

콘덴서 런 單相誘導電動機의 設計的 考察

—補助卷線 및 콘덴서 容量值의 選定—

論 文
31~2~3

A Study on the Design of Permanent-Split Capacitor Motor

—Selection of Auxiliary Winding and Capacitor Value—

元 鍾 洙*

(Jong-Soo Won)

Abstract

Designing the capacitor-run motor for balanced operation is accompanied with the excessive capacitor value and low capacitor terminal voltage of condenser. As a solution for this problems, It was reported the design by equal volt-ampere method, The running characteristics of capacitor-run motor by this method due to the balancing point selection, however, has a room to be studied further.

This paper deals with the determination of the winding ratio and capacitor value of a permanent-split capacitor motor by balanced operation and equal volt-ampere method at the different load points. The analysis of the running characteristics of a motor and its designing method also presented for both cases. It concluded that the running characteristics due to the equal volt-ampere operation are very close to the balanced operation.

1. 序 論

近來 家庭用 電氣機器나 家內工業設備의 驅動源으로 콘덴서 電動機가 많이 使用되고 있는바 그 設計過程에서 補助卷線 및 콘덴서 容量의 適切한 選定은 經濟的인 設計에서 重要한 問題가 된다.

Boothby氏⁽¹⁾는 卷線比와 콘덴서 容量을 適切히 選定함으로써 全負荷時의 力率을 95~100%로 改善하는 力率法을 提案한 바 있으나 이 方法은 卷線比의 選定과 콘덴서 容量 決定에 制約이 있다.

Trickey氏⁽²⁾는 定格負荷에서 平衡運轉을 하도록 卷數比 및 콘덴서 容量을 選定하는 方法을 提示한 바 있으나 이 方法은 콘덴서 容量이 過大해지는 缺點이 있다. 이에 대한 解決方法으로 運轉時의 콘덴서 볼트 암페어가 平衡運轉으로 設計한 콘덴서의 볼트 암페어와 같도록 卷線比 및 콘덴서 容量을 選定하는 콘덴서 볼

트 암페어 一定法을 提示한 바 있다. Tozne 및 Sudo⁽³⁾氏는 이 方法을 適用하의 電動機의 運轉特性과 設計方法을 解析한 바 있다. 그러나 平衡運轉點 變化에 따른 볼트 암페어 一定法 設計時의 卷線比, 콘덴서 容量 및 運轉特性等의 關係가 分明치 않다. 本 論文에서는 볼트 암페어 一定法에 의한 設計方法을 適用하여 平衡運轉點 移動에 따른 卷線比 및 콘덴서 容量의 變化, 그리고 平衡運轉時와 볼트 암페어 一定運轉時의 諸特性의 關係를 數值計算과 實驗을 통해서 考察하였다.

2. 特性式의 誘導

콘덴서 電動機의 卷線軸角度 θ 는 大部分의 경우 $\pi/2$ 로 取하지만 極數變換時의 슬롯 數의 關係, 起動特性 또는 平衡運轉時의 特性등을 考慮하여 $\pi/2$ 를 벗어나게 하는 경우^{(3)-⁽⁵⁾}가 있으므로 $\theta \approx \frac{\pi}{2}$ 인 경우의 特性式을 먼저 提示하고 이로부터 $\theta = \pi/2$ 이고 콘덴서는 1箇만을 使用한 電動機에 限定해서 本 論文에서는 다루기로 한다. 또한 特性解析을 簡略化하기 위해서 鐵損等價抵抗

* 正會員 : 서울대 工大 電氣工學科 教授
接受日字 : 1981年 11月 23日

$r_i = \infty$ 로 보고 鐵心の 飽和, 슬롯 開口部의 影響 등은 無視한다.

(1) $\theta \approx \pi/2$ 일 때의 特性式

그림 1 (a)와 같은 非對稱軸 콘덴서 電動機에서 主卷線, 補助卷線の 實効卷數를 W_m, W_a 라 하면, 그림 1 (a)는 補助卷線을 主卷線의 卷數와 같게 하여 이를 主卷線方向과 直角方向으로 나누어서 그림 1 (b)와 같이 表示할 수 있다. 그리고 그림 1 (b)의 電動機에 대해서 이와 同一한 回轉磁界를 發生하는 그림 1 (c)의 非對稱軸 콘덴서 電動機를 想定하고 正相分電流를 \dot{I}_p , 逆相分電流를 \dot{I}_N 라 한다.

그림 1 (b)로부터 主卷線相 및 補助卷線相의 電壓에 對해서는 (1), (2)式이, 電流에 대해서는 (3), (4)式이 成立한다. 이러한 數式에서 漏洩리액턴스의 2卷線間의 結合은 $\cos \theta$ 에 比例하는 것으로 한다.

$$\dot{V}_m = \dot{I}_p \dot{Z}_p + \dot{I}_N \dot{Z}_N + \dot{I}_m \dot{Z}_{m1} + j \dot{I}_a x_1 \cos \theta \quad (1)$$

$$\dot{V}_m / a = j(\dot{I}_p \dot{Z}_p - \dot{I}_N \dot{Z}_N) \sin \theta + \dot{I}_a \dot{Z}_{a1} + (\dot{I}_p \dot{Z}_p + \dot{I}_N \dot{Z}_N) \cos \theta + j \dot{I}_m x_a \cos \theta \quad (2)$$

$$\dot{I}_p + \dot{I}_N = \dot{I}_m + \dot{I}_a \cos \theta \quad (3)$$

$$j(\dot{I}_p - \dot{I}_N) = \dot{I}_a \sin \theta \quad (4)$$

여기서

\dot{V}_m : 電源電壓

θ : 卷線軸角度

a : 補助卷線의 主卷線에 對한 實効卷數比(W_a/W_m)

S : 슬립

\dot{I}_p : 콘덴서 電動機의 正相分電流

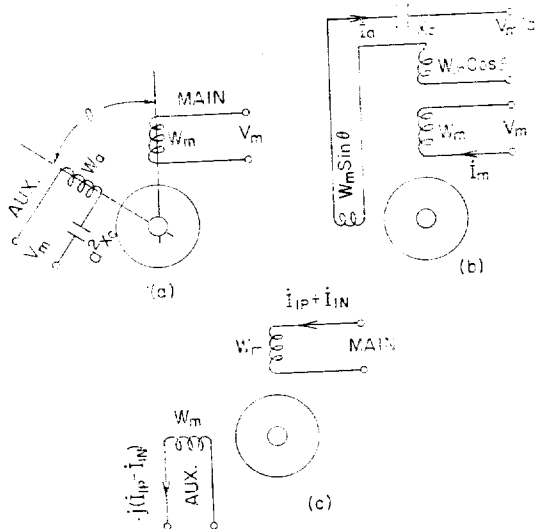


그림 1. 非對稱의 콘덴서 電動機의 變換

Fig. 1. Transformation of the unsymmetrical capacitor motor

\dot{I}_{1N} : 콘덴서 電動機의 逆相分電流

$\dot{Z}_{m1} = r_1 + jx_1$ = 主卷線의 임피던스

$\dot{Z}_{a1} = r_{a1} + j(x_{a1} - x_c)$ = 主卷線으로 換算한 補助卷線相의 임피던스

$$\dot{Z}_p = \frac{jx_m \{ (r_2/S) + jx_2 \}}{\left(\frac{r_2}{S} \right) + j(x_m + x_2)} = Z_{pR} + jZ_{pi} = \text{主卷線으로 換算한 回轉子の 正相 임피던스}$$

換算한 回轉子の 正相 임피던스

$$\dot{Z}_N = \frac{jx_m \{ r_2 / (2-S) + jx_2 \}}{r_2 / (2-S) + j(x_m + x_2)} = Z_{NR} + jZ_{Ni} = \text{主卷線으로 換算한 回轉子の 逆相 임피던스이다.}$$

으로 換算한 回轉子の 逆相 임피던스이다.

(1)~(4)式으로부터 \dot{I}_p, \dot{I}_N 은

$$\dot{I}_p = \dot{V}_m [j \dot{Z}_N \sin \theta + j \dot{Z}_{a1} / \sin \theta - (\dot{Z}_N + jx_{a1}) \cos \theta + x_{a1} \cos^2 \theta / \sin \theta + (1/a)(\dot{Z}_N + \dot{Z}_{m1} + jr_1 \cot \theta)] / D \quad (5)$$

$$\dot{I}_N = \dot{V}_m [j \dot{Z}_p \sin \theta + j \dot{Z}_{a1} / \sin \theta + (\dot{Z}_p + jx_{a1}) \cos \theta + x_{a1} \cos^2 \theta / \sin \theta - (1/a)(\dot{Z}_p + \dot{Z}_{m1} - jr_1 \cot \theta)] / D \quad (6)$$

여기서

$$D = [j \dot{Z}_N \sin \theta + j \dot{Z}_{a1} / \sin \theta - (\dot{Z}_N + jx_{a1}) \cos \theta + x_{a1} \cos^2 \theta / \sin \theta] (\dot{Z}_p + \dot{Z}_{m1} - jr_1 \cot \theta) + (\dot{Z}_N + \dot{Z}_{m1} + jr_1 \cot \theta) [j \dot{Z}_p \sin \theta + j \dot{Z}_{a1} / \sin \theta + (\dot{Z}_p + jx_{a1}) \cos \theta + x_{a1} \cos^2 \theta / \sin \theta]$$

이다.

(2) $\theta = \pi/2$ 일 때의 特性式

$\theta = \pi/2$ 일 때 (5), (6)式은

$$\dot{I}_p = \dot{V}_m [j(\dot{Z}_N + \dot{Z}_{a1}) + \frac{1}{a}(\dot{Z}_N + \dot{Z}_{m1})] / D_{(\theta=\pi/2)} \quad (7)$$

$$\dot{I}_N = \dot{V}_m [j(\dot{Z}_p + \dot{Z}_{a1}) - 1/a(\dot{Z}_p + \dot{Z}_{m1})] / D_{(\theta=\pi/2)} \quad (8)$$

$$D_{(\theta=\pi/2)} = [j(\dot{Z}_N + \dot{Z}_{a1})(\dot{Z}_p + \dot{Z}_{m1}) + j(\dot{Z}_N + \dot{Z}_{m1})(\dot{Z}_p + \dot{Z}_{a1})]$$

이 되고 $\dot{Z}_{m1} = \dot{Z}_{1N} + \dot{Z}_{1p}$, $\dot{Z}_{a1} = \dot{Z}_{1N} - \dot{Z}_{1p}$ 로부터

$$\dot{I}_p = \left(\frac{\dot{V}_m}{2} \right) \frac{(1-j/a)(\dot{Z}_N + \dot{Z}_{1N}) - (\dot{Z}_p + \dot{Z}_{1N})(\dot{Z}_p + \dot{Z}_{1N}) - (1+j/a)\dot{Z}_{1p}}{+(\dot{Z}_{1N} + \dot{Z}_{1p})(\dot{Z}_{1N} - \dot{Z}_{1p})} \quad (9)$$

$$\dot{I}_N = \left(\frac{\dot{V}_m}{2} \right) \frac{(1+j/a)(\dot{Z}_p + \dot{Z}_{1N}) - (\dot{Z}_p + \dot{Z}_{1N})(\dot{Z}_p + \dot{Z}_{1N}) - \{1-(j/c)\}\dot{Z}_{1p}}{+(\dot{Z}_{1N} - \dot{Z}_{1p})(\dot{Z}_{1N} - \dot{Z}_{1p})} \quad (10)$$

이다.

3. 運轉特性的의 近似解析

誘導電動機의 實質의인 運轉範圍는 無負荷에서 全負荷사이이며, 最大토크를 發生하는 슬립은 20~30% 程度이다. $S < 0.2 \sim 0.3$ 範圍에서는 S 의 값이 작은 關係로 \dot{Z}_{m1} 및 \dot{Z}_N 은 \dot{Z}_p 나 x_c 에 비해서 大端히 작은 값이

며 近似的으로 $x_c, Z_p \gg Z_{m1}, Z_N$ 의 關係가 成立한다.

이 關係를 (9), (10)式에 適用하브르서 I_{1p}, I_{1N} 는 各各 다음과 같이 表示된다.

$$I_{1p} = \dot{V}_m / (Z_p + Z_{m1}) \approx \dot{V}_m / Z_p \quad (11)$$

$$I_{1N} = \dot{V}_m \{ 2/Z_p + (ja^2 - a)/a^2 x_c \} \quad (12)$$

그리고 이 때의 콘덴서 런 電動機의 運轉時의 諸特性式은 다음과 같다.

主卷線電流

$$I_m = I_{1p} + I_{1N} = \dot{V}_m \{ 2/Z_p + (ja^2 - a)/a^2 x_c \} \quad (13)$$

補助卷線電流

$$I_a = (1/a)(jI_{1p} - jI_{1N}) = \dot{V}_m \{ (a+j)/a^2 x_c \} \quad (14)$$

線電流

$$I = \dot{V}_m \{ 2/Z_p + j(a^2 + 1)/a^2 x_c \} \quad (15)$$

力率

$$\cos \varphi = \frac{I_{(real)}}{\sqrt{I_{(real)}^2 + I_{(imag)}^2}} \quad (16)$$

여기서 I_{real} : I 의 實數部, I_{imag} : I 의 虛數部이다.

$$\begin{aligned} \text{토크 } T &= 2(|I_{1p}|^2 Z_{pR} - |I_{1N}|^2 Z_{NR}) \\ &= V_m^2 \left\{ \left| \frac{1}{Z_p} \right|^2 Z_{pR} - \left| \frac{1}{Z_p} + \frac{1}{a^2 x_c} \right|^2 \right. \\ &\quad \left. (ja^2 - a)^2 Z_{NR} \right\} \quad (17) \end{aligned}$$

振動토크

$$\begin{aligned} T_v &= 2|I_{1p}| \cdot |I_{1N}| (Z_p - Z_N) \approx 2|I_{1p}| \cdot |I_{1N}| Z_p \\ &= 2V_m^2 \left| \frac{1}{Z_p} + \frac{ja^2 - a}{a^2 x_c} \right| \quad (18) \end{aligned}$$

따라서 (11)~(18)式에 運轉時의 콘덴서 볼트 암페어가 平衡運轉時의 볼트 암페어와 같도록하는 條件을 適用하면 各各 볼트 암페어 一定時의 條件을 얻을 수 있다.

4. 平衡運轉과 平衡運轉特性

콘덴서 런 電動機는 單相으로 運轉하는 경우, 어느 任意的 한 速度에서 主卷線과 補助卷線 兩相의 起磁力的 크기를 같게 하고 또한 時間的으로 $\pi/2$ 의 位相差를 가지게 할 수 있다. 本論文에서는 이를 平衡運轉이라 부르기로 한다. 平衡運轉에서는 卷數比와 콘덴서 容量의 두 條件이 滿足되어야 한다. 그리고

$$-jaI_a = I_m \quad (19)$$

이어야 한다.

平衡運轉時의 等價回路는 그림 2로 表示된다고 한다. 그림 2(b)에서 r_{a1}, x_{a1}, x_c 등 定數는 主卷線換算值이다.

平衡運轉時는 逆相分電流 $I_{1N}=0$ 인 條件에서 (6)式의 分子의 實數部, 虛數部는 零이어야 한다. 實數部가 零인 條件으로부터 平衡運轉時의 卷數比 a_b 는

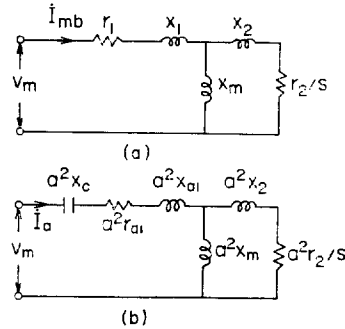


그림 2. 平衡運轉時의 콘덴서 電動機의 等價回路
Fig. 2. Equivalent circuits of the condenser motor at balanced operation

$$a_b = \frac{Z_{pj} + x_1 - r_1 \cot \theta}{Z_{pR} \sin \theta + r_{a1} / \sin \theta + (Z_{pj} + x_{a1}) \cos \theta} \quad (20)$$

이고 (6)式의 虛數部 零인 條件으로부터 主卷線相으로 換算된 콘덴서의 임피던스 x_{cb} 는

$$\begin{aligned} x_{cb} &= (x_{a1} + Z_{pj}) \sin^2 \theta - Z_{pR} \sin \theta \cos \theta \\ &\quad + (r_{a1} + Z_{pR}) / a_b \quad (21) \end{aligned}$$

이다. 따라서 $\theta = \pi/2$ 에서는

$$a_b = (Z_{pj} + x_1) / (Z_{pR} + r_{a1}) \quad (22)$$

$$\begin{aligned} x_{cb} &= \{ (Z_{pj} + x_1)(Z_{pj} + x_{a1}) \\ &\quad + (Z_{pR} + r_1)(Z_{pR} + r_{a1}) \} / (Z_{pj} + x_1) \quad (23) \end{aligned}$$

이며, 正常的인 運轉範圍에서 $Z_{pR} \gg r_{a1}, Z_{pj} \gg x_{a1}$ 의 關係가 成立하브르 $r_{a1} \approx r_1, x_{a1} \approx x_1$ 으로 取捨할 수 있어

$$a_b = (Z_{pj} + x_1) / (Z_{pR} + r_1) \quad (24)$$

$$x_{cb} = \{ (Z_{pj} + x_1)^2 + (Z_{pR} + r_1)^2 \} / (Z_{pj} + x_1) \quad (25)$$

이 된다. 以下 平衡運轉을 論할 때는 添字 b 을 附記키로하며 特性式誘導는 精密解析을 對象으로 한다.

主卷線電流

$$I_{mb} = \dot{V}_m / \{ (r_1 + Z_{pR}) + j(x_1 + Z_{pj}) \} \quad (26)$$

補助卷線電流

$$\begin{aligned} I_{ab} &= (j/a_b) I_{mb} = j\dot{V}_m / \{ a_b \{ (r_1 + Z_{pR}) \\ &\quad + j(x_1 + Z_{pj}) \} \} \quad (27) \end{aligned}$$

線電流

$$I_b = \dot{V}_m \left\{ 1 + \left(-\frac{j}{a_b} \right) \right\} / \{ (r_1 + Z_{pR}) + j(x_1 + Z_{pj}) \} \quad (28)$$

力率

$$\begin{aligned} \cos \varphi_b &= \frac{(r_1 + Z_{pR})}{\sqrt{\left\{ (r_1 + Z_{pR}) + \frac{1}{a_b} (x_1 + Z_{pj}) \right\}^2 \\ &\quad + \frac{1}{a_b^2} (x_1 + Z_{pj})^2 \\ &\quad + \left\{ \frac{1}{a_b} (r_1 + Z_{pR}) - (x_1 + Z_{pj}) \right\}^2}} \quad (29) \end{aligned}$$

토오크

$$T_b = 2|I_{1p}|^2 Z_{pR} = 2V_m^2 Z_{pR} / \{(r_1 + Z_{pR})^2 + (x_1 + Z_{pj})^2\} \quad (30)$$

이다. 그리고 콘덴서의 端子電壓 E_b 및 볼트 암페어 值 $(VA)_b$ 는

$$E_b = V_m \sqrt{1 + \{(x_1 + Z_{pj}) / (r_1 + Z_{pR})\}^2} = V_m \sqrt{1 + a_c^2} \quad (31)$$

$$(VA)_b = V_m^2 / (x_1 + Z_{pj}) = a_b^2 I_a^2 x_{cb} = I_m^2 x_{cb} \quad (32)$$

이며 平衡運轉時의 콘덴서의 端子電壓 및 볼트 암페어는 電動機의 等價回路定數를 使用하여 구할 수 있다.

5. 볼트 암페어 一定時의 運轉

電動機運轉時의 콘덴서의 볼트 암페어를 平衡運轉條件에 따라 設計한 경우의 콘덴서의 볼트 암페어와 같도록(볼트 암페어 一定法이라함) 콘덴서 容量值를 選定하였을 때의 電動機特性에 대해서 考察한다. 다음에서 添字 c 는 볼트 암페어 一定時의 값을 表示하는 것으로 한다.

볼트 암페어 一定時의 運轉에서는

$$a_b^2 I_a^2 x_{cb} = a^2 I_a^2 x_c \quad (33)$$

의 關係가 있으며 (14), (24), (25), 및 (27)式으로부터

$$a_c^2 x_{cc} = (a_c^2 + 1)(x_1 + Z_{pj}) \quad (34)$$

이다. 여기서 a_c , x_{cc} 는 各各 볼트 암페어 一定時의 卷數比 및 콘덴서의 리액턴스이다. 볼트 암페어 一定時의 特性은 (34)式의 條件을 (13)~(18)式에 代入함으로써 구할 수 있다. 但 精密式誘導를 위해서 Z_{m1} 까지 考慮한다.

主卷線電流

$$I_{mc} = \dot{V}_m \{2 / (Z_p + \dot{Z}_{m1}) + (ja_c^2 - a_c) / a_c^2 x_{cc}\} \quad (35)$$

補助卷線電流

$$I_{ac} = \dot{V}_m \{a_c + j\} / a_c^2 x_{cc} \quad (36)$$

線電流

$$I_c = I_{mc} + I_{ac} \quad (37)$$

力率

$$\begin{aligned} \cos \varphi_c &= \frac{I_{c(\text{real})}}{\sqrt{I_{c(\text{real})}^2 + I_{c(\text{imag})}^2}} \\ &= \frac{2 \cdot (r_1 + Z_{pR}) \cdot a_c^2}{\sqrt{4a_c^2 x_{cc} \{(r_1 + Z_{pR})^2 + (x_1 + Z_{pj})^2\} \{a_c^2 x_{cc} - (a_c^2 + 1)(x_1 + Z_{pj})\} + (a_c^2 + 1)^2}} \\ &= \frac{x_{cc}}{\{(r_1 + Z_{pR})^2 + (x_1 + Z_{pj})^2\}^2} \quad (38) \end{aligned}$$

토오크

$$T_c = 2V_m^2 \left\{ \left| \frac{1}{Z_p + \dot{Z}_{m1}} \right|^2 Z_{pR} - \left| \frac{1}{Z_p + \dot{Z}_{m1}} + \frac{1}{a_c^2 x_{cc}} (ja_c^2 - a_c) \right|^2 \cdot Z_{NR} \right\} \quad (39)$$

振動토오크

$$\begin{aligned} T_{vc} &= 2|I_{1p}| \cdot |I_{1N}| (Z_p - \dot{Z}_N) \\ &= 2|I_{1p}| \cdot |I_{1N}| Z_p = 2V_m^2 \left\{ \frac{1}{Z_p + \dot{Z}_{m1}} + \frac{ja_c^2 - a_c}{a_c^2 x_{cc}} \right\} \quad (40) \end{aligned}$$

볼트 암페어 一定法에 따라 卷數比 a_c 를 決定할 때는 運轉過程에서 콘덴서에 걸리는 端子電壓를 考慮하여야 한다. 콘덴서의 端子電壓 및 容量值는

$$E_c = a_c^2 x_{cc} I_{ac} \quad (41)$$

$$c_c = 1 / \omega a_c^2 x_{cc} \quad (42)$$

이고 콘덴서의 容量值 c_c 와 平衡運轉時의 容量值 c_b 와의 比는 (24), (25), 및 (34)式의 關係로부터

$$c_c / c_b = a_b^2 x_{cb} / a_c^2 x_{cc} = (a_b^2 + 1) / (a_c^2 + 1) \quad (43)$$

이 되고 卷數比의 關係만으로 表示할 수 있다. a_c 에 대한 E_c / V_m , c_c / c_b 와의 關係를 圖示하면 그림 3과 같다. 볼트 암페어 一定法에 따라 콘덴서 容量值를 選定할 때 그림 3으로부터 a_b 에 대한 a_c 값을 豫測하여 c_c 의 概略值를 구하여 놓으면 보다 正確한 容量值를 求할 수 있다.

볼트 암페어 一定時의 運轉特性을 平衡運轉時의 特性을 基準으로 表示하면 다음과 같다.

(26), (35)式으로부터 主卷線電流比는

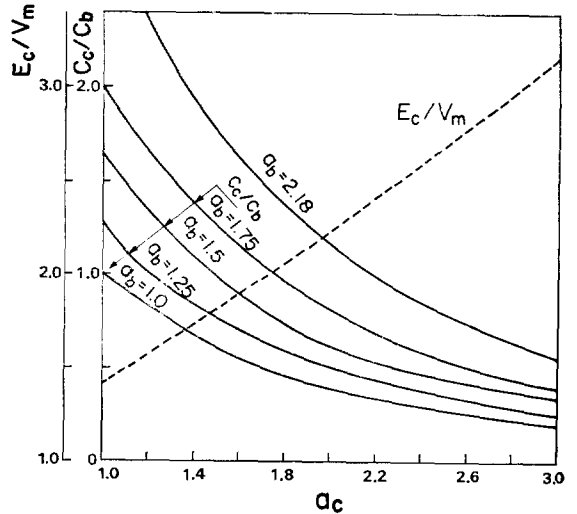


그림 3. 볼트 암페어 一定法에 따라 選定되는 콘덴서 값과 콘덴서 端子電壓

Fig. 3. Capacitor value and capacitor voltage by equal volt-ampere method

$$\frac{i_{mc}}{i_{mb}} = \left\{ \frac{2}{Z_p + Z_{m1}} + \frac{j(a_c^2 - a_c)}{a_c^2 x_{cc}} \right\} (Z_p + Z_{m1}) \quad (44)$$

(28), (37)式으로부터 線電流比는 近似的으로

$$I_c/I_b = 1 \quad (45)$$

(30), (39)式으로부터 토오크 比는

$$\frac{T_c}{T_b} = 1 - \frac{1}{a_c^2 + 1} \left(1 - \frac{a_c}{a_b} \right)^2 \left(\frac{s}{2-s} \right) \left\{ 1 + \left(\frac{r_2}{s x_m} \right)^2 \right\} \quad (46)$$

(30), (40)式으로부터 振動토오크와 平衡運轉時的 토오크와의 比는

$$\frac{T_{vc}}{T_b} = \sqrt{\frac{a_b^2 + 1}{a_c^2 + 1}} \left| \frac{a_c}{a_b} - 1 \right| \quad (47)$$

振動토오크와 平衡運轉時的 토오크와의 比 T_{vc}/T_b 를 平衡運轉하는 卷數比 a_b 가 1.0, 1.1, 1.25, 1.5, 1.75, 2.18인 경우에 대해서 圖示하면 그림 4와 같다. 그림 4로부터 振動토오크는 卷數比 a_c 가 a_b 보다 커지거나 작아지면 增加하며, $a_c = a_b$ 에서 $T_{vc}/T_b = 0$ 이 된다. 따라서 볼트 암페어 一定法에 따른 設計에서는 卷數比 a_c 를 a_b 에 가깝게 選定하는 것이 振動토오크 輕減의 見地에서 볼때 有利하다.

運轉狀態에서 成立한 近似式은 $S=1$ 인 起動時에 그대로 適用키 어려우므로 (9), (10)式에 의해서 起動 토오크比를 구하면 다음과 같다.

起動時는 $S=1$ 이므로 Z_s, Z_N 의 式에서 $S=1$ 로 놓으면

$Z_p = Z_N, Z_{pR} = Z_{NR}$ 의 關係가 있어 이를 各各 Z_s, Z_{pR} 로 表示하면

$$T_i = 2(|\dot{I}_{1p}|^2 Z_{pR} - |\dot{I}_{1N}|^2 Z_{NR}) = 2Z_{pR}(|\dot{I}_{1p}|^2 - |\dot{I}_{1N}|^2)$$

$$\dot{I}_{1p} = \frac{\dot{V}_m}{2} \left\{ \frac{1}{Z_{m1} + Z_s} - \frac{j}{a(Z_{o1} + Z_s)} \right\}$$

$$\dot{I}_{1N} = \frac{\dot{V}_m}{2} \left\{ \frac{1}{Z_{m1} + Z_s} + \frac{j}{a(Z_{o1} + Z_s)} \right\}$$

볼트 암페어 一定時 起動토오크 T_{ic} 는

$$T_{ic} = \left(\frac{V_m^2}{a_c} \right) \frac{Z_{pR}(r_1)}{|Z_{m1} + Z_s|^2 |r_{o1} + j(x_{o1} - x_{cc}) + Z_{pR} + j Z_{pj}|^2}$$

平衡運轉時的 起動토오크 T_{ib} 는

$$T_{ib} = \left(\frac{V_m^2}{a_b} \right) \frac{Z_{pR}(r_1)}{|Z_{m1} + Z_s|^2 |r_{o1} + j(x_{o1} - x_{cb}) + Z_{pR} + j Z_{pj}|^2}$$

$$\frac{T_{ic}}{T_{ib}} = \left(\frac{a_b}{a_c} \right) \left(\frac{x_{cc}}{x_{cb}} \right) \frac{(r_{o1} + Z_{pR})^2 + (x_{o1} - x_{cb})^2 + Z_{pj}^2}{(r_{o1} + Z_{pR})^2 + (x_{o1} - x_{cc})^2 + Z_{pj}^2} \quad (48)$$

$r_{o1} \approx r_1, x_{o1} \approx x_1$ 으로 取扱할 수 있어

$$\frac{T_{ic}}{T_{ib}} = \left(\frac{a_b}{a_c} \right) \left(\frac{x_{cc}}{x_{cb}} \right) \frac{(r_1 + Z_{pR})^2 + (x_1 - x_{cb})^2 + Z_{pj}^2}{(r_1 + Z_{pR})^2 + (x_1 - x_{cc})^2 + Z_{pj}^2} \quad (49)$$

(49)式에서 普通 $x_{cb}, x_{cc} \gg (x_1 + Z_{pj}), x_{cb}^2, x_{cc}^2 \gg (r_1 + Z_{pR})^2$ 의 關係가 있으므로 (22), (23), (24)式的 關係로부터 近似的으로

$$\frac{T_{ic}}{T_{ib}} = \left(\frac{a_b}{a_c} \right) \left(\frac{x_{cb}}{x_{cc}} \right) = \left(\frac{a_c}{a_b} \right) \left(\frac{a_b^2 + 1}{a_c^2 + 1} \right) \quad (50)$$

이다. 위 式으로부터 卷數比 a_c 를 a_b 보다 크게 選定함에 따라 볼트 암페어 一定時的 起動 토오크는 減小함을 豫想할 수 있어 單一 콘덴서를 使用하는 콘덴서 連 電動機에서는 a_c 를 選定할때 起動토오크에 대한 考慮가 必要하다.

6. 計算例

표 1의 電動機 定數는 1/4HP, 60Hz, 110V, 1725RP M, 콘덴서 電動機에 대한 等價回路定數이다.

이 電動機를 슬립 $S=0.025, 0.031, 0.036, 0.042$ 로 運轉할 때의 平衡運轉條件과 이에 대한 諸特性을 計算하고 위 슬립에서 電動機運轉時的 콘덴서 볼트 암페어가 平衡運轉時的 콘덴서 볼트 암페어와 같아지는 볼트 암페어 一定時的 運轉條件과 諸特性을 卷數比 $a_c=1, 1.4, 1.8, 2.2, 2.6$ 에 대해서 電子計算機로 精密計算하여 볼트 암페어 一定時的 運轉特性과 平衡運轉時的

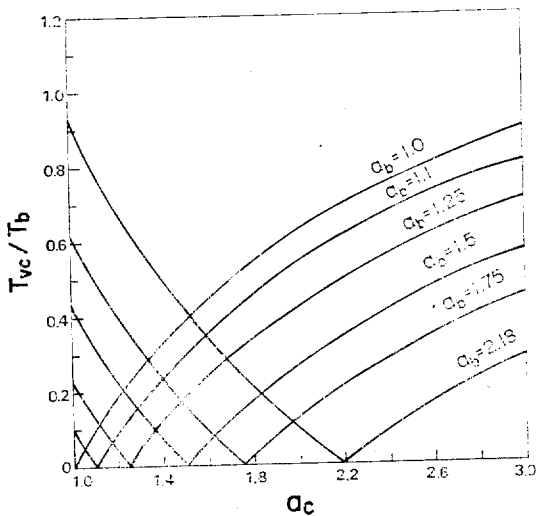


그림 4. 볼트암페어 一定運轉時的 振動토오크와 平衡運轉時的 토오크比
Fig. 4. Ratio between pulsating torque and balanced operation torque under the equal volt-ampere operation

표 1. 콘덴서 런 電動機의 等價回路定數 및 損失
Table 1. Equivalent circuit constants and loss of capacitor-run motor

主 卷 線	$r_1=1.68\Omega, x_1=3.31\Omega$
回轉子(主卷線換算)	$r_2=3.741\Omega, x_2=3.31\Omega$
勵磁리액턴스	$x_m=69.236\Omega$
補助卷線(主卷線換算)	$r_{a1}=2.449\Omega, x_{a1}=5.822\Omega$
實効卷線比(W_a/W_m)	$a=1.274$
鐵損+機械損	31.1W

特性比를 구한 結果를 提示하면 표 2와 같다. 特性計算은 主卷線은 變更함이 없이 補助卷線만을 卷數比에 適合토록 再卷線하고, 콘덴서는 運轉條件에 適合한 것을 選定하는 것으로 假定하였다.

표 2의 計算結果에 대해서 考察한다.

(1) 卷數比, 定數가 주어진 電動機에 대해서 平衡運轉速度를 高速側으로 移動시키면 卷數比 a_b 는 增加된다.

(2) 콘덴서의 容量值, 平衡運轉點을 低速側에 移動하면 平衡運轉時의 콘덴서 容量 c_b 는 急速히 커진다.

한편 볼트 암페어 一定法에 따른 運轉에서는 同一슬립이면 卷線比 a_c 를 크게할 수록 콘덴서 容量 c_c 는 減小시킬 수 있으나 a_c 選定은 주어진 電動機의 슬롯의 크기 및 콘덴서 定格電壓에서 오는 制約을 考慮하여야 한다.

(3) 콘덴서의 볼트 암페어, 平衡運轉時의 콘덴서의 볼트 암페어 (VA)_b와 볼트 암페어 一定時의 콘덴서의 볼트 암페어 (VA)_c는 大體적으로 ±1V內에서 一致하고 있어 위 解析이 妥當함을 알 수 있다.

(4) 電流比, 볼트 암페어 一定時의 主卷線電流 I_{m_c} 와 平衡運轉時의 主卷線電流 I_{m_b} 와의 比인 I_{m_c}/I_{m_b} 는 a_c 增加에 따라 減小하다가 完滿하게 增加하는 것은 全負荷에 가까운 運轉速度近方에서는 a_c 增加에 따라 I_{m_c} 는 減小하다가 若干 增加하기 때문이다.

$\frac{I_c}{I_b}$ 는 $a_c < a_b$ 일 때는 $I_c < I_b$ 임을 알 수 있으며 平衡運轉點을 輕負荷인 高速點에 陷을 수록 顯著하다 따라서 $a_c < a_b$ 로하면 볼트 암페어 一定運轉時의 콘덴서 값은 平衡運轉時의 콘덴서 값보다 큰 것을 必要하게 되고 經濟的이 되지 못한다. 故로 콘덴서에 걸리는 電壓이 콘덴서의 定格電壓을 넘지 않고 또한 슬롯 크

표 2. 볼트 암페어 一定法에 의한 콘덴서 런 電動機의 特性計算值

Table 2. Calculated performances of capacitor-run motor due to equal volt-ampere method

슬 립	定數 및 特性比			平衡運轉		볼트암페어一定		$\frac{I_{m_c}}{I_{m_b}}$	$\frac{I_c}{I_b}$	$\frac{\cos\phi_c}{\cos\phi_b}$	$\frac{T_c}{T_b}$	$\frac{T_{vc}}{T_b}$	$\frac{T_{sc}}{T_{sb}}$
	a_b	$c_b(\mu F)$	(VA) _b	a_c	$c_c(\mu F)$	(VA) _c							
S=0.025(1755RPM)	2.112	7.8	209.9	1.0	21.7	210.5	1.247	0.930	1.032	0.939	0.823	1.196	
				1.4	14.5	210.5	1.106	0.965	1.015	0.975	0.156	1.176	
				1.8	10.2	210.7	1.028	0.987	1.006	0.993	0.170	1.084	
				2.2	7.3	210.3	0.993	1.002	1.0	1.001	0.613	0.976	
				2.6	5.5	210.3	0.978	1.010	0.996	1.003	0.208	0.88	
S=0.031(1744RPM)	1.761	11.3	227.5	1.0	23.7	228.3	1.192	0.936	1.025	0.949	0.577	1.096	
				1.4	15.8	228.5	1.056	0.975	1.010	0.984	0.235	1.076	
				1.8	11.0	228.1	0.994	1.001	1.0	1.002	0.023	0.993	
				2.2	7.9	228.2	0.972	1.017	0.994	1.008	0.219	0.897	
				2.6	5.9	228.0	0.972	1.028	0.990	1.01	0.367	0.803	
S=0.036(1735RPM)	1.516	15.4	248.3	1.0	25.8	248.8	1.142	0.947	1.016	0.956	0.403	1.036	
				1.4	17.2	249.3	1.017	0.989	1.004	0.994	0.076	1.022	
				1.8	11.9	249.0	0.972	1.018	0.994	1.010	0.169	0.940	
				2.2	8.6	249.1	0.968	1.036	0.989	1.016	0.353	0.849	
				2.6	6.4	248.6	0.982	1.048	0.984	1.017	0.49	0.764	
S=0.042(1724RPM)	1.336	19.9	271.9	1.0	28.2	272.2	1.097	0.959	1.009	0.966	0.271	1.004	
				1.4	18.7	272.5	0.987	1.005	0.998	1.004	0.046	0.992	
				1.8	12.9	272.4	0.963	1.036	0.990	1.019	0.285	0.913	
				2.2	9.3	272.4	0.978	1.056	0.985	1.024	0.462	0.823	
				2.6	7.0	272.4	1.006	1.069	0.981	1.024	0.594	0.741	

기에 따른 卷線上的 制限이 없다면 $a_c \geq a_b$ 로 選定함이 妥當하다.

(5) 力率比, 볼트 암페어 一定運轉時的 力率과 平衡運轉時的 力率は 그 比가 大略 1인 點으로부터 서로 같다.

(6) 토오크 比, 平衡運轉時的 토오크와 볼트 암페어 一定運轉時的 토오크는 卷線比가 비슷하면 거의 一致한다. 그러나 $a_c < a_b$ 로 하였을 때는 $T_c < T_b$ 의 傾向을 볼 수 있다.

振動토오크 T_{vc} 와 平衡運轉토오크 T_b 와의 比인 T_{vc}/T_b 는 $a_b = a_c$ 에서 最小值를 얻을 수 있어 振動, 均一回轉, 騒音에 重點을 둔다면 使用速度와 平衡運轉速度는 一致시키고 또한 a_c 는 a_b 에 가깝게 選定할 必要가 있다.

(7) 起動토오크 比, 平衡運轉點을 高速에서 低速側으로 移動할 수록 起動 토오크 T_{sc} 및 T_{sc} 는 增加한다. 그러나 平衡運轉과 同一速度에서 볼트 암페어 一定運轉時的 起動 토오크 T_{sc} 는 a_c 를 a_b 보다 크게 選定할 수록 相當히 큰 比率로 줄어든다. 따라서 起動 토오크를 重要視하는 設計에서는 a_c 를 크게하는 것은 起動 토오크面에서 받게 될 制約을 考慮할 必要가 있다. 이러한 境遇에는 所定の 起動 토오크를 確保하기 위해서 2重 콘덴서 電動機로할 必要가 생긴다.

7. 設計方法 및 實驗

〈7.1〉 設計順序, 上記 解析結果에 따라 볼트 암페어 一定法에 의한 콘덴서 런 電動機의 設計順序에 대해서 考察한다.

(1) a_b 및 x_{c1} 의 決定, 平衡運轉時的 負荷點을 어느 點에 둘 것인가를 決定하고, 그 負荷點에 該當하는 슬립에서 平衡運轉할 때의 卷線比 a_b , 콘덴서의 리액턴스 x_{c1} , 콘덴서의 端子電壓 E_b 와 볼트 암페어值(VA)_b 등을 電動機의 定數를 使用하여서 (24), (25), (31) 및 (32)式에 의해서 計算한다.

(2) 卷數比 a_c 의 選定, 위에서 구한 E_b 값이 使用코저하는 콘덴서의 定格電壓보다 낮으면 볼트 암페어 一定運轉時的 卷數比 a_c 는 다음과 같이하여 選定한다.

設計코저하는 電動機의 振動 토오크와 平衡運轉時的 토오크 比 T_{vc}/T_b 는 設定值 以內인가 그리고 이때 콘덴서의 端子電壓은 定格電壓值 以下일 것인가를 檢討하고, 그림 3과 그림 4로부터 概略의인 適正 a_c 를 選定한다.

(3) 콘덴서 容量值의 決定, a_c 가 決定되면 電動機定數로부터 (34)式을 適用하여 x_{c1} 를 決定하고 (42)式으

로부터 c_c 를 決定한다. 또는 主卷線이 주어진 電動機에 設計順序 (2)에서 구한 卷線比 a_c 에 適合한 補助卷線을 하고, 콘덴서를 接續하여서 運轉하였을 때 콘덴서의 볼트 암페어가 設計順序 (1)에서 決定한 平衡運轉時的 콘덴서의 볼트 암페어 (VA)_b와 같도록 콘덴서의 容量值를 選定함으로써 볼트 암페어 一定運轉時的 콘덴서 容量을 決定할 수도 있다. 따라서 x_{c1} 값으로부터 c_c 를 計算하고 設計順序 (2)에서 구한 a_c 값을 利用하면 (43)式으로부터 c_c 를 決定할 수 있다.

〈7.2〉 實驗

供試電動機는 GE會社製 出力 1/3 HP, 4極, 實驗用 콘덴서 起動 單相誘導電動機 키트를 콘덴서 런 電動機로 再卷線하고 實施하였다. 다음에 補助卷線 및 콘덴서 容量의 選定과 實驗結果에 대해서 考察한다.

(1) 供試電動機의 定格 및 定數

供試電動機는 표 3의 定格을 滿足케하는 것을 目標로 하였다. 키트를 任意의 卷數比 $a=1.31$ 로 卷線하여 표 4의 定數를 얻었다.

표 3. 供試電動機의 定格

Table 3. Rating of the proposed motor

電 壓	115 V
周 波 數	60 Hz
定 格 回 轉 數	1740 RPM
콘덴서 定格 電壓	330 V
磁 極 數	4
出 力	1/3 Hp
運 轉 特 性	平衡運轉時的特性

표 4. 供試電動機의 等價回路定數 및 損失

Table 4. Equivalent circuit constants and loss of the proposed motor

主卷線	$r_1=2.59\Omega, x_1=3.21\Omega$
回轉子(主卷線換算)	$r_2=2.29\Omega, x_2=3.21\Omega$
勵磁리액턴스	$x_m=62.4\Omega$
補助卷線(主卷線換算)	$r_{a1}=2.51\Omega, x_{a1}=3.25\Omega,$ $r_c=2.59\Omega, x_c=95.4\Omega$
實効卷數比(W_a/W_m)	$a=1.31$
鐵損+機械損(W)	52.5

(2) 平衡運轉, 平衡運轉點은 $S=0.033(1740RPM)$ 으로 定하고 平衡運轉時的 卷數比 a_b , 콘덴서의 容量值 c_b , 콘덴서의 볼트 암페어 (VA)_b를 (24), (25), (32)式을 適用, 計算하여서 各各 $a_b=1.16, C_b=30.20\mu F,$ (VA)_b=354.5VA를 얻었다.

(3) 볼트 암페어 一定運轉, 볼트 암페어 一定運轉에 대해서는 콘덴서의 볼트 암페어 (VA)_c가 平衡運轉時的 콘덴서의 볼트 암페어 (VA)_b와 같아지는 콘덴서의 리

표 5. 供試機의 特性計算結果와 實驗結果比較

Table 5. Comparison of calculated results and experimental results of the proposed motor performances
(a) $S=0.033$ (1740RPM) $\alpha_c=1.4$

運轉方法	平 衡 運 轉		볼트 암페어 一定運轉		볼트 암페어 一定運轉 平 衡 運 轉	
	計 算 值	實 測 值	計 算 值	實 測 值	計 算 值	實 測 值
定數 및 特性						
卷線比	1.16	1.16	1.4	1.4	1.206	1.206
콘덴서容量值(μF)	30.20	30.2	23.9	24	0.791	0.794
主卷線電流(A)	2.331	2.38	2.240	2.3	0.961	0.966
補助卷線電流(A)	2.01	2.06	1.790	1.84	0.890	0.893
線電流(A)	3.078	3.14	3.165	3.24	1.028	1.031
力 率	0.989	0.97	0.985	0.97	0.996	1.00
軸토크($N\cdot m$)	1.423	1.37	1.461	1.40	1.026	1.021
콘덴서 볼트 암페어(VA)	354.5	358.4	355.1	360.6	1.001	1.006
콘덴서電壓	176.3	174	198.35	196	1.125	1.126

(b) $S=0.033$ (1740RPM) $\alpha_c=2.18$

運轉方法	平 衡 運 轉		볼트 암페어 一定運轉		볼트 암페어 一定運轉 平 衡 運 轉	
	計 算 值	實 測 值	計 算 值	實 測 值	計 算 值	實 測 值
定數 및 特性						
卷線比	1.16	1.16	2.18	2.18	1.879	1.879
콘덴서容量值(μF)	30.20	30.2	12.2	12.2	0.404	0.404
主卷線電流(A)	2.331	2.38	2.331	2.38	1.00	1.00
補助卷線電流(A)	2.01	2.06	1.281	1.32	0.637	0.640
線電流(A)	3.078	3.14	3.334	3.41	1.083	1.085
力 率	0.989	0.97	0.976	0.97	0.986	1.00
軸토크($N\cdot m$)	1.423	1.37	1.498	1.44	1.053	1.051
콘덴서 볼트 암페어(VA)	354.5	358.4	354.7	361	1.001	1.007
콘덴서 電壓(V)	176.3	174	276.92	273.5	1.570	1.571

액턴스 x_{cc} 를 $\alpha_c=1.4, 2.18$ 에 대해서 (34)식을 適用하여서 計算하였으며 그 結果는 표 5와 같다.

(4) 實驗, 위 實驗順序 (2), (3)에서 구한 卷數比 α_c , c_c 에 適合토록 주어진 主卷線은 變更함이 없이 補助卷線만을 다시 卷線하고 C_1, C_2 容量을 갖는 콘덴서를 接續하고 實驗한 結果는 표 5와 같다.

8. 結 論

以上 平衡運轉點 選定에 따른 卷數比 및 콘덴서 容量值의 決定과 諸特性에 대해서 考察하고 볼트 암페어 一定時의 運轉特性 및 起動 토크 特性을 平衡運轉時의 特性과 比較 檢討함으로써 볼트 암페어 一定時의 設計法을 明白히 하였다.

즉 볼트 암페어 一定時의 運轉特性은 平衡運轉時의 特性과 大略 一致함을 確認하였다. 그리고 上記 設計手法에 따라 設計한 콘덴서 리 電動機에 대해서 實驗한 結果도 解析結果와 比較의 잘 一致하는 結果를 얻

었다.

그러나 本 論文에서는 卷線軸角度 θ 가 $\frac{\pi}{2}$ 이고 主卷線相의 等價回路定數가 주어진 狀態에서의 對稱條件 및 運轉特性과 볼트 암페어 一定法에 따른 諸特性을 對象으로 하였기 때문에 鐵心の 形狀, 卷線의 크기 및 $\theta \approx \frac{\pi}{2}$ 일 때의 諸特性등을 直接 구할 수가 없으나 이러한 問題는 今後의 課題로 하고저 한다.

끝으로 本研究은 80年度 現代研究費로 이루어진 것임을 알리는 바이다.

參 考 文 獻

[1] C.G. Veinott; "Theory and design of small induction motors," pp.410~466, McGraw-Hill, New York, 1959.
[2] A. Tozune, and T. Suto; "Designing capacitor motors based on the equal volt-ampere method," IEEJ Trans. Vol. 96-B, No. 9 pp.458~464, 1976.

- [3] T. Yokozuka; "On unsymmetrical capacitor motors for balanced operation," IEEJ Trans. Vol. 98-B, No.2, pp.169 ~176, 1978.
- [4] Y. Yamagucki; "An investigation of the speed control of the single phase induction motor by changing of pole numbers," IEEJ Trans. Vol. 97-B, No. 8, pp.511~518, 1977.
- [5] J. Kibe, S. Mito and K. Kamimura; "Torque characteristics of single phase induction motor," JIEEJ. Vol. 82, No. 881, pp.190~199, 1962.
- [6] T. Koike; "Performance analysis of capacitor motors," Hitachi Review, Vol. 51, No. 5, pp, 25~29, 1969.
- [7] T. Yokozuka; "Design of condenser motors for balanced operation," JIEEJ. Vol. 90, No. 10, pp. 2031~2040. 1970.
- [8] T. Kenjo; "Symmetry conditions and optimum winding design for two strand single phase motors," JIEEJ. Vol. 89, No.5, pp.957~965, 1969.
- [9] C.G. Veinott; "Performance calculations on L and T connected tapped winding capacitor motors," IEEE Transactions, Vol. PAS-96, No. 4, pp. 1137~1144, 1977.
- [10] C.G. Veinott; "Performance calculations on the two-speed shunted capacitor motor," IEEE Trans. Vol. PAS-96, No. 4, pp.1132~1136, 1977.
- [11] M. Odamura, I. Utsugi, and K. Kawatake; "Optimization of stator windings of single phase induction motors," IEEJ Trans. Vol. 99-B, No. 1, pp.57~61, 1979.