新手特區—

三相感應電動機起動(1/5，分5期刊登)

麥家聲
ksmak8888@yahoo.com.hk
http://www.ksmak-sir.com/

三相鼠籠式感應電動機 (Squirrel-cage induction motor) 是指電動機的定子裝有三相散嵌式分布繞組，轉子沒有繞組，用成型裸銅或鋁導體經絕緣作為籠條嵌壓入轉子鐵心槽及銅端環槽中，導體兩端與銅端環焊接成一體。由於這些導體與銅端環構成的形狀與舊式之鼠籠相似，故稱之為三相鼠籠式感應電動機。電動機在定子繞組輸入三相交流電後，便會產生旋轉磁場，其轉子上的閉合導體會因為切割定子旋轉磁場的磁力線而「感應」出電動勢和電流，而感應出電流的導體與旋轉磁場便會產生推斥力，從而驅動轉子運動，電動機轉子便旋轉起來，這就是三相鼠籠式感應電動機的工作原理。三相鼠籠式感應電動機的轉速一定較電動機旋轉磁場低，不能與旋轉磁場「同步」，否則兩者的相對速度為零，便再沒有感應電動勢，所以稱為「異步」，也有稱為三相鼠籠式異步電動機。

三相鼠籠式感應電動機使用的場合很多，在日常生活中包括：工業、商業、農業設備、港口碼頭、運輸、交通等各個領域，它有以下的特性：

優點：

- 結構簡單，成本低，價格便宜，堅固耐用，使用壽命長；
- 轉子上只有短路環及短路鋁條，不像繞線式（另一種感應電動機）有繞組，電刷及火花；
- 無需日常維護，故障率甚低，效率較高，性能穩定；
- 轉子不受電動機的極數影響，即使更改電動機繞組的極數，轉子也不需改動（線繞式轉子也一樣）。

缺點：

- 在起動過程中會產生較大的起動電流；
- 起動轉矩及功率因數較低；
- 調速性能較差。

鼠籠式轉子除可應用於三相供電外，也可製造成單相鼠籠式感應電動機，使用單相供電。但被廣泛採用的三相鼠籠式感應電動機，從小型到大型，若與單相鼠籠式感應電動機相比，具有高效率、高起動轉矩，驅動時無需電容器等優點；一般的單相鼠籠式感應電動機，

多用於家庭電器及只能提供單相供電的工、商業場合。三相鼠籠式感應電動機可算是工業動力上使用得最廣泛的一種電動機。分析三相鼠籠式感應電動機的電流時，可將電動機的轉子看成變壓器的次級，定子繞組為變壓器的初級。當三相鼠籠式感應電動機起動的瞬間，由於轉子還是靜止的，未有感應電動勢，基於鼠籠式轉子的電阻很小（變壓器次級），這時便好像一個次級短路的變壓器，所以定子繞組起動電流（變壓器初級）很大。一般的三相感應電動機，其起動電流約是額定電流的 5 至 7 倍。當電動機開始轉動後，轉子便會感應電動勢，起動電流會慢慢下降，直至起動過程完結後，才回復到額定電流。

根據供電則例，額定值高於 0.37kW 的電動機，需有過流和無壓的保護，當電動機的電流超過其額定值時，可以自動切斷電動機的電源，停止電動機的運作。再者，當電源中斷後，電動機需由操作人員再次操作才能起動，避免電源回復時，電動機會自行起動而產生的危險。此外，供電則例也規定 2.2kW 以上至少於 11kW 的三相電動機，起動電流不應高於其滿載電流的 6 倍，11kW 至少於 55kW 的三相電動機，起動電流不應高於其滿載電流的 2.5 倍。

三相鼠籠式感應電動機巨大的起動電流，雖然不是維持很長時間，也會對電網和其他用電設備造成衝擊。例如在一些較舊的樓宇，供電設施已很殘舊，電纜容量已用到極限，當有較大功率的電動機（升降機或水泵）起動時，這個增加了的短暫起動電流，會令樓宇的電纜產生一個比原來較大的電壓降，從而使樓宇各單位的供應電壓下降（嚴重時用戶可能感覺電燈會暗一暗，以往國內一些農村缺電時也會出現），這情況也可稱為電壓驟降，這些影響對其他用戶絕對是一種干擾。另外，這個巨大的短暫起動電流，也會對電動機的保護裝置及相關設施構成影響，長遠會令使用壽命降低，所以需要在電動機起動過程中採取必要的措施，從而降低起動電流。

為了符合供電則例，減少起動電流，三相鼠籠式感應電動機最常用的方法，是在電動機起動時，降低電動機的供應電壓，這類的方法，稱為降壓起動。因為根據歐姆定律，只需在起動時將供應電壓減低，起動電流也會下降，直至電動機起動過程完成後，才將正常的供應額定電壓接上；另一種稱為繞線式轉子感應電動機的轉子，可接上外加的電阻，然後慢慢將電阻短路，直至電動機完全起動後，才將外加電阻的短路電路截斷。

可是，電動機的轉矩是直接受電流影響的，當起動電流因供電電壓降低時，電動機的起動轉矩也隨之減弱，所以使用時應考慮電動機的特性和負載操作要求，為它配上一個適當的起動方法。隨著科技的進步，起動方法已有多種，有些已沿用了幾十年，仍然運作良好；較新的方法已加入了電子控制，使表現更理想。由於電動機一般會連接自動化系統，所以控制時都會採用電磁接觸器、過載繼電器、時間掣、按鈕及指示燈等元件組合而成。

過載繼電器

過載繼電器 (Thermal relay, Overload relay, OL)，也有稱積熱繼電器（電驛），它是用電流產生熱效應原理製成的電動機過載電流保護控制元件，可防止電動機電流過載，通常裝設於主電磁接觸器後方，內部主要有電阻發熱元件，雙金屬片，機械觸點等。

過載繼電器主要利用兩種不同熱膨脹係數之金屬疊合而成，行內多稱為雙金屬片，常用作電動機之過載保護檢測電流之用。當電動機發生過載超過設定值時，串聯於主電路的電阻發熱元件會比正常狀態產生較大的熱量，令設於鄰近的雙金屬片受熱，熱膨脹係數較大的金屬片伸長較多，而熱膨脹係數較小的金屬片伸長較少，使雙金屬片彎曲並產生機械動作，引

致過載繼電器內部的 N/C 常閉機械觸點被頂開而開路，N/O 常開機械觸點接通。由於常閉觸點會串聯電動機的控制電路，所以 N/C 常閉觸點開路也使電動機隨之斷電。N/O 常開觸點一般會連接過載指示燈，從而提示電動機已過載。過載繼電器的動作時間與過載電流的大小按反時限的關係變化，因此與一般也稱為繼電器元件在功能與使用上有很大的分別。過載繼電器安裝使用方便，功能較全面，成本低廉，對電動機進行可靠的過載保護。

直接起動方法

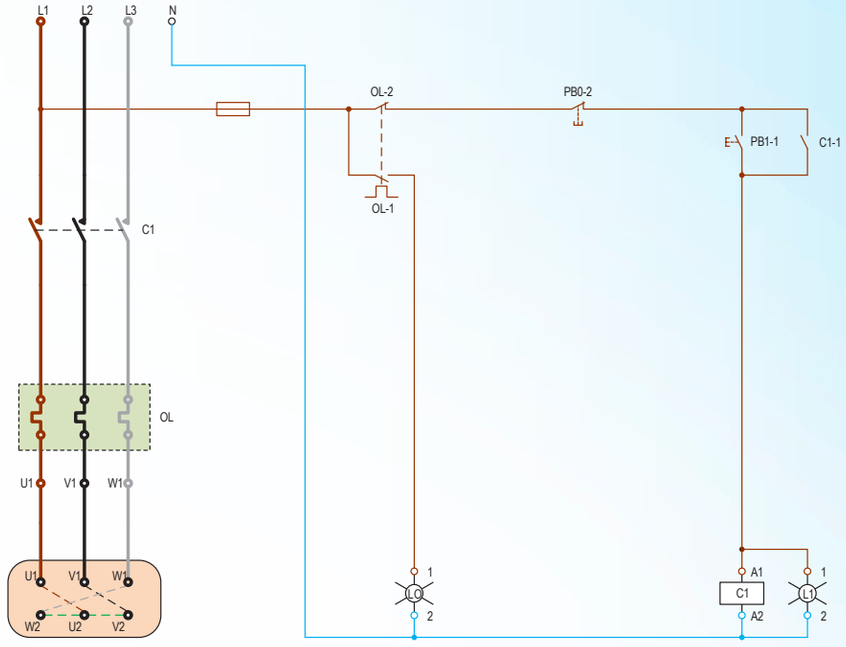
直接起動方法 (Direct on-line, DOL) 可算是最簡單及最便宜的起動方法，它從電動機起動至運行的過程，三相額定電源會直接供電至電動機，所以起動電流很大，約為額定電流的 5~7 倍，惟電動機也有較大的起動轉矩，此方法只適合於小型電動機。此外，電動機為了要提供過流和無壓保護，起動器一般裝有一個電磁接觸器和過流元件，電磁接觸器和過流元件通常是直接連接的，主電路及控制電路如（圖：1.1）所示。

直接起動器 (Direct on line starter) 是市場上較容易購買的產品，它主要由三相直接起動電路構成，惟所有的配件包括起動按鈕、停止按鈕、主接觸器及過載繼電器等都裝在一個小型控制箱內，箱內大部分的佈線已完成，使用時只須根據電動機容量，購買適當規格的起動器，再將三相電源（輸入）及三相電動機（輸出）接上便可，其效果與一般直接起動電路一樣。

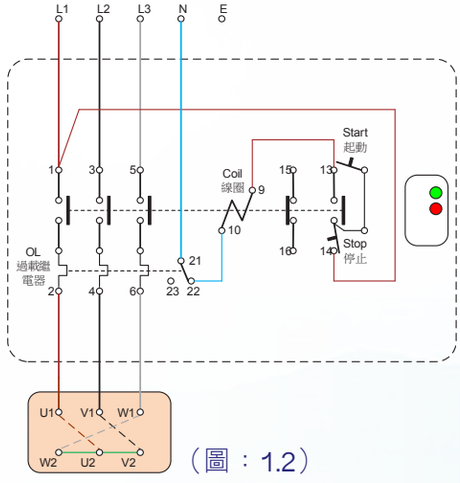
由於直接起動器令電路簡化，體積較小，易於購買，價錢平，所以廣泛用於鑽床、抽風機及小型三相電動機的場合。惟選擇時除考慮負載的電流量外，也要留意繼電器的線圈電壓，在香港有主流的 220V（圖：1.2）及較少人採用的 380V（圖：1.3）兩種，前者必須提供三相四線供電（需有中性線）；後者只需提供三相三線供電便可（不需有中性線）。

電路工作原理（圖：1.1）

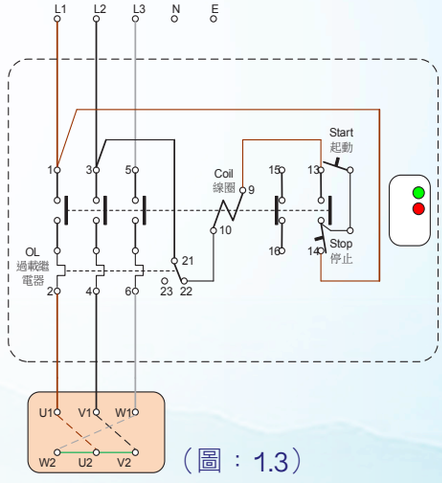
1. 當按下 PB1-1（起動）常開按鈕時，控制電路通電，電磁接觸器 C1 線圈得電吸索，C1 主觸頭閉合，三相電源經 C1 電磁接觸器的主觸頭和過流元件 OL 供電至電動機，電動機以全壓起動及運行；
2. 電磁接觸器 C1 線圈得電時，其輔助觸點隨之轉態，C1-1 常開觸點變為閉合，為 PB1-1 按鈕提供旁路（自保），即使 PB1-1 復位開路，控制電路仍然可繼續操作，保持電動機的電力供應。利用自身電磁接觸器的輔助常開觸點保持控制電路的電磁接觸器操作功能，叫自保持 (Self hold) 電路；
3. 在任何情況下，當三相電源中斷或按下 PB0-2（停止）常閉按鈕時，控制電路斷路，電磁接觸器失電釋放復位，C1 主觸頭打開，輔助觸點也復位，中斷電動機的電力，使電動機停止運轉；
4. 若電動機電流超過其設定的額定值時，過流元件 OL 動作，其常閉觸點 OL-2 轉態，切斷控制電路，使電動機停止運轉。大部分過流元件 OL 會設定至由人手「M」操作，方能復位，目的是過流後須經由專業人員檢查電路，才可繼續工作。也有特別需要場合會將 OL 設定至自動「A」操作，只要雙金屬片冷卻後，回復原來正常狀態，便會自動重置。在任何時間或情況，當控制電路斷路或電源中斷後，即使三相電源回復，除非



（圖：1.1）



（圖：1.2）



（圖：1.3）

由操作人員再按下 PB1-1 常開按鈕，否則，電動機也不能自行起動，為電動機提供了「無壓保護」。

特點：起動轉矩大，所需設備少，成本低，起動與運行集於一身，經濟，操作和控制簡單，可靠。缺點：強大的起動電流衝擊電網和電動機，容易造成電機過熱，影響電動機的使用壽命，也對電網穩定性構成影響。所以大容量的電動機，不適宜使用直接起動方法，它只適合於小型電動機不太頻繁起動，因太頻繁起動也有機會令其過熱。

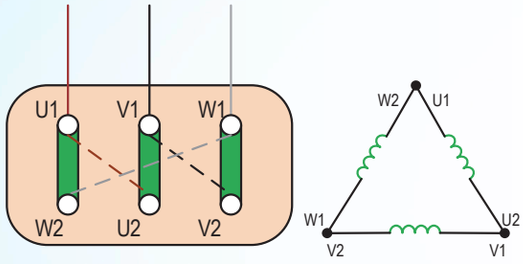
選料、接線及測試

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，主電磁接觸器 (AC3)，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；
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；

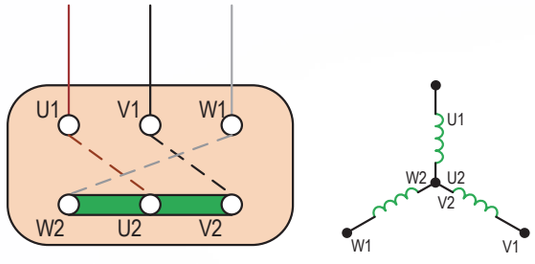
3. 先測試控制電路（不要接上電動機大線），檢查起動及停止按鈕、接觸器吸索程序與電路設計要求結果是否一致，有需要須排除故障後才可繼續；

4. 根據電動機的特性及需要，將電動機接線箱的 3 條銅連杆（銅巴）接到 3 或 6 個接線端。角形或星形接法如下：將銅連杆於 6 個接線端上下接駁，構成 3 條垂直的銅巴，便是「角形」接法，而入氣的大線可分別接於 3 條銅巴上或下位置，如（圖：1.4）示。將上或下的 3 個接線端用 3 條銅連杆接駁（2 條已足夠，其餘一條可重疊安裝，不要掉去），構成上或下橫向的銅巴，便是「星形」接法，入氣的大線可分別接於沒有銅巴的 3 個接線端，如（圖：1.5）示；

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。觀察電動機轉向是否與實際需要的工作轉向相同，否則抽風機會變成吹風機，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。



（圖：1.4）



（圖：1.5）

電阻或電抗降壓起動方法

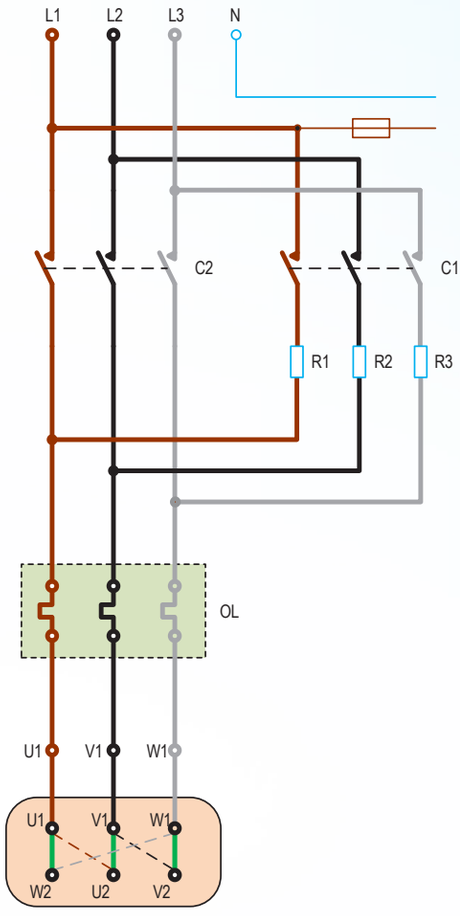
電阻或電抗降壓起動 (Resistor/Reactor starter) 是將適當阻值的電阻器或電抗器串聯於定子中，令阻抗增大，使起動電流減少，起動後再將電阻器或電抗器短路或移去。可是這方法令電動機的端電壓也下降，基於電動機轉矩會隨電壓的平方下降，所以起動轉矩也會減少。例如：起動時的電動機電壓為額定值的 50%，則起動轉矩僅為正常電壓值時的 $(0.5)^2$=25%，這個起動轉矩只適用於輕載場合，應用時一般會採用 70% 左右作參考。這種起動方法也屬於降壓起動，主電路如（圖：1.6）及（圖：1.7）所示，控制電路如（圖：1.8）所示，可同時適用於電阻或電抗降壓起動主電路。特點：電路簡單，不受電動機接線形式的限制。缺點：起動電流只有較少的減低，起動轉矩將減少，將電感換成電阻，成本更低，但電阻器較電抗器能量消耗大。它適合於不經常起動場合或用於空載、輕載的電動機，常用於中小型機床中，由於不符合經濟效益，現已較少採用。

選料、接線及測試

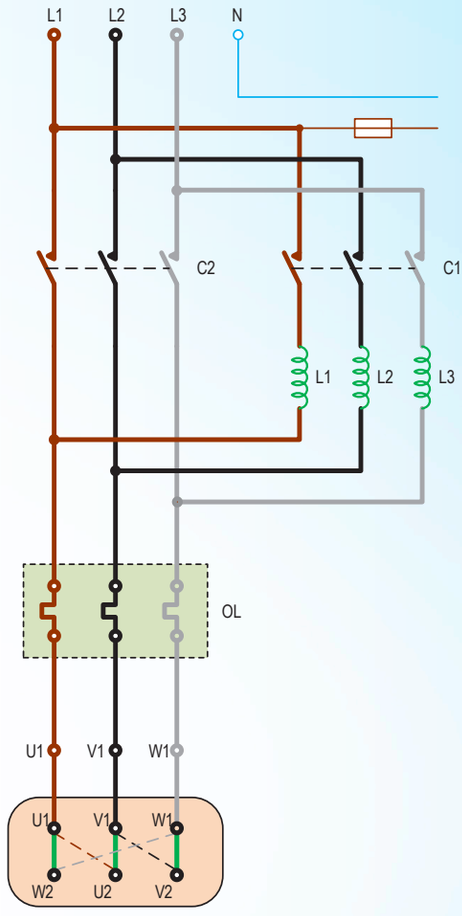
1. 按電動機的額定功率或額定電流的 1 倍來選擇主電路的斷路器及隔離開關之容量，主電磁接觸器 (AC3)，過載繼電器同樣以電動機額定功率或額定電流的 1 倍作評估；

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



（圖：1.6）



（圖：1.7）

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，目測電阻器或電抗器於起動時的狀況。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；

6. 評估電阻器或電抗器大小時，應先決定在起動期間要向電動機施加多少百分比的電壓，看起動轉矩是否足夠可驅動負載。若以星形接駁 220V，20A，起動電流 6 倍為 I_S=20x6=120A 的電動機為例，設可將電壓降低至額定電壓的 70%=154V，即電阻器或電抗器電壓降為 V_R=30%=66V。電阻器或電抗器的電阻或阻抗為 $R=Z=V_R/I_S$=66/120 =0.55Ω，功率為 $P_R=I_SV_R$=120x66=7.92kW 或 $P_R=I_S^2R=120^2$x0.55=7.92kW。

電路工作原理（圖：1.8）

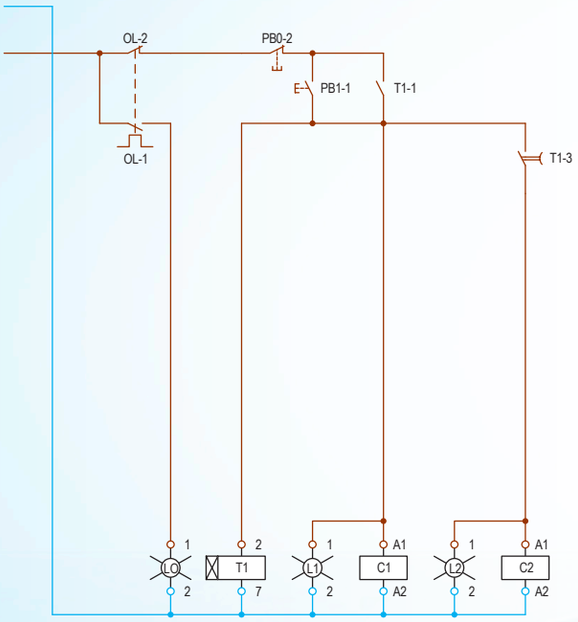
1. 電動機起動時，首先按下 PB1-1（起動）常開按鈕，電磁接觸器 C1 線圈觸發得電吸索，由於 T1 時間掣線圈與 C1 線圈並聯，這時 T1 線圈同樣得電，T1-1 瞬時常開觸點變為閉合，為 PB1-1 常開按鈕提供旁路，即使 PB1-1 掣復位，C1 控制電路仍然繼續操作，

這時三相電源經電阻或電抗器向電動機作降壓起動；

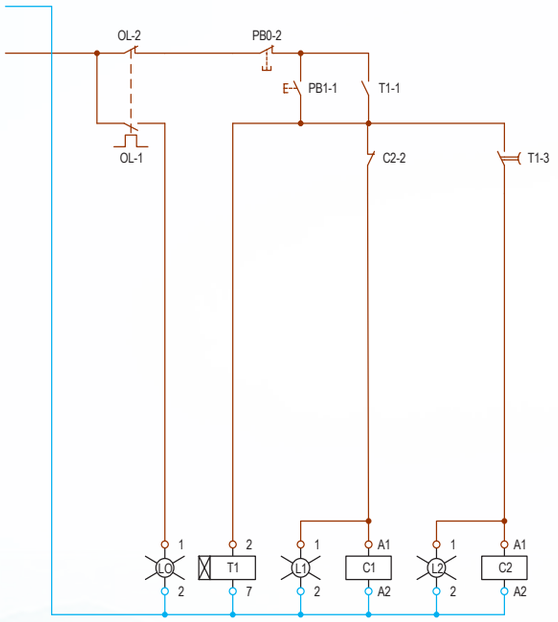
2. T1 時間掣開始計時；

3. T1 通電延遲時間掣到達預定時間後，其通電延遲常開觸點 T1-3 閉合，觸發 C2 線圈，C2 主觸頭閉合將電阻或電抗器旁路，電動機正常全壓運行，這時 C1 及 C2 線圈都被吸索。（圖：1.9）為改良的控制電路，於 C1 線圈前附加一對 C2-2 常閉觸點，當 C2 吸索後，截斷 C1 線圈電源，C1 便不需長久吸索；

4. 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，控制電路開路，C1、C2 及 T1 線圈失電釋放復位，C1 及 C2 主觸頭打開，輔助觸點也復位，中斷電動機的電力，電動機停止運轉。



（圖：1.8）



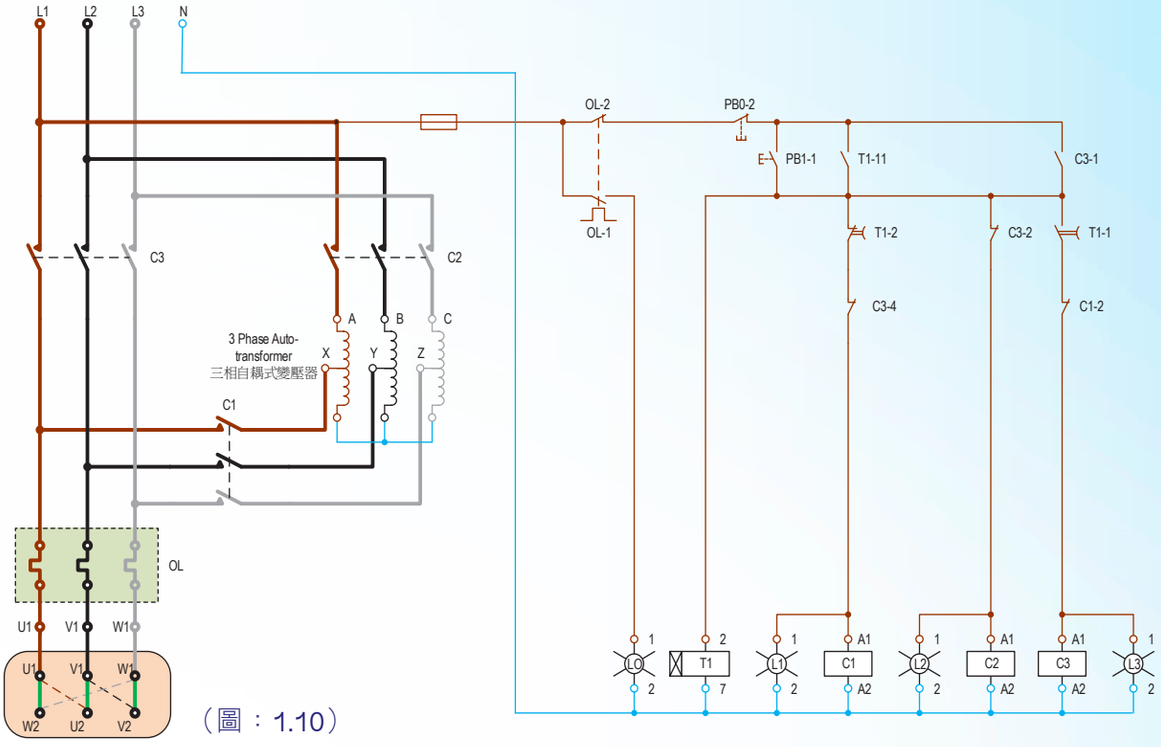
（圖：1.9）

自耦式變壓器起動方法

自耦式變壓器起動方法 (Auto-transformer starter) 的電源經三相自耦式變壓器降壓後供電至電動機，也屬於降壓起動，常用於較大容量及高壓的三相交流電動機。起動時，電動機在自耦式變壓器較低壓的抽頭獲取電壓，起動後把自耦式變壓器電路移離全壓運行或將電動機接至有額定電壓的抽頭運行。自耦式變壓器起動器採用的自耦式變壓器設有 50%、65% 和 80% 線路電壓之抽頭，從抽頭輸出的電壓給予電動機作降壓起動。由於起動電流及起動轉矩與其端電壓的平方成比例降低，所以對應以上百分比的抽頭，使電動機的起動電流分別為全壓起動電流的 $(50\%)^2=25\%$、$(65\%)^2=42\%$ 和 $(80\%)^2=64\%$。自耦式變壓器起動器的主電路及控制電路如（圖：1.10）所示。

電路工作原理（圖：1.10）

1. 起動時首先按下 PB1-1（起動）常開按鈕，時間掣 T1-11 即時啟動觸點旁路 PB1-1 作自保持，即使 PB1-1 復位，起動仍繼續；時間掣 T1 線圈被觸發開始計時；電流再經 T1-2



（圖：1.10）

常閉觸點，C3-4 常閉觸點，電磁接觸器線圈 C1 被吸索；電磁接觸器線圈 C2 經 C3-2 常閉觸點被吸索；

2. 三相電源經 C2 主觸頭供電至自耦式變壓器輸入端，自耦式變壓器經抽頭降壓後，經 C1 主觸頭輸出供電至電動機，電動機用較低電壓起動；

3. 時間掣 T1 到達預定時間，電動機應已運行至額定轉速，T1-2 通電延遲常閉觸點打開，令 C1 失電復位，C1 主觸頭停止供電；T1-1 通電延遲常開觸點閉合，再經剛復位的 C1-2 常閉觸點令電磁接觸器線圈 C3 被吸索，三相電源直接（C3 主觸頭旁路自耦式變壓器）供電至電動機；

4. C3-2 常閉觸點打開令 C2 線圈復位，自耦式變壓器輸入端停止再供電；

5. 電動機完成起動，繼續以額定電壓正常運行；

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，整個控制電路的電磁接觸器復位。

特點：經久耐用，維護成本低。自耦式變壓器降壓起動的電壓比抽頭 k 值是可以調節的，使用時可根據實際需要選擇或訂製適當 k 值靈活使用，運行時可以直接由人手操作控制或用電磁接觸器作自動控制，常用於不頻繁起動，起動轉矩較大，容量較大的場合，也常用於高壓抽水泵及噴射式隧道風扇上；缺點：體積大，重量重，價格高，電路相對複雜，修理麻煩。

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，主

電磁接觸器 (AC3)，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。自耦式變壓器的功率應大於或相當於電動機功率，自耦式變壓器抽頭的 k 值，應按負載大小作評估，有需要時可根據計算公式來核實；

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，起動及運行時的電流，目測自耦式變壓器於起動時的狀況。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；

6. 自耦式變壓器降壓起動電路不能頻繁操作，如果起動不成功的話，第二次起動應間隔 4~5 分鐘以上，假如在 60 秒連續內兩次起動後，應停電 4 小時再次起動運行，主要是為了防止自耦式變壓器繞組內起動電流太大而發熱損壞自耦式變壓器的絕緣。

另一種自耦式變壓器起動電路在行內也被廣泛使用，它在主電路作出修改，將自耦式變壓器的封星點接到電磁接觸器作控制，如（圖：1.11）所示，所以必須採用獨立端點連接的自耦式變壓器（部份自耦式變壓器於出廠時已將封星點作內部連接，不能拆開）。該電路的好處是當降壓轉為全壓供電的瞬間，至電動機的電流沒有中斷；相反（圖：1.10）的電路，當降壓轉為全壓供電時，電磁接觸器轉換的瞬間，電動機的電流會有短時間的斷電情況，構成二次電流。

電路工作原理（圖：1.11）

1. 起動時首先按下 PB1-1（起動）常開按鈕，電流經輔助繼電器 R1-2 常閉觸點使電磁接觸器線圈 C1 被吸索，C1-1 常開觸點旁路 PB1-1 作自保持，即使 PB1-1 復位，起動仍繼續，這時 C1 的主觸頭令自耦式變壓器的星點被封；

2. C1 吸索後，C1-3 常開觸點閉合通路，電流經 C1-3，C3-2 常閉觸點令時間掣 T1 線圈被觸發開始計時，與 T1 並聯的電磁接觸器線圈 C2 也被吸索，T1-11 即時啟動觸點與 C1-3 並聯作自保持（作用是起動後 C2 比 C1 較遲釋放彈出復位，自耦式變壓器的繞組變成串聯的扼流圈），C2 主觸頭接通自耦式變壓器的來電，自耦式變壓器有星點及來電，抽頭便有輸出，三相電流由自耦式變壓器抽頭經 OL 輸出至電動機，電動機以設定的較低電壓起動；

3. 電動機運行至設定時間後，T1 時間掣有輸出，T1-1 通電延遲常開觸點閉合通路，觸發輔助繼電器 R1，R1-1 常開觸點旁路 T1-1 作自保持，R1 被吸索；

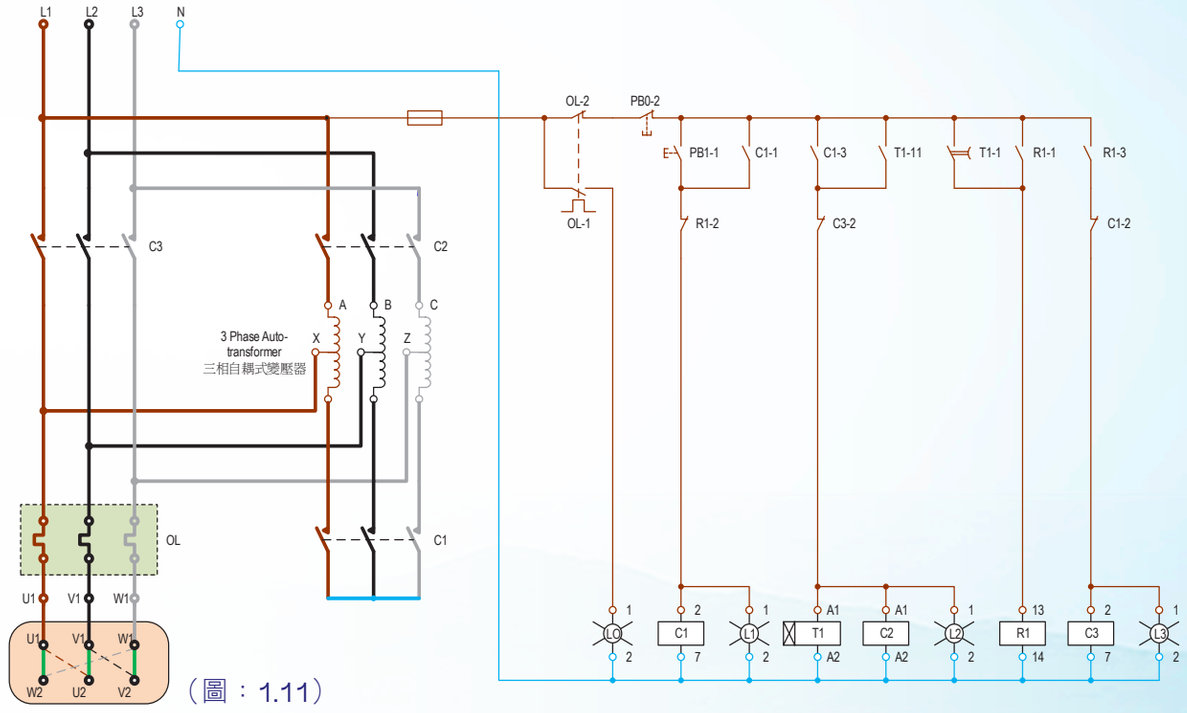
4. R1-2 常閉觸點因 R1 吸索被開路，令 C1 電磁接觸器釋放彈出復位，自耦式變壓器的

封星點開路，惟 C2 電磁接觸器仍未釋放彈出復位，這時自耦式變壓器的繞組視為串聯的扼流圈，電流從自耦式變壓器繞組經抽頭供電至電動機，電動機的供電未有中斷；

5. R1-3 常開觸點也因 R1 吸索被閉合接通，而 C1-2 常閉觸點也復位通路，電流經 R1-3 常開觸點及 C1-2 常閉觸點令電磁接觸器線圈 C3 被吸索，C3 電磁接觸器主觸頭旁路當時成為扼流圈的自耦式變壓器繞組，電動機以全壓運行；

6. C3 電磁接觸器吸索後，C3-2 常閉觸點被開路，令時間掣 T1 及 C2 電流中斷，T1 及 C2 復位，這時只有輔助繼電器 R1 及電磁接觸器 C3 被吸索，電動機以全壓正常地運行；

7. 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，整個控制電路的電磁接觸器、輔助繼電器、時間掣復位。



（圖：1.11）

◆ YouTube 影片－ What is an Overload Relay? Connection & Working Principle －英語－英文字幕 (可設定自動翻譯中文)（8:23）
https://www.youtube.com/watch?v=3aur1tZYlKE&ab_channel=Automatedo

◆ YouTube 影片－感應電動機 Induction Motor －英語－英文字幕（4:49）
https://www.youtube.com/watch?v=CL2YEx4ul80

未完，下期再續