

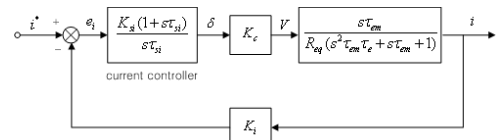
## 퍼지-뉴럴 네트워크를 이용한 BLDC 모터 전류 기준값 추정

**황찬길**, 박기광, 김동욱, 양해원  
한양대

### Estimation current reference using Fuzzy-Neural networks for BLDC motor

Chan-gil Hwang, ki-Kwang Park, Dong-Ok Kim, Hai-Won Yang  
Hanyang University

**Abstract** - BLDC는 낮은 관성, 빠른 응답, 높은 전력밀도, 높은 신뢰성 및 유지보수를 요구하지 않기 때문에 산업용 어플리케이션에 널리 이용되고 있다. BLDC는 종래의 영구자석 DC모터의 운영 특성을 보이고 있지만 기계적인 정류자와 브러시를 제거하였다. BLDC의 경우 자속이 일정하기 때문에 속도 제어가 중요하다. 회전자의 속도를 제어하기 위해 전류 지령치를 퍼지 뉴럴 네트워크를 이용하여 제어치를 추정한다.



〈그림 1〉 The current loop for the BLDC

### 1. 서 론

BLDC는 낮은 관성, 빠른 응답, 높은 전압밀도, 높은 신뢰성 및 유지보수를 요구하지 않기 때문에 산업용 어플리케이션에 널리 이용되고 있다. BLDC는 기존의 DC모터의 운영 특성을 보이고 있지만 기계적인 정류자와 브러시를 제거하였다. 따라서 브러쉬와 정류자와 관련된 많은 문제들을 제거하였고, 선형적인 토크 대 전류, 속도 대 전압특성을 갖고 있으며 기계적·전기적인 잡음이 없고, 가감속 제어가 용이하며, 토크 대 관성의 비가 매우 높아 높은 출력을 낼 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이 논문에서는 BLDC 드라이브 시스템에서 퍼지뉴럴 네트워크를 기반으로 전류 기준값을 추정한다.

주어진 임계 주파수  $\omega_{ci}$ , 전류제어기의 이득  $K_{si}$ 는 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$K_{si} = \frac{\omega_{ci} \tau_e R_{eq}}{K_c K_i} \quad (5)$$

폐루프 변환함수는 다음과 같이 결정 할 수 있다.

$$H_i(s) = \frac{1}{K_i(1+s/\omega_{ci})} \quad (6)$$

### 2. 본 론

#### 2.1 Drive system.

드라이브 시스템은 정류기, 인버터, 모터를 포함하고 있다. 3상 Y결선 BLDC의 수학적 모델은 다음과 같이 나타내었다.

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_a \\ \dot{v}_b \\ \dot{v}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T_e = (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) / \omega_r \quad (2)$$

R은 위상저항, L은 상 인덕턴스 M은 상호 인덕턴스,  $v_{a,b,c}$ 는 상전압,  $i_{a,b,c}$ 는 상전류,  $e$ 는 상 역기전력, p는 미분연산자,  $\omega_r$ 는 회전자 속도,  $T_e$ 는 전자기 토크이다. BLDC의 역기전력은 통상 120° 구간을 갖는 사다리꼴 형태로 이루어져 있어서 회전자의 위치 정보는 전기각으로 60°마다 검출하고 전동기의 3상중 항상 2상만 여자 되도록 인버터를 구동시킨다.

#### 2.2 전류루프의 PI 제어기

제어기의 내부전류 루프는 PI 제어기이다. 전류제어기 출력은 인버터의 PWM duty 싸이클  $\delta$  이고, 모터의 평균전압은 duty 싸이클  $\delta$  에 대해 비례한다. 그리고 인버터는 증폭기로 간주될 수 있고,  $K_c$ 와 함께 DC link 전압에 비례한다. BLDC의 전류루프는 그림 2에서 보여준다.  $K_{si}$ 는 전류제어기의 이득,  $\tau_{si}$ 는 적분시간 상수,  $K_i$ 는 전류센서의 이득, 그리고  $\tau_{em}$ 은 전기기계 시간상수  $JR/(K\Phi)^2$ . 전류 제어기는 다음과 같이 표현한다.

$$G_i(s) = \frac{K_{si}(1+s\tau_{si})}{s\tau_{si}} \quad (3)$$

$$\frac{s\tau_{em}}{R_{eq}(s^2\tau_{em}\tau_e + s\tau_{em} + 1)} \approx \frac{s\tau_{em}}{R_{eq}(s^2\tau_{em}\tau_e + s\tau_{em})} = \frac{1}{R_{eq}(1+s\tau_e)} \quad (4)$$

#### 2.3 속도루프의 PI제어기

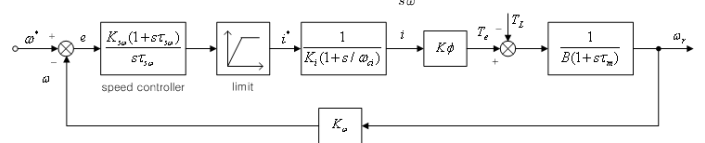
속도루프에 대한 PI제어기의 전류루프는 (6)식에서 나타낸다. BLDC의 속도루프는 PI제어기와 함께 그림 2에서 보여 준다.  $K_{sw}$ 는 속도제어기의 이득,  $K_w$ 는 속도센서의 이득,  $\tau_{sw}$ 는 적분상수이다.

속도 제어기의 출력은 전류 제어기의 레퍼런스 전류  $i^*$ 이다. 모터의 제한된 최대 허용 상전류는 제한(또는 포화)은 모터를 보호하기 위해 필요하다. 속도루프의 개루프 변환식은

$$A_w(s) = \frac{K_{sw}(1+s\tau_{sw})K\phi K_w}{s\tau_{sw}BK_i(1+s/\omega_{ci})(1+s\tau_m)} \quad (7)$$

임계주파수  $\omega_{cs}$ 와 위상폭  $\varphi_{cs}$ , 속도제어기 파라미터  $K_{sw}$ 와  $\tau_{sw}$ 는 개루프 변환공식 (7)로부터 결정된다. 증분 커맨드는

$$\Delta u = K_{sw} \Delta e + \frac{K_{sw}}{\tau_{sw}} e \quad (8)$$

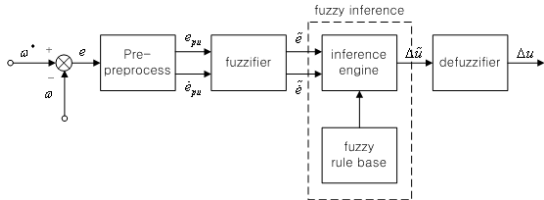


〈그림 2〉 The speed loop for the BLDC

#### 2.4 속도루프의 퍼지제어기

퍼지논리 제어는 전문가의 경험적 지식을 포함하는 제어능력을 사용하는 것이다. 퍼지 제어기의 구성은 퍼지화기(fuzzifier), 규칙베이스(rule-base), 퍼지 추론기(fuzzy inference engine) 그리고 비퍼지화기(defuzzifier)의 네가지 중요한 요소로 이루어져 있다. BLDC의 퍼지논리 제어기의 구조는 그림 3에서 보여준다.

퍼지논리 제어기의 입력은 속도에러와 가속에러(속도에러의 미분)이다. 분석은 계산된 normalized속도에러  $e_{pu}$ 와 가속에러  $e_{pu}$ 를 사용하고 fuzzifier의 파라미터를 결정하는데 편리하다. 제어기의 입력신호는 속도 에러( $\tilde{e}$ )와 가속도에러( $\tilde{\dot{e}}$ )에 대한 변화율을 관찰할 수 있다. 그런 다음 표1에 보여주는 퍼지규칙을 기반으로 추론 할 수 있다. 퍼지 추정에 대한 출력 커맨드(제어신호)증가는 ( $\Delta\tilde{u}$ )이다. 퍼지 추정에 대한 출력 커맨드(제어신호)는 ( $\Delta\tilde{u}$ )이다. 출력 값은 NB, NM, NS, Z, PS, PM 그리고 PB이다. Negative Big, Negative Medium, Negative Small, O, Positive, Small, Positive Midium, Positive Big으로 각각 나타낼 수 있다.



<그림 3> The structure of the fuzzy logic controller

<표 1> fuzzy rule base

	$\hat{e}$				
$\hat{e}$	NB	NS	Z	PS	PB
NB	NB	NB	NM	NS	Z
NS	NB	NM	NS	Z	PS
Z	NM	NS	Z	PS	PM
PS	NS	Z	PS	PM	PB
PB	Z	PS	PM	PB	PB

### 2.5 퍼지 뉴럴 네트워크(FNN) 시스템

미지의 함수  $L(t)$ 를 퍼지 뉴럴 네트워크를 이용한 근사기를 통하여 추정하고자 한다. FNN 시스템은 기본적으로 IF-THEN 규칙과 퍼지 inference engine으로 구성되어 있다.  $i$  번째 IF-THEN 규칙은 다음과 같다.

$$R^{(i)}: IF \quad x_1 \text{ is } F_1^i \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } F_n^i \\ THEN \quad y^i = G^i \quad (9)$$

여기서  $x_1, x_2, \dots, x_n$ 는 퍼지 시스템의 입력 성분이며,  $y^i$ 는  $i$  번째 규칙의 출력성분을 나타낸다. 또한  $F_j^i$  와  $G_j^i$  ( $j=1, 2, \dots, n$ )는 각각 입력과 출력의 퍼지 집합을 의미한다. 식(9)와 같은 규칙에 기초하여 퍼지 시스템을 product inference engine, 그리고 center average 비퍼지화 방법을 사용하여 구성하면 퍼지 시스템의 출력을 다음과 같이 표현 할 수 있다.

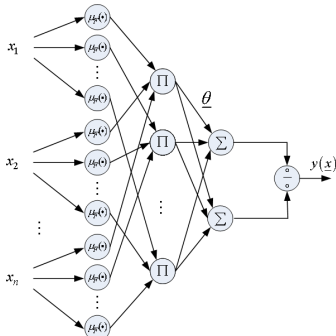
$$y(x) = \frac{\sum_{i=1}^M \theta_i \left( \prod_{j=1}^n \mu_{F_j^i}(x_j) \right)}{\sum_{i=1}^M \left( \prod_{j=1}^n \mu_{F_j^i}(x_j) \right)} = \Theta^T \xi(x) \quad (10)$$

여기서  $\Theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_M]^T$ 은 적용 파라미터 벡터이고,

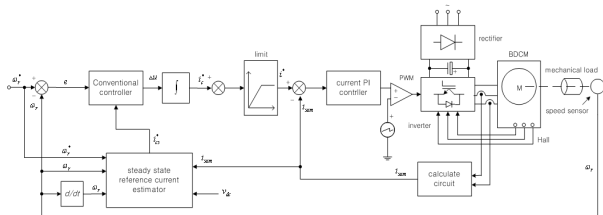
$\xi(x) = [\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_M]^T$ 은 퍼지 기저 함수 벡터 이다. 또한  $M$ 은 퍼지 규칙의 총 수를 나타낸다.

$$\xi_i(x) = \frac{\prod_{j=1}^n \mu_{F_j^i}(x_j)}{\sum_{i=1}^M \left( \prod_{j=1}^n \mu_{F_j^i}(x_j) \right)} \quad (11)$$

식(10)에서 소개된 FNN 시스템은 미지의 함수에 대한 오차를 근사화 하는데 이용된다. FNN 시스템의 전체 구조는 그림 4와 같다.



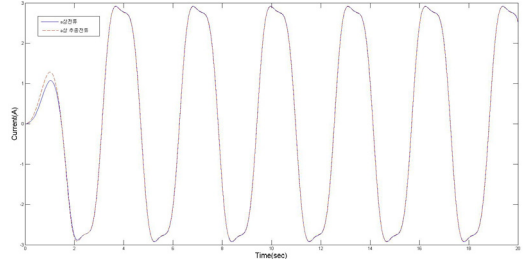
<그림 4> The structure of Fuzzy Neural Network



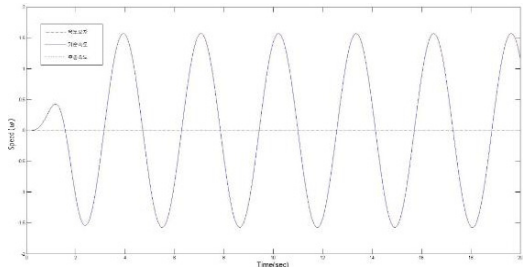
<그림 5> The structure of the control system

### 3. 실험 결과

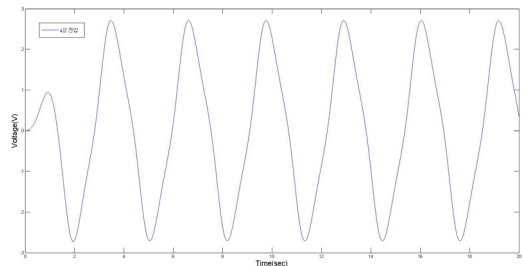
본 모의실험에서는 BLDC 드라이브 시스템에 대한 제안된 제어기를 적용하여 회전자 속도제어를 하기위해 퍼지뉴럴 네트워크를 사용하여 전류지령치를 찾고자 한다. 속도 기준값은  $\omega_d = \pi/2 \sin 2t \cdot (1 - e^{-0.3t^3})$ 와 같이 나타낼 수 있다. 그림 6은 제안된 전류제어기가 기준전류값을 추종하고 있음을 보여준다. 초기의 오차를 제외 시킨다면 기준전류를 추종하고 있다. 그림 7은 기준전류를 추종하고 있을 때의 속도제어를 보여준다. 기준속도를 잘 추종하고 있으며 오차가 거의 없고 그림 8은 이때의 전압에 대해 보여준다.



<그림 6> a상의 전류/추종전류



<그림 7> 기준속도/추종속도



<그림 8> a상의 전압

### 4. 결 론

BLDC 드라이브 시스템을 위한 퍼지 뉴럴 네트워크를 기반으로 하여 전류 기준값 추정을 제안하고 있다. 본 논문은 기존의 제어기와 함께 빠른 응답, 작은 오버슈트, 작은 진동, 견고성 및 등등의 장점이 있다. 실험 결과를 그림으로 나타냈다. 퍼지 뉴럴 네트워크를 사용하여 전류 지령치를 찾고 기준 전류를 잘 추종함에 있어서 속도제어가 원활하게 됨을 알 수 있다. 드라이브 시스템은 PI제어기와 퍼지 제어기 하에 테스트 하였다. 성능은 기준전류를 추종함으로써 속도제어가 크게 개선되었다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Boldea, I., and Nasar, S.A., "Electric drives" (CRC press LLC Boca Raton, Florida, 1999)
- [2] Rubaai, A., Kotaru, R., and Kankam, M.D.: 'A continually onlinetrained neural network controller for brushless DC motor drives', IEEE Trans. Ind. 36, (2), pp. 475 - 83, Appl., 2000,
- [3] Lai, Y.S., and Lin, J.C.: "New hybrid fuzzy controller for direct torque control induction motor drives", IEEE Trans. Power Electron., 18, (5), pp. 1211 - 219, 2003,
- [4] Z.Y. Pan and F.L. Luo, "Steady state reference current determination technique for brushless DC motor drive system", IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 152, No. 6, November 2005
- [5] Lin, F.J., Hwang, W.J., and Wai, R.J.: 'A supervisory fuzzy neural network control system for tracking periodic inputs', IEEE Trans. Fuzzy Syst., (1), pp. 41 - 52, July, 1999.