

## 電動機械實驗 Lab6 報告

### (Electrical Machinery Laboratory Lab5 Report)

實驗題目 (Experiment title) : 直流機(發電機與電動機)實驗

日期 (Date) : 2022/4/27

時間 (Time) : 15:30 ~ 21:50

地點 (Place) : 資電館 103

組別 (Group number) : 第 3 組

組員 (Group member) (簽名) : 王致中、黃威誌、楊松諭、陳竑廷

撰寫人 (Writer) : 108061106 王致中

## 1. 實驗目的：

本實驗主要配合原理介紹，由實際量測以瞭解直流機(DC machines)，包含直流發電機以及直流馬達(電動機)之靜態操作特性。

## 2. 實驗背景：

直流機可分成直流發電機及直流電動機(直流馬達)，兩者結構相同，只是換能應用方式不同。此處介紹有刷式直流機，另外有一種特殊馬達，係將機械式換向機構(換向器+炭刷)改以電子式取代，稱為直流無刷式馬達(DC brushless motor, BDCM)。

直流機依連接方式不同，可約略分為：

- (1) 永磁式 (Permanent-magnet)：磁場為永久磁鐵提供。
- (2) 他激式 (Separately excited)：磁場由另一獨立直流電壓源激磁。
- (3) 自激式 (Self-excited)：磁場由自己電樞之應電勢激磁。而場繞組 (Field winding)與電樞繞組 (Armature winding) 間有多種連接方式，可分為：
  - (a) 並激式 (Shunt)。
  - (b) 串激式 (Series)。
  - (c) 複激式 (Compound)。

其中，複激式依連接方式又分為長並聯式 (Long Shunt) 和短並聯式 (Short Shunt)；而複激直流機，串激場與並激場共同產生激磁，以並激磁場 (Shunt field) 為主，串激磁場 (Series field) 依其相助或相反對並激磁場，以串激磁場之強度不同，其特性可分為：

- (1) 助複激 (Cumulative compound)：
  - (a) 過複激 (Over-compound)。
  - (b) 平複激 (Flat-compound)。
  - (c) 欠複激 (Under-compound)。
- (2) 差複激 (Differential compound)。

### 2.1. 直流發電機 (DC generator)

- (1) 並激發電機之自激電壓建立過程 (Voltage buildup process of a self-excited DC shunt generator)
  - 利用一點剩磁感生一小電樞電壓 $E_r$ 。
  - 由 $E_r$ 產生一小磁場電流 $I_{f1}$ ，進而產生較高之電壓，直至磁化曲線與場阻線交點所決定之電壓。

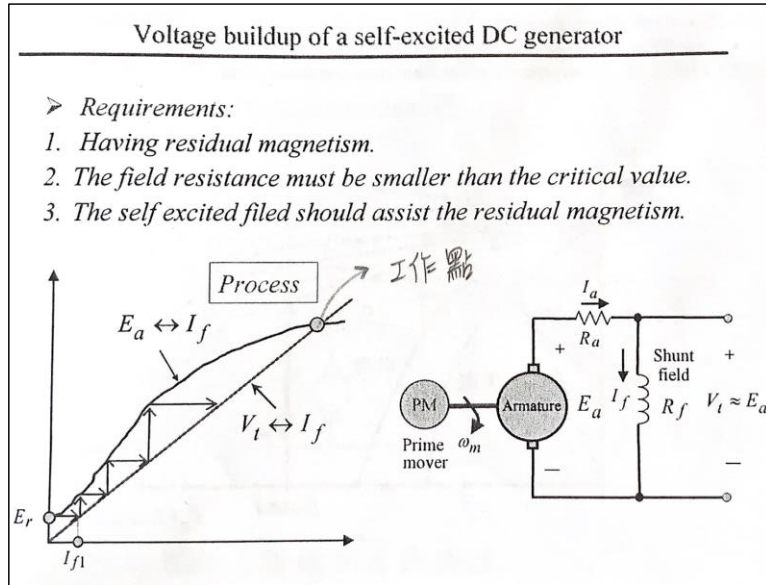


Fig. 2.1. 自激電壓建立過程

(2) 發電機之負載端電壓特性 (Generator terminal voltage characteristics)

A. 所有發電機之負載端電壓特性 (Terminal voltage characteristics of all DC generators)

Fig. 2.2 所示為一長並聯複激發電機(Long-shunt generator)之接線圖，以並激發電機 (Shunt generator) 之特性作為比較對象，所有發電機之負載特性 Fig. 2.3 所示。他激式之曲線在並激之上，助複激之下；複激式依串激磁場之正或負、串激磁場激磁之大小，其特性曲線即可由與並激發電機之參考比較得知而相對繪出。有徹底的認識，才可於做實驗時，容易進行並發掘錯誤。在 Fig. 2.4 之中，顯示了並激 (或分激) 發電機之負載特性曲線 (端特性曲線或外部特性曲線)，其中清楚的顯示發電機端電壓隨負載增加而下降之原因。

各種形式之直流發電機有其特定適用場合，比較特殊的，如差複激及串激直流發電機，適用於銲接，因短路下之電流為合理之值，亦及為電流源。

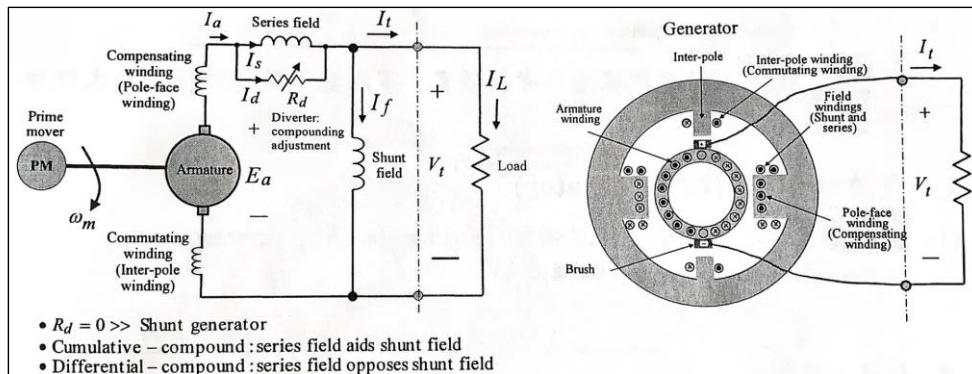


Fig.2.2. 長並聯複激發電機接線

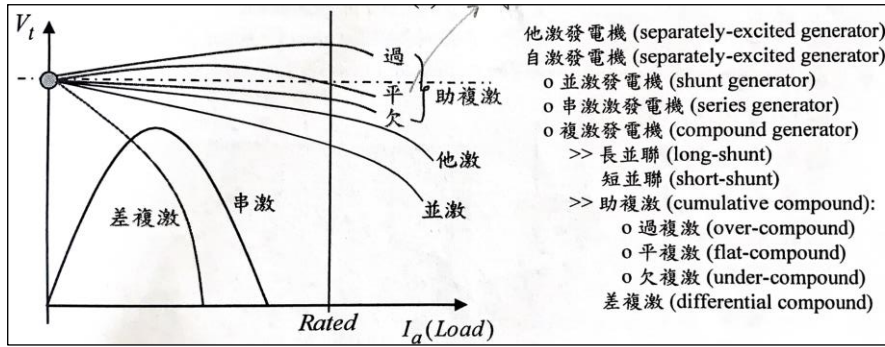


Fig. 2.3. 各式發電機之負載端電壓特性比較

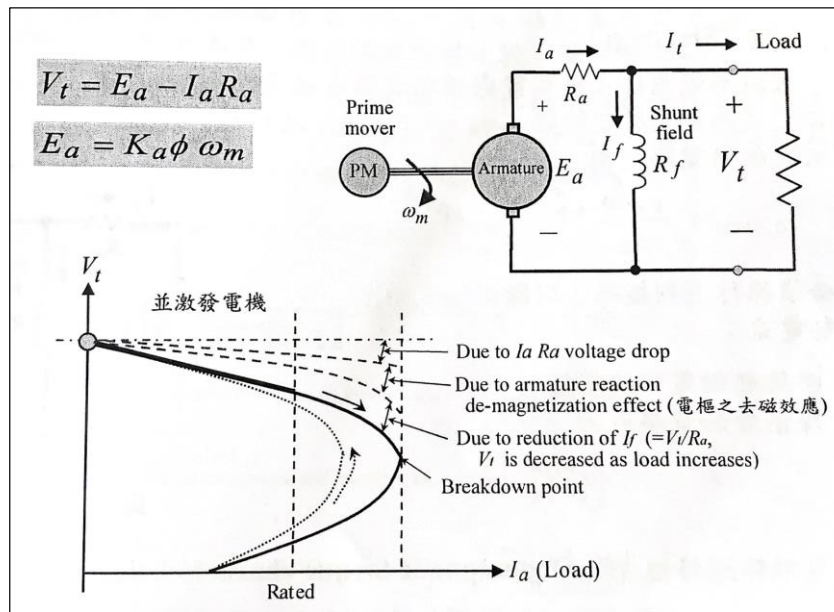


Fig. 2.4. 並激發電機之負載特性曲線

**B. 串激發電機之負載端電壓特性 (Series generator terminal voltage characteristics)**

某負載特性大致如 Fig. 2.5 所示，其中，兩個特殊之應用區為增壓 (Voltage booster) 區及電流發電機 (Constant current generator) 區。

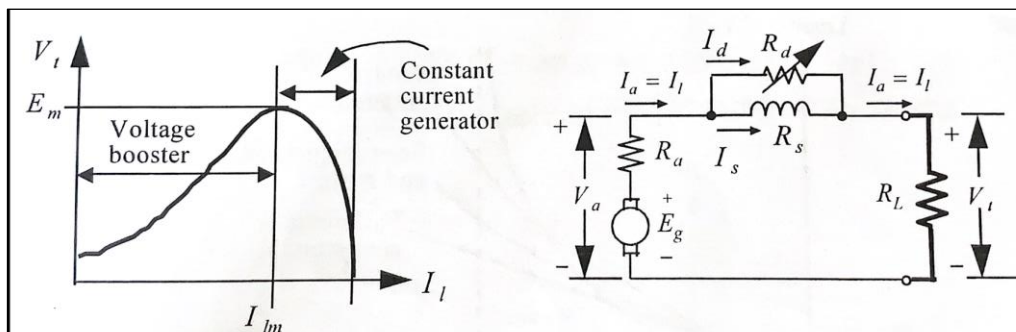


Fig. 2.5. 串激發電機之接線及負載特性

## 2.2. 直流馬達 (DC motors)

### (1) 啟動 (Starting)

直流馬達電樞之應電勢與磁通及轉速成正比，即  $E_a = K_a \phi \omega_m$ ，以 Fig. 2.6 之並激馬達為例，於起動時， $\omega_m = 0$ ， $E_a = 0$ ，沒有  $E_a$  以克服降低  $I_a$ ，因此造成很大之啟動電流，即： $I_{a,start} \approx \frac{V_t - 0}{R_a} \uparrow$ 。故必須採取下列措施，以降低啟動電流：

- (a) 串接啟動電阻於電樞。
- (b) 降低外加電壓  $V_t$ 。

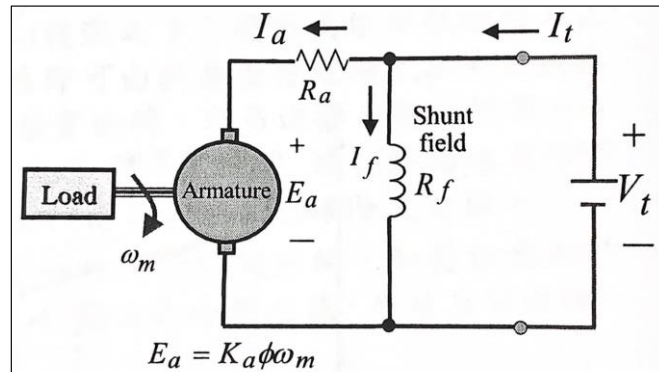


Fig. 2.6. 並激馬達

### (2) 電磁轉矩特性

直流馬達之電磁轉矩與磁通及電樞電流之乘積成正比，即  $T = K \phi I_a$ ，依不同之連接方式，各自有下列特性，Fig. 2.7 為其比較。

Shunt motor :  $\phi \approx \text{constant} \Rightarrow T = K I_a$

Series motor :  $\phi \approx I_a \Rightarrow T = K'' I_a^2$

Differential compound motor :  $T = K(\phi_f - \phi_s) I_a$

Cumulative compound motor :  $T = K(\phi_f + \phi_s) I_a$

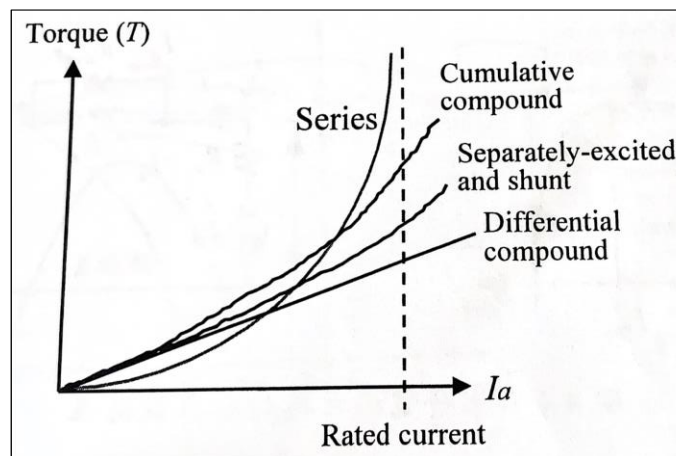


Fig. 2.7. 各式直流馬達之轉矩特性比較

### (3) 速度特性 (Speed-load characteristics)

直流馬達之速度與磁通成反比，與電樞反電動勢 $E_a$ 成正比，即 $\omega_m = E_a / (K\phi)$ ，不同之馬達之速度調節特性比較如 Fig. 2.8 所示。

各種型式之直流馬達有其特定適用場合，比較特殊的，如串激馬達，適用為 Take-up roll 之驅動器，如 Fig. 2.9 所示，Coil drive 為一例，需具定功率 Constant-power (Torque  $\times$  speed = Constant) 之驅動特性。

$$\text{Shunt motor : } \omega_m = \frac{E_a}{K\phi} = K \frac{V_t - I_a R_a}{\phi_f}$$

$$\text{Series motor : } \omega_m = \frac{V_t - I_a(R_a + R_s)}{K\phi_s} = K \frac{V_t - I_a(R_a + R_s)}{I_a}$$

$$\text{Differential compound motor : } \omega_m = K \frac{V_t - I_a(R_a + R_s)}{(\phi_f - \phi_s)}$$

$$\text{Cumulative compound motor : } \omega_m = K \frac{V_t - I_a(R_a + R_s)}{(\phi_f + \phi_s)}$$

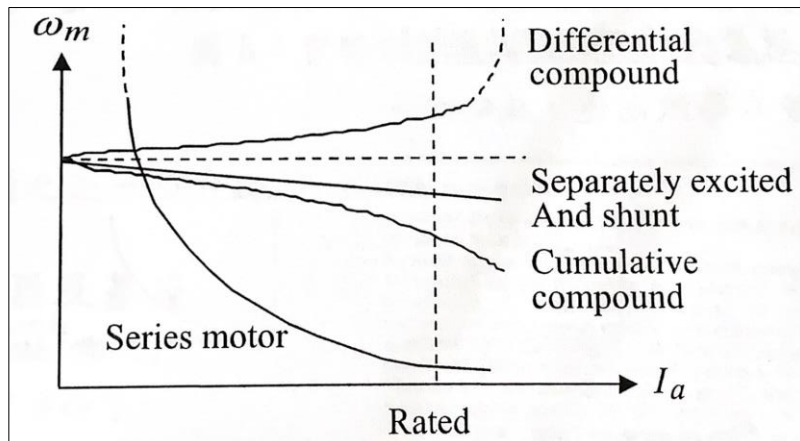


Fig. 2.8. 各式直流馬達之速度調節特性比較

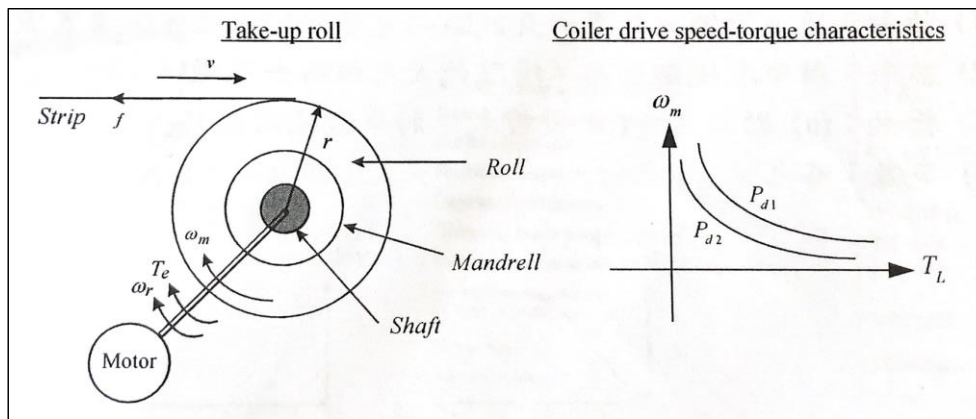


Fig. 2.9. Take-up roll 驅動器



### 3. 實驗項目與系統組態圖

#### 3.1. 簡介與實驗項目

此次實驗使用複激直流機，將其串激繞組短路得到並激；反接得到差複激；正接得到助複激，且由調整串激繞組之電流大小得到不同程度之助複激。有些組之複激直流機其並激場繞組之場阻大於臨界值 (Critical value)，在做並激馬達實驗時沒有問題，但在做並激發電機實驗時，電壓建立有困難，此時須改做他激發電機實驗，且須將原動機之速度提高。

##### A. 馬達(Motor)

測量下列馬達之：(a)轉速-轉矩特性曲線；(b)轉矩-電樞電流特性曲線：

- (1) 並激：將串激繞組短路。
- (2) 複激：(a)助複激；(b)差複激：將串激繞組反接 (注意：Load  $\uparrow$   $\Rightarrow$  Speed  $\uparrow$ )，當速度稍高時須立即停止測試
- (3) 串激：較易導致高速，故先略之。

##### B. 發電機 (Generator)

測量下列發電機之：(a)端電壓-激磁電流特性曲線；(b)端電壓-負載電流特性曲線：

- (1) 他激：將並激繞組接至一直流激磁電壓源 (注意電壓及電流值)。
- (2) 並激：將串激繞組短路，場阻較大之組別可略去不做。
- (3) 複激：(a)助複激；(b)差複激：將串激繞組反接。
- (4) 串激：略之。

#### 系統組成

電動機械實驗設備主要係在一具有渦流剎車器 (Eddy current brake)之基座上，裝設所欲測試之馬達及發電機，配合剎車負載控制單元及一些開關、儀表、保護裝置等配件，進行一些基本特性測試。Fig. 3.1 所示為一組成示意圖。

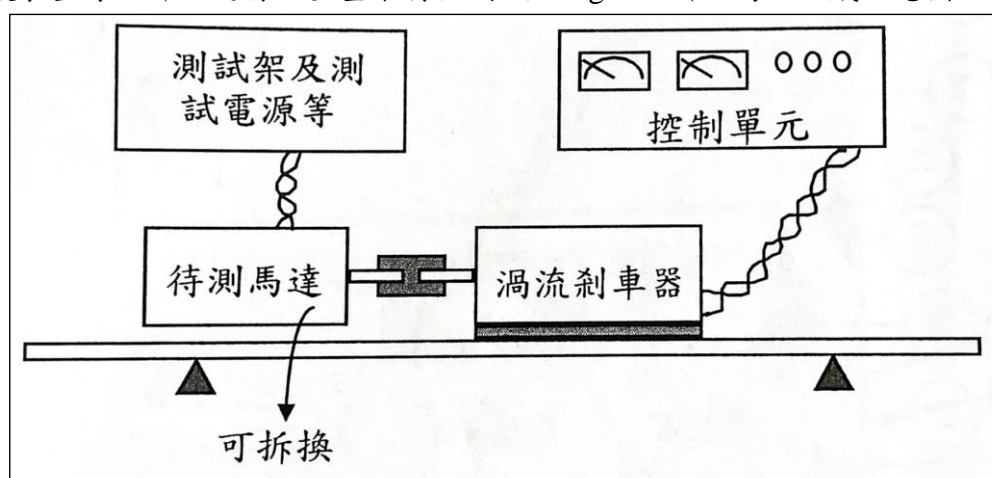


Fig. 3.1. 實驗設備之系統組成

### 3.2. 實驗接線圖

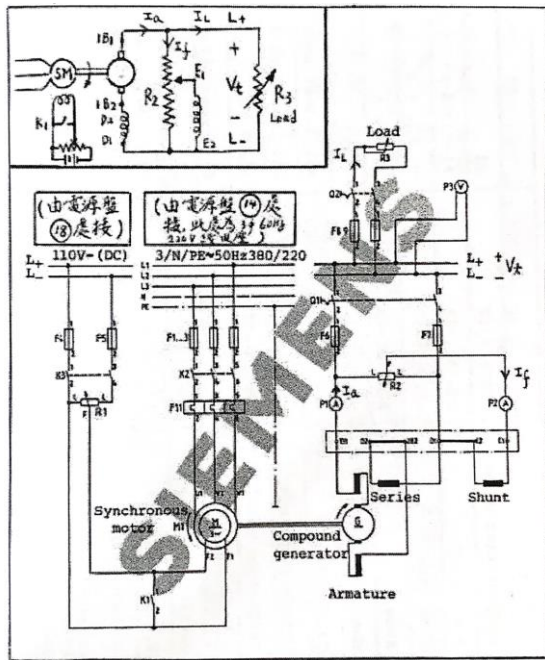


Fig. 3.2. 直流複激發電機測試接線圖-  
電力電路

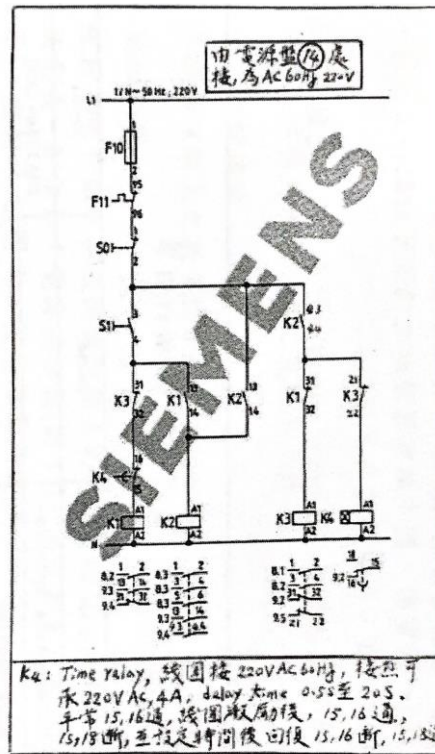


Fig. 3.3. 直流複激發電機控制電路

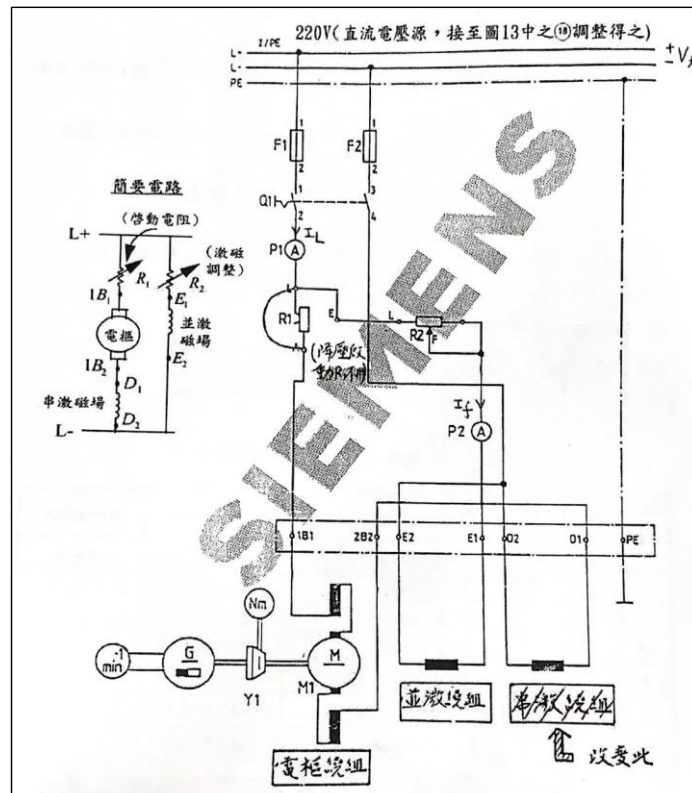


Fig. 3.4. 複激直流馬達實驗接線圖



## 4. 實驗步驟

### 4.1. 測試前之設定與同步馬達之啟動

- (1) 依接線圖接線。
- (2) 先將 R1 滑至最左之位置，使同步機之激磁線圈短路，以便在接點 K1 之短路除去後，可慢慢由 R1 之往右滑動而調整控制激磁電流。
- (3) 以 DVM 量測監視，調整自耦變壓器，使供給同步機激磁磁場繞組之電壓為 DC 110V。
- (4) 調整 R2 滑至最左之位置，使直流發電機為 Full excitation voltage。
- (5) 將 Time delay K4 之 Delay time 設為 5 秒鐘。
- (6) 將開關 S1 turn ON，此時其動作情形如 Fig. 4.1 所示。

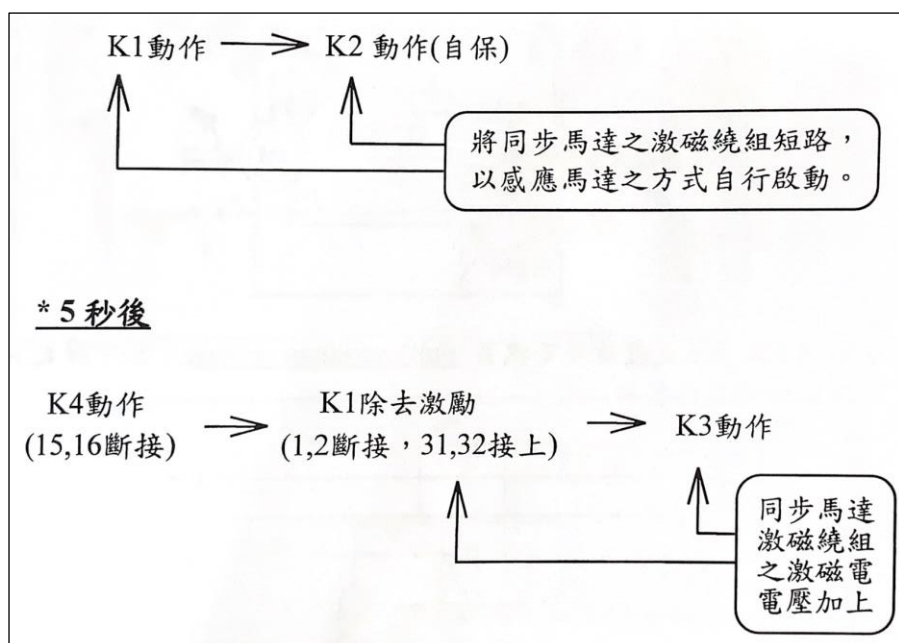


Fig. 4.1. S1 ON 之動作情形

- (7) 調整 R1 以得到施加於同步馬達之激磁電壓為 DC 110V。
- (8) 使 Q1 turn ON，此時負載尚未真正接上，因 Q2 尚未 ON，故此時只先將直流電壓表接上。

### 4.2. 助複激直流發電機端特性

- (1) 先確認 Q2 在 OFF 位置，接者使 R3 調整至最大值後開啟 Q2。
- (2) 將 R3 由大而小調整，記錄負載端電壓及負載電流，須注意當量測到大負載電流時，量測速度須加快，因負載重，發電機易過熱。量完後再將 R3 調整至最大值。

#### 4.3. 分激式發電機端特性

- (1) 將 S1 OFF，同步馬達停止。
- (2) 將串激場短路(以一導線將 D1, D2 連接)。
- (3) S1 ON，如前之手續啟動同步馬達。
- (4) 重複 4.2 之步驟。
- (5) 量測數據並繪製曲線圖。

#### 4.4. 他激式發電機端特性

- (1) 將 S1 turn OFF，使同步馬達停止。
- (2) 將串激場短路。
- (3) 將 R2 轉接至一固定電壓源，並激場線圈仍由 R2 滑動取其分壓供給電壓。
- (4) 將 S1 turn ON，使用與前面相同之手續啟動同步馬達。
- (5) 調整並量測資料值。

#### 4.5. 激磁特性-磁化曲線( $E_A - I_f$ )

- (1) 將 R3 除去(Q2 turn OFF)。
- (2) 將 S1 turn ON，如前述步驟啟動同步馬達。
- (3) 並激場仍由外部電壓源供給調整。
- (4) 記錄 $E_A$ 與 $I_f$ 值，並繪製磁化曲線，其中 $E_A$ 為電樞之開路電壓。

#### 4.6. 直流馬達實驗設定

- (1) 依接線圖接線。
- (2) 使 Q1 turn OFF，以及控制單元中之剎車激勵 turn OFF。
- (3) 供給馬達之直流電壓 $V_t = 0$ ，將 Q1 turn ON。
- (4) 慢慢調高供給馬達之電壓，直到 $V_t = 220V$ 為止。
- (5) 調整 R2，使 $I_f = 0.11A$ 。

#### 4.7. 複激式直流馬達

- (1) 開啟剎車激勵，旋轉調整旋鈕以調整激磁電流，改變轉矩 T，記錄 $I_L, n(rpm)$ 及 $T(N - m)$ ，直到轉矩 T 約至 0.8N-m 為止。注意量測時動作要快一些。

#### 4.8. 並激式直流馬達

- (1) 將串激場短接。
- (2) 重複 4.7 之步驟，以獲得並激式直流馬達之數值。
- (3) 將 4.7 以及 4.8 數值繪圖後比較。

## 5. 實驗量測結果

### 5.1. 助複激直流發電機端特性

$I_L(A)$	$V_t(V)$	$I_L(A)$	$V_t(V)$
0	139	0.	158
0.1	142	0.6	162
0.2	146	0.8	165
0.3	155	1.0	167
0.4	157	1.2	168

Table 1. 助複激直流發電機之 $V_t - I_L$ 端特性

→ 由於是助複激，因此當 $I_L$ 上升同時 $I_a$ 上升， $V_t$ 亦會隨之上升。

### 5.2. 分激式發電機端特性

$I_L(A)/ I_f(A)$	$V_t(V)$	$I_L(A)/ I_f(A)$	$V_t(V)$
0/ 0.064	120	0.5/ 0.050	90
0.1/ 0.061	114	0.6/ 0.047	85
0.2/ 0.059	108	0.8/ 0.038	70
0.3/ 0.056	102	1.0/ 0	0
0.4/ 0.053	98	1.2/ 0	0

Table 2. 分激直流發電機之 $V_t - I_L$ 端特性

→ 此為分激式發電機， $I_L$ 上升的同時激磁場電流 $I_f$ 會隨之下降，進而導致 $E_a$ ， $V_t$ 也逐漸下滑，最終因為 $I_f$ 過小而無法建立 $V_t$ 電壓。故 Table 2 最後兩格數據 $V_t$ 為 0。

### 5.3. 他激式發電機端特性

$I_L(A)$	$V_t(V)$	$I_L(A)$	$V_t(V)$
0	133	0.5	118
0.1	129	0.6	116
0.2	125	0.8	114
0.3	121	1.0	110
0.4	120	1.2	105

Table 3. 他激式直流發電機之 $V_t - I_L$ 端特性

→ 增加 $I_L$ 會使得 $I_a$ 增加，造成 IR drop 以及電樞反應(磁通降低會使 $E_a$ 下降)，進而造成 $V_t$ 下降。

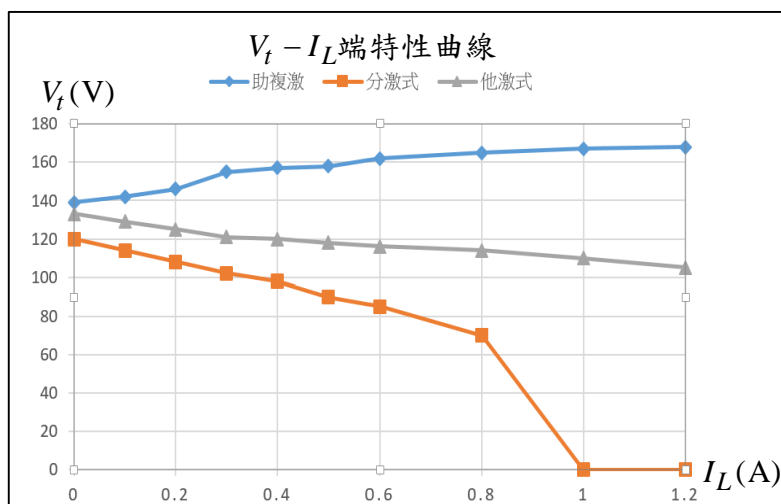


Fig. 5.1.  $V_t - I_L$  端特性曲線

→ 由 Fig. 5.1 就可以觀察到不同激磁方式導致的  $V_t - I_L$  曲線變化，他激式因為激磁場為獨立激磁，故與並激式相比，負載電流在上升時  $V_t$  下降的幅度較低。而此助複激曲線應為過複激或平複激，端看負載的額定電流為何。

#### 5.4. 激磁特性-磁化曲線 ( $E_A - I_f$ )

$I_f(A)$	$E_A(V)$	$I_f(A)$	$E_A(V)$	$I_f(A)$	$E_A(V)$
0	12	0.04	77	0.08	144
0.01	27	0.05	95	0.09	150
0.02	40	0.06	109	0.1	165
0.03	57	0.07	124		

Table 4. 磁化曲線 ( $E_A - I_f$ )

→ 量測線圈電阻  $R_f = 1.82k\Omega$ 。

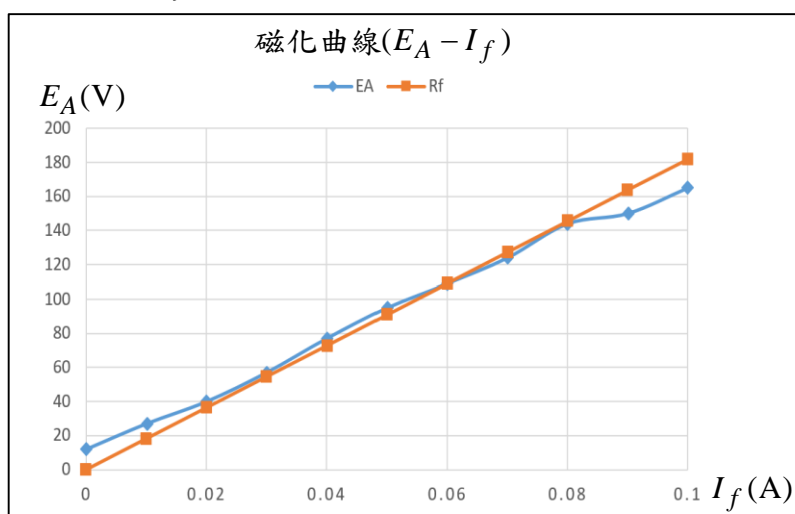


Fig. 5.2. 磁化特性曲線 ( $E_A - I_f$ )

→ 觀察 Fig. 5.2 可以得知，起初 $I_f$ 為 0 時有剩磁以感生一小電樞電壓 12V，接著提升 $I_f$ 以建立更高之 $E_A$ 電壓，最終可以達到磁化曲線與場阻線之交點電壓。

### 5.5. 助複激馬達量測特性

$I_L(A)$	$n(rpm)$	$T(N - m)$	$I_L(A)$	$n(rpm)$	$T(N - m)$
0.50	1910.2	0.1	1.02	1466.4	0.5
0.69	1622.5	0.2	1.13	1409.3	0.6
0.85	1570.1	0.3	1.21	1385.2	0.7
0.94	1515.6	0.4	1.28	1341.5	0.8

Table 5. 助複激馬達之量測特性

### 5.6. 並激式直流馬達量測特性

$I_L(A)$	$n(rpm)$	$T(N - m)$	$I_L(A)$	$n(rpm)$	$T(N - m)$
0.759	2019.0	0.1	1.446	1908.5	0.5
0.969	1984.1	0.2	1.653	1902.6	0.6
1.156	1954.3	0.3	1.865	1818.4	0.7
1.297	1925.5	0.4	1.942	1864.1	0.8

Table 6. 並激式馬達之量測特性

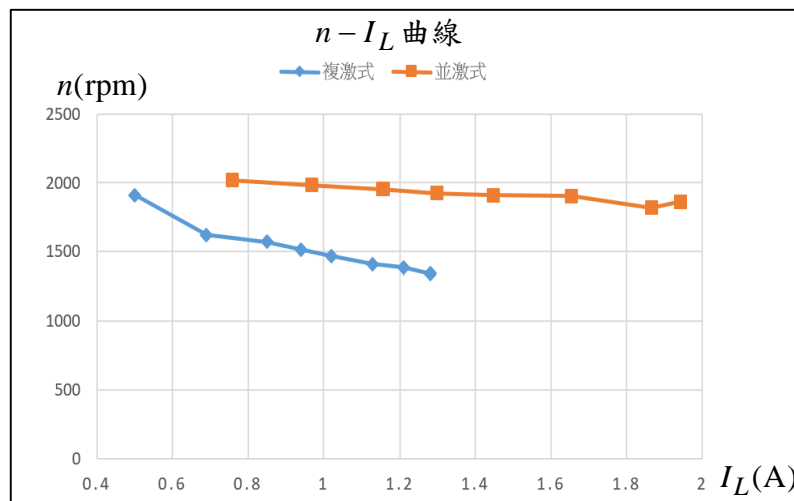


Fig. 5.3. 直流馬達之特性比較 (轉速-負載電流)

→ Shunt motor :  $\omega_m = \frac{E_a}{K\phi} = K \frac{V_t - I_a R_a}{\phi_f}$ 。



→ Cumulative compound motor :  $\omega_m = K \frac{V_t - I_a(R_a + R_s)}{(\phi_f + \phi_s)}$ 。

→ 增加 $I_L$ 會增加 $I_a$ ，且使 $\phi_s$ 上升。由以上兩公式，可以知道助複激的轉速會比並激式的下降更多。

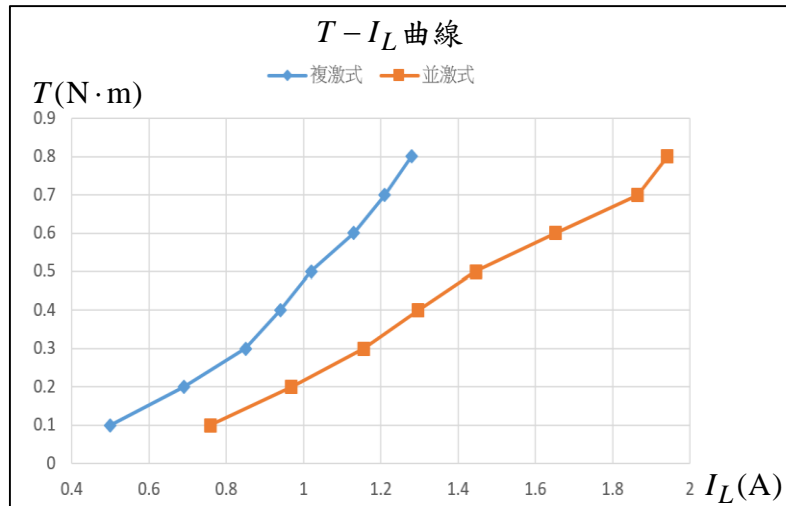


Fig. 5.4. 直流馬達之特性比較 (轉矩-負載電流)

→ Shunt motor :  $\phi \approx constant \Rightarrow T = K I_a$

→ Cumulative compound motor :  $T = K(\phi_f + \phi_s) I_a$

→ 增加 $I_L$ 會增加 $I_a$ ，且使 $\phi_s$ 上升。故在相同 $I_L$ 下，助複激轉矩會大於並激式轉矩。

## 6. 心得

在這次實驗中藉由量測直流馬達的特性曲線以及轉速、轉矩數據，讓我更深刻理解直流馬達的運轉原理，並且連結到之前電動機械課程所學的直流馬達章節，最為高興的是可以利用自己所量測出的數據畫出曲線變化驗證講義圖例，比較觀察其中細節，這讓我非常有成就感。也謝謝助教實驗中的指導與討論。