

PM스텝 모터의 동특성 개선 및 안정화에 관한 연구

(A Study on Improvement of Dynamic Characteristic and Stability of PM Stepping Motor)

金 道 鉉*

(Do Hyun Kim)

要 約

본 논문에서는 PLL를 사용하여 2相 Bifilar 권선 PM 스텝 모터를 구동하는데 있어서 고속화 및 안정화에 관하여 연구하였다. 특히 Bode 선도를 이용하여 제어 시스템을 설계하여 안정화를 이루었으며 고속화를 위해서는 PLL를 사용했고 이때에 DC모우터와는 달리 스텝모우터의 自己起動 주파수의 한계성 때문에 생기는 제어의 문제를 해결하는 방법을 제시하였으며, 한편 스텝 모우터의 多스텝 응답 등의 복잡한 전달함수를 이용하지 않고 비교적 간단히 제어기를 설계하는 방법을 제시하였으며, 이에 대한 실험결과와 시뮬레이션의 결과는 거의 일치하였으며 이러한 설계가 매우 유용함을 보여 주었다.

Abstract

In this paper, a phase locked loop control system is designed to have high performance and stability in a 2-phase bifilar winding PM step motor. The BODE diagram analysis method is used to improve the stability and dynamic characteristic of the closed loop control system. Also, a PLL servo is used to accomplish high-precision speed and to attain smooth ness. In applying the PLL control to the step motor, a new design method is suggested to solve the control problem which occurs as a result of the limited maximum acceleration of the step motor. A simple design method is suggested without using the complicated multi-step characteristic of the step motor in constant voltage driving. computer simulation results agree closely with experiments, indicating that the PLL servo system of the step motor designed is very useful.

I. 서 론

스텝모우터는 외부에서 가하는 스텝 펄스에 따라 동작이 된다. 이러한 개-루우프 제어는 널리 사용되고 있으며 다른 기종의 모우터에 비하여 스텝모우터는 안정되어 있다. 그러나 개-루우프 제어는 입력 펄스의

주파수 및 부하의 영향을 받는 정도가 폐-루우프 제어보다 크며 진동하기가 쉽다.^[1]

일반적으로 제어의 정확성을 꾀하기 위하여 PLL 제어를 사용하는 폐-루우프 제어가 있으나 그 설계방법 및 구동회로 등이 상당히 복잡하다.^[2]

본 논문에서는 PLL IC, 루우프 필터, VCO, 스텝 모우터, Optical Shaft Encoder에 대한 실제의 전달함수를 구하고 Bode 선도를 이용하여 시뮬레이션으로 제어기를 설계하려고 한다.

한편 PLL제어기의 초기 구동시에 기준입력 펄스와

*正會員, 國民大學校 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., Kook-Min Univ.)

接受日字: 1986年 5月 8日

(* 본 연구는 과학재단 연구비로 이루어 졌음.)

비교 입력 펄스의 위상차가 위상 비교기의 선형관계를 벗어났을 경우에 PLL의 위상 비교기 출력은 VCO 에서 최대출력 주파수가 발생되도록 설계되어 있으므로 구동시에 가속도를 크게 하기 위해 구동주파수를 급격히 증가시키면 스텝 모우터의 경우, 회전자의 관성으로 생기는 自己起動 주파수의 한계성 때문에 회전속도가 구동펄스를 추종하지 않게 되어 회전자가 脫調하여 버리므로 페-루우프 제어가 다소 문제가 되는 수가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 흔히 PLL의 기준입력 주파수를 서서히 변화시켜 스텝 모우터가 일정한 가속도로 회전되도록 하여 원하는 회전속도까지 상승되게 하든지, 또는 VCO에 입력되는 아날로그 전압을 서서히 증가시키는 방법 등이 있다.

전자의 경우는 기준 펄스 발생기의 부분을 아날로그 회로로 간단히 구성할 수 있으나 그 기준펄스 자체가 정확성이 없으며 여러가지 기준 펄스에 대해 서서히 펄스 증가를 꾀하는 것도 어렵다. 또한 디지털 회로로 구성되는 경우, 수정 발전과 카운터에 의한 기준 펄스 자체는 정확하지만, 그 펄스를 점차적으로 가속시키는 방법도 문제가 있다.

후자의 경우는 전자의 경우와 같은 문제는 다소 해결되지만 페-루우프에 있어서 루우프 필터의 지연과 VCO의 입력전압증가로 인한 지연이 상호간에 엇갈린 작용을 할 경우 VCO의 최대발생 주파수 이하의 속도로 구동할 때에는 모우터 속도의 오우버슈우트를 피하기가 어렵다. 이러한 현상을 감안하여 본 연구에서는 일정한 속도까지의 스텝모우터의 가속에 있어서는 위상비교기와 루우프 필터 사이에 전압 감산기를 설치하여 위상비교기의 출력과 가속 또는 감속시키기 위한 일정한 기술기의 적분기 출력의 차를 루우프 필터의 입력에 가하는 방법을 제시함으로써 상기의 문제점을 쉽게 해결하려고 한다.

이상과 같이 하여 설계된 페-루우프의 PLL 제어기를 구성하여 실험을 하여 얻은 실험결과와 시뮬레이션의 설계에 의한 결과가 일치한다는 것을 보임으로써 본 논문에서의 설계방법이 유용함을 보이고 제어기 설계에 따른 복잡성을 배제하려고 한다.

II. PLL제어기 설계

제어대상인 스텝모우터를 PLL를 이용하여 제어하기 위해서 그림 1 과 같은 PLL제어기를 설계한다.

1. PLL제어기의 설계사양

- 1) 모우터는 bifilar PM형 stepper를 사용한다.
- 2) 정상 상태에서의 모우터의 속도는 기준 펄스 발생기인 수정발전기의 정밀도와 같은 수준으로 하는 것

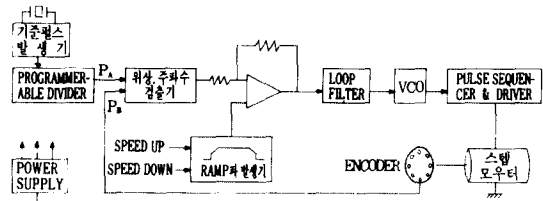


그림 1. PLL제어기의 계통도
Fig. 1. PLL controller block diagram.

을 그 목적으로 하고 최대 pulse rate는 1200pps 정도로 하며 기준 펄스 속도는 가변으로 한다.

3) 스텝모우터의 권선의 여자는 30V정도의 DC 정전압원과 직렬저항을 사용하여 2相-여자방식으로 한다.

4) 고전류 스파이크에 대한 댐핑은 다이오드 댐핑으로 한다. 이러한 설계사양에 따라, 그림 1의 계통도의 각 블록의 상세한 설계와 동시에 전달함수를 각각 구하고 bode 선도로 전체시스템에 대한 안정화 및 고속성을 고려한 시뮬레이션으로 루우프필터를 설계한다.

2. 기준 펄스 발생기

스텝모우터의 구동의 기준이 되는 부분이므로 정밀 속도제어와 변속제어가 가능하게 하기 위하여 수정발전자와 NOT게이트를 사용하여 4MHz의 기본 클럭을 만들어 디지털 카운터로 구성된 programmable 분주기로 기준 펄스를 만든다.

3. 위상, 주파수 검출기

PLL과 통상의 서어보와의 차이는 기준입력이 PLL의 경우는 주기적인 신호이고, 통상의 서어보의 경우는 일정한 전압치이다.

이는 간단히 EX-OR 회로나 edge-triggered flip-flop을 사용하는 경우도 있으나 EX-OR회로를 사용하여 위상차를 검출하는 경우 선형영역이 $\pi/2$ 를 기준으로 $\pm\pi/2$ 이며 edge-triggered flip-flop을 사용하는 경우에는 선형영역이 π 를 기준으로 $\pm\pi$ 이며 이러한 위상 검출기는 기준입력펄스의 정수배의 주파수에 loop가 lock되기 쉽고 또 기준입력펄스 및 비교 펄스의 duty cycle이 50%가 되어야 하는 결점이 있다.⁴⁷⁾ 그래서 보다 나은 위상검출기로서 설계된 IC는 PLL용으로 MC4344/4044, MC14046B, MC14568B등의 것을 들 수 있으나, 여기서는 VCO가 내장된 motorola의 MC14046B를 선택하였다.

이 IC의 특성은 그림 2와 같으며 기준입력펄스의 정수배의 고조파에 lock되는 일도 없고 또 duty cycle이 50%가 되지 않은 경우에도 사용할 수 있다.

선형영역은 그림 2에서 알 수 있는 바와 같이 posi-

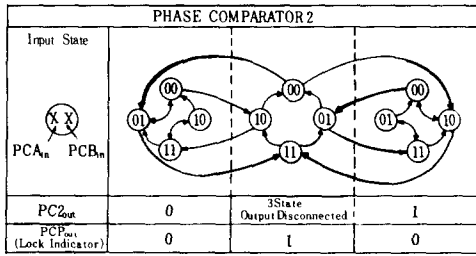


그림 2. 위상비교기의 상태 다이어그램과 파형
 Fig. 2. Phase comparator state diagrams and waveforms.

tive going-edge에서 trigger 되므로 0(zero)를 기준으로 $\pm 2\pi$ radian의 범위가 되며 이때 +5V 단일 전압을 사용할 경우, 위상검출기 출력은 5V에서 0V까지 변화한다고 가정하면 위상검출기의 전달함수는

$$K\phi = \frac{5V - 0V}{2\pi - (-2\pi)} = \frac{5V}{4\pi} = 0.398V/\text{radian} \quad (1)$$

이 된다.

4. 램프파 발생회로

이 회로의 목적은 스텝모우터의 일정한 가속 및 감속의 목적외에도 위상검출기의 기준펄스입력에 일정한 주파수가 인가되고 스텝모우터가 정지하고 있을 때 위상검출기의 출력은 +5V 가까이 나오므로 정지상태에서 갑자기 구동될 경우 VCO의 출력이 최대 주파수가 되므로, 이때 自己起動 주파수를 초과한 경우는 기동이 불가능하게 되므로 이를 방지하기 위해 램프파 발생회로에 제어회로를 넣어 정지상태에서는 VCO에 입력되는 전압이 0(zero)V가까이 되어 VCO의 최소 발생주파수 fmin이 발생되도록 하였다.

램프파의 최고전압은 3V, 최저전압은 0.5V로 선정하였다. 동작은 OP amp 1의 반전입력에 Vset로 전압이 입력되면 반전 입력단자의 전압이 비반전 입력단자보다 전압이 높으면 출력단자에는 -5V가 걸리고 OP Amp 2의 출력전압은 Vset에 이를 때까지 C1는 (2)식과 같은 일정한 전류로 충전이 된다.

$$I = \frac{5}{Rt} \quad (2)$$

새로이 콘덴서에 충전되는 전하량은

$$\Delta Q_c = I\Delta t = C_t \Delta V \quad (3)$$

에서

$$\Delta V = \frac{I}{C_t} \Delta t = \frac{5}{R_t C_t} \Delta t \quad (4)$$

가 되므로 시간 t에 대하여 $5/R_t C_t$ 의 선형적인 기울기로 충전 또는 방전을 하게 되어 램프파를 발생시킨다.^[5]

5. 루우프필터(loop filter)

PLL 회로에 저주파 여파기를 넣은 것은 첫째로 잡음제거 및 위상검출기의 출력에서 생기는 고주파성분을 제거하여 평균치 전압을 만들어 내는 것이고, 둘째로 페-루우프 전체의 안정도와 동특성을 결정하는 중요한 역할을 하게 된다.

이러한 것에는 다음의 요소가 포함된다!^[7]

- Capture와 lock의 범위
- 대역폭(bandwidth)
- 과도응답특성

이러한 것으로서 passive filter와 active filter를 고려할 수 있으나 동작의 특성등을 개선하기 위하여 일종의 적분과 비례형이 포함된 active low-pass filter를 사용하였다.

이때 전달함수는

$$\text{루우프필터} = \frac{SR_2C + 1}{SR_1C} = \frac{R_2}{R_1} - \frac{1}{SR_1C} \quad (5)$$

로 되며 VCO의 입력 동작범위가 0V에서 5V까지 이므로 비반전 입력에는 전압레벨 시프트를 시켰다.

그리고 식(5)에서와 같이 R_2/R_1 는 stop band에서의 이득을 결정하게 되는데, 이의 효과적인 여파기가 되기 위해서는 R_2 가 R_1 보다 아주 작아야 한다. ($R_2/R_1 = 1/10$)^[47]

6. VCO(Voltage Controlled Oscillator)

VCO는 앞에서 선정한 MC14046B에 내장되어 있는 것을 사용하기로 하였으며 측정결과 fcenter = 800Hz (2.5V)가 되도록 조정하였을 때, 주파수-전압관계는 1250Hz (3.15V), 400Hz (1.96V)가 되었으므로

위상에 관한 VCO 전달함수는

$$\frac{K_v}{S} = \frac{1250 - 400}{3.15 - 1.96} = \frac{714.3}{S} \text{ (pulse/V)} \quad (6)$$

가 된다.

7. 모우터(motor)

사용할려는 모우터는 1.8°/step, 1.1 A/相, Vs=4V, 권선저항=3.6Ω/相, 권선 inductance=3.6H/相, 회전

자 관성모멘트=57g·cm²인 오리엔탈의 PH264-01 bifilar형 PM스텝모우터이다.

스텝모우터에 대해서는 단일 스텝응답특성 및 연속 스텝응답 특성에 대한 전달함수가 이미 발표되어 있다.¹⁾

그러나 DC모우터와는 달리 그 전달함수가 상당히 복잡하여 본 논문에서는 정전압원을 사용하는 경우에 있어서 설계의 간편성을 꾀하기 위하여 연속 스텝응답의 경우를 가정하여 다음과 같이 모델링을 하였다.

$$\frac{K_m}{ST_m+1} \quad (7)$$

여기서 K_m은 스텝모우터의 펄스입력에 대한 회전각 상수이며, T_m은 스텝모우터에 있어서의 구동시 저항과 권선사이의 시정수이다.

따라서 K_m은 상기의 모우터 사양에서

$$K_m = \frac{2\pi \text{ radian}}{200 \text{ pulse}} = 0.0314 \text{ rad/pulse} \quad (8)$$

가 되고 T_m은 외부저항 RS가 연결되는 경우에 내부의 권선저항과 직렬이 되어 시정수가 결정되므로^{1),6)}

$$T_m = \frac{L}{R_c + R_s} = \frac{3.6 \text{ mH}}{3.6 \Omega + 30 \Omega} = 1.07 \times 10^{-4} \text{ sec} \quad (9)$$

(단, R_c는 권선의 相當 내부저항이며 직렬저항은 30V 전후의 정전압원을 사용할 경우의 1.1A/相의 전류조건을 맞추기 위하여 30Ω을 정하였음)가 된다.

8. Pulse sequencer와 motor driver

Bifilar형 PM스텝모우터를 2相 구동을 하기 위하여 표 1과 같은 스위칭모드로 펄스를 만드는 sequencer는 4bit up/down 2진 카운터와 EPROM를 사용하여 쉽게 설계할 수 있었으며 EPROM의 address 비트를 바꾸어 줌으로서 쉽게 다른 스위칭모드로 구동이 가능하며 또 2진 카운터의 up/down 단자를 임의로 선택함으로써 시계방향, 반시계방향의 회전방향 설정을 쉽게 할 수 있게 하였다. 또 motor driver는 다이링톤의 스위칭 트랜지스터를 사용하였으며 구동에 있어서는 직렬저항방식(직렬저항R_s=30Ω)을 사용하였고, 다이오드 댄핑 및 정전압원 35V를 이용했다.

표 1. 스위칭모드
Table 1. Switching mode.

Mode \ 相	A	B	\bar{A}	\bar{B}
1	ON	ON	OFF	OFF
2	ON	OFF	OFF	ON
3	OFF	OFF	ON	ON
4	OFF	ON	ON	OFF

9. Optical shaft encoder

Motor의 사양에 맞추어 200counts/turn의 분해능을 가진 多摩川 精機(TAMAGAWA SEIKI)의 TS5101 N132의 것을 사용하였으며, DC모우터의 경우와는 달리 스텝모우터의 경우에는 각 스텝의 전진시에 저속인 경우, 상당한 진동이 있으므로 오히려 고분해능의 encoder는 실제로 진동의 영향으로 기속속도가 아닌 다른 속도에 lock되므로 되도록이면 모우터의 사양과 동일한 것을 사용하는 것이 좋으며 coupling 및 선택시에 상당한 주의를 요한다.

그리고 optical shaft encoder의 전달함수는

$$K_e = \frac{200}{2\pi} \text{ (pulse/rad)} = 200 \text{ (pulse/turn)}$$

이 된다.

Ⅲ. 시뮬레이션

지금까지 구한 전달함수를 이용하여 그림 1의 PLL 제어시스템의 계통도의 각 블록에 대입하여 bode 선도를 그리기 위해 개-루우프의 전달함수를 구하면

$$G(S)H(S) = K\phi \frac{R_2CS+1}{R_1CS} \cdot \frac{K_v}{S} \cdot \frac{K_m}{T_mS+1} \cdot K_e = \frac{K(R_2CS+1)}{R_1CS^2(T_mS+1)} \quad (10)$$

또는

$$G(S)H(S) = \frac{KR_2}{T_mR_1} \frac{S + \frac{1}{R_2C}}{S^2 \left(S + \frac{1}{T_m} \right)} \quad (11)$$

여기서 K=KφK_vK_mK_e이다.

또 |G(S)H(S)| dB=20log₁₀|G(S)H(S)|

$$= 20 \log_{10} \frac{K\sqrt{(R_2C\omega)^2+1}}{R_1C\omega^2\sqrt{(T_m\omega)^2+1}} \quad (12)$$

$$\angle G(S)H(S) = -180 + \tan^{-1}(R_2C\omega) - \tan^{-1}(T_m\omega) \quad (13)$$

가 되며, 또한 기준입력 X(s)와 스텝모우터의 출력 Y(s)에 대한 폐-루우프 전달함수 G_t(S)는

$$G_t(S) \triangleq \frac{G(S)}{1+G(S)H(S)} = \frac{K\phi \frac{R_2CS+1}{R_1CS} \cdot \frac{K_v}{S} \cdot \frac{K_m}{T_mS+1}}{1 + \frac{K(R_2CS+1)}{R_1CS^2(T_mS+1)}} = \frac{K\phi K_v K_m R_2}{T_m R_1} \frac{S + \frac{1}{R_2C}}{S^3 + \frac{1}{T_m} S^2 + \frac{KR_2}{T_m R_1} S + \frac{K}{T_m R_1 C}} \quad (14)$$

그리고 정규화된 |G_t(S)| dB와 ∠G_t(S)는

$$|G_t(S)| \text{ dB} = 20 \log_{10}$$

$$\left[K \sqrt{\frac{(R_2 C \omega)^2 + 1}{(K R_1 C \omega - R_1 C T_m \omega^2)^2 + (K - R_1 C \omega^2)^2}} \right] \quad (15)$$

$$\angle G_t(S) = \tan^{-1}(R_2 C \omega) - \tan^{-1} \left[\frac{K R_2 C \omega - T_m R_1 C \omega^2}{K - R_1 C \omega^2} \right] \quad (16)$$

이상의 유도된 식으로부터 bode 선도를 개-루우프 이득과 전체의 폐-루우프 전달함수에 대하여 루우프 필터의 파라미터(parameter)를 변경하여 computer로 plotting을 하여 보았으며 여러 경우에 대해 시뮬레이션을 하였다. 그리고 설계된 PLL 제어시스템에 대해 개-루우프 이득과 정규화된 폐-루우프이득의 bode 선도를 그림 3에 나타내었다.

폐-루우프 시스템의 설계에 있어서는 위상여유는 30°~60° 정도 사이에서 설계를 하여야 하므로^[8,9] 그림 3에서와 같이 어느정도의 速應性을 갖게 하기 위하여 그림 3의 (a)와 (b)의 경우를 target으로 정하였다.

또 앞서 언급한 바와 같이 루우프 필터에서 $R_2/R_1 = 1/10$ 이 선택되었고, 설계사양에서 최대 pulse rate를 1200정도도 하였으므로 그림 3의 (b)의 시스템의 전달함수를 볼 때 -3dB 차단점이 70rad/sec 정도로 되어 있고 스텝모터의 전달함수를 고려하여 pulse rate로 환산하면 2000pps 정도가 되므로 만족스럽게 설계가 된 것을 알 수가 있다.

그림 3의 (c)와 (d)는 $C = 4.7 \mu\text{F}$ 으로 변경하였을 경우를 나타내며 위상여유가 줄어들고 대신에 -3dB 차단점이 증가하였다. 따라서 (d)의 그림은 (b)의 그림에 비해 댐핑이 상당히 줄어든 것을 알 수가 있고 전반적인 시스템은 (a)와 (b)의 경우가 (c)와 (d)의 경우보다 더 안정되어 있다.

그림 3의 (e)와 (f)의 경우는 R_2 의 값을 3.3K Ω 으로 증가시킨 것인데 (e)에서 위상여유와 -3dB 차단점이 상당히 증가한 반면에 (f)에서 보면 루우프 필터의 본래 목적인 저역역파의 기능을 제대로 수행하지 못함을 알 수가 있다.

따라서 이런 경우를 선택하여 스텝모터를 동작시킬 경우에는 위상검출기 출력의 고조파성분이나 잡음 등이 그대로 모우터에 전달되어 진동을 일으킬 위험이 있으며 특히 스텝모터의 경우는 기동이 안될 수도 있을 것이다

그림 3의 (g)와 (h)의 경우는 R_2 저항이 470 Ω 일때를 표시한 것이고 (a)와 (b)그림에 비해 위상여유와 -3dB 차단점이 동시에 줄어들었다.

그림 3의 (i)와 (j)의 경우는 R_2/R_1 의 비는 (a)와 (b)

의 경우와 동일하지만, 두저항값이 감소된 경우를 나타내었는데 위상여유가 줄어든 반면 -3dB 차단점이 상승하여 대역폭이 증가하는 경우이다.

그림 3에서 보는 바와 같이 5 가지 경우에 대해 루우프 필터의 파라미터를 변경시켜 전체의 시스템에 미치는 영향을 분석한 결과 루우프 필터의 파라미터 특성을 알 수 있으므로 회로설계를 쉽게 할 수 있으며 이것을 토대로 하여 설계된 회로가 그림 4와 같다.

IV. 실험 및 고찰

그림 4와 같은 시스템을 구성하여 시뮬레이션의 결과로 설계한 루우프 필터의 계수를 토대로 하여 각각의 경우에 대하여 실험을 하였으며 그 결과는 표 2와 같다.

그리고 시스템에서 VCO의 발생주파수를 증가시켜 가면서 개-루우프 상태에서 shaft encoder를 부착하여 사용된 모터의 최대 pulse rate를 VCO의 발생주파수를 조정해 가면서 측정하였다. 이때 脫調현상이 없이 추종하는 pulse rate는 1700pps가 되었으며 VCO 입력전압은 3.5V가 되었고, 그림 4의 PLL 제어를 하였을 때의 추종하는 최대 pulse rate는 1500pps가 되었다.

표 2에서 보면 각각의 어느 경우에 대해서나 수렴 이후의 오차는 ± 0 pps로 그 정확성에 있어서는 상당히 정확했다고 할 수 있다. 또 수렴속도도 샘플링 주기를 0.1초로 하였을 때 수렴은 각 경우에 있어서도 표 2에 표시된 바와 같이 빠른 시간내에 over shoot가 없이 수렴되었으며, 특히 R_1, R_2, C 가 각각 6.8K Ω 680 Ω , 4.7 μF 인 경우는 수렴속도는 어느 경우보다 빨랐지만, 회전시에 약간의 소음이 발생하였는데, 이는 기준 펄스와 회전자의 사이에서 동기에 있어서의 약간의 불안정한 요소를 갖고 있는데 기인하며, 시뮬레이션의 그림 3의 (c)와 (d)의 경우에서 알 수 있는 바와 같이 위상여유감소 및 -3dB 차단점의 증가로 다소 안정도가 낮아진 결과와 일치함을 알 수가 있다.

또 loop filter의 계수가 6.8K Ω 680 Ω 22 μF 인 경우는 회전시의 소음이 최소화이며, 스무우드하게 회전하는 펄스 소음이 들렸으며, 가장 적절한 경우의 값이라고 생각 된다.

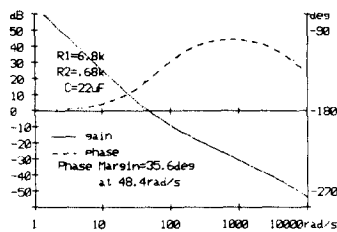
그러나 계수가 6.8K Ω 680 Ω , 10 μF 의 경우도 거의 구별을 못할 정도로 좋은 상태가 되었다.

한편 계수가 6.8K Ω 3.3K Ω 22 μF 의 경우는 진동으로 기동이 불가능했으며, 이는 시뮬레이션의 그림 3의 (e)와 (f)에서 알 수 있는 바와 같이 위상여유는 83.5°로 아주 큰 편이지만, (f)에서의 -3dB 차단점이 상당

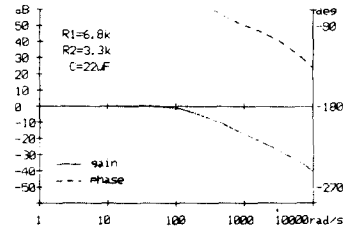
히 증가하였고, 또 다른 경우에 비하여 고역 차단특성이 좋지 않아서 위상 검출기의 불연속적인 출력이 그대로 모우터에 까지 전달되어 기동이 불가능하게 되었다.

이 경우는 loop filter가 안정도는 높였지만 저역 여파기로서의 성능 발휘가 안되었기 때문이다.

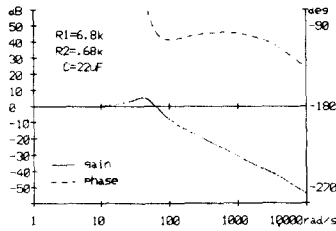
마지막의 $6.8K\Omega$, 470Ω , $22\mu F$ 의 경우는 회전시에



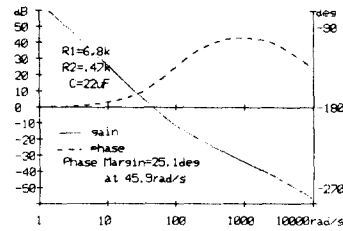
(a) 개-루우프 이득



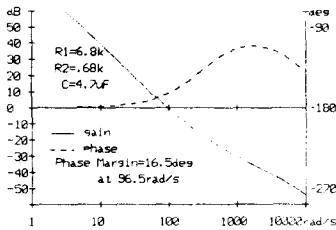
(f) 정규화된 폐-루우프 이득



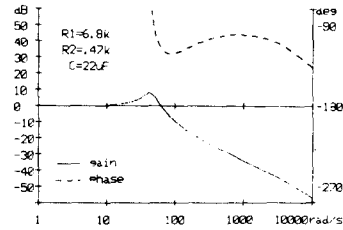
(b) 정규화된 폐-루우프 이득



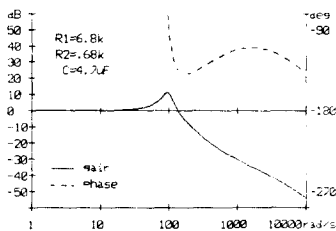
(g) 개-루우프 이득



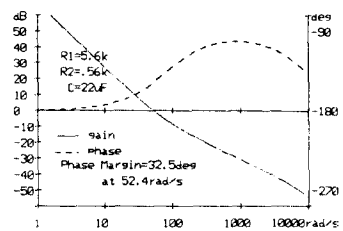
(c) 개-루우프 이득



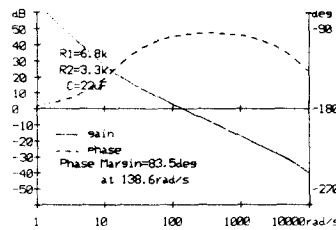
(h) 정규화된 폐-루우프 이득



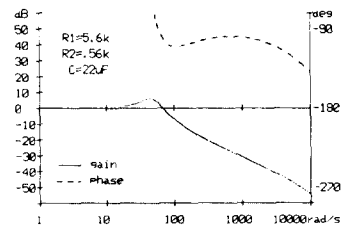
(d) 정규화된 폐-루우프 이득



(i) 개-루우프 이득



(e) 개-루우프 이득



(j) 정규화된 폐-루우프 이득

그림 3. PLL 제어 시스템의 BODE 선도
Fig. 3. BODE DIAGRAM of PLL control system.

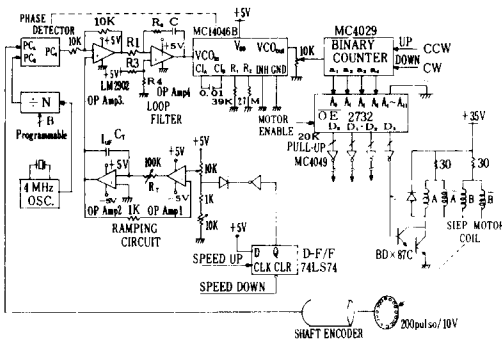


그림 4. PLL제어기 bifilar형 PM step motor system
Fig. 4. PLL controlled bifilar type PM step motor system.

표 2. 그림 4의 system의 실험결과 체크표
Table 2. Experimental results of the Fig4. system.

Loop Filter $R_1(\Omega)$ 基準 $R_1(\Omega)$ Pulse C(μF) 速度 (pps)	6.8K	6.8K	6.8K	6.8K
500	0.3 sec	0.3sec	X	0.3 sec
1000	0.3 sec	0.4 sec	X	0.4 sec
1250	0.3 sec	0.5 sec	X	0.5 sec
수렴이후의 Pulse오차(pps)	± 0	± 0	X	± 0
비 고	회전시에 약간의 소음 발생	회전시의 소음 이 최소이며 구동펄스음이 들릴정도	진동으로 회전불가	기준속도1000 PPS이상일 때 마끄러지는 듯한 소음

미끄러지는 듯한 소음이 발생했으며, 0.1초 주기의 샘플링을 했을 때 나타나지 않았지만, 기준 펄스를 순간순간에 빠르게 추종하지 못하여 이런 소음이 발생된 것으로 생각되며, 시뮬레이션의 그림 3의 (g)와 (h)에서 위상여유도 괜찮고, 고역차단 성능도 좋았지만, 단지 -3dB 차단점의 저하로 filter의 대역폭의 감소에서 이러한 현상이 일어났음을 알 수 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 bifilar형 PM 스텝모우터를 PLL 제어함에 있어서 안정도 및 동특성을 개선하기 위하여, 안정도 및 주파수 영역에서 시스템의 특성을 가장 쉽게 파악할 수 있는 bode선도를 이용하여 설계를 위

한 시뮬레이션 및 각각의 블록 별 설계와 전체 시스템의 설계에 따라 실험을 하여, 제시된 설계방법이 표 2에서의 두번째 실험결과와 같이 만족스럽게 되었음을 확인하였다.

그리고 서론에서 언급한 스텝모우터에 대한 PLL제어의 초기 구동시에 생기는 제어문제는 여기에서 제시한 위상비교기의 출력에서 램프와 발생기의 출력을 감산하여 제어하는 방법이 간단하며, 실험결과에서도 over shoot가 전혀 생기지 않았으며 모우터의 기동도 순조로웠다.

앞으로의 연구에 있어서는 스텝모우터의 순간적인 脫調時에 회전의 자동복구에 관한 것도 케투우프제어에서 이루어지면 보다 나은 제어가 될 것이다.

參 考 文 獻

- [1] Takashi Kenjo, *Stepping Motors and Their Microprocessor Controls*. CLARENDON PRESS OXFORD 1984.
- [2] Dana F. Geiger, *Phaselock Loops for DC Motor Speed Control*. JOHN WILEY & SONS.
- [3] Benjamin C. Kuo, *Theory and Applications of Step Motors*. WEST PUBLISHING CO. pp. 120-140, pp. 273-315.
- [4] A.W. Moore, *Phase-Locked Loops for Motor-Speed Control*, IEEE SPECTRUM, pp. 61-67, April, 1973.
- [5] Vithal V. Athani and Jaiprakash G. Mundhada, "High-performance translator for a high-torque PM stepping motor," *IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation*, vol. IECI-25, no. 4, pp. 343-346 Nov. 1978.
- [6] 大木創, "ステップモータの理論と應用,"實數出版株式會社
- [7] Howard M. Berlin, *Design of Phase-Locked Loop Circuits with Experiments*. Howard W. Sams & Co. Inc. pp. 24-121.
- [8] Coughanowr & Koppel, *Process Systems Analysis and Control*. McGrawhill kogakusha pp. 232-263.
- [9] Stanley M. Shinnars, *Modern Control System Theory and Application*. Addison wesely publishing company pp. 213-235.