

# 진화전략과 입력제약조건에 의한 시변스위칭면의 가변구조제어기 설계

論 文  
48A-4-8

## Variable Structure Controller with Time-Varying Switching Surface under the Bound of Input using Evolution Strategy

李敏中\* · 金賢植\*\* · 崔榮奎\*\*\* · 田成緝§

(Min-Jung Lee · Hyun-Sik Kim · Young-Kiu Choi · Seong-Jeub Jeon)

**Abstract** - Variable structure control law is well known to be a robust control algorithm and evolution strategy is used as an effective search algorithm in optimization problems. In this paper, we propose a variable structure controller with time-varying switching surface. We calculate the maximum value of switching surface gradient under the bound of input. To enhance the robustness, we choose a time-varying switching surface gradient that is of the 3rd order polynomial form. Evolution strategy is used to optimize the parameters of the switching surface gradient. Finally, the proposed method is applied to position tracking control for BLDC motor. Experimental results show that the proposed method is more useful than the conventional variable structure controller.

**Key Words** : Variable Structure Control, Robust Control, Evolution Strategy

### 1. 서 론

일반적으로 시스템의 제어기 설계에 있어서 중요한 목표는 시스템 파라미터의 변동이나 외란에 강인한 제어를 구성하는 일이다. 그러나 각종 산업기에서 제어요소로 널리 사용되는 제어시스템은 대부분 PID 제어방식을 채택하고 있으므로 외란이 인가되거나 부하특성이 비선형적으로 변화할 때에는 적절한 이득과 성능을 얻기 어렵다. 이와같은 문제를 해결할 수 있는 비선형 제어방법중의 하나가 가변구조제어(variable structure control : VSC)방법이다[1-3].

VSC 이론은 상태 공간상에 임의의 스위칭면(switching surface)을 설정하고 시스템 상태벡터가 설정된 스위칭면으로 향하도록 불연속적인 제어입력을 가함으로써 시스템 상태벡터가 스위칭면을 따라 원점으로 수렴하게 하는 특징을 갖는다.

그런데 일반적으로 VSC 이론은 다음의 문제점을 가진다. 첫 번째는 스위칭 함수값의 부호변화에 따른 불연속적인 제어입력으로 인하여 떨림현상(chattering)이 발생하여 고조파성분의 동특성을 유기한다. 그래서 이러한 문제점을 해결하기 위해서 경계면내에서 선형적인 제어입력을 갖는 포화함

수(saturation function)를 사용하면 떨림현상을 감소시킬수 있다[4]. 그러나 경계면 내에서는 강인성을 상실하게 된다. 최근에는 Gao등이 불연속적인 부호함수형태에 포화함수와 비슷한 특성을 가지는 스위칭 함수가 첨가된 형태를 가지는 제어입력형태를 제안하였다[5]. 두 번째는 도달 모드에서 시스템 파라미터의 변동이나 부하 변동, 외란 등에 대해서 강인성을 보장할 수 없다. 그래서 최근에는 시스템 상태벡터가 초기시점부터 스위칭면에 존재하게 되는 시변 스위칭면을 가지는 시변 가변구조제어기에 대하여 많은 연구가 진행되었다[6,7]. 세 번째는 가변구조제어기를 설계할 때 중요한 파라미터인 스위칭면 기울기 값을 구하는 방법이 명확하지 않다. 기존의 방법에서는 시행착오(trials-and-errors)에 의한 방법으로 스위칭면 기울기를 설정하거나, 최근에 J. H. Lee와 A. Bartoszewich등에 의한 최적제어이론의 적용에 의한 방법으로 스위칭면 기울기를 결정하였다[6,7]. 시행착오법의 경우에는 스위칭면 기울기를 구하는데 비효율적인 특성이 있고, 최적제어법의 경우에는 계산이 복잡하다. 또한 산업현장에서 사용하는 플랜트마다 서로 다른 입력 제약조건이 존재하므로 입력 제약 조건을 고려하여 스위칭면 기울기를 설정해야 하는 문제가 있다.

본 논문에서는 가변구조제어기를 설계하기 위해서 세 가지 단계로 나누어서 해결한다. 첫 번째 단계로 스위칭면 기울기를 구하는 데 있어서 제어기 설계자가 알고 있는 시스템의 공칭값을 이용하여 제어입력의 제약조건을 위배하지 않는 범위내에서 스위칭면 기울기의 최대값을 구한다. 그리고 두 번째 단계는 도달모드에서 강인성을 높이기 위해 시변 스위칭면의 가변구조제어기를 설계한다. 여기서 시변 스위칭면 기울기는 3차 다항식을 사용하여 정의한다. 마지막으로 세 번째 단계는 3차 다항식의 시변 스위칭면 기울기 파라미터들과 도달모드의 스위칭 이득을 전역적 탐색능력이

\* 正 會 員 : 釜山大 工大 電氣工學科 博士課程

\*\* 正 會 員 : 國防科學研究所 研究員

\*\*\* 正 會 員 : 釜山大 工大 電氣工學科 教授

§ 正 會 員 : 釜慶大 工大 電子工學科 教授

接受日字 : 1998年 7月 30日

最終完了 : 1999年 2月 24日

우수하고, 자연의 적자생존의 원리와 생물의 진화과정을 모방한 진화 전략(evolution strategy)을 사용하여 구한다.

## 2. 스위칭면 최대기울기

가변구조제어기는 상태벡터가 스위칭면 위에 존재할 때 상태벡터는 지수함수적으로 안정점(equilibrium point)으로 감소한다. 여기서 시스템의 응답속도는 스위칭면 기울기 값에 의해서 결정되는데, 스위칭면 기울기가 작은 값을 가지게 되면 시스템의 응답속도는 감소하게 되고, 반대로 큰 값을 가지면 시스템의 응답속도는 빠르게 된다. 하지만 스위칭면 기울기가 매우 큰 값을 가지게 되면 시스템의 관성과 비선형성등에 의해서 제어입력을 인가하였을 때 빠른 동특성을 얻을 수 없기 때문에 상태벡터가 스위칭면위에 존재할 수 없게 된다. 그러므로 시스템의 제어입력등을 고려하여 항상 상태벡터가 스위칭면위에 존재하기 위한 스위칭면 최대기울기를 구하여야 한다.

실제 시스템에서 존재하는 제어입력의 제약조건 ( $|u| \leq U_{max}$ )을 고려하여 스위칭면의 최대기울기를 구하기 위해서 다음과 같은 2차 시스템을 고려한다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (1)$$

$$\text{단, } A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a_1 & a_2 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ b \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

최대 기울기를 갖는 스위칭함수  $s$  를 다음과 같이 정의한다.

$$s = Cx \quad (2)$$

$$\text{단, } C = [c_{max} \ 1]$$

여기서 시스템이 슬라이딩 모드동작을 할 때의 고유입력을 구하기 위하여 식 (2)를 미분하여 0으로 두면 등가 제어입력을 구할 수 있다.

$$u_{eq} = - (CB)^{-1} CAx \quad (3)$$

위에서  $CB$ 는 nonsingular이고 따라서  $(CB)^{-1}$ 가 존재한다. 그리고 시스템 전체 제어입력은 슬라이딩 모드 존재 조건  $ss' < 0$  을 만족하면서 시스템이 슬라이딩 모드동작을 할 때에는 도달법칙 값이 0 이 되도록 다음과 같이 선택하였다.

$$u = u_{eq} - ks \quad (4)$$

단,  $k$ 는 스위칭 이득이고,  $b$  와 같은 부호를 갖는다.

식 (4)에서 도달법칙에 의해서 상태벡터가 스위칭면 위에 존재하는 슬라이딩 모드 동작시 도달법칙은 0 이 되어 영향

을 주지않고, 상태벡터가 스위칭면위에 놓여 있기 위한 등가 제어입력  $u_{eq}$  만이 영향을 주게된다. 그러므로 제어입력의 제약조건은  $|u_{eq}| \leq U_{max}$  로 바꾸어 쓸 수 있고, 스위칭면 위에서  $s = 0$  이므로 식 (2)로부터  $x_2 = -c_{max}x_1$  이 된다. 따라서

$$|u_{eq}| = |[-a_1 + (c_{max} + a_2)c_{max}] \frac{x_1}{b}| \leq U_{max} \quad (5)$$

식 (5)의 해를 구하면 최대 스위칭면 기울기를 구할 수 있지만 2개의 변수  $c_{max}$  와  $x_1$ 이 있으므로  $c_{max}$  를 바로 구하기 어렵다. 그러므로  $x_1$ 의 최대값을 구할 수 있다면 이 값을 이용하여 최대 스위칭면 기울기를 구할 수 있게 된다.

시스템이 이상적인 슬라이딩 모드동작을 할 때 제어입력에서 도달법칙의 값은 0이 된다. 그러나 도달모드에서는  $s \neq 0$  이므로 스위칭 함수를 미분하고 식 (4)를 대입하면 다음과 같다.

$$\dot{s} = -(CB)ks \quad (6)$$

$$\text{여기서 } CB = [c_{max} \ 1] \begin{bmatrix} 0 \\ b \end{bmatrix} = b \text{ 이다.}$$

식 (6)에서 도달모드에서 스위칭 함수값을 구하여 식 (2)에 대입하면 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$s = \dot{x} + c_{max}x = s_0 e^{-bk(t-t_0)} \quad (7)$$

식 (7)를 1계 선형 미분 방정식의 해법에 적용하여 풀면 도달모드에서의  $x_1$ 값을 구하면 다음과 같다.

$$x_1 = \frac{s_0}{c_{max} - bk} [e^{-bk(t-t_0)} - e^{-c_{max}(t-t_0)}] + x_{10} e^{-c_{max}(t-t_0)} \quad (8)$$

단,  $s_0$  : 스위칭 함수  $s$ 의 초기 값

$x_{10}$  :  $t_0$ 에서  $x_1$ 의 값

식 (8)을 미분하면  $x_1$ 이 스위칭 평면으로 향하는 단조함수임을 알 수 있으므로  $x_1$ 의 초기값의 절대치를 최대값으로 사용할 수 있다. 그러므로 식 (8)에서 변수  $x_1$ 을 최대값  $x_{1max}$ 으로 바꾸면 식 (5)는 다음과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$|-a_1 + (c_{max} + a_2)c_{max}| \leq \frac{U_{max} |b|}{|x_{1max}|} \quad (9)$$

식 (9)에서  $c_{max}$ 에 대한 2차 곡선과 직선의 교차점을 찾으면  $c_{max}$ 의 값을 구할 수 있다.  $c_{max}$ 의 값을 구하면

$$c_{max} = \frac{-a_2 \pm \sqrt{a_2^2 + 4 \left( a_1 + \frac{|b| U_{max}}{|x_{1max}|} \right)}}{2} \quad (10)$$

식 (10)에서  $c_{max}$ 에 대한 2개의 값을 구할 수 있고 여기서  $c_{max} > 0$ 인 최대기울기의 값을 구할 수 있다. 본 논문에서는 식 (10)으로부터 얻은  $c_{max}$ 의 값을 시변 스위칭면을 가지는 가변구조제어기의 최대 스위칭면 기울기로 사용하였다.

### 3. 시변 스위칭면을 갖는 가변구조제어기

가변구조제어기의 특징은 상태벡터가 스위칭면위에 있을 때 강인한 특성을 보이는 것이다. 하지만 상태벡터가 스위칭면에 도달하기 전에는 강인성이 보장되지 않는다. 그러므로 상태벡터의 초기치부터 스위칭면위에 존재하기 위해서 시변 스위칭면을 갖는 가변구조제어기를 사용한다.

본 논문에서는 식 (10)에서 계산된 최대 스위칭면 기울기를 최대 경계치로 사용하여, 상태벡터의 초기치에서부터 최대 경계치까지 스위칭면이 원점을 기준으로 회전하는 시변 스위칭면의 가변구조제어기를 설계하기 위해서 시변 스위칭면을 다음과 같이 정의하였다.

$$s = x_2 + c(t)x_1 \quad (11)$$

식 (11)의 양변을 미분하여 등가 제어입력을 구하면

$$u_{eq} = -\frac{1}{b} [(a_1 + \dot{c}(t))x_1 + (a_2 + c(t))x_2] \quad (12)$$

그러나 식 (12)은 시변 스위칭면 기울기  $c(t)$ 의 값이 초기치에서 최대치인  $c_{max}$ 의 값이 될 때까지의 등가 제어입력이고 시변 스위칭면 기울기  $c(t)$ 의 값이  $c_{max}$ 와 같게 되면 등가 제어입력은 다음과 같이 된다.

$$u_{eq} = -\frac{1}{b} [a_1 x_1 + (c_{max} + a_2)x_2] \quad (13)$$

시변 스위칭면을 가지는 가변구조제어기의 전체 제어입력은 식 (4)와 같다. 그리고, 여기서 시변 스위칭면 기울기는 다음의 3차 함수를 사용하였다.

$$c(t) = \sum_{i=0}^3 a_i t^i \quad (14)$$

윗식에서  $a_0$ 는 초기기울기이며 위치제어의 경우 정지상

태로부터 출발하면  $a_0$ 는 0이 된다. 그리고 가변구조제어기의 설계과정에서 얻어진 식 (4)와 (14)의 제어기의 이득과 시변 스위칭면 기울기의 파라미터들은 최적해 탐색능력을 가지는 진화전략을 사용하여 획득하였다.

### 4. 진화 전략의 설계

진화 전략은 최적화 문제에서 효과적인 탐색방법으로 사용된다. 진화전략은 자연의 적자생존의 원리와 생물의 진화 과정을 모방하였으며, 목적함수의 연속성이나 미분가능성 등이 불필요하고, 가우시안 랜덤변수에 의한 돌연변이를 기본 연산자로 사용하고 있다. 그리고 전역적 탐색능력과 국부 탐색능력을 동시에 가지고 있다[8].

본 논문에서는 상태벡터의 초기치에서 스위칭면 최대기울기까지 스위칭함수가 제어입력에 따른 상태벡터의 변화에 따라 시간적으로 변화할 수 있도록 식 (14)의 설계 파라미터들과 식 (4)의 스위칭 계인을 적절하게 설정하기 위해서 진화전략을 사용한다. 그리고 본 논문에서 사용한 돌연변이 연산은 다음과 같다.

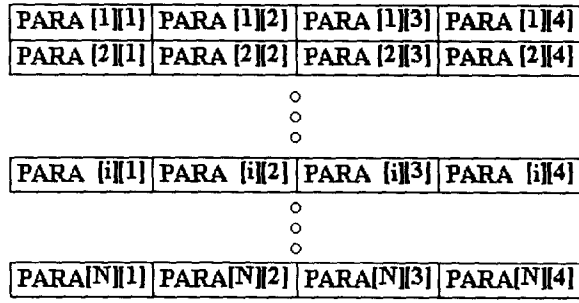
$$[a_1, a_2, a_3, k]_{parent} = [a_1, a_2, a_3, k]_{offspring} + N[0, \sigma] \quad (15)$$

여기서  $\sigma$ 는 돌연변이 연산을 적용하기 위한 표준편차를 나타낸다. 적합도(fitness) 함수의 값은 시스템 오차와 스위칭 함수값 그리고 스위칭 함수의 변화분이 반영되었다. 적합도 함수에 시스템오차가 들어간 것은 제어오차를 줄이기 위한 것이고, 스위칭함수가 들어간 것은 채터링을 최소화하기 위한 것이며, 스위칭함수의 변화분이 들어간 것은 스위칭 평면으로부터 이탈하는 것을 막기 위한 것이다.

$$fit = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^m [(e_i(k))^2 + (s_i(k))^2 + (\dot{s}_i(k))^2]} \quad (16)$$

식 (16)에서  $e_i(k)$ 는  $i$  번째 문자열의  $k$  스텝시간에서의 추종오차이고,  $s_i(k)$ 와  $\dot{s}_i(k)$ 는  $i$  번째 문자열의  $k$  스텝시간 스위칭함수와 변화율이다. 그리고  $m$ 은 총 샘플링 갯수이다. 그리고 시변 스위칭면을 갖는 가변구조제어기 설계과정에서 필요한 시변 스위칭면 기울기의 파라미터들과 제어입력의 이득들을 진화전략으로 구하기 위해서 그림 1과 같이 문자열 구조를 선택하였다.

진화전략 알고리즘을 그림 2에서 보는 것과 같이 구현하였다. 첫 번째로 문자열로 초기화한다. 다음으로 가우시안 랜덤변수를 이용한 돌연변이연산을 실행하고 나서 각 문자열집단(population)에 대한 적합도의 함수값을 구하고 최대 적합도 함수의 값을 구하게 된다. 그리고 앞에서 구한 최대 적합도 함수의 값이 종료조건을 만족하면 알고리즘을 종료하게 되지만 그렇지 않으면 각각의 세대에서 최대 적합도 함수의 값을 갖는 문자열을 다음 세대로 생존시켜서 돌연변이 연산과정부터 다시 시작한다.



PARA[i][1] =  $\alpha_1$ , PARA[i][2] =  $\alpha_2$ , PARA[i][3] =  $\alpha_3$ ,

PARA[i][4] =  $k$

그림 1 문자열의 구조  
Fig. 1 Structure of string

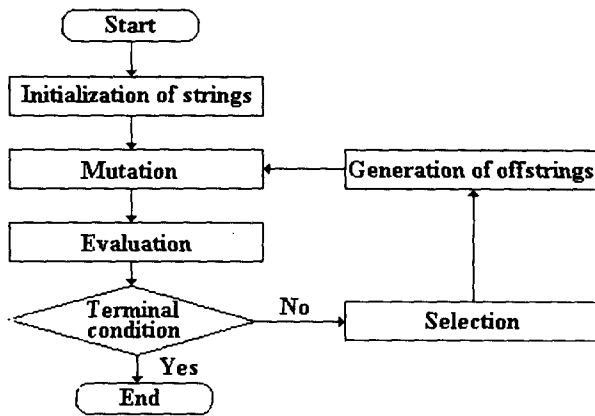


그림 2 진화 전략의 흐름도  
Fig. 2 Flowchart of the Evolution Strategy

본 논문에서 사용한 전체 제어시스템의 블록선도는 그림 3과 같다. 한 개의 VSC 파라미터벡터가 설정되면 실험을 하여 그 파라미터벡터에 대한 적합도를 구한뒤에 진화전략에 의해 새로운 파라미터벡터를 구해나가는 방식의 반복학습형태를 취하고 있다.

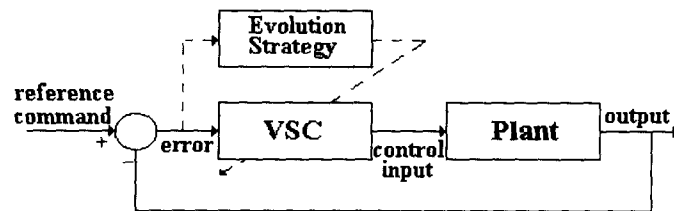


그림 3 제안한 제어시스템의 블록선도  
Fig. 3 Block diagram of the proposed control system

### 5. BLDC 모터의 수학적 모델 및 실험 장치

BLDC(brushless direct current)모터는 높은 효율과 컴퓨터제어의 용이함 그리고 보수 유지의 불필요함 등으로 인해 운동제어용 액추에이터로 많이 사용된다. 3상 2극 BLDC모터의 등가 회로는 3상 2극 동기모터의 등가회로와 같고 회전자는 영구자석으로 만들어져 있으며 전압방정식은 식(17)과 같다.

$$V_{abc} = r_s i_{abc} + \frac{d\lambda_{abc}}{dt} \quad (17)$$

$$\lambda_{abc} = L_{abc} i_{abc} + \lambda_m \quad (18)$$

식 (17), (18)에서  $r_s$ 는 각 상의 저항이고,  $\lambda_{abc}$ 는 고정자 각 상의 코일에 유기되는 자속이다. 그리고  $\lambda_m$ 와  $L_{abc}$ 은 각각 회전자의 영구 자석에 의해 고정자측에 유기 되는 쇄교 자속과 각 상의 인덕턴스이다. 그리고 회전자의 영구자석에 의해 고정자측에 유기되는 전압이 정현적이라고 가정하고, 식 (17)을 회전자 기준축에 의한 d-q변환을 통해 나타내면 다음과 같다.

$$V_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{dL_q}{dt} i_{qs} + \omega_r L_d i_{ds} + \omega_r \lambda_m \quad (19)$$

$$V_{ds} = r_s i_{ds} + \frac{dL_d}{dt} i_{ds} - \omega_r L_q i_{qs} \quad (20)$$

$L_q$ 와  $L_d$ 는 d-q축으로 변환을 했을 때의 인덕턴스이다. 그리고 전동기에서 발생하는 토오크는 다음과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} \left( \frac{p}{2} \right) (\lambda_m i_{qs} + (L_d - L_q) i_{qs} i_{ds}) \quad (21)$$

단, p는 극수

식 (17) - (21)에서 BLDC모터는 회전자의 속도에 따라 인덕턴스와 쇄교자속이 변화하는 비선형모델이다. 그래서 과도특성이 우수한 벡터제어 방식을 도입하면 BLDC모터는 식 (22)과 같이 발생 토오크를 간단하게 나타낼 수 있다.

$$T_e = \frac{3}{2} \left( \frac{p}{2} \right) \lambda_m i_{qs} = k_t i_{qs} \quad (22)$$

$$\text{단, } k_t = \frac{3}{2} \frac{p}{2} \lambda_m$$

식 (22)식에서 전류  $i_{qs}$ 의 제어로 BLDC 모터의 발생 토오크를 제어할 수 있다. 그리고 BLDC 모터에서 일반적으로 전기 시정수가 기계 시정수보다 무척 작으므로 그의 동적방정식을 다음과 같이 간단히 근사시킬 수 있다.

$$J\dot{\omega} + B\omega + T_1 = T_e \quad (23)$$

여기서  $T_1$ 은 부하토크이며,  $J$ 와  $B$ 는 전동기의 관성계수이고 마찰계수이다. 그리고  $\omega$ 는 속도를 나타낸다. 진화전략과 VSC가 결합된 제어를 설계하기 위해서 시스템 상태 벡터를 다음과 같이 정의하였다.

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_{ref} - \theta \\ -\omega \end{bmatrix} \quad (24)$$

여기서  $\theta_{ref}$ 는  $\theta$ 의 지령치이다.

식 (24)을 사용하여 식 (23)을 상태방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{J} \end{bmatrix} T_e + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J} \end{bmatrix} T_1 \quad (25)$$

식 (25)은 식 (1)과 거의 유사한 형태이다. 식 (21)을 사용하여 본 논문에서 제안하는 방법으로 시변 스위칭면의 가변구조제어를 설계하였다. BLDC 모터의 사양은 표1과 같다.

표 1 BLDC 모터의 사양

Table 1 Specifications of BLDC motor

	BLDC 모터
모터 질량 (kg)	0.5
정격 토크 (N·m)	0.519
관성 모멘트 (kg·m <sup>2</sup> )	0.0026
롤론 마찰력 (N·m)	0.036
정격 회전수 (rpm)	3000

본 실험을 위해 사용된 전체 시스템 구성은 그림 4와 같다. 시변 스위칭면을 가지는 가변구조제어기와, 시변 스위칭면 기술기 파라미터들 및 제어입력의 이득의 최적해를 구하는 진화전략이 결합된 제어를 IBM-PC에서 C언어로 구현하여 입력신호를 만들어 낸다. 그리고 BLDC 모터의 RDC(resolver to digital converter)에서 나오는 위치신호를 데이터 획득보드를 사용하여 얻었다.

### 6. 실험 및 고찰

본 논문에서 제안된 시변 스위칭면을 갖는 가변구조제어기를 BLDC 모터에 적용하기 위해서, 식 (10)과 (23) 및 표1을 이용하여 스위칭면 최대기술기를 구하면  $c_{max} = 13.846$ 이다. 시변 스위칭면 기술기의 파라미터들과 제어기의 스위칭 이득을 식 (15)과 같이 진화전략의 문자열로 구성하였다. 그리고 BLDC 모터의 위치 지령은 4.7[radian]인 스텝입력을

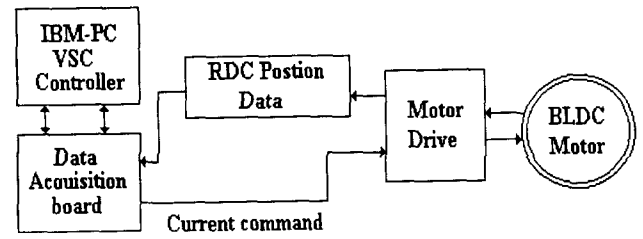


그림 4 시스템 구성도

Fig. 4 Schematic diagram of the system

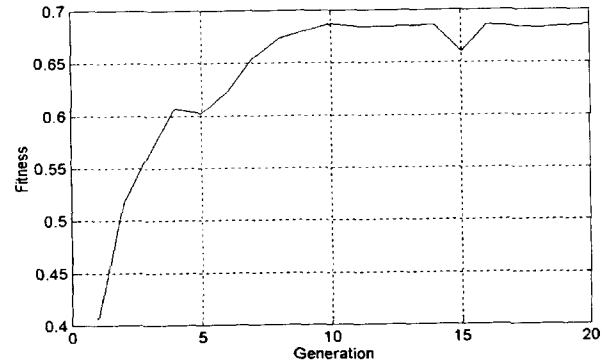


그림 5 최대 적합도의 추이 (1~20 세대)

Fig. 5 Trend of the best fitness

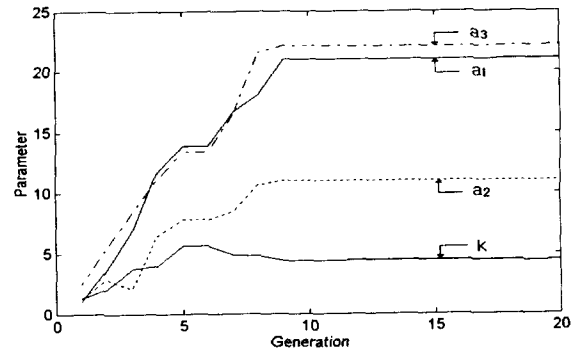


그림 6 제어기의 파라미터의 추이(1~20 세대)

Fig. 6 Trends of controller parameters

로 주어졌고, 샘플링 간격은 1[msec]이며 1초동안의 실험을 행하였다.

그림 5와 그림 6은 각각 진화전략을 이용하여 구한 파라미터들의 1~20세대의 적합도 추이와 제어기 파라미터들의 추이를 나타낸다. 그림 6에서 제어기의 파라미터들이 수렴하는 특성을 볼 수 있다.

그리고 그림 7과 그림 8은 가변구조제어기의 출력 응답곡선과 토크곡선을 나타낸다. 그림 8에서 알 수 있듯이 고정된 스위칭면을 갖는 가변구조제어기에서 초기에 상태벡터가 스위칭면에 빠르게 도달하기 위해 큰 값의 제어입력을 가지므로 그림 7과 같이 고정된 스위칭면을 갖는 가변구조제어

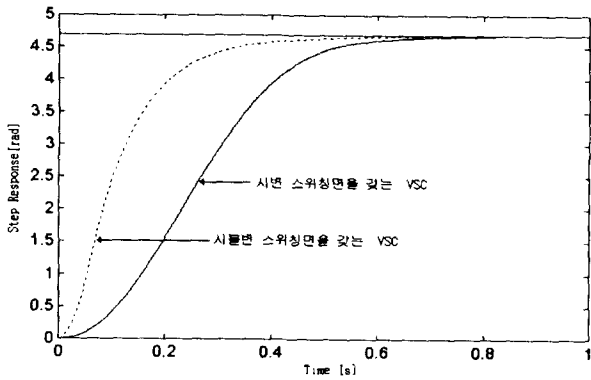


그림 7 스텝응답  
Fig. 7 Step responses

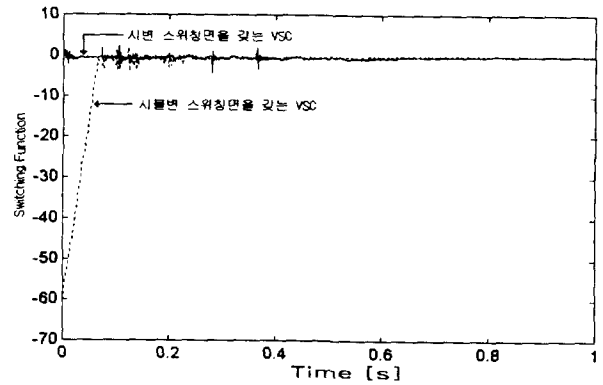


그림 9 스위칭 함수의 값  
Fig. 9 The values of switching functions

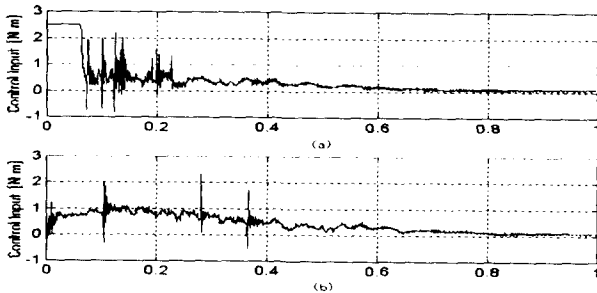


그림 8 제어 입력  
(a) 시불변 스위칭면을 갖는 VSC 입력  
(b) 시변 스위칭면을 갖는 VSC 입력

Fig. 8 Control inputs  
(a) Input of VSC with time-invariant switching surface  
(b) Input of VSC with time-varying switching surface

기가 제안된 제어기 비해 빠른 응답속도를 갖는다. 그림 9에서 빠른 상승시간을 갖는 고정된 스위칭면을 갖는 가변구조제어기의 경우에는 초기에 스위칭 함수값이 매우 크나 시변 스위칭면을 갖는 가변구조제어기의 경우에는 스위칭 함수 값이 거의 0에 머무름을 알 수 있다. 그래서 그림 9의 결과에서 시변 스위칭면을 갖는 가변구조제어기의 경우가 스위칭 함수값이 작으므로 상태벡터가 스위칭면에 주로 머물게 되어 강인성이 증대됨을 예상할 수 있다. 그림 10와 그림 11은 0.01초와 0.1초사이에 외란(0.2595 [N·m])을 주었을때의 고정된 스위칭면을 갖는 가변구조제어기와 시변 스위칭면을 갖는 가변구조제어기의 응답곡선을 나타낸다. 고정된 스위칭면을 갖는 가변구조제어기의 경우 그림 10과 같이 외란에 대해 응답곡선이 민감한 반응을 보인 반면에 시변 스위칭면을 갖는 가변구조제어기의 경우는 그림 11과 같이 외란에 대해서 강인한 특성을 보이고 있다.

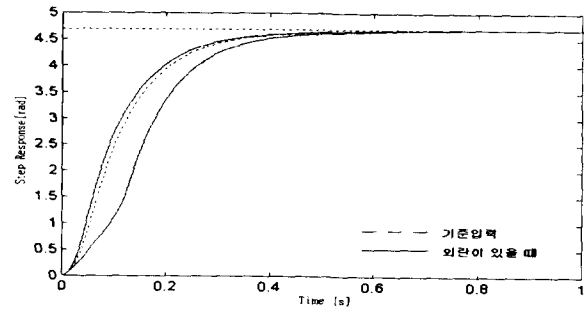


그림 10 외란이 있을 때 시불변 가변구조제어기 스텝 응답  
Fig. 10 Step response of time-invariant variable structure controller under disturbance

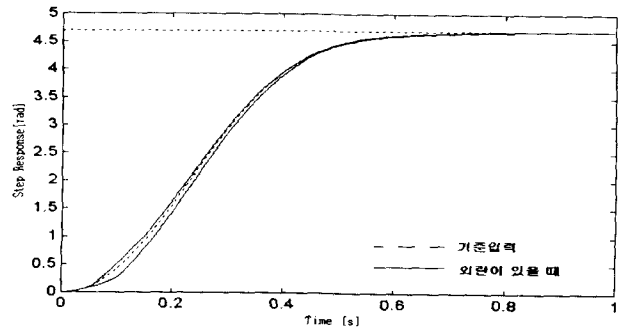


그림 11 외란이 있을 때 시변 가변구조제어기 스텝응답  
Fig. 11 Step response of time-varying variable structure controller under disturbance

그리고, 본 논문에서 제안된 제어기를 궤적제어에 적용하기 위하여 지령치를  $x_d(t) = 3.14 \sin(5t)$ 으로 설정하였을 때, 그림 12과 그림 13은 고정된 스위칭면을 갖는 가변구조제어기와 시변스위칭면을 갖는 가변구조제어기의 궤적곡선을 나타낸다. 그림 14는 시변 스위칭면을 갖는 가변구조제어기의 스위칭함수 값이 고정된 스위칭면을 갖는 가변구조제어기보다 작은 값을 나타내어 강인성이 증대됨을 예상

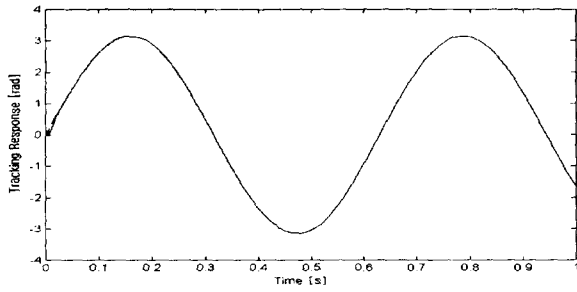


그림 12 고정된 스위칭면을 갖는 가변구조제어기의 궤적응답  
 Fig. 12 Tracking response of time-invariant variable structure controller

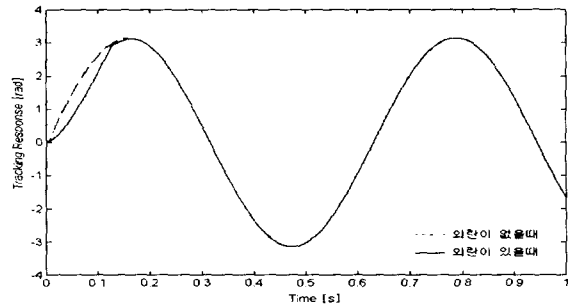


그림 15 외란이 있을 때 시불변 가변구조제어기의 궤적응답  
 Fig. 15 Tracking response of time-invariant variable structure controller under disturbance

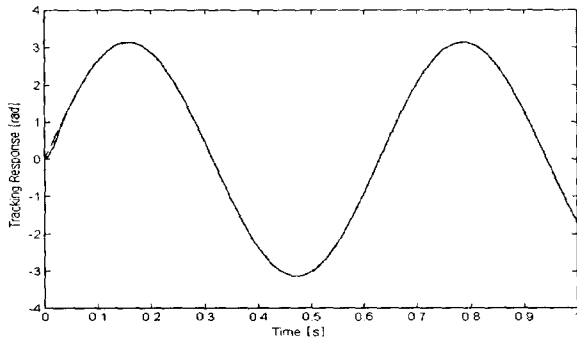


그림 13 시변스위칭면을 갖는 가변구조제어기의 궤적응답  
 Fig. 13 Tracking response of time-varying variable structure controller

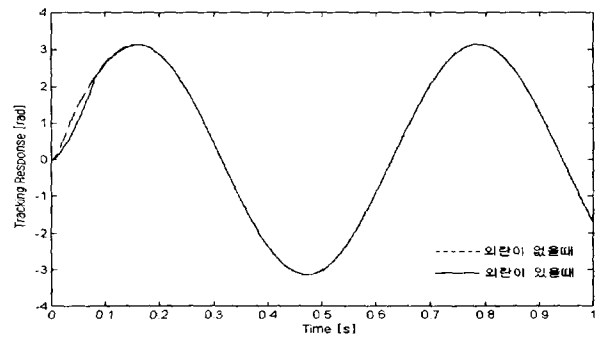


그림 16 외란이 있을 때 시변 가변구조제어기의 궤적응답  
 Fig. 16 Tracking response of time-varying variable structure controller under disturbance

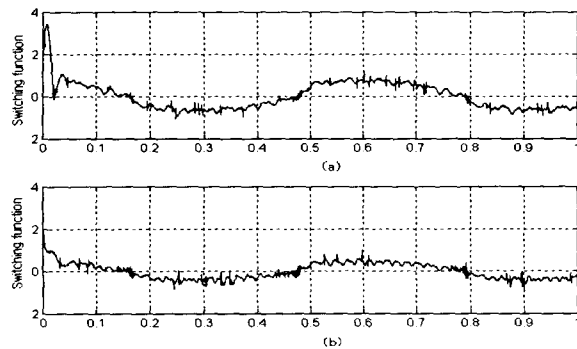


그림 14 스위칭 함수의 값  
 (a) 시불변 스위칭면을 갖는 VSC  
 (b) 시변 스위칭면을 갖는 VSC  
 Fig. 14 The value of switching functions  
 (a) VSC with time-invariant switching surface  
 (b) VSC with time-varying switching surface

할 수 있다. 그림 15와 그림 16은 앞과 동일한 외란을 인가하였을 때의 고정된 스위칭면의 가변구조제어기와 시변 스위칭면의 가변구조 제어기의 궤적 곡선이다

실험 결과에서 알 수 있는 것과 같이 고정된 스위칭면의 가변구조제어기보다 시변 스위칭면의 가변구조제어기가 외란에 대해서 강한 특성을 보이고 있다.

## 7. 결 론

본 논문에서는 등가 제어방법을 적용하여 입력 제약조건에 위배되지 않는 범위내에서 스위칭면 기울기의 최대값을 수학적으로 구하였다. 그리고 도달 모드에서 강인성을 증대시키기 위해서 스위칭면 기울기가 상태벡터의 초기치에서 최대 경계치까지 시간에 따라 변화하는 회전형 시변 스위칭면의 가변구조제어를 설계하였다. 여기서 최대경계치는 수학적으로 계산된 최대기울기를 사용하였으며, 이때 시변 스위칭면은 3차 다항식으로 표현하였다. 시변 스위칭면 기울기 함수의 파라미터들과 도달법칙의 스위칭 이득을 최적화하기 위해 진화알고리즘을 사용하였다.

그리고 본 연구에서 제안된 시변 스위칭면의 가변구조제어기를 사용하여 BLDC모터 실험을 통해 시불변 스위칭면의 가변구조제어기의 성능과 비교하였다. 실험을 통하여 본 연구에서 제안된 제어기가 시불변 스위칭면의 가변구조제어기보다 강인성이 증대되는 것을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] Jean-Jacques E. Slotine and Weiping Li, *Applied Nonlinear Control*, Prentice-Hall International Inc. 1991.

[2] U. Itkis, *Control System of Variable Structures*, New York : Wiley 1976.

[3] V. I. Utkin, "Variable Structure Systems with Sliding Modes," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. AC-22, no. 2, pp. 212-221, 1977.

[4] John Y. Hung, Weibing Gao, and James C. Hung, "Variable Structure Control : A Survey," *IEEE Trans. on Ind. Electro.*, vol. 40, no. 4, pp. 2-22, 1993.

[5] Weibing Gao and James C. Hung, "Variable Structure Control of Nonlinear Systems : A New Approach," *IEEE Trans. on Ind. Electro.*, vol. 40, no. 1, pp. 45-55, 1993.

[6] J. H. Lee, S. K. Chung, G. W. Moon, I. S. Kim, M. J. Yoon, and T. Y. Ahn, "Design of a Variable Structure Controller Using an Integral-Augmented Sliding Surface for Position Control of BLDDSM with Prescribed Output Dynamics," *Journal of KIEE*, vol. 8, no. 1, pp. 16-26, 1995.

[7] A. Bartoszewich, "Time-varying Sliding Modes for Second-order Systems," *IEE Pro. Control Theory Appl.*, vol. 143, no. 5, pp. 455-462, 1996.

[8] Zbigniew Micalewicz, *Genetic Algorithms + Data Structure = Evolution Programs*, Springer-Verlag, 1994.



김 현 식(金賢植)

1972년 2월 7일생. 1994년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 현재 국방과학기술연구소 연구원.

Tel : (0553) 540-6135

E-mail : hskimm@sunam.kreonet.re.kr



최 영 규(崔榮奎)

1957년 6월 18일생. 1980년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1982년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박). 1990~1991년 CALTECH Visting

Scholar. 현재 부산대 공대 전기공학과 교수

Tel : (051) 510-1445

E-mail : ykichoi@hanmail.net



전 성 줌(田成緝)

1957년 8월 28일생. 1980년 숭전대학교 전기공학과 졸업. 1982년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1982년~85년 한국과학기술원 연구원 근무. 1985년~86년 한국전기연구소 근무. 1986년~

현재 부경대학교 전자공학과 부교수

Tel : (051) 620-1509

E-mail : jeub@pine.pknu.ac.kr

저 자 소 개



이 민 중(李敏中)

1970년 10월 14일생. 1996년 부경대 전기공학과 졸업. 1998년 부산대 일반대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998~현재 동대학원 전기공학과 박사과정

Tel : (051) 510-1445

E-mail : mnjlee@hanmail.net