

펄스電動機의 位置制御特性에 관한 解析的 研究

論 文

28-1-3

Analytical Study of Position Control Characteristics of the Variable Reluctance Pulse Motor

李 允 鍾* 張 世 勳** 李 龍 範***
(Youn Jong Lee, Se Hoon Chang, Young-Buam Lee)

Abstract

The linearized models on performance dynamics of the pulse motor have been already proposed by many others. These models exhibit certain advantages of their own because of their simple formulation, but in many cases the models are proved to be inadequate for further accurate analysis of the motor dynamics, owing to impractical and rather rough assumptions in the derivation. In this study, a dynamic state transition model is induced, using the equivalent circuit obtained from the operating principle of the variable reluctance pulse motor, which turns out to be nonlinear equation. This nonlinear dynamic state equation is numerically analysed by the use of UNIVAC System/3(OS/3) digital computer at hand.

In the course of the dynamic analysis of the performance characteristics of a testing motor, dependance of the inertia of rotor and load, the coefficient of viscous friction between rotor and housing, and the winding resistance of the stator is discussed and a comparative study of the machine constants is carried on, as related to the design problem of the motor.

1. 緒 論

펄스電動機는 최근의 制御系에서 중요한 digital操作素子로서 매우 활발히 研究되고 있다. 펄스電動機에는 永久磁石型과 可變磁氣抵抗型의 두 가지 종류가 있는데, 이것들은 어느 것이나 digital pulse 入力을 받아 回轉子가 펄스入力에 應動되어 回轉하는 형태의 analog出力을 發生하는 특수한 電動機이다. 펄스電動機의 出力은 固定子捲線에 카하여진 펄스入力에 따라서 回轉子가 일정한 位相角增分만큼 階段的으로 回轉, 轉 靜止하는 運動의 형태로 나타나며 일반 電動機와는 造形 態 및 動作을 달리하고 있다. 특히 이 電動機는 位置制御系의 操作機로서 쓰여질 때 閉루우프制御系를

構成시키지 아니하고도 閉루우프系만으로 정밀한 位置制御가 가능하다는 特徵을 지니고 있다.

펄스電動機의 사용범위도 대단히 넓고 다양하며 digital plotter나 pen記錄計 등의 計裝機構 혹은 電子計算機의 周邊裝置인 printers, tape 驅動裝置 등, 記憶裝置들의 驅動用 操作機로 쓰이며 많은 종류의 digital-analog變換器와 process制御系에도 널리 사용된다.

O'Donahue⁽¹⁾와 Kiebuetz⁽²⁾는 펄스電動機의 動作特性에 대한 線型化 模型을 제시하였다. 線型化시킨 傳達函數를 이용하여서는 digital制御系의 動作特性을 보다 정확히 解析하기에 불충분한 경우가 간혹 있다. 本論文에서는 이 電動機가 지니는 非線型性要因을 감안하여 가면서 可變磁氣抵抗型 펄스電動機의 動作特性을 나타내는 數學的 狀態模型을 확립하려는데 목적을 두었다. 誘導된 狀態模型을 써서 이 電動機의 驅動特性을 數值解析의 方法으로 다루어 보았으며 電動機의 여러 機械定數들이 位相角制御時의 過渡, 定常應答에

*正會員: 漢陽大工大 電氣工學科教授·工博

**正會員: 漢陽大工大 電氣工學科教授·工博

***正會員: 漢陽大工大 大學院

接受日字: 1978年 11月 18日

미치는 影響과 機械내부에서의 信號傳達관계등을 究明하여 보았다. 특히 펄스電動機의 位相角制御에 직접적인 影響을 주는 回轉子一負荷系의 慣性和 粘性摩擦係數, 固定子の 捲線抵抗이 回轉子の 角變位, 回轉角速度制御時의 過渡狀態와 定常狀態의 應答에 미치는 影響을 比較檢討하여 보았다.

II. 可變磁氣抵抗型 펄스電動氣의 動作特性

2-1. 1相만을 고려한 경우

3相펄스電動機의 動態方程式을 誘導하기 위하여는 먼저 3相중 1相만을 고려하여 취급하면 간편하다. 그림 1은 이 경우의 等價電氣回路圖이다.

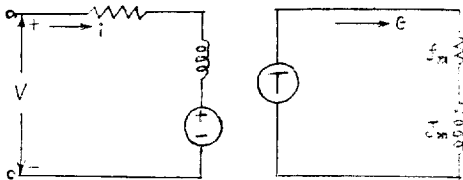


그림 1. 1相만을 고려하였을 경우의 等價電氣回路
Fig. 1. Equivalentt circuit for the one-phase

그림 1은 펄스電動機의 機械의 構造가 각 相마다 완전히 대칭인 것으로 가정하여 도출된 것이며, 回轉子一負荷物理系의 여러 回轉物理量들은 等價電氣量으로 變換하여 표시하였다.

여기서,

$v_{(t)}$ [V]: 固定子捲線에 인가되는 DC 펄스電壓

$R[\Omega]$: 固定子捲線의 抵抗으로 각 相捲線의 이 抵抗값을 구분할 필요가 있을 때에는 A相, B相 및 C相 固定子捲線을 각각 R_A , R_B 및 R_C 로 표시한다.

$L_{(t)}$ [H]: 固定子捲線의 自體인덕턴스로 θ 의 函數이다. 각 相에 대한 것을 구분할 필요가 있을 때에는 $L_{A(t)}$, $L_{B(t)}$, $L_{C(t)}$ 등으로 구분한다.

$e_b(t)$ [V]: 固定子捲線에 誘起되는 逆起電力

$\theta(t)$ [deg]: 回轉子の 角變位

$i_{(t)}$ [A]: 固定子捲線을 흐르는 電流로서 각 相의 捲線電流는 $i_{A(t)}$, $i_{B(t)}$ 및 $i_{C(t)}$ 등으로 구분한다.

T_A , T_B , T_C : 대응되는 각 相의 固定子捲線을 勵磁시켰을 때의 回轉子發生토크

J_m , f_m : 回轉子에 연결된 負荷回轉系의 合成慣性能率 및 粘性摩擦係數

그림 1에서 固定子捲線回路에 電壓平衡式을 세우면

$$v_{(t)} = Ri_{(t)} + \frac{d}{dt}[i_{(t)} \cdot L_{(t)}] = Ri_{(t)} + L_{(t)} \frac{di_{(t)}}{dt}$$

$$+ i_{(t)} \frac{dL_{(t)}}{dt} - \frac{d\theta(t)}{dt} = Ri_{(t)} + L_{(t)} \frac{di_{(t)}}{dt} + e_b(t) \tag{1}$$

한편 空隙에서의 에너지 W 는

$$W_{(t,\theta)} = \frac{1}{2} L_{(t)} i_{(t)}^2 \tag{2}$$

回轉子에 電磁力에 의해 發生되는 토크는 에너지 變換原理에 따르면 다음과 같다. 즉

$$T = -\frac{\partial}{\partial \theta} [W_{(t,\theta)}] = \frac{1}{2} i_{(t)}^2 \frac{\partial L_{(t)}}{\partial \theta} \tag{3}$$

지금 電動機가 靜적인 平衡狀態에 있다고 가정하고 固定子の 톱니와 마주 보는 回轉子の 톱니중 하나의 톱니 중심을 角의 基準點: $\theta=0$ 인 점으로 잡으면 固定子捲線의 自體인덕턴스는 다음과 같이 θ 의 函數로 표시할 수 있다. (5)

$$L_{(t)} = L_1 + L_2 \cos[n\theta(t)] \tag{4}$$

여기서

$$L_1 + L_2 = L_{(t)\max}$$

$$L_1 - L_2 = L_{(t)\min}$$

n 는 回轉子の 톱니수

식 (4)를 식 (1)에 대입하면 固定子捲線回路의 電壓平衡式은 다음과 같이 된다.

$$v_{(t)} = Ri_{(t)} + [L_1 + L_2 \cos[n\theta(t)]] \frac{di_{(t)}}{dt} + i_{(t)} \{-nL_2 \sin[n\theta(t)]\} \frac{d\theta(t)}{dt} \tag{5}$$

식 (4)를 發生토크에 관한 식 (3)에 대입하면

$$T = -\frac{1}{2} i_{(t)}^2 \frac{dL_{(t)}}{dt} = -\frac{nL_2}{2} i_{(t)}^2 \sin[n\theta(t)] = -Ki_{(t)}^2 \sin[n\theta(t)] \tag{6}$$

여기서 $K = nL_2/2$

回轉子の 發生토크表現式은 식 (6)과 같이 理論적으로 誘導되지만 實驗的인 結果에 의하면 固定子捲線電流와 토크는 거의 正比例의인 關係를 가지는 것으로 밝혀졌으므로 回轉子 發生토크는 다음과 같이 簡略化시켜 표현할 수 있다. 즉

$$T = -Ki_{(t)} \sin[n\theta(t)] \tag{7}$$

2-2 3相을 고려할 경우

可變磁氣抵抗型 3相펄스電動機의 動態狀態遷移方程式은 1相만을 고려하였을 때의 경우를 擴張시켜 적용하므로써 誘導해 낼 수 있다. 다만, 이때 고려되어야 할 것은 어느 1相을 다룰 때의 基準角을 3相을 다룰 때의 角의 基準角으로 잡으면 양쪽 옆의 相들은 그것과 角度差를 갖는 것을 명심하면 된다. 지금 A相의 平衡點을 3相을 고려할 때의 基準原點되는 位置로 잡으면 B相의 平衡點은 이 原點보다 하나의 step角 즉 $2\pi/(3n)$ 만큼 앞서며 또한 C相의 平衡點은 하나의 step角만큼

뒤지게 될 것이니 각 相의 固定子捲線의 自體인덕턴스 및 각 相에 의한 回轉子發生토크는 다음과 같이 된다.

$$\left. \begin{aligned} L_{A(\theta)} &= L_{A1} + L_{A2} \cos\{n\theta_{(t)}\} \\ L_{B(\theta)} &= L_{B1} + L_{B2} \cos\left\{n\left[\theta_{(t)} - \frac{2\pi}{3n}\right]\right\} \\ &= L_{B1} + L_{B2} \cos\left\{n\theta_{(t)} - \frac{2\pi}{3}\right\} \\ L_{C(\theta)} &= L_{C1} + L_{C2} \cos\left\{n\left[\theta_{(t)} + \frac{2\pi}{3n}\right]\right\} \\ &= L_{C1} + L_{C2} \cos\left\{n\theta_{(t)} + \frac{2\pi}{3}\right\} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

및

또한

$$\left. \begin{aligned} T_A &= -K i_{A(t)} \sin\{n\theta_{(t)}\} \\ T_B &= -K i_{B(t)} \sin\left\{n\left[\theta_{(t)} - \frac{2\pi}{3}\right]\right\} \\ T_C &= -K i_{C(t)} \sin\left\{n\left[\theta_{(t)} + \frac{2\pi}{3}\right]\right\} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

식 (8)에서 $L_{A1} = L_{B1} = L_{C1} = L_1$, $L_{A2} = L_{B2} = L_{C2} = L_2$ 라 가정하고 A, B, C 각 相의 固定子捲線回路에 電壓平衡式을 세우면

$$\left. \begin{aligned} v_{A(t)} &= R_A i_{A(t)} + L_{A(\theta)} \frac{di_{A(t)}}{dt} + i_{A(t)} \frac{dL_{A(\theta)}}{d\theta} \frac{d\theta_{(t)}}{dt} \\ v_{B(t)} &= R_B i_{B(t)} + L_{B(\theta)} \frac{di_{B(t)}}{dt} + i_{B(t)} \frac{dL_{B(\theta)}}{d\theta} \frac{d\theta_{(t)}}{dt} \\ v_{C(t)} &= R_C i_{C(t)} + L_{C(\theta)} \frac{di_{C(t)}}{dt} + i_{C(t)} \frac{dL_{C(\theta)}}{d\theta} \frac{d\theta_{(t)}}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

이제 $R_A = R_B = R_C = R$ 라 가정하고 식 (8)의 결과를 식 (10)에 대입하고 정리하면

$$\left. \begin{aligned} v_{A(t)} &= \left\{ R - nL_2 \sin\{n\theta_{(t)}\} \frac{d\theta_{(t)}}{dt} \right\} i_{A(t)} \\ &\quad + \{L_1 + L_2 \cos\{n\theta_{(t)}\}\} \frac{di_{A(t)}}{dt} \\ v_{B(t)} &= \left\{ R - nL_2 \sin\left[n\left(\theta_{(t)} - \frac{2\pi}{3}\right)\right] \frac{d\theta_{(t)}}{dt} \right\} i_{B(t)} \\ &\quad + \{L_1 + L_2 \cos\left[n\left(\theta_{(t)} - \frac{2\pi}{3}\right)\right]\} \frac{di_{B(t)}}{dt} \\ v_{C(t)} &= \left\{ R - nL_2 \sin\left[n\left(\theta_{(t)} + \frac{2\pi}{3}\right)\right] \frac{d\theta_{(t)}}{dt} \right\} i_{C(t)} \\ &\quad + \{L_1 + L_2 \cos\left[n\left(\theta_{(t)} + \frac{2\pi}{3}\right)\right]\} \frac{di_{C(t)}}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

또한 3相에 의한 전체의 合成發生토크는

$$T = T_A + T_B + T_C \quad (12)$$

일 것이므로 식 (9)의 결과를 식 (12)에 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned} T &= -K \left\{ i_{A(t)} \sin\{n\theta_{(t)}\} + i_{B(t)} \sin\left[n\left(\theta_{(t)} - \frac{2\pi}{3}\right)\right] \right. \\ &\quad \left. + i_{C(t)} \sin\left[n\left(\theta_{(t)} + \frac{2\pi}{3}\right)\right] \right\} \quad (13) \end{aligned}$$

2-3. 可變磁氣抵抗型 3相 펄스電動機의 狀態方程式

回轉子에 負荷된 機械的負荷가 다음과 같은 線性性 負荷인 것으로 가정한다.

$$T_m = J_m \frac{d^2\theta_{(t)}}{dt^2} + f_m \frac{d\theta_{(t)}}{dt} \quad (14)$$

이 負荷가 식 (13)의 發生토크와 平衡되어야 할 것 이므로

$$\begin{aligned} T &= T_m = J_m \frac{d^2\theta_{(t)}}{dt^2} + f_m \frac{d\theta_{(t)}}{dt} \\ &= -K \left\{ i_{A(t)} \sin\{n\theta_{(t)}\} + i_{B(t)} \sin\left[n\left(\theta_{(t)} - \frac{2\pi}{3}\right)\right] \right. \\ &\quad \left. + i_{C(t)} \sin\left[n\left(\theta_{(t)} + \frac{2\pi}{3}\right)\right] \right\} \quad (15) \end{aligned}$$

이제 식 (11)과 식 (15)로부터 다음과 같은 動態方程式을 얻는다.

$$\begin{aligned} \frac{di_{A(t)}}{dt} &= \frac{1}{L_1 + L_2 \cos\{n\theta_{(t)}\}} \\ &\quad \left\{ [nL_2 \sin\{n\theta_{(t)}\} \frac{d\theta_{(t)}}{dt} - R] i_{A(t)} + v_{A(t)} \right\} \quad (16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{di_{B(t)}}{dt} &= \frac{1}{L_1 + L_2 \cos\left[n\left(\theta_{(t)} - \frac{2\pi}{3}\right)\right]} \\ &\quad \left\{ [nL_2 \sin\left(n\left(\theta_{(t)} - \frac{2\pi}{3}\right)\right) \frac{d\theta_{(t)}}{dt} - R] i_{B(t)} + v_{B(t)} \right\} \quad (17) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{di_{C(t)}}{dt} &= \frac{1}{L_1 + L_2 \cos\left[n\left(\theta_{(t)} + \frac{2\pi}{3}\right)\right]} \\ &\quad \left\{ [nL_2 \sin\left(n\left(\theta_{(t)} + \frac{2\pi}{3}\right)\right) \frac{d\theta_{(t)}}{dt} - R] i_{C(t)} + v_{C(t)} \right\} \quad (18) \end{aligned}$$

및

$$\begin{aligned} \frac{d^2\theta_{(t)}}{dt^2} &= \frac{1}{J_m} \left\{ -f_m \frac{d\theta_{(t)}}{dt} - K \right. \\ &\quad \left. [i_{A(t)} \sin\{n\theta_{(t)}\} + i_{B(t)} \sin\left(n\left(\theta_{(t)} - \frac{2\pi}{3}\right)\right) \right. \\ &\quad \left. + i_{C(t)} \sin\left(n\left(\theta_{(t)} + \frac{2\pi}{3}\right)\right)] \right\} \quad (19) \end{aligned}$$

이제 狀態變數로서

$$\left. \begin{aligned} x_{1(t)} &= i_{A(t)} \\ x_{2(t)} &= i_{B(t)} \\ x_{3(t)} &= i_{C(t)} \\ x_{4(t)} &= \theta_{(t)} \\ x_{5(t)} &= \dot{\theta}_{(t)} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

로 잡으면

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \frac{1}{L_1 + L_2 \cos\{n x_4\}} \left\{ [nL_2 \sin\{n x_4\} x_5 - R] \right. \\ &\quad \left. x_1 + v_A \right\} \quad (21) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= \frac{1}{L_1 + L_2 \cos\left(n x_4 - \frac{2\pi}{3}\right)} \\ &\quad \left\{ [nL_2 \sin\left(n x_4 - \frac{2\pi}{3}\right) x_5 - R] x_2 + v_B \right\} \quad (22) \end{aligned}$$

$$\dot{x}_3 = \frac{1}{L_1 + L_2 \cos\left(nx_4 + \frac{2\pi}{3}\right)} \quad (23)$$

$$\left\{ \left[nL_2 \sin\left(nx_4 + \frac{2\pi}{3}\right) x_3 - R \right] x_3 + v_c \right\} \quad (23)$$

$$x_4 = x_5 \quad (24)$$

$$\dot{x}_5 = \frac{1}{J_m} \left\{ -f_m x_5 - K \left[x_1 \sin(nx_4) + x_2 \sin\left(nx_4 - \frac{2\pi}{3}\right) + x_3 \sin\left(nx_4 + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \right\} \quad (25)$$

위의 결과는 다음과 같은 벡터函數로 정리된다.

$$\dot{x}(t) = f(x, v) \quad (26)$$

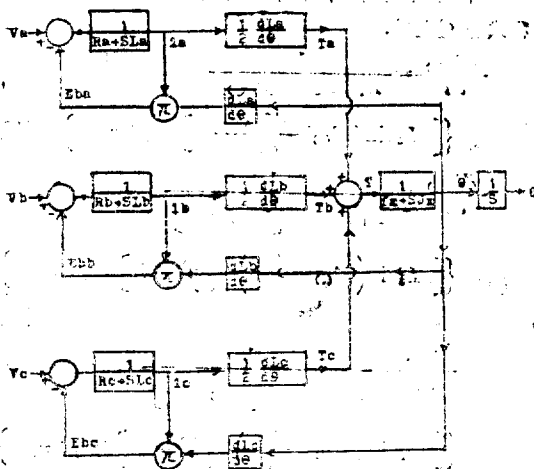


그림 2. 可變磁氣抵抗型 펄스電動機의 블록線圖
Fig. 2. Block diagram of the variable reluctance pulse motor

식 (11), 식 (12) 및 식 (15)에 의거하여 펄스電動機 내부에서의信號傳達關係를 그리면 그림 2와 같은블록線圖를 얻는다.

III. 動作特性的 數值解析과 結果의 檢討

3-1 試驗電動機의 여러 物理定數

이 論文에서는 Superior Electric Co.에서 만들어진 M092-FC08 3相 펄스電動機를 試驗機로하여 UNIV-AC System/3(OS/3) 電子計算機를 써서, 動作特性을 數值解析하였다. 이 電動機의 特性解析에 쓰여진 電動機 및 負荷系의 여러 物理定數들을 요약 정리하면 다음과 같다.

- a) DC펄스 入力の 電壓振幅: 3[V]
- b) DC펄스 入力の 時間幅: 0.05[msec]
- c) 固定子捲線抵抗(\bar{R}): 0.8[Ω]
- d) 固定子捲線의 自體인덕턴스: $L_1=4$ [H], $L_2=0.2$ [H]

- e) 固定子の 톱니수(n): 60
 - f) 外部負荷를 포함한 回轉子の 慣性能率(J_m): 0.23 $\times 10^{-3}$ [N/m]
 - g) 回轉子の 粘性摩擦係數(f_m): 1.6×10^{-4} [N/m/sec]
- 固定子捲線回路의 時定數 L/R 를 적게하기 위해 制動用 外部抵抗 4[Ω]를 固定子捲線에 直列로 連結하여 驅動시켰다. 위의 定數들을 써서 식 (6)으로 정의된 이 電動機의 常數 K 를 구하면

$$K = nL_2/2 = 6$$

한편 回轉子の step角은

$$\text{step角} = 2\pi/m \times \dot{n} = 2^\circ = 0.035[\text{rad}]$$

으로 얻어진다.

3-2. 試驗機의 狀態모델과 狀態遷移

試驗機의 여러 物理定數들을 써서 이 機械의 動作特性을 數值解析하기 위하여는 먼저 試驗電動機의 驅動初期狀態를 설정할 필요가 있다. 우선 固定子の A相의 톱니와 回轉子の 톱니가 마주 보고 서 있는 位置에서 回轉子は 靜止하고 있다고 가정한다. 이것은 바로 전에 A相의 固定子捲線에 DC펄스入力が 가하여진 후 충분한 시간이 경과되어 현재 回轉子が 靜의 平衡狀態에 있다고 가정함을 뜻한다. 이 때의 角位置를 基準으로 잡아 $\theta = 0$ ($t=0$ 에서)로 본다.

지금 $t=0$ 에서 固定子の B相捲線에 振幅 3[V], 時間幅 0.05[msec]인 DC펄스入力が 인가되었다고 생각한다. 물론 이 時間區間에는 v_a 와 v_c 는 인가되지 아니한다.

위 狀態下에서의 驅動初期條件은 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} i_{A(0)} = i_{B(0)} = i_{C(0)} = 0, \\ \theta(0) = 0 \\ \text{및 } \frac{d\theta(0)}{dt} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

식 (21)~식 (25)를 써서 위의 初期條件下에서의 M092-FC08 試驗電動機의 狀態方程式을 구하면 $0.0 < t \leq 0.05$ [msec]에 대하여는:

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{4 + 0.2 \cos(60x_4)} \left\{ 60 \times 0.2 \sin(60x_4) x_3 - 4.8 \right\} x_1 \quad (28)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{4 + 0.2 \cos\left(60x_4 - \frac{2\pi}{3}\right)} \left\{ \left[60 \times 0.2 \sin\left(60x_4 - \frac{2\pi}{3}\right) x_3 - 4.8 \right] x_2 + 3 \right\} \quad (29)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{1}{4 + 0.2 \cos\left(60x_4 + \frac{2\pi}{3}\right)} \left\{ \left[60 \times 0.2 \sin\left(60x_4 + \frac{2\pi}{3}\right) x_3 - 4.8 \right] x_3 \right\} \quad (30)$$

$$\dot{x}_4 = x_5 \quad (31)$$

$$x_3 = \frac{1}{0.26 \times 10^{-3}} \left\{ -0.16 \times 10^{-3} x_3 - 6 \left[x_1 \sin(60x_1) + x_2 \sin\left(60x_1 - \frac{2\pi}{3}\right) + x_3 \sin\left(60x_1 + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \right\} \quad (32)$$

$t > 0.05$ [msec]에 대하여는 식 (29)만 다음과 같이 변경된다.

$$x_2 = \frac{1}{4 + 0.2 \cos\left(60x_1 - \frac{2\pi}{3}\right)} \left\{ 60 \times 0.2 \sin\left(60x_1 - \frac{2\pi}{3}\right) x_3 - 4.8 \right\} x_2 \quad (33)$$

여기서 DC펄스入力은 완전한 矩形波인 것으로 가정하였다.

위의 動態方程式을 數值解析하기 위한 電算機프로그램은 대략 다음과 같이 꾸며졌다. 主프로그램에서 電動機의 驅動初期條件을 설정해 준 다음 計算反復時間區間을 0.0005 [sec]로 지정하여 逐오는 狀態遷移計算을 200번 반복시켰다. 微分方程式의 解를 위해서는 四次型 Runge-Kutta方法을 썼으며 이를 subroutine MXRK2로 명명하였다. 여기에서는 0.0005 [sec]의 時間區間을 2분하여 0.00025 [sec]로 나누었으며 이 區間에 관한 狀態遷移를 2번, 즉 0.0005 [sec]만큼의 時間이 증가하는 동안 같은 過程의 계산을 4번 反復하게 하였다. 이렇게 하여 얻은 $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$, $\theta(t)$ 와 $d\theta/dt$ 의 計算결과들을 일단은 지정된 記憶場所에 기억시키고는 식 (13)을 써서 回轉子發生토포크를 計算시켜 기억시켰다. 이들 값은 나중에 curve plotting에 알맞도록 다시 scaling하여 두었다.

위의 과정이 일단 끝나면 初期值를 再調整하고는 時間 T 를 増分 0.0005 [sec]만큼 증가시키고는 計算을 反復되풀이시켜 나중에 각 狀態遷移를 plot 및 print하게 하였다. 특히 MXRK2에서의 計算중에 사용되는 動態

方程式중 pulse入力이 가하여지는 동안의 電動機의 動特性方程式群 식 (29), 식 (30), 식 (31) 및 식 (32)를 subroutine GN로, 또한 入力펄스가 끊어진 다음의 動特性方程式群 식 (29), 식 (33), 식 (31) 및 식 (32)는 subroutine GN4에서 처리하게 하였다. 부록 그림은 앞의 計算過程을 정리하여 표시한 flow chart이다.

3.3 解析結果의 檢討

試驗펄스電動機의 出力軸角變位 $\theta(t)$ 의 定常値는 앞의 계산에 따르면 0.035 [rad]이 된다. $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$, $d\theta(t)/dt$ 및 回轉子토포크의 定常値는 물론 零의 값이 된다. 첫번째 경우로서 앞의 電動機-負荷系의 物理定數를 써서 MO92-FC08 3相 펄스電動機의 狀態變數 $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$, $\theta(t)$ 및 $d\theta(t)/dt$ 와 回轉子發生토포크의 變化推移의 電算機 plotting은 그림 3 및 그림 4와 같이 얻어졌다. 그림에서 빗금친 部分은 入力펄스를 나타낸다. $\theta(t)$ 의 上昇時間은 약 3.5 [msec], 最終値의 95~105 [%]내에 鎮定되는 整定時間은 약 [4.6msec], 98~102 [%]내에 鎮定되기 까지의 整定時間은 약 5.7 [msec]로 얻어졌으며 角速度 $d\theta(t)/dt$ 는 $t=0.15$ [msec]인데 1.91 [rad/sec]의 값을 갖는 것에 비하여 $t=5.0$ [msec] 될 때에는 이 값의 약 5 [%]에 해당하는 0.1 [rad/sec]가 되어 이 후의 角速度의 變化는 거의 무시될 정도로 적어졌다.

回轉子發生토포크는 $t=0.05$ [msec]에서 最大토포크值인 81.83 [kg-m]의 값을 갖게 되나 급격히 감소되어 $t > 0.5$ [msec]에서는 거의 零의 값으로 감소되었다. 결국 이 경우는 5 [msec]에서 角變位 $\theta(t)$ 가 整定되었다고 간주하면 이 펄스電動機가 秒當 回轉할 수 있는 最大의 step數는 $100/5=20$ (step per second) 또는 0.7 (rad/sec)의 속도로 回轉시킬 수 있다. 이때 DC펄스

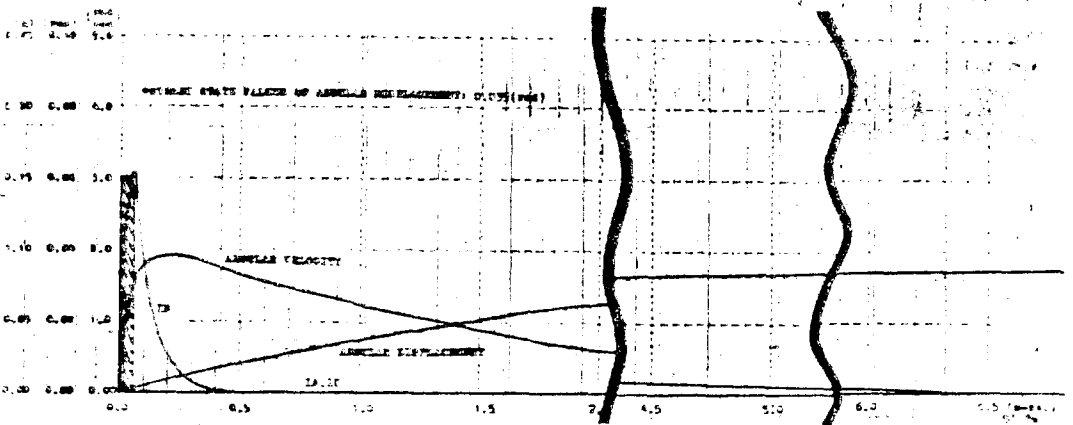


그림 3. 첫째 경우의 펄스電動機의 動作特性을 보여주는 狀態遷移.
 Fig. 3. State transitions of the performance dynamics of the pulse motor for case I.
 $R=4.8[\Omega]$, $L_1=4[H]$, $L_2=0.2[H]$, $r=60$, $J_m=0.23 \times 10^{-3}[N/m]$, $f_m=0.16[N/m/sec]$

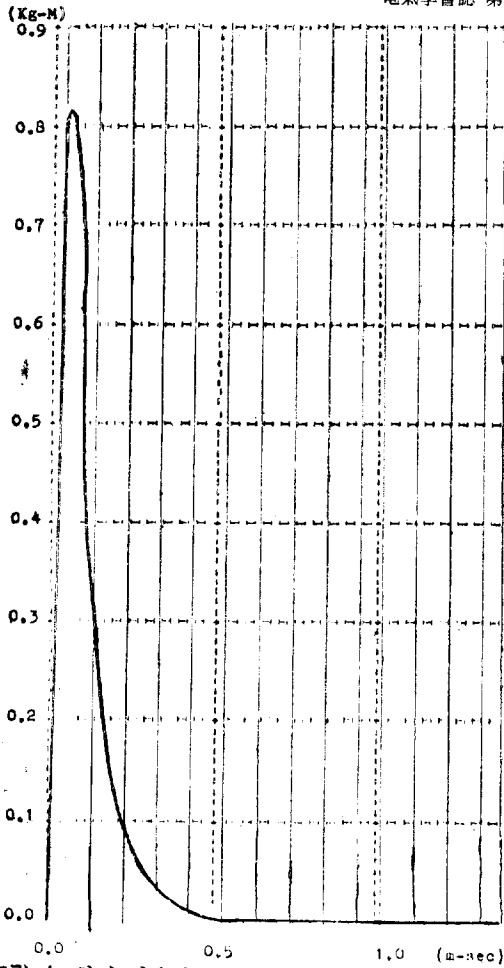


그림 4. 첫째 경우의 회전자發生토크의變化
Fig. 4. Developed torque vrs time plotting for cage I

入力の bit時間은 약 5[msec]이다.

두번째 경우로는 $J_m=0.26 \times 10^{-3}$ [N/m], $f_m=0.18 \times 10^{-2}$ [N/m/sec]인 값으로 物理定數를 변경시키고는 이 變化影響으로 오는 狀態遷移의 變化를 解析하여 본 결과는 그림 5와 같은 電算機出力을 얻었다. 角變位의 上昇時間은 약 1.4[msec]가 되며 $t=3.05$ [msec]에서 最大超過量인 0.059[rad]의 값을 갖다가는 점차로 減少한다. 角速度 $d\theta_{(t)}/dt$ 는 $t=0.5$ [msec]에서 最大值인 2.1[rad/sec]를 가진 후 조금씩 감소하다가 $t=3.0$ [msec]인 때의 값 1.17[rad/sec]에서 $t=3.05$ [msec]에서 -0.22 [rad/sec]로 급격히 떨어지게 되며 $t=3.2$ [msec]에서 最少值인 -1.0 [rad/sec]의 값을 나타낸 후 차츰 增加된다. 또한 토크는 $t=0.05$ [msec]에서 81.5[kg-m]의 最大值를 가진 후 급격히 減少되어서 $t=1.75$ [msec]에서 反對方向의 토크가 발생하기 시작하여 $t=3.05$ [msec]에서는 反對方向의 最大토크인 -6.03 [kg-m]를 가진 후 점점 增加하게 된다. 결국이 경우는 매우 完滿한 振幅減衰는 있었으나 位置制御에 적합하지 못한 應答를 나타낸다.

세번째 경우로는 固定子捲線에 直列로 連結된 外部抵抗 4.0 [Ω]를 없애고 特性解析을 計算하였다. 이 경우 角變位 $\theta_{(t)}$ 는 $t=3.0$ [msec]부근에서 定常值 0.035[rad]을 지나 조금씩 커지다가는 이 때부터 發生토크는 反對方向으로 생기기 시작하여 $t=10.0$ [msec] 부근에서 $\theta_{(t)}$ 는 0.0416[rad]의 값을 가지게 된다. 이 경우 角變位는 적은 量의 振幅減衰는 있었으나 매우 오랜 時間동안 振動한 후 整定狀態에 도달함을 볼 수 있었다.

표 1에 이들 세가지의 경우의 狀態遷移 및 回전자發生토크의 計算結果를 몇가지만 추려서 比較하였다.

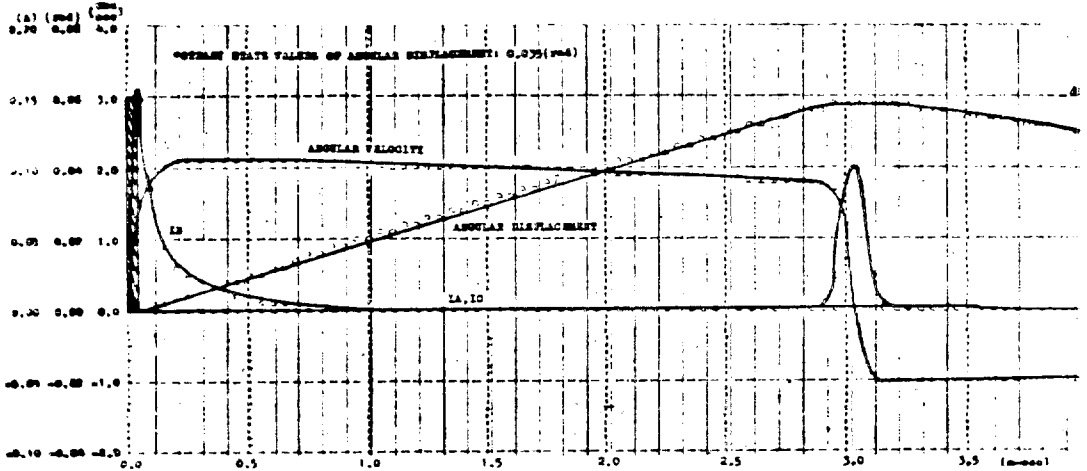


그림 5. 둘째 경우의 펄스電動機의 動作特性을 보여주는 電算機出力
Fig. 5. Computer plotting of the motor dynamics for case II

$R=4.8$ [Ω], $L_1=4$ [H], $L_2=0.2$ [H], $n=60$, $J_m=0.26 \times 10^{-3}$ [N/m], $f_m=0.18 \times 10^{-2}$ [N/m/sec]

Ⅱ 1. 각 경우의 狀態遷移 및 回轉子發生토크의 比較

Table 1. Comparison of the state transitions and developed torque for the three cases

時間 [msec]	I_A [A]	I_C [A]	I_B [A]			θ [rad]			$d\theta/dt$ [rad/sec]			토크[kg-m]		
			I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
0.00	0.0	0.0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0075
0.05	0.0	0.0	0.1582	0.1557	0.1908	0.0002	0.0002	0.0002	1.5676	1.5197	1.7118	81.8273	81.5391	99.9438
0.10	0.0	0.0	0.0762	0.0728	0.0775	0.0011	0.0012	0.0013	1.6414	1.8967	2.1787	37.9046	39.3123	42.0431
0.15	0.0	0.0	0.0399	0.0454	0.0430	0.0021	0.0022	0.0025	1.9854	2.0069	2.2496	21.6263	25.2583	24.1010
0.20	0.0	0.0	0.0224	0.0321	0.0252	0.0031	0.0033	0.0037	1.9955	2.0553	2.2457	12.7414	18.2683	14.4883
0.25	0.0	0.0	0.0027	0.0244	0.0146	0.0041	0.0043	0.0048	1.8798	2.0795	2.2135	7.3773	14.1780	8.5601
0.30	0.0	0.0	0.0069	0.0195	0.0081	0.0050	0.0054	0.0059	1.8414	2.0922	2.1678	4.1000	11.4962	4.8122
0.35	0.0	0.0	0.0036	0.0160	0.0042	0.0050	0.0065	0.0070	1.7964	2.0989	2.1148	2.1579	9.5467	2.5244
0.40	0.0	0.0	0.0017	0.0133	0.0020	0.0059	0.0076	0.0080	1.7488	2.1023	2.0580	1.0667	7.9816	1.2208
0.45	0.0	0.0	0.0008	0.0110	0.0009	0.0077	0.0086	0.0091	1.6983	2.1036	1.9995	0.4927	6.6145	0.5403
0.50	0.0	0.0	0.0003	0.0089	0.0003	0.0036	0.0097	0.0100	1.6485	2.1038	1.9408	0.2120	5.3551	0.2181
1.00	0.0	0.0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0157	0.0202	0.0184	1.2129	2.0603	1.4278	0.0000	0.0145	0.0000
1.50	0.0	0.0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0209	0.0303	0.0245	0.8916	1.9903	1.0497	0.0000	0.0000	0.0000
2.00	0.0	0.0	0.0000	0.0000	0.0000	—	—	—	—	—	—	—	0.0000	0.0000
2.50	0.0	0.0	0.0000	0.0000	0.0000	—	0.0505	0.0324	—	1.8507	0.5673	0.0000	0.0000	0.0000
3.00	0.0	0.0	0.0000	0.0000	0.0000	—	0.0588	0.0348	—	0.2235	0.4170	0.0000	0.0000	0.0000
3.50	0.0	0.0	0.0000	0.0000	0.0000	—	0.0545	0.0366	—	0.9830	0.3065	0.0000	0.0000	0.0003
4.00	0.0	0.0	0.0000	0.0000	0.0000	—	—	—	—	—	—	—	0.0000	0.0008
5.00	0.0	0.0	0.0000	0.0000	0.0009	0.0336	—	—	0.1100	—	—	0.0000	0.0000	0.0003
6.00	0.0	0.0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0344	—	—	0.0594	—	—	0.0000	0.0000	0.0000
10.00	0.0	0.0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0345	0.0030	0.0415	—	0.6268	0.0056	0.0000	0.0000	0.0000

Ⅳ. 結 論

可變磁氣抵抗型 3相펄스電動機의 狀態變數法에 의한 動作特性解析 및 MO92-FC08型 試驗펄스電動機의 動態特性을 數值解析한 결과 다음과 같은 결론이 인출된다.

1. 이 論文에서는 3相機에 대한 狀態모델을 다루었으나 一般的으로 相數가 m 인 可變磁氣抵抗型 펄스電動機에 대한 狀態모델도 쉽사리 變形시켜 얻을 수 있을 것이 예측된다. 특히 여기서는 外部에서 連結되는 機械負荷系를 식 (14)에서 처럼 線型인 것으로 간주하였으나 負荷系의 非線型要因을 감안하더라도 數值解析上 별다른 번거러움이 없을 것이다.

2. 狀態變數를 써서 電動機의 動作特性을 모델化하니까 자체의 非線型性介入으로 인해 數式表現이 번잡한듯하나, 이 모델은 可變磁氣抵抗型 펄스電動機의 位置制御特性뿐만 아니라 角速度制御特性 및 固定子捲線電流의 變化 및 回轉子發生토크의 解析結果도 동시에 주므로 驅動裝置의 設計 혹은 負荷의 物理變數에 대

한 영향이 電算機에의 data入力만 바꾸므로써 비교적 간편하게 얻어질 수 있다.

3. 試驗機에 대한 特性解析을 앞에서 誘導된 狀態모델을 simulation하여 數值解析한 결과 整定時間은 약 5[msec], slewing이 없이 step drive시켰을 때의 最大回轉數는 20[step/sec]로 얻어졌으며 이것은 實際實驗結果와 맥 흡사하였다.

4. 驅動條件을 달리한 세가지의 경우를 비교하면 固定子捲線回路的 電氣時定數가 位置制御應答에 뚜렷한 制動效果를 보인다. 즉 이 回路的 抵抗값을 增加시켰을 때가 맥 뚜렷한 制動效果를 보였다.

5. 回轉部分의 機械時定數 f_m/J_m 의 값 變化에 따라 應答에 뚜렷한 制動影響을 나타내었다. 경우 1의 구동 조건때보다 f_m/J_m 의 값을 약 1/10로 줄인 경우 2의 구동 조건하에서는 制動效果가 상대적으로 현저하게 줄었으며 上昇時間은 3.5[msec]에서 1.4[msec]로 약 2배 향상된 반면 감쇠진동이 매우 완만하여 位置制御特性으로는 만족할만한 應答을 주지 못하였다. 負荷 및 外部抵抗의 사용에 의한 系의 적절한 制動이 중요시된

다.

6. 이 論文에서는 open-loop mode로 "可變磁氣抵抗型" 펄스電動機의 位置制御特性을 주로 다루었으나 closed loop로 運轉될 때의 位置制御特性 및 slewing response 등을 감안한 速度制御特性의 究明도 흥미로운 것으로 사료된다.

參 考 文 獻

1. 'J.P.O' Donahne, "Transfer function for a stepper motor", control Engrg. Vol. 8, pp.103~104 November 1961.
2. R.B. Kieburtz, "the step motor the next advance in control systems," IEEE Trans. Automatic control, Vol. AC-9, pp. 93~104, January 1964.
3. K. Venkataratnam, Suchas C. Sarkar, and S. palani, "synchronizing characteristics of a step motor," IEEE Trans., Automatic Control, Vol.

- AC-14, No. 5, pp.510~517, October 1969.
4. Bunjiroh Saitoh, Keizah Maezawa, Susumu Ohta, "Precision small-sized motor and their applications." Yokogawa technical report, vol. 20 No. 4, pp.179~182, 1976.
5. Benjamin C. Kuo, "Automatic Control systems" Prentice Hall, 1975.
6. Benjamin C. Kuo, G. Siagh, R. Yockel, "Modeling and simulation of a stepping motor," IEEE Trans. Automatic Control, vol. AC-14, pp. 745~747, December 1969.
7. "Design Engineer's guide to DC stepping motor" published by Superior Electric Co.,