

가변구조제어기를 이용한 BLDC 모터의 전류제어

°박영배*, 김대준**, 전항식***, 최영규*

* 부산대학교 전기공학과 ** 동명중공업(주) 기술연구소 *** 대우중공업(주) 항공사업부

Variable Structure Current Controller for BLDC Motor

°Young-Bae Park*, Dae-Jun Kim**, Hyang-Sik Jeon***, Young-Kiu Choi*

* Pusan National Univ. *** Tongmyung Heavy Industry Co. *** Daewoo Heavy Industry Co.

Abstract - It is well known that Variable Structure Controller(VSC) is robust to parameters variation and disturbance but its performance depends on the design parameters such as switching gain and slope of sliding surface.

This paper proposes a more robust VSC that is composed of local VSC's. Each local VSC considers the local system dynamics which has narrow parameter variation and disturbance.

We optimize the local VSC's by use of Evolution Strategy, and then we use Artificial Neural Network to generalize the local VSC's and construct the overall VSC in order to cover the whole range of parameter variation and disturbance.

Simulation on BLDC motor current control has verified the proposed VSC is superior to the conventional VSC.

1. 서 론

Brushless Direct Current 모터는 높은 효율, 컴퓨터 제어의 용이함, 보수 유지의 불필요, 간단한 회로방정식등으로 인해 모션제어등의 액츄에이터로 많이 쓰이고 있다. 그리고 이 전동기에 벡터제어방법을 사용하면 타여자 직류기와 같이 모터의 토오크가 전적으로 고정자 q축 전류에 지배되기 때문에 정밀한 전류제어가 정밀한 속도, 토오크 제어에 필수적이다[3].

전류제어기로서는 대표적으로 히스테리시스 제어기, 삼각파 비교제어기, 예측제어기 등이 알려져 있다[1]. 히스테리시스 제어기는 일정한 전류폭을 설정하여 이 폭을 벗어나면 반대방향으로 인버터를 스위칭하는 일종의 뱅뱅(bang-bang)제어기로 스위칭 주파수의 불균일과 전류오차가 전류폭의 2배까지 커질 수 있는 단점이 있다. 삼각파 비교제어기는 전류오차를 PI제어기를 통과시켜 삼각파와 비교하는 방법으로 동작주파수에 따라 PI이득을 적절히 변화시켜주지 않으면 지령전류와 실제전류와 사이에 위상차가 존

재한다[5]. 그리고 예측제어기는 고정자 전류를 일정한 시간간격으로 샘플하여 전류벡터를 계산하고 난 뒤 한 샘플링 후의 전류벡터를 정확히 추종하도록 하는 전압벡터를 계산하여 인버터 스위칭을 결정하는 방법인데, 전동기의 파라미터를 정확히 측정하여야 정확한 계산이 된다는 단점이 있다.

가변구조제어기(Variable Structure Controller:VSC)는 비선형 부계환제어기로, 그 제어구조가 시스템의 상태에 따라 변하는 구조를 하고 있다. 각각의 구조는 안정하지 않는 계라 할지라도 양자의 스위칭에 의해 생기는 슬라이딩 모드 상으로 시스템의 상태가 미끄러져 평형점으로 수렴하기 때문에 슬라이딩 모드상에서는 외란이나 시스템 상태에 강인한 성능을 보이게 된다[7]. 그런데 여기에서 사용자가 정의해야 할 파라미터들이 존재하는데 외란의 폭, 스위칭 면의 기울기, 채터링을 경감시키기 위한 saturation-width 등에 의해 그 성능이 영향을 받게 된다. 하지만 이제까지의 논문에서는 그 파라미터를 정하는 일관된 방법이 존재하지 않고 시행착오에 의존하고 있다.

따라서 본 논문에서는 시스템 파라미터나 외란등에 강인한 성능을 보이는 VSC를 이용하여 회전자프레임상에서 전류제어기를 구성한다. 설계시 외란으로 간주한 회전자의 각속도성분을 일정 간격으로 나누고, 각각의 외란조건에서 자연의 진화원리를 모방한 진화전략(Evolution Strategy:ES)를 사용하여 VSC의 설계 파라미터들을 최적화한다. 전속도 영역에서의 VSC의 설계파라미터들을 구하기 위해서 앞의 VSC 파라미터들을 인공신경회로망으로 일반화시킨다. 기존의 일정 파라미터 VSC보다 본연구에서 제안된 방법이 전류오차 수렴특성과 채터링면에서 더 우수함을 시뮬레이션을 통해서 보인다.

2. BLDC 모터의 가변구조 전류제어기의 설계

2.1 BLDC 모터의 수학적 모델링

BLDC 모터의 고정자 3상에서의 전압방정식은 식

(1)과 같이 주어진다.

$$V_{abc} = r_s i_{abc} + p \lambda_{abc} \quad (1)$$

여기서,

$$(f_{abc}) = [f_a \ f_b \ f_c]$$

$$r_s = \text{diag} [r_s \ r_s \ r_s]$$

p : 미분연산자 $\frac{d}{dt}$

λ_{abc} : 고정자 쇄교자속

2차원 평면에 존재하는 n 개의 벡터들의 합은 2개의 기본 벡터 쌍으로 표현이 가능하며 서로 120° 씩 떨어져 있는 3상의 변수를 나타내는 벡터들은 서로 직각인 d 상과 q 상의 기본벡터들을 사용하여 나타낼 수 있다. 이런 변환방법을 기준좌표법이라 하며 변환된 dq 축이 고정자에 고정된 프레임, 회전자와 같이 움직이는 프레임 혹은 임의의 각도로 회전하는 프레임등 여러 가지가 있으며 각각의 변환방법은 여러 종류의 전동기 해석에 그 특징에 따라 다른 좌표변환법이 이용된다.

3상으로 표현된 변수를 회전자프레임으로의 변환하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

회전자프레임에서의 전압방정식은 다음과 같다.

$$V_d = (r_s + pL_d)i_d - \omega_r L_q i_q \quad (3)$$

$$V_q = \omega_r L_d i_d + (r_s + pL_q)i_q + \lambda_m \omega_r \quad (4)$$

여기서,

$$L_q = L_k + L_{mq}$$

$$L_d = L_k + L_{md}$$

회전자프레임에서의 전류에 대한 미분방정식은 아래와 같이 주어진다.

$$p \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_s}{L_d} & \frac{\omega_r L_q}{L_d} \\ -\frac{\omega_r L_d}{L_q} & -\frac{r_s}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_d}{L_d} \\ \frac{V_q}{L_q} - \frac{\lambda_m \omega_r}{L_q} \end{bmatrix} \quad (5)$$

또한 BLDC 모터의 토크 방정식은 다음과 같다.

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (6)$$

$$= \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) [\lambda_m i_{qs} + (L_d - L_q) i_{qs} i_{ds}]$$

$$= \left(\frac{2}{P}\right) \frac{d\omega_r}{dt} + B_m \left(\frac{2}{P}\right) \omega_r + T_L$$

여기서,

J : 회전자 관성

B_m : 마찰 계수

T_L : 부하 토크

여기서 d 축 전류를 0으로 제어한다면

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) \lambda_m i_{qs} \quad (7)$$

여기서 P 는 전동기의 극수

즉, 전동기의 토크는 q 상 전류에 의하여 직접 제어할 수 있음을 알 수 있다.

2.2 VSC 전류제어기 설계

앞에서 주어진 BLDC 모터의 전류미분방정식을 다시 정리하면 다음과 같이 적을 수 있다.

$$\frac{di_{ds}}{dt} = -\alpha_d i_{ds} + \frac{1}{L_d} (V_{ds} + D_d) \quad (8)$$

$$\frac{di_{qs}}{dt} = -\alpha_q i_{qs} + \frac{1}{L_q} (V_{qs} + D_q) \quad (9)$$

여기서, $\alpha_d = -\frac{r_s}{L_d}$, $\alpha_q = -\frac{r_s}{L_q}$

$$D_d = \omega_r L_q i_{qs} - L_d \Delta \alpha_d$$

$$D_q = -\omega_r L_d i_{ds} - \lambda_m \omega_r - L_q \Delta \alpha_q$$

D_d , D_q 는 disturbance로 간주하는 항목

$\Delta \alpha_d$, $\Delta \alpha_q$ 는 파라미터의 부정확도의 폭

지령전류와 현재 전류의 오차를 아래와 같이 정의하고

$$e_{ids} = i_{ds} - i_{ds}^*, \quad e_{iqs} = i_{qs} - i_{qs}^* \quad (10)$$

지령전류는 전류제어 주기동안 일정하다고 가정하면 아래의 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{de_{ids}}{dt} = \frac{di_{ds}}{dt}, \quad \frac{de_{iqs}}{dt} = \frac{di_{qs}}{dt} \quad (11)$$

위에서 구한 전류미분방정식을 전류오차식에 대입하여 계산하면

$$\frac{de_{ids}}{dt} = -\alpha_d e_{ids} + \frac{1}{L_d} (V_{ds} + E_d) \quad (12)$$

$$\frac{de_{iqs}}{dt} = -\alpha_q e_{iqs} + \frac{1}{L_q} (V_{qs} + E_q) \quad (13)$$

여기서,

$$E_d = D_d - L_d \alpha_d i_{ds}^*$$

$$E_q = D_q - L_q \alpha_q i_{qs}^*$$

위 식에서 E_d , E_q 성분은 외란으로 볼 수 있는 성분인데 입력쪽에 존재하기 때문에 제어구조를 적절히 선택함으로써 이 영향을 대폭 감소시킬 수 있다. 여기서는 전향적(feedforward)으로 보상하여 이 영향을 줄이고자 한다. 그러면 D_d , D_q 성분을 가변구조제어기에 의해 제어할 수 있다. 이와 같은 과정으로 가변구조 전류제어기를 설계한다.

dq축의 스위칭 평면을 아래와 같이 정의한다.

$$S_d = i_{ds} - i_{ds}^* \quad , \quad S_q = i_{qs} - i_{qs}^* \quad (14)$$

그러면 제어입력으로 dq축의 지령전압을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_{ds}^* = \begin{cases} L_d \alpha_d i_{ds}^* - \frac{S_d}{|S_d|} \bar{\rho}_d & \text{as } |e_{ids}| \neq 0 \\ L_d \alpha_d i_{ds}^* & \text{as } |e_{ids}| = 0 \end{cases} \quad (15)$$

$$V_{qs}^* = \begin{cases} L_q \alpha_q i_{qs}^* - \frac{S_q}{|S_q|} \bar{\rho}_q & \text{as } |e_{iqs}| \neq 0 \\ L_q \alpha_q i_{qs}^* & \text{as } |e_{iqs}| = 0 \end{cases} \quad (16)$$

여기서,

$$|D_d| \leq \bar{\rho}_d \quad , \quad |D_q| \leq \bar{\rho}_q \quad (17)$$

스위칭함수에 곱해지는 $\bar{\rho}_d$, $\bar{\rho}_q$ 는 외란의 경계인데, 일반적인 가변구조제어기와 달리 회전자의 속도와 관계된 커플링 성분을 외란으로 간주했기 때문에 그 폭은 회전자의 속도에 전적으로 지배된다.

또 여기서는 적분성분을 첨가하여 정상상태 오차를 줄이려고 한다. 하지만 과도상태에서는 적분성분이 시스템 응답속도에 악영향을 미치기 때문에 전류오차의 크기가 일정값 이내에서는 적분성분을 첨가시키고, 그 외에서는 적분성분을 0으로 하여 빠른 전류오차수렴특성과 정상상태오차를 제거하는 특성을 가지게 하였다.

적분성분을 첨가하여 스위칭 평면을 다시 정의하면,

$$S_d^* = i_{ds} - i_{ds}^* + K_{di} \int_0^t (i_{ds} - i_{ds}^*) dt \quad (18)$$

$$S_q^* = i_{qs} - i_{qs}^* + K_{qi} \int_0^t (i_{qs} - i_{qs}^*) dt \quad (19)$$

여기서,

K_{di} , K_{qi} 는 각각 d,q축 적분이득

최종적으로 가변구조제어기에 의한 dq축 지령전압을 다음식과 같이 구할 수 있다.

$$V_{ds}^* = \begin{cases} L_d \alpha_d i_{ds}^* - \frac{S_d^*}{|S_d^*|} \bar{\rho}_d & \text{as } |e_{ids}| \neq 0 \\ L_d \alpha_d i_{ds}^* & \text{as } |e_{ids}| = 0 \end{cases} \quad (20)$$

$$V_{qs}^* = \begin{cases} L_q \alpha_q i_{qs}^* - \frac{S_q^*}{|S_q^*|} \bar{\rho}_q & \text{as } |e_{iqs}| \neq 0 \\ L_q \alpha_q i_{qs}^* & \text{as } |e_{iqs}| = 0 \end{cases} \quad (21)$$

2.3 진화전략과 신경회로망

위에서 구한 가변구조제어기의 파라미터를 원하는 속도영역을 몇 개의 부분으로 나누어 각 구간에서 최적의 파라미터를 찾기위해 ES를 사용하고, 한 개의 개체를 다음과 같이 구성하였다.

$$k = a_k (\bar{\rho}_d, \bar{\rho}_q, \Phi, K_{di}, K_{qi})$$

여기서 파라미터는 위에서 구한 가변구조제어기의 파라미터와 같다.

본 연구에서 사용된 적합도 함수는 다음과 같다.

$$f = \frac{1}{1 + \eta \sum [d\text{축 전류오차}^2 + q\text{축 전류오차}^2]} \quad (22)$$

η : scaling factor

그리고, 선택과정은 엘리트즘(elitism)을 사용하여 적합도값이 가장 높은 개체를 살려 두었다.

각 속도영역에서 최적의 파라미터를 구하여 원하는 전 속도영역에서 차례로 적용시키면 각 소구간 속도영역을 벗어나는 구간에서 파라미터의 값이 연속적인 값이 아니므로 전류특성이 파라미터가 변하는 영역에서 크게 바뀌므로 이런 최적파라미터의 변화를 일반화기능이 뛰어난 신경회로망을 사용하여 interpolation함으로써 해결하였다.

그림 1은 전체시스템 블록선도를 나타낸다.

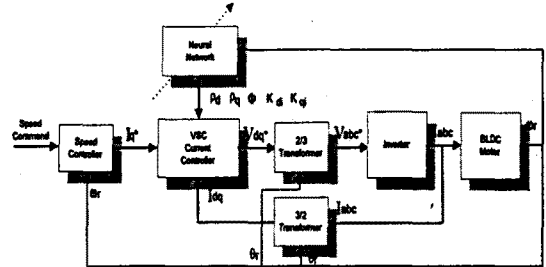


그림 1. 전체 제어시스템 블록선도

3. 시뮬레이션

시뮬레이션에 사용된 모터사양은 표 1과 같다.

표 1. BLDC 모터의 사양

정격 출력	200W
정격 속도	2000 rpm
극수	8
정격 전류	4.2 A
고정자 저항	0.95 Ω
고정자 인덕턴스	2.3 mH
회전자 관성	3.6 kg-cm ²
Emf 상수	0.11 V _{rms} -sec/rad

BLDC 모터의 속도명령을 100rpm단위로 나누어 그 구간에서 ES를 이용하여 최적의 파라미터를 구하였다. 그렇게 구한 파라미터를 인공신경회로망으로 interpolation하여 BLDC 모터에 인가되도록 하였다. 파라미터를 고정시킨 가변구조제어기는 지령속도를 1000rpm으로 고정하여 ES를 실행시켜 최적의 파라미터를 찾았다.

q축 전류명령이 다음과 같이 주어졌을때

$$i_{qs}^* = 0.3\sin\left(\frac{2\pi}{20000}t\right) + 0.3\sin\left(-\frac{5\pi}{2000}t\right) + 0.3\sin\left(\frac{9\pi}{8000}t\right) + 1.5 \quad (23)$$

그림 2, 3은 파라미터를 고정시켰을 때의 전류응답이고, 그림 4, 5는 파라미터를 변화시켰을 때의 전류응답이다. 모든 그림은 공통적으로 윗그림에서는 점선이 지령치이고, 실선이 실제전류를 나타내고, 아래그림은 그 오차를 나타낸다.

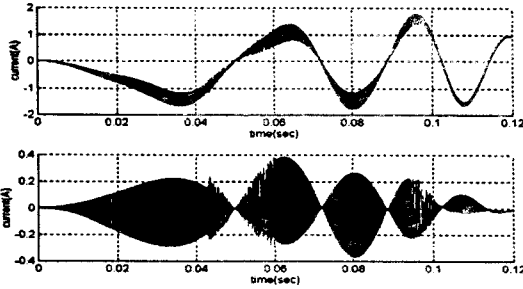


그림 2. i_{qs}^* 가변, 파라미터 고정일때의 A상 전류응답

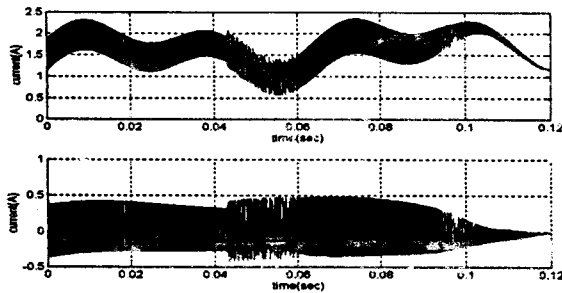


그림 3. i_{qs}^* 가변, 파라미터 고정일때의 q축 전류응답

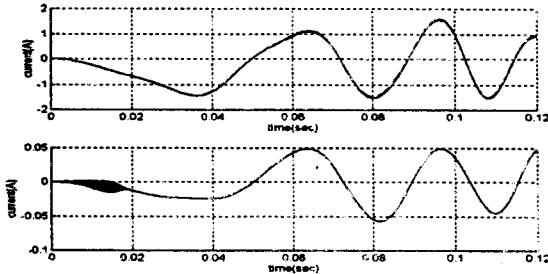


그림 4. i_{qs}^* 가변, 파라미터 가변일때의 A상 전류응답

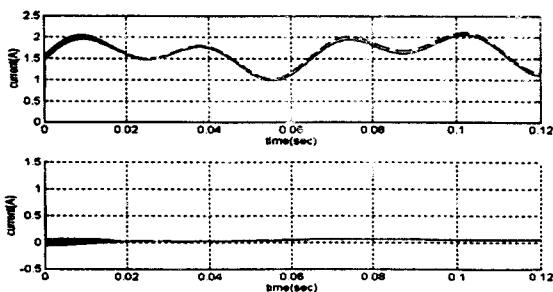


그림 5. i_{qs}^* 가변, 파라미터 가변일때의 q축 전류응답

4. 결 론

가변구조제어기를 사용하여 BLDC 모터의 전류제어기를 설계하고 제어기의 성능에 관계있는 파라미터를 튜닝하기 위하여 진화전략을 사용하였다. 전속도 영역에서 최적의 파라미터를 찾기위해서, 속도를 일정한 소구간으로 나누어 각각에서 최적의 파라미터를 찾고 전체 속도영역으로 일반화하기 위하여 인공신경회로망을 이용하여 interpolation하였다. 제안된 방법이 기존의 가변구조제어기에 비해서 전류오차 수렴특성과 채터링면에서 우수함을 시뮬레이션에서 보였다.

[참 고 문 헌]

- [1] D.M Brod, D.W. Novotny, "Current Control of VSI-PWM Inverters," *IEEE trans. on Ind. App.*, vol.IA-21, no.4, pp.562-570, 1985.
- [2] K-K. Shyu, H-J. Shieh, "Variable Structure Current Control for Induction Motor Drives by Space Voltage Vector PWM," *IEEE trans. on Ind. App.*, vol.42, no.6, pp.572-578, 1995.
- [3] H. Hashimoto, H. Yamamoto, S. Yanagisawa, F. Harashima, "Brushless Servo Motor Control Using Variable Structure Approach," *IEEE trans. on Ind. App.*, vol.24, no.1, pp.160-170, 1988.
- [4] T.M. Rowan, R.J. Kerkman, "A New Synchronous Current Regulator and an Analysis of Current-Regulated PWM Inverters," *IEEE trans. on Ind. App.*, vol.IA-22, no.4, pp.678-690, 1986.
- [5] L. Zhang, R. Norman, W. Shepherd, "Long-Range Predictive Control of Current Regulated PWM for Induction Motor Drives Using the Synchronous Reference Frame," *IEEE trans. on con. sys. tech.*, vol.5, no.1, pp.119-126, 1997.
- [6] Y.Dote, S. Kinoshita, *Brushless Servomotors*, Clarendon Press · Oxford, 1990.
- [7] J-J. E. Slotine, W. Li, *Applied Nonlinear Control*, Prentice-Hall, 1991.
- [8] P. C. Krause, *Analysis of Electric Machinery*, McGraw-Hill, 1986.
- [9] Z. Michalewicz, *Genetic Algorithms+Data Structures=Evolution Programs*, Springer-Verlag, 1995.
- [10] C-T. Lin, C.S. George Lee, *Neural Fuzzy Systems*, Prentice-Hall, 1996.