

# 퍼지논리제어기를 이용한 유도전동기 회전자 상수변동 보상제어기법

류경운, 이흥희

울산대학교 전기·전자 및 자동화공학부

## Compensation Algorithm Rotor Parameter Variation for I.M Using Fuzzy Logic Controller

K. Y RHYU H. H LEE

School of Electrical Eng. & Automation Univ. of Ulsan,

### Abstract

벡터제어기법은 유도전동기의 무부하 시험 및 구속 시험 등을 통하여 구한 고정자 및 회전자 상수를 이용한 전동기의 수학적 모델을 기초로 하여 이루어진다. 따라서 유도전동기의 수학적 모델을 구성하는 고정자 및 회전자 상수의 정확성은 곧 벡터제어의 성능과도 직결된다. 하지만, 온도 상승 등의 영향으로 회전자 저항값은 정상치보다 최대 80~100%까지 상승할 수 있으며, 이는 벡터제어의 특성을 저하시키는 요인이 된다. 따라서, 본 연구에서는 회전자 저항을 이용하는 자속 PI제어부를 회전자 저항을 사용하지 않는 자속 퍼지제어부로 대체하고 측정된 3상 전류를 이용하여 회전자 저항값의 변화를 실시간으로 추정·보상하는 퍼지추론기를 구성함으로써 회전자 저항의 변화에도 최적의 효율 및 성능을 가지는 보완된 벡터 제어 기법을 개발하였다.

### 1. 서론

산업현장에서 사용되는 전동기의 대부분은 유도전동기이다. 이는 유도전동기의 구조가 간단하고 견고하여 유지보수가 거의 필요없다는 장점 때문이다.

유도전동기의 고성능 제어를 위해서 벡터제어기법이 사용되고 있다. 벡터제어는 유도전동기의 속도 및 토크 응답특성을 타러자 직류전동기와 유사한 특성을 갖도록 수학적 모델을 기초로 하여 제어된다.

이와 같이 벡터제어는 유도전동기의 모델을 이용하여 제어하기 때문에 뛰어난 동특성과 고효율 운전이 가능한 것이다. 전동기의 수학적 모델의 정확성은 벡터제어의 특성에 많은 영향을 미치게 되는데, 슬립주파수제어방식의 벡터제어에서는 슬립주파수를 구하는

때 사용되는 회전자 저항에 특히 많은 영향을 받는다.[1] - [3] 하지만, 회전자 저항은 유도전동기의 운전에 따른 온도 등의 영향으로 그 값이 최대 80-100%까지 증가할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 회전자 저항의 증가가 기존의 벡터제어에 미치는 영향을 분석하여 그 문제점을 해결하고자 한다. 즉 전동기 정수에 강인한 자속 퍼지제어기를 설계하고 회전자 상수변동을 보상하는 퍼지추론기를 구성하여 회전자 상수변동에도 안정된 슬립주파수를 가질 수 있는 벡터제어기법을 구현한다. 제안된 방법의 안정성은 디지털 시뮬레이션을 통해 입증해 보인다.

### 2. 회전자 저항 변동의 영향

회전 좌표계상의 전압방정식은 다음과 같다.

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + p\lambda_{sd} - \omega_s \lambda_{sq} \quad \text{식(1)}$$

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + p\lambda_{sq} + \omega_s \lambda_{sd} \quad \text{식(2)}$$

$$0 = R_r i_{rd} + p\lambda_{rd} - (\omega_s - \omega_r) \lambda_{rq} \quad \text{식(3)}$$

$$0 = R_r i_{rq} + p\lambda_{rq} - (\omega_s - \omega_r) \lambda_{rd} \quad \text{식(4)}$$

- 단,  $v_{sd}, v_{sq}$  : d, q축 고정자 전압
- $i_{sd}, i_{sq}$  : d, q축 고정자 전류
- $i_{rd}, i_{rq}$  : d, q축 회전자 전류
- $\lambda_{sd}, \lambda_{sq}$  : d, q축 고정자 자속
- $\lambda_{rd}, \lambda_{rq}$  : d, q축 회전자 자속
- $R_s, R_r$  : 고정자 및 회전자 저항
- $\omega_r, \omega_s$  : 회전자 및 동기 각속도
- $p$  : 미분연산자

유도전동기에 인가되는 3상 고정자 전류는 토크분 전류  $i_{sq}$  와 자속분 전류  $i_{sd}$ 로 분해할 수 있다. 이 전

류성분을 동기각속도를 이용하여 3상 전류지령치로 변환하여 벡터제어를 수행한다. 그림 1에는 슬립주파수 제어기법을 이용한 일반적인 벡터제어 블록도를 나타내었다.

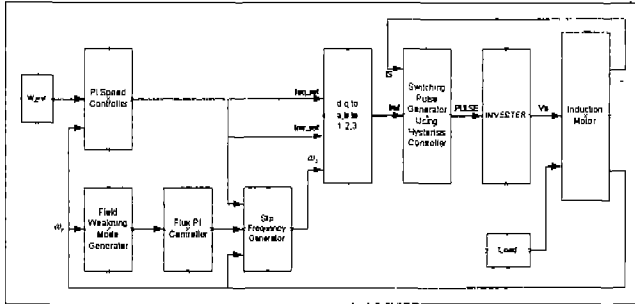


그림 1. 벡터제어 시스템

회전좌표계 전류에서 고정좌표계 전류로의 변환은 Clark 변환과 Park 변환을 통해 이루어지며 이는 식 (5)와 식(6)과 같다.

$$\begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_s & -\sin \theta_s \\ \sin \theta_s & \cos \theta_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} \quad \text{식 (5)}$$

$$\begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \end{bmatrix} \quad \text{식 (6)}$$

위 식(5)의  $\theta_s$ 는 동기각을 의미하며, 동기각속도  $\omega_s$ 는 식 (7)과 같다.

$$\omega_s = \omega_r + \omega_{slip} \quad \text{식 (7)}$$

또한 슬립주파수  $\omega_{slip}$ 은 다음과 같이 구해진다.

$$\omega_{slip} = \frac{R_r}{L_r} \frac{i_{sq}}{i_{mr}} \quad \text{식 (8)}$$

식 (8)에서 알 수 있는 바와 같이  $i_{mr}$ 이 일정한 경우  $\omega_{slip}$ 은 회전자 저항  $R_r$ 과  $i_{sq}$ 의 함수이다.  $i_{sq}$ 는 부하에 따라 변하고  $R_r$ 은 온도에 따라 변화하는데  $R_r$ 의 경우 최대 80~100%까지 바뀔수 있다. 따라서 회전자 저항값이 변화하게 되면 정확한  $\omega_{slip}$ 을 얻을 수 없으며 결과적으로 3상 입력전류의 지령치가 부정확하게 된다.

회전자 저항변화에 따른 벡터제어의 특성을 살펴보기 위해 회전자 저항 변화치를 그림 2와 같이 가정했

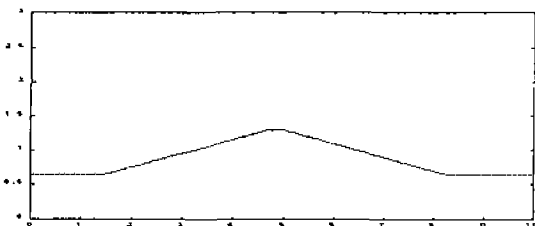


그림 2 회전자 저항 변화 계획도

다. 대부분의 회전자 저항 변동은 지속적인 전동의 구동에 의한 경우이므로 본 논문에서는 회전자 저항의 변화는 정상상태에서 발생한다고 가정한다. 벡터제어의 정상상태에서는  $i_{mr}$ 이 일정한 값을 가지므로 식(8)은 식(9)와 같이 표현된다.

$$\omega_{slip} \propto R_r i_{sq} \quad \text{식(9)}$$

만약 회전자 저항  $R_r$ 이  $R_r'$ 으로 증가하게 되면 식 (9)는 식(10)과 같이 나타내어진다. [5]

$$(\omega_{slip} + \Delta \omega_{slip}) \propto (R_r + \Delta R_r) i_{sq} \quad \text{식(10)}$$

위 식 (10)에 의해 회전자의 저항이  $\Delta R_r$ 만큼 증가하게 되면, 유도전동기의 슬립주파수도  $\Delta \omega_{slip}$ 만큼 증가하게 된다.

그림 1의 벡터제어기에서 유도전동기가 정상상태 일때의 슬립주파수는 다음과 같이 표현된다.

$$\omega_{slip} \propto R_r i_{sq}^* \quad \text{식(11)}$$

단,  $i_{sq}^*$  = 회전자 토크전류 지령치

실제 유도전동기 벡터제어에서는 회전자 저항이  $\Delta R_r$ 만큼 상승함에 따라 슬립주파수도  $\Delta \omega_{slip}$ 만큼 상승하여 식(11)은 다음과 같이 된다.

$$(\omega_{slip} + \Delta \omega_{slip}) \propto R_r (i_{sq}^* + \Delta i_{sq}^*) \quad \text{식(12)}$$

즉, 이는 속도지령치나 외부 부하에 무관하게 토크 지령치  $i_{sq}^*$ 가 변화함을 의미하며, 이로 인해 실제 토크분 전류 지령치인  $i_{sq}^*$ 에  $\Delta i_{sq}^*$ 가 더해져 고정자에 인가되어 벡터제어의 특성을 저하시키는 요인이 된다. 이러한 현상을 그림 3과 4에 나타내었다.

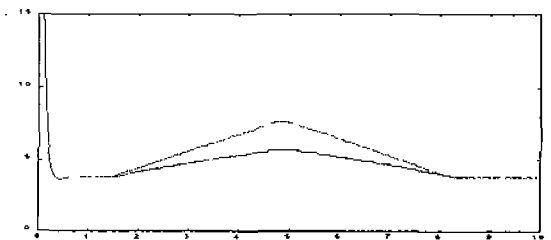


그림 3. 회전자 저항변동시 기존 벡터제어의 슬립주파수와 이상적인 슬립주파수의 비교

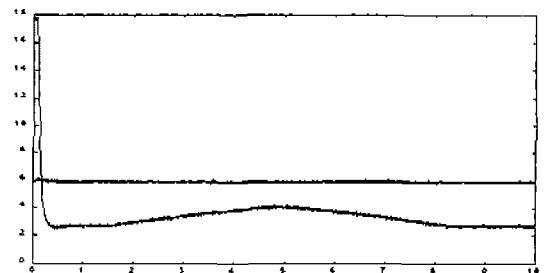


그림 4. 회전자 저항변동시 회전좌표계 전류(일반벡터제어)

그림 3에서 알 수 있듯이 실제 저항의 변화를 정확히 알때의 슬립주파수와는 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 벡터제어의 효율 및 성능을 저하시키므로, 회전자 저항의 변화를 실시간으로 보상해 줄 수 있는 기법이 필요함을 알 수 있다. 또한 또한 식 (8)에서 자화전류  $i_{mr}$  역시 식(13)과 같이 회전자 저항이 포함되어 있으며, 이는 자속 PI제어기의 입력으로 사용되어 진다.

$$(R_r + L_r p) i_{mr} = R_r i_{sd} \quad \text{식(13)}$$

따라서, 전체적으로 회전자 저항의 변화를 실시간으로 추정·보상하면서 벡터제어기 내에 회전자 저항을 필요로 하는 부분을 제거하여야만 회전자 저항의 변동에도 강인성을 가지는 벡터제어를 구현할 수 있게 된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제를 대표적 비선형제어기법의 하나인 퍼지논리제어기를 이용하여 접근하고자 한다.

### 3. 회전자 저항변동 보상제어의 구현

#### 3.1 자속 퍼지 제어기

그림 1의 벡터제어 시스템은 크게 자속 제어기와 속도 제어기를 포함하고 있다. 자속 제어기는 식 (16)과 같이 회전자 저항에 대한 함수이므로 이를 입력으로 사용하는 자속 PI제어기의 불안정 동작을 일으키는 요인이 된다. 그림 2와 같이 회전자 저항변동시 자속 PI제어기의 출력  $i_{mr}^*$ 을 그림 5에 나타내었다.

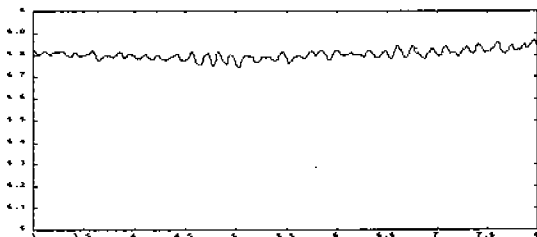


그림 5. 회전자 저항변동시  $i_{mr}^*$ (PI제어기 출력)

그림 5와 같이 정상상태에서 자화전류 지령치  $i_{mr}^*$ 은 회전자 저항변동의 영향으로 일정한 값을 유지하지 못하고 있다. 따라서 회전자 저항변동에 강인한 자속 제어기를 구성하기 위하여 회전자 저항을 포함하지 않는 퍼지논리제어기를 구성하였으며, 이의 블록도는 그림 6에 나타내었으며, 자속 퍼지제어기의 출력인  $i_{mr}^*$ 의 출력을 그림 7에 나타내었다

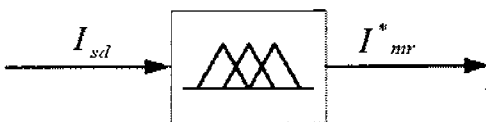


그림 6. 자속 퍼지제어기의 블록도

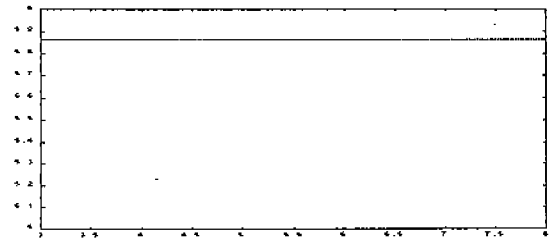


그림 7. 회전자 저항변동시  $i_{mr}^*$ (퍼지제어기)

그림 7의 결과처럼 기존의 자속 PI제어기를 자속 퍼지제어기로 대체함으로써 회전자 저항변동에 강인성을 가지는 자속 제어기를 구성할 수 있다.

#### 3.2 회전자 저항변동 보상 퍼지추론기

회전자 저항을 오프라인으로 측정하는 방식으로는 실제 구동시 발생하는 회전자 저항 변동을 해결할 수 없다. 따라서 실제 구동시 효율적으로 회전자 저항의 변동을 감지, 이의 실시간 보상이 필요하며 본 논문에서는 이를 위해 퍼지논리 추론기를 그림 8과 같이 구성하였다.

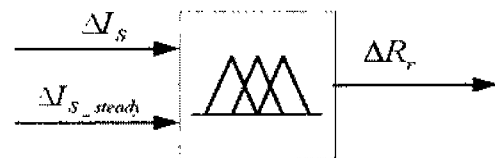


그림 8. 회전자 저항 퍼지논리 추론기의 블록도

회전자 저항이 증가하게 되면, 속도 및 외부 부하와 무관하게 회전자 토크분 전류가 상승하게 되며 이는 급격한 변화를 가져오는 속도 및 외부 부하의 변동과 달리 조금씩 증감하는 저항의 특성으로 완만한 기울기를 가지고 증감하게 된다. 이를 이용하여 다음의 조건을 구성하였다.[4]

※ 입력 1 ( $\Delta i_s(n) = i_s(n) - i_s(n-1)$ )

I)  $\Delta i_s > \Delta i_s^{Max}$  : 속도지령치 및 부하  $\Rightarrow$  변동

II)  $\Delta i_s < \Delta i_s^{Max}$  : 속도지령치 및 부하  $\Rightarrow$  일정

단,  $\Delta i_s$  : 3상 고정자 전류변동

$\Delta i_s^{Max}$  : 3상 고정자 전류변동의 최대변동값

(과도상태 운전시)

※ 입력 2 ( $\Delta i_s' = i_s(n) - i_{s\_Steady}$ )

I)  $\Delta i_s' > \Delta i_s^{Ref}$  : 퍼지추론기 동작

II)  $\Delta i_s' < \Delta i_s^{Ref}$  : 퍼지추론기 미동작

단,  $i_s$  : 3상 고정자 전류

$\Delta i_s^{ref}$  : 3상 고정자 전류변동의 최대변동값  
( 정상상태 운전시 )

위의 조건을 이용하여 회전자 저항 변동시의 퍼지추론기를 구성하였으며 이의 결과는 퍼지추론기에 의한 슬립주파수와 실제 회전자 저항의 변화를 정확히 알고 있다고 가정했을 때의 슬립주파수를 그림8에 나타내었다.

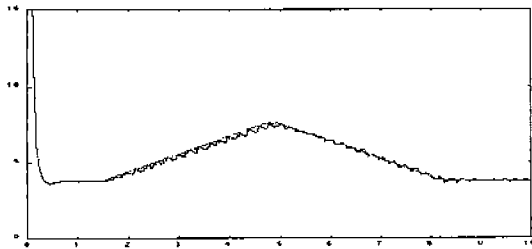


그림 9 회전자 저항변동시 퍼지추론기에 의한 슬립주파수와 이상적인 슬립주파수와의 비교

### 3.3 시뮬레이션 결과

위 3.2와 3.3을 통해 구성된 자속 퍼지제어기와 회전자 저항변동 퍼지추론기를 이용하여 그림 2의 벡터제어 시스템을 수정·보완하여 회전자 저항변동에 강인한 수정된 벡터제어 시스템을 구성하였으며 이는 그림 10과 같다.

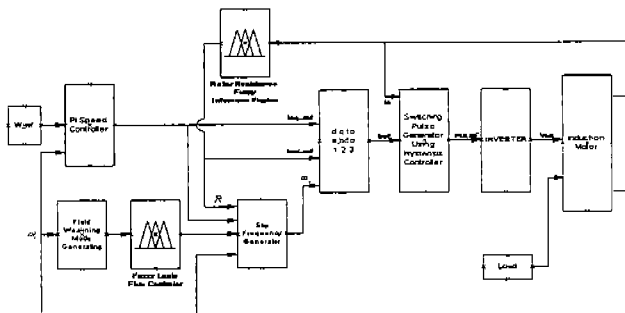


그림 10 자속 퍼지제어기 및 회전자 저항 보상 퍼지추론기를 이용한 벡터제어

위 그림 10에 나타난 시스템의 성능을 검증하기 위하여 시뮬레이션 조건은 앞서 제시한 기존의 벡터제어 시스템과 동일하게 하였으며 이의 결과는 그림 11과 같다.

그림 11은 그림 4와는 달리 회전자 저항이 변화하더라도 에 나타난 것처럼 회전자 저항이 변화하더라도 유도전동기의 자속 및 토크전류인  $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$ 는 일정한 값을 유지하고 있다. 따라서 제안된 알고리즘은 회전자 저항이 변화하더라도 정확한 벡터제어를 수행하고 있음을 알 수 있다.

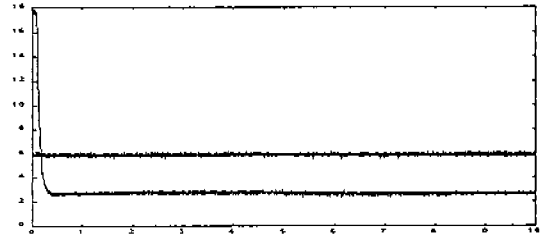


그림 11. 회전자 저항변동시 회전자표계 전류(퍼지추론기)

## 4. 결 론

일반적으로 회전자 저항이 변화하면 정확한 슬립주파수를 측정할 수 없다. 본 논문에서는 퍼리이론을 사용해 회전자 저항이 바뀔경우에도 슬립주파수를 정확히 추정할 수 있는 벡터제어알고리즘을 제안했다. 즉, 자속퍼지제어기와 회전자저항 퍼지추론기를 사용하여 부하변동이나 저항변동을 감지하여 저항변동일 경우 저항의 변화량을 슬립주파수 형태로 추정하여 정확한 벡터제어가 이뤄지도록 했다.

또한 본 알고리즘은 기존의 벡터제어회로에서 추가적인 측정장치를 필요로 하지 않으며, 실시간으로 슬립주파수를 측정할 수 있어 실제 시스템에 그대로 적용하는 것이 가능하리라 사료된다.

## 참 고 문 헌

- [1] K. H. Nordin, W. D. Novotny, "The Influence of machine parameter deviation in feedforward field oriented control" IEEE Trans. Ind. Applicant vol [A-2], no. 4, pp. 1009 - 1015, 1985
- [2] D. J. Atkinson, P.P. Academy, "Observation for induction machine state and parameter estimation" IEEE Trans. Ind. Applicant vol. 27, no. 6, pp 1119 - 1127, 1991
- [3] J. Holtz, "Identification of machine parameters in vector controlled induction machine drive", IEEE Trans. Ind. Applicant., vol. 27, no. 6, 1111-1118, 1991
- [4] S. A. Mir, D. S. Zinger, "Fuzzy Controller for Inverter fed induction machines", IEEE Trans. Ind. Applicant., vol. 30, no. 1, pp. 78-84, 1994
- [5] S. Mir, M. Elbulk, "PI and Fuzzy Estimator for tuning the stator resistance in the Direct Torque Control of I.M", IEEE Trans. Power Electron. Vol 13. no. 2, pp. 279-287, 1998
- [6] S. A. Mir, D. S. Zinger, "Fuzzy Implementation of Direct torque control of induction machine", IEEE Trans. Ind. Applicant., vol. 30, no. 1, pp. 729-735, 1994