論 文
13—1—2

Analog 計算機 에의한 2相誘導電動機의 Transient Dynamic Braking 의 해석

黃 熙 隆*

序 論

電氣的 機械的에네어지 變換裝置로서의 2相誘導電動機 braking 現象의 過渡的인 dynamics를 正確히 考察하기 爲하여 直流制動과 프라깅(plugging)의 두 現象을 取扱하였는데, Lagrangian 方法에 依하여 導出된 一般化된 電氣機械의 運動方程式을 線型變換으로서 $\alpha\beta, dq$ 變換, +−, fb 變換 等을 行하여 變形시킨 式에 위 各現象의 條件을 代入 計算으로 푸는 한편, 前의 非線型性을 갖는 運動方程式을 analog 電子計算機에 씨뮤래이트 한 후 各 條件 및 定數를 變化시켜 現象을 考察하며 위 計算으로 얻은 曲線과 比較하였고, 다음에 實際機械의 實驗으로 求한 資料를 添加하였다.

Analog 電子計算機에 依한 해석은 直流制動만을 取扱하였고, 프라깅은 씨뮤래이숀方法 만을 前者에 準하여 適하였다. 本文에 使用된 機械의 定數는 實驗에 依하여 求하였다

電氣機械는 電壓, 電流特性과 그 톨크特性이 元來 非線型性을 內包하기 때문에 機械를 設計하거나 그것들의 正確한 動特性을 研究하기 위해서는 analog 計算機로 씨뮤래이트하여 해석하거나 small signal 法으로 어떤 平衡點 近傍을 線型化하여 解釋하는것이 最善의 方法이다. 또 2相誘導電動機는 一般化된 回轉機械(generalized rotating machine)*1에 가장 近似한 機械로서 모든 電氣 機械해석의 기초가 되어 固定子 M相, 回轉子 N相인 機械를 等價2相電動機로 計算하여 해석*2할 수 있고 整流子機械는 이것의 線型變換*3으로 解析할 수있다.

그러므로 2相誘導電動機의 위두가지 現象을 analog 計算機에 씨뮤래이트하여 해석함은 비슷한 2相써이보모오터나 直流機의 braking 의 dynamics 를 해석가능하게 하고 機械設計에도 도움을 줄것이다.

本 論文에서 使用된 數式과 記號는 附錄A에, 實驗으로求한 電動機定數는 附錄B에 各各 說明해 놓았다.

* 서울大學校 工科大學 電氣工學科

本 論 A. D-C Braking

1. 概 說

一定速度로 回轉하고 있는 2相籠型誘導電動機를 電源으로부터 차단과 同時에 2相中 1相에만 一定直流電流를 흘려 braking 시킨다. 이 直流 braking 條件을 +−, fb 變換으로 얻은 附錄 A(11)'', (12)''式에 代入하여 計算으로 運動方程式을 풀고 다음에 $\alpha\beta, dq$ 變換으로 얻은式 附錄 A(7)', (8)式'에 같은 條件을 代入하여 analog 計算機에 씨뮤래이트(simulate)한후 比較하였다. 다음에 time scaling 을 行하여 電氣的 過渡톨크에 對하여 條件과 定數를 變化시킬때 影響을 考察하였고 small signal 法으로 平衡點 附近에 對하여 analog 計算機로 씨뮤래이트 하는法도 例示하였다

2. +−, fb 變換式에 依한 D-C Braking 해석

勵起電源으로서 電流를 쓰면

$$\begin{bmatrix} i_+^s \\ i_-^s \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & j \\ 1 & -j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha^s \\ i_\beta^s \end{bmatrix}$$

α 相에 一定直流 I^s를 흘리고 β 相은 開放하므로

$$i_\alpha^s = I^s \qquad i_\beta^s = 0$$

이므로

$$i_+^s = \frac{1}{\sqrt{2}} I^s$$

$$i_-^s = \frac{1}{\sqrt{2}} I^s$$

$$v_\alpha^r = v_\beta^r = 0 \qquad \therefore \ v_f^r = v_b^r = 0$$

그러므로 附 A(11)''式 (12)''式은 ($\dot{\theta} = \omega_m$로 一定하다고 볼수 있을 때)

$$\begin{bmatrix} v_+^s \\ v_-^s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R^s + L_\mu^s p & 0 & L_\mu^{sr} p \\ 0 & R^s + L_\mu^s p & 0 \\ L_\mu^{sr}(p - jn\omega_m) & 0 & R^r + L_\mu^r(p - jn\omega_m) \\ 0 & L_\mu^{sr}(p + jn\omega_m) & 0 \end{bmatrix}$$

$$
\begin{matrix} 0 \\ L_{\mu}^{r}p \\ 0 \\ R^{r}+L_{\mu}^{r}(p-jn\omega_m) \end{matrix} \left.\begin{matrix} \\ \\ \\ \\ \end{matrix}\right] \begin{bmatrix} \frac{I^s}{\sqrt{2}} \\ \frac{I^s}{\sqrt{2}} \\ i_f^r \\ i_b^r \end{bmatrix} \qquad (11)'''
$$

$$
T_e = \frac{1}{\sqrt{2}} jnL_{\mu}^{sr}(I^s i_f^r - I^s i_f^{r*})
$$

$$
= \frac{1}{\sqrt{2}} jnL_{\mu}^{sr} I^s(i_f^r - i_f^{r*}) \qquad (12)'''
$$

가되며

의 matrix 는

$$
v_f^s = \frac{1}{\sqrt{2}} I^s R^s + L_{\mu}^{s,r} p i_f^r \qquad (가)
$$

$$
v_b^s = \frac{1}{\sqrt{2}} I^s R^s + L_{\mu}^{s,r} p i_b^r \qquad (나)
$$

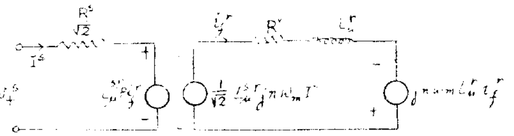
$$
0 = \frac{1}{\sqrt{2}} L_{\mu}^{s,r} jn\omega_m I^s + \{R^r + L_{\mu}^r(p - jn\omega_m)\} i_f^r \qquad (다)
$$

$$
0 = \frac{1}{\sqrt{2}} L_{\mu}^{s,r} jn\omega_m I^s + \{R^r + L_{\mu}^r(p + jn\omega_m)\} i_b^r \qquad (라)
$$

(가)와 (나), (다)와 (라)式은 서로共액이므로 (가)와 (다)에 關해서만 論한다.

(다)式을 i_f^r에 對하여 풀면

$$
i_f^r = \frac{L_{\mu}^{s,r} jn\omega_m I^s}{\sqrt{2}(R^r - jn\omega_m L_{\mu}^r)} \left\{ 1 - \varepsilon^{\left(-\frac{R^r}{L_{\mu}^r} + jn\omega_m\right)t} \right\}
$$



$$
\therefore\ i_b^r = \frac{-L_{\mu}^{s,r} jn\omega_m I^s}{\sqrt{2}(R^r + jn\omega_m L_{\mu}^r)} \left\{ 1 - \varepsilon^{\left(-\frac{R}{L_{\mu}^r} - jn\omega_m\right)t} \right\}
$$

위 電壓 電流方程式의 等價回路는

톨크式(12)'''式은

$$
T_{eu} = \frac{jnL_{\mu}^{s,r}}{\sqrt{2}} I^s(i_f^r - i_f^{r*})
$$

$$
= \frac{-n^2\omega_m L_{\mu}^{s,r2} I^{s2}}{(R^r)^2 + (n\omega_m L_{\mu}^r)^2} \left(1 - \varepsilon^{-\frac{R^r}{L_{\mu}^r}t} \cos n\omega_m t\right)
$$

$$
- \frac{n^3\omega_m^2 L_{\mu}^r L_{\mu}^{s,r} I^{s2}}{(R^r)^2 + (n\omega_m L_{\mu}^r)^2} \varepsilon^{-\frac{R^r}{L_{\mu}^r}t} \sin n\omega_m t
$$

平均톨크 $(T_{eu})_{average}$는

$$
(T_{eu})_{average} = \frac{-n^2\omega_m L_{\mu}^{sr2} I^{s2}}{(R^r)^2 + (n\omega_m L_{\mu}^r)^2}
$$

回轉子에 소비되는 平均電力 $P_{average}$

$$
P_{average} = \{i_f^{r2} R^r\}_{average} = \frac{(n\omega_m L_{\mu}^{s,r} I^s)^2}{2\{(R^r)^2 + (n\omega_m L_{\mu}^r)^2\}} R^r
$$

最大平均톨크는 $\frac{d\{(T_{eu})_{average}\}}{d\omega_m} = 0$

로놓을때 $\omega_m = \frac{R^r}{nL_{\mu}^r}$ 일때 最大톨크가 생김을 알수있으므로

$$
(T_{eu})_{average\ max} = \frac{nL_{\mu}^{sr2} I^{s2}}{2R^r L_{\mu}^r}
$$

實驗으로 求한(附錄 B 參照) 아래와 같은 2相籠型誘導電動機의 定數를 $(T_{eu})_{average}$式에 代入한후 ω_m을 變하는 一定値 15×2π부터 0의 値까지 變化시켜 圖示하면 그림 1 과 같다.

$n=4$, $L_{\mu}^{s,r} = 44.5\times10^{-3}$ [henry], $I^s = 10\ A$,

$R^r = 3.3\ \Omega$

$L_{\mu}^r = 51.8\times10^{-3}$ [henry]

$\omega_m = 2\pi n_s$

ω_m[rad/sec]	$2\pi\times15$	$2\pi\times14$	$2\pi\times13$	$2\pi\times12$	$2\pi\times11$	$2\pi\times10$	$2\pi\times9$	$2\pi\times8$	$2\pi\times7$
$(T_{eu})_{average}$	0.973	0.85	0.913	0.98	1.01	1.156	1.271	1.41	1.57

ω_m[rad/sec]	$2\pi\times6$	$2\pi\times5$	$2\pi\times4$	$2\pi\times3$	$2\pi\times2.56$	$2\pi\times2$	$2\pi\times1.5$	2π	$2\pi\times0.5$	$2\pi\times0$
$(T_{eu})_{average}$	1.76	1.96	2.19	2.39	2.42	2.31	2.12	1.65	0.915	0

3. Analog 電子計算機에 依한 D-C braking 解析

直流制動條件과 均等空隙(smooth air gap)인 理由로 $L_{\mu 2}^{s} = L_{\mu 2}^{r} = L_{\mu 2}^{s,r} = 0$, 및 $v_a^r = 0$, $v_q^r = 0$인 條件을 附錄 A(7)', (8)'式에 代入하면

$$
\begin{bmatrix} v_a^s \\ v_\beta^s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R^s + pL_{\mu}^s & 0 & pL_{\mu}^{s,r} & 0 \\ 0 & R^s + pL_{\mu}^s & 0 & pL_{\mu}^{s,r} \\ pL_{\mu}^{s,r} & n\phi L_{\mu}^{s,r} & R^r + pL_{\mu}^r & n\phi L_{\mu}^r \\ -n\phi L_{\mu}^{s,r} & pL_{\mu}^{s,r} & -n\phi L_{\mu}^r & R^r + pL_{\mu}^r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a^s \\ i_\beta^s \\ i_d^r \\ i_q^r \end{bmatrix} \qquad (7)''
$$

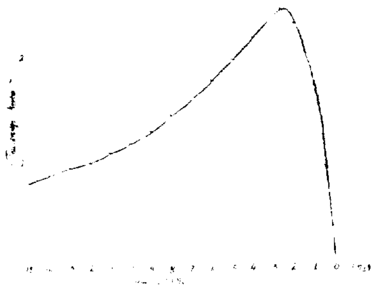


그림 1

$$T=J\dot{\phi}+\alpha\phi-nL_\mu^{sr}(i_\beta^s i_\alpha^r-i_\alpha^s i_q^r) \qquad (8)''$$

로되고 係數를 간단화하기 위하여 電壓, 電流에 對하여 變換

$$\begin{bmatrix} x_\alpha^s \\ x_\beta^s \\ x_d^r \\ x_q^r \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} [u] & [0] \\ [0] & \begin{bmatrix} \frac{R^r}{L_\mu^{sr}} & 0 \\ 0 & \frac{R^r}{L_\mu^{sr}} \end{bmatrix} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_\alpha^s \\ x_\beta^s \\ x_d^r \\ x_q^r \end{bmatrix}$$

을 (7)''式에 行하면

$$\begin{bmatrix} v_\alpha^s \\ v_\beta^s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} & [0] \\ [0] & \begin{bmatrix} \frac{R^r}{L_\mu^{sr}} & 0 \\ 0 & \frac{R^r}{L_\mu^{sr}} \end{bmatrix} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} R^s+pL_\mu^s & 0 & pL_\mu^{sr} & 0 \\ 0 & R^s+pL_\mu^s & 0 & pL_\mu^{sr} \\ pL_\mu^{sr} & n\phi L_\mu^{sr} & R^r+pL_\mu^r & n\phi L_\mu^r \\ -n\phi L_\mu^{sr} & pL_\mu^{sr} & -n\phi L_\mu^r & R^r+pL_\mu^r \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} & [0] \\ [0] & \begin{bmatrix} \frac{L_\mu^{sr}}{R^r} & 0 \\ 0 & \frac{L_\mu^{sr}}{R^r} \end{bmatrix} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_\alpha^s \\ i_\beta^s \\ i_d^{r'} \\ i_q^{r'} \end{bmatrix}$$

$$=\begin{bmatrix} R^s+pL_\mu^s & 0 & p\frac{L_\mu^{sr2}}{R^r} & 0 \\ 0 & R^s+pL_\mu^s & 0 & p\frac{L_\mu^{sr2}}{R^r} \\ pR^r & n\phi R^r & R^r+pL_\mu^r & n\phi L_\mu^r \\ -n\phi R^r & pR^r & -n\phi L_\mu^r & R^r+pL_\mu^r \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_\alpha^s \\ i_\beta^s \\ i_d^{r'} \\ i_q^{r'} \end{bmatrix}$$

回轉子回路를 R^r로 除하고 添字 μ를 없애면

$$\begin{bmatrix} v_\alpha^s \\ v_\beta^s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} R^s+pL^s & 0 & p\frac{L^{sr}}{R^r} & 0 \\ 0 & R^s+pL^s & 0 & p\frac{L^{sr}}{R^r} \\ p & n\phi & 1+p\frac{L^r}{R^r} & n\phi\frac{L^r}{R^r} \\ -n\phi & p & -n\phi\frac{L^r}{R^r} & 1+p\frac{L^r}{R^r} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_\alpha^s \\ i_\beta^s \\ i_d^{r'} \\ i_q^{r'} \end{bmatrix} \qquad (7)'''$$

톨크(8)''式은

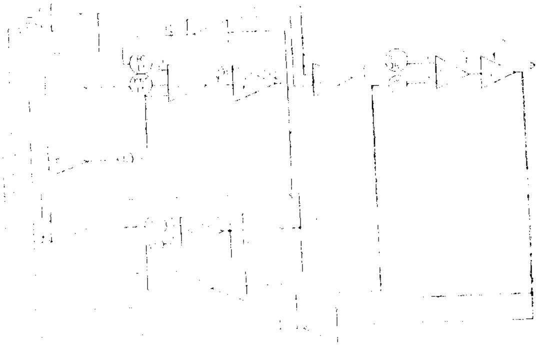
$$T=J\dot{\phi}+\alpha\phi-n\frac{L^{sr2}}{R^r}(i_\beta^s i_d^{r'}-i_\alpha^s i_q^{r'}) \qquad (8)'''$$

되고 直流制動條件을 (7)''', (8)'''式에 代入하면 即 固定子 α 相에 一定直流 I^s를 흘리고 β 相은 開放하면 各各

$$\begin{bmatrix} v_\alpha^s \\ v_\alpha^s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} R^s+pL^s & 0 & p\frac{L^{sr2}}{R^r} & 0 \\ 0 & R^s+pL^s & 0 & p\frac{L^{sr2}}{R^r} \\ p & n\phi & 1+p\frac{L^r}{R^r} & n\phi\frac{L^r}{R^r} \\ -n\phi & p & -n\phi\frac{L^r}{R^r} & 1+p\frac{L^r}{R^r} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I^s \\ 0 \\ i_d^{r'} \\ i_q^{r'} \end{bmatrix} \qquad \cdots\cdots(7)'''$$

$$T=J\dot{\phi}+\alpha\phi+n\frac{L^{sr2}}{R^r}(I^s i_q^{r'}) \qquad (8)'''$$

이 5個의 方程式을 analog 計算器로 씨무레이트하면 아래와 같다.



實驗한 電動機에서 얻은 定數(附錄 B 參照)를 代入하고 和項을 없애면

$$i_d' = -\int\left(\frac{R^r}{L^r} i_d' + n\phi i_q'\right)dt = -\int(63.7 i_d' + 4\phi i_q')dt$$

$$i_q' = -\int\left(\frac{R^r}{L^r} i_q' - \frac{n\phi I^s}{L^r}R^r - n\phi i_d'\right)dt = -\int(63.7 i_q' - 254.8 I^s\phi - 4\phi i_d')dt$$

$$\phi = -\int\left(\frac{\alpha}{J}\phi + \frac{nL^{sr2}}{JR^r} I^s i_q'\right)dt = -\int(0.214\phi + 0.0482 I^s i_q')dt$$

이되고 i_d', i_q'의 初期條件은 零, ϕ의 初期値 90.43 rad/sec. I^s는 常數이므로 magnitude scaling을 하지않으면 analog 電子計算機 씨뮤레이숀은 아래와 같다.

위와 같이 씨뮤레이트하여 $\phi_0=\omega$를 變化시키면서 톨크모양을 考察해보면 그림(2)과 같으며, 이때의 ω를 橫軸으로 톨크를縱軸으로 했을때 그림 3과 같다. 이것으로볼때 最大톨크는 制動電流가 變하지 않는限 初期速度 ω에는 關係없이 一定하며 톨크—速度曲線은 誘導電動機의 그것과 비슷하며 前節에서 計算으로 얻은 曲線과 定性的으로 一致한다.

電氣的인 過渡톨크를 考察하기 위하여 time scaling으로서 100倍한후 回轉數變化, 回轉子抵抗値變化 直流

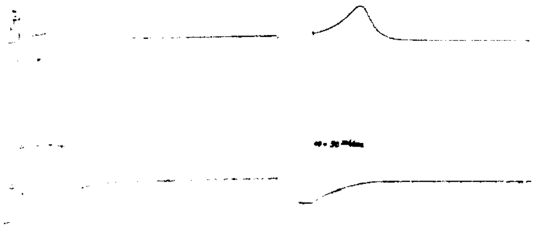


그림 2

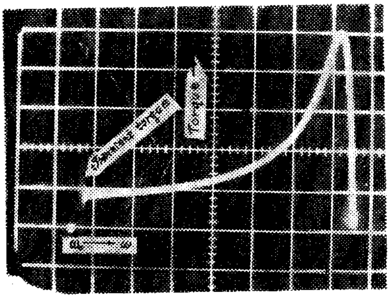


그림 3

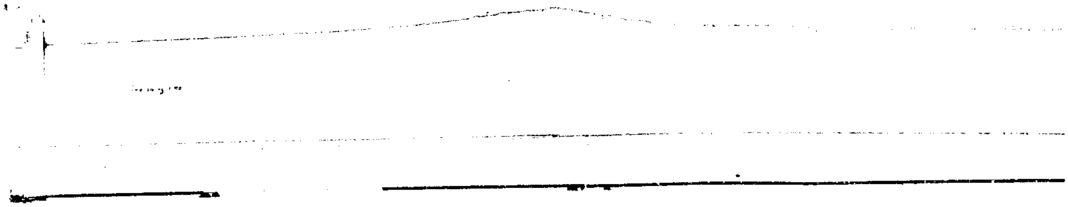


그림 4

制動 電流값의 變化에 따른 過渡톨크의 影響을 考察해 보면

그림(2)의 첫 경우를 100倍한 것이 그림(4)와 같고 그림(4)中의 過渡分을 橫軸 sweep時間을 빠르게한것이 그림(5)가 된다.

(1) 電氣的 過渡톨크와 初期速度와의 關係

直流制動時 初速度를 $\dot{\phi}_0=90.4$ rad/sec, 60, 40 rad/sec로 할때 톨크曲線 i_g''와 i_d''曲線의 變化는 그림(6)과같다.

(2) 回轉子抵抗値 變化時 電氣的過渡톨크 와의 關係

回轉子抵抗値를 이電動機의 1.5倍, 1倍, 0.5倍로 變化시켰을때 電氣的 過渡톨크의 變化는 그림(7)과 같다.

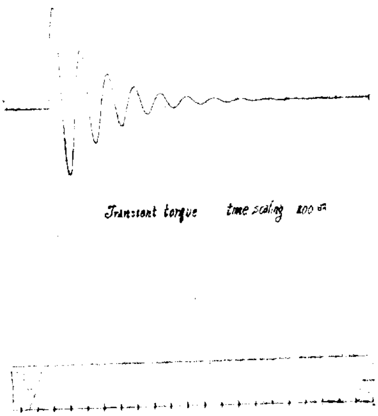


그림-5

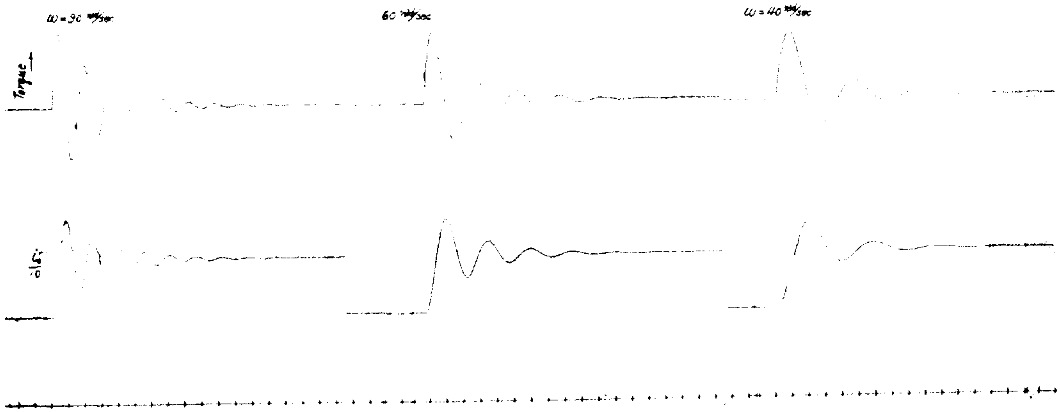


그림-6

(3) Braking 電流 I^s의 變化와 要停止時間과의 關係

braking 電流 I^s를 1 ampere, 10 ampere 로할때 速度

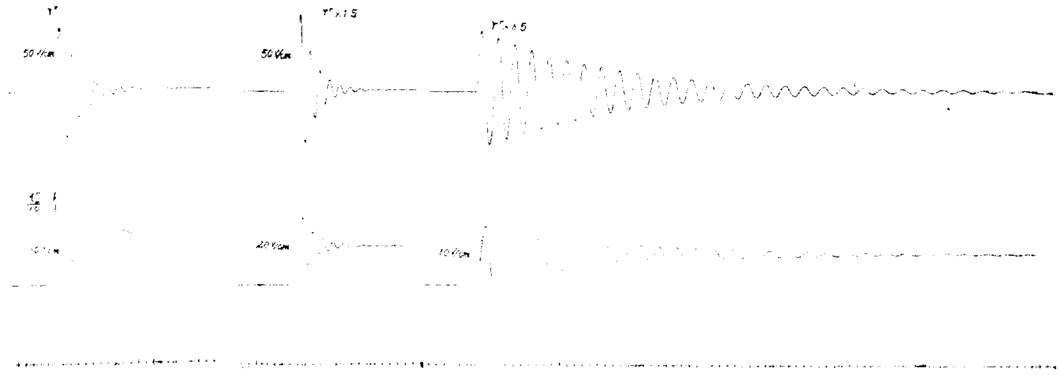


그림-7

가 初期値로부터 零으로 되기까지 걸리는 時間의 比較는 그림 8과 같고 實際 triclad induction motor (Model 5K213 AG 1000)에 對한 그것은 그림 9와 같다.

(위 (1), (2), (3)의 計算機에 依해 記錄된 各曲線의 橫軸 即 時間軸은 눈금하나가 1秒를 表示한다.)

그림-3

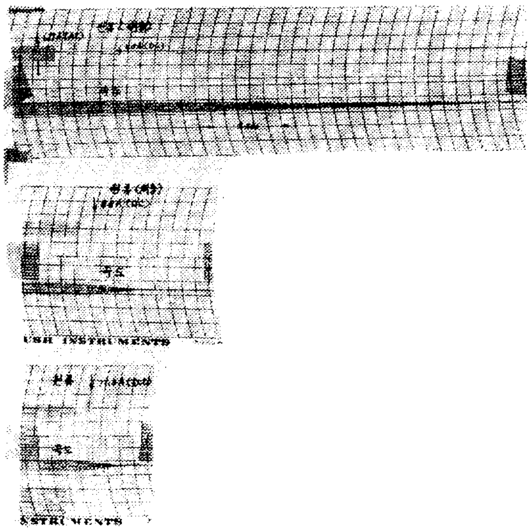


그림-9

(나) **Small signal 理論에 依한 analog 電子計算機씨뮤래이숀**

Small signal 理論에 依하여 어떤 平衡點 주위의 動特性을 計算機에 씨뮤래이트하여 해석하기 위하여 이點주위의 微小變化를

$$v_a^s = V_{a0}^s + v_{a1}^s$$
$$i_d^{r\prime} = I_{d0}^r + i_{d1}^{r\prime}$$
$$i_q^{r\prime} = I_{q0}^r + i_{q1}^{r\prime}$$
$$T = T_0 + T_1$$
$$\dot{\phi} = \Omega + \dot{\phi}_1 \quad \text{라면}$$

(7)′, (8)′式들은 smooth air gap, $v_a^r = v_q^r = 0$ 및 制動條件을 代入할때

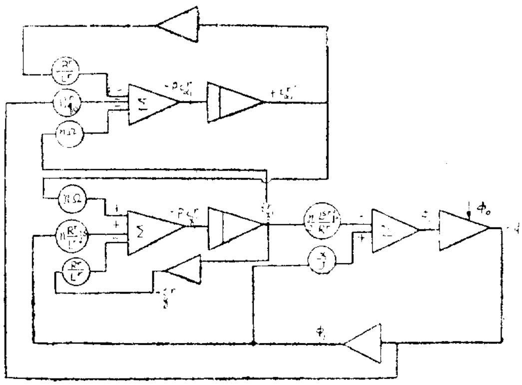
$$v_{a1}^s = \frac{L^{sr2}}{R^r} p i_{d1}^{r\prime}$$

$$0 = i_{d1}^{r\prime} + \frac{L^r}{R^r} p i_{d1}^{r\prime} + n\dot{\phi}_1 \frac{L^r}{R^r} I_{q0}^r + n\Omega \frac{L^r}{R^r} i_{q1}^{r\prime}$$

$$0 = -n\dot{\phi}_1 I^s - n\dot{\phi}_1 \frac{L^r}{R^r} I_{d0}^r - n\Omega \frac{L^r}{R^r} i_{d1}^{r\prime} - i_{q1}^{r\prime} + \frac{L^r}{R^r} p i_{q1}^{r\prime}$$

$$T_1 = J\ddot{\phi}_1 + \alpha\dot{\phi}_1 + n\frac{L^{sr2}}{R^r} I^s i_{q1}^{r\prime}$$

가 되는데 外部에서 加하는 놑크가 없으므로 $T_1 = 0$ 初期條件이 모두 零이고 단 $\dot{\phi}_0$만이 存在하고 Ω, $I_{d0}^{r\prime}$, I^s는 常數임을 考慮하면 analog 計算機씨뮤래이숀은 다음과 같다.



B. 프라깅(Plugging)

1. 槪 說

그림(10)의 $x_1\,y_1$으로 이루어지는 2相回轉磁界로 正方向으로 回轉시키다가 relay를 利用하여 x_2, y_2로 이루는 回轉磁界를 짧은 時間內에 加하여 逆方向으로 톨크가 作用되게 하여 制動시킨다. 이런 프라깅현상을 附A (11)'', (12)''式에 電動機의 條件과 이 현상의 條件을 代入하여 數式으로 풀었고, analog電子計算機에의 씨뮤레이 손은 方法만을 直流制動에 準하여 풀고 다음에 本論文에서 取扱한 電動機의 實際 프라깅時 電流 電壓 速度 曲線을 brush recorder로 기록하였다.

2. —, fb 變換式에 依한 프라깅해석

本文에서 取扱된 電動機는 3極 2相 籠型誘導電動機이며 電源은 3相電源中 2相을 各 相에 印加하였다. 均一空隙 및 附錄B의 定數에 依하면 機械的인 加速은 電氣的인 過渡에 比하여 大端히 느리기 때문에 大略의 動特性은 여러 다른 一定速度에 對한 定常狀態의 sequence로 計算할 수 있기 때문에 프라깅된 순시에 角速度를 一定하다고 보아 이들 모든 條件을 附錄A(11)', (12)''式

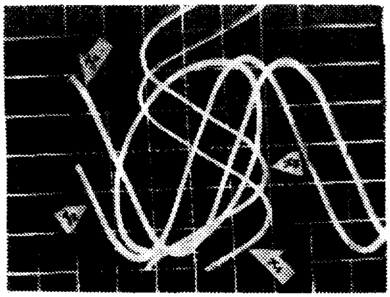


그림-10

에 代入한다.

첫째로 電壓式

$$v_+^s=\frac{1}{2}(V_-^s e^{j\omega t})+\frac{1}{2}(V_-^{s*}e^{-j\omega t})$$

$$v_-^s=\frac{1}{2}(V_+^s e^{-j\omega t}+\frac{1}{2}(V_-^s e^{j\omega t})$$

여기서 $V_+^s=\frac{1}{\sqrt{2}}(V_\alpha^s+jV_\beta^s)=\frac{1}{\sqrt{2}}V_\alpha^s(1+e^{j\frac{\pi}{6}})$

$$V_-^s=\frac{1}{\sqrt{2}}(V_\alpha^s-jV_\beta^s)=\frac{1}{\sqrt{2}}V_\alpha^s(1-e^{j\frac{\pi}{6}})$$

를 代入하여 正常狀態下의 重疊의 原理와 $v_+^s=v_-^{s*}$, $i_+^s=i_-^{s*}$, $v_f^r=v_b^{r*}$, $i_f^r=i_b^{r*}$의 條件과 $s=\frac{\omega-n\omega_m}{\omega}$을 利用하여 (11)''(12)''式을 풀면

電流式들은

$$I_+^s=\frac{\frac{1}{2}\left(\frac{R^r}{s}+j\omega L_\mu^r\right)\left\{V_\alpha^s(1+e^{j\frac{\pi}{6}})\right\}}{\left(\frac{R^r}{s}+j\omega L_\mu^r\right)(R^s+j\omega L_\mu^s)+(\omega L_\mu^{sr})^2}$$

$$I_f^r=\frac{-j\omega L_\mu^{s,r}(V_\alpha^s)(1+e^{j\frac{\pi}{6}})\frac{1}{\sqrt{2}}}{\left(\frac{R^r}{s}+j\omega L_\mu^r\right)(R^s+j\omega L_\mu^s)+(\omega L_\mu^{s,r})^2}$$

$$I_-^s=\frac{\left(\frac{R^r}{2-s}+j\omega L_\mu^r\right)\frac{1}{\sqrt{2}}(V_\alpha^s)(1-e^{j\frac{\pi}{6}})}{\left(\frac{R^r}{2-s}+j\omega L_\mu^r\right)(R^s+j\omega L_\mu^s)+(\omega L_\mu^{s,r})^2}$$

$$I_b^r=\frac{-j\omega L_\mu^{s,r}\frac{1}{\sqrt{2}}(V_\alpha^s)(1-e^{j\frac{\pi}{6}})}{\left(\frac{R^r}{2-s}+j\omega L_\mu^r\right)(R^s+j\omega L_\mu^s)+(\omega L_\mu^{s,r})^2}$$

$$T_{e\mu}=\frac{jnL_\mu^{s,r}}{4}[(I_+^{s*}I_f^r-I_+^sI_f^{r*})+(I_-^sI_b^{r*}-I_-^{s*}I_b^r)+(I_-^sI_f^r-I_+^sI_b^r)e^{j2\omega t}+(I_+^{s*}I_b^{r*}-I_-^{s*}I_f^{r*})e^{-j2\omega t}]$$

平均톨크 $(T_{e\mu})_{average}$

$$(T_{e\mu})_{average}=\frac{\frac{1}{2}n\omega L_\mu^{s,r^2}\frac{R^r}{s}\frac{1}{2}\left|1+e^{j\frac{\pi}{6}}\right|^2\cdot V_\alpha^{s^2}}{\left[\frac{R^rR^s}{s}-\omega^2(L_\mu^rL_\mu^s-L_\mu^{s,r^2})\right]^2+\omega^2\left(L_\mu^rR^s+L_\mu^s\frac{R^r}{s}\right)^2}-\frac{\frac{1}{2}n\omega L_\mu^{s,r^2}\frac{R^r}{2-s}\frac{1}{2}\left|1-e^{j\frac{\pi}{6}}\right|^2V_\alpha^{s^2}}{\left[\frac{R^rR^s}{2-s}-\omega^2(L_\mu^rL_\mu^s-L_\mu^{s,r^2})\right]^2+\omega^2\left(L_\mu^rR^s+L_\mu^s\frac{R^r}{2-s}\right)^2}$$

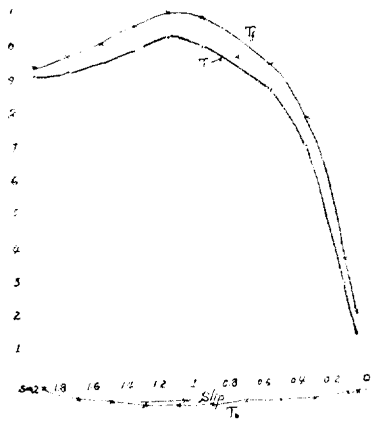


그림-11

프라깅中 톨크를 알기 위해서는 위$(T_{eu})_{average}$式中의 s를 1.95부터 0까지 變化시키면서 그値의 變化를 보면 될것이다.

本論文에서 取扱한 電動機의 定數를 代入하고 s의 値를 變化시킬때 그림(11)과 같다.

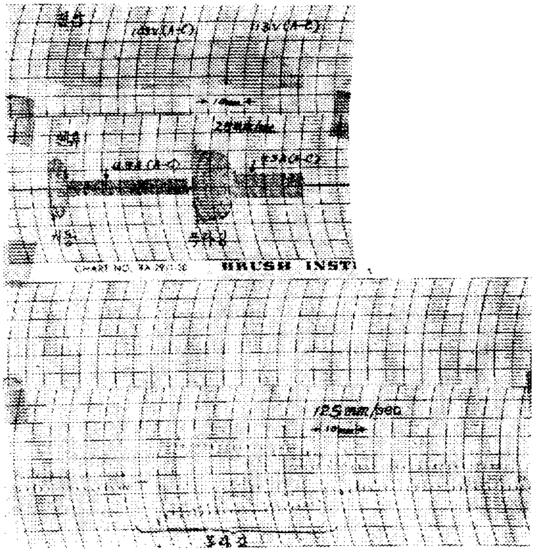


그림-12

3. 프라깅의 Analog 計算機 씨뮤래이숀

(7)″式 (8)″式을 直流制動時와 마찬가지로 計算機에 씨뮤래이트 하고 ϕ의 初期値만을 $-\phi_0$로 놓고 해석하면 될것이다. 本文에서는 計算機의 理由로해서 실제 analog 計算機에 依한 해석은 略하고 實驗과 數的計算만을 行하였음.

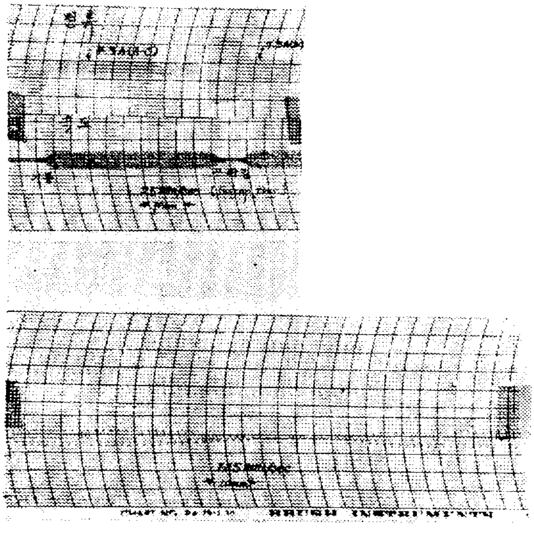


그림-13

4. 프라깅의 實驗

2相 8極으로 捲線한 籠型誘導電動機를 槪說에 說明한 바와 같이 relay를 써서 1/25秒 內에 行할때 電流電壓特性, 電流—速度特性은 그림(12), (13)과같다.

結　　論

直流制動時 速度—톨크曲線은 마치 誘導電動機의 그것과 類似하며 停止에 가까운 근방에서 最大톨크를 나타내며 本文에서 취급된 機械의 電氣的인 時定數와 機械的인 時定數는 1/300程度의 比가 되어 이機械의 電氣的 過渡特性은 機械의 一定速度에서 일어 난다고 보고 해석하여도 別差가 없다. 이것은 速度 一定이라 假定하여 計算된 速度—톨크曲線을 圖示한것과(그림1) analog 電子計算機로부터 얻은 그것과 一致함에서 알수있는 일이다.

그러나 正確한 動特性을 必要로 하게 되거나 機械的인 時定數와 電氣的인 時定數와 비슷한 경우에는 速度一定으로 볼수 없게 되므로 計算機를 써야 한다.

Braking하는 톨크의 最大値는 ϕ의 初期値에 關係없고 制動直流의 自乘에 比例하고 電氣的 過渡톨크는 0.15秒內에 감쇠진동하는데 그 振動하는 周波數는 初速度에 따라 變化하고 回轉子抵抗이 增加함에 따라 最大値가 커가며 過度期間이 짧어지고 反對로 감소함에 따라 最大値는 감소하고 振動期間이 길어진다.

直流制動電流와 要停止時間과의 關係는 서로 逆比例하여 直流가 많을 수록 빨리 停止한다.

프라깅은 實驗과 計算値 만에 依하여 結論하면 프라깅동안 流入되는 電流는 그 크기가 起動電流와 비슷하여 이 期間中 많은 電流가 흐르기 때문에 電源電壓이 약간 變化하며 relay 端子, 接觸部分의 電壓降下 등으로 電動機捲線에 걸린 電壓은 線間電壓보다 약간 낮은 電壓이 걸리고 이때문에 電流도 좀 감소한다 프라깅으로 停止하기까지의 時間은 直流制動時 定格値의 1.5倍 直流를 쓸 경우의 停止時間과 비슷한다.

附錄 *A* 基礎理論

本論文의 理論은 1959年度版 M.I.T.의 David. C. White, Herbert H. Woodson 共著 Electromechanical Energy Conversion에서 取扱된 해석방법을 썼으므로 本論文에 使用된 數式과 記號에 關하여 간단히 說明한다.

附A.1 一般化된 機械의 운동方程式은 이 系統의 狀

態定數 (state function)인 Lagrangian에 Hamilton 原則[*4]을 非保存系統까지 擴張하여 誘導된 Euler-Lagrage 方程式[*5]

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k}\right)-\frac{\partial L}{\partial q_k}+\frac{\partial F}{\partial \dot{q}_k}=Q_k \tag{1}$$

但, $L(\phi,\ i_a^s,\ i_b^s,\ i_a^r,\ i_b^r,\ \dot{\phi})$

$$=\frac{1}{2}i_{ab,ab t}^{s,r}L_{ab,ab}^{s,r}i_{ab,ab}^{s,r}+\frac{1}{2}J\dot{\phi}^2-\frac{1}{2}K\phi^2$$

에 適用하여 求해진다. 電壓, 電流 및 토크方程式은 (1)式에서 matrix로 表示하면

$$\left.\begin{matrix} V_{ab,ab}^{s,r} \\ T \end{matrix}\right\}=\left.\begin{matrix} R_{bb,ab}^{s,b}i_{ab,ab}^{s,r}+p(L_{ab,ab}^{s,r}i_{ab,ab}^{s,r}) \\ \alpha\dot{\phi}+J\ddot{\phi}+K\phi-\frac{1}{2}i_{ab,ab t}^{s,r}\frac{\partial L_{ab,ab}^{s,r}}{\partial\phi}i_{ab,ab}^{s,r} \end{matrix}\right\} \tag{2}$$

即 電氣的으로는

$$V_{ab,ab}^{s,r}=R_{ab,ab}^{s,r}i_{ab,ab}^{s,r}+p(L_{ab,ab}^{s,r}i_{ab,ab}^{s,r})$$

$$=R_{ab,ab}^{s,r}i_{ab,ab}^{s,r}+L_{ab,ab}^{s,r}pi_{ab,ab}^{s,s}+\frac{\partial L_{ab,ab}^{s,r}}{\partial\phi}\dot{\phi}i_{ab,ab}^{s,r} \tag{3}$$

機械的으로는

$$T=\alpha\dot{\phi}+J\ddot{\phi}+K\phi-\frac{1}{2}i_{ab,ab t}+\frac{\partial L_{ab,ab}^{s,r}}{\partial\phi}i_{ab,ab}^{s,r} \tag{4}$$

여기서 L: Lagrangian. (state function)

q_i: 系統 coordinate

$\dot{q}_i$: 系統 velocity

ϕ: 機械角

k: 스프링의 stiffniss

$$Q_k=\begin{bmatrix} v_a^s \\ v_b^s \\ v_a^r \\ v_b^r \\ T \end{bmatrix}\ \text{Non conservative force}$$

添字

s: 固定子

r: 回轉子

a: a 相

b: b 相을 表示한다

$$p=\frac{d}{dt}$$

$$F=\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{2}r_i(\dot{q}_i)^2 \quad \text{Rayleich dissipation 函數}$$

$$=\frac{1}{2}R^s(i_a^s)^2+\frac{1}{2}R^s(i_b^s)^2+\frac{1}{2}R^r(i_a^r)^2+\frac{1}{2}R^r(i_b^r)^2+\frac{1}{2}\alpha(\dot{\phi})^2$$

R: 저항

α: 마찰계수

$$=\frac{1}{2}i_{ab,ab t}^{s,r}R_{ab,ab}^{s,r}i_{ab,ab}^{s,r}+\frac{1}{2}\dot{\phi}\alpha\dot{\phi}$$

$$v_{ab,ab}^{s,r}=\begin{bmatrix} v_a^s \\ v_b^s \\ v_a^r \\ v_b^r \end{bmatrix} \qquad i_{ab,ab}^{s,r}=\begin{bmatrix} i_a^s \\ i_b^s \\ i_a^r \\ i_b^r \end{bmatrix}$$

$$R_{ab,ab}^{s,r}=\begin{bmatrix} R^s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R^s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R^r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R^r \end{bmatrix},\ \lambda_{ab,ab}^{s,r}=\begin{bmatrix} \lambda_a^s \\ \lambda_b^s \\ \lambda_a^r \\ \lambda_b^r \end{bmatrix}=L_{ab,ab}^{s,r}i_{ab,ab}^{s,r}$$

$$L_{ab,ab}^{s,r}=\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{aa}^{ss} & L_{ab}^{ss} \\ L_{ba}^{ss} & L_{bb}^{ss} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} L_{aa}^{sr} & L_{ab}^{sr} \\ L_{ba}^{sr} & L_{bb}^{sr} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} L_{aa}^{ra} & L_{ab}^{rs} \\ L_{ba}^{rs} & L_{bb}^{rs} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} L_{aa}^{rr} & L_{ab}^{rr} \\ L_{ba}^{rr} & L_{bb}^{rr} \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

$$=\begin{bmatrix} L_\mu^c+L_{\mu2}^s & 0 & (L_\mu^{sr}+L_{\mu2}^{sr})\cos\phi & -(L_\mu^{sr}+L_{\mu2}^{sr})\sin n\phi \\ 0 & L_\mu^s-L_{\mu2}^s & (L_\mu^{sr}-L_{\mu2}^{sr})\sin n\phi & (L_\mu^{sr}-L_{\mu2}^{sr})\cos n\phi \\ (L_\mu^{sr}+L_{\mu2}^{sr})\cos n\phi & (L_\mu^{sr}-L_{\mu2}^{sr})\sin n\phi & L_\mu^s+L_{\mu2}^r\cos n\phi & -L_{\mu2}^r\sin 2n\phi \\ -(L_\mu^{sr}+L_{\mu2}^{sr})\sin n\phi & (L_\mu^{sr}-L_{\mu2}^{sr})\cos n\phi & -L_{\mu2}^r\sin 2n\phi & L_\mu^r-L_{\mu2}^r\cos 2n\phi \end{bmatrix}$$

n: 磁極對數

윗 式은 다음과 같은 方法으로 얻어졌다.

一般化된 電氣機械에 저축된 에네어지로서 磁束密度 **B**, 磁場의 세기 **H**를 써서 $W_m=\int\frac{1}{2}\mathbf{HB}dv$를 計算하고, 回路變數로서 計算하여 얻은 에네지 $W_m=\frac{1}{2}\sum_i\sum_j L_{ij}i_i i_j$를 같게 놓았을때 係數 $L_{ab,ab}^{s,r}$[*6]가 決定된다. 이式中 $L_{\mu2}^{s,r}$, $L_{\mu2}^s$, $L_{\mu2}^r$ 等은 非凸極型機일때는 零이된다

附 A. 2 $\alpha\beta, dq$ 變換

數式을 간단화 하고 unbalanced machine의 動特性을 해석하기 위해서 $\alpha\beta$, dq 變換을 한다. 이는 回轉子만에 變換 $[a_{dq}^r]=\begin{bmatrix} \cos n\phi & \sin n\phi \\ -\sin n\phi & \cos n\phi \end{bmatrix}$을 행하게 된다. 그러면 (3), (4)式은 各各

$$v_{\alpha\beta,q}^{s,r}=[A_{\alpha\beta,dq}^{s,r-1}(R_{\alpha\beta,\alpha\beta}^{s,r}+pL_{\alpha\beta,\alpha\beta}^{s,r})A_{\alpha\beta,dq}^{s,r}]\ i_{\alpha\beta,dq}^{s,r} \tag{5}$$

$$T=J\ddot{\phi}+\alpha\dot{\phi}+k\phi-\frac{1}{2}i_{\alpha\beta,dq t}^{s,r}(A_{\alpha\beta,dq t}^{s,r}\frac{\partial L_{\alpha\beta,\alpha\beta}^{s,r}}{\partial\phi}A_{\alpha\beta,dq}^{s,r})\times i_{\alpha\beta,dq}^{s,r} \tag{6}$$

여기서 $A_{\alpha\beta,dq}^{s,r}=\begin{bmatrix} [u] & 0 \\ 0 & [a_{dq}^r] \end{bmatrix}$. $\qquad [u]=\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$

($\alpha\beta,\alpha\beta$ 變換은 balanced 2 phase machine으로의 變換 이므로 略함)

다음에 $A_{\alpha\beta,dq}^{s,r}$는 ϕ의 函數이므로 (5), (6)式은

$$v_{\alpha\beta,dq}=(R_{\alpha\beta,dq}^{s,r}+L_{\alpha\beta,dq}^{s,r}p+g_{\alpha\beta,dq}^{s,r}\dot{\phi})\ i_{\alpha\beta,dq}^{s,r} \tag{7}$$

$$T=J\ddot{\phi}+\alpha\dot{\phi}+k\phi-\frac{1}{2}i^{s}_{\alpha\beta,dqt}T^{s,r}_{\alpha\beta,dq}i^{s,r}_{\alpha\beta,dq} \tag{8}$$

여기서

$$R^{s,r}_{\alpha\beta,dq}=A^{sr\text{-}1}_{\alpha\beta,dq}R^{s,r}_{\alpha\beta,\alpha\beta}A^{s,r}_{\alpha\beta,dq}$$

$$L^{s,r}_{\alpha\beta,dq}=A^{s,r\text{-}1}_{\alpha\beta,dq}L^{s,r}_{\alpha\beta,\alpha\beta}A^{s,r}_{\alpha\beta,dq}$$

$$T^{s,r}_{\alpha\beta,dq}=A^{s,r}_{\alpha\beta,dqt}\frac{\partial L^{s,r}_{\alpha\beta,\alpha\beta}}{\partial\phi}A^{s,r}_{\alpha\beta,dq},$$

$$g^{s,r}_{\alpha\beta,dq}=T^{s,r}_{\alpha\beta,dq}+A^{s,r\text{-}1}_{\alpha\beta,dq}L^{s,r}_{\alpha\beta,dq}\frac{\partial A^{s,r}_{\alpha\beta,dq}}{\partial\phi}$$

(7), (8)式은 matrix 을 表示하면

$$\begin{bmatrix} v^s_\alpha \\ v^s_\beta \\ v^r_d \\ v^r_q \end{bmatrix}=\left[\begin{array}{c|c|c|c} R^s+p(L^s_\mu+L^s_{\mu2}) & 0 & p(L^{sr}_\mu+L^{sr}_{\mu2}) & 0 \\ 0 & R^s+p(L^s_\mu-L^s_{\mu2}) & 0 & p(L^{sr}_\mu-L^{sr}_{\mu2}) \\ p(L^{sr}_\mu+L^{sr}_{\mu2}) & n\dot{\phi}(L^{sr}_\mu-L^{sr}_{\mu2}) & R^r+p(L^r_\mu+L^r_{\mu2}) & n\dot{\phi}(L^r_\mu-L^r_{\mu2}) \\ -n\dot{\phi}(L^{sr}_\mu+L^{sr}_{\mu2}) & p(L^{sr}_\mu-L^{sr}_{\mu2}) & -n\dot{\phi}(L^r_\mu+L^r_{\mu2}) & R^r+p(L^r_\mu-L^r_{\mu2}) \end{array}\right]\begin{bmatrix} i^s_\alpha \\ i^s_\beta \\ i^r_d \\ i^r_q \end{bmatrix}$$

$$T=J\ddot{\phi}+\alpha\dot{\phi}+k\phi-nL^{sr}_\mu(i^s_\beta i^r_d-i^s_\alpha i^r_q)+nL^{sr}_{\mu2}(i^s_\beta i^r_d+i^s_\alpha i^r_q)+nL^r_{\mu2}(2i^r_d i^r_q) \tag{8)$'$}$$

附 A. 3 $+-$, $+-$變換

瞬時 對稱成分 變換으로서 $\alpha\beta$, $\alpha\beta$ 變換과 맞서는 複素線型變換이며 해석상에 많은 利點이 있다. 이變換은 $\alpha\beta$ 成分과 關係지우는 것으로

$$x_{\alpha\beta}]=[a_{+-}]\ x_{+-}]$$

이며 $x]$는 回轉子나 固定子의 電壓, 電流를 表示한다. 여기

$$[a_{+-}]=\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -j & j \end{bmatrix}$$

運動方程式 (3), (4)式을 $+-$, $+-$變換 할때

$$v^{s,r}_{+-,+-}=A^{s,r\text{-}1}_{+-,+-}(R^{s,r}_{\alpha\beta,\alpha\beta}+pL^{s,r}_{\alpha\beta,\alpha\beta})A^{s,r}_{+-,+-}i^{s,r}_{+-,+-} \tag{9}$$

$$T=J\ddot{\phi}+\alpha\dot{\phi}+K\phi-\frac{1}{2}i^{s,r*}_{+-,+-t}A^{s,r*}_{+-,+-t}T^{s,r}_{\alpha\beta,\alpha\beta}A^{s,r}_{+-,+-}i^{s,r}_{+-,+-} \tag{10}$$

여기서 $A^{s,r}_{+-,+-}=\begin{bmatrix} [a_{+-}] & [0] \\ [0] & [a_{+-}] \end{bmatrix}$

(9)(10)式을 matrix 로 表示하면

$$\begin{bmatrix} v^s_+ \\ v^s_- \\ v^r_+ \\ v^r_- \end{bmatrix}=\left[\begin{array}{c|c|c|c} R^s+L^s_\mu p & L^s_{\mu2}p & L^{sr}_\mu e^{jn\phi}(p+jn\dot{\phi}) & L^{sr}_{\mu2}e^{-jn\phi}(p-jn\dot{\phi}) \\ L^s_{\mu2}p & R^s+L^s_\mu p & L^{sr}_{\mu2}e^{jn\phi}(p+jn\dot{\phi}) & L^{sr}_\mu e^{-jn\phi}(p-jn\dot{\phi}) \\ L^{sr}_{\mu2}e^{-jn\phi}(p-jn\dot{\phi}) & L^{sr}_{\mu2}e^{-jn\phi}(p-jn\dot{\phi}) & R^r+L^r_\mu p & L^r_{\mu2}e^{-j2n\phi}(p-j2n\dot{\phi}) \\ L^{sr}_{\mu2}e^{jn\phi}(p+jn\dot{\phi}) & L^{sr}_\mu e^{jn\phi}(p+jn\dot{\phi}) & L^r_{\mu2}e^{j2n\phi}(p+j2n\dot{\phi}) & R^r+L^r_\mu p \end{array}\right]\begin{bmatrix} i^s_+ \\ i^s_- \\ i^r_+ \\ i^r_- \end{bmatrix}$$

$$T=J\ddot{\phi}+\alpha\dot{\phi}+K\phi-jn\{L^{sr}_\mu[(i^{s*}_+i^r_+)e^{jn\phi}-(i^s_+i^{r*}_+)e^{-jn\phi}]+L^{sr}_{\mu2}[(i^s_+i^r_+)e^{jn\phi}-(i^{s*}_+i^{r*}_+)e^{jn\phi}]+L^r_{\mu2}[(i^r_+)^2e^{j2n\phi}-(i^{r*}_+)^2e^{-j2n\phi}]\} \tag{10)$''$}$$

附 A. 4 $+-$, fb 變換

$\dot{\phi}$가 一定할때도 (9)″, (10)″式을 보면 時變係數를 갖는 微方式이 되기때문에 이 困難을 除去하기 위하여 回轉子에만 다시 fb 度換을 하여 i^si^r, $\dot{\phi}\cdot i$의 積의 非線型性만 남게하고 ϕ의 成分을 없애어 式을 간단화 한다. 即變換

$$x^r_{+-}]=[a^r_{fb}]\ x^r_{fb}] \quad 但\ [a^r_{fb}]=\begin{bmatrix} e^{-jn\phi} & 0 \\ 0 & e^{jn\phi} \end{bmatrix}$$

을 (9)″(10)″式에 行하면

$$v^{s,r}_{+-,fb}=A^{s,r\text{-}1}_{+-,fb}(R^{s,r}_{+-,+-}+pL^{s,r}_{+-,+-})A^{s,r}_{+-,fb}\ i^{s,r}_{+-,fb} \tag{11}$$

$$T=J\ddot{\phi}+\alpha\dot{\phi}+K\phi-\frac{1}{2}i^{s,r*}_{+-,fbt}A^{s,r*}_{+-,fb}T^{s,r}_{+-,+-}A^{s,r}_{+-,fb}\cdot i^{s,r}_{+-,fb} \tag{12}$$

여기서 $A^{s,r}_{+-,fb}=\begin{bmatrix} [u] & [0] \\ [0] & [a^r_{fb}] \end{bmatrix}$

$$R^{s,r}_{+-,+-}=A^{s,r\text{-}1}_{+-,+-}R^{s,r}_{\alpha\beta,\alpha\beta}A^{s,r}_{+-,+-}$$

$$L^{s,r}_{+-,+-}=A^{s,r\text{-}1}_{+-,+-}L^{s,r}_{\alpha\beta,\alpha\beta}A^{s,r}_{+-,+-}$$

$$T^{s,r}_{+-,+-}=A^{s,r\text{-}1}_{+-,+-}T^{s,r}_{\alpha\beta,\alpha\beta}A^{s,r}_{+-,+-}$$

(11)(12)式을 matrix 로表示하면

$$\begin{bmatrix} v^s_+ \\ v^s_- \\ v^r_f \\ v^r_b \end{bmatrix}=\left[\begin{array}{c|c|c|c} R^s+L^s_\mu p & L^s_{\mu2}p & L^{s,r}_\mu p & L^{s,r}_{\mu2}p \\ L^s_{\mu2}p & R^s+L^s_\mu p & L^{sr}_{\mu2}p & L^{sr}_\mu p \\ L^{sr}_\mu(p-jn\dot{\phi}) & L^{s,r}_{\mu2}(p-jn\dot{\phi}) & R^r+L^r_\mu(p-jn\dot{\phi}) & L^r_{\mu2}(p-jn\dot{\phi}) \\ L^{sr}_{\mu2}(p+jn\dot{\phi}) & L^{sr}_\mu(p+jn\dot{\phi}) & L^r_{\mu2}(p+jn\dot{\phi}) & R^r+L^r_\mu(p+jn\dot{\phi}) \end{array}\right]\begin{bmatrix} i^s_+ \\ i^s_- \\ i^r_f \\ i^r_b \end{bmatrix} \tag{11)$''$}$$

$$T=J\ddot{\phi}+\alpha\dot{\phi}+K\phi-jn\{L^{sr}_\mu(i^{s*}_+i^r_f-i^s_+i^{r*}_f)+L^{sr}_\mu(i^s_+i^r_f-i^{s*}_+i^{r*}_f)+L^r_{\mu2}[(i^r_f)^2-(i^{r*}_f)^2]\} \tag{12)$''$}$$

附錄 B 電動機 定數 決定

8極 2相 誘型誘導電動機로서 本論文에서 取扱된 機

械는 General Electric社 triclad induction Motor (Model 5K213AG 1000) 1HP를 8極 2相으로 捲線하여 使用하였고 定數決定은 1962年度版 朴文鎬敎授著 誘導機器, 1954年版 Lyon著 Transient Analysis of Alternating Current Machinery (63—66 pp)에 準하여 抵抗, inductance, mutual inductance를 決定하였고 慣性모우멘트는 石黑美種編 電氣工學實驗(156—157 pp)의 方法에 依하여 測定하고 마찰계수는 다음과 같은 方法으로 決定하고 檢討를 위해 Richard W. Jones著 Electric Control System (415 pp)에서 取扱된 바와 같이 停止時까지의 總回轉數를 計算値와 測定値를 比較해 보았다.

위方法에 依해 測定하여 計算된 定數는

$J=0.049893$ [kg·m²]

$\alpha=0.0106$ [kg·m/sec]

$R^r=R^s=3.3[\Omega]$

$L_{jj}=51.8\times10^{-3}$ [henery]

$L_{jj}^{sr}=44.5\times10^{-3}$ [henry]

[마찰계수 α의 決定]

定常狀態로 回轉하고 있든 기계를 電源에서 차단하였을 때 Braking을 하지 않는 경우 마찰에 依한 制動톨크만이 存在하고 그것이 角速度 ω에 比例 한다면 톨크方程式은

$$J\frac{d\omega}{dt}+\alpha\omega=0$$

$$\omega=Ke^{-\frac{\alpha}{J}t}$$

$t=0$ 때 初速度가 ω_0라면

$$\omega=\omega_0\epsilon^{-\frac{f}{J}t}$$

가 되므로 ω_0의 値가 電源에서 차단한 순간부터 $\frac{\omega}{e}$로 감소 되는때 까지의 時間이 $\frac{J}{f}$의 값이 될것이다. J는 既知이므로 f가 計算된다.

그림(14)는 위 條件을 마추었을때 電動機의 速度—時間曲線이다. 여기서 求한 α의 값이 0.0106 [kg·m/sec] 이다.

停止할때 까지의 總回轉數 n_s는

$$n_s=\frac{1}{2\pi}\int_0^{t_s}\omega dt=\frac{1}{2\pi}\int_0^{t_s}\omega_0\epsilon^{-\frac{d}{J}}dt=\frac{\omega_0 J}{2\pi f}(1-\epsilon^{-\frac{f}{J}t_s})$$

가 되는데 이 式中 停止할때 까지의 時間 t_s를 測定하여 計算된 n_s와 實測한 値와는 몇%差에 不過하였다.

$\frac{J}{f}$측정을 위한 속도—시간곡선

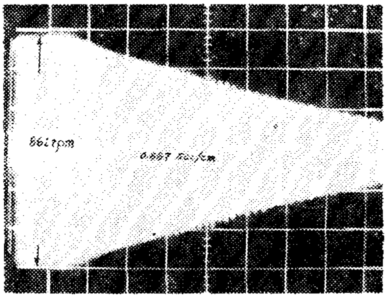


그림-14

(1964年 3月 3日 接受)

參考文獻

1. Electromechanical Eneergy Conversion dy David C. White & Herbert H. Woodson, 1959, John Wiley & Sons, Inc.
2. Transient Analysis of Alternating Current Machinery by Lyon, 1954, (Chapter 3, 4).
3. Electric Control Systems by Robert Lien Cosgriff (Chap. 4), 1958, McGraw-Hill.
4. Transient Performance of Electric Power Systems by Reinhold Rüdenberg, (Chapter 17, 19), 1950, McGraw-Hill
5. 誘導機器, (1962), 朴文鎬著, 東明社.
6. 電氣工學實驗, 石黑美種編, (155—157 page), 産業圖書株式會社.
7. E.A. Guillemin's The Mathemataics of Circuit Analysis, (Chapt. II, III).
8. Advanced Calculus for Engineer by P.B. Hildebrand, (424~426 page).

(註)

*1; Electromechanical Energy Conversion (172 page)

*2; 〃 〃 〃 (542 〃)

*3; 〃 〃 〃 (421 〃)

*4; 〃 〃 〃 (31 〃)

*5; 〃 〃 〃 (62 & 196 page) & Classical Mechanics by Herbert Goldstein (Chapt. II).

*6; Electromechanical Energy Conversion (180~187 page)