

PLL과 Fuzzy 논리를 이용한 전기자동차 구동용 유도전동기의 속도제어 Speed Control of Induction Motor for Electric Vehicles Using PLL and Fuzzy Logic

* 양형렬, 위석오, 나석환, 임영철, 박종진

전남대학교 전기공학부(Tel:062-529-7294;Fax:062-520-6382;E-mail:u9697020@chonnam.chonnam.ac.kr)

Abstracts This paper describes speed controller of a induction motor for electric vehicles using PLL and Fuzzy logic. The proposed system is combined precise speed control of PLL and robust, fast speed control of Fuzzy logic. The motor speed is adaptively incremented or decremented toward the PLL locking range by the Fuzzy logic using information of sampled speed errors and then is maintained accurately by PLL. The results of experiment show excellence of proposed system and that the proposed system is appropriate to control the speed of induction motor for electric vehicles.

Keywords Electric vehicles, Induction motor, PLL, Fuzzy, Speed control

1. 서론

오늘날 자동차 보급률이 현저하게 증가함에 따라 공해문제가 큰 사회적 문제로 대두되고 있다. 엔진에서 연소된 배기가스에는 NO_x, HC, CO 등의 유해한 성분이 포함되어 있어 도심공해의 주범이 되고 있으므로 이를 감소시키기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이 배기가스 대책을 연구하는 과정에서 주목된 것이 소음이 적고 배기 가스가 없는 전기 자동차이다.

전기 자동차는 배터리를 전원으로 하여 구동되는 전동기를 동력원으로 사용하게 된다. 그런데 전기자동차는 도로상태, 승객의 인원수 등 여러 가지 원인에 의해서 속도가 운전자의 의지와는 관계없이 변동될 것이고 이러한 속도변동은 승차감을 떨어뜨리게 될 것이다. 그러므로 우수한 주행 성능을 위하여 차량 부하의 변동에 무관하게 원하는 속도를 유지할 수 있는 일정 속도제어 시스템은 필수적이라 할 수 있겠고, 특히 무인 전기 자동차에서는 제어기에 의해 설정된 속도 지령치를 빠른 속도로 추종할 수 있는 구동시스템의 설계는 중요한 문제이다.

지금까지 유도 전동기의 정확한 속도 제어를 위하여 Phase-locked loop(PLL) 제어가 널리 사용되어져 왔다. 이 PLL 제어기는 전동기의 속도를 지령 주파수에 아주 정확하게 동기시킬 수 있는 장점이 있다. 그러나 대부분의 PLL 유도 전동기 속도제어 시스템은 다음과 같은 약점을 가지고 있다.

- ① 큰 계단입력의 속도지령을 주었을 때 PLL에 의한 결과는 신뢰성이 없다.
- ② 주파수 도입과정(pull-in process)이 느리고 동기상태로 무프를 가져오기까지 긴 시간 소요, 전동기의 속도 응답이 늦어진다.
- ③ 갑작스런 부하의 변동이 있을 경우 전동기는 동기를 잃게 된다.
- ④ 외란에 의한 PLL의 순간적인 속도변화가 기존의 아날로그 서보 시스템에 비해 크다.

따라서 PLL 제어에 퍼지제어를 조합하여 이러한 약점을 없애고 우수한 속도제어 성능을 발휘하는 제어기를 설계한다.

퍼지제어기는 제어대상의 동작에 대한 최소한의 지식만으로도 설계가 가능하고, 직관적, 간단, 실행이 쉬운 장점이 있기 때문에 PLL 제어와의 조합으로 강인하고 빠르며, 정확한제어가 가능하게 된다.

전동기의 속도는 주기적으로 마이크로컴퓨터에 의해 샘플링

되고 이 전동기의 속도와 지령치 속도의 오차가 설정치 이상이면 퍼지제어기에 의해 자동적으로 속도가 가감되어 PLL 동기범위에 도달하게 되고 일단 PLL 동기범위에서 조작되면 전동기의 속도는 속도지령전압을 주파수로 변환하기 위한 VCO에 의해 공급되는 기준 주파수에 동기(Lock)된다. 그리고 온도, 습셋오차, 소자의 노화 등에 대해 안정되게 된다.

2. 시스템 동작 원리

2.1 전체 시스템의 구성 및 동작원리

전체 시스템의 구성도를 그림 1에 나타내었다. 원하는 속도에 해당하는 전압을 VCO(Voltage Controlled Oscillator)에 인가하면 그 전압에 상응하는 주파수의 구형파를 출력한다. VCO의 출력 f_R 과 엔코더의 출력 f_M 이 PFD(Phase Frequency Detector)에 입력되어 주파수와 위상차에 해당하는 구형파를 발생하게 되고 PFD의 출력은 LF(Loop Filter)를 통해 평활 되고 샘플링되

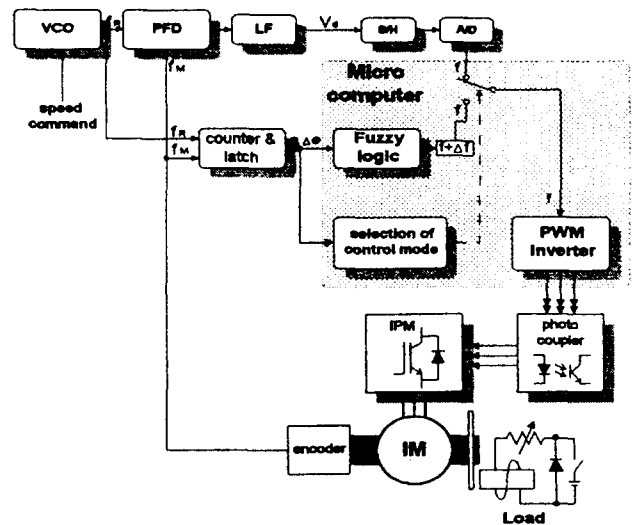


그림 1 시스템의 전체 구성도
Fig. 1 Schematic diagram of system.

어 A/D 변환기를 거쳐 마이크로컴퓨터로 입력 된다.

VCO의 출력과 엔코더의 출력 f_R, f_M 은 또한 카운트, 래치되고 마이크로컴퓨터로 입력된다. 마이크로컴퓨터에서는 두 주파수의 차 ($e : f_R - f_M$)를 계산하여

① $e > |\epsilon|$ (정해진 오차의 허용범위)이면

오차 변동률(Δe)을 계산하여 $e, \Delta e$ 에 해당하는 Δf 를 퍼지로지 룩업테이블에서 출력하고 Δf 는 이전의 주파수 지령치와 합산되어 PWM(PulseWidth Modulation)파형 생성 로직으로 입력 된다.

② $e < |\epsilon|$ 이면

A/D 변환기로부터 받은 V_d 를 주파수 지령치 f 로 하여 이것을 PWM파형 생성 로직으로 입력한다.

③ PWM파형 생성 로직에서는 그 주파수 지령에 해당되는 PWM파형(3상)을 일정 V/f 제어방식으로 생성하여 출력한다.

마이크로컴퓨터에서 출력된 PWM파형은 포토커플러를 거쳐 절연된 후 IPM(Intelligent Power Module)으로 입력되고 IPM에서는 PWM파형에 따른 전력을 전동기에 공급한다. 유도 전동기 자체에 부착되어있는 엔코더에서는 전동기의 회전수에 상당하는 주파수의 펄스가 출력되어 PFD와 카운터로 다시 입력되어 비교된다.

3. 퍼지 논리 제어기의 설계

퍼지 논리제어기는 어떤 현상의 불확실한 상태를 수량적 정보로 다루는 수학적 기법의 일종으로서, 인간의 사고나 애매모호함을 정량적으로 해석하기 위하여 1965년 미국 캘리포니아 버클리대학의 L. A. Zadeh교수에 의해서 제안된 이론으로서 멤버쉽 함수(Membership Function)가 도입되었으며, 퍼지논리(Fuzzy logic) 또는 퍼지숫자(Fuzzy number)라고도 한다.[5]

퍼지 논리 제어기의 입력변수로서 속도오차 E 와 오차의 변화량 ΔE , 출력변수로서 속도지령 주파수의 변화량 Δf 를 사용하며 각각 다음과 같이 표현된다.[4]

$$\begin{aligned} E &= \omega_r^*(n) - \omega_r(n) \\ \Delta E &= E(n) - E(n-1) \\ \Delta f &= f(n) - f(n-1) \end{aligned} \quad (1)$$

각 변수에 대한 소속 함수는 그림2와 같다. 여기서 NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB는 언어적인 변수로서 다음과 같다.

- NB : Negative Big
- NM : Negative Midium
- NS : Negative Small
- ZO : Zero
- PS : Positive Small
- PM : Positive Midium
- PB : Positive Big

실 시스템에 적용할 퍼지제어기를 설계하기 위해서는 그 시스템에 적합한 퍼지제어 규칙을 찾아야 한다. 각 구간별 요구되는 이득 변화의 크기와 방향을 분석하고 이것을 언어적 표현으로 규칙화 한다.

- (1) E 가 PB이고 ΔE 가 ZO이면 Δf 는 PB이다.
- (2) E 가 ZO이고 ΔE 가 NB이면 Δf 는 NB이다.
- (3) E 가 NB이고 ΔE 가 ZO이면 Δf 는 NB이다.
- (4) E 가 ZO이고 ΔE 가 PB이면 Δf 는 PB이다.
- (5) E 가 PM이고 ΔE 가 ZO이면 Δf 는 PM이다.

(6) E 가 ZO이고 ΔE 가 NM근처이면 Δf 는 NM이다.

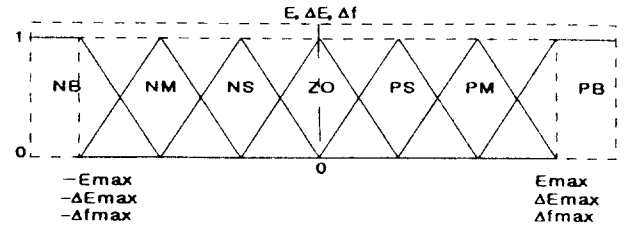


그림 2 멤버쉽 함수

Fig. 2 Membership function.

위의 요구 특성을 전체 입력변수 범위에 대하여 적용하여 구한 퍼지규칙은 표1과 같다.

표 1 퍼지 제어규칙

TABLE 1 Fuzzy rules.

		CHANGE OF ERROR						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E	PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB
	PM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB
	PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB
	ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
R	NS	NB	PB	NM	NS	ZO	PS	PM
	NM	NB	PB	PB	NM	NS	ZO	PS
	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO

퍼지추론 및 비퍼지화는 Mizumoto의 간이 Product-sum-gravity를 사용하였다. 그림3은 간이 Product-sum-gravity방법

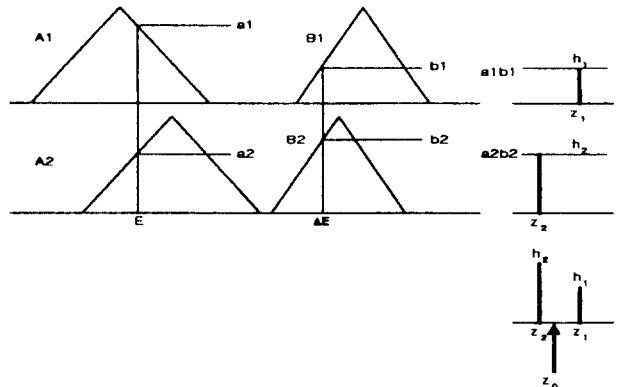


그림 3 비퍼지화

Fig. 3 Defuzzification.

과정을 나타낸 것이며 퍼지추론 형태는 식2로 나타낸다.[6]

$$z_0 = \frac{\sum_{i=0}^n h_i z_i}{h_1 + h_2 + \dots + h_n} \quad (2)$$

실시간 처리를 하기위하여 모든 가능한 입력조건에 대한 퍼지 추론 결과 z_0 를 표2와 같이 룩업테이블로 만들었다.

4. Phase-Locked Loop제어기

PLL은 입력클럭 주파수와 전동기의 속도를 정확하게 동기시키므로 정밀 속도제어에 적합한 제어방법이다.[1] PLL 모드에서 동작되는 유도전동기 구동 시스템의 블록도를 그림4에 보인다. 이것은 PFD, 루프필터, 샘플/홀드, A/D 변환기, PWM 인버터, 유도전동기, 엔코더로 구성되어 있고, 이 중에서 샘플/홀드, A/D

표 2 퍼지제어기의 룩업테이블
TABLE 2 Lookup table of the Fuzzy controller.

Error	Error Change														
	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
-7	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1	-0.9	-0.7	-0.5	-0.3	-0.2	0
-6	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.1	-1	-0.8	-0.7	-0.5	-0.4	-0.1	0	0.2
-5	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1	-0.9	-0.7	-0.6	-0.4	-0.2	0	0.1	0.3
-4	-1.2	-1.2	-1.2	-1.1	-1.1	-1	-0.8	-0.7	-0.5	-0.4	-0.1	0	0.2	0.4	0.5
-3	-1.2	-1.2	-1.2	-1.1	-1	-0.8	-0.7	-0.5	-0.4	-0.2	0	0.1	0.4	0.5	0.7
-2	-1.2	-1.2	-1.2	-1	-0.8	-0.6	-0.5	-0.3	-0.1	0	0.2	0.4	0.6	0.7	0.9
-1	-1.2	-1.1	-1	-0.8	-0.7	-0.5	-0.4	-0.2	0	0.1	0.4	0.5	0.7	0.8	1
0	-1.2	-1	-0.9	-0.7	-0.5	-0.3	-0.2	0	0.2	0.3	0.5	0.7	0.9	1	1.2
1	-1	-0.8	-0.7	-0.5	-0.4	-0.1	0	0.2	0.4	0.5	0.7	0.8	1	1.1	1.2
2	-0.9	-0.7	-0.6	-0.4	-0.2	0	0.1	0.3	0.5	0.6	0.8	1	1.2	1.2	1.2
3	-0.7	-0.5	-0.4	-0.1	0	0.2	0.4	0.5	0.7	0.8	1	1.1	1.2	1.2	1.2
4	-0.5	-0.4	-0.2	0	0.1	0.4	0.5	0.7	0.8	1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2
5	-0.3	-0.1	0	0.2	0.4	0.6	0.7	0.9	1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
6	-0.2	0	0.1	0.4	0.5	0.7	0.8	1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
7	0	0.2	0.3	0.5	0.7	0.9	1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2

변환기, PWM 인버터, 유도전동기, 엔코더가 VCO를 이루고 있다. 엔코더로부터 피드백된 펄스 f_M 이 PFD에 의해 기준 주파수 펄스 f_R 과 비교되어 나온 오차값은 루프필터(LF)를 통하여 아날로그 전압 V_d 로 변환되고, 이것은 다시 A/D 컨버터를 통하여 컴퓨터로 입력된다. PWM 인버터의 출력은 유도전동기의 속도를 f_M 과 f_R 의 차가 작아지도록 조절하고 결국 이 두 신호는 위상과 주파수가 일치하게 된다. 이때 이 루프는 동기(Lock)되었다고 하며 유도전동기의 속도는 지령주파수와 동기하게 된다.

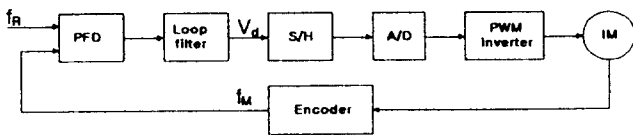


그림 4 Phase-locked loop 제어의 개략도
Fig. 4 Block diagram of Phase-locked loop control.

5. PWM 인버터

인버터의 각 스위칭 소자를 구동하기 위해 전압변조가 필요하다. 전압변조는 최적 PWM, 삼각파 비교·PWM, 공간전압벡터 변조법에 의한 PWM 방식 등을 통해 실현하고 있다. 교류 전동기를 구동하는 경우에는 전 운전영역에서 최대의 토크를 얻기 위해 주어진 직류 링크 전압을 최대한으로 사용할 수 있어야 하고, 고조파의 왜형율을 줄일 수 있어야 하며, 디지털 구현이 용이해야 한다. 이러한 관점에서 볼 때 공간전압벡터 변조법에 의한 PWM방식은 다른 어떤 종류의 PWM 방식 보다도 우수하여 그 적용 범위가 급속히 확대되고 있는 변조기법이다.[4] 본 연구에서는 유도전동기 구동용 PWM 파형 발생을 위하여 공간전압벡터 PWM기법을 사용하였다.

전압벡터는 선간전압이 0인 제로점(V0점, V7점)과 전압을 발생시키는 이웃하는 두 벡터로 이루어진 6개의 삼각형으로 구성된 그림 5와 같은 정육각형을 따라 회전한다. 각각의 삼각형을 섹터라고 하며 전압벡터를 발생시키는 스위치들의 도통시간을 유지시켜줌과 동시에 전압벡터를 $V_1 \rightarrow V_2 \rightarrow V_3 \rightarrow V_4 \rightarrow V_5 \rightarrow V_6$ 의 방향으로 회전 시키거나, 그 반대방향으로 회전시킴으로써 출력전압을 거의 정현파에 가까운 전압으로 변조한다. 이때 각각의 섹터별 전압벡터의 체제시간은 다음과 같다.[2]

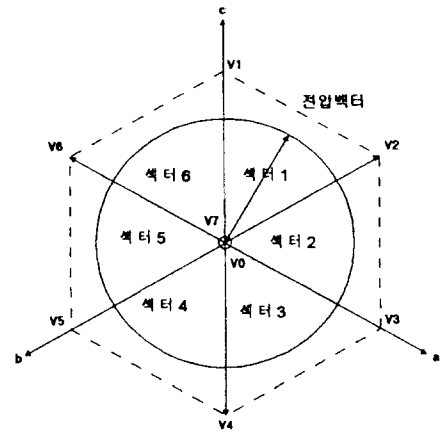


그림 5 평면상의 전압벡터의 궤적
Fig. 5 Trajectories of voltage vector.

$$T_1 = mT_s \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta_r\right)$$

$$T_2 = mT_s \sin \theta_r$$

T_s : 스위칭주기, θ_r : 변조각

m 은 변조지수(modulation index)로서 다음과 같다.

$$m = \frac{|V_0(t)|}{E/\sqrt{3}}$$

V_0 를 유지하는 시간 T_0 는 다음과 같다.

$$T_0 = T_s - T_1 - T_2$$

또한, 최대 출력전압은 다음과 같다.

$$\max |V_0(t)| = \frac{E}{\sqrt{3}}$$

6. 실험결과 및 고찰

본 연구의 타당성을 입증하기 위하여 PLL 및 퍼지제어를 적용한 유도전동기의 속도제어 실험을 행하였다. 본 시스템에서는 PC586을 사용하여 전체적인 소프트웨어를 처리하였고, VCO, PFD는 motorola사의 MC74HC4046을 사용하였다. 퍼지 제어 알고리즘은 C언어로 작성되어 마이크로컴퓨터에 의해 수행되며 $e, \Delta e$ 를 입력으로 하여 룩업테이블로부터 유도 전동기를 구동시킬 주파수 변화값 Δf 를 출력한다.

한편 배터리의 전압(24V)은 상용 인버터를 통해 교류 220V, 60Hz로 승압되어 브리지 다이오우드를 통하여 직류로 변환된 후 IPM에서 PWM방식에 의해 3상 교류전압으로 변환된다. 이때 PWM파형은 실시간 처리를 위하여 마이크로컴퓨터에 저장된 록업테이블에 의해 생성된다. 그리고 실험에 사용된 전동기는 Lab-Volt사의 175W, 120/208V, 60Hz, 1.2A, 1670rpm의 정격을 가진 4극 농형 유도전동기이며, 부하장치 또한 Lab-Volt사의 0 - 3 N·m의 토크, 250 - 5000rpm의 정격을 가진 전자부하장치를 사용하였다.

FUZZY

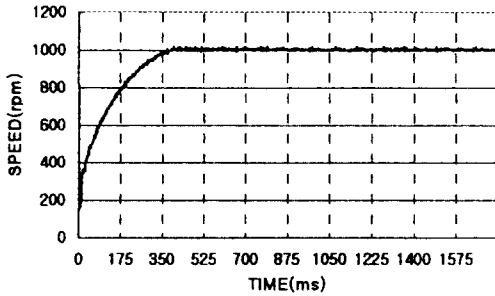


그림 6 순수한 퍼지제어만을 사용했을 경우의 스텝응답
Fig. 6 Step response using pure fuzzy control.

FUZZY & PLL



그림 7 Fuzzy와 PLL제어를 함께 사용했을 때 스텝응답
Fig. 7 Step response using fuzzy and PLL control.

FUZZY & PLL

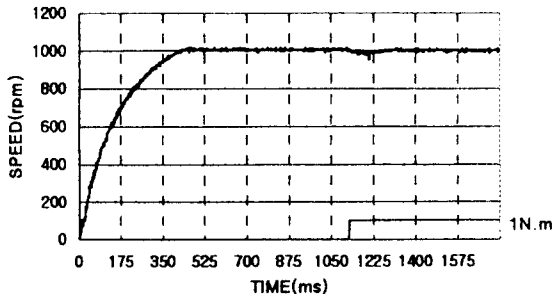


그림 8 Fuzzy와 PLL 제어를 사용한 시스템의 부하의란에 대한 속도응답
Fig. 8 Speed response with load disturbance for system using fuzzy and PLL control.

유도 전동기의 속도지령을 1000rpm 계단입력으로 주었을 때 제안된 시스템의 실험결과를 그림6, 그림7, 그림8에 보인다. 퍼지 제어기만으로 제어를 하였을 때는 정상상태에서 약간의 진동(약 0.016%의 오차)을 보여주고 있으나 PLL과 퍼지 제어를 함께 사용했을 경우에는 거의 진동이 없는 정확한(약 0.008%의 오차) 제어가 됨을 알 수 있었다. 또한 부하를 걸어주었을 때에는 980rpm으로 속도가 떨어진 후 120ms만에 원래의 회전속도로 회복됨을 볼 수 있었다. 그러나 순수 PLL 만을 사용하였을 경우에는 비동기(unlocked) 현상이 발생하였다.

이 실험을 통하여 제안된 시스템이 외란에 대한 강인성, 빠른 추종 속도, 정확성 등에서 우수한 성능을 가지고 있음을 입증하였다.

7. 결론

샘플링된 속도오차를 이용하여 퍼지 제어기로 전동기의 속도를 빠르게 PLL 동기범위까지 끌어올리고 다음에 PLL은 전동기의 속도를 지령 속도에 동기 시킨다. 퍼지 제어기는 유도 전동기에 대한 자세한 지식이 없어도 좋은 성능을 가진 속도제어 시스템을 설계할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러므로 본 논문에서는 이러한 퍼지 제어알고리즘을 정교한 속도제어 성능을 가지는 PLL에 적용시킴으로써 부하의 변동에 의해 발생하는 PLL의 동기상실(loss-of-lock)로부터 재빨리 정상 속도로 회복하여 안정된 상태로 회전을 할 수 있는 속도제어 시스템을 설계하였다.

본 실험 결과로부터 PLL 유도 전동기 속도제어 시스템에 퍼지 제어기를 조합하는 것이 적절하며, 또한 본 시스템의 성능이 우수함을 확인할 수 있었다. 따라서 잦은 부하변동과 외란의 영향을 받기 쉬운 전기 자동차의 구동장치에 제안된 시스템을 적용함이 적합하리라 생각된다.

참고문헌

- [1] A. Takano, "Quick-Response Torque-Controlled Induction Motor Drives Using Phase-Locked Loop Speed Control with Disturbance Compensation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 43, pp. 640-646, Dec. 1996.
- [2] 김영근, 최정환, "공간벡터 PWM을 이용한 유도전동기의 속도 제어에 관한 연구", '96대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.476-478, 1996.
- [3] 서영수, 상대용, "공간전압벡터 PWM 전류제어방식에 의한 유도전동기의 서보운전", '96대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.467-469, 1996.
- [4] 송호신, 이오걸, "퍼지 기법으로 구동되는 유도 전동기의 가변속 운전에 관한 연구", 조명·전기설비학회지, 제8권 제1호, pp.46-51, 1994.
- [5] 이오걸, "퍼지 기법으로 구동되는 직류 서보 시스템의 위치 제어", 박사학위논문, 동아대학교, 1993.
- [6] 조순봉, 현동석, "부하관성모멘트 변화를 보상한 유도전동기의 퍼지 PI 속도제어기", *KIEE Trans.*, v.43, n.2, pp. 233-243, 1994.