

Tubular Type L. I. M. 을 이용한 Linear Servo 기구의  
구성에 관한 연구  
A Study on the Composition of a Linear Servo System using  
a Tubular Type L. I. M.

임 담 호                      한양대학교  
김 영 중                      한양대학교  
심 준 석\*                     한양대학교

종래에는 제어성능의 우수성과 효율성 때문에 D.C.Motor 가 Servo 용으로 많이 사용되어 왔다. 그러나 최근에 특히 FA 분야에서는 Servo Motor 의 조건으로서 고응답성이 부가되게 되었다. A.C.Motor 는 전기시정수가 작기 때문에 이 점에 있어서 D.C.Motor 보다 유리하며 정, 역전온전이 쉬운 장점이 있다. 따라서 제어의 용이성만 얻어질 수 있다면 A.C.Motor 가 Servo 용으로 적합하게 이용될 수 있다는 것을 알 수 있다. 한편 직선변위가 요구되는 Servo System 에 있어서 변환 장치가 필요없는 직선형 Motor 를 사용한다면 Motor 의 속도 제한이 제거되고 에너지 효율면에서 회전형 Motor 를 사용한 경우보다 유리하다. 따라서 본 연구에서는 Tubular Type L.I.M. 을 제작하고 이를 이용한 Servo 기구를 구성하여 제어 특성을 알아 보았다.

Tubular L.I.M. 은 저속기이기 때문에 End Effect 를 무시할 수 있으며 2차축 도체의 Overhang 부분이 없어 Edge Effect 가 존재하지 않으므로 이외 동가회로는 회전형 유도기 Servo Motor 의 경우와 같다. 따라서 2상 Servo 의 각 상에 대한 동가회로를 그림 2.1, 2.2 에 나타내었다.

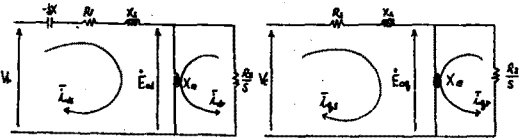


그림 2-1 기본상 동가회로                      그림 2-2 제상상 동가회로

동가회로로 부역  $\dot{I}_{dr} \dot{I}_{ds} \dot{I}_{qr} \dot{I}_{qs}$  는 식 2.1)-2.4)와

같다.

$$\dot{I}_{dr} = -\dot{I}_{ds} \frac{jX_m}{R_2/s + jX_m} = -\dot{I}_{ds} \frac{j1}{sG + j1} \quad \text{--- 2.1)}$$

$$\dot{I}_{ds} = \frac{\dot{V}_r}{R + j(X - X_c)} \quad \text{--- 2.2)}$$

$$\dot{I}_{qr} = -\dot{I}_{qs} \frac{j1}{1/sG + j1} \quad \text{--- 2.3)}$$

$$\dot{I}_{qs} = \frac{\dot{V}_c}{R + jX} \quad \text{--- 2.4)}$$

여기서,  $R + jX = R_1 + jX_1 + \frac{jX_m R_2/s}{jX_m + R_2/s}$

s : slip

G : Goodness Factor ( $= \frac{X_m}{R_2}$ )

$$\therefore \dot{E}_{od} = -\dot{I}_{dr} \frac{R_2}{s} \quad \text{--- 2.5)}$$

$$\dot{E}_{oq} = -\dot{I}_{qr} \frac{R_2}{s} \quad \text{--- 2.6)}$$

추력 F는,

$$F = F_q - F_d = \frac{1}{U_s} \text{Re}(\dot{\psi}_q^* \dot{I}_{dr} - \dot{\psi}_d^* \dot{I}_{qr}) \quad \text{--- 2.7)}$$

이다. 한편,

$$\dot{\psi}_d = \frac{\dot{E}_{od}}{j\omega} \quad \text{--- 2.8)}$$

$$\dot{\psi}_q = \frac{\dot{E}_{oq}}{j\omega} \quad \text{--- 2.9)}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{dr} \dot{I}_{qr}^* &= \dot{I}_{ds} \dot{I}_{qs}^* \frac{1}{1/(sG)^2 + 1} \\ &= \dot{I}_{ds} \dot{I}_{qs}^* \frac{1}{1/(sG)^2 + 1} e^{j\theta} \quad \text{--- 2.10)} \end{aligned}$$

식 2.5)-2.10)을 식 2.7)에 대입하여 정리하면

$$F = \frac{2I_{ds} I_{qs}}{sU_s(1/(sG)^2 + 1)} R_2 \sin\theta \quad \text{--- 2.11)}$$

이다. 최대 추력  $F_m$ 은  $s_m G=1$ 에서 얻어지며 이 때의 slip  $s_m$ 은 다음과 같다.

$$s_m = 1/G \quad \text{--- 2.12)}$$

식 2.11)로 부역 G를 Parameter로 한 속도-추력 곡선을 그림2-3에 보였다.

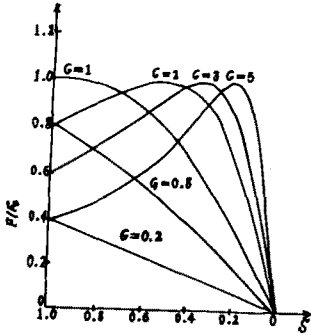


그림 2-3

그림2-3에서 압수 있는 바와 같이  $G=0.2 \sim 1$  범위에서는 L.I.M. 의 제어특성이 상당히 양호하다. 이와같은 결과로 부역 Tubular Type L.I.M.을 Servo Motor 로 이용하기 위하여는  $G \leq 1$ 인 조건을 만족하도록 설계하여야 한다.

기준상 전압을  $V_r$ , 제어상 전압을  $V_c$ 라고 하면 식2.11)로 부역 전압제어 방식을 사용한 경우

$$F = \frac{V_r V_c R_2 \sin \theta}{s U_s (1/(sG) + 1) \sqrt{(R^2 + X^2)(R^2 + (X - X_c)^2)}} \quad \text{3.1)}$$

여기서 k에 따른 속도-추력 곡선을 그림3-1에 나타내었다.

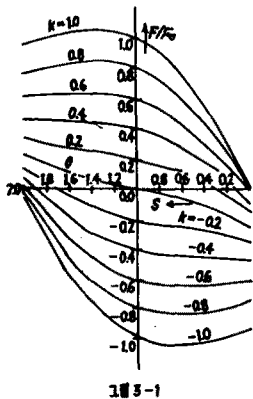


그림 3-1

여기서  $F_0$ 는,

$$F_0 = \frac{V_r^2 R_2 \sin \theta}{U_s (1/G + 1) \sqrt{(R^2 + X^2)(R^2 + 0.6X^2)}}$$

이다.

비동기 Motor 에 대한 운동방정식은 식 3-2)와 같다.

$$M \frac{dU}{dt} + BU = F_d = kF_0 - F_L \quad \text{--- 3.2)}$$

M : 가동부 질량

B : 제동정수 ( $D = -\frac{\partial kF_0}{\partial U} |_{U=U_s}$ )와 점성계수의 합

$F_d$  : 외란 torque

$F_L$  : 부하 torque

그림3-1의 속도-추력 특성곡선은 그림 3-2와 같이 근사화시킬 수 있다.

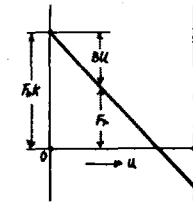


그림 3-2

그림 3-2로 부역  $B = F_0 / U_s$  이

므로 속도 U 는

$$U = \frac{kF_0 - F_L}{F_0} U_s \left(1 - e^{-\frac{t}{T_m}}\right) \quad \text{3.3)}$$

$$T_m = \frac{MU_s}{F_0}$$

이다.

부하 Torque 존재하는 경우와 존재하지 않은 경우의 정상속도는  $U = kU_s$  ( $F_L = 0$ ) --- 3.4)

$$= (k - k') U_s \quad (F_L \neq 0) \quad \text{--- 3.5)}$$

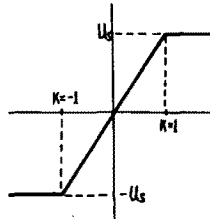


그림 3-3  $F_L = 0$

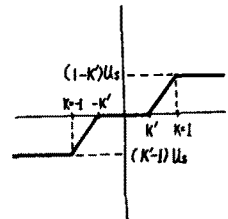


그림 3-4  $F_L \neq 0$

그림3-3 과 3-4에서 볼수 있는 바와 같이 속도는 k에 비례한다. 제어상 전압은 Triac의 점호각에 의하여 결정되는데 점호각  $\alpha$ 에 대한 기본파 성분 전압은 다음과 같다.

$$V_c = kV_r \sin(\omega t + \psi) \quad \text{3.6)}$$

$$kV_r = \frac{V_r}{2\pi} \sqrt{(\sin 2\alpha + 2(\pi - \alpha))^2 + (\cos 2\alpha - 1)^2} \quad \text{3.7)}$$

$$= \tan^{-1} \frac{\cos^2 \alpha - 1}{\sin^2 \alpha + 2(\pi - \alpha)} \quad \text{3.8)}$$

식3.7)로 부역

$$k = \frac{1}{2\pi} \sqrt{(\sin 2\alpha + 2(\pi - \alpha))^2 + (\cos 2\alpha - 1)^2} \quad \text{3.9)}$$

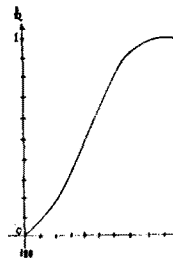
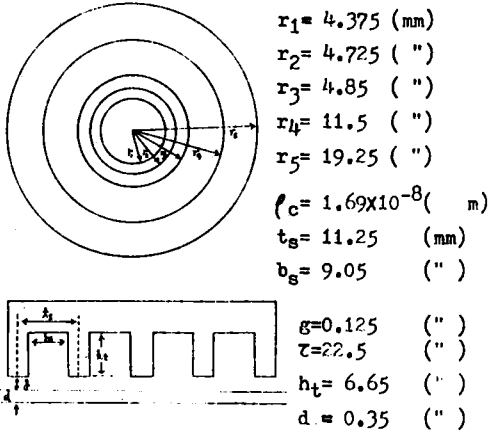


그림 3-5

Tubular Type L.I.M. 은  $G \leq 1$  이 되도록 설계하였으며 이로부여 동가회로 정수를 구하면 다음과 같다.



유효공극길이

$$g_e = k_c g + d = 0.855 \text{ (mm)}$$

여기서  $k_c$ 는 Karter 계수이다.

$$k_c = \frac{1}{1 - (g/t_s)\gamma} = 4.04, \quad \gamma = \frac{(bs/g)^2}{5 + bs/g}$$

Goodness factor G

$$G = \frac{2\mu_0 \tau^2 f}{\pi \rho_r g_e} = 0.58867$$

여기서  $\rho_r = \frac{\rho_c}{d}$

$$R_1 = \rho_c \frac{\pi D_s N^2}{P_t b_s h_t K_f} = 3.67 \Omega \quad P_t: \text{극쌍수} : 1$$

$$X_1 = 2\pi f \omega \frac{N^2 D_s^2}{P_t} = 2.19 \Omega \quad g: \text{한상당 Slot 수} : 2$$

$$R_2 = \frac{60D}{\tau P} (\rho_c N)^2 = 33.12 \Omega \quad \text{한상당 권수} : 300$$

$$X_m = G R_2 = 19.497 \Omega \quad D_0: 1\text{차 Slot의 평균 직경} : 1.635 \times 10^{-2} \text{ (m)}$$

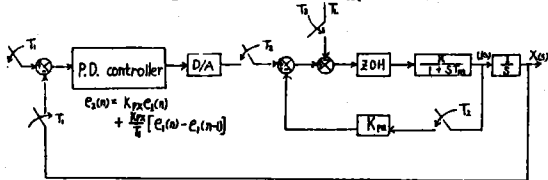
$$\lambda_D: \text{누설 계수} \approx \frac{1}{2} k_i (1 + 3k_w)$$

$$D: 2\text{차도체의 평균 직경} : 9.1 \times 10^{-3} \text{ (m)}$$

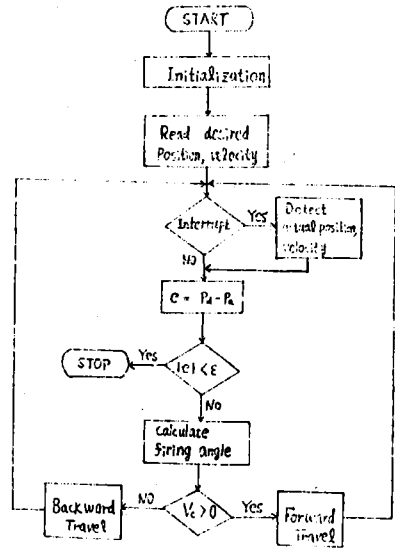
$$K_f: \text{Slot fill factor} : 0.1767$$

위치제어를 위한 System block 선도와

Flowchart 를 다음에 나타내었다.



1항 4-1 system block 선도



1항 4-2 Microprocessor flowchart

참고 문헌

- 1) E.R. Laithwaite, "Induction Machines for Special Purposes," Stonebridge Press, 1966
- 2) S.A. Nesar & I. Boldea, "Linear Motion Electric Machines," John Wiley & Sons, 1976
- 3) 山田一, "リニアモータと応用技術," 実教出版株式会社, 1976