

관측자를 이용한 영구자석형 동기모터의 저속영역 속도리플 개선

김 정태, 노 철원, 최 종률
현대정공 기술연구소 공작기계연구부

Improvement of Speed Ripple in Low Speed Range for PMSM using Observer

Chung-tae Kim, Chul-won Noh, Song-yul Choe
Hyundai Precision & Ind. Co., Ltd. Technical Research Institute
Machine Tool Engineering Dept.

ABSTRACT

Generally, we often use a speed sensor based on a rotary encoder and we can obtain a speed information by counting the increased or decreased number of encoder pulses in a sampling period. However, these speed measurement systems do not inherently produce a true, instantaneous speed information and then, the speed ripple is generated by speed measurement errors.

In order to overcome this problem, speed observer is used for the accurate speed measurement and improvement of speed ripple for Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) in this paper. Speed observer estimates the instantaneous speed at each sampling instant. This estimated speed signal is then used as the speed feedback signal for the speed loop control. The proposed speed observer system is proved by simulation using SABER simulation S/W.

1. 서 론

최근의 산업계에서 사용되고 있는 대부분의 서보 시스템이 가져야할 중요한 요소들은 고성능, 고신뢰성, 경제성등이다. 이러한 이유로 영구자석형 동기모터(Permanent Magnet Synchronous

Motor)를 구동하기 위한 서보 드라이브 시스템은 간단한 구조로 높은 신뢰도를 가질 뿐만 아니라 자성체와 반도체 그리고 제어기술의 발달로 인한 경제성과 성능을 확보하게 되면서 고효율, 높은 토크를 발생시킬 수 있어 그 수요가 급격히 늘어가고 있다.

그러나 이러한 영구자석형 동기모터를 제어하기 위한 여러 가지 제어기법들은 모터의 정확한 속도와 위치정보를 필요로 하며 일반적으로 회전자의 속도나 위치정보를 알아내는 방법으로 Tacho-generator, Encoder, Resolver 등의 센서를 이용하게 된다. 그러나 속도나 위치정보의 측정시 시스템 잡음이나 센서의 분해능의 한계로 인하여 정확한 정보를 얻을 수 없는 경우, 특히 저속 구동시 디지털 센서의 출력 주파수가 제어기의 샘플링 주파수보다 낮으면 정확한 속도나 위치정보를 얻을 수 없게 되며 전체적인 시스템의 신뢰도가 떨어지게 된다.

최근의 산업용 서보 드라이브 시스템에서의 저속영역의 속도 리플은 고정밀 제어에 많은 영향을 주고 있으며 이의 저감을 위한 많은 노력들이 최근에 이루어지고 있다. 특히 공작기계와 같은 저속에서 정밀제어가 요구되는 시스템에서의 속도 리플은 소재의 가공시 큰 영향을 미치게 된다. 이에 본 논문은 Speed Observer를 사용하여 엔코더의 분해능의 한계를 극복하여 정확한 속도 및 위치를 추정함으로써 저속에서의 속도 리플을 개선하고자 한다.

II. 본 론

1. 저분해능 엔코더(Encoder)에 의한 속도 측정

최근의 고성능 서보 드라이브 시스템에 있어 넓은 속도영역에서의 정밀한 속도제어가 요구되어지고 있으나 현재 산업계에서 많이 사용되어지는 증분형 엔코더를 사용한 저속에서의 속도 측정은 엔코더 자체의 분해능의 한계로 인하여 정확한 속도를 계산하는데는 한계가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 고분해능의 속도 측정장치를 사용할 수 있지만 이는 기구학적인 한계를 가지고 있을 뿐만 아니라 시스템의 가격을 상승시키는 요인으로 작용하게 된다.

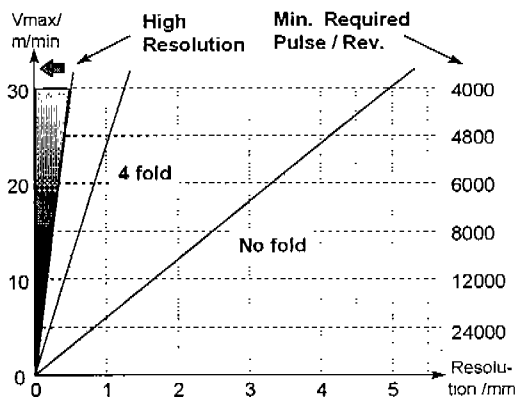
일반적으로 식(1)과 같이 일정시간동안에 입력되는 엔코더 펄스에 의한 위치를 측정하여 속도를 계산하게 된다. 따라서 속도의 분해능은 식 (2)와 같이 엔코더의 분해능에 의존하게 된다. 이 방법은 Sampling Time이 일정하고 Hardware가 간단하나 저속 운전시에는 정밀도가 떨어지는 단점이 있고 정밀도를 높이기 위해서는 1회전당 많은 펄스의 엔코더를 사용하든지 또는 Sampling Time을 늘려야 하는 문제점이 있다.

$$\hat{\omega}(k) = \frac{\theta(k) - \theta(k-1)}{T} \quad (1)$$

$$\hat{\omega}_{resolution} = \frac{\theta_{resolution}}{T} \quad (2)$$

여기서, T : the sample time for the speed control loop

k : the sample number



Ball Screw Pitch(h_v) = 10mm/rev
 f_{max} (엔코더의 최대응답 주파수) = 100kHz
 V_{max} (전기적 최대 이송속도) = $(60 \cdot f_{max} \cdot h_v)/ppr$

Fig. 1 엔코더의 분해능과 이송속도와의 상관관계

Fig. 1은 엔코더 펄스를 채배하지 않았을 경우와 4채배를 하였을 경우, 그리고 고분해능 (High Resolution) 엔코더를 이용하였을 경우에 Ball screw pitch에 따른 최대 분해능과 이송 속도와와의 상관관계를 도시하였고, 그 때의 엔코더의 최소 요구되는 ppr(pulse per revolution)을 나타내었다. 예를 들면 Ball screw pitch를 10mm 사용할 경우 최대 이송 속도 30[m/min]을 얻기 위한 최소 요구되는 엔코더의 ppr은 4000ppr이고 이때 채배를 하지 않았을 때의 얻을 수 있는 분해능은 5mm이다. 또한, 4000ppr을 4채배를 하였을 때의 해상도는 약 1.2mm정도의 분해능을 얻을 수 있다.

2. Speed Observer

이러한 단점을 보완하기 위하여 최근 회전자의 속도와 위치에 대한 관측자 구성을 통한 여러 가지 제어기법이 제안되어져 왔다. 본 논문에서는 영구자석형 동기모터에 장착된 저분해능 엔코더와 Speed Observer를 사용하여 속도 제어, 특히 저속에서의 속도 제어를 함에 의하여 속도 측정의 오차 및 한계에 의하여 발생하는 속도리플의 개선을 실현하기 위한 시스템을 구성하였다.

Fig. 2에서와 같이 측정되어진 위치 정보 θ 는 Closed loop observer의 기준입력으로 사용되며 추정되어진 위치 $\hat{\theta}$ 와의 오차에 대한 값이 Open loop observer의 Feedforward 기준입력인 Torque에 추가되어지는 간단한 Closed-Loop Observer의 형태를 지닌 Speed Observer를 사용하고자 한다.

이러한 Closed-Loop 형태의 Speed Observer는 Open-Loop 형태의 Observer보다 파라미터의 변동에 의한 영향을 줄일 수 있다.

실제 Simulation을 위한 Speed Observer로는

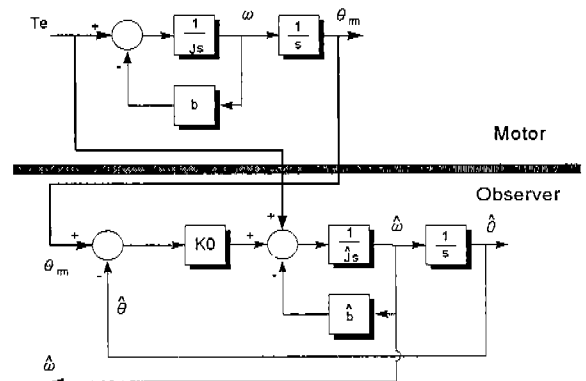


Fig. 2 The General Model of a closed loop observer

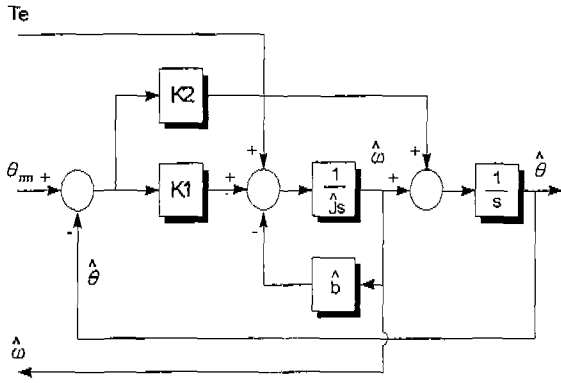


Fig. 3 Optimal Speed Observer Block Diagram

Fig. 3에서와 같이 Gain terms K1, K2를 가지는 형태로 구성되어진다.

따라서 K1, K2를 조절함에 의해 Closed loop observer의 추정속도와 추정위치가 실제속도와 위치에 얼마나 빨리 수렴할 수 있는지를 결정할 수 있다.

Fig. 3의 시스템은 2차 시스템의 형태로 나타내어지므로 시스템의 전달함수로부터 다음 식 (3)과 같은 특성방정식을 얻을 수 있으며 이를 식 (4)와 같은 고유 진동수 ω_n 과 감쇠비 ζ 으로 표현되는 2차 시스템의 특성방정식에 의하여 식 (5)와 같이 K1, K2를 선정할 수 있다.

$$s^2 + K2 \cdot s + \frac{K1 + \hat{b} \cdot (K2 + 1)}{j} = 0 \quad (3)$$

$$s^2 + 2\zeta\omega_n \cdot s + \omega_n^2 = 0 \quad (4)$$

$$\therefore K1 = j \cdot \omega_n^2 - \hat{b} \cdot (K2 + 1) \quad (5)$$

$$K2 = 2\zeta\omega_n$$

따라서, j 가 $1.085 \times 10^{-2} [\text{Kgm}^2]$ 이고 \hat{b} 가 거의 0이라고 할 때 감쇠비 ζ 를 0.707로 하고 고유 진동수 ω_n 를 150 rad/sec로 설계한다면 K1과 K2는 각각 K1=244.125, K2=212.1이 된다.

Fig. 3에서 T_e 는 실제 모터에서 발생되어지는 토크에 대한 입력이므로 센싱되어진 2상의 전류로부터 계산되어진 토크분 전류에 토오크 상수를 곱하여 Closed loop Speed Observer에 대한 Feedforward 입력으로 작용하고 저분해능 엔코더에 의해 측정되어진 위치 정보 θ_{rm} 를 기준입력으로 하여 그에 대한 속도와 위치를 추정하게 된다.

따라서 Speed Observer에 의한 위치 또는 속도 분해능은 위치 또는 속도 센서의 분해능의 한계에 의하여 제한받지 않으며 단지 Speed Observer가 실행되어지는 제어 루프에 의하여 제한되어진다.

따라서, Fig. 3와 같은 Speed Observer에 대한 상태방정식은 다음 식 (6)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt} \hat{\omega} \\ \frac{d}{dt} \hat{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\hat{b}}{j} & -\frac{K1}{j} \\ 1 & -K2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{K1}{j} & \frac{1}{j} \\ \frac{K2}{K2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{rm} \\ T_e \end{bmatrix} \quad (6)$$

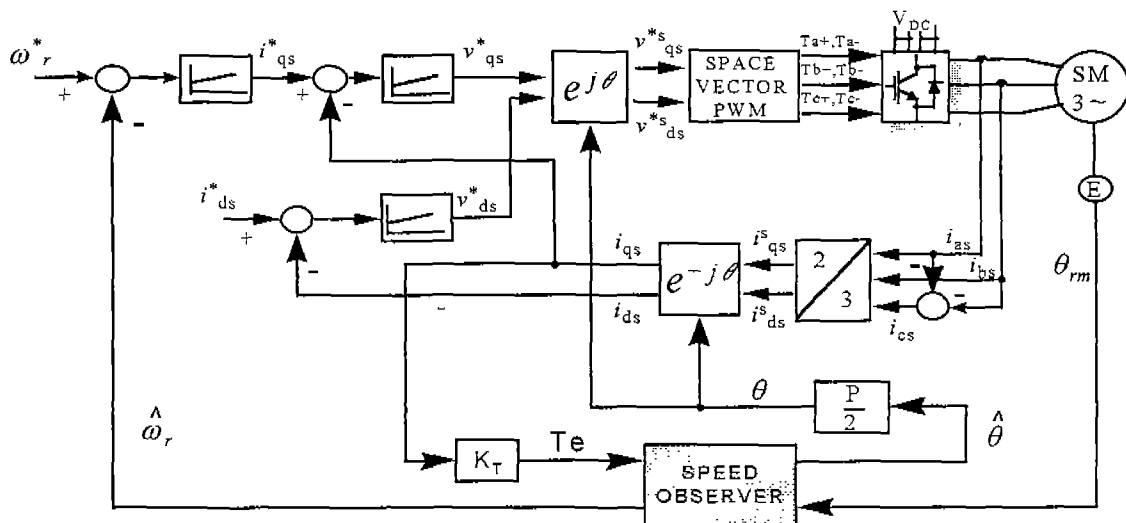


Fig. 4 The overall control diagram for Speed control

Table. 1 Motor Parameter for Simulation

Stator Resistance R_s	2.6Ω
Stator Inductance L_s	19mH
Torque Constant K_T	0.115 Nm/A
Rotor Inertia J	1.085×10^{-2} Kgm ²
Poles	6

3. Simulation

이와 같이 제안되어지는 Speed Observer를 바탕으로 한 저속영역에서의 속도리플 개선을 실현하기 위한 전체적인 시스템은 Fig. 4와 같은 구조를 가지며 전기적 시스템과 기계적 시스템의 혼합 시뮬레이션이 가능한 SABER Simulation S/W (Analogy, 미국)에 의하여 시뮬레이션이 진행되어졌다.

시뮬레이션에 사용되어진 PMSM 서보 모터는 SABER Simulation S/W에서 Library로 제공되는 PMSM 모델을 사용하였으며 내부 모델에 대한 상태방정식은 공개되지 않았고 Table. 1과 같은 모터 파라미터들로 설정되어졌다.

구성되어진 드라이브 시스템은 고정자 전류를 d축 성분(자속분 전류)과 q축성분(토크분 전류)으로 나누어 이를 각각 독립적으로 제어하는 벡터제어 방식을 사용하였으며 벡터제어 알고리즘에 의하여 발생된 기준전압을 모터로 인가하기 위하여 빠른 응답특성을 보이며 성능이 우수한 공간전압벡터 (Space Voltage Vector) PWM 기법을 사용하였다.

속도와 전류 제어를 위한 Control loop의 주기는 각각 1ms, 125μs로 설정되어졌으며 시뮬레이션에 사용되어진 엔코더의 분해능은 모터의 회전자가 1회전할 때 2048개의 펄스가 발생하도록 하였다. 발생되어지는 엔코더의 펄스는 체배회로에 의하여 4체배 되어 속도 제어기와 전류 제어기에서 사용되어진다.

Speed Observer에서 엔코더로부터의 위치 정보 센싱과 속도 및 위치 추정은 전류 제어 루프와 동일한 125μs마다 행하여지게 되며 이러한 추정 속도로부터 1ms마다 속도제어루프가 실행되어진다.

2048ppr 엔코더의 펄스를 4체배하여 속도 제어 루프 1msec마다 속도를 계산하게 되면 발생되어지는 펄스당 속도에 대한 오차는 약 7.3rpm정도가 된다. 따라서, 10rpm 부근에서는 0~2개정도의

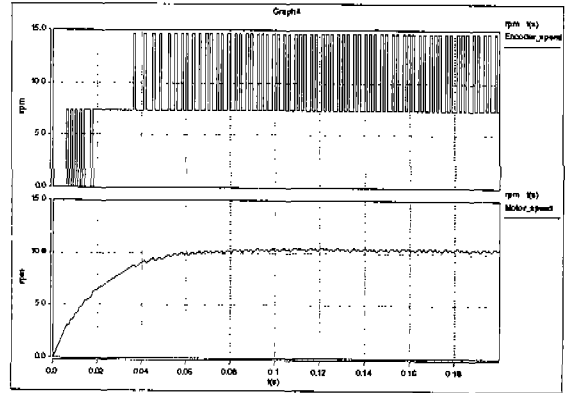


Fig. 5 2048ppr Encoder만에 의한 속도 제어

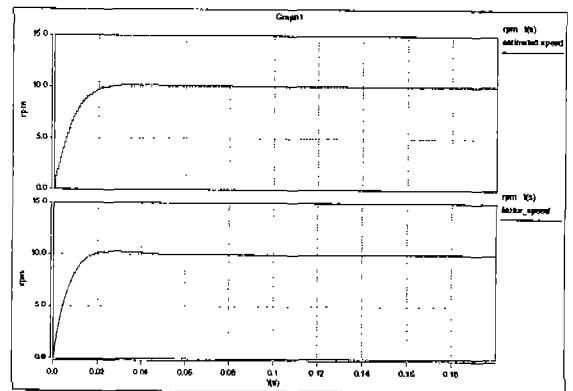


Fig. 6 Speed Observer를 사용하였을 때의 추정 속도와 모터의 실제 속도

엔코더 펄스 신호가 제어 루프로 변환되어지므로 정확한 속도 계산 및 제어를 하기에 불충분하다. 따라서, 엔코더 펄스만에 의한 속도 계산에 의하여 속도 제어가 행하여질 경우 실제 속도의 정상 상태 오차가 발생할 뿐만 아니라 속도 리플이 발생한다.

Fig. 5는 2048ppr 엔코더와 4체배 회로를 통하여 10rpm으로 속도 제어를 하였을 때 제어기로 변환되어지는 펄스에 의하여 계산되어진 속도와 실제 모터의 속도를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 제어기에서 계산되어진 속도는 펄스당 약 7.3rpm의 속도로 제어되어지는 것을 볼 수 있으며 이러한 제어에 의하여 실제 모터의 속도에 리플이 생기는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6는 2048ppr 엔코더에 제안되어진 Speed Observer를 사용하여 10rpm으로 속도 제어를 하였을 때의 Speed Observer에 의하여 추정되어진 속도와 실제 모터의 속도를 보여주고 있다. 엔코더만을 사용하였을 때와는 달리 거의 정확한 속도 추정에 의한 속도 제어를 하고 있는 것을 볼 수

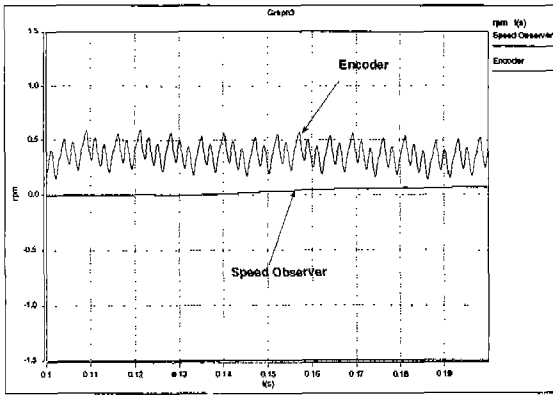


Fig. 7 각 제어기의 속도 리플 및 속도 오차

있으며 속도에 대한 리플도 현저히 감소하였고 정상상태 오차가 사라진 것을 볼 수 있다.

Fig. 7는 2048ppr 엔코더만을 사용하였을 때의 속도 제어시와 Speed Observer를 사용하였을 때의 속도 제어시의 정상상태에서의 속도에 대한 리플을 비교한 파형이다.

엔코더만의 신호에 의하여 제어하였을 경우 기준 속도에 대한 오차뿐만 아니라 약 0.5rpm(Peak to Peak)정도의 속도리플이 발생함을 알 수 있다.

III. 결 론

저분해능 엔코더에 의하여 측정되어지는 위치 정보와 측정되어진 전류로부터 계산되어지는 Torque를 이용한 Speed Observer를 통하여 저속 영역을 포함한 전 속도영역에서의 속도 제어를 수행할 수 있는 속도 제어 시스템을 구성하여 속도 오차 및 속도 리플을 개선할 수 있음을 시뮬레이션을 통하여 검증하였고 이를 바탕으로 실제 PMSM을 이용한 실험을 통하여 성능을 검증하고자 한다.

6. 참고 문헌

- [1] K. Ohishi and Y. Nakamura, "Robust Self-Tuning Speed Control Based on Speed Observer and Disturbance Observer," IPEC Conf. , pp. 699-704, 1995.
- [2] Y. Hori, "Robust Motion Control based on a two-degrees of freedom servosystem", Trans . on Advanced Robotics, Vol.7, No.6, pp.525-546, 1993.
- [3] L. A. Jones and J. H. Lang, "A state observer for permanent magnet synchronous motor," IEEE Trans. Ind. Electron., Vol.36, No.3, pp. 374-382, 1989.
- [4] A. E. Fitzgerald and C. Kingsley, Elec. Machinery. New York:McGraw-Hill Company