

퍼지 추론을 이용한 유도 전동기의 광대역 속도 제어

(The Wide-Range Speed Control of Induction Motor using Fuzzy Reasoning)

최흥규 · 강태은 · 송영주 · 김병철 · 전광호*

(Hong-Kyoo Choi · Tae-Eun Kang · Young-Joo Song · Byung-Chul Kim · Kwang-Ho Jun)

홍익대학교 전기설비 연구소

Abstract

In this paper, a novel speed control system that implements the fuzzy logic controller(FLC) is proposed. Fuzzy controller is shown more excellent efficiency than a conventional controllers in the strength aspect and non-linear controller using IF-THEN rule which can control without process the accurate mathematical modeling about induction motor. But we cannot expect that conventional fuzzy controller divide equally the space of input and output parameter and use the certain shape of triangle membership function. Therefore to develop the efficiency of conventional fuzzy controller, We need to scale the range of membership functions. In this study, proposed fuzzy controller has the ability controlling scale of membership functions using by output scaling factor.

1. 서론

산업계의 자동화가 진행되면서 구동 장치로써 광범위하게 사용되어 왔던 전동기 중, 특히 직류 전동기는 정밀한 속도 및 위치 제어가 용이하여 많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나 직류 전동기는 제어성은 뛰어나지만 정류자와 브러시가 존재하여 마모로 인한 지속적인 보수 및 점검이 필요하고, 정류자의 정류 한계상 고속화 및 고압화에 문제가 있고, 대용량에서는 설치시 가격이 비싸고 설치 환경에도 제약을 받는다[1]. 반면에 교류 전동기는 기계적 접촉을 일으키는 브러시나 정류자가 없어 기계적인 마모에 의한 유지 보수가 필요 없으며 견고하고 보수가 용이하다는 잇점과 구조가 간단하고 소형, 경량, 가격의 저렴함 등 여러 가지 장점들을 가지고 있다[1][2][3][4][5].

대표적인 교류 전동기로는 유도 전동기와 동기 전동기 등이 있는데 그 중 유도 전동기는 크기, 무게, 회전자 관성, 최대 속도, 효율 및 비용면에서 직류 전동기에 비해 매우 우수하다. 이러한 장점에도 불구하고 유도 전동기는 전기적 양(量)인 전류와 전압 등의 입력 변수들이 역학적 양(量)인 토크 및 속도 등의 출력 변수와 복잡하게 결합되어 있는 비선형 결합 시스템이므로 제어가 용이하지 않으며, 상변환(相變換) 인버터 소자의 빠른 스위칭 시간이 요구되는 단점 등이 있다. 그러나 최근 마이크로프로세서와 고성능 전력용 반도체

소자의 급속한 발달로 인하여 직류 전동기의 응용 분야를 유도 전동기로 대체하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다[4][5][6].

유도 전동기의 속도 조정(speed regulation)을 위해 쓰이는 전형적인 PI 제어기는 저속 영역에서 동적 속도 추종(追從, dynamic speed tracking) 파라미터의 변화와 부하 변동에 따른 빠른 응답 특성을 갖지 못하는 문제점이 있어 저속 영역에서 유도 전동기의 구동이 불가능하다. 이와 같은 이유로 산업 현장에서는 저속 영역에서는 별도의 직류 전동기나 스텝핑 전동기(steping motor)를 이용하고 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 유도 전동기를 제어하는 방법에 있어 유도 전동기의 시정수 변동에 따라 적용 특성이 있고 제어기 구성이 간단하며 시스템 응답이 강인한 퍼지 제어 방식에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다[7][8].

퍼지 제어는 숙련자의 경험과 지식을 IF-THEN 규칙으로 하여 시스템을 제어하는 비선형 제어로서 과도 응답 특성과 외란에 대한 강인성 면에서 고전 제어 방식보다 우수한 성능을 보이나 퍼지 제어기의 입출력 변수의 공간을 균등하게 나누고 일정한 형태의 삼각형 멤버십 함수를 이용한 퍼지 제어기는 한정된 성능 이상을 기대할 수 없고 유도 전동기와 같은 시간 변화 변수를 가지는 복잡한 시스템을 제어하는 경우 퍼지 제어기의 퍼지 제어 변수를 선택하는 것은 쉬운 일이 아니다

[8][9]. 또한 유도 전동기를 제어하는데 있어 유도 전동기의 속도 영역이 저속, 중속, 고속인 각각의 경우에서 지령 속도와 추정 속도의 오차가 같다고 하더라도 각각의 속도 영역에서 유도 전동기를 제어하기 위한 토오크 전류의 양은 큰 차이를 보인다. 그럼에도 불구하고 일반적인 퍼지 제어를 이용한 유도 전동기 제어에서는 유도 전동기의 속도 영역에 상관없이 동기 속도를 유지하기 위한 토오크 전류의 양을 기준으로 하여 유도 전동기의 속도를 제어하거나 각각의 속도 영역에 따라 각각의 퍼지 제어를 이용한다[9].

본 연구에서는 일반적인 퍼지 제어의 문제점을 개선하여 동일한 유도 전동기를 저속, 중속, 고속의 속도 영역에서 제어가 가능한 퍼지 제어를 설계하였다.

2. 본 문

2.1. 유도 전동기의 벡터 제어

유도 전동기의 벡터 제어 방법은 자속 벡터의 추정 방법에 따라 직접 벡터 제어 방법(direct vector control method)과 간접 벡터 제어 방법(indirect vector control method)으로 구분된다. 직접 벡터 제어 방법은 위상 공간에서의 회전자 자속의 위상각과 크기를 센서나 자속 모델을 이용하여 측정하는 방법인데 그림 1에 나타난 바와 같이 자속 센서에 의해 측정된 자속으로부터 $\cos\theta$ 와 $\sin\theta$ 를 발생하여 기본적인 제어 파라미터인 I_{ds} 와 I_{qs} 를 고정축의 d축 성분 i_{ds} 와 q축 성분 i_{qs} 로 변환한다.

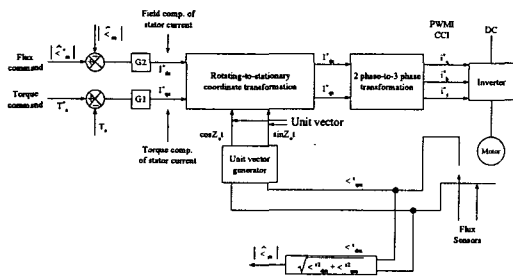


그림 1. 직접 벡터 제어
Fig. 1. Direct method of vector control

회전자의 자속을 측정하는 방법으로는 전동기의 공극에 홀 효과 검출기(hall CT)를 설치하는 방법과 공극에 자속 측정 코일을 설치해 유기 전압을

적분하여 구하는 방법등이 있다. 그러나 이러한 방법들은 온도에 따라 센서의 출력이 동요하여 그 보상이 어렵고 측정 장치의 설치에 따른 문제가 발생한다. 또한 직접 벡터 제어 방식은 고정자의 저항에 의존하고 있어 고정자 저항의 온도 변화에 따른 정확한 회전자 속도 추정이 어렵고, 유도 전동기의 정지 상태에서는 회전자 자속의 계산이 되지 않기 때문에 낮은 속도 영역에서는 시스템의 특성이 나빠지게 된다.

따라서 본 논문에서는 고정자 전류와 회전자의 속도를 이용하여 자속 벡터를 얻는 그림 2와 같은 간접 제어 방식을 이용한다.

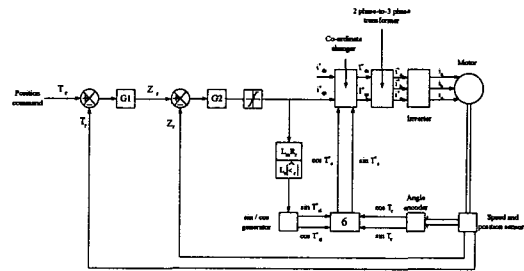


그림 2. 간접 벡터 제어
Fig. 2. Indirect method of vector control

2.2. 제안된 퍼지 제어 알고리즘

유도 전동기의 속도 조절을 위해 쓰이는 전형적인 PI 제어기는 고속 영역에서는 우수한 성능을 가지나 중속과 저속 영역에서는 동적 속도 추정 파라미터의 변화와 부하 변동에 대해 빠른 응답 특성을 갖지 못하는 문제점이 있으며 특히 저속 영역에서는 유도 전동기의 구동이 불가능하다.

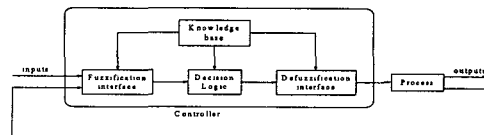


그림 3. 일반적인 퍼지 제어기의 블록 선도
Fig. 3. Block diagram of a typical fuzzy controller

따라서 최근에는 그림 3과 같은 퍼지 제어를 이용하여 빠른 응답 특성을 갖는 제어기에 대해 중속, 고속 영역 제어가 연구되고 있다. 퍼지 제어 알고리즘을 실현시키기 위한 퍼지 논리 제어기의 일반적인 형태는 퍼지화 인터페이스, 지식 베이스, 결정 논리와 비퍼지화 인터페이스로 구성되었다. 그러나 현재까지 연구된 퍼지 제어기로는 중속, 고

속 영역에서의 부하 변동에 대한 응답 속도는 개선되었으나 저속 영역에서의 제어는 불가능하였다.

본 연구에서는 유도 전동기를 고속, 중속, 저속의 광대한 속도 영역에서 구동할 수 있는 제어를 설계하였다. 본 연구에서 제안한 퍼지 제어 알고리즘은 유도 전동기의 속도 제어 원리에 적용되는 PI 제어기에 대한 경험과 지식을 근거로 한 언어적 규칙을 제어 방식으로 선택하였다. 유도 전동기를 제어하기 위한 퍼지 제어기는 그림 4와 같다.

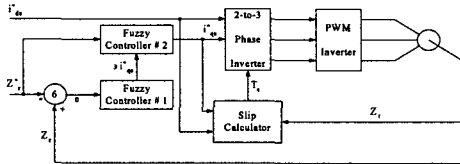


그림 4. 제안된 퍼지 제어기
Fig. 4. Proposed fuzzy controller

그림 4의 퍼지 제어기는 속도 오차와 속도 오차 변화를 퍼지화 한 퍼지 변수를 입력으로 하여 유도 전동기의 속도를 제어하는 토크 성분 전류를 발생시키는 퍼지 제어기 #1(fuzzy controller #1)과 유도 전동기의 속도 영역(고속, 중속, 저속)에 맞는 출력 조절 계수(output scaling factor)를 발생시키는 퍼지 제어기 #2(fuzzy controller #2)로 구성되었다.

2.3. 퍼지화 인터페이스

본 연구에서 제안한 퍼지 제어기는 2개의 퍼지 제어기로 구성되어 있다.

첫 번째 퍼지 제어기 #1은 속도의 오차와 속도의 오차 변화를 퍼지화한 2개의 퍼지 입력 상태 변수와 1개의 크리스프한 입력 변수 조건에 따라 자속을 일정하게 유지하면서 유도 전동기의 속도를 제어하기 위한 전류 $i_{qs}^*(k)$ 를 출력시키게 설계되었다.

두 번째 퍼지 제어기 #2는 저속, 중속, 고속의 광대한 속도 영역에서 유도 전동기의 속도를 조절하기 위한 첫 번째 퍼지 제어기의 출력을 조절하는 계수를 출력하게 설계되었다.

퍼지 제어기 #1의 입력으로 사용되는 2개의 퍼지 상태 변수중 첫 번째 퍼지 상태 변수는 지령 속도와 실제 유도 전동기의 추정 속도의 오차에 대한 퍼지 변수 $\tilde{E}_r(k)$ 이다. 속도의 오차에 대한

퍼지 변수는 유도 전동기의 지령 속도 W 와 유도 전동기가 지령 속도에 대응하여 동작하고 있는 유도 전동기의 회전자 추정 속도 $\omega_r(k)$ 를 비교한 후 그 오차를 퍼지 연산자를 이용하여 퍼지화하여 얻어진다.

$$E_r(k) = \omega_r^* - \omega_r(k)$$

$$\tilde{E}_r(k) = \text{fuzzifier}(E_r(k)) \quad (1)$$

단, $\tilde{E}_r(k)$: 퍼지 집합

$E_r(k)$: 크리스프 입력

유도 전동기의 회전자 추정 속도 $\omega_r(k)$ 는 회전자 각속도의 정밀도를 향상 시키기 위하여 다음과 같은 평균치 알고리즘을 이용하여 추정한다.

$$W_R K = \frac{d_R K \mathfrak{N} d_R K \mathfrak{N}}{r 4} \quad (2)$$

여기서, $d_R \cdot$ 는 회전자 각도의 표준치이고 $r 4$ 는 표본화 시간이다.

식 (1)로 주어진 속도 오차를 퍼지화한 변수의 전체 퍼지 집합(universe of discourse of velocity error)은 7개의 중첩된 퍼지 집합 - NL_{E_r} , NM_{E_r} , NS_{E_r} , Z_{E_r} , PS_{E_r} , PM_{E_r} , PL_{E_r} 등의 퍼지 집합 - 으로 구성된다. 각 속도 오차의 소속 함수는 그림 5와 같이 일반적으로 사용되는 정규화 된 삼각 분포를 갖는다.

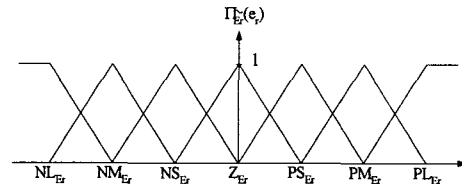


그림 5. 속도 오차의 소속 함수 분포
Fig. 5. Membership distribution of velocity error

두 번째 퍼지 상태 변수 $\tilde{E}_r(k)$ 는 식 (3)과 같이 속도 오차의 변화를 퍼지 연산자를 이용하여 퍼지화함으로써 얻어진다.

$$\tilde{E}_r(kT) = E_r(kT) - E_r[(k-1)T]$$

$$\tilde{E}_r(k) = \text{fuzzifier}(E_r(k)) \quad (3)$$

단, $E_r(k)$: 크리스프 입력

식 (3)으로 주어진 속도 오차 변화를 퍼지화한 변수의 전체 퍼지 집합 역시 7개의 중첩된 퍼지 집합으로 구성된다. 각 속도 오차 변화의 소속 함수는 그림 6과 같이 정규화 된 삼각 분포를 갖는다.

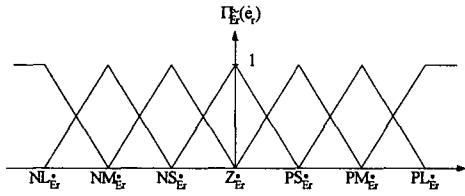


그림 6. 속도 오차 변화의 소속 함수 분포
Fig. 6. Membership distribution of velocity error change

식 (4)의 세 번째 퍼지 상태 변수는 첫 번째 퍼지 제어기의 퍼지 추론에 의해 추론된 출력에 대한 퍼지 변수이다.

$$\widetilde{\Delta i_{qs}^*} = \text{fuzzifier}(\Delta i_{qs}^*) \quad (4)$$

여기서, $\widetilde{\Delta i_{qs}^*}$: 퍼지 입력

Δi_{qs}^* : 크리스프 입력

따라서 $\widetilde{\Delta i_{qs}^*}$ 는 그림 7과 같이 7개의 중첩된 퍼지 집합으로 구성된다.

퍼지 제어기 #2는 Δi_{qs}^* 를 조절하기 위한 퍼지 제어기이다.

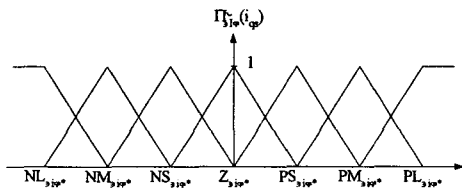


그림 7. $\widetilde{\Delta i_{qs}^*}$ 의 소속 함수 분포
Fig. 7. Membership distribution of $\widetilde{\Delta i_{qs}^*}$

Δi_{qs}^* 는 첫 번째 퍼지 제어기의 증가 또는 감소 명령 전류인데 유도 전동기의 속도에 따라 Δi_{qs}^* 의 소속 함수 분포의 범위가 달라진다. 기존의 퍼지 제어기에 있어 Δi_{qs}^* 의 소속 함수 범위는 유도 전동기의 동기 속도인 경우에 고정되어 있고 중속

이나 저속 운전 시 전문가의 지식이나 경험에 의해 매번 Δi_{qs}^* 의 소속 함수 분포의 범위를 다르게 하여 유도 전동기의 속도를 제어 하는 불편함이 있었다.

따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하고자 다음과 같은 퍼지 제어를 기존의 퍼지 제어기에 추가하여 다음과 같은 퍼지 제어를 제안하였다.

퍼지 제어기 #2는 유도 전동기 속도의 영역을 퍼지화 한 속도 영역 퍼지 변수와 퍼지 제어기 #1의 출력 퍼지 변수를 입력으로 하여 실제적인 유도 전동기의 속도를 제어하기 위한 하나의 제어 변수를 출력시키게 설계되었다.

퍼지 제어기 #2의 첫 번째 퍼지 입력은 지령 속도 W 를 퍼지 연산자를 이용하여 퍼지화하여 얻어진다.

$$\widehat{W} \text{ FUZZIFIER } W \quad (5)$$

식 (5)로 주어진 유도 전동기의 속도 영역에 대한 전체 퍼지 집합은 3개의 중첩된 퍼지 집합으로 구성된다. 각 속도 영역에 대한 퍼지 오차의 소속 함수는 그림 8과 같이 정규화 된 삼각 분포를 갖는다.

퍼지 제어기 #2의 두 번째 퍼지 상태 변수는 퍼지 제어기 #1의 출력 Δi_{qs}^* 의 퍼지 변수이다.

퍼지 제어기 #2의 실제적인 출력은 유도 전동기의 속도 영역 - 저속, 중속, 고속 - 에 따라서 토오크 성분 전류의 값을 조절하기 위한 것이다.

$$\Delta i_{qs}^{**}(k) = \alpha \Delta i_{qs}^*(k) \quad (6)$$

여기서, α : 출력 조절 계수 (output scaling factor)

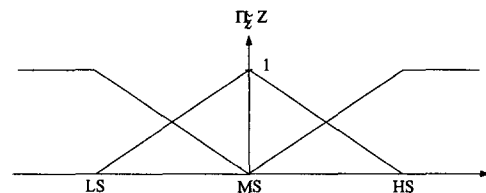


그림 8. 속도 영역의 소속 함수 분포
Fig. 8. Membership distribution of velocity range

퍼지 제어기 #2의 알고리즘은 속도 영역에 대한

퍼지 변수와 Δi_{qs}^* 에 대한 퍼지 변수를 이용하여 \sim 를 연산하여 조절하는 것이다. 따라서 퍼지 제어기 #2의 세 번째 퍼지 상태 변수는 퍼지 제어기 #2의 퍼지 추론에 의해 추론된 출력 조절 계수 \sim 에 대한 퍼지 변수로서 정규화된 소속 함수를 갖는 7개의 중첩된 퍼지 집합으로 이루어진다.

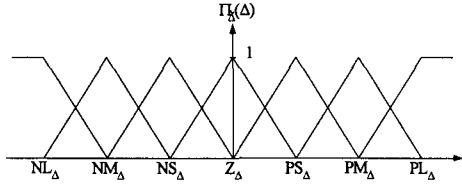


그림 9. 출력 조절 계수 \sim 의 소속 함수 분포
Fig. 9. Membership distribution of output scaling factor \sim

따라서 유도 전동기를 광대역에서 속도를 제어하기 위하여 제안된 전체 퍼지 제어기의 실제적인 출력은 다음식과 같다.

$$i_{qs}^*(k) = i_{qs}^*(k-1) + \Delta i_{qs}^{**}$$

여기서, $i_{qs}^*(k)$: 토크 성분 명령 전류 (7)

Δi_{qs}^{**} : 제안한 퍼지 제어기의 증가 또는 감소 명령 전류

2.4. 퍼지 규칙 베이스와 지식 베이스

퍼지 제어기의 장점 중 하나는 제어기 자체의 지식 베이스(knowledge base)에 있다. 지식 베이스를 설계한다는 것은 퍼지 제어기 안에 전문가의 경험과 지식을 결합하는 것이다. 이들 경험은 입력과 출력의 소속 함수값의 선택과 퍼지 규칙 베이스(fuzzy rule base)를 조합하는 것이다.

표 1. 퍼지 제어기 #1의 규칙 베이스
Table 1. Fuzzy controller#1 rule base

Rule Base	\tilde{E}_r							
	$\tilde{\Delta i}_{qs}^*$	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
\tilde{E}_r	NL	NL	NL	NL	NM	NM	NM	NS
	NM	NL	NL	NM	NM	NS	Z	PL
	NS	NL	NM	NM	NS	Z	PS	PL
	Z	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
	PS	NL	NS	Z	PS	PM	PM	PL
	PM	NL	Z	PS	PM	PM	PL	PL
	PL	Z	PS	PM	PM	PL	PL	PL

본 논문에서의 제어 규칙은 퍼지 제어기 #1인 경우 속도 오차와 속도 오차 변화를 이용한 PI 제어기의 원리에 의한 경험적 지식을 바탕으로 표 1과 같은 지식 베이스에 의해 구성되었다.

퍼지 제어기 #2의 규칙 베이스는 유도 전동기의 속도가 저속, 중속, 고속일 경우 유도 전동기의 지령 속도와 실제 회전 속도의 차가 같더라도 유도 전동기의 실제 제어 명령인 토크 성분 전류의 양이 크게 차이가 난다는 경험적 지식을 바탕으로 표 2와 같은 규칙 베이스가 구성되었다.

표 2. 퍼지 제어기 #2의 규칙 베이스
Table 2. Fuzzy controller#2 rule base

Rule Base	$\tilde{\Delta i}_{qs}^*$							
	\sim	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
$\tilde{\omega}^*$	HS	PL	PM	PS	Z	PS	PM	PL
	MS	PM	PS	PS	Z	PS	PS	PM
	LS	NM	NS	NS	Z	NS	NS	NM

퍼지 제어기에서 비퍼지화는 추론 결과의 수치적 해석으로 이해할 수 있으며 비퍼지화에 관한 체계적인 방법은 아직까지 없으며, 이와 같은 비퍼지화(defuzzification) 과정을 위하여 대부분의 퍼지 제어기는 Mamdani가 제안한 Min-Max-Gravity 방법을 이용한다. 그러나 Min-Max-Gravity 방법으로 유도 전동기의 속도를 저속 영역에서 제어하는 것은 부족함이 많다. 따라서 본 연구에서는 저속을 포함한 광대역에서 유도 전동기를 제어하기 위하여 Min-Max-Gravity 보다 우수한 결과를 보이는 Product-Sum-Gravity를 비퍼지화에 이용하였다.

2.5. 시스템의 구현 및 설계

유도 전동기의 자기 동조 퍼지 제어 시스템의 구현은 하드웨어부와 소프트웨어부로 구성된다. 하드웨어부는 3상 AC 전압을 DC 전압으로 만드는 컨버터, 유도 전동기를 구동시키는 인버터, 전동기의 고정자 전류와 회전자 속도를 감지하는 감지기, 제안된 퍼지 제어 알고리즘을 처리하는 DSP로 구성하였다. 소프트웨어부는 기준 명령을 발생시키는 외부 PI 제어 알고리즘과 유도 전동기를 동조시키기 위한 스위칭 패턴을 발생시키는 자기 동조 퍼지 제어 알고리즘으로 구성하였다. 실험에 사용한 유도 전동기의 정격은 표 3과 같다.

표 3. 유도 전동기의 정격.

Table 3. Ratings of Induction Motor.

정격 전압	220[V]
정격 전류	5[A]
정격 출력	200[W]
극수 및 회전수	4극, 1800[rpm]
고정자 저항	0.04878[Ω]
회전자 저항	0.03114[Ω]
고정자 인덕턴스	0.03865[Ω]
회전자 인덕턴스	0.05286[Ω]
상호 인덕턴스	0.79165[Ω]

2.6. 실험 결과 및 고찰

본 논문에서 제시한 제어 방식의 유용성과 타당성 및 강인성에 관한 실증은 유도 전동기의 광범위한 속도 영역에서 유도 전동기의 속도 및 토크 응답 특성을 측정하여 고찰 하였다. 본 실험에 사용된 유도 전동기의 부하는 MG세트의 직류 발전기에 저항 부하를 접속하여 사용하였다.

그림 10은 유도 전동기의 정격 속도 1800rpm 명령에 따른 PI 제어기를 사용한 유도 전동기의 속도 응답 특성을 나타낸 것이다. 그림 10에서 알 수 있는 바와 같이 유도 전동기의 지령 속도가 고속 영역인 1800rpm인 경우 PI 제어기를 이용한 유도 전동기의 속도 응답은 임계값 이내의 댐핑비를 가지고 550[ms]에서 기준 속도 명령에 빠르게 수렴되고 있음을 보여주고 있다.

그림 11은 기존의 퍼지 제어기를 사용하여 유도 전동기의 정격 속도 1800rpm 명령에 따른 속도 응답 특성을 나타낸 것이다. 이 경우는 510[ms]에서 기준 속도 명령에 빠르게 수렴되고 있음을 보여주고 있다.

그림 12는 제안된 퍼지 제어기를 이용한 유도 전동기의 속도 응답 특성을 나타낸 것이다. 이 경우는 500[ms] 이내에서 기준 속도 명령에 빠르게 수렴되고 있음을 보여주고 있다.

그림 10과 그림 11, 그림 12에 나타난 것과 같이 유도 전동기의 속도가 고속 영역인 경우는 PI 제어기, 기존의 퍼지 제어기 및 제안된 퍼지제어기를 사용한 각각의 경우에 양호한 속도 응답 특성을 보인다.

그림 13과 그림 14 그림 15는 지정 속도 명령이 900rpm인 경우 유도 전동기의 정격 속도 명령에 대한 각각의 제어기를 이용한 유도 전동기의 속도 응답 특성을 나타낸 것이다. 제어 시스템의 속도 응답은 300[ms]정도에서 임계값 이내의 댐핑비를

가지고 지령 속도 명령에 수렴되고 있음을 알 수 있다. 이는 제어기가 정상적으로 동작하고 있음을 보여주는 것으로 세가지 제어기 모두 응답 특성이 양호함을 알 수 있다.

그림 16은 지정 속도 명령이 300rpm인 경우 PI 제어기를 이용한 유도 전동기의 속도 응답이다. 그림 16에서 나타난 바와 같이 유도 전동기의 속도 응답은 지정 명령 속도에 수렴하지 못하고 심한 리플을 나타내고 있다. 이는 유도 전동기의 제어가 가능하지 않음을 나타내는 것이다. 이러한 이유는 고정자의 저항이 온도에 따라 변하기 때문이다.

그림 17은 퍼지 제어기를 이용하여 유도 전동기를 300rpm에서 제어할 시의 속도 응답을 나타낸다. 그림 17에 나타난 바와 같이 퍼센트 오버슈트 13.3%를 가지고 685[ms]에 지정 속도 명령에 수렴을 한다.

그림 18은 제안된 퍼지 제어기를 이용하여 유도 전동기를 300rpm에서 제어 할 시의 속도 및 토크 응답을 나타내는데 퍼센트 오버슈트 3%를 가지고 430[ms]에 지정 속도 명령에 수렴을 한다. 그림 17과 그림 18을 비교하여 보면 유도 전동기의 응답 특성면에서 제안된 퍼지 제어기가 기존의 퍼지 제어기 보다 우수한 성능을 보인다.

그림 19는 퍼지 제어기를 이용하여 유도 전동기를 150rpm에서 제어할 시의 속도 응답을 나타낸다. 그림 19는 일정한 범위에서 지속적으로 리플이 발생하는데 이것은 일반적인 퍼지 제어기가 유도 전동기를 저속 영역에서 제어하는데 어렵다는 것을 나타낸다.

그림 20은 제안된 퍼지 제어기를 이용하여 유도 전동기를 150rpm에서 제어할 시의 속도 응답을 나타낸다. 퍼센트 오버슈트 3%를 가지고 468[ms]에 지정 속도 명령에 수렴을 한다.

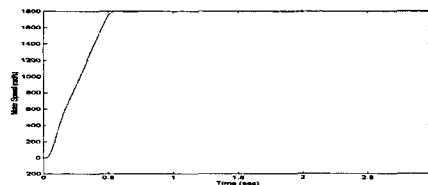


그림 10. PI 제어기를 이용한 유도 전동기의 속도 응답(1800 rpm)

Fig. 10. Speed response of induction motor using PI controller(1800rpm)

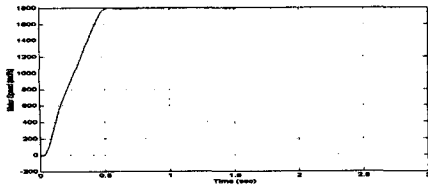


그림 11. 퍼지 제어를 이용한 유도 전동기의 속도 응답(1800rpm)

Fig. 11. Speed response of induction motor using fuzzy controller(1800rpm)

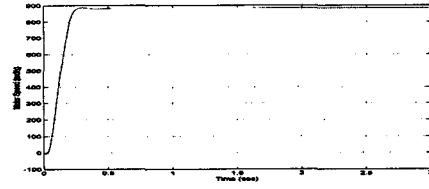


그림 15. 제안된 퍼지 제어를 이용한 유도 전동기의 속도 응답(900rpm)

Fig. 15. Speed response of induction motor using proposed fuzzy controller(900rpm)

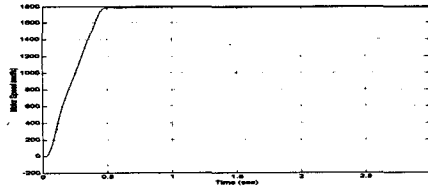


그림 12. 제안된 퍼지 제어를 이용한 유도 전동기의 속도 응답(1800rpm)

Fig. 12. Speed response of induction motor using proposed fuzzy controller (1800rpm)

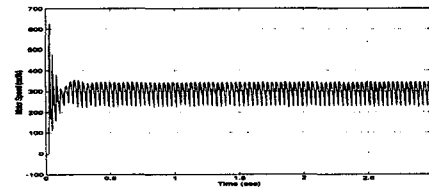


그림 16. PI 제어를 이용한 유도 전동기의 속도 응답(300 rpm)

Fig. 16. Speed response of induction motor using PI controller(300rpm)

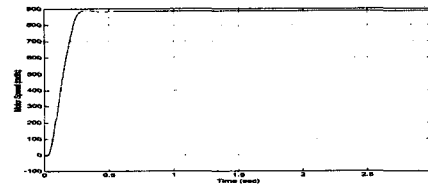


그림 13. PI 제어를 이용한 유도 전동기의 속도 응답(900 rpm)

Fig. 13. Speed response of induction motor using PI controller(900rpm)

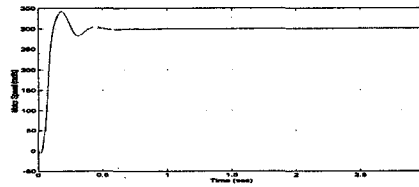


그림 17. 퍼지 제어를 이용한 유도 전동기의 속도 응답(300rpm)

Fig. 17. Speed response of induction motor using fuzzy controller(300rpm)

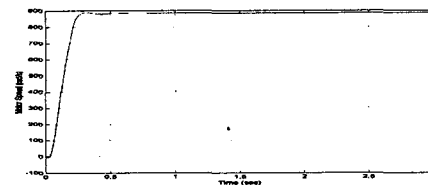


그림 14. 퍼지 제어를 이용한 유도 전동기의 속도 응답(900rpm)

Fig. 14. Speed response of induction motor using fuzzy controller(900rpm)

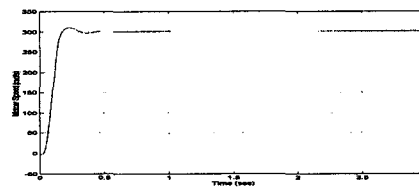


그림 18. 제안된 퍼지 제어를 이용한 유도 전동기의 속도 응답(300rpm)

Fig. 18. Speed response of induction motor using proposed fuzzy controller(300rpm)

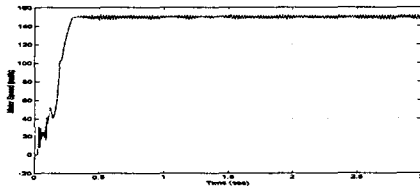


그림 19. 퍼지 제어를 이용한 유도 전동기의 속도 응답(150rpm)

Fig. 19. Speed response of induction motor using fuzzy controller(150rpm)

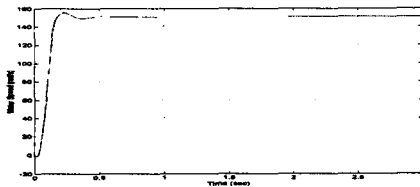


그림 20. 제안된 퍼지 제어를 이용한 유도 전동기의 속도 응답(150rpm)

Fig. 20. Speed response of induction motor using proposed fuzzy controller(150rpm)

3. 결론

본 논문에서는 회전자 자속을 이용한 기존의 간접 벡터 제어 방식에 퍼지 제어 알고리즘을 도입하여 속도에 대한 동특성 응답이 우수한 제어 방법을 제안하였다.

실험 결과 및 고찰에서 알아본 바와 같이 유도 전동기를 고속 영역에서 제어 할 시에는 PI 제어기와 일반적인 퍼지 제어기 및 제안된 퍼지 제어기 모두 양호한 응답 특성을 나타내나 중속 영역에서 저속 영역으로 속도가 변할시 각 제어기에 대하여 응답의 차이가 있다.

중 저속시 PI 제어기는 온도에 따른 고정자 저항 및 철손의 영향으로 인해 퍼지 제어기보다 성능이 저하되고 또한 저속 영역에서는 제어가 불가능하지만 일반적인 퍼지 제어기의 경우는 중 저속에서는 강인한 응답 특성을 보인다. 그러나 속도 영역이 저속이 될 수록 리플이 발생하여 허용 오차 범위에 따라 일반적인 퍼지 제어를 이용하여 유도 전동기를 제어하는데 문제점이 발생한다. 즉, 저속 영역에서 유도 전동기 제어 시 일반적인 퍼지 제어기는 퍼지 입력 및 출력 변수의 공간을 균등하게 나누고 일정한 형태의 삼각형 소속 함수 범위에 의한 한계성으로 인해 제어가 어렵다는 문제점이 발생한다. 이러한 문제점을 해결하고자 본 연구에서는 출력 조절 계수를 이용한 새로운 퍼지

를 제안하여 해결하였다.

본 논문에서는 유도 전동기를 제어할 시 기존의 PI 제어기와 퍼지 제어기의 경우와 같이 저속 영역에서는 별도의 전동기나 속도 영역에 따른 제어를 부가하지 않고 저속, 중속, 고속 영역의 광대한 속도 영역에서 유도 전동기를 제어할수 있는 퍼지 제어를 제안하였다.

제안된 퍼지 제어 알고리즘을 이용함으로써 기존의 제어기에 비하여 제어기의 구성이 간단하고 손쉽게 구현하였으며, 유도 전동기의 광대역 속도-저속, 중속, 고속에서 전동기 변수와 설정 속도에 적응적이며 강인한 특성을 가짐을 실험을 통하여 입증함으로써 제시한 퍼지 제어 알고리즘의 타당성과 유용성을 확인 하였다.

향후 대용량 유도 전동기의 적용과 저속 운전시에 대한 저항의 영향, 자속 연산 및 보상법 등에 대한 연구가 뒤따라야 할것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] B. K. Bose, Power Electronics and AC Drives. Englewood Cliffs, NJ Prectice Hall, 1986.
- [2] F. Blaschke, "The Principle of Field Orientation as Applied to the New TRANS VECTOR Closed Loop Control System, for Rotating Field Machines", Siemens Review, Vol. 34, pp. 217-220, May, 1972.
- [3] I. Takashi and T. Noguchi, "A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor", IEEE Trans. Industry Applications, vol. IA-22, no. 5, pp.820-827, 1986.
- [4] X. Xu. R. DeDoncker and D. W. Novotny, "A stator flux oriented induction machine drive", in PESC 1988 Conf. Rec., pp.870-876.
- [5] X. Xu. R. DeDoncker and D. W. Novotny, "A stator flux orientation control of induction machines in the field weakening region", in IEEE-IAS Conf. Rec., pp. 437-443, 1988.
- [6] R. d. Lorenz and D. B. Lawson, "A simplified approach to continuous, on-line tuning of field oriented induction machine drives", in IEEE- IAS Conf. Rec., pp. 444-449, 1988.
- [7] C. C. Lee, "Fuzzy Logic in control system : Fuzzy logic controller.-Part I", IEEE Trans. Syst. Man Cybern., vol. 20, pp. 404-418, 1990.
- [8] C. C. Lee, "Fuzzy Logic in control system : Fuzzy logic controller.-Part II", IEEE Trans. Syst. Man Cybern., vol. 20, no. 2, pp.404-418, 1990.
- [9] M. Braae and D. A. Rutherford, "Selection of parameters for a fuzzy logic controller", Fuzzy sets Syst., pp. 185-199, 1979.