

Built-in Type 스펀들 구동을 위한 제어방법에 관한 연구

*한성용, *윤주만, *박세환, *원충연, **김영렬, ***최철, ***이상훈
*성균관대학교, **안양대학교, ***OTIS-LG

A Study on Control Method for Built-in Type Spindle

*S.Y. Han, *J.M. Yoon, *S.H. Park, *C.Y. Won, **Y.R. Kim, ***C. Choi, ***S.H. Lee
*Sungkyunkwan Univ., **Anyang Univ., ***OTIS-LG

ABSTRACT

In this paper, the authors propose a new high performance Built-in Type spindle motor drive using vector-controlled technique at 15,000 r/min. Control method is changed by variation of motor speed in a conventional Built-in type spindle drive. In the drive system to be presented, the conventional vector control is used in the low-speed range, and the vector control without encoder is used in the high-speed range. Furthermore, in order to drive the motor from 0 to 15,000 rpm smoothly, the vector control with encoder in the low-speed range (from 0 to 8,000 rpm) is utilized and the vector control without encoder in the high-speed range (from 8,000 to 15,000 rpm) is utilized.

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

1. 서 론

전통적 제조업의 고부가가치화 및 새로운 시스템의 도입 등과 함께 최근의 공작 기계는 고속화, 고정밀화를 바탕으로 크게 발전하고 있다.

또한 산업기술의 발달로 점차 고도의 정확, 정밀도가 요구되는 부품의 필요성과 더불어 다품종 소량생산에 따른 생산성 제고가 중요하다.

또한 생산라인의 자동화 측면에서 요구되는 FMS(Flexible Manufacturing System)와 같은 자동화 설비 등을 적용하는 현 산업 구조에 있어서 공작기계의 역할은 자동화의 기본이 된다.

디지털 기술과 전력용 반도체 소자의 발전으로 인하여 Built-in Type 스펀들용 유도전동기의 가변속 구동이 가능해지게 되었으며 벡터제어를 통하여

고성능 가변속 제어 및 토크제어가 가능하게 되었다. 그러나 40,000[rpm]의 고속으로 운전하는 스펀들 모터의 특성상 20,000[rpm]이상의 영역에서의 속도를 측정할 수 있는 속도센서가 없어서, V/f 제어를 하거나 센서리스 제어로 운전 하였다.^{[1][2]}

본 논문에서는 고속 Built-in Type 스펀들 구동을 위한 제어방식을 속도에 따라 달리하는 방법을 제시하였다.

대상 모터의 파라미터의 관계상 기존의 40,000[rpm] 속도 구간을 대신하여 15,000[rpm]의 속도 범위 내에서 운전 하였다.

또한 Ohtani씨가 제시한 자속관측기를 이용하여 약제자 영역에서 센서리스 제어를 구현하여 제시한 제어방법의 타당성과 두 가지 자속관측에 따른 제어성능을 시뮬레이션을 통해 검증 및 분석하였다.

2. 본 론

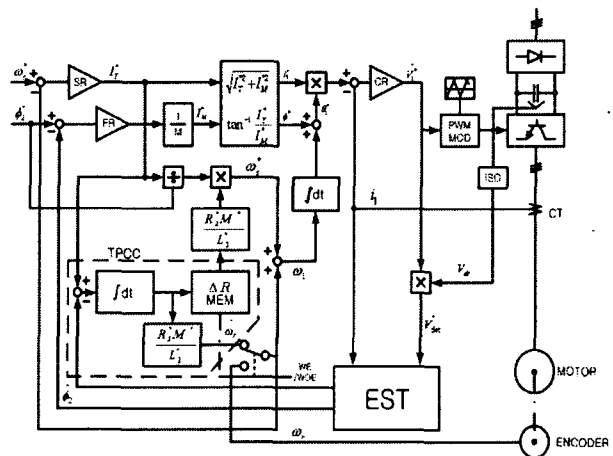


그림 1 기존의 스펀들 모터 구동 알고리즘
Fig. 1 Conventional spindle motor operation algorithm

2.1 기존의 스펀들 구동방식

일반적인 스펀들 구동 방법은 0~20,000[rpm] 영

역에서는 엔코더의 위치 정보를 이용한 벡터제어를 수행하고, 20,000[rpm]에서 모드를 바꾸어 엔코더 정보에 의존하지 않고 open loop 형태의 V/f 제어를 하였다.

V/f 제어 방법은 고속영역에 대한 운전 속도 제어는 가능하지만, 정밀한 토크 및 속도 응답에 대해선 민감하지 않은 단점이 있다.

그러므로, 속도 센서가 없는 센서리스 제어에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다.^[2]

2.2 제안한 스핀들 모터 구동방식

본 논문에서는 스핀들 모터 구동을 위한 제어 방법을 속도에 따라 달리 하게 된다.

약계자 제어를 수행하기 전의 정격속도 영역에서는 슬립 각속도(ω_{sl})를 계산하여 이를 회전자 속도(ω_r)에 더하여 간접적으로 자속 각속도(ω_e)를 구하여 제어하는 전향보상(Feedforward)방식, 즉 간접 벡터제어 방법으로 제어를 수행하게 된다.

정격속도 이상의 영역에서 구동모드를 바꾸어 약계자 제어를 수행하기 위한 자속관측기를 통한 자속추정에 따른 θ_e 를 이용하여 직접 벡터제어를 수행하게 된다.

자속관측기는 전압모델 전류모델과 오타니 자속관측기를 사용하여 특성을 비교하였다.

속도 추정은 고정자 전압 방정식을 이용하여 고정자 자속을 구하여 슬립을 추정하는 방식을 사용하였다.

고정자 전압 방정식에서 고정자 자속성분으로 ω_e, ω_{sl} 을 구하여 $\omega_r = \omega_e - \omega_{sl}$ 으로 속도를 추정하였다. 이 방식은 구현하기가 간단하며, 또한 회전자 파라미터에 대한 영향이 적다는 장점이 있다.^[3]

2.2.1 자속관측기

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

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

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

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

2.2.2 오타니 자속관측기^{[4][5]}

식 (3)을 이용하여 자속을 구할 경우 순수적분에

의하여 옵셋에 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 통과 필터를 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.

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

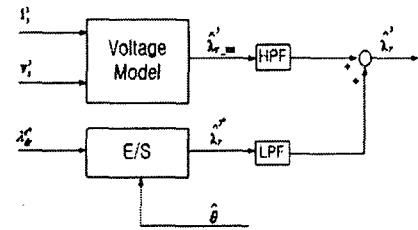


그림 2 오타니 모델 자속관측기
Fig. 2 Flux observer of Ohtani model

2.3 시뮬레이션

2.3.1 시스템 구성

그림 3은 Built-in Type 스핀들의 구동을 위한 전체 제어시스템의 블록도이다.

표 1. 유도전동기 상수
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]

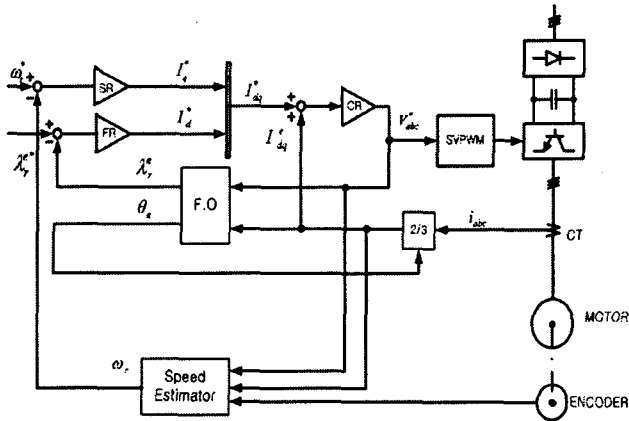


그림 3 전체 시스템 구성도
Fig. 3 Overall system block diagram

기본적인 간접벡터제어 시스템에서 속도에 따라 직접벡터제어 시스템으로 변경하며, 속도센서가 없는 경우를 8,000[rpm]이상으로 가정하여 센서리스 제어시스템이 활성화 된다.

시뮬레이션에 3[hp] 유도전동기가 사용되었으며 표 1에 시뮬레이션에 사용된 유도전동기의 정격 및 상수를 나타내었다.

2.3.2 시뮬레이션 결과

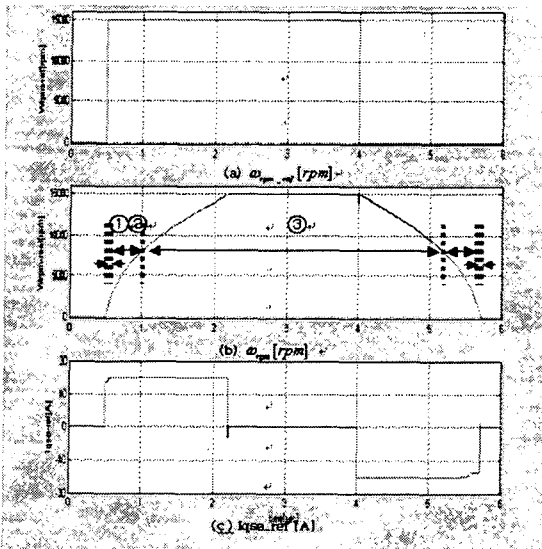


그림 4 속도 제어기 특성
(a) 속도 지령치
(b) 실제 속도 파형
(c) q축 전류 지령치

그림4는 계단 속도지령에 대한 속도 응답특성의 시뮬레이션 결과이다. 속도제어에서 기준속도 변화에 대한 시스템의 과도 응답 특성을 살펴보기 위한 시뮬레이션으로서, 무부하 상태에서 기준속도를

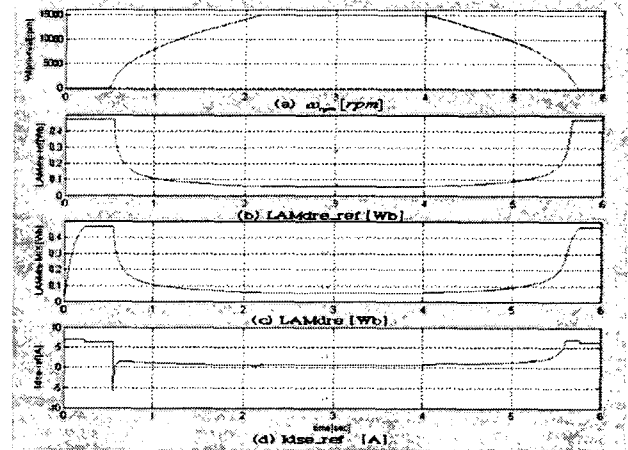


그림 5 자속제어기 특성
(a) 전동기 속도
(b) 자속 지령치
(c) 전압, 전류 모델 자속
(d) d축 자속 지령치

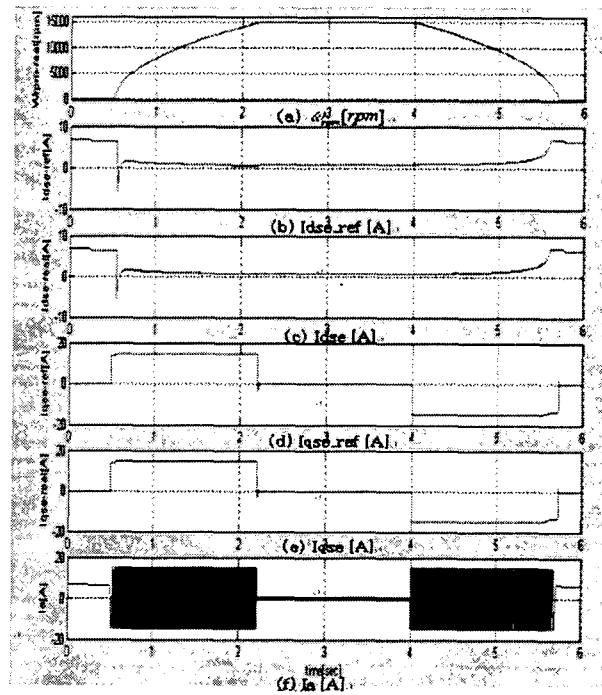


그림 6 전류 제어기 특성
(a) 전동기 속도
(b) 동기좌표계 d축 전류 지령치
(c) 동기좌표계 d축 전류
(d) 동기좌표계 q축 전류 지령치
(e) 동기좌표계 q축 전류
(f) 전동기 전류

t=0.5초에 15,000[rpm]으로 스텝기동하고, t=4초에서 0[rpm]으로 스텝 감속하였을 경우의 응답특성을 시뮬레이션 한 결과 파형이다. 그림4 (a)는 속도 지령치 그림4 (b)는 실제속도파형 그림4(c)는 이에

상응하는 q축 전류 지령치를 보여준다.

그림 4(b)에서 영역 ①은 간접벡터제어 방식으로 운전하고 있으며, 영역 ②는 직접벡터제어, 영역 ③은 8,000[rpm]이상에서 센서리스 벡터제어로 운전하고 있다.

시뮬레이션 결과로 정격이내에서의 간접벡터제어와 정격속도 이상의 약계자 영역에서의 직접벡터제어와 8,000[rpm]이상에서 센서리스 벡터제어로 가변속 제어가 매우 잘 수행됨을 알 수 있다.

그림 5는 전동기를 무부하 상태에서 기준속도를 $t=0.5$ 초에서 15,000[rpm]으로 스텝기동하고, $t=4$ 초에서 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 6는 동기좌표계상에서의 d-q축 전류제어 특성을 보여준다.

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.

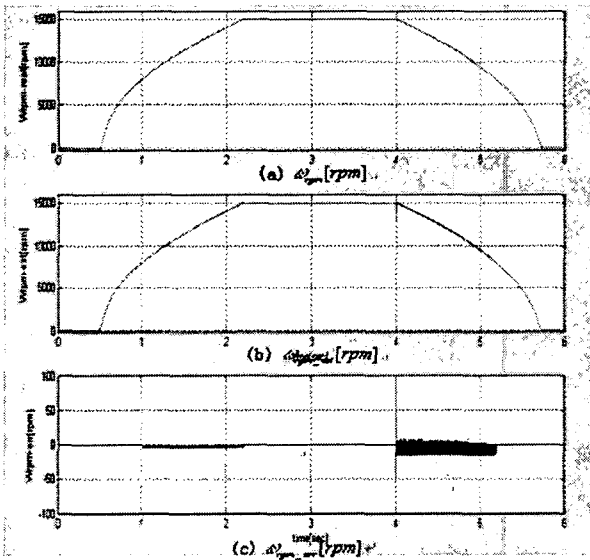


그림 7 속도 응답과 속도 추정
(a) 회전자 실제 속도
(b) 회전자 속도 추정 파형
(c) 실제 회전자 속도와 추정 속도 오차

그림7(a)는 회전자 실제 속도이며, 그림7(b)는 8,000[rpm] 이상에서 고정자 자속에 의한 슬립을 추정하여 회전자 속도를 추정한 파형이다.

그림7(c)는 실제 회전자 속도와 추정된 속도의 오차로서 감속 시 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.

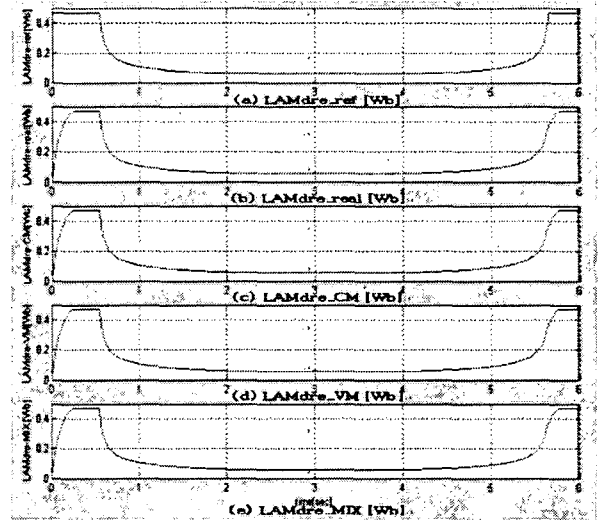


그림 8 약계자 영역에서의 자속추정
(a) d축 자속 지령치(정격속도 이상)
(b) d축 자속
(c) 전류 모델의 d축 자속 추정치
(d) 전압 모델의 d축 자속 추정치
(e) 전압, 전류 혼합 모델 d축 자속 추정치

그림 8은 약계자 영역에서의 자속추정기의 특성을 보여준다. 그림 8(a)는 정격속도 이상에서의 d축 자속지령치, 그림 8(b)는 d축 자속, 그림 8(c)는 회전자 회로에서 전류모델을 이용한 d축 자속추정치, 그림 8(d)는 고정자 회로에서의 전압 모델을 이용한 d축 자속 추정치, 그림 8(e)는 두 가지 모델의 혼합 모델을 이용한 d축 자속 추정치이다.

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

3. 결 론

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

본 논문에서는 속도추정이 가능한 영역에서는 정격속도이하에서 간접벡터제어와 약계자제어시는 직접벡터제어로 제어시스템을 구성하고, 속도센서가 없는 영역을 8,000[rpm]으로 가정하고 센서리스 제어를 하였다.

자속관측기에는 전압 및 전류모델과 Ohtani 모델을 사용하여 본 시스템에 적용하여 시뮬레이션으로 스펠들 구동에서의 제어특성을 구현하였다.

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, 김홍근, 김진규, 최영태, 노의철, 전대원, "자속관측기를 이용한 유도 전동기 센서리스제어의 특성해석", 전력전자 학회지 2003. 8., pp. 299-306.