制御用 直流電動機의 定速度最適制御에 대한 解析的 硏究

論 文
26~6~2

An Analytical Study of the Optimal Constant Speed Regulation of a D.C Control Motor

張 世 勳*·李 陽 範**
(Se Hoon Chang, Yang Bum Lee)

Abstract

The object of this work is to study the optimal control strategy of constant speed characteristics for a D.C control motor under influence of disturbance.

In the course of the analysis, the linearization and time invariance schemes on motor dynamics are presumed throughout under certain prescribed conditions and the performance measure for optimality is assumed to be quadratic in state and the control effort, with the initial and final time specified.

When the motor speed is deviated from a stationary operating point by any external disturbance, the optimal continuous feedback control law is investigated by the application of the calculus of variation and realizability of the required control meachanism is suggested.

Finally, the comparative study of the speed responses of the motor, with and without the optimal control effort is also presented to confirm the obtained results.

1. 서 론

이 論文은 制御用 直流電動機의 定速度 制御를 위한 最適制御方法을 규명하고 이러한 制御性能을 구현할 수 있는 制御調節器를 設計하는데 목적을 두었다.

과거 많은 문헌에서의 制御電動機의 定持性 및 動持性 解析方法은, 傳達函數法에 의존된다든지 혹은 狀態空間解析法을 사용하였다하더라도 在來式 複素周波數領域내에서의 解析 혹은 設計方法에 의존된 경향이 많았었다.[1,2] 이러한 古典的方法으로는, 다루는 制御系의 次數가 높아지면 그 數學的 處理가 비교적 번거롭고 어려울 뿐 아니라 制御系의 設計 및 最適制御化問題를 다루는데에는 더 한층 알맞지 못한 短點이 있다.

最近에 와서 變分法, 最大原理, 動的計劃法, 傾斜法 등, 系統의 最適制御에 관한 理論的 硏究의 개발이 이루어 짐에 따라 制御分野에서도 이러한 理論을 적용하여 制御系를 電算機를 써서 解析한다든지 혹은 制御系의 最適制御를 위한 機構設計를 이러한 方法에 의해 處理할려는 硏究가 활발히 진행되고 있다.[3,4,5,6]

이 論文에서는 古典的 複素周波數領域내에서의 解析設計方法이 지닌 難點들을 극복할 양으로 變分法에 의한 最適化原理를 써서 制御用 直流電動機系의 定速度最適制御問題를 다루되, 制御系의 設計 및 그 定態 혹은 過渡持性을 解析함에 있어 관련 方程式들을 電子計算機에 시뮤레이트하기 쉽도록 離散値化시켜 표현하여 數値解析을 시도하여 보았다. 이 方法의 長點은 反復計算이 가능하게 制御法則, 制御應答持性이 電算機시뮤레이트될 수 있게 표현되므로 電子計算機를 써서 빠르고, 쉽게, 또한 정확하게 解析 및 設計가 이루어질 수 있는데 있다.

速度制御機構에서 直流電動機는 操作部에 자주 사용된다. 이러한 電動機가 定速度運轉을 유지하지 못하는 데에는 여러가지 원인이 있을 수 있으나 여기서는 어떤 目標設定速度로 平衡運轉되어 오던 電動機—機械負荷系가 外部機械的負荷의 갑작스런 外亂變動에 應動되어 이 平衡運轉이 흐트러졌을 경우, 制御性能評價函數를 最適化하도록 電動機制御電壓을 여하히 最適制御할 것이며 이를 實現키 위한 피이드백制御系의 구성, 調節器가 가추어야될 조건을 규명하고, 그 制御效果를

*正會員 : 漢陽大工大敎授·工博
**正會員 : 大田工專專任講師
接受日字 : 1977年 7月 20日

數値解析하여 결과를 검토하여 보았다.

最適化理論으로는 變分法에 의한 最適化原理를 이용하였으며 狀態變數로는 電動機의 角變位, 角速度, 電機子電流를 잡고, 制御量으로는 電機子電壓을 택하도록하였다.

한편 이 電動機一負荷系의 系統方程式은 이때 非線型微分方程式으로 표현되므로 여기에서는 電動機의 平衡運轉點을 중심으로한 微少變動을 고려하여 다음과 같은 假定을 세워 다루는 制御對象을 線型化시켰다.

i) 부러쉬의 接觸抵抗은 무시한다.

ii) 磁氣飽和領域까지의 機械運轉은 고려하지 아니하며 磁氣回路의 磁化特性은 線型으로 가정하고

iii) slot로 인한 磁氣 recoil動作은 무시하며 히스테리시스는 없는 것으로 한다.

iv) 界磁電流는 일정하게 유지되며 回轉子一負荷系의 靜的摩擦力은 무시한다.

2. 最適速度制御條件

制御對象인 직류전동기의 狀態모델은 적절한 假定下에 다음과 같은 正規型으로 표현됨을 증명할 수 있다.

$$\boldsymbol{X}(t)=\boldsymbol{A}(t)\boldsymbol{X}(t)+\boldsymbol{B}(t)\boldsymbol{U}(t) \tag{1}$$

여기서

$\boldsymbol{X}$: $(n\times 1)$의 狀態行列

$\boldsymbol{A}$: $(n\times n)$의 系의 係數行列

$\boldsymbol{B}$: $(n\times m)$의 驅動行列

$\boldsymbol{U}$: $(m\times 1)$의 制御行列

最適化를 위한 制御機構의 評價尺度로는 다음과 같이 一般的인 調節器設計에서의 最適化 評價基準을 택하도록 한다.

$$\boldsymbol{J}=\frac{1}{2}\int_{t_0}^{t_f}[\boldsymbol{X}^T(t)\boldsymbol{Q}(t)\boldsymbol{X}(t)+\boldsymbol{U}^T(t)\boldsymbol{R}(t)\boldsymbol{U}(t)]dt \tag{2}$$

여기서 t_0, t_f는 初期및 最終時間을 나타내며 이들 端末性向은 固定된 것으로 생각한다.

이제 最適化 문제는 식 (1)로 표현되는 制御對象을, 식 (2)의 評價函數를 最少로 할 수 있도록 閉루우푸最適制御系를 설계하여 내는 문제로 집약된다.

지금 Hamiltonian을 다음과 같이 定義하면

$$\boldsymbol{H}[\boldsymbol{X}(t)\cdot\boldsymbol{U}(t)\cdot\boldsymbol{P}(t)\cdot t]=\frac{1}{2}\boldsymbol{X}^T(t)\boldsymbol{Q}(t)\boldsymbol{X}(t)+\frac{1}{2}\boldsymbol{U}^T(t)\boldsymbol{R}(t)\cdot\boldsymbol{U}(t)+\boldsymbol{P}^T(t)\boldsymbol{A}(t)\boldsymbol{X}(t)+\boldsymbol{P}^T(t)\boldsymbol{B}(t)\boldsymbol{U}(t) \tag{3}$$

여기서 $\boldsymbol{P}(t)$는 Costate벡터임.

最適化를 위한 必要條件은

$$0=\frac{\partial \boldsymbol{H}}{\partial \boldsymbol{U}}=\boldsymbol{R}(t)\boldsymbol{U}^*(t)+\boldsymbol{B}^T(t)\boldsymbol{P}^*(t) \tag{4}$$

식 (4)를 $\boldsymbol{U}^*(t)$에 관하여 풀면 最適制御量 $\boldsymbol{U}^*(t)$는

$$\boldsymbol{U}^*(t)=-\boldsymbol{R}^{-1}(t)\boldsymbol{B}^T(t)\boldsymbol{P}^*(t) \tag{5}$$

로 얻어지며 이들 결과로 부터

$$\left.\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{X}}^*(t)&=\boldsymbol{A}(t)\boldsymbol{X}^*(t)-\boldsymbol{B}(t)\boldsymbol{R}^{-1}(t)\boldsymbol{B}^T(t)\boldsymbol{P}^*(t)\\ \text{및 }\dot{\boldsymbol{P}}^*(t)&=-\boldsymbol{A}^T(t)\boldsymbol{P}^*(t)-\boldsymbol{Q}(t)\boldsymbol{X}^*(t)\end{aligned}\right] \tag{6}$$

이 制御機構가 制御可能하고, 또한 다루는 制御系가 時不變이어서 $\boldsymbol{A}, \boldsymbol{B}$ 및 $\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{Q}$行列이 實常數 行列이면 식 (6)의 解는 다음과 같다.[3]

$$\boldsymbol{P}^*(t)=\boldsymbol{K}(t)\boldsymbol{X}^*(t) \tag{7}$$

여기서 $\boldsymbol{P}^*(t)$ 및 $\boldsymbol{X}^*(t)$는 線型函數이며 $\boldsymbol{K}$는 $[n\times n]$ 行列이다. $\boldsymbol{K}$行列를 구하기 위하여 식 (7)을 t에 관해 한번 微分하면

$$\dot{\boldsymbol{P}}^*(t)=\dot{\boldsymbol{K}}(t)\boldsymbol{X}^*(t)+\boldsymbol{K}(t)\dot{\boldsymbol{X}}^*(t) \tag{8}$$

이제 $\boldsymbol{X}^*(t)$를 정리하면 $\boldsymbol{K}(t)$에 관한 다음의 Riccati 型 微分方程式을 얻는다.

$$\frac{d\boldsymbol{K}(t)}{dt}=-\boldsymbol{A}^T(t)\boldsymbol{K}(t)-\boldsymbol{K}(t)\boldsymbol{A}(t)-\boldsymbol{Q}(t)+\boldsymbol{K}(t)\boldsymbol{B}(t)\boldsymbol{R}^{-1}(t)\boldsymbol{B}^T(t)\boldsymbol{K}(t) \tag{9}$$

이 論文에서는 角速度 W_m이 一定速度下의 平衡狀態로 運轉되고 있는 直流電動機 系統이 外亂으로 인하여 回轉角速度에 變化를 받아 $t_0\sim t_f$時間區間 사이에서 적은 制御量을 消費하면서 또한 적은 偏差를 유지하면서 되도록 원래의 平衡速度로 遷移되기를 희망한다고 생각한다.

(이렇게 定速度 電動機系에서 回轉角速度가 變化를 받게되는 原因으로는

(1) 界磁回路電壓이 固定値에서 빗나갔을 때와

(2) 機械的 負荷의 外亂變動 等을 들 수가 있다.) 따라서 最適化를 위한 制御性能의 評價尺度로서 식 (2)와 같은 I.S.E. (integral of the sequare of the error) 評價函數를 사용하면 된다. 즉

$$J=\frac{1}{2}\int_{t_0}^{t_f}(q\Delta W^2{}_m+R\Delta U^2)dt \tag{10}$$

여기서 出力을 角速度變動分으로 취하였을 때

$\Delta W_m=\boldsymbol{C}\Delta\boldsymbol{X}$

단 $\boldsymbol{C}$: $(1\times n)$의 出力行列

위의 出力表現式을 식 (10)에 대입하면 評價函數로는

$$J=\frac{1}{2}\int_{t_0}^{t_f}(\Delta\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{C}^Tq\boldsymbol{C}\Delta\boldsymbol{X}+R\Delta U^2)dt \tag{11}$$

가 얻어진다.

3. 最適制御機構의 具現

J를 最少化하는 最適制御量을 구하기 위해서 變分法에 의한 最適化原理를 이용하는 경우 식 (9)의 Riccati方程式을 경계조건

$\boldsymbol{K}(t_f)=0$

制約下에서 풀어야 한다.

그러므로 最適制御된 系統의 狀態遷移 $X^*(t)$는

$$X^*(t)=exp\{G(t)\}X_0 \tag{12}$$

가 되고 最適化를 위한 調節裝置의 制御量 $U^*(t)$는

$$U^*(t)=-R^{-1}(t)B^T(t)K(t)X^*(t)$$
$$=F(t)X^*(t) \tag{13}$$

로 얻어진다. 여기서 F는 궤환이득行列이다.

따라서 最適化 機能을 갖춘 最終制御系는 Fig. 1와 같이 具現化시키면 된다.

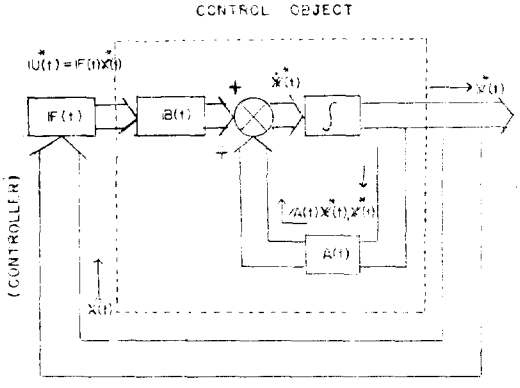

그림 1. 最適化 制御系統의 블럭線圖
Fig. 1. Block diagram of the Optimally Controlled System.

이제 電動機의 運轉平衡點을 基準하여 다른 變動量들을 표시할 필요가 있다. 식 (13)에서 이 平衡點으로부터 微少變動된 制御量은

$$\Delta U^*(t)=F(t)\cdot\Delta X^*(t) \tag{14}$$

또한, 상태방정식을 이 平衡點을 기준한 變分量으로 표시하면

$$\Delta X^*(t)=A(t)\Delta X^*(t)+B(t)\Delta U^*(t)$$
$$=G(t)\cdot\Delta X^*(t) \tag{15}$$

가 되고 初期條件은

$$\Delta X(t_0)=\Delta X_0 \tag{16}$$

식 (15)와 식 (16)으로 부터

$$\Delta X^*=exp\{G(t)\}\Delta X_0 \tag{17}$$

가 얻어지고 식(16)을 식(14)에 대입하면 ΔU^*값도 얻어진다.

狀態變數를 角變位, 角速度, 電機子電流, 한편 制御量을 電機子電壓으로 취하였을 때 平衡點을 中心으로 微少量만큼 變化하였을 때의 각 變分量은

$$\left.\begin{aligned}\theta_m&=\theta_{m0}+\Delta\theta_m\\ I_a&=I_{a0}+\Delta I_a\\ W_m&=W_{m0}+\Delta W_m\\ V_a&=V_{a0}+\Delta V_a\end{aligned}\right\} \tag{18}$$

(여기서 I_{a0}, θ_{m0}, W_{m0}는 平衡狀態의 動作點에서의 狀態量임.)

위 식과 이미 얻어진 最適制御결과식을 이용하면 Fig. 2와 같은 調節機構가 형성된다.

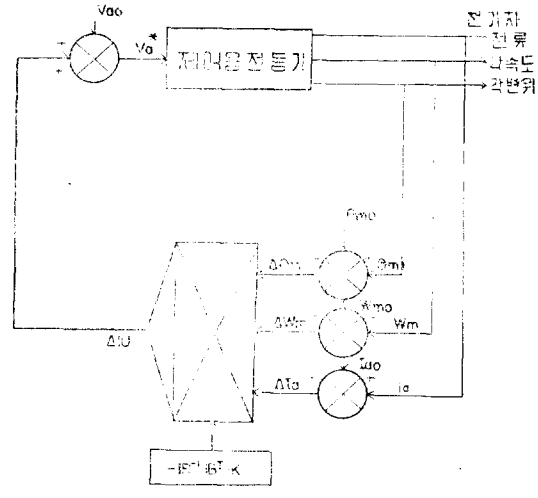

그림 2. 最適速度調節器
Fig. 2. Block diagram of the optimum Speed Controller.

電動機系로 부터 角變位, 角速度, 電機子電流를 檢出하고 이것들로부터 平衡狀態의 角變位 θ_{m0}, 角速度 W_{m0}, 電機子電流 I_{a0}와의 差 $\Delta\theta_m$, ΔI_a, ΔW_m을 구하여 이것들을 乘算器를 써서 $-R^{-1}B^TK$와 곱하고 ΔU와 V_{a0}를 합하면 最適制御量 電機子電壓 V_a*가 얻어진다.

4. 供試 直流電動機의 動特性모델

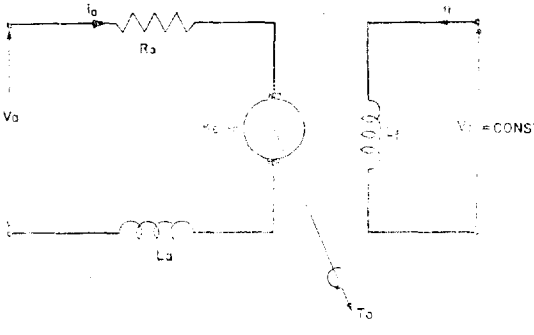

그림 3. 直流分卷電動機
Fig. 3. Diagram of D.C. Shunt Motor.

그림 3은 電機子電壓制御를 시도한 制御用 直流分卷電動機의 等價回路를 나타낸다. 電壓 및 回轉力 平衡

條件들을 감안하면 이 系에 대하여 다음의 여섯개 方程式을 세울 수 있다.

$$\left.\begin{aligned} &V_a(t)=R_a i_a(t)+L_a\frac{di_a(t)}{dt}+e_m \\ &\phi(t)=K_f i_f=\phi(\text{界磁磁束 一定}) \\ &T_D(t)=K_m\phi i_a(t)=K_m K_f i_f i_a(t)=K_T i_a(t) \\ &T_D(t)=J_m\frac{dW_m(t)}{dt}+B_m W_m(t) \\ &W_m(t)=\frac{d}{dt}\theta_m(t) \\ &e_m=K_e W_m(t) \end{aligned}\right\} \quad (19)$$

여기서

V_f=電動機의 界磁捲線電壓
V_a=電動機의 電機子捲線電壓
$i_a(t)$=電動機 電機子電流
i_f=電動機 界磁電流
ϕ=主界磁 磁束
K_f=磁束比例定數
K_e=逆起電力 定數
K_T=回轉力 定數
e_m=電氣子 逆起電力
$T_D(t)$=電動機 發生回轉力
L_a=電機子回路의 自己인덕턴스
R_a=電機子回路의 抵抗
J_m=電動機軸에 관한 回轉子의 慣性能率
B_m=電動機 軸에 관한 回轉子의 粘性 摩察係數
W_m=角速度
θ_m=角變位

지금 電機子電壓制御되는 경우의 動持性 모델을 작성하기 위하여 外部印加電壓 혹은 機械的負荷外亂등의 微少變動으로 말미암아 電動機速度에 變動이 생겼다고 하면 이 平衡點 근방에서의 變動分에 대해 狀態모델을 정리할 필요가 있다.

식 (19)을 기틀로 하여 狀態모델을 작성하면

$$\left.\begin{aligned} &\frac{d}{dt}\Delta\theta_m(t)=\Delta W_m(t) \\ &\frac{d}{dt}\Delta W_m(t)=\frac{K_T}{J_m}\Delta i_a(t)-\frac{B_m}{J_m}\Delta W_m(t) \\ &\frac{d}{dt}\Delta i_a(t)=-\frac{R_a}{L_a}\Delta i_a(t)-\frac{1}{L_a}\Delta e_m(t) \\ &\qquad\qquad +\frac{1}{L_a}\Delta V_a(t) \end{aligned}\right\} \quad (20)$$

이며, 이를 行列로 표시하면

$$\begin{pmatrix}\Delta\dot{X}_1\\ \Delta\dot{X}_2\\ \Delta\dot{X}_3\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0 & 1 & 0\\ 0 & -\frac{B_m}{J_m} & \frac{K_T}{J_m}\\ 0 & -\frac{K_e}{L_a} & \frac{-R_a}{L_a}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\Delta X_1\\ \Delta X_2\\ \Delta X_3\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}0\\ 0\\ \frac{1}{L_a}\end{pmatrix}\Delta V_a \quad (21)$$

이다.

微少偏移된 出力을 回轉角速度로 잡았을 때의 出力方程式은

$$\Delta W_m=C\Delta X$$

단, C : $(1\times n)$의 出力行列

이를 行列로 표시하면

$$\Delta W_m=\begin{bmatrix}0 & 1 & 0\end{bmatrix}\begin{pmatrix}\Delta x_1\\ \Delta x_2\\ \Delta x_3\end{pmatrix} \quad (22)$$

이다.

이 論文에서는 電動機로서 直流 27[V]와 定格電流 7[A], 8500[rpm]의 分卷電動機를 사용하였다. 供試機의 중요한 物理定數를 測定 혹은 計算한 결과치는 다음과 같다.

電氣子抵抗 $R_a=0.25[\Omega]$
電機子인덕턴스 $L_a=1.02\times10^{-3}$[H]
逆起電力常數 $K_e=29.965\times10^{-3}$[V/rad/sec]
토오크常數 $K_T=24.5\times10^{-3}$[N·m/A]
慣性모우멘트 $J_m=1.4928\times10^{-6}$[kg$-m^2$]
粘性마찰계수 $B_m\fallingdotseq0$

이들 값을 식(21)에 대입하면 電動機 系統의 動特性狀態모델은 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{pmatrix}\Delta\dot{x}_1\\ \Delta\dot{x}_2\\ \Delta\dot{x}_3\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 16412\\ 0 & -29.377 & -245.1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x_1\\ x_2\\ x_3\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}0\\ 0\\ 984.8\end{pmatrix}\cdot V_a \quad (23)$$

$$\Delta W_m=\begin{bmatrix}0 & 1 & 0\end{bmatrix}\begin{pmatrix}\Delta x_1\\ \Delta x_2\\ \Delta x_3\end{pmatrix} \quad (24)$$

5. 供試電動機系의 最適制御結果의 數値解析

앞의 系統定數를 가진 供試分卷電動機가 電機子 電壓으로 制御되는 경우의 定速度 制御持性을, 앞 1節, 2節 및 3節에서의 理論을 適用하며 最適化를 위한 制御政策 및 이로 인한 制御效果를 數値解析으로 검토하여보았다. 電動機—負荷系의 平衡運轉條件에서의 각 變數들의 실제값은

$\omega_m=141.6$ [rad/sec]
$I_f=7.0$[A]
$I_a=1.4$[A]

로 測定되었고 또한 이 制御對象의 係數行列, 驅動行列 및 出力벡터는 식 (23)으로 부터 각각 다음과 같이 얻어졌다.

$$A=\begin{pmatrix}0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 16412\\ 0 & -29.38 & -245.1\end{pmatrix},\quad B=\begin{pmatrix}0\\ 0\\ 984.8\end{pmatrix} \quad (25)$$

$$C=[\,0\ 1\ 0\,] \tag{26}$$

이 系統은 時不變, 線型系統이고 行列 Riccati 方程式을 電算機로 푼 결과 실제로 制御가 행하여지는 時間(初期時間)부근에서 거의

K=常數

로 되었다. 制御効果의 比較를 위해 차후 편리할것 같아 q의 다른 몇개의 값에 대하여도 K 및 G行列을 計算하여 내도록 電算機프로그램하였고, 실제의 系統에서 얻은 係數行列과 驅動行列의 要素定數값들을 1/100로 축소시켜 계산시켰다.

이 計算에 사용된 電算機프로그램은 그림 4와 같다.

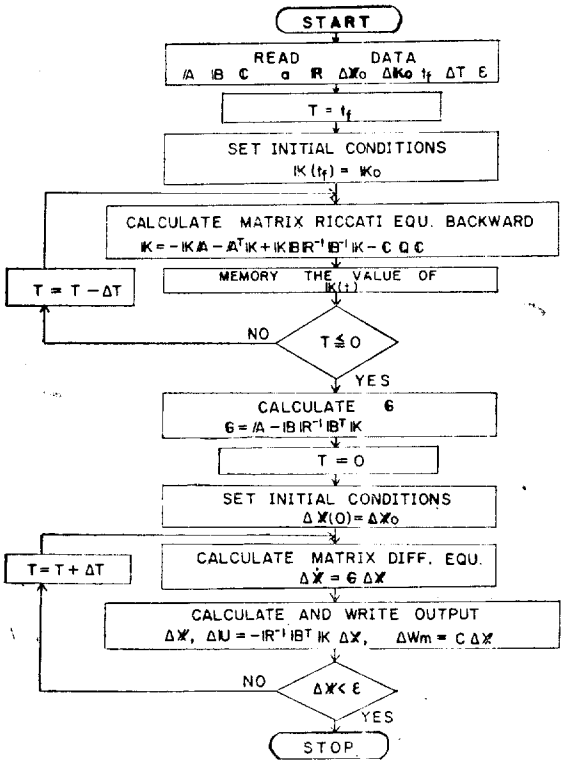

그림 4. 電算機프로그래밍을 위한 플로우圖
Fig. 4. Flow chart of computer simulation

이에 사용된 計算機는 韓國電力의 FACOM 230 OS2/VS型이며 q 및 R의 여러 값에 대한 K行列 및 G行列의 電算機出力 결과는 아래와 같다.

i) $q=1$, $R=1$일때

$$K=\begin{pmatrix}0&0&0\\0&0.0347&0.0986\\0&0.0986&0.5528\end{pmatrix}\quad G=\begin{pmatrix}0&1&0\\0&0&164.1\\0&-9.852&-56.07\end{pmatrix} \tag{27}$$

ii) $q=0.1$, $R=1$일 때

$$K=\begin{pmatrix}0&0&0\\0&0.006&0.0292\\0&0.0292&0.2902\end{pmatrix}\quad G=\begin{pmatrix}0&1&0\\0&0&164.1\\0&-3.128&-30.60\end{pmatrix} \tag{28}$$

iii) $q=0.05$, $R=1$일때

$$K=\begin{pmatrix}0&0&0\\0&0.0035&0.0199\\0&0.0199&0.2353\end{pmatrix}\quad G=\begin{pmatrix}0&1&0\\0&0&164.1\\0&-2.222&-25.27\end{pmatrix} \tag{29}$$

iv) $q=0.001$, $R=1$일때

$$K=\begin{pmatrix}0&0&0\\0&0.001&0.0076\\0&0.0076&0.1367\end{pmatrix}\quad G=\begin{pmatrix}0&1&0\\0&0&164.1\\0&-1.028&-15.71\end{pmatrix} \tag{30}$$

식(27), (28), (29), (30)의 각각에 대하여 검토하여 보면 $g_{11}, g_{12}, g_{13}, g_{21}, g_{22}, g_{23}, g_{31}$값들은 q값의 變化에 거의 變化가 없고 g_{32}, g_{33}의 값만이 현저하게 증가 또는 감소함을 알 수가 있다.

즉 g_{33}의 값을 보면 q값의 감소에 따라 −56.07, −30.60, −25.27, −15.71로 變化하였는데 이 값이 커질수록 電機子 電流의 감쇄율도 작아진다.

또한 初期條件을 다음과 같이 가정

$$\Delta X_0=\begin{pmatrix}0\\5\\0\end{pmatrix}$$

하였을 때

$$\text{즉 } \Delta W_m=[\,0\ 1\ 0\,]\begin{pmatrix}0\\5\\0\end{pmatrix}=5[\text{rad/sec}]$$

에 대하여 ΔU^*, ΔW^*_m, ΔI_a^*를 計算한 결과를 도시하였다.

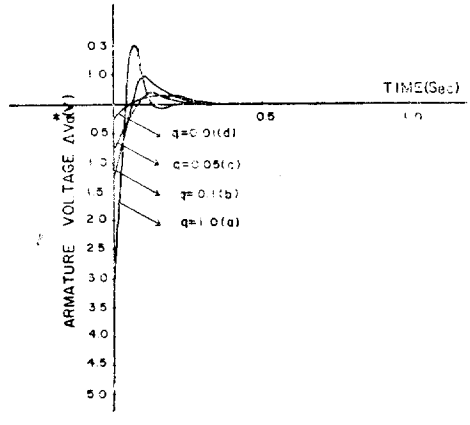

그림 5. 電機子電壓 對 時間特性
Fig. 5. Relation of Armature Voltage VS. time

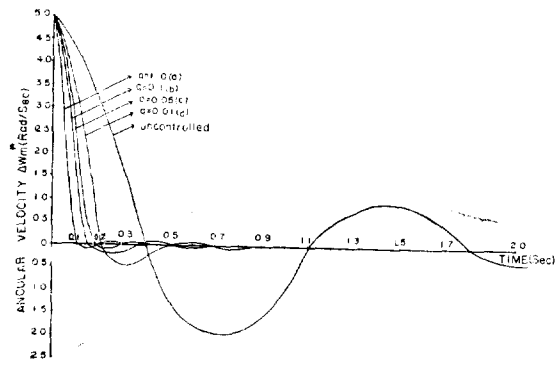

그림 6. 回轉角速度 對 時間持性
Fig. 6. Relation of Angular Velocity VS. time.

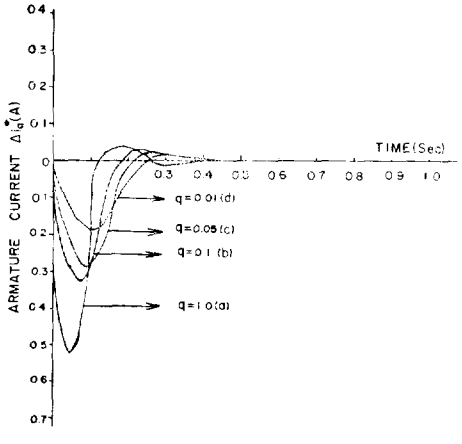

그림 7. 電機子電流 對 時間持性
Fig. 7. Relation of Armature Current VS. time.

그림 5는 出力端에 階段狀 微少角速度 外亂變動으로 因한 誤差가 發生하였을 때 評價函數를 最少로하기 위해 電機子에 가해야 될 制御電壓變化分(ΔU^*)를 그린것이고 그림 6은 이때의 角速度 變化量(ΔW_m^*)를 그린 것이다.

回轉角速度에 誤差가 생기면 電機子電壓을 크게 變化시켜 誤差電壓을 빨리 감쇄시키고 誤差가 점점 감소함에 따라 電機子電壓도 그 값이 감소되어 원래의 平衡값으로 복귀된다. 이들 그림에서 曲線 a, b, c 및 d는 각각 ΔW_m^*과 ΔU^*와의 比重, 즉 q와 R의 비율 1 : 1, 0.1 : 1, 0.05 : 1, 0.001 : 1로 하였을 때 q값에 따라 ΔU^*와 ΔW_m^*變化가 다르게 나타났으며 q값을 크게할수록 電動機 回轉角速度가 短時間에 平衡狀態에 도달하였다. 그러나 電機子電壓의 變化量은 크게 감쇄하였으며 실제의 linear-requlator에서는 ΔU^*가 어떤값에 制限되어 있으므로 V_a의 값을 취하는데 있어 ΔU^*가 그 制限値를 넘지 않도록 定하여야 할 것이다. 그림 (7)은 電機子電流 變化를 그린 것인데 電機子電流는 q값을 크게 취함에 따라 빨리 平衡狀態에 도달함을 알 수 있다

6. 結 論

i) 定常持性해석중 狀態變數에 의한 狀態遷移신호흐름 線圖에 의한 해법은 計算이 번잡하므로 discrete-time system으로 취급 하였을 때 電子計算機를 사용하여서 古典的 해법보다도 신속하고 간결한 結論을 얻었으며 어떤 파형의 入力에 대하여도 電動機持性 해석에 적용할 수 있다.

ii) 角速度 W_m의 값과 電機子電流 I_a의 값은 初期狀態이후의 값부터 尖頭値를 나타내는 감쇄진동을 일으키다 時間의 흐름에 따라 점점 定常狀態로 이른다. 따라서 電機子電流 I_a의 不足制動된 狀態의 감쇄진동으로 말미암아 初期電流가 많이 흐른다.

iii) 平衡狀態에서 一定速度로 運轉되고 있는 電動機가 回轉角速度 5[rad/sec]의 階段狀으로 變化를 받았을 때 이것을 다시 平衡狀態로 복귀하려면 電機子電壓의 最適値는 그림 (5)의 (C)의 曲線($q=0.005$)에서와 같이 電機子電壓을 순간적으로 −0.95[V]으로 감소시켰다가 時間이 경과함에 따라 그림 (5)의 곡선(C)를 상당한 電機子電壓制御를 행하면 된다.

iv) 回轉角速度에 대한 誤差減衰를 더욱 빨리 하려면 q의 값을 더욱 크게 잡을 必要가 있으며 q를 1로 한다면 그림(6)의 (a)의 曲線과 같이 角速度의 減衰는 더욱 빨리 일어난다. 그러나 이때 그림(5)의 曲線(a)와 같이 電機子電壓의 調整範圍는 커진다.

v) 식(25)에서 $b_{11}=0$, $b_{21}=0$, $b_{31}=984.8$이므로 電機子電流만이 直接的으로 電機子電壓의 영향을 받는다 그러므로 電機子電壓의 變化가 클 때에는 電機子電流의 變化도 크게 나타난다.

參 考 文 獻

1. L.B.K Sastry, "Flow graph theory study of D.C Motor dynamics" U.D.C 621, 313, 223, 001, 1967. 9.
2. Stanley M. Schinners, "Modern Control System theory and Application" Addison-Wesley publishing Company (1972)
3. Kirk, D.E., "Optimal Control theory Prentice-Hall Inc. (1967)

4. Andrew P. Soge, "Optimal System Control" Prentice-Hall Inc. (1968)
5. J.T. Tou: "Modern Control theory", MacGraw-Hill (1969)
6. Michael Athans and Peter L. Falb, "Optimal Control" McGraw-Hill Inc. (1966)
7. Takashi, Y. "Control and Dynamics System" Addison-Wesley Publishing Company (1969)
8. Daniel D. McCracken and William S, Dorm "Numerical Methods and Fortran Programming"
9. Benjamin C, Kuo, "Linear Networks and System"., McGraw-Hill (1967)
10. E.A. Freeman, C. Eng, K.M. Abbott, "Design of Optimal Linear Control System with quadratic Performance indices" PROC, IEEE. Vol. 114, No. 8, August 1967.
11. K. Nitta, H. Okitsu and T. Suzuki "Dynamic Characteristics of D.C. Shunt Motor"
12. 元鍾洙 "直流自勵磁分卷發電機의 最適線型 電壓調整器에 관한 硏究"대한 전기학회지 1973. 7.
13. 千熙英 "Thyristor直流 chopper方式으로 驅動되는 直流他勵磁式電動機의 過度持性 解析法"대한전기학회지 1972. 3.