

新手特區—

三相感應電動機起動 (5/5, 分5期刊登)

麥家聲

ksmak8888@yahoo.com.hk

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

續上期

變頻器

三相 4 極感應電動機的轉速約為 1440rpm，而 2 極感應電動機的轉速約為 2960rpm。基本上，交流感應電動機的同步轉速 N_s 由兩個因素決定：供電頻率 f 及電動機磁場對極數 p ，而感應電動機轉子之轉速 N_r ，永遠較同步轉速為低。因為轉子導體與旋轉磁場間必需保持相當之轉速差，構成相對速度，才使轉子導體能切割旋轉磁場磁力線以感應電壓，產生電流以產生轉矩，兩者之轉速差稱為轉差率 s 。根據轉速的關係公式，當需要調節電動機的轉速時，感應電動機可選擇改變頻率這方法來達成。

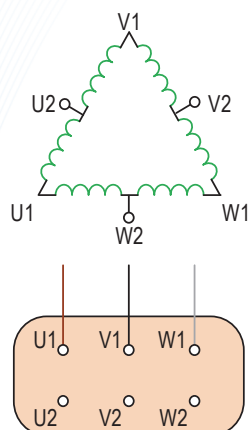
$$N_s = \frac{60 \times f}{p}$$

$$N_r = N_s (1 - s)$$

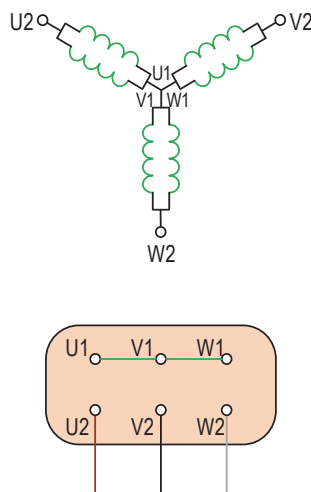
$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100\%$$

 N_s = 電動機的同步轉速 (rpm) p = 電動機的對極數 (對) N_r = 電動機轉子的轉速 (rpm) f = 供電頻率 (Hz) s = 轉差率 (%)

慢速 (4 極, 1440 轉) 單角接法



快速 (2 極, 2960 轉) 雙Y接法



(圖：5.1)

雖然感應電動機調速也可選擇改變電動機磁對極數 p 來進行，稱為「變極法」。但這方法需要改動電動機的物理性質，例如：需要重繞電動機繞組，並於製作電動機繞組時，預先安排電動機繞組接線，才可在不同的連接方法下，從而獲得不同的磁對極數，惟此方法的調速也受一定的限制。一台用變極法製成的雙速感應電動機接線圖如（圖：5.1）所示，它可以 4 極單 Δ 方式連接低速（1440rpm）作起動；當需要高速運行時，以 2 極雙 Y 連接高速（2900rpm），使用時可採用電磁接觸器及控制電路作控制，令電動機繞組達致不同的接法，這樣只需用一個電動機的繞組，便獲得二個不同的轉速。

變頻器 (Inverter, Variable Frequency Drive, VFD) 是一種電子裝置，能把電網固定不變的交流電壓和頻率，變換成電壓及頻率都可變的交流電裝置。一般的變頻器首先把三相或單相交流電（AC）變換成直流電（DC），然後再把直流電變換為可調頻的三相或單相交流電（AC）。變頻器工作時會同時改變輸出頻率與電壓，由於頻率改變，也就是改變了電機運行曲線上的轉速，使電機運行曲線平行下移。變頻器具有調壓、調頻、穩壓、調速等基本功能，能夠實現真正的軟起動、軟停車和高效調速。它應用了現代的科學技術，價格昂貴但性能良好，內部結構複雜但使用卻簡單，所以現今不只是簡單用於起動電動機，而是廣泛地應用到各種不同的場合。

優點：變頻器可以使電動機以較小的起動電流而獲得較大的起動轉矩，可以起動重載負荷，電動機可軟起動及軟停車，運轉全程都可作轉速控制，減少功率損耗。
缺點：價錢十分高，也需要專業人士維修。

變頻器的功能作用

軟起動及軟停車——變頻器的軟起動可控制電動機的起動電流從零開始變化，使最大值也不超過額定電流，減輕對電網的影響。軟停車使電動機由高速運轉，然後慢慢減速直至完全停止，使設備及生產系統停車更平滑，相關的設備衝擊減低。軟起動及軟停車可延長設備和閥門的使用壽命，同時也節省設備的維護費用。

變頻節能——變頻器常用於風機、水泵的場合。在傳統的風機、泵類一般會採用擋板和閥門進行流量調節，電動機轉速基本不變。由於電動機的功率與轉速的三次方成比例，當這些電動機輸出至負載需求較低時，可採用變頻調速控制使其轉速降低，便可節省約 20~60% 功率。

自動化及生產系統應用——由於變頻器內置有微處理器，具有多種邏輯運算和智慧控制功能，令輸出精度很高。而且它更有完善的檢測、保護環節，因此，在自動化系統中獲得廣泛應用。變頻器更廣泛應用於傳送、起重、擠壓和機床等各種機械設備控制領域，提高工藝水平和產品品質，減少設備的衝擊和雜訊，延長設備的使用壽命。採用變頻調速控制後，使機械系統簡化，操作和控制更加方便，甚至可以改變原有的工藝規範，從而提高了整個設備的功能。

變頻家電——變頻器除應用在工、商業外，在一般家庭中，可節約能源、提高家電性能、保護環境等的改進，已受到越來越多的關注，所以變頻家電將會成為另一個應用趨勢。現有已採用變頻技術的產品有變頻控制的雪櫃、洗衣機、家用空調冷氣等。變頻家電在節能、減小電網衝擊、降低噪音、提高控制精度等方面，對源用已久的模式有很大的優勢。

變頻器的結構

較主流的交—直—交變頻器的結構，主要可分成四個部分，方塊圖如（圖：5.2）所示。

1. 整流器

變頻器內的整流器與單相或三相交流電源相連接，利用二極管或晶閘管將交流電轉換成脈動的直流電壓。整流器有三種基本類型，包括不可控，半可控和可控的。不可控整流之整流方法的直流輸出電壓和交流電源電壓的比值為固定，不能改變。選擇整流電路時，主要從輸出性能好、結構簡單、經濟實用、對電網影響小等方面考慮。一般用於變頻器的整流器，都會選用要求較高的整流方法。

單相的整流類別中，以全波不可控橋式整流最普遍；單相半波因諧波較高，甚少採用。三相整流類別中，三相變壓器半波不可控整流及三相變壓器全波不可控整流是較常用的整流方法。

某些要求更高的變頻器，也會採用可控整流的方法，包括：全波全控橋式整流，三相變壓器半波全控整流及三相變壓器全波全控整流。可控整流以相位控制閘流體來取代二極體，而閘流體整流器的輸出電壓，更可以根據控制閘流體的觸發角而加以改變，輸出電壓可作調壓。此種相位控制構造簡單，並且價格便宜，其效率一般

均高於 95% 以上，所以應用極為廣泛。

2. 中間電路

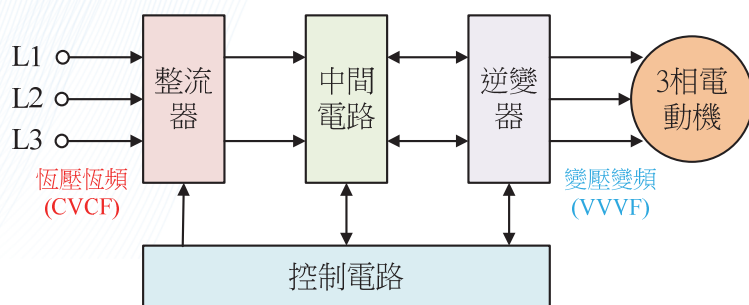
變頻器的中間電路有以下三種主要的功能：

- 將整流電壓轉換成直流電流或可變的直流電壓；
- 配置濾波器使脈動的直流電壓變得更穩定及平滑，以供逆變器使用，提高變頻器性能；
- 通過開關電源為各個控制線路供電。

3. 逆變器

逆變器將直流電轉換成單相或三相交流電，並產生可供電動機使用的電壓及頻率，而變頻調速的基本方式為控制基準電壓及基準頻率。電動機用變頻調速時有兩種情況，是基頻（基準頻率，供電頻率）以下調速及基頻以上調速，惟調速時應盡量保持電機主磁通為額定值不變。若磁通過弱（電壓過低，基頻以上，轉速調高），稱為「弱磁」，電動機鐵芯不能得到充分利用，電磁轉矩變小，負載能力下降；如果磁通過強（電壓過高，基頻以下，轉速調低），電動機處於過激磁狀態，因電流過大而嚴重發熱。電動機內有繞組線圈，就有電感，不同頻率供應便會產生不同感抗，從而影響到電流，再影響功率，惟調速時提供給電動機的功率應不得超過其額

定功率。所以大部分逆變器除變頻外，也會同時將固定的直流電壓轉換成可變的交流電壓，即同時進行變壓變頻（VVVF），使電動機電流變化，令電動機達到額定功率，電動機的最大轉矩不變，仍維持磁通「 Φ 」恆定，使電壓與頻率的比列始終為一個固定值。



（圖：5.2）

4. 控制電路

控制電路將訊號傳送給整流器、中間電路和逆變器，同時也接收來自這部分的訊號作回饋，具體被控制的部分取決於各個變頻器的設計。它的主要功能：

- 利用訊號來開、關逆變器的半導體元件；
- 提供操作變頻器的各種控制訊號；
- 監視變頻器的工作狀態，提供保護功能。

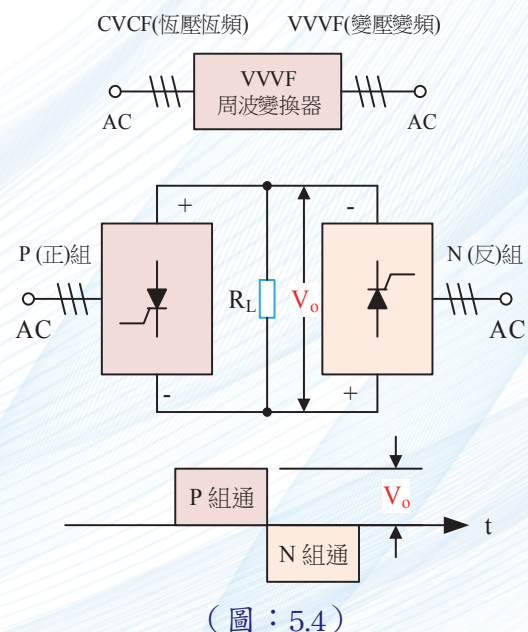
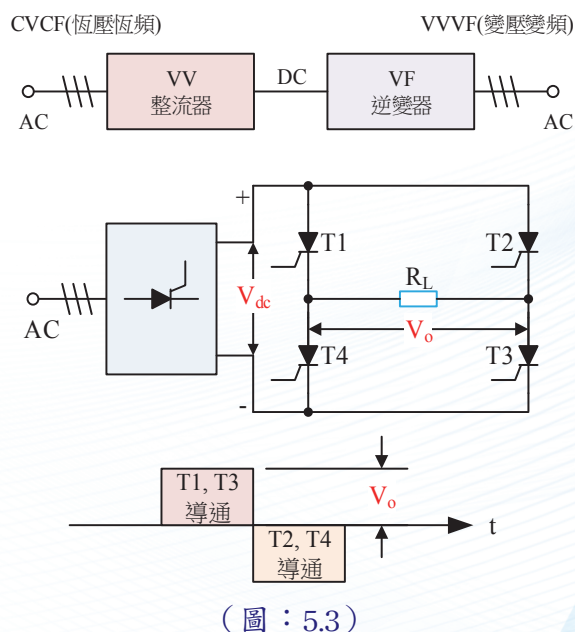
交—直—交變頻器

交—直—交變頻器又稱為間接式變頻器，它先把交流電源整流，得到幅值可變的直流電壓。然後經四個（單相）開關元件輪流導通，從而使負載獲得幅值和頻率均可變化的交流輸出電壓。其幅值由整流器輸出的直流電壓決定，頻率則由逆變器的開關元件的切換頻率所決定，即變頻器的輸出頻率不受電網頻率的限制，所以用途廣泛，是主流及最常用的變頻方法。

在交—直—交變頻器中，有一個將直

流電壓轉變為頻率不同的交流電壓的過程，可是變頻器輸出卻是方形波。如果直接把這個方形波輸入給電動機的話，其效率將比由正弦波供電的效率下降 5~7%，功率因數要下降 8% 左右，而電流卻要增大 10 倍。為解決這一問題，在 VVVF 型電動機的調速系統中，多採用脈寬調制控制器 (Pulse Width Modulation, PWM)。PWM 就是按一定的規律，控制逆變器中功率開關元件的通與斷，從而在逆變器的輸出端，獲得一組等幅而不等寬的矩形脈衝波，用來近似等效正弦波的一種裝置。

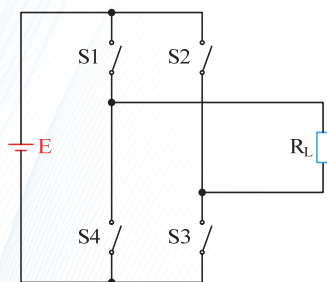
交—直—交變頻器的方塊圖及工作原理如（圖：5.3）所示。變頻器先將三相交流電源整流得到幅值可變的直流電壓 V_{dc} ，然後經開關元件 T1、T3 和 T2、T4 輪流切換導通，則在負載 R_L 就可獲得幅值和頻率均可變化的交流輸出電壓 V_o ，其幅值由整流器輸出的直流電壓 V_{dc} 所決定，而頻率由逆變器的開關元件的切換頻率所決定，即交—直—交變頻器的輸出頻率不受電網頻率的限制。



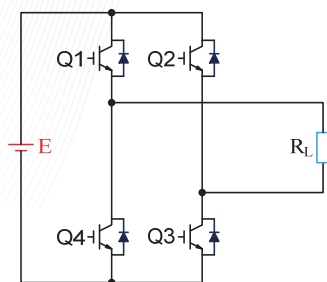
交—交變頻器

交—交變頻器又稱為直接式變頻器，它是由兩組反向並聯的整流器組成，經適當的「電子開關」，按一定的頻率使兩組整流器輪流向負載供電，使負載獲得變化了的輸出電壓。輸出電壓的幅值，由各組整流器的控制角決定。而其變化頻率，則由「電子開關」的切換頻率所決定，惟變化的頻率只能在電網頻率以下的範圍內進行變化，減少了中間電路環節，從而省去了體積大、價格貴的電解電容，效率較高。

交—交變頻器的方塊圖及工作原理如（圖：5.4）所示，它由兩組反向並聯的變流器 P 和 N 所組成。經適當的「電子開關」按一定的頻率使 P 組和 N 組輪流向負載 R_L 供電，負載 R_L 就可獲得變化的輸出電壓 V_o 。 V_o 的幅值是由各組變流器的控制角 α 所決定， V_o 的頻率變化由「電子開關」的切換頻率所決定。而「電子開關」由電源



（圖：5.5）



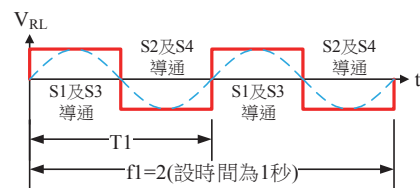
（圖：5.7）

頻率所控制， V_o 的輸出波形由電源變流後得到。因此交—交變頻器的頻率變化只能在電網頻率以下的範圍內進行變化。

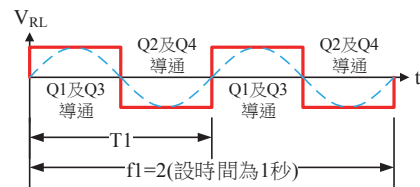
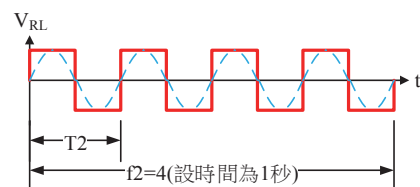
逆變器

逆變電路的作用是将直流電路輸出的直流電源轉換成頻率和電壓都可以任意調節的交流電源，稱為逆變器 (Inverter)，而逆變電路的輸出也是變頻器的輸出。

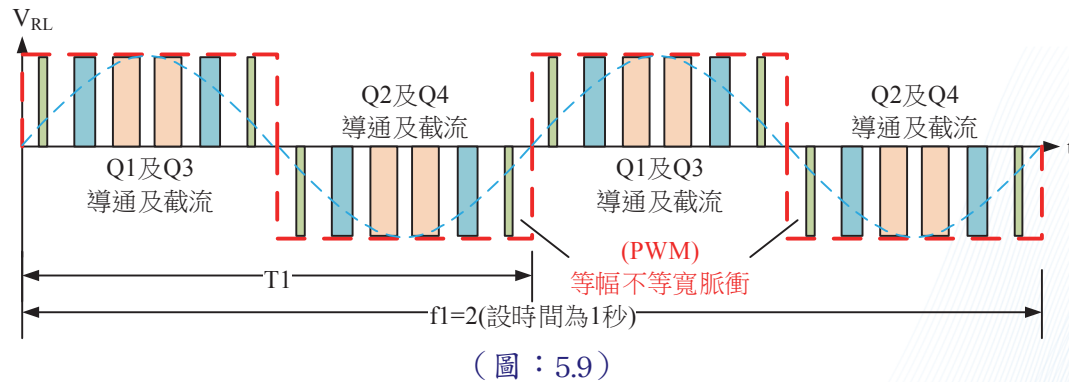
最簡單的單相逆變器如（圖：5.5）所示，只需採用 4 個開關 $S1 \sim S4$ ，透過 $S1 \sim S4$ 按時間有規律的導通及截流， R_L 便可獲得如（圖：5.6）所示的交流方波；若調節 $S1 \sim S4$ 不同時間的導通及截流，更可改變輸出的頻率，稱為「變頻」。在實際應用的電路中， $S1 \sim S4$ 開關會由 4 個功率開關器件 $Q1 \sim Q4$ 取代組成，如（圖：5.7）所示，同樣只要按時間有規律的令 $Q1 \sim Q4$ 導通及截流，也可獲得如（圖：5.8）所示



（圖：5.6）



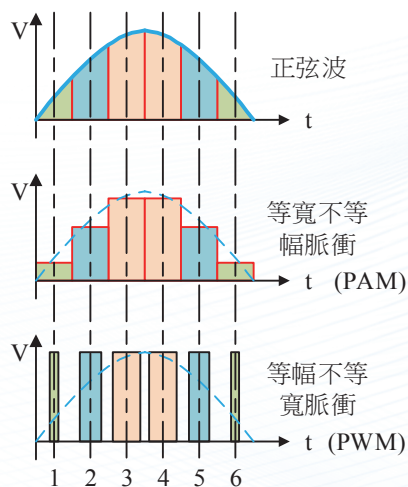
（圖：5.8）



同樣的交流電輸出。

若利用脈衝寬度調制 (PWM) 方法，透過控制 Q1~Q4 導通及截流，將交流方波再細分成多分，變成等幅不等寬脈衝，如（圖：5.9）所示，便可改變輸出的電壓，稱為「變壓」，而整個系統稱為「變壓變頻」。

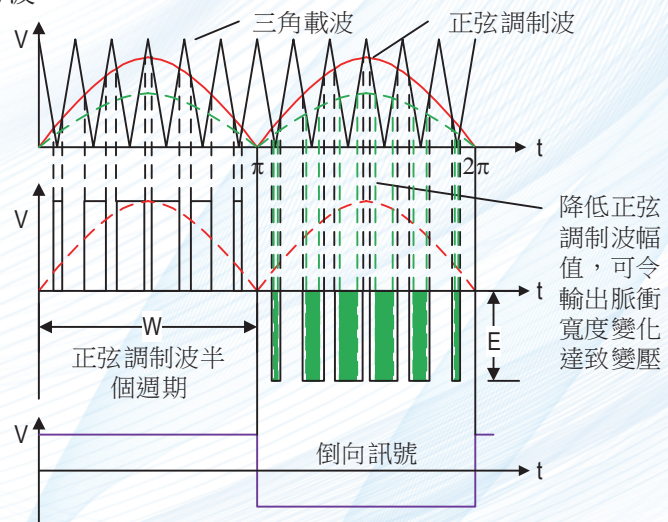
由於一個波形可以用很多個其他的波形函數替代，因此一個正弦波可以設想用多個不同幅值的矩形脈衝波來替，示意如（圖：5.10）所示。在圖中，將一個正弦半波分割出多個等寬不等幅的波形。如果每一個矩形波的面積都與相應時間段內正弦波的面積相等，則這一系列矩形波的合成面積就等於正弦波的面積，亦即有等效的作用，稱為正弦等寬不等幅調制 (Sinusoidal Pulse Amplitude Modulation, SPAM/PAM)。為了提高等效的精度，矩形波的個數分得越多越好，圖中分割出的波



形數目 $n=6$ ，但這些分割都是由電子電路負責，它的數目往往受到開關器件允許開關頻率的限制。

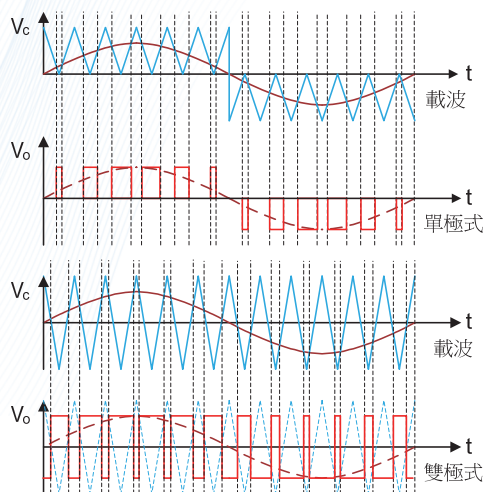
在通用變頻器採用的交—直—交變頻裝置中，前級整流器是不可控的，給逆變器供電的是直流電源，其幅值恆定。若把上述一系列等寬不等幅的矩形波用一系列等幅不等寬的矩形脈衝波來替代，只要每個脈衝波的面積都相等，也能實現與正弦波等效的功能，稱作正弦脈衝寬度調制波形 (Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM/PWM)。例如，把正弦半波分作 $n=6$ 等分，把每一等分的正弦曲線與橫軸所包圍的面積都用一個與此面積相等的矩形脈衝來代替，矩形脈衝的幅值不變，各脈衝的中點與正弦波每一等份的中點相重合，這樣就形成 SPWM 波形。

上述 SPWM 波形在半周內的脈衝電壓



只能在「正」或「負」與「零」之間變化，因主電路每相只有一個開關器件反覆通、斷，稱為單極式 SPWM。如果讓同一橋臂用上、下兩個開關器件互補地導通與關斷，則輸出脈衝在「正」及「負」之間變化，就得到雙極式的 SPWM 波形，稱為雙極式 SPWM。惟開關器件之間的關係是互補的，即通、斷狀態彼此是相反交替的。

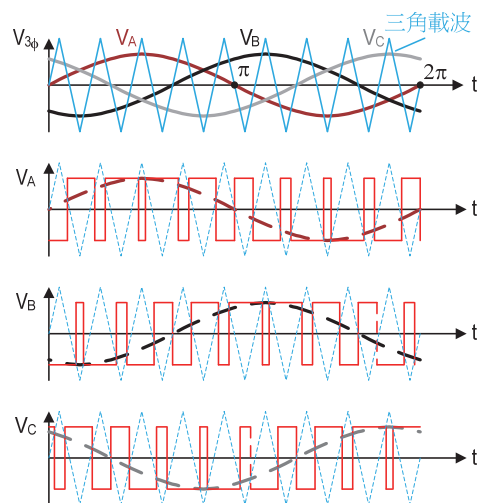
SPWM 是利用無線電發射技術，將等幅的三角波作為載波 (Carrier wave)，與期望輸出波形相同的正弦波之調制波 (Modulation wave) 或稱訊號波作比較，載波與調制波相交點發出開、關功率開關元件的觸發脈衝，如 (圖：5.11) 所示。在正弦波值大於三角波值時，控制逆變器的電晶體開關導通；而當正弦波值小於三角波值時，控制逆變器的電晶體開關截止，就可在逆變器輸出端得到一組「等幅不等寬」脈衝，來模擬正弦波。輸出幅值相等於逆變器直流端的電壓 E ，寬度按正弦波規律變化的一組矩形脈衝之次序，它等效於正弦曲線。若載波頻率增高，兩種波的交點增多，令每個週期內的脈衝數增加，便會使輸出更接近正弦波，但控制電路也較複雜。



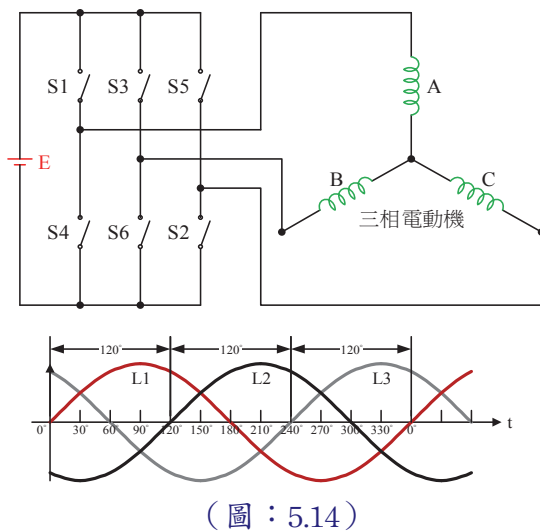
(圖：5.12)

改變正弦調制波的頻率 f ，從而改變週期 W ，便可改變輸出電壓的頻率，達至「變頻」。改變直流電壓 E 的幅值，可以改變輸出等效正弦波幅值，達至「變壓」。可是一般的 PWM，其整流電路採用不可控的二極體，輸出是固定的直流電壓，幅值 E 不能改變。這樣，若降低正弦調制波的幅值，使各段脈衝的寬度變窄 (圖中的綠色線)，從而使輸出電壓基波的面積平均值也相應減少，即幅值也減少，間接也可起到調壓的作用。改變 PWM 正弦調制波的幅值，也可達至「變壓」。

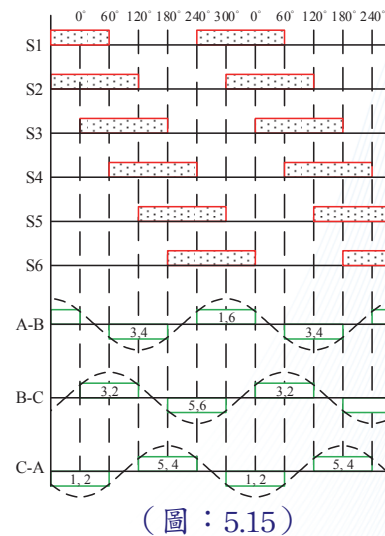
以上的方法只是得到交流正半周的調寬脈衝，對於正弦波的負半周，就要用相應的負值三角波進行調制，如 (圖：5.12) 所示。在實際控制電路中，一般採用如 (圖：5.11) 中的相同三角波控制，再加上「倒向訊號」，將負半波反相，就可以得到全波的調寬脈衝。若是用於三相逆變器時，必須產生互差 120 度的三相調制波，才可產生可變頻、變幅的三相正弦參考訊號，然後分別與三角波互相比較，產生三相脈衝調制波，其調制方法和單極式相似，只是輸出脈衝電壓的極性不同，輸出波形圖如 (圖：5.13) 所示。



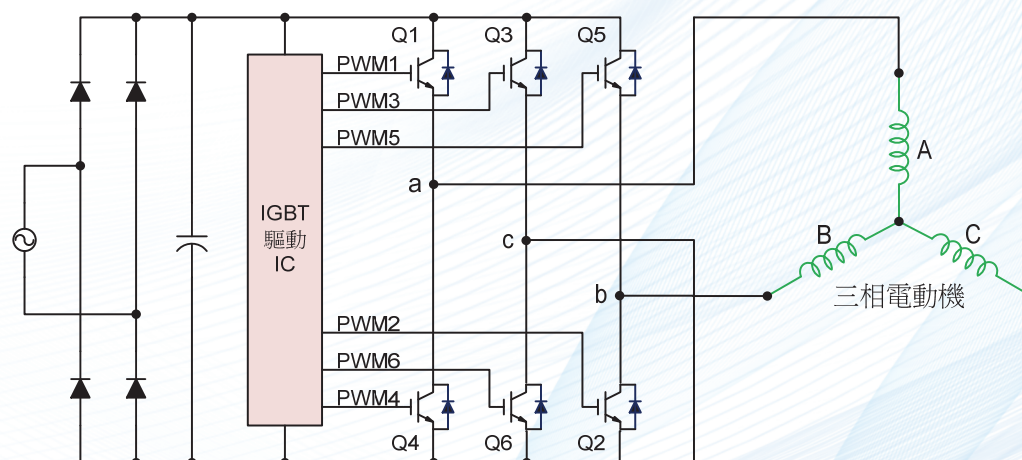
(圖：5.13)



產生三相交流電的逆變電路原理與單相相同，惟增加了2個開關，如（圖：5.14）所示，只需將 S1~S6 按（圖：5.15）所示順序導通及截流，則在三相電動機 A-B、B-C、C-A 繞組間獲得一交變電壓。以 B-C 相為例，當 S3、S2 接通時，B-C 獲得正半週電壓；S5、S6 接通時，獲得負半週電壓。改變每對開關的導通時間的長短，就可改變輸出電壓的頻率（變頻）；用 PWM 方法控制每對開關的導通及截流之時間，就可改變輸出電壓的平均值（變壓）。由圖中可見，相與相之間的線電壓是相距 120 的矩形波，便可模擬三相電源來驅動三相電動機繞組。



同樣在實際的電路中，6 個開關 S1~S6 將由 Q1~Q6 功率開關器件取代，現時主流的功率開關器件為 (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)，並配合整體的控制電路而成。一個簡單控制三相電動機轉速的變頻器整體電路如（圖：5.16）所示。控制功率開關器件時，必須做到上開則下關，上關則下開，以防止上、下短路直流源的情況發生。例如：Q1(S1) 開，Q4(S4) 關；Q3(S3) 關，Q6(S6) 開；Q5(S5) 開，Q2(S2) 關，但由於功率開關器的截止 (Turn-off) 時間，通常大於導通 (Turn-on) 時間，因此必須於上、下開關的訊號之間加入一段延遲時間。



變頻器的控制方法

市面上出售的變頻器，主要用途不再只是作為電動機起動及停車，而是電動機在整個運行過程中的轉速控制，根據各廠的研究開發及專利，控制方法可能大同小異，但名稱卻不同，其驅動控制方法主要包括：

1. 電壓/ 頻率(V/f)控制

電壓 / 頻率控制是在改變電動機電源頻率 f 的同時，也改變電動機電源的電壓 V ，使電動機磁通「 Φ 」保持恆定，因為是控制電壓 V 與頻率 f 之比，稱為 V/f 控制，（圖：5.17）所示為控制方塊圖。此種控制方法最為簡單，成本較低，機械特性硬度也較好，能夠滿足一般傳動的平滑調速要求，它不需要複雜控制器，亦不需要轉速回授，屬於轉速開環控制。此方法的缺點是沒有轉矩控制之迴路系統，因此其速度精確度較差，並且當負載加大時，其轉速將受影響。在轉速極低時，輸出低頻及電壓較低，電磁轉矩無法克服較大的靜摩擦力，不能適當的調整電動機的轉矩補償和適應負載轉矩的變化，穩定性變差；其次是無法準確的控制電動機的實際轉速，令電動機的實際轉速由轉差率決定。 V/f 控制的特性：性價比高，輸出轉矩恆定，也是恆磁通控制，但速度控制的精度不高，適用於以節能為目的和對速度精度要求較低的場合。

另有一種稱為轉差頻率控制，是對 V/f 控制的一種改進的變頻器。由於感應電動機當頻率一定時，電磁轉矩正比於轉差率，機械特性為直線。這種控制方法需要由安裝在電動機上的速度感測器檢測出電動機的轉速，構成速度閉環，令速度的靜態誤差較少，速度調節器的輸出為轉差頻率，而變

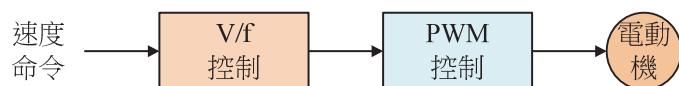
頻器的輸出頻率則由電動機的實際轉速與所需轉差頻率之和決定。由於通過控制轉差頻率來控制轉矩和電流，與單 V/f 控制相比，其加減速特性和限制過電流的能力從而可提高。

2. 向量控制 (Vector control)

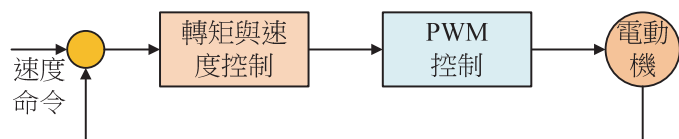
向量控制亦稱為磁場導向控制 (Field Oriented Control, FOC)，以直流電動機和交流電動機比較來闡述這概念，使感應電動機的控制如同直流電動機的控制方式一樣，或看成交流電動機可等效直流電動機，分別對速度，磁場進行獨立控制。直流電動機的控制方式是使磁場「 Φ 」為定值，而轉矩大小正比於電樞電流 I_a ；其次是定子磁場與電樞磁場保持垂直關係時，可以得到最大的輸出轉矩。

向量控制變頻調速的做法是將非同步電動機在三相坐標系下的定子交流電流 I_a 、 I_b 、 I_c ，通過三相二相變換，等效成兩相靜止坐標系下的交流電流 I_{a1} 、 I_{b1} ，再通過按轉子磁場定向旋轉變換，等效成同步旋轉坐標系下的直流電流 I_{m1} 和 I_{t1} 。 I_{m1} 相當於直流電動機的勵磁電流， I_{t1} 相當於直流電動機的電樞電流，然後模仿直流電動機的控制方法，計算出直流電動機的控制量，再經過相應的座標反變換，實現對感應電動機的控制。

向量控制方塊圖如（圖：5.18）所示，



（圖：5.17）



（圖：5.18）

與 V/f 比較，主要增加了轉軸速度回授作比較。轉矩與速度的內部控制環節較 V/f 複雜很多，更包含向量控制，所以需要速度控制器，磁通控制器與電流回路控制器，解耦合（用數學方法將兩種耦合運動分開來處理問題）與轉差頻率計算等問題。向量控制的優點是速度精確度較高，並且當負載加大時其穩態轉速將不受影響。然而在實際應用中，由於轉子磁鏈難以準確地檢測，系統特性受電動機參數的影響較大，而且在等效直流電動機控制過程中，所用向量旋轉變換較複雜，使得實際的控制效果難以達到理想分析的結果。向量控制的特性：可從零轉速進行控制，低頻轉矩大，調速範圍寬，可對轉矩進行精確控制，系統響應速度快，速度控制精度高。

3. 無轉軸數據測量器控制 (Sensorless control)

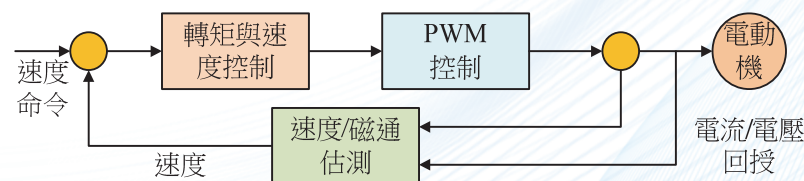
由於速度回授是向量控制不可缺少的配件，但速度回授所需要的測量設備價格，已佔去整個向量交流變速驅動器總價的一個相當高的比例。因此無轉軸數據測量器的控制器，便成為另一種考慮的控制技術，它的方塊圖如（圖：5.19）所示。無轉軸數據測量器向量控制器，以電流 / 電壓回

授估算轉速或同步轉速。其優點是可減少成本與體積，缺點是精確度較差，在低轉速區域控制不容易，因此選擇減少其控速比 (Speed ratio)。控速比是指滿載或 150% 額定負載下，可以達到的最高轉速與最低轉速的比值。目前市面上出售的無轉軸數據測量器向量控制變頻器的控速比大約在 75~100% 之間。

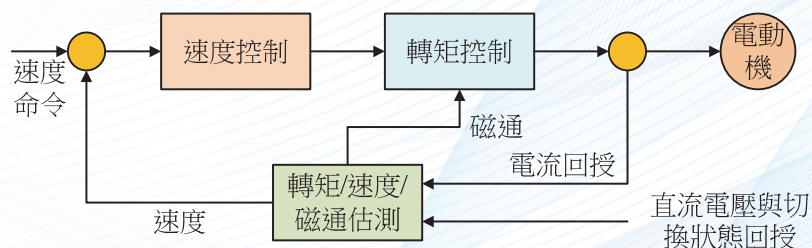
4. 直接轉矩控制 (Direct Torque Control, DTC)

直接轉矩控制是指直接控制電動機磁通與轉矩大小，使磁通與轉矩誤差在限定的容許範圍之內，方塊圖如（圖：5.20）所示，磁通與轉矩的估測為直接轉矩控制的主要工作之一。直接轉矩控制的特色包括：不需要轉軸機械位置或速度回授、快速轉矩反應及包含低轉速範圍的廣泛轉速控制區間等。

轉矩與磁通是電動機控制最直接的兩個基本物理量，在向量控制法中，必須經由與電動機參數有極大相關的電壓或電流解耦合及轉差頻率計算，才能間接地達到轉矩與磁通的獨立控制，但由於參數會隨著負載增加或運轉時間加長而變動，因此



（圖：5.19）



（圖：5.20）

影響了向量控制驅動器的性能。轉矩控制是直接定子坐標系下分析交流電動機的數學模型，控制電動機的磁鏈和轉矩。它針對電動機的轉矩與磁通誤差來決定變頻器的開關切換方式，免除解耦合與轉差頻率計算等問題，更不需要實施內電流回路控制，因此較不會受參數變動的影響，其控制方法也較向量控制法容易，解決了向量控制的不足。

直接轉矩控制變頻驅動系統，雖然有較快速的轉矩響應等優點，但是它受制於發明專利的影響，至目前為止其商品化產品僅限於 ABB 公司，直接轉矩控制已經廣泛應用於小型至中型系統。直接轉矩控制的特性：可從零轉速進行控制，調速範圍寬，對轉矩進行精確控制，系統響應速度快，速度控制精度高。

變頻器的選用

選用變頻器的類型時，先按生產機械的類型、調速範圍、靜態速度精度、起動轉矩的要求，決定選用那種控制方式的變頻器及電動機最合適。合適的定義不是越貴越好，而是既要好用，又要經濟，從而滿足工藝和生產的基本條件和要求。而負載的類型，也要作出考慮，而負載類型主要分為三種：

1. 恆轉矩負載——例如：傳送帶、攪拌機。變頻器拖動恆轉矩性質的負載時，低速下的轉矩要足夠大，並且有足夠的超載能力。如果需要在低速下穩速運行，更要考慮感應電動機的散熱能力，避免電動機的溫升過高。
2. 恆功率負載——例如：機床主軸和軋機、造紙機。如果電動機的恆轉矩和恆功率調速的範圍與負載的恆轉矩和恆功率範圍互相一致時，即「匹配」的情

況下，電動機的容量和變頻器的容量均最小。

3. 水泵類負載——例如：水泵、油泵、風機。當所需風量、流量減小時，利用變頻器通過調速的方式來調節風量、流量，可以大幅度地節約電能。當知道了負載種類，選擇變頻器時再根據以下多點作考慮：
 - 電動機的極數：一般電動機極數以不多於 4 極為宜，否則變頻器容量就要適當加大；
 - 轉矩特性、臨界轉矩、加速轉矩：在同等電動機功率情況下，相對於高超載轉矩模式，變頻器規格可以降額選取；
 - 電磁相容性：電磁相容性 (Electro Magnetic Compatibility, EMC) 是指設備或系統在其電磁環境中符合要求運行，並不對其環境中的任何設備產生無法忍受的電磁干擾（諧波干擾）的能力。因此，EMC 一方面是指設備在正常運行過程中，對所在環境產生的電磁干擾不能超過一定的限值；另一方面是指設備對所在環境中，存在的電磁干擾具有一程度的抗擾度。為減少對主電源干擾，變頻器會在中間電路或輸入電路中增加電抗器，或安裝前置隔離變壓器；
 - 選擇變頻器時應以實際電動機電流值作為變頻器選擇的依據，電動機的額定功率作為參考；
 - 每個變頻器的生產廠家一般都有自家品牌風機、水泵類變頻器，只需確定電動機的規格型號，就可基本確定了變頻器的規格型號（品牌對比）；
 - 變頻器驅動潛水泵電動機應用時，因為潛水泵電動機的額定電流比一般電動機的額定電流大，所以選擇變頻器

時，其額定電流要大於潛水泵電動機的額定電流；

- 當變頻器控制一些特殊負載時，其起動電流可能很大，所以選擇變頻器時一定要注意變頻器的容量是否足夠大；
- 變頻器若要用長電纜運行時，此時應該採取措施抑制長電纜對地耦合電容的影響，避免變頻器輸出不足。所以變頻器應加大一級，選擇或在變頻器的輸出端安裝輸出電抗器；
- 當變頻器用於控制並聯的幾台電動機時，一定要考慮變頻器到電動機的電纜之長度總和在變頻器是否容許範圍內。如果超過規定值，要加大一級或兩級來選擇變頻器。另外在此種情況下，變頻器的控制方式只能為 V/f 控制方式（風機、水泵類負載），並且變頻器無法保護電動機的過流、超載保護，此時需在每台電動機上加熔斷器來作保護；
- 選擇變頻器時，一定要注意其防護等級是否與現場的情況相匹配。否則現場的灰塵、水氣會影響變頻器的長久運行；
- 如果用於向量閉環控制，變頻器與電動機必須匹配，不能大也不能小，如果是重負載可以選重載型的。

變頻器功率的選用

系統效率等於變頻器效率與電動機效率的乘積，當兩者都處在較高的效率下工作時，則系統效率才會較高，所以若從效率角度出發，在選用變頻器功率時，要注意以下幾點：

- 變頻器功率值與電動機功率值相約時最合適，以便變頻器在高的效率下工作，也可令初期投入的資金減低。首先測定電機的實際功率，更要考慮電

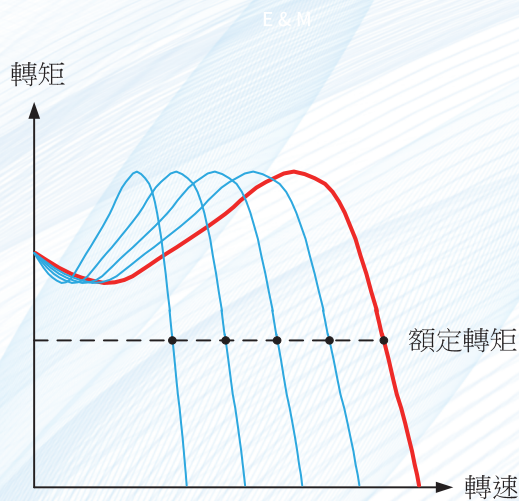
動機負載的起動電流之大小影響；

- 在變頻器的功率分級與電動機功率分級不相同時，變頻器的功率要盡可能接近電動機的功率，但應略大於電動機的功率；
- 當電動機屬頻繁起動、制動工作或處於重載起動且較頻繁工作時，可選取大一級的變頻器，令變頻器長期、安全地運行；
- 經測試後，電動機實際功率確實有餘額，可考慮選用功率小於電動機功率的變頻器，但要注意暫態峰值電流是否會造成變頻器過電流保護動作；
- 當變頻器與電動機功率不相同時，則必須相應調整節能程式的設置，以利達到較高的節能效果。

軟起動器和變頻器的分別

變頻器與軟起動器都是由電子元件組成的設備，兩者有一些相似之處，但也有足夠的差異。變頻器一般是用於需要調速的地方，其輸出不但改變電壓而且同時改變頻率，所以可以調節轉速；軟起動器實際上是個調壓器，用於電動機起動及停止時，輸出只改變電壓並沒有改變頻率，所以不能調節轉速。

變頻器具備所有軟起動器功能，但它的價格比軟起動器高，結構也複雜得多。變頻器可以通過控制頻率來滿足需要，可應用於不斷調節電動機轉速的應用場合，並能夠在整個起動過程中，確保電動機以額定轉矩和額定電流順利起動，特性曲線如（圖：5.21）及（圖：5.22）所示。另外，變頻器控制電動機消耗之功率 (P) 與轉速 (N_r^3) 成正比。由於電動機的轉速與頻率成正比，所以當轉速 N_r 為額定值 100%， $P=1^3=100\%$ ；當變頻器令電動機轉速 N_r 下



(圖：5.21)

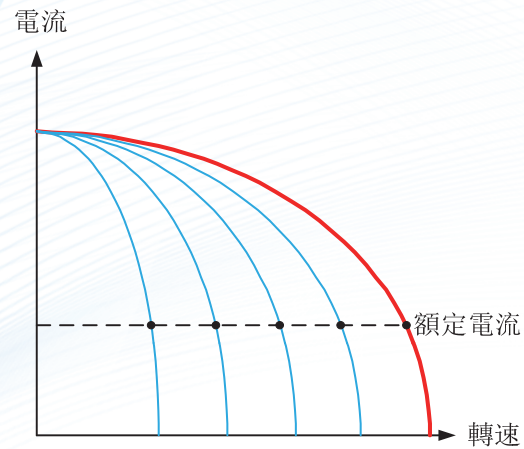
降至 80%， $P=0.8^3=51\%$ ；當轉速 N_r 下降至 60%， $P=0.6^3=22\%$ ，所以變頻器作調速更有節能的作用，而軟起動器只能在輕載時達致節能的效果。

軟起動器和變頻器的選擇

軟起動器大多用於不需要調速的電動機起動和停止場合，若這時用變頻器與軟起動器相比，使用變頻器就成為不必要，昂貴的大型解決方案。速度控制是 VFD 的一個優點，因為它在電動機的整個運行週期中提供一致的加速時間，而不僅僅是在起動期間，VFD 還可以提供比軟起動器更強大的功能，包括數位診斷資訊。

如果主要目標是節能，VFD 可能較理想，因為 VFD 不僅限制起動時電動機的速度，它還可在正常運行以及停車階段控制速度，從而降低總體能量損耗。在需要能夠控制機器的速度和平穩性能的情況下，例如應用在升降機及自動梯等，VFD 表現會更佳。變頻器能控制這些設備的恆定速度，並防止它們遇到任何意外的功率浪湧。

選擇軟起動器或變頻驅動器通常取決於實際應用，軟起動器與 VFD 相比（通常較大功率），軟起動器更小、更便宜，VFD 佔用更多空間，通常比軟起動器更昂貴。

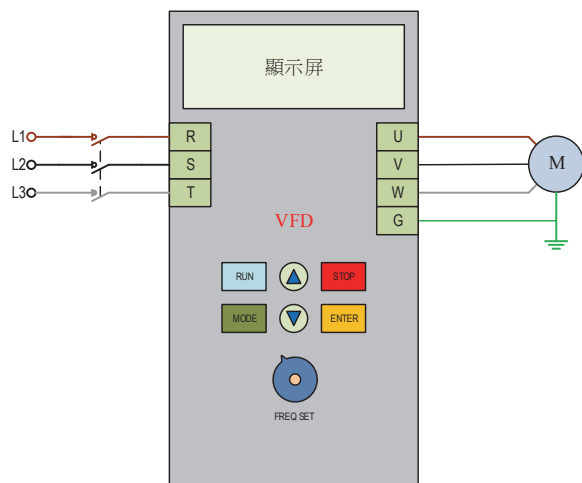


(圖：5.22)

雖然 VFD 前期投放的成本較高，但它可以節省高達 50% 的能源，從而在設備的整個使用壽命內節省更多成本。VFD 的初始成本可能是軟起動器的 2~3 倍，因此，在不需要恆定加速度和轉矩控制，而且應用僅在起動期間需要電流限制，則從成本角度來看，軟起動器可能是更好的解決方案。由於軟起動器降低了與輸入電流相對應的輸入電壓，而輸入電流與感應電機的起動轉矩成正比，因此大大降低了起動轉矩，所以軟起動器主要用於低或中等起動轉矩應用的原因。

變頻器的接線及設定

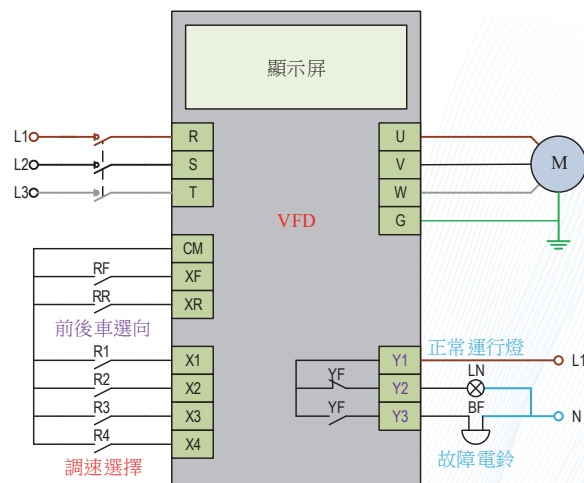
市場上可選購的變頻器，有來自不同品牌的設計產品，各廠的型號接線及設定都有不同，可算是各有特色，使用時只需根據變頻器原廠的使用手冊，負載的需要，建議的接駁電路圖，按部就班進行接線及簡單設定便可。很多通用的變頻器只需接上最簡單的電源（單相或三相）及電動機導線，透過變頻器附設的按鈕及旋鈕，便可進行最簡單的操作，使電動機以手動運行（RUN 按鈕），停止（STOP 按鈕）及調頻（FREQ SET 旋鈕），如（圖：5.23）所示，這個不需接駁其他接線及進行複雜設定的實例，也可應用在只需單一調速的



(圖：5.23)

場合。假如某客戶要求推動生產線的電動機調至較慢或較快的速度，從而改善生產，這個附加變頻器的簡單接線及無需複雜設定，可能也可滿足客戶要求。

選擇變頻器來控制電動機，一般不會是簡單的應用，所以都會進行設定及加入很多控制導線，從而獲得更好的效果。變頻器的設定應使用該品牌提供之自設軟件，



(圖：5.24)

在設定模式下，根據使用手冊建議，按負載的特性需要，先切換相關功能表，再輸入相關參數，再確認便可。設定時的功能可能包括：額定電流、積熱電流、額定電壓、額定頻率、額定速度、額定功率、IR補償、滑差補償、同步馬達參數、積熱保護類型、積熱狀態、可在專家級模式讀取的自我調適參數和馬達參數、馬達控制類

	(R1) X1	(R2) X2	(R3) X3	(R4) X4	選速參數 (假設數據)	備註
0	0	0	0	0	800	停車
1	0	0	0	1	801	最慢速
2	0	0	1	0	802	↑ ↓
3	0	0	1	1	803	↑ ↓
4	0	1	0	0	804	↑ ↓
5	0	1	0	1	805	↑ ↓
6	0	1	1	0	806	↑ ↓
7	0	1	1	1	807	↑ ↓
8	1	0	0	0	808	↑ ↓
9	1	0	0	1	809	↑ ↓
10	1	0	1	0	810	↑ ↓
11	1	0	1	1	811	↑ ↓
12	1	1	0	0	812	↑ ↓
13	1	1	0	1	813	↑ ↓
14	1	1	1	0	814	↑ ↓
15	1	1	1	1	815	最高速

(表：5.1)

型等，這些設定可使變頻器工作時獲得更好的保護，起動，停車及運行更平滑。

控制變頻器工作，給予相關的訊號，控制電動機起動，加速，運行，減速及停車，一般會使用自動化控制，行內多使用外加的繼電器控制系統或 PLC 控制系統，透過控制系統的電路，再將相關的訊號輸入變頻器，便可使變頻器按設定的程序運作。

某變頻器的接線控制電路如（圖：5.24）所示。RF 是外加繼電器控制系統的前車中間繼電器，RR 是後車中間繼電器，惟整個繼電器控制系統沒有繪出。當 RF 吸索，訊號輸入變頻器內部輸入繼電器 XF，變頻器控制電動機以前車方向運行；若 RR 吸索，訊號輸入變頻器內部輸入繼電器 XR，變頻器控制電動機以後車方向運行，即 RF 及 RR 兩者的常開觸點，構成前後車選向。惟當 RF 及 RR 都沒有吸索，兩個常開觸點都開路時，變頻器會視為停車，所以電動機的前後車運行全由外加的控制系統輸入訊號來決定。外加繼電器控制系統的 R1，R2，R3，R4 的常開觸點分別輸入變頻器的 X1，X2，X3，X4，作用是構成調速控制，直觀感覺變頻器好像只提供 4 個速度的選擇。由於變頻器都採用邏輯控制，當 X1，X2，X3，X4 共 4 個有不同的輸入，在邏輯的「1」或「0」的選擇上，便可組合而成 16 個選擇，構成 15 個不同的選速及 1 個停車參數，邏輯真值表如（表：5.1）所示。變頻器更可能會在使用手冊列出每一個選速對應一個速度參數，只要在選速功能表輸入參數，變頻器便會按該速度運行；若在不同的時間改變 R1，R2，R3，R4 常開觸點的開合情況，或更改變頻器的選速參數，電動機便會實現一級級的變速。至於變頻器會按 X1，X2，X3，X4 不同的

輸入狀態進行調速，還是根據選速參數進行，必須在變頻器預先設定，以便變頻器收取正確的訊號。若變頻器選速電路不需要 16 個，可將 4 個輸入簡化。若只使用 X4 單一個時，可獲得 2 個速度及停車；使用 X3，X4 二個時，可獲得 4 個速度及停車；使用 X2，X3，X4 三個時，可獲得 8 個速度及停車。

變頻器的故障訊號，可由變頻器內部輸出繼電器 YF 的常開及常閉觸點獲得，內部輸出繼電器 YF 會在檢測出故障時吸索。當變頻器正常運行時，YF 沒有吸索：YF 常閉觸點連接 Y2，Y2 輸出高電位，燈泡 LN 便視為正常運行指示燈；YF 常開觸點連接 Y3，Y3 輸出低電位，電鈴 BF 不會發出聲響。當變頻器檢測出故障時，YF 被吸索：YF 常閉觸點連接 Y2，Y2 輸出低電位，燈泡 LN 未能發亮；YF 常開觸點連接 Y3，Y3 輸出高電位，電鈴 BF 便會發出聲響作聽覺提示。以上的前後車，調速及故障訊號控制方法電路介紹，只是其中一種變頻器的設計，切記每個品牌或型號都有所不同，必須詳盡了解變頻器使用手冊的內容。

電動機起動方法的選擇

三相感應電動機有多種之起動方式，相關的資料已作介紹，其特性簡單比較如（表：5.2）所示，惟在選擇時必須考慮下列幾點：

1. 電源容量，可否符合有關電動機起動時的規格、相關規定；
2. 所容許之起動電流以及與起動、加速轉矩之調和及起動時間；
3. 起動時對於機械所造成之衝擊；
4. 電動機是否需要軟起動，軟停車，工作運行時是否需要調速。

方法	優點	缺點	應用
直接起動	簡單，不會減低起動轉矩	起動電流大，電壓驟降	小型電動機
電阻或電抗降壓起動	起動電流減小	需要減壓裝置，起動轉矩減低	鼠籠式電動機的空載或輕載起動
轉子電阻起動	起動電流減小，起動轉矩增大	需要轉子電阻起動裝置，只適用於滑環式電動機	滑環式電動機
星角起動	起動電流小，可以頻繁起動，簡單，價格低	減低起動轉矩	可角形連接的電動機及適合輕載起動
自耦式變壓器起動	可根據需要設定自耦式變壓器的抽頭，從而限制起動電流，獲得較大的起動轉矩	裝置較貴，重量重，體積大，不宜作頻繁起動	較大型的電動機及適合較重載起動
軟起動器 (變壓)	起動電流減小，可按負載需要控制起動特性	起動轉矩減低，價錢高	鼠籠式電動機
變頻器 (變頻變壓)	起動電流減小，起動轉矩不變，運行可作調速控制	控制電路複雜，價錢最高	鼠籠式電動機

(表：5.2)

- ◆ YouTube 影片— Variable Frequency Drives Explained | VFD Basics- Part 1 —英語—英字幕 (8:34)
https://www.youtube.com/watch?v=HayrxySX_po
- ◆ YouTube 影片— Variable Frequency Drives Explained | VFD Basics- Part 2 —英語—英字幕 (8:19)
<https://www.youtube.com/watch?v=DXjXh0cF8Kc>
- ◆ YouTube 影片— Variable Frequency Drives Explained- VFD Basics IGBT inverter —英語—英字幕 (15:17)
<https://www.youtube.com/watch?v=yEPe7RDtkgo&t=16s>
- ◆ YouTube 影片— How a 3 Phase Pulse Width Modulation (PWM) VFD Inverter Works Simulation —英語—英字幕 (9:43)
https://www.youtube.com/watch?v=wwzUE_Q9Ahi&ab_channel=betechnical.ca



- ◆ YouTube 影片——Power Inverter, How It Works? ——英語——英字幕（7:36）
https://www.youtube.com/watch?v=_O-1Fgc_xUg&ab_channel=chrvoje_engineering
- ◆ YouTube 影片——逆变器的工作原理，逆变器是怎么工作的——國語——無字幕（6:55）
<https://www.youtube.com/watch?v=TOdIYB9zRos>
- ◆ YouTube 影片——介《首次接触变 器 (1/18)》——國語——簡字幕（2:41）註：全系列共有 18 套，可按需要繼續觀看其餘各套
https://www.youtube.com/watch?v=XqbEdyOc_Hs&ab_channel=MITSUBISHIELECTRICFactoryAutomation
- ◆ YouTube 影片——1-1 前言——國語——繁字幕（5:45）註：全系列共有 9 套，可按需要繼續觀看其餘各套
https://www.youtube.com/watch?v=mwRmbFikGJ8&list=PLwwwQUVb6vm6fhjvdZlOmmXmJce0k0Qza&ab_channel=%E8%B2%A1%E5%9C%98%E6%B3%95%E4%BA%BA%E5%8F%B0%E7%81%A3%E7%94%A2%E6%A5%AD%E6%9C%8D%E5%8B%99%E5%9F%BA%E9%87%91%E6%9C%8

