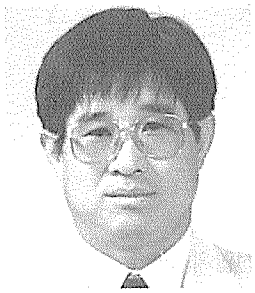
논단 III

단상 Condenser 전동기의 평형운전, torque, 효율등에 관한 이론



한국기술교육대학
전 기 공 학 과
교 수 박 창 순

1. 서 론

단상전동기는 단상전원에 연결이 가능하기 때문에 이용분야가 대단히 넓다.

특히 단상 Condenser전동기는 오래전부터 가정용과 공업용에 사용되어 많은 역할을 하였다. 그러나 단상 Condenser전동기는 삼상전동기에 비하여 효율이 낮고 inverse Torque로 인한 열과 torque ripple이 발생하는 단점이 있다.

단상 Condenser 전동기는 Condenser용량을 크게 하여 기동 torque와 최대 Torque를 증가시킬 수 있으나 negative sequence component가 함께 증가하여 효율이 감소하고 torque ripple이 증가하는 특성이 있다. condenser전동기는 보조권선과 주권선의 권선비와 condenser용량이 전동기의 운전특성에 큰 영향을 미치며 일정한 부하에서 권선비와 Condenser용량의 적절한 선택으로 negative sequence component를 완전히 소멸시켜 symmetric operation을 할 수가 있다. 따라서 condenser용량과 보조권선과 주권선의 권선비, 기동Torque, 최대 torque, 효율 그리고 torque ripple의 관계를 파악하여 일정부하에서 평형운전을 하는 권선비와 condenser용량을 구하고 그에 따른 운전특성을 구하는 방법을 소개하고자 한다.

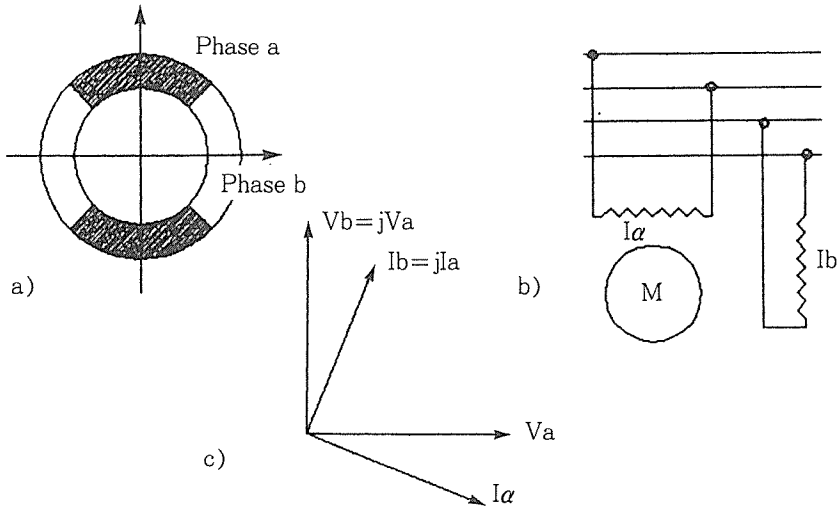
2. 이 론

2.1 2상회로의 symmetric operation

2상 전동기는 다음과 같은 조건을 만족시킬 때 symmetrical rotating Field를 제공한다.

a) 두 권선의 권선수가 같고 90도의 위상차가 있게 위치적으로 놓여있을때

b) 두 권선에 흐르는 교류가 크기는 같고 서로 90도의 위상차가 있을 때



〈그림－1〉 평형을 이루는 2상권선의 조건과 전류, 전압의 Vector도

이때 전압과 전류는 다음과 같은 조건을 만족하여야 한다.

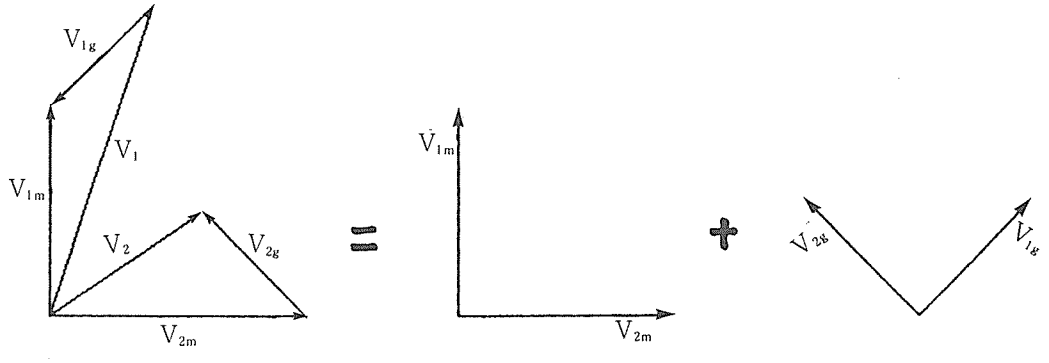
$$V_b = \pm jV_a \quad (1)$$

$$I_b = \pm jI_a \quad (2)$$

이때의 jV_a는 V_a의 시계반대방향으로 회전하는 것으로 가정한다.

공식 (1)과(2)는 고정자와 회전자에 회전자계를 만드는 조건이다.

Condensermotor의 고정자 권선은 위치적으로 평형을 이루게 놓여있다. 그러나 단상교류의 전원에서는 불평형 운전이 된다.



〈그림－2〉 불평형 상전압의 positive, negative sequence system

이러한 불평형 운전시의 전압과 전류는 서로 위상차가 있고 크기가 다른 두가지의 평형이 되는 symmetric component로 분해하여 생각을 할 수가 있다.

이러한 전류 또는 전압은 서로 90도의 위상차를 갖기 때문에 symmetric component로 생각을 할 수가 있으며 Positive sequence system(Index m)과 Negative sequence system(Index g)로 정의할 수가 있다.

전류 I_g는 Positive sequence system과는 phase의 차례가 바뀌어 있다.

〈그림-2〉로 부터 다음과 같은 관계가 성립이 된다.

$$V_a = V_m + V_g \text{ 또는 } I_a = I_m + I_g \quad (3)$$

$$V_b = jV_m + jV_g \text{ 또는 } I_b = jI_m + jI_g \quad (4)$$

전압 V_a, V_b 또는 전류 I_a, I_b의 값이 주어졌다면 공식(3)과 (4)로 부터 symmetric component의 크기는 다음과 같이 계산할 수가 있다.

$$V_m = \frac{V_a - jV_b}{2} \text{ 또는 } I_m = \frac{I_a - jI_b}{2} \quad (5)$$

$$V_g = \frac{V_a - jV_b}{2} \text{ 또는 } I_g = \frac{I_a - jI_b}{2} \quad (6)$$

따라서 반대로 평형 2상 전동기에 나타나는 불평형 상전압과 전류를 2상의 Positive-, Negative sequence system으로 분해할 수가 있다.

공식 (3)과 (4)에 의하여 상전류 I_a와 I_b를 계산할 수가 있고 불평형을 평형 System으로 하기위한 방법을 찾을 수가 있다.

불평형을 평형 system으로 하는 조건은 여기에서 $I_g=0$이다.

Condensermotor는 불평형 system이다.

두권선은 서로 위치적으로 90도의 위상차를 갖으나 같은 전원에 연결이 되며 두권선은 권선수가 다르다.

각권선에 서로 위상차가 생기는 전류를 만들기 위하여 b상에는 capacitive resistance를 직렬로 연결한다.

Condensermotor는 capacity C를 선택하기에 따라서 그리고 권선 a와 b의 권선수를 선택하기에 따라서 어느 일정한 부하에서는 $I_g=0$인 평형 운전을 할 수가 있다.

2.2 2상 권선을 갖는 단상 condensermotor의 회로

단상 유도전동기의 등가회로는 공식(3)과 (4)로 부터 다음과 같은 symetric component를 찾을 수가 있으며

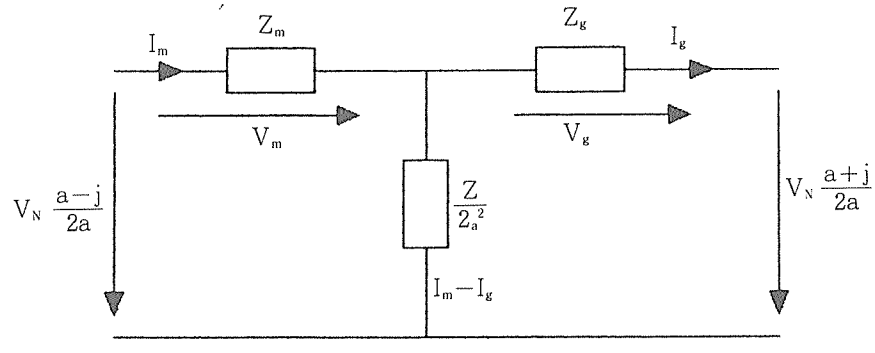
$$V_n = V_a = V_m + V_g = I_m Z_m + I_g Z_g \quad (7)$$

$$I_a = I_n = I_m + I_g \quad (8)$$

$$I_b = \frac{jI_m}{a} - \frac{jI_g}{a} \quad (9)$$

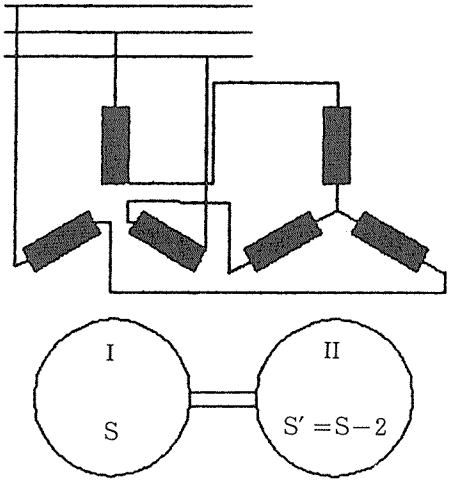
a:권선 a와 권선 b의 권선비 $= \frac{W_b}{W_a}$

Symetric voltagecomponent V_m와 V_g는 slip s로 회전하는 기기의 Impedance Z_m과 slip(2-s)로 회전하는 기기의 Impedance Z_g와 같은 성격을 갖는다.



〈그림-3〉 4단상 유도전동기의 등가회로

단상유도전동기의 전류와 토오크의 특성은 평형 2상 전동기에 비하여 두개의 고정자 권선이 서로 반대로 하여 직렬로 연결된 것으로 하고 회전자의 축이 연결되어 회전하는 것으로 생각하여 등가회로를 그릴 수가 있다.



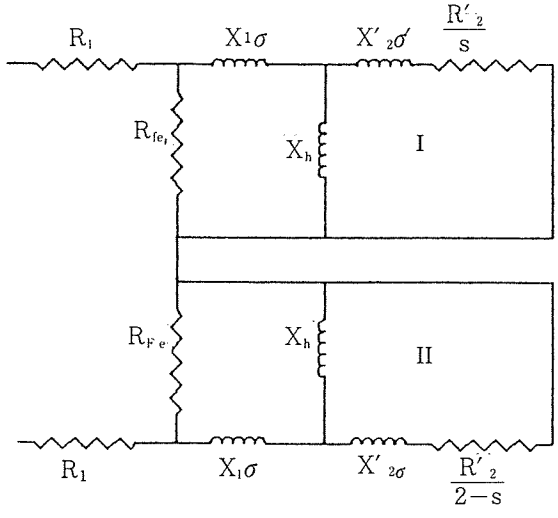
〈그림−4〉 단상유도전동기의 등가회로를 위한 직렬로 연결된 고정자권선과 회전자

3. 계 산

불평형 운전을 하는 전동기의 symmetric 등가회로는 주권선과 보조권선의 권선수를 같게 설정하고 앞서 설명한 symmetric component를 이용하여 계산을 한 후 보조권선의 전압과 전류는 실제 권선수에 의하여 환산하는 방법을 사용한다.

3.1 positive-, negative sequence system의 Impedance

평형 등가 전동기의 positive-, negative sequence system의 Impedance는 〈그림−5〉에 의하여 계산한다.



〈그림−5〉 등가회로

Positive sequence system의 Impedance는

$$Z_m(s)=R_1+\frac{R_{Fe}}{(R_{Fe}+Z_{p1})+Z_{p2}^2}\ Z_{p1}(R_{Fe}+Z_{p1})+Z_{p2}^2+jR_{Fe}Z_{p2} \quad (10)$$

공식 (10)에서 Z_{p1}과 Z_{p2}는

$$Z_{p1}(s)=\frac{X_{1h}^2}{X_2^2+(\frac{R'_2}{s})^2}\ \frac{R'_2}{s} \quad (11)$$

$$\frac{Z_{p2}(s)=jX_1+X_{1h}X_{2X'_2}+(\frac{R'_2}{s})^2}{X_2^2+(\frac{R'_2}{s})^2} \quad (12)$$

$X_2=X_{1h}+X'_2$

negative sequence system의 Impedance는

$$Z_g(s)=Z_m(2-s) \quad (13)$$

상기 값의 Admittance는

$$Y_m(s)=\frac{1}{Z_m}(s) \quad (14)$$

$$Y_g(s)=\frac{1}{Z_g}(s) \quad (15)$$

3.2 Symmetric Voltage component

Symmetric Voltage Component는 전원전압 V_n과 권선비 a그리고 condenser가 있는 회로의 admittance로 부터 구한다.

$$V_m=V_n\frac{Y_g+Y_c(a-j)a}{Y_m+Y_g+2a^2Y_c} \quad (16)$$

$$V_g=V_n\frac{Y_m+Y_c(a+j)a}{Y_m+Y_g+2a^2Y_c} \quad (17)$$

3.3 전 류

Positive- negative sequence system의 전류는

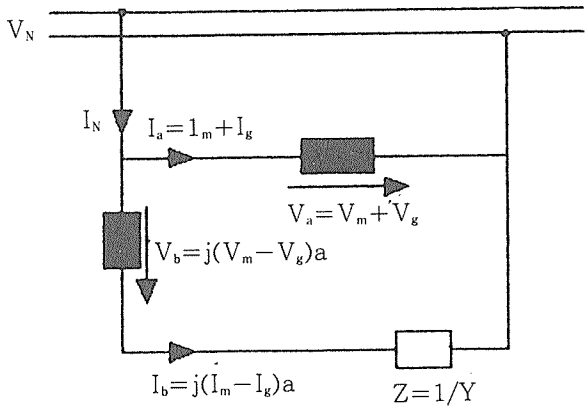
$$I_m=V_mY_m \quad (18a) \qquad I_g=V_gY_g \quad (18b)$$

그리고 주권선과 보조권선의 전류는

$$I_a=I_m+I_g \quad (19a) \qquad I_b=j\frac{1}{a}(I_m+1_g) \quad (19b)$$

총전류는

$$I_n=I_a+I_b \quad (20)$$



〈그림-6〉 권선 a와 권선 b의 권선비가 다른 2상 전동기의 전압과 전류

3.4 내부전압

자기포화, 철손을 계산하기 위하여는 1차측 저항 R1 다음의 내부저항을 아는 것이 대단히 중요하다.

$$V_{Em}=\sqrt{V^2_m+I^2_mR^2_1-2R_1(V_mI_m)} \quad (21)$$

$$V_{Eg}=\sqrt{V^2_g+I^2_gR^2_1-2R_1(V_gI_g)} \quad (22)$$

3.5 출 력

Positive-, negative sequence system의 출력은 일반 유도전동기와 같이 계산한다.

Positive sequence system의 고정자측으로 환산한 회전자전류는

$$I'_{2m}=-I_m \frac{jR_{Fe}X_{1h}}{\frac{R'_2}{s}(R_{Fe}+Z_{pl})-Z_{p2}X_2+jZ_{p2}\frac{R'_2}{s}+jX_2(R_{Fe}+Z_{pl})} \quad (23)$$

negative sequence system의 고정자측으로 환산한 회전자 전류는

$$I'_{2g}=-I_g \frac{jR_{Fe}X_{1h}}{\frac{R'_2}{(S-2)}(R_{Fe}+Z_{pl})-Z_{p2}X_2+jZ_{p2}\frac{R'_2}{(S-2)}+jX_2(R_{Fe}+Z_{pl})} \quad (24)$$

positive-, negative sequence system의 출력 :

$$P_{Dm}(s)=m1\frac{R'_2}{s}I'^2_{2m} \quad (25a)$$

$$P_{Dg}(s)=-m1\frac{R'_2}{(s-2)}I'^2_{2g} \quad (25b)$$

m1 : 상수

최종출력 :

$$P_D(s)=P_{Dm}(s)-P_{Dg}(s) \quad (26)$$

3.6 손 실

3.6.1 철 손

$$V_{Fe}=\frac{2}{R_{Fe}}(V^2_{Eg}+V^2_{Eg}) \quad (27)$$

3.6.2 권선 a(주권선)와 b(보조권선)의 동손

권선 b의 저항 Rb는 권선비로 권선저항 Ra로부터 구한다.

$$R_b=a^2R_a \quad (28)$$

주권선의 동손

$$V_{1A}=I^2_aR_a \quad (29)$$

보조권선의 동손

$$V_{1b}=I^2_bR_b \quad (30)$$

3.6.3 회전자측 동손

$$V_2=sP_{Dm}+(2-s)P_{Dg} \quad (31)$$

3.6.4 마찰손

마찰손은 일반적으로 경험에 의하여 정격토오크의 2% 정도로 가정하며 회전수에 비례하여 증가하는 것으로 한다.

3.6.5 총손실

$$V\sum=V_{Fe}+V_{1a}+V_{1b}+V_2+V_{fr} \quad (32)$$

3.7 출 력

$$P_2=P_D(1-s) \quad (33)$$

3.8 Torque ripple

Torque ripple은 단상전동기에서 positive sequence rotating filed외에 negative sequence rotating filed가 있으면 즉 불평형 운전시 나타난다.

torque ripple은 전원전압주파수의 배가 되는 주파수로 회전방향을 바꾸며 총 평균치는 0이 된다.

때로는 torque fipple의 최대치 Tp는 단상전동기의 출력 Torque보다 큰 값이 되기도 하며 소음의 주된 원인이 된다.

평형운전시에는 torque ripple역시 0이 되며 크기는 다음의 공식으로 부터 계산한다.

$$|T_p| = 2m\frac{P}{\omega_n}\frac{V_m}{V_n}\frac{V_g}{V_n} e V_n \qquad (34)$$

$$e = \frac{1}{2}[Y_m - Y_g]V_n$$

3.9 효 율

효율은 일반적인 삼상전동기와 마찬가지로 계산한다.

$$\eta = \frac{P^2}{P_2 + V\Sigma} \qquad (35)$$

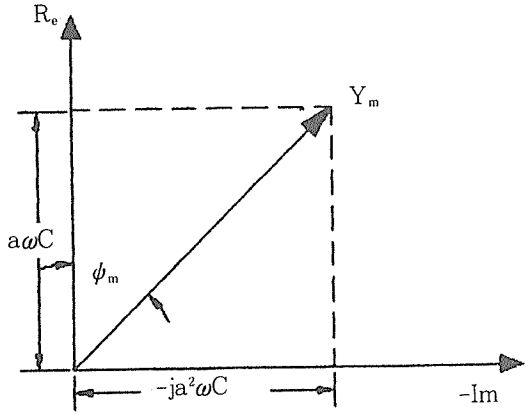
3.10 symmetric operation을 위한 권선비와 콘덴서 용량의 결정

system을 평형운전하기 위한 조건은 이미 1장에서 설명하였다. 즉

$$I_a = jaI_b \qquad (36)$$

그리고 $I_g=0$이 되어야만 한다.
이 조건으로부터 공식 (17)의 분자는 0이 되어야 한다.

$$Y_m + Y_c(\alpha+j)\alpha = 0 \qquad (37)$$



〈그림-7〉 2상권선을 갖는 단상전동기의 평형운전을 위한 Admittance

$$Y_c = j\omega C = -\frac{Y_m}{(\alpha+j)\alpha} \qquad (38)$$

$$a = \tan\psi_m = \frac{Re(Y_m)}{Im(Y_m)} \qquad (39)$$

어떤 일정부하의 평형운전점에서 보조권선에는 diagram의 전압 V_b가 걸린다.

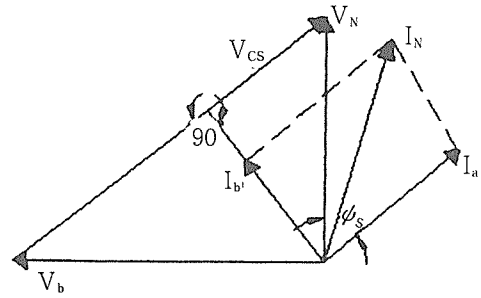
$$\frac{V_{bs}}{V_{as}} = \frac{I_{as}}{I_{bs}} = a \qquad (40)$$

그리고 콘덴서에 걸리는 전압

$$V_{cs} = \frac{U_n}{\cos\psi_s} = \sqrt{1+a^2}V_n \qquad (41)$$

이때의 운전콘덴서의 용량은

$$C_B = \frac{I_{as}\cos\psi_s}{V_n a 2\pi f_n} \qquad (42)$$



〈그림-8〉 평형운전점에서의 전압과 전류의 Diagram

4. 계산예

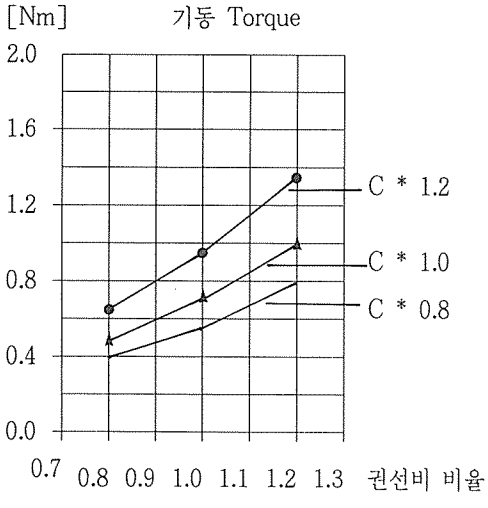
다음 값은 상기 공식을 program화 하여 계산한 값이다.

C	a	P	Ta	Tk	Tr	Ia	In	η	P_v
0.8	0.8	177.0	0.37	1.875	0.904	3.602	1.711	53.3	147.9
0.8	1.0	178.8	0.54	2.11	0.423	3.609	1.672	53.3	165.8
0.8	1.2	180.6	0.76	2.15	-0.21	3.644	1.748	49.5	207.3
1.0	0.8	179.5	0.49	2.0	0.657	3.537	1.745	51.2	159.2
1.0	1.0	180.1	0.71	2.2	8.E-4	3.57	1.667	51.5	193.3
1.0	1.2	182.0	1.013	2.43	-0.71	3.642	1.912	44.3	265.2
1.2	0.8	179.1	0.625	2.11	0.35	3.483	1.593	53.1	175.6
1.2	1.0	181.2	0.928	2.46	-0.52	3.547	1.75	47.6	235.3
1.2	1.2	181.6	1.327	2.7	-1.23	3.688	2.2	37.7	354.2

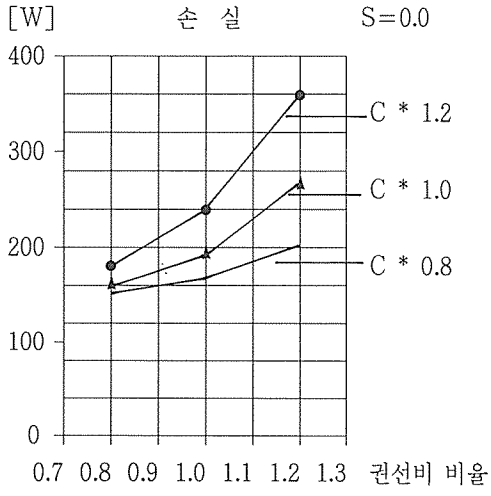
C : 사용한 condenser용량/계산한 condenser 용량
a : 사용한 권선비/계산한 권선비
P : 정격출력 [W]
Ta : 기동torque [Nm]
Tk : 최대torque [Nm]
Tp : torque ripple [Nm]
Ia : 기동전류 [A]
In : 정격전류 [A]
η : 효율 [%]
Pv : 무부하손실 [W]

계산에 사용된 sample 전동기는 출력=175W, 220V, 4극기이며 계산된 권선비는 1.427이고 condenser는 7.9μF이다.

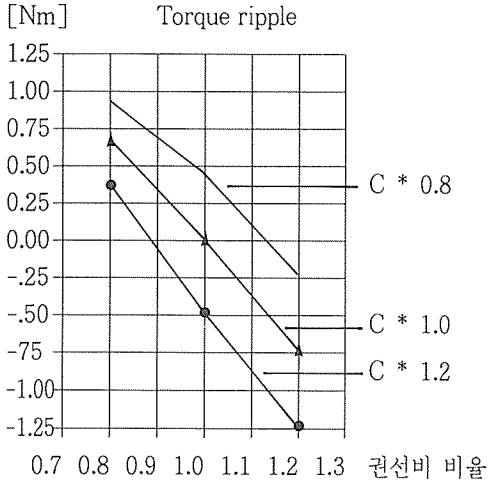
표에서 보듯이 권선비와 condenser의 변화에 따라 운전특성에 영향이 많이 있는 것을 알 수가 있다.



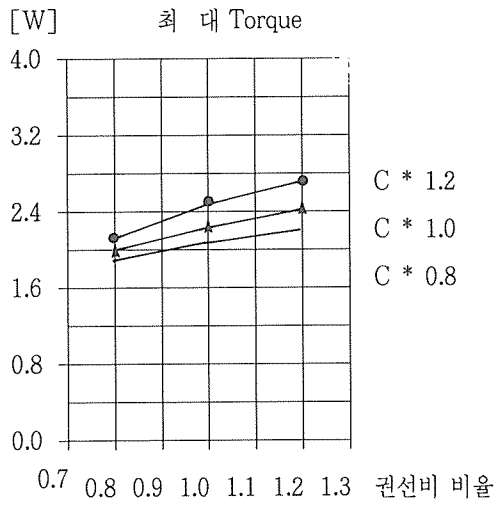
〈그림-9〉 권선비와 condenser 용량에 따른 기동torque



〈그림-10〉 권선비와 condenser 용량에 따른 손실



〈그림-11〉 권선비와 condenser 용량에 따른 torque ripple



〈그림－12〉 권선비와 condenser 용량에 따른 최대 torque

〈그림－9, 12〉에서 보듯이 전동기의 기동 torque는 condenser용량이 증가하고 권선비가 증가하는데 따라서 거의 비례적으로 증가하였다. 그러나 torque ripple은 계산된 condenser용량과 권선비외에는 모듈 큰 값을 나타내고 있고 손실은 권선비와 condenser용량의 증가에 따라 급격히 증가하는 것을 볼 수가 있다.

상기 공식을 이용하면 많은 시간과 비용이 드는 단상 condenser 전동기의 condenser용량결정과 전동기의 고정자내경, 길이, slot형태 등을 변경하지 않고 권선비를 변경하여 원하는 운전특성을 찾을 수가 있을 것으로 생각되며 추후 운전점에 따라 특성을 최적화하는 방법에 대한 소개를 할 수 있는 기회가 있기를 바란다.

5. 결 론

〈용 어 해 설〉

Town Watching Business

상품의 소비자이기도 한 생활자를 상세히 관찰하여 시대의 경향을 포착하는 산업. 미국이나 일본 등의 선진국에서는 이미 일반화된 분야로 우리나라에서 최근 유행하고 있는 X세대를 겨냥하는 것 등이 그 내용이다.

과거에는 기업의 마케팅 담당자들이 개인적으로 진행해 왔으나 구매자의 경향파악이 점점 상품개발에 중요한 요소로 인식되면서 최근에는 별개의 부서가 생겨나고, 타운 워칭 투어 등의 보다 적극적인 전략이 수립되고 있다.

테크노 마트

기술교육, 기술이전을 원활하게 추진하기 위해 창설된 기술거래의 중개알선 시스템. 技術去來市場이라고 번역된다.

기술정보의 유통을 축으로 이업종간, 기술영역간, 지역간의 기술이전을 촉진할 필요에 의해서 설립된 것으로 기술정보를 제공하는 새로운 Infra-Structure라고 할 수 있다. 기술거래시장에서는 주로 공업소유권 정보, 신제품 개발정보, 공동 연구개발 파트너 정보를 본부의 컴퓨터에 입력하고 온라인 서비스를 함으로써 정보의 제공자와 이용자를 연결시키는 시스템을 사용한다.