

정희원 이성백, 정희원 이종규*, 정희원 원영진**, 정희원 한완우***, 준희원 조준희****

DC Motor Speed Control by Variable Structure PI Control

Lee Sung Bak, Lee Jong Kyu, Won Young Jin, Han Wan Oak, Cho Joon Hee

ABSTRACT- This paper presents a study on the variable structure PI(proportional and integrate) control which is insensible to the variation of parameters or external disturbance for driving DC motor.

In the presented variable structure PI control (VSPIC), the sliding mode control was used at the below of 4000 rpm and PI control also used at the above of 4000 rpm with no load. In other way, the PI control was used at the below of 4000 rpm and the sliding mode control at the above of 4000 rpm with some loading, and then the output waveform following the variation of load was measured. intel 8031 microcomputer unit and IBM PC was combined to form the full system and the speed control was performed with it. The experimental result of the fast response to speed was more improve than it was open loop state. For load varying, the sliding mode insensible to external disturbance was applied and the improved response was obtained.

Key words : variable structure PI control (가변구조 PI 제어)

1. 서론

안정된 응답, 정확도 그리고 강인함은 모든 전기 구동 시스템에서 요구되는 중요한 기능이다. PI 제어는 구조가 간단하고, 매개 변수를 무시한 정상 상태와 일정한 외란이 가해지는 동안에도 정확성이 유지 되므로 전동기 구동에 널리 적용되어 왔다.

그러나 PI 제어는 전동기의 매개변수의 변화와 제어 플랜트의 비선형성에 매우 민감하므로 중대한 결점을 갖는다. 부하 변동시 흐르는 전류의 증가로 인한 온도 상승이 전동기의 매개 변수를 변화시킨다. 또한 외부에서 가해지는 갑작스런 외란에 의해 전동기의 매개변수가 변화될 때 안정된 제어값을 유지하기 어렵게 된다.

반면 슬라이딩 모드 제어는 매개변수의 변화나 외란에 대해 둔감하므로 안정된 제어를 유지할 수 있게 한다. 그러나 이 제어는 대상 시스템의 동특성이 설계자에 의해 미리 설정된 스위칭 면(switching surface)에 의해 결정된 궤적의 추종과정에서 불연속적인 제어 입력이 가해짐으로 인한 떨림(chattering)이 발생된다. 이러한 떨림 현상으로 인해 정확한 제어를 유지할수 없게되는 단점을 갖는다[1-6]. 따라서 이러한 단점들을 보완하기 위해 가변구조 PI 제어 시스템을 제시하였다.

본 논문에서 제시한 가변 구조 PI 제어(VSPIC)는 무 부하시, 회전수 4000 RPM 이하에서는 슬라이딩 모드 제어를 실행하고 그 회전수 이상에서는 PI 제어를 사용하였다. 반면 부하를 걸 상태에서, 4000 RPM 이하에서는 PI 제어를 실행하고 그 회전수 이상에서는 슬라이딩 모드 제어를 실행하였다.

제어기 설계는 1 회전당 200 펄스인 엔코더에서 나오는 출력 을 MCS-51를 사용하여 M/T 방식으로 속도를 측정하였고 이 값을 IBM PC의 Main 보드 상의 8255로 구성된 병렬카드(Parallel card)로 받아들여 여러값을 보정한 후 이 제어값이 D-A 변환기를 거쳐 출력단을 구동하도록 하였다. 출력단으로 전력의 소비를 줄이고 실행을 간단히 하기위해 제한된 단극(Limited unipolar) 모드에서 직류 전동기를 구동하였고, 출력 전류를 3 [A] 이하로 제한하여 제어를 실행하였다[7-10].

2-1. 슬라이딩 모드 제어 이론의 해석

가변 구조 시스템(VSS)라고 알려진 슬라이딩 모드 제어 방식은 소련에서 지난 20 여년간 연구되어 왔다. 가변 구조 제어 방식은 미리 정해진 궤적을 따라 움직이는 일종의 적응 제어 방식인데, 이 제어 방식의 특징은 파라미터의 변화나 외부 외란에 대해 둔감성을 갖는 것이다. 어떤 원하는 특성을 얻기 위하여 상태 공간에서 시스템의 상태가 불연속 표면(discontinuity surface)을 가로지룰때 계통의 구조를 변화시킴으로써 종래의 제어기에서 얻을 수 없는 안정된 응답을 갖게 한다. 이 제어기는 어떤 입력값이 들어오면 미리 정해진 제어 값에 의해 스위칭 평면을 향하게 되며, 이 평면을 따라 이동하게 되는데 이때 일어난 현상을 슬라이딩 모드라고 한다.

슬라이딩 모드 제어는 가변구조 방식을 택하여 시스템의 응답이 미리 선정된 궤적을 따라 움직이게 된다. 따라서 개별적인 구조들이 불안정 상태이더라도 시스템의 평균응답은 안정하게 된다.

슬라이딩 모드 제어기 : 시스템의 상태가 슬라이딩 라인에 도달하여 슬라이딩 모드 상태를 유지하기 위하여 제어 입력 U는 다음과 같다.

$$U = \psi_1 x_1 + \psi_2 x_2$$

$$\psi_1 = \begin{cases} \alpha_1 : \sigma_1 x_1 > 0 \\ \beta_1 : \sigma_1 x_1 < 0 \end{cases}$$

$$\psi_2 = \begin{cases} \gamma_1 : \sigma_1 x_2 > 0 \\ \xi_1 : \sigma_1 x_2 < 0 \end{cases}$$

이때 슬라이딩 모드가 유지하기 위해서는 ψ_1 과 ψ_2 가 적절히 설계되어야 한다.

$$x_1 = \text{속도오차}, x_2 = \text{가속도 오차}$$

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = -ax_2 + bu$$

$$x_1 = w_{ref} - w$$

$$a = \frac{k_t k_h + RR_a}{J R_a}$$

$$b = \frac{k_t}{J R_a}$$

윗 식에 대한 슬라이딩 모드의 상태 공간 방정식은 아래식과 같다.

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ b \end{pmatrix} u$$

서로 다른 구조를 갖는 시스템을 슬라이딩 라인상으로 올려 놓기 위한 슬라이딩 모드의 존재 조건은 Lyapunov 방정식 식 (1)과 (2)식을 만족해야한다.

1) $V(x) > 0, x \neq 0$ ($V(x)$ 는 positive definitive 함수이다) - 1)

2) $\frac{dv}{dt} < 0, x \neq 0$ ($\frac{dv}{dt}$ 는 negative definitive 함수이다) - 2)

슬라이딩 라인에 대한 안정도는 위의 조건을 만족시키는 Lyapunov함수 $V(x)$ 를 찾는 일이다. 단일 입력 시스템에서 Lyapunov함수를 식 (3)로 놓을 수 있다.

$$V(x) = \frac{1}{2} \sigma^2(x) \quad (3)$$

함수 $V(x)$ 는 식(1)을 만족시킨다. 시스템이 점근적으로 안정되기 위해서는 $V(x)$ 의 미분값이 식(2)을 만족시켜야 한다.

$$\frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} \cdot \sigma^2 \right] = \sigma \cdot \dot{\sigma} < 0 \quad (4)$$

식(4)는 슬라이딩 모드의 존재 조건식이 되며 슬라이딩 모드 제어기의 파라미터를 결정하는데 사용된다.

1) 가속구간

$$\sigma_1 = -c(x_1 - x_{10}) + x_2 \quad (x_{10} \text{은 초기 속도여라})$$

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_1 &= -c\dot{x}_1 + \dot{x}_2 \\ &= -c_1x_2 - ax_2 + bu \\ &= b\psi_1x_1 + (b\psi_2 - c_1 - a)x_2 \end{aligned}$$

$$\sigma_1 \dot{\sigma}_1 = b\psi_1 \sigma_1 x_1 + (b\psi_2 + c_1 - a) \sigma_1 x_2 < 0$$

$$b\psi_1 < 0 \quad ; \quad \sigma_1 x_1 > 0$$

$$b\psi_1 > 0 \quad ; \quad \sigma_1 x_1 < 0$$

$$b\psi_2 - c_1 - a < 0 \quad ; \quad \sigma_1 x_2 > 0$$

$$b\psi_2 - c_1 - a > 0 \quad ; \quad \sigma_1 x_2 < 0$$

ψ_1 과 ψ_2 를 적절히 설계함으로써 슬라이딩 모드제어를 실행할 수 있다.

2) 정속구간 : $\sigma_2 = x_2 - x_{20}$

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_2 &= \dot{x}_2 \\ &= -ax_2 + bu \\ &= b\psi_1x_1 + (b\psi_2 - a)x_2 \end{aligned}$$

$$\sigma_2 \dot{\sigma}_2 = b\psi_1 \sigma_2 x_1 + (b\psi_2 - a) \sigma_2 x_2 < 0$$

$\sigma_2 \dot{\sigma}_2$ 가 음의값을 가지기 위해서는 다음 식을 만족해야 한다.

$$b\psi_1 < 0 \quad ; \quad \sigma_2 x_1 > 0$$

$$b\psi_1 > 0 \quad ; \quad \sigma_2 x_1 < 0$$

$$b\psi_2 - a < 0 \quad ; \quad \sigma_2 x_2 > 0$$

$$b\psi_2 - a > 0 \quad ; \quad \sigma_2 x_2 < 0$$

ψ_1 과 ψ_2 를 적절히 설계함으로써 슬라이딩 모드제어를 실행할 수 있다.

3) 감속구간 : $\sigma_3 = c_3x_1 + x_2$

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_3 &= c_3\dot{x}_1 + \dot{x}_2 \\ &= c_3x_2 - ax_2 + bu \\ &= b\psi_1x_1 + (b\psi_2 + c_3 - a)x_2 \end{aligned}$$

$$\sigma_3 \dot{\sigma}_3 = b\psi_1 \sigma_3 x_1 + (b\psi_2 + c_3 - a) \sigma_3 x_2 < 0$$

$$b\psi_1 < 0 \quad ; \quad \sigma_3 x_1 > 0$$

$$b\psi_1 > 0 \quad ; \quad \sigma_3 x_1 < 0$$

$$b\psi_2 + c_3 - a < 0 \quad ; \quad \sigma_3 x_2 > 0$$

$$b\psi_2 + c_3 - a > 0 \quad ; \quad \sigma_3 x_2 < 0$$

ψ_1 과 ψ_2 를 적절히 설계함으로써 슬라이딩 모드제어를 실행할 수 있다.

2-2. PI 제어 이론

전동기 제어에서 가장 일반적으로 사용하는 제어기는 PI 제어기이다. PI 제어기의 중요한 특성은 구조가 간단하며, 계산량이 적고 처리속도가 빠르기 때문에 마이크로 프로세서로 처리하기에 적합하다.

PI 제어기의 시간응답은 다음 식에 의해 주어진다.

$$V_o(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t) dt$$

$$\begin{cases} V_o(t) : \text{제어기 출력} \\ e(t) : \text{오차값} \\ K_p : \text{비례이득} \\ K_i : \text{적분이득} \end{cases}$$

적분기의 출력 방정식은 적분기를 반복 접근법을 사용하였다.

$$\begin{aligned} V_o(n) &= V_o(n-1) + \left[\frac{K_i}{2} \cdot T - K_p \right] \cdot e(n-1) + \\ &\quad \left[\frac{K_i}{2} \cdot T + K_p \right] \cdot e(n) \end{aligned}$$

이때 K_i 와 K_p 를 실험치로 구하여 제어를 실행하였는데, K_i 는 1.15로 설정하였고 K_p 는 1.8로 계산하여 제어를 실행하였다.

2-3. 가변 구조 PI 제어기(VSPIC)

본 논문에서 제시한 가변구조 PI제어(VSPIC)는 무 부하시, 회전수 4000 RPM 이하에서는 슬라이딩 모드 제어를 실행하고 그 회전수 이상에서는 PI제어를 사용하였다. 반면에 부하를 건 상태에서, 4000 RPM 이하에서는 PI 제어를 실행하고 그 회전수 이상에서는 슬라이딩 모드 제어를 실행하였다. 전체 시스템의 블록다이어그램은 다음과 같다.

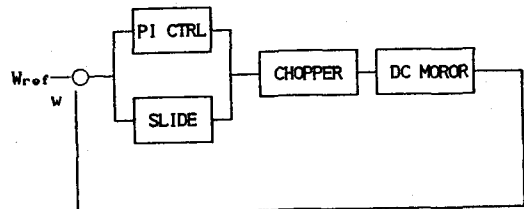


그림 1. 전체 시스템의 블록 선도
Fig. 1. A block diagram of entire system

3. 실험 및 고찰

본 논문에서 저속 영역에서는 펄스간의 시간을 측정하는 T 방식과 고속영역에서는 펄스 수를 측정하는 H 방식을 혼합한 개선된 M/T 방식을 사용하여 8031 마이크로프로세서가 속도를 측정하였다. 속도 측정시, 무부하시엔 회전당 200 펄스의 출력을 갖는 로터리 엔코더를 사용하였으며, 부하시엔 회전당 60 펄스의 출력을 갖는 엔코더를 회전자 축에 고정, 광차단기(Photo Interrupter)를 사용하여 속도를 측정하였다.

측정된 속도 오차값을 C 언어로 보정하여 D-A 컨버터를 통해 데이터 값을 아나로그 양으로 전송, 이 값을 연산증폭기 TL082의 반전 단자에 입력하고 펄스 발생기에서 나오는 삼각파와 비교, 조정하여 베이스 구동용 하이브리드 IC 에 전송하였다. 출력단 구성은 트랜지스터의 단구 모드에서 Tr₁의 베이스 단자에는 항상 +5 volt로 고정시키고 Tr₄의 베이스 단자에 하이브리드 IC를 연결하여 출력을 단속하여 전동기의 속도 제어를 실행 하였다.

그림 2는 전동기의 회전수가 6000 rpm일때 기루프 상태에서의 속응성을 보여준다. 이때 정상 상태 속도도 도달하기전 과도 응답을 볼 수 있으나 그림 3에서 본 논문에 제시된 기법에 의해 개선된 응답을 볼 수 있다.

그림 4는 전동기의 회전수가 7000 rpm일때 기루프 상태에서의 속응성을 보여준다.그림 5는 전동기의 회전수가 7000 rpm일때 폐루프 상태에서의 속응성을 보여준다.

그림 6은 부하가 10W이고 기루프 상태일때의 속응성을 보여주고 그림 7은 부하가 10W이고 폐루프 상태일때의 속응성을 보여준다 이때 속응성이 개선된것을 볼수있다.그림 8은 부하가 13W일때 보상되지 않은 VSPIC을 보여주고 그림 9는 보상된 VSPIC을 보여준다. 이때 과도 응답이 개선된 것을 보여준다.

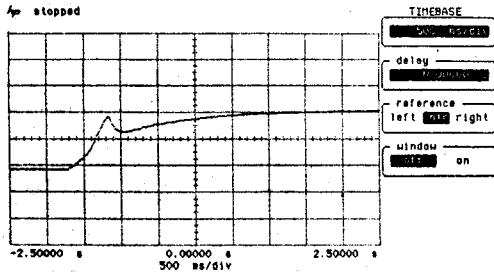


그림 2. 기 루프상태 일때의 속도에 대한 응답 (6000 rpm)
Fig. 2. Speed response at open loop state (6000 rpm)

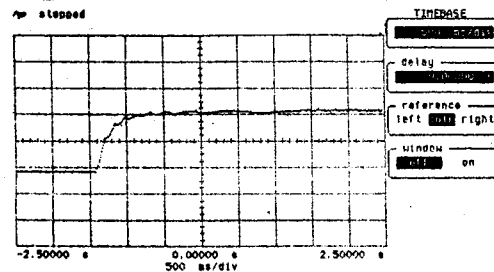


그림 3. 폐 루프상태 일때의 속도에 대한 응답 (6000 rpm)
Fig. 3. Speed response at closed loop state (6000 rpm)

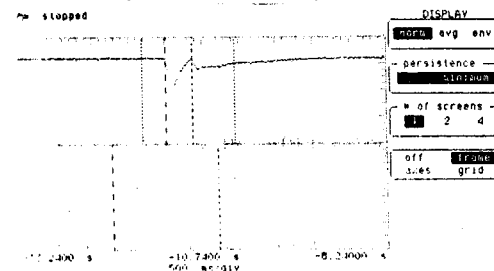


그림 8. 부하가 13W 일때 보상되지 않은 VSPIC 응답 (7000 rpm)
Fig. 8. Uncompensated VSPIC at 13W loaded (7000 rpm)

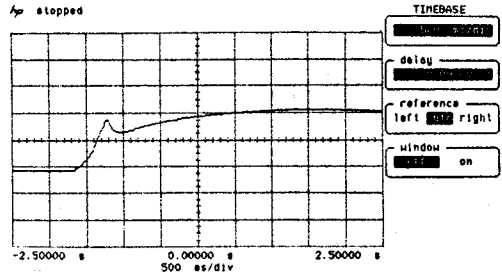


그림 4. 기 루프상태 일때의 속도에 대한 응답 (7000 rpm)
Fig. 4. Speed response at open loop state (7000 rpm)

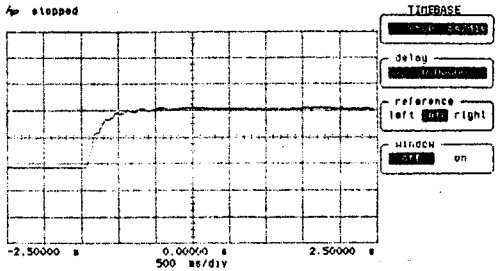


그림 5. 폐 루프상태 일때의 속도에 대한 응답 (7000 rpm)
Fig. 5. Speed response at open loop state (7000 rpm)

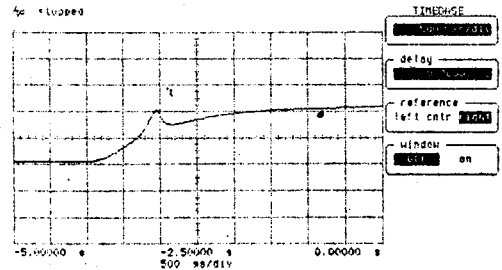


그림 6. 기 루프상태이고 부하가 10W 일때 속도 응답 (6000 rpm)
Fig. 6. Speed response at open loop state and 10w loaded (6000 rpm)

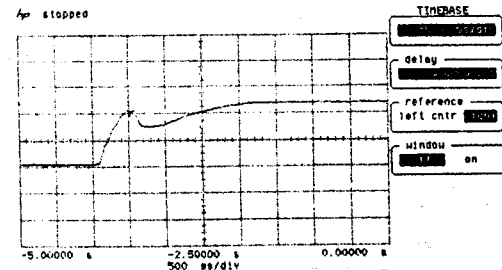


그림 7. 폐 루프상태이고 부하가 10W 일때 속도 응답 (6000 rpm)
Fig. 7. Speed response at closed loop state and 10w loaded(6000 rpm)

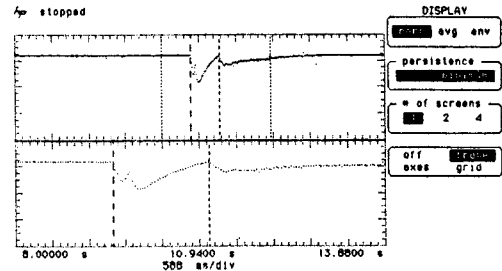


그림 9. 부하가 13W 일때 보상된 VSPIC 응답 (7000 rpm)
Fig. 9. Compensated VSPIC at 13W loaded (7000 rpm)