

## Evolution Strategy를 이용한 가변구조제어기의 BLDC motor 위치제어

°김현식, 박진현, 최영규

\*부산대학교 전기공학과

### BLDC Motor Position Control by Variable Structure Control with Evolution Strategy

°Hyun-Sik Kim, Jin-Hyun Park, Young-Kiu Choi

\*Dept. of Electrical Eng. Pusan National University

**Abstract** - Variable Structure Controller is well known to be a robust controller. Recently, Evolution Strategy is used as a effective search algorithm. In this paper, we propose a Variable Structure Controller combined with Evolution Strategy. Evolution Strategy is used to estimate the unknown parameters, the control gain and the thickness of saturation function boundary layer of Variable Structure Controller. From the experiment, we found the proposed Variable Structure Controller shows accurate tracking ability and robust performance in the BLDC motor position control system.

### 1. 서 론

시스템 파라미터와 부하의 변동, 미선행성분 등의 외란에 대한 강인성으로 인해 그 우수성이 인정되고 있는 가변구조제어기(Variable Structure Controller)는 슬라이딩면의 기울기, 플렌트파라미터, 제어개인, saturation 함수 경계층의 폭을 적절히 선택하면 우수한 성능의 제어기를 구성할 수가 있다[1-3]. 그러나 가변구조제어기의 성능을 결정하는 각종 파라미터들을 적절히 선택하는 것이 쉬지 않다. 본 논문에서는 이 문제를 해결하기 위해 뛰어난 최적해 탐색능력을 가진 Evolution Strategy(ES)를 사용하여[4] 가변구조제어기의 각종 파라미터들을 적절히 동조하여 효과적인 제어를 하였다.

플랜트로는 서보제어용모터로 널리 사용되고 있는 BLDC 모터를 사용하였으며[5-7], 시스템의 실제 작용에서 제안한 제어 알고리즘의 강인성, 효율성, 유용성을 보이고자 한다.

본 논문의 2장에서는 제어기 설계를, 3장에서는 BLDC 모터의 수학적 모델 및 실험장치를, 4장에서는 실험 및 고찰을, 5장에서는 결론을 밝힌다.

### 2. 제어기 설계

#### 2. 1 Evolution Strategy

최적해 탐색에 있어서 유용한 ES는 임의의 집단내에서 우수한 개체가 경쟁을 통하여 생존하는 원리를 모방한 것이다. 이 알고리즘은 다음의 특징을 가진다. 첫째, 목적함수의 연속성이나 미분 가능성 등이 불필요하다. 둘째, 전역탐색을 한다. 셋째, 다른 전화 알고리즘에서와 같은 부호화 과정이 필요 없으므로 실제 변수를 사용한다.

그린데 ES는 수렴속도와 정확도를 결정하는 탐색영역이 가운데인 랜덤변수의 표준편차 값에 의존하는 단점이 있다.

#### 2. 2 가변구조제어기

가변구조제어기론은 상태공간(error, d\_error)상에서 임의의 슬라이딩면(switching surface)을 정하고 상태벡터가 항상 슬라이-

팅면으로 향하도록 불연속적인 제어입력을 가해줌으로써, 상태벡터가 빠른 속도로 슬라이딩면을 따라 원점(오차와 오차의 미분치가 영)으로 수렴하면서 외란에 대해 강인한 특성을 보이는 슬라이딩모드를 발생시켜 강인한 제어를 한다[8]. 슬라이딩면의 방정식이  $S = Ce + \dot{e}$  일 때, 상태벡터가 슬라이딩면으로 향하도록 하기 위해서는  $\dot{S} < 0$ 을 만족하도록 가변이득을 결정하고, 원점으로 수렴하게 하기 위해서는 슬라이딩면의 기울기( $C$ )를 적절히 선택하여야 한다[8].

#### 2. 3 제안한 제어기

일반적인 ES의 수렴속도와 정확도를 개선하기 위하여 최대적합도와 반비례 관계에 있도록 표준편차를 가변시켜 탐색영역의 크기를 조절한다[9]. 시작점부터 최적점 근처까지는 표준편차를 크게 설정하여 수렴속도를 높이고 최적점 근처에서는 표준편차를 작게 설정하여 정확도를 높인다. 또한 다수의 극점을 갖는 최적화 문제에 유연하게 대처하기 위하여 최적점 근처에서는 최대적합도의 변화량까지 고려한다. 즉, 그럼 1에서 파라미터벡터가 P점에 도달하였을 때, 탐색영역이 A의 크기를 가지므로 세대가 진행되어도 최대적합도의 변화량이 거의 없이 적합도가 더 높은 Q점으로 이동할 가능성이 낮아 국부점에 빠진다. 이 때, 탐색영역이 B의 크기를 갖도록 표준편차를 가변하면 Q점으로 이동할 수 있는 가능성이 높아져서 국부점을 빠져나올 수 있다.

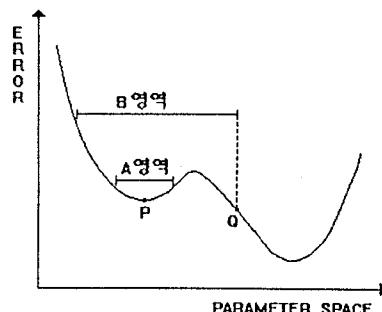


그림 1. 목적함수

Fig. 1. Objective function

다음은 가변구조제어기 설계로서 BLDC 모터의 방정식이 다음의 (1)식과 같을 때,

$$T_e = J\left(\frac{p}{2}\right)\dot{\theta} + B\frac{2}{p}\dot{\theta} + T_L \quad (1)$$

ES와의 결합요소를 만들기 위해 미선행요소를 포함한 외란에 대한 가변구조제어기의 강인성을 바탕으로 동적인 미지의 파라미터( $J$ ,  $B$ ,  $T_L$ ) 벡터  $\alpha$ 와 regressor matrix  $\Phi$ 로 (2)식과 같이

선행화 하였다[10].

$$T_e = [\theta \ \dot{\theta} \ 1] \begin{vmatrix} J(\frac{p}{2}) \\ B(\frac{p}{2}) \\ T_L \end{vmatrix} = \phi a \quad (2)$$

가변구조제이기의 강인한 제이특성을 가질수 있도록 제이입력  $u$ 는 (3)식과 같이 구성하였다.

$$u = \phi \psi + K_d s \quad (3)$$

단,  $\psi = [\psi_1 \ \psi_2 \ \psi_3]^T$

$$\psi_1 = \text{PARA1} \cdot \text{sgn}(s\dot{\theta})$$

$$\psi_2 = \text{PARA2} \cdot \text{sgn}(s\dot{\theta})$$

$$\psi_3 = \text{PARA3} \cdot \text{sgn}(s)$$

PARA1, 2, 3,  $K_d$ 는 스위칭개인의 크기

체널링문제를 감소하기 위해서는  $\text{sat}(s)$ 를 사용함으로써  $s$ 가 경계면  $\phi$ 를 정하여 (4)식과 같이 제이 출력을 내도록 하였다.

$$\text{sat}(s) = \begin{cases} 1 & \text{if } s/\phi > 1 \\ s/\phi & \text{if } -1 < s/\phi < 1 \\ -1 & \text{if } s/\phi < -1 \end{cases} \quad (4)$$

제이기 합성의 구체적 내용으로 가변구조제이기의 파라메터인 슬라이딩면 기울기 1개, 스위칭개인 4개, saturation 함수 경계층의 폭 1개를 ES의 문자열로 구성하였다. 문자열 구조는 다음과 같다.

PARA[1][1]	PARA[1][2]	PARA[1][3]	PARA[1][4]	PARA[1][5]	PARA[1][6]
PARA[2][1]	PARA[2][2]	PARA[2][3]	PARA[2][4]	PARA[2][5]	PARA[2][6]
⋮			⋮		
PARA[3][1]	PARA[3][2]	PARA[3][3]	PARA[3][4]	PARA[3][5]	PARA[3][6]
⋮			⋮		
PARA[N-1][1]	PARA[N-1][2]	PARA[N-1][3]	PARA[N-1][4]	PARA[N-1][5]	PARA[N-1][6]
PARA[N][1]	PARA[N][2]	PARA[N][3]	PARA[N][4]	PARA[N][5]	PARA[N][6]

$i = 0, 1, \dots, N-1, N$

PARA[i][1] =  $C$

PARA[i][2] =  $\phi$

PARA[i][3] =  $J$ 의 스위칭개인

PARA[i][4] =  $B$ 의 스위칭개인

PARA[i][5] =  $T_L$ 의 스위칭개인

PARA[i][6] =  $K_d$

그림 2. 문자열의 구조

Fig. 2. The Structure of String

그림 3은 ES의 흐름도이고, 그 내용은 다음과 같다.

- ① 최대 적합도를 갖는 문자열 하나에 가우시안 랜덤번호(RN)를 난수로 생성한 후 더하여 N-1번 만족하여 총 N개의 문자열집단을 만들. (PARA[i][1] = PARA[1][1](best) + RN)
- ② 각각의 문자열에 대해 적합도를 평가.
- ③ Termination Condition을 만족할 때까지 앞의 과정을 반복.

그리고, 본 논문에서 사용한 적합도 함수는 다음과 같다.

$$\text{fitness}(i) = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^m k |e_i(k)|} \quad (5)$$

단,  $e_i(k)$ 는  $i$ 번째 문자열의  $k$  스텝 시간에서의 오차,  $m$ 은 총 샘플링의 개수

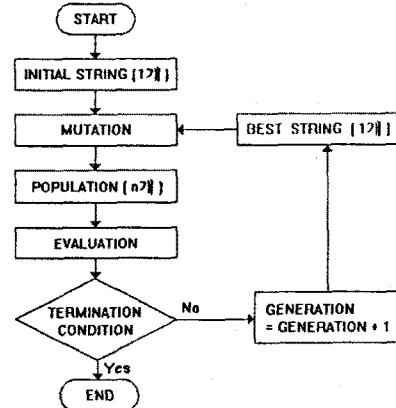


그림 3. ES의 흐름도

Fig. 3. The flowchart of Evolution Strategy

그림 4는 제안한 제이시스템의 블럭선도이다.

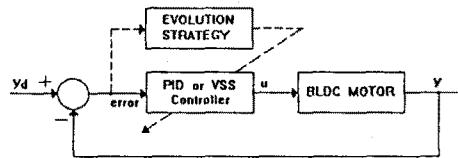


그림 4. 제안한 제이시스템의 블럭선도

Fig. 4. The blockdiagram of Proposed Control System

### 3. BLDC 모터의 수학적 모델 및 실험장치

BLDC 모터의 등가회로를 전압방정식으로 나타낸 후 d-q변환을 하고 벡터제어방식에 의해 d상 전류명령  $i_{ds}$ 를 영으로 제어한다면, (1)식의  $T_e$ 는 다음과 같은 간단한 방정식으로 나타낼 수 있다[5].

$$T_e = \frac{3}{2} \left( \frac{p}{2} \right) \lambda_{mi_{qs}} = k_t i_{qs} \quad (6)$$

전체 시스템 구성은 다음과 같다. IBM-PC(486DX2-66)에서 제안한 제이기를 C 언어로 구현하였고, 제이입출력신호의 처리를 위해서는 AX5411 board(data acquisition board)를 사용하였다. BLDC 모터의 위치정보는 레졸비로 부터의 아날로그 신호를 RDC(resolver to digital converter)로 변환하여 얻었다. D/A의 제이명령과 RDC 위치정보로 Park의 익빈환율-통해 3상 전류명령신호를 만들었고, 삼각파 비교형 PWM방식의 전류제이형 인버터로 BLDC 모터(3상 4극, 141V/200W)를 구동하였다. 부하로는 직류진동기(75V/200W)-가변저항(15Ω)을 연결하였다. 그림 5는 하드웨어 구성도이다.

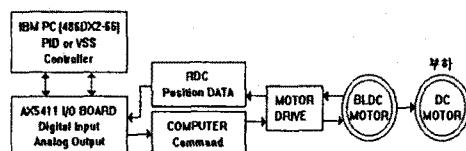


그림 5. 하드웨어 구성도

Fig. 5. Hardware schematic diagram

#### 4. 실험 및 고찰

ES의 문자열 집단의 크기는 5, 세대수는 30이다. 초기 문자열 값은 모두 영이며, 가우시안 랜덤변수의 평균은 0, 표준편자는 적합도가 0.9이하에서는 3.0, 0.9이상에서는 0.1, 0.9이상에서 적합도의변화가 0.001보다 작으면 5.0로 가진하였다. 샘플링 갯수는 2000, 샘플링 간격은 1msec이다.

제안한 제어기를 사용하여  $20\pi$ 의 스텝입력을 인가했을 경우, 1세대, 2세대, 30세대에 나타나는 최적의 문자열에 대한 응답곡선은 그림 6과 같다. 그럼 7은 그림 6의 30세대에서 나타나는 토크특성곡선이다. 그럼 8은 최대 적합도 추이를 나타내고, 그럼 9는 그림 6의 30세대에서 동조된 파라미터들로 제어기를 구성한 뒤에 0.3초 동안 0.6 Nm의 부(-)토크 스텝외란을 가한 경우의 응답이다. 제안한 제어기에 의한 제어응답은 세대가 증가할수록 상승시간, 정착시간이 개선되었고 외란이 인가된 경우에도 응답이 개선되는 경인성을 보였다.

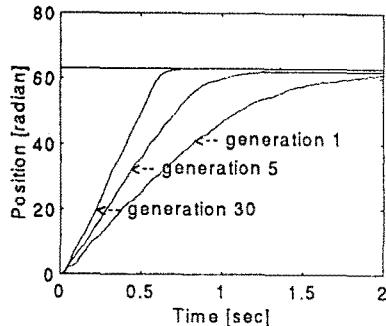


그림 6. 스텝응답  
Fig. 6. Step Response

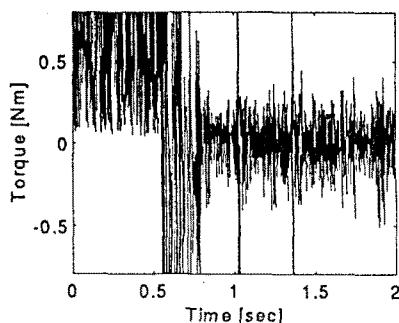


그림 7. 토크특성곡선  
Fig. 7. Torque characteristic curve

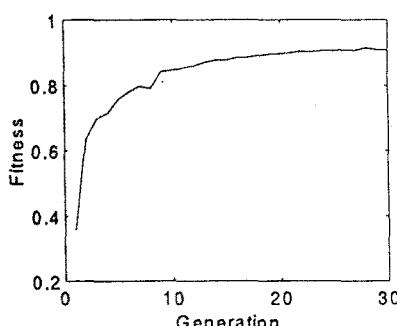


그림 8. 적합도의 추이  
Fig. 8. Trends of Fitness

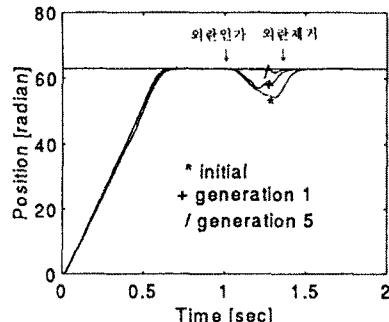


그림 9. 외란에 대한 스텝응답  
Fig. 9. Step Response with Disturbance

#### 5. 결론

BLDC 모터의 위치제어에 가변구조제어기의 장인성과 ES의 최적점 탐색능력을 결합한 형태의 제어기를 사용하여 정확한 위치제어 성능과 외란에 잘 적용하는 강인한 성능을 얻었다. 여기서 ES가 슬라이딩면의 기울기, 각종 제어계인, saturation 함수 경계층의 폭을 효과적으로 동조하여 가변구조제어기의 성능을 향상시킬 수 있다.

앞으로 제안된 알고리즘의 온라인 적용과 정확한 최적점 탐색 방법의 연구가 계속되어야 할 것이다.

#### 참고문헌

- [1] V. I. Utkin, "Variable Structure Systems with Sliding Modes", IEEE Transaction on Automatic Control, vol. AC-22, NO. 2, pp. 212-221, 1977
- [2] S. V. Drakunov and V. I. Utkin, "Sliding mode control in dynamics systems", INT. J. Control, 1992, vol. 55, NO. 4, pp. 1029-1037
- [3] 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
- [4] Tomas Bäck, "Selective Pressure in Evolutionary Algorithms: A Characterization of Selection Mechanisms," Proceedings of the first IEEE Conference on Evolutionary Computation, Vol.1, pp. 57-62, 1994.
- [5] Paul C. Krause, Analysis of electric machinery, McGraw-Hill, 1984.
- [6] Samuel Seely, Electromechanical energy conversion, pp.226-235, McGraw-Hill, 1992.
- [7] Yasuhiko Date & Sankai Kino Shibusi, Brushless servomotors fundamentals and applications, Clarendon Press, 1990.
- [8] F. L. Lewis, C. T. Abdallah, D. M. Dawson, "Control of Robot Manipulators", Macmillan
- [9] J. H. Park, Man Suck Son, Young Kiu Choi, "Parameter Tuning for Controller using Evolution Algorithms", Proceedings of the 1st KECW pp. 25-31, 1994
- [10] Chun-Yi Su and Tin-Pui Leung "A Sliding Mode Controller with Bound Estimation for Robot Manipulators", IEEE Transaction on Robotics and Automation, vol. 9, no. 2, pp. 208-214, 1993