◉ 研究論文

# 三相誘導電動機의 缺相時 電流 및 廻轉力特性에 關한 硏究*

俞 春 植** · 盧 彰 注***

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

Choonsik Yu · Changjoo Noh.


## 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 numerical 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;

1) The values computed by the unbalanced circuit theory generally come to approach the values recorded through experiments.

2) Near the rated load, speed drop is less than 1.2 per cent of the speed of three-phase induction motor and torque reduces less than 3 per cent of it of three-phase induction motor when three-phase induction motor is run under a single-phase. On the other hand, the stator current in a single-phase circuit is more than 1.9 times of it in three-phase circuit.

3) The stalling torque in a single-phase circuit is reduced to about 41 per cent of it in three-phase circuit while the corresponding slip is moved toward the synchroneous speed and the corresponding stator current is increased.


* 1981年度 春季學術講演會(1981年 4月 25日)에서 發表

** 正會員, 海軍士官學校

*** 正會員, 韓國海洋大學

## 記號 說明

$b_m$ : 勵磁 서셉턴스〔Ω〕
$g_m$ : 勵磁 콘덕턴스〔℧〕
$\dot{I}_u$, $\dot{I}_u$, $\dot{I}_W$ : 一次側 各 相의 線電流〔A〕
$\dot{I}_{1P}$, $\dot{I}_{1N}$ : 一次側 正相 및 逆相電流〔A〕
$\dot{I}_{1\phi}$, $\dot{I}_{3\phi}$ : 單相 및 三相時 一次側에 流入되는 전류〔A〕
$\dot{I}_{1m1\phi}$, $\dot{I}_{1m3\phi}$ : 單相 및 三相의 一次側에 流入되는 最大電流〔A〕
$J=mr^2$ : 慣性모우먼트〔kg·m²〕
$N_{1\phi}$, $N_{3\phi}$ : 單相 및 三相의 電動機의 분당 회전수〔rpm〕
$P_{c1}$, $P_{c2}$ : 1차 및 2차 銅損〔W〕
$P_1$, $P_2$ : 一次 및 二次 入力〔W〕
$P_{0P}$ : 出力〔W〕
$r_1$ : 一相當一次抵抗〔Ω〕
$r_2'$ : 二次一相의 抵抗(一次換算値)〔Ω〕
$R_{2P}$, $R_{2N}$ : 正相 및 逆相磁界에 依한 二次一相의 抵抗〔Ω〕
$s$ : slip
$S_{m1\phi}$, $S_{m3\phi}$ : 單相 및 三相에 있어서 最大廻轉力을 發生하는 slip
$T$ : 電動機의 廻轉力〔N·m〕
$T_L$ : 負荷廻轉力〔N·m〕
$T_{1\phi}$, $T_{3\phi}$ : 缺相 및 三相時 廻轉力〔N·m〕
$T_{m1\phi}$, $T_{m3\phi}$ : 單相 및 三相時 最大廻轉力〔N·m〕
$V_{VW}$ : $V$相과 $W$相間의 線間電壓〔V〕
$V_{1P}$, $V_{1N}$ : 一次側 正相 및 逆相電壓〔V〕
$V_U$, $V_V$, $V_W$ : 各相電壓〔V〕
$x_1$ : 一次一相의 漏洩리액턴스〔Ω〕
$x_2'$ : 二次一相의 漏洩리액턴스 (一次換算植)〔Ω〕
$x_m$ : 勵磁리액턴스〔Ω〕
$Y_m=g_m-jb_m$ : 勵磁어드미턴스〔Ω〕
$\omega$ : 電動機의 任意角速度 (rad/sec)
$\omega_S$ : 同期角速度(rad/sec)

## 1. 序 論

三相誘導電動機는 船舶이나 産業設備의 動力源으로서 普遍的으로 利用되며 그 用途 또한 多種多樣하다. 그런데, 이것을 運轉할 때 供給電壓의 不平衡, 電源스위치의 接觸不良, 電源開閉器의 一線의 휴우즈의 斷絶, 一次捲線의 一相開路, 또는 二次回路의 開放等으로 不平衡 運轉狀態로 되는 境遇가 많다.

三相交流回路의 電壓은 보통 1~2% 程度의 不平衡率($\mu=V_{1N}/V_{1P}$)은 피할 수 없고 電動機에 미치는 影響 역시 적어서 사실상 無視될 程度이나 이것이 5~6%를 超過하면 Slip 및 電流가 增加되고 銅損이 커져서 機械的인 出力이 감소되고 逆相廻轉力의 增加로 有效廻轉力도 감소된다.[1] 또 電壓 不平衡의 極端의 例로서 三相誘導電動機가 運轉中에 一次端子의 一線이 開放되어 單相運轉을 행하게 되는 경우 電動機는 계속 廻轉하나 出力 및 效率은 減少된다.

運轉되고 있던 電動機가 缺相이 생기면 停動토오크(Stalling torque)는 50% 전후로 감소되고 入力電流는 2倍 가까이 흐르므로[2] 2 element thermal relay(過負荷 및 缺相保護)나 3 element relay(過負荷, 缺相 및 逆相保護)[3]와 같은 電動機 保護裝置의 作動이 不良할 때는 電動機가 燒損되는 事故가 發生하게 된다.

三相誘導電動機의 不平衡狀態에 對한 一般的인 解析法으로는 1918년 Fortescue 氏에 依해 發表된 對稱座標法[4,5]을 많이 이용하고 있다. 그리고 이 方法이 실제 電動機 特性解析에 있어서 가장 一般的이고 타당한 理論으로 認定되어 왔다. 그러나, 筆者가 오랫동안 艦上에서 誘導電動機를 使用해 본 경험에 비추어 볼 때 缺相時의 電流와 廻轉力은 一般 文獻과는 差가 많은 것 같았고 最近에 와서 電動機의 材質 및 製作技術의 發達로 機器들이 小形化 되었으므로 이런 것에서 오는 機械·電氣的 諸定數의 變化가 있을 것을 豫想하고 어느 程度 理論과 實際가 一致하는가를 確認하고 他實務者에게 참고가 되게 하기 위하여 硏究가 실시되었다.

本硏究를 위해서 籠型三相誘導電動機를 供試

機로 選定하여 正常運轉狀態에서 一次側 端子의 任意의 一線을 開放하여 不平衡狀態로 만들어 一次側에 流入되는 電流와 廻轉力이 어떻게 變化하는가를 考察하였다. 또 缺相時 電流 및 廻轉力의 變化를 理論的으로 밝히기 위해서 앞에서 언급한 解析法에 의해서 特性式을 유도했으며 實驗을 通해서 被試驗電動機의 解析에 必要한 諸 定數値를 決定하고 三相 및 缺相時의 速度—電流 및 速度—廻轉力線圖를 記錄하였다.

그리고 不平衡運轉解析法에 依해 誘導된 電流 및 廻轉力式에 定數値를 代入해서 얻은 各各의 計算値와 實驗을 通해서 얻은 實測値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[5,6,7]

對稱座標法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은 3個의 平衡系統 vector로 分解된다.[8,9,10]

缺相時에는 不平衡의 極端의 경우므로 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 중첩되어 있으므로 이것의 T型等價回路는 그림 1[5,7]과 같다.

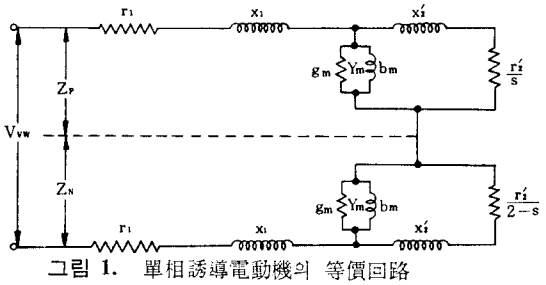

그림 1. 單相誘導電動機의 等價回路

但, $Z_P=r_1+jx_1+\dfrac{1}{g_m-jb_m+\dfrac{1}{\dfrac{r_2'}{s}+jx_2'}}$

$Z_N=r_1+jx_1+\dfrac{1}{g_m-jb_m+\dfrac{1}{\dfrac{r_2'}{2-s}+jx_2'}}$

固定子捲線이 Y 結線된 三相籠型誘導 電動機가 運轉 중에 그림 2처럼 $UVW$의 三端子 중 $U$가 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.

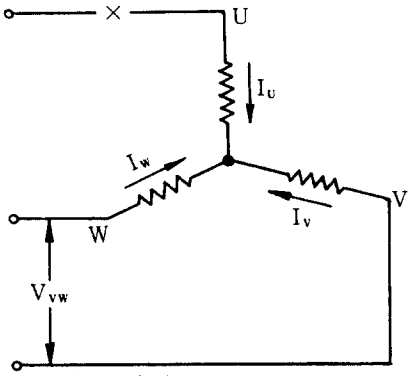

그림 2. 缺相時一次電流

$U$端子線이 끊어지면 $\dot{I}_U=0$, $\dot{I}_V=-\dot{I}_W$가 되고 $U$相을 基準으로 取할 때 電流의 對稱分은

$$\left.\begin{aligned}\dot{I}_{1P}&=\frac{1}{3}(\dot{I}_U+a\dot{I}_V+a^2\dot{I}_W)\\&=\frac{1}{3}(a\dot{I}_V+a^2\dot{I}_W)\\&=a(1-a)\dot{I}_V/3\\\dot{I}_{1N}&=\frac{1}{3}(\dot{I}_U+a^2\dot{I}_V+a\dot{I}_W)\\&=\frac{1}{3}(a^2\dot{I}_V+a\dot{I}_W)\\&=a(a-1)\dot{I}_V/3\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

(단, $a=\varepsilon^{j\frac{2}{3}\pi}=-\dfrac{1}{2}+j\dfrac{\sqrt{3}}{2}$

$a^2=\varepsilon^{j\frac{4}{3}\pi}=-\dfrac{1}{2}-j\dfrac{\sqrt{3}}{2}$

式(1)에서 $\dot{I}_{1P}=-\dot{I}_{1N}$가 얻어진다.

한편 電壓의 對稱分은

$$V_{1P}=\frac{1}{3}(V_U+aV_V+a^2V_W)$$

$$V_{1N}=\frac{1}{3}(V_U+a^2V_V+aV_W)$$

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

$$=\frac{j}{\sqrt{3}}V_{VW}$$

對稱分電壓은 對稱分電流×대칭분 임피던스이므로

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

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

따라서 電流의 對稱分은 式 (2)에서

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

線電流는

$$\dot{I}_V=-\dot{I}_W=a^2\cdot\dot{I}_{1P}+a\dot{I}_{1N}$$

$$=-\frac{j}{\sqrt{3}}\cdot\frac{V_{VW}}{Z_P+Z_N}(a^2-a)$$

$$=\frac{V_{VW}}{Z_P+Z_N}\cdots\cdots(4)$$

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

$$V_{1P}=\dot{I}_{1P}\cdot Z_P=\frac{Z_P}{Z_P-Z_N}\cdot\frac{j}{\sqrt{3}}V_{VW}$$

$$V_{1N}=-\dot{I}_{1P}\cdot Z_N=\frac{-Z_N}{Z_P-Z_N}\cdot\frac{j}{\sqrt{3}}V_{VW}$$

$$\cdots\cdots(5)$$

즉, 對稱分電壓의 걸대치는 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 $P_1=(V_{VW}\cdot\dot{I}_V)$로 된다.

線電流는 $\left|\frac{V_{VW}}{Z_P-Z_N}\right|$ 이고 이것이 $\frac{r_2'}{s}$ 分路로 흐르므로 分流係數를 구해보면

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

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

$r_2'/(2-s)$로 흐르는 경의 分流係數도

$$a_2=\left|\frac{jx_m}{j(x_m+x_2')+r_2'/(2-s)}\right|\cdots\cdots(7)$$

이다. 全入力을 $I^2R$ 형식으로 나타내면 3가지 저항에서 전력이 소모하므로

$$P_1=\dot{I}_V^2\cdot\left\{r_1+(\dot{I}_V\cdot a_1)^2\cdot\frac{r_2'}{s}+(\dot{I}_V\cdot a_2)^2\cdot\frac{r_2'}{2-s}\right\}$$

$$=\dot{I}_V^2(2r_1+a_1^2\cdot\frac{r_2'}{s}+a_2^2\cdot\frac{r_2'}{2-s})$$

$$=\frac{|V_{VW}|^2}{|Z_P+Z_N|^2}(2r_1+R_{2P}+R_{2N})\cdots\cdots(8)$$

단, $R_{2P}=\dfrac{x_m^2}{(r_2'/s)^2+(x_m+x_2')^2}\cdot\dfrac{r_2'}{s}\cdots(9)$

$$R_{2N}=\frac{x_m^2}{\{r_2'/(2-s)\}^2+(x_m+x_2')^2}\cdot\frac{r_2'}{2-s}$$

$$\cdots\cdots(10)$$

式 (8)의 저항은 一次銅損이고, 그 값은

$$P_{C1}=2|I_V|^2\cdot r_1=2|V_{VW}|^2\cdot r_1/|Z_P+Z_N|^2$$

$$\cdots\cdots(11)$$

나머지는 二次入力이 되고, 그 값 $P_2$는

$$P_2=P_1-P_{C1}=\frac{|V_{VW}|^2}{|Z_P-Z_N|^2}(R_{2P}+R_{2N})$$

$$=3\left\{\frac{|V_{VW}|^2}{3|Z_P+Z_N|^2}\cdot R_{2P}+\frac{|V_{VW}|^2}{3|Z_P+Z_N|^2}\cdot R_{2N}\right\}$$

$$\cdots\cdots(12)$$

等價回路에서 明確한 것처럼 $Z_P$ 중의 $r_2'/s$를 흐르는 電流 $\dot{I}_V'=a_1\dot{I}_V$ 및 $Z_N$ 중의 $r_2'/(2-s)$를 흐르는 電流 $\dot{I}_V''=a_2\dot{I}_V$라 하면, 二次銅損 $P_{C2}$는

$$P_{C2}=|I_V'|^2\cdot r_2'+|I_V''|^2\cdot r_2'$$

$$=|I_V|^2\left\{\frac{x_m^2}{\left(\frac{r_2'}{s}\right)^2+(x_m+x_2')^2}\cdot r_2'+\frac{x_m^2}{\left\{\frac{r_2'}{(2-s)}\right\}^2+(x_m+x_2')^2}r_2'\right\}$$

$$=|I_V|^2\{s\cdot R_{2P}+(2-s)\cdot R_{2N}\}\cdots\cdots(13)$$

出力은 二次入力에서 二次銅損을 빼면 되므로

$$P_{OP}=P_2-P_{C2}=|I_V|^2\{R_{2P}+R_{2N}-\{s\cdot R_{2P}+(2-s)\cdot R_{2N}\}\}=|I_V|^2\{R_{2P}-R_{2N}\}(1-s)$$

$$\cdots\cdots(14)$$

廻轉力은

$$T=P_{OP}/(1-s)\cdot\omega_S=|I_V|^2\{R_{2P}-R_{2N}\}/\omega_S$$

$$=3\left\{\frac{|I_V|^2}{3}\cdot R_{2P}-\frac{|I_V|^2}{3}\cdot R_{2N}\right\}/\omega_S\ [N\cdot m]$$

그런데, 式 (3)을 利用하여

$$T=3(|I_{1P}|^2\cdot R_{2P}-|I_{2N}|^2\cdot R_{2N})/\omega_S$$

$$=3\cdot|I_{1P}|^2\cdot(R_{2P}-R_{2N})/\omega_S\ [N\cdot m]\cdots(15)$$

이 되며 이 값에 電動機의 鐵損과 廻轉損을 감한 것이 出力으로 나간다.

한편, 平衡三相인 경우의 전류와 회전력은 $L$型 等價回路로부터 誘導되는 式은

$$I_{1\phi}=\frac{V/\sqrt{3}}{\sqrt{(r_1+r_2'/s)^2+(x_1+x_2')^2}} \quad \cdots(16)$$

$$T_{3\phi}=\frac{V^2\cdot r_2'/s}{\omega_s\{(r_1+r_2'/s)^2+(x_1+x_2')^2\}} \quad \cdots(17)$$

이다.

## 3. 實　　驗

### 3·1 實驗裝置의 槪要

本 論文의 性質上 正常狀態에서 運轉하고 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 廻電力의 變化를 測定 내지 記錄할 수 있는 裝置를 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로써 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 회전시켜 주고 이때 供試電動機의 電力指示値의 差($\Delta W=W_1-W_2$)로 구했다. 그리고 三相 및 缺相時 一次側에 流入되는 電流 및 廻電力의 變化는 X-Y recorder를 使用하여 記錄할 수 있도록 하였다.

표 3·1은 被試驗電動機의 定格이며 그림 3은 實驗裝置의 結線圖와 實物寫眞이다.

표 3·1 被試驗機의 定格

| 普通籠型 | 誘導電動機 |
|---|---|
| Voltage : 200V | RPM : 1720 |
| Frequency : 60Hz | Pole : 4P |
| Starting current : 18amp | Full load current : 3.5amp |
| Starting torque : 150% | output : 0.7KW(1HP) |

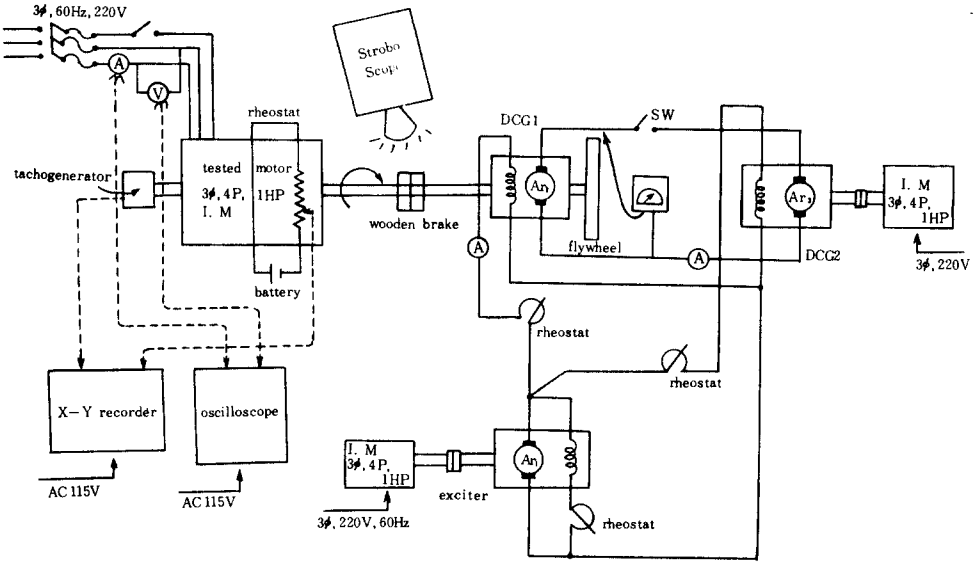

그림 3. 實驗裝置結線圖 및 寫眞

### 3·2 定數測定實驗[11,12]

廻轉力과 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 $r_1$, $r_2$, $x_1$, $x_2$, $x_m$, $g_m$, $b_m$, $y_m$ 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, 短絡 또는 拘束實驗을 實施하였다. 力率角測定에는 오실로스코우프를 使用하였고 無負荷實驗은 供試電動機가 無負荷로 運轉中 $Ar_3$에서 $Ar_2$로 DC電力을 供給하여 同期速度까

지 增速시킨 후 즉 機械損을 負擔하도록 한 뒤의 AC入力電力으로부터 求했다. 이들 實驗을 通해서 決定된 供試電動機의 諸定數値는 表 3·2와 같다.

표 3·2 被試驗電動機의 電氣的 定數

| | |
|---|---|
| $r_1=2.1535[\Omega]$ | $g_m=0.0058[\mho]$ |
| $r_2'=2.2177[\Omega]$ | $b_m=0.0193[\mho]$ |
| $x_1+x_2'=4.3721[\Omega]$ | $Y_m=0.02015[\mho]$ |
| $x_1=x_2'=2.1856[\Omega]$ | $x_m=47.52[\Omega]$ |

### 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 $s\simeq0$에서 $s=1$까지 變할 때 固定子捲線에 흐르는 電流値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 負荷를 無에서 電動機가 停止할 때까지 증가시켜 그림 4의 ④의 曲線과 같은 電流—slip特性曲線을 얻었다.

같은 方法으로 求한 缺相時의 값은 曲線③이다.

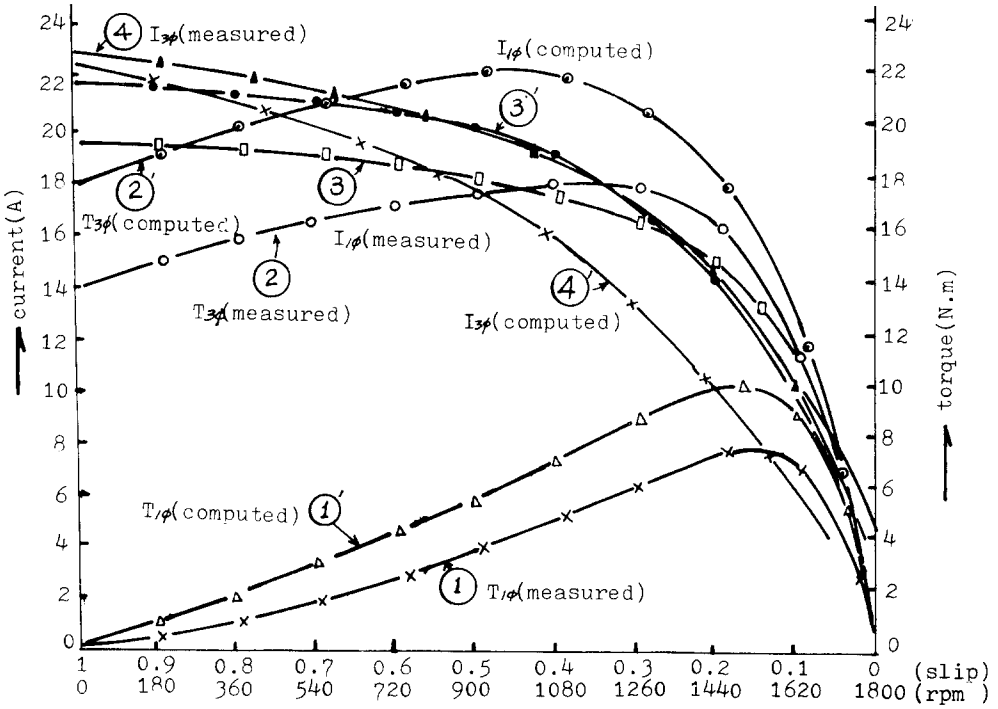


그림 4. 平衡三相時와 缺相時의 電流·廻轉力의 計算値와 實驗値

### 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 X축에는 tachogenerator의 誘起電壓을 넣고 Y軸에는 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에서 發生하는 廻轉力에 比例해서 固定子가 비틀어진 角에 相當한 電壓을 넣어 廻轉力(kg·m) 값이 記錄되도록 하였다. 이 曲線이 그림 4의 ②이다. 勿論 固定子에 나타나는 廻轉力은 스프링식 張力計(arm 0.32m)가 달려 있으므로 供試電動機의 어떤 任意의 廻轉數에 對하여 廻轉力을 읽을 수 있도록 되어 있다.

缺相時의 값은 그림 4의 ①이다.

## 4. 實驗結果 및 檢討

### 4·1 理論値의 具体的인 計算

單相時 電動機의 廻轉力과 電流의 理論的인 값을 求하기 위해 表 3·2에 주어진 本 被試驗電動機의 電氣的 諸定數値를 式 (4), (15)에 그리고 三相인 것은 (16), (17)에 代入하여 電子計算機로써 電流 및 廻轉力 값을 slip 0.02 구간으로 하여 구하고 그 값을 그림 4에 그려서 實測値와 比較 용이하게 하였다.

### 4·2 實測値와 計算値와의 比較

그림 4에서 slip 變化에 對한 電流의 變化, 廻轉力 크기의 變化 등은 一目요연하게 알 수 있다. 이 그림에서 알 수 있는 것은 전반적으로 實測値가 計算値보다 적게 나오고 있다.

計算値의 停動토오크는 $T_{m3\phi}=21.926$〔N·m〕에서 $T_{m1\phi}=9.679$〔N·m〕로 되어 44% 減少하며 이때 $s_{m3\phi}=0.46$에서 $s_{m1\phi}=0.18$로 移動한다. 反面에 實測値는 $T_{m3\phi}=17.25$〔N·m〕에서 $T_{m1\phi}=7.12$〔N·m〕로 41% 程度 減少하고 이때 $s_{m3\phi}=0.4$에서 $s_{m1\phi}=0.2$ 附近으로 移動한다.

한편 固定子에 流入되는 電流는 計算의 경우

$s_{m3\phi}=0.46$에서 $I_{13\phi}=16.904$〔A〕이고,

$I_{11\phi}=19.604$〔A〕($3\phi$의 1.16倍)이나,

$s_{m1\phi}=0.18$에서 $I_{13\phi}=9.203$〔A〕이고,

$I_{11\phi}=13.934$〔A〕($3\phi$의 1.51倍)로 增加를 나타내고 있다.

實測値에서는

$s_{m3\phi}=0.4$에서 $I_{13\phi}=18.55$〔A〕이고,

$I_{11\phi}=17.4$〔A〕($3\phi$의 0.94倍)이나,

$s_{m1\phi}=0.2$에서 $I_{13\phi}=14.4$〔A〕이고,

$I_{11\phi}=14.8$〔A〕($3\phi$의 1.03倍)로 역시 增加하고 있다.

結果的으로 缺相時 電動機에 나타나는 特性으로 停動토오크는 三相時 停動토오크의 41%까지 減少하고 停動토오크를 發生하는 slip은 $s=0$ (同期速度)쪽으로 移動하며 停動토오크附近에서의 一次 電流는 計算値와 實測値가 모두 增加한다는 事實을 알 수 있다.

그러나 同期速度 근방에서 電動機를 利用하므로 이 附近에서는 상세히 檢討할 必要가 생긴다.

### 4·3 電動機廻轉力과 負荷廻轉力과의 考察

一般的으로 電動機가 負荷를 지고 平衡狀態로 驅動되고 있을 때는 角加速度가 없으므로 $\left(J\frac{d\omega}{dt}=0\right)$ 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

$T_L=F+K\omega$〔$K$:常數〕[14] ……(18)

로 나타낼 수 있다.

그림 4는 同期速度 근방에서는 모든 曲線이 한 곳에 集結되어 상세한 內容을 구별할 수가 없다. 그러므로 電動機를 使用하는 範圍 근방만 特別히 확대하여 理論的인 曲線과 實測的인 曲線上에서 假定한 負荷線(명판에 기재된 出力 및 廻轉數에 基礎를 두었음)과 交叉한 狀態로 平衡運轉되고 있는 그림이 必要하다.

그림 5는 理論曲線이며 그림 6은 實測 曲線이다.

定格負荷로 三相誘導電動機가 運轉되다가 어떤 原因으로 缺相이 되면 計算値(그림 5)에서는 $T_{3\phi}=4.55$〔N·m〕, $s_{3\phi}=0.036(N_{3\phi}=1,735$rpm)에서 平衡狀態로 運轉되다가 $T_{1\phi}=4.45$〔N·m〕, $s_{1\phi}=0.045(N_{1\phi}=1,719$rpm)로 平衡点이 移動하며, 反面에 實測値(그림 6)에서는 $T_{3\phi}=4.4$〔N·m〕, $s_{3\phi}\fallingdotseq 0.038(N_{3\phi}\fallingdotseq 1,733$rpm)에서 $T_{1\phi}=4.3$〔N·m〕, $s_{1\phi}=0.049(N_{1\phi}=1,712$rpm)로 電動機와 負荷廻轉力의 平衡点이 移動한다.

筆者는 計算的인 曲線보다 實測曲線에 더 重点을 두고 싶으며 이 曲線上(그림 6)에서 그 關係를 나타내면 平衡運轉中에서는 $P_1$에 있던 것이 缺相이 생기면 $P_2$点으로 移動하게 된다.

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 計算値의 경우에 $I_{3\phi}=2.15$〔A〕에서 $I_{1\phi}=6.75$〔A〕로 3.14倍 증가하고, 實測値의 경우에는 $I_{3\phi}=3.7$〔A〕에서 $I_{1\phi}=7$〔A〕정도로 1.9倍 增加하고 있다. 어느 特定負荷狀態에서 缺相이

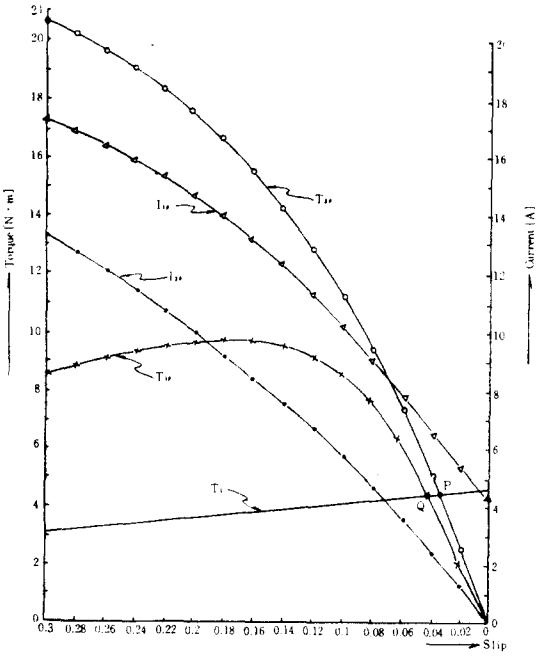


그림 5. 定格負荷下에서 平衡된 運轉狀態(理論値)

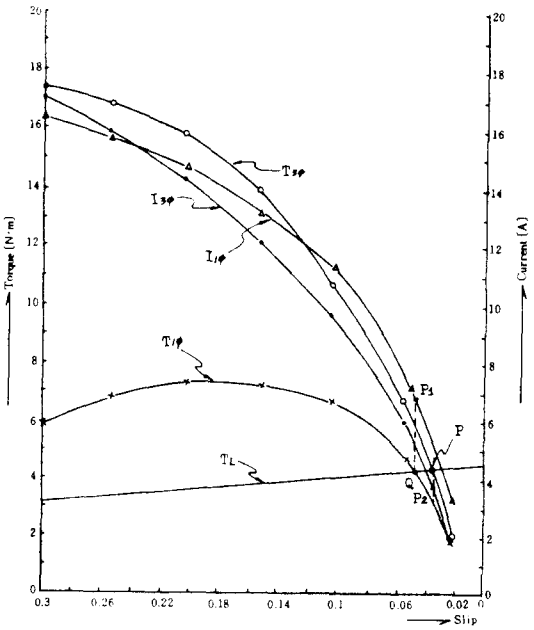


그림 6. 定格負荷下에서 平衡된 運轉狀態(實測値)

생겼을 때 어떻게 되는 가를 알려면 負荷의 크기에 따라 負荷線의 기울기와 位置가 달라짐으로 그때마다 위와 같은 과정을 거쳐서 구해보면 되겠으나 작업이 번거러움으로 여기서는 80%, 100%, 120% 3가지에 대해서만 어떻게 변화하는가를 求하여 表 4·1에 나타내어 보았다.

이번에는 slip의 變化에 따라 三相인 것과 缺相인 경우에 廻轉力의 差가 어떻게 變하는 가를 그림 7에 나타내었다.

이 線圖에서 供試電動機는 $\Delta T$가 $s=0.06$을 變曲点(brake point)으로 하여 거의 直線的으로 增加하는 特性을 가짐을 알 수 있다.

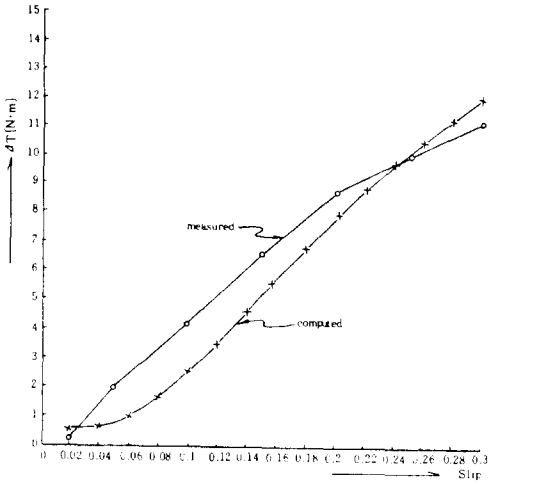


그림 7. Slip變化 對 廻轉力差(三相時와 缺相時) 曲線 〔$\Delta T=T_{3\phi}(s)-T_{1\phi}(s)$〕

표 4·1 缺相時 速度, 電流, 廻轉力 變化

(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 / 0.035 | 1.85 / 3.3 | 3.95 / 3.85 | 0.036 / 0.38 | 2.15 / 3.7 | 4.55 / 4.4 | 0.041 / 0.042 | 2.4 / 4.2 | 5.05 / 4.9 |
| 缺相 | 0.039 / 0.042 | 6.25 / 4.7 | 3.85 / 3.8 | 0.045 / 0.049 | 6.75 / 7 | 4.45 / 4.3 | 0.05 / 0.056 | 7.1 / 7.9 | 5.02 / 4.75 |

## 5. 結 論

지금까지 誘導電動機에 缺相事故가 發生하였을 때 이것의 廻轉力, 電流를 計算하는 理論式과 實驗裝置를 利用하여 구한 實測値와 比較 檢討하는 과정에서 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 電動機廻轉力은 實測値에 대체로 接近하나 다소의 誤差가 있다. 이런 것들은 固定子에 供給되는 電流가 slip ring을 通했기 때문에서 오는 一次抵抗증대, 定格不正確, 測定計器 등의 부정확, 그리고 기타 여러 가지 原因에 起因한 것으로 본다.

(2) 小形三相籠型誘導電動機가 定格負荷 前後에서 缺相事故가 생기면 廻轉力이 3%程度 減少함으로 速度도 1.2% 감소된다. 즉 큰 速度變化는 일어나지 않지만 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 함으로 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 時間을 예측할 수 있을 것이며 그리고 간단한 理論的 근거에서 추측하는 값보다 더 큰 電流가 흐른다는 것을 알 수 있다.

(3) 종래의 電動機 保護裝置는 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 電動機가 燒損될 위험이 있으므로 缺相時에는 얼마나 큰 電流가 흐른다는 것을 正確히 예측됨으로 電子裝置를 導入한다면 보다 正確한 保護裝置의 設計가 可能함을 豫示하고 있다.

(4) Current-slip 및 torque-slip 特性曲線에서 缺相時 停動토오크는 文獻에 依하면 50% 前後이나[2] 本 硏究에서는 41%로 減少하였으며 停動토오크를 發生하는 slip는 同期速度쪽으로 移動하였고 停動토오크를 發生하는 slip 附近에서 入力電流가 增加하는 特性을 나타내어 一般文獻과 差가 있음을 알았다.

## 參 考 文 獻


1) 後 藤 良：電磁機械(上), 共立出版株式會社, 東京, 1963, p.p.163～166.
2) 任達鎬, 朴聖圭：電氣機械Ⅱ, 東逸出版社, 1978, p.p.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 p.p. 95～105.
4) K.Y. Tang：Alternating current circuits, International textbook company, 1955. 12, p.p.361～385.
5) 日本電氣學會：誘導機, 日本電氣學會, 東京, 1952. 10, p.p.132～154, p.p.188～196.
6) 高田勇次郎：電氣機械Ⅰ, オーム社, 東京, 1965. 5, p.p.321～322.
7) 朴 汶 鎬：誘導機器, 東明社, 1977, p.p. 471～482, p.p.535～543.
8) 한만춘역：交流回路(Russel M. Kerchner and Geoge F. Corcoran: Alternating current circuits) 文敎部, p.p.497～528.
9) A.E. Fitzgerald and Charles Kingsley, Electric machinery, McGraw-Hill book company, INC, 1952. p.p.440～467.
10) A.E. Fitzgerald外 2名：Electric machinery, International student edition, 1971, p.p.524～530.
11) 東京電氣大學：最新强電實驗, 東京電氣大學出版部, 1962. 6, p.p.121～140.
12) 李 允 鍾：新編電氣機械, 東明社, 1979, p.p.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 硏究, 大韓電氣學會誌 第27卷 第5號, 1978. 9.
14) 朴 汶 鎬：電動機 應用(電氣制御編), 東明社, 1965, p.p.6～13.