

電機機械課程軟體的研製

The Development of Computer-Aided Instruction for Electric Machinery Courseware

吳添保 林睿源

Tian-Bao Wu Rwei-Yuan Lin

摘要

本文旨在討論如何利用電腦輔助教學(CAI)軟體來提升技術學院的電機機械課程及其實作能力。本程式使用 VB6.0 程式語言設計而成。該軟體完全以課堂所教的電機機械理論為基本架構，事先鍵入各種電機機械的簡易實驗數據，可以得到變壓器與旋轉電機的全盤模擬輸出特性曲線，據此，可與電機機械實習的量測輸出特性曲線做一比較，已達到「定性分析」的效果。

關鍵詞：電腦輔助教學，電機機械課程軟體，簡易實驗，輸出特性。

ABSTRACT

This paper mainly discusses the usage of the computer-aided instruction (CAI) on electric machinery courseware at the institute of technology level in order to improve the lecture quality as well as the implementing technology on electric machinery. The program was written in VB 6.0. This courseware system is fully based on the machinery theories taught in the lecture. If we key in transformer and machines' simple experimental data in advance, a set of general computer simulation results of machine characteristics can be obtained. This courseware system can be used to compare with the results that students measured in the laboratory.

Key Words: CAI, electric machinery courseware, simple experiments, output characteristics.

1. 前言

國外對於電機機械及其實習著重於大學方面課程之研究與改善[1-8]，國內大專相關課程之研究也偏重大學，對專科學校著墨較少[9,10]。由於技職體系的專業課程由能力本位教育轉為群集教育，無論專業理論或實務課程的上課時數均大為縮減，為了提升教學的品質，多數課程均配合電腦輔助教學的方式，來滿足未來國內產業走向高科技、精密工業的需求。

本文根據 83 年最新部訂標準[11] 的電機機械及其實習教學大綱，利用簡易的實習量測值，經由電機機械理論數學模式來模擬出各項電機機械(單/三相變壓器、三相感應電動機、直流電機與同

步電機)的阻抗參數值及全盤的特性曲線，以 VB6.0 程式語言設計出一套電機機械計算機輔助教學軟體，和已完成的『電機機械實習』課程的教學軟體[12,13]相互對照，已達到「定性分析」的目的，將可應用於電機機械實務教學。

2. 研究方法

研究步驟與方法如圖 1 所示。簡述如下：

- 1.蒐集文獻資料、設備資料與設計資料[14-22]，並建立電腦檔案。
- 2.電腦程式分析：包括圖、文資料建檔與軟體程式設計。
- 3.程式設計項目：如圖 2 所示，主要分四大項-六

個小項，分別為單/三相變壓器、三相感應電動機、三相同步發電機、三相同步電動機、直流發電機、直流電動機來計算其參數及繪製特性曲線圖。

4. 是否達到預期目標？：根據 3. 所提出的各大項繪製曲線，若曲線與理論不符則修改程式，直到曲線與理論相符。

3. 理論分析

電機機械的數學模式主要分四大項：1. 單/三相變壓器、2. 三相感應電動機、3. 三相同步發電機/電動機、4. 直流發電機/電動機。分述如下：

3.1 單/三相變壓器

3.1.1 阻抗參數的計算公式

由開、短路實驗已知 V_o 、 I_o 、 W_o 、 V_s 、 I_s 、 W_s 、 $(V_L)_{L-L}$ 、 $(V_H)_{L-L}$ 。公式號碼後方加一『b』為三相系統專用。未加『b』的號碼為單、三相兩用。

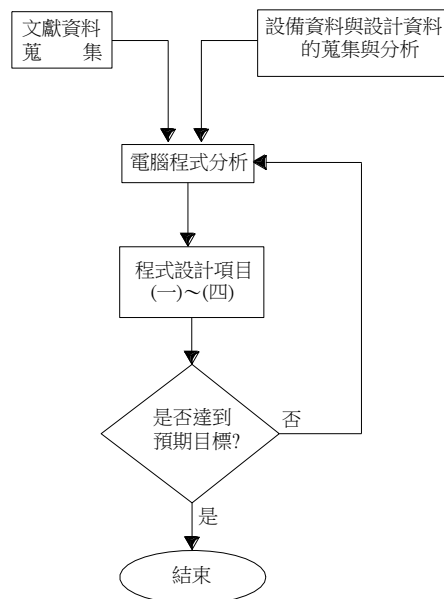


圖 1 研究步驟與方法的流程圖

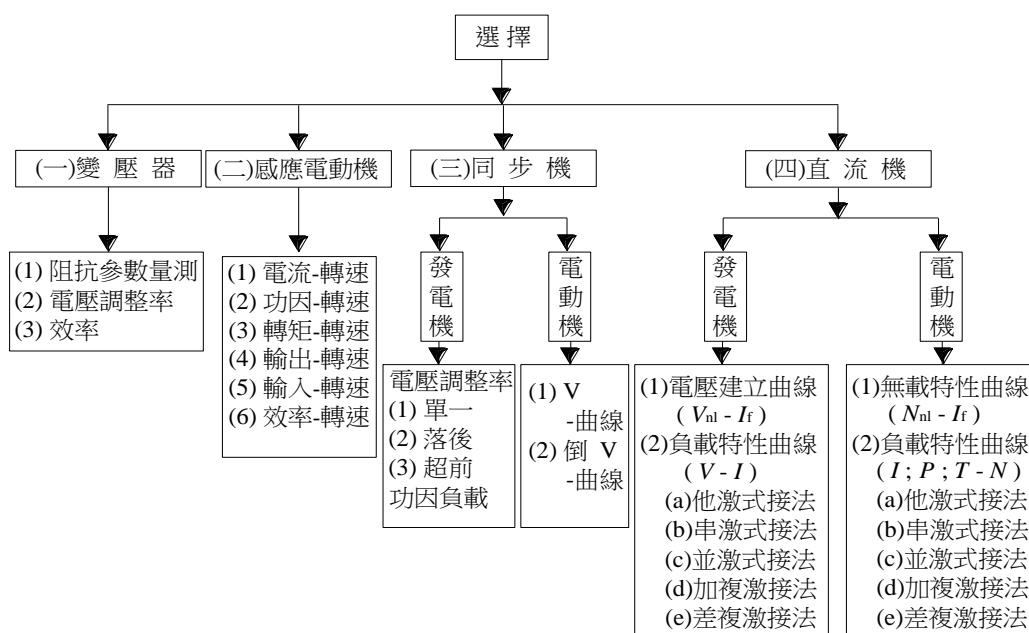


圖2 『電機機械』課程軟體內容規劃流程圖。

$$I_{c_L} = \frac{W_o}{V_o} \quad (1)$$

$$I_{c_L} = \frac{W_o}{\sqrt{3} \times V_o} \quad (1b)$$

$$I_{m_L} = \sqrt{I_o^2 - I_{c_L}^2} \quad (2)$$

$$Y_L = \frac{I_o}{V_o} \quad (3)$$

$$Y_L = \frac{\sqrt{3} \times I_o}{V_o} \quad (3b)$$

$$g_{c_L} = \frac{W_o}{V_o^2} \quad (4)$$

$$b_{m_L} = \sqrt{Y_L^2 - g_{c_L}^2} \quad (5)$$

$$\cos \theta_o = \frac{W_o}{V_o \times I_o} \quad (6)$$

$$\cos \theta_o = \frac{W_o}{\sqrt{3} \times V_o \times I_o} \quad (6b)$$

$$R_{eq_H} = \frac{W_s}{I_s^2} \quad (7)$$

$$R_{eq_H} = \frac{W_s}{3 \times I_s^2} \quad (7b)$$

$$Z_{eq_H} = \frac{V_s}{I_s} \quad (8)$$

$$Z_{eq_H} = \frac{V_s}{\sqrt{3} \times I_s} \quad (8b)$$

$$X_{eq_H} = \sqrt{Z_{eq_H}^2 - R_{eq_H}^2} \quad (9)$$

$$\cos \theta_s = \frac{W_s}{V_s \times I_s} \quad (10)$$

$$\cos \theta_s = \frac{W_s}{\sqrt{3} \times V_s \times I_s} \quad (10b)$$

3.1.2 效率特性曲線的計算公式(單位：pu)

在指定功率因數的情況下，來看效率與容量的關係。

$$a = \frac{(V_L)_{L-L}}{(V_H)_{L-L}} \quad (11)$$

$$I_{c_H} = a \times I_{c_L} \quad (12)$$

$$I_{m_H} = a \times I_{m_L} \quad (13)$$

$$Y_H = a^2 \times Y_L \quad (14)$$

$$g_{c_H} = a^2 \times g_{c_L} \quad (15)$$

$$b_{m_H} = a^2 \times b_{m_L} \quad (16)$$

$$Z_{eq_L} = a^2 \times Z_{eq_H} \quad (17)$$

$$R_{eq_L} = a^2 \times R_{eq_H} \quad (18)$$

$$X_{eq_L} = a^2 \times X_{eq_H} \quad (19)$$

$$I = \frac{S}{V} \quad (20)$$

$$P_{cu} = I^2 \times R_{eq} \quad (21)$$

$$P_{core} = V^2 \times g_c \quad (22)$$

$$\eta = \frac{S \times \cos \theta}{S \times \cos \theta + P_{cu} + P_{core}} \quad (23)$$

3.1.3 電壓調整率曲線的計算公式(單位：pu)

假設二次側電壓(V_s)為 1pu 的情況下，來看電壓調整率 VR 與電流的關係。

$$\frac{V_p}{a} = V_s + R_{eq} I_s + jX_{eq} I_s \quad (24)$$

$$VR = \frac{\left(\frac{V_p}{a} \right) - V_s}{V_s} \times 100\% \quad (25)$$

3.2 三相感應電動機

3.2.1 阻抗參數的計算公式

由無載、堵轉實驗已知 V_o 、 I_o 、 W_o 、 V_s 、 I_s 、 W_s 、 R_{1cold} 、 T_{cold} 。

$$I_c = \frac{W_o}{\sqrt{3} \times V_o} \quad (26)$$

$$g_c = \frac{\sqrt{3} \times I_c}{V_o} \quad (27)$$

$$I_m = \sqrt{I_o^2 - I_c^2} \quad (28)$$

$$b_m = \frac{\sqrt{3} \times I_m}{V_o} \quad (29)$$

$$Z_{eq} = \frac{V_s}{\sqrt{3} \times I_s} \quad (30)$$

$$R_{eq} = \frac{W_s}{3 \times I_s^2} \quad (31)$$

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} \quad (32)$$

$$R_{lhot} = R_{lcold} \times \frac{234.5 + T_{hot}}{234.5 + T_{cold}} \quad (33)$$

$$X_1 = X_2' = 0.5 X_{eq} \quad (34)$$

$$R_2' = R_{eq} - R_{lhot} \quad (35)$$

3.2.2 特性曲線的計算公式

計算公式請參閱附錄 A [23]三相感應電動機特性計算示意圖。

$$s = \frac{N_s - N_m}{N_s} \quad (36)$$

$$Z_2' = \sqrt{\left(\frac{R_2'}{s}\right)^2 - (X_2')^2} \quad (37)$$

$$g_2 = \frac{\left(\frac{R_2'}{s}\right)}{(Z_2')^2} \quad (38)$$

$$g = g_2 + g_c \quad (39)$$

3.3 三相同步發電機/電動機

3.3.1 三相同步發電機

(1) 阻抗參數的計算公式

由無載、短路實驗已知 E_{ao} 、 I_f 、 N 、 I_a 、 R_{a_cold} 、 T_{cold} 、 T_{hot} 。

$$b_2 = \frac{X_2'}{(Z_2')^2} \quad (40)$$

$$b = b_2 + b_m \quad (41)$$

$$Y = \sqrt{g^2 + b^2} \quad (42)$$

$$r_g = \frac{g}{Y^2} \quad (43)$$

$$r = R_1 + r_g \quad (44)$$

$$X_g = \frac{b}{Y^2} \quad (45)$$

$$X = X_1 + X_g \quad (46)$$

$$Z = \sqrt{r^2 + X^2} \quad (47)$$

$$I_1 = \frac{V_1}{Z} \quad (48)$$

$$P_{in} = 3 \times I_1^2 \times r \quad (49)$$

$$PF = \frac{r}{Z} \times 100 \quad (50)$$

$$P_{scl} = 3 \times I_1^2 \times R_1 \quad (51)$$

$$P_{core} = 3 \times I_1^2 \times \frac{g_c}{Y^2} \quad (52)$$

$$E_1 = V_1 - I_1(R_1 + jX_1) \quad (53)$$

$$I_2' = \frac{E_1}{\frac{R_2'}{s} + X_2'} \quad (54)$$

$$P_g = 3 \times I_2'^2 \times \frac{R_2'}{s} \quad (55)$$

$$P_{rcl} = s \times P_g \quad (56)$$

$$P_{out} = P_{in} - (P_{scl} + P_{core} + P_{rcl}) \quad (57)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (58)$$

$$Z_{eq} = \frac{E_{ao}}{\sqrt{3} \times I_a} \quad (59)$$

$$R_{a_hot} = R_{a_cold} \times \frac{234.5 + T_{hot}}{234.5 + T_{cold}} \quad (60)$$

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{a_hot}^2} \quad (61)$$

(2) 特性曲線的計算公式

由使用者自行鍵入功率因數：(a)固定 V_t 來看 E_a 與 I_a 的關係；(b)固定 E_a 來看 V_t 與 I_a 的關係；(c) 假設 V_t 為 1pu 的情況下來看電壓調整率與電樞電流的關係。

$$E_a = V_t + I_a(R_a + jX_s) \quad (62)$$

$$V_t = E_a - I_a(R_a + jX_s) \quad (63)$$

$$VR = \frac{E_{ao} - V_t}{V_t} \times 100\% \quad (64)$$

3.3.2 三相同步電動機

(1) 阻抗參數的計算公式(同三相同步發電機)

(2) 特性曲線的計算公式

$$P_{in} = \sqrt{3} \times V_t \times I_a \times \cos \theta \quad (65)$$

$$E_a = V_t - I_a(R_a + jX_s) \quad (66)$$

3.4 直流發電機/電動機

3.4.1 直流發電機

(1) 特性曲線的計算公式

(a)固定 V_t 來看 E_a 與 I_L 的關係；(b)固定 E_a 來看 V_t 與 I_L 的關係；(c)在這裡我們把磁通 Φ 與場電流 I_f 視為線性關係如(67)式所示。

$$E_a = K\Phi N = K f(I_f) N \quad (67)$$

(A) 他激式

$$E_a = V_t + I_a R_a = V_t + I_L R_a \quad (68)$$

$$V_t = E_a - I_a R_a = E_a - I_L R_a \quad (69)$$

(B) 分激式

$$E_a = V_t + I_a R_a = V_t + (I_f + I_L) R_a \quad (70)$$

$$V_t = E_a - I_a R_a = E_a - (I_f + I_L) R_a \quad (71)$$

(C) 串激式

$$V_t = E_a - I_a R_a = E_a - I_f R_a = E_a - I_L R_a \quad (72)$$

3.4.2 直流電動機

(1) 特性曲線的計算公式

(A) 他激式與分激式

令 $K\Phi$ 為 1, V_t 視為 1pu。

$$\omega = \frac{V_t}{K\Phi} - \frac{R_a}{(K\Phi)^2} T \quad (73)$$

$$T = K\Phi I_a \quad (74)$$

$$P_{out} = \omega \times T \quad (75)$$

(B) 串激式

$$\omega = K' \frac{V_t}{\sqrt{T}} \quad (76)$$

4. 研究結果

簡易的實習量測值,經由上節電機機械理論數學模式模擬出各項電機機械(單/三相變壓器、三相感應電動機、直流電機與同步電機)的阻抗參數值及全盤的特性曲線結果分述如下:

4.1 阻抗參數的計算結果

4.1.1 單/三相變壓器

變壓器需選擇三相或單相系統,再鍵入額定容量及高、低壓側之額定電壓以及開、短路實驗所量測的值,程式可計算變壓器等效電路換算至高壓側或低壓側的阻抗參數值,限於篇幅,請參附錄 B[23]的圖 B(1)所示。

4.1.2 三相感應電動機

三相感應電動機需鍵入機臺額定輸出、額定電壓、頻率、極數及無載實驗、堵住實驗及繞組實驗所量測的值,可計算出三相感應電動機等效電路中的各項阻抗參數值;若鍵入轉速值,則可計算出該轉速下的輸出轉矩、效率、輸出功率及輸入功率與電壓、電流和功因、轉差率,如圖 B(2)所示。

4.1.3 三相同步發電機/電動機

三相同步機需鍵入機臺額定輸出、額定容量、額定電壓、極數、頻率以及無載、短路實驗所量測到的值和電樞冷電阻值,可計算出同步阻抗、同步電抗及電樞熱電阻值,如圖 B(3)所示。

4.1.4 直流發電機/電動機

直流機需鍵入額定容量、額定輸出、額定電壓、額定電流、額定轉速及各項直流機的冷電阻值,和無載實驗固定點所量測的值,並可將冷電阻值轉換成熱電阻值,以及利用無載實驗固定點所量測的值,利用內插法來繪出電壓建立特性曲線,如圖B(4)所示。

4.2 全盤特性曲線的計算結果

三相感應電動機的全盤特性曲線圖如附錄 C[23]所示,因實驗設備的限制,無法提供全盤實測曲線供比較。各項電機機械模擬的『滿載特性』曲線圖和已完成的『電機機械實習』課程的『量測曲線圖』[12,13]相互對照,限於篇幅,僅列出三相感應電動機如圖3所示,其餘電機機械的『模擬』

與『量測』對照圖請參閱附錄D~附錄I[23]。

5. 結論與展望

5.1 結論

本文忽略電阻的溫升變化、磁場電流對磁通的非線性變化及電樞反應等，根據簡易量測實驗值求出等效電路的阻抗參數，完成電機機械理論分析的特性曲線模擬圖，並與已完成的『電機機械實習課程軟體(Windows 版)』的特性曲線實測圖作比較，已達成「定性分析」的效果。本文之具體成果為：

- (1)由簡易量測實驗值可利用軟體自動算出阻抗參數值。
- (2)本軟體可以讓使用者自行選擇想要看的電機機械等效電路圖。
- (3)由算出的阻抗參數值，可利用軟體模擬出全盤的特性曲線圖或局部的特性曲線圖。

5.2 展望

- (1)本文因時間關係先完成三種常用—他激式、分激式、串激式的直流電機，只完成加複激與差複激直流電機的等效電路，未完成特性曲線，仍有改善的空間。
- (2)本文一方面驗證電機機械理論模式「定性分析」的一般性，另方面透過實習量測的「定量分析」的特殊性來修正一般性的不足，並提供實務的經驗參考修正係數，擬將兩獨立的課程軟體整合為一應用軟體。

6. 誌謝

本文承蒙國科會科教處計劃編號 NSC 90—2815—C—131—007—S 之經費補助，謹致謝意。

7. 符號說明

a ：低壓端與高壓端的線電壓比(又稱匝比)

b_2 ：換算至一次側的二次電納(mho)

b 、 b_m ：空氣隙等效電納、磁化電納(mho)

b_{m_L} 、 b_{m_H} ：換算至低、高壓側的磁化電納(mho)

$\cos\theta$ ：功率因數

$\cos\theta_o$ ：變壓器開路實驗時的功率因數

$\cos\theta_s$ ：變壓器短路實驗時的功率因數

E_1 ：空氣隙的應電勢(volt)

E_a ：考慮電樞反應的合成感應電勢相量(volt)

E_a ：考慮電樞反應的合成感應電勢大小(volt)

E_{ao} ：無載感應電勢(volt)

g_2 ：換算至一次側的二次電導(mho)

g 、 g_c ：空氣隙的電導、鐵損電導(mho)

g_{c_L} 、 g_{c_H} ：換算至低、高壓側的鐵損電導(mho)

I ：線電流(pu)

I_1 ：感應機的線電流=相電流(amp)(等效 Y 接)

I'_2 ：感應機換算至一次側的二次電流(amp)

I_a ：直流機/同步機電樞電流相量(amp)

I_a ：直流機/同步機電樞電流(amp)

I_c ：感應機鐵損電流(amp)

I_{c_L} 、 I_{c_H} ：換算至低、高壓側的鐵損電流(amp)

I_f ：直流機/同步機激磁電流(amp)

I_L ：直流機負載電流(amp)

I_m ：感應機磁化電流(amp)

I_{m_L} 、 I_{m_H} ：換算至低、高壓側的磁化電流(amp)

I_o 、 I_s ：感應機無載電流、堵轉電流(amp)

I_o 、 I_s ：變壓器開路電流、短路電流(amp)

I_s ：變壓器二次側電流相量(pu)

K 、 K' ：常數(無單位)

N ：轉速(rpm)

N_s 、 N_m ：同步轉速、機械轉速(rpm)

P_{cu} 、 P_{core} ：變壓器銅損、鐵損(Watt)

P_g 、 P_{core} ：感應機氣隙功率與鐵損(watt)

P_{in} 、 P_{out} ：輸入、輸出功率(watt)

P_{rcl} 、 P_{scl} ：感應機轉子與定子繞組的銅損(watt)

PF ：功率因數(%)

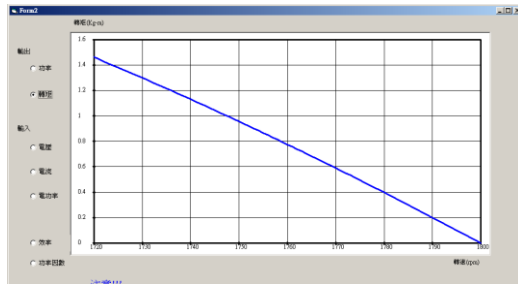
r ：感應機總等效電阻(ohm)
 r_g ：感應機空氣隙的等效電阻(ohm)
 R_1 ：感應機熱機時定子等效 Y 接每相電阻(ohm)
 R_{1cold} ：感應機冷機時定子等效 Y 接相電阻(ohm)
 R'_2 ：感應機換算後轉子等效 Y 接每相電阻(ohm)
 R_a ：直流機電樞電阻(ohm)
 R_{a_cold} ：同步機電樞冷電阻(ohm)
 R_{a_hot} ：同步機電樞熱電阻(ohm)
 R_{eq} ：感應機串聯分路等效總電阻(ohm)
 R_{eq_L} 、 R_{eq_H} ：換算至低、高壓側的等效電阻(ohm)
 s ：感應機轉差率(無單位)
 S ：變壓器容量(pu)
 T ：直流機輸出轉矩(nt-m)
 T_{cold} ：量測冷電阻時的周溫(°C)
 T_{hot} ：溫升後的溫度(°C)
 V ：變壓器線電壓(pu)
 V_1 ：感應機外加的端電壓相量(volt)
 $(V_L)_{L-L}$ 、 $(V_H)_{L-L}$ ：低、高壓端的線電壓(volt)
 V_o 、 V_s ：感應機無載電壓、堵轉電壓(volt)
 V_o 、 V_s ：變壓器開路電壓、短路電壓(volt)
 V_p 、 V_s ：變壓器一、二次側電壓相量(pu)
 V_t ：直流機端電壓(volt)
 V_t ：同步機等效 Y 接每相的端電壓相量(volt)
 VR ：電壓調整率(%)
 W_o 、 W_s ：感應機無載損失、堵轉損失(watt)
 W_o 、 W_s ：變壓器開路損失、短路損失(watt)
 X ：感應機總等效電抗(ohm)
 X_1 ：感應機定子等效 Y 接每相漏電抗(ohm)
 X'_2 ：感應機換算後轉子等效 Y 接相漏電抗(ohm)
 X_{eq} ：感應機串聯分路等效總電抗(ohm)
 X_{eq} ：同步機等效 Y 接每相的同步電抗(ohm)

X_{eq_L} 、 X_{eq_H} ：換算至低、高壓側的等效電抗(ohm)
 X_g ：感應機空氣隙的等效電抗(ohm)
 Y ：感應機空氣隙的等效導納(mho)
 Y_L 、 Y_H ：換算至低、高壓側的激磁導納(mho)
 Z ：感應機總等效阻抗(ohm)
 Z'_2 ：感應機換算至一次側的二次阻抗(ohm)
 Z_{eq} ：感應機串聯分路等效總阻抗(ohm)
 Z_{eq} ：同步機等效 Y 接每相的同步阻抗(ohm)
 Z_{eq_L} 、 Z_{eq_H} ：換算至低、高壓側的等效阻抗(ohm)
 Φ ：直流機磁通(web)
 η ：效率(%)
 ω ：角速度(rad/s)

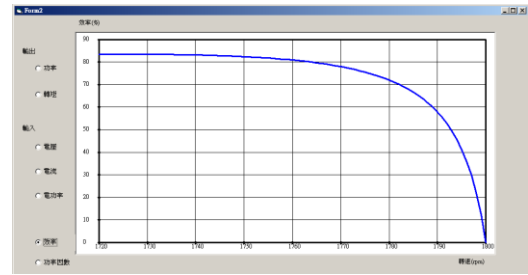
8. 參考文獻

1. Linke, S., J. S. Torgenson and J. Au (1989), "An interactive computer-graphics program to aid instruction in electric machinery," *IEEE J. Comput. Applicat. In Power*, Vol. 2, No. 3.
2. Smolleck, H. A. (1990), "Modeling and analysis of the induction machine: A computational experimental approach," *IEEE Trans. Power Syst.* Vol. 5, No.2.
3. Mohammad, O. A. and H. W., Gordon (1991) "Analysis of rotating machine concepts in the energy conversion laboratory from experimental data," *IEEE Trans. Power Syst.* Vol. 11, No. 5.
4. Fardanesh, B (1992). "Computer aided instruction of rotating electric machines via animated graphics," presented at the 1992 IEEE winter power meeting.
5. Nehrir, M. H. and V. Gerez(1991), " A method to teach an undergraduate course on electric machinery with Introduction to power systems, " in proc. 1991 annual ASEE conf..
6. Ranade, S. J. (1989), "An automated data acquisition and processing system using personal

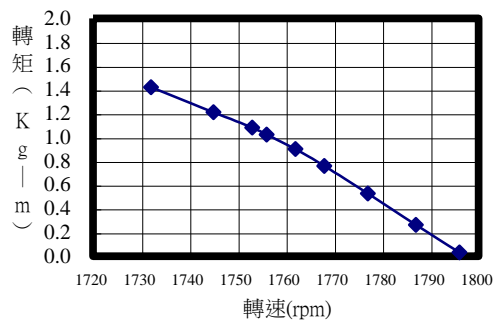
- computers for an undergraduate electric machinery laboratory, "IEEE Trans. Power Syst., Vol. 4, No. 1.
7. Nehrir, M. H., A. J. Odernann and B. D. Bowen(1990), "A microcomputer microprocessor based DC motor speed controller for undergraduate electric machinery laboratory," *IEEE Trans. Educ.* Vol. 33, No. 4.
8. Nehrir, M. H., F. Fatehi and V. Gerez (1995), "Computer modeling for enhancing instruction of electric machinery," *IEEE Trans. Educ.* Vol.38, No. 2, pp.166-170.
9. 康自立、蕭錫錡(1994)，「技職教育課程基礎的理論研究」，國科會 83 年度科學教育專題研究，頁 1-12 頁。
- 10.張天津(1994)，「專科學校電機工程科畢業生就業技術能力之分析研究」，國科會 83 年度教育專題研究，頁 109-116 頁。
- 11.教育部技職司(1994)，五年制專科學校工業類電機科目表暨教材大綱，臺北。
- 12.吳添保(1998)，「提升電機機械實習實作能力的電腦輔助教學」，技術學刊，第十三卷，第四期，頁 677~683。
- 13.吳添保(1997)，電機機械實習(上)、(下) (附系統磁片)，全華圖書公司，臺北。
- 14.Chapman, S. J. (1991), *Electric Machinery Fundamentals*, 2nd Ed., McGraw-Hill, New York, N. Y.
- 15.Kosow, I. L. (1991), *Electric Machinery and Transformers*, 2nd Ed., Prentice-Hall, New Jersey, N. J.
- 16.Wildi., T. (1991), *Electrical Machines, Drives, and Power Systems*, 2nd Ed., Prentice-Hall, New Jersey, N. J.
- 17.McPherson, G. and R. D. Laramore(1990), *An Introduction to Electrical Machines and Transformers*, John Wiley and Sons, New York, N. Y.
- 18.Veinott, C. G. (1959), *Theory and Design of Small Induction Motors*, McGraw-Hill, New York, N. Y.
- 19.Kuhlmann, J. H. (1968), *Design of Electrical Apparatus*, 3rd Ed., John Wiley and Sons, New York, N. Y.
- 20.陳國堂(1994)，電機機械實習，再版，全華圖書公司，臺北。
- 21.劉昌煥主編(2002)，電機機械，二版，東華書局，臺北。
- 22.仲成儀器編輯部(1995)，電機機械實習，全華圖書公司，臺北。
- 23.林睿源(2002)，「電機機械課程軟體的研製」，國科會 90 年度大專學生參與專題研究計畫研究成果報告，臺北。



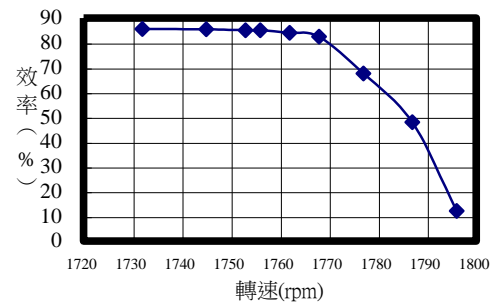
(a) 感應電動機的轉矩－轉速模擬曲線



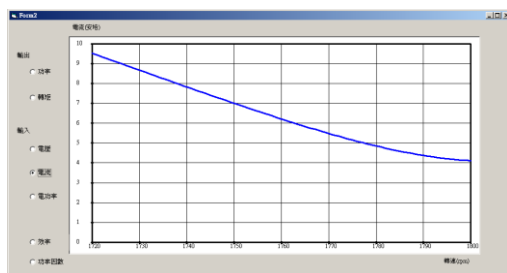
(e) 感應電動機的效率－轉速模擬曲線



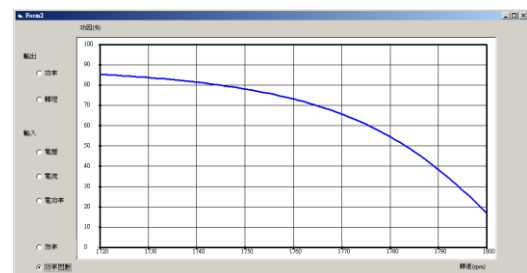
(b) 感應電動機的轉矩－轉速量測曲線



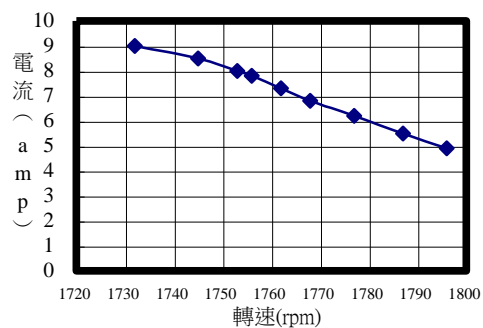
(f) 感應電動機的效率－轉速量測曲線



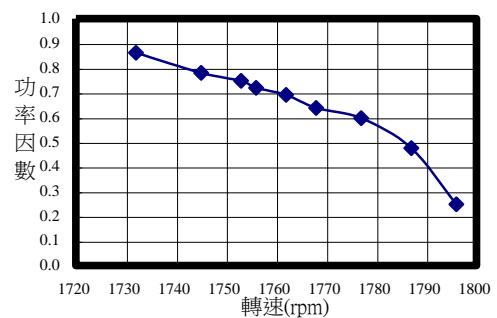
(c) 感應電動機的電流－轉速模擬曲線



(g) 感應電動機的功率因數－轉速模擬曲線



(d) 感應電動機的電流－轉速量測曲線



(h) 感應電動機的功率因數－轉速量測曲線

圖3 三相感應電動機模擬『滿載特性』曲線－『量測曲線』的相互對照圖。

圖3(續) 三相感應電動機模擬『滿載特性』曲線－『量測曲線』的相互對照圖。

9. 附錄

附錄 A 三相感應電動機特性計算示意圖[23]

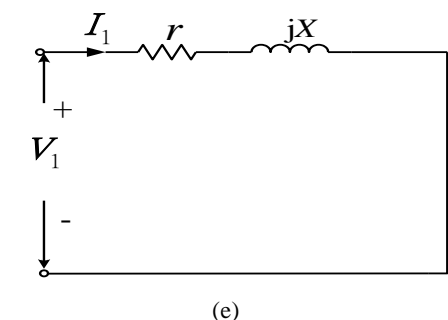
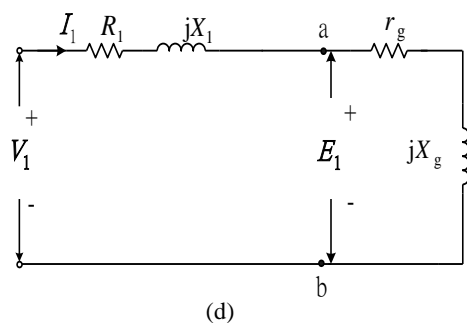
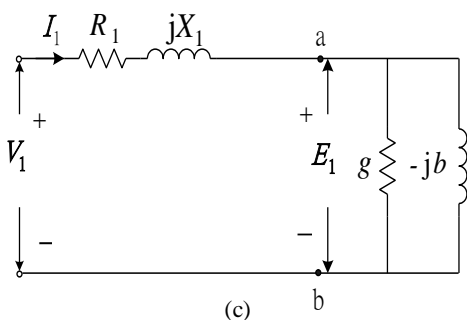
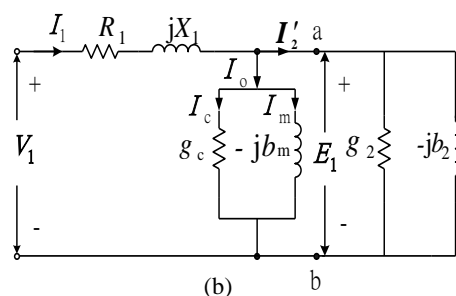
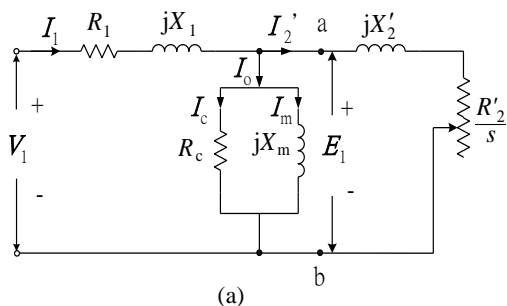


圖 A 三相感應電動機特性計算示意圖。

附錄B 各項電機機械的阻抗參數計算結果畫面[23]

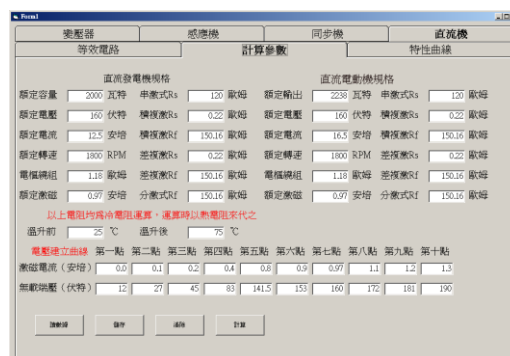
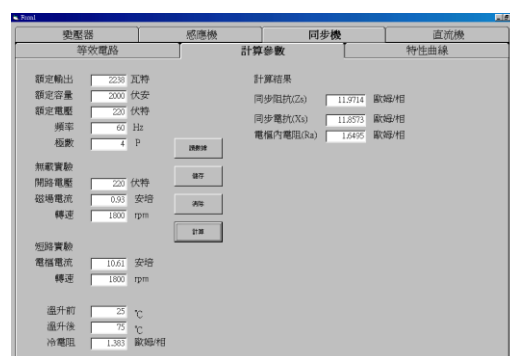
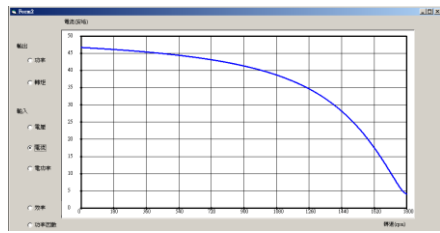
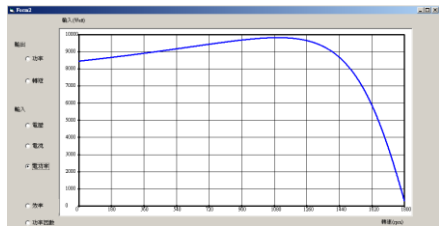


圖 B 各項電機機械阻抗參數的計算結果畫面。

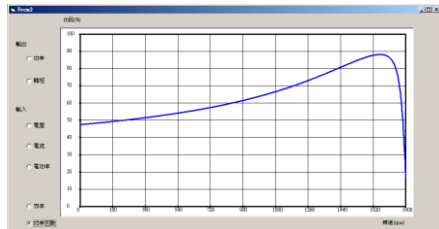
附錄 C 三相感應電動機的全盤特性曲線圖[23]



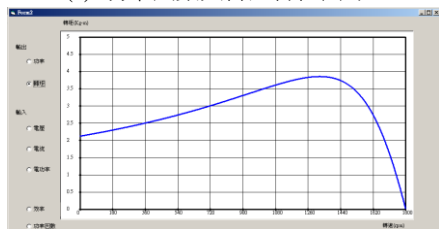
(a) 電流與轉速特性曲線



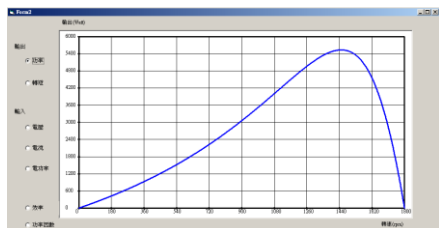
(b) 輸入功率與轉速特性曲線



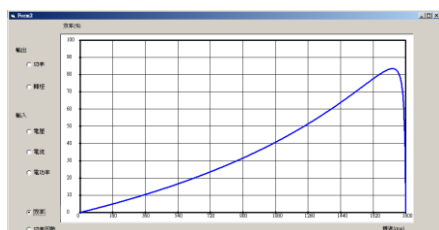
(c) 功率因數與轉速特性曲線



(d) 轉矩與轉速特性曲線



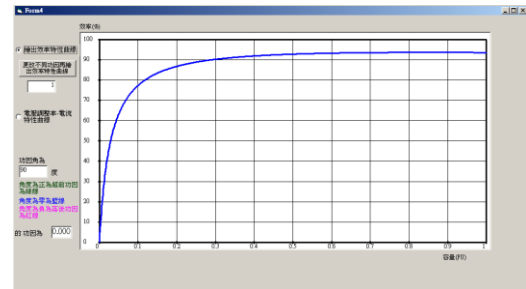
(e) 輸出功率與轉速特性曲線



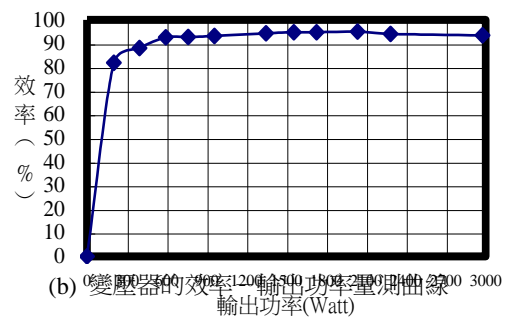
(f) 效率與轉速特性曲線

圖C 三相感應電動機的『全盤特性』曲線模擬圖。

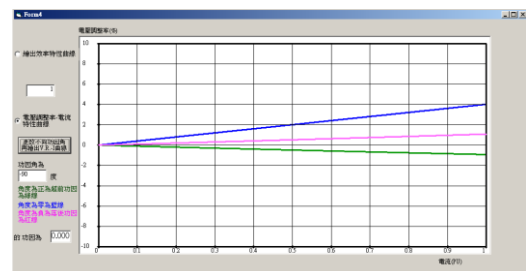
附錄D 單/三相變壓器的模擬與量測對照圖[23]



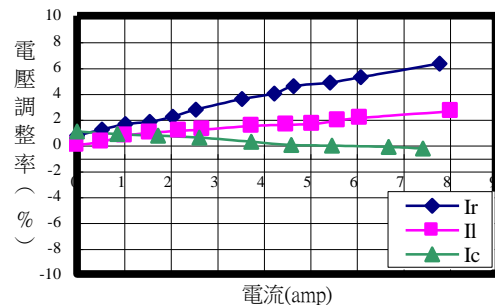
(a) 變壓器的效率－輸出功率模擬曲線



(b) 變壓器的效率－輸出功率量測曲線



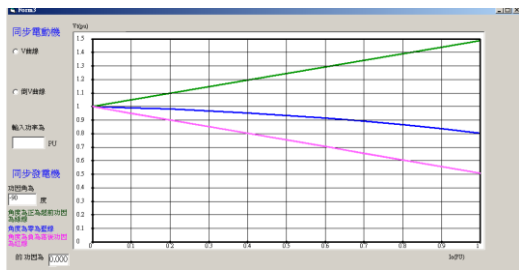
(c) 變壓器的電壓調整率－電流模擬曲線



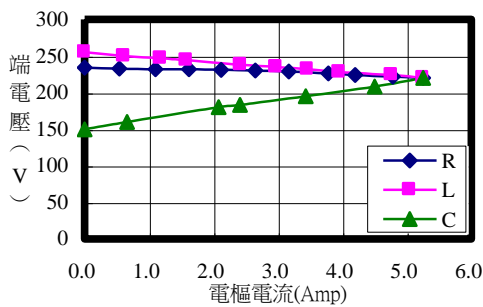
(d) 變壓器的電壓調整率－電流量測曲線

圖D 單/三相變壓器模擬『滿載特性』曲線－『量測曲線』的相互對照圖。

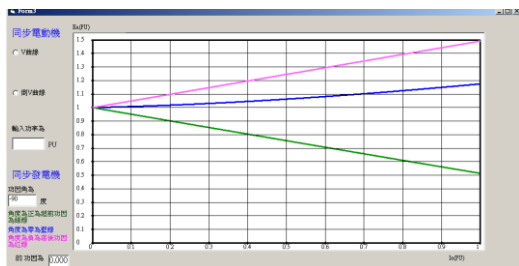
附錄E 三相同步發電機的模擬與量測對照圖[23]



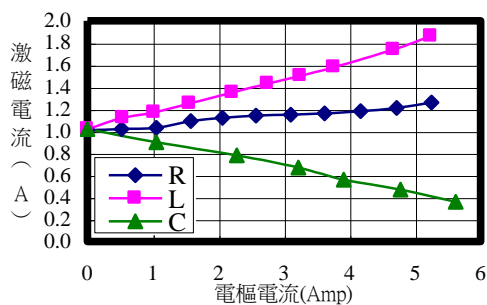
(a) 同步發電機的端電壓－電樞電流模擬曲線



(b) 同步發電機的端電壓－電樞電流量測曲線



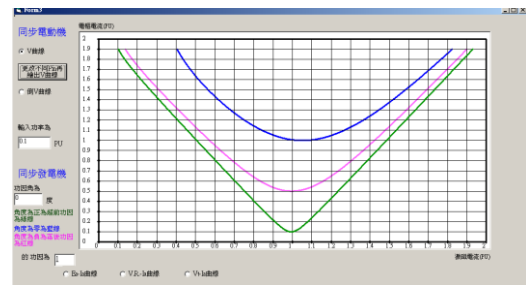
(c) 同步發電機的激磁電流－電樞電流模擬曲線



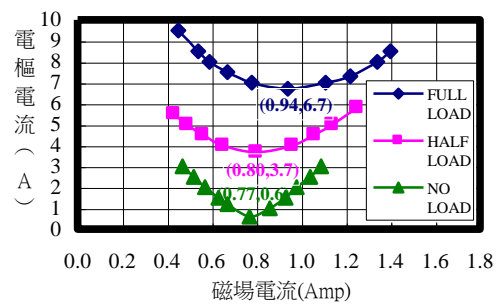
(d) 同步發電機的激磁電流－電樞電流量測曲線

圖E 三相同步發電機模擬『滿載特性』曲線－『量測曲線』的相互對照圖。

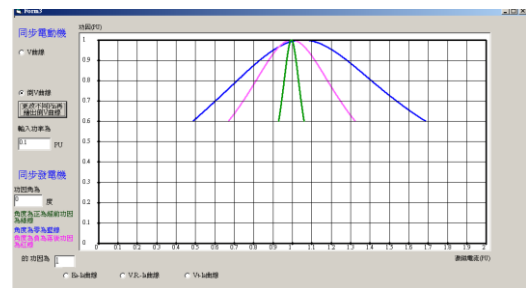
附錄F 三相同步電動機的模擬與量測對照圖[23]



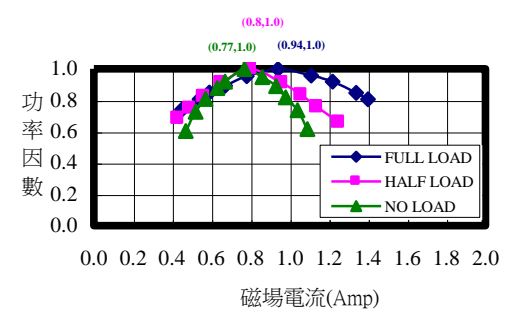
(a) 同步電動機的電樞電流－磁場電流模擬曲線



(b) 同步電動機的電樞電流－磁場電流量測曲線



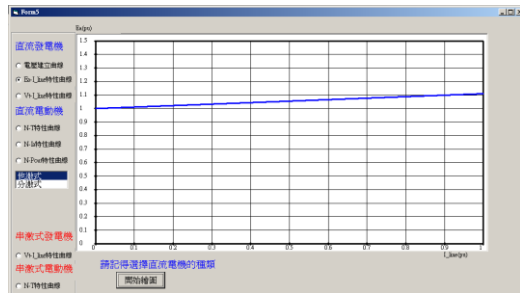
(c) 同步電動機的功率因數－磁場電流模擬曲線



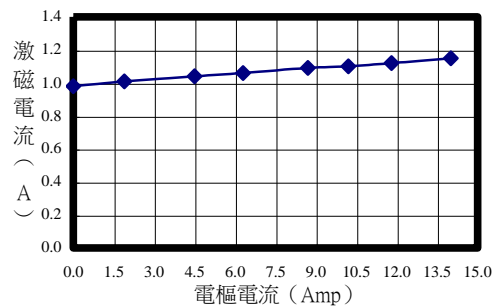
(d) 同步電動機的功率因數－磁場電流量測曲線

圖F 三相同步電動機模擬『滿載特性』曲線－『量測曲線』的相互對照圖。

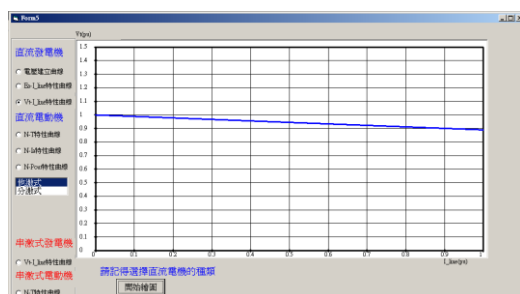
附錄G 直流他激式發電機的模擬與量測對照圖 [23]



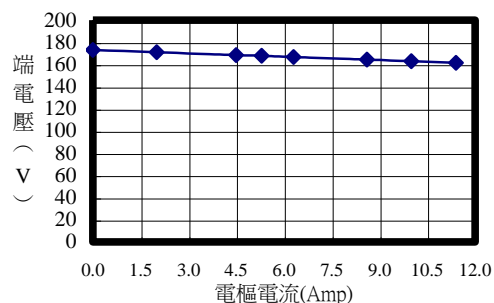
(a) 他激式發電機激磁電流－電樞電流模擬曲線



(b) 他激式發電機激磁電流－電樞電流量測曲線



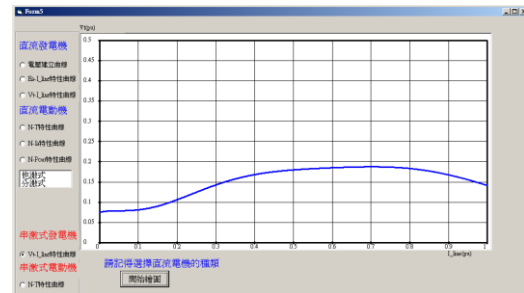
(c) 他激式發電機端電壓－電樞電流模擬曲線



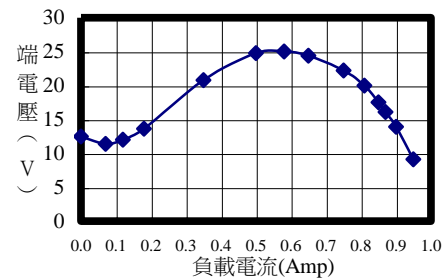
(d) 他激式發電機端電壓－電樞電流量測曲線

圖G 直流他激式發電機模擬『滿載特性』曲線－『量測曲線』的相互對照圖。

附錄H 串激式發電機的模擬與量測對照圖[23]



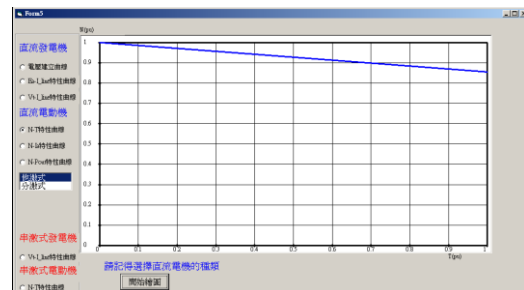
(a) 串激式發電機端電壓－負載電流模擬曲線



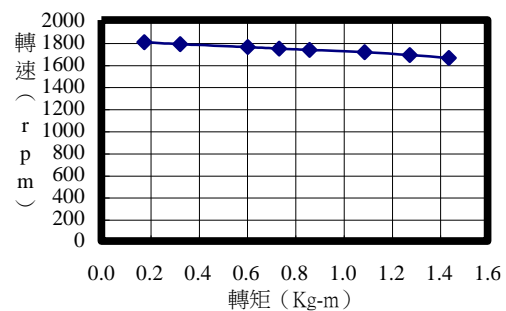
(b) 串激式發電機端電壓－負載電流量測曲線

圖H 直流自激式發電機模擬『滿載特性』曲線－『量測曲線』的相互對照圖。

附錄I 他激式電動機的模擬與量測對照圖[23]



(a) 他激式電動機轉速－轉矩模擬曲線



(b) 他激式電動機轉速－轉矩量測曲線

圖I 直流他激式電動機模擬『滿載特性』曲線－『量測曲線』的相互對照圖。

