

# 간접 벡터 제어 방식 유도전동기에 대한 하이브리드 퍼지 제어기 설계

## A Hybrid Fuzzy Controller for Indirect Field-Oriented Induction Machine Drives

안덕우\*, 우성도\*, 이은욱\*\*, 김용석\*\*\*, 이형찬\*\*\*\*, 양해원\*\*\*\*\*

Duck-Woo Ahn, Sung-Do Woo, Eun-Wook Lee, Eung-Seok Kim, Hyoung-Chan Rhee, Hai-Won Yang

**Abstract** - 본 논문에서는 간접 벡터 제어 방식의 유도전동기를 위한 하이브리드 퍼지 속도제어기를 설계한다. 제안한 하이브리드 퍼지 속도제어기는 유도 전동기의 속도 응답 성능을 향상시키기 위하여 응답 상태에 따라 PI(비례적분)제어기와 퍼지 제어기를 선택하여 사용하는 형태이다. 정상상태에서는 PI 제어기를 사용하고 속도 오차값이 크면 퍼지 제어기를 사용한다. 또한 사용된 퍼지 제어기는 퍼지 입력의 파라미터를 튜닝하여 응답 성능을 높였다. 본 논문에서 제안한 하이브리드 퍼지 속도제어기와 기존의 PI 제어기의 성능을 실험을 통하여 비교 검증한다.

**Key Words** : 퍼지 제어기, 벡터 제어, 유도전동기

### 1. 서론

유도전동기는 신뢰성이 높고, 유지 보수가 필요 없으며, 낮은 가격, 견고함 등의 이유로 산업현장에서 널리 사용되고 있다. 그러나 유도전동기는 여러 상태변수들이 매우 복잡하게 결합되어 있는 다변수의 비선형 시스템이고 회전자와 전기적 변수들을 측정할 수 없을 뿐만 아니라 동작조건에 따라 전동기 파라미터들이 변할 수 있어 제어하기가 매우 어렵다.

산업현장에서 유도전동기를 제어하기 위해 널리 사용되고 있는 방법은 벡터 제어[1]로 최근에 많이 발전되어 왔다. 벡터 제어는 속도와 자속을 분리하여 제어할 수 있는 방법으로 직접 및 간접제어로 나눌 수 있는데, 직접 벡터 제어는 회전자에 센서를 부착하여 자속을 측정하거나 자속관측기를 사용하여 자속을 추정하고, 간접 벡터 제어는 슬립속도를 사용하여 회전자계의 속도를 구하는 방법이다. 그러나 자속센서를 사용하는 직접 제어방법은 유도전동기를 특수하게 제작하여야 하므로 실현이 거의 불가능하다. 직접 및 간접 벡터 제어 방법 모두 회전자 저항, 즉 회전자 시정수를 정확히 알지 못하면 정확한 자속지향을 달성할 수 없어 제어기의 성능 및 전력효율이 저하될 수 있다.

본 논문에서는 하이브리드 퍼지 제어기를 사용하여 유도전동기의 속도 응답 성능을 향상시키고자 한다[3]. 제안된 제어기는 시스템의 정보를 정확하게 알 필요가 없다. 그리고 속도 변화가 큰 상태에서는 퍼지 제어기를 사용하고 정상상태에서는 PI 제어기를 사용하는 형태를 가지고 있다. 여기서 사용한 퍼지 제어기는 퍼지 입력의 파라미터를 오차의 크기에 따라 튜닝하여 좀더 정밀한 제어를 가능하게 설계하였다. 본

논문에서는 PI 제어기와 하이브리드 퍼지 제어기를 유도전동기의 속도제어기로 사용하여 실험하고 그 성능을 비교한다.

### 2. 간접 벡터 제어기

유도전동기에 벡터 제어를 사용하는 경우 토크와 관련 있는 고정자 q축 전류성분과 자속과 관련 있는 고정자 d축 전류성분 이렇게 두 가지 전류 성분으로 나누어서 제어하게 된다[1][2]. 간접 벡터 제어 방식의 전체 블록 다이어그램을 그림 1에 표현하였다. 간접 벡터 제어 방식에서는 슬립속도를 사용하여 회전자계의 속도를 구하며 슬립속도  $\omega_s$ 는 식 (1)과 같다.

$$\omega_s = \frac{R_r i_d^*}{L_r i_d^*} \quad (1)$$

여기서  $R_r$ 은 회전자 저항,  $L_r$ 은 회전자 인덕턴스이고  $i_d^*$ 은 q축 전류 지령값,  $i_d^*$ 은 d축 전류 지령값이다.

$i_q^*$ 은 속도 제어기의 출력값이 되고 실제 회전자 속도  $\omega_r$ 와 속도 지령값  $\omega_r^*$ 의 차이 정보가 속도 제어기의 입력값이 된다.

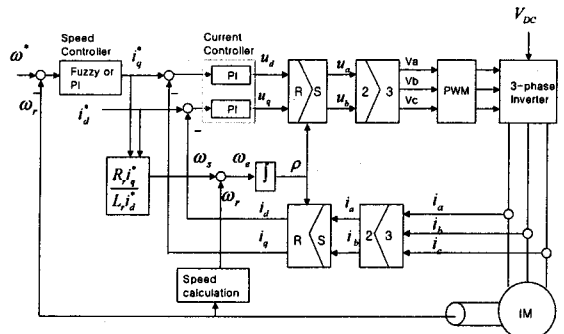


그림 1. 간접 벡터 제어기의 블록 다이어그램

\* 準 會 員 : 漢陽大學 電子電氣制御計測工學科 碩士課程  
 \*\* 正 會 員 : 忠淸大學 電氣情報科 教授 · 工博修了  
 \*\*\* 正 會 員 : 漢拏大學 電子情報工學部 教授 · 工博  
 \*\*\*\* 正 會 員 : 大眞大學 電氣工學科 教授 · 工博  
 \*\*\*\*\* 正 會 員 : 漢陽大學 電子電氣制御計測工學科 教授 · 工博

### 3. 하이브리드 퍼지 제어기

#### 3.1 퍼지 속도제어기 설계

퍼지 제어기의 블록 다이어그램을 그림2에 표현하였다.

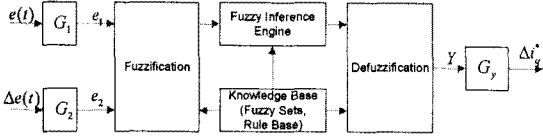


그림 2. Fuzzy controller 블록 다이어그램

그림 2에서  $e(t)$ 는 시간에 회전자의 실제 속도  $w_r$ 와 속도 지령값  $w_r^*$ 의 차이를 나타낸 값이고  $\Delta e(t)$ 는  $e(t)$ 가  $\Delta t$  시간동안 변화한 양으로 식 (2), (3)에 나타내었다.

$$e(t) = w_r - w_r^* \quad (2)$$

$$\Delta e(t) = e(t) - e(t - \Delta t) \quad (3)$$

여기서  $G_1$ ,  $G_2$ 는 퍼지 입력 파라미터이고  $G_\gamma$ 는 퍼지 출력 파라미터이다. 퍼지 제어기의 입력  $e_1$ ,  $e_2$ 는 식 (4), (5)와 같다.

$$e_1 = G_1 e(t) \quad (4)$$

$$e_2 = G_2 \Delta e(t) \quad (5)$$

퍼지의 입력 멤버십 함수와 출력 멤버십 함수는  $\mu_{E_i}(e_i)$ 와  $\mu_{U^j}(\Delta u)$ 로 표현할 수 있다. 여기서  $i$ 는 1과 2의 값을 갖고  $j$ 는 -3,-2,-1,0,1,2,3의 값을 갖는다. 각각의 입력 퍼지 집합  $E_i^j$ 와 출력 퍼지 집합  $U^j$ 는 7개의 멤버십 함수로 구성되고 그림 3과 그림 4에 표현하였다.

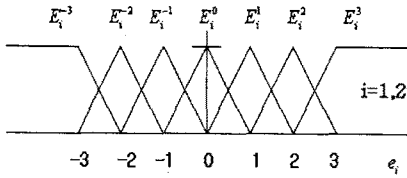


그림 3. 입력 멤버십 함수

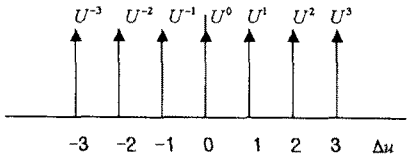


그림 4. 출력 멤버십 함수

표 1. 퍼지 룰 베이스

Rule Base		$E_2^j(e_2)$						
		$\Delta u$ select	-3	-2	-1	0	1	2
$E_1^i(e_1)$	-3	3	3	3	3	2	2	1
	-2	3	3	3	2	2	0	-3
	-1	3	3	2	2	1	-1	-3
	0	3	2	1	0	-1	-2	-3
	1	3	1	-1	-2	-2	-2	-3
	2	3	0	-2	-2	-2	-3	-3
	3	-1	-2	-2	-2	-3	-3	-3

표 1은 본 논문에서 사용한 퍼지 룰 베이스이다.

$e_1$ 와  $e_2$ 에 따라  $e_1$ 을 포함하는 입력 멤버십 함수  $E_1^a$ ,  $E_1^b$ 와  $e_2$ 를 포함하는 입력 멤버십 함수  $E_2^a$ ,  $E_2^b$ 가 결정되면 표1의 퍼지 룰 베이스에 따라 if then 룰이 식 (6)~(9)와 같이 4개가 나오게 된다.

$$\text{Rule1 if } E_1^j = E_1^a \text{ and } E_2^j = E_2^a \text{ then } U^j = \Delta u_1 \quad (6)$$

$$\text{Rule2 if } E_1^j = E_1^a \text{ and } E_2^j = E_2^b \text{ then } U^j = \Delta u_2 \quad (7)$$

$$\text{Rule3 if } E_1^j = E_1^b \text{ and } E_2^j = E_2^a \text{ then } U^j = \Delta u_3 \quad (8)$$

$$\text{Rule4 if } E_1^j = E_1^b \text{ and } E_2^j = E_2^b \text{ then } U^j = \Delta u_4 \quad (9)$$

$\Delta u_r (r=1,2,3,4)$ 은 그림4에 표현한 단일 멤버십 함수 (singleton membership function)의 값들이다. 그리고  $\mu_G (r=1,2,3,4)$ 은 퍼지 룰의 우위를 나타내는 가중치의 양 (Mamdani's minimum fuzzy implication rule)이고  $\mu_G$ 은 식 (10)~(13)과 같다.

$$\mu_{G1} = \min(E_1^a(e_1), E_2^a(e_2)) \quad (10)$$

$$\mu_{G2} = \min(E_1^a(e_1), E_2^b(e_2)) \quad (11)$$

$$\mu_{G3} = \min(E_1^b(e_1), E_2^a(e_2)) \quad (12)$$

$$\mu_{G4} = \min(E_1^b(e_1), E_2^b(e_2)) \quad (13)$$

퍼지 제어기의 최종 출력은  $Y$ 이고 Center of Area Method를 사용하여 식 (14)와 같이 표현된다.

$$Y = \frac{\sum_{r=1}^4 \Delta u_r \mu_{G_r}}{\sum_{r=1}^4 \mu_{G_r}} \quad (14)$$

퍼지 출력 파라미터  $G_\gamma$ 와  $Y$ 의 곱은  $i_q^*$ 의 변화량인  $\Delta i_q^*$ 가 된다. 결국 퍼지 속도제어기는  $Y$ 값에 의하여  $i_q^*$ 값이 업데이트되는 형태로 식 (15)와 같다.

$$i_q^*(t) = i_q^*(t - \Delta t) + G_\gamma Y \quad (15)$$

$\Delta t$ 는 업데이트 주기이고  $i_q^*(t)$ 는 시간  $t$ 에  $q$ 축 전류 지령 값이다.

#### 3.2 퍼지 입력 파라미터 튜닝

본 논문에서는 퍼지 입력의 파라미터가 되는  $G_1$ ,  $G_2$ 의 값으로 정수를 취하지 않고  $e(t)$ ,  $\Delta e(t)$ 값에 따라 적절히 튜닝하여 제어기의 성능을 향상시켰다.  $G_1$ 과  $G_2$ 의 튜닝 방식은 식 (16), (17)과 그림 5에 나타내었다. ( $N_i$ : 양의 실수)

$$G_1 = \begin{cases} 1, & N_1 < |e(t)| \\ |e(t)|/N_1, & N_1 \geq |e(t)| \end{cases} \quad (16)$$

$$G_2 = \begin{cases} 1, & N_2 < |\Delta e(t)| \\ |\Delta e(t)|/N_2, & N_2 \geq |\Delta e(t)| \end{cases} \quad (17)$$

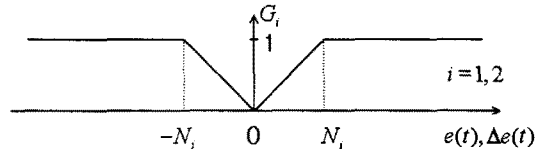


그림 5.  $G_1$ ,  $G_2$  튜닝 함수

#### 3.3 하이브리드 퍼지 제어기의 설계

유도전동기의 속도 응답 성능을 향상시키기 위하여 속도 오차값의 크기에 따라 PI 제어기와 3.1, 3.2장에서 제시한 퍼지 제어를 선택하여 사용하는 하이브리드 퍼지 제어를 사용하였다. PI 제어기는 일반적으로 유도전동기의 속도 제어기로 많이 사용되고 있다. 이 논문에서 사용한 PI 속도제어기 도 식 (18)과 같이 일반적인 형태를 사용한다.

$$i_q^* = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (18)$$

여기서  $K_p$ 와  $K_i$ 는 비례계수와 적분계수이다.

퍼지 제어기는 전동기 회전자의 파라미터 변화에 둔감하며 오차의 급격한 변화에 대응하는 응답 속도가 PI 제어기에 비하여 빠른 장점이 있다. 그러므로 속도 오차의 값이 크게 변화할 때는 퍼지 제어를 사용하고 정상상태에서는 PI 제어를 사용한다. 그 스위칭 관계는 식 (19)와 같다.

$$Switch = \begin{cases} PI\ controller, & |e| \leq Q \\ Fuzzy\ controller, & |e| > Q \end{cases} \quad (19)$$

여기서  $Q$ 는 스위칭 경계값(Threshold)이다.

#### 4. 실험

본 논문은 LG-OTIS사의 벡터 제어 전용 3상 농형 유도 전동기를 사용하여 실험하였다. 전동기 파라미터는 표 2와 같다. 전동기의 제어를 위하여 DSP(TMS320F2812)를 사용하였고 2상 220V/60Hz 전압을 사용하는 벡터 인버터를 사용하였다.

표 2. 전동기 파라미터

정격 출력	2.2[KW],3[HP]
극수	4
전압	220/380[V],60[Hz]
전류	9.2/5.3[A]
정격 회전속도	1750[rpm]
최대 회전속도	3600[rpm]
엔코더	1024[P/P]

그림 6은 속도 지령값을 DA converter(dac7612)를 활용하여 오실로스코프로 출력한 그래프이다. DA converter는 DSP에서 12 bit 시리얼 방식으로 데이터를 받는다. 데이터의 출력 최대 범위는 4.095V이다. 그림 6의 속도 지령값은 1200rpm과 1600rpm으로 주어졌고 일정한 기울기로 증가하도록 하였다. 이때 DA converter의 출력 전압값은 그림 6에서 보이는 바와 같이 2.73V(1200rpm), 3.64V(1600rpm)로 표시된다.

그림 7, 8은 그림 6의 속도 지령값에 따른 전동기의 실제 응답 속도와 그에 따른 전류a상의 입력 전류값을 표현한 그래프이다. 그림 7의 (a)는 PI 속도제어기를 사용한 경우에 실제 속도 응답값이고 그림 7의 (b)는 PI 속도제어기를 사용한 경우에 a상 입력 전류값이다. 그림 8의 (a)는 하이브리드 퍼지 속도제어기를 사용한 경우에 실제 속도 응답값이고 그림 8의 (b)는 하이브리드 퍼지 속도제어기를 사용한 경우에 a상 입력 전류 값이다. 실험결과에서 보는 바와 같이 PI 제어를 사용한 경우보다 하이브리드 퍼지 제어를 사용한 경우 좋은 응답 특성을 보여주고 있다.

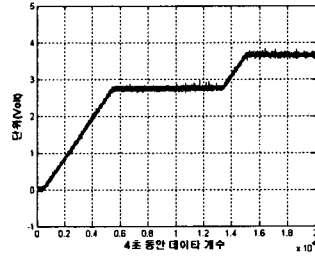


그림 6. 속도 지령값

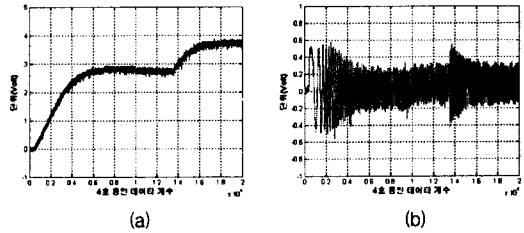


그림 7. PI 제어기의 응답속도와 a상전류 입력

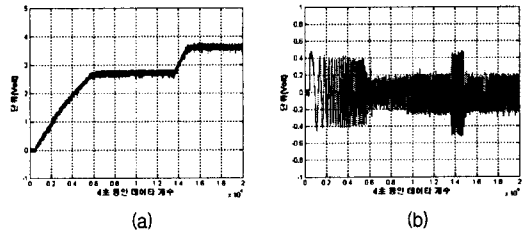


그림 8. 하이브리드 퍼지 제어기의 응답속도와 a상전류 입력

#### 5. 결과

본 논문에서는 유도전동기의 응답 성능을 높이기 위하여 간접 벡터 제어 방식에서 속도 제어기에 하이브리드 퍼지 제어를 적용하였다. 이를 통해 기존의 PI 제어를 사용하였을 때보다 향상된 응답 특성이 나타남을 실험을 통하여 증명하였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Bimal K. Bose, "Modern Power Electronics and AC Drives", Prentice Hall, 2002
- [2] Sergei Peresada, Andrea Tili, Alberto Tonielli, "Theoretical and Experimental Comparison of Indirect Field-Oriented Controllers for Induction Motors", IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 18, no. 1, pp. 151-163, January 2003
- [3] Yen-Shin Lai, Juo-Chiun Lin, "New Hybrid Fuzzy Controller for Direct Torque Control Induction Motor Drives", IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 18, no. 5, pp. 1211-1219, September 2003