전력전자학술대회 논문집 2003. 7. 14 ~ 7. 17

프로피버스 기반 복수유도전동기의 멀티레이트 추정 및 제어

이홍희, 김관수
울산대학교 전기전자정보통신공학부

Profibus based Multirate Estimation and Control of Dual Induction motors

H.H. Lee and G.S. Kim
Dept. of Electrical, Electronics and Information Engineering, University of Ulsan

ABSTRACT

This paper presents a method for increasing controller performance through multirate state estimation for ac machines at a low velocity. The multirate controller outputs control desired speed at each measurement instant. The simulation results show that the performance of multirate velocity estimation and control at low velocity is improved than single rate one.

1. 서 론

고성능의 마이크로 프로세스가 발전함에 따라 대부분의 제어 시스템은 디지털 제어 시스템으로 대체되고 있다. 그러나, 디지털 제어 시스템에서 중앙제어기와 센서나 구동기와 같은 필드기기들을 직접 연결하는 방식은 많은 배선을 필요로 하며, 시스템의 유연성과 신뢰성 확보가 어려울 뿐만 아니라, 시스템의 유지 및 보수가 어렵다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해 공유된 전송매체를 사용하는 산업용 네트워크에 대한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 최근 산업용 네트워크 시스템에서 개발이 진행 되고 있는 프로피버스 프로토콜은 OSI 참조 모델을 기반으로 하고 있으며 물리계층, 데이터 링크 계층, 그리고 응용계층으로만 구성되어 있다. 이 프로토콜은 빌딩 자동화 설비, 구동장치 및 프로세스 제어 등의 영역에서 널리 사용되고 있다. 이러한 산업용 네트워크에 연결되는 필드기기중 하나인 전동기에서 엔코더 정보를 받아 속도 제어시에 엔코더로부터 얻은 펄스의 개수를 계산하여 속도를 측정한다. 그러나 저속도일 경우 이 방법으로 측정한 속도는 순시값이 아니라 평균값이므로 펄스의 개수를 계산하는 과정에서 측정 지연현상이 나타난다. 특히 저속영역에서는 엔코더로부터 발생되는 펄스의 시간간격이 제어주기에 비해 많이 커지므로 측정과정에서 발생되는 지연현상이 속도 제어기에 더 많은 영향을 미치게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 고정밀도의 엔코더를 사용하는 것이 성능향상을 위한 방법이지만 유지 관리가 어렵다. 따라서 저정밀도의 엔코더를 사용하여 저속도에서의 제어기의 성능향상을 위한 많은 방법들이 연구되어 왔다. 이산 시간 형태의 멀티레이터 상태 추정 및 제어[1]는 Hori[2]에 의해 모터/엔코더 시스템으로 구현되었고, 자기 디스크 드라이브는 Chiang[3]과 Phan[4]에 의해 구현되었다.

본 논문에서는 프로피버스 기반의 복수 서보 전동기를 구동할 때 저속도에서의 긴 샘플링 기간에 의해 발생하는 지연을 극복하기 위해 루엔버그 관측기를 사용한 멀티레이터 추정 및 제어 기법을 통하여 성능을 향상시키고자 한다.

2. 속도 관측기

2.1 루엔버그 속도 관측기

일반적인 연속시간 선형 시불변 시스템의 플랜트 모델은 다음과 같다.

$$\dot{x}(t) = A_c x(t) + B_c u(t) \quad (1)$$
$$y(t) = Cx(t)$$

x:상태 변수, u:입력, y:출력

이 모델을 이산시간 등가 모델로 변환하면 다음과 같은 상태 방정식으로 나타낼수 있다.

$$x(k+1, i) = \Phi_c x(k, i) + \Gamma_c u(k, i) \quad (2)$$
$$y(k, i) = C_c x(k, i)$$

$$\Phi_c = e^{A_c T}, \Gamma_c = \int_0^T e^{A_c \tau} B_c d\tau$$

이산시간 모델에서 비관측 상태를 추정하는 일반적인 알고리즘으로 루엔버그 관측기를 사용한다.

$$x_c(k+1|k+1) = x_p(k+1|k) + L[y(k+1) - Cx_p(k+1|k)]$$
$$x_p(k+1|k) = \Phi_c x_p(k|k) + \Gamma_c u(k) \quad (3)$$
$$x_p(k|k) = x_c(k|k)$$

L: 관측기 이득 행렬, x_p: 예측 상태변수

x_c: 정정 상태변수, k: 샘플링 순간,

Ts: 샘플링 시간

시스템의 속도는 변하기 때문에 측정 시간도 또한 변한다. 측정 정보를 사용할 때 시스템은 측정 샘플링 시간에 영향을 받는다. 따라서, 루엔버그 관측기에 샘플링 시간을 포함하여 관측기 방정식 (3)을 다음과 같이 다시 표현한다.

$$x_c(t_{i+1}|t+i+1) = x_p(t_{i+1}, t_i) + L(T_i)[y(t_{i+1}) - Cx_p(t_{i+1}, t_i)]$$
$$x_p(t_{i+1}, t_i) = \Phi_c(T_i) x_p(t_i, t_i) + \Gamma_c(T_i) u(t_i) \quad (4)$$
$$x_p(t_i, t_i) = x_c(t_i|t_i)$$
$$\Phi_c(T_i) = e^{A_c T_i}, \Gamma_c(T_i) = \int_0^{T_i} e^{A_c \tau} B_c d\tau$$

$T_i = t_{i+1} - t_i$ 에서 t_i와 t_{i+1}는 두 측정 샘플링 시간을 나타낸다.

3. 멀티레이터 속도 추정기

식 (4)의 관측기 방정식이 새로운 측정값을 사용할 때 고정 샘플링 에서는 성능 향상을 가져오지만, 저속도에서의 긴 샘플링 시간에서는 성능 저하를 가져온다.

만일 플랜트 모델이 정확하다면, 멀티레이터 추정 및 제어를 통해 시스템의 성능을 더 향상시킬 수 있다. 멀티레이터 추정 및 제어시 식4의 첫번째 식은 각 측정순간에 그대로 업데이트되고 식4의 두 번째 식은 훨씬 더 빠른 샘플링 시간 T_f에서 업데이트 된다. 이것은 그림 1의 시스템 모델을 통해서 설명할 수 있다.

업데이트 된 식 4의 두 번째 식은 다음과 같다.

$$x_p(k+1, t_i) = \Phi_f(T_f) x_p(k, t_i) + \Gamma_f(T_f) u(k, t_i) \quad (5)$$
$$T_f = 1/f_f, \Phi_f = e^{A_c T_f}, \Gamma_f = \int_0^{T_f} e^{A_c \tau} B_c d\tau$$

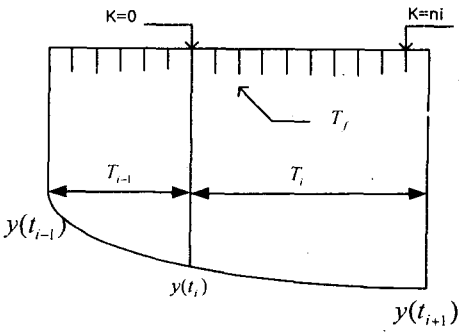

그림 1 멀티레이터 추정 구성도

Fig 1 Multirate estimation scheme

T_f는 고정 샘플링 시간이기 때문에 Φ_f와 Γ_f는 오프라인에서 계산된다. 시변 시스템에서 식 (5)는 다음과 같은 식을 통해서 업데이트 된다.

$$x_p(t_{i+1}, t_i) = \Phi_{f_i}(T_{f_i}) x_p(n_i, t_i) + \Gamma_{f_i}(T_{f_i}) u(n_i, t_i) \quad (6)$$
$$T_{f_i} = T_i - n_i T_f \ , \ \Phi_{f_i} = e^{A_c T_{f_i}}, \Gamma_{f_i} = \int_0^{T_{f_i}} e^{A_c \tau} B_{cd} \tau$$

A_{f_i}와 B_{f_i}는 $T_i - n_i T_f$값에 따라서 온라인으로 계산된다. 빠른 샘플링 시간 Tf는 프로세스 속도에 따라 제한된다.

시변 시스템과 멀티레이터 시스템 구성에 대한 블록 다이어그램은 그림 2와 같다.

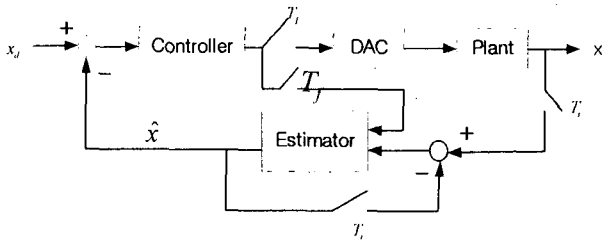

그림 2 멀티레이터 추정 및 제어 구성도

Fig 2 Block diagram of multirate estimation

그림 2와 같은 멀티레이터 시스템을 사용하면 속도 제어시 성능을 향상시킬 수 있다. 4장의 서보 전동기 시스템의 시뮬레이션을 통해 확인 할 수 있다.

4. 서보 전동기 시스템

4.1 시스템 모델

서보 전동기의 상태방정식을 수학적으로 모델링 하면 다음과 같다.

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu \quad (7)$$

$$y = Cx$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B_m}{J_m} & -\frac{1}{J_m} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J_m} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$C=[\ 1\ \ 0\ \ 0]$, D=[0]

$x=[\ \theta\ \ \omega\ \ \tau_d]$,

Bm : 마찰계수, Jm : 관성 계수

θ, ω : 각 위치 및 각 속도

τ_d, τ_e : 외란 토크, 모터 토크

전동기의 토크 방정식은 다음과 같다.

$$\tau_e = J_m \frac{dw}{dt} + B_m w + \tau_d \quad (8)$$

5. 시뮬레이션

설계된 멀티레이터 추정 제어기를 통해 서보 전동기 시스템의 저속도에서의 성능 평가를 위해 MATLAB을 사용하여 그림 2와 같은 시스템을 구성하여 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션 조건은 표 1에 나타내었다.

표 1 시뮬레이션 조건

관성 모멘트	0.038 kgm^2
마찰 계수	0.1
고정 샘플링율	1ms
멀티 레이터	50us

시뮬레이션은 시불변 고정 샘플링 일때와 시변 멀티레이터 샘플링 일때의 두 가지 경우에서 저속도 속도 제어 응답 특성을 비교해 보았다.

먼저, 시불변 고정 샘플링 방식을 사용한 저속도에서의 시뮬레이션 수행 결과는 그림 3과 같다.

그림 3은 기준 속도가 0.3075 rad/s일 때, 1 ms의 고정 샘플링 방식으로 속도를 추정한 결과를 보여준다.

다음으로 시변 멀티레이터 추정 방법을 사용한 저속도에서의 시뮬레이션 수행 결과는 그림 4와 같다.

그림 4는 기준 속도가 0.3075 rad/s 일 때, 50 us의 빠른 샘플링 율을 가지는 멀티레이터 추정 기법을 사용한 속도 추정 및 오차를 보여준다.

그림5, 6은 기준 전압이 구형파 입력일 때 속도 추정을 나타낸 것이다.

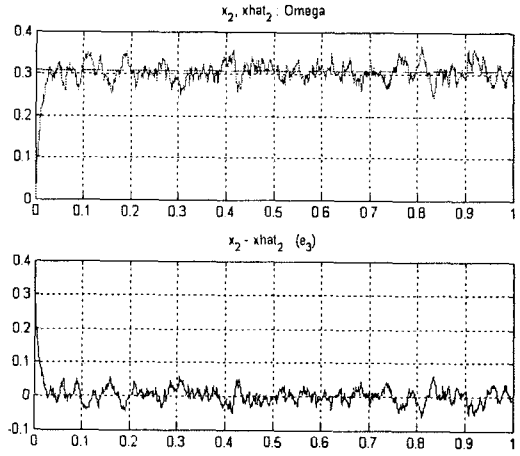

그림 3 서보 전동기 속도 추정 및 오차(고정 샘플링)
Fig 3 Servo Motor Speed Estimation and Error(Single Rate)

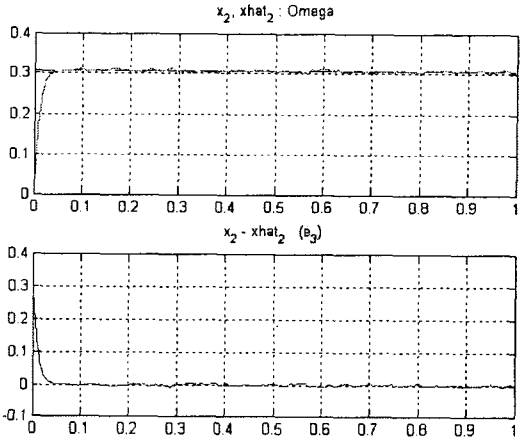

그림 4 서보 전동기 속도 추정 및 오차 (멀티레이터)
Fig 4 Servo Motor Speed Estimation and Error(Multirate)

그림 5는 기준 속도가 0.5 rad/s를 가지는 구형파 입력일 때, 1 ms의 고정 샘플링 방식의 속도 추정결과를 보여준다.

그림 6은 기준 속도가 0.5 rad/s를 가지는 구형파 입력일 때, 50 us의 빠른 샘플링 율을 가지는 멀티레이터 추정 기법을 사용한 속도 추정 및 오차를 보여준다.

시뮬레이션 결과를 보면 서보 전동기의 저속도 구동시 단일 샘플링 율로 수행한 결과보다 멀티레이터 샘플링 율을 사용한 제어기가 속도 추정오차가 훨씬 줄어든 것을 볼수 있다.

따라서, 저속도에서의 멀티레이터 속도추정제어기의 성능이 단일 샘플링 율을 사용한 추정 제어보다 나은 성능을 가짐을 확인할 수 있다.

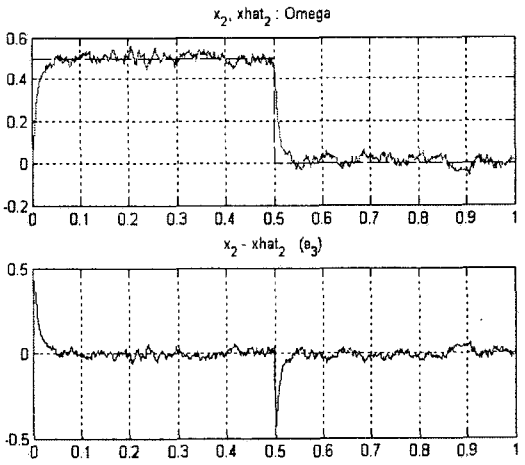

그림 5 고정 샘플링 일때의 속도 추정(w=구형파)
Fig. 5 Speed Estimation of Single Rate(w=rectangular)

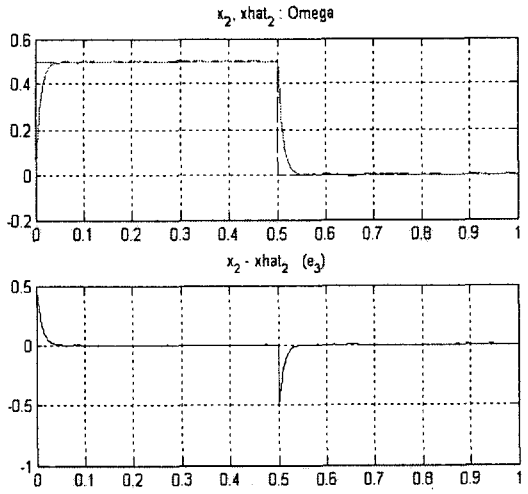

그림 6 멀티레이터 일때의 속도 추정(w=구형파)
Fig 6 Speed Estimation of Multirate (w=rectangular)

6. 결 론

멀티레이터 상태 추정기를 설계하고 서보 전동기 시스템에 적용하였다. 설계된 상태 추정기는 루엔버그 관측기를 바탕으로 한다.

제어기 성능을 비교하기 위해 싱글 레이터 추정기와 멀티레이터 추정기의 속도 추정을 통해 비교해 보았다. 그 결과로 저속도에서 멀티레이터 추정시 더 작은 추정오차를 가짐을 확인하였다.

향후 실제 시스템에 적용하여 시뮬레이션 결과의 타당성을 실험적으로 검증하고자 한다.

참 고 문 헌

[1] Franklin, G. F and Powell, J. D., "Digital Control of Dynamic Systems, 2nd Ed", Addision-Weslsey Publishing Company, Reading, Massachusetts, 1990.

[2] Hriy, Y., Umeno, T., Uhida, T., and Konno, Y., "An Instant Speed Observer for High Performance Control of DC Servomotor using DSP and Low Precision Shaft Encoder," Fourth European Conference on Power Electronics and Applications, Firenz, Italy, September 3-6, 1991.

[3] Chiang, W. -W., "Multirate State-Space Digital Controller for Sector Servo Systems," Proceedings of the 29th IEEE Conference on Decision and Control, Honolulu, HI December 5-7, 1990.

[4] Phan, D. T., "The Design and Modeling of Multirate Digital Control Systems for Disk Drive Applications," Proceedings of the 1993 Asia-Pacific Workshop on Advances in Motion Control, Singapore, July 15-16, 1993.