

DSP6416을 이용한 유도기의 정밀 위치 제어

金賢植*, 金暎贊**, 高宗宣†

Precision position control of induction motors using DSP6416

Hyun-Sik Kim, Young-Chan Kim, Jong-Sun Ko

요 약

본 논문은 외란 변화에 대하여 정밀위치 변화를 줄이고자 외란 관측기를 사용하였고 이를 유도전동기에 적용하였다. 제안된 알고리즘이 외란 변화에 대한 유도전동기의 정밀 제어에 강인함을 보이고 있다. 외란 관측기가 있는 이 시스템은 높은 실효성과 외란 보상에 뛰어난 데드비트 컨트롤을 사용하고 있다. 이 효과를 보이기 위해서 모의 실험은 Simulink를 사용하였고 DSP6416 및 TCP-IP 네트워크 보드와 연동하여 실험하였다.

ABSTRACT

This paper presents a precision position control of induction motor using disturbance observer to reduce disturbance effects. It shows that proposed algorithm is strong in induction motor precision control for disturbance change. This system with disturbance observer using deadbeat control, which has high benefit, is good for quick disturbance compensation. To show this effectiveness the whole process is simulated by simulink, and also experimented by DSP6416 with TCP-IP network board.

Key Words : Disturbance observer, IM position control, Deadbeat control, MATLAB Simulink, DSP6416, TCP-IP network system

1. 서 론

최근에 유도전동기는 마이크로프로세서의 발달과 현대 제어이론의 적용으로 산업현장에서 사용 영역이 점차 확대되어 가고 있다. 또한, 유도전동기의 벡터제어는 전류의 크기와 순시 위상각의 동시 제어를 통해 고정자 전류를 토크 성분과 자속 성분으로 분리하여 독립적인 제어를 행하는 것으로, 순시 토크 제어 특성이 얻어 질 수 있다.

유도전동기는 PMSM과 비교하여 제작이 용이하고 안정성이 높은 장점이 있으나 특히, rotor flux 관측이

어려워 정밀 위치제어가 복잡한 단점이 있다. 따라서 정확한 전류제어의 수행과 함께 파라미터 변동 시에 요구되는 제어기의 강인성은 제어기의 필수 특성이 되었다. 현재 사용되고 있는 가변속 구동시스템은 전동기 구동 및 제어시스템, 통신기능을 위한 Network 장치 등이 외장형으로 구성되어 있어 시스템의 크기, 가격, 개발시간 측면에서 큰 제약조건 작용하고 있다. 따라서, 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 구동 및 제어기, Web Interface 기능을 전동기에 내장하는 Embedded type 전동기 제어기술의 개발이 반드시 필요하다. 본 연구에서 개발하고자 하는 Embedded type 전동기 제어기술은 전동기 구동, 제어, Network 분야의 복합적인 기술로 이루어져 있으며 최종적으로 전동기에 내장된 제어기를 구현하는 것이 목표이다. 전동기 구동분야는 고효율 구동기술의 개발과 함께 전력회로의 모듈화, DSP와 FPGA를 이용한 제어기의 집적화

†교신저자 : 정희원, 단국대 전자전기컴퓨터공학부 교수
E-mail : jsko@dku.edu

*학생회원, 단국대 대학원 전기공학과 박사과정

**학생회원, 단국대 대학원 전기공학과 석사과정

접수일자 : 2006. 8. 8 1차 심사 : 2006. 8. 28
2차 심사 : 2006. 11. 27 심사완료 : 2006. 12. 22

가 기술적 목표이며 현재 미국, 일본, 독일 등에서 추진되고 있는 핵심적인 원천기술이다.

제어기술 분야는 다양한 동작 환경에서 우수한 제어 성능과 자기 진단 기능을 갖는 지능형 제어기술이 목표이며, Network 분야는 Internet과 Web을 이용한 다중 전동기 구동 시스템의 원격제어, 감시 및 유지보수를 위한 Embedded 시스템의 개발이 핵심적인 과제로 전력기술에 정보기술(IT)을 접목하는 미래 지향적인 기반기술로 반드시 연구가 필요하다. 기존에는 PI 혹은 PID를 주로 feedforward 보상을 사용하였고 현재 산업계에서 많이 사용하고 있습니다. 데드비트 부하 관측기는 이론적으로 차수 스텝안에 매우 빨리 외란을 제거하는 특징이 있다. 이에 본 논문에서는 유도전동기의 정밀 위치제어의 방법으로 데드비트 부하 토오크 관측기(deadbeat load torque observer)를 이용한 외란 보상방법에 의해 응답 특성을 개선하는 시스템을 제안하였다. 이와 같이 유도전동기 정밀 위치제어기를 구현 하였으며 제어보드는 우선 가장 쉬운 DSP 범용 제어보드를 사용하였다.

초소형 유도전동기 벡터제어 부분은 현재 구동용 전용 칩인 DSP2812와 스마트 파워 모듈을 사용하여 드라이브 시스템을 구성하였으며 그리고 제작된 보드를 이용하여 SVM 기반의 벡터제어 알고리즘을 구현하였다. 특히 인버터의 단일 전원 구동 방식을 적용 하였다.

2. 제어 알고리즘

2.1 유도전동기의 수학적 모델링

유도전동기는 비선형 특성을 나타낸다. 그러나 벡터 제어에 의해 i_{ds} 는 상수로 만들 수 있다. 이 제어방법에 의한 유도전동기의 시스템 방정식은 다음과 같은 선형방정식으로 쓸 수 있다.

$$\dot{i}_{qs} = -\left(\frac{R_s}{L_\sigma} + \frac{R_r L_m^2}{L_r^2 L_\sigma}\right) i_{qs} - \omega_e i_{ds} - \frac{L_m \lambda_{dr}}{L_r L_\sigma} \omega_r + \frac{1}{L_\sigma} v_{qs} \quad (1)$$

$$\dot{i}_{ds} = \omega_e i_{qs} - \left(\frac{R_s}{L_\sigma} + \frac{R_r L_m^2}{L_r^2 L_\sigma}\right) i_{ds} - \frac{\lambda_{dr} L_m R_r}{L_r^2 L_\sigma} + \frac{1}{L_\sigma} v_{ds} \quad (2)$$

$$\dot{\omega}_r = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2}\right)^2 \frac{L_m \lambda_{dr}}{J L_r} i_{qs} - \frac{B}{J} \omega_r - \frac{P}{2J} T_L \quad (3)$$

$$\theta = \omega_r \quad (4)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m \lambda_{dr}}{L_r} i_{qs} = k_t i_{qs} \quad (5)$$

단, $L_\sigma = L_s - L_m^2/L_r$, $k_t = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m \lambda_{dr}}{L_r}$

P	극수	R _s	고정자 저항[Ω]
J	관성 [Kgm ²]	R _r	회전자 저항[Ω]
k _t	토오크 상수[Nm/A]	L _s	고정자인덕턴스[H]
ω _r	회전자전기각속도 [rad/s]	L _r	회전자인덕턴스[H]
ω _e	동기회전각속도[rad/s]	L _m	상호 인덕턴스[H]
λ _d	d-축의 회전자 자속[Wb]	L _σ	누설 인덕턴스[H]

자속 기준 제어를 구현하기 위하여 전류제어 명령을 발생해야 하는데 이 명령은 i_{qc} 로, 회전자 기준에서 발생한 제어 전류를 고정자 기준으로 바꾼다. 이 결과 얻은 고정자 3상전류를 CRPWM (Current Reference Pulse Width Modulation)으로 추적토록 한다. 이는 향후 실험에서 사용할 것이다.

2.2 상태 제한 제어 알고리즘

유도전동기의 추적 제어를 위해서 추가 상태를 식 (6)와 같이 정의하면 유도전동기의 추가 상태 시스템 방정식은 식 (7), (8)과 같으며 제어 규칙은 식 (9)과 같이 정할 수 있다.

$$\dot{z} = y - y_r \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B}{J} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_t \frac{P}{2J} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} i_{qs} - \begin{bmatrix} \frac{P}{2J} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} T_L - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} y_r \quad (7)$$

$$y = [0 \ 1 \ 0] \begin{bmatrix} \omega \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$u = -[k_1 \ k_2 \ k_3] \begin{bmatrix} \omega \\ y \\ z \end{bmatrix} = -K \begin{bmatrix} \omega \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서, $y = \theta, u = i_{qc}$ 이다.

일반적으로 단순한 PI 제어를 실행하면 외란에 의한 오차를 빨리 줄이기 위해서는 큰 게환 이득이 필요하게 된다. 이것은 매우 큰 전류를 만들게 되어 높은 이득에 의한 에너지 과도 소비 및 비선형 영역에 들어갈 요인이 된다.

부하 토크 T_L 을 알게 되면, $T_L = k_t i_{qc2}$ 에 의하여 등가 전류 i_{qc2} 를 구할 수 있으며 외란의 보상 입력을 선택적으로 생성할 수 있다. 따라서 제어 입력 i_{qc} 는 위치 제어기 출력 i_{qc1} 과 등가 전류 i_{qc2} 로 구성된다. 외부 외란의 영향은 등가의 q-상전류로 정제환(feed-forward)하여 보상한다.

2.3 외란 관측기

일반적으로 시스템의 모든 입력을 알면 상태 추정을 할 수 있다. 그러나 실제시스템에서 몇몇 입력은 정확한 값을 알 수 없거나 찾아내기 힘든 경우가 있다. 이러한 입력의 경우 관측기에 의해 추정할 수 있음이 알려져 있으며, 빠른 샘플링에 의해 외란은 구간상수로 가정할 수 있으므로 다음과 같은 0차 관측기에 의해 추정이 가능하다. 이때 L 은 3×1 의 피드백 행렬이다. 전체 시스템 응답 시간보다 빠른 부하 토크 계산을 하고, 과도 응답에서 부하 토크 보상을 위해서 데드비트 관측기를 사용한다. 데드비트의 극점 정의에 의해서 게환 이득은 Ackermann 공식을 이용하여 다음 같이 구할 수 있다.

$$\hat{T}_L = 0 \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{\omega}} \\ \dot{\hat{y}} \\ \dot{\hat{T}}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B}{J} & 0 & -\frac{P}{2J} \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{y} \\ \hat{T}_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_t \frac{P}{2J} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} i_{qs} + L \left(y - [0 \ 1 \ 0] \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{y} \\ \hat{T}_L \end{bmatrix} \right) \quad (11)$$

$$L = P(\Phi)W_0^{-1}[0 \ 0 \ \dots \ 1]^T \quad (12)$$

데드비트 관측기는 이득이 커서 노이즈에 매우 민감하다. 따라서 노이즈를 줄이기 위한 처리가 필요하다. 필터는 관측기 전단이나 관측기 후단에 사용될 수 있으며, 경우에 따라 2가지를 같이 이용하는 방법이 있다. 하지만, 관측기 정보의 저감을 줄이기 위해서는 전단 필터(pre-filter)보다는 후단 필터(post-filter)가 유용하게 사용된다. 본 논문에서는 시물레이션이 노이즈에 크게 영향을 받지 않아 필터를 사용하지 않았으나 향후 실험에서는 사용할 예정이다.

제어 입력은 $i_{qc} = i_{qc1} + i_{qc2}$ 로 구성된다. i_{qc1} 은 추가 상태 게환(augmented state feedback)의 전류 명령이고 i_{qc2} 는 관측기의 보상 신호이다. 제안된 알고리즘의 블록선도를 그림 1에 제시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 상태 게환기와 외란 관측기가 동시에 독립적으로 적용되고 있다.

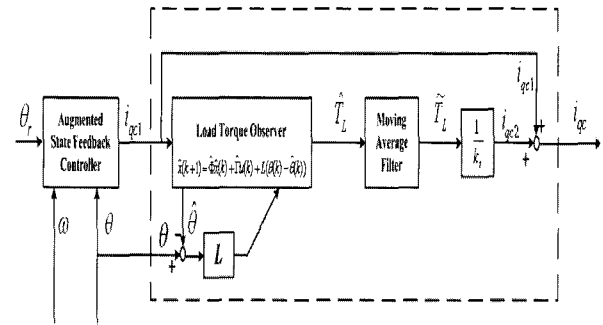


그림 1 제안된 알고리즘의 블록선도
Fig. 1 Block diagram of the proposed algorithm

3. 전체 시스템 구성

제안한 제어 시스템의 구성은 시물링크 프로그램으로 그림 2에 나타냈다.

여기서 제어알고리즘은 위치제어기, 외란 관측기로 구성되며 하나의 블록으로 표현하였다. 위치 제어기는 추가 상태 게환으로 이루어지며, 일반적으로 추가 상태 $z(k+1)$ 의 구현은 평행사변형 방식을 이용하며 외란 관측기인 데드비트 관측기의 출력 즉, 관측된 부하토크를 이용하여 등가전류 i_{qc2} 를 구한다. 이상의 제어 알고리즘을 사용하여 제안한 제어 시스템의 시물링크

모델을 아래와 같다. 외란의 영향을 보이기 위하여 부하 토크를 직접 모터 축에 인가하고 그 부하에 따른 위치의 변동을 얻었다.

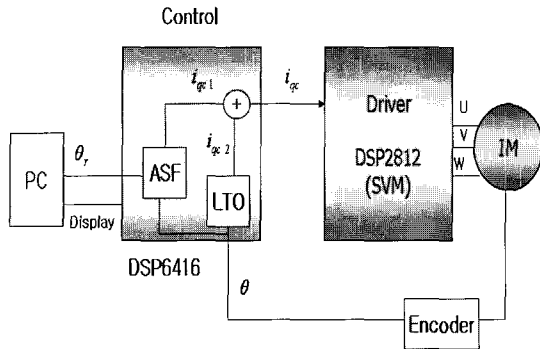


그림 3 전체 시스템 구성도
Fig. 3 Configuration of the total system

본 논문에서의 전체 시스템 구성도를 그림 3과 같이 간략하게 표현하였다. 원격 PC에서 내린 위치나 속도 명령은 Interface 보드의 TCP-IP 할당을 감지하여 제어 보드에 넘겨진다. 제어 보드는 이 명령에 맞게 드라이버를 이용하여 목표 값을 제어한다. 이 제어 결과는 바로 인터페이스 보드를 통하여 원격 PC에 전달되고 화면에 표시된다.

트위크 보드는 임베디드 Linux가 포팅 되고 device driver를 통해서 인터페이스보드와 연결된다. 그림 5는 TCP-IP 할당 IB(Interface Board)와 드라이버 보드, 그리고 DSP6416으로 구성된 시스템을 보이고 있다. 파라미터 변화를 위해 그림 6은 관성부하를 모델링하여 사용하였으며 이를 실험에 적용하였다. 실험에서 부하는 모터에 직접 연결된 황동으로 구현하였다.

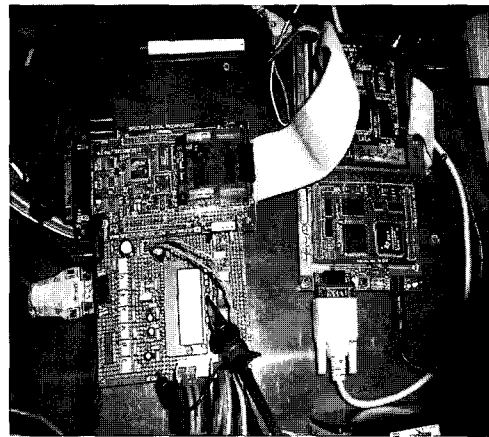


그림 5 초소형 제어 기관 실험 장치
Fig. 5 Smart control system boards

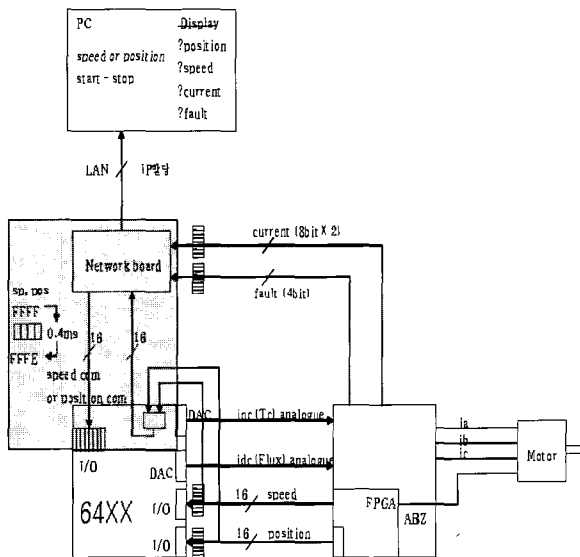


그림 4 상호 연결도
Fig. 4 System connection

위 그림 4는 인터페이스보드, 네트워크 보드, DSP 보드, 모터 보드와의 상호 연결도를 나타내고 있다. 네

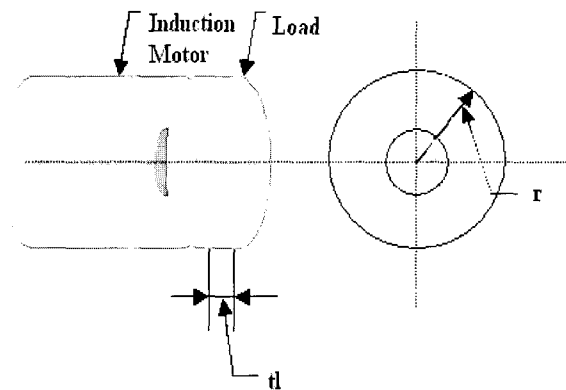


그림 6 파라미터 변화를 위한 관성부하
Fig. 6 inertia load for parameter variation

4. 시뮬레이션

시뮬레이션에 사용된 유도전동기의 파라미터를 표1에 나타내었다. 시뮬레이션 주기 $T_s = 0.2[ms]$ 이다. 원하는 목표 도달시간과 과도응답이 없는 가중 행렬 $Q = \text{diag}[1 \ 5 \ 20]$, $R = 1$ 으로 선택하여 최적 이득

행렬을 구하면 $K=[0.5858 \ 3.2613 \ 3.9049]$ 가 되며, 외란 관측기의 이득 $L=[9623.9 \ 2.7 \ -3639.9]^T$ 가 된다.

표 1 모터 파라미터
Table 1 Motor parameter

정격출력	800 W
정격속도(Rated speed)	3900 rpm
극수(P)	4 극
관성 모멘트(J)	2.4 kgcm ²
고정자 저항(Rs)	6.087 Ω
회전자 저항(Rr)	4.092 Ω
고정자 누설 인덕턴스(Lss)	11.6 mH
회전자 누설 인덕턴스(Lrr)	7.5 mH
자화 인덕턴스(Lm)	177.6 mH
관성(Inertia)	0.24×10 ⁻³ kgm ²

일반적으로 명판에 기재되어 있는 파라미터는 최소 10~20%정도 부정확하다. 유도전동기의 관성이 2.4 kgcm²이며 robot, 자동화 기기에서 어떠한 작업을 수행할 때 이 관성이 크게는 수십 배 이상의 순간적인 변화 값을 갖는다. 본 논문에서는 유도전동기의 정격 토크 부하를 모델로 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 과정은 다음과 같다. 부하 실험시 5초때 부하를 인가하였다.

그림 7은 추가 상태 궤환 제어기를 가지는 유도전동기의 무부하일 때 위치응답에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내며, 그림 8은 추가 상태 궤환과 데드비트 관측기를 포함하는 제어기를 가지는 유도전동기의 무부하일 때 위치응답에 대한 시뮬레이션 결과이다. 초기기동 후 과도 상태에서 안정적인 위치 응답특성을 가짐을 볼 수 있다.

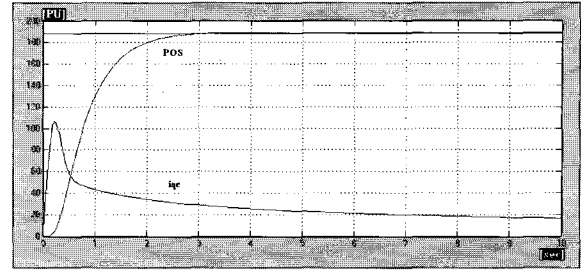


그림 7 추가 상태 궤환 알고리즘(무부하)
Fig. 7 Augmented state feedback algorithm(no load)

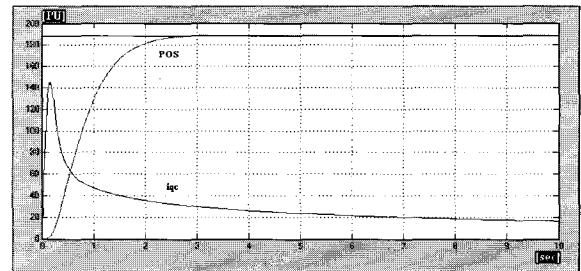


그림 8 외란 관측기를 이용한 알고리즘(무부하)
Fig. 8 Disturbance observer algorithm(no load)

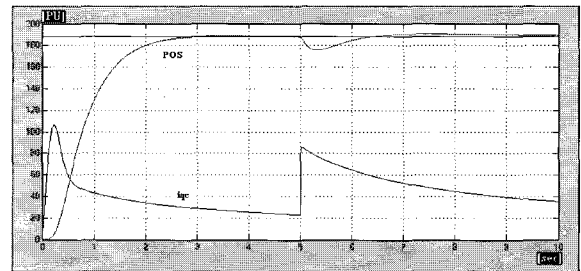


그림 9 추가 상태 궤환 알고리즘(부하)
Fig. 9 Augmented state feedback algorithm(load)

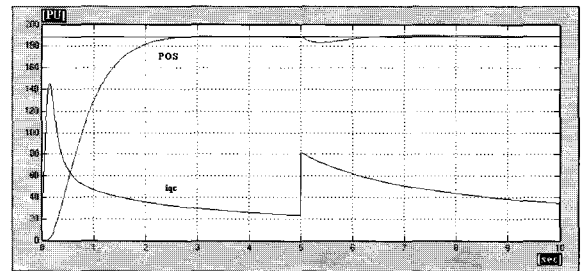


그림 10 외란 관측기를 이용한 알고리즘(부하)
Fig. 10 Disturbance observer algorithm(load)

그림 9은 추가 상태 궤환 제어기를 가지는 유도전동기의 정격 토크 부하를 가했을 때 위치 응답에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내며, 그림 10는 추가 상태 궤환과 데드비트 관측기를 포함하는 제어기를 가지는 유

도전동기의 정격 토오크 부하를 가했을 때 위치 응답에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 초기 기동 후 과도 상태에서 안정적인 위치 응답특성을 가지며, 정격 토오크 부하가 가해졌을 때 데드비트 관측기에 의해 정격 토오크 부하가 가해졌을 때 나타나는 언더슈트(undershoot)가 개선 되어 빠른 위치 응답을 가짐을 볼 수 있다. 이상의 시뮬레이션 결과로 제안된 제어기는 데드비트 관측기가 추정한 토오크를 이용하여 과도상태 및 정상상태의 위치응답이 개선됨을 확인할 수 있다.

5. 실험 및 결과

실험에 대한 결과 파형들은 TMS320C6416을 이용한 제어기 사용 시 위치 값과 q상 지령전류의 실험 결과이다. 그림 11은 추가상태 궤환 알고리즘을 이용한 무부하일 때 위치응답과 q상 지령전류의 응답을 나타낸다. 그림 12은 추가 상태 궤환과 외란 관측기를 이용하여 무부하일 때의 위치 응답과 q상 지령전류의 응답에 대한 실험 결과를 나타낸다.

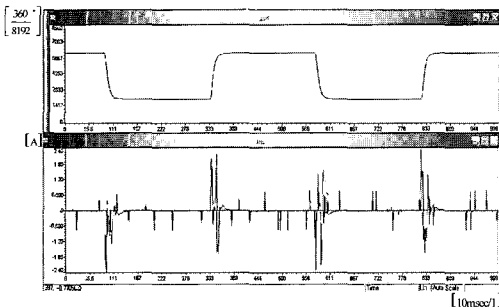


그림 11 추가 상태 궤환 알고리즘(무부하)
Fig. 11 Augmented state feedback algorithm(no load)

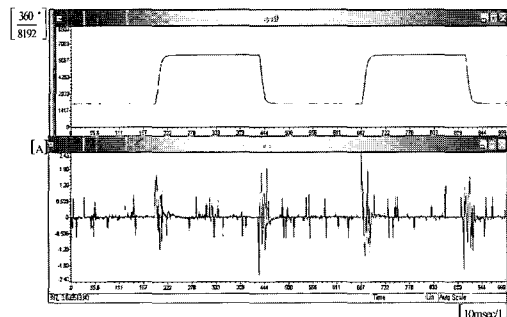


그림 12 추가 상태 궤환, 외란 관측기를 이용한 알고리즘(무부하)
Fig. 12 Augmented state feedback, Disturbance observer algorithm(no load)

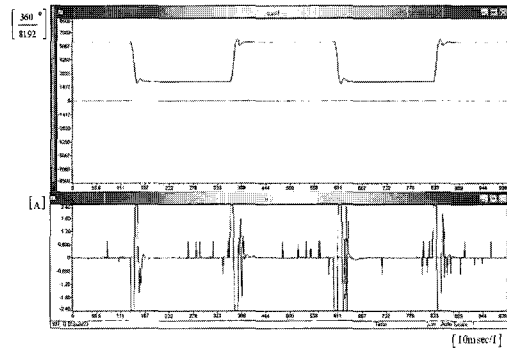


그림 13 추가 상태 궤환 알고리즘(부하)
Fig. 13 Augmented state feedback algorithm(load)

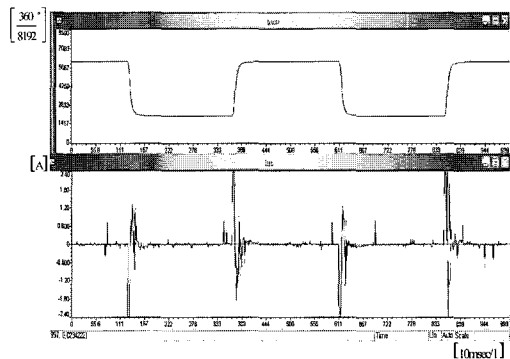


그림 14 추가 상태 궤환, 외란 관측기를 이용한 알고리즘(부하)
Fig. 14 Augmented state feedback, Disturbance observer algorithm(load)

그림 13는 추가상태 궤환 알고리즘을 이용한 부하일 때 위치응답과 q상 지령전류의 응답을 나타낸다. 그림 14에 결과 파형은 부하를 달았을 때의 추가 상태 궤환, 외란관측기를 사용 했을 때 실험 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 안정성만은 변하지 않으며 전류 파형이 보상되는 크기가 증가함을 보인다.

시스템 구동 시 위치 값과 q상 지령전류의 실험을 한 결과를 나타낸다. 실험할 때의 위치 값은 2000~8000(약240도)의 변화를 보이고 있다. 위치제어에 필요한 시간은 약 0.5초 정도 소요됨을 알 수 있다. 정밀도는 약 2비트정도 오차가 나며 도(degree)로는 약 0.08도정도의 오차를 가지고 있음을 확인했다.

6. 결론

본 논문에서는 속도제어에 많이 사용되고 있는 유도전동기에 대해 외란에 강인한 위치 제어의 방법으로 외란 관측기를 이용한 위치 제어 방법을 제시하고, 시

플레이션과 실험을 통하여 그 성능을 입증하였다. 빠른 외란 보상을 위하여 높은 이득을 갖는 데드비트 외란 관측기를 사용하였으며, 데드비트 외란 관측기를 사용할 경우 발생하는 원치 않는 잡음 증폭 효과는 관측기의 후단에 필터를 갖도록 하여 관측기의 성능 변화 없이 잡음의 영향을 감소하도록 하였다.

본 논문에서는 외란에 더욱 강인한 제어를 위해 외란 관측기를 이용한 정밀한 제어 시스템을 최종 제안하였다. 이상의 시스템은 시뮬링크를 사용하여 0.2ms의 샘플링시간에서 z-domain에서 최적 이득을 사용하여 디지털 시스템으로 구현하여 시뮬레이션 하였으며, 시스템의 계산 시간을 줄이고 실시간 제어를 위해 Texas Instruments(TI)사의 TMS320C6416 프로세서를 사용하여 실험을 하였다. 또한 제어 알고리즘은 C-언어를 사용해서 프로그램 하였다.

DSP6416의 초소형 제어보드를 최초로 적용 실험하였다. 초소형 유도전동기 벡터제어 부분은 현재 구동용 전용 칩인 DSP2812와 스마트 파워 모듈을 사용하여 드라이브 시스템을 구성하였다.

향후 ASIC 기술을 도입하여 좀 더 초소형의 제어기를 실현할 수 있을 것으로 생각한다.

이 연구는 2005학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음

참 고 문 헌

- [1] D. W. Novotny and R. D. Lorentz "Introduction to field orientation and high performance AC drives" IEEE-IAS Tutorial Course, 1986.
- [2] P. C. Krause, Analysis of electric machinery, McGraw-Hill, 1984.
- [3] K. J. Åström and B. Wittenmark Computer controlled system, Prentice Hall, International, 1997.
- [4] J. S. Ko, J. H. Lee, S. K. Chung, and M. J. Youn "A Robust Position Control of Brushless DC motor with Dead Beat Load Torque Observer" IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 40, no. 5, pp. 512-520, 1993.
- [5] C. T. Chen, Linear System Theory and Design, Holt, Rinehart and Winston, Inc. 1984.
- [6] C. Y. Huang, T. C. Chen, C. L. Huang "Robust Control of Induction Motor with A Neural-Network Load Torque Estimator and A Neural-Network Identification" IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 46, no. 5, pp 990-998, 1999.
- [7] J. D. Landau, System Identification and Control Design. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1990.
- [8] G. C. Goodwin, K. S. Sin, Adaptive Filtering Prediction and Control. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1984.
- [9] Hornick K., Stinchcombe M., and White H., "Multi-layer Feedforward Networks are Universal Approximators", Neural Networks, Vol. 2, 1989.
- [10] Chen, F. "Back-Propagation Neural Networks for Nonlinear Self-Tuning Adaptive Control", IEEE Control System Magazine, April, 1990.
- [11] Jong Sun Ko and Myung Joong Youn, "Robust Digital Position Control of BLDD Motors using Neural Network with State Feedback," Proc. of the 3rd. International Workshop on Advanced Motion Control, pp. 852-861, March, 1994.
- [12] Jong-Sun Ko, Tae-Ho Lee, Chil-Hwan Cheon, and Sang-Seol Lee, Precision Speed Control of PMSM Using Disturbance Observer and Parameter Compensator KJPE, Vol. 6 No. 1, pp98-106, Feb., 2001.
- [13] A. Krzyżak, E. Rafajłowicz, M. Pawlak "Moving Average Restoration of Bandlimited Signals from Noisy Observations", IEEE Trans. on signal processing, Vol. 45, No. 12, 1997.
- [14] B. K. Bose, Power Electronics and AC Drives, Prentice-Hall, 1986.
- [15] H. Kubota, K. Matsuse, and T. Nakao, "DSP-based speed adaptive flux observer of induction motor," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 29, no2, pp. 344-348, 1993.
- [16] Z. Zhaoyong, L. Tiejai, T. Takahashi, and E. Ho, "Design of a universal space vector PWM controller based on FPGA," IEEE APEC'04, pp. 1698-1702, 2004.
- [17] A. M. Trzynadlowski, M. M. Bech, F. Blaabjerg, and J. K. Pedersen, "An integral space-vector PWM technique for DSP-controlled voltage-source inverters," IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 35, no. 5, pp. 1091-1097, 1999.
- [18] Y.-Y. Tzou, H.-J. Hsu, "FPGA realization of space-vector PWM control IC for three-phase PWM inverters," IEEE Trans. on Power Electr., vol. 12, no. 6, pp. 953-963, 1997.
- [19] J. Ye, P. Lin, W. Liqiao, and Z. Zhang, "Development of optimized SVPWM algorithm based on CPLD," Conf. Rec. IPERC '04, pp. 603-606, 2004.

저 자 소 개



김현식(金賢植)

1978년 10월 7일생. 2004년 원광대 전기 전자 및 정보공학부 졸업. 2006년 단국대 전기공학과 졸업(석사). 동 대학원 박사과정.



김영찬(金暎贊)

1980년 6월 24일생. 2006년 원광대 전기전자 및 정보공학부 졸업. 2006년~현재 단국대 전기공학과 석사과정.



고종선(高宗宣)

1960년 3월 20일생. 1984년 서울대 전기공학과 졸업. 1989년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1994년 동대학원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박). 1983년~1995년 삼성전자 생산기술센터 선임연구원. 1995년~1996년 삼성그룹 삼성경영기술대 사내 교수(부장). 1999년 2월~2000년 1월 미국 Tennessee 주립대 (UT) Post-Doc. 1996년~2003년 7월 원광대 전기전자 및 정보공학부 조교수. 2003년 8월~현재 단국대 전기공학과 교수. 당 학회 편집이사.