유도전동기 속도제어를 위한 개선된 근사 슬라이딩 모드 제어기

°차정화, 김상우, 김준환, 문학룡, 전희종
숭실대학교 전기공학과

Novel Quasi-Sliding Mode Speed Controller for Induction Motor

°Jung-Hwa Cha, Sang-Woo Kim, Jun-Hwan Kim, Hak-Yong Moon, Hee-Jong Jeon
Dept. of Electrical Eng., SoongSil University

Abstract - In this paper, a quasi-sliding mode (QSM) control with load observer is discussed for field-oriented induction motor speed drive. The proposed QSM control, which is defined in the discrete time domain and act with the load torque observer eliminating impacted load torque, restricts the bound of chattering within specified band. With this strategy, we can obtain fast dynamics without overshoot and robustness to parameter variation and disturbance. The proposed scheme is verified by digital simulation

1. 서 론

현재까지, 슬라이딩 모드(Sliding Mode, SM) 제어는 강인한 제어 시스템 설계하는 유력한 제어이론이고 괄목할 만한 성과들이 보고되고 있다[1]. 또한 이산시간 영역에서의 SM 제어에 대해서도 연구가 되어왔으나 연속시간 영역에서의 성과에 비하여 많은 연구가 이루어지지 못하였다[2]-[4]. 현재는 상대적으로 긴 샘플링 주기를 가지는 디지털 프로세서에 의해서 시스템이 구현되는 추세이므로 기존에 연구되어오던 SM 제어 역시 이산영역에서 설계되어질 필요가 있다. 그러나 근사 슬라이딩 모드(Qusi-Sliding Mode, QSM), 즉 이산시간 영역에서의 슬라이딩 모드는 기존의 SM 조건을 단순히 이산시간 영역으로 등가 전환하는 것으로는 얻을 수 없다. [2]와 [3]에서는 이산시간 영역으로 기존의 SM 제어를 전환하였지만 도달조건만을 만족시킬 뿐 슬라이딩 평면 근처에서의 QSM 현상을 정확히 정의하지 못하였다. [4]에서는 이러한 문제점에 대하여 새롭게 QSM의 성질과 근사 슬라이딩 모드 밴드(QSMB)를 정의하였으나 이론적인 고찰에 머물렀을 뿐 현실적인 적용을 고려할 때 매우 지켜지기 어려운 조건을 제시하였다.

본 연구에서는 실제 시스템에 적용될 수 있는 현실성을 고려하여 QSM의 정의를 수정하였으며 이에 의한 QSM 제어기를 설계하고 이를 유도전동기 속도 제어 시스템에 적용하였다. 일반적으로 슬라이딩 모드 제어 시에는 채터링이 문제되며 본 연구에서는 슬라이딩 모드 부하관측기를 부가하여 QSM 제어기의 출력에 더해지도록 구성함으로써 부하 토오크를 상쇄하고 전체적인 채터링의 크기를 줄일 수 있다.

제안한 QSM 속도 제어기는 개선된 QSM의 성질을 만족시키며, 채터링의 크기를 QSMB 안으로 제한한다. 또한 파라미터 변동과 외란에 강인하고 오버슈트 없이 빠르게 지령치를 추종한다. 본 기법의 효용성은 시뮬레이션을 통하여 검증한다.

2. 본 론

비선형 다변수 시스템인 유도전동기를 선형적으로 만들고 직류전동기와 유사하게 제어하는 벡터제어가 내부루프에서 원활히 제어되고 있다고 가정하면, 유도전동기 상태방정식은 선형적으로 변환되며 토오크식은 다음과 같이 근사화되어 직류전동기와 유사하게 토오크를 제어할 수 있게된다.

$$T_e = K_t i_{qs} \tag{1}$$

여기서 K_t는 토오크 상수이며 i_{qs}는 q축 고정자 전류를 나타낸다. 기계적 운동방정식은 식(2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$J\frac{d}{dt}\omega_m + B\omega_m + T_L = T_e \tag{2}$$

식(2)에서 ω_m은 회전자의 기계적 각속도, T_L은 외부 부하 토오크, B는 점성 마찰력, J는 회전자의 관성 모멘트를 나타낸다.

2.1 부하 관측기를 가지는 근사 슬라이딩 모드 속도 제어기의 설계

디지털 프로세서로 구현되는 실제 시스템과 스위칭 소자의 주파수 한계를 고려할 때, 이산시간 영역에서 슬라이딩 모드 제어를 다루는 것이 바람직하다. QSM를 정의하는데 있어 현실적으로 가장 크게 고려되어야 할 지점은 채터링 크기에 대한 문제이므

로 이를 기준으로 하여 다음과 같이 QSM의 제 성질을 정의 한다.

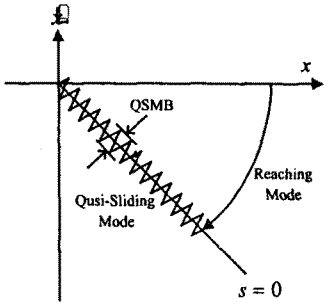

그림 1. 근사 슬라이딩 모드

▮A1: 상태궤적은 임의의 초기상태에서 출발하여 유한한 시간 안에 그 평면을 가로지른다.

▮A2: 상태궤적은 외란이 허용하는 범위 내에 존재한다면 샘플링 주기 마다 거듭 그 평면을 가로지른다.

▮A3: 각 지그재그 스텝은 근사 슬라이딩 모드 밴드(QSMB) 안에 머물러 있는다($-\Delta < s(k) < \Delta$).

본 연구에서는 채터링 크기를 고려하여 부하 토오크는 슬라이딩 모드 부하관측기에서 관측하여 전향 보상하는 방식을 취하다. 따라서 A2의 허용하는 범위 내의 외란에는 부하관측기의 관측 오차를 제외한 나머지의 미소한 외란과 파라미터 변분 등이 포함된다.

식(2)로부터 오차 동적방정식을 유도하면 식(3)이 된다.

$$\frac{d}{dt}x = -\frac{B}{J}x - \frac{B}{J}\omega_m^* - \frac{1}{J}T_L + \frac{K_t}{J}i_{qs} \tag{3}$$

여기서 외란을 입력채널로 환원시키면 다음 식과 같이 된다.

$$\frac{d}{dt}x = -\frac{B}{J}x + \frac{K_t}{J}\left(i_{qs} - \frac{B}{K_t}\omega_m^* - \frac{T_L}{K_t}\right) \tag{4}$$

식(4)를 이산 시스템으로 표현하면 다음과 같다.

$$x(k+1) = ax(k) + b\left(i_{qs}^*(k) - \omega_m^*\frac{B}{K_t} - \frac{T_L}{K_t}\right) \tag{5}$$

단,

$$a = e^{-(B/J)T_s}$$
$$b = \left(\int_0^{T_s} e^{-(B/J)\tau}d\tau\right)\frac{K_t}{J}$$

먼저, 다음과 같이 지령치와 실제값 사이의 오차를 스위칭 함수로 정의한다.

$$s(k) = x(k) = \omega_m(k) - \omega_m^*(k) \tag{6}$$

제어입력을 구하기 위하여 여러 가지 방식이 제안되고 있으나 본 연구에서는 도달조건이 자연스럽게 만족되는 도달법칙방법[4]을 이용한다. 따라서 스위칭 함수가 다음의 식을 만족하도록 제어입력을 주어야 한다.

$$s(k+1) - s(k) = -qT_s s(k) - \varepsilon T_s \mathrm{sgn}[s(k)] \tag{7}$$

여기서 q와 ε는 제어 상수이며 T_s는 샘플링 주기를 나타낸다. 식(5)와 (6)을 (7)에 대입하여 정리하면 다음의 식(8)과 같다.

$$ax(k) + b\left(i_{qs}^*(k) - \omega_m^*\frac{B}{K_t} - \frac{T_L}{K_t}\right) - x(k) = -qT_s s(k) - \varepsilon T_s \mathrm{sgn}[s(k)] \tag{8}$$

이를 i_{qs}^*에 대하여 정리하면 다음과 같은 제어입력을 얻을 수 있다.

$$i_{qs}^* = -\frac{1}{b}\{ ax(k) - (1-qT_s)s(k) + \varepsilon T_s \mathrm{sgn}[s(k)] + f\} + \omega_m^*\frac{B}{K_t} + \hat{T}_L/K_t \tag{9}$$

여기서 f는 허용하는 범위의 외란을 나타내며 $\hat{T}_L$은 다음과 같은 슬라이딩 모드 부하관측기에 의해서 구해진다.

$$\hat{\omega}_m = -\frac{B}{J}\hat{\omega}_m - \frac{1}{J}\hat{T}_L + K_t i_{qs} + K_1 \mathrm{sgn}(s)$$
$$\hat{T}_L = K_2 \mathrm{sgn}(s) \tag{10}$$

제안한 제어입력이 슬라이딩 평면 근처에서 A2의 성질을 만족시키기 위해서는 식(11)이 성립해야 한다.

$$\mathrm{sgn}[s(k+2)] = -\mathrm{sgn}[s(k+1)] = \mathrm{sgn}[s(k)] \tag{11}$$

식(5)와 (6)을 (11)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 부등식을 얻으며 이는 A2의 성질을 만족시킨다.

$$|f| < \frac{qT_s\varepsilon T_s}{2(1-qT_s)} \tag{12}$$

또한 QSMB는 다음과 같이 구해진다.

$$\Delta < \frac{\varepsilon T_s}{1-qT_s} \tag{13}$$

그림2에 제안된 QSM 속도제어기의 블록도가 나타나 있다.

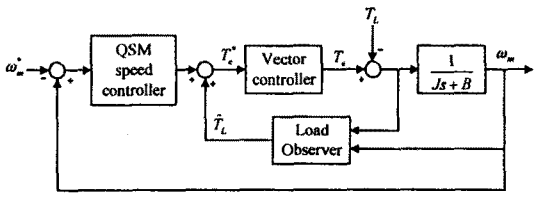

그림 2. 제안된 유도전동기 속도제어 모델

2.2 컴퓨터 시뮬레이션

본 연구에서는 제안된 제어기의 유효성을 검증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 내부의 벡터제어기의 샘플링 주기는 100[㎲]로 하였으며 QSM 속도제어기는 내부루프가 충분히 정상상태에 도달할 시간을 고려하여 5[ms]로 하였고 부하관측기는 100[㎲]로 하였다. 또한 현실성을 감안해 인버터 및 공간전압벡터 PWM 기법 등을 모델링하였다.

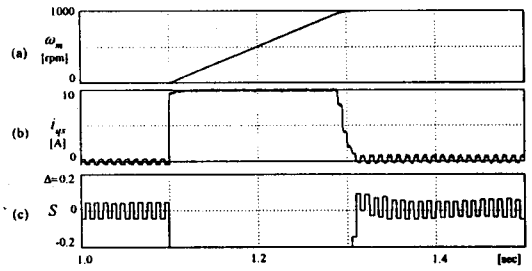

그림 3. 속도지령 1000[rpm]에 대한 응답

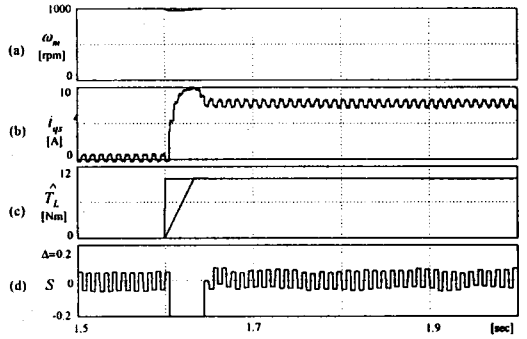

그림 4. 부하인가시 응답(10[Nm])

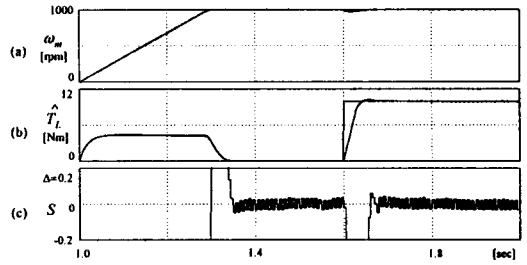

그림 5. 파라미터 변동에 대한 응답(J=J_0*1.5)

QSM 속도제어기의 qT_s 와 ϵT_s 는 각각 0.5와 0.1로 하였으므로 $\Delta=0.2$가 되고 슬라이딩 모드 부하관측기의 K_1 과 K_2 는 각각 200과 300으로 하였다. 다음은 시뮬레이션에 사용된 농형 유도전동기의 파라미터이다.

정격전압 250 [V]	정격전류 8.4 [A]
정격속도 1420 [rpm]	극수 4
정격출력 2.2 [kW]	정격부하 14[Nm]
R_s=1.45 [Ω]	R_r=0.925 [Ω]
L_s=100.8 [mH]	L_r=100.2 [mH]
L_m=96.7 [mH]	J=0.0245 [Nms^2/rad]
B=0.0035[Nms^2/rad]	

그림1은 유도전동기의 J와 B가 공칭값을 가질 때 속도지령 1000 [rpm]에 대한 응답이다. 토오크 상수 K_t는 벡터제어에 의해서 상수화가 되지만 실제로 이상적인 상수가 아니므로 어느 정도의 외란을 포함하고 있다. (a)에서 보는 바와 같이 속도는 지령치에 대하여 최대 토오크를 내면서 추종해가고 있으며 (c)의 $s(k)$도 정상상태시에 매 샘플링 시간마다 그 부호를 바꾸는 것을 볼 수 있다. 또한 $\Delta=0.2$ 이므로 정상상태 오차가 0.2[rad/sec]를 넘지 않는다. 그림2는 1000[rpm]으로 운전 중에 10[Nm]의 부하를 인가했을 경우의 응답이다. 부하인가와 동시에 $s(k)$는 영점으로부터 멀어지지만 부하관측기가 부하를 추정해 가면서 속도는 다시 지령치로 회복되고 $s(k)$ 역시 QSM로 접어듬을 볼 수 있다. 그림3은 실제 J가 공칭값의 150%가 되었을 때의 속도와 부하인가에 대하 응답을 보여준다. (b)에서 부하관측기는 파라미터 변동에 대한 영향으로 과도상태에서 관측 오차가 생긴다. 또한 $s(k)$는 일시적으로 영점을 벗어나지만 부하관측기가 정상상태에 도달하면서 정상적인 스위칭 동작을 보인다. 따라서 외란이나 파라미터 변화에 강인하다는 것을 알 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는, 디지털 프로세서로 구현되는 실제 시스템을 고려하여 QSM 제어를 개선하여 유도전동기 속도 제어에 적용하였다. 현실적인 QSM를 정의하였고, 채터링을 크기를 감소시키기 위해 부하관측기를 부착하였고 채터링 크기를 해석적으로 구할 수 있었다. 시뮬레이션 결과에서 보듯이 제안된 속도제어기는 오버슈트 없는 빠른 동적응답과 강인성을 확보할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

[1] V. J. Utkin, "Sliding Mode Control Design Principles and Applications to Electric Drives," IEEE Trans. on Ind. Electron. vol. 40, no. 1, February 1993.

[2] D. Milosavljevic, "General conditions for the existence of a quasi-sliding mode on the switching hyperplane in discrete variable structure systems," Automat. Remote Contr., vol. 46, 1985.

[3] S. Z. Sarpturk, Y. Istefanopuios, and O. Kaynak, "On the stability of discrete-time sliding mode control systems," IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 32, no. 10, 1987

[4] W. B. Gao, Y. Wang, and A. Homaifa, "Discrete-time variable structure control systems," IEEE, Trans. on Ind. Electron., vol 42, no. 2, Apr. 1995.