

400 Hz AC 전압용 PWM 인버터의 퍼지추론 제어

Fuzzy-Inference Control of a PWM Inverter for 400 Hz AC Voltage Regulation

이만희*, 송재익*, 이강웅*

Man Hee Lee*, Jae Ik Song*, and Kang Woong Lee*

요 약

본 논문에서는 항공기용으로 사용되는 400 Hz 정현파 교류전원을 얻기 위한 단상 PWM 인버터의 출력전압 제어기법을 제안한다. 제안된 퍼지추론 제어 알고리즘은 부하변동이나 파라미터 변화에도 불구하고 인버터의 출력전압이 기준 정현파 전압을 추종하도록 한다. 퍼지추론은 출력전압과 기준전압의 오차와 오차 미분을 이용하고 퍼지추론에 의해 정해진 입력은 PWM 게이트 신호를 결정한다. 실험을 통하여 제안된 제어시스템의 성능을 확인하였다.

Abstract

In this paper we proposed an output voltage regulation scheme of a single-phase PWM inverter used to obtain a 400 Hz sinusoidal AC voltage for an aircraft. The fuzzy-inference control scheme is designed to achieve good output voltage tracking in the presence of load change or parameter variations. The PWM gate signals are determined by the fuzzy-inference controller using the error between the reference voltage and the feedback voltage and the derivative of error. The tracking performance of

I. 서 론

인버터(inverter)는 교류 정전압 전원장치(regulated voltage and frequency power supply), 무정전 전원장치(UPS: uninterruptible power supply)나 교류전동기 구동장치 등에 사용되는 DC-AC 변환기로 대부분 PWM(pulse width modulation) 변조방식을 채택하고 있다[1].

항공기에서 사용하는 교류전원은 400 Hz의 주파수를 사용하는데 이것은 각종 계기 및 변환장치의

무게와 부피를 줄이기 위함이다. 항공기에 장착된 각종 계기는 정확하게 동작하여야 하므로 계기용 전원은 전압변동 및 주파수 변동이 적어야 한다. 따라서 항공기용 인버터는 400 Hz의 주파수를 가지며 부하변동이나 파라미터 변동에도 불구하고 출력전압 변동이 최소가 되도록 설계되어야 한다[2].

출력전압 제어기법으로 제시된 히스테리시스(hysteresis) 방식은 과도응답 및 정상상태 응답 특성은 양호하나 스위칭 주파수가 변경되어 인버터가 부정확하게 동작할 뿐만 아니라 부하변동이 큰 경우 부하변동 효과를 보상하지 못한다[3]. 마이크로프로세

* 한국항공대학교 항공전자공학과(Dept. of Avionics Eng., Hankuk Aviation Univ.)

· 논문번호 : 99-1-5

· 접수일자 : 1999년 6월 28일

서를 이용하는 디지털 제어방식은 시스템 변경이 용이하며 신뢰성이 높고 비용이 적게 들기 때문에 디지털 제어방식에 의한 인버터 제어로 전환되고 있다. 디지털 제어방식인 데드비트(deadbeat) 제어기법은 스위칭 주파수를 일정하게 할 수 있어서 과도 응답 및 정상상태 응답 특성이 양호하나 부하변동이나 파라미터 변동에 매우 민감한 것이 단점이다[4]. 출력전압을 보상하기 위하여 도입된 상태궤환 제어기는 시스템 모델을 정확히 알아야 하기 때문에 시스템이 비선형 특성을 포함하거나 파라미터 변동이 있는 경우에는 효과적인 제어를 하지 못한다.

비선형 특성을 포함하거나 부하변동 및 파라미터 변동을 가지는 시스템 제어에 효과적인 제어방식으로 알려진 슬라이딩 모드(sliding mode) 제어가 PWM 인버터 제어에 적용되었다[5],[6]. 그러나 이 방식은 부하변동이나 파라미터 변동에는 강한 특성을 가지지만 제어입력의 스위칭 주파수가 유한하기 때문에 채터링(chattering) 현상이 발생되어 제어성능이 약화되는 단점을 가지고 있다.

최근 여러 분야에 응용되고 있는 퍼지추론 제어(fuzzy inference control)는 전문가의 경험을 제어기 설계에 반영시킬 수 있을 뿐만 아니라 시스템에 대한 정확한 수학적 모델을 요구하지 않기 때문에 비선형시스템 제어 및 부하변동 등에 의한 파라미터 불확실성을 포함하는 시스템 제어에 적합하다[7].

참고문헌 [8]에서는 이 제어기법을 적용하여 3상 PWM인버터의 전류제어를 하였다.

본 연구에서는 퍼지추론 제어기법을 적용하여 항공기용 400 Hz 교류전원을 발생시키는 PWM 인버터의 출력전압을 제어하는 제어시스템을 설계하고자 한다. 궤환된 출력전압과 기준전압과의 오차와 오차의 변화를 이용한 퍼지추론 제어기를 구성하여 부하변동에 의한 출력전압 변동을 보상하도록 한다. PWM 인버터 회로를 구현하고 실험을 통하여 제안된 제어기의 성능을 입증하고자 한다.

II. PWM 인버터 모델

직류전원으로부터 교류전원을 얻는 DC-AC 변환장치는 PWM 인버터, LC 필터와 부하로 구성된다. 인버터의 출력전압이 부하변동이나 파라미터 변동에 무관하게 기준전압을 유지하도록 하기 위해서는 그림 1과 같이 궤환 제어 루프(feedback control loop)로 구성되어야 한다. PWM 제어기는 궤환되는 출력전압이 기준전압과 같아지도록 PWM 인버터의 펄스 폭을 제어한다.

PWM 인버터의 동특성 모델은 LC 필터와 부하에 좌우되는데 부하는 비선형 특성을 포함하거나 주기적으로 스위칭될 수 있으며 시간에 따라 특성이 변하는 시변(time varying) 부하가 될 수 있다. 따라

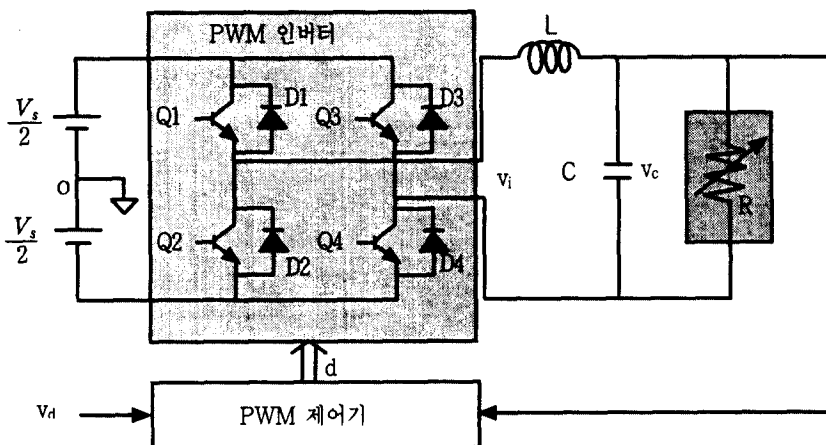


그림 1. PWM 인버터

Fig. 1. PWM inverter.

서 부하를 정확하게 모델링하기가 어렵다. 본 연구에서는 모델을 간략화하기 위하여 L과 C의 저항성분은 무시된다고 가정하고 부하는 저항성이며 시변이 될 수 있다고 가정한다.

LC 필터의 C 양단전압과 전압의 미분을 각각 상태변수 $x_1 = v_c$, $x_2 = \dot{v}_c$ 로 정하면 인버터의 동특성 방정식은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{LC} x_1 - \frac{1}{RC} x_2 + \frac{1}{LC} v_i \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 v_i 는 인버터 출력전압으로 $+V_s$, $-V_s$, 0의 값을 가지며 평균치는 제어입력과 같다. PWM 인버터는 PWM 제어기에 의해 결정되는 펄스 폭 d 로부터 v_i 를 출력시키는 이득이 고정된 증폭기 역할을 한다. 기준전압을 $v_d = V_d \sin \omega t$ 라 하고 출력전압과 기준전압과의 오차와 오차의 미분을 각각 $e_1 = x_1 - v_d$, $e_2 = \dot{e}_1$ 로 정의하면 다음과 같은 오차 상태방정식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= e_2 \\ \dot{e}_2 &= \frac{1}{LC} e_1 - \frac{1}{RC} e_2 + \frac{1}{LC} v_i \\ &+ \frac{1}{LC} v_d - \frac{1}{RC} \dot{v}_d - \ddot{v}_d \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)를 벡터-행렬식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{LC} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} e + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{LC} \end{bmatrix} v_i \\ &+ \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \left[\frac{1}{LC} v_d - \frac{1}{RC} \dot{v}_d - \ddot{v}_d \right] \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $e = [e_1 \ e_2]^T$ 인 오차벡터이다.

III. 퍼지추론 PWM 제어기

퍼지추론 제어는 최근 여러 분야에 응용되고 있는데 전문가의 지식과 경험을 고려하여 제어기가 설계된다. 이 제어기법은 Zadeh[9]에 의해 제시된 퍼지집합론을 적용한 것으로 공정이 수학적 모델로 정확하게 표현되지 못할 때 적용될 수 있으며 다른 비선형 제어기보다 강인한 특성을 가진다.

PWM 인버터의 출력전압을 제어하기 위한 퍼지추론 제어시스템은 그림 2와 같다.

퍼지추론 제어기는 퍼지화(fuzzification), 퍼지추론 엔진(fuzzy-inference engine)과 역퍼지화(defuzzification)의 세부분으로 구성된다. 퍼지화과정에서는 기준전압과 출력전압 사이의 오차값과 오차의 미분값을 언어변수(linguistic variable)인 퍼지변수값으로 변환한다. 즉, 오차와 오차의 미분값을 구간별로 소속되는 소속함수(membership function)로 표시한다. 소속함수의 결정은 전문가의 지식과 설계자의 경험으로 이루어지며 함수의 형태는 삼각형 모양, 사다리꼴, 종형이 있는데 간단하고 다루기가 쉬우므로 삼각형 모양을 많이 택한다.

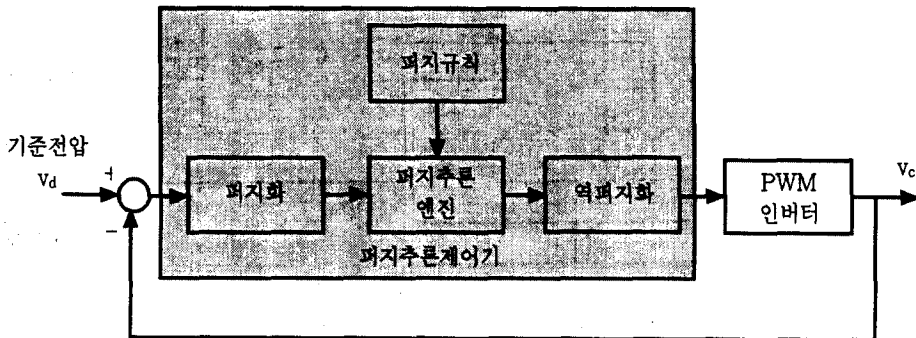


그림 2. 퍼지추론 제어시스템

Fig. 2. Fuzzy-inference control system.

퍼지화 과정에서 얻어진 퍼지변수들을 이용하여 퍼지추론이 이루어지는데 퍼지추론에 필요한 퍼지 규칙(fuzzy rule)의 선정은 성능개선에 중요한 역할을 한다. 퍼지규칙은 다음과 같은 IF-THEN 문의 집합으로 구성된다.

IF E is PB and DE is PB, THEN control is PB.

이 IF-THEN 문은 E(오차)가 PB(positive big)이고 DE(오차의 미분)가 PB이면 control 출력은 PB가 되어야 함을 나타낸다. 이와 같은 퍼지규칙을 이용하여 퍼지 입력변수에 대한 퍼지추론을 실행한다. 퍼지추론 방법은 일반적으로 min-max 기법이 많이 이용되고 있다. 퍼지추론 결과를 제어입력으로 사용하기 위해서는 퍼지변수로부터 실수로 변환되어야 하는데 이 과정을 역퍼지화라 한다. 역퍼지화는 다음과 같은 중심평균법(center average method)이 많이 이용되고 있다.

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{y}^i w_i}{\sum_{i=1}^m w_i} \quad (4)$$

여기서 y^* 는 역퍼지화된 실수값, \bar{y}^i 는 i 번째 퍼지집합의 중심값이고, w_i 는 퍼지집합의 최대값이다. 식 (3)의 제어입력 v_i 를 다음과 같이 선정한다.

$$v_i = -v_d + \frac{L}{R} \dot{v}_d + LC\ddot{v}_d + K_{Pfuzz}(e, \dot{e})e + K_{Dfuzz}(e, \dot{e})\dot{e} \quad (5)$$

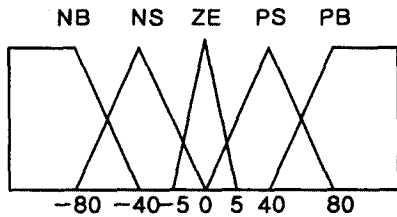
여기서 $K_{Pfuzz}(e, \dot{e})$ 와 $K_{Dfuzz}(e, \dot{e})$ 는 퍼지추론에 의해 정해지는 제어기 이득이다.

식 (5)의 제어입력을 식 (3)에 대입하면 오차 상태방정식은 다음과 같은 동차방정식이 된다.

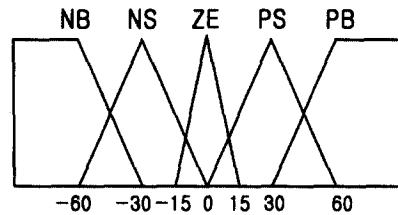
$$\dot{e} = \left[\begin{array}{cc} 0 & 1 \\ \frac{1}{LC}(K_{Pfuzz} - 1) & \frac{1}{LC}(K_{Dfuzz} - \frac{L}{R}) \end{array} \right] e \quad (6)$$

식 (6)의 특성방정식은 다음과 같이 된다.

$$\lambda^2 + \frac{1}{LC}(\frac{L}{R} - K_{Dfuzz})\lambda + \frac{1}{LC}(1 - K_{Pfuzz}) = 0 \quad (7)$$



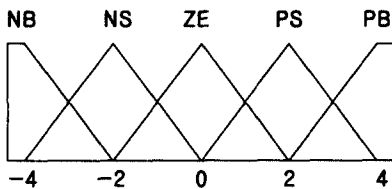
(a) 오차의 소속함수



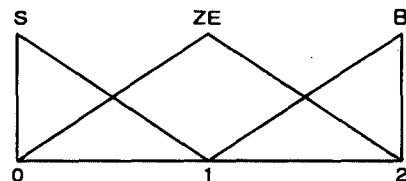
(b) 오차 미분의 소속함수

그림 3. 오차와 오차 미분의 소속함수

Fig. 3. Membership functions of voltage error and derivative of error.



(a) $K_{Pfuzz}(e, \dot{e})$ 에 대한 소속함수



(b) $K_{Dfuzz}(e, \dot{e})$ 에 대한 소속함수

그림 4. 이득 $K_{Pfuzz}(e, \dot{e})$ 와 $K_{Dfuzz}(e, \dot{e})$ 에 대한 소속함수

Fig. 4. Membership functions of $K_{Pfuzz}(e, \dot{e})$ and $K_{Dfuzz}(e, \dot{e})$.

E \ δE	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NB
NS	NB	NS	NS	NS	NS
ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
PS	PS	PS	PS	PB	PB
PB	PB	PB	PB	PB	PB

(a) $K_{P_{fuzz}}(e, \dot{e})$ 에 대한 퍼지규칙표

E \ δE	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	B	B	B	B	B
NS	B	S	S	S	B
ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
PS	B	S	S	S	B
PB	B	B	B	B	B

(b) $K_{D_{fuzz}}(e, \dot{e})$ 에 대한 퍼지규칙표

그림 5. 퍼지추론 규칙표

Fig. 5. Rule tables for fuzzy-inference.

제어기 이득 $K_{P_{fuzz}}(e, \dot{e})$ 와 $K_{D_{fuzz}}(e, \dot{e})$ 는 특성근이 복소평면의 왼쪽에 있으면서 부하변동이나 파라미터 변동에도 불구하고 인버터의 출력전압이 기준전압을 추종하도록 퍼지추론에 의해 결정한다.

제어기 이득을 결정하기 위한 오차와 오차의 미분에 대한 소속함수는 그림 3과 같고 이득 $K_{P_{fuzz}}(e, \dot{e})$ 와 $K_{D_{fuzz}}(e, \dot{e})$ 에 대한 소속함수는 그림 4와 같다. 이득을 퍼지추론하기 위한 규칙표는 그림 5와 같다.

IV. 실험

제안된 인버터의 퍼지추론 출력전압 제어기의 성능을 확인하기 위하여 그림 6과 같은 인버터 회로를 구성하였다. 스위칭 소자 IGBT는 Semikron사의 SKM40x 모듈을 사용하고 정현파 PWM 방식을 채택하여 PWM 신호를 발생시키는 SA828 IC를 사용하여 PWM 신호를 발생시키도록 하였다. PC에 저

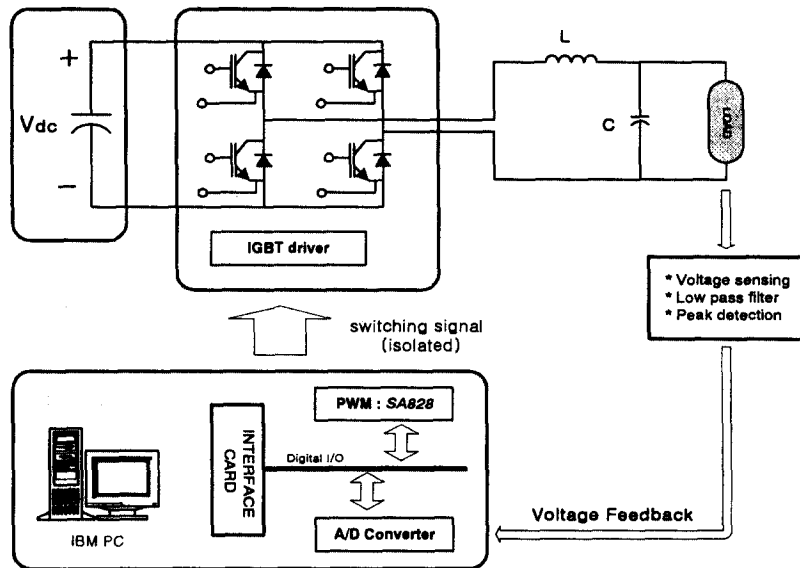


그림 6. 인버터 시스템

Fig. 6. Inverter system.

장된 퍼지추론 제어 알고리즘에 의하여 SA828의 내부 레지스터 값을 변경시켜 인버터의 출력전압이 제어되도록 한다. 부하 전압은 RC회로로 구성되는 피크치 검출회로를 거쳐 A/D 변환된 후 PC에 피드백되어 기준전압의 피크치와 비교된다. 인버터 출력전압에 포함되는 고조파를 제거하기 위하여 LC 필터를 사용하였으며 사용된 각 소자값은 표 1과 같다. IGBT 드라이버와 제어부는 포토 커플러를 사용하여 절연되도록 하였다.

실험은 5KΩ의 부하를 연결하고 부하가 고정될 때의 출력전압과 부하를 변화시켰을 때 출력전압의 보상 특성을 확인하였다. 그림 7은 5KΩ의 부하가 고정되었을 때의 출력파형이고, 그림 8은 이 출력이 궤환되는 피크치를 나타내고 있다. 그림 9는 저항성

표 1. 파라미터 값

Table 1. Values of parameters.

PARAMETER	VALUE	DIMENSION
Output Filter L	3.2	mH
Output Filter C	1	uF
Low-pass Filter R	1,000	Ω
Low-pass Filter C	0.1	uF
Nominal Load	5,000	Ω
DC-link Voltage	30	V
Output Voltage	22	V

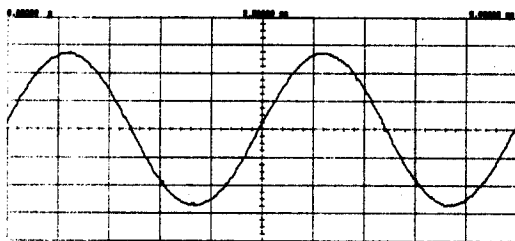


그림 7. 5 KΩ의 부하에 대한 인버터 출력전압(8[V]/div, 500[μ s]/div)

그림 7. Output voltage of inverter for resistive load 5 KΩ.

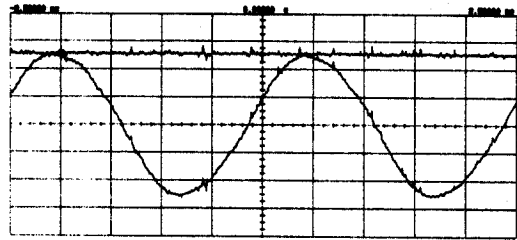


그림 8. 궤환되는 출력전압의 피크치(1.5 V/div, 500 μs/div)

Fig. 8. Peak value of output feedback voltage.

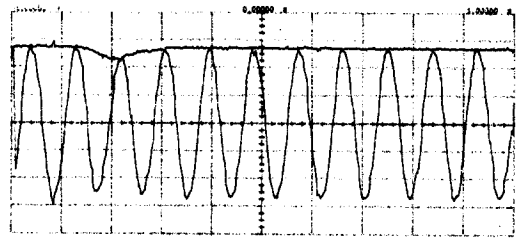


그림 9. 부하 변동을 가지는 출력전압(1.5[V]/div, 2 [ms]/div)

Fig. 9. Output voltage with resistive load variation.

부하를 30% 증가시켰을 경우에 출력전압의 복원을 나타내고 있다. 부하 변동으로 인버터의 출력전압은 15% 정도 작아지지만 궤환제어에 의하여 2 msec 이내에 기준값으로 보상됨을 보여주고 있다. 따라서 제안된 퍼지추론 제어기법이 부하변동에도 불구하고 원하는 출력전압을 유지하도록 하는 강인제어 기법임을 확인할 수 있다.

V. 결론

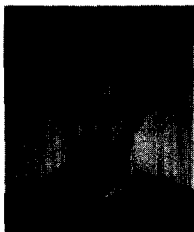
항공기용 인버터는 그 운용상의 특수성으로 인하여 민간용과는 달리 400 Hz의 고정밀도의 출력응답이 요구된다. 본 연구에서는 항공기용 인버터에 사

용하기 위한 400 Hz용 인버터의 출력전압을 제어하기 위한 퍼지추론 제어 알고리즘을 제시하고 실험을 통하여 성능을 확인하였다. 인버터의 동특성 오차방정식 모델이 안정하도록 하고 부하변동에 무관하게 원하는 출력전압을 얻도록 하기 위한 제어이득을 퍼지추론에 의해 정함으로써 제어시스템이 강인한 특성을 가지도록 하였다. PWM 파형 발생용 IC를 이용하여 인버터 회로를 구성하고 출력전압의 파크치가 궤환되도록 하였으며 저항성 부하 변동시에도 제안된 제어 알고리즘이 만족할 만한 출력보상을 할 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] J. Holtz, "Pulsewidth modulation for electronic power conversion," *Proc. of the IEEE*, vol. 82, no. 8, pp. 1194-1214, August, 1994.
- [2] W. G. Homeyer, E. E. Bowles, S. P. Lupan, C. Rodriguez, P. S. Walia, N. M. Shah, and M. A. Maldonado, "Advanced power converters for more electric aircraft applications," *Proc. of the 31th Intersociety Energy Conversion Engineering Conf.*, Washington, DC, pp. 137-142, Aug., 1996.
- [3] A. Tripathi and P. C. Sen, "Comparative analysis of fixed and sinusoidal band hysteresis current controllers for voltage source inverters," *IEEE Trans. Indus. Electr.*, vol. 39, no. 1, pp. 63-73, Feb., 1992.
- [4] Y. Y. Tzou and S. L. Jung, "Full control of a PWM DC-AC converter for AC voltage regulation," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Sys.*, vol. 34, no. 4, pp. 1218-1226, Oct., 1998.
- [5] S. L. Jung and Y.Y. Tzou, "Discrete sliding-mode control of a PWM inverter for sinusoidal output waveform synthesis with optimal sliding curve," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 11, pp. 567-577, July, 1996.
- [6] T. L. Chern, J. Chang, C. H. Chen, and H. T. Su, "Microprocessor-based modified discrete integral variable structure control for UPS," *IEEE Trans. Indus. Electron.*, vol. 46, no. 2, pp. 340-348, April, 1999.
- [7] V. S. C. Raviraj and P.C. Sen, "Comparative study of proportional-integral, sliding mode, and fuzzy logic controllers for power converters," *IEEE Trans. Indus. Appl.*, vol. 33, no. 2, pp. 518-524, March/Apr., 1997.
- [8] Y. Y. Tzou and S. Y. Lin, "Fuzzy-tuning current-vector control of a three-phase PWM inverter for high-performance AC drives," *IEEE Trans. Indus. Electron.*, vol. 45, no. 5, pp. 782-791, Oct., 1998.
- [9] L. X. Wang, *A course in fuzzy systems and control*, Prentice Hall PTR, New Jersey, 1997.

이 만 회(李晩熙)



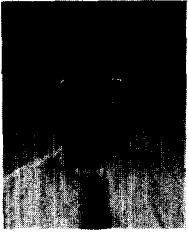
1997년 2월 : 한국항공대학교 항공전자공학과(공학사)
 1997년 3월~현재 : 한국항공대학교 항공전자공학과 석사과정 재학중
 관심분야 : 비선형제어, 강인제어, 항공기 전력 시스템, 전동기 제어.

송 재 익(宋在益)



1999년 2월 : 한국항공대학교 항공전자공학과(공학사)
 1999년 3월~현재 : 한국항공대학교 항공전자공학과 석사과정 재학중
 관심분야 : 비선형제어, 전력전자.

이 강 웅(李康熊)



1980년 2월 : 한국항공대학교 항공
전자공학과(공학사)

1982년 2월: 서울대학교 전자공학
과(공학석사)

1989년 8월: 서울대학교 전자공학
과(공학박사)

1983년 1월~1984년 2월 : 삼성전

자(주) 연구원

1994년 1월~1995년 1월:미시간주립대학교 전기공학과
방문교수

1989년 9월~현재 : 한국항공대학교 항공전자공학과 부교
수

관심분야 : 비선형제어, 강인제어, 적응제어, 로봇 제어,
전동기 제어