

부하변동을 고려한 직류 서보전동기의 자기동조제어에 관한 연구

이운종 오원석 김영태 (한양대학교)

Self-tuning Control of DC Servo Motor Taking into Account of Load Variation

Yoon-Jong Lee, Won-Seok Oh, Young-Tae Kim (Hanyang Univ.)

Abstract

An adaptive control system for D.C servo drive is developed via minimum variance control theory. The problem of designing this controller under varying load conditions is discussed. A robust self tuning controller that can track a constant reference and reject constant load disturbance is developed. Simulation study shows that the controller has excellent adaptation capability as well as transient recovery under load changes.

1. 서론

전력전자 공학 및 마이크로 전자공학의 급속한 발전과 강력한 마이크로 프로세서의 출현으로 로봇이나 수치제어용 공작기계(NC machine) 및 사무자동화 기기, 항공기 등의 분야에서 요구되고 있는 정밀한 속도 및 위치제어, 그리고 외란이나 부하변동에 대한 강인한 서보전동기 제어가 가능하게 되었다.

서보시스템(Servo System)의 구동제어에 있어서 어려운 점은 시스템 매개변수의 큰 변동과 시변외란에 기인하는 오차를 허용범위로 줄이면서 신속하고 진동이 없는 과도응답 특성을 얻는 것이다. 일반적으로 사용되는 비례-미분-적분 제어나 선형상태궤환 제어기는 한 동작 조건에서는 매우 유용하나 매개변수 변화에 의해 동작 조건이 변화할 때에는 이러한 성능을 만족시키기가 곤란하여 고도로 발달된 현대의 제어이론의 도입에 관한 연구가 이루어져 왔다.[1]

이들 중 자기동조 제어 방식은 주어진 평가함수와 측정할 수 있는 입출력에서 얻은 정보로 매개변수를 추정하여 동작조건에 변화-전환 변동, 부하변동, 전동기 자체의 열손실에 의한 온도변화 - 나뉘은 동작범위에서도 정밀하고 강인한 제어를 할 수 있는 방식으로 극배치 제어 방식(Pole placement control)과 최소분산 제어(Minimum Variance Control)의 두 가지 방법이 제시되었다.[3][4][5]

이 제어방식의 적용은 상태변수의 정확한 정보를 필요로 하여 센서의 성능향상과 고성능 마이크로 프로세서의 도입이 필연적이다.

본 연구에서는 제어입력 가중항을 도입하고 시스템 출력의 분산이 최소가 되도록 하는 최소분산제어[2] 방식을 사용하고 시스템의 입출력 오차를 적분항으로 평가함수에 포함하여 시스템의 강인성을 향상시킨 제어이론을 제시하였고, 직류 서보전동기 구동에 적용하여 그의 타당성을 입증하였다.

2. 시스템의 수학적 모델

입력전압 Vi(t)가 직류 영구자형 서보전동기의 전기자권선에 인가됐을 때 시스템의 동작방정식을 아래와 같이 기술할 수 있다.[9]

Vi(t) = RaIa(t) + La dIa(t)/dt + Vg(t) (1)

Vg(t) = KeW(t) (2)

Tg(t) = KtIa(t) (3)

Tg(t) = Jm dW(t)/dt + BW(t) + Tl(t) (4)

여기서

- Ia : 전기자전류
Ra (La) : 전기자저항 (인덕턴스)
Vg : 전동기 역기전력
Tg : 전동기 토크
Jm (B) : 전동기 관성모멘트 (마찰계수)이다.

본 연구에서는 부하의 변동영향을 고려하기 위해 Lead screw 형 부하를 사용하였다. 그러므로, 부하 토크가 부하 가속 토크로만 표현된다고 할 때 전동기축으로 환산된 부하축의 관성을 포함한 부하 토크는

Tl = Jl dW/dt = M/g (1/2πG)² dW/dt (5)

으로 나타낼 수 있다. 여기서 M, g, l, G는 각각 table의 중량, 중력가속도, lead, 치수비이다.

그러므로 식(4)는 다음 식으로 고쳐 쓸 수 있다.

Tg(t) = J dW/dt + BW (6)
J = Jm + Jl

이식들을 라플라스 변환하여 블럭선도로 표시하면 그림 1과 같다. 그림 1로부터 인가전압 Vi(s)에 대한 출력W(s)의 전달함수를 구해보면

G(s) = W(s)/Vi(s) = Kt / (Las+Ra)(Js+B) + KtKe (7)

여기서, 시정수와 DC 이득이 J 와 B 에 의존함을 알 수 있다.

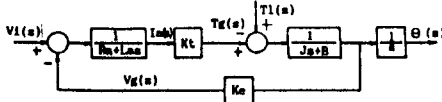


그림 1. 직류 서어보 전동기의 블록선도

$$\begin{aligned} g1 &= -(Rv + 1)BOB1 \\ g2 &= (1 + Rv) BO \\ g3 &= BORv \end{aligned}$$

식(13)에서 구해진 입력에 의한 제어부의 출력 선도는 그림 2와 같다. 임출력 오차를 보상할 적분항과 비례항이 IP(integral proportional) 제어기 [7]의 형태로 구성되었으며 setpoint의 변화를 빠르게 추적할 수 있는 정궤환 부우프도 포함한다. 그러므로 제안된 제어기는 빠른 과도 응답과 부하변동시 신속한 회복능력을 나타내게 된다. 또한 가중치 Rv와 Ru의 적절한 선택에 의해서 여러 종류의 제어기로도 응용될 수 있다.

3. 제어 알고리즘

본 연구에서 제어하고자 하는 시스템에 대한 수학적 모델은 식(8)과 같은 시분별 단입력 단출력 DARMA (Deterministic Auto Regressive Moving Average)로 표현될 수 있다. [5]

$$A(q^{-1})Y(k) = q^{-d}B(q^{-1})U(k) \quad (8)$$

여기서

$$\begin{aligned} A(q^{-1}) &= 1 + A1q^{-1} + \dots + Anaq^{-na} \\ B(q^{-1}) &= BO + B1q^{-1} + \dots + Bnbq^{-nb} \quad (BO \neq 0) \end{aligned}$$

q^{-1} 은 backward shift operator로서 $q^{-d}Y(k) = Y(k-d)$ 가 되며 $U(k), Y(k)$ 는 공정의 입출력이고 $A(q^{-1})$ 와 $B(q^{-1})$ 는 q^{-1} 로 이루어진 다항식이며 $d \geq 1$ 는 sampling 주파수의 정수배이다.

이는 B 의 0임을 의미한다. 본 연구에서 적용한 최소분산제어이론은 공정의 평가함수에 임출력 오차를 보상하는 적분항을 포함한 것으로 더욱 강인한 제어를 이루게 한다. 그러므로 본 연구의 평가함수는 식(9)와 같이 정의된다.

$$J = 1/2[Y(k+d) - W(k)]^2 + 1/2 RvV(k+d)^2 + 1/2 RuU(k)^2 \quad (9)$$

여기서 $W(t)$ 는 기준 입력이고 Rv, Ru 는 가중치이다. 또한 $V(k)$ 는 임출력 오차를 보상하는 항으로 식(10)과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} E(k) &= W(k-d) - Y(k) \\ (1-z^{-1})V(k) &= E(k) \end{aligned} \quad (10)$$

본 연구에서 적용한 모델은 식(7)의 전달함수를 가지므로 이 연속형 전달함수를 이산형으로 변환하면

$$G(q^{-1}) = \frac{q^{-1}(BO + B1q^{-1})}{1 + A1q^{-1} + A2q^{-2}} = \frac{q^{-1}B(q^{-1})}{A(q^{-1})} \quad (11)$$

과 같이 되므로 식(12)로 표현되며

$$Y(k) = -A1Y(k-1) - A2Y(k-2) + BOU(k-1) + B1U(k-2) \quad (12)$$

이 식을 이용하여 식(9)의 평가함수를 최소화 하는 제어입력 $U(k)$ 를 식(13)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} U(k) &= 1/h0 [f1Y(k) + f2Y(k-1) + g1U(k-1) \\ &\quad + g2W(k) + g3V(k)] \\ h0 &= BO^2 (1 + Rv) + Ru \\ f1 &= (1 + Rv) BOA1 \\ f2 &= (1 + Rv) BOA2 \end{aligned} \quad (13)$$

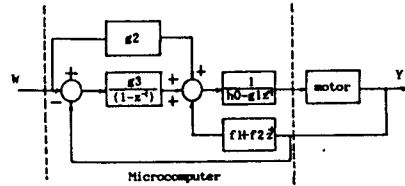


그림 2. 서어보전동을 위한 자기동조제어기의 블록선도

4. 매개변수 추정 알고리즘

자기동조 제어이론은 시스템의 매개변수를 추정하고 추정된 매개변수로 최적제어 입력을 구하는 이론에 기초한다. 매개변수의 추정을 위해서 순환형 최소자승법을 이용한다. 추정방정식은 식(12)와 같으며, 이 식으로부터 식(14)가 정의된다.

$$\begin{aligned} Y(k) &= X^T(k)\Theta(k) \\ X^T(k) &= [-Y(k-1), -Y(k-2), U(k-1), U(k-2)] \\ \Theta^T(k) &= [A1, A2, B0, B1] \end{aligned} \quad (14)$$

미지의 매개변수 Θ 는 식(15)와 같이 측차형 테로 추정된다.

$$\begin{aligned} \hat{\Theta}(k) &= \hat{\Theta}(k-1) + \mu(k) [Y(k) - X^T(k-d)\hat{\Theta}(k-1)] \\ \mu(k) &= P(k)X(k-d) / [\beta + X^T(k-d)P(k)X(k-d)] \\ P(k+1) &= [I - \mu(k)X^T(k-d)]P(k) / \beta \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 β 는 망각인자로 0보다크고 1보다 작은 값을 갖는다. 추정된 매개변수를 식(13)에 대입하고 입력 $U(k)$ 를 구하게 된다.

5. 해석 및 시뮬레이션

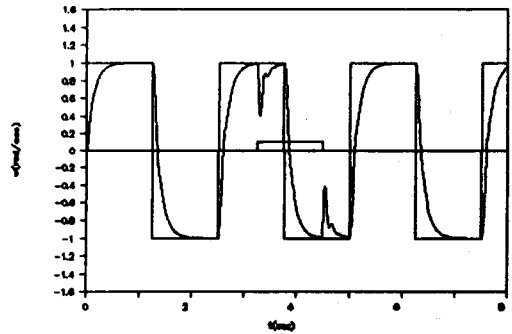
본 연구에서 제시한 알고리즘의 타당성을 입증하기 위해 고전적인 PID 알고리즘과 최소분산제어 알고리즘 그리고 본 연구의 임출력간의 오차를 보상하는 적분항을 포함한 최소분산제어 알고리즘을 적용하여 주어진 직류 전동기에 결정적인(deterministic) 부하변동이 생겼을 때의 각 알고리즘의 추종상태를 비교하였다.

기준 입력은 크기 +1, -1의 구형파 입력을 사용하였고 PID 부우프의 이득은 부하변동이 없을 때의 최적함을 선정하였다.

결정적인 부하변동은 DARMA 모델의 출력항에 첨가된 형태로 표현하였으며 일정크기의 부하와 정현적으로 변하는 부하를 그림 3, 4와 같이 일정시간동안 가하였다.

초기상태에서는 고전적 PID 제어가 최소 분산 제어기보다 overshoot의 면에서 양호한 특성을 보였지만 기준 입력에의 수렴은 그제 뒤였으며 부하변동에 의해 모델의 매개변수가 영향을 받았을 경우 PID 제어기보다 최소 분산 제어기가 overshoot의 면에서나 기준 입력 추종면에서 매우 양호함을 알 수 있었다.

더구나, 본 연구에서 제시한 제어가 종전의 최소 분산제어기 보다 수렴속도와 부하변동에 따른 회복속도가 우수함을 알 수 있었다.

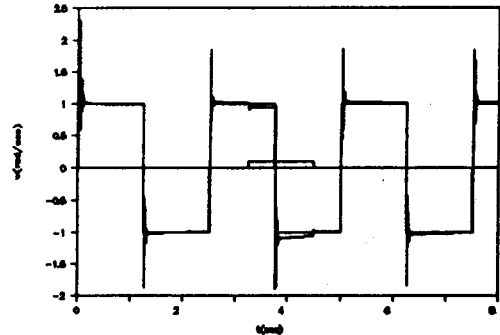


a) PID 제어

6. 결론

본 연구에서는 직류 서보전동기의 제어에 강인한 자기동조 제어이론을 적용하였다. 제안된 제어기의 성능을 비교하기 위해 고전적인 PID와 종전의 최소분산 제어이론과 비교하여 부하변동에서도 수렴속도 및 부하에 대한 회복능력이 우수함을 보였다.

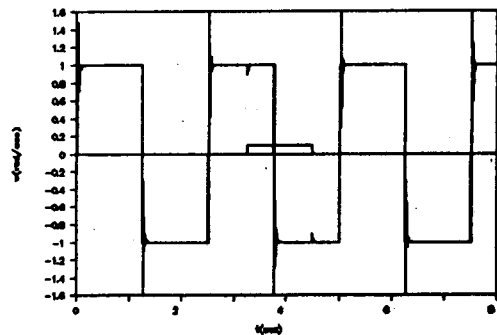
제안된 제어기는 전동기의 매개변수를 추정하는 추정부분과 입력을 공급하는 제어기로 구성되며 불완전한 매개변수 추정하에서도 부하변동에 의한 입력과 출력의 오차를 보상하며 기준 입력을 추종함을 알 수 있었다.



b) 최소 분산제어 (MVC)

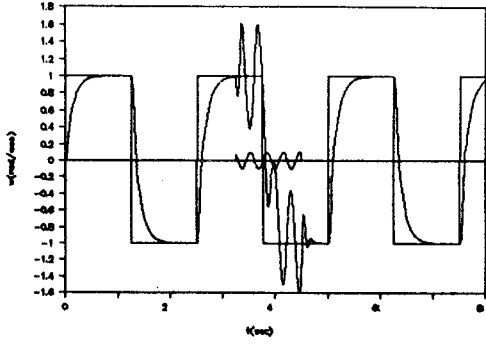
7. 참고 문헌

- 1) B.K.Bose, Power Electronics and AC drives, Prentice Hall, 1986.
- 2) B.Courtial and I.D.Landau, "High speed adaptation system for controlled electrical drives.", Automatica, vol.11, pp.119-127, 1975.
- 3) D.W.Clarke and P.J.Gawthrop, "Self tuning control," Proc. IEE, vol.126, 1979, pp 633-640.
- 4) Astrom, K.J. and B.Wittenmark, "Computer controlled systems theory and design," Prentice Hall editions, 1984.
- 5) Graham C.Goodwin, et.al., "Adaptive filtering prediction and control," Prentice Hall editions, 1984.
- 6) Tung Sang Ng, et.al., "Representation and transient behaviour of self-tuning controller for deterministic disturbances," IEE Proceedings, vol.133, No.6, november, 1986.
- 7) P.k.Nedam, P.C.Sen, "Analog and digital speed control of DC drives using proportional-integral control techniques," IEEE trans. vol. IE-34, No.2, May 1987.
- 8) 박경일의 2인, "자기동조제어 방식에 의한 직류 전동기의 속도제어," 대한 전자공학 회지, 제2권 제2호, 1985년 3월.
- 9) B.C.Kuo, "Incremental motion control," SRL Publishing company 1978.

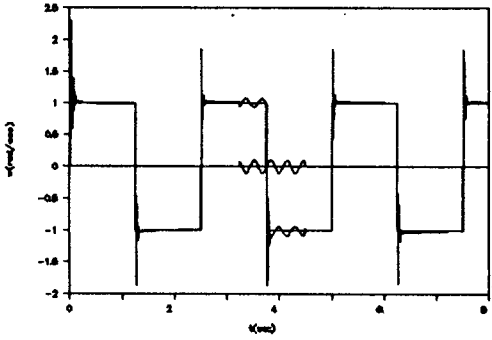


c) 본 연구의 MVC

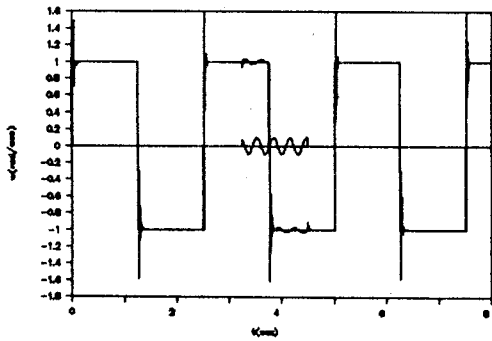
그림 3. 일정크기의 부하를 가한 경우



a) PID 제어



b) 최소 분산제어 (MVC)



c) 본 연구의 MVC

그림 4. 정현적인 부하를 가한 경우