

求하는 解析的인 方法에 對해 考察하였다.

本 方法에 依해 求한 퍼라미터가 最適值인은 應答實驗을 通해 확인되었으며 周波數應答에 依한 檢測를 거쳐 다음과 같은 結論을 얻을 수가 있다.

i) 2次系統의 制御對象에 對하여 PI 制御器를 使用할 때 利得  $k_p$ 를 增加시키면 2乘制御面積  $\hat{P}$ 은 커어진다.

ii) 二배의 最適  $\hat{\omega}_n$ 와  $\hat{P}$ 는 다음과 같다.

$$\hat{\omega}_n = \frac{k\hat{k}_p(k\hat{k}_p + 4\zeta - 1)}{2\zeta\omega_n(\sqrt{(k\hat{k}_p + 1)(k\hat{k}_p + 4\zeta - 1)} + 1 - 1)}$$

$$\hat{P} = \frac{k\hat{k}_p + 4\zeta - 1 + 2\zeta\omega_n\hat{\omega}_n/k\hat{k}_p}{4\zeta\omega_n(k\hat{k}_p + 1 - k\hat{k}_p/2\zeta\omega_n\hat{\omega}_n)}$$

iii)  $\hat{k}_p$ 가 작은 값에서는  $\hat{k}_p$ 값의 變化에 對한  $\hat{P}$ 의 變化는 크나  $\hat{k}_p$ 값이 커지면  $\hat{k}_p$ 의 變化에 對한  $\hat{P}$ 의 變化는 커어지며  $\hat{k}_p$ 가  $\infty$ 의 값에 가지면  $\hat{P}$ 는  $1/4\zeta\omega_n$ 에 收斂하게 된다.

iv) 2次制御面積  $\hat{P}$ 를 改善하기 위해  $\hat{k}_p$ 를 增加시키면 어느 범위 이상에서는  $M_p$ 值도 增加되어 制御系統은 過渡應答 時 最大 오우버슈트가 커진다.

v)  $\hat{k}_p$ 를 增加시키면 利得餘裕는 增加했다  $\infty$ 가 된다 반면 位相餘裕는 增加했다 減少되어  $0^\circ$ 에 收斂하게 된다.

여기서 가장 理想的인 最適制御는  $\hat{k}_p \rightarrow \infty$ 일 때이나 이때는 過渡狀態를 좋지 못하게 하므로 實際的인 관점에서 制御에서는 여러 制御定數(最大 오우버슈트,  $M_p$ 值, 利得餘裕, 位相餘裕, 速應性등)의 중요 考慮에서  $\hat{k}_p$ 값과 그에 對應되는  $\hat{\omega}_n$ 값을 선택하여야 할 것이다.

參 考 文 獻

1. 李正植, 鄭吉원: PID制御器의 最適調整에 關한 研究, 韓國海洋大學 大學院 論文集, Vol. 2, pp.5(1979)
2. 李正植: 自動制御工學, 韓國海洋大學 敎育圖書出版社, 釜山, pp.100~113, 267~278 (1974)
3. 高木正一, 崔炳鍾: 自動制御, 文運堂, 서울, pp.272~292 (1977)
4. 根元重一, 澤田 彰, 中講高好: 統計的 自動制御理論, 코모사社, 東京, pp.124~139, 303~306
5. L.L. D'Azzo, C.H. Houpls: Feed Back Control System Analysis and Synthesis, McGraw-Hill Korea Co., Ltd., pp.644~658 (1966)
6. Allen I. Elgerd: Control System Theory, McGraw-Hill, New-York, pp.59~85 (1967)
7. Stanley M. Shinnars: Modern Control System Theory and Application, Addison-Wesley Publishing Co. pp. 63~84, 473~512 (1979)
8. Hitachi Analog Computer Programming, Hitachi Electronics, LTD., pp.70~79

# 三相誘導電動機의 缺相時 電流 및 廻轉力特性에 關한 研究

俞 春 植

## A Study on Current and Torque Characteristics of Three-Phase Induction Motor in Single-Phase Operation

Choonsik yu

### 目 次

- |                                      |                         |
|--------------------------------------|-------------------------|
| 1. 序 論                               | 4. 實驗結果 및 檢討            |
| 2. 理 論<br>不平衡運轉 解析法에 依한 電流 및 廻轉力 特性式 | 4-1. 理論值의 具體的인 計算       |
| 3. 實 驗                               | 4-2. 實測值와 計算值의 比較       |
| 3-1. 實驗裝置의 概要                        | 4-3. 電動機廻轉力과 負荷廻轉力과의 考察 |
| 3-2. 定數 測定 實驗                        | 5. 結 論                  |
| 3-3. 速度—電流特性測定實驗                     | 參考文獻                    |
| 3-4. 速度—廻轉力特性測定實驗                    | 記號說明                    |
|                                      | 附 錄                     |

### Abstract

The characteristics of the stator current and torque of a small three-phase squirrel cage induction motor are studied experimentally under the situation of a single-phase operation due to various causes.

Through the experiments, the torque-slip and current-slip curve of single-phase circuit as well as three-phase circuit are obtained and the needed constants are determined.

The stator current and torque are calculated by the current and torque equations derived by the unbalanced circuit theory.

The numeral values obtained from the above methods are compared with the experimental values under the same conditions.

The results of the study are summerized as follow;

고리고 不平衡運轉解析法에 依하 誘導된 電流 및 廻轉力式에 定數值를 代入해서 算은 各各의 計算值와 實驗을 通해서 算은 實測值와를 比較檢討하였다.

## 2. 理 論

不平衡運轉(單相運轉) 解析法에 依한 電流 및 廻轉力 特性式<sup>5),6),7)</sup>

對稱座標法(symmetrical coordinate method)은 廻轉電氣機械를 포함하는 不平衡 電氣回路를 解析하는 有用한 方法으로 供給電壓의 不平衡으로 因한 特殊한 運轉狀態로 되는 多相電氣機械를 취급할 때 特히 有用하다. 이것은 不平衡 系統을 對稱成分으로 나누는 Fortescue의 定理에 基礎를 두는 것으로 三相系統에 適用時 이 定理는 모든 不平衡 三相系統 vector가 3個의 平衡系統 vector로 分解된다.<sup>8),9),10)</sup>

缺相時에는 不平衡의 極端의 경우로서 零相分電流는 없지만 正相分과 逆相分은 存在하게 되고 運轉中에는 正相分과 逆相分廻轉磁界가 重疊되어 있으므로 이것의 T型等價回路는 Fig. 1<sup>5),7)</sup>과 같다.

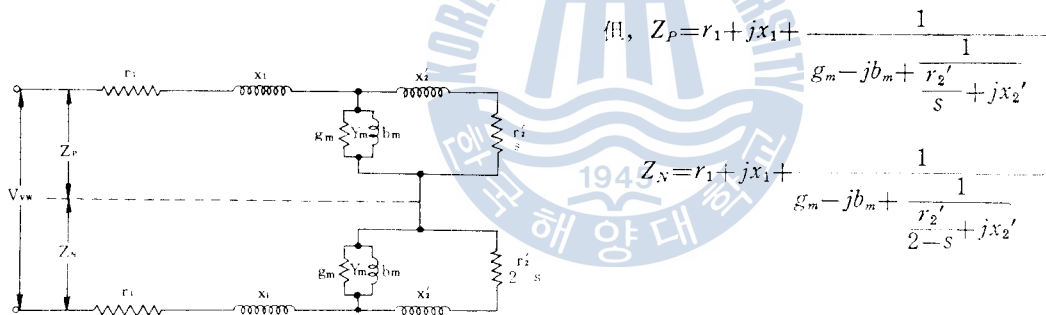


Fig. 1. Equivalent circuit for symmetrical coordinate method

固定子捲線이 Y 結線된 三相籠型誘導電動機가 運轉 中에 Fig. 2 처럼 UVW의 三端子 中 U가 開路되었을 때 正相分과 逆相分의 電流와 電壓을 求하여 線電流와 廻轉力을 求해 보기로 한다.

U端子線이 끊어지면  $I_U=0$ ,  $I_V=I_W$ 가 되고 U相을 基準으로 取할 때 電流의 對稱分은

$$\begin{aligned}
 I_{1P} &= \frac{1}{3}(I_U + aI_V + a^2I_W) = \frac{1}{3}(aI_V + a^2I_W) \\
 &= a(1-a)I_V/3 \\
 I_{1N} &= \frac{1}{3}(I_U + a^2I_V + aI_W) = \frac{1}{3}(a^2I_V + aI_W) \\
 &= a(a-1)I_V/3
 \end{aligned}$$

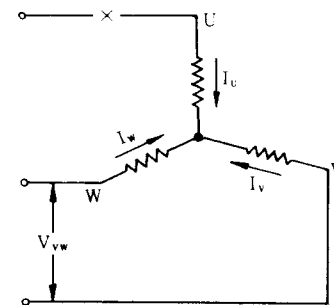


Fig. 2. The case one of the primary circuit is opened arbitrarily

$$\left. \begin{aligned} \text{(단, } a = \varepsilon^{j\frac{2}{3}\pi} = \cos 120^\circ + j\sin 120^\circ = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \\ a^2 = \varepsilon^{j\frac{4}{3}\pi} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \end{aligned} \right\}$$

式(1)에서  $I_{1P} = -I_{1N}$ 가 얻어진다.

한편 電壓의 對稱分은

$$\dot{V}_{1P} = \frac{1}{3}(\dot{V}_U + a\dot{V}_V + a^2\dot{V}_W)$$

$$\dot{V}_{1N} = \frac{1}{3}(\dot{V}_U + a^2\dot{V}_V + a\dot{V}_W)$$

$$\therefore \dot{V}_{1P} - \dot{V}_{1N} = \dot{V}_{VW} \times \frac{1}{a^2 - a} = \dot{V}_{VW} \times \frac{1}{-j\sqrt{3}} = \frac{j}{\sqrt{3}} \dot{V}_{VW}$$

對稱分電壓은 對稱分電流 × 대칭분 임피던스이므로

$$V_{1P} = I_{1P} \cdot Z_P, \quad \dot{V}_{1N} = I_{1N} \cdot Z_N = -I_{1P} \cdot Z_N$$

$$\therefore \dot{V}_{1P} - \dot{V}_{1N} = I_{1P}(Z_P + Z_N) = \frac{j}{\sqrt{3}} \cdot \dot{V}_{VW} \quad (2)$$

따라서 電流의 對稱分은 式(2)에서

$$I_{1P} = \frac{j}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\dot{V}_{VW}}{Z_P + Z_N} \quad \left. \vphantom{I_{1P}} \right\} (3)$$

$$I_{1N} = -I_{1P} = \frac{-j}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\dot{V}_{VW}}{Z_P + Z_N}$$

線電流는

$$I_V = -I_W = a^2 \cdot I_{1P} + aI_{1N} = -\frac{j}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\dot{V}_{VW}}{Z_P + Z_N} (a^2 - a) = \frac{\dot{V}_{VW}}{Z_P + Z_N} \quad (4)$$

즉 線電流는 正 · 逆相分 임피던스를 합하여 線間電壓으로 나누면 구할 수 있다.

式(2), (3)에서 電壓의 對稱分을 求하면

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_{1P} = I_{1P} \cdot Z_P = \frac{Z_P}{Z_P + Z_N} \cdot \frac{j}{\sqrt{3}} \dot{V}_{VW} \\ \dot{V}_{1N} = -I_{1P} \cdot Z_N = \frac{-Z_N}{Z_P + Z_N} \cdot \frac{j}{\sqrt{3}} \dot{V}_{VW} \end{aligned} \right\} (5)$$

즉, 對稱分電壓의 절대치는 相電壓의 성분별 임피던스에 比例한다.

一次入力  $P_1$ 은 線間電壓과 線電流로서 정해지고  $P_1 = [\dot{V}_{VW} \cdot I_V]$ 로 된다.

線電流는  $\left| \frac{\dot{V}_{VW}}{Z_P + Z_N} \right|$ 이고 이것이  $\frac{r_2'}{s}$  회로로 흐르므로 分流係數를 구해보면

$$a_1 = \left| \frac{jx_m}{j(x_m + x_2') + r_2'/s} \right| \quad (6)$$

(단,  $Y_m = g_m - jb_m$ 에서  $g_m$ 은 매우 적으므로 무시하면  $1/Y_m \approx jx_m$ 로 될 수 있다.)

이고,  $r_2'/(2-s)$ 로 흐르는 것의 分流係數도

그리고 不平衡廻轉解析法에 依한 誘導된 電流 및 廻轉力式에 定數値를 代入해서 算은 各各의 計算値와 實驗을 通해서 算은 實測値와를 比較檢討하였다.

## 2. 理 論

不平衡廻轉(單相廻轉) 解析法에 依한 電流 및 廻轉力 特性式<sup>5), 6), 7)</sup>

對稱座標法(symmetrical coordinate method)은 廻轉電氣機械를 포함하는 不平衡 電氣回路를 解析하는 有用한 方法으로 供給電壓의 不平衡으로 因한 特殊한 廻轉狀態로 되는 多相電氣機械를 취급할 때 特히 有用하다. 이것은 不平衡 系統을 對稱成分으로 나누는 Fortescue의 定理에 基礎를 두는 것으로 三相系統에 適用時 이 定理은 모든 不平衡 三相系統 vector가 3個의 平衡系統 vector로 分解된다. <sup>8), 9), 10)</sup>

缺相時에는 不平衡의 極端의 경우로서 零相分電流는 없지만 正相分과 逆相分은 存在하게 되고 廻轉中에는 正相分과 逆相分廻轉磁界가 重疊되어 있으므로 이것의 T型等價回路는 Fig. 1<sup>5), 7)</sup>과 같다.

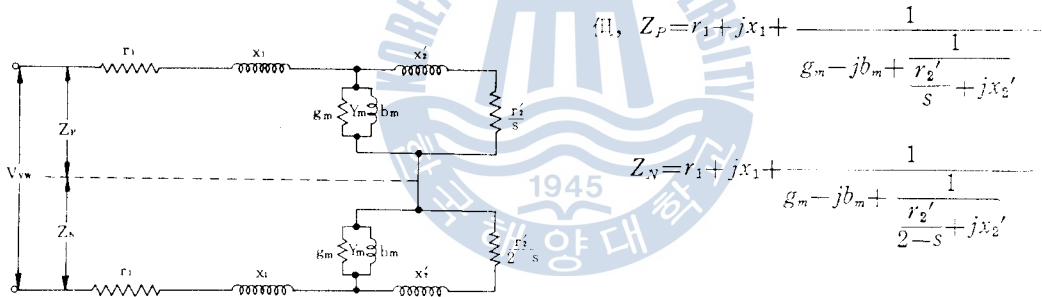


Fig. 1. Equivalent circuit for symmetrical coordinate method

固定子捲線이 Y 結線된 三相籠型誘導電動機가 廻轉 中에 Fig. 2 처럼 UVW의 三端子 中 U가 開路되었을 때 正相分과 逆相分의 電流와 電壓을 구하여 線電流와 廻轉力을 구해 보기로 한다.

U端子線이 끊어지면  $I_U=0$ ,  $I_V=I_W$ 가 되고 U相을 基準으로 取할 때 電流의 對稱分은

$$\begin{aligned}
 I_{1P} &= \frac{1}{3}(I_U + aI_V + a^2I_W) = \frac{1}{3}(aI_V + a^2I_W) \\
 &= a(1-a)I_V/3 \\
 I_{1N} &= \frac{1}{3}(I_U + a^2I_V + aI_W) = \frac{1}{3}(a^2I_V + aI_W) \\
 &= a(a-1)I_V/3
 \end{aligned}$$

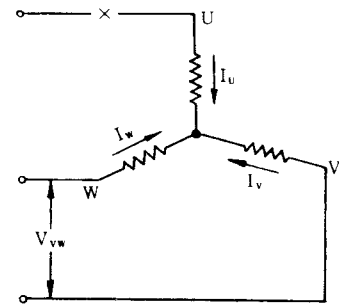


Fig. 2. The case one of the primary circuit is opened arbitrarily

$$\left. \begin{aligned} \text{(단, } a = \varepsilon^{j\frac{2}{3}\pi} = \cos 120^\circ + j\sin 120^\circ = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \\ a^2 = \varepsilon^{j\frac{4}{3}\pi} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \end{aligned} \right\}$$

式(1)에서  $I_{1P} = -I_{1N}$ 가 얻어진다.

한편 電壓의 對稱分은

$$\dot{V}_{1P} = \frac{1}{3}(\dot{V}_U + a\dot{V}_V + a^2\dot{V}_W)$$

$$\dot{V}_{1N} = \frac{1}{3}(\dot{V}_U + a^2\dot{V}_V + a\dot{V}_W)$$

$$\therefore \dot{V}_{1P} - \dot{V}_{1N} = \dot{V}_{VW} \times \frac{1}{a^2 - a} = \dot{V}_{VW} \times \frac{1}{-j\sqrt{3}} = \frac{j}{\sqrt{3}} \dot{V}_{VW}$$

對稱分電壓은 對稱分電流 × 대칭분 임피던스이므로

$$V_{1P} = I_{1P} \cdot Z_P, \quad \dot{V}_{1N} = I_{1N} \cdot Z_N = -I_{1P} \cdot Z_N$$

$$\therefore \dot{V}_{1P} - \dot{V}_{1N} = I_{1N}(Z_P + Z_N) = \frac{j}{\sqrt{3}} \cdot \dot{V}_{VW} \quad (2)$$

따라서 電流의 對稱分은 式(2)에서

$$\left. \begin{aligned} I_{1P} &= \frac{j}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\dot{V}_{VW}}{Z_P + Z_N} \\ I_{1N} &= -I_{1P} = -\frac{j}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\dot{V}_{VW}}{Z_P + Z_N} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

線電流는

$$\dot{I}_V = -\dot{I}_W = a^2 \cdot \dot{I}_{1P} + a\dot{I}_{1N} = -\frac{j}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\dot{V}_{VW}}{Z_P + Z_N} (a^2 - a) = \frac{\dot{V}_{VW}}{Z_P + Z_N} \quad (4)$$

즉 線電流는 正 · 逆相分 임피던스를 합하여 線間電壓으로 나누면 구할 수 있다.

式(2), (3)에서 電壓의 對稱分을 求하면

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_{1P} &= I_{1P} \cdot Z_P = \frac{Z_P}{Z_P + Z_N} \cdot \frac{j}{\sqrt{3}} \dot{V}_{VW} \\ \dot{V}_{1N} &= -I_{1P} \cdot Z_N = \frac{-Z_N}{Z_P + Z_N} \cdot \frac{j}{\sqrt{3}} \dot{V}_{VW} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

즉, 對稱分電壓의 절대치는 相電壓의 성분별 임피던스에 比例한다.

一次入力  $P_1$ 은 線間電壓과 線電流로서 정해지고  $P_1 = [\dot{V}_{VW} \cdot \dot{I}_V]$ 로 된다.

線電流는  $\left| \frac{\dot{V}_{VW}}{Z_P + Z_N} \right|$ 이고 이것이  $\frac{r_2'}{s}$  회로로 흐르므로 分流係數를 구해보면

$$a_1 = \left| \frac{jx_m}{j(x_m + x_2') + r_2'/s} \right| \quad (6)$$

(단,  $Y_m = g_m - jb_m$ 에서  $g_m$ 은 매우 적으므로 무시하면  $1/Y_m = jx_m$ 로 될 수 있다.)

이고,  $r_2'/(2-s)$ 로 흐르는 것의 分流係數도

이 때, 전압 \$V\_{1V}\$ 와 전류 \$I\_{1V}\$ 는 다음과 같다.

$$V_{1V} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-s}}$$

이 때, \$I\_{1V}\$ 와 \$I\_{2V}\$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_{1V} &= I_{2P} \cdot a_1 + I_{2N} \cdot a_2 = \frac{V_{1V}}{Z_P} + \frac{V_{1V}}{Z_N} \\ &= I_{2P} \left( 2a_1 + a_2 \cdot \frac{r_2'}{s} + a_1 + a_2 \cdot \frac{r_2'}{2-s} \right) = \frac{V_{1V}}{Z_P} + \frac{V_{1V}}{Z_N} \cdot (2a_1 + R_{2P} + R_{2N}) \end{aligned} \quad (8)$$

이 때,  $R_{2P} = \frac{x_m^2}{(\bar{r}_2'/s)^2 + (\bar{x}_m + \bar{x}_2')^2} \cdot \frac{r_2'}{s}$  (9)

$$R_{2N} = \frac{x_m^2}{(r_2'/2-s)^2 + (x_m + \bar{x}_2')^2} \cdot \frac{r_2'}{2-s} \quad (10)$$

式 (8)의 제곱을 一次銅損이라고, 그 값은

$$P_{C1} = 2|I_V|^2 \cdot r_1 = 2|\dot{V}_{1V}|^2 \cdot r_1 / |Z_P + Z_N|^2 \quad (11)$$

이 때, \$P\_2\$는 二次入力이 되고, 그 값 \$P\_2\$는

$$\begin{aligned} P_2 &= P_1 - P_{C1} = \frac{|\dot{V}_{VW}|^2}{|Z_P + Z_N|^2} \cdot (R_{2P} + R_{2N}) \\ &= 3 \left\{ \frac{|\dot{V}_{VW}|^2}{3|Z_P + Z_N|^2} \cdot R_{2P} + \frac{|\dot{V}_{VW}|^2}{3|Z_P + Z_N|^2} \cdot R_{2N} \right\} \end{aligned} \quad (12)$$

等價回路에서 明確한 것처럼 \$Z\_P\$ 중의 \$r\_2'/s\$를 흐르는 電流 \$I\_V' = a\_1 I\_V\$ 및 \$Z\_N\$ 중의 \$r\_2'(2-s)\$를 흐르는 電流 \$I\_V'' = a\_2 I\_V\$라 하면, 二次銅損 \$P\_{C2}\$는

$$\begin{aligned} P_{C2} &= |I_V'|^2 \cdot r_2' + |I_V''|^2 \cdot r_2' \\ &= |I_V|^2 \left[ \frac{x_m^2}{\left( \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_m + \bar{x}_2')^2} \cdot \frac{r_2'}{s} + \frac{x_m^2}{\left( \frac{r_2'}{2-s} \right)^2 + (x_m + \bar{x}_2')^2} \cdot r_2' \right] \\ &= |I_V|^2 [s \cdot R_{2P} + (2-s) \cdot R_{2N}] \end{aligned} \quad (13)$$

이 때, \$P\_{3P}\$는 二次銅損을 빼면 되므로

$$\begin{aligned} P_{3P} &= P_2 - P_{C2} = |I_V|^2 [R_{2P} + R_{2N} - \{s \cdot R_{2P} + (2-s) \cdot R_{2N}\}] \\ &= |I_V|^2 [R_{2P} - R_{2N}] (1-s) \end{aligned} \quad (14)$$

토크 \$T\$는

$$\begin{aligned} T &= P_{3P} / (1-s) \cdot \omega_r = |I_V|^2 [R_{2P} - R_{2N}] / \omega \\ &= 3 \left[ \frac{|I_V|^2}{3} \cdot R_{2P} - \frac{|I_V|^2}{3} \cdot R_{2N} \right] / \omega \quad [\text{N} \cdot \text{m}] \end{aligned}$$

이 때, 式(3)을 利用하여

$$\begin{aligned} T &= 3(|I_{1P}|^2 \cdot R_{2P} - |I_{1N}|^2 \cdot R_{2N}) / \omega \\ &= 3 \cdot |I_{1P}|^2 \cdot (R_{2P} - R_{2N}) / \omega \quad [\text{N} \cdot \text{m}] \end{aligned} \quad (15)$$

이 때, 이 값은 電動機의 鐵損과 銅損을 빼고 出力으로 나타난다.

### 3. 實 驗

#### 3-1. 實驗裝置의 概要

本論文의 性質上 正常狀態에서 運轉되고 있는 三相誘導電動機가 어떤 原因으로 缺相時 一次側에 流入되는 電流와 廻轉力의 變化를 測定내지 記錄할 수 있는 장치를 마련하였다. 實驗裝置는 供試電動機를 DC發電機와 直結시키고 負荷크기는 DC發電機의 負荷와 木製制動機로서 조종했으며 速度測定은 tachogenerator로 그리고 廻轉力의 測定은 固定子에 附着한 rheostat와 스프링식 張力計를 使用하였다. 供試電動機의 機械損을 測定하기 위해서 外部直流電動機로서 同期速度로 회전시켜주고 이때 공시전동기의 電力지시치의 差( $\Delta W = W_1 - W_2$ )로 구했다. 갑작스런 負荷變動에도 廻轉數의 急變을 막기 위해 플라이휠을 設置했다. 그리고 三相 및 缺相時 一次側에 流入되는 電流 및 廻轉力의 變化는 X-Y recorder를 使用하여 記錄할 수 있도록 하였다.

Table 3-1은 被試驗電動機와 기록계의 定格이며, Fig. 3는 實驗裝置의 結線圖와 寫眞이다.

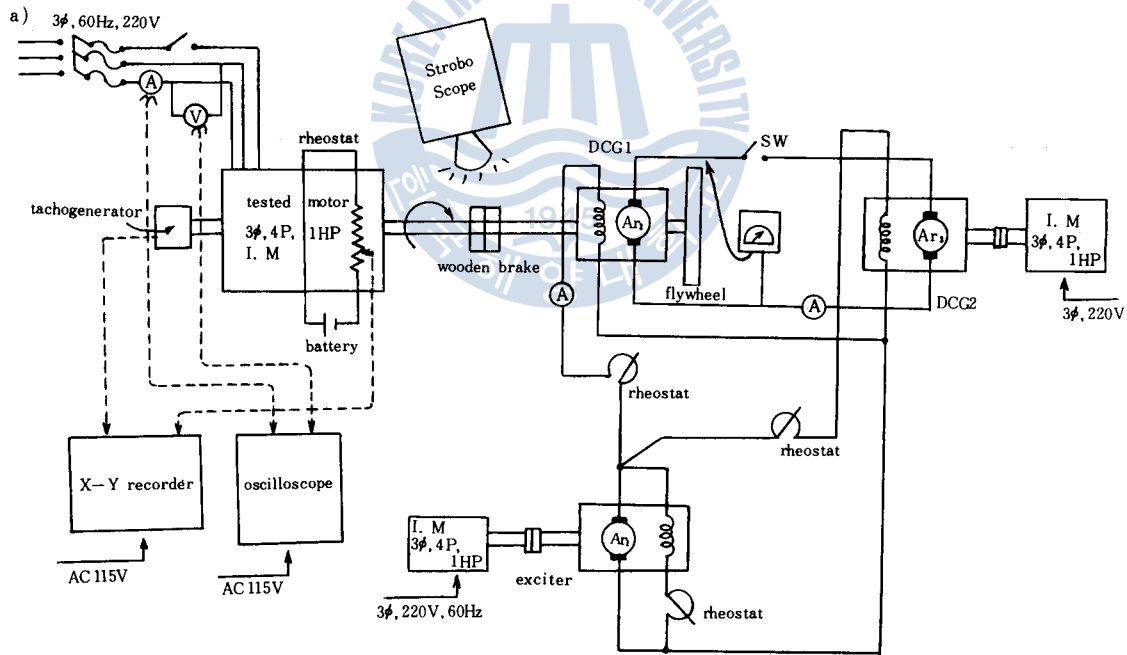


Fig. 3. a) Schematic connection diagram and  
b) experimental apparatus



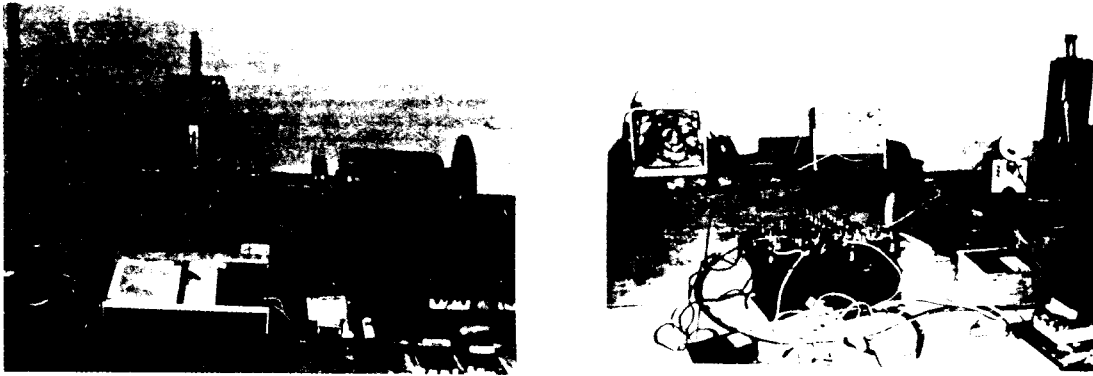


Fig 3. Continued

Table 3-1 Rated values of experimental apparatus

i) 普通籠型 誘導電動機	.....울지전기Co.
Voltage : 200V	RPM : 1720
Frequency : 60Hz	Pole : 4P
Starting current : 18amp	Full load current : 3.8amp
Starting torque : 150%	Output : 0.76KW(1HP)
ii) X-Y Recorder	.....Hewlett Packard
Input : ±500VDC	Accuracy : ±0.2%
Input range : 1, 10, 100mV/in	.....of full scale
1 and 10V/in	Power : 115 or 230V±10%,
writing area: 7in×10in	50 to 60 Hz

3-2. 定數測定實驗<sup>11), 12)</sup>

延轉力及 電流의 計算 및 解析에 必要한 電動機等價回路에 包含될 定數  $r_1, r_2, x_1, x_2, x_m, \zeta_m, l_m, Y_m$ 等을 測定하기 위한 實驗이다. 이것을 하기 위해서 供試電動機로부터 一次抵抗測定實驗, 無負荷實驗 (no load test), 短絡 또는 拘束實驗 (short circuit or lock test)을 實施하였다. 力率角測定에는 코실로스코우프를 使用하였고 無負荷實驗은 供試電動機가 無負荷로 運轉中  $A_1$ 에서  $A_2$ 로 DC電力을 供給하여 同期速度까지 增速시킨 후, 軸機械損을 負擔하도록 한 뒤의 AC電力으로부터 求한다. 이들 實驗을 通해서 決定된 供試電動機의 諸定數値는 Table 3-2와 같다.

Table 3-2 The various constants obtained from the tested motor.

$r_1=2.1537 [\Omega]$	$\zeta_m=0.0058 [\sigma]$
$r_2'=2.2177 [\Omega]$	$l_m=0.0193 [\sigma]$
$x_1+x_2'=1.0712 [\Omega]$	$Y_m=0.02015 [\sigma]$
$x_1=x_2'=2.188 [\Omega]$	$\lambda_m=47.52 [\Omega]$

## 3-3. 速度—電流特性測定實驗

三相 및 缺相時供試電動機에 負荷를 점진적으로 增加시켜 slip이  $S \approx 0$ 에서  $S=1$ 로 變換해 固定子捲線에 흐르는 電流值를 測定하는 實驗이다.

供試電動機의 廻轉速度에 比例해서 誘起되는 tachogenerator의 電壓을 整流해서 X-Y recorder의 X축에 넣고 固定子에 흐르는 電流는 開路되지 않은 任意의 한線에서 AC電流計의 端子電壓을 整流하여 Y축에 넣어 Fig. 4와 같은 Current-slip特性曲線을 얻었다.

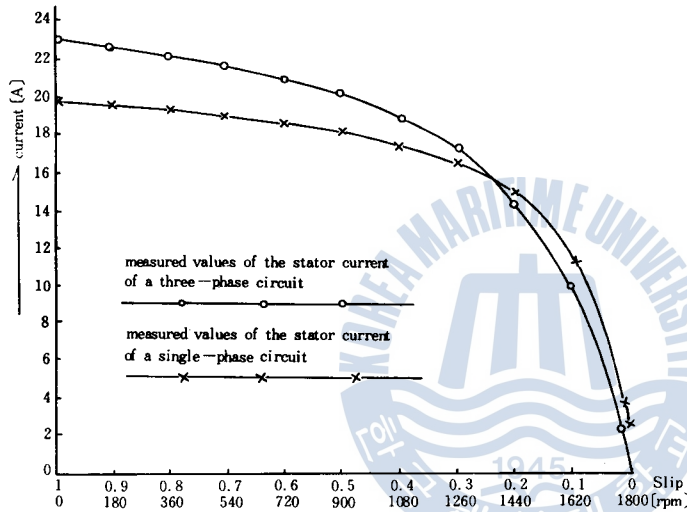


Fig. 4. Current-slip characteristics

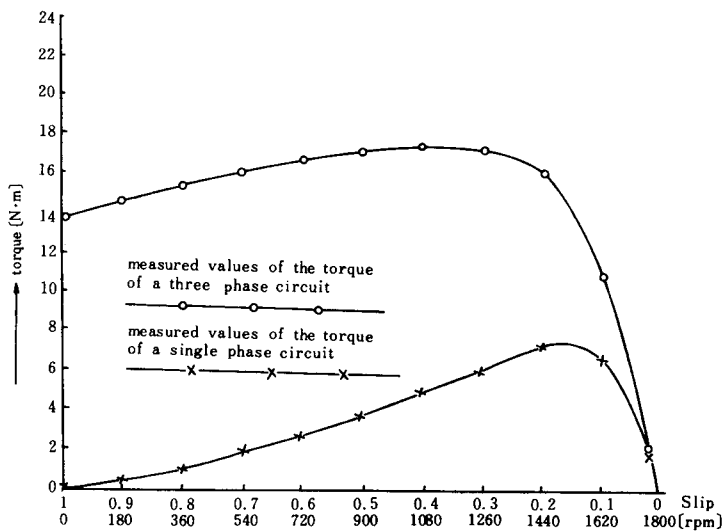


Fig. 5. Torque-slip characteristics curves

## 3-4. 速度—廻轉力特性測定實驗

速度—電流 特性測定實驗에서와 同一한 方法으로 記錄計의 X축에 는 tachogenerator의 誘起電壓을 整流해서 넣었다. 그리고 廻轉可能한 供試電動機의 固定子外周에 potentiometer를 附着시키고 여기에 直流電源을 연결하여 電動機에 發生하는 廻轉力에 比例해서 固定子가 비틀어진 角에 相當한 電壓이 記錄計의 Y 軸에 廻轉力(kg·m)값이 記錄되도록 하였다. 물론 이 값은 사전에 calibration되어 있다.

또 固定子에 나타나는 廻轉力이 스프링식 張力計(arm 0.32m)를 달아 둠으로써 供試電動機의 어떤 任意의 廻轉數에 對해서 廻轉力을 읽을 수 있도록 하였다.

Fig. 5은 實驗結果 얻어진 三相 및 缺相時의 Torque-slip 特性曲線이다.

## 4. 實驗結果 및 檢討

## 4-1. 理論值의 具體的인 計算

이동전압을 계산하면,  $V_{1d} = 21.936[V]$  이고,  $V_{1q} = 9.679[V]$  이다. 이 때,  $V_{1d}$  와  $V_{1q}$  의 크기는 각각  $V_{1d} = 21.936[V]$  이고,  $V_{1q} = 9.679[V]$  이다. 이 때,  $V_{1d}$  와  $V_{1q}$  의 크기는 각각  $V_{1d} = 21.936[V]$  이고,  $V_{1q} = 9.679[V]$  이다.

이 때,  $V_{1d}$  와  $V_{1q}$  의 크기는 각각  $V_{1d} = 21.936[V]$  이고,  $V_{1q} = 9.679[V]$  이다. 이 때,  $V_{1d}$  와  $V_{1q}$  의 크기는 각각  $V_{1d} = 21.936[V]$  이고,  $V_{1q} = 9.679[V]$  이다.

$$I_{1d} = \frac{V_{1d}}{\sqrt{R_s^2 + (\omega_s L_s)^2}} = \frac{21.936}{\sqrt{0.1^2 + (3.14 \times 0.1)^2}} = 13.501[A]$$

$$I_{1q} = \frac{V_{1q}}{\sqrt{R_s^2 + (\omega_s L_s)^2}} = \frac{9.679}{\sqrt{0.1^2 + (3.14 \times 0.1)^2}} = 6.231[A]$$

$$T_{1d} = \frac{V_{1d} \cdot I_{1d}}{\omega_s (T_{1d}^2 + L_s^2 I_{1d}^2)} = \frac{21.936 \times 13.501}{3.14 (0.1^2 + 0.01 \times 13.501^2)} = 21.936[N \cdot m]$$

$$T_{1q} = \frac{V_{1q} \cdot I_{1q}}{\omega_s (T_{1q}^2 + L_s^2 I_{1q}^2)} = \frac{9.679 \times 6.231}{3.14 (0.1^2 + 0.01 \times 6.231^2)} = 9.679[N \cdot m]$$

#### 4-2. 實測値와 計算値의 比較

計算結果와 實測値를 檢討해 보면 計算値와 變動토크는  $T_{1d} = 21.936[N \cdot m]$  이고  $T_{1q} = 9.679[N \cdot m]$  이다. 이 때, 44% 정도 減少하여 이 때  $S_{1d} = 0.46$  이고  $S_{1q} = 0.18$  로 移動한다. 反面로 實測値는  $T_{1d} = 17.25[N \cdot m]$  이고  $T_{1q} = 7.12[N \cdot m]$  로 41% 정도 減少하고 이 때  $S_{1d} = 0.4$  이고  $S_{1q} = 0.2$  附近으로 移動한다.

상기 測定子의 流入되는 電流를 計算해 보면  $S_{1d} = 0.46$  이고  $I_{1d} = 13.501[A]$  이고,  $I_{1q} = 6.231[A]$  (3φ의 1.16倍) 이고,  $S_{1q} = 0.18$  이고  $I_{1q} = 6.231[A]$  이고,  $I_{1d} = 13.501[A]$  (3φ의 1.51倍) 로 增加할 事가 되고 있다. 實測値와 比較

$S_{1d} = 0.4$  이고  $I_{1d} = 13.571[A]$  이고,  $I_{1q} = 6.231[A]$  (3φ의 0.94倍) 이고,  $S_{1q} = 0.2$  이고  $I_{1q} = 6.231[A]$  이고,  $I_{1d} = 13.571[A]$  (3φ의 1.02倍) 이고, 3.14로 乘해서  $T_{1d} = 17.25[N \cdot m]$  이고  $T_{1q} = 7.12[N \cdot m]$  이다.

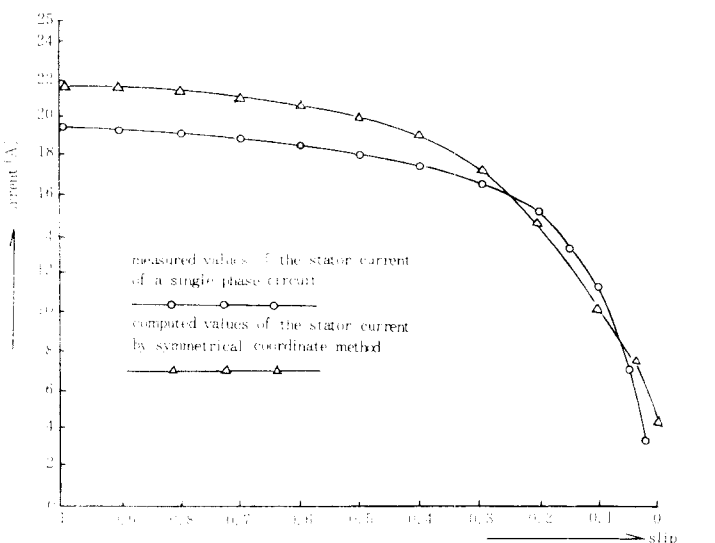


Fig. 4. Comparison of computed current and measured current under the situation of single phase operation

比較해 보면 計算値와 變動토크는  $T_{1d} = 21.936[N \cdot m]$  이고  $T_{1q} = 9.679[N \cdot m]$  이다. 이 때, 44% 정도 減少하여 이 때  $S_{1d} = 0.46$  이고  $S_{1q} = 0.18$  로 移動한다. 反面로 實測値는  $T_{1d} = 17.25[N \cdot m]$  이고  $T_{1q} = 7.12[N \cdot m]$  로 41% 정도 減少하고 이 때  $S_{1d} = 0.4$  이고  $S_{1q} = 0.2$  附近으로 移動한다.

#### 4-3. 變動轉力과 負荷轉力과의 考察

一般的으로 電機機의 負荷轉力은 轉力轉速의 變化的인 現象이다.

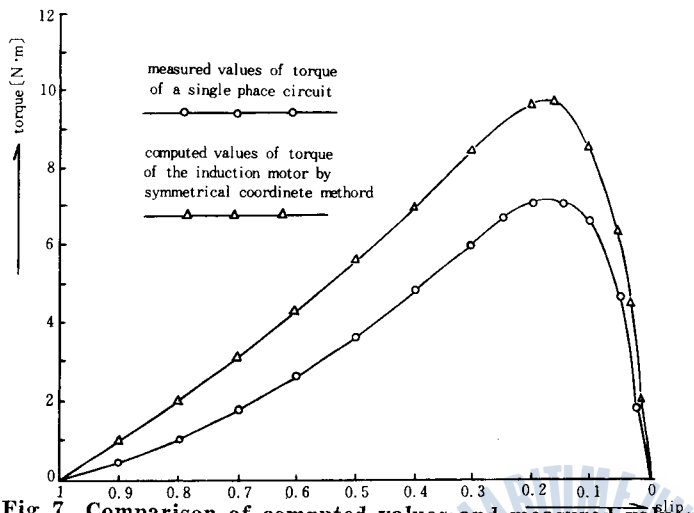


Fig. 7. Comparison of computed values and measured values of the induction motor torque under the situation of single phase operation

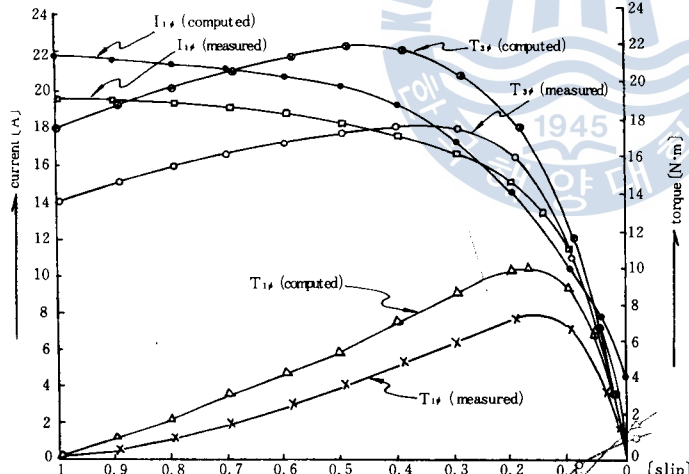


Fig. 8. Comparison of the characteristics of current and torque in single phase circuit and three-phase circuit

角加速度가 없으므로 ( $J \frac{d\omega}{dt} = 0$ ) 電動機에서 發生하는 廻轉力은 全部 負荷에 供給된다.

한편 負荷廻轉力은 간단히

$$T_L = F + k\omega \quad (k : \text{常數})^{14} \quad (18)$$

로 나타낼 수 있다.

Fig. 9에서는 三相 및 缺相時의 電流, 廻轉力을 式(4), (15)에 依하여 計算한 값을 그린 것과 명판에 記載된 定格出力 및 廻轉數로 돌 때의 假想的인 負荷線과 交叉한 狀態를 보이고 있으며 Fig. 10에서는 三相 및 缺相時 實測에 依한 電動機의 電流·廻轉力을 그린 것과 定格出力 및 廻轉數로 運轉했을 때 負荷線과의 平衡狀態를 보이고 있다.

定格負荷로 三相誘導電動機가 運轉되다가 어떤 原因으로 缺相이 되면 計算值 (Fig. 9)에서는  $T_{3\phi} = 4.55 [N \cdot m]$ ,  $S_{3\phi} = 0.036$  ( $N_{3\phi} = 1,735 \text{rpm}$ )에서 平衡狀態로 運轉되다가  $T_{1\phi} = 4.45 [N \cdot m]$ ,  $S_{1\phi} = 0.045$  ( $N_{1\phi} = 1,719 \text{rpm}$ )로 平衡點이 이동하며, 反面에 實測值(Fig. 10)에서는  $T_{3\phi} = 4.4 [N \cdot m]$ ,  $S_{3\phi} \approx 0.038$  ( $N_{3\phi} \approx 1,733 \text{rpm}$ )에서  $T_{1\phi} = 4.3 [N \cdot m]$ ,  $S_{1\phi} = 0.049$  ( $N_{1\phi} = 1,712$

rpm)로 電動機와 負荷廻轉力의 平衡點이 移動한다.

그러므로 定格負荷에서 缺相時 電動機速度는 三相時 電動機速度의 1.2%以下로 減少하고 廻轉力은 3%以下로 減少한다. 그러나 固定子에 流入되는 電流는 計算值의 경우에  $\dot{I}_{3\phi} = 2.15 [A]$ 에서  $\dot{I}_{1\phi} = 6.75 [A]$ 로 3.14배 增加하고, 實測值의 경우에는  $\dot{I}_{3\phi} = 3.7 [A]$ 에서  $\dot{I}_{1\phi} = 7 [A]$ 정도로 1.9배 增加하고 있다.

몇 가지 負荷의 크기에 對하여 缺相이 생겼을 때 slip, 電流 및 廻轉力이 얼마나 變하는가를 Table 4-1에 나타내었다.

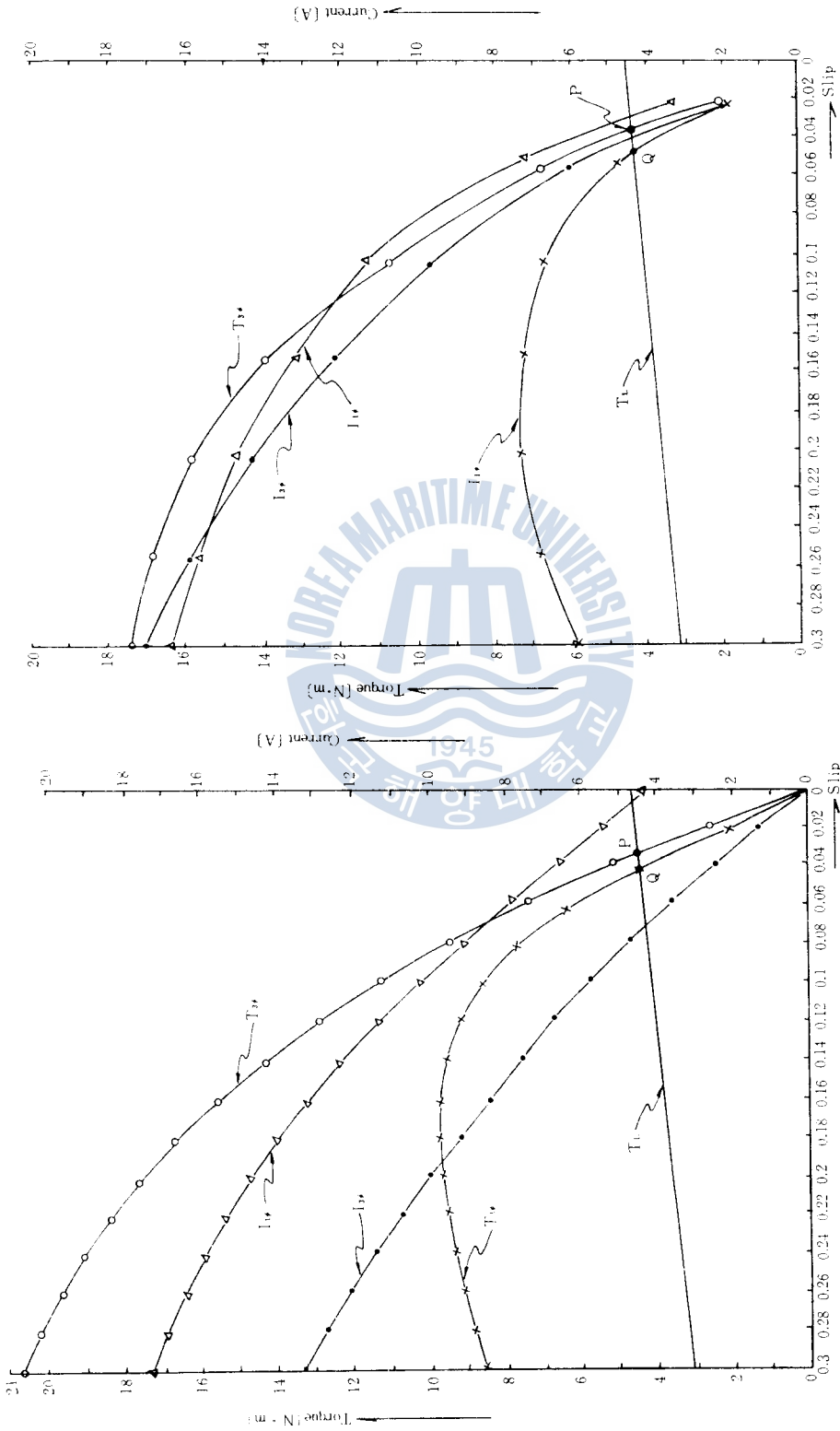


Fig. 10 Equilibrium of the motor torque and load torque (measured)

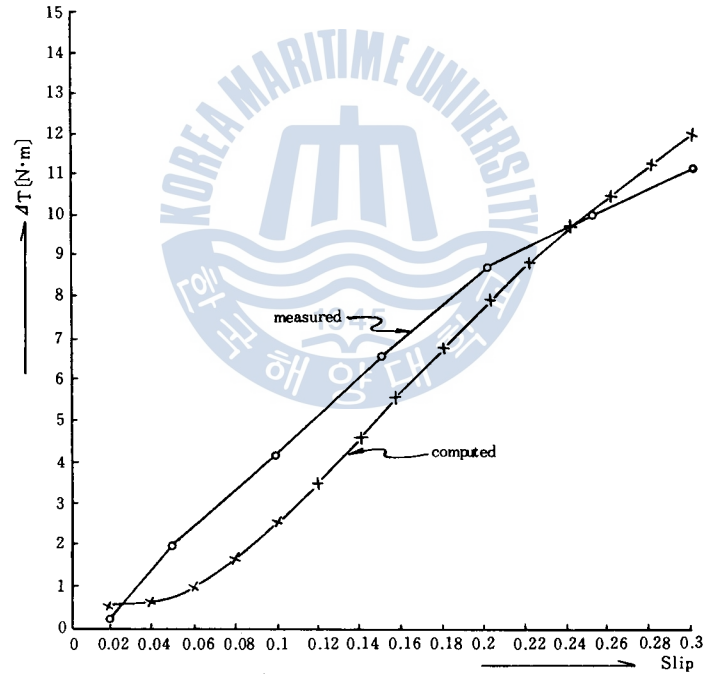
Fig. 9 Equilibrium of motor torque and load torque (computed)

Table 4-1 Comparison of the slip, current and torque under various loads

(계산치/실측치)

負荷	80% 負荷			定格 負荷			120% 負荷		
구분	Slip (%)	電流 [A]	廻轉力 [N·m]	Slip (%)	電流 [A]	廻轉力 [N·m]	Slip (%)	電流 [A]	廻轉力 [N·m]
三相	0.033	1.85	3.95	0.036	2.15	4.55	0.041	2.4	5.05
	0.035	3.3	3.85	0.038	3.7	4.4	0.042	4.2	4.9
缺相	0.039	6.25	3.85	0.045	6.75	4.45	0.05	7.1	5.02
	0.042	4.7	3.8	0.049	7	4.3	0.056	7.9	4.75

Fig. 11은  $\Delta T-S$  curve [단  $\Delta T = T_{3\phi}(s) - T_{1\phi}(s)$ ]를 그린 것으로 이 線圖에서 供試電動機가  $\Delta T$ 가  $S=0.06$ 을 變曲點(brake point)으로 하여 거의 直線의으로 增加하는 特性을 가짐을 알 수 있다.

Fig. 11.  $\Delta T-S$  Curve

## 5. 結 論

本 論文에서 理論, 實驗, 結果檢討를 거쳐 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 三相誘導電動機가 運轉 중에 一相이 缺相이 되었을 때 不平衡回路理論에 依한 固定子에 流入 되는 電流 및 廻轉力은 實測值에 대체로 接近하나 다소의 오차가 있다. 이런 것들은 固定子에 供給 되는 電流가 slip ring을 通했기 때문에 오는 一次抵抗증대, 측정기기 등의 부정확, 그리고 기타 여러 가지 原因에 起因한것으로 본다.

(2) 小形 三相籠型誘導電動機가 運轉中에 缺相이 되면 定格負荷前後에서의 speed drop는 三相時 電動機速度의 1.2% 정도이며 廻轉力減少는 三相電動機廻轉力の 3%정도이나 固定子에 流入되는 電流는 三相運轉時보다 1.9倍 以上이 흘러 正常보다. 3.6倍정도의 發熱을 하므로 電動機過熱을 초래한다. 따라서 三相時 어떤 過負荷狀態에서 燒損時間을 알 수 있다면 缺相時 電動機가 燒損되는 시간을 예측할 수 있을 것이며 缺相時 overload detect element 두 개가 모두 動作될 경우에는 電動機는 停止하나 하나만이 動作될 경우에는 電動기가 燒損될 위험이있으므로 三相 모두에 overload detect element 장치가 있었으면 좋겠다.

(3) Current-slip 및 Torque-slip 特性曲線에서 缺相時停動토크는 文献에 依하면 50%前後이나<sup>2)</sup> 本研究에서는 41%로 減少하였으며 停動토크를 發生하는 slip는 同期速度쪽으로 移動하였고 停動토크를 發生하는 slip附近에서 入力電流는 增加하는 特性을 나타내었다.

參 考 文 獻

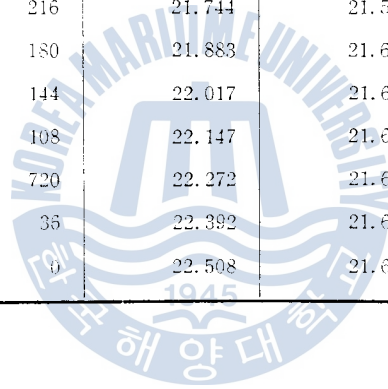
- 1) 後藤良 : 電磁機械(上), 共立出版株式會社, 東京, 1963, pp.163—166.
- 2) 任達鎬, 朴聖圭·電氣機械Ⅱ, 東逸出版社, 1978, pp.298—299.
- 3) 元鍾洙 : 電動機의 燒損防止를 위한 保護, 大韓電氣學會誌, 第28卷 第2號, 1979.2, pp.95—105.
- 4) K. Y. Tang : Alternating current circuits, International textbook company, 1955.12, pp.361—385.
- 5) 日本電氣學會 : 誘導機, 日本電氣學會, 東京, 1952.10, pp.132—154, pp.188—196.
- 6) 高田勇次郎 : 電氣機械Ⅰ, オーム社, 東京, 1965.5, pp.321—322.
- 7) 朴長鎬 : 誘導機器, 東明社, 1977, pp.471—482, pp.535—543.
- 8) 한만춘 역 : 交流回路(Russel M. Kerchner and Geoge F. corcoran, alternating current circuits) 文教部, pp.497—528.
- 9) A. E. Fitzgerald and Charles Kingsley, *Electric machinery*, McGRAW-HILL book company, INC. 1952, pp.440—467.
- 10) A. E. Fitzgerald外 2名 : *Electric machinery*, International student edition, 1971, pp.524—530.
- 11) 東京電氣大學 : 最新強電實驗, 東京電氣大學出版部, 1962.6, pp.121—140.
- 12) 李允鍾 : 新編電氣機械, 東明社, 1979, pp.329—332.
- 13) 盧彰注·金潤植 : 小形三相誘導電動機의 起動電流一時間에 關한 研究, 大韓電氣學會誌 第27卷 第5號 1978.9.
- 14) 朴長鎬 : 電動機 應用(電氣制御篇), 東明社, 1965, pp.6—13.

附錄 : Computed values of the stator current and torque

Slip	분당회전수 [rpm]	電 流 [A]		廻 轉 力 [N·m]	
		三 相	缺 相	三 相	缺 相
0	1,800	0	4.435	0	0.105
0.02	1,764	1.230	5.265	2.670	2.149
0.04	1,728	2.409	6.484	5.120	4.531
0.06	1,692	3.535	7.787	7.352	6.403
0.08	1,656	4.608	9.049	9.370	7.716
0.10	1,620	5.629	10.224	11.183	8.598
0.12	1,584	6.597	11.297	12.800	9.162
0.14	1,548	7.514	12.269	14.235	9.492
0.16	1,512	8.382	13.145	15.499	9.650
0.18	1,476	9.203	13.937	16.606	9.679
0.20	1,440	9.978	14.644	17.570	9.612
0.22	1,404	10.710	15.284	18.404	9.474
0.24	1,368	11.402	15.861	19.118	9.284
0.26	1,332	12.054	16.383	19.726	9.057
0.28	1,296	12.671	16.855	20.238	8.802
0.30	1,260	13.253	17.283	20.664	8.529
0.32	1,224	13.803	17.673	21.013	8.243
0.34	1,188	14.322	18.027	21.294	7.950
0.36	1,152	14.814	18.351	21.515	7.653
0.38	1,116	15.278	18.647	21.681	7.355
0.40	1,080	15.718	18.918	21.801	7.058
0.42	1,048	16.135	19.166	21.878	6.763
0.44	1,008	16.530	19.394	21.981	6.471
0.46	972	16.904	19.604	21.926	6.184
0.48	936	17.260	19.797	21.905	5.902
0.50	900	17.597	19.975	21.860	5.625
0.52	864	17.918	20.139	21.792	5.353
0.54	828	18.223	20.290	21.706	5.086
0.56	792	18.514	20.429	21.603	4.825
0.58	756	18.790	20.558	31.486	4.568
0.60	720	19.054	20.677	21.357	4.317
0.62	684	19.306	20.786	21.218	4.071
0.64	648	19.546	20.887	21.069	3.829



0.66	512	19.775	21.133	20.713	1.422
0.68	571	19.895	21.136	20.751	1.359
0.70	549	20.204	21.144	20.583	1.159
0.72	504	20.495	21.215	20.411	2.965
0.74	483	20.597	21.281	20.255	2.883
0.76	492	20.782	21.349	20.657	2.455
0.78	395	20.959	21.394	19.877	2.249
0.80	350	21.128	21.442	19.695	2.036
0.82	324	21.291	21.485	19.513	1.826
0.84	288	21.448	21.523	19.329	1.618
0.85	252	21.599	21.555	19.146	1.411
0.88	216	21.744	21.587	18.963	1.206
0.90	180	21.883	21.608	18.780	1.003
0.92	144	22.017	21.628	18.898	0.801
0.94	108	22.147	21.643	18.417	0.600
0.95	720	22.272	21.653	18.237	0.400
0.98	35	22.392	21.660	18.059	0.200
1.00	0	22.508	21.662	17.882	0.237E-05



0.66	412	19.775	21.533	21.813	20.532
0.68	374	19.835	21.436	21.751	20.759
0.70	340	20.204	21.144	21.533	21.173
0.72	314	20.465	21.215	21.411	21.995
0.74	288	20.597	21.281	21.296	21.483
0.76	272	20.782	21.340	21.057	21.465
0.78	266	20.959	21.394	19.877	21.249
0.80	260	21.128	21.442	19.695	21.036
0.82	254	21.291	21.485	19.513	21.826
0.84	248	21.448	21.523	19.329	21.618
0.85	252	21.599	21.556	19.146	21.411
0.88	216	21.744	21.587	18.963	21.206
0.90	180	21.883	21.608	18.780	21.003
0.92	144	22.017	21.628	18.598	20.801
0.94	108	22.147	21.643	18.417	20.600
0.95	720	22.272	21.653	18.237	20.400
0.98	36	22.392	21.660	18.059	20.200
1.00	0	22.508	21.662	17.882	0.237E-05

