

# 單相 Twin Stator 誘導機의 特性解析에 관한 研究

## An Analysis on the Performance of a Twin Stator Single-phase Induction Machine.

황 영 문\*  
(Young Moon Hwang)

### Abstract

An analysis is made for the performance of twin stator single-phase induction machine having any movable asymmetrical angle of stator windings, with any symmetrical or asymmetrical magnetizing reactance and winding turn-ratio between two stators, provided that asymmetrical common squirrel cage rotor is utilized. This mechanism is a new type, which has the advantage of making only not the performance prediction in applications as a single-phase electromagnetic driving mechanism but also the analysis prediction of single-phase induction motor with not in quadrature axis. The basis of the analyses are lead by Kron's primitive machine matrix and Morrill's double-revolving field concept. All the performances can be calculated from the test values and design details of the asymmetrical magnetizing reactance twin stator single-phase induction machine and verified by test. And its validity is still demonstrated to the pure twin stator single-phase induction machine.

### 1. 서 론

single stator 인 單相誘導電動機에서 권선조건을 純單相卷線分布로 할때는 원리상 기동토크는 생기지 아니한다. 그리하여 分相用의 補助卷線을 장치하여 기동토크를 개선하게 하는데, 이때 主卷線과 補助卷線과의 相差角은 대칭으로, 즉 90°로 하고, 권선조건은 비대칭으로 한다. 이러한 單相誘導機중 커패시터分相型이 가장 많이 이용되는데, 이때 기동토크는 개선되나, 정상운전토크특성은 오히려 나빠지게 되므로, 정상운전시에는 補助卷線을 분리하는 방식이 이용되어 왔다. 그러나 요즘에는 소형인 경우, 永久커패시터 分相電動機가 일반화 되어있다. 또한 이러한 기구의 권선조건을 연구개발하여 가장 적정한 設計條件을 추구하고 있는데, 전동기 제작설계과정에서 slot 배치로 인한 권선분포의 제한조건이라든지, Sastry<sup>3)</sup>의 單相 PAM 電動機의 개발과정에서, 卷線分布를 非對稱으로 한 결과, 기동

토크특성이 개선되는 점에 착안하여, Puchstein 및 Lyon의 理論을 이용한 非對稱卷線軸 永久커패시터分相電動機에 대한 연구<sup>4),5),6)</sup>가 활발히 진행되고 있으나,

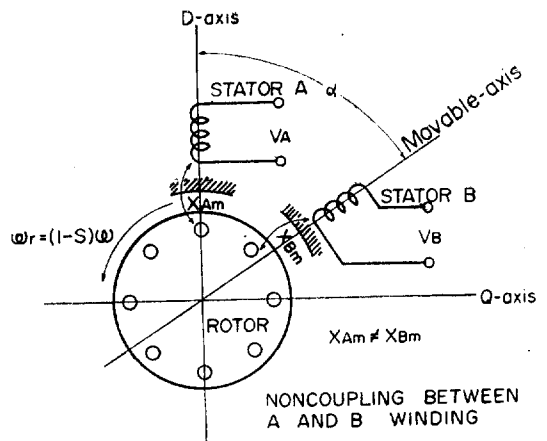


그림 1. 單相 twin stator 誘導機의 等價圖  
Fig. 1. Schematic diagram of the twin stator single-phase induction machine.

\* 정회원 : 부산대학교 공과대학 전기공학과 부교수

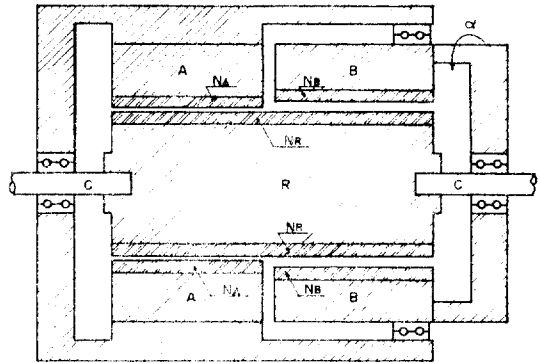
아직 확실한 결론에 도달하지 못하고 있다. 또한 이들은  $\alpha$ 를, 설계시에 이미 特定角, 즉  $105^\circ$ ,  $120^\circ$ 와 같은 가장 적당하다고 예상되는 각도를 선정하게 하는데, 이러한  $\alpha$ 는 slot 간격에 해당하는 각도단위에 의한 제한조건을 갖고 있다.

저자는 이러한  $\alpha$ 를 운전시에서도 임의로 可變할 수 있고, slot 간격에 의한 제한조건도 받지 않는 새로운 單相誘導電動機를 추구한 결과, 고정자는 두부분으로 하되, 한쪽 고정자는 고정하고, 다른쪽 고정자는 半可動式으로 하며, 회전자는 共有籠型으로 하여, 고정자 상호간의 卷線配置를 임의의  $\alpha$ 를 갖게 한 機械的構造, 즉 單相 twin stator 誘導機를 연구개발하였다. 저자가 문헌조사를 통하여 아노바에 의하면, 아직 이러한 單相電動機를 취급한 연구는 없는 것으로 알미, 다만 連續型 3相誘導機의 變型이라고 볼 수 있는 3相 twin stator 誘導機가 機械的構造에서 같은 類型的 것으로 볼 수 있으나, 특성상으로는 많은 차이가 있다. 3相 twin stator 誘導機는 Smith<sup>1)</sup>에 의하면, 同種電源에 대한  $\alpha$ 의 효과는 1次電壓調整效果와 같다고 보았고, 異種電源<sup>2)</sup>에 대하여는 連續型에서와 같이 하나의 和差動의 synchronous 특성과 1차전압조정효과를 아울러 갖는다고 보았으나, 저자는 이를 공유회전자에서의 에너지 歸還效果로 보아, 즉 상대적인 2次勵磁效果라고 보아, 이러한 2차여자효과를 외부에서 조정하면,  $\alpha$ 에 따라 可變인 synchronous 특성을 갖게 된다는 점에 대하여는 이미 발표<sup>16)</sup>한 바 있다.

여기서, 저자가 이러한 twin stator의 機械的原理를 새로이 單相電源에 의한 單相機에 적용시켜 본 결과, 1차전압효과외에 shaded pole 효과를 갖는 單相非對稱卷線軸電動機의 變型임을 알게 되었고, 非對稱卷線軸電動機가 현재 활발히 연구검토되고 있는 점을 참작하여, 可變非對稱卷線軸單相電動機로서 單相 twin stator 誘導機의 動作特性을 연구검토하여, 이를 數理的 및 實驗的으로 解析하여, 그 實用性을 추구하고 있다. 또한 單相 twin stator 誘導機와 single stator인 非對稱卷線軸誘導機와는 非對稱卷線軸角이 可變, 非可變이란 점과 그의 에도 다소 기구적으로 차이점은 있으나, 특성상으로는 많은 유사점이 있고, 非對稱軸角  $\alpha$ 의 효과에 대하여 해석한 결과 1차전원전압조정효과와 shaded pole 효과와의 관계, 권선임피던스의 비대칭과 자기회로 정수의 비대칭과의 관계가 밝혀졌으므로, 單相 twin stator 誘導機로서의 實用과 아울러 일반비대칭권선축전동기의 非對稱軸效果의 총괄적인 특성을 검토하는데 기여하는 바 있을 것으로 생각하여 이를 발표한다.

## 2. 單相 twin stator 誘導電動機

單相 twin stator 誘導電動機는 그림 1, 2와 같이 공유농형회전자를 갖는 2개의 단상고정자가 한쪽은 고정되어있고, 다른 한쪽은 각도  $\alpha$ 만큼 임의로 회전할 수



A: Stator Core A (fixed) B: Stator Core B (Movable)  
R: Rotor Core NA: Stator A Conductor  
NB: Stator B Conductor NR: Rotor Common Conductor  
C: Rotor Shaft

그림 2. 非對稱勵磁 reactance 를 갖는 單相 twin stator 誘導機構圖

Fig 2. Mechanism of the unsymmetrical magnetizing reactance twin stator single-phase induction machine.

있도록 되어 있어, 결과적으로 고정자권선배치가 임의의  $\alpha$ 만큼 갖는 非對稱軸卷線配置를 갖는 것으로 되어있다. single stator의 경우와 다른것은 고정자위에서의 2권선사이의 相互誘導作用이 존재하지 아니하는 점과, 회전자의 漏洩磁束 및 電機子反作用이 single stator에서는 자기회로에서 상호작용하여 그 종합된 자속에 의하여 고정자권선과 쇄교하는 과정에서 생기는 데 반하여, twin stator에서는 자기 및 상대방자기회로에서 각각 따로 따로 相互鎖交作用을 하는 과정에서 생기며, 이로인하여 각 고정자자기회로에서는 그 종합된 전류의 값을 갖는다는 점이다.

한편, 일반교류단상기에서는 공동적인 현상으로 기동회전력특성이 나쁜데, twin stator에서도 마찬가지일 것으로 생각하여, 다음과 같은 현상분석과 후술하는 數理的인 動作特性分析을 토대로, 비대칭효과를 강조하기 위하여 2개의 air-gap 간격을 각각 달리한 單相 twin stator 誘導機를 채택하였다.

즉, 일반적으로 단상기에서는 기동회전력을 개선하기 위하여는 다음과 같은 조치가 필요하다.

- 1) 主卷線과 補助卷線의 卷線條件의 不均等化
- 2) 各 卷線의 勵磁 리액턴스의 不均等化

여기서 1) 경우는 補助卷線에다 主卷線電流와 다른

移相電流를 흘리기 위한 조치인데, split 형전동기 및 커패시터형 전동기가 이에 속하며, 이들의 實効卷線比 및 卷線임피던스 比의 적정한 不均等化에 대하여는 여러 가지로 검토되고 있으며, 非對稱卷線軸의 경우에 대하여도<sup>3, 4)</sup> 현재 활발히 연구되고 있으나, 아직 명확한 결론을 얻지 못하고 있다. 다만 적절하게 非對稱卷線軸으로 하면, 對稱卷線軸의 경우에 비하여 기동토크특성이 개선된다는 점이 밝혀져 있다. 그리고 2)의 경우는 1차전원측에서 본 等價리액턴스를 다르게 하여 移相電流를 흘리게끔 하는 조치로서, shaded pole 전동기<sup>9, 10, 11)</sup> 및 single stator 에서 직축과 횡축의 air-gap 를 달린 yoke slot 형 전동기<sup>12)</sup> 등이 이에 속한다.

후술하는 動作特性分析에서 보면, twin stator 에서는 위의 두 경우의 효과가 어느 경우만 채택하더라도 같은 효과를 갖는다는 점(즉 勵磁 reactance 의 非對稱比  $\delta$  와 卷線比의 非對稱比  $a$  가  $\delta/a$  의 항으로 항상 같이 나타남으로)과 고정자권선선이라든 twin stator 고유의 대칭성을 살린다는 점에서 2)의 경우를 채택하기로 한다. 또한 여기서 취급한 전동기가 yoke slot 형 전동기와 다른 점은 각각의 고정자의 직축과 횡축의 여자 리액턴스는 비대칭으로 하지 아니하고, 두 고정자의 여자 리액턴스의 크기를 달리하여 비대칭이 되도록 한점이다.

전원공급방법으로는, yoke slot 형 전동기<sup>12)</sup>에서 알수 있는 바와같이, 2권선을 직렬로 연결하여 전원을 공급하면 직축과 횡축 리액턴스가 비대칭이 아니므로, 기동토크가 생기지 아니하므로, 본 논문에서는 직렬의 경우는 취급하지 않고, 병렬형만을 채택하기로 하였다. 그리고 harmonics 토크에 대한 것은 이를 고려에 넣지 않고 특성분석결과를 harmonis 토크를 취급한 문헌<sup>19, 20)</sup>의 결과와 비교 검토하기로 한다.

### 3. 基本等式의 誘導

基本等式의 誘導過程에서 다음과 같은 일반적인 가정을 설정한다. 즉

- 1) 각 고정자의 air-gap 면에서의 여자리액턴스의 분포는 sinusoidal 분포를 갖는다.
- 2) 각 卷線分布는 sinusoidal 한 분포로 한다.
- 3) 磁氣回路에서의 자기포화, eddy current 및 hysteresis 손실은 무시한다.
- 4) 電壓 및 電流는 시간에 대하여 sinusoidal 함수를 갖는다.
- 5) slot 의 불균형에 의한 harmonics 는 고려하지 아니 한다.

#### 記 號

$V_A, V_B$  : 고정자권선 A, B 의 인가전압

$I_A, I_B$  : 고정자권선 A, B 의 전류

$V_{rd}, V_{rq}$  : 회전자 직축 및 횡축전압

$I_{rd}, I_{rq}$  : 회전자 직축 및 횡축전류

$R_A, R_B$  : 고정자 A, B 의 저항

$X_{Ai}, X_{Bi}$  : 고정자 A, B 의 누설리액턴스

단,  $X_{Aid} = X_{Aiq}, X_{Bid} = X_{Biq}$

$X_{Am}, X_{Bm}$  : 고정자와 회전자간의 여자 리액턴스

단,  $X_{Amd} = X_{Amq}, X_{Bmd} = X_{Bmq}$

$R_{rA}, R_{rB}(=R_r)$  : 공유 회전자 직축 저항

$X_{rAi}, X_{rBi}$  : 회전자 A, B 축 누설리액턴스

단,  $X_{rAid} = X_{rAiq}, X_{rBid} = X_{rBiq}$

$N_A, N_B, N_R$  : 고정자 A, B 및 회전자권선의 실효권선수<sup>\*)</sup>

$a_1, a_2, a$  : 회전자와 고정자와의 권선비 및 고정자간의 권선비

즉  $a_1 = N_A/N_R, a_2 = N_B/N_R, a = a_1/a_2$

$\alpha$  : 고정자 A와 B 권선과의 相差角, 즉 非對稱軸角

$\delta$  : A, B 의 여자리액턴스 비, 즉  $X_{Am}/X_{Bm}$

$I_{rd}, I_{rq}$  : A 기권선축으로 환산한 회전자 직축  $d-q$  축전류

$R_R, R_{RB} : \equiv R_R$ , A 기권선축으로 환산한 회전자 저항

$X_{rAi}, X_{rBi}$  : A 기권선축으로 환산한 회전자 직축 누설리액턴스

$X_R : \equiv (X_{rAi} + X_{rBi}) + (X_{Am} + a^2 X_{Bm}) \equiv X_{rA} + (X_{Am} + a^2 X_{Bm})$

#### (1) 基本等式

지금 primitive machine 의 원리에 의하여, 공유농형 회전자를  $d-q$  axis 에 따라 나누고, 고정자 A, B 도  $d-q$  axis 에 따라 나눈다. 여기서 각각의 고정자와 공유농형 회전자와의 여자리액턴스는 회전방향에 대하여, uniform air-gap 로하기 때문에  $X_{md}$  및  $X_{mq}$  는 같으나, 회전축방향의 여자리액턴스는 달리함으로  $X_{Am} \neq X_{Bm}$  로 한다. 그리고 일반식을 유도함에 있어서 A, B 의 고정자권선조건은 달리하여 실효권선수  $N_A, N_B$  로 한다.

지금 전동기정수를  $d-q$  axis 로 나눈 값으로하여, A 및 B 축의 等式[Appendix I 참조]을 표시하면,

$$V_A = [R_A + j(X_{Ai} + X_{Am})] I_A + [jX_{Am}/a_1] I_{rd} \quad (1)$$

$$V_B = [R_B + j(X_{Bi} + X_{Bm})] I_B + [jX_{Bm} \cos \alpha/a_2] I_{rd} + [jX_{Bm} \sin \alpha/a_2] I_{rq} \quad (2)$$

$$V_{rd} = [jX_{Am}/a_1] I_A + [jX_{Bm} \cos \alpha/a_2 - (1-s)X_{Bm} \sin \alpha/a_2] I_B + [2R_r + j(X_{rAi} + X_{rBi}) + j(X_{Am}/a_1^2 + X_{Bm}/a_2^2)] I_{rd} - (1-s) [(X_{rAi} + X_{rBi}) + X_{Am}/a_1^2 + X_{Bm}/a_2^2] I_{rq} \quad (3)$$

$$V_{rq} = [(1-s)X_{Am}/a_1] I_A + [jX_{Bm} \sin \alpha/a_2 + (1-s)X_{Bm} \cos \alpha/a_2] I_B + (1-s) [(X_{rAi} + X_{rBi}) + (X_{Am}/a_1^2 + X_{Bm}/a_2^2)] I_{rd}$$

$$+ [2R_r + j(X_{RA1} + X_{RB1}) + j(X_{Am}/a_1^2 + X_{Bm}/a_2^2)] I_{r,q} \quad (4)$$

지금 (1)~(4)식의 회전자에 값을 A 축 고정자의 값으로 환산하고, 그리고 A 축 권선을 d 축에 놓았을때의 d-q 축형 등가회로를 표시하면 그림 3과 같다. 여기서

$I_{Rd} = I_{rd}/a_1$ ,  $I_{Rq} = I_{rq}/a_1$ ,  $X_{R1} = a_1^2 X_{r1}$ ,  $X_{RB1} = a_1^2 X_{rB1}$  가 되고, 회전자는 공유동형으로 하였기 때문에  $V_r = V_{Rd}/a_1 = 0$ ,  $V_{r,q} = V_{Rq}/a_1 = 0$  가 된다.

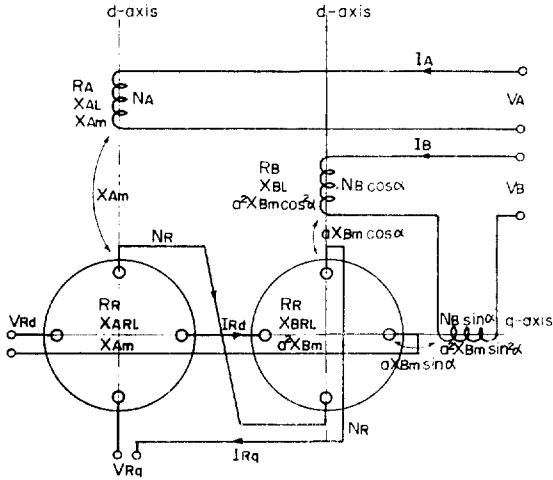


그림 3. 單相 twin stator 誘導機의 d-q 軸型等價圖  
Fig. 3. Schematic d-q axis diagram of the twin stator single-phase induction machine.

$$\begin{bmatrix} V_A \\ \frac{s}{\omega} V_B \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} RA + j(X_{AL} + X_{Am}) & 0 & jX_{Am} & 0 \\ 0 & \frac{s}{\omega} [RB + j(X_{BL} + X_{Bm})] & jX_{Am} \sin \alpha & jX_{Am} \sin \alpha \\ jX_{Am} & jX_{Am} \cos \alpha & 2RR + jXR & -(1-s)XR \\ (1-s)X_{Am} & jX_{Am} \sin \alpha & -(1-s)XR & 2RR + jXR \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \quad (5)$$

단,  $b = X_{Am}/X_{Bm}$ ,  $a = NA/NB$ ,  $X_R = X_{RAL} + X_{RBL} + X_{Am} + a^2 X_{Bm}$   
그리고  $X_{Am,d} = X_{Am,q} = X_{Am}$ ,  $X_{Bm,d} = X_{Bm,q} = X_{Bm}$

그리고, 이때 基本等式을 표시하면, (5)식과 같은 matrix 가 되는데, 여기서 일반 非對稱卷線軸單相誘導機와 다른 점은 1) 고정자권선 A 와 B 와의 相互 리액턴스  $X_{AB}$  가 존재하지 않는다는 점이다. 비대칭권선 축단상 전동기에서도  $X_{AB}$  는 非對稱軸角  $\alpha$  가  $90^\circ$  가 아닌 경우에는 항상 나타나나,  $\alpha = 90^\circ + \theta$  에서  $\theta$  각이 적은 경우에는  $X_{AB}$  는 일반적으로 적은 값이라하여<sup>3)</sup> 생략하여 해석하기도 한다. 그림 2와 3에서 보는바와 같이 單相 twin stator 誘導機에서는 처음 부터 이 값은 존재하

지 아니며, 후술하는 回轉磁界型等價회로와, O'Kelly<sup>14)</sup> 의 非對稱卷線軸電動機의 回轉磁界型等價회로와 비교함으로써 명백한바와 같이,  $X_{AB}$  의 定數는 전동기의 동작 특성에서, 다만 1次電流의 크기를 조정하여 줄뿐이며, 토오크특성에는 영향을 미치지 않는다. 2) 그림 3과 (5)식의 matrix 에서 보는 바와 같이, 2차공유회전자에서의 리액턴스  $X_R = (X_{RA1} + X_{RB1}) + (X_{Am} + a^2 X_{Bm})$  의 값은 일반 단상유도기와는 달리 큰 값을 갖는다.

### 3. 動作特性 解析

單相電動機는 일반적으로 간단한 수식을 얻기가 힘들다. 더욱이 單相 twin stator 誘導機는 더 복잡한 수식으로 표시된다.

#### (1) 電流式

지금 (5)식의 matrix 를 逆變換하여 電流式을 구하면 다음과 같다.

$$I_A = \frac{1}{\Delta} \left\{ \left[ X_{Am}^2 Z_G + \frac{\delta^2}{a^2} Z_B Z_K Z_H \right] V_A + \left[ -X_{Am}^2 Z_G \frac{\delta}{a} e^{j\alpha} + j \frac{\delta}{a} X_{Am} Z_P Z_H \right] V_B \right\} \quad (6)$$

$$I_B = \frac{1}{\Delta} \left\{ \left[ -X_{Am}^2 Z_G \frac{\delta}{a} e^{j\alpha} + j \frac{\delta}{a} X_{Am} Z_Q Z_K \right] V_A + \left[ X_{Am}^2 Z_G \frac{\delta^2}{a^2} + \frac{\delta^2}{a^2} Z_A Z_K Z_H \right] V_B \right\} \quad (7)$$

여기서  $\Delta = X_{Am}^2 Z_G [Z_A + \frac{\delta^2}{a^2} Z_B] + Z_A Z_B \frac{\delta^2}{a^2} Z_H Z_K + X_{Am}^2 Z_P Z_Q$

$$Z_G = 2R_R + js(2-s)X_R$$

$$Z_K = 2R_R + jsX_R$$

$$Z_H = 2R_R + j(2-s)X_R$$

$$Z_P = sX_{Am} \sin \alpha$$

$$Z_Q = (2-s)X_{Am} \sin \alpha$$

이다. 그리고 回轉磁界型電流는

$$\begin{aligned} I_f &= I_{Af} + I_{Bf} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ I_B + \frac{a}{\delta} I_B e^{-j\alpha} \right\} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{\Delta} \left\{ Z_K \left[ \frac{\delta^2}{a^2} Z_B Z_H + j X_{Am} Z_Q e^{-j\alpha} \right] V_A + \frac{\delta}{a} \left[ -2j X_{Am}^2 Z_G \sin \alpha + Z_H (Z_A K e^{-j\alpha} + j X_{Am} Z_P) \right] V_B \right\} \quad (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_b &= I_{Ab} + I_{Bb} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ I_B + \frac{a}{\delta} I_B e^{j\alpha} \right\} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{\Delta} \left\{ \left[ X_{Am}^2 Z_G (1 - e^{2j\alpha}) + Z_K \frac{\delta^2}{a^2} Z_B Z_H + j X_{Am} Z_Q e^{j\alpha} \right] V_A + \frac{\delta}{a} Z_H [Z_A Z_K e^{j\alpha} + j X_{Am} Z_P] V_B \right\} \quad (9) \end{aligned}$$

그리고

$$I_t = I_A + I_B \quad (10)$$

이다. 또한 회전자에서는

$$I_{Rf} = \frac{X_{Am}s}{\sqrt{2}d} \left\{ \left[ X_{Am}Z_{Qe}^{-j\alpha} - j\frac{\delta^2}{a^2}Z_BZ_H \right] V_A + \frac{\delta}{a} \left( X_{Am}Z_{Qe} - jZ_AZ_He^{-j\alpha} \right) V_B \right\} \quad (11)$$

$$I_{Rb} = \frac{X_{Am}(2-s)}{\sqrt{2}d} \left\{ \left( -X_{Am}Z_{Pe}^{j\alpha} - j\frac{\delta^2}{a^2}Z_BZ_K \right) V_A + \frac{\delta}{a} \left( -X_{Am}Z_{Pe} - jZ_AZ_K^{j\alpha} \right) V_B \right\} \quad (12)$$

지금 並列電源印加型에서는  $V_A = V_B = V_i$  이므로

$$I_{Rf} = \frac{X_{Am}s}{\sqrt{2}d} \left\{ X_{Am}Z_Q \left( \frac{\delta}{a} + e^{-j\alpha} \right) - jZ_H \left[ \frac{\delta}{a}Z_Ae^{-j\alpha} + \frac{\delta^2}{a^2}Z_B \right] \right\} V_i \quad (13)$$

$$I_{Rb} = -\frac{X_{Am}(2-s)}{\sqrt{2}d} \left\{ X_{Am}Z_P \left( \frac{\delta}{a} + e^{j\alpha} \right) + jZ_K \left[ \frac{\delta}{a}Z_Ae^{j\alpha} + \frac{\delta^2}{a^2}Z_B \right] \right\} V_i \quad (14)$$

## (2) Torque 特性式

지금 토오크의 값은 forward 토오크와 backward 토오크의 차로서

$$T = I_{Rf} \cdot I_{Rf}^* \frac{2R_R}{s} - I_{Rb} \cdot I_{Rb}^* \frac{2R_R}{2-s} \quad [\text{sync} \cdot \text{watt}] \quad (15)$$

이므로, (15)식에 (13)식과 (14)식을 대입하면, 단상 twin stator 전동기의 토오크 특성식이 된다. 즉  $V_A = V_B = V_i$  라하고, 이를 정리하면, 다음과 같다.

$$T = \frac{X_{Am}^2 R_R}{|d|^2} s(2-s) V_i^2 \times \left\{ \begin{array}{l} [A_1 + A_2 \cos \alpha] (1-s) \sin^2 \alpha \\ + [B_1 + B_2 \cos \alpha] (1-s) \\ - [C_1 + C_2 \cos \alpha] \frac{(1-s)}{s(2-s)} \\ + [D_1] \frac{1}{s(2-s)} \sin \alpha \\ + [E_1 + E_2 \cos \alpha] \sin \alpha \end{array} \right\} \quad (16)$$

여기서

$$A_1 \equiv 2X_{Am}^2 \left( X_{Am}^2 \frac{\delta^2}{a^2} + 1 \right) + 2X_R \frac{\delta^2}{a^2} (X_A - X_B)$$

$$A_2 \equiv 2X_{Am}^2 \left( 2X_{Am}^2 \frac{\delta}{a} \right)$$

$$B_1 \equiv 2X_R^2 \frac{\delta^2}{a^2} \left( |Z_A|^2 + \frac{\delta^2}{a^2} |Z_B|^2 \right)$$

$$B_2 \equiv 4X_R^2 \frac{\delta^3}{a^3} (R_A R_B + X_A X_B)$$

$$C_1 \equiv R_R^2 \frac{\delta^2}{a^2} \left( |Z_A|^2 + \frac{\delta^2}{a^2} |Z_B|^2 \right)$$

$$C_2 \equiv 2R_R^2 \frac{\delta^3}{a^3} (R_A R_B + X_A X_B)$$

$$D_1 \equiv 16R_R^2 \frac{\delta^3}{a^3} (X_A R_B - R_A X_B)$$

$$E_1 \equiv 8X_{Am}^2 R_R \frac{\delta}{a} \left( X_A + \frac{\delta^2}{a^2} X_B \right) + 4X_{Am}^2 X_R \frac{\delta}{a} \left( R_A + \frac{\delta^2}{a^2} R_B \right)$$

$$+ 4X_R^2 \frac{\delta^3}{a^3} (X_A R_B - R_A X_B)$$

$$E_2 \equiv 4X_{Am}^2 \frac{\delta^2}{a^2} [2R_R(X_A + X_B) + X_R(R_A + R_B)]$$

이다.

지금 (16)식을 살펴보면,

1) [ ] 안  $\cos \alpha$  함수를 포함하는 항은 1차전압조정에 의하여 토오크의 값을 변화시켜주는 값이고

2) 1, 2, 3항은  $(1-s)$  함수를 갖는 것으로, 기동 토오크 값을 갖지 않는 순 단상전동기의 토오크 특성, 즉  $s=1$ 에서 forward 및 backward 토오크 값이 서로 같고, 방향이 반대인 특성을 갖게 되며,

3) 4, 5항은 계산과정에서 보면, forward 토오크 성분 및 backward 토오크 성분중, 방향이 서로 같은 값을 갖는 항들이다. 즉  $\sin \alpha$  함수의 값이 shaded pole 효과를 갖는 항이다.

4) 4항은 두개의 고정자조건을 같게 하면, 나타나지 않는 값인데, 이는 일반적으로 다른 항에 비하여 극히 적다. 그러나 두 고정자조건이 다르면, 4항 값의 항들도 변화하여, 종합적인 토오크 값은 상당히 커진다.

## (3) 回轉磁界型의 基本等價回路

지금 일반 전동기와 비교점토하기 위하여 (5)식을 forward-backward field 等價回路로 변환시킨다. 우선 A 기 및 B 기의 인가전압, 전류를  $d$ - $q$  axis 값으로 다음과 같이 변환시켜, 이를 (5)식의 matrix 에 적용시키기로 한다. 즉

$$\left. \begin{array}{l} V_A = [V_{Ad} \cdot 1 + V_{Aq} \cdot 0] \\ V_B = \frac{a}{\delta} [V_{Bd} \cos \alpha + V_{Bq} \sin \alpha] \end{array} \right\} \quad (17)$$

$$\left. \begin{array}{l} I_{Ad} = I_A \cdot 1 \\ I_{Aq} = I_A \cdot 0 \end{array} \right\} \quad (18)$$

$$\left. \begin{array}{l} I_{Bd} = \frac{a}{\delta} \cos \alpha \cdot I_B \\ I_{Bq} = \frac{a}{\delta} \sin \alpha \cdot I_B \end{array} \right\} \quad (19)$$

(17)~(19)식의 관계식을 (5)식의 matrix 에 적용시키고, 이를 다시  $d$ - $q$  형과  $f$ - $b$  형의 변환식에 의하여,  $f$ - $b$  의 matrix 로 표시하여 [Appendix II 참조], 그 等價回路를 그리면, 그림 4와 같다.

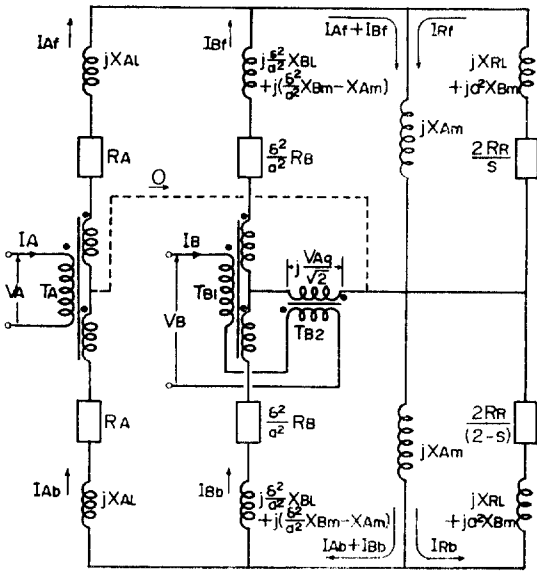
지금 그림 4의 回轉磁界型等價回路를 살펴보면,

1) 그림 4의 등가회로는 A, B 두개의 고정자권선에 의하여, 공유농형회전자에 병렬로 유도작용하는 등가회로로 표시된다.

2) 회전자회로에  $jX_{R1}$  의  $ja^2 X_{Bm} = j\frac{a^2}{\delta} X_{Am}$  인 누설 리액턴스의 값이 첨가되어, 일반유도기에서 2차회전자에 리액턴스 성분을 삽입하여 운전하는 것과 같은 특성을 갖게 된다.

3) A기를 기준으로 하였을 때, A기는 純單相機로서 작용하고

4) B기는 A기의 여자 리액턴스  $X_{Am}$ 를 갖고, 1차 누설 리액턴스가  $jX_{B1}$  외에  $j(X_{Bm} - \frac{a^2}{\delta} X_{Am})$ 인 누설

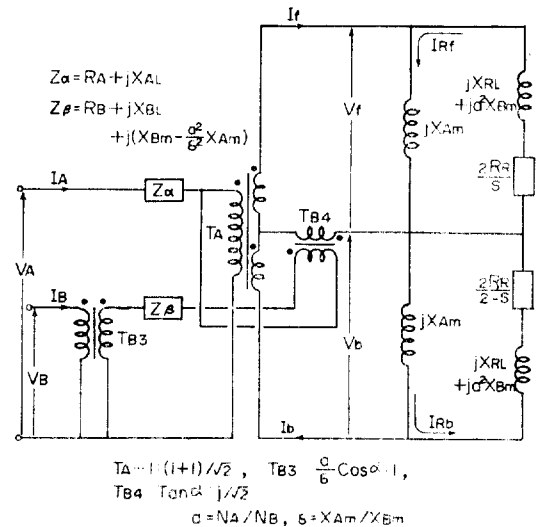


$$T_{A1} \approx 1: (1+1)/\sqrt{2}, \quad T_{B1} \approx \frac{\delta}{\epsilon} \cos \alpha : (1+1)/\sqrt{2},$$

$$T_{B2} \approx \frac{\delta}{\epsilon} \sin \alpha : j/\sqrt{2}$$

$$a = N_A/N_B, \quad \epsilon = X_{Am}/X_{Bm}$$

그림 4. 單相 twin stator 誘導機의 回轉磁界型等價回路  
Fig. 4. Forward-backward field equivalent circuit of twin stator single-phase induction machine.



$$T_{A1} \approx 1: (1+1)/\sqrt{2}, \quad T_{B3} \approx \frac{\delta}{\epsilon} \cos \alpha : 1,$$

$$T_{B4} \approx \tan \alpha : j/\sqrt{2}$$

$$a = N_A/N_B, \quad \epsilon = X_{Am}/X_{Bm}$$

그림 5. 單相 twin stator 誘導機의 Hybrid 回轉磁界型等價回路  
Fig. 5. Hybrid equivalent circuit of twin stator single-phase induction machine.

리액턴스가 첨가된것과 같이 작용하되,  $\alpha$ 의 값에 따라  $\cos \alpha$ 분의 純單相機作用과  $\sin \alpha$ 분의 forward 및 backward 성분을 가감하는 두 성분의 합으로 나타나는 특성을 갖는다고 볼수 있다. 이는 순수한 twin stator 단상 전동기에서는,  $(1+\cos \alpha) V_1$  성분의 1차전압조정효과와  $\sin \alpha V_1$  성분의 shaded pole 효과가 동시에 나타남을 표시한다.

5)  $\delta$  및  $\alpha$ 의 값은,  $\delta/a$ 의 향으로 회로정수를 변화시키므로, 勵磁 리액턴스를 달리하거나, 또는 實効卷線비를 달리하거나, 그 효과는 거의 동일하다.

6) 인가전압조건에 대한 상호관계를 보기위하여, O' Kelly<sup>14)</sup>의 hybrid 等價回路로 이를 표시하면, 그림 5와 같은데, 여기서, 純單相機성분에 부가되어 동작특성을 변화시키는 요소로서,  $T_{B2}$ 의 理想變壓器의 變成비가  $\alpha$ 의 함수로 되어 있어, 4)의 검토를 뒷받침하고 있으며

7)  $T_{B2}$ 에 인가전압의 크기는 전동기의 정수의 값과, 2개의 고정자의 인가전압조건, 즉 병렬로하느냐, 직렬로하느냐, 혹은 인가전압비를 달리하느냐에 따라 달라짐으로, 1차전압조정특성효과와 shaded pole 특성효과와의 합성에 의한 最適 토크 특성을 갖는  $\alpha$ 의 값은 일률적으로 단정할수 없으며, 더욱이  $\alpha=0$ , 혹은  $\alpha=90^\circ$ 인 대칭 조건이 最適條件이 아님을 반증하고 있다.

(4) 機構定數의 調整

이상과 같은 基本等式과 等價回路에서 다음과 같은 두 경우에 대하여 機構定數의 調整에 따른 特性變化를 비교검토함으로서, 單相 twin stator 誘導機의 動作특성을 좀더 명백하게 하고자 한다. 즉,

i) Twin stator single-phase induction machine with asymmetrical magnetizing reactance

엄밀히 말하면, 이것은 單相 twin stator 誘導機라고 볼수 없을지 모르나, 기계구조상 조작방법 및 제작방법 등이 유사하며, 動作특성도 거의 같으므로, 넓은 의미의 誘導機의 連續型電動機構에서, 相差角  $\alpha$ 를 변화시켜 운전 특성을 조정하는 기구라는 점에서 單相 twin stator 誘導機의 한 종류라고 볼수 있을 것이다.

지금 이 기구의 機構定數條件으로서,  $\delta$  및  $a$ 가 電流 및 토크식에  $\frac{\delta}{a}$ 의 향으로 나타난다 함은 이미 설명하였거니와, 여기서는

$$a=1, \quad \delta \approx 1 \quad \text{즉} \quad \frac{\delta}{a} \approx 1 \quad \text{이요}$$

$$Z_A \approx Z_B, \quad \text{단} \quad R_A = R_B, \quad X_{A1} + X_{Am} \approx X_{B1} + X_{Bm}$$

다음 경우의로 한 경우이다. 이때 ii)의 경우의 pure twin stator의 경우와 거의 같은 특성 변화를 갖게 되나, 전체적으로 토크 특성은 개선된다. 동시에 1차역률도 전체적으로 개선되는 경향이 있어, 여자 리액턴스의 비대칭효과는 1차 권선정수의 비대칭효과와 같음을 단적으로 표시한다고 본다.

ii) Pure twin stator single-phase induction machine

twin stator 誘導機의 기본요건이, 2개의 고정자의 기계정수가 동일한 것을 말하는 것으로, B 고정자의 기계정수를 A 고정자의 그것과 같게한 경우이다.

즉  $\alpha=1, \delta=1, Z_A=Z_B$  인 조건인 때다.

i) ii)의 두 경우, 표 1에서와 같은 기계정수를 써서 특성곡선을 산출한 결과 그림 6과 같다. 여기서 보면, 가장 좋은 토오크 특성은  $\alpha=30^\circ$  전후에 있게 되는데, 3상의 경우<sup>1)</sup>,  $\alpha=0^\circ$ 가 가장 좋은 특성을 갖는 것과 비교해 볼때, 이는 1차전압조정효과에 shaded pole 효과를 따로 갖게 됨을 알 수 있다.

그리고 slip=0.4부근에서 harmonics 토오크에서와 같은 특성을 갖게 되나, 여기서는 harmonics 특성에 대하여는 고려하지 아니하였으므로, 이러한 특성은 電源電壓의 非對稱(單相電源은 平衡 3相電源에 대하여 非對稱電源이라고 본다.)에 의한 非對稱卷線軸角에 대한 특성이라고 볼수 있으며, 이는 harmonics 토오크를 고려한<sup>2)</sup> 경우에는 그 영향이 더욱 심한 결과를 갖는 점과, slip 0.5~1.0사이에 나타나는 harmonics 토오크가 이 경우에는 존재하지 아니한다는 점을 비교 검토하면, 쉽게 알 수 있을 것이다.

(6)~(16)식은 基本電流式 및 토오크식이며, 1次入力

과 1次力率式도 유도할 수 있으나, 대단히 복잡하므로 定數值를 대입하여 이를 산정하고 이를 그림 7에서 그 특성곡선으로 표시하기로 한다.

5. 解析結果와 實驗值

앞서의 2가지 機構定數를 가진 電動機에 대하여, 먼저 基本式에서 定數值에 의한 特性曲線을 산정하고, asymmetrical magnetizing reactance 를 갖는 供試機에서, 이를 實測하여, 解析結果를 뒷받침하므로써, pure twin stator의 解析結果도 아울러 實證케하는 방법을 취하였다.

(1) 供試機의 機構定數

特性解析을 위한 供試機는 편의상 軸出力 250[W], 100[V] 2극의 單相電動機를 개조하여 軸出力450[W], 100[V], 4극인 非對稱勵磁 리액턴스를 갖는 單相 twin stator 誘導機를 試作하되, A 기 고정자(air-gap 간격 0.3[mm])와 B 기 고정자(air-gap 간격 0.4[mm])중 B 기고정자를 반가동식으로 하고, 회전자는 A 기와 B 기 고정자목을 합한 길이의 회전자철심을 갖되, 농형동봉을 양 고정자권선과 자속쇄교할 수 있게끔 직열로 배치하였다.

지금 供試機를 기준으로 하여, 機構定數와 토오크식의 각 항의 값을 算定하면 표 2와 같다.

(2) 測定方法

표. 1. 단상 twin stator 전동기의 기계정수

Table. 1. Machine coefficient of twin stator single phase induction machine.

Type of Machine	Stator A			Stator B			Common Rotor			Ratio	
	$X_{Am}$	$X_{Ai}$	$R_A$	$X_{Bm}$	$X_{Bi}$	$R_B$	$X_{RAI}$	$X_{RBI}$	$R_R$	$\delta$	$\alpha$
Pure twin stator I. M.	24	1.35	2.0	24	1.35	2.0	1.4	1.4	2.2	1	1
Asymmetrical magnet. react. I. M	24	1.35	2.0	19	1.45	2.0	1.6	1.5	2.2	1.3	1

분현[15]에 의한 정수측정법에 의한 실측치, [ohm]

표. 2. Torque 식의 각 항의 값

Table. 2. Values of torque factor of Eq.(16)

Type of machine	1차 전압조정효과치						shaded pole 효과치			$\Delta$
	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	
Pure twin stator I. M	13.3	13.3	66.4	66.5	0.06	$0.06 \times 10^5$	0	7.7	$7.7 \times 10^5$	$\Delta^{(1)} \times 10^3$
Asymm. magnet. react. I. M	24.2	17.6	87.3	87.0	0.11	$0.11 \times 10^5$	0.02	18.2	$16.5 \times 10^5$	$\Delta^{(2)} \times 10^3$

$$\Delta^{(1)} = -[50 + j165] + s(2-s) [165 + 332 \sin^2 \alpha - j145]$$

$$\Delta^{(2)} = -[66 + j198] + s(2-s) [258 + 332 \sin^2 \alpha - j185]$$

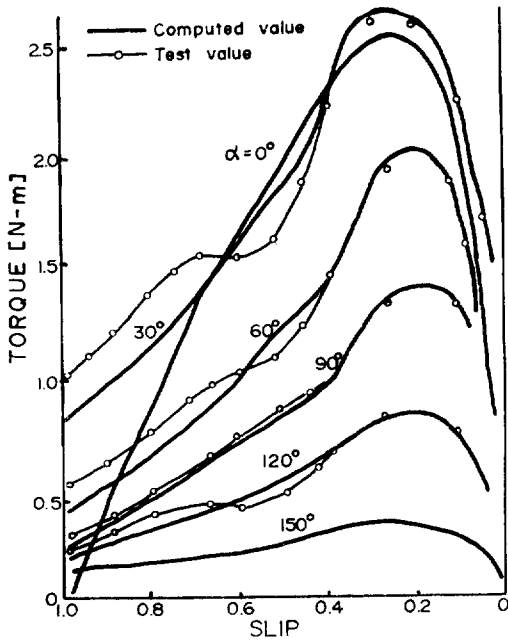


그림 6. 非對稱勵磁 reactance를 갖는 單相 twin stator 誘導機의 torque speed 특성곡선, 450 [W], 100[V], 4[극]  
 Fig. 6. Torque-speed curve for twin stator single-phase induction machine with asymmetrical reactance 450[W], 100[V], 4[pole]

動作特性値의 측정은 기동상태에서 정상운전상태에 걸쳐 다음과 같은 순시기록장치에 의하여, 각 동작조건에 대하여 동시기록 측정하였다. 즉 토오크는 eddy current type dynamometer에 balancer 대신 鋼片을 이용한 strain 측정장치를 설치하여, 토오크에 비례하는 strain이 생기게 하고, 이를 strain 측정기에서 검출, 증폭하여 6-channel photocorder에서 기록측정하였다. 그리고 電流 및 入力은 power unit 장치를 거쳐, 토오크와 동시에 photocorder에서, 그리고 速度는 photota-

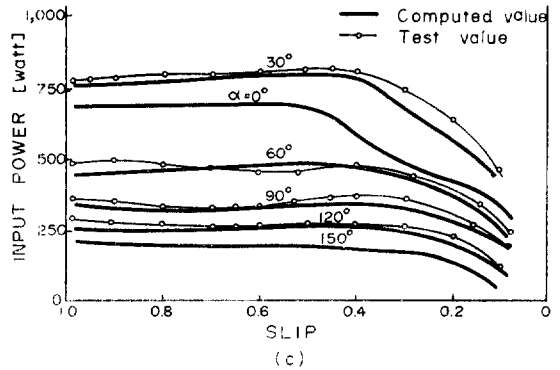
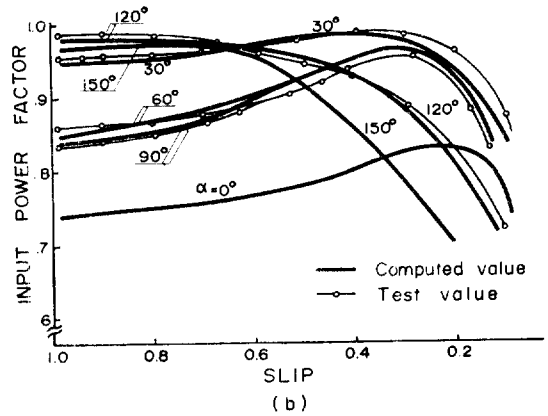


그림 7. 非對稱勵磁 reactance를 갖는 單相 twin stator 誘導機의 諸特性曲線 (a) 電流特性 (b) 1次力率特性 (c) 入力特性  
 Fig 7. Characteristics curves for twin stator single-phase induction machine with asymmetrical magnetizing reactance, (a) line current, (b) input power factor, (c) input power.

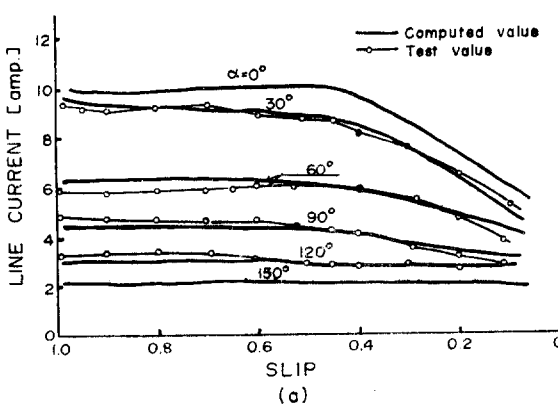
chometer에서 검출되는 펄스수를 photocorder에 의하여 동시 기록측정하여 이를 환산산정하였다.

6. 考 察

1) 3相 twin stator 誘導機와는 달리, 1次電源電壓調整效果의 shaded pole 特性效果가 나타남으로 인하여,  $\alpha=30^\circ$  전후에서 일반단상기에 비하여 起動토크 및 定常運轉토크特性이 개선된다.

2) 相差角  $\alpha$ 가 對稱軸角(즉  $\alpha=0^\circ, 90^\circ$ )이 아닐때는 slip 0.4 근처에서 토오크크기가 줄어드는 현상이 나타나는데, 이는 電源電壓의 非對稱效果라고 볼 수 있다.

3) 여자리액티브를 비대칭으로 하거나, 고정자권선조건을 비대칭으로할때, 그 비인  $\frac{\hat{a}}{a}$ 가 같으면 動作特性은 같게 되며, 이들의 非對稱效果는 그림 6과 8에서 보는





바와같이 토오크의 절대치를 전체적으로 크게 하며, 그림 7과 9에서 보는 바와같이 1次力率이 개선된다는 점이다.

4) 1次力率特性은  $X_{Am} \approx X_{Bm}$  인 그림 7의 (b)와,  $X_{Am} = X_{Bm}$  인 그림 9의 (b)에서 보는 바와 같이  $\alpha = 0^\circ$  인 경우를 제외하고는  $X_{Am} \approx X_{Bm}$  때가 전체적으로 좋아졌으며,  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\alpha = 90^\circ$  때가 비교적 낮은 값을 갖는 것은 여자 리액턴스의 비대칭이  $\alpha$  각의 비대칭에 미치는 영향이 큼을 나타내고 있다. 즉 공격자속에 큰 효과를 갖는 shaded pole 효과에 기인한다고 볼수 있으며, 이는 비교적 공격자속이 평형인 동기속도 근처에서는  $X_{Am} = X_{Bm}$  인 경우와 비슷한 특성을 갖게 된다는 것이 이를 단적으로 나타내고 있다.

5) 일반단상유도기에서 主卷線 및 補助卷線의 권선 조건을 같게 하면, 起動토크가 나타나지 않는 것에 비하여, 이와 유사한 純單相 twin stator 誘導機에서는  $\alpha$  각에 따라 起動토크가 생기게 됨은, 2개의 고정자 권선이 상대적으로 shaded pole의 효과를 갖게 함을 의미한다.

6) 單相 twin stator 誘導機 및 單相 single stator 誘導機인 非對稱卷線軸誘導機에서 1차전압조정효과( $\cos \alpha$ 의 함수)와 shaded pole 효과( $\sin \alpha$ 의 함수)를 분리하여 해석할 수 있으므로 해서, 이들과 機構定數와의 관련을 그림 4와 같은 回轉磁界等價回路에서, 그리고 그 권선의 인가전압과의 관계를 그림 5와 같은 hybrid 回轉磁界型等價回路에서 추리할 수 있다.

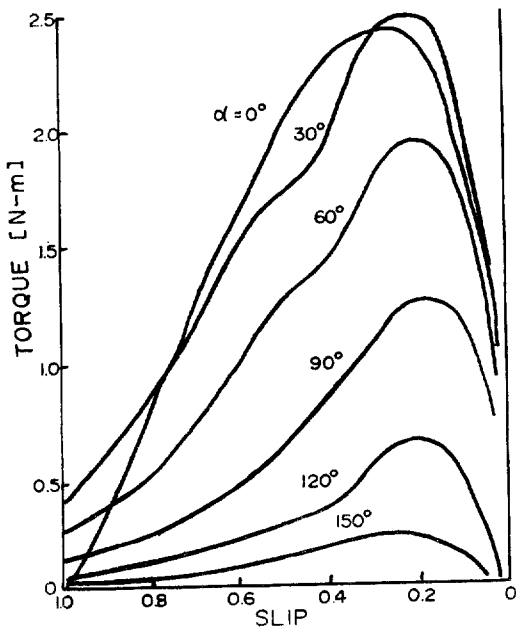


그림 8. 純單相 twin stator 誘導機의 torque-speed 특성곡선

Fig. 8. Torque-speed curve for a pure twin stator single-phase induction machine.

7) 고정자 두 권선을 직렬로 연결한 直列型 單相 twin stator 誘導機는 回轉磁界方向으로, 여자 리액턴스를 非對稱으로 하지 아니하면 起動토크가 생기지 않는데, 이는 그림 4,5의 회전자속회로에서 forward 및 backw-

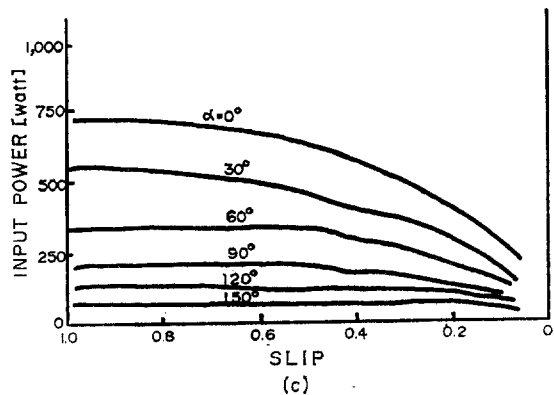
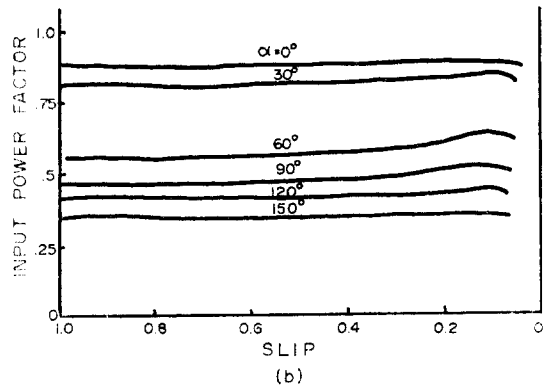
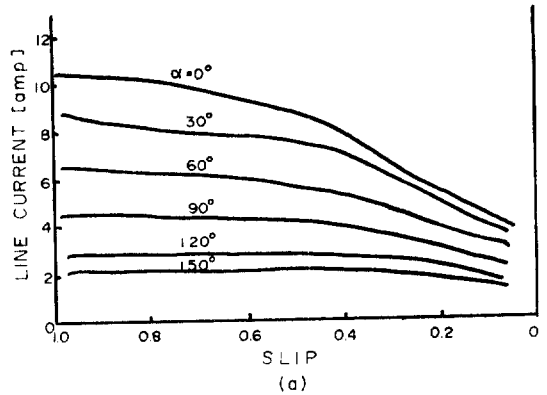


그림 9. 純單相 twin stator 誘導機의 諸特性 (a) 電流特性 (b) 1次力率特性 (c) 入力特性

Fig. 9. Characteristics curves for a pure twin stator single-phase induction machine (a) line current (b) input power factor (c) input power

ard의 相互結合回路에 回路定數가 존재할 때 起動 토오크가 존재할 것이 예상되므로, 이러한 回路定數가 존재하지 아니하는 單相 twin stator 誘導機에서는 直列형의 경우 起動토오크가 존재하지 아니함이 확실하다.

8) 非對稱軸角을 갖일 경우,  $\alpha=0^\circ$  일때 보다 定常運轉特性이 개선됨은 4)의 高轉에서와 마찬가지로 근거에서이다.

9) 電流式에서의 shaded pole 효과에 대한 電流値는 (6)식과 (7)식에서  $\frac{2R_R}{A} X_{Am} \sin \alpha$ 의 함수의 값으로 표시되는데 이 값이 電源電流式에는 나타나지 않고 고정자의 2권선을 순환하는 순환전류치와 같이 나타남으로서 쉽게 알수 있으며, 非對稱勵磁 리액턴스의 경우는 A의 값이 변화함으로 해서 이러한 효과를 강화하게 된다.

10) 計算結果와 實驗結果에서  $\alpha=0^\circ$  및  $\alpha=90^\circ$ 인 對稱인 경우는 오차범위가 적으나, 非對稱軸角을 갖일 때 오차범위가 큰 것은 slot不均整에 인한 harmonics 토오크의 영향에 기인하는 것으로, 일반적으로 harmonics 토오크가 非對稱卷線軸角에 따라 큰 영향을 미치게<sup>3) 10)</sup> 되는 것에 비추어 타당한 결과라고 본다.

7. 結 論

單相 twin stator 誘導機는 電動機構定數의 적정한 선정으로 1차전원전압조정효과와 shaded pole 효과를 겸한 電動機構로서 가변적이고 효과적인 토오크特性을 갖어, 그 應用性이 존재함이 확실하며, 對稱卷線을 갖는 電動機構에서, 主卷線과 補助卷線의 인가전압을 조정하여 特性制御를 할 수 있는 방식의, 연속적인 非對稱軸角의 조정으로도 特性制御를 할 수 있는 電動機構의 존재를 제시할 수 있게 되었다.

한편, single stator인 單相非對稱卷線軸電動機構의 특성해석에 있어서, 반드시 卷線配置를 對稱으로 할 때 가장 좋은 토오크特性을 갖는 것이 아니라는 점을 單相 twin stator 電動機構에서 나타나는 1차전압조정효과와 電動機構定數의 非對稱에서 나타나는 shaded pole 효과로 분리하여 해석함으로써 해서 명백하게 하였으며, 非對稱軸角의 効果를 관련된 기계 정수의 값으로 총괄시켜, 일반 비대칭권선축기의 적정 설계의 기본제념을 확실하게 하였다.

끝으로, 이 연구를 함에 있어서, 많은 문헌제시와 야 깎없는 지도를 하여 주신 朴旻鎬교수님과 여러모로 도와 주신 서울大學校 工科大學 電氣工學科교수님들께 감사의사를 드립니다.

[Appendix I]

單相 twin stator 誘導機의 Faraday-flux linkage 식<sup>13)</sup>은 그림 (I-1)에서

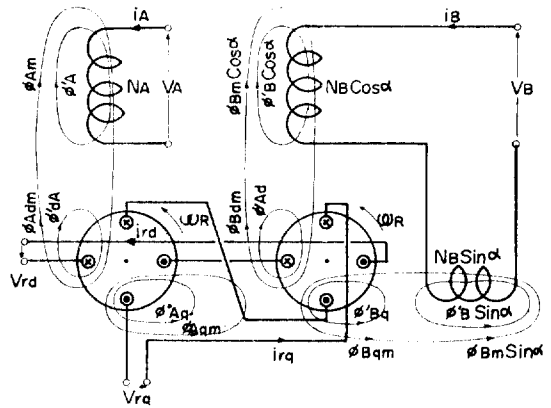


그림 (I-1)

$$\left. \begin{aligned}
 N_A \phi_A &= N_A [\phi'_A + \phi_{Am} + \phi_{Adm}] \\
 N_B \phi_B &= N_B \cos \alpha [\phi'_B \cos \alpha + \phi_{Bm} \cos \alpha + \phi_{Bdm}] \\
 &\quad + N_B \sin \alpha [\phi'_B \sin \alpha + \phi_{Bm} \sin \alpha + \phi_{Bqm}] \\
 N_R \phi_d &= N_R [\phi'_{Ad} + \phi_{Adm} + \phi_{Am} + \phi'_{Bd} + \phi_{Bm} \cos \alpha \\
 &\quad + \phi_{Bdm}] \\
 N_R \phi_q &= N_R [\phi'_{Aq} + \phi_{Aqm} + \phi'_{Bq} + \phi_{Bm} \sin \alpha + \phi_{Bqm}]
 \end{aligned} \right\} (I-1)$$

그리고 kirchhoff의 식에 의하여

$$\left. \begin{aligned}
 V_A &= R_A i_A + \frac{d}{dt} [N_A \phi_A] \\
 V_B &= R_B i_B + \frac{d}{dt} [N_B \phi_B] \\
 V_d &= R_R d i_{rd} + \frac{d}{dt} [N_R \phi_d] + \omega_R [N_R \phi_q] \\
 V_q &= R_R q i_{rq} + \frac{d}{dt} [N_R \phi_q] - \omega_R [N_R \phi_d]
 \end{aligned} \right\} (II-2)$$

여기서 flux-linkage 係數를 impedance 係數로 변환하는데는 다음과 같은 관계가 있다. 즉

$$\begin{aligned}
 N_A \phi'_A &= L'_A i_A & N_R \phi'_{Ad} &= L'_{Ad} i_{rd} \\
 N_R \phi'_{Aq} &= L'_{Aq} i_{rq} & N_B \phi'_B &= L'_B i_B \\
 N_R \phi'_{Bd} &= L'_{Bd} i_{rd} & N_R \phi'_{Bq} &= L'_{Bq} i_{rq}
 \end{aligned}$$

그리고 동일한 磁束을 갖는 자기회로의 相互誘導係數는

$$\frac{L_{Am}}{N_A^2} = \frac{L_{Adm}}{N_R^2} = \frac{L_{Aqm}}{N_R^2}, \quad \frac{L_{Bm}}{N_B^2} = \frac{L_{Bdm}}{N_R^2} = \frac{L_{Bqm}}{N_R^2}$$

또한

$$\begin{aligned}
 N_A \phi_{Am} &= L_{Am} i_A, & N_B \phi_{Bm} &= L_{Bm} i_B, \\
 N_A \phi_{Adm} &= \frac{N_A}{N_R} L_{Adm} i_{rd}, & N_B \phi_{Bdm} &= \frac{N_B}{N_R} L_{Bdm} i_{rd}, \\
 N_A \phi_{Aqm} &= \frac{N_A}{N_R} L_{Aqm} i_{rq}, & N_B \phi_{Bqm} &= \frac{N_B}{N_R} L_{Bqm} i_{rq}, \\
 N_R \phi_{Adm} &= L_{Adm} i_{rd}, & N_R \phi_{Bdm} &= L_{Bdm} i_{rd} \\
 N_R \phi_{Aqm} &= L_{Aqm} i_{rq}, & N_R \phi_{Bqm} &= L_{Bqm} i_{rq}
 \end{aligned}$$

란 관계식은 (I-1), (II-2)에 대입하여 정리하면 본문의 그림 3과 같은 等價圖와 (1), (2), (3) 및 (4)식과 같이 된다.

[Appendix II]

(5)식의 matrix 를  $V_A=V_{Ad}+V_{Bd}$ ,  $V_B=-\frac{\alpha}{\delta}[V_{Bd} \cos \alpha + V_{Bq} \sin \alpha]$ ,  $I_{Ad}=I_A$ ,  $I_{Aq}=0$ ,  $I_{Bd}=-\frac{\alpha}{\delta} \cos \alpha I_B$ ,  $I_{Bq}=\frac{\alpha}{\delta} \sin \alpha I_B$  라 할때  $d-q$  matrix 는 (II-1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_{Ad} \\ V_{Aq} \\ V_{Bd} \\ V_{Bq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_A+jX_{Al} & 0 & 0 & 0 & jX_{Am} & 0 \\ +jX_{Am} & & & & & \\ 0 & R_A+jX_{Al} & 0 & 0 & 0 & jX_{Am} \\ +jX_{Am} & & & & & \\ 0 & 0 & \frac{s^2}{\delta^2}[R_B & 0 & jX_{Am} & 0 \\ +jX_{Bl}] & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & \frac{s^2}{\delta^2}[R_B & 0 & jX_{Am} \\ +jX_{Bl}] & & & & & \\ & & & +jX_{Bl}] & & & & & & & \\ & & & +jX_{Bl}] & & & & & & & \\ & & & +jX_{Bl}] & & & & & & & \\ jX_{Am} & -(1-S)X_{Am} & jX_{Am} & -(1-S)X_{Am} & 2Rr+jXr & -(1-S)Xr \\ (1-S)X_{Am} & jX_{Am} & (1-S)X_{Am} & jX_{Am} & (1-S)Xr & 2Rr+jXr \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Ad} \\ I_{Aq} \\ I_{Bd} \\ I_{Bq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \quad (II-1)$$

그리고, (II-1)의  $d-q$  matrix 를 Morrill's double field 의  $f-b$  matrix 로 표시하면 (II-2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} V_{Af} \\ V_{Ab} \\ V_{Bf} \\ V_{Bb} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_A+jX_{Al} & 0 & 0 & 0 & jX_{Am} & 0 \\ +jX_{Am} & & & & & \\ 0 & R_A+jX_{Al} & 0 & 0 & 0 & jX_{Am} \\ +jX_{Am} & & & & & \\ 0 & 0 & \frac{s^2}{\delta^2}[R_B & 0 & jX_{Am} & 0 \\ +j(X_{Bl}+X_{Bm} \\ -\frac{s^2}{\delta^2}X_{Am})] & & & & & \\ +jX_{Am} & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & \frac{s^2}{\delta^2}[R_B & 0 & jX_{Am} \\ +j(X_{Bl}+X_{Bm} \\ -\frac{s^2}{\delta^2}X_{Am})] & & & & & \\ +jX_{Am} & & & & & \\ jX_{Am} & 0 & jX_{Am} & 0 & 2Rr/s & 0 \\ +j(Xr-X_{Am}) & & & & & \\ +jX_{Am} & & & & & \\ 0 & 0 & jX_{Am} & 0 & jX_{Am} & 0 \\ +j(Xr-X_{Am}) & & & & & \\ +jX_{Am} & & & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Af} \\ I_{Ab} \\ I_{Bf} \\ I_{Bb} \\ I_{rf} \\ I_{rb} \end{bmatrix} \quad (II-2)$$

참 고 문 헌

1) B. H. Smith, "Theory and Performance of a Twin Stator Induction Machine" IEEE Trans. Power App. Syst. Vol. PAS-85, No. 2, pp.123~131, Feb. 1966.  
 2) B. H. Smith, "Synchronous Behavior of Doubly fed Twin Stator Induction Machine" IEEE Trans. Power App. Syst. Vol. PAS-86, No.10, pp.1227~1236, Oct. 1967.

3) Venkata. V. Sastry, Mayuram R. Krishnaurthy, "Generalized Theory for the Starting Performance of Single-Phase Induction Motor with Asymmetrical Windings" IEEE Trans. Power App. Syst. Vol. PAS-89, No. 4, pp.652~662, April 1970.  
 4) K. Hayashi, F. Funahashi, "The Starting Characteristics of Capacitor Motor with Nonquadrature Stator Windings" JIEEJ Vol. 79, No. 851 pp. 1014~1021, Aug. 1959.  
 5) Toshio. Koike, "Torque Characteristics of Capacitor Motors with Windings not in Quadrature" Hitachi Hyorow, Vol. 50 No.6, pp. 512~516, June 1968.  
 6) T. Takegami, K. Hayashi, F. Funahashi, "Circle Diagrammatic Method of Determination of Characteristics of Two Phase Induction Motor with Windings not in Quadrature and Its Application" JIEEJ Vol. 76, pp. 394~401, April, 1956.  
 7) 박민호, "非對稱卷線軸單相電動機의 等價回路에 關係서" 대한전기학회지 Vol. 21 No. 1 pp. 7~12, Jan. 1972.  
 8) K. Y. Tang, R. L. Cosgriff "Two Axis Method of Analyzing Electric Machines" AIEE Trans. Vol. 74 pp.1449-1455, Feb. 1955.  
 9) G. Sridhara Rao, Venkata V. Sastry, P. Venkata Rao, "Two-speed Single-winding Shaded-pole Single-phase Induction Motors" IEEE Trans. Power App. Syst. Vol. PAS-89, No. 6. pp. 1308~1321, July/Aug. 1970.  
 10) O. I. Butler, A. K. Wallace, "Generalised Theory of Induction Motors with Asymmetrical Windings, and Its Application to the Analysis and Performance Prediction of Shaded-pole Motors" Proc. IEE, Vol. 115, No. 5 pp. 685~695, May 1968.  
 11) P. L. Alger, The Nature of Induction Machines. Gordon and Breach Pub. pp. 459, pp. 393~463, 1965 Book.  
 12) Doran D. Hershberger, John L. Oldenkamp, "A Single-phase Induction Motor with One Distributed Winding" IEEE Trans. Power App. Syst. Vol. PAS-87, No. 10, pp. 1862~1866, Oct. 1968.  
 13) Gabriel Kron, Equivalent Circuit of Electric Machinery, John Wiley & Sons, INC, pp. 25~

59, 1951. Book.

14) Denis O'Kelly, "Equivalent Circuits for Single-phase Induction and Hysteresis Motors" IEEE Trans. Power App. Syst. Vol. PAS-90, No.1 pp.279~288, Jan/Feb. 1971.

15) K.Kato, K.Tsuboi, "On th Form of the Magnetic Field of a Single-phase Induction Motor vs Its Slip" JIEEJ Vol. 91. No.4, pp.699, Apr. 1971.

16) 황영문, "2次勵磁起電力에 의한 Twin Stator Induction Machine 의 Torque 特性解析", 대한전기학회지, Vol. 18, No. 8 pp.46~52, Nov.1969.

17) 황영문, "直列型 Twin Stator Induction Machine 의 Torque 特性解析" 부산대학교 공과대학 연구지 Vol. 10 pp.39~47, March 1970.

18) Young Moon Hwang "Performance of a Twin Stator Induction Machine by Second Excitation E. M. F" Proceedings of S. I. C. EEE, pp.157~161, Sept. 1970.

19) L. W. Buchanan, "An Equivalent Circuit for a Single-phase Motor Having Space Harmonics in Its Magnetic Field" IEEE Trans. Vol. PAS-84, No.11, pp.999~1007, Nov. 1965.

20) T.H. Barton, J.C. Dunfield, "M. M. F-Harmonic Effects in Induction Motors with Phase-wound Rotors" Proc. IEE, Vol. 116, pp.965~971, June 1969.

21) P.C.Krause, "Simulation of Unsymmetrical 2-Phase Induction Machines"IEEE Trans. Power App. Syst, Vol. PAS-84. No.11, pp.1025~1037, Nov.1965.