

電動機械實驗 Lab7 報告

(Electrical Machinery Laboratory Lab7 Report)

實驗題目 (Experiment title): 直流馬達驅動系統之電力電子速度控制實驗
相位控制法(應用 SCR)

日期 (Date): 2022/5/4

時間 (Time): 15:30 ~ 21:50

地點 (Place): 台達館 218

組別 (Group number): 第 1 組

組員 (Group member) (簽名): 王致中、黃威誌

撰寫人 (Writer): 108061106 王致中

1. 實驗背景與工作原理：

1.1. 直流馬達(電動機)種類與基本特性

任何電機均需磁場及電樞(承載作用載體)，直流電動機或稱直流馬達(DC motor)，依激磁方式可分為：永磁式、他激式、自激式等，其中自激式又分並激(或分激)、串激及複激等。 L_s 為串聯磁場繞組(Series field winding)、 L_f 為並聯磁場繞組(Shunt field winding)、A 為電樞(Armature)。各類直流電動機之特性為：

- (1) **永磁式(Permanent magnet)**：以永久磁鐵產生磁場，轉速可由控制電樞之直流端電壓予以控制。
- (2) **他激式(Separately excited)**：電動機之磁場線圈由獨立之直流電壓源激勵調整，可利用磁場控制法控制其速度。如外加之磁場電壓固定，轉速可由供給電樞之直流端電壓控制。
- (3) **自激式(Self-excited)**：
 - (a) **串激式(Series excited)**： L_s 與 A 串聯，具有大啟動轉矩之特點；但不具定速特性、且不可空轉。
 - (b) **並激式(Shunt excited)**： L_f 與 A 並聯，主要優點是轉速隨負載之變化較小，適用於定速負載。
 - (c) **複激式(Compound excited)**：綜合串激式與並激式之優點，不但啟動轉矩大，而且調速特性良好，又可分為**長並聯(Long shunt)**及**短並聯(Short shunt)**兩種連接方式。如依串激磁場之激磁是否與並激場之激磁相助或相消，又可分為**助複激(Cumulative compound)**及**差複激(Differential compound)**兩種方式。

1.2. 直流馬達(電動機)轉速控制基本原理(DC motor speed control principle)

Fig. 1.1 所示為他激式直流電動機之等效電路，其中： R_a = 電樞電阻，電樞電感忽略， E_a = 電樞電動勢，由磁場繞組 L_f 經磁場電流 I_f 激勵所產生之磁通， N = 轉速(rpm)(ω_r (rad/sec))。因直流電動機之速度電勢為 $E_a = K\phi N$ (K 為比例常數)，故由圖中可知轉速為： $N = \frac{E_a}{K\phi} = \frac{V_t - I_a R_a}{K\phi}$ ，由此式可知，控制電動機之電壓 V_t ， ϕ (via I_f)或 R_a 之大小，可以改變轉速 N 的大小，改變供給電動機之電壓 V_t 係最常見最有效之控制方法，但需要可控直流電壓之電力電子轉換器。

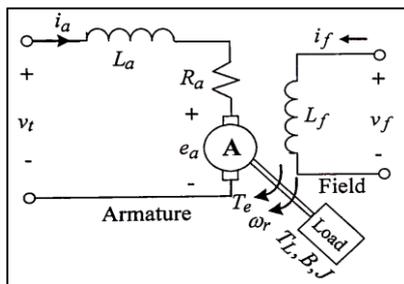


Fig. 1.1. 他激式直流電動機等效電路

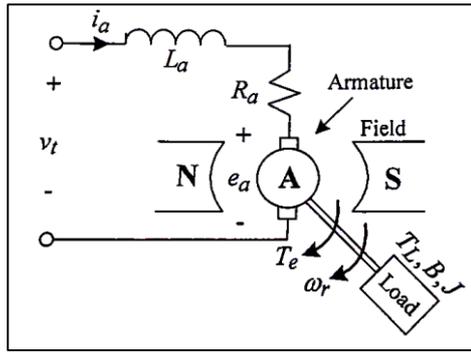
$$V_t = R_a i_a + L_a \frac{d}{dt} i_a + e_a$$

$$e_a = K_a \phi \omega_r = K_f i_f \omega_r$$

$$T_e = K_a \phi i_a = K_f i_f i_a$$

$$= T_L + B \omega_r + J \frac{d}{dt} \omega_r$$

永磁式直流馬達： $\phi = constant$ ， $K_a\phi \equiv K_t$ ，如 Fig. 1.2 所示：



Permanent-magnet field:

$$K_a\phi \equiv K_t$$

$$V_t = R_a i_a + L_a \frac{d}{dt} i_a + e_a$$

$$e_a = K_a\phi\omega_r \equiv K_t\omega_r$$

$$T_e = K_a\phi i_a \equiv K_t i_a$$

$$= T_L + B\omega_r + J \frac{d}{dt} \omega_r$$

Fig. 1.2. 永磁式直流馬達等效電路

Fig. 1.3 顯示永磁式直流馬達驅動系統之等效電路圖，我們將對此系統之動態模式特性做分析，可以得到下列特性方程式：

Electrical equation:

$$V_{tm}(D) = i_{am}R_{am} + L_{am} \frac{di_{am}}{dt} + e_{gm}, \quad e_{gm} = K\phi\omega_r \triangleq K_{tm}\omega_r$$

Mechanical equation:

$$T_e = K_t i_{am} = T_L + B\omega_r + J \frac{d\omega_r}{dt}, \quad T_L \approx K_{tg} i_{ag}$$

Steady state equations:

$$V_{tm}(D) = I_{am}R_{am} + E_{gm}, \quad E_{gm} = K_{tm}\omega_r$$

$$T_e = K_t I_{am} = T_L + B\omega_r, \quad T_L \approx K_{tg} I_{ag}$$

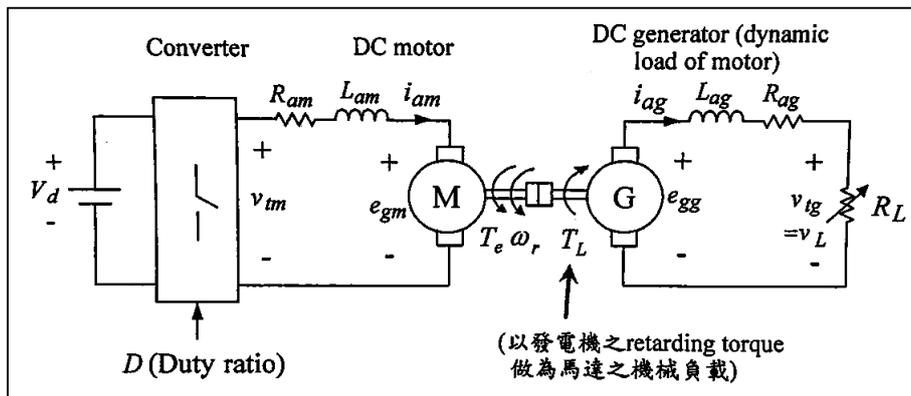


Fig. 1.3. 永磁式直流馬達驅動系統等效電路圖

1.3. 相位控制法(Phase control method)

於電力公司交流供電之應用場合，此方法使用得相當普遍，以 SCR 控制輸出電壓之觸發角及導通角度，而改變輸出至直流馬達之電壓 v_t 之平均值大小以控制轉速，其操作原理與相位調光相同，如 Fig. 1.4 所示。而對於單相交流馬達，利用相位控制法亦可改變供給馬達電壓基本波之有效值，進而控制其速度，但調速範圍較窄。

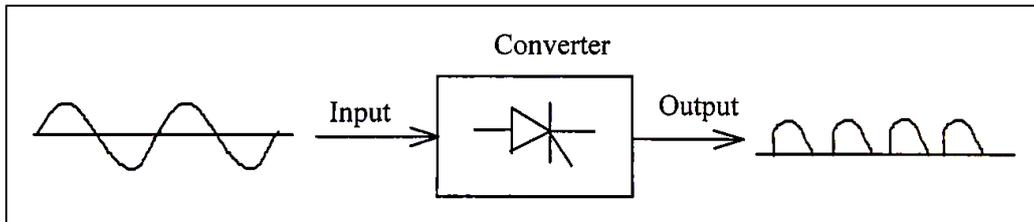
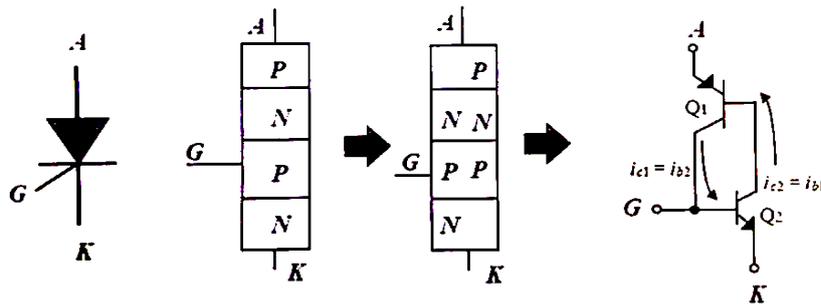


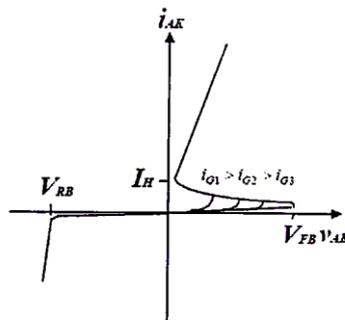
Fig. 1.4 相位控制法

1.4. SCR 矽控整流器

- 又稱為閘流體(Thyristor)：Controlled turn-on, uncontrolled turn-off.
- Construction, symbol, equivalent circuit, triggering control:



- 觸發控制:
Turn on: 當 $v_{AK} > 0$ 時，加以適當之 $i_{GS} > 0$
Turn off: $i_{AK} < I_H$ (Holding current)
- 在使用時，須注意外加之電壓正負峰值不可大於順向崩潰電壓 V_{FB} 及逆向崩潰電壓 V_{RB} 。
- V-I characteristics:

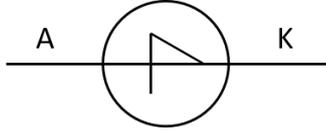


- 沒有 Gate 之 SCR \Rightarrow 蕭克萊二極體(Shockley diode)，其 on 與 off：

$$ON: V_{AK} \geq V_{FB}$$

$$OFF: i_{AK} < I_H$$

Symbol:



2. 系統組態圖與操作原理

2.1. 實驗電路接線圖

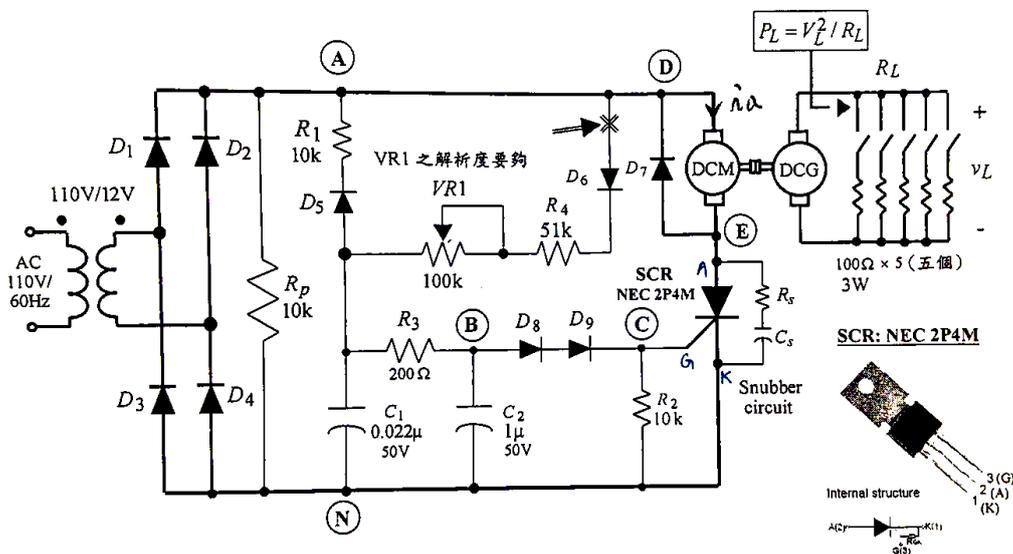


Fig. 2.1. 相位控制法直流馬達速度控制電路接線圖

2.2. 操作原理

- (1) 我們使用永磁式 DC 電動機(馬達)轉速控制電路，D1~D4 為橋頭式全波整流電路，輸出正向全波脈動直流電壓(不可加電容濾波，以便具有零交越點提供 SCR 之線換相)。每一半周期開始，電源電壓經由 A \rightarrow D₆ \rightarrow R₄ \rightarrow VR1 \rightarrow C₁ \rightarrow N 向電容 C₁ 充電；C₂ 由 C₁ 上之電壓經由 R₃ 充電，當 C₂ 充電電壓達到一定電壓時，D₈、D₉(可用蕭克萊二極體)導通而觸發 SCR 為 ON，馬達開始運轉。改變 VR1 之大小，可以改變 C₂ 充電速度，進而改變 SCR 導通角度，控制轉速。如轉速偏高難以調低時，可將 C₁、R₃ 或 C₂ 之值調高，以增加 RC 電路之充電時間常數，使 SCR 之觸發時刻延後。
- (2) 為減少因 C₁ 之電荷未放掉之記憶特性，影響馬達之調速範圍，加了 D₅、R₁ 及 R_p。SCR 在每半波導通終了時，C₁ 經 D₅、R₁、R_p 放電，

使 C1 放電至零電位，以達到較寬範圍的速度控制。否則 C1 有殘留電荷存在，充電時間將縮短，無法達成慢速控制。R1 為限流電阻，藉以保護 D5。

- (3) 為使轉速較不隨負載而改變(較佳調節特性)，可將 D6 陽極接 E 點而不接 D 點，如此 C1 的充電電壓是由 SCR 之陽極端電壓供給，而 SCR 陽極端點電壓為橋式整流器之輸出電壓減去電樞之反電動勢，故 C1 充電速率會依反電動勢之大小而改變，因反電動勢會隨電動機的轉速而變，即轉速低時，反電動勢小，SCR 陽極端點電壓增加，供給 C1 之充電電壓增加，SCR 會提早觸發，SCR 導通角增大，供給電樞較大的功率，使馬達之速度回升，具有回授之效應，故馬達負載變化可以得到補償，使轉速較不隨負載而變，即具有較佳之負載調節性能。
- (4) 一般在輕載時，電樞電流較小，電樞電流之波形成為不連續模式(DCM)，即在一周期內電樞電流有零之時刻。D7 為飛輪二極體，與電樞反並聯，一般係用以提供電樞電流延續流通路徑，使電樞電流較為連續，D7 另外亦可減少因電樞電流之變化所生電感性負感應反電動勢($L_a di_a/dt$)對 SCR 耐壓之危害。此外，為防止此電感性負感應電動勢經 R4、VR1 向 C1 作逆向充電，而超過蕭克萊二極體(此處以 D8+D9 取代)之激發電壓破壞 SCR 的 G-K 介面，加上二極體 D6 以防止之。Rs、Cs 是為防止使 SCR 較不受 dv/dt 之影響，一般稱為減振電路(Snubber circuit)，具有保護 SCR 及維持正常操作之功能，典型值為： $C_s = 0.1\mu F, R_s = 10\Omega$ 。

3. 實驗步驟

3.1. 測試 A

- (1) 依 Fig. 2.1 接線。
- (2) 首先將 R_L 斷接($R_L = \infty$)，調整 VR1 使馬達運轉於一穩定狀態下，繪出 $v_{AN}, v_{BN}, v_{CN}, v_{EN}, v_{DE}, i_a$ 之相對波形，並記錄觸發角 α 、轉子轉速 n_r 。
- (3) VR1 不變，接上 $R_L = 20\Omega$ (100 Ω 並接五個)，於一穩定狀態下，繪出 $v_{AN}, v_{BN}, v_{CN}, v_{EN}, v_{DE}, i_a$ 之相對波形。
- (4) 比較(2)與(3)之結果，比較有無負載下，何者波形較為連續，觀察 v_{EN} 及 v_{DE} ：在 SCR 導通期間(t_{ON})，電樞電流流通， $v_{CE} = SCR$ 之導通電壓 V_{ON} ；而在電樞電流不連續期間(t_{OFF})， V_{DE} 為馬達之速度電壓，近乎定值。判斷是否 t_{ON} 越長(t_{OFF} 越短)越連續。
- (5) 觀察 v_{EN} 之波形(將示波器之 DC level 調好)，讀出並記錄 SCR 之導通電壓 V_{ON} 。

3.2. 測試 B

- (1) 首先不接發電機負載 $R_L (R_L = \infty)$ ，調整 VR1 使馬達運轉於一穩定狀態下，記錄觸發角 α 、轉子轉速 n_r 。
- (2) VR1 不變，改變發電機負載 $R_L = 100\Omega, 50\Omega, 33.3\Omega, 25\Omega, 20\Omega$ ，分別記錄在各 R_L 下：轉子轉速 n_r 、發電機之端電壓 V_L 。計算發電機之輸出功率 $P_L = V_L^2/R_L$ ，及電流 $I_L = V_L/R_L$ 。
- (3) 繪製轉速-負載曲線($n_r - I_L$ curve)。
- (4) 調整 VR1 使馬達運轉於另一穩定速度下並重複步驟(1)~(3)。
- (5) 將 D6 陽極改接至 E 點，重複步驟(1)~(4)。
- (6) 比較討論 D6 之陽極接至 D 點及接至 E 點所得之結果。

3.3. 測試 C

- (1) 將 R_L 斷接($R_L = \infty$)，調整 VR1 使馬達運轉於不同速度，紀錄其觸發角 α 、以及轉子轉速 n_r 。
- (2) 繪製轉速-觸發角曲線($n_r - \alpha$ curve)。
(注意： $\alpha \uparrow \Rightarrow$ conduction angle $\downarrow \Rightarrow$ speed \downarrow)。

4. 實驗量測結果

4.1. 測試 A

- (1) $R_L = \infty : \alpha = 44.3^\circ, n_r = 1317 (rpm), V_{ON} = 0.83V$

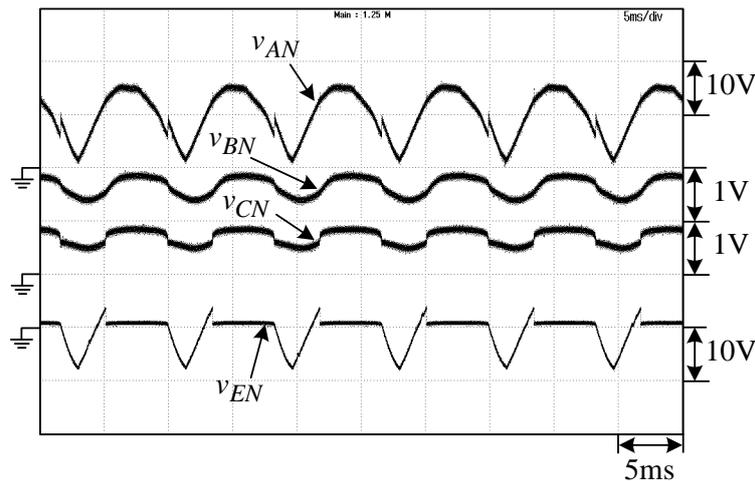


Fig. 4.1. ($v_{AN}, v_{BN}, v_{CN}, v_{EN}$) 波形， $R_L = \infty$

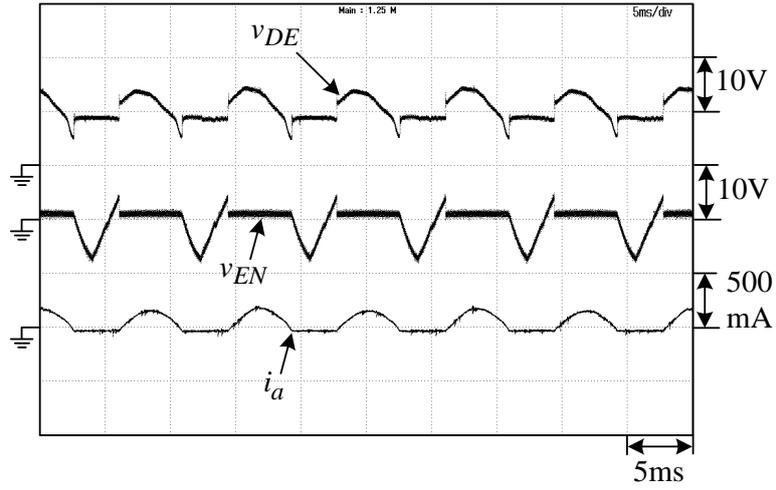


Fig. 4.2. (v_{DE}, v_{EN}, i_a) 波形, $R_L = \infty$

(2) $R_L = 20\Omega$: $\alpha = 39.82^\circ$, $n_r = 560$ (rpm), $V_{ON} = 0.83V$

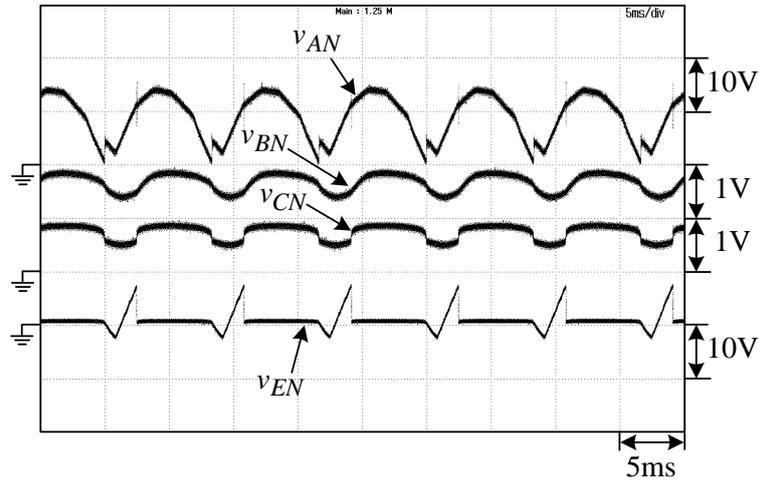


Fig. 4.3. ($v_{AN}, v_{BN}, v_{CN}, v_{EN}$) 波形, $R_L = 20\Omega$

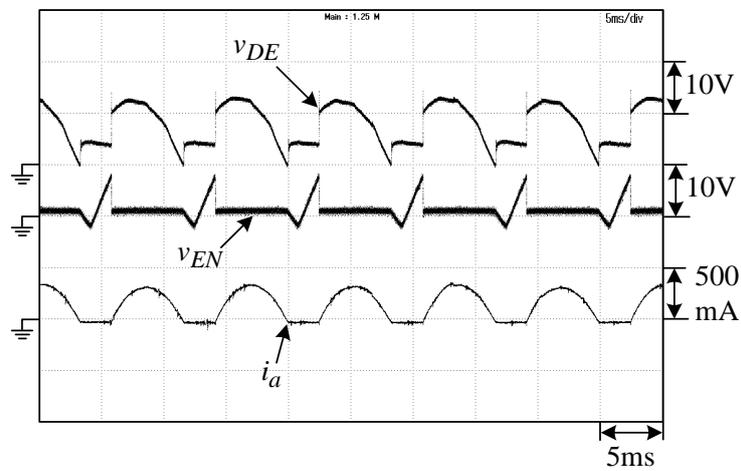


Fig. 4.4. (v_{DE}, v_{EN}, i_a) 波形, $R_L = 20\Omega$

觀察 Fig. 4.2 和 Fig. 4.4 中之 i_a 波形可以發現，在(2)有負載的情況下($R_L = 20\Omega$)電流較為連續(進入零電流的時間較短)，且 t_{ON} 較長、 t_{OFF} 較短，因此可知當 t_{ON} 越長則越連續。(1), (2)所測之 $V_{ON} = 0.83V$ 。

4.2. 測試 B

(1) D6 陽極接至 D 點：

<i>Triggering angle $\alpha_1 = 56.18^\circ$</i>				
$R_L(\text{ohms})$	$V_L(V)$	$P_L(W)$	$I_L(A)$	$n_r(\text{rpm})$
20	1.63	0.1328	0.0815	560
25	1.92	0.1475	0.0768	605
33.3	2.36	0.1673	0.0709	647
50	3.08	0.1897	0.0616	716
100	4.3	0.1849	0.043	845

<i>Triggering angle $\alpha_2 = 49.7^\circ$</i>				
$R_L(\text{ohms})$	$V_L(V)$	$P_L(W)$	$I_L(A)$	$n_r(\text{rpm})$
20	1.75	0.1531	0.0875	606
25	2.06	0.1697	0.0824	644
33.3	2.53	0.1922	0.0758	693
50	3.28	0.2152	0.0656	778
100	4.71	0.2218	0.0471	919

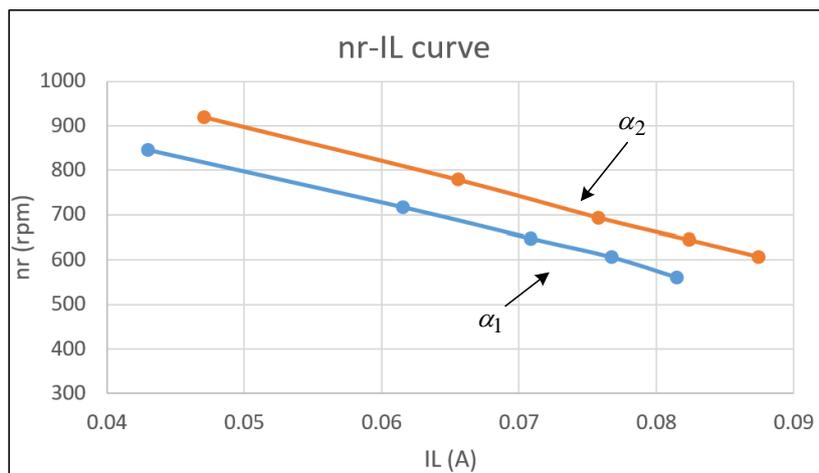


Fig. 4.5. $n_r - I_L$ curve for (1)

由 Fig. 4.5 可知， α 越大，轉速越小，這是因為導通角下降所致；另一方面， R_L 越大(負載越輕)，轉速也越快。

(2) D6 陽極接至 E 點：

<i>Triggering angle $\alpha_1 = 75.63^\circ$</i>				
$R_L(\text{ohms})$	$V_L(\text{V})$	$P_L(\text{W})$	$I_L(\text{A})$	$n_r(\text{rpm})$
20	1.2	0.0720	0.0600	438
25	1.4	0.0784	0.0560	458
33.3	1.73	0.0899	0.0520	483
50	2.16	0.0933	0.0432	519
100	2.95	0.0870	0.0295	578

<i>Triggering angle $\alpha_2 = 86.43^\circ$</i>				
$R_L(\text{ohms})$	$V_L(\text{V})$	$P_L(\text{W})$	$I_L(\text{A})$	$n_r(\text{rpm})$
20	0.91	0.0414	0.0455	332
25	1.07	0.0458	0.0428	342
33.3	1.28	0.0492	0.0384	365
50	1.64	0.0538	0.0328	386
100	2.2	0.0484	0.022	428

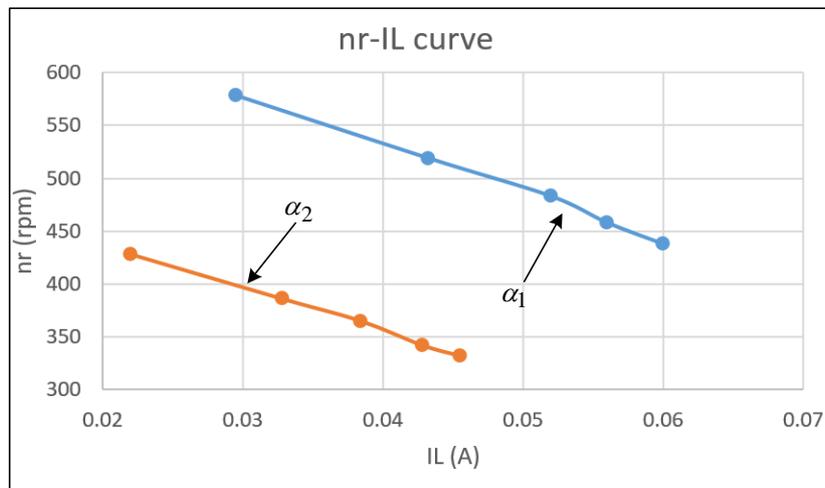


Fig. 4.6. $n_r - I_L$ curve for (2)

Fig. 4.6 與 Fig. 4.5 結果大致相同， α 越大，轉速越小，這是因為導通角下降所致；另一方面， R_L 越大(負載越輕)，轉速也越快。

(3) 比較 D6 陽極接 D 與 E 點的差異：

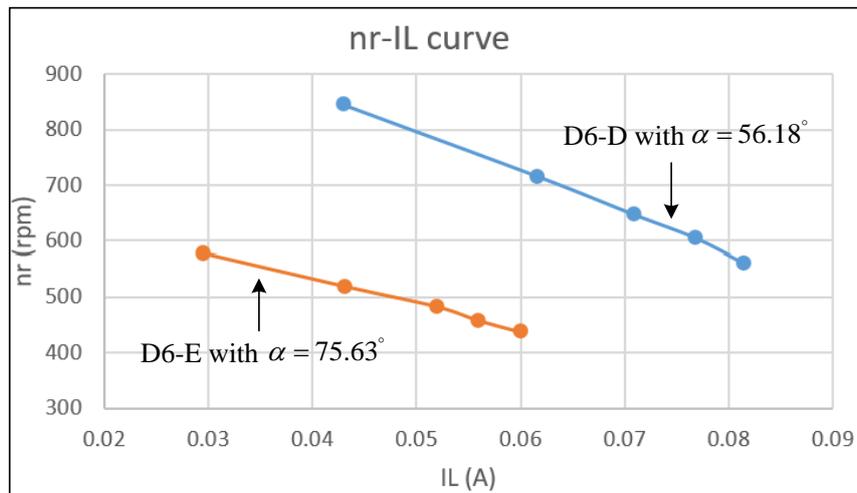


Fig. 4.7. D6 接不同點的波形比較

由 Fig. 4.7 可以發現，D6 接在 D 點時轉速隨負載的變動很大(最大與最小相差 140 rpm)，相對地，D6 接在 E 點時變動則沒那麼大。這是因為當 D6 陽極接 E 點時，C1 的充電電壓是由 SCR 之陽極端電壓供給，因此 C1 充電速率會依反電動勢之大小而改變。又因反電動勢會隨電動機的轉速而變，當轉速低時，反電動勢小，SCR 陽極端點電壓增加，供給 C1 之充電電壓增加，SCR 會提早觸發，SCR 導通角增大，供給電樞較大的功率，使馬達之速度回升，具有回授之效應，故馬達負載變化可以得到補償，使得轉速較不隨負載而變，具有較佳之負載調節性能。

4.3. 測試 C

(1) $R_L = \infty$ 。D6 陽極接至 D 點。

$R_L = \infty$ (ohms)	
觸發角(度)	n_r (rpm)
32.41	674
43.22	628
54.02	574
64.83	514
75.63	468

(2) $R_L = \infty$ 。D6 陽極接至 E 點。

$R_L = \infty$ (ohms)	
觸發角(度)	n_r (rpm)
54.02	572
59.42	526
64.83	496
70.23	456
75.63	426

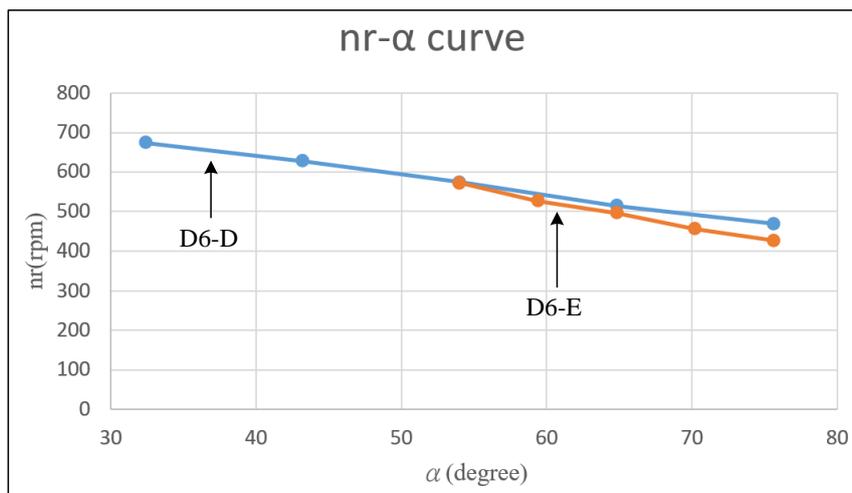


Fig. 4.8. $n_r - \alpha$ curve

由 Fig. 4.8 可以發現，當 α 增加時， n_r 會下降，這是因為導通角下降所致。

1.
$$\left(\int_{\frac{\pi}{4}}^{\pi} \sqrt{2} \cdot 110 \cdot \sin \omega t \, d\omega t \right) \times \frac{1}{\pi} = 84.53 \text{ (V) } \#$$
2.
$$84.53 - \left(\frac{\pi}{4} \times \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) \times \frac{1}{2} \right) \times \frac{1}{\pi} = 70.18 \text{ (V) } \#$$
3.
$$84.53 + \left[\frac{\pi}{8} \times 60 \times \frac{1}{2} \right] \times \frac{1}{\pi} = 88.28 \text{ (V) } \#$$
4.
$$84.53 + \left[\frac{\pi}{8} \times 60 \right] \times \frac{1}{\pi} = 92.03 \text{ (V) } \#$$

Fig. 4.9. Preliminary tests

5. 心得

這次實驗是直流馬達的速度控制(相位控制法)，也是我第一次使用 SCR 來當作電路開關，學習到了何謂可控導通、不可控截止元件。運用不同元件的特性來架構出特殊電路總是讓我覺得驚艷，好比這次實驗的電路圖一樣，每一個元件都有其負責的功能，缺一不可。最後也感謝教授的指導以及助教的幫忙。