

개선된 슬라이딩 모드 관측기에 의한 유도전동기의 센서리스 속도제어

論 文

57-9-10

Sensorless Speed Control of Induction Motor by an Improved Sliding Mode Observer

張 玟 英* · 金 相 均** · 權 營 顏†

(Min-Young Jang · Sang-Kyoon Kim · Young-Ahn Kwon)

Abstract - Recently, sensorless induction motor drives have been much studied due to several advantages. Sensorless drives eliminate the additional mounting space, increase the reliability in harsh environments, and reduce the cost of a motor. This paper investigates an improved sliding mode observer for the sensorless speed control of an induction motor. The proposed control strategy is the sliding mode observer with a variable boundary layer for a low-chattering and fast-response control. The proposed sensorless-algorithm is verified through the simulation and experimentation.

Key Words : Induction Motor, Sensorless Control, Sliding Mode Observer, Variable Boundary Layer

1. 서 론

유도전동기에 의한 가변속 구동시스템은 유도전동기가 가지는 범용성과 장점으로 여러 분야에서 널리 활용되고 있으며 최근에는 설치환경, 가격 등의 제약으로 인하여 위치 및 속도센서를 사용하지 않는 센서리스 속도제어가 많이 연구되고 있다. 유도전동기의 센서리스 제어 방식으로는 고정자 전압 및 전류를 측정하여 전동기 방정식으로부터 자속 및 속도를 추정하는 방식, 유도전동기의 두 모델, 예를 들어 고정자모델과 회전자모델에 의해 구한 추정치의 차이를 적응 메카니즘에 적용시킴으로써 속도를 추정하는 방식, 관측기에 의해 회전자자속을 추정하고 이를 이용하여 속도정보를 얻는 방식, 시스템이 잡음의 영향을 받을 경우에 최적의 필터링 알고리즘인 칼만 필터를 이용하는 방식, 가변구조 제어방식인 슬라이딩 모드 관측기에 의한 방식, 자속추정 없는 전류오차에 의한 방식, 기계적 구조에 의한 전압 및 전류 고조파를 분석하여 속도를 추정하는 방식, 자속 및 토크 직접제어를 활용한 방식 및 인공지능을 활용하는 제어 방식 등이 있다[1-5].

본 논문은 유도전동기의 여러 가지 센서리스 속도제어 방식 중 비교적 최근에 많은 연구가 이루어지는 슬라이딩 모드 관측기 방식의 개선에 관한 논문이다. 일반적으로 슬라이딩 모드 관측기는 수렴성이 빠르고, 시스템의 파라미터 변동과 외란에 강인하며 구현하기 쉽다는 장점을 가진다[6,7]. 그

러나 슬라이딩 모드 제어는 제어입력의 불연속성 때문에 정상상태에서 채터링을 유발하게 된다. 본 논문에서는 슬라이딩 함수에 경계층을 설정하여 경계내의 제어 입력을 연속 함수로 대체시키고, 속도에 따른 가변 경계층을 설정함으로써 넓은 속도범위에서 채터링을 감소하고 수렴성이 빠른 제어방식을 제안한다. 본 논문에서 제시된 유도전동기의 센서리스 제어방식은 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험을 수행하여 검증하였으며, 컴퓨터 시뮬레이션과 실험결과는 유사하므로 본 논문에서는 실험결과만을 제시한다.

2. 유도전동기의 수학적 모델

유도전동기에서 좌표변환에 의하여 2상 고정자 기준 좌표계 $\alpha s - \beta s$ 축으로 전압방정식을 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha s} \\ v_{\beta s} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 & pL_m & 0 \\ 0 & R_s + pL_s & 0 & pL_m \\ pL_m & \omega_r L_m & R_r + pL_r & \omega_r L_r \\ -\omega_r L_m & pL_m & -\omega_r L_r & R_r + L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \\ i_{\alpha r} \\ i_{\beta r} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\text{단, } \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$$

정지좌표계에서 고정자와 회전자의 쇄교자속은 다음과 같다.

$$\lambda_{\alpha s} = L_s i_{\alpha s} + L_m (i_{\alpha s} + i_{\alpha r}) = L_s i_{\alpha s} + L_m i_{\alpha r} \quad (2)$$

$$\lambda_{\beta s} = L_s i_{\beta s} + L_m (i_{\beta s} + i_{\beta r}) = L_s i_{\beta s} + L_m i_{\beta r} \quad (3)$$

$$\lambda_{\alpha r} = L_r i_{\alpha r} + L_m (i_{\alpha s} + i_{\alpha r}) = L_r i_{\alpha r} + L_m i_{\alpha s} \quad (4)$$

$$\lambda_{\beta r} = L_r i_{\beta r} + L_m (i_{\beta s} + i_{\beta r}) = L_r i_{\beta r} + L_m i_{\beta s} \quad (5)$$

* 正 會 員 : 釜 山 大 大 學 院 電 子 電 氣 工 學 科 碩 士

** 正 會 員 : 釜 山 大 大 學 院 電 子 電 氣 工 學 科 博 士

† 교신저자, 正會員 : 釜山大 工大 電子電氣工學部 教授 · 工博

E-mail : yakwon@pusan.ac.kr

接受日字 : 2008年 5月 16日

最終完了 : 2008年 8月 18日

3. 슬라이딩 모드 관측기에 의한 센서리스 제어

본 논문에서 유도전동기의 센서리스 제어방식으로서 개선된 슬라이딩 모드 관측기 방식을 제시한다. 일반적으로 슬라이딩 모드 관측기에 의한 센서리스 속도제어는 추정 전류와 측정전류의 오차를 이용하여 슬라이딩 함수를 구하고, 슬라이딩 함수를 치환하여 회전자자속을 추정하는 방식을 사용한다. 고정자 기준 좌표계에서 고정자전류 및 회전자자속을 상태변수로 하는 슬라이딩 모드 관측기의 상태방정식은 식 (1)-(5)로부터 다음과 같다[8-10].

$$\frac{d\hat{x}}{dt} = A\hat{x} + Bv_s + Ku(i_s - \hat{i}_s) \quad (6)$$

단, $\hat{\cdot}$: 추정치, K : 스위칭 이득, u : 스위칭 함수

$$x = \begin{bmatrix} i_s \\ \lambda_r \end{bmatrix}, \quad i_s = \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \end{bmatrix}, \quad \lambda_r = \begin{bmatrix} \lambda_{\alpha r} \\ \lambda_{\beta r} \end{bmatrix}, \quad v_s = \begin{bmatrix} v_{\alpha s} \\ v_{\beta s} \end{bmatrix},$$

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_{11} = -[R_s/(\sigma L_s) + (1-\sigma)/(\sigma \tau_r)]I,$$

$$A_{12} = L_m/(\sigma L_s L_r)[(1/\tau_r)I - \omega_r J],$$

$$A_{21} = (L_m/\tau_r)I, \quad A_{22} = -(1/\tau_r)I + \omega_r J,$$

$$B_1 = 1/(\sigma L_s)I, \quad \sigma = 1 - L_m^2/(L_s L_r), \quad \tau_r = L_r/R_r.$$

식(6)에서 슬라이딩 관측기는 속응성이 빠르고, 시스템의 파라미터 변동과 외란에 강인한 장점을 가진다. 그러나 슬라이딩 모드 제어는 제어입력의 불연속성 때문에 정상상태에서 채터링을 유발하게 된다. 본 논문에서는 슬라이딩 함수에 경계층을 설정하여 경계층 내의 제어 입력을 연속 함수로 대체시키고, 속도에 따른 가변 경계층을 설정함으로써 넓은 속도범위에서 채터링을 감소하고 속응성이 빠른 제어방식을 제안한다. 그림 1은 제안한 슬라이딩 모드 관측기의 가변 경계층을 나타낸다.

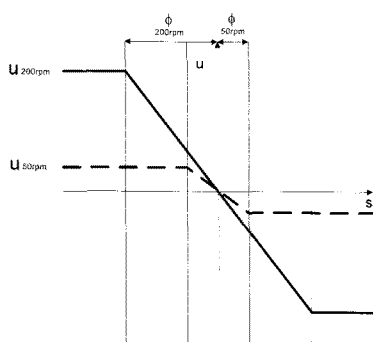


그림 1 가변 경계층을 가지는 제어 입력
Fig. 1 Control input with a variable boundary layer

식(6)에서 구한 전류 및 자속으로부터 회전자 속도는 다음과 같이 추정한다.

$$\hat{\omega}_r = K_p [k_1 \text{sgn}(\hat{i}_{\alpha s} - i_{\alpha s}) \hat{\lambda}_{\beta r} - k_2 \text{sgn}(\hat{i}_{\beta s} - i_{\beta s}) \hat{\lambda}_{\alpha r}] + K_i \int [k_1 \text{sgn}(\hat{i}_{\alpha s} - i_{\alpha s}) \hat{\lambda}_{\beta r} - k_2 \text{sgn}(\hat{i}_{\beta s} - i_{\beta s}) \hat{\lambda}_{\alpha r}] dt \quad (7)$$

이상에서 제시한 센서리스 속도제어 시스템의 전체 구성도는 그림 2와 같다.

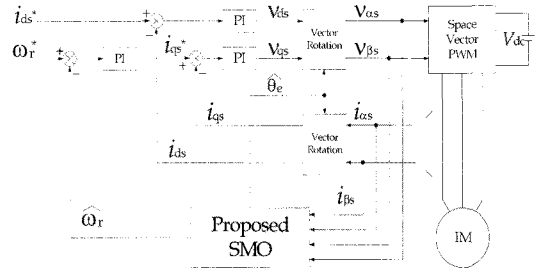


그림 2 전체시스템 구성도
Fig. 2 Configuration of overall system

4. 실험결과 및 검토

본 논문에서 제시한 센서리스 속도제어방식의 타당성을 검증하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다. 시뮬레이션과 실험결과는 유사하게 구해졌으며 본 논문에서는 실험결과만을 제시한다. 본 실험에 사용된 유도전동기는 국내에서 생산되는 일반용 유도전동기로서 3상 농형이며 사양은 표 1과 같다. 전체 알고리즘의 디지털 처리를 위해서 마이크로프로세서 시스템을 이용하였으며 샘플링주기는 200 μ sec이다.

표 1 전동기 사양
Table 1 Motor specification

정격출력	3hp	R_r	1.5 Ω
정격전압	220V	L_s	245mH
극수	4	L_r	247mH
R_s	2.7 Ω	L_m	236mH

그림 3과 그림 4는 본 논문에서 제시한 센서리스 제어방식에 의해 무부하에서 속도지령치를 각각 20rpm, 800rpm으로 한 경우의 속도응답 실험결과이다. 결과에서 나타난 바와 같이 저속과 고속에서 양호한 속도응답을 나타내고 있다.

그림 5와 그림 6은 유도전동기 회전자 저항의 변동을 고려한 경우로서 종래의 슬라이딩 모드 관측기와 비교를 위하여 각각 실험을 수행하였다. 각각의 모델에서 회전자 저항을 공칭 값보다 30% 증가하여 200rpm으로 운전 중에 6Nm의 부하를 변동하였을 때의 속도 응답을 나타낸다.

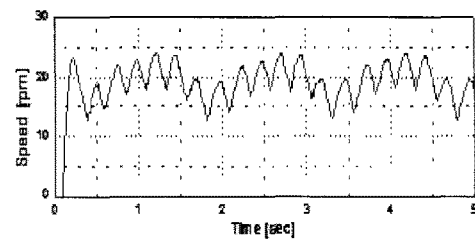


그림 3 속도지령치 20rpm에서 속도응답 실험결과
Fig. 3 Experimental speed response in the speed command 20rpm

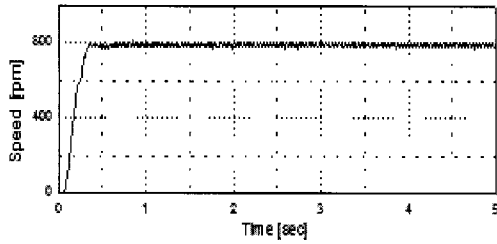


그림 4 속도지령치 800rpm에서 속도응답 실험결과
 Fig. 4 Experimental speed response in the speed command 800rpm

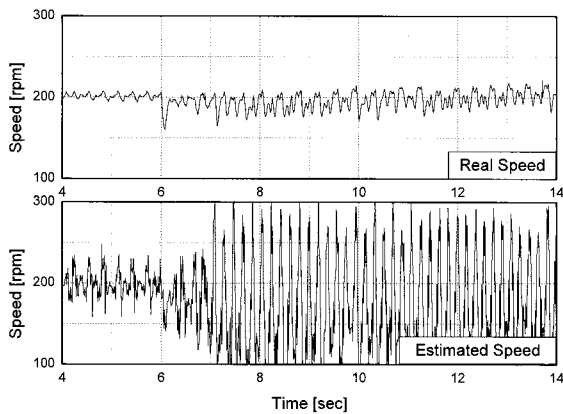


그림 5 종래의 슬라이딩 모드 관측기에서 회전자저항 변동 속도응답 실험결과 ($\hat{R}_r = 1.3R_r$, $0 \rightarrow 6Nm$, 200rpm)
 Fig. 5 Experimental speed responses in the rotor resistance variation of the conventional sliding mode observer ($\hat{R}_r = 1.3R_r$, $0 \rightarrow 6Nm$, 200rpm)

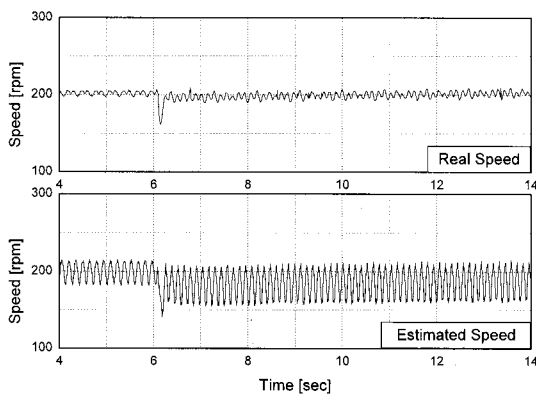


그림 6 제안한 슬라이딩 모드 관측기에서 회전자저항 변동 속도응답 실험결과 ($\hat{R}_r = 1.3R_r$, $0 \rightarrow 6Nm$, 200rpm)
 Fig. 6 Experimental speed responses in the rotor resistance variation of the proposed sliding mode observer ($\hat{R}_r = 1.3R_r$, $0 \rightarrow 6Nm$, 200rpm)

그림 5와 그림 6의 실험결과에서 보면 본 논문에서 제시한 방식은 파라미터 변동에 강인한 속도응답을 나타내고 있으며 정상상태에서 종래의 방식보다 채터링이 훨씬 감소함을 나타내고 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 유도전동기의 센서리스 제어방식으로서 개선된 슬라이딩 모드 관측기를 제안하였다. 슬라이딩 모드 관측기는 추정전류와 측정전류의 오차를 이용하여 슬라이딩 함수를 구하고, 슬라이딩 함수는 치환되어 회전자속을 추정하는데 이용한다. 본 논문에서 개선한 슬라이딩 모드 제어는 빠른 응답 특성과 채터링 저감을 위하여 슬라이딩 모드 관측기에 가변 경계층을 사용하였다. 제안한 센서리스 제어 방식을 시뮬레이션 및 실험을 통하여 검증한 결과, 저속 및 고속 운전에서 양호한 속도응답을 나타내었으며, 회전자저항 변동을 고려한 경우에 강인한 속도응답 및 정상상태에서 채터링이 훨씬 감소함을 나타내었다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의해 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] K. Rajashekara, A. Kawamura and K. Matsuse, *Sensorless Control of AC Motor Drives*, IEEE Press, 1996.
- [2] J. Holtz, "Sensorless control of induction motor drives", Proc. IEEE, Vol.90, No.8, pp. 1359-1394, 2002.
- [3] P. Vas, *Sensorless Vector and Direct Torque Control*, Oxford Univ. Press, 1998.
- [4] Y. A. Kwon and S. H. Kim, "New scheme for speed-sensorless control of induction motor," IEEE Trans. Ind. Electr., vol.51, pp.545-550, June 2004.
- [5] Z. Yan and V. Utkin, "Sliding mode observers for electric machines- an overview," IEEE Proc IECON, pp.1842-1847, 2002.
- [6] J. J. Slotine, "Sliding Controller Design for Nonlinear Systems," Int. J. Contr., Vol. 40, No. 2, pp.421-434, 1984.
- [7] A. Utkin, J. Guldner and J. Shi, *Sliding Mode Control In Electromechanical Systems*, Taylor & Francis, 1999.
- [8] F. Parasiliti, R. Petrella, and M. Tursini, "M Adaptive sliding mode observer for speed sensorless control of induction motors," IEEE IAS Annual Meeting, pp.2277- 2283, 1999.
- [9] J. Li, L. Xu, and Z. Zhang, "An adaptive sliding mode observer for induction motor sensorless speed control," IEEE IAS Annual Meeting, pp.1329-1334, 2004.
- [10] M. Y. Jang, B. S. Jang, J. I. Jeong, Y. H. Park and Y. A. Kwon, "Speed sensorless control of induction motor using sliding mode observer with variable boundary layer", SICE Annual Conf, 2008(to be presented).