



## 직류 서어보 전동기 제어를 위한 직접 극배치 PID 자기동조 제어기의 설계

$$d_0 = k_p \left( 1 + \frac{T_0}{2T_i} \right) \quad d_1 = k_p \left( \frac{T_0}{2T_i} - 1 \right)$$

$$f = \frac{2 k_p T_d}{T_0 + 2T_i} \quad e = \frac{T_0 - 2T_i}{T_0 + 2T_i}$$

따라서, 식 (2.3) 을 다항식 형태로 표현하면,

$$U(k) = \left[ \frac{D(z^{-1})}{I(z^{-1})} + \frac{F(z^{-1})}{E(z^{-1})} \right] [U_r(k) - y(k)] \quad (2.6)$$

$$= \frac{D(z^{-1}) E(z^{-1}) + F(z^{-1}) I(z^{-1})}{I(z^{-1}) E(z^{-1})} [U_r(k) - y(k)]$$

여기서, 다음과 같은 다항식을 정의한다.

$$N(z^{-1}) = D(z^{-1}) E(z^{-1}) + F(z^{-1}) I(z^{-1}) \quad (2.7)$$

$$M(z^{-1}) = I(z^{-1}) E(z^{-1}) \quad (2.8)$$

그러므로, 전체 폐루프 시스템은 다음과 같이 표현된다.

$$y(k) = \frac{z^{-1} B(z^{-1}) N(z^{-1})}{A(z^{-1}) M(z^{-1}) + z^{-1} B(z^{-1}) N(z^{-1})} U_r(k) \quad (2.9)$$

결국 그림 1 의 구조에서 기존 입력과 시스템 출력의 오차에 대하여 제어기 출력을 구할 수 있다.

단,

$$M(z^{-1}) u(k) = N(z^{-1}) e(k)$$

$$N(z^{-1}) = I(z^{-1}) E(z^{-1}) = (1 - z^{-1})(1 + \alpha z^{-1}) \quad (2.10)$$

$$M(z^{-1}) = D(z^{-1}) E(z^{-1}) + F(z^{-1}) I(z^{-1})$$

$$= (d_0 + d_1 z^{-1})(1 + e z^{-1}) + f(1 - z^{-1})^2$$

$$= n_0 + n_1 z^{-1} + n_2 z^{-2} \quad (2.11)$$

$$e(k) = U_r(k) - y(k)$$

여기서 나타나는 독립된 매개변수의 값을 적당히 선정해 주어야 하는데 이 매개변수들을 선정하기 위하여 다음 장에서 직접 극배치 PID 자기 동조기를 설계하기로 한다.

### 3. 직접 극배치 PID 자기동조제어기의 설계

폐 루프 전달함수가 식 (2.9) 이고, 또한 폐 루프가 안정하고 기준입력  $U_r$ 로부터 출력값까지의 전달함수가 다음과 같이 표현된다고 하자.

$$G_m(z^{-1}) = \frac{z^{-1} B_m(z^{-1})}{A_m(z^{-1})} \quad (3.1)$$

여기서,  $A_m, B_m$  은 서로 소이며,  $A_m$  다항식은 monic 이다. 또한  $G_m(z^{-1})$  의 극점들은 단위 원안에 존재하는 안정극으로 설정한다. 따라서, 표준 이산시간 PID 제어기는 독립된 4 개의 매개변수들 가지므로 이 매개변수들을 이용하여 폐루프 시스템의 극을 원하는 위치로 배치시킬 수 있다. 이를 위해서는 제어기 다항식  $N(z^{-1})$  과  $M(z^{-1})$  이 다음의 극배치 방정식을 만족시켜야 한다.

$$A(z^{-1})M(z^{-1}) + z^{-1} B(z^{-1})N(z^{-1}) = A_m(z^{-1}) \quad (3.2)$$

$$A_m(z^{-1}) = 1 + A_m z^{-1} + \dots + A_m z^{-n} \quad (3.3)$$

식 (3.2) 가 성립하면 기준입력  $U_r(k)$  와  $y(k)$  사이의 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{z^{-1} B(z^{-1})N(z^{-1})}{A(z^{-1})N(z^{-1}) + z^{-1} B(z^{-1})M(z^{-1})} = \frac{z^{-1} B_m(z^{-1})}{A_m(z^{-1})} \quad (3.4)$$

본 연구에서는  $A(z^{-1})$  과  $B(z^{-1})$  의 계수는 모르는 상태에서 오직 시스템의 입력과 출력만을 직접 측정하여 이로부터 원하는 제어 목적을 이루는 직접 극배치 PID 자기동조 제어기를 설계하고자 한다. 이러한 제어기 설계 방법으로 제어기 매개변수들을 선형적으로 추정하는 기존 선형 매개변수 추정법을 유도하기 위하여 Diophantine 방정식을 도입하자.  $A(z^{-1})$  과  $B(z^{-1})$  이 서로 소라는 가정에 의해 다음의 Diophantine 방정식이 성립된다.

$$A(z^{-1}) C_0(z^{-1}) + z^{-1} B(z^{-1}) D_0(z^{-1}) = I \quad (3.5)$$

여기서,

$$C_0(z^{-1}) = 1 + c_1 z^{-1}$$

$$D_0(z^{-1}) = d_0 + d_1 z^{-1} \quad (3.6)$$

$$D(z^{-1}) = k_0 D_0(z^{-1}) = d_0 + d_1 z^{-1}$$

$$N(z^{-1}) = k_0 C_0(z^{-1}) = k_0 + c_1 z^{-1} \quad (3.7)$$

여기서, 계수  $k_0$ 는 0 이 아닌 임의의 상수이다. 따라서 Diophantine

방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$A(z^{-1})C(z^{-1}) + z^{-1}B(z^{-1})D(z^{-1}) = k_0 \quad (3.8)$$

식 (3.8) 에서 우변을 이와 같이  $k_0$  로 놓은 이유는 다음에 유도될 방정식에서  $k_0$  를 매개변수로 사용하기 위함이며,  $k_0$  는 이 방정식으로 부터 유일하게 결정된다. 식 (3.8) 을 만족시키는 다항식  $D(z^{-1})$  과  $C(z^{-1})$  은  $k_0$  의 값에 따라 무수히 존재한다. 그러나 식 (3.5) 를 만족시키는 다항식  $D_0(z^{-1})$  과  $C_0(z^{-1})$  는 Diophantine 방정식 특성에 의하여 유일하게 결정된다. 식 (3.8) 의 Diophantine 방정식이 성립하면, 이 관계식을 이용하여 식 (3.2) 를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$A(z^{-1})M(z^{-1}) + z^{-1} B(z^{-1}) N'(z^{-1}) + z^{-1} B(z^{-1})$$

$$= (1/k_0)[A(z^{-1})C(z^{-1}) + z^{-1} B(z^{-1})D(z^{-1})]A_m(z^{-1})$$

$$= (1/k_0)z^{-1} B(z^{-1})D(z^{-1})A_m(z^{-1})$$

$$+ (1/k_0)A(z^{-1})C(z^{-1})A_m(z^{-1}) \quad (3.9)$$

단,  $N'(z^{-1}) = N(z^{-1}) - 1$

다시, 식 (3.9) 의 양변에  $x(k)$  을 곱하면 다음과 같다.

$$A(z^{-1})M(z^{-1})x(k) + z^{-1} B(z^{-1})N'(z^{-1})x(k) + z^{-1} B(z^{-1})x(k)$$

$$= (1/k_0)z^{-1} B(z^{-1})D(z^{-1})A_m(z^{-1})x(k)$$

$$+ (1/k_0)A(z^{-1})C(z^{-1})A_m(z^{-1})x(k) \quad (3.10)$$

첫식에서 식 (2.2-a) 와 (2.2-b) 를 적용시켜  $y(k)$  에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$y(k) = -M(z^{-1})u(k) - N'(z^{-1})y(k) + (1/k_0)D(z^{-1})A_m(z^{-1})y(k)$$

$$+ (1/k_0)C(z^{-1})A_m(z^{-1})u(k) \quad (3.11)$$

식 (3.11) 은 결국 극배치 방정식과 Diophantine 방정식을 이용하여 시스템 입, 출력 사이의 관계를 나타낸 것으로서 직접제어기 방법이 Diophantine 방정식으로 부터 유도됨을 알 수 있다. 이를  $u(k)$  와  $y(k)$  사이의 전달함수로 나타내면 다음과 같다.

$$y(k) = \frac{k_0 M(z^{-1}) - A_m(z^{-1}) C(z^{-1})}{A_m(z^{-1}) D(z^{-1}) - k_m N(z^{-1})} u(k) \quad (3.12)$$

전체 전달함수는

$$y(k) = \frac{[k_0 M(z^{-1}) - A_m(z^{-1})C(z^{-1})]N(z^{-1})}{A_m(z^{-1})[M(z^{-1})D(z^{-1}) - N(z^{-1})C(z^{-1})]} U_r(k) \quad (3.13)$$

식 (3.11) 을 정리하면 다음식과 같다.

$$y(k) = P^T \Phi(k) \quad (3.14)$$

여기서,

$$\Phi(k)^T = [\Phi_1(k)^T; \Phi_2(k)^T] \quad (3.15)$$

$$P^T = [P_1^T; P_2^T] \quad (3.16)$$

$$\Phi_1(k)^T = [(z^{-1}-1)u(k-1), -y(k), -y(k-1), -y(k-2)]$$

$$\Phi_2(k)^T = [A_m(z^{-1})y(k), A_m(z^{-1})y(k-1), A_m(z^{-1})u(k-1), A_m(z^{-1}) - 1 + z^{-1})u(k)] \quad (3.17)$$

$$P_1^T = [m, n_0, n_1, n_2] \quad (3.18)$$

$$P_2^T = [d_0', d_1', c_1', 1] \quad (3.19)$$

$$d_0' = d_0/k_0 \quad (3.20)$$

$$d_1' = d_1/k_0$$

$$c_1' = n_1/k_0$$

식 (3.18) 의 마지막 항에서 다항식  $A_m(z^{-1})$  의 상수항은 1 이므로 상수항은 서로 상쇄되어 결과항의 다항식은  $A_m(z^{-1})$  부터 시작된다. 벡터  $P_1$  은 제어기 매개변수로 되어있고 벡터  $P_2$  는 Diophantine 방정식의 도입으로 인한 추가 매개변수로 구성되어 있으며, 이 추가 매개변수들은 다항식  $C_0(z^{-1})$  와  $D_0(z^{-1})$  의 계수들이다. 또한 벡터  $\Phi(k)$  는 시스템 입력과 출력으로 구성된다. 여기서, 제어기 매개변수는 RLS 매개변수 추정 알고리즘으로 추정하고, 추가 매개변수들은 제안된 방정식을 이용하여 구하므로써 Diophantine 방정식의 도입에 의한 임의의 극배치를 피할 수 있게 되어 특성 방정식은 원래의  $A_m(z^{-1})$  이 된다.

$$y(k) = \frac{k_0 M(z^{-1}) - A_m(z^{-1})C(z^{-1})}{A_m(z^{-1})D(z^{-1}) - k_0 N(z^{-1})} u(k) \quad (3.22)$$

$$A(z^{-1})y(k) = z^{-1}B(z^{-1})u(k) \quad (3.23)$$

식 (3.22) 과 (3.23) 은 등가식 이므로 다음과 같은 식이 성립한다.

$$A(z^{-1}) = A_m(z^{-1})D(z^{-1}) - k_0 N(z^{-1}) \quad (3.24)$$

$$z^{-1} B(z^{-1}) = k_0 M(z^{-1}) - A_m(z^{-1})C(z^{-1}) \quad (3.25)$$

식 (3.24) 과 (3.25) 가 성립하기 위하여는 다항식  $A_m(z^{-1})$  의 차수가 1 보다 작거나 같아야 한다. 식 (3.24) 에서  $A(z^{-1})$  과  $N(z^{-1})$  의 차수가 2 이므로 주어진 다항식  $A(z^{-1})$  과  $N(z^{-1})$  에 대하여 매개변수  $d_0, d_1, c_1$  에 의해 식 (3.24) 는 항상 성립한다. 또한 식 (3.24) 에서 양 변의 상수항이 0 인 2 차식이므로 주어진 다항식  $B(z^{-1})$  과  $N(z^{-1})$  에 대하여 매개변수  $k_0$  와  $c_1$  에 의해 식

(3.25) 는 항상 성립한다. 그러므로 식 (3.24) 와 식 (3.25) 를 동시에 만족시키는 매개변수  $K_0$  의 값을 구하기 위해 위의 두 식을 한 식으로 유도하면 다음의 방정식이 성립한다.

$$M(z^{-1})D(z^{-1}) - N(z^{-1})C(z^{-1}) = I \quad (3.26)$$

따라서, 식 (3.26) 은 앞으로 추정될  $M(z^{-1})$  과  $N(z^{-1})$  을 사용하여 추가 매개변수  $C(z^{-1})$  과  $D(z^{-1})$  을 구하는 데 사용된다. 만일  $M(z^{-1})$  과  $N(z^{-1})$  이 각각 식 (3.24) 와 식 (3.25) 의 형태를 갖는다면,  $M(z^{-1})$  과  $N(z^{-1})$  은 서로 소인 다항식이 되어, 식 (3.26) 의 해가 항상 존재한다. 또한  $A(z^{-1})$  과  $N(z^{-1})$  이 서로 소라는 가정에 의해  $K_0$  는 0 이 될 수 없으므로 추가 매개변수  $P_2$  내의 값들이 존재한다. 그러므로 추가 매개변수  $P_2$  는 앞으로 추정될 제어기 매개변수  $P_1$  을 사용하여 위의 방정식으로부터 구할 수 있다. 이상으로 시스템 다항식  $A(z^{-1})$  과  $B(z^{-1})$  을 모른다고 가정하여 PID 구조의 선형 제어기를 설계하였다. 제어기 매개변수를 추정해 내는 반복 최소화자매 매개변수 추정 알고리즘은 다음과 같다.

$$\hat{P}(t) = \hat{P}(t-1) + \frac{P(t-1)\hat{\Phi}^T(t-k)}{1 + \hat{\Phi}(t-k)R(t-1)\hat{\Phi}^T(t-k)} [y(t) - \hat{\Phi}(t-k)\hat{P}(t-1)]$$

$$R(t) = \frac{1}{\sigma} [R(t-1) - \frac{R(t-1)\Phi^T(t-k)\Phi(t-k)R(k-1)}{\sigma + \Phi(t-k)R(t)\Phi^T(t-k)}] \quad (3.28)$$

여기서, 망각인수  $\sigma$  는  $0.9 \leq \sigma \leq 1$ 이며,  $P$  는 추가된 제어기의 매개변수이다.

4. 시뮬레이션

제안된 직접 극배치 PID 자기동조 제어기의 응답특성을 알아보기 위하여 다음의 이산 방정식으로 나타난 3 종류의 시스템을 제어 대상으로 하여 컴퓨터 시뮬레이션을 하였다. 이때, 이용한 컴퓨터는 IBM-PC/AT 이고, 언어는 Turbo-C 를 사용하였다. 기준 입력은  $\pm 1$ ,  $\pm 1$ 로 변화하는 구형파이고, 이에 대해 정상상태에서 부하 외란을 가했을 때의 출력을 관찰하였다. 이때, 초기 매개변수  $P(0) = [0.1, 0.1, 0.1, 0.1]$  이고 망각인수  $\sigma$  는 1.0 하였다. 또한 페 루우프 특성방정식  $\Delta m(z^{-1})$  은 모두 1로 하였다.

그림 2 는 다음과 같은 극(-0.75, 0.35)와 영점(0.5)가 모두 단위 원 내에 존재하는 최소위상 시스템에 대한 시뮬레이션 결과이다.

$$A(z^{-1}) = 1 + 0.4z^{-1} - 0.2625z^{-2}$$

$$z^{-1}B(z^{-1}) = z^{-1}(1 - 0.5z^{-1})$$

그림 3 은 다음과 같은 불안정한 극 (1.4, 1.3) 과 불안정한 영점 (2) 를 갖는 비최소 위상 시스템이다.

$$A(z^{-1}) = 1 - 2.7z^{-1} + 1.82z^{-2}$$

$$z^{-1}B(z^{-1}) = z^{-1}(0.5 + z^{-1})$$

또한 그림 4 는 다음과 같은 불안정한 극 (1.5) 와 안정한 극 (0.9) 불안정한 영점 (-2.5) 를 갖는 비최소 위상 시스템이다.

$$A(z^{-1}) = 1 - 2.0z^{-1} + 0.99z^{-2}$$

$$z^{-1}B(z^{-1}) = z^{-1}(0.5556 - z^{-1})$$

그림 2 에서와 같이 극, 영점이 모두 안정한 영역에 존재할 경우에 대한 응답특성은 매우 안정하여 7-8 스텝 이후에는 급격히 변하는 출력값이 정상상태에 도달해서 시스템 입-출력이 일치하게 되었다. 그러나, 그림 3 에서와 같은 비최소 위상 시스템인 경우는 급격히 변하는 기준 입력에 대해 출력이 발진이 생겼다. 그러나 약 25 스텝에서는 기준 입력과 같은 응답특성이 보였으며 80 스텝, 150 스텝 등에서는 점진적으로 이 발진도 줄어들어 계속되는 기준 입력의 변화에 신속히 대처함을 보여주었다. 마지막으로 그림 4 도 마찬가지로 좋은 응답 특성을 얻었지만 출력이 약간 찌그러짐을 알 수 있었다.

5. 적용실험 및 결과

본 연구에서 제안한 직접극배치 PID 자기동조 제어기를 KED-1 로보트의 전기자 제어 직류 전동기(Japan Servo DM 60 HP)에 적용 하여 무부하 실험과 0.25 Kg 의 편심 부하를 전동기 축의 한쪽 부분에 연결하고, 0.1 Kg 의 관성부하를 전동기 축에 연결하여 실험을 하였으며 이에 대한 결과를 그림 5, 6, 7 에 나타내었다. 이 때 사용한 부호기(Koyo Electronics TRD -J1000-RZ)의 분해능은 1 회전당 1000 펄스이다. 또한 실험 시스템의 출력은 전동기 축에 연결된 회전형 부호기의 회전수에 비례하는 펄스로 나타난다. 시스템의 출력 값은 부호기의 출력 펄스를 받아들이며 정해진 기간(표본화 시간) 동안 제어된 값으로 나타내며, 이 값을 제어 알고리즘에 사용하였다. 로보트 매니퓰레이터의 구동장치인 직류 전동기의 속도 및 위치 제어를 수행하기 위하여 설계, 제작한 하드웨어는 컴퓨터와 시스템과의 접속 회로, PWM 파형 발생회로, 전동기 구동회로, 전동기 회전방향 검정회로, 부호기의 연결된 전동기 회전방향 검정회로, 위치속정 계수기 회로, 속도속정 계수기 회로 등으로 구성되어 있다. 직접극배치 PID 적용제어 알고리즘은 IBM-PC/AT 에 의하여 소프트웨어로 처리하였으며, 이것의 출력을 PWM 신호 발생부에 공급하여 직류 전동기를 구동하였다. [14][15]

적용실험에서의 초기 매개변수  $P(0) = [0.1, 0.1, 0.1, 0.1]$  로 하였고, IBM PC/AT 상에 Turbo - C 언어를 사용하였고, 표본화 주기는 52 [ms] 로 하였다. 그림 5 는 전동기가 무부하일 경우 직접 극배치 PID 자기동조 제어 방식 적용 하였을 때의 출력, 제어입력과 매개변수를 나타낸 것으로 기준입력을 추종하는 데 시간 스텝은 약 50 에 스텝정도 소모되었다. 그러나 약간의 오실레이션이 발생한 이유는 전동기속과 부호기 사이의 커풀링 때문이다. 따라서 이같이 리듬은 제어대상 시스템에서 최소 또는 비최소 위상에 관계없이 기준입력을 추종함을 알 수 있다.

부하변동시의 제어시스템의 적응성을 조사하기 위해 부하를 변동시켰을 때의 응답을 알아보기 위해 0.25 Kg 의 편심부하를 전동기 축의 한쪽 방향에 연결하였을 때의 결과를 그림 6 에 나타내었다. 그림 6 에서 기준 속도를 100으로 추종했을때의 출력과 제어입력을 나타내었으며 정상상태에서 약간의 진동을 나타냈다. 위의 결과로 미루어 편심부하를 연결하였을 때 시스템의 극, 영점이 모두 불안정한 비최소 위상 시스템으로 되었음을 알 수 있었고, 기준입력이 바뀔 때 마다 상당한 진동이 있음을 볼 수 있었다. 이 문제는 극 영점배치 기법이나 적분제어기를 사용함으로써 위와 같은 진동과 시간지연을 개선할 수 있을 것이다. 이때의 매개변수는 원하는 기준입력을 추종할 수 있는 제어기 매개 변수가 되면 점진적으로 일정 값에 수렴하는 것을 알 수 있었다. 그림 7 은 0.1 Kg 의 관성 부하를 전동기 축에 연결했을때의 출력, 제어입력, 매개변수를 나타냈다. 이때에는 비교적 진동이 줄어들음을 알 수 있었다.

6. 결론

본 연구에서는 직접극배치 PID 자기동조 제어기를 구성하여 로보트 매니퓰레이터 제어용 직류 서어보 전동기의 속도 제어에 적용하였다. 이의 성능을 구현하기 위하여 시뮬레이션과 적용실험을 통하여 부하 및 무부하시의 수렴속도를 조사하였다. 본 제어기는 제어대상 시스템 영점의 안정성 여부에 관계없이 적용 가능함을 확인하였으며, 이 결과로 바탕으로 직류 서어보 전동기를 제어대상으로 선정하여 이 전동기의 속도 제어를 실험하여 실제 전동기의 제어에 직접 극배치 PID 자기동조기 이론을 적용하여 양호한 결과를 얻었다. 또 제어 대상의 모델을 구하지 않고도 매개변수 추정으로 과도 상태의 시간과 초과량을 줄일 수 있었으며, 정상 상태 오차를 현저하게 감소시킬 수 있었다. 직류 전동기에 직접 극배치 PID 자기동조기를 적용한결과 기준입력을 잘 추종하는 것을 확인하였으며, 또한 신속하고 정교한 속도 및 위치제어를 수행할 수 있어 정밀한 속도 및 위치제어를 요구하는 로보트나 공작기계, 자동화 기계 기구등의 제어에 직접 극배치 PID 자기동조제어기를 적용할 수 있을 것이다.

[참고 문헌]

- [1] F. Cameron and D. E. Seborg, "A Self-tuning Controller with a PID structure," Int. J. Contr., Vol.38, No.2, 1983.
- [2] B. Wittenmark, "Self-tuning PID Controllers Based on Pole Placement," Dept. of Auto. Contr., Lund Inst. of Tech., Lund, Sweden, Rep., No. LUF22/(TFRT-7179)/1/0371/, 1979.
- [3] R. Ortega and R. Kelly, "PID Self-tuners: Some Theoretical and Practical Aspects," IEEE Trans. Ind. Elec., Vol. IE-31, No.4, Nov.1984.
- [4] K.J. Astrom and B. Wittenmark, Adaptive Control. Weseley, Inc., 1989.
- [5] R.V. Monopoli, "Model reference adaptive control with an augmented error signal", IEEE Trans. Automa. Contr., Vol. AC-19 No.5, pp.474-484, Oct.1974.
- [6] Y.D. Landau, "Adaptive Control-The Model Reference Approach", Marcel Dekker, Inc. 1979.
- [7] A.Y. Allidina, F.M. Hughes, "Self-tuning controllers for deterministic systems", In Vol.37, No.4, pp.831-841, 1983.
- [8] K.J. Astrom, B. Wittenmark, "On Self-tuning regulators," Automatica, Vol.9, pp. 185-199 1973.
- [9] R. Lozano L., "Convergence analysis of recursive identification algorithm with forgetting factor" Automatica, Vol. 19, No.1, 1983.
- [10] H. Elliott, "Direct Adaptive Pole placement with Application to Nonminimum Phase System" IEEE Trans. Automat. Contr., Vol.AC-27, June 1981.
- [11] G.C. Goodwin and K.S. Sin, "Adaptive Filtering Prediction and Control, Prentice Hall, 1984.
- [12] G.C. Goodwin and K.S. Sin, "Adaptive control of nonminimum phase systems", IEEE Trans. Automat. Contr., Vol.AC-26, No.2, pp.478-483, Apr. 1981.
- [13] 김 중환, "비최소 위상 시스템에 대한 직접 극배치 PID 자기동조기 및 적응제어기에 관한 연구" 서울대학교 대학원 박사학위논문, 1987.
- [14] 손 재현, "HERO 2000 로보트 매니퓰레이터의 이동궤적 추적기 설계에 관한 연구" 건국대학교 대학원 석사 학위논문, 1988.
- [15] 윤 희성, 이규영, 정 철, 남 문현, "비최소위상 시스템에 대한 직접 극배치 PID 자기동조기의 설계", 대한 전기학회, 대한 전자공학회 제어계측 연구회 합동학술 발표 논문집, pp.35-39, 6, 1989.
- [16] Y.D.Landau, "Elimination of the real positivity condition in the design of parallel MRAS", IEEE Trans., Automat. Contr., Vol. AC-23-No. 6, pp.1015-1020, Dec. 1978.

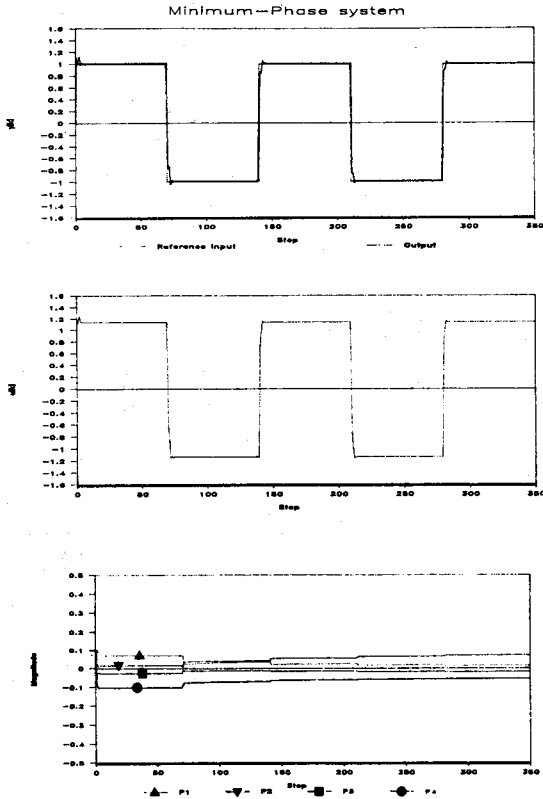


그림 2 직접 극배치 PID 자기 동조제어기 (최소위상 시스템)  
(a) 기준 입력과 출력 (b) 제어 입력  
(c) 제어기 매개변수

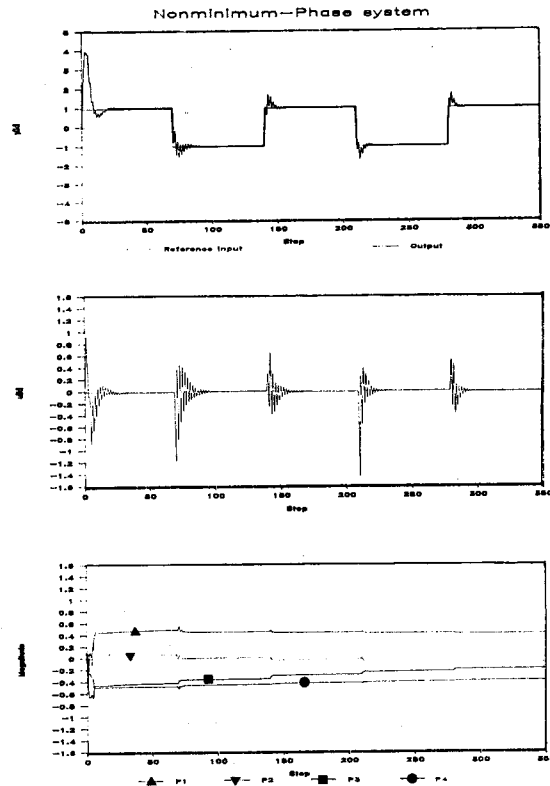


그림 3 직접 극배치 PID 자기 동조제어기 (비최소위상 시스템)  
(a) 기준 입력과 출력 (b) 제어 입력  
(c) 제어기 매개변수

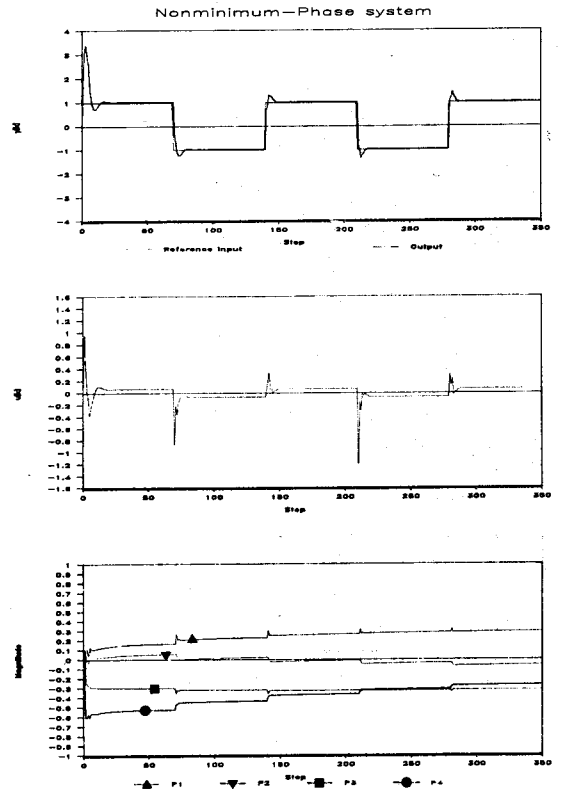


그림 4 직접 극배치 PID 자기 동조제어기 (비최소위상 시스템)  
(a) 기준 입력과 출력 (b) 제어 입력  
(c) 제어기 매개변수

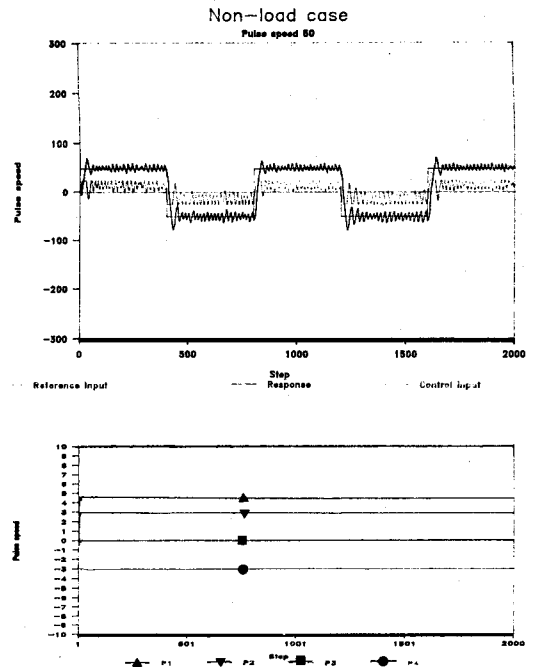


그림 5 직접 극배치 PID 자기 동조기 (무부하인 경우)  
(a) 기준 입력, 출력 제어 입력 (b) 제어기 매개변수

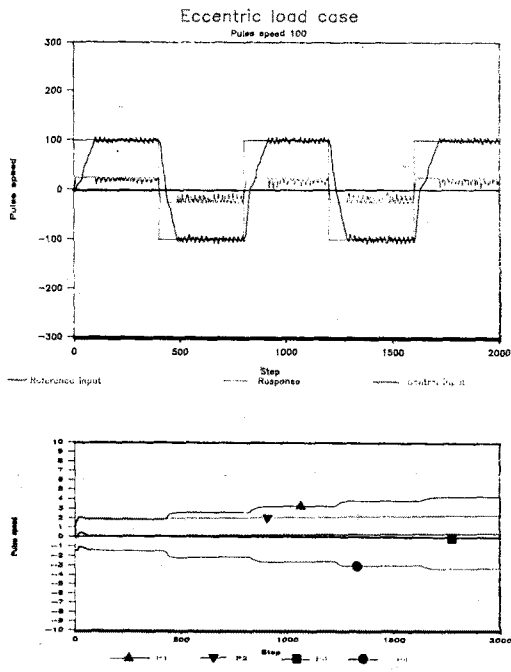


그림 6 직접 극배치 PID 자기 동조기 (편심부하인 경우)  
(a) 기준 입력, 출력 제어 입력 (b) 제어기 매개변수

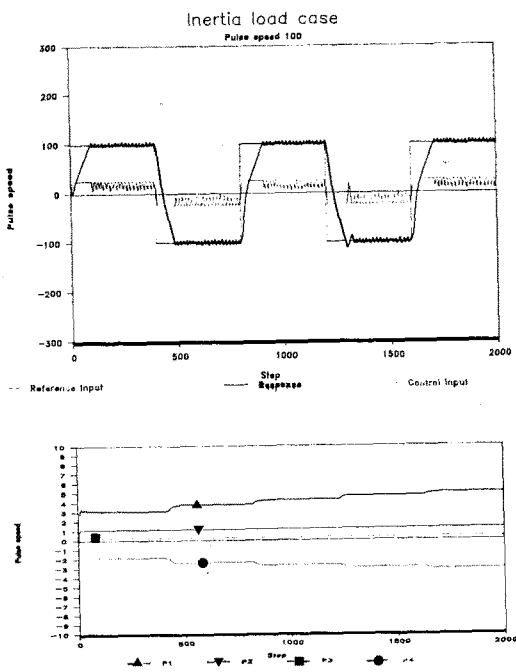


그림 7 직접 극배치 PID 자기 동조기 (관성부하인 경우)  
(a) 기준 입력, 출력 제어 입력 (b) 제어기 매개변수