

인터넷을 이용한 CNC 선반의 속도 센서리스 토크감시

홍익준*(서울시립대 대학원 기계정보공학과), 권원태(서울시립대 기계정보공학과)

Speed Sensorless Torque Monitoring On CNC Lathe Using Internet

I. J. Hong(Mechanical and Information Eng. Dept. UOS), W. T. Kwon(Mechanical and Information Eng. Dept. UOS)

ABSTRACT

Internet provides the useful method to monitor the current states of the machine tool no matter where a personnel is monitoring them. In this paper, a monitoring method of the torque of the machine tool's spindle induction motor using internet is suggested. The torque of vector controlled induction motor is estimated without speed measuring sensor. Only stator currents are measured to estimate the magnetizing current which is used to calculate flux linkage, rotor velocity and motor torque. Graphical programming is used to implement the suggested algorithm, to monitor the torque of an induction motor in real time and to make the estimated torque monitored on client computers. To solve the fluctuation problem of estimated torque caused from instantly varying rotating speed of an induction motor, the rotating speed is reconstructed based on the measured current signals. Mechanical part of the machine tool is also reconstructed using the data obtained from preliminary experiments. Torque of the spindle induction motor is well monitored on the client computers with 3% error range under various cutting conditions.

Key Words : Induction motor(유도모터), CNC Lathe(CNC 선반), d-q transform(d-q 변환), Vector control(벡터제어), G-program(그래픽프로그램)

1. 서론

공작기계의 절삭력을 측정하는 방법에는 공구 동력계를 이용하여 직접 측정하는 방법이 있으나 거친 기계적 환경에서 견딜수 있는 공구 동력계의 가격이 워낙 비싸고 공구동력계 설치로 인한 강성의 감소로 떨림 현상과 치수 오차 발생에 따른 가공 품질의 저하 등으로 인해 공구 동력계를 이용하는 것이 항상 가능한 것은 아니다.

본 논문에서는 공구동력계를 사용하지 않고 유도전동기의 파라미터와 고정자 전류만으로 절삭력과 속도 정보를 추정하는 새로운 알고리즘을 제안한다. 이 알고리즘은 고정자 전류만을 이용하므로 부가적인 하드웨어를 추가하지 않아도 기존에 설치된 유도전동기 시스템에 바로 적용이 가능하다. 여태까지의 방식은 벡터제어에 의한 목표치의 변화에 의하여 모터토크의 변화를 감시하여 왔으나 목표치와 실제치의 거동에 대한 일치성을 보임으로써 부하에 의한 전체 토크의 변화를 홀 센서를 이용하여 간단히 나타낼 수 있을 뿐만 아니라, 전체시스템이 전류에 대한 식으로 나타낼 수 있는 근거를 제시한

다. 또한 CNC 선반의 주축 드라이브 모델을 이용^(1,2)하여 마찰력 특성을 고려하였다. G-program을 이용하여 네트워크 기반의 제어와 계측이 가능하도록 하였으며 이는 인터넷이 연결된 어디서든지 실시간으로 모니터링 및 제어를 가능하게 해준다.

2. 유도전동기 각속도 및 토크추정

2.1 센서리스 벡터제어

동기 회전 좌표계에서 3상 유도전동기의 d-q 전압 방정식⁽³⁾에서 회전자 자속식은 다음과 같이 표시된다.⁽⁴⁾

$$\lambda_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} = L_m i_{mr} \quad (1)$$

$$\lambda_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (2)$$

여기서 아래첨자 s는 고정자측, r은 회전자측, d는 d축, q는 q축 성분을 각각 나타내며 p는 미분연산자(d/dt)이다. 회전자측 전압은 단락되어 있으므로 0이며 L_m 은 고정자와 회전자의 상호 인덕턴스, i_{mr} 은 자화전류를 나타낸다. 유도전동기에서는 관

축의 기준축인 Φ 축의 회전자 자속을 축에 일치시켜 정렬하면 q 축 회전자 자속(λ_{qr})이 0이 되고 d 축 회전자 자속(λ_{dr})은 일정한 값을 가지게 된다. 그리고 전압방정식을 이용하여 d 축 전류를 계산하여 자화전류를 표현하면 다음과 같다.⁽⁵⁾

$$i_{mr} + \left(\frac{L_r}{R_r}\right) \frac{di_{mr}}{dt} = i_{ds} \quad (3)$$

회전자 q 축 전압방정식을 이용하여 슬립각속도를 구한 식에 식(2)과 식(3)을 대입하여 정리하면 슬립각속도는 다음과 같이 표현된다.

$$\omega_{sl} = \omega - \omega_r = -\frac{R_r \left(-\frac{L_m}{L_r}\right) i_{qs}}{L_m i_{mr}} = \frac{i_{qs}}{\left(\frac{L_r}{R_r}\right) i_{mr}} \quad (4)$$

ω 는 동기속도, ω_{sl} 은 슬립각속도, ω_r 은 전동기 속도를 나타낸다.

동기속도 ω 는 고정자 각 권선에 인입되는 a, b, c 상 전류의 주파수와 같으므로, 슬립각속도의 추정치 ω_{sl} 를 계산하면 전동기 속도 ω_r 를 추정할 수 있다. 따라서 전동기 속도 추정식은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\omega_r = \omega - \omega_{sl} = \omega_e - \frac{i_{qs}}{\left(\frac{L_r}{R_r}\right) i_{mr}} = \omega_e - \frac{L_m i_{qs}}{\left(\frac{L_r}{R_r}\right) \lambda_r} \quad (5)$$

한편, 유도 전동기에 발생하는 전기적 토크를 구하는 식은 다음과 같다.⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} \lambda_r i_{qs} \quad (6)$$

여기서 P 는 극수이다.

식(3)으로 부터 자속은 i_{ds} 에 의해 일정하게 제어될 수 있으며, 식(6)으로 부터 토크는 i_{qs} 에 의해 제어될 수 있음을 알 수 있다.

2.2 마찰 토크 변수들의 결정

모니터링 모델은 기계적인 부분과 전기적인 부분으로 구성되며 기본적인 모델식은 다음과 같다.

$$J \frac{d\omega_r}{dt} + B \omega_r = T_e - T_r \quad (7)$$

여기서 J 는 모터에 의한 총 등가 관성계수[kgm²], B 는 등가 감쇠계수[kgm], T_r 는 모터에 가해지는 총 토크[Nm]이다.

T_r 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_r = T_{fc0} + \delta T_f + T_c = T_{fc0} + \delta T_{fc} + \delta T_{fv} + T_c \quad (8)$$

여기서 T_{fc0} 는 무부하시 쿠울롱 마찰 토크, δT_f 는 절삭부하에 의한 마찰 토크 증가량, T_c 는 절삭 토크, δT_{fc} 는 절삭 부하에 의한 쿠울롱 마찰 토크 증가량, δT_{fv} 는 절삭 부하에 의한 점성 마찰 토크 증가량이다.

무부하시 쿠울롱 마찰 토크(T_{fc0})를 구하기 위해 정상상태($d\omega_r/dt=0$)에서 식(7)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = T_{fc0} + B \omega_r \quad (9)$$

여기서 T_e 와 ω_r 은 측정 가능한 값이므로 두 값에 대한 1차 곡선을 그리면 T_{fc0} , B 의 값을 알 수 있다. B 값은 온도나 습도등의 영향으로 변하는 값이므로 절삭할 때마다 보정해 주어야 한다.

절삭부하에 의한 마찰 토크 증가량(δT_f)를 구하기 위해 9개의 서로 다른 절삭 속도와 절삭깊이로 실험을 수행하였다. 공구는 상용 Si₃N₄계 세라믹 절삭공구를 사용하였으며 공작물은 직경 105mm의 SM45C 탄소강을 사용하였다. 이 실험을 통하여 절삭 토크(T_c)와 절삭부하에 의한 마찰 토크 증가량(δT_f)의 관계를 알 수 있으며 이 데이터를 커브 피팅하여 식(10)의 C와 D의 계수를 알아낼 수 있다. 그리고 속도가 변하더라도 항상 적용하기 위해 C와 D를 주축 속도의 함수로 다시 피팅하였다.

$$\delta T_f = C * T_c + D * T_c^2 \quad (10)$$

3. 실험 및 결과

3.1 실험장치

실험에 사용된 공작기계는 현대자동차 HiT-15 CNC 선반이며 스피들 모터는 SIEMENS사의 1PH6137-4NZ00이며 규격은 다음과 같다.

공구 동력계는 스위스 키슬러사의 9257B 모델이며 전하 증폭기는 키슬러사의 5019A 모델을 사용하였다. U, V, W의 3상 전류는 HIOKI사의 9275 CLAMP ON AC SENSOR를 사용하여 i_{as} , i_{bs} , i_{cs} 를 측정하였다. 고정자 전류신호와 전하 증폭기에서 나오는 절삭력 신호는 A/D 변환보드인 NI-DAQ PCI-MIO16E-4 board를 통해 A/D 변환한 후 586PC에 저장하였고, 객체 지향적 프로그램 작성을 위해 Graphical programming기법인 LabVIEW 6.0i⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾를 사용하여 토크 모니터링 시스템을 구축하였다.

Table 1 Specification of induction motor

Phase/Pole	Rated Power	Rated Current
3phase/4pole	11[kw]	41.8[A]
Rated Speed	Rated Voltage	Rated Frequency
750[1/min]	217[V]	26.3[Hz]

Table 2 Parameter of induction motor

Parameter	실제치
Stator resistance (R_s)	0.134
Rotor resistance (R_r)	0.101
Stator self-inductance (L_s)	0.0419H
Rotor self-inductance (L_r)	0.0423H
Mutual inductance (L_m)	0.04006H
Moment of Inertia (J_m)	0.085 kg · m ²

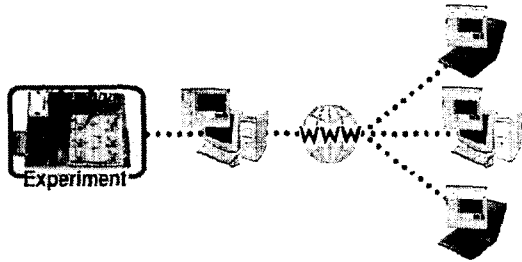


Fig.1 Internet control of a remote laboratory

작성한 프로그램을 월드 와이드 웹(World Wide Web)상에 올리고 익스플로러(explorer)나 넷스케이프(netscape)를 사용하여 Fig. 1 과 같이 지역적으로 멀리 떨어져 있는 기기에 대한 실시간 모니터링 및 제어를 하기 위하여 LabVIEW 에서 제공하는 웹 퍼블리싱 툴(Web Publishing Tool)을 사용하였다.

LabVIEW로 작성한 프로그램은 프론트 패널(front panel)과 블록 다이어그램(block diagram)으로 구성된다. 프론트 패널은 흔히 사용자 인터페이스(user interface)라고 부르며, 여기에서 그래프로 결과값이 표시된다. 또한 측정하고자 하는 채널(channel)수와 샘플링 주기를 조절할 수 있어 데이터 저장용 융통성 있게 할 수 있다. 블록 다이어그램은 소스 코드(source code)가 저장되는 부분이다. 위에서 언급한 프론트 패널을 서버(server)에 연결하여 인터넷으로 모니터링 및 제어를 하게 되는 것이다.

통신을 하기 위해서는 서버와 클라이언트(client)가 있어야 한다. 그리고 클라이언트는 커넥션 타입(connection type)에 따라 두 경우로 나누어진다. 하나는 같은 Web Address로 한명만 접속할 수 있도록 선언하는 것과 또 하나는 여러 사람이 같은 Web Address로 동시에 접속하여 데이터를 받아볼 수 있도록 선언하는 것이다.

네트워크가 연결된 다른 컴퓨터에서 모니터링 및 제어를 하기 위해서는 LabVIEW 런 타임 엔진(Run Time Engine)을 설치한다. 런 타임 엔진은 서버에서 보내는 정보를 클라이언트가 받을 수 있도록 데이터를 확인하고 보내주는 기능을 한다.

웹 서버가 있는 컴퓨터에는 제어할 프로그램을 실행시켜 놓음으로서 컴퓨터 메모리에 정보가 저장되어 다른 컴퓨터에서 이 메모리의 데이터를 불러 볼 수 있다.

3.2 실험 결과

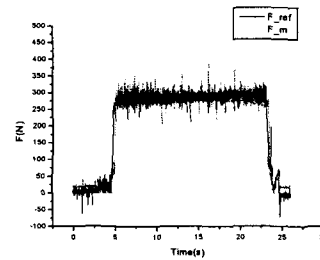


Fig. 2 Estimated and reference cutting force (Material: Gray cast iron, Spindle speed:500rpm, Depth of cut:1 mm)

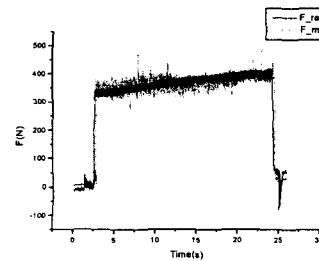


Fig. 3 Estimated and reference cutting force (Material: SM45C steel, Spindle speed:700rpm, Depth of cut:2mm)

실험에 사용된 공구는 상용 Si₃N₄ 계 세라믹 절삭공구이며 Feedrate 는 0.2mm/rev 이다.

Fig. 2 에서 절삭력은 공구동력계로 측정된 절삭력과 추정된 절삭력을 비교해 2.8%의 오차율을 보이고 있으며, Fig. 3 에서는 3.26%의 오차율이 나타났다. Time delay 는 0.3sec 정도로 양호한 결과를 보였다.

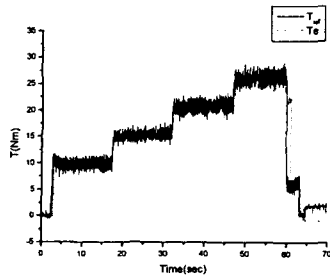


Fig. 4 Estimated and reference cutting torque
(Material:SM45C steel, Spindle speed:1000rpm, Depth of cut:0.5mm,1mm,1.5mm, 2mm)

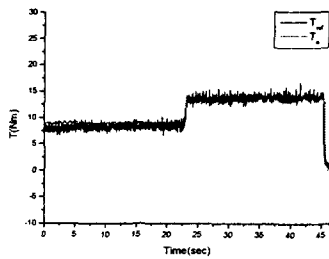


Fig. 5 Estimated and reference cutting torque
(Material:SM45C steel, Spindle speed:1500rpm, Depth of cut:0.5mm,1mm,)

Fig. 5는 공작물에 0.5mm씩의 단을 주어 실험을 한 결과를 나타낸다. 각 단마다 오차율은 조금씩 차이를 보이지만 평균적으로 3%이내의 오차율을 보였다. Fig. 6은 공작물에 0.5mm의 단을 주고 1500rpm에서 실험을 한 결과를 나타낸다. 이 실험에서도 평균 3%이내의 오차율을 보였으며 Time delay는 앞의 실험에서와 마찬가지로 0.3sec 정도로 나타났다.

4. 결론

1) 슬립 각속도를 추정함에 있어 유도전동기에 인입되는 전류신호만을 사용하기 때문에 실제시스템에 적용하기에 매우 편리함을 알 수 있다.

2) 공구나 가공재료, 절삭조건에 관계없이 적용이 가능하다.

3) G-program 을 이용하여 네트워크 기반의 제어와 계측이 가능하도록 하였기 때문에 인터넷이 연결된 어디서든지 실시간으로 모니터링 및 제어가

가능하다.

4) 본 알고리즘을 실제 시스템에 적용하여 실험을 한 결과 정상상태에서의 오차는 평균 3%범위 안에 있으므로 추정값에 대한 신뢰도가 우수한 것으로 판단된다.

참고문헌

- 허건수, 이강규, 김재욱, "CNC 선반에서의 절삭력 감지 시스템 개발", 한국정밀공학회지 제 16 권 제 1 호, 1999.
- Stein, J.L. and Wang, C.H., "Analysis for Power Monitoring on AC Induction Drive Systems," Transaction of ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol.112, pp.239-248, June, 1990.
- Paul C. Krause, "Analysis of Electric Machinery", McGraw-Hill, 1986.
- Peter Vas, "Sensorless vector and direct torque control", Oxford University Press, 1998.
- 박진우, 권원태, "그래픽 프로그래밍 기법을 이용한 주축용 유도전동기의 속도 센서리스 토크 감시", 한국정밀공학회지 accepted for publication
- 설승기, 권봉현, 강준구, "유도전동기의 속도 추정 벡터제어에 관한 연구", 대한전기학회논문지 vol.39, pp. 928-933, 1990.
- 박민호, 설승기, "유도전동기 단자전압, 전류에 의한 속도계산 및 속도제어에 관한 연구", 대한전기학회논문지 vol.35, pp. 445-451, 1986.
- 장현오, "LabVIEW 그래픽프로그램의 이해", (주)ADC 씨시스템, 1998.
- National Instrument, "Data Acquisition Basics Manual, Function Reference", 2000.
- 곽두영, "LabVIEW 컴퓨터 기반의 제어와 계측 Solution", Ohm 사, 2002