

# AC 서보 전동기 시스템의 상태공간 모델 식별에 관한 연구

(A Study on State-Space Model Identification of AC Servo Motor System)

이태훈\* · 김상환 · 송봉철 · 원종연 · 이상석

(Tae-Hoon Lee, Sang-Hwan Kim, Bong-Chul Song, Chung-Yeon Won, Sang-Suk Lee)

## Abstract

Generally, The systems are so complex that it not possible to obtain reasonable models using physical insight. Also a model based on physical insight contains a number of unknown parameters even if the structure is derived from physical laws. To solve these problems, the systems identification is described in this paper. So, AC servo motor system which has both open loop and closed loop is selected as an example for identification. A state-space model of AC servo motor system is identified through open loop experiment and identified through closed loop experiment and using pole placement integral controller to open loop system. As the results, From ARMA model, We have obtained continuous-time state space model.

## 1. 서론

산업분야에서 사용되는 프로세스들은 안전하고 효율적으로 움직이도록 제어되어야 하며 이를 위해서 프로세스에 대한 수학적 모델이 필요하다. 프로세스는 상세하고 복잡한 시뮬레이션 모델에서부터 매우 간단한 모델에 이르기까지 여러 모델로 표현된다.

시스템 식별은 프로세스 모델링의 실험적 접근방법으로, 미지의 시스템에서 관측된 입력과 출력 자료를 가지고 그와 동일한 동작을 할 수 있는 모델을 구하는 것이다.[1] 시스템 식별 방법은 크게 nonparametric 방법과 parametric 방법으로 나눈다. Nonparametric 방법은 모델 파라미터들을 직접 추정하지 않는 방법으로, 여기에는 과도응답 해석, correlation 해석, 주파수 해석, spectral 해석과 같은 방법들이 속한다. Parametric 방법은 동적 모델의 파라미터를 직접 추정하는 것으로 Prediction-Error Method(PEM), Correlation Method, Subspace Method 등이 있다.

본 논문에서는 AC 서보 전동기 시스템의 입출력 관계를 선정한 후 실험에 의한 데이터를 가지고 상태공간 모델을 구한다. AC 서보 전동기 시스템은 속도제어 루프가 있는 것과 속도제어 루프가 없는 시스템을 식별하였다. 입력 데이터로는 속도 지령과 출력데이터는 전동기의 위치와 속도를 얻기 위해 엔코더를 이용하였다.

입출력 데이터로부터 ready-made model을 적용하여 상태공간 모델을 얻어내고 제어를 적용하여 전동기 시스템 식별을 구현한다.

## 2. 본론

### 2.1. 식별대상

AC 서보 전동기는 회전자에 전기를 공급하는 정류자와 브러시의 단점을 제거하기 위하여 회전자와 고정자의 위치를 반대로 한 것이다. 즉 영구자석으로 이루어진 회전자는 회전 자계를 형성시키며 이러한 회전 자계와 직교 방향인 교류 전류를 고정자 권선에 인가하여 회전한다.[1]

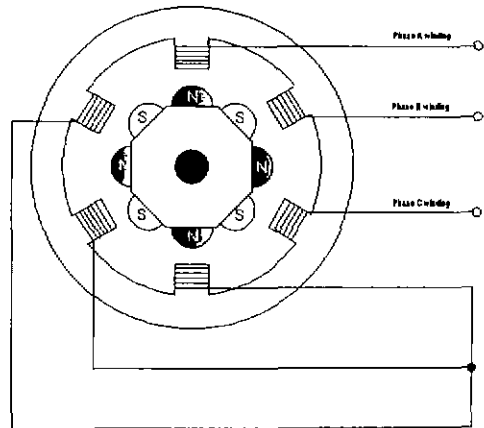


그림 1. AC servo 전동기 구조  
Fig. 1. AC Servo motor structure

정류자와 브러시의 역할을 전력용 반도체 스위칭 소자와 위치 검출기가 대신하므로 DC 전동기의 브러시와 정류자를 제거할 수 있다. AC 서보 전동기의 극수는 8극이며 고정자 권선의 감긴 형태가 집중권선이고 영구자석 회전자의 착자가 고정자 권선에 유기되는 전동기의 역 기전력은 정현파 역 기전력을 갖는다[1].

그림 1에서 고정자 철심에는 3상 전기자 권선이 감겨있고 회전자에는 계자 자속을 발생시키는 영구자석이 사용된다.

## 2.2 구동 원리

직류를 교류로 변환하는 장치인 인버터는 상의 개수나 전원의 형태에 따라 여러 방식이 있다. 본 논문에서 AC 서보 전동기와 120도 통전 방식의 전압형 인버터(Voltage Source Inverter)를 사용하며 인버터의 출력단에 부하로서 AC 서보 전동기가 연결되어있다.

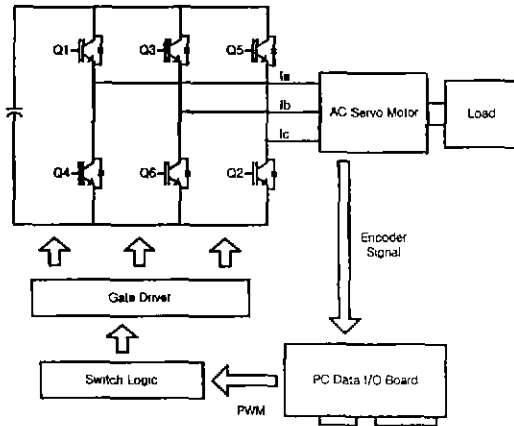


그림 2. 시스템 구성도  
Fig. 2. System diagram

그림 2는 AC 서보 전동기를 구동하기 위한 3상 인버터의 전력회로를 나타내고 있다. 3상 입력 전원은 정류 다이오드에 의해 직류로 변환된 후 DC 링크단을 거쳐 3상 인버터에 직류전압이 인가된다. 직류 전압은 반도체 소자의 스위칭 동작에 의해서 AC 전압으로 변환되어 출력측에 연결된 AC 서보 전동기에 인가된다. 이와 같은 전력변환작용은 각 상에 연결된 반도체 소자의 스위칭 동작을 제어하는 구동신호(PWM신호)에 의해서 이루어진다.

## 2.3 3상 전류에 따른 스위치 모드

그림 3은 AC 서보 전동기의 3상 권선에 인가되는 상전류와 인버터의 스위칭 동작을 결정하는 반도체 소자의 파형을 나타내었다. 반도체 소자의 파형에 따른 스위치 ON, OFF동작은 표 1과 같은 6가지 모드로 이루어져 있다.

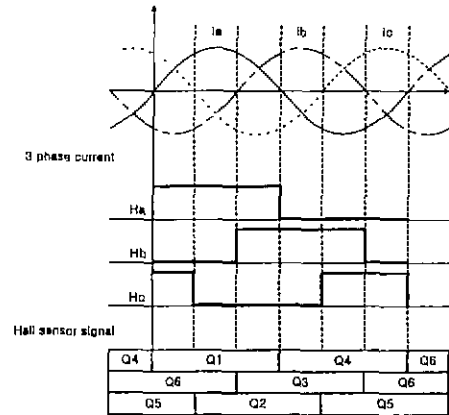


그림 3. 3상 전류에 따른 인버터 ON/OFF 관계  
Fig. 3. Inverter ON/OFF relation of 3phase current

표 1. 홀센서 신호에 대한 인버터 스위칭 패턴

Table 1. Inverter switching sequence of hall sensors signal

	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
모드1	1	1	0	0	0	1
모드2	1	1	1	0	0	0
모드3	0	1	1	1	0	0
모드4	0	0	1	1	1	0
모드5	0	0	0	1	1	1
모드6	1	0	0	0	1	1

## 3. 시스템 식별

### 3.1 개요

시스템 식별은 미지의 시스템에서 관측된 입력과 출력 자료를 가지고 그와 동일한 동작을 할 수 있는 수학적 모델을 결정하는 것이다.[3] 일반적인 시스템의 식별 절차는 그림 4와 같이 표현 할 수 있다.

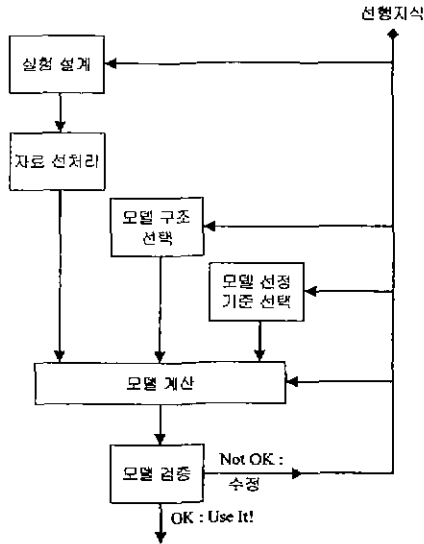


그림 4. 시스템 식별 루프  
Fig. 4. The system identification loop

여기서, 식별에 필요한 기본적인 용어를 정의하기 위해서 그림 5와 같이 출력에 외란이 가해진 선형 시스템을 생각하자. 이 시스템에 대한 기본적인 표현은 식 (3.1)과 같이 나타낼 수 있다.

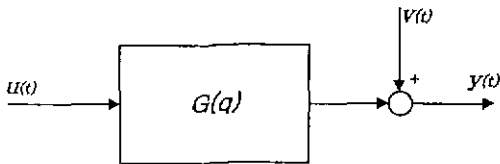


그림 5. 외란이 있는 시스템  
Fig. 5. The disturbance system

$$y(t) = G(q)u(t) + v(t) \quad (3.1)$$

여기서  $u(t)$ 는 입력 신호,  $G(q)$ 는 입력에서 출력까지의 전달 함수,  $q$ 는 쉬프트 연산자(Shift operator),  $v(t)$ 는 외란이다. 보통 외란  $v(t)$ 는 백색 잡음을 선형 필터  $H(q)$ (잡음모델)를 통해 여과해서 얻는 것으로 표현하면 편리하므로 식 (3.2)와 같이 표현한다.

$$v(t) = H(q)e(t) \quad (3.2)$$

따라서, 식 (3.2)은 식 (3.3)과 같이 표현된다.

$$y(t) = G(q)u(t) + H(q)e(t) \quad (3.3)$$

식 (3.3)에서  $G(q)$ 와  $H(q)$ 을 알지 못한다면, 이것을 반영하는 파라미터  $\theta$ 을 도입한다. 따라서, 식 (3.3)은 식 (3.4)과 같이 매개변수화된 모델로 다

시 표현될 수 있다.

$$y(t) = G(q, \theta)u(t) + H(q, \theta)e(t) \quad (3.4)$$

### 3.2 실험 설계

시스템 식별을 위해서는 수집된 자료가 시스템에 관한 충분한 정보를 가지도록 해야하므로, 식별에 사용되는 자료를 수집하기 위해서는 실험을 잘 계획해야 한다. 실험을 계획하는 데는 몇 가지 결정해야 하는 설계 변수들이 있다. 즉, 입출력 신호의 선택, 입력신호의 설계, 샘플링 주파수 선택, 필요한 입출력 자료의 수를 결정한다.

### 3.3 식별 실험에 대한 입력 설계

입력 신호  $u(t)$ 는 시스템의 모든 특성을 나타내도록 설계되어야 한다. 예를 들어, 주파수  $\omega$ 인 순수한 정현파는 단지  $\omega$ 에 대한 주파수 함수값의 정보만 준다. 이런 입력을 가했을 때 출력이 같은 시스템은 많이 존재하므로  $u(t)$ 가 많은 주파수 성분을 가지도록 하는 것은 중요하다. 만약 시스템의 입력을 사용자가 선택할 수 있다면, 두 레벨로만 불규칙적으로 변화면서 많은 주파수 성분을 포함하는 입력을 선택하는 것이 좋다. 여기서 레벨의 선택은 시스템이 최대로 변할 수 있는 크기와 같게 하면 된다. 만약 시스템이 비선형이라면 우리가 원하는 동작점과 일치하도록 입력 구간을 선택해야 한다.

샘플링 구간의 선택은 시스템의 시정수와 연관되어 있다. 시스템 동역학보다 자료를 빠르게 샘플링을 하면 자료는 충분히 얻을 수 있지만 상대적으로 시스템에 대한 정보는 적어져 결과 모델의 분산이 증가한다. 반대로, 시스템 동특성보다 느린 샘플링은 동특성을 나타내는 매개변수를 결정하는데 어려움이 있다. 그래서 보통 시스템 대역폭의 약 10배의 샘플링 주파수를 선택하는 것이 좋은 방법으로 알려져 있다. 이것은 시스템 계단응답에 대한 상승시간(rise time)에서 5~8개의 샘플링을 하는 것과 대략적으로 일치한다.[5] 만약 샘플링 구간을 선택하는 것이 명확하지 않고 시스템으로부터 쉽게 자료를 얻을 수 있다면, 샘플링을 빠르게 하는 것이 좋다.

### 3.4 자료 선처리(Data preprocessing)

실험으로부터 수집된 자료를 그대로 식별 알고리즘에 사용할 수는 없다. 식별에 적용하기 전에 우선 자료를 그려보고, 자료에 오류가 있는지 찾아

야 한다. 즉 신호 레벨이 저주파 외란에 의해 변하거나, 시스템 동특성에 관심이 있는 주파수 구간 이상의 고주파 외란이 존재할 수도 있다. 또한 자료들 사이에는 잘못된 값이 있을 수도 있다. 좋은 모델을 선정하기 위해서는, 자료에서 필요한 주파수 대역만 나타나도록 여과 해야한다. 그래서 실제 식별을 시작하기 전에 자료를 전처리(preprocessing)해야한다. 전처리의 중요한 점은 좋은 자료를 선택해서 모델 선정과 모델 검증에 적절하도록 하는 것이다.

식별에 적절한 모델 구조를 선택하는 것은 설계자가 해야할 가장 어려운 결정이다. 따라서 모델 구조를 결정하기 위해서는 다음 몇 가지 사항을 고려해야 하며 첫째로 Tailor-made 모델과 Ready-made 모델 중 어느 것을 사용할 것인지 결정해야 한다.

Tailor-made 모델을 사용하면 기존의 물리적 관제로부터 목적에 맞게 새로운 모델을 만들 수 있지만 모델링 절차에 시간이 많이 걸린다.

Ready-made 모델을 사용하면 ARX, OE, ARMAX(BJ) 또는 다른 모델 중 어떤 것을 사용할 것인지 결정해야 하며, 마지막으로 Ready-made 모델에 대한 차수를 결정해야 한다.

모델 차수가 너무 낮으면 모든 동특성을 표현할 수 없고, 차수가 너무 높으면 그 만큼 더 많은 파라미터를 추정해야하고 분산도 커지기 때문이다. 따라서 모델 차수는 프로세스를 표현할 수 있는 가장 작은 차수를 찾는 것이 바람직하다.

### 3.5 모델 계산

모델 선정 기준으로부터 실제 파라미터를 추정하기 위해서는 식 (3.5)과 (3.7)을 수학적으로 풀어야 한다. 일반적으로 식 (3.6)은 해석적인 방법으로는 최소화할 수 없고, 마찬가지로 식 (3.8)을 0으로 만드는 해를 직접적으로 구할 수는 없다 그래서 반복적인 기법이나 수치 해석적 기법을 통해서 해를 찾을 수 있다.

$$\hat{\theta}_N = \arg \min_{\theta \in D_M} V_N(\theta, Z^N) \quad (3.5)$$

$$V_N(\theta, Z^N) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \ell(\varepsilon_F(t, \theta), \theta, t) \quad (3.6)$$

모델은 시스템의 실제 표현이 아니므로 우리는 정확한 모델을 요구하지는 않으며 대신 모델이 문제를 해결하는데 도움을 줄 수 있도록 하는 것

이다. 우리는 이렇게 사용되는 모델을 목적에 유효하다고 한다.

$$\hat{\theta}_N = \underset{\theta \in D_M}{\text{sol}} [f_N(\theta, Z^N) = 0] \quad (3.7)$$

$$f_N(\theta, Z^N) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \zeta(t, \theta) \alpha(\varepsilon_F(t, \theta)) \quad (3.8)$$

어떤 모델이 유효한지를 결정하는 것이 모델 검증이다. 검증 절차는 모델을 만드는 단계에서부터 철저히 검사되어야 하며, 그 과정에서 모델의 어떤 부분은 제외하거나 개선되어야 한다. 모델 검증은 모델링과 직접적인 관련이 있으며, 그림 6에서 보는 바와 같이 반복적인 절차를 통하여 검증한다.

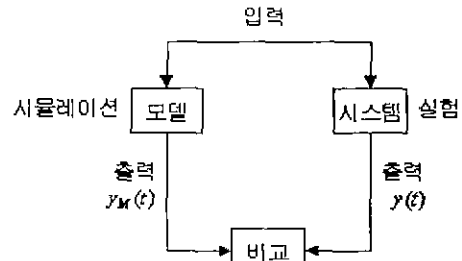


그림 6. 시스템 식별 검증

Fig. 6. The system identification test

시스템 식별을 위해 앞에서 설명한 많은 내용 중, 특히 모델을 계산하고 그것의 특성을 평가하는 데는 프로그램의 도움이 필요하며 실제 상업적으로 이용 가능한 많은 프로그램이 존재한다. 이 프로그램들은 다양한 사용자 인터페이스와 모델 구조의 선택에 대한 옵션에 따라 달라진다.

본 논문에서는 Matlab 프로그램을 사용하여 AC 서보 전동기 시스템을 식별하였다.

## 4. 실험결과

AC 서보 전동기 시스템의 식별은 두 가지 방법으로 실험하였다 첫 번째 방법은 게루프 상태에서 시스템을 식별한 후 식별 모델에 의하여 적절한 제어기를 설계하여 속도제어가 됨을 확인하고 두 번째 방법은 시행착오 방법을 통하여 제어기를 설계한 후 페루프 상태에서 식별을 하였다.

#### 4.1 제어기가 없는 시스템 식별

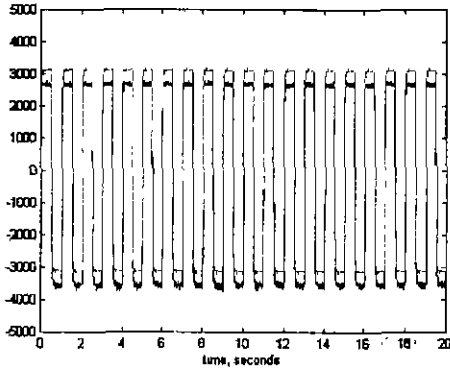


그림 7. 제어기가 없는 ARMA 모델 식별결과  
X 축 : 시간 (초), Y 축 : 속도 (rpm)  
Fig. 7. Result of ARMA model identification without controller  
X axis : time (sec), Y axis : velocity (rpm)

#### 4.2 PI 제어기가 있는 시스템 식별

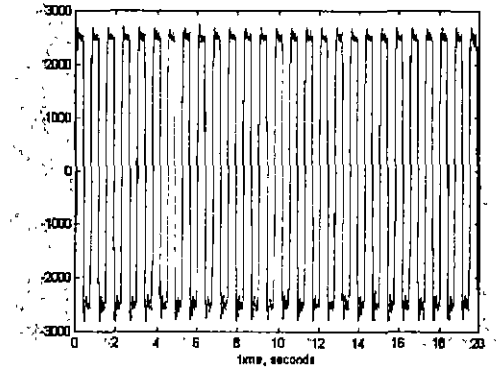


그림 9. PI 제어기를 적용한 ARMA 모델 식별 I  
X 축 : 시간 (초), Y 축 : 속도 (rpm)  
Fig. 9. ARMA model identification with PI controller I  
X axis : time (sec), Y axis : velocity (rpm)

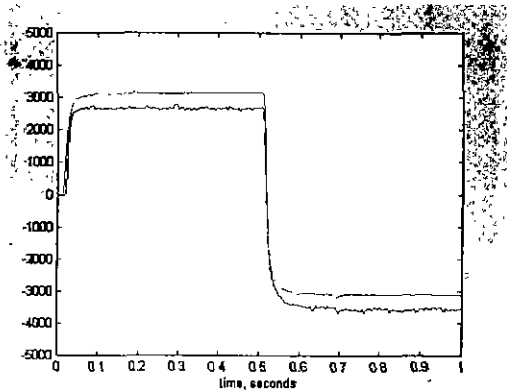


그림 8 제어기가 없는 ARMA 모델 식별  
X 축 : 시간 (초), Y 축 : 속도 (rpm)  
Fig. 7. Result of ARMA model identification without controller  
X axis : time (sec), Y axis : velocity (rpm)

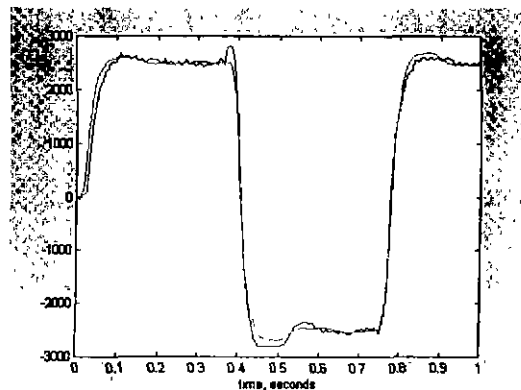


그림 10. PI 제어기를 적용한 ARMA 모델 식별 II  
X 축 : 시간 (초), Y 축 : 속도 (rpm)  
Fig. 10. ARMA model identification with PI controller II  
X axis : time (sec), Y axis : velocity (rpm)

제어기가 없는 시스템에 대한 상태공간 모델 식별 결과는 식(4.1), (4.3), (4.3)과 같다.

$$A = 1.0 \times 10^{12} \begin{bmatrix} -0.0003 & -0.0696 & -2.9322 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$C = 1.0 \times 10^{12} [ 0 \quad -0.0107 \quad 2.9364 ] \quad (4.3)$$

제어기가 있는 시스템에 대한 상태공간 모델 식별 결과는 식(4.4), (4.5), (4.6)과 같다.

$$A = 1.0 \times 10^{12} \begin{bmatrix} -0.0004 & -0.0157 & -0.3347 & -6.4162 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$C = 1.0 \times 10^{12} [ 0.0001 \quad 0.009 \quad 0.1682 \quad 6.4274 ] \quad (4.6)$$

### 4.3 속도제어 실험 결과

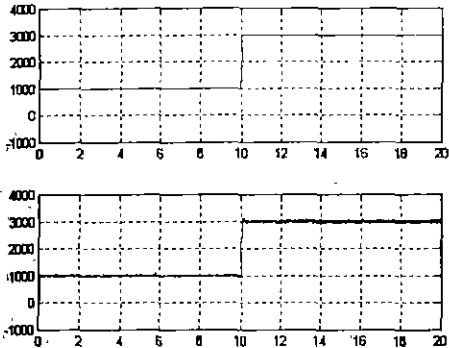


그림 11. 제어가 없는 모델에 대한 속도제어 결과

X 축 : 시간 (초), Y 축 : 속도 (rpm)

Fig. 11. Result of model without controller

X axis : time (sec), Y axis : velocity (rpm)

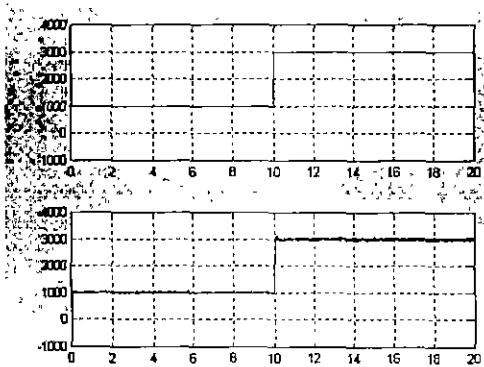


그림 12. PI 제어가 있는 모델에 대한 속도제어 결과

X 축 : 시간 (초), Y 축 : 속도 (rpm)

Fig. 12. Result of model with PI controller

X axis : time (sec), Y axis : velocity (rpm)

## 5. 결론

본 논문에서는 AC 서보 전동기 시스템의 상태공간 모델 식별을 위하여 ready-made 모델을 선정하고 ARMA 모델을 적용하여 시스템의 모델을 식별하였다. 시스템의 개루프 상태와 폐루프 상태에서 식별을 한 모델에 대하여 속도제어를 구현하였다. 개루프 시스템의 경우 모델에 대하여 적절한 제어를 설계한 후 속도제어 파형은 시행착오 방법으로 구현한 폐루프 시스템의 속도제어 결과와 같음을 증명하였다.

개루프 시스템을 식별하여 제어를 설계하는 장점은 시행착오 방법보다 제어기 구현시간을 단축할 수 있으며 시스템의 안전성을 보장할 수 있다

앞으로 향후 연구과제로 AC 서보 전동기 시스템의 전류제어기를 적용하는 것과 비선형 방정식을 식별하여 실제 시스템에 근접한 모델을 얻어내는 것이다. 또한 안정한 영역뿐 아니라 불안정한 영역 및 실시간 식별하는 방법에 대해서 연구되어야 할 것이다.

본 논문은 산업자원부 중기거점 개발사업 디지털 X-ray 영상진단기기 개발사업의 1단계 연구결과와 일부임.(1998.10~2000.10)

### 참 고 문 헌

- [1] J. R. Hendershot Jr and Tje Miller, "Design of Brushless Permanent-Magnet Motors," Magna Physics Publishing and Clarendon Press, Oxford, 1994.
- [2] Lennart Ljung, "System Identification-Theory for the User," Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1987, 1999.
- [3] LANDAU, "System Identification And Control Design," Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1990.
- [4] William s. Levine "Control Handbook," CRC Press, 1996.
- [5] 강호균, "아라고 원판 시스템의 상태공간 모델 식별에 관한 연구," 성균관 대학교 전기전자 및 컴퓨터 공학부, 1999.
- [6] Chi-Tsong Chen, "Linear System Theory and Design," Saunders College Publishing, 1984
- [7] Robert D. Strum and Donald E. Kirk, "Contemporary Linear System using MATLAB," Brooks and Cole, Thomson Learning, 2000.