

## 新手特區

## 三相感應電動機起動 (2/5, 分5期刊登)

麥家聲

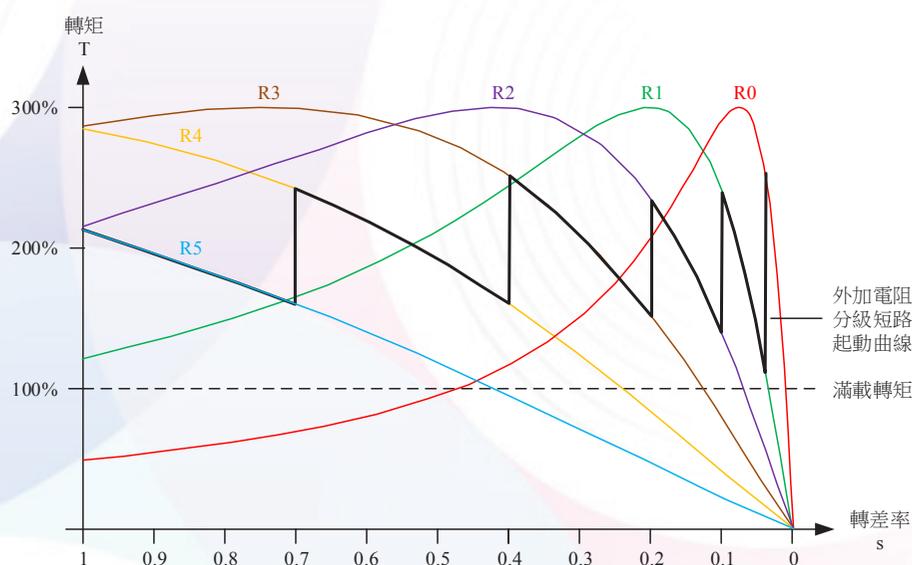
ksmak8888@yahoo.com.hk

<http://www.ksmak-sir.com/>

## 續上期

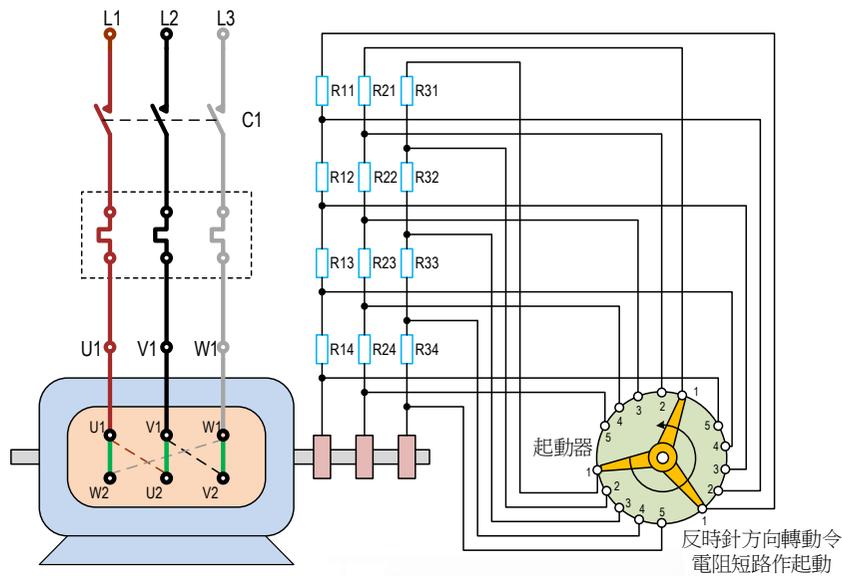
## 轉子串聯電阻起動方法

三相電動機的轉子除有鼠籠式外，還有另一種稱為繞線式轉子，它與一般三相電動機的定子組合，便構成三相繞線式轉子電動機，也有稱為滑環式 (Slip ring) 電動機。繞線式轉子電動機可算是一種特殊的交流感應馬達，它在轉子設有三相繞組，繞組以星形連接，繞組的引出線連接到轉軸上的滑環，再經滑環及電刷，與同樣以星形連接的外部電阻接駁，便構成轉子繞組與外部電阻串聯。三相繞線式轉子電動機起動時，先令轉子繞組與整組外接電阻串聯，使整個轉子電阻增加，這樣可以降低起動電流，並增加起動轉矩，更可作適量的轉速控制，特性曲線如 (圖：2.1) 所示。電動機運行時，轉速可利用外部電阻的大小來控制，外部串接電阻相當於轉子繞組的內阻增加，減低了轉子繞組的感應電流。從另一角度來看，電動機又像是一個變壓器，次級 (轉子) 電流小，也令變壓器初級 (定子) 繞組的電動機勵磁繞組電流相應減小。惟電動機起動後，必須將轉子繞組短路，以減少因為電阻帶來的不必要損耗，提高效率。

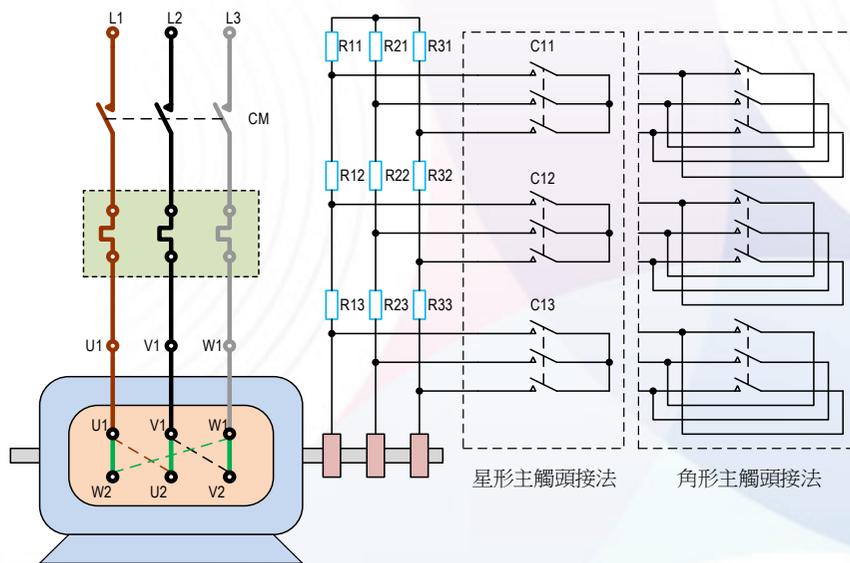


(圖：2.1)

此外，特性曲線顯示當外部電阻改變時，負載起動轉矩及轉速亦會按比例改變，稱為比例推移。圖中的 R0（最小，不加電阻）至 R5（最大）的曲線分別代表加入不同大小的轉子電阻時之特性曲線。但在感應電動機轉子電路中串入電阻，由於電阻的損耗，將嚴重地降低電動機的效率，所以這種控制轉速的方法通常只能短時間使用。圖中 R0 至 R3 的起動轉矩都是因電阻增大而增加，惟由 R4 開始，曲線已開始移位，其起動轉矩相反地開始下降，曲線圖中 R4 的起動轉矩差不多與 R3 一樣，R5 的曲線已顯著下降，這表示串入電阻的阻值不可以永無止境地增加。繞線式轉子電動機運作時，可根據特性曲線於適當時候將外部電阻慢慢短路而減少。繞線式轉子感應電動機，在滿載時，電動機轉速約是同步轉速的 75~80%，轉差速  $s \approx 0.25 \sim 0.2$ 。



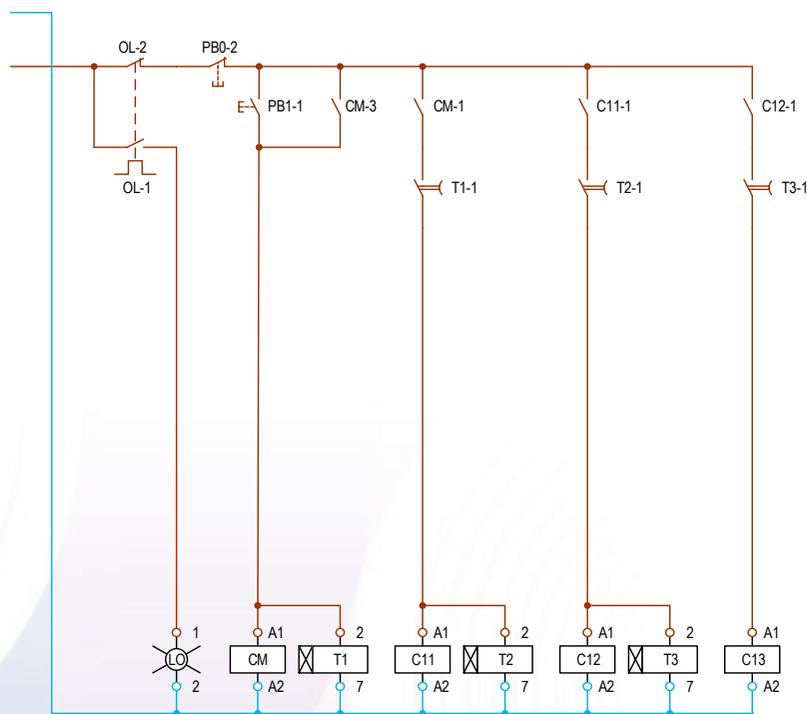
(圖：2.2)



(圖：2.3)

三相繞線式轉子電動機較舊式的控制方法及電路如（圖：2.2）所示，起動時，利用氣壓或油壓系統，使可轉動起動器之觸點慢慢將外部電阻短路（反時針方向由 1 點至 5 點）。較新式的多使用電磁接觸器控制，主電路及控制電路如（圖：2.3）及（圖：2.4）所示，透過不同的時間令電磁接觸器 C11、C12 及 C13 依次吸索，一般採用時間掣控制電路，使其主觸頭閉合，主觸頭可接成星形或角形（較多），最後完全將外部的電阻與三個滑環連接的轉子繞組短路。

轉子電阻起動 (Rotor resistor starting) 只適用於滑環式感應電動機。三相繞線式轉子電動機可算是數十年前一種起動及調速方案，由於滑環及電刷需要作定時維護，成本較高，所以在變壓變頻 (VVVF) 系統出現後，大部分原用三相繞線式轉子電動機的系統已被變壓變頻來驅動鼠籠式電動機系統更新取代。（新手不要以為舊式或漸漸被淘汰的東西可不需學習，因為很多「電」的產物，只要定時進行維護，運行數十年是絕無問題的，所以即使你暫時未有接觸，也要對它們有充分的認識）



(圖：2.4)

### 電路工作原理（圖：2.3及2.4）

1. 電動機起動前，轉子繞組與外部的星形電阻器連接，增加了轉子的電阻，減少電動機的起動電流；
2. 起動時，在（圖：2.4）中，首先按下 PB1-1（起動）常開按鈕，電磁接觸器 CM 線圈觸發得電，其輔助觸點隨之轉態，CM-3 常開觸點變為閉合，為 PB1-1 常開按鈕提供旁路自保，即使 PB1-1 掣復位，CM 線圈控制電路仍然繼續操作，這時 CM 及 T1 線圈被觸發，（圖：2.3）三相電源直接經 CM 主觸頭連接電動機的定子繞組，

而轉子電阻的阻值包括 R11、R12 及 R13 三組全部串聯；

3. 設 T1、T2 及 T3 都調較至 2 秒，T1 時間掣於 2 秒後達時，其通電延遲常開觸點 T1-1 閉合，電流經 CM-1 常開觸點，T1-1 常開觸點，觸發電磁接觸器 C11 及時間掣 T2 線圈，C11 主觸頭將外部電阻 R11、R21 及 R31 短路，使整個轉子電阻減少 1/3；
4. T2 時間掣於 2 秒後達時，其通電延遲常開觸點 T2-1 閉合，電流經 C11-1 常開觸點，T2-1 通電延遲常開觸點，觸發電磁接觸器 C12 及時間掣 T3 線圈，C12 主觸頭將外部電阻 R12、R22 及 R32 短路，整個轉子電阻又再減少 1/3；
5. T3 時間掣於 2 秒後達時，其通電延遲常開觸點 T3-1 閉合，電流經 C12-1 常開觸點，T3-1 通電延遲常開觸點，觸發電磁接觸器 C13 線圈，C13 主觸頭將外部電阻 R13、R23 及 R33 短路，這時外部的電阻完全被短路，只有轉子繞組兩端以星點連接，完成起動，電動機正常運行；
6. 在任何情況下，當三相電源中斷，按下 PB0-2（停止）常閉按鈕或監察電動機電流之過載繼電器 OL-2 常閉觸點開路，電磁接觸器 CM、C11、C12、C13 及通電延遲時間掣 T1、T2、T3 會中斷電源，同時復位，轉子重新接上外部的電阻器，準備下一次的起動。

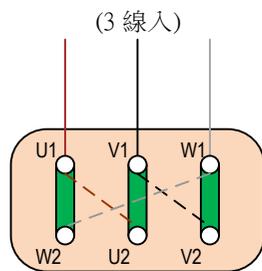
特點：增加轉子電阻令定子電流減少，起動轉矩增加。缺點：需要定期維護滑環及電刷，滑環式轉子製造困難，不經濟，能量消耗於電阻器，效率低。適合於重載下起動，負載較重的場合。

### 選料、接線及測試

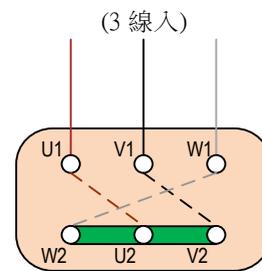
1. 按電動機的額定功率或額定電流的 1 倍來選擇主電路的斷路器及隔離開關之容量，過載繼電器同樣以電動機額定功率或額定電流的 1 倍作評估；由於是繞線轉子式電動機，CM 主電磁接觸器應採用 (AC2)。轉子部份的主觸頭只需短暫連接並傳輸電流，通常以三角形連接，最後階段工作的 C13 主電磁接觸器需採用 (AC1)，電流量可根據轉子電流  $I_o$  的 0.58 倍作評估；C12 及 C13 主電磁接觸器以  $I_o$  的 0.18~0.43 倍作評估（視負載而定）。外接電阻的阻值及功率可根據電動機廠的指引數據作參考；
2. 根據電動機的額定電流或客戶要求規格來選擇適當的導體來接駁電路；
3. 先測試控制電路（不要接上電動機大線），檢查起動及停止按鈕、接觸器吸索程序與電路設計要求結果是否一致，有需要須排除故障後才可繼續；
4. 根據電動機的需要，將電動機接角形或星形；
5. 行車後留意電動機是否有噪音，用鉗錶分別檢測三相線電流是否平衡，電流量是否正常，目測滑環及電刷的接觸狀態，是否有較大的火花。調節時間掣的長短使電動機獲得較平滑的起動電流及轉速。觀察電動機轉向是否與實際需要的工作轉向相同，若轉向不同便需要「調相」，可將三相輸入電源 L1、L2、L3 或輸出至電動機 U1、V1、W1 的任何兩條大線互換，令電動機的相序不同，轉向便可改變。

### 星角起動方法(Star-delta starter) [開路轉換]

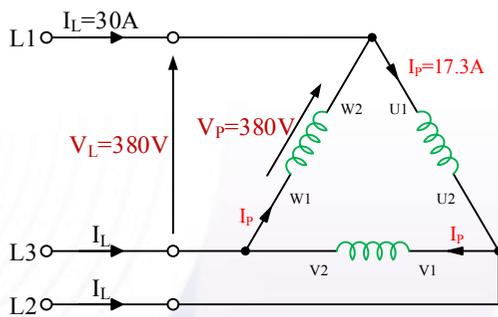
三相鼠籠式感應電動機在額定運行情況下的線電壓  $V_L$  為電動機的額定電壓，電動機工作時的電壓不應高於或低於額定值的 5%。三相鼠籠式感應電動機的設計，在同一台電動機條件下，是可以星形或角形連接，但要按設計時的輸入電壓而定，電動機一般會標示出兩種對應的額定電壓值，例如  $\Delta/Y$ ：220/380V 或 380/660V。若以香港供電線電壓  $V_L=380V$  為例，以角形  $\Delta$  連接時，繞組相電壓  $V_P(380V)$  等於供電線電壓  $V_L(380V)$ ，設當時的線電流  $I_L=30A$ ，相電流  $I_P=17.3A$ ，如（圖：2.5）所示；但當電動機以星形  $Y$  連接時，每相繞組所得的相電壓只是角形連接時的  $1/\sqrt{3}$  倍 (58%)(220V)，當時的線電流  $I_L=10A$ ，相電流  $I_P=10A$ ，只為角形的 33%，如（圖：2.6）所示。由於角形連接時，繞組相電壓較高，線電流也較大，為星形接駁時 3 倍，因此三相感應電動機以角形接駁，功率也會較星形接駁時大 3 倍，所以大功率電動機的設計，多以角形連接為主。



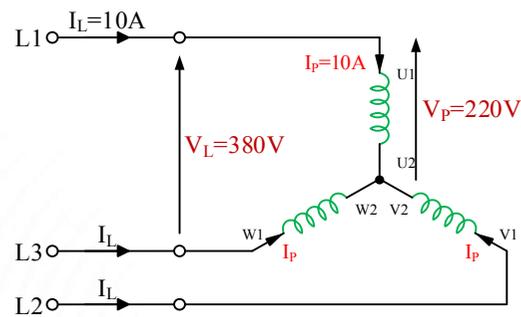
固定角形接法，接線箱的銅連杆須(垂直連接)



固定星形接法，接線箱的銅連杆須(橫向連接)



(圖：2.5)



(圖：2.6)

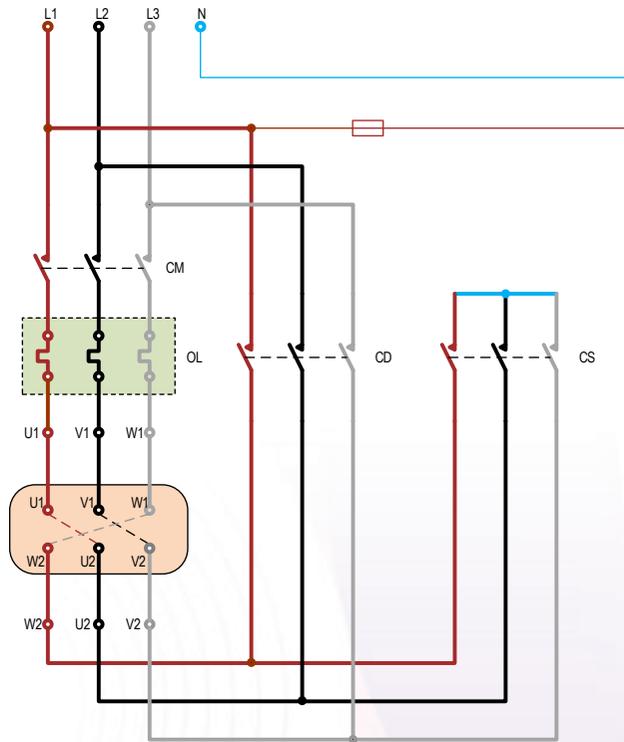
星角起動方法先把原來是接角形的電動機先以星形方式連接作起動（電壓較低），起動後再以角形方式連接作運行（電壓較高），從而降低起動電流，這方法屬於降壓起動，稱為星角「Y- $\Delta$ 」起動器，行內俗稱九線掣（因為控制掣箱內有 3 條來氣，6 條線去電動機，共 9 條較粗的大線）。九線掣的控制電路有多種設計，可算是各有特色，惟主電路都差不多，留意接駁過載繼電器的位置，應該檢測電動機的相電流，而不是較大的線電流。其中一種主電路及控制電路如（圖：2.7）及（圖：2.8）所示。

星角起動器當電動機起動時先將電動機接成星形，使起動電流減少至只是角形起動時的  $1/3(33\%)$ ，條件可滿足供電則例的要求。可是電動機的起動轉矩直接受起動電流的影

響，當起動電流減少時，電動機的起動轉矩也減弱，Y形的起動轉矩只是△形起動轉矩的1/3(33%)，所以星角起動器不適用於已帶有很大負載的起動場合，否則電動機因為沒有足夠的起動轉矩而不能起動。在香港的電動機 $\geq 7.5\text{HP}$  或 $\geq 5.5\text{kW}$ ，一般都會考慮採用星角起動器，電動機 $< 7.5\text{HP}$  或 $< 5.5\text{kW}$ ，都會採用直接起動方法。星角形起動方法之相關比較數據如(表：2.1)所示。

接法	線電壓 (VL)	相電壓 (VP)	每相阻抗 (Z)	起動相電流 (IP)	起動線電流 (IL)	總電功率 (P)	每相起動轉矩	三相起動轉矩
Y形	1	58%	1	58%	33%	33%	33%	33%
△形	1	1	1	1	1	1	1	1

(表：2.1)



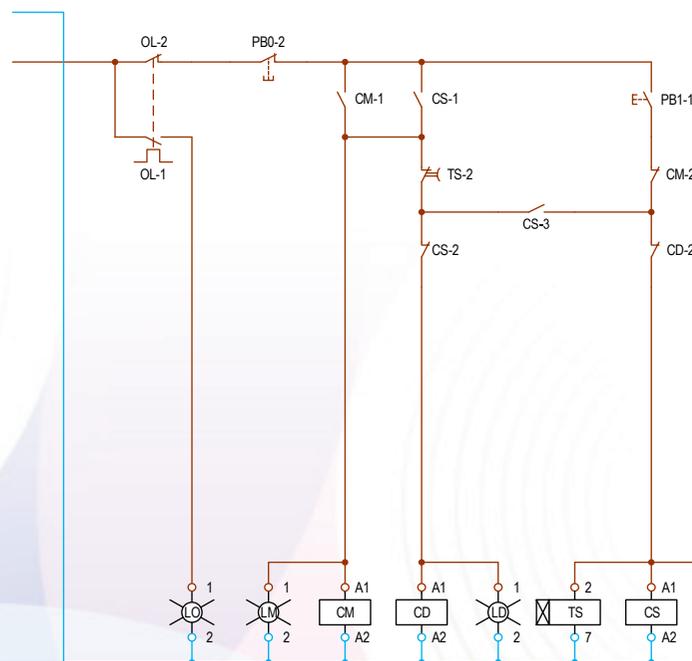
(圖：2.7)

### 電路工作原理 (圖：2.8)

1. 電動機起動時，首先按下PB1-1(起動)常開按鈕，控制電路電流經OL-2常閉觸點，PB0-2常閉觸點，PB1-1常開觸點，CM-2常閉觸點，CD-2常閉觸點等，使電磁接觸器CS線圈觸發吸索，(圖：2.7)CS主接觸點令電動機的U2、V2、W2接線端閉合，先將電動機以星形接法的星點連接；
2. 起動電路的时间掣TS線圈與CS線圈並聯，也同時被觸發並開始計時；

3. CS-1 常開觸點閉合，令電磁接觸器 CM 線圈吸索，三相電源 L1、L2、L3 分別經 CM 主觸點供應至電動機的 U1、V1、W1 接線端。由於電動機星點已連接，所以電動機以星形連接作起動形式運行；
4. CM-1 常開觸點旁路 CS-1 常開觸點，再經 TS-2 常閉觸點，CS-3 常開觸點作自保持，這時即使 PB1-1 常開觸點復位開路，CM、CS 及 TS 線圈仍保持有電；
5. TS (通電延遲式時間掣) 計時至預定的時間 (電動機 至差不多額定的轉速) 並動作，TS-2 常閉觸點打開，令電磁接觸器 CS 及時間掣 TS 失電釋放復位，電動機在該瞬間成為開路，慣性力量使電動機繼續運轉；
6. 電動機作短暫的開路後，TS-2 常閉觸點復位，電流經 CM-1 常開觸點，TS-2 常閉觸點，CS-2 常閉觸點，電磁接觸器 CD 線圈吸索，電動機接成角形，作正常的運行；
7. 再次按下 PB1-1 (起動) 常開按鈕，CM-2 及 CD-2 常閉觸點已打開，起動電路不會令星形電磁接觸器 CS 線圈再次被觸發；
8. 在任何情況下，當三相電源中斷，按下 PB0-2 (停止) 常閉按鈕或監察電動機電流之過載繼電器 OL-2 的常閉觸點開路，整個控制電路的電磁接觸器失電釋放復位。

特點：設備簡單，經濟，起動電流小。缺點：起動轉矩小，只適合於輕載和空載起動。



(圖：2.8)

### 選料、接線及測試

1. 按電動機的額定功率或額定電流的 1 倍來選擇主電路的斷路器及隔離開關，主及角形電磁接觸器 (AC3)，過載繼電器以不少於電動機額定功率或額定電流的 0.6 或 0.58 倍作評估 (觸點電流為相電流  $I_p$ ，只是線電流  $I_L$  的 0.58 倍)，星形電磁接觸器可

用 0.34 (I<sub>L</sub>/3) 倍作評估，也可根據角形電磁接觸器的較低一級規格作標準；

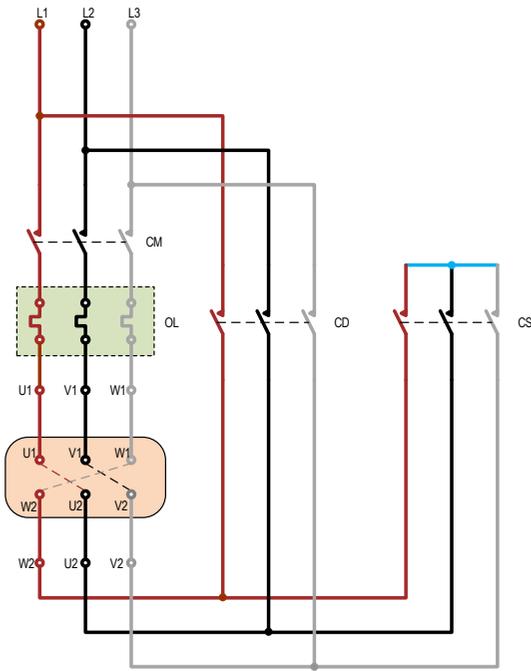
2. 根據電動機的額定電流或客戶要求規格來選擇適當的導體來接駁電路；
3. 先測試控制電路（不要接上電動機大線），檢查起動及停止、時間掣、接觸器吸索程序與電路設計要求結果是否一致，有需要須排除故障後才可繼續，惟必須檢測電動機行角形後，若再次按起動按鈕，星形索掣是否會吸索；
4. 接上電動機大線前，關閉電源，用萬用錶電阻檔根據（圖：2.7）主電路圖檢查大線是否按接線端編號來接駁（不能任意接駁）；
5. 將電動機接線箱的 3 條銅連杆（銅巴）移除，按已核實的大線接線端編號接駁至接線箱內 U1、V1、W1 及 U2、V2、W2 共 6 個的接線端；
6. 試行車時先將轉角形的時間掣調至較長的時間，看電動機行星形時是否正常，然後再檢測行角形的情況。留意電動機是否有噪音，用鉗錶檢測三相線電流分別在星形及角形運行時是否平衡，電流量是否正常；
7. 行車後檢查電動機轉向是否與實際需要的工作轉向相同，若轉向不同便需要「調相」，可將三相輸入電源 L1、L2、L3 其中兩相互換，令電動機的輸入相序不同，轉向便可改變；
8. 轉角形的時間掣一般可調至 2~15 秒，大型可調至 15~60 秒，也可用鉗錶檢測行星形時的電流作決定。電動機於星形起動時電流最大，然後會慢慢下降，當星形電流下降至穩定不變後，這時便可轉角形。

安裝九線掣電路時，一些初學者以為只要控制電路中俗稱「索掣」的電磁接觸器及時間掣是根據線路圖的時序正常操作，電動機部份便萬無一失，以致最後接駁 6 條電動機接線時，沒有根據電路圖的接線端編號來接駁，最後便出現故障，電動機不能正常運行。筆者曾於十多年前在本雜誌寫了一篇文章「星一角形起動器電動機主電路常見之錯誤」，介紹以往學生在接駁九線掣實習時之電動機部份時常出現的問題，現將部份內容與大家重溫。（圖：2.9）為一般九線掣的電動機主電路圖，較常出現的故障為：

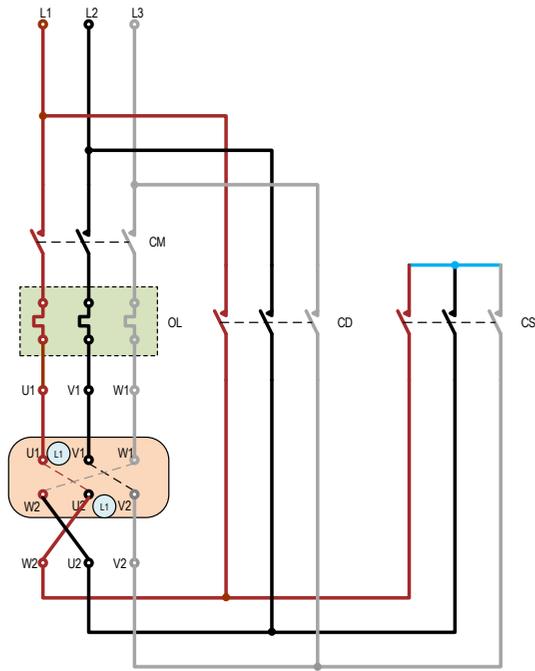
### 1. 行星形時電動機正常，轉角形後電動機有嘈聲並以較慢轉速繼續轉動

當出現以上故障時，應先查看角形索掣 CD 的 3 對主接觸點是否正常。主要原因是電動機 U2、V2、W2 的其中 2 條接線錯誤地對調。設 U1-U2 之間為電動機第一相繞組，V1-V2 之間為第二相繞組及 W1-W2 之間為第三相繞組。若 U2、V2、W2 的其中 2 條接線錯誤地對調，則電動機轉角形時，三相繞組其中一相的頭尾線便會接於同一相位，以致沒有電位差及電流，電動機只有其餘二相繞組有正常供電，變成缺相運行。

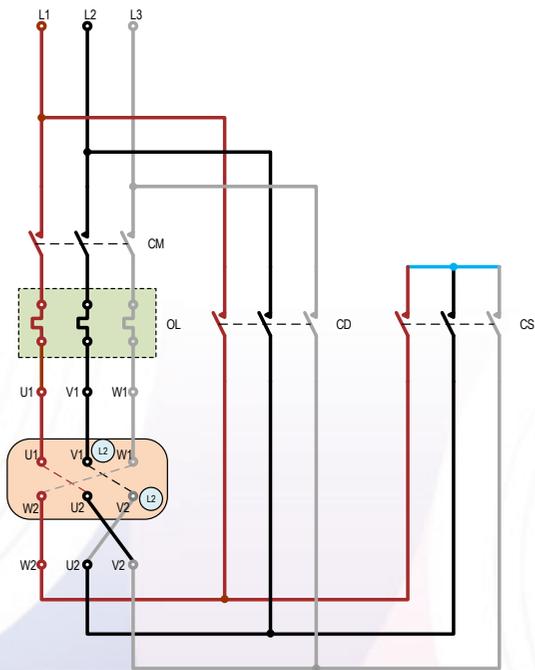
- （圖：2.10）為 U2 及 W2 錯誤地對調，轉角後第一相繞組頭尾線 U1-U2 同接於 L1 相
- （圖：2.11）為 V2 及 U2 錯誤地對調，轉角後第二相繞組頭尾線 V1-V2 接於 L2 相
- （圖：2.12）為 W2 及 V2 錯誤地對調，轉角後第三相繞組頭尾線 W1-W2 接於 L3 相



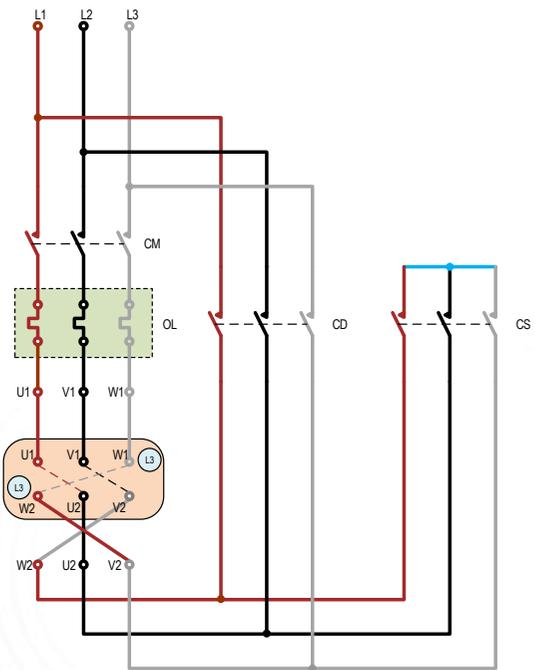
(圖：2.9)



(圖：2.10)



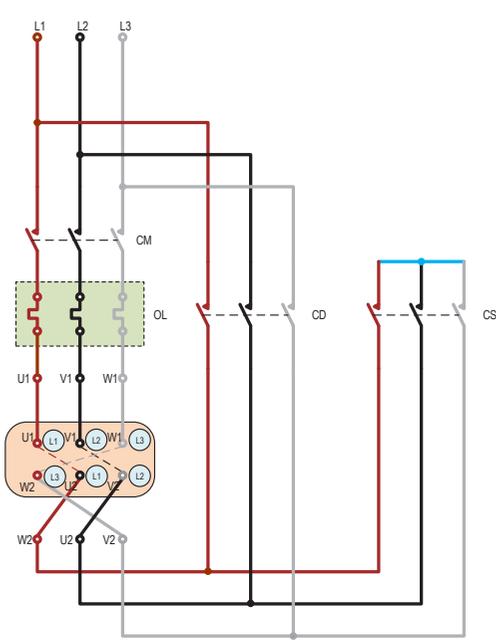
(圖：2.11)



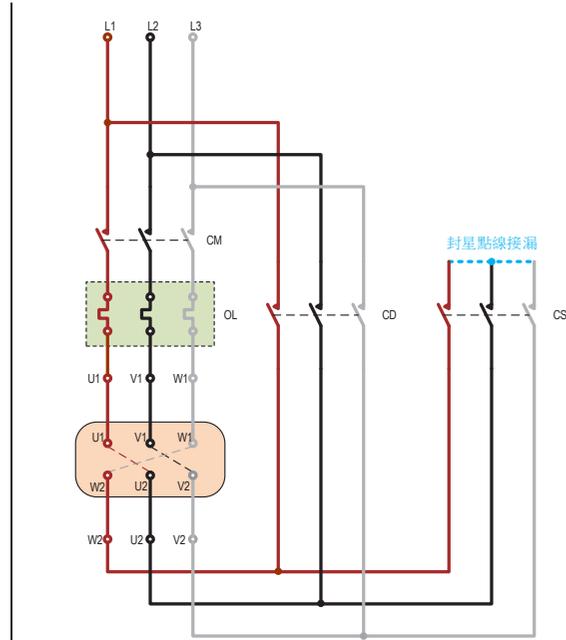
(圖：2.12)

## 2. 行星形時電動機正常，轉角形後電動機慢慢減速直至停止運行

當出現以上故障時，應先查看角形索掣 CD 的 3 對主接觸點是否正常。惟主因是接駁電動機的 3 條接線 U2、V2、W2 時，一起錯誤地向右移了一接線位，如(圖：2.13)示，(若是向左移了一接線位，轉角形後也會正常轉動)，以致轉角形後電動機三相繞組的頭尾線都分別接於三相電的其中一相，U1-U2 接於 L1 相，V1-V2 接於 L2 相及 W1-W2 接於 L3 相，三相繞組在轉角形連接時均沒有電位差及電流，所以慢慢減速至停止。



(圖：2.13)



(圖：2.14)

### 3. 行星形時電動機完全不轉動，轉角形後卻正常運轉

當出現以上故障時，應查看星形索掣 CS 的 3 對主接觸點是否正常。但一般只是漏駁 CS 主接觸點之封星點短路接線，如（圖：2.14）示，以致行星形時，沒有星點，三相繞組沒有電位差，電動機便不能運轉。

以上有關九線掣電動機的故障，均假設三個索掣的全部大線至電動機之 U1、V1、W1 端點間都是根據電路圖正確連接的。當發現以上問題時，應先檢查有關索掣的主接觸點是否良好，再檢查主接觸點大線的連接是否與電路圖相同，最後根據電路圖中有關電動機的 6 個已編號的頭、尾端點接駁，電動機定必能正常操作的。九線掣是考電工牌時的熱門題目，新手必須充分掌握相關的要訣。🔗

- ◆ YouTube 影片 – Slip ring Induction Motor, How it works ? – 英語 – 英字幕 (可設定自動翻譯中文) (6:19)

<https://www.youtube.com/watch?v=JPn5Ou-N0b0>



- ◆ YouTube 影片 – Star Delta Starter power wiring / Star Delta Connection 色 / Star Delta Starter operation Explained – 英語 – 英字幕 (可設定自動翻譯中文) (7:04)

[https://www.youtube.com/watch?v=Lez5vaqeUVk&ab\\_channel=ElectroAcademy](https://www.youtube.com/watch?v=Lez5vaqeUVk&ab_channel=ElectroAcademy)



未完，下期再續