

슬라이딩모드 제어를 이용한 전동차의 슬립제어

김은기*, 김영춘**, 조문택***, 주해종****, 이의수****, 최혜길****, 송호빈*****
한국수자원공사*, 공주대학교**, 대원대학***, 동국대학교****, 경희사이버대학교****, (주)휴스컴*****

Using Sliding Mode Controller Slip Control of the Train

Eun-Gi Kim*, Young-Chun Kim**, Moon-Tack Cho***, Hae-Jong Joo****, Euy-Soo Lee****, Hae-Gil Choi****, Ho-Bin Song*****
K-water*, Kongju National Univ.**, DaeWon Univ. College***, DongGuk Univ.****, KyungHee Cyber Univ.****, Uscom CO.*****

Abstract - In this paper, adaptive speed sensorless vector control, sliding mode observer to be present. Adaptive sliding mode observer of the motor stator coordinate system using the voltage equations of the rotor flux components are observed. Lyapunov function of the induction motor speed 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. Analyzed and compared according to the results presented confirmed the usefulness of the system.

1. 서 론

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

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. 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 Lyapunov 함수에 의해서 얻어진 추가적인 관계에 의해서 추정된다. 이와 같은 이론을 입증하기 위하여 기존의 PI제어기에 의한 방법과 적응슬라이딩 모드 관측기를 부가한 시스템의 특성을 시뮬레이션을 통해 비교, 분석하여 제안된 시스템의 유용성을 연구하였다.

2. 본 론

2.1 적응 슬라이딩모드 관측기 설계

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

2.1.1 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 고정자 좌표계에서 상태방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{x} = Ax + Bv_s \quad (2-1)$$

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

다.

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

$$A_{11} = aI, \quad A_{12} = cI - dJ, \quad A_{21} = eI, \quad A_{22} = -\varepsilon A_{12}, \quad B_1 = b_1$$

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

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

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

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

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

여기서, K 는 이득행렬이고, 정리하면 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.

$$\dot{\hat{x}} = Ae + \Delta A \hat{x} + K \operatorname{sgn}(\hat{i}_s - i_s) \quad (2-3)$$

여기서,

$$e = \hat{x} - x = [e_i \ e_\psi]^T, \quad e_i = \hat{i}_s - i_s, \quad e_\psi = \hat{\psi}_r - \psi_r$$

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

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

$$e_i = e_i = 0 \quad (2-4)$$

식 (2-3)로부터

$$0 = A_{12}e_\psi + \Delta A_{11}\hat{i}_s + \Delta A_{12}\hat{\psi}_r - z \quad (2-5)$$

$$\dot{e}_\psi = A_{22}e_\psi + \Delta A_{21}\hat{i}_s + \Delta A_{22}\hat{\psi}_r + Lz \quad (2-6)$$

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

식 (2-5), 식 (2-6)로부터 슬라이딩모드 조건에서 회전자 자속에 대한 오차방정식은 다음과 같다.

$$\dot{e}_\psi = (A_{22} + LA_{12})e_\psi + (\Delta A_{21} + L\Delta A_{11})\hat{i}_s + (\Delta A_{22} + L\Delta A_{12})\hat{\psi}_r \quad (2-7)$$

속도정보는 알고 있다고 가정하고 다른 파라미터의 변동은 고려하지 않는다면 식 (2-7)으로부터 슬라이딩 조건에서 회전자 자속 관측기의 오차방정식은 다음과 같다.

$$e_\psi = (A_{22} + LA_{12})e_\psi \quad (2-8)$$

2.1.2 회전자 속도추정 알고리즘

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

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

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

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

Lyapunov 함수를 다음과 같이 선택한다.

$$V = e_\psi^T e_\psi + W \quad (2-9)$$

여기서, 함수 W 는 Lyapunov 안정도 이론에 의하여 추정파라미터의 수렴을 확인하기 위하여 결정되어진다.

Lyapunov 유사함수의 시간에 대한 미분은 다음처럼 표현할 수 있다.

$$\dot{V} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 \quad (2-10)$$

여기서,

$$\dot{V}_1 = z^T A^T A_{12}^{-1} z \quad (2-11)$$

$$\dot{V}_2 = z^T A^T A_{12}^{-1} \frac{\Delta\omega_r}{\varepsilon} J \widehat{\psi}_r + \dot{W} \quad (2-12)$$

그리고 $A = L - \varepsilon I$.

식 (2-12)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 선택 되어진다.

$$A^T = -\gamma A_{12}, \quad \gamma > 0 \quad (2-13)$$

이 가정에 대하여 조건 $\dot{V}_2 = 0$ 이 주면

$$\dot{W} = \gamma z^T \frac{\Delta\omega_r}{\varepsilon} J \widehat{\psi}_r \quad (2-14)$$

식 (2-14)의 해석하면 함수 W는 다음처럼 선택된다.

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

식 (2-14)과 (2-15)의 비교에 의하여, 속도 추정에 관한 방정식은 다음처럼 얻어진다.

$$\dot{\omega}_r = \mu\gamma [k_1 \text{sgn}(i_{s\alpha} - i_{s\alpha}) \cdot \widehat{\psi}_{r\beta} - k_2 \text{sgn}(i_{s\beta} - i_{s\beta}) \cdot \widehat{\psi}_{r\alpha}] \quad (2-16)$$

2.1.3 적응관측기의 설계

식(2-13)을 통해 행렬 L에서 관측이득을 정하고, 회전자 속도 추정의 수렴이 확인된다.

조건을 정의하면 다음과 같다.

$$A^T \leq -\gamma A_{12}, \quad \gamma > 0 \quad (2-17)$$

$$L = -xI - yJ \quad (2-18)$$

대하여,

$$x = (q-1)\varepsilon + \frac{\gamma\sigma_r}{\varepsilon} \quad (2-19)$$

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

여기서, 식 (2-19)의 첫 번째 조건은 $q \geq 0$ 설계 파라미터에 관하여 표현된다.

속도는 관측 가능한 파라미터로 가정하고, 슬라이딩모드 조건 의 오차 식은 식(2-20)에 의해 주어졌다

$$A_\psi = A_{22} + LA_{12} = -\alpha I + \beta J \quad (2-20)$$

$$-\alpha = -cx - dy - \sigma_r \quad (2-21)$$

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

그리고 페루프 오차 시스템의 고유치는

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

속도에 대한 수렴 조건은 도입할 때 식 (2-19),

(2-21), (2-22)에 의하여 고유치를 얻는다.

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

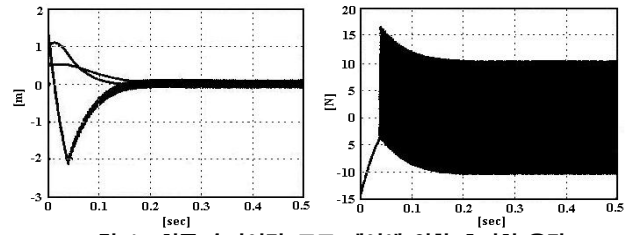
이 관계에서 적응 슬라이딩 모드 관측기는 대단히 안정함을 증명한다.

적응 관측기의 설계 파라미터는 식 (2-19)의 q, γ , 그리고 식 (2-16)의 μ 이다. q, γ , 는 회전자 자속 추정의 성능을 개선하기 위해 선택하고, μ 는 적응속도의 동적응답에 영향을 준다.

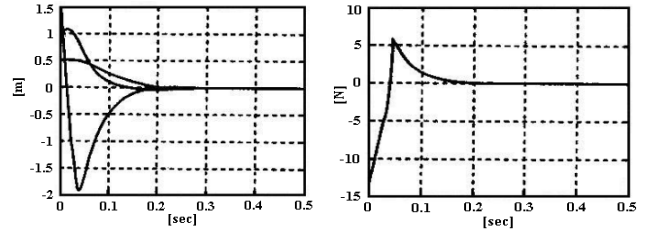
3. 시뮬레이션

슬라이딩모드 제어를 이용하여 임의의 초기치에서 원점에 수렴하는 조정기를 설계한 결과 <그림 1>에 보여지는 것과 같이 0.04초 부근에서 절환 함수가 0이 되는 것에서 슬라이딩모드가 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 제어입력이 심하게 절환되어 제어입력의 채터링(chattering)이 발생하고 있는 것을 알 수 있다.

이것은 입력의 빠른 절환에 의해 제어대상을 모델화 할 때 무시했던 고주파수 영역을 여진하고 spillover등의 발진의 원인이 될 가능성이 있다. 그래서 제어입력의 채터링 억제 대책으로 저역필터를 입력단에 추가한 초기치 응답을 <그림 2>에 나타내었다. <그림 1>에서 나타난 심한 채터링이 완전히 없어졌어도 선형제어 처럼 되는 것을 알 수 있다.



<그림 1> 최종 슬라이딩-모드 제어에 의한 초기치 응답



<그림 2> 최종 슬라이딩모드의 초기치 응답 (채터링 억제대책이 있는 경우)

5. 결 론

본 논문에서는 유도전동기의 속도 센서리스 백터제어를 위한 적응 슬라이딩-모드 관측기를 나타냈고, 적응 관측기의 이득을 선택하기 위한 기준을 제안하였다. 속도센서가 없이 시스템을 구성하기 위하여 센서리스 백터제어 이론을 적용하여 구현하였으며 제안한 방법을 5[Hp] 유도전동기 시스템에 적용하여 시뮬레이션 및 실험을 통해 센서리스 백터제어를 적용함으로써 시스템의 가격을 낮출 수 있고, 속도센서에 의한 속도 오차를 줄일 수 있다. 또한, 외란, 파라미터 미분 그리고 시스템 노이즈 해결의 유효함을 확인하였고, 이 방법은 전동기 파라미터의 변화에 대하여 강인하다는 것이 주요 특징으로서 나타났다.

[참 고 문 헌]

- [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 Railway 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] Wirrote Sangtungtong, "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, "Transducerless position and velocity estimation in induction and salient AC machines," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 31, pp. 240 - 247, Mar./Apr. 1995.