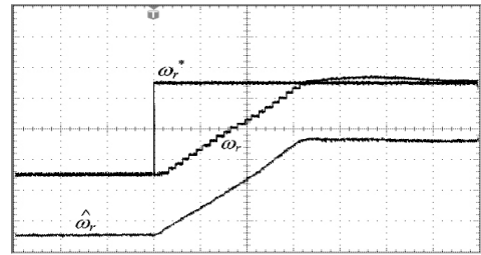
(a) 20[ms/div], 2[V/div], 1.75[V]



(b) 20[ms/div], 5[V/div], 2.5[V]

[그림 4] 0→0.7 단위 속도 과도현상(무부하)

[Fig. 4] 0→0.7 step speed transient(no load)

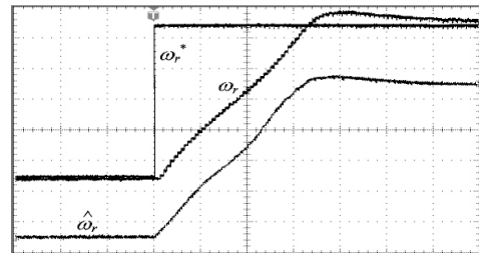


[그림 5] -0.6→0.6 단위 속도변환(무부하)
(20[ms/div], 2[V/div], 1.72[V])

[Fig. 5] -0.6→0.6 step speed conversion

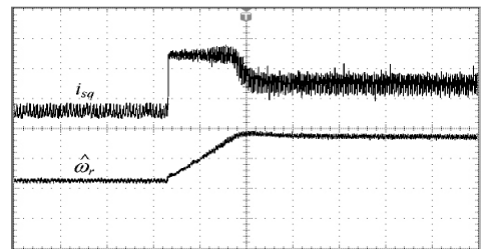
정지상태에 있는 추정치를 유지하기위한 성능과 과도상태 동안 추정하는 속도의 빠른 수렴을 확인할 수 있다. 전속도 동작 범위는 그림 6에 정격속도 전환에 의해 증명한 것처럼 이루어질 수 있다.

동적성능은 그림 7에 나타낸 것처럼 정격 부하토크가 공급될 때 좋은 성능을 보여준다.



[그림 6] -1→1 단위 속도변환(무부하)
(40[ms/div], 2.0[V/div], 1.76[V])

[Fig. 6] -1→1 step speed conversion



[그림 7] 0.1→0.7 단위 속도 과도현상(정격부하)
(200[ms/div], 2.0[V/div], 1.76[V])

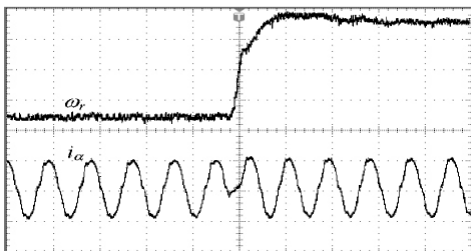
[Fig. 7] 0.1→0.7 step speed transient

저속도, 고 토크 동작시 ± 200 r/min(그림 8), ± 100 r/min과 ± 50 r/min(그림 9)에서 각각 정격부하에서 속도 변환에 의해 조사하였다. 관측기는 이런 임계동작 조건에서 추정된 것을 유지할 수 있고, 이때의 동

적 반응은 만족스럽다.

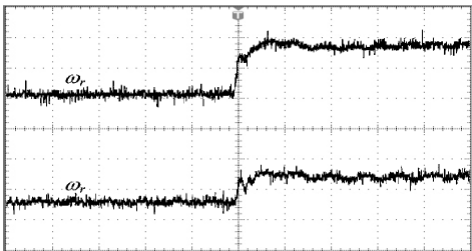
정상상태 동작에서 위상전류의 반응은 그림 8에 보여진다. 여기서 전류의 왜곡은 인버터 동작이 있는 즉, 속도에 상응하는 리플 때문에 생긴 것이다.

식 (19)에 의하여 파라미터 $\mu\gamma$ 는 속도적응의 속응성에 영향을 미치고, 반면에 너무 큰 값은 진동을 줄이지 못한다. 게다가 추정된 속도는 슬라이딩-모드에 의한 리플 때문에 더 영향을 받는다. 즉, 이런 파라미터는 요구조건에 맞게 적절히 선택하여 절충해야한다. 또한 파라미터 γ 는 속도추정에 영향을 준다.



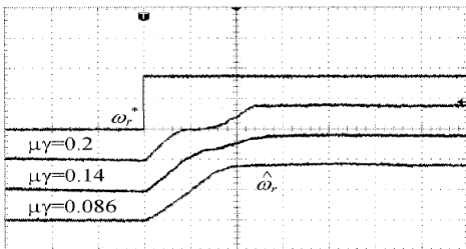
[그림 8] 위상전류와 실제속도(정격부하, ± 200 [r/min])
(20[ms/div], 200[mV/div], 5[V])

[Fig. 8] Phase current and real speed



[그림 9] 실제속도(± 100 [r/min], ± 50 [r/min])
(200[ms/div], 200[mV/div], 84.0[mV])

[Fig. 9] Real speed

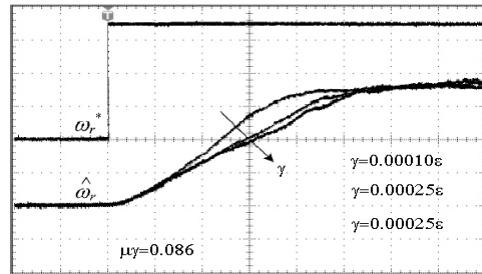


[그림 10] $\mu\gamma$ 의 다른 값에 대한 0→0.7 단위 속도 과도 현상(20[ms/div], 2.0[V/div], 1.76[V])

[Fig. 10] 0→0.7 step speed transient for other value of $\mu\gamma$

파라미터 $\mu\gamma$ 과 γ 의 영향은 과도상태 속도의 경우에 그림 10, 그림 11에서 고려 고찰된다.

그림 11에서 γ 는 페루프에 적용하는 자속 관측기의 고유치를 조절한다. 특히 γ 값이 크면 속도는 빠르지만 과도상태동안 속도추정과 자속 관측의 응답은 더 진동함을 알 수 있다.



[그림 11] γ 의 다른 값에 대한 0→0.7 단위 속도 과도현상(10[ms/div], 1.0[V/div])

[Fig. 11] 0→0.7 step speed transient for other value of γ

5. 결론

본 논문에서는 유도전동기의 속도 센서리스 벡터제어를 위한 적응 슬라이딩-모드 관측기를 나타냈고, 적응 관측기의 이득을 선택하기 위한 기준을 제안하였다. 속도센서가 없이 시스템을 구성하기 위하여 센서리스 벡터제어 이론을 적용하여 구현하였으며 제안한 방법을 5[HP] 유도전동기 시스템에 적용하여 시뮬레이션 및 실험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 속도센서 사용 시 속도정보의 변환에 의한 오차를 적응슬라이드 모드 관측기를 통해 추정함으로써 정확한 속도 정보를 얻을 수 있다.
2. 부하변동 등 외란으로 인한 오차 발생 시에도 적응슬라이드 모드 관측기가 정확한 속도 정보를 추정함을 확인하였다.

References

- [1] Satoshi Kadowaki, Kiyoshi Ohishi, "Re-adhesion Control of Electric Motor Coach Based on Disturbance Observer and Sensor-less Vector Control", PCC-Osaka 2002, pp.1020~1025, 2002.
- [2] Kazuaki Yuki, Takuma Hemmi, "Application of Speed Sensorless Control to Rail-way Traction Field",

PCC-Osaka 2002, pp.1033~1038, 2002.

- [3] Marko Hinkkanen, "Analysis and Design of Full-Order Flux Observer for Sensorless Induction Motors", IEEE 2002, pp.77~82, 2002.
- [4] Hou-Tsan Lee, Li-Chen Fu and Su-Hau Hsu, "Adaptive Speed/Position Control of Induction Motor with Unknown Load Torque", Proceedings of American Control Conference Anchorage, pp.4583~4588, 2002.
- [5] Wirote Sangtuntong, "An adaptive sliding -mode observer incorporating core loss", IEEE IAS pp.574~577, 2004
- [6] Jingchuan Li, "An adaptive sliding-mode observer for induction motor sensorless speed control", IEEE, pp.1329~1334, 2004
- [7] P. L. Jansen and R. D. Lorentz, "Trans- ducerless position and velocity estimation in induction and salient AC machines," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 31, pp. 240 - 247, Mar./Apr. 1995.

주 해 종(Hae-Jong Joo)

[정회원]



- 2008년 6월 : (美)Cumberland University(컴퓨터교육학박사)
- 2010년 2월 : 명지대학교 컴퓨터 공학과(공학박사)
- 1997년 3월 ~ 2005년 2월 : 대원대학 멀티미디어과 조교수
- 2010년 1월 ~ 현재 : 동국대학교 산학전담교수

<관심분야>

데이터엔지니어링, IT융합기술, 유비쿼터스 컴퓨팅

김 영 춘(Young-Choon Kim)

[정회원]



- 1989년 8월 : 명지대학교 전기공학(공학석사)
- 1997년 2월 : 명지대학교 전기공학(공학박사)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계자동차공학부 교수

<관심분야>

전기자동차전력변환, 전장제어, 하이브리드 자동차

조 문 택(Moong-Taek Cho)

[정회원]



- 1988년 2월 : 명지대학교 전기공학(공학사)
- 1990년 2월 : 명지대학교 전기공학(공학석사)
- 1999년 2월 : 명지대학교 전기공학(공학박사)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 대원대학교 전기전자계열 부교수

<관심분야>

신재생에너지, 시뮬레이션