

S.C.R.에 의한 單相誘導電動機의 運轉特性에 關해서

A Study on the Running Characteristics of the Single Phase Induction Motor by S.C.R.

元 種 洙*
(Jong Swoo Won)

[ABSTRACT]

In recent years the development of the SCR has made possible the control of the power system. It is one example that the speed control of the induction motor can be done by changing the frequency with the S.C.R.

This paper is devoted primarily to a study of the running characteristics of the single phase induction motor through the experimental and theoretical methods when the speed of the motor is controlled by varying the conduction period in current with S.C.R. under the constant frequency.

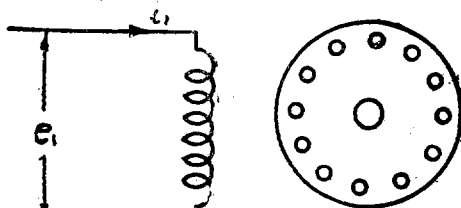
We conclude from the experiments that the adjustment of the phase angle in current is equivalent to the change of the supply voltage to the motor. Therefore, the speed control of the motor such as a fan duty motor is possible by this methods.

[1] 序 論

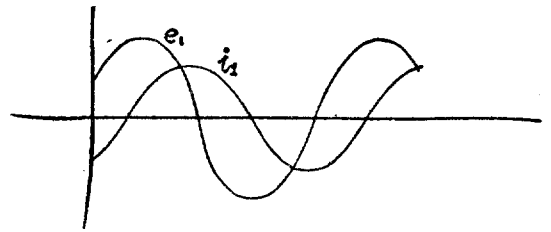
從來의 電力制御系統에서는 Thyatron은 電流容量이 적고 效率도 좋지 못하여 많은 電力을 要求하는 制御系統에는 거의 使用되지 못하였으나 近來에 와서 S.C.R.의 發達은 大電力系統의 制御를 可能케 하였다. 其中의 한 例로서 誘導電動機의 速度制御를 들수 있다. 即 S.C.R.을 利用한 周波數變換器를 使用하는 速度制御와 電源의 周波數는 一定하게 維持하고 단지 電流가 흐르는 時間을 變化하여 調整하는 두 方法이 있으며 前者는 回路가 복잡하고 價格이 高價인 반면 後者는 回路가 簡單하고 價格이 廉價이므로 特殊한 負荷(例 送風기)를 가진 單相誘導電動機의 運轉에 매우 適合한 回路라고 생각되어 本論文에서는 이 回路에 對한 運轉特性을 取扱하였다.

[2] 理 論

그림 1-(a)와 같이 單相誘導電動機의 一次卷線에



(a) 單相誘導電動機



(b) 單相誘導電動機의 一次電壓과 一次電流
그림 1

$$e_1 = E_m \sin(\omega t + \varphi_1) \quad (1)$$

의 起電力을 印加하여 回轉子가 스리프 s로 回轉하고 있을 때 一次電壓과 一次電流와의 關係는 그림 1-(b)와 같다. 그리고 여기서 起動卷線回路는 생략하였다.

이때 等價回路를 그리면 그림 2와 같이 된다. 여기서

- r_{1m} : 一次卷線抵抗
- x_{1m} : 一次漏洩리액턴스
- r_2 : 二次卷線抵抗
- x_2 : 二次漏洩리액턴스
- x_ϕ : 磁化리액턴스

다음 그림 3과 같이 一次卷線에 두개의 S.C.R.을 연결하고 Gate의 入力位相을 조정하여 그의 導電角(conduction starting angle)을 α 로 하였을 때 電壓, 電流관계는 그림 4와 같이 된다. 一次電流에 의한 S.C.R.의 電壓降下를 無視하면

*正會員: 서울大學校工科大學工業教育學科

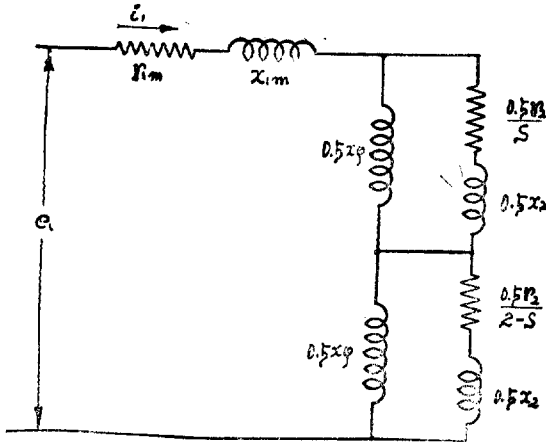


그림 2 單相誘導電動機의 等價回路
Fig. 2 Equivalent circuit of single phase induction motor

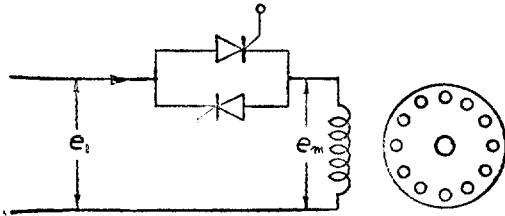


그림 3 實驗回路圖
Fig. 3 Connection diagram in the experiment

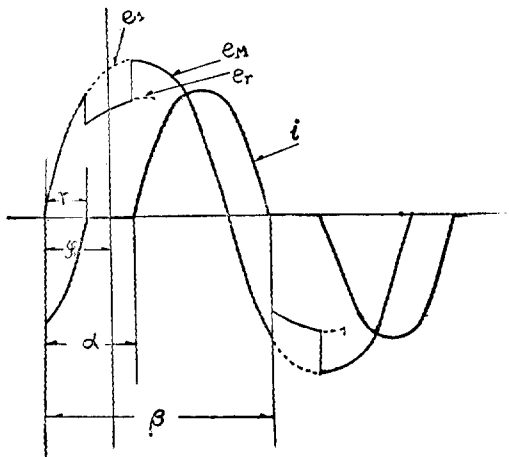


그림 4 導電角이 α 일 때 電壓電流
Fig. 4 Current and voltage curves for the case when the conduction starting angle is α .

$$\left. \begin{aligned} e_M = e_1 = E_m \sin(\omega t + \varphi_1), \quad \alpha - \varphi_1 \leq \omega t \leq \beta - \varphi_1 \\ e_M = e_r \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

여기서 e_r 는 一次電流가 零이 되는 瞬間 二次(回轉子) 卷線에 貯蓄된 $\frac{1}{2} L_2 I_2^2$ 의 에너지에 依하여 一次卷線에 誘起되는 電壓이다. 卽 二次電流 i_2 및 空隙磁束 ϕ_2 는 다음式과 같다.

$$\left. \begin{aligned} i_2 &= I_2 e^{-r_2 t / L_2} \\ \phi_2 &= \phi_2 e^{-r_2 t / L_2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

磁束 ϕ_2 는 回轉子와 같이 回轉하므로 一次誘起電壓 e_r 는 $e_r = e_{rs} + e_{rT}$ 이다. e_{rs} 는 ϕ_2 의 回轉에 依한 速度起電力(Speed EMF)이며 回轉子の 同期速度를 ω_s , 回轉子の 回轉速度를 ω_r 라하면

$$\left. \begin{aligned} e_{rs} &= \frac{\omega_r}{\omega_s} E_{rm} e^{-r_2 t / L_2} \sin(\omega_r t + \varphi_2) \\ \omega_r &= \omega_s (1 - s) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

이 되고 E_{rm} 은 回轉子가 同期速度로 回轉한다고 생각할 때 一次에 誘起되는 電壓이며 二次抵抗이 적은 경우에는 供給電壓보다 多少 작은 값이다. 또 e_{rT} 는 ϕ_2 의 減衰에 依한 變壓起電力(Transformer EMF)이며 一次卷線과 二次卷線사이의 相互인덕턴스를 M 라 하면

$$\begin{aligned} e_{r1} &= M \frac{di_2}{dt} \\ &= - \frac{Mr_2}{L_2} I_2 e^{-r_2 t / L_2} \\ &= - E_{rT} e^{-r_2 t / L_2} \end{aligned} \quad (6)$$

이며 二次抵抗이 적은 경우에는 無視된다. $\alpha - \varphi_1 \leq \omega t \leq \beta - \varphi_1$ 間에 一次回路에 흐르는 電流는 아래의 微分方程式을 滿足한다.

$$e_M + e_{rs} + e_{rT} = L \frac{di_1}{dt} + R i_1 \quad (7)$$

一般으로 誘導電動機는 二次抵抗이 적으므로 e_{rT} 를 無視하면

$$\begin{aligned} E_m \sin(\omega t + \varphi_1) + \frac{\omega_r}{\omega_s} e^{-r_2 t / L_2} E_{rm} \sin(\omega_r t + \varphi_2) \\ = L \frac{di_1}{dt} + R i_1 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서

$$\begin{aligned} R &= r_{1m} + 0.5R_f + 0.5R_b \\ \omega L &= x_{1m} + 0.5X_f + 0.5X_b \\ R_f &= \frac{x_\varphi^2}{x_{22} s Q_2 + 1/s Q_2} \\ X_f &= \frac{x_2 x_\varphi}{x_{22}} \frac{R_f}{s Q_2} \end{aligned}$$

$$R_b = \frac{r_2}{2-s} \left(\frac{x_\varphi}{x_{22}} \right)^2$$

$$X_b = \frac{x_2 x_\varphi}{x_2} + \frac{R_b}{(2-s)Q_2}$$

$$x_{22} = x_2 + x_\varphi$$

$$Q_2 = \frac{x_{22}}{r_2}$$

이다.

(8)式으로 부터 電流를 求하면

$$i_1(t) = \frac{E_m \omega}{L(a_0^2 + \omega^2)^{\frac{1}{2}}} \left\{ \frac{a_0 - a_3}{a_3^2 + \omega^2} \epsilon^{-a_3 t} \right. \\ \left. + \frac{1}{\omega} \left(\frac{a_0^2 + \omega^2}{a_3^2 + \omega^2} \right)^{\frac{1}{2}} \sin(\omega t + \phi_1) \right\} \\ + \frac{\omega_r}{\omega} \frac{E_{r_m}}{L} \frac{\omega_r}{\{(a_1 - a_2)^2 + \omega_r^2\}^{\frac{1}{2}}} \\ \times \left\{ \frac{a_1 - \beta}{(a_2 - a_3)^2 + \omega_r^2} \epsilon^{-\beta t} \right. \\ \left. + \frac{1}{\omega_r} \left\{ \frac{(a_1 - a_2)^2 + \omega_r^2}{(a_3 - a_2)^2 + \omega_r^2} \right\}^{\frac{1}{2}} \epsilon^{-\alpha t} \sin(\omega_r t + \phi_2) \right\} \quad (9)$$

이다.

여기서

$$a_0 = \frac{\omega}{\tan \varphi_1}$$

$$a_1 = \frac{\omega_r}{\tan \varphi_2} + a_2$$

$$a_2 = \frac{r_2}{L_2}, \quad a_3 = \frac{R}{L}$$

$$\phi_1 = \varphi_1 - \tan^{-1} \frac{\omega}{a_3}$$

$$\phi_2 = \varphi_2 - \tan^{-1} \frac{\omega_r}{a_3 - a_2}$$

그러므로 一次電流의 實効值 I_1 은

$$I_1 = \sqrt{\frac{\omega}{\pi} \int_{(\alpha - \varphi_1)/\omega}^{(\beta - \varphi_1)/\omega} i_1^2(t) dt} \quad (10)$$

이 된다.

電動機에 加해진 電壓의 實効值 E_1 은

$$E_1 = \sqrt{\frac{\omega}{\pi} \int_{(\alpha - \varphi_1)/\omega}^{(\beta - \varphi_1)/\omega} E_{m1}^2 \sin^2(\omega t + \varphi_1) dt} \quad (11)$$

이다. 다음에 電動機의 平均入力 W_1 은

$$W_1 = \frac{\omega}{\pi} \int_{(\alpha - \varphi_1)/\omega}^{(\beta - \varphi_1)/\omega} i_1(t) e_1(t) dt \quad (12)$$

또 一次力率 $\cos \gamma$ 는

$$\cos \gamma = \frac{W_1}{E_1 I_1} \quad (13)$$

이 된다.

토크 T 는

$$T = \frac{0.5}{\omega_s} I_1^2 (R_f - R_b) \quad (14)$$

이다. 效率 η 는

$$\eta = \frac{\omega_r T}{W_1} = \frac{(1-s)\omega_s T}{W_1} \quad (15)$$

이다.

[3] 實 驗

(1) 負荷試驗

使用한 電動機는 115V $\frac{3}{4}$ HP, 60 ∞ 單相誘導電動機

이며 S.C.R. 은 OC41 을 使用하였다.

電動機定數는

$$r_{1m} = 0.538 [\Omega]$$

$$x_{1m} = 0.803 \quad "$$

$$r_2 = 0.828 \quad "$$

$$x_2 = 0.803 \quad "$$

$$x_\varphi = 18.81 \quad "$$

이고 토크는 分數馬力電動力計(Fractional horse power dynamometer)로 測定하였다. S.C.R. 의 導電角(Conduction starting angle)을 變化시켰을 때의 各量들은 圖示하면 다음과 같다. 그림 5. 그림 6. 그림 7에서 실선은 실측치이고 "△"는 各各式 (9), (12), (14), (15)로부터 計算한 理論值이다. 그림 8은 $\alpha = 90^\circ$, Slip = 0.04 $T_L = 4[N-m]$ 일때의 電壓曲線(a), 電流曲線(b)을 各各 圖示한다.

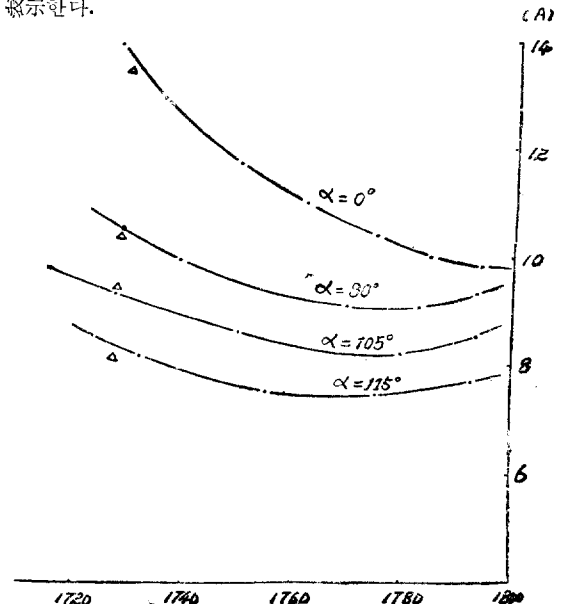


그림 5 速度—一次電流

Fig. 5 Speed—primary current characteristics

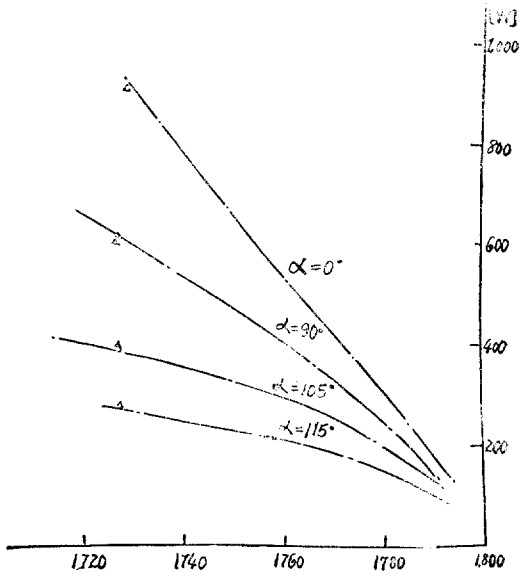


그림 6 速度—一次入力
Fig. 6 Speed—primary input characteristics

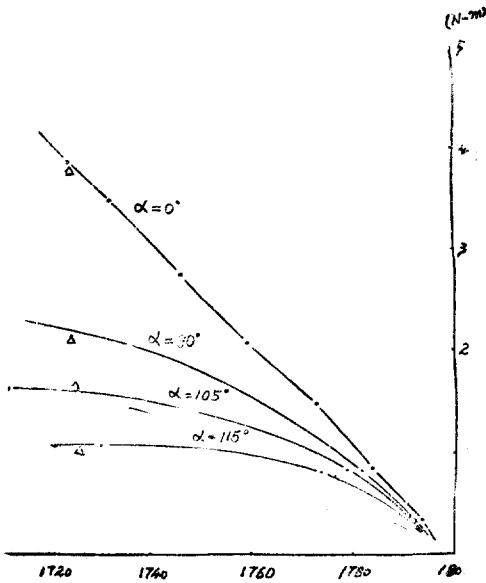


그림 7 速度—토크
Fig. 7 Speed—torque characteristics

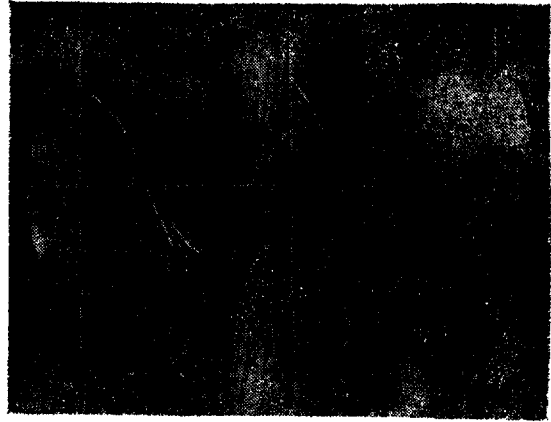


그림 8-(a) $\alpha=90^\circ$, Slip=0.04 $T_L=4[N-m]$ 에서
의 電壓曲線
Fig. 8-(a) Voltage curve at $\alpha=90^\circ$, slip=0.04
and $T_L=4[N-m]$

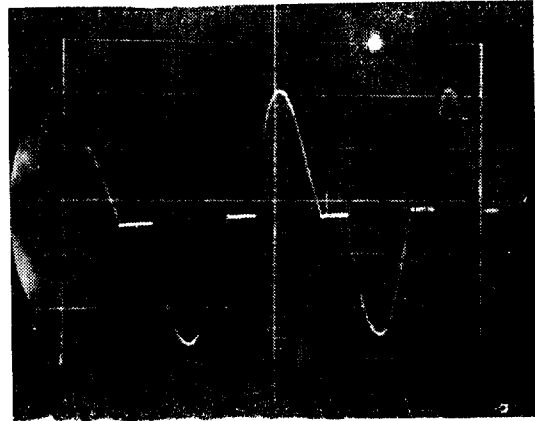


그림 8-(b) $\alpha=90^\circ$, Slip=0.04 $T_L=4[N-m]$ 에서
의 電流曲線
Fig. 8-(b) Current Curve at $\alpha=90^\circ$, slip=0.04
and $T_L=4[N-m]$

k	鐵損 (W)
0 ~ 15°	0.5
15 ~ 30°	2.0
30 ~ 45°	5.1
45 ~ 60°	10.0
60 ~ 75°	12.2
75 ~ 90°	15.2

그림 9. 導電角變化時 鐵損變化例
Fig. 9. An example of iron loss variation for the case
when conduction starting angle is varied.

(2) 鐵損試驗

S.C.R.의 導電角이 變化함에 따라 電動機의 固定子에 電壓이 印加되지 않는 期間이 變化하므로 固定子 鐵心の

鐵損도 變化한다.

그림 9는 導電角을 變化 시켰을때의 鐵損의 變化를 測定한 것이다.

無負荷損失은 120[W]이고 그중 鐵損 90[W], 風損 및 機械損은 30[W]이다.

(4) 檢 討

(1) 數值計算例

(a) 電流計算

負荷의 토크 4[N-m], 回轉子 스리프 0.04, S.C.R.의 導電角 90°일때 式(9)의 電流를 各項別로 그려보면 그림(10)과 같다. 이 그림중 曲線(5)는 全體合成電流이다. 式(10)에 依하여 電流의 實効值를 計算하면

$$I = \sqrt{\frac{333}{3.14}} = 10.3[A]$$

實測值는 10.2[A]이다. [그림 (8) 참조]

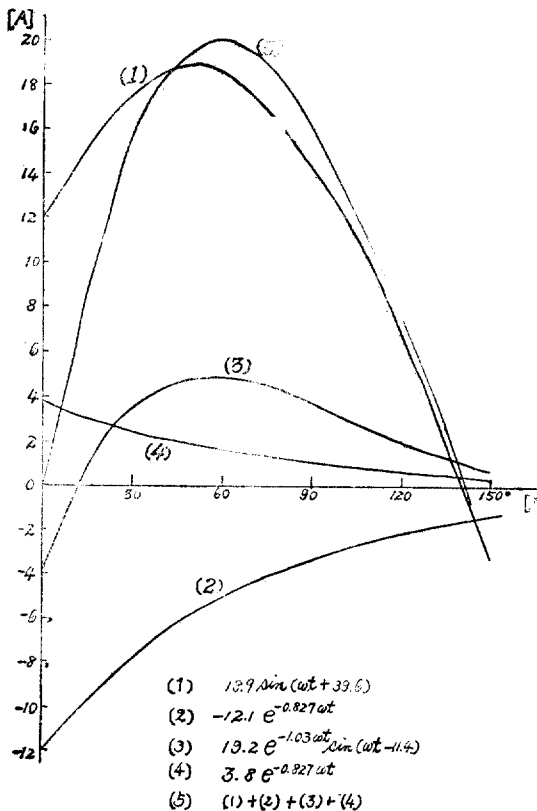


그림 10 電流의 計算例

Fig. 10 Example of calculated current values.

(b) 入力計算

부하의 토크 4[N-m], 回轉子 스리프 0.04, S.C.R.의

導電角 90° 일때 電力을 그려보면 그림 11과 같다. 이 때 平均電力을 求하면

$$W = 537 [W]$$

이다. 電流가 흐르지 않는 期間은 $33^\circ < \omega t < 90^\circ$ 이고 前節서 얻은 結果를 利用하면 鐵損, 風損 및 機械損은 79 [W]이다.

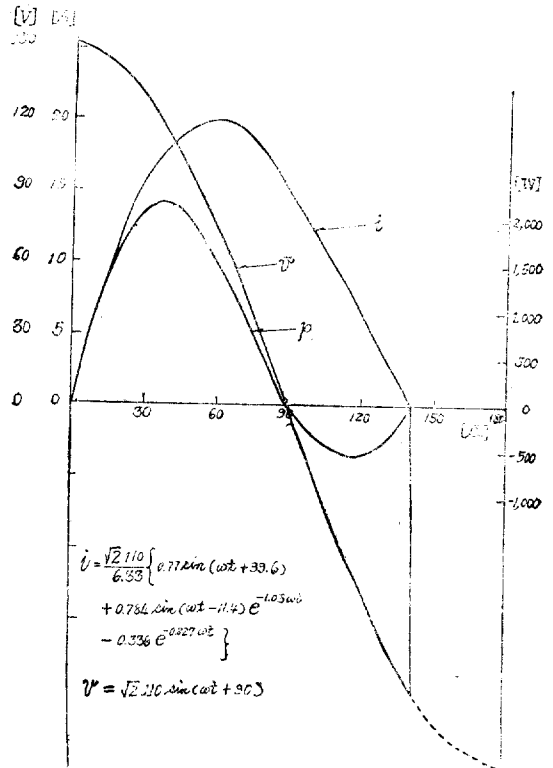


그림 11 電力計算例

Fig 11. Example of calculated power values

그러므로 全體入力은 616[W]이고 實測值는 617[W]이다.

(c) 토크計算

위의 경우에 式(14)로 토크를 計算하면

$$T = \frac{0.5}{188.5} \times (10.3)^2 (4.5 - 0.19) = 2.36 [N-m]$$

이며 實測值는 2.45[N-m]이다.

(2) 토크-速度特性

그림 12와 같이 S.C.R.의 Gate 入力位相을 調整하여 電壓의 導電角을 변화 시켰을때의 토크-速度特性은 誘導電動機에 印加한 電壓의 크기를 變化시킨 토크-速度特性과 비슷할것을 알 수 있다. 그러므로 T₁과 같이 일정

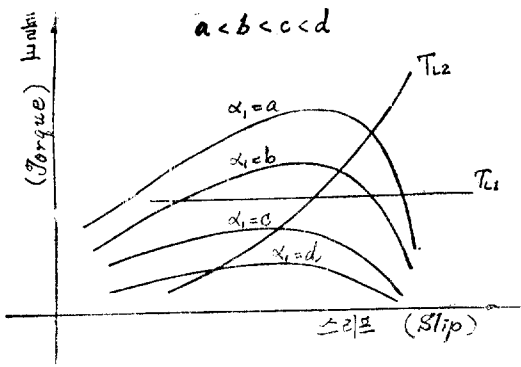


그림 12 導電角 α 變化時 토크-Slip 曲線과 負荷曲線
 Fig 12. Torque-slip Characteristics and load characteristics for the case when conduction starting angle is varied.

토크負荷에 對하여는 速度制御를 할수없으나 T_{L2} 와 같은 토크特性을 가진 負荷에 對해서는 導電角을 變化시키어 速度制御를 連續的으로 할수 있음을 알 수 있다.

[5] 結 論

(1) 本論에서와 같이 S.C.R. 에 依한 單相誘導電動機

의 荷運轉特性은 從來의 方法으로 求한 電動機定數를 써서 本論에서 擇한 解析法으로 特性을 計算하면 電流, 電力 토크特性들이 實驗値와 一致함을 알 수 있다.

(2) 이 特性中 토크-速度特性은 S.C.R. 回路의 電流位相을 調整하므로써 變化하는데 이는 마치 電源電壓變化와 같은 結果로 나타났다. 그러므로 線동기 같은 負荷의 速度調整에 있어서는 電壓變化法이나 周波數變換法보다 이 方法이 더 適合하리라고 思料된다.

(3) 一定토크 負荷에 對하여 導電角을 變化시켰을 경우 電壓이 걸리지 않는 期間中의 鐵損減少에 依하여 效率이 改善된다.

끝으로 本研究에 많은 協力을 하여주신 本大學 黃熙隆 韓松曠 兩先生에게 深甚한 謝意를 表示하는 바이다.

[6] 參考文獻

- (1) 誘導機器 朴旻鎭教授著
- (2) Electric Machinery, 2nd edition, Fitzgerald & Kingsley McG. Hill.
- (3) 電動機制御工學 尾山純一 Ohm 社
- (4) 非同期機實回路理論 竹內壽太郎 Ohm 社
- (5) S.C.R. 와 그應用