

스핀들용 유도전동기 센서리스 벡터제어에 관한 연구

(A study on Sensorless Vector Control for Spindle Induction Motor)

박세환* · 윤주만* · 유재성* · 신수철* · 원충연* · 최철** · 이상훈**

(S.H. Park · J.M. Yoon · J.S. You · S.C. Shin · C.Y. Won · C. Choi · S.H. Lee)
(Sungkyunkwan Univ.* · OTIS-I.G**)

Abstract

A new control method of spindle induction motor drive is proposed in this paper. In a conventional control method, the vector control was employed in the low speed range, while the constant V/f(volt-per-hertz) PWM control was employed in the high speed range. The two control modes were automatically selected at an intermediate speed. In a proposed control method, the direct vector-control with an encoder is employed in the low speed range(from 0 to 8,000rpm), and the vector control without an encoder is employed in the high speed(from 8,000 to 15,000rpm) by using flux observer and speed estimator.

This paper describes problem of control method in a conventional spindle induction motor drive and proposes control method as variation of motor speed.

1. 서 론

산업의 발전과 더불어 생산성이나 품질의 향상을 목적으로 전동기 가변속 구동에 대한 필요성이 증대되고 있다. 특히 공작기계, 스펀들드라이브와 같은 가변속 구동분야에 있어서 전동기의 운전영역은 정격속도 이상의 영역에서 운전을 한다.

최근에 디지털 기술과 전력용 반도체 소자의 발달로 인하여 스펀들용 유도전동기 벡터제어에 의해 고성능 가변속 제어 및 토크 제어가 가능하다. 그러나 40,000[rpm]의 고속으로 운전하는 스펀들 유도전동기의 특성상 20,000[rpm] 이상의 속도영역에서는 측정할 수 없는 속도센서가 없어서 V/f 제어를 하거나 센서리스 제어로 운전을 하였다.

그러나 V/f 제어 방법은 제어 시스템의 하드웨어와 구동 알고리즘이 간단하여 그 구현이 매우 용이하나 가변속 제어 성능이 매우 떨어지며, 근본적으로 open-loop 형태의 제어 방식이기 때문에 부하 변화에 의한 전동기의 속도 변동을 보상할 수 없다는 단점을 가지고 있다.

그래서 본 논문에서는 고속에서의 스펀들용 유도전동기의 제어를 위해서 고속 영역에서 센서리스 방법을 적용하였다. 대상 모터는 기존의 40,000[rpm] 속도 구간을 대신하여 15,000[rpm]의

속도 범위 내에서 운전하였다. 또한 오타니(Ohtani)가 제시한 자속 관측기와 로렌즈 교수가 제시한 고퍼나스 자속 관측기를 이용하여 약계자 영역에서의 센서리스 제어를 구현하였다. 두 관측기의 제어 특성과 속도 추정기의 성능을 시뮬레이션을 통하여 검증 및 분석하였다.

2. 본 론

2.1. 기존의 스펀들 모터의 구동방식

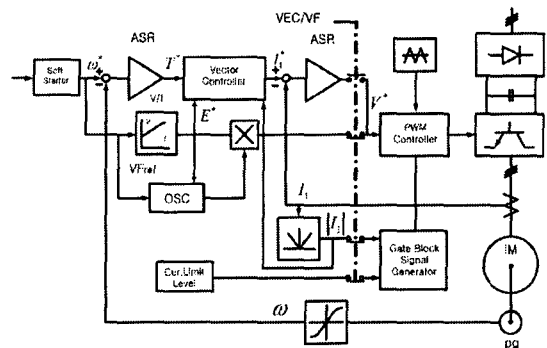


그림 1 기존의 스펀들 모터 구동 알고리즘
Fig.1 Conventional spindle motor operation algorithm

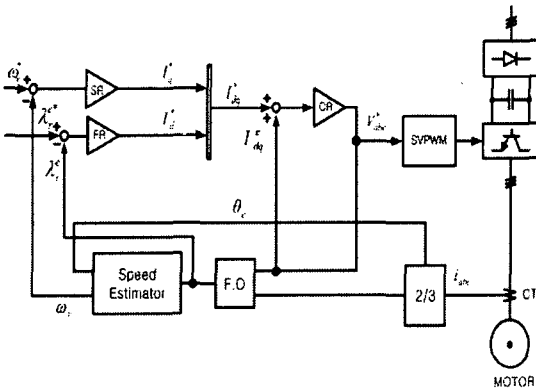
일반적인 스피들 유도전동기의 구동 방법은 0~20,000[rpm]까지는 엔코더의 위치정보를 이용한 벡터제어를 수행하고, 20,000[rpm] 이상의 영역에서는 모드를 바꾸어 엔코더 정보에 의지하지 않고 open-loop 형태인 V/f 제어를 한다.

V/f 제어 방법은 구현이 단순하고 별도의 센서 없이도 운전이 가능하므로 제작상의 경제성이 뛰어나나 자속의 크기만을 제어하므로 자속과 토크를 효율적으로 나누어 제어할 수 없다.

즉 저속운전이 불안정하고 순간적인 응답성이 떨어져서 고성능제어에는 사용할 수 없다.

그러므로 속도 센서가 없는 센서리스 제어에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

2.2. 제안한 스피들 모터의 구동방식



SR : Speed regulator

FR : Flux regulator

그림 2 제안된 스피들 모터 구동 알고리즘

Fig.2 Proposed spindle motor operation algorithm

본 논문에서는 스피들 모터 구동을 위한 제어방법을 속도에 따라 달리 하게 된다. 정격속도까지는 자속추정기를 이용하여 이 자속으로부터 회전자자속의 위치를 파악하는 직접벡터제어 방법을 사용하였고, 정격속도 이상에서는 오타니 자속 관측기와 고퍼나스 자속 관측기에서 구하여진 자속을 속도 추정기에 이용한 센서리스 제어 방법을 사용하였다. 여기에 사용된 속도 추정기는 자속각과 제어각을 직접 이용하여 구현하였다.

2.2.1 자속관측기

추정된 고정자전압과 전류를 이용하여 고정자전압 방정식에서 고정자 자속을 구하고 식 (2)에서 회전자 자속을 계산한다.

$$\lambda_s^s = \frac{1}{s}(\mathbf{v}_s^s - r_s \mathbf{i}_s^s) \quad (1)$$

$$\hat{\lambda}_r^s = \frac{L_r}{L_m}(\lambda_s^s - \sigma L_s \mathbf{i}_s^s) \quad (2)$$

$$\hat{\lambda}_r^s = \frac{L_r}{L_m} \left[\frac{1}{s}(\mathbf{v}_s^s - r_s \mathbf{i}_s^s) - \sigma L_s \mathbf{i}_s^s \right] \quad (3)$$

여기에서 λ_r^s 는 정지좌표계의 회전자 자속을 나타낸다.

2.2.2 오타니 자속관측기⁽⁴⁾⁽⁵⁾

식 (3)을 이용하여 자속을 구할 경우 순수적분에 의하여 읍셋에 의한 발산으로 직접 사용할 수 없으므로 식 (4)와 같이 고주파 통과필터를 이용하여 사용할 수 있다.

$$\hat{\lambda}_r^s = \frac{s}{s + \omega_c} \frac{L_r}{L_m} \left[\frac{1}{s}(\mathbf{v}_s^s - r_s \mathbf{i}_s^s) - \sigma L_s \mathbf{i}_s^s \right] \quad (4)$$

식 (4)의 경우 차단각 주파수 ω_c 이하에서는 사용이 불가능하므로 자속지령 λ_r^s 에 저주파 통과필터를 사용하면 다음과 같다.

$$\hat{\lambda}_r^s = \frac{1}{s + \omega_c} \frac{L_r}{L_m} (\mathbf{v}_s^s - (r_s + \sigma L_s s) \mathbf{i}_s^s) + \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \lambda_r^{s*} \quad (5)$$

식 (5)에서 추정된 각과 회전자 자속지령의 진폭이 정확한 경우, 전압모델의 고주파 통과필터에 의하여 보상된다.

전압 모델을 이용하여 구한 식 (3)의 λ_r^s 를 $\lambda_{r_vm}^s$ 이라고 정의하면 식 (5)는 다음과 같다.

$$\hat{\lambda}_r^s = \frac{s}{s + \omega_c} \lambda_{r_vm}^s + \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \lambda_r^{s*} \quad (6)$$

2.2.3 고퍼나스 자속관측기

회전자 전압방정식을 회전자 자속과 고정자 전류로 표현하면 다음과 같다.

$$p \lambda_r^s = - \left[\frac{R_r}{L_r} - j \omega_r \right] \lambda_r^s + R_r \frac{L_m}{L_r} i_s^s \quad (7)$$

전류모델에서 구한 λ_r^s 를 $\lambda_{r_cm}^s$ 이라고 정의하고 식 (3)과 식 (7)을 이용하여 고퍼나스 모델의 자속관측기를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{\lambda}_r^s = \frac{s^2}{s^2 + K_p s + K_i} \lambda_{r_vm}^s + \frac{K_p s + K_i}{s^2 + K_p s + K_i} \lambda_{r_cm}^s \quad (8)$$

식 (8)은 전압모델에 고주파 통과필터가, 전류모델에

는 저주파 통과필터와 대역 통과필터가 곁해진 형태로 볼 수 있으며 전류모델에서 전압모델로 전이되는 주파수를 필터의 차단각주파수로 해석하여 PI제어기의 이득을 2차 Butterworth 필터의 개념에서 설계하면 $K_p = \sqrt{2}\omega_c$, $K_i = \omega_c^2$ 이다.

식 (8)에서 $\lambda_{r_cm}^s$ 을 λ_r^s 로 두면 식 (9)와 같고 이는 속도 센서리스제어에 사용할 수 있다.

$$\hat{\lambda}_r^s = \frac{s^2}{s^2 + K_p s + K_i} \lambda_{r_vm}^s + \frac{K_p s + K_i}{s^2 + K_p s + K_i} \lambda_r^s \quad (9)$$

이는 식 (6)의 오타니 모델과 비교하면 오타니 모델은 1차필터를 고티나스 모델은 2차필터를 적용한 형태이며 그림 3은 오타니 모델과 고티나스 모델의 자속관측기이다.

이 두 모델은 필터의 차수의 차이만 있으며 동일한 구조를 가진다.

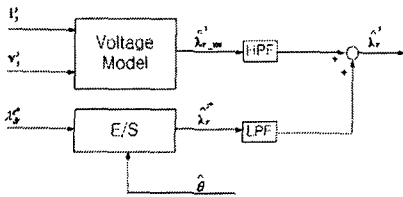


그림 3 오타니 모델과 고티나스 모델의 자속관측기
Fig.3 Flux observer of Ohtani model and Copinath model

2.2.4 속도 추정기

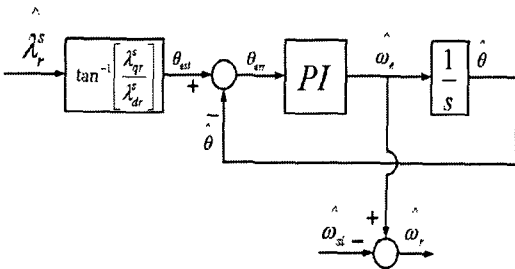


그림 4 자속각과 제어각을 이용한 속도추정기
Fig.6 Speed estimator using flux angle and control angle

그림 4는 자속각과 제어각을 직접 이용한 속도추정기이다. 자속관측기에서 관측된 자속에서 θ_{est} 와 속도 추정기에서 구한 $\hat{\theta}$ 의 차이를 PI제어하여 동기속도와 제어각을 구한다.

그림 4에서 자속각과 제어각의 관계를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\hat{\theta} = \frac{K_p s + K_i}{s^2 + K_p s + K_i} \theta_{est} \quad (10)$$

식 (10)에서 $K_p = 2\xi\omega_n$, $K_i = \omega_n^2$ 으로 두고 ξ 와 ω_n 을 오버슈트가 없으며 속도제어기와 비슷한 차단각 주파수를 갖게 설계한다.

2.3. 시뮬레이션

2.3.1 시뮬레이션 구성

그림 5는 Built-in type 스피들 모터 구동을 위한 전체 제어시스템의 시뮬레이션 블록도이다.

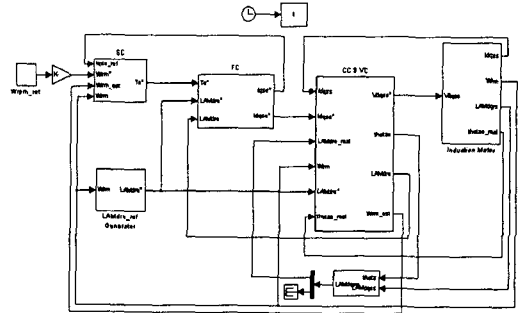


그림 5 시뮬레이션 전체 블록도
Fig.5 Overall simulation block diagram

기본적인 직접백터제어 시스템에서 속도가 증가하여 8,000[rpm]이상부터는 속도센서가 없는 센서리스 제어시스템이 활성화된다.

시뮬레이션에서는 3마력 유도전동기가 사용되었으며 표 1에 시뮬레이션에 사용된 유도전동기의 파라미터를 나타내었다.

표 1. 유도전동기 파라미터
Table 1. Induction motor parameter

| | | | |
|-------|------------|----------------|--------------------------|
| 정격출력 | 2.2[kW] | R _s | 2.135[Ω] |
| 정격전압 | 180[V] | R _r | 0.774[Ω] |
| 정격전류 | 10.71[A] | L _s | 78.781[mH] |
| 극수 | 4 | L _r | 80.823[mH] |
| 정격주파수 | 60[Hz] | L _m | 74.496[mH] |
| 정격속도 | 1,460[rpm] | J | 0.02[kg·m ²] |

2.3.2 시뮬레이션 결과

그림 6은 계단 속도지령에 대한 속도 응답특성의 시뮬레이션 결과이다. 속도제어에서 기준속도

변화에 대한 시스템의 과도 응답 특성을 살펴보기 위한 시뮬레이션으로서, 무부하 상태에서 기준속도를 $t=0.5$ 초에 15,000[rpm]으로 스텝기동하고, $t=4$ 초에서 0[rpm]으로 스텝 감속하였을 경우의 응답특성을 시뮬레이션 한 결과 파형이다. (a)는 속도 지령치 (b)는 실제속도파형 (c)는 이에 상응하는 q축 전류 지령치를 보여준다.

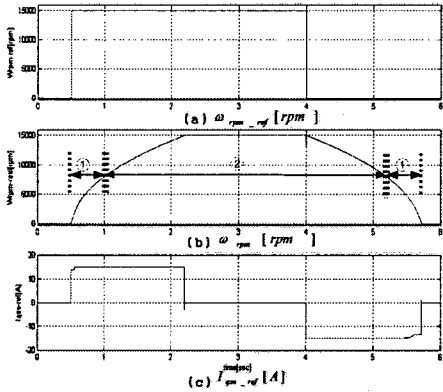


그림 6 속도 제어기 특성

- (a) 속도 지령치
- (b) 실제 속도 파형
- (c) q축 전류 지령치

그림 6(b)에서 영역 ①은 직접벡터제어 방식으로 운전하고 있으며, 영역 ②는 8,000[rpm]이상에서 센서리스 벡터제어로 운전하고 있다.

시뮬레이션 결과로 저속영역에서의 직접벡터제어와 고속영역인 8,000[rpm] 이상에서의 센서리스 벡터제어로 가변속 제어가 잘 수행됨을 알 수 있다.

그림 7의 (a)는 회전자 실제 속도이며, (b)는 8,000[rpm] 이상에서 자속 관측기와 속도 추정기를 사용하여 회전자 속도를 추정된 파형이다. (c)는 실제 회전자 속도와 추정된 속도의 오차로서 갑작스런 임펄스 형태의 오차가 발생하나, 속도제어에 있어 큰 영향은 없다. 실제 속도와 추정된 속도의 오차가 평균 10[rpm] 이하로 센서리스 알고리즘이 잘 수행됨을 알 수 있다.

그림 8은 동기좌표계상에서의 d-q축 전류제어특성을 보여준다. (a)는 전동기 속도, (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 9는 전동기를 무부하 상태에서 기준속도를 $t=0.5$ 초에서 15,000[rpm]으로 스텝기동하고, $t=4$ 초

에서 0[rpm]으로 줄였을 경우의 약계자 영역에서의 자속기준치의 변화와 회전자 d축 자속, d축 전류 지령치를 보여준다. 여기서 회전자 d축 자속은 자속 기준치에 잘 추종함을 볼 수 있다.

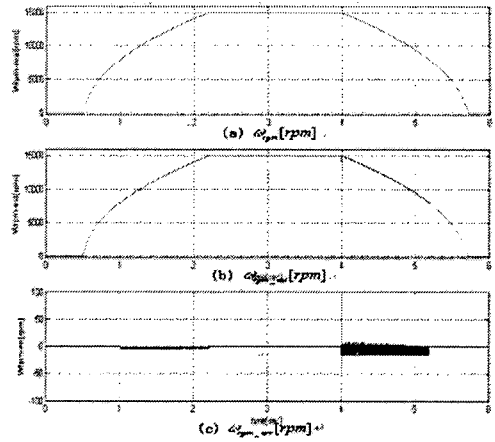


그림 7 속도 응답과 속도 추정

- (a) 회전자 실제 속도
- (b) 회전자 속도 추정 파형
- (c) 실제 회전자 속도와 추정 속도 오차

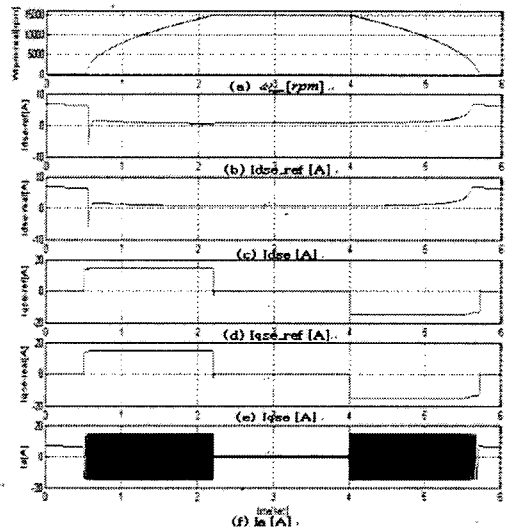


그림 8 전류 제어기 특성

- (a) 전동기 속도
- (b) 동기좌표계 d축 전류 지령치
- (c) 동기좌표계 d축 전류
- (d) 동기좌표계 q축 전류 지령치
- (e) 동기좌표계 q축 전류
- (f) 전동기 전류

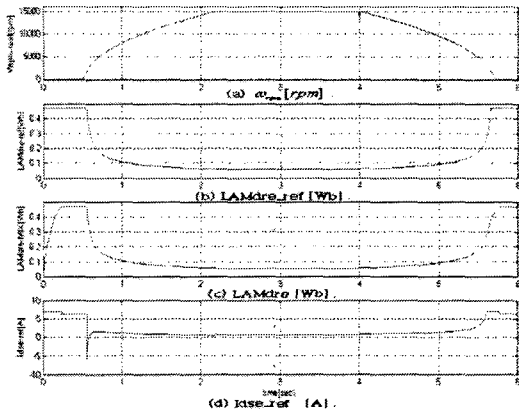


그림 9 자속제어기 특성

- (a) 전동기 속도
- (b) 자속 지령치
- (c) 전압, 전류 모델 자속
- (d) d축 자속 지령치

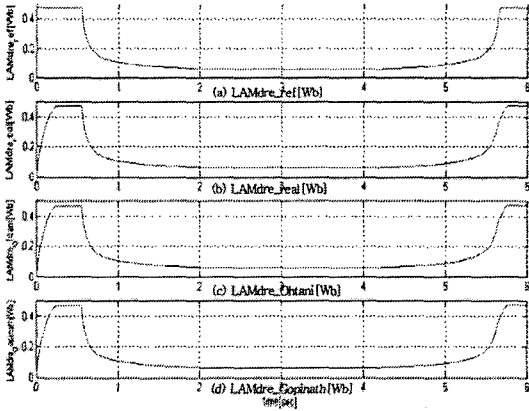


그림 10 약계자 영역에서의 자속추정

- (a) d축 자속 지령치(정격속도 이상)
- (b) d축 자속
- (c) 오타니 모델 자속추정치
- (d) 고프나스 모델 자속추정치

그림 10은 약계자 영역에서의 자속추정기의 특성을 보여준다. (a)는 정격속도 이상에서의 d축 자속지령치, (b)는 d축 실제 자속치, (c)는 오타니 모델을 이용한 회전자 자속추정치, (d)는 고프나스 모델을 이용한 회전자 자속추정치이다.

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

2.4 실험결과

현재 실험 중이며 그림 11과 그림 12는 지금까지의 실험결과이다.

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

실험에서 정격 속도 이상에서는 약계자 제어를 이용하여 5,000[rpm]까지 동작시켰다.

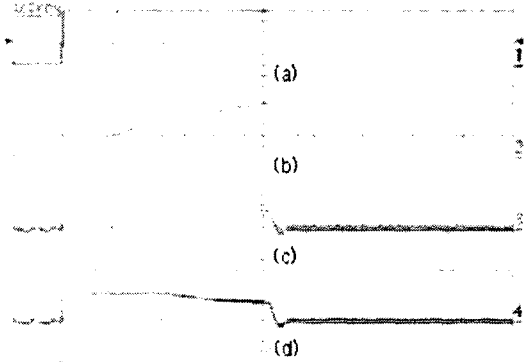


그림 11 속도 응답과 q축 전류 파형

Fig.11 Speed response and q axis current wave form

그림 11(a)는 속도 지령치를 나타내며 그림 (b)는 실제 회전자 속도값, 그림 (c)는 q축 전류 지령치, 그림 (d)는 실제 q축 전류값을 나타낸다. 5,000[rpm]의 속도 지령치를 주었을때 실제 회전자 속도가 잘 따라가는 것을 알 수 있다.

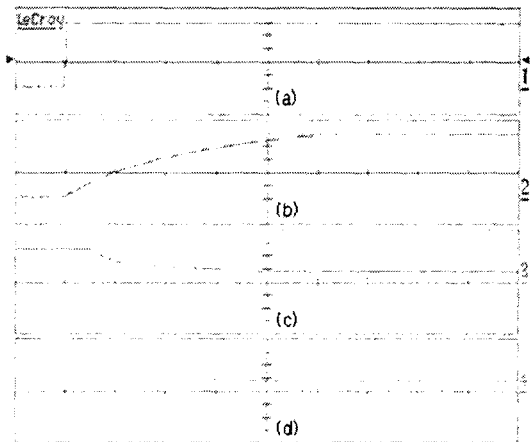


그림 12 자속제어기 파형

Fig.12 Flux controller wave form

그림 12는 속도에 따른 자속 성분을 나타낸 것이다. (a)는 속도 지령치, (b)는 실제 회전자 속도값, (c)는 자속 지령치, (d)는 실제 자속값을 나타낸 것이다. 회전자를 5,000[rpm]으로 돌렸을 때 자속이 잘 추정되는 것을 알 수 있다.

그림 13과 그림 14는 각각 제작한 스핀들 모터 제어 보드와 실험에 사용된 스핀들 모터(2.2kW급)이다.

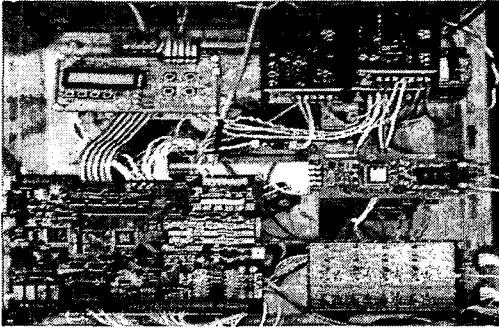


그림 13 스핀들 모터 제어 보드
Fig.13 Control board of spindle motor

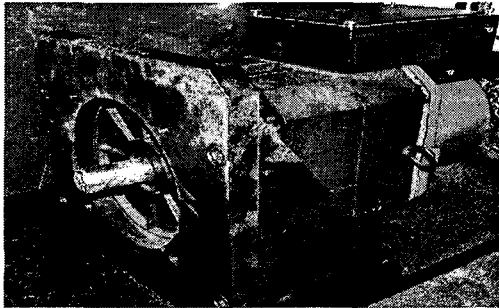


그림 14 스핀들 모터
Fig.14 Spindle motor

3. 결 론

Built-in type 스핀들 모터는 고속운전을 하는 경우에 분해능이 큰 속도센서로 속도추정이 어려운 영역까지 운전을 하게 된다.

본 논문에서는 속도추정이 가능한 저속 영역(0~8,000rpm)에서는 속도센서를 이용한 직접벡터제어로 제어시스템을 구성하였다.

속도센서가 없는 고속 영역을 8,000[rpm] 이상으로 가정하여 고속 영역(8,000~15,000rpm)에서는 센서리스

제어로 제어시스템을 구성하였다.

자속관측기로는 오타니 모델 관측기와 고포나스 모델 관측기를 본 시스템에 적용하여 전 속도 영역에서의 스핀들 모터 제어 특성을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

향후 계획으로는 본 논문에서의 시뮬레이션 결과를 실험을 통하여 검증해 나갈 예정이다.

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] T. Ohtami, N. Takada, and K. Tanaka, "Vector Control of Induction Motor without Shaft Encoder", in IEEE Trans. on IA, vol. 28, no. 1, pp. 157-164, Jan./Feb. 1992.
- [3] B.K. Bose, "Modern Power Electronics and AC Drives"
- [4] T. Ohtani, N. Takada and K. Tanaka, "Vector control of induction motor without shaft encoder", in Conf. Rec. 1989 14th Annu. Meet. IEEE Ind. Appl. Soc., pp. 500-507
- [5] 박용환, 최종우, 김흥근, 김진규, 최영태, 노의철, 전태원, "자속관측기를 이용한 유도 전동기 센서리스제어의 특성 해석", 전력전자 학회지 2003. 8., pp.299-306
- [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 Page: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.
- [8] 한성용, 윤주만, 박세환, 원충연, 김영렬, 최철, 이상훈, "Built-in Type 스핀들 구동을 위한 제어방법에 관한 연구" 전력전자학회 추계학술대회 논문집 2003, 11, pp.51-55