

고성능 절삭 추력을 위한 스핀들 전동기의 최대토크운전 분석

권완성, 김영식, Cao Qinbo, 최규하
건국대학교

Inertia Identification Algorithm for Spindle Motor of Machine Tool

Kwon Wan-Sung, Kim Young-Sik, Cao Qinbo, Choi Gyu-Ha
Konkuk University

ABSTRACT

This paper compared with field weakening operation methods for the spindle motor of machine tool in which high speed drive is required. The maximum torque field weakening algorithm ensures the full utilization of the output torque capability of the machine over 1/Wr method. From simulation, the validity of the Max_Te method is confirmed. It is verified that the Max-Te algorithm provided the improved torque capability over 1/Wr method. So, It is applicable to provide high performance control involving fast acceleration and precise speed control for the adjustable speed drive system of spindle.

1. 서 론

공작기계의 구동부는 모두 기계적인 요소들로 구성되어 있어서 각 구성부품들의 가공오차와 더불어 각 부품간의 조립상태, 사용 시간에 따른 마모, 주위 환경의 변화 등으로 인해서 공구와 공작 물과의 상대적인 공칭간격과 실제로 운동하는 거리와의 차이인 오차를 내포하게 되어 정밀도가 떨어지게 된다. 따라서 항공기, 전자 산업에서 알루미늄 합금과 같은 연질 금속 가공물등과 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 높 이려는 연구가 다각도로 시도되고 있으며 이러한 공작기계의 고속화 및 고경도화 연구는 현재 세계적인 추세이며, 이 가운데 자동화 공장의 핵심부를 차지하는 머시닝 센터의 고속화 연구가 그 주류라 할 수 있다. 따라서 빠른 가감속과 고속운전이 요구되는 스핀들 전동기는 일정 출력의 부하 특성을 가지므로 정출력 영역에서의 운전, 즉 약계자 영역에서 원하는 출력 토크를 제대로 얻을 수 있는 약계자 영역에서의 최대토크운전이 필수적이다. 약계자 운전은 고정자 전류를 토크발생 전류성분과 자속발생 전류성분으로 분리하고 독립적인 제어가 가능한 벡터제어방식의 기본적인 특징을 이용하여 전동기의 회전속도가 증가함에 따라 자속발생 전류성분을 감소시킴으로써 구현된다. 일반적으로 유도전동기의 출력 토크는 인버터가 전동기에 공급할 수 있는 최대 전압과 최대 전류로 제한되므로, 약계자 영역에서 이들 제한조건을 만족하면서 전동기의 출력 토크를 최대로 발생시키기 위해서는 고정자 전류에 토크발생 전류성분과 자속발생 전류성분을 최적으로 분배하여 운

전하여야 한다. 이와 같이 일정 출력영역에서 유도전동기의 출력 토크는 약계자 운전을 구현하는 방법에 따라 크게 달라진다. 고전적으로 사용된 약계자 방법은 전동기의 회전속도에 반비례하여 여자전류를 감소시키는 "1/ω_r 방법"이 있다^{[1][2]}. 그러나 이 방법은 회전자의 기준자속이 너무 높기 때문에 회전속도의 증가에 따라 전동기의 역기전력이 급속히 증가하므로 전류제어를 위한 인버터의 여유전압이 점점 부족하게 되어 정확한 전류제어가 불가능해지고 결과적으로 주어진 전압 및 전류조건에서 전동기는 최대 토크를 발생시킬 수 없게 된다. 그러므로 전 약계자 운전영역에서 전동기가 최대 토크를 발생하도록 제어하려면 주어진 전압 및 전류제한조건을 고려한 약계자 제어방법의 적용을 고려해야 한다. 본 논문에서는 공작기계 주축용 스핀들 전동기의 빠른 가감속 운전 및 고속화 운전과 관련하여 일정 토크영역과 일정 출력영역에 이르는 광범위한 속도운전영역에서 최대 토크로 지령속도에 대한 속응성과 응답성 개선을 위한 방안을 제시하고자 1/ω_r 방법과 최대토크 운전기법을 각각 시뮬레이션 비교하여 최적의 방법을 공작기계에 적용하고자 분석하였다.

2. 최대 토크 발생을 위한 최적의 기준전류 결정법

2.1 1/ω_r 기법

약계자 운전을 위한 1/ω_r 방법은 전동기의 회전속도에 반비례하여 자속을 감소시키는 방법이다. 즉, 회전속도의 증가에 따라 회전자의 자속을 감소시키기 위하여 여자전류를 회전속도에 반비례하여 감소시키는 것으로 이때 전류의 정격을 최대한 이용하기 위하여 토크전류를 여자전류가 감소되는 비율만큼 증가시킨다. 이때 결정되는 기준전류는 각각 식(1)과 (2)와 같다.

$$i_{ds}^{e*} = I_{ds_rated} \times \frac{\omega_{base}}{\omega_r} \quad (1)$$

$$i_{qs}^{e*} = \sqrt{I_{s_max}^2 - (i_{ds}^{e*})^2} \quad (2)$$

여기서, ω_{base} : 약계자 운전이 시작되는 속도

I_{ds_rated} : 정격 여자전류

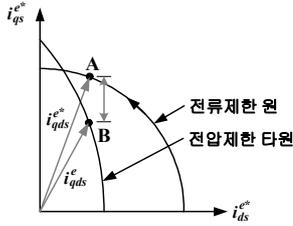


그림 1 $1/\omega_r$ 방법에서의 기준전류벡터
Fig. 1 Reference current vector in the $1/\omega_r$ method.

이와 같이 d-q축 기준전류의 궤적은 회전속도가 증가함에 따라 전류제한을 나타내는 원을 따라 움직이게 되며 이 과정을 그림 1에 나타내었다. 그림 1과 같이 임의의 속도에서 기준전류벡터가 A점에 해당된다면 이것은 전압제한타원의 밖에 존재하므로 전압제한조건을 만족하지 못하게 되고, 이런 이유로 실제의 전류벡터는 기준전류벡터를 추종하지 못하고 B점으로 이동하여 동작하게 된다. 그러므로 전동기는 지령된 기준토크를 발생하지 못하고 이보다 작은 토크를 발생하게 된다^[3].

2.2 전류모델에 의한 최대 토크 운전

임의의 회전속도에서 전압제한조건과 전류제한조건을 동시에 만족하기 위한 기준전류벡터는 전압제한타원과 전류제한원의 내부에 존재해야 한다. 이를 만족하기 위한 기준전류의 조합 중 출력 토크를 최대로 하는 최적의 조합을 구해야 하며, 이들 조합에 영향을 주는 제한조건에 따라서 고속운전영역에서의 약계자 영역을 두 구간으로 나눌 수 있다^[4].

2.2.1 약계자 제 1 영역

이 영역은 약계자 운전이 시작되는 전동기의 기저속도 ω_{base} 로부터 최대 슬립을 발생하는 속도 ω_1 까지의 영역으로 정의한다. 그림 2에서 보는 바와 같이 전압제한조건 및 전류제한조건을 만족하는 영역은 타원과 원의 빗금친 부분이 되는데, 최대 출력 토크를 위한 최적의 기준전류조합은 빗금친 영역 중에서 식(3)을 최대로 하는 점이 된다.

$$T_c^* = \frac{T_c}{\left(\frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m^2}{L_r}\right)} = i_{ds}^* i_{qs}^* \quad (3)$$

그림 3으로부터 최대 출력 토크를 발생하기 위한 최적의 기준전류벡터는 전압제한타원과 전류제한원의 교점인 A점이 된다. 이는 $1/\omega_r$ 방법에 의한 출력 토크보다 큰 출력 토크를 발생시킨다. 이 경우 최대 출력 토크를 위한 최적 기준전류는 식(4)와 (5)같이 구할 수 있다. 전동기의 회전속도가 증가함에 따라 전압제한타원은 점점 작아지므로 식(4)와 (5)같은 최적의 기준전류벡터는 회전속도가 증가할 때 각 전압제한타원과 전류제한원의 교점에 따라 그림 4에 화살표 방향으로 이동하게 된다. 일정 토크영역에서 약계자 영역으로 전이가 일어나는 기저속도 ω_{base} 를 선택하는 방법에 따라 출력 토크는 영향을 받는다. 이 기저속도는 일정 토크영역에서 사용하는 기준자속값에 따라 다소 다르게 선정된다. 그러나 전류제어기가 포화되기 시작하는 점은 전압 및 전류의 제한조건에 따라 달라지기 때문에 이 기저속도는 기준자속값과 함께 전압과 전류의 제한조건에 따라 조절되지 않으면 출력 토크는 저하된다.

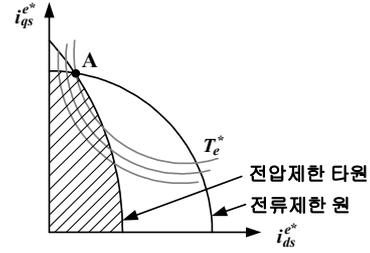


그림 2 약계자 1영역에서 최대토크를 위한 최적의 기준전류
Fig. 2 Optimal current for Max_Te in the 1st field weakening region.

$$i_{ds}^* = \frac{\sqrt{\left(\frac{V_{s,max}}{\omega_e}\right)^2 - (\sigma L_s I_{s,max})^2}}{L_s^2 - (\sigma L_s)^2} \quad (4)$$

$$i_{qs}^* = \sqrt{I_{s,max}^2 - (i_{ds}^*)^2} \quad (5)$$

따라서 이와 같은 조건을 고려한 기저속도는 식 (6)과 같이 도출된다.

$$\omega_{base} = \frac{V_{s,max}}{\sqrt{L_s^2 I_{ds,rated}^2 + (\sigma L_s)^2 (I_{s,max}^2 - I_{ds,rated}^2)}} \quad (6)$$

이 영역에서는 회전속도가 증가함에 따라 여자전류가 감소하여 슬립각속도 ω_{sl} 이 증가한다. 회전속도가 더욱 증가하여 슬립이 최대값에 이르면 약계자 제 2 영역이 시작된다. 최대 슬립과 이때 속도 ω_1 은 전압제한과 전류제한 그리고 식(3)에 의해서 식(7), (8)로 표현할 수 있다.

$$\omega_{sL,max} = \frac{i_{qs}^*}{T_r i_{ds}^*} = \frac{L_s}{T_r \sigma L_s} = \frac{1}{T_r \sigma} \quad (7)$$

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{L_s^2 + (\sigma L_s)^2}{2L_s^2 (\sigma L_s)^2}} \times \frac{V_{s,max}}{I_{s,max}} \quad (8)$$

식(7)로부터 최대 슬립은 전동기의 고정자 권선의 누설계수에 의해 결정된다는 것을 알 수 있다. 또한 식(7)로부터 속도 ω_1 은 누설 인덕턴스뿐만 아니라 전압 및 전류제한조건에 의해 결정된다는 것을 알 수 있다.

2.2.2 약계자 제 2 영역

전동기의 회전속도가 더욱 증가하면 전압제한타원은 계속 줄어들어 그림 3와 같이 전류제한원에 거의 포함되게 되어 최종에는 전압제한조건에 범위는 전류제한조건에 범위에 완전히 포함되며 이 운전 영역에서는 출력 토크가 단지 전압제한조건에 의해서만 결정된다는 것을 의미한다. 이 경우 최대 출력 토크를 위한 최적의 기준전류는 전압제한과 식(3)으로부터 식(9)와 (10)과 같이 정리된다.

$$i_{ds}^* = \frac{V_{s,max}}{\sqrt{2} \omega_e L_s} \quad (9)$$

$$i_{qs}^{e*} = \frac{V_{s,max}}{\sqrt{2} \omega_e \sigma L_s} \quad (10)$$

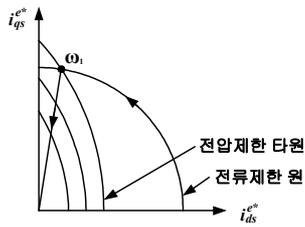


그림 3 약계자 1영역에서 최대토크를 위한 최적의 기준전류
Fig. 3 Optimal current for Max_Te in the 2nd field weakening region.

이 영역이 시작되는 속도 ω_1 은 전압제한조건만을 고려하였을 경우에 최대 출력 토크를 발생시키는 기준전류벡터가 전압제한타원과 전류제한원의 교점과 일치하는 속도이며, 이때 슬립은 최대가 된다. 그러므로 ω_1 이상의 속도에서는 전압제한조건만을 고려하여 출력 토크가 결정된다. 그림 3에서는 이 영역에서 속도의 증가에 따라 전압제한조건을 만족하는 최적 기준전류벡터의 궤적을 도시한 것으로, 약계자 제 2 영역에서는 약계자 제 1 영역에서와는 다르게 최대 슬립을 유지하기 위하여 d축 기준전류가 감소함에 따라 q축 기준전류도 함께 감소하게 된다. $1/\omega_r$ 방법에서는 이러한 조건이 고려되지 않기 때문에 전동기가 불안정한 토크영역에서 운전되고 이러한 결과로 제어가 불안정해지는 원인이 된다.

3. 디지털 시뮬레이션 및 검토

그림 4는 $1/\omega_r$ 기법과 최대 출력 토크 방법의 성능을 비교하기 위하여 표 1에 나타내어진 사용된 스피들 전동기의 정격으로 무부하시 시뮬레이션을 수행하였으며 사용되어진 툴은 Matlab Simulink를 사용하였다. 그림 4는 정격 출력이 7.5[kW]급이고 그림 5은 정격 출력이 11[kW]급이다. 그림에서 보는 것과 같이 $1/\omega_r$ 방법보다 최대 출력 토크 방법이 정격토크영역에서는 별 차이가 없으나 약계자 제 1 영역의 1/3지점부터 지령속도 추정에 대한 차이가 나기 시작하여 고속영역인 약계자 제 2 영역에서 지령속도 추정에 대한 속응성의 차이가 더 차이가 남을 알 수 있다. 이는 약계자 제 2 영역에서 $1/\omega_r$ 기법보다 최대 출력 토크 기법을 사용하였을 경우 출력 토크가 더 크기 때문에 실제 추정 속도도 지령속도에 더 빨리 도달함을 알 수 있다. 이로서 공작기계 주축용 스피들 전동기가 절삭 가공물에 대응하여 $1/\omega_r$ 방법보다 일정 출력영역에서 절삭 추력을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

표 1 스피들 전동기 파라미터
Table 1 Parameter of spindle motor

파라미터 항목	전동기 상수	
Rated Power[kW]	7.5	11
Rated Speed[rpm]	1,500	1,500
Pole	4	4
Rs[Ω]	0.2775	0.05
Rr[Ω]	0.2707	0.015
Ls[H]	0.020417	0.00671
Lr[H]	0.020395	0.00771
Lm[H]	0.019230	0.00655
Jm[kg·m ²]	0.0183	0.0725

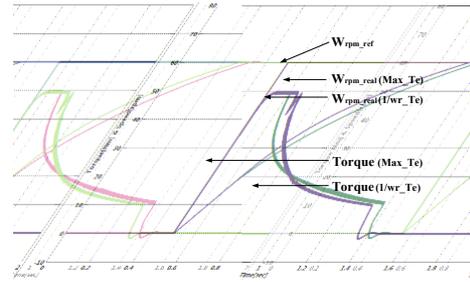


그림 4 $1/\omega_r$ 방법과 최대 출력 토크 방법의 성능 비교(7.5[kW] 스피들)
Fig. 4 Performance comparison Max_Te and $1/\omega_r$ (7.5[kW] Spindle)

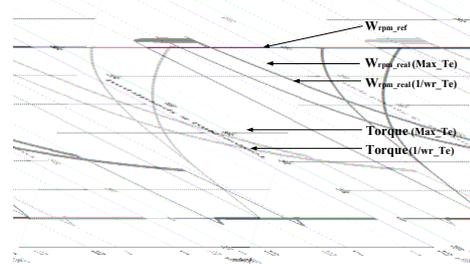


그림 5 $1/\omega_r$ 방법과 최대 출력 토크 방법의 성능 비교 (11[kW] 스피들)
Fig. 5 Performance comparison Max_Te and $1/\omega_r$ (11[kW] Spindle)

4. 결론

본 논문에서는 고속 운전 능력이 요구되는 공작기계 주축용 스피들 구동시스템에서 고속 고정도 가공을 위한 요소기술 확보를 위하여 제한된 전압과 전류로부터 운전 가능한 전압의 영역을 알아내어 이 영역을 만족하면서 스피들 전동기가 최대 토크를 발생하도록 하면서 단시간에 최대 속도에 도달될 수 있도록 하는 최적의 기준전류를 고속의 두 영역에서 각각 구하여, 이에 따라 전동기의 전류를 제어하도록 두가지 방법을 비교 분석하였으며 그 가운데 공작기계용 스피들 전동기에 최대토크 기법을 적용하였을 경우 가공성능이 우수할 것이라고 판단된다.

이 논문은 서울중소기업청의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] R. Joetten and H. Schierling, "Control of the Induction Machine in the Field Weakening Range", IFAC Control in Power Electronics and Electrical Drives, Lausanne, Switzerland, pp. 297-301, 1983.
- [2] R. D. Lorenz and D.B. Lawson, "Flux and Torque Decoupling Control for Field-Weakening Operation of Field-Oriented Induction Machines", IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 26, No. 2, pp. 290-295, Mar./Apr., 1990.
- [3] X. Xu and D.W. Novotny, "Selection the Flux Reference for Induction Machine Drives in the Field Weakening Region", IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 28, No. 6, pp. 1353-1358, Nov.-Dec. 1992.
- [4] 김상훈, "약계자 영역에서 유도 전동기의 최대 토크 운전", 서울대학교 대학원 공학박사학위논문, 1994.