

공작기계 주축용 스피들 전동기를 위한 관성추정알고리즘

정병환, 최규하, 최경진*, 이태리*
건국대학교, (주)메트로닉스*

Inertia Identification Algorithm for Spindle Motor of Machine Tool

Jeong Byung-Hwan, Choe Gyu-Ha, Choi Gyeong-Jin, Lee Tai-Ree
Konkuk University, Metronix Co.*

ABSTRACT

This Paper proposes a simple identification method of the moment of inertia for high performance spindle motor of machine tool. It uses the dynamic equation of a simple mechanical system, the torque reference of a speed controller, and the actual rotating speed of machine. The identified inertia can be for auto-tuning of the gains in the speed controller. The effectiveness of the proposed method is proved by the computer simulation.

1. 서론

근래에는 전동기와 엔코더, 볼스크류, 유압시스템을 위한 솔레노이드 등의 점진적인 발전과 더불어 자동제어를 위한 제어기를 부착한 컴퓨터수치제어(Computer Numerical Control : CNC) 공작기계가 일반화 되면서 생산성과 유연성의 향상을 가져와 생산 자동화에 크게 기여를 하게 되었다. 따라서 제품 생산자는 가공 프로그램의 작성과 가공물의 장착, 가공의 감시만 하면 되므로 부품 가공물의 정밀도는 대부분 공작기계에 의존하게 되었다. 그러나 공작기계의 구동부는 모두 기계적인 요소들로 구성되어 있어서 각 구성부품들의 가공오차와 더불어 각 부품간의 조립상태, 사용시간에 따른 마모, 주위 환경의 변화 등으로 인해서 공구와 공작물과의 상대적인 공칭간격과 실제로 운동하는 거리와의 차이인 오차를 내포하게 되어 정밀도가 떨어지게 된다. 따라서 항공기, 전자산업에서 알루미늄 합금과 같은 연질 금속 가공물들과 같은 각각의 산업에 대한 생산품의 요구 정밀도가 높아지고 또한 가공성능이 우수하고 생산성이 높은 생산 공정을 구성하려는 산업제품 생산자들에게는 고성능 공작기계의 필요성이 절실히 요구되고 있다. 이에 따라 공작기계의 고속 정밀가공을 위하여 더욱 더 성능을 높이려는 연구가 다각도로 시도되고 있으며 이러한 공작기계의 고속화 및 고정도화 연구는 현재 세계적인 추세이며, 이 가운데 자동화 공장의 핵심부를 차지하는 머시닝 센터의 고속화 연구가 그 주류라 할 수 있다. 공작기계의 고속화는 두 가지 경우를 나누어 말할 수 있는데, 그 하나는 주축 회전수의 고각속도(高角速度)와 또 다른 하나는 고주속(高周速)이다. 고각속도는 주로 진동에 의한 공작물의 형상 정밀도와 연관되며 고주속은 발열에 의한 변형 문제를 일으킨다. 공작기계 주축의 고속화를 언급할 경우에는 고주속을 말하는 경우가 많다. 이러한 고주속의 실현은 유연한 가공물의 능률적인 절삭과 정밀도의 향상을 기대할 수 있을 뿐만 아니라 절삭속도를 높일 경우 절삭저

항이 감소하여 낮은 발열로 연삭할 수 있기 때문에 고정밀 가공이 가능해지며, 절삭력 또한 감소하게 되어 절삭공구의 수명 또한 연장할 수 있다. 다시 말해, 공작기계가 고정밀 성능을 얻기 위해서는 고속 주축계의 실현에 있다고 해도 과언이 아니다. 이러한 공작기계의 절삭속도를 높이기 위해서는 스피들 전동기의 우수한 속도제어기가 필요한데 이를 해결하기 위해서는 정확하고 빠른 속도 측정과 고성능의 속도제어 알고리즘이 필수적이다. 특히 속도제어기의 특성을 정확히 설계하기 위해서는 관성과 마찰계수와 같은 기계시스템 상수를 정확히 아는 것이 필요한데 이 가운데 관성은 우수한 속도제어 성능을 얻기 위하여 절실히 필요한 상수이다. 이에 따라 전동기 고성능 속도 제어를 위하여 관성추정에 관한 연구가 많이 되어왔다^{[1][2][3]}. 기계방정식에서 알 수 있듯이 관성과 부하 토크는 따로 분리하여 생각할 수 없고 반드시 함께 고려되어야만 한다. 그러므로 관성을 실시간 추정하는 것은 상당히 어렵다. 실시간 관성을 추정하기 위하여 칼만필터(KalmanFilter), ROELO (Reduce-OrderExtended Luenberger Observer), RELS(Recursive Extended Least Square) 등이 제안되었다^[4]. 확률분포를 갖는 불규칙적인 시스템에서 최적상태 추정방법인 칼만필터를 이용하여 관성을 추정하는 방법은 불규칙 잡음을 갖는 동적 시스템에 적용되어 지고 있는데 이 방법은 속도가 변화하지 않는 경우에는 추정을 할 수 없고, 심지어 발산할 우려가 있기 때문에 정속구간에서는 추정하지 않도록 하여야 한다. ROELO를 이용하는 방법은 속도응답 특성에 영향을 미치는 저속 영역에서 좋은 성능을 보이지만 계산을 통하여 이득이 설정되고 관성이 추정되기 때문에 다소 복잡한 단점이 있고 최소승자법 등의 최적제어 이론을 적용한 관성 추정법은 속도지령을 항상 변화시켜야 하고 수렴속도가 느린 단점이 있다. 본 논문에서는, 정밀 절삭제어를 위하여 주축용 스피들 전동기가 최대 속도영역까지 도달하여 우수한 속도제어를 위하여 관성추정제어를 제안하였고 시뮬레이션을 통하여 제안한 알고리즘을 검증하였다.

2. 고성능 속도제어시스템을 위한 관성추정

전동기에 엔코더를 부착한 기계계의 모델링은 그림1과 같이 표현되고 전동기에 해당되는 부분은 식(1)과 같이 표현된다. 증분형 엔코더는 실제로 위치 검출기이므로 기계계의 출력은 위치 정보이고 회전자의 속도는 회전자 위치의 미분으로부터 계

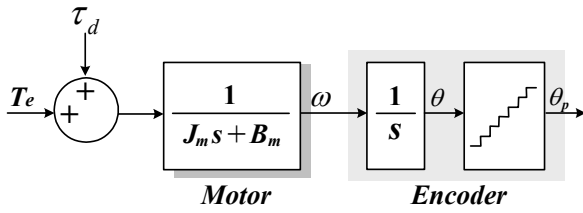


그림 1 기계계의 모델링
Fig. 1 Modeling of mechanical system

산되는 것이다. 따라서 기계계의 출력은 위치이며 이로부터 속도는 식(2)와 같은 수식으로 표현된다.

$$T_e + \tau_d = J_m \frac{d\omega}{dt} + B_m \omega \quad (1)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (2)$$

- 여기서, T_e : 구동 토크 [Nm]
 τ_d : 부하 외란 [Nm]
 ω : 회전자의 기계각속도 [rad/sec],
 J_m : 관성모멘트 [kg-m²]
 B_m : 마찰 계수 [Nm/(rad/sec)]
 θ : 각 위치

그림 2는 전형적인 속도제어시스템의 블록다이어그램을 나타내고 있다. 그림에서 ω^* 는 지령속도, T_e^* 은 지령 토크, $\hat{\omega}$ 는 실제 추정속도 그리고 $\hat{\tau}_d$ 는 추정 외란 토크이다. 속도추정기는 미분기 혹은 속도관측기가 될 수 있고 외란 관측기(feed forward)는 외란 토크의 영향을 줄이기 위하여 사용되어지고 있으며 속도제어기는 간단한 PI제어기와 전향보상지령으로 구성되어진다. 그리고 파라미터 추정기는 점성마찰계수와 전동기의 기계 부하를 고려하여 전동기 전체 등가 관성으로 다루었고 따라서 기계파라미터의 검증은 2개의 파라미터인 관성과 점성마찰계수로 고려하였다. 위의 식(1)에서 부하 관성을 고려한 기계방정식으로 재표현하면 식(3)과 같다.

$$T_e + \tau_d = (J_m + J_L) \frac{d\omega}{dt} + B_m \omega \quad (3)$$

여기서 J_L 은 부하 관성이다. 식(3)의 양변에 실제 회전속도 증분의 도함수를 곱하여 유도하면 식(4)과 같다.

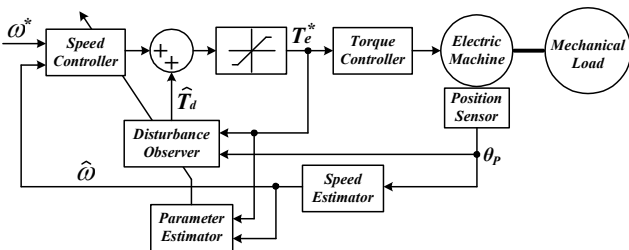


그림 2 속도 제어시스템의 블록도
Fig. 2 Block diagram of the typical speed control system

$$T_e \frac{d\omega}{dt} = (J_m + J_L) \left(\frac{d\omega}{dt} \right)^2 + B_m \omega \frac{d\omega}{dt} - \tau_d \frac{d\omega}{dt} \quad (4)$$

외란 토크가 시간에 대한 변화가 매우 느리다고 가정하고 식(4)의 양변에 한정된 시간에 따른 적분을 취하면 식(5)와 같이 주어진다.

$$\int_{t_1}^{t_2} T_e \frac{d\omega}{dt} dt = (J_m + J_L) \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{d\omega}{dt} \right)^2 dt + B_m \int_{t_1}^{t_2} \omega \frac{d\omega}{dt} dt - \tau_d \int_{t_1}^{t_2} \frac{d\omega}{dt} dt \quad (5)$$

여기서 t_1 은 현재 시작 시간을 의미하고 t_2 는 종료시간을 나타낸다. 그리고 식(5)의 우변의 2번째 항은 식(6)과 같이 표현되어질 수 있다.

$$B_m \int_{t_1}^{t_2} \omega \frac{d\omega}{dt} dt = \frac{B_m}{2} (\omega_{at=t_2}^2 - \omega_{at=t_1}^2) \quad (6)$$

전체 관성을 $J_T = (J_m + J_L)$ 와 같이 표현하고 식(5), (6)으로부터 $T_e = T_e^*$ 라는 가정 하에 전체 관성모멘트는 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_T = (J_m + J_L) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} T_e^* \frac{d\omega}{dt} dt}{\int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{d\omega}{dt} \right)^2 dt} - \frac{B_m (\omega_{at=t_2}^2 - \omega_{at=t_1}^2)}{2 \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{d\omega}{dt} \right)^2 dt} + \tau_d \frac{(\omega_{at=t_2} - \omega_{at=t_1})}{\int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{d\omega}{dt} \right)^2 dt}$$

위 식에서 유도된 실제 속도는 디지털 양자화 혹은 측정으로 인한 노이즈를 줄이기 위하여 저역통과필터로 필터링 될 수 있다. 만약 파라미터의 검증시간이 충분히 길고 파라미터 검증시간 동안 유도된 실제속도가 0으로 되지 않는다면 분모가 분자에 비해 매우 커질 것이기 때문에 식(7)의 두 번째 항과 세 번째 항이 무시될 수 있다. 검증시간 간격이 충분하지 않을 경우 만약 t_1 과 t_2 의 속도가 같거나 서로가 근사하다면 두 번째 항과 세 번째 항의 분자가 0으로 될 수 있다. 따라서 점성마찰수와 외란을 간주하지 않은 관성 모멘트는 식(8)처럼 간단하게 성립될 수 있다.

$$J_T = \frac{\int_{t_1}^{t_2} T_e^* \frac{d\omega}{dt} dt}{\int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{d\omega}{dt} \right)^2 dt} \quad (8)$$

3. 디지털 시뮬레이션 및 검토

제한한 관성추정알고리즘을 검증하기 위해 디지털 시뮬레이션을 수행하였으며 사용되어진 툴은 전력전자 시뮬레이션 전용 툴인 POWER SIMTECH사의 PSIM 버전 6.0을 사용하였다. 그리고 모든 제어기는 DLL(Dynamic Link Library)를 이용하여 ANSI C 언어로 코딩하여 적용하였고 시뮬레이션에 사용한 7.5[kW] 스핀들 전동기의 전기적 사양은 표1과 같다. 관성 모멘트의 값을 추정하기 위하여 그림 3(a)에서 볼 수 있는 것과 같

이 150[msec]에 1000[rpm] 가속과 감속을 하도록 속도 지령을 주었고 정역회전이 아닌 단방향으로 구동시키도록 하였다.

표 1 스피들 전동기 파라미터

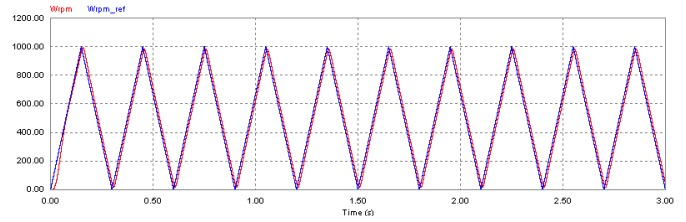
Table 1 Parameter of spindle motor

파라미터 항목	전동기 상수
Rated Power	7.5[kW]
Rated Speed	1,500[rpm]
Pole	4
Rs	0.2775[Ω]
Rr	0.2707[Ω]
Ls	0.020417[H]
Lr	0.020395[H]
Lm	0.019230[H]
Jm	0.0183[kg·m ²]

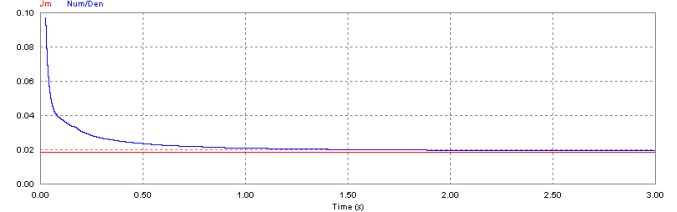
속도 지령을 그림 3(a)와 같이 주는 이유는 관성 모멘트가 일정 시간에 따른 속도변동분과 동일한 시간동안의 토크 변화량으로 얻을 수 있기 때문이다. 본 논문에서 적용한 이때 속도제어기의 주파수 영역은 $\omega_{sc} = 100[\text{rad}/\text{sec}]$ 로 설정하여 비례적분제어기 이득을 각각 $K_{sp} = \omega_{sc} \times J_m$ 과 $K_{si} = 0.2 \times \omega_{sc} \times K_{sp}$ 으로 정하였다. 그리고 그림 3(b)에서는 고성능 속도제어시스템을 위한 관성추정을 식(4.7)-(4.10)을 적용하여 실제 관성이 속도 지령에 따라 추정되고 있는 과정을 나타내고 있다. 시뮬레이션 결과 추정된 관성은 실제 관성 모멘트 값과의 1.5초에 10[%]의 오차를 보이다가 1.8초 - 2초 사이부터 오차가 5[%]로 나타남을 알 수 있다. 따라서 실제관성과 비슷하게 추정관성이 수렴하는데 걸리는 시간은 2초 이내이다. 그림에서 알 수 있듯이 추정 관성 모멘트가 실제 전동기 기계 관성 모멘트 값에 잘 추종되고 있는 것을 보여주고 있다. 그림 4는 오토튜닝 제어기에 제한한 관성추정 알고리즘을 적용하여 시뮬레이션 한 결과를 나타낸 것이다. 그림 4(a)는 지령 속도와 지령 속도를 나타내고 있는데 시뮬레이션 시작 시간인 0초부터 1.5초까지는 속도 PI제어기의 비례 제어기의 이득 값으로 사용된 관성 모멘트의 값이 실제 관성 모멘트 값보다 -50[%] 작을 경우를 시뮬레이션 한 것이고 1.5초부터 3초까지는 추정 관성 모멘트 값을 속도제어기의 이득 값으로 오토튜닝 제어기로 설정하였을 때를 시뮬레이션 한 것이다. 이때 그림 4(b)를 살펴보면 실제 관성 값보다 잘못된 관성 값이 설정된 0초에서 1.5초 사이의 경우 속도에 대한 오차가 실제 관성을 추정하여 튜닝한 속도제어기의 오차율의 3배나 됨을 알 수 있고 실제 관성을 추정한 후의 속도 제어기의 속도에 대한 오차가 작아짐을 알 수 있다. 따라서 관성 추정알고리즘에 대한 타당성을 살펴보았으며 정확한 관성 모멘트의 값이 추정이 되어야 우수한 속도제어가 수행됨을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 공작기계 주축용 스피들 전동기를 위한 고성능 속도제어시스템의 속도 측정과 속도제어기 설계를 위하여 관성 모멘트를 새로운 기법을 이용하여 정의하는 방법을 제안하였다. 이를 위하여 모터의 실제 회전속도와 속도제어기의 지령 토크 그리고 간단한 동특성 기계방정식을 이용하였으며 제한한 기법을 7.5[kW]급 스피들 전동기에 적용하여 검증한 결과 추정관성 모멘트가 정격 관성모멘트의 5[%] 이내로 추정하는 것을 보여 주고 추정값을 속도제어기의 이득값으로 튜닝하면 속도제어가 향상됨을 시뮬레이션으로 검증하였다.



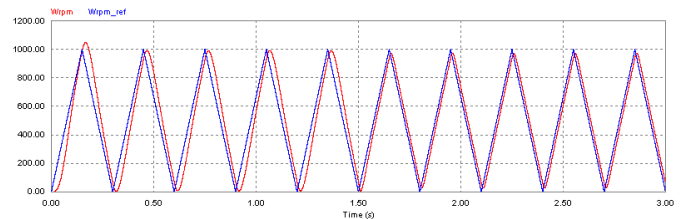
(a) 지령속도와 실제속도



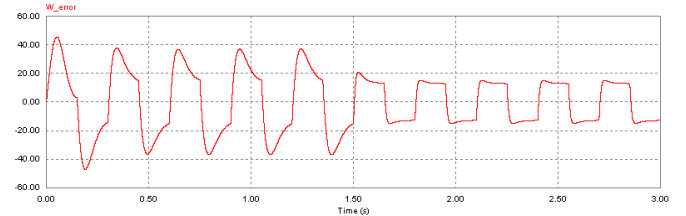
(b) 관성 모멘트 추정

그림 3 관성 추정알고리즘 시뮬레이션

Fig. 3 Simulation result of the inertia estimation method.



(a) 지령속도와 실제속도



(b) 속도 추정오차

그림 4 관성 추정을 이용한 오토튜닝

Fig. 4 Inertia estimation with auto-tuned controller.

참고 문헌

- [1] S.M Yang and Y. J. Deng, "Observer-based inertia identification for auto-tuning servo motor drives", IEEE Industry Application Conf. Vol. 2, pp. 968-972, 2005.
- [2] Awaya I, etc. "New Motion Control with Inertia Identification Function using Disturbance Observer" International Conf. on Industrial Electronics, Control, Instrument and Automation Vol. 1, pp. 77-81, 1992.
- [3] B.K. Bose "Modern Power Electronic and AC Drives", Prentice-Hall 1986
- [4] N. J. Kim, H. S. Moon and D. S. Hyun, "Inertia Identification for the Speed Observer of the Low Speed Control of Induction Machines", IEEE Trans. on Ind. Appl. Vol. 32, pp. 1371-1379, 1996.