

# 界磁回路 開放時の 直流機の 異常現象에 關한 少考

權 純 國

## 序 論

直流分巻 電動機에 있어서 定常運轉時에 界磁回路를 開放하면 回轉子의 速度가 매우 上昇하는 傾向이 있다. 여기에서는 이러한 異常現象 自體를 數學的으로 解析해서 開放後의 回轉子의 速度變化和 電機子電流의 變化를 時間의 函數로써 求하였다. 그리고 回轉子의 速度 및 電機子電流, 殘留磁氣와 回轉子 最終速度와의 關係, 負荷 torque 를 생각했을 경우의 回轉子速度降下條件, 및 speed-torque curve 도 求해 보았다.

Speed-torque curve 의 경우에는 數學的으로는 복잡함으로 간단히 하기 위하여 過渡期間을 편의상 sub-transient 와 transient 의 두 가지 period 로 나눈 다음 物理的 現象을 考慮하여 sub-transient 를 無視해서 생각하였다.

以上 몇 가지 간단한 理論에 對하여 實際로 實驗을 해 봄으로써 比較檢討 하였다. 本 實驗에서 detector 로는 Diehl tachometer-generator 를, tachometer 入力으로는 Hewlett-Packard 社製 Model 200 CD 型 oscillator 에 依한 20 cps signal 을 利用하였다. 그리고 回轉 速度와 電機子電流를 Dual Channel Sanborn-150 recorder 로 記錄하였다.

## 理 論

直流分巻電動機의 定常運轉狀態를 圖示하면 그림 1 과 같이 簡단히 表示된다.

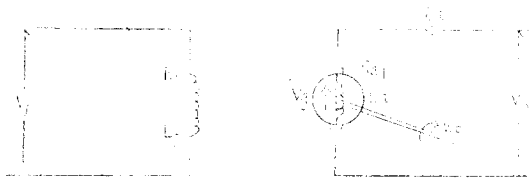


그림 1

위와 같은 system 에서, 電機子反作用에 依한 影響을 無視하면, 即, 負荷에 依한 磁束減少를 막기 위하여 設

置한 補償卷線이 電機子反作用에 依한 影響을 完全히 補償해 준다면 다음과 같은 基本式이 成立한다.

$$V_a = V_g + i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} \dots\dots\dots (1)$$

$$V_f = i_f R_f + L_f \frac{di_f}{dt} \dots\dots\dots (2)$$

$$V_g = K_a \phi \omega \dots\dots\dots (3)$$

$$T = K_a \phi i_a \dots\dots\dots (4)$$

$$T = J \frac{d\omega}{dt} + f\omega \dots\dots\dots (5)$$

지금  $V_a$  와  $\omega = \omega_0$  를 定格値인 constant 로 해서 定常狀態로 運轉하다가  $t=k$  인 순간에 界磁回路를 開放시켰을 경우를 생각해 보기로 한다.

### [A] $\omega(t)$ 및 $i_a(t)$ 曲線

이 때에 field flux 는 定常狀態일 때인  $\phi_0$  에서 殘留磁氣인  $\phi_R$  로 급격히 減少한다. 즉,  $i_f$  에 依한 flux  $\phi_0$  를, 남는 部分인  $\phi_f$  와 없어지는 部分인  $\phi_R$  로 나누어서 생각하면

$$\begin{cases} \phi = \phi_0 = \phi_f + \phi_R & (t < k \text{ 일 때}) \\ \phi = \phi_R & (t > k \text{ 일 때}) \end{cases}$$

로 된다.

實際로  $\phi - i_f$  曲線에 있어서 原點부근과 포화점 부근에서는 非線型으로 되지만 여기에서 必要的 條件은 單純히 定常狀態인  $\phi_0$  와 開放後인  $\phi_R$  들 뿐이므로 이 두 條件만 생각하면 非線型性에 無關하다. 그리고 界磁卷線 開放時, switching 하는 순간에 있어서 field flux 의 變化는 完全한 step 으로는 되지 않지만 그 period 가 너무 적으므로 完全한 step 으로 보아도 無妨하다. 또 이 system 은 磁氣的結合으로 되어 있으므로 相互誘導作用에 依한 影響을 考慮해보면  $t=k$  인 순간에 field flux 는  $\phi_0$  에서  $\phi_R$  로 減少하고 電機子回路는 電源이 短絡된 閉回路로 생각할 수 있어서  $\phi_0$  가  $\phi_R$  로 되는 순간에  $L_a$  에는 電壓이 순간적으로 誘起된다. 그러나 air gap 때문에 相互誘導係數가 극히 적고 또 時定數가 매우 적으므로 電流는 곧 사라진다. 그래서 이러한 事實에 依한 影響도 考慮해 넣지 않았다.

따라서 다음과 같은 電壓方程式이 成立한다.

$$V_a = K_d(\phi_f + \phi_R)\omega + iaR_a + L_a \frac{di_a}{dt}$$

( $t < k$  이면  $\phi_f = \phi_{f_0}$ ,  $\omega = \omega_0$ ,  $t > k$  이면  $\phi_f = 0$ )

윗 式을  $\mathcal{L}$ -Transform 한 後,  $k \rightarrow 0$  되는 極限을 取하면

$$K_d \phi_R \omega(s) + (L_a s + R_a) i_a(s) = (L_a I_{a0} + \frac{V_a}{s})$$

로 된다.

여기에서  $I_{a0}$ 는 定常狀態일 때의 電機子電流이다.

다음에 torque equation에서 dynamic equation은

$$K_d(\phi_f + \phi_R) i_a = J \frac{d\omega}{dt} + f\omega$$

( $t < k$  이면  $\phi_f = \phi_{f_0}$ ,  $\omega = \omega_0$ ,  $t > k$  이면  $\phi_f = 0$ )

역시 電壓方程式과 같은 過程을 밟으면

$$(Js + f)\omega(s) - K_d \phi_R i_a(s) = J\omega_0$$

로 된다.

結果의으로 다음과 같은 두 式을 얻는다.

$$\left\{ (Js + f)\omega(s) - K_d \phi_R i_a(s) = J\omega_0 \dots\dots\dots(6) \right.$$

$$\left. \left\{ K_d \phi_R \omega(s) + (L_a s + R_a) i_a(s) = L_a I_{a0} + \frac{V_a}{s} \dots\dots\dots(7) \right. \right.$$

이 들 두 式으로부터

$$\omega(s) = \omega_0 \frac{s^2 + \left(\frac{R_a + K_d \phi_R I_{a0}}{L_a} + \frac{K_d \phi_R V_a}{J\omega_0 L_a}\right) s + \frac{K_d \phi_R V_a}{J\omega_0 L_a}}{s \left\{ s^2 + \frac{JR_a + fL_a}{JL_a} s + \frac{(K_d \phi_R)^2 + fR_a}{JL_a} \right\}} \quad (8)$$

$$i_a(s) = I_{a0} \frac{s^2 + \frac{fL_a I_{a0} + JV_a - J\omega_0 K_d \phi_R}{JL_a I_{a0}} s + \frac{fV_a}{JL_a I_{a0}}}{s \left\{ s^2 + \frac{JR_a + fL_a}{JL_a} s + \frac{(K_d \phi_R)^2 + fR_a}{JL_a} \right\}} \quad (9)$$

Final-value theorem을 적용하면

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \omega(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \omega(s) = \frac{(K_d \phi_R) V_a}{(K_d \phi_R)^2 + fR_a} \quad (10)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} i_a(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s i_a(s) = \frac{fV_a}{(K_d \phi_R)^2 + fR_a} \quad (11)$$

그리고 一般의으로 (8), (9) 式의 判別式  $D$ 는  $D > 0$  이므로 [(C)項 參照]  $\omega(t)$  및  $i_a(t)$ 는 振動하지 않는다.

지금  $\omega$ 와  $i_a$ 의 時間的變化를 알기 위하여 (8) 및 (9) 式을 inverse transform 하면

$$\omega(t) = \omega_0 \left\{ \frac{b}{\alpha\beta} + \frac{\alpha^2 - a\alpha + b}{\alpha(\alpha - \beta)} e^{-at} - \frac{\beta^2 - a\beta + b}{\beta(\alpha - \beta)} e^{-\beta t} \right\} \quad (12)$$

$$= A + B e^{-at} + C e^{-\beta t} \quad (13)$$

$$i_a(t) = I_{a0} \left\{ \frac{b_1}{\alpha\beta} + \frac{\alpha^2 - a_1\alpha + b_1}{\alpha(\alpha - \beta)} e^{-at} \right.$$

$$\left. - \frac{\beta^2 - a_1\beta + b_1}{\beta(\alpha - \beta)} e^{-\beta t} \right\} \quad (14)$$

$$= A_1 + B_1 e^{-at} + C_1 e^{-\beta t} \quad (15)$$

로 된다. 여기에서

$$\alpha = \frac{1}{2} \left\{ \frac{JR_a + fL_a}{JL_a} + \sqrt{\left(\frac{JR_a + fL_a}{JL_a}\right)^2 - \frac{4(K_d \phi_R)^2 + fR_a}{JL_a}} \right\}$$

$$\beta = \frac{1}{2} \left\{ \frac{JR_a + fL_a}{JL_a} - \sqrt{\left(\frac{JR_a + fL_a}{JL_a}\right)^2 - \frac{4(K_d \phi_R)^2 + fR_a}{JL_a}} \right\}$$

$$a = \left( \frac{R_a}{L_a} + \frac{K_d \phi_R I_{a0}}{J\omega_0} \right)$$

$$b = \left( \frac{K_d \phi_R V_a}{J\omega_0 L_a} \right)$$

$$a_1 = \left( \frac{fL_a I_{a0} + JV_a - J\omega_0 K_d \phi_R}{JL_a I_{a0}} \right)$$

$$b_1 = \left( \frac{fV_a}{JL_a I_{a0}} \right)$$

즉,  $\omega(t)$ 와  $i_a(t)$ 는 logarithmic curve를 그린다.

[B] 印加電壓이 速度變化에 미치는 影響

前項에서는 無負荷, 定格速度, 定格電壓에서의 界限 回路開放現象을 생각했다. 여기에서는 印加電壓이 速度變化에 미치는 影響에 關해서 생각해 보기로 한다.

지금 (5) 式에서 負荷 torque  $T_s$ 를 考慮해 보면 dynamic equation은

$$T = J \frac{d\omega}{dt} + f\omega + T_s \quad (16)$$

로 된다. 그래서 (A)에서의 樣 같은 方法으로  $\omega(s)$  및  $i_a(s)$ 를 求解 하면

$$\omega(s) = \omega_0 \frac{s^2 + \frac{J\omega_0 R_a + L_a I_{a0} K_d \phi_R - T_s I_a}{J\omega_0 L_a} s + \frac{K_d \phi_R V_a - T_s R_a}{J\omega_0 L_a}}{s \left\{ s^2 + \frac{JR_a + fL_a}{JL_a} s + \frac{(K_d \phi_R)^2 + fR_a}{JL_a} \right\}} \quad (17)$$

$$i_a(s) = I_{a0} \frac{s^2 + \frac{JV_a + fL_a I_{a0} - J\omega_0 K_d \phi_R}{JL_a I_{a0}} s + \frac{fV_a + T_s K_d \phi_R}{JL_a I_{a0}}}{s \left\{ s^2 + \frac{(JR_a + fL_a)}{JL_a} s + \frac{(K_d \phi_R)^2 + fR_a}{JL_a} \right\}} \quad (18)$$

로 된다.

이 경우에도 分母의 判別式  $D$ 는  $D > 0$  이므로 inverse transform 하면

$$\omega(t) = \omega_0 \left\{ \frac{b'}{\alpha\beta} + \frac{\alpha^2 - a'\alpha + b'}{\alpha(\alpha - \beta)} e^{-at} - \frac{\beta^2 - a'\beta + b'}{\beta(\alpha - \beta)} e^{-\beta t} \right\} \quad (19)$$

$$= m_1 + m_2 e^{-at} + m_3 e^{-\beta t} \quad (20)$$

$$i_a(t) = I_{a0} \left\{ \frac{b_1'}{\alpha\beta} + \frac{\alpha^2 - a_1'\alpha + b_1'}{\alpha(\alpha - \beta)} e^{-at} \right.$$

$$-\frac{\beta^2 - a_1'\beta + b_1'}{\beta(\alpha - \beta)} e^{-\beta t} \} \dots\dots\dots(21)$$

$$= m_1' + m_2' e^{-at} + m_3' e^{-\beta t} \dots\dots\dots(22)$$

Final-value theorem 을 적용하면

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \omega(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \omega(s) = \frac{K_d \phi_R V_a - T_s R_a}{(K_d \phi_R)^2 + f R_a} \dots\dots\dots(23)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} i_a(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s i_a(s) = \frac{f V_a + T_s K_d \phi_R}{(K_d \phi_R)^2 + f R_a} \dots\dots\dots(24)$$

(23)式에서  $t \rightarrow \infty$  뒤에 따라  $\omega(t)$ 가 0으로 되기 위해서는

$$K_d \phi_R V_a - T_s R_a = 0$$

이어야 한다. 따라서

$$V_a < \frac{T_s R_a}{K_d \phi_R} \dots\dots\dots(25)$$

인 條件만 만족되면 定常狀態( $\omega = \omega_0$ )로 運轉하다가 界磁回路를 開放한다 하더라도 速度는 增加하지 않고 減少해서 드디어는 停止한다.

그러나 速度가 增加하지 않고  $\omega_0$ 보다 조금이라도 減少하기 위한 條件은 條件 (25)와는 좀 다르다.

(16)式에서 定常狀態를 생각하면

$$T = f \omega_0 + T_s$$

다시 (16)式을 음미해 보면 界磁回路를 開放한 直後에는  $J$ 가 크기 때문에  $\omega$ 는 거의 變化하지 않는다. 따라서  $\omega = \omega_0$  constant로 놓으면 switching 한 直後에도

$$T = f \omega_0 + T_s$$

로 볼 수 있다.

다음에 電機子電流의 變化를 음미해 보기로 한다. 이 경우에도  $\omega$ 가 거의 變化하지 않으므로  $\omega = \omega_0$  constant로 보면 (1)式에서  $t=k$ 에서부터 극히 짧은 時間間隔 동안 (이것을 sub-transient period로 본다. 이 period에서 電流는 急增하게 된다) 右邊 第一項은 -定이다. 그리고 實際 system에서는 時定數가 매우 적으므로 直觀的인 意味에서 過渡項은 無視해도 좋다. 따라서 (1)式中 過渡項을 無視하면 界磁回路를 開放한 直後에는 (實際로는 sub transient period 만큼 時間差가 있지만) 電壓式은 다음과 같이 된다. 即

$$V_a = K_d \phi_R \omega_0 + i_a' R_a \dots\dots\dots(26)$$

다음에 torque의 大小關係를 생각해 보면  $T = f \omega_0 + T_s$ 인 關係와 (4)式에서 만일

$$f \omega_0 + T_s > K_d \phi_R i_a'$$

의 條件이 만족되는  $i_a'$ 가 흐른다면 回轉子의 速度는 減少하기 始作하므로 여기에 (26)의  $i_a'$ 를 代入하면

$$\frac{f \omega_0 + T_s}{K_d \phi_R} > \frac{V_a - K_d \phi_R \omega_0}{R_a}$$

$$\therefore V_a < \frac{f R_a + (K_d \phi_R)^2}{K_d \phi_R} \omega_0 + \frac{T_s R_a}{K_d \phi_R} \dots\dots\dots(27)$$

結果的으로 界磁回路를 開放한 直後, sub-transient period가 지난 다음만을 생각할 때 (27)의 條件이 만족되면 速度는 이 period가 지난 後부터 減少하기 始作한다.

그러나 (25)의 條件이 있으므로  $V_a$ 가

$$\frac{f R_a + (K_d \phi_R)^2}{K_d \phi_R} \omega_0 + \frac{T_s R_a}{K_d \phi_R} > V_a > \frac{T_s R_a}{K_d \phi_R}$$

의 範圍內에 들게 되면 回轉子는 停止한 때까지 速度가 減少하지 않고  $\omega_0$ 보다는 적은 값, 例를 들면  $\omega_1$ 이라는 一定한 값 ( $f \omega_1 + T_s = K_d \phi_R i_a''$  되는)에서 定常狀態로 된다.

지금  $\omega$ 의 變化에 따르는  $V_a$ 의 變化를 보기 위하여  $\omega$ 를 獨立變數로 놓으면 (27)式은

$$V_a < \frac{f R_a + (K_d \phi_R)^2}{K_d \phi_R} \omega + \frac{T_s R_a}{K_d \phi_R} \dots\dots\dots(28)$$

로 表示된다.

### [C] Speed-torque curve

(4)式에서

$$T = K_d \phi_R i_a$$

인 關係가 있으므로  $i_a$ 代身 (15)式을 代入하면

$$T = K_d \phi_R (A_1 + B_1 e^{-at} + C_1 e^{-\beta t}) \dots\dots\dots(29)$$

그러므로 (B)式의 曲線과 (29)式의 曲線을 plotting한 後 이들 두 曲線으로부터 speed對torque를 읽어서 plotting하면 目的하는 speed-torque curve를 구할 수 있다.

그러나 이것을 數式的으로 간단히 구하기 위하여 다음과 같이 생각한다.

$$(1 \pm x)^{\frac{1}{2}} \approx 1 \pm \frac{1}{2} x \quad (0 < x < 1)$$

인 關係로부터

$$\alpha \approx \frac{R_a}{L_a} + \frac{f}{J} - \frac{(K_d \phi_R)^2 + f R_a}{J R_a + f L_a}$$

$$\beta \approx \frac{(K_d \phi_R)^2 + f R_a}{J R_a + f L_a}$$

그리고 一般的으로 使用하는 標準型 直流機에서는  $L_a \ll R_a$ ,  $J \gg R_a$ ,  $K_d \phi_R \ll 1$ ,  $J > f$ 인 關係가 있으므로

$$\alpha \approx \frac{R_a}{L_a} \gg 0$$

$$0 < \beta \approx 1$$

로 된다.

이것은 (13)式과 (29)式中에서 第2項의 時定數가 매우 적다는 것을 意味한다. 따라서 若干의 時間間隔만 이 경과하더라도 第2項은 곧 消滅한다. 이렇게 생각하면 (3)式과 (29)式中 第2項을 無視할 수 있으므로 다음과 같은 간단한 두 式을 얻는다.

$$\begin{cases} C e^{-\beta t} = \omega(t) - A \\ C_1 e^{-\beta t} = \frac{T}{K_d \phi_R} - A_1 \end{cases}$$

이 두 식에서 時間項을 消去하면

$$T = K_d \phi_R \frac{C_1}{C} \omega(t) + K_d \phi_R \left( A_1 - \frac{C_1}{C} A \right) \dots\dots(30)$$

인 關係式을 얻는다.

即, 界磁回路를 開放했을 때의 speed-torque curve는 sub-transient period가 지난 後부터 만을 생각하면 거의 直線의 變換함을 알 수 있다.

以上은 速度가 增加하는 경우의 speed-torque curve이다.

다음에 (27)식의 條件이 만족되어 速度가 減少하는 경우를 생각하면 前과 같은 方法으로 (20), (22) 및 (4) 式으로부터

$$T = K_d \phi_R \frac{m_3'}{m_3} \omega(t) + K_d \phi_R \left( m_1' - \frac{m_3'}{m_3} m_1 \right) \dots(31)$$

을 얻는다. 이것도 亦是 直線의 方程式이다.

以上의 理論을 綜合해서 檢討해 보면 理想的인 直流 分卷電動機에서는 定常狀態로 運轉하다가 界磁을 開放했을 때 轉子의 速度는, 定格으로 運轉했을 경우에는 增加하고 그 極限値는 無負荷인 場合に (10)式으로 주어진다.

(10)式은  $(K_d \phi_R)$ 의 函數로 볼 수 있는데 이것은  $(K_d \phi_R)$ 의 2次 分數式이므로 반드시 1개의 極限値를 갖는다. 지금  $\omega(\infty)$ 를  $(K_d \phi_R)$ 의 函數로 보고 그 曲線을 그려 보면 그림 2와 같이 된다. 極點은  $(\sqrt{fR_a}, V_a/2\sqrt{fR_a})$  로써 殘留磁氣가  $\sqrt{fR_a}$  일 때

$$\omega(\infty)_{max} = \frac{V_a}{2\sqrt{fR_a}}$$

로 된다.

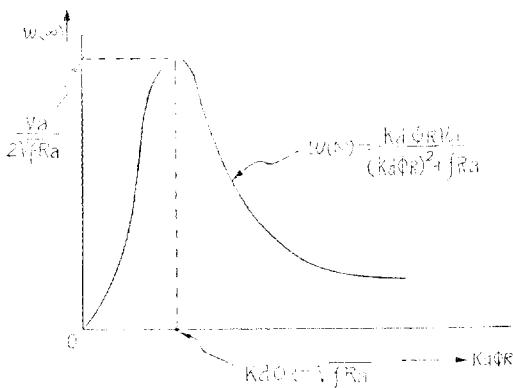


그림 2

即, 殘留磁氣가  $\sqrt{fR_a}$ 인 값이 될 때 까지는  $\omega(\infty)$ 는 增加하고,  $\sqrt{fR_a}$ 보다 적어지면  $\omega(\infty)$ 는 漸次로 減少

한다. 殘留磁氣가 零이면  $\omega(\infty)$ 는 零이 된다.

그리고  $\omega(\infty)$ 는  $V_a$ 에 正比例하며 負荷가 있는 경우에는  $\omega(\infty)$ 는 (23)式으로 주어진다. 負荷 torque에 依해서 減少함도 알 수 있다.

다음에 speed torque curve는 sub transient period가 지난 後부터 생각하면 어느 경우에나 거의 直線의 變換한다.

## 實 驗

本 實驗에 使用한 直流電動機는 G.E.社製 分馬力 D. C. dynamometer이다. recorder로는 Sanborn-150 duel channel recorder를 使用하였으며 tachometer로는 Dichl社製 tachometer-generator를 使用하였다. tachometer 入力으로는 Hewlett-Packard社製 200 CD型 oscillator에 依한 20 cps signal을 利用하였다. 그리고 上記한 直流電動機에는 G.E.社製 1/6 HP, 80 V, 2,200 rpm, 27A 定格인 直流分卷電動機를 直接 coupling해서 實驗을 行하였다.

### (1) (A)에 關한 實驗

#### 測定値 및 計算

##### [定數의 測定]

$$L_a = 0.016, L_f = 0.18, R_a = 2.0, R_f = 472$$

##### [無負荷實驗에 依한 測定值]

$$V_a = 103, I_{a0} = 0.725, I_{f0} = 0.19, n = 1,800 \text{ rpm}$$

$$\therefore \omega = 188.4 \text{ rad/sec.}$$

##### [ $K_d \phi_R$ 의 測定]

$$V_{a1} = 5.5, n_1 = 1,800 \therefore K_d \phi_R = 0.029$$

$$\text{그리고 } K_d \phi_0 = 0.54$$

##### [J의 測定]

$$V_a = 115, n = 2,600, t_1 = 9, I_{a0} = 0.9, I_{f0} = 0.14$$

$$\therefore \omega = 272.1 \text{ rad/sec, } \alpha = 45.4 \text{ rad/sec}^2$$

$$\theta = \int_0^{t_1} \omega \cdot dt = 46.700 \text{ degrees}$$

$$T = 0.54 \times 0.9 = 0.486 \text{ kg-m}$$

$$\therefore J = 0.53 \text{ kg m}^2$$

Kent's Mechanical Engineers' Handbook (12th edition), Design and Production (John Wiley) 에서 最惡인 경우로써  $f = 0.003$ .

以上의 測定値를 使用하여 計算하면 結果的으로  $\omega(t)$ 와  $i_a(t)$ 의 trace는 다음과 같은 方程式으로 表示된다.

$$\omega(t) = 188.4 [2.32 + 0.00011e^{-157t} - 1.32e^{-0.615t}]$$

$$i_a(t) = 0.9 [50.2 - 52.8e^{-125t} + 3.6e^{-0.615t}]$$

이들 두 식에서 알 수 있는 바와 같이 速度는 점점 增加하여 最終速度가 初期速度의 2.32倍도 된다. 電機子 電流는 中間에 最大値를 갖게 되며 極限에 가서는  $0.9 \times 50.2 = 45.18 \text{ amp}$ 로 된다.

實驗結果 Fig. A, ( $n=1,800, V_a=103$ ), Fig. B  $n=1,800, V_a=108V$ , Fig. C ( $n=1,800, V_a=101$ ) 3개의 graph 를 얻었는데 Fig. A 가 앞의 計算値에 해당되는 것이다.

[2] (B)에 關한 實驗

[測定値]

$T_s=0.918 \text{ kg-m}, V_a=65, I_{a0}=0.89, I_f=0.09, n=1,800.$

[計算結果]

實驗 [1]에서와 같은 方法으로 計算하여 다음 式을 얻었다.

$$\omega(t)=188.4\{0.035+0.00003 e^{-125t}+0.965 e^{-0.615t}\}$$

$$i_a(t)=0.89\{36.5-32.4 e^{-125t}-3.1 e^{-0.615t}\}$$

(25)式의 條件에 對한  $V_a$ 를 計算해 보면

$$V_a = \frac{T_s R_a}{K_a \phi_R} = 63.3V < 65V$$

即,  $V_a=65$  이면  $\omega$ 가 減少하여 거의 零이 됨을 알 수 있다. 이에 對한 實驗結果는 Fig. D와 같다. 대략적으로 一致함을 알 수 있다.

다음에 (27)式의 條件을 求해 보면

$$V_a = \frac{fR_a + (K_a \phi_R)^2}{K_a \phi_R} \omega_0 + \frac{T_s R_a}{K_a \phi_R} = 85.2$$

그러므로  $V_a$ 가  $63.3 < V_a < 85.2$ 의 範圍內에 들게 되면 回轉子는 速度가 減少는 하지만 停止하지 않고  $\omega$ 가 낮아진 後 어떤 一定值인  $\omega'$ 로 回轉하게 된다. 이것에 關한 實驗結果는 다음과 같다.

Fig. E는  $V_c=55$ 인 경우로써 回轉子의 速度는 매우 빨리 減少한다. Fig. F는  $V_a=81.2$ 인 경우로써 回轉子 速度는 減少해서  $\omega_0$ 보다는 좀 적은 constant인 回轉速度로 回轉한다.

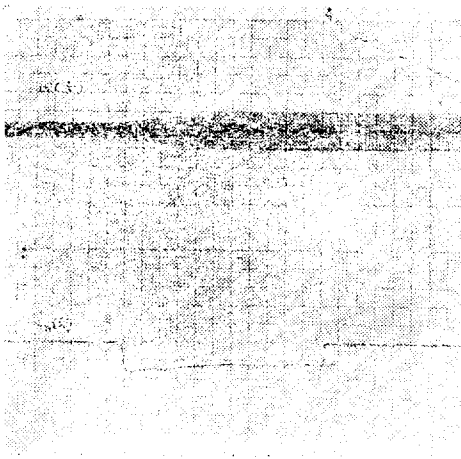


Fig. A

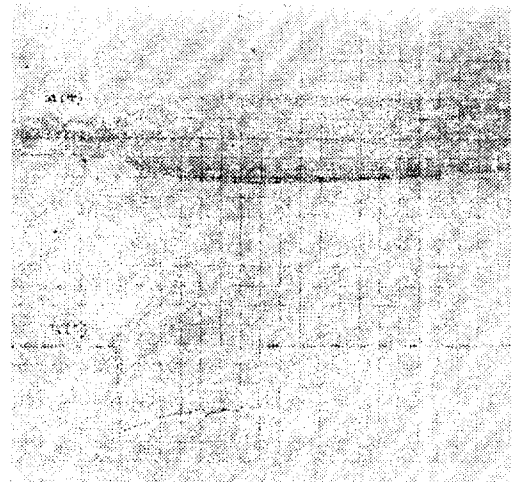


Fig. B

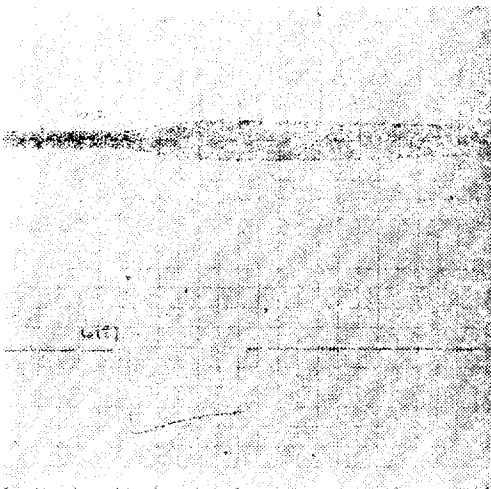


Fig. C

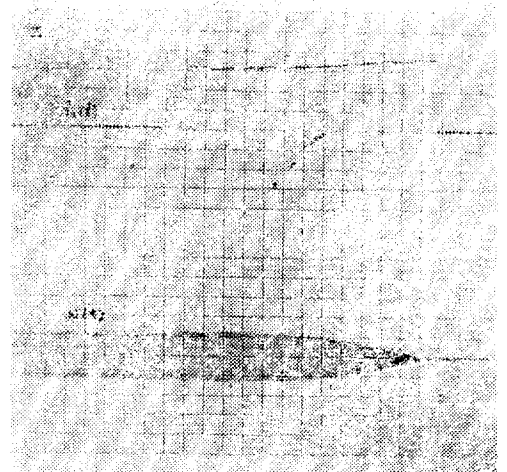


Fig. D

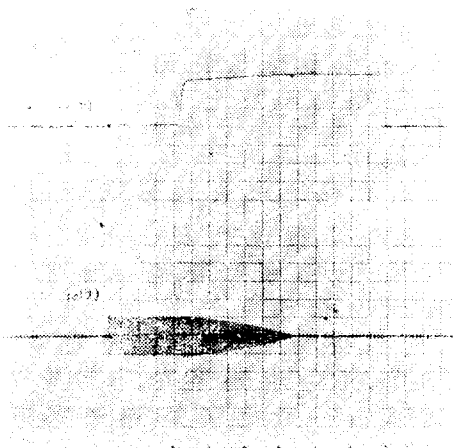


Fig. E

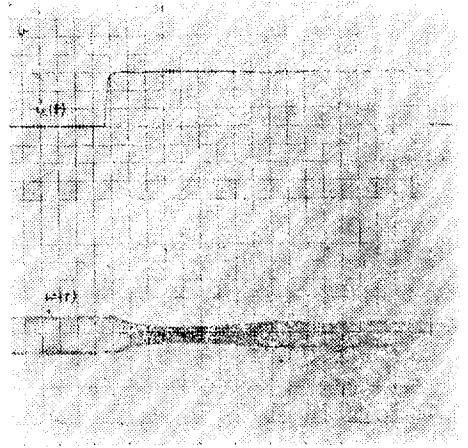


Fig. F

[3] (C)에 관한 實驗

Speed-torque curve plotting

(30)式에 對한 數値를 구하여 speed-torque curve를 구해본 結果 Fig. A, Fig. B, Fig. C의 實驗에 對한 것으로써 다음 3式을 얻었다. 여기에서는  $\omega_0=188.4$ 를 per unit value로 取하였다.

$$\begin{cases} \text{Fig. A ; } i_a = \frac{T}{K_a \phi_R} = -2.45 \omega + 50.68 \dots\dots\dots ① \\ \text{Fig. B ; } i_a = \quad // = -4.26 \omega + 57.9 \dots\dots\dots ② \\ \text{Fig. C ; } i_a = \quad // = -2.02 \omega + 48.9 \dots\dots\dots ③ \end{cases}$$

위의 3개의 曲線을 Fig. G에 plotting 하였다. 다음에 Fig. A, Fig. B, Fig. C로부터  $\omega - \frac{T}{K_a \phi_R}$ 를 읽은 後 (表 1), Fig. G에 亦是 plotting 하였다.

Speed torque curve (Fig. G)를 보면 간단히 취급한 理論式은 直線이지만 實驗値는 直線이 아니고 약간 씩 아래로 굽었다. 그러나 界磁回路를 開放한 後 過渡期間을 지나 定常狀態에 가까워지면 理論値와 實驗値가

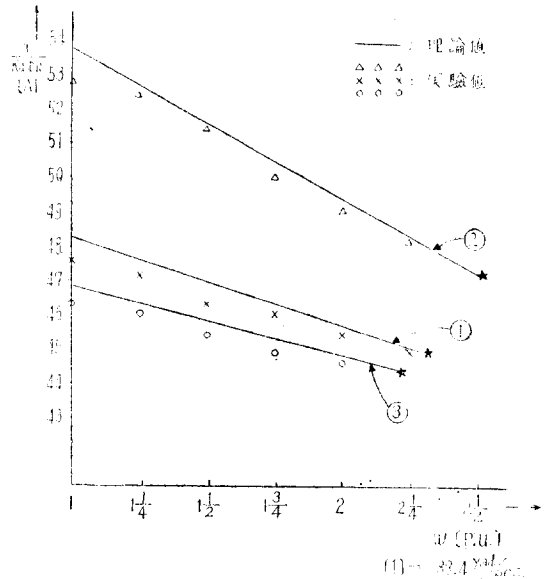


Fig. G

表-1

$\frac{T}{K_a \phi_R}$	$\omega$ (P.U.)	1	$1 \frac{1}{4}$	$1 \frac{1}{2}$	$1 \frac{3}{4}$	2	$2 \frac{1}{4}$
		①	理論値 48.2 實驗値 47.6	---	---	---	45.8 45.5
②	理論値 53.8 實驗値 52.8	---	---	---	49.4 49.1	---	48.3
③	理論値 46.9 實驗値 46.4	---	---	---	44.9 44.7	---	---

거의 一致함을 알 수 있다.

結果의 由로 speed-torque curve는 sub-transient period가 지난 後부터 定常狀態가 될 때까지 거의 直線의이며 그 기울기는 印加電壓이 높을수록 커진다. 그리고 이 curve는  $\omega(t)$  및  $i_a(t)$ 가 定常狀態로 되는 點 (Fig. G에서 ★表한 點)에서 靜止(即,  $\omega(t)$ 와  $i_a(t)$ 가 const.)하게 된다.

結 論

直流通分巻電動機를 定常狀態로 定格運轉시키다가 界磁

回로를開放하면 速度는 매우 增加하여 어떤 極限值로 接近하게 된다. 그 極限値는 殘留磁氣, 印加電壓, 마찰 계수, 負荷 torque 에 依해서만 影響을 받는다.

速度의 極限値인  $\omega(\infty)$ 를 殘留磁氣의 函數로 보면 2 次分數函數로써 그림 2 와 같은 모양으로 되며 단 1 개의 極大値를 갖는다.

$\omega(t)$  및  $i_a(t)$ 는 logarithmic curve 를 그린다.

만일 (27)의 條件에 맞는 電壓을 印加해서 運轉하면 界磁回로開放時 回轉子의 速度는 增加하지 않고 減少한다.

Speed-torque curve 는 sub-transient period 를 지난 後부터는 定常狀態로 轉 때까지 거의 直線的으로 變化한다.

以上과 같은 結果가 直流分卷電動機의 異常現象을 理解하는 데 조금이라도 도움이 된다면 그것으로 더 多幸한 일이 없겠다.

本考의 研究, 實驗에 있어서 여러가지로 아낌없는 지도와 편달을 하여주신 李承院 先生任, 그리고 朴旻鎬 先生任께 感謝를 드립니다.

(西紀 1963 年 3 月 13 日 接受)

### 參 考 文 獻

- 1) Kuhlmann: Design of Electrical Apparatus.
- 2) Kloeffler: D-C Machinery (Revised Ed.).
- 3) Davis: Electromechanical Components for Servomechanisms.
- 4) Fitzgerald and Kingsley: Electric Machinery (2nd Edition).
- 5) Gardner and Barnes: Transients in Linear Systems.