

약계자 영역에서의 스피들 모터 고속운전

박세환* · 윤주만* · 유재성* · 신수철* · 원충연* · 최철** · 이상훈**
 성균관대학교*, OTIS-LG**

High Speed Operation of Spindle Motor in the Field Weakening Region

S.H. Park*, J.M. Yoon*, J.S. Yu*, S.C. Shin*, C.Y. Won*, C. Choi**, S.H. Lee**
 Sungkyunkwan Univ.*, OTIS-LG**

ABSTRACT

This paper presents a strategy to drive built in-type spindle induction motor which is used as CNC (Computer Numerical Control) in the industrial world.

The direct vector control which is robust to the changed machine parameters in the high speed range is used in this motor control method.

And electrical model of induction motor presents the basic idea based on observer structure, which is composed of voltage model and current model. But the former has the defects in low speed range, the latter has the defects of sensitivity to motor parameter. Thus Gopinath model flux estimator which is the closed loop flux observer based on two models for the rotor flux estimation is used in this paper.

Moreover this paper presents to drive the spindle motor in the high speed range by using the flux weakening control.

1. 서 론

산업계 전반에 걸쳐 생산성 향상이 요구됨에 따라 최근 공작기계의 주축 및 이송계의 고속화 필요성이 관심을 받고 있다.

빌트인 스피들 모터는 모터와 스피들이 일체형 구조로 되어 있기 때문에 주축의 고속회전 대응이 유리할 뿐 아니라 콤팩트한 구조로 머시닝 센터용 주축 및 복합 선반용 주축 등으로 그 적용범위가 증가하는 추세이다.⁽¹⁾

본 논문에서는 스피들 모터로서 2.2[kW] 유도전동기를 시뮬레이션과 실험에 사용하였고, 제어 방법으로는 직접 벡터제어 방법을 사용하였다.

그리고 직접 벡터제어에 사용될 회전자 자속은

고피나스 모델 자속추정기를 이용하여 추정한다. 그리고 스피들 모터 특성상 정격 속도 이상의 고속운전을 하기 위하여 약계자 제어를 하였다.⁽²⁾⁽³⁾⁽⁷⁾

실제 CNC 선반에 사용될 스피들 모터는 40,000 [rpm]까지 동작하지만, 시뮬레이션과 실험에 사용된 유도전동기 파라미터상 시뮬레이션에서 15,000 [rpm]까지 구동하였고 실험은 현재 진행중이다.

2. 스피들 모터 알고리즘

2.1 스피들 모터 구동방식

본 논문에서는 스피들 모터의 고속 운전을 위하여 전압과 전류를 이용해 자속을 간접적으로 추정하는 직접 벡터제어 방법을 사용하였고 자속추정기로는 고피나스 모델 자속추정기를 선정하였다.

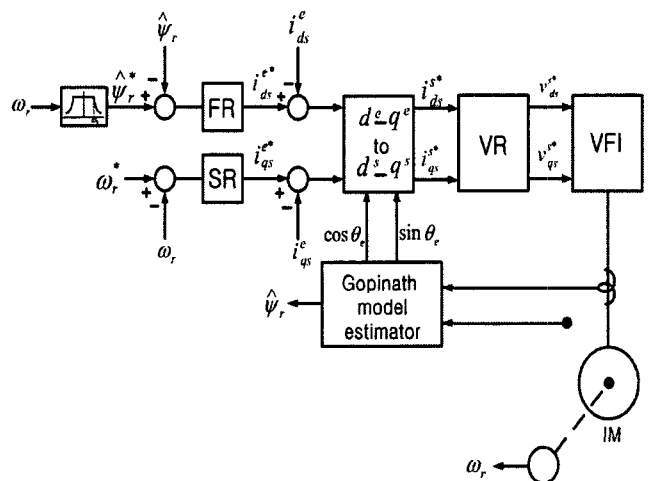


그림 1. 스피들 모터 구동 알고리즘
 Fig.1 Spindle motor operation algorithm

그리고 정격 속도 이상의 고속 운전을 하기 위하여 약계자 제어를 하였다.

2.2 약계자 제어⁽³⁾

약계자 제어란 고정자 전류를 토크발생 전류성분 (i_{qs}^*)과 자속발생 전류성분(i_{ds}^*)으로 분리하여 독립적인 제어가 가능한 벡터 제어 방식이 정격속도가 넘게 되면 약계자 제어하는데 필요하다. 즉 전동기 회전자의 회전속도가 증가함에 따라 자속발생 전류성분을 감소시킴으로써 정격 이상의 더 큰 힘을 얻는 방법이다.

일반적으로 유도전동기의 출력토크는 인버터가 전동기에 공급할 수 있는 최대전압과 전류로 제한된다.

그러므로 약계자 운전영역에서 이들 제한조건을 만족하면서 전동기의 출력토크를 최대로 발생시키려면 고정자 전류에 토크발생 전류성분과 자속발생 전류성분을 최적으로 분해하여 운전하여야 한다.

2.2.1 전압 제한 조건

인버터가 인가할 수 있는 최대 고정자 전압 (V_{smax})은 직류링크 전압 V_{dc} 와 사용된 PWM 기법에 따라 크게 달라진다. 식 (1)은 전압 제한 조건식을 나타낸다.

$$V_{ds}^{e*2} + V_{qs}^{e*2} \leq V_{smax}^2 \quad (1)$$

여기서 벡터제어시 동기좌표계에서 유도전동기의 고정자 전압방정식은 식은 다음과 같으며

$$V_{ds}^{e*} = r_s i_{ds}^{e*} + \sigma L_s \frac{di_{ds}^{e*}}{dt} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\lambda_{dr}^{e*}}{dt} - \omega_e \sigma L_s i_{qs}^{e*} \quad (2)$$

$$V_{qs}^{e*} = r_s i_{qs}^{e*} + \sigma L_s \frac{di_{qs}^{e*}}{dt} + \frac{L_m}{L_r} \omega_e \lambda_{dr}^{e*} + \omega_e \sigma L_s i_{ds}^{e*} \quad (3)$$

약계자 영역에서 정상상태시 간략화 된 고정자 전압방정식은 다음과 같이 나타낸다.

$$V_{ds}^{e*} \approx -\omega_e \sigma L_s i_{qs}^{e*} \quad (4)$$

$$V_{qs}^{e*} \approx \frac{L_m}{L_r} \omega_e \lambda_{dr}^{e*} + \omega_e \sigma L_s i_{ds}^{e*} = \omega_e L_s i_{ds}^{e*} \quad (5)$$

식 (4)과 (5)을 식 (1)에 대입하면 전압 제한 조건식은 다음과 같이 나타낸다.

$$(\omega_e \sigma L_s i_{qs}^{e*})^2 + (\omega_e L_s i_{ds}^{e*})^2 \leq V_{smax}^2 \quad (6)$$

2.2.2 전류 제한 조건

인버터가 전동기에 인가할 수 있는 최대 고정자 전류(I_{smax})는 인버터의 전류 정격과 전동기의 열 정격에 의해 결정된다. 식 (7)는 전류 제한 조건식을 나타낸다.

$$i_{ds}^{e*2} + i_{qs}^{e*2} \leq i_{max}^2 \quad (7)$$

2.2.3 제어 가능한 기준전류의 영역

그림 2는 전압제한타원을 나타내며 제어 가능한 기준전류의 영역은 운전주파수 ω_e 의 함수인 타원의 내부로 주어진다. 이 타원의 영역은 운전 주파수 증가에 따라 점점 작아지며 이는 제어 가능한 기준전류의 범위가 줄어든다는 것을 나타낸다.

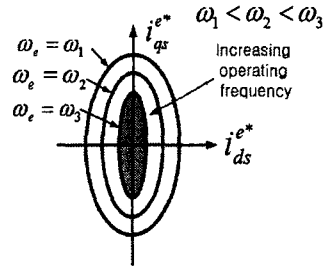


그림 2. 전압 제한 타원
Fig.2 Voltage-limit ellipse

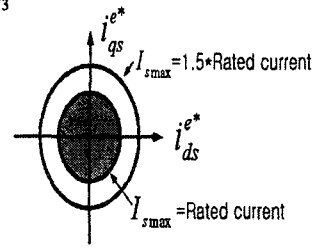


그림 3. 전류 제한원
Fig.3 Current-limit circle

그림 3은 전류제한원을 나타내며 전류 제한 조건하에서 제어 가능한 전류의 영역은 I_{smax} 를 반지름으로 하는 원의 내부로 표현된다.

그림 4는 전압과 전류의 두 제한 조건을 모두 고려한 경우의 제어 가능한 기준전류 영역으로서 전압제한타원과 전류제한원의 공통된 영역이다.

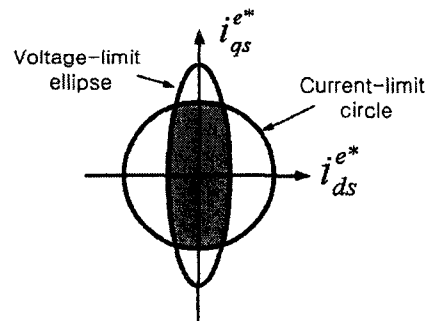


그림 4. 전압 제한 타원과 전류 제한원의 공통영역
Fig.4 Common region between voltage-limit ellipse and current-limit circle

2.3 고피나스(Gopinath) 자속추정기⁽⁷⁾

일반적으로 역기전력이 큰 고속영역에서는 고정자전압을 적분하여 구한 전압모델이 유리하고 역기전력이 작은 저속영역에서는 회전자 회로를 이용한 전류모델이 유리하다.

이렇게 저속에서 우세한 전류모델과 고속에서 우세한 전압모델을 함께 사용하는 것이 고피나스(Gopinath) 모델 자속추정기이다.

그림 5에서 보면 회전자 자속이 PI제어기의 주파수대역 보다 낮은 주파수에서는 전류모델에서 추정된 자속으로 따라가고, 높은 주파수에서는 전압모

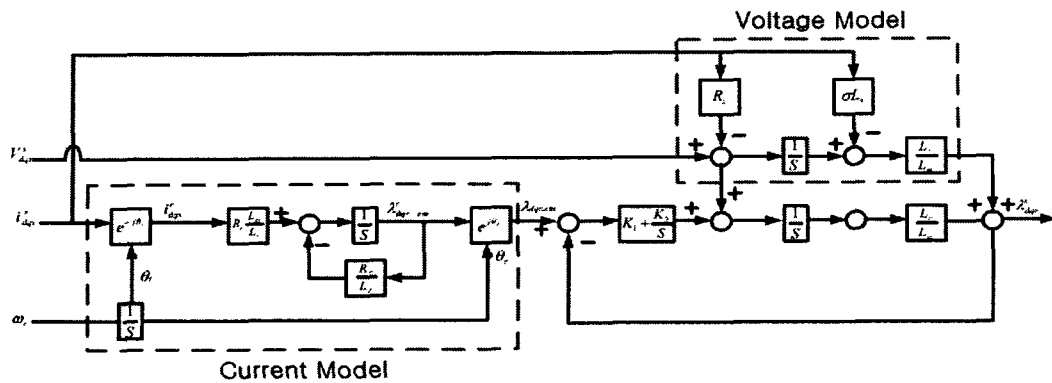


그림 5. 고퍼나스 모델 자속추정기
Fig.5 Gopinath model flux estimator

델에서 추정된 자속을 따라간다.

이것을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\hat{\lambda}_r^s = \frac{s^2}{s^2 + K_p s + K_i} \lambda_{r-vm}^s + \frac{K_p s + K_i}{s^2 + K_p s + K_i} \lambda_{r-cm}^s \quad (8)$$

식 (8)에서 보면 전류모델에서 구한 자속에 LPF (Low Pass Filter)가, 그리고 전압모델에서 구한 자속에 HPF(High Pass Filter)가 각각 곱해진 형태로 재해석 될 수 있다.

이 경우, PI제어기의 이득을 2차 butterworth 필터의 개념으로 설계하면 ω_c (차단각 주파수)를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_p = \sqrt{2}\omega_c, \quad K_i = \omega_c^2 \quad (9)$$

3. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 구성

그림 6은 Built-in type 스펀들 모터 구동을 위한 전체 제어시스템의 시뮬레이션 블록도이다. 시뮬레이션 툴로는 Matlab을 사용하였다.

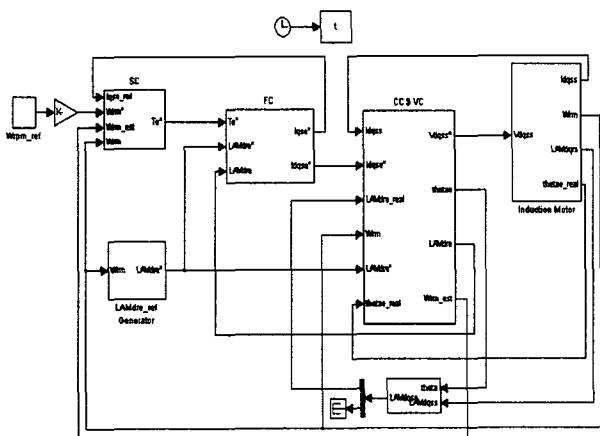


그림 6. 시뮬레이션 전체 블록도
Fig.6 Overall simulation block diagram

시뮬레이션에서는 스펀들 모터로 2.2[kW] 유도전동기를 사용하였으며 고퍼나스 모델 자속추정기를 이용한 직접 벡터제어를 사용하여 0[rpm]부터 15,000[rpm]까지 구동하였다.

표 1에 시뮬레이션에서 사용된 유도전동기의 파라미터를 나타내었다.

표 1. 유도전동기 파라미터
Table 1. Induction motor parameter

정격출력	2.2(kW)	Rs	2.3562(Ω)
정격전압	180(V)	Rr	0.2839(Ω)
정격전류	10.71(A)	Ls	146.8(mH)
극수	4	Lr	148.9(mH)
정격주파수	50(Hz)	Lm	142.75(mH)
정격속도	1,460(rpm)	J	0.035(kg • m ²)

3.2 시뮬레이션 결과

그림 7은 계단 속도지령에 대한 속도 응답특성의 시뮬레이션 결과이다.

속도제어에서 기준속도 변화에 대한 시스템의 과도 응답 특성을 살펴보기 위한 시뮬레이션으로서, 무부하 상태에서 기준속도를 t=0.5초에 15,000[rpm]

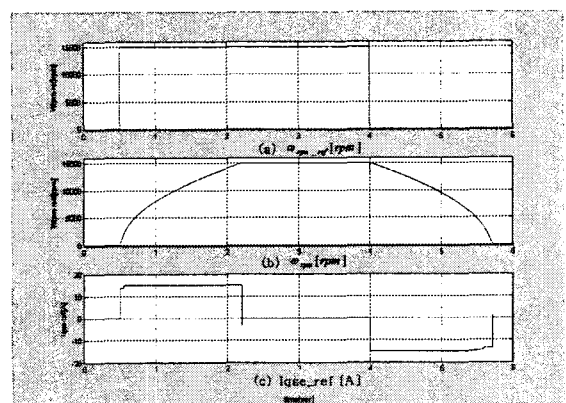


그림 7. 속도 제어기 특성
Fig.7 Feature of Speed Controller

으로 스텝기동하고, $t=4$ 초에서 0[rpm]으로 스텝 감속하였을 경우의 응답특성이다.

(a)는 속도 지령치 (b)는 실제속도파형 (c)는 이에 상응하는 q축 전류 지령치를 보여준다. 시뮬레이션 결과로 0[rpm]부터 15,000[rpm]까지 잘 수행됨을 알 수 있다.

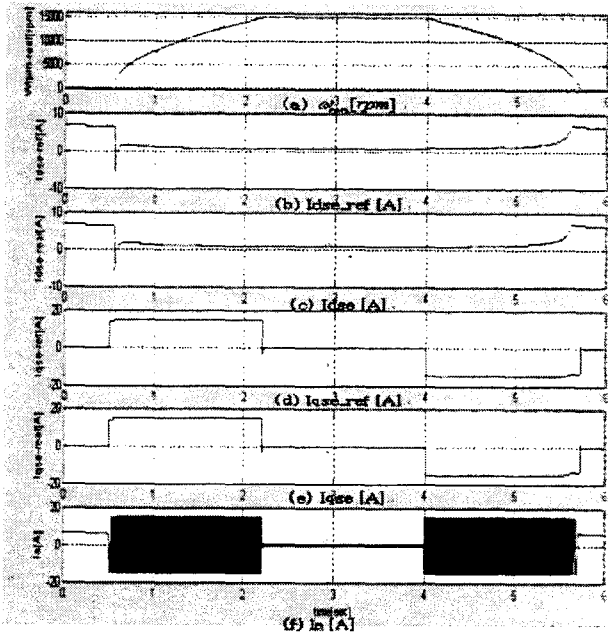


그림 8. 전류 제어기 특성
Fig.8 Feature of Current Controller

그림 8은 동기좌표계상에서의 d-q축 전류제어특성을 보여준다. (a)는 전동기속도, (b)는 동기좌표계 d축 전류 지령치, (c)는 동기좌표계 d축 전류, (d)는 동기 좌표계 q축 전류 지령치, (e)는 동기좌표계 q축 전류, (f)는 실제전류가 전류 지령치를 잘 추종하는 것을 보여준다.

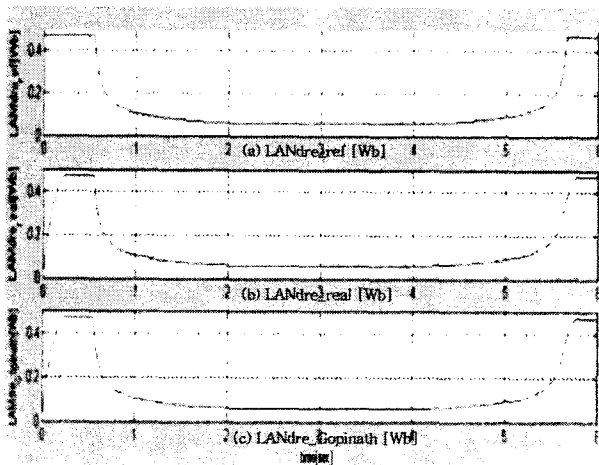


그림 9. 약계자 영역에서의 자속추정
Fig.9 Flux Estimation in the Field Weakening Region

그림 9는 약계자 영역에서의 자속추정기의 특성을 보여준다. (a)는 정격속도 이상에서의 d축 자속 지령치, (b)는 d축 실제 자속치, (c)는 고퍼나스 모델을 이용한 회전자 자속추정치이다.

이 결과로 속도가 변화하는 중에서도 자속 추정은 안정하게 동작함을 알 수 있다.

4. 실험

실험에 사용중인 스피들 모터는 정격 속도가 1,460[rpm]인 2.2[kW] 유도전동기이다.

현재 실험 중이며 그림 10은 실험을 위하여 제작된 실험셋트의 전체 시스템 구성 블록도이다.

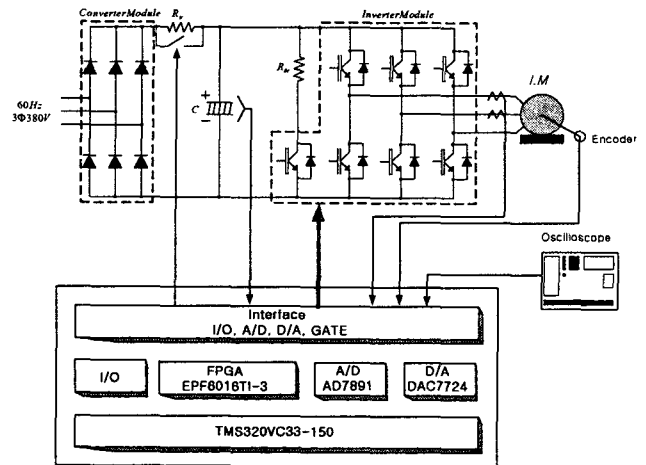


그림 10. 전체 시스템 구성 블록도
Fig.10 The Whole System Block

실험에서는 정격 속도 이상에서 약계자 제어를 이용하여 8,000[rpm]까지 동작시켰다. 그림 11과 그림 12는 현재까지의 실험 결과 파형이다.

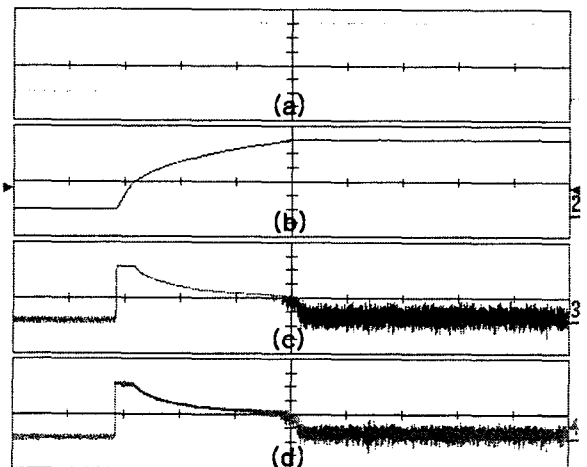


그림 11. 토크성분 전류 파형
Fig.11 Torque axis current wave form

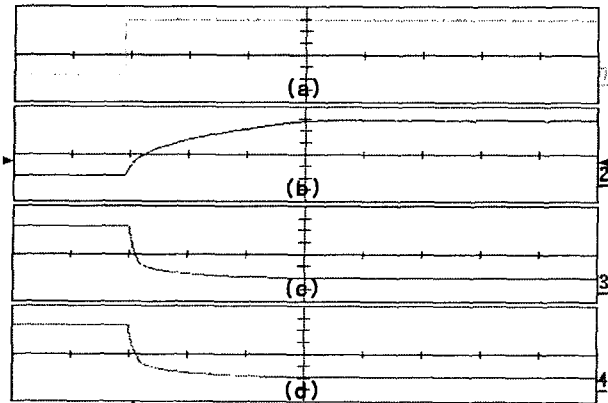


그림 12. 자속성분 파형
Fig.12 Flux component wave form

그림 11은 속도에 따른 토크분 전류 성분을 나타낸 것으로 (a)는 속도 지령치를 나타내며 (b)는 실제 회전자 속도파형, 그림 (c)는 토크분 전류 지령치, 그림 (d)는 실제 토크성 전류파형을 나타낸다.

8,000 [rpm]의 속도 지령치를 주었을때 실제 회전자 속도는 잘 따라가며 실제 토크분 전류도 토크분 전류 지령치에 잘 추정되는 것을 볼 수 있다.

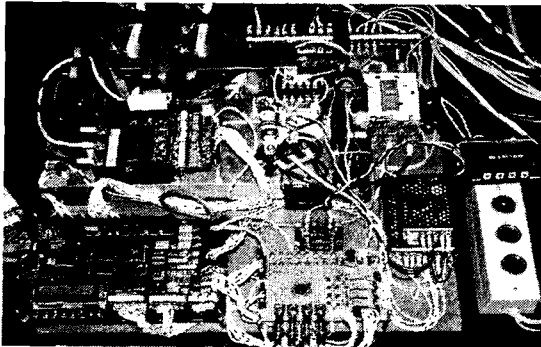


그림 13. 스피들 모터 제어 보드
Fig.13 Control board of spindle motor



그림 14. 스피들 모터
Fig.14 Spindle motor

그림 12는 속도에 따른 자속 성분을 나타낸 것이다. (a)는 속도 지령치, (b)는 실제 회전자 속도파형, (c)는 자속 지령치, (d)는 실제 자속파형을 나

타낸다.

속도 지령치를 8,000[rpm]으로 주었을 때 자속 파형을 보면 정격속도인 1,460 [rpm] 이상에서 약 계자 제어가 잘되는 것을 볼 수 있다.

그림 13과 그림 14는 각각 제작한 스피들 모터 제어 보드와 실험에 사용중인 스피들 모터(2.2kW 급)이다.

5. 결 론

본 논문은 산업계에서 많이 사용되고 있는 Built in-type 스피들 유도전동기 구동시스템을 설계하고 제작하여 다음의 결과를 얻었다.

스피들 모터를 구동하는데 있어서 제어 방법으로 간접 벡터제어 보다 전동기 상수, 특히 회전자 시정수의 변동에 강인한 직접벡터제어를 사용하였다.

그리고 저속에서 유리한 전류모델과 고속에서 유리한 전압모델을 함께 이용한 고퍼나스 모델 자속추정기를 이용하여 회전자 자속을 추정하였고 정격속도 1,500[rpm]부터 고속영역 8,000 [rpm]까지 약계자 제어를 하였다.

현재 시뮬레이션에서는 스피들 모터를 15,000[rpm]까지 약계자 운전을 하였으며 실험은 진행중이다.

이 논문은 산업자원부의 중기거점사업 일환으로 진행되고 있는 "IT 기반 나노제어 시스템 개발" 사업의 지원을 받아 연구되었습

참 고 문 헌

- [1] T. Kume, et al, "A 40,000rpm Induction motor and its Control Strategy for Machine Tool Spindle drive", Conference Record of IPEC-Tokyo' 90, pp. 1132-1136.
- [2] B.K. Bose, "Modern Power Electronics and AC Drives"
- [3] S.H. Kim, and S.K. Sul, "Voltage Control Strategy for Maximum Torque Operation of an Induction Machine in the Field-Weakening Region" IEEE, Trans on Ind, Volume: 44, Issue: 4, Aug. 1997, pp. 512 - 518
- [4] Tugutoshi Ohtani, Hideki Takasaki "High performance vector control of induction motor using torque producing current", Conference Record of IPEC-Tokyo '90, pp. 61, 84-90.
- [5] 한성용, 윤주만, 박세환, 원충연, 김영렬, 최철, 이상훈, "Built-in Type 스피들 구동을 위한 제어방법에 관한 연구" 전력전자학회 추계학술대회 논문집 2003, 11, pp.51-55
- [6] T. Kume, et al, "High speed Vector Control without Encoder for a High Speed Spindle Motor", Conference Record of the 1990 IEEE, 7-12 Oct. 1990 pp. 390-394 vol.1
- [7] J.H. Kim, J.W. Choi, and S.K. Sul, "Novel Rotor Flux Observer using Observer Characteristic Function in Complex Vector Space for Field-Oriented Induction Motor Drives", IEEE Trans. IA. vol. 38, no. 5, pp. 1334-1343, Sep/Oct 2002.