

# SCR 인버터로 驅動되는 單相 Reluctance Motor의 特性에 관한 研究

논문  
22~2~5

## Analytical Study of Single Phase Reluctance Motor Driven by SCR Inverter

원 종 수\*  
(Jong Swoo Won)

### Abstract

This paper presents numerical analysis by computer for the steady state characteristics of the single phase reluctance motor driven by the bridge type SCR inverter, and also the experiments were carried out to verify the numerical analysis data for the current, voltage, and torque of the motor.

It shows that the inductance of the inverter, the capacity of the commutation condenser and the frequency of the inverter have great effects to the magnitude and wave form of the motor terminal voltage and current. It is clear that the capacity of the commutation condenser and the inductance of the inverter circuit have to be adequately selected in order to stabilize the motor operation.

또한 解析에 있어서는 다음과 같은 假定을 設定한다.

- (1) 鐵心の 히스테리시스 現象을 無視한다.
- (2) SCR 및 整流 다이오드의 順方向 電壓降下를 無視한다.
- (3) 回轉子는 一定 同期角速度  $\omega$  로 回轉한다.

### 1. 序 論

近來에 와서 SCR를 使用한 인버터의 發達로 同期 電動機의 速度制御가 容易하게 되었다.

P.C. Krause와 T.A. Lipo<sup>1)</sup>는 整流器-인버터로 3相 reluctance motor를 운전하는 境遇 그 動特性에 關해서 研究發表하였다.

그러나 小形機器에 많이 使用되는 單相 reluctance motor에 對하여는 거의 取扱된바 없어 本 論文에서는 單相 reluctance motor를 인버터로 驅動하였을 때의 여러가지 靜特性에 關해서 取扱하였다.

單相 reluctance motor는 回轉磁界가 아닌 交番磁界로 驅動되기 때문에 正常的인 回轉狀態에서도 回轉子の 制動卷線에 誘導電流가 흘러 回轉子の 回轉方向과 反對方向의 토크를 發生시키고 있다. 本 研究에서는 reluctance 變化에 依하여 생기는 同期機로서의 토크 만을 取扱하기 爲해서 回轉子の 制動卷線을 除去한 單相 reluctance motor를 使用하였다.

### 2. Reluctance Motor의 電氣的 特性

그림 1은 簡易 單相 reluctance motor이다. 즉 回轉子에는 直流 勵磁卷線이나 制動卷線이 없으며 그 模樣은 突出磁極形으로 되어 있다. 그림 2는 回轉子が 電動機의 直軸과 任意의 角  $\theta$  로 놓여 있을 때의 磁化曲線이다.

電動機의 回轉子 및 固定子가 積層 珪素鋼板으로 되어 있으므로 電流가 增加할 때와 減小할 때에 있어서 磁化曲線이 겹치지 않는다. 本 研究에서는 이것을 簡略化하여 磁化曲線을 點線(C-曲線)과 같이 取扱하기로 한다. 그림 3은 回轉子の 여러 回轉角에 對한 磁化曲線들을 나타내는데 回轉子の 回轉角度에 따라 磁氣回路의 磁氣抵抗이 달라지므로 磁化曲線의 模樣도 달라진

\* 정희원 : 서울대학교 공과대학 조교수

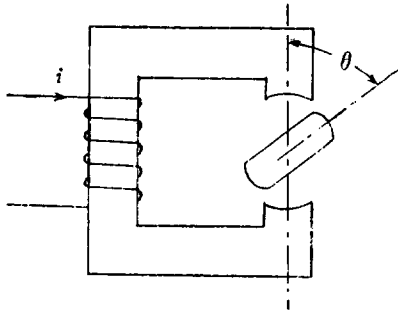


그림 1. 簡易單相 리럭턴스 모우터  
Fig. 1. Simplified reluctance motor (Laminated core)

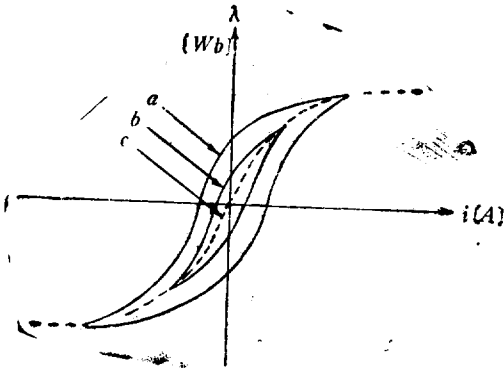


그림 2. 磁化曲線  
Fig. 2. Magnetizing curves.

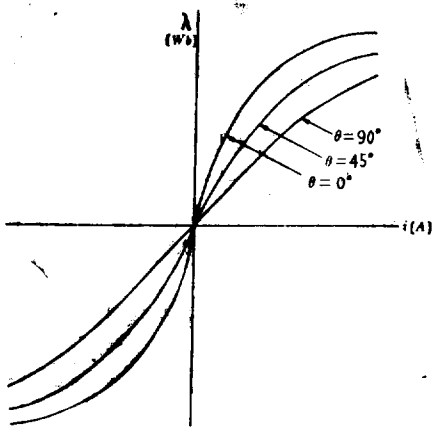


그림 3. 回轉子位置에 따른 磁化曲線變化  
Fig. 3. Magnetizing curves vs. rotor angles.

다.

그림 3으로부터

$$i(\lambda, \theta) = K_1(\theta)\lambda + K_3(\theta)\lambda^3 + K_5(\theta)\lambda^5 + \dots$$

$$= \sum K_n(\theta)\lambda^n$$

$$n = 1, 3, 5, \dots, \quad (1)$$

이다. 電動機의 電壓 電流 關係式<sup>2)</sup>은

$$\frac{d\lambda}{dt} + Ri = e \quad (2)$$

이다. 式 (1)로부터

$$\frac{di}{dt} = \sum K_n(\theta) \cdot n\lambda^{n-1} \frac{d\lambda}{dt} = \frac{d\lambda}{dt} \cdot \sum K_n(\theta)n\lambda^{n-1} \quad (3)$$

이고 式 (2)와 式 (3)으로부터

$$\frac{di}{dt} = \frac{e - Ri}{\sum K_n(\theta)n\lambda^{n-1}} \quad (4)$$

이 된다. 또한

$$W_m' = \int \lambda(\theta, i') di' \quad (5)$$

이므로

$$T = \frac{\partial W_m'}{\partial \theta} = \int \frac{\partial \lambda(\theta, i')}{\partial \theta} di' \quad (6)$$

이다.

### 3. 인버터 회로

인버터의 電源은 3相 交流를 全波整流하여 이것을 콘덴서 C<sub>1</sub>로 平滑히 하여 使用하고 인버터는 轉流 콘덴서를 使用한 브리지形<sup>3)</sup>을 使用하였다. SCR A와 A'가 導通되었을 때는

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{V - e - R_s i_s}{L_s}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{e - Ri}{\sum K_n(\theta)n\lambda^{n-1}} \quad (7)$$

$$\frac{de}{dt} = \frac{ic}{C} = \frac{i_s - i - e/R_m}{C}$$

이고 SCR B와 B'가 導通되었을 때는

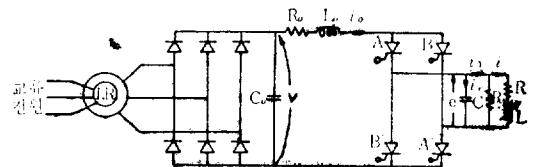


그림 4. 인버터와 電動機結線圖  
Fig. 4. Circuit diagram of inverter and reluctance motor

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{V + e - R_s i_s}{L_s}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{e - Ri}{\sum K_n(\theta)n\lambda^{n-1}} \quad (8)$$

$$\frac{de}{dt} = \frac{i_c}{C} = \frac{-i_s - i - \frac{e}{R_m}}{C}$$

이다. 여기서

$$\theta = 2\pi ft - \delta \quad (9)$$

이다 식 (7)과 (8)은 非線形聯立微分方程式이므로 求解를 解析的으로 求하기가 어렵다. 그러므로 電子計算機를 利用하여 數值解析을 하여야한다. 그림 5는 이것에 對한 電子計算機 simulation<sup>4)</sup>이다.

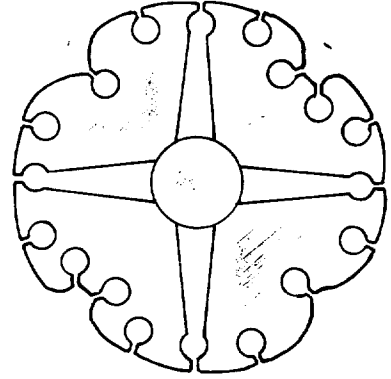


그림 6. 回轉子斷面  
Fig. 6. Rotor cross section.

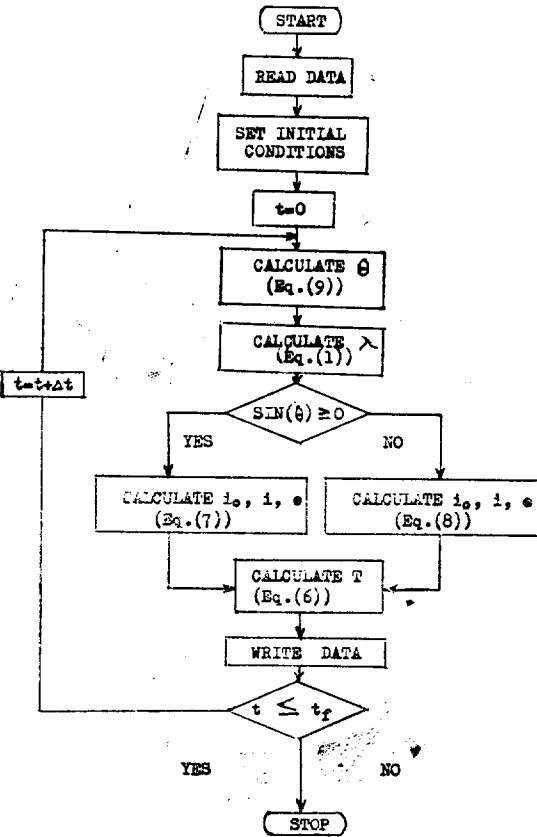


그림 5. 電子計算機의 플로우圖  
Fig. 5. Flow diagram of computer simulation.

#### 4. 數值解 및 實驗結果

本 研究에서는 單相 交流 110[V], 60[Hz]. 4極,  $\frac{1}{40}$ [HP] reluctance motor를 使用하였는데 回轉子の 制動卷線은 除去하였고 回轉子の 斷面은 그림 6과 같다.

實驗에 있어서의 實地 印加電壓은 珪素鋼板이 飽和되지 않는 範圍의 값을 取하였기 때문에

$$i_s = K_1(\theta)\lambda \quad (10)$$

로 表示될 수 있었

$$L(\theta) = \frac{1}{K_1(\theta)} = L_1 + L_2 \cos(2\theta) \quad (11)$$

이 었다 따라서

$$T = \int_0^i \frac{\partial(Li')}{\partial \theta} di' = -i^2 L_2 \sin(2\theta) \quad (12)$$

이다.

電動機와 인버터의 定數는

|                    |                          |
|--------------------|--------------------------|
| $L_s = 0.0942$ [H] | $R_s = 35$ [ $\Omega$ ]  |
| $L_1 = 0.194$ [H]  | $R = 6$ [ $\Omega$ ]     |
| $L_2 = 0.0823$ [H] | $R_m = 180$ [ $\Omega$ ] |
|                    | $C = 125$ [ $\mu F$ ]    |

이다.

그림 7에서 實線은  $V=125$  [V],  $L_s=0$  [H]  $f=50$  [Hz]이고 電動機는 無負荷일 때  $i_s, e, i_s, T$ 를 電子計算機로 數值解析한 것이다. 또한 X표는 實測值인데  $i_s$ 와  $e$ 는 計算値와 거의 비슷하였다.  $i_s$ 에 있어서 計算値와 實測値가 잘 符合하지 않는 것은 珪素鋼板에서 電流가 增加할 때와 減小할 때의 磁化特性을 같게 取하였기 때문이다.(그림 12 參照)

그림 8은 그림 7과 같은 條件이고  $L_s=0.0942$ [H] 일 때 電動機의  $i_s, e, i_s, T$ 를 求한 것이다.(그림 13 參照)

그림 7과 그림 8을 比較하여 보면 인버터 回路에 인덕턴스  $L_s$ 를 넣으면 인버터 電流  $i_s$ 의 脈動이 매우 적어지고 負荷端子電壓이 높아짐을 알 수 있다.

그림 9는 周波數를 40~80 [Hz]로 變化시켰을 때 負荷端子電壓의 크기를 表示한 것이다. 周波數의 增加에 對하여 負荷端子電壓을 增加시키기 爲하여 인버터

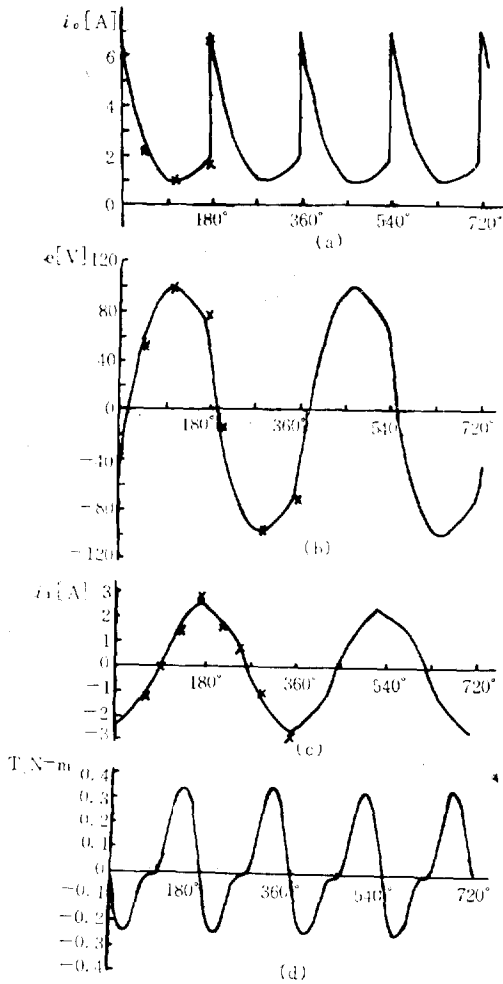


그림 7.  $V=125[V]$ ,  $L=0[H]$ ,  $f=50[Hz]$ 일 때의  
 電動機無負荷特性曲線, — 計算值, × 實測值  
 Fig. 7. Running characteristics at no load.  
 $V=125[V]$ ,  $L=0[H]$ ,  $f=50[Hz]$ .

直流電壓을 周波數에 따라 增加시켰는데 낮은 周波數  
 範圍에서는 負荷端子電壓이 周波數에 比例하였으나 周  
 波數가 높은 範圍에서는 端子電壓이 增加하지 않았다.  
 그 理由는 周波數가 높아감에 따라 電動機端子電壓의  
 波形이 三角波에 가까워지기 때문이다. (그림 14 參照).  
 이러한 現象은 轉流콘덴서의 값을 減小시키므로써 解  
 決할 수 있으나 어느 限界를 넘으면 SCR의 轉流가 不  
 可能하게 된다.

그림 10은 인버터 周波數를 70 [Hz]로하고 轉流  
 콘덴서의 값을 變化시켰을때 電動機 端子電壓의 波形  
 을 나타낸 것이다. 콘덴서 값에 따라 電壓의 波形 및

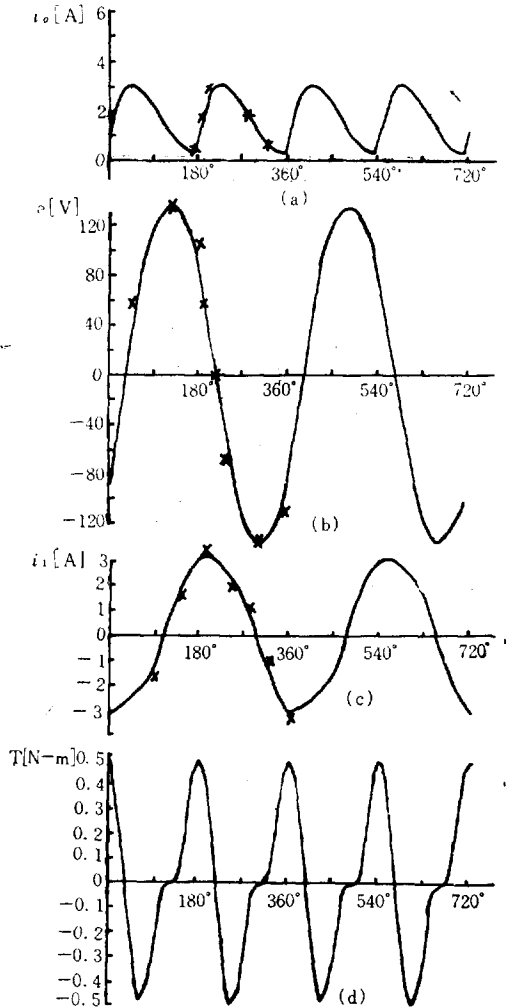


그림 8.  $V=125[V]$ ,  $L=0.0942[H]$ ,  $f=50[Hz]$   
 일 때의 電動機無負荷特性曲線  
 — 計算值, × 實測值  
 Fig. 8. Running characteristics at no load.  
 $V=125[V]$ ,  $L=0.0942[H]$ ,  $f=50[Hz]$ .

크기가 顯著하게 달라졌음을 알 수 있다.

그림 11은 인버터 定數를 一定하게 하고 인버  
 터 周波數를 變化시켰을 때 電動機 回轉力을 나타낸  
 다. 앞에서 指摘한바와 같이 電動機의 電流波形이 計  
 算值와는 若干의 差異가 있었으므로 토오크 值도 若干  
 의 誤差가 있으리라고 生覺된다. 周波數가 增加함에  
 따라 回轉力이 減小한 것은 電動機 端子電壓이 周波數  
 에 比例하여 增加하지 못하였기 때문이다. (그림 9 參  
 照) 토오크 曲線이 周波數 增加에 따라 右側으로 移動  
 한 것은 周波數가 增加함에 따라 電動機 電壓波形中  
 基本波의 位相의 變라지기 때문이다.

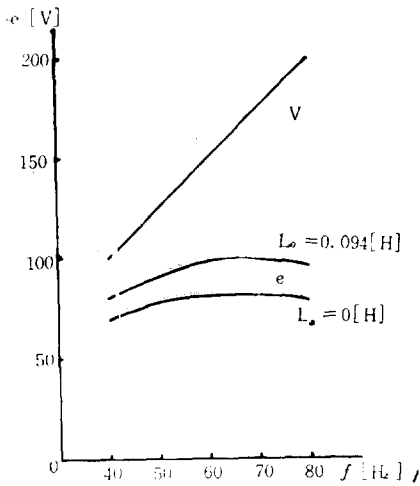


그림 9. 인버터 周波數對 電動機端子電壓  
Fig. 9. Inverter frequency Vs. motor terminal voltage.

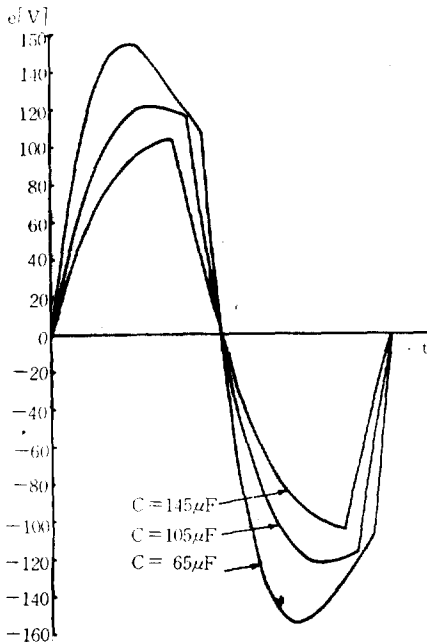


그림 10. 電動機端子電壓對 轉流콘덴서  
Fig. 10. Relationship between motor terminal voltage and commutation condenser.

### 5. 結 論

單相 reluctance motor를 인버터로 驅動하였을 때 電動機의 靜特性을 電子計算機에 依한 數值解析 및 實驗으로 考察하였다.

앞에서 얻은 結果를 要約하면

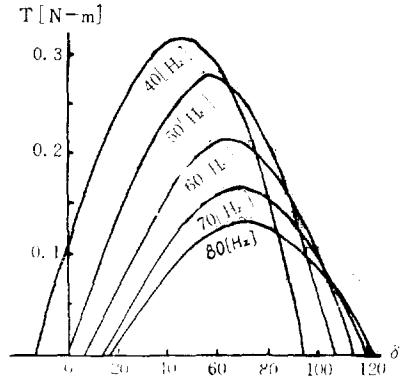


그림 11. 電動機 토크 特性  
Fig. 11. Characteristic curves of motor torque.

(1) 電子計算機에 依한 數值解析은 實驗結果와 잘 符合하였다. 그러나 負荷電流의 波形이 一致하지 않은 것은 電動機 鐵心の 히스테리시스 루우프를 그 中心을 通하는 하나의 線으로 簡略化하였기 때문이다.

(2) 인버터 回路定數를 一定하게 하고 周波數를 增加시키면 負荷端子電壓의 波形은 차차 三角波에 가까와 지고 電壓의 값이 減小한다. 그러므로 周波數變化에 따라 轉流콘덴서의 값을 減小시키는 것이 좋다.

(3) 인버터 回路定數 또는 周波數變化에 따라 電動機 端子電壓이 變化하고 最大回轉力을 發生하는 回轉子의 位置가 달라진다.

(4) 인버터 回路에 인덕턴스를 넣으므로써 電流는 脈動이 매우 적어졌고 負荷端子電壓은 增加하였다.

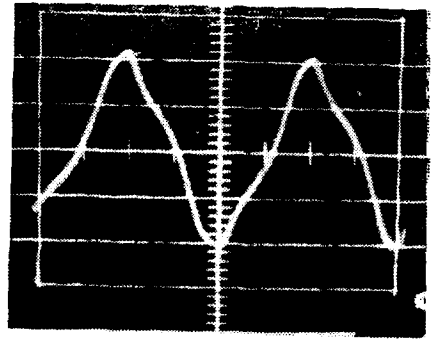
끝으로 本 研究은 1972年度 文敎部 學術研究助成費에 依해서 이루어진 것임을 밝혀 둔다.

### 參 考 文 獻

- (1) Paul C. Krause and Thomas A. Lipo, "Analysis and Simplified Representations of Rectifier-Inverter Reluctance Synchronous Motor Drives," IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-88, pp.962~970, June 1969.
- (2) Samuel Seely, "Electromechanical Energy Conversion", pp.8~30, McGraw-Hill, 1962.
- (3) 원종수, "SCR을 이용한 유도전동기의 속도제어에 관한 연구" 대한전기학회지, Vol.19 No.4, pp.1~11, 1970년 7월.
- (4) Daniel D. McCracken and William S. Dorn, "Numerical Methods and Fortran Programming," John Wiley and Sons, 1964.

記號說明

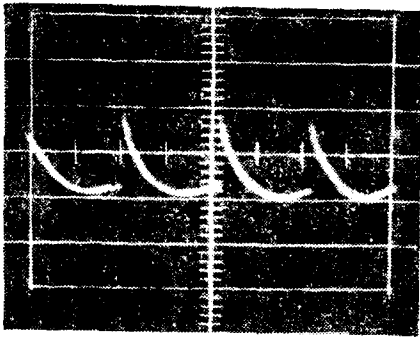
- $e$  電動機 端子電壓
- $i$  電動機 負荷電流
- $i_1$  電動機 全電流
- $\lambda$  電動機 磁束鎖交
- $W_m'$  電動機 magnetic coenergy
- $T$  電動機 토크
- $\delta$  負荷角
- $V$  인버터 直流電壓
- $R$  電動機 卷線抵抗
- $R_m$  電動機 鐵損 等價抵抗
- $L$  電動機 인덕턴스
- $C$  轉流 콘덴서
- $i_c$  轉流 콘덴서의 電流
- $C_s$  平滑 콘덴서
- $\theta$  回轉子回轉角度
- $f$  인버터 周波數
- $i_s$  인버터 電流
- $R_s$  인버터 抵抗
- $L_s$  인버터 인덕턴스



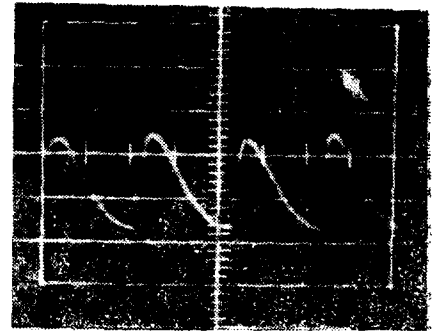
(c)

그림 12.  $V=125[V]$ ,  $L_s=0[H]$ ,  $f=50[Hz]$  일 때의 電動機無負荷特性曲線(實測)  
 Fig. 12. Experimental running characteristics at no load.  
 $V=125[V]$ ,  $L_s=0[H]$ ,  $f=50[Hz]$

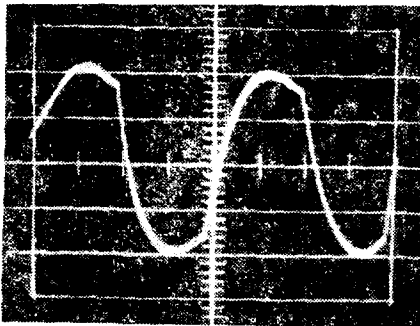
附 錄



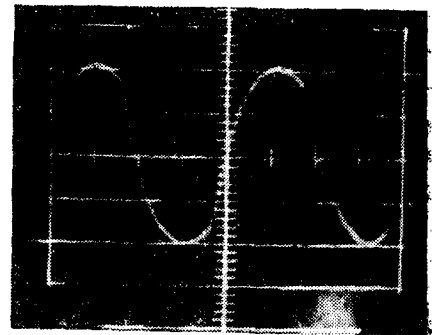
(a)



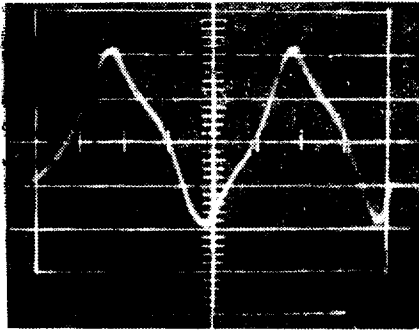
(a)



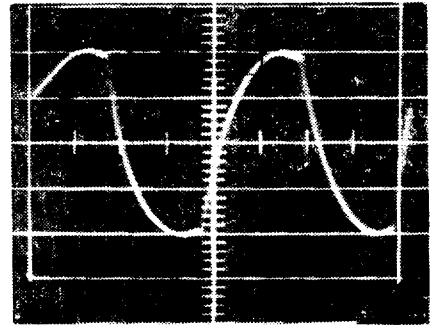
(b)



(b)



(c)

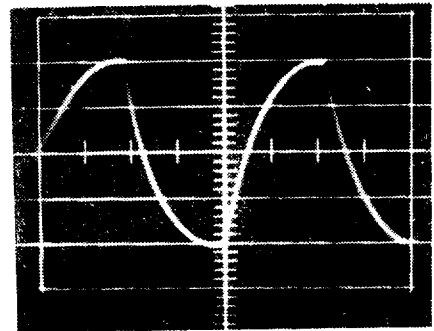


(b)

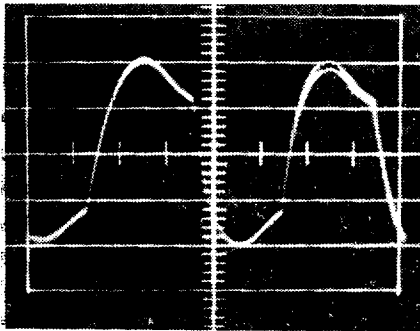
그림 13.  $V=125[V]$ ,  $L_s=0.0942[H]$ ,  $f=50[Hz]$   
일 때의 電動機無負荷特性曲線

Fig. 13. Experimental running characteristics  
at no load.

$V=125[V]$ ,  $L_s=0.0942[H]$ ,  $f=50[Hz]$ .



(c)



(a)

그림 14. 周波數變化에 따른 電動機端子電壓波形  
(a) 40[Hz], (b) 60[Hz], (c) 70[Hz].

Fig. 14. Wave forms of motor terminal voltage  
due to frequency change.

(a) 40 [Hz], (b) 60 [Hz], (c) 70 [Hz].