전력전자학술대회 논문집 2002. 7. 3 ~ 7. 6

GA 제어기를 사용한 저가형 BLDC의 동작특성 개선에 관한 연구

박종원, 홍정표, 조학래, 박성준*, 원태현**, 정영석, 권순재
부경대학교 기계공학부, 동명대학 전기전자계열*, 동의공업대학 전기전자계열**

A study on improvement of The Operating Characteristics of the low cost BLDC using GA controller

Jong-Won Park, Jeng-Pyo Hong, Hag-Lae Cho, Sung-Jun Park*, Tae-Hyun Won**, Young-Seok Jung, Soon-Jae Kwon
Pukung National Univ. Tongmyung College*, Dongeui institute Technology**

ABSTRACT

A study on control of BLDC is studing in progress, because of radical increase of survo motor at industrial machine and home machine. Nowaday, we study on control of BLDC, because of radical increase of survo motor at industry and home.Although control ratio and output of the unit volume are good than the others , BLDC motor demands high cost. Therefor, the study on low cost BLDC have square wave back-emf is studing in progress. Therefor, BLDC Motor was studied to reduce high cost that have square wave back-emf at recently. This paper shows that BLDC Motor, developed highly responsility by usig Genetic Algorithm(GA) that the advantages of learning ability. Also, this paper shows experiment and simulation at 200W BLDC that have squarewave back-emf by using Genetic Algorithm. At the result of this methods, the study prove experiment's right.

1. 서 론

전동기는 대부분의 산업현장에서 구동기로서 사용되고 있으며, 전기적 기계적 시스템에 대한 정확한 제어방식에 대한 연구는 계속 진행되어 오고 있다. 브러시 있는 직류 서보 전동기는 구동기로서 상대적으로 제어가 용이하여 이에 대한 제어기법은 많은 연구가 있었다. 그러나 브러시에 의한 불꽃현상에 따른 신뢰성 문제와 이에 따른 보수 및 수명과 노이즈 발생문제 그리고 큰 출력 비의 요구 등의 관계로 구동부가 안정되고 되도록 작으면서 토크가 상대적으로 큰 구동기로 대치되고 있다. 기존의 영구자석 직류 전동기와 동일한 속도-토크 곡선을 갖는 BLDC 전동기는 기계적인 브러시가 제거됨에 따른 신뢰성과 회전자에 권선이 없으므로 해서 좋은 방열성과 높은 토크대 관성비를 갖는다. 반면에 전기적 시스템 특성이 다입력과 상전류와 회전자 속도사이의 비선형 결합에 기인해서 브러시 있는 직류 전동기에 비해 제어가 어렵고 비용이 많이 드는 단점이 있다[1][2][3]. 퍼지 논리는 퍼지 집합론을 기준으로 한 제어이론으로 제어대상 플랜트를 수학적으로 모델링 하는 대신 입력과 출력의 관계만을 통하여 제어 규칙을 생성하므로 플랜트의 수학적 모델링이 필요 없고, 외란에 강인한 특성을 가지고 있다. 그러나 퍼지 제어기는 제어규칙, 소속함수, 입출력 이득을 생성하기 위한 일반적 규칙이 존재하지 않고 전문가의 지식에 의존한다.[4][5] 본 논문에서는 BLDC의 속도제어를 위한 퍼지제어기의 입 출력 소속함수의 파라미터들을 찾기 위해서 유전 알고리즘을 이용하였다.

2. BLDC Motor 의 수학적 모델링

BLDC Motor는 구조적으로 동기기(Syncronous motor)와 같고, 일반적으로 고정자는 3상으로 되어 있고 회전자는 영구자석으로 이루어져 있다. 고정자에 3상의 교류 전류를 인가하여 회전자속을 얻고 이 회전자속과 회전자 영구자석에서 발생된 토오크에 의해 전동기가 구동된다.[6][7]

BLDC 전동기의 등가회로는 3상 2극 동기전동기의 등가회로와 같고, 회전자는 영구자석으로 만들어져 있으며 전압 방정식은 다음과 같다.

$$v_k = R i_k + L \frac{di_k}{dt} + e_k \qquad (1)$$

단 $k=1,2,3$

여기서 R, L은 상권선의 저항 및 인덕턴스를 나타내며, v_K, i_k, e_k는 전동기의 상전압, 상전류 및 역기전력을 나

타낸다. 위 식을 상태방정식으로 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{di_k}{dt} = -\frac{R}{L} i_k - \frac{1}{L} e_k + \frac{1}{L} v_k \tag{2}$$

그리고 구형파 브러시리스 직류전동기에 대해서 운동방정식은 다음과 같이된다.

$$T_e - T_L = B\omega_r + J\frac{d\omega_r}{dt} \tag{3}$$

식 (3)에서 T_e는 전동기의 출력토크, T_L은 전동기에 인가되는 부하토크, B는 점성마찰계수, J는 회전자 관성계수, ω_r은 전동기의 기계적 각속도를 나타낸다. 기계적 각속도와 전기적 각속도의 관계는 다음식과 같다.

$$\omega_e = P\,\omega_r \tag{4}$$

3상 전동기에 의해 발생된 mutual torque는 공극전력과 발생된 기계적인 출력을 같게 둠으로써 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\omega_r T_e = \sum_{k=1}^{k=3} (e_k\, i_k) \tag{5}$$

토크의 선형성을 가정하면 역기전력은 속도, 형상함수, 정규화 요소의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$e_k = \frac{\omega}{\omega_c} F_k(\theta)\, V_{cc}, \quad k = 1, 2, 3$$
$$where \quad \max|F_k(\theta)| = 1 \tag{6}$$

여기서 ω_c는 역기전력의 피크치가 전원전압과 같게 될 때의 전기적인 주파수이다. 즉,

$$\max|E_k(\theta)| = 1$$
$$when \quad \omega = \omega_c \tag{7}$$

역기전력은 다음과 같이 퓨리에 급수로 나타낼 수 있다.

$$F_k(\theta) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_n \exp\left\{jn\left[\theta - (k-1)\frac{2\pi}{3}\right]\right\}$$
$$단\ k = 1, 2, 3 \tag{8}$$

따라서 구형파 브러시리스 직류 전동기의 등가회로로부터 미분방정식 식 (2)와 식 (3)를 세우면, 이 식들은 상전류 i_1, i_2, i_3와, 회전속도 ω_r를 상태변수로 한 상태 방정식이므로 이를 가지고 구형파 브러시리스 직류전동기의 상전류 i_1, i_2, i_3와, 회전속도 ω에 개한 분석을 할 수 있고, 분석 결과를 식 (5)에 대입함으로써 출력토크 T_e에 대한 분석도 할 수 있다.

3. 퍼지 제어 규칙과 추론

일반적으로 FLC(Fuzzy Logic Controller)의 설계 절차는 우선 퍼지제어기의 입출력 변수를 결정하고 각각의 입출력 변수에 관련된 퍼지집합과 멤버쉽 함수를 결정하고, 퍼지제어기의 제어규칙을 결정한다. FLC의 제어 규칙은 전문가의 지식이나 경험에 의해서 얻어진다. 규칙 "IF~THEN"형식으로 구성되어 있기 때문에 전문가의 경험과 지식을 자연언어로 사용할 수 있게 한다. 일반적인 퍼지모델 규칙은 다음과 같다.

R_1 : *IF* e_1 *is PB* and ce_1 *is PS THEN* co_1 *is PB.*
R_2 : *IF* e_2 *is NM* and ce_2 *is PS THEN* co_2 *is NM.*
R_3 : *IF* e_3 *is ZO* and ce_3 *is ZO THEN* co_3 *is ZO.*
⋮

여기서, $e_1, e_2, \ldots, e_n, ce_1, ce_2, \ldots, ce_n$은 제어기 입력, $co_1, co_2, \ldots, co_n$ 은 퍼지 제어기 출력이다. 추론이란 어떤 주어진 사실이나 관계로부터 새로운 사실이나 관계를 유추하는 과정이다[8]. 그러므로 제어기 입력과 제어규칙에서 추론의 합성규칙을 이용하여 정확한 제어기 출력값을 구할 수 있다. 추론의 합성 규칙에는 MAX-MIN과 MAX-PRODUCT 등 여러 가지가 있지만 본 논문에서는 Mamdani가 제안한 MAX-MIN 합성 규칙을 사용한다. MAX-MIN 합성 규칙은 식 (9), 식 (10)와 같다.

함의 : $\mu_R(e, ce, co) =$

$$MIN(\mu_E(e), \mu_{CE}(ce), \mu_{CO}(co)) \tag{9}$$

추론: $\mu_{CO}(co) =$

$$MAX - MIN(\mu_E(e'), \mu_{CE}(ce'), \mu_{CO(co)}) \tag{10}$$

여기서, e', ce' : 제어기 입력의 퍼지 집합
co' : 추론된 제어기의 출력값
μ: 소속 함수 값

제어규칙에 의해서 추론된 출력값은 퍼지 값이므로 이 값을 플랜트의 입력 값으로 하기 위해서는 결정론적인 값 즉, 비퍼지화를 하여야 한다. 본 논문에서 사용한 비퍼지화는 식 (11)의 무게 중심법에 의해 실행된다.

$$CO^* = \frac{\sum(\mu_S \times \mu_V)}{\sum \mu} \tag{11}$$

여기서, CO^* : 비퍼지값, μ : 소속함수값, $\sum$: 값의 합, μ_S : 소속함수값을 갖는 대집합, μ_V : 해당 대집합의 소속함수값

4. 유전 알고리즘을 이용한 퍼지제어기

본 논문에서 제안하는 유전 알고리즘-퍼지제어기의 블록 다이어그램은 그림 1과 같다. 이는 일반적인 퍼지제어기에 유전 알고리즘 부분을 추가한 구조를 하고 있다.

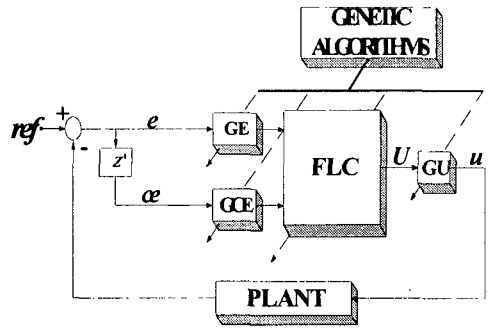

그림 1. GA- 퍼지 제어기의 블록도

Fig. 1. Block diagram of GA-fuzzy Logic controller

유전 알고리즘은 자연의 진화과정을 컴퓨터 상에서 모의 실험하여 주어진 문제에 대한 원하는 최적해를 탐색하는 방법이다. 유전 알고리즘을 이용하여 문제를 푸는 경우, 각 개체는 풀고자 하는 문제의 해에 관련한 정보를 가지며 이는 일련의 비트, 정수, 혹은 실수 스트링으로 표현이 된다. 각 개체가 풀고자 하는 문제에 얼마나 적합한지는 적합도(fitness)에 의해 평가되며, 이 적합도에 따라 집단 내에서 그 개체의 생존 여부가 결정된다. 일반적으로 적합도는 풀고자 하는 문제에 관련된 목적함수에 의해 결정되며 주로 목적함수의 지수나 역수 형태를 취한다. 이러한 개체들의 모임인 개체군을 세대라고 하며 유전 알고리즘은 이 세대에 대해 작동을 한다. 유전 알고리즘은 재생산, 교차, 돌연변이 연산자를 사용하여 최적해를 탐색해간다.

유전 알고리즘에서 전역적인 최적의 해를 구하기 위한 순서는 다음과 같다.

① 부호화 및 초기화 : 생물의 유전정보인 염색체와 같이 유전 알고리즘에서는 염색체에 해당하는 파라미터를 부호화한다. 보통의 부호화 방법은 유한 길이의 이진 염색체로 부호화하며 랜덤하게 N개의 문자열을 생성하여 초기 해집단을 구성한다.

② 평가 : 각 분자열을 디코딩 하여 목적함수에 대한 적합도를 계산한다.

③ 최적해를 구하였으면 탐색 과정을 중단한다.

④ 재생산 : 자연 생태계의 작자생존 원리를 이용하여 높은 적합도를 가진 문자열에 대하여 다음세대로 복제될 확률을 높게 한다.

⑤ 교배와 돌연변이 : 문자열을 쌍으로 구성하여 문자열 안에 있는 유전자 정보를 서로 교환하고 유전자의 돌연한 형태로 새로운 유전 정보를 갖는 문자열을 만든다.

⑥ 새로 생성된 자손의 문자열에 대하여 적합도를 평가하고 최적해를 구할 때까지 ③ 이하의 과정을 반복한다.

유전 알고리즘에 의해 멤버쉽 함수와 퍼지규칙을 아래와 같이 정의한다. 이렇게 구성된 염색체는 하나의 긴 염색체를 구성하며 이 염색체를 사용하여 유전 알고리즘이 수행된다.

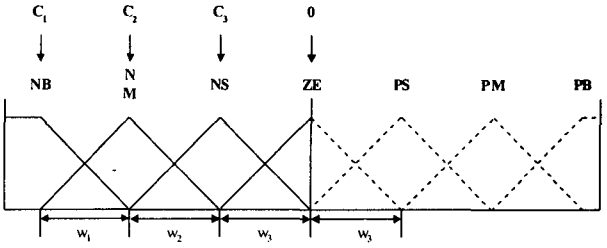

그림 2. 대칭 구조 멤버쉽 함수

Fig. 2. Symetrical membership functions

본 연구에서는 유전 알고리즘의 수렴속도를 향상시키기 위하여 그림 2와 같이 ZE를 중심으로 대칭 구조 멤버쉽 함수를 이용하였다. 멤버쉽 함수가 대칭인 경우 찾아야할 셀의 수가 1/2로 축소되어 수렴시간이 빨라지는 장점이 있다. 본 연구에선 이용한 염색체의 구조는 표 1과 같으며 꼭지점, 폭, 그리고 입력 및 출력 팩터 등 총 21개의 셀로 구성되어 있다.

표 1. 염색체의 구조

Table 1. The structure of the chromosome

C1	W1	C2	W2	C3	W3	...	C9	W9	GE	GCE	GU

여기서, C_i는 멤버쉽함수의 꼭지점, W_i는 멤버쉽함수의 폭, GE, GCE, GU는 각각의 스케일 벡터이다. 세대를 진화시키는 요소는 앞의 염색체 구조와 다음의 평가함수로 이루어진다. 이 평가 함수는 시스템에 있어서 적합한 유전자인가를 평가 할 수 있는 적합도 함수이다. 여기서 사용한 평가함수는 오차와 오차변화를 최소로 하는 것을 목적으로 한다. 따라서 식(12)과 같이 오차와 오차변화의 제곱누적을 평가함수의 항으로 사용하였다.

$$fitness(x) = \frac{1}{\sum_{n=0}^{N} (nT \cdot e_n^2 + nT \cdot ce_n^2)} \qquad (12)$$

여기서, T는 샘플링 주기, e는 플랜트의 출력과 기준 신호간의 오차, N은 sampling numbers, ce는 오차의 변화율이다. 이렇게 정의되어진 적합도 함수는 각 객체가 다음 세대에 생존할 가능성의 척도가 된다.

5. 시뮬레이션 및 실험

시뮬레이션은 C 언어를 이용하여 수행하였다.

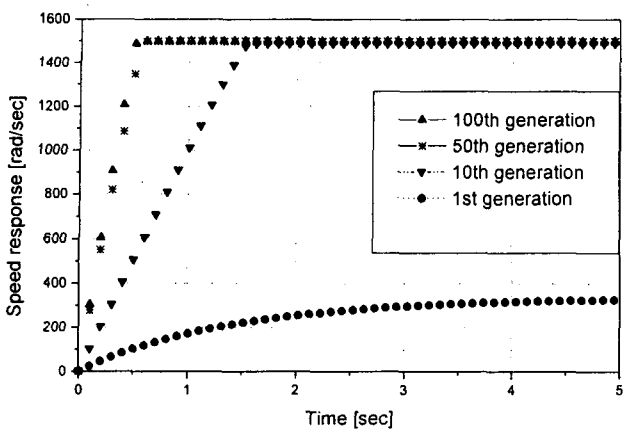

그림 3. 세대의 변화에 따른 제어대상 플랜트의 출력의 변화
Fig. 3. Output of controlled plant for different generations

그림 3은 GA를 이용하여 멤버쉽 함수의 꼭지점, 폭 그리고 입출력 팩터 21개를 학습시킨 결과이다. 1세대에서는 입출력 스케일 팩터가 맞지 않은 관계로 좋은 속도 응답을 얻을 수 없었으나 세대가 지나감에 따라 속도 응답의 성능이 향상되고 있음을 알 수 있다.

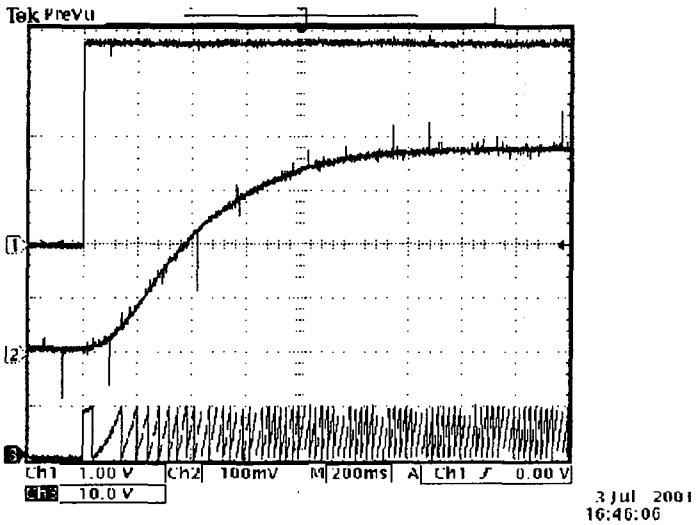

그림 4. 기존의 PI제어기의 속도응답 (1500[rpm])
Fig. 4. Speed response of convention PI control

그림 4은 기존의 비례적분제어기를 사용하여 지령속도 1500[rpm]으로 설정한 경우의 속도응답을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 약 1[sec]후에 정상상태가 됨을 알 수 있다.그림 5는 퍼지제어기를 사용한 경우의 속도응답을 나타내고 있으며, 기존의 비례제어기에 비하여 속응성이 많이 개선됨을 알 수 있었으나 정상상태의 속도리플이 조금 나타남을 알 수 있었다

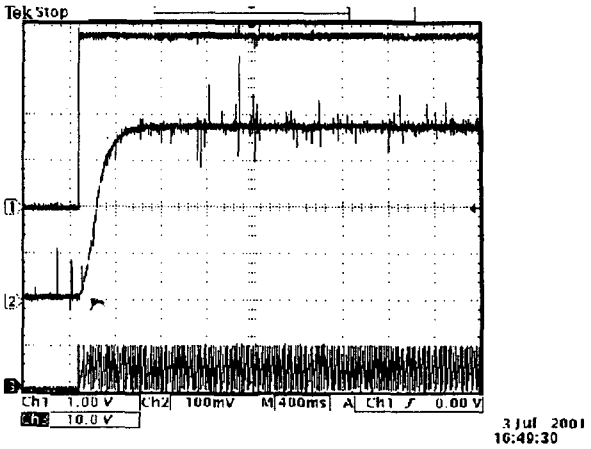

그림 5. 퍼지제어기의 속도응답(1500[rpm])
Fig. 5. Speed response of fuzzy control

6. 결 론

본 논문에서는 제어대상 플랜트를 수학적으로 모델링 없이 입력과 출력의 관계만을 통하여 제어 규칙을 생성하여 외란에 강인한 특성을 가지는 퍼지제어기의 입, 출력 소속함수의 파라미터들을 찾기 위해서 유전 알고리즘을 사용하여 실험을 행한 결과 속응성을 상당히 개선하였다.

참 고 문 헌

[1] Neyram Hemati, and Ming C.Leu, " A Complete Motel Characterization of Brusheless dc Motors", IEEE Trans, on Industry Applications, Vol.28 NO,1 Jan/Fab.1992

[2] Pragasen Pillay, and Ramu Krishnan, " Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent-Magnet Motor Drives, Part 1 : The Permanent-Magnet Synchronous Motor Drive ", IEEE Trans. on Industry Applications ,Vol ,25, No. 2, March/April 1989

[3] Pragasen Pillay, and Ramu Krishnan, " Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent-Magnet Motor Drives, Part 2 : The Permanent-Magnet Synchronous Motor Drive ", IEEE Trans. on Industry Applications Vol ,25, No. 2, March/April 1989

[4] S.K Panda, X.M Zhu and P. K. Dash. "Fuzzy Gain Scheduled PI Speed Controller for Switched Reluctance Motor Drive",IECON'97

[5] Mahmood Nagrial, M.T. Qureshi, Mostafa A Mohamed," Fuzzy Logic Applications to High Performance Drives with] Special Reference to Reluctance Motor", Proc. of PEDS'97, vol.1, pp193~198,1997.

[6] J.R. Hendershot Jr., TJE Miller,Design of Brushless Permanent-Magnet Motor,Magna Physics,1994.