

逆變器

逆變器是變頻器最後一個環節，其後與馬達相聯。它最終產生適當的輸出電壓。

變頻器通過使輸出電壓適應負載的辦法，保證在整個控制範圍內提供良好的運行條件。這方法是將馬達的勵磁維持在最佳值。

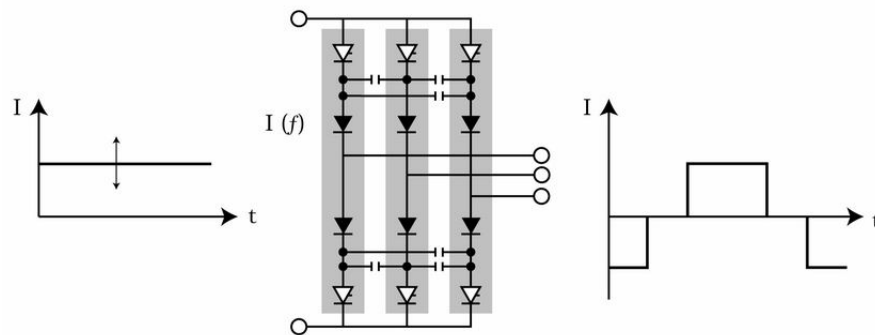
逆變器可以從中間電路得到以下三者之一：

- 可變直流電流
- 可變直流電壓
- 固定直流電壓

在以上每種情況下，逆變器都要確保給馬達提供可變的量。換句話說，馬達電壓的頻率總是由逆變器產生的。如果中間電路提供的電流或電壓是可變的，逆變器只需調節頻率即可。如果中間電路只提供固定的電壓，則逆變器既要調節馬達的頻率，還要調節馬達的電壓。

現在晶閘管在很大程度上被頻率更高的晶體管所取代，因為電晶體可以更快速地導通和關斷。開關頻率取決於所用的半導體器件，典型的開關頻率在 300 Hz 到 20 kHz 之間。

逆變器中的半導體器件，由控制電路產生的信號使其導通和關斷。這些信號可以受到不同的控制。

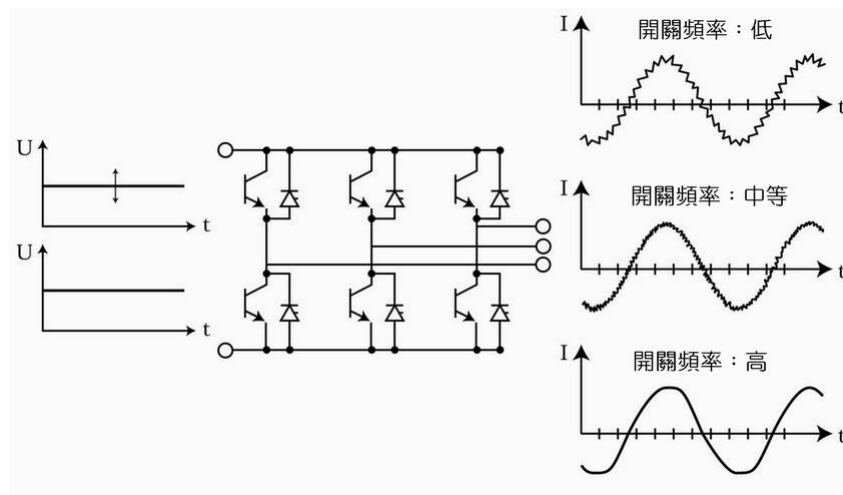


採用可變直流型中間電路的傳統逆變器

在傳統逆變器，採用可變直流電流型中間電路的逆變器由二極體，晶體管和電容器各 6 個構成。

電容器可使晶體管導通和關斷（使晶閘管導通，當然門極還需要加觸發信號），以使每相繞組的電流有 120° 的相位差，並且電流的大小必須與馬達的大小相匹配。按 U-V, V-W, W-U, U-V..... 的順序週期地向馬達端子提供電流時，就產生一個按所需頻率斷續旋轉的磁場。儘管馬達電流基本上為方波，但馬達電壓接近正弦波。當電流被開關接通或切斷時，總有尖峰電壓產生。

二極體將電容間馬達的負載電流隔開。



採用可變或固定直流電壓型中間電路的逆變器，其輸出電流波形取決於逆變器的開關頻率。

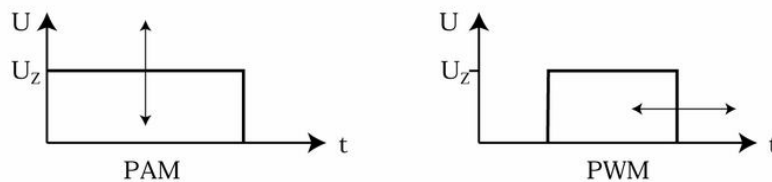
採用可變或固定直流電壓型中間電路的逆變器，總有 6 個開關元件，不管用哪種半導體器件，其作用基本上相同。控制電路用不同的調製技術使半導體器件通和斷，這樣就改變了變頻器的輸出頻率。

這裏首要的技術是對中間電路的可變電壓或電流如何處理。

為了得到所需的輸出頻率，使每個半導體器件的導通區間按順序排列。

半導體器件的開關狀態根據中間電路可變電壓或電流的大小進行控制。利用壓控振盪器使頻率總能追隨電壓幅值的變化。這種逆變器的控制方式稱為脈衝幅度調製（PAM）。

另一種主要技術是使用固定的中間電路電壓。依靠調節對馬達繞組所加中間電路電壓的時間長短（即脈衝寬度）來改變馬達電壓。



脈衝幅度調製和脈衝寬度調製

改變時間軸上的電壓脈衝極性可改變頻率，使半個週期是正的脈衝，另外半個週期是負的脈衝。

改變電壓脈衝寬度的技術稱為脈寬調製（PWM）。PWM（以及正弦脈寬調製 SPWM 等相關技術）是逆變器控制中最常用的技術。

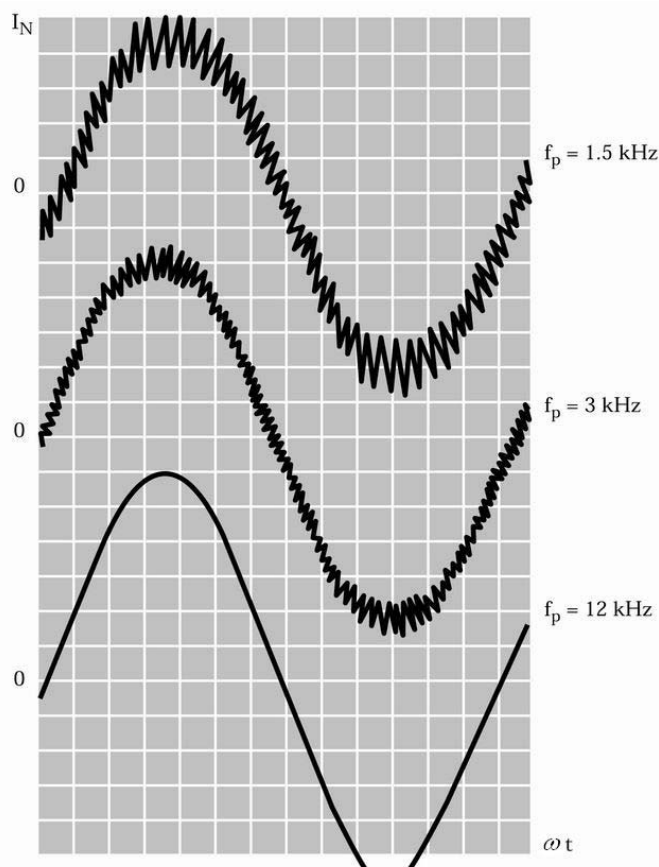
在 PWM 技術裏，控制電路將半導體器件的通和斷的時刻，定在三角波電壓與疊加的正弦波參考電壓的交點上。這裏只是以正弦脈寬調製為例，所以用正弦波作為參考波形。

其他先進的 PWM 技術還包括一些改進的 PWM 技術，例如像 Danfoss 公司的 VVC 和 VVC^{plus} 。這兩種技術的原理將在“丹佛斯控制原理”講解。

電晶體

電晶體可以高速通斷，因此馬達的“脈衝”勵磁產生的磁噪音可以減少。

開關頻率高的另一個優點是可以靈活地調節變頻器的輸出電壓。開關頻率高時，控制電路只需控制逆變器電晶體的通與斷，就能產生正弦的馬達電流。



開關頻率對馬達電流的影響

因為高頻將導致馬達發熱和高的尖峰電壓，所以逆變器的開關頻率需衡權考慮。開關頻率越高，損耗就越大。

另一方面，開關頻率低會使馬達產生較高的音頻噪音。




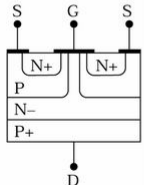
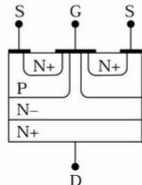
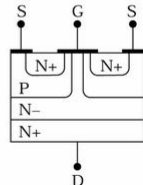
高頻電晶體可分為三種主要類型：

- 雙極型 (LTR)
- 單極型 (MOS-FET)
- 絕緣門雙極型 (IGBT)

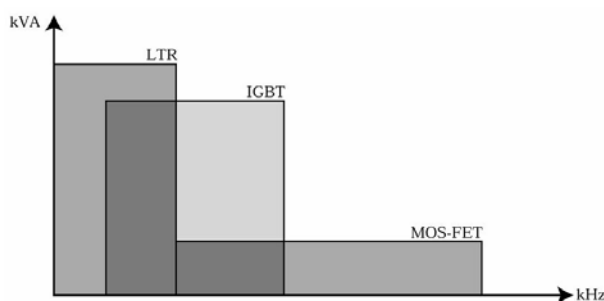
現在 IGBT 電晶體得到了最廣泛地應用，因為它將 MOS-FET 電晶體的控制特性和 LTR 電晶體的輸出特性結合在一起，具有適當的功率範圍、導電性和開關頻率，很適於現代變頻器的控制。

將 IGBT 電晶體、逆變器的元件及 IGBT 的控制部分同做在一個模組上，這種模組稱為“智慧功率模組” (IPM)。

下表給出了 MOS-FET、IGBT 和 LTR 之間的主要區別。

特性	半導體		
	MOS-FET	IGBT	LTR
符號			
設計			
導電性 電流傳導性 損耗	低 大	高 輕微	高 輕微
阻斷狀況 上限	低	高	中等
開關狀況 觸發導通時間 觸發關斷時間 損耗	短 短 輕微	中等 中等 中等	中等 長 大
控制狀況 功率 驅動信號	小 電壓	小 電壓	小 電流

電力電晶體的比較



電力電晶體的功率和頻率範圍

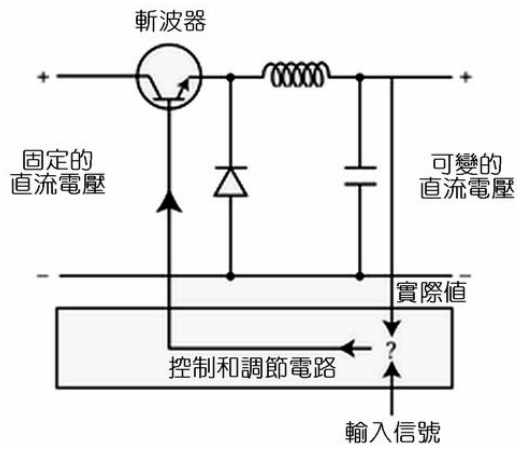
脈衝幅度調製 (PAM)

PAM 被用於中間電路電壓可變的變頻器。

使用不可控整流器的變頻器，其輸出電壓的幅值由中間電路的斬波器決定；而使用可控整流器的變頻器，其輸出電壓的幅值是由可控整流器直接決定的。

下圖所示電晶體（斬波器）的導通或關斷，由控制和調節電路來控制。開關的次數取決於給定值（輸入信號）和測得的電壓信號（實際值），實際電壓值是在電容器上測得的。

線圈繞組和電容器都是作為濾波器用來消除電壓的紋波。輸出電壓的峰值取決於電晶體通斷的次數。如果給定值和實際值有差異，則斬波器受到調節直至達到所需的電壓值。



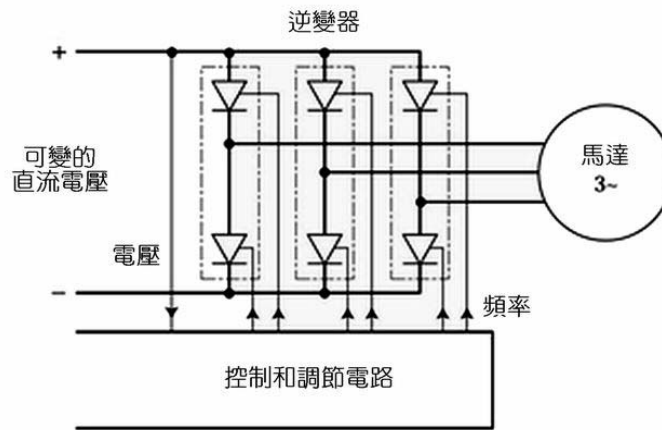
在有中間電路斬波器的變頻器中電壓的產生

頻率控制

輸出電壓的頻率通過逆變器改變工作週期來調節。在每一工作週期內半導體開關組都通斷若干次。

逆變器工作週期的長度可用兩種方法來控制：

1. 直接由輸入信號控制
2. 依靠可變的直流電壓來控制，這個直流電壓是與輸入信號成比例的



對中間電路電壓的頻率控制

脈寬調製 (PWM)

為了產生與頻率相對應的三相交流電壓，PWM 方法是用得最廣泛的。

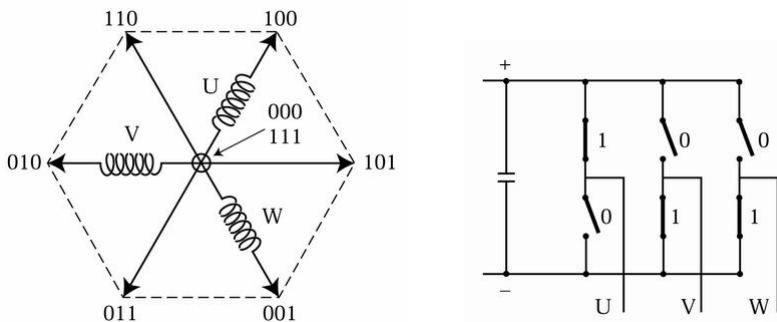
在 PWM 的過程中，中間電路的全電壓 ($\approx \sqrt{2} \times U_{\text{主電路}}$) 由電力電子器件開關控制。脈衝的寬度是可變的，因而使輸出電壓變化。

在 PWM 控制逆變器中所採用的開關模式，可有三種主要的選擇：

正弦控制 PWM / 同步 PWM / 異步 PWM

三相 PWM 逆變器上的每個支路都會有兩種不同的狀態（通或斷）。

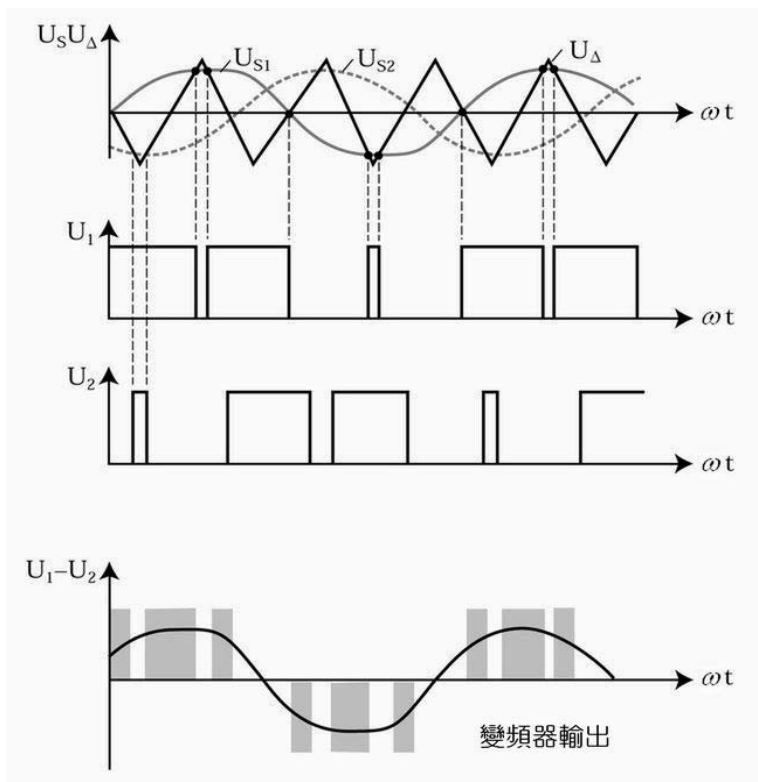
三個開關支路能產生 8 種開關的組合 (2^3)，所以在逆變器的輸出端或者在與逆變器相連的馬達定子繞組上可產生 8 種電壓向量。如下圖所示，100, 110, 010, 011, 001, 101 這些向量指向一個六邊形的頂點，000 和 111 被用作零向量。



在開關組合為 000 和 111 時，同樣的電位被加在逆變器的三個輸出端子上，它或者是中間電路的正電位元，或者是中間電路的負電位元。對於馬達來說，這相當於端子間的短路，馬達繞組的電壓為 0V。

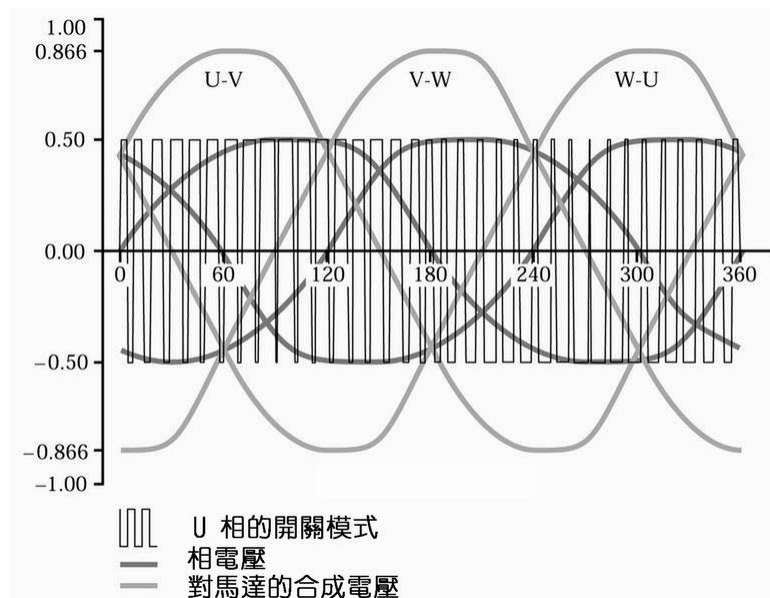
正弦控制 PWM

正弦控制 PWM 的控制原理是，對逆變器的每一輸出使用一個正弦參考（基準）電壓 (U_0)，正弦參考電壓的週期相應於所需輸出電壓的基頻。這三個參考電壓被疊加在一個三角波電壓 (U_Δ) 上（見下圖）。



正弦控制 PWM 的原理（畫有兩條參考電壓）

逆變器的電力半導體器件，在三角波電壓和正弦參考電壓相交的時刻被觸發導通或關斷。這些交點由控制電路板決定，如果三角波電壓高於正弦電壓，則輸出脈衝會由正變為負（或由負變為正）。如降低三角波電壓，則變頻器的最大輸出電壓取決於中間電路電壓。輸出電壓由改變導通時間和關斷時間的比例來調節，所以改變這一開關的比例就可產生所需的電壓。正負電壓脈衝的幅值總是相當於中間電路電壓的一半。



正弦控制 PWM 的輸出電壓

當定子頻率低時，“關”的時間增長，它可能變得長到不能再繼續三角波電壓頻率不變。

“關”的時間過長將使馬達加不上電壓的期間過長，造成馬達運行不穩定。為了防止這一現象，在低頻時三角波電壓的頻率將加倍。

變頻器輸出端的相電壓相當於中間電路電壓的一半除以 $\sqrt{2}$ ，即等於電源線電壓的一半。而輸出端的線電壓等於相電壓的 $\sqrt{3}$ 倍，這樣就等於電源線電壓的 0.866 倍。

正弦調製的 PWM 逆變器能提供額定電壓的 86.6%（參見上圖）。

因為輸出電壓約低 13%，採用完全正弦調製的逆變器，其輸出電壓不能達到馬達電壓的要求。

當頻率大於 45 Hz 時，所需的額外的電壓可以通過減少脈衝的數量來獲得。但是採用這一技術會帶來一些缺點，特別是它將造成電壓跳變，馬達電流變得不穩定。脈衝的數量減少，還會使變逆器輸出的高次諧波增加，導致馬達損耗增大。

解決這一問題的另一個方法是，用別的參考電壓來取代那三個正弦參考電壓。它可能是一些別的波形（例如：梯形波或階梯波）。

例如通常參考電壓可利用正弦參考電壓的三次諧波。將正弦參考電壓的幅值增加 15.5%，再加上三次諧波，由此得到的逆變器半導體器件的開關模式能夠增加變逆器的輸出電壓。

同步 PWM

正弦控制 PWM 方法的一個基本問題，就是為產生一個給定週期的電壓而決定最佳的通斷時間和角度，這些時間是依照使高次諧波最小的原則來設定的。這樣的開關模式只是在給定的（有限的）頻率範圍內保持不變。這一頻率範圍以外的運行則需要另外的開關模式。

採用正弦控制 PWM 有必要使電壓利用率最高，諧波最小。如果調製比（即三角波頻率與參考信號頻率之比）很高，這兩個信號可以是不同步的。但當頻率比較接近 10 或更低時，將產生有害的諧波，這時有必要使兩個信號同步。這種同步化可見於一種被稱為“換擋（gearshift）”的方式中，這種方式適用於動態性能要求低的三相交流傳動，因為其電壓和頻率（通常 V/f 控制）變化得較慢。

異步 PWM

在三相交流傳動（包括伺服傳動）中，如要求磁場定向及要求對轉矩和速度控制有快速的系統響應，則逆變器電壓的幅值和角度就需要一種跳變的調製。如使用“普通的”或“同步的” PWM 調製模式，則逆變器電壓的幅值和角度就不可能產生跳變。

滿足這一要求的方法是異步 PWM 方式。這一方式不同於對應輸出頻率同步地調製輸出電壓的同步 PWM 方式。異步 PWM 方式像通常一樣也要減少馬達的諧波，它是對電壓向量進行調製，這就造成調製與輸出頻率不同步。

有兩利主要的異步 PWM 技術：

- *SFAVM*（Stator Flux - oriented Asynchronous Vector Modulation 定子磁通定向非同步向量調製）
- 60° *AVM*（Asynchronous Vector Modulation 非同步向量調製）

SFAVM

SFAVM 是一種空間向量調製的方法，它可以隨意地改變逆變器輸出電壓的幅值及角度，使其在開關時刻發生跳變（換言之就是異步）。使用 *SFAVM* 可得到較好的動態性能。

這種調製方法的主要目的是，在使轉矩紋波最小的同時利用定子電壓使定子磁通最優化。因為開關的順序將決定角度的偏差，而角度的偏差會導致較大的轉矩紋波。因此對開關的順序必須進行計算，以保證向量角度的偏差最小。電壓向量之間的切換是基於對所需的馬達定子磁通軌跡的計算，由此決定氣隙轉矩。

以往一般的 PWM 電源受到定子磁通向量幅值與角度的偏差影響。這些偏差影響到馬達氣隙的旋轉磁場（轉矩），造成轉矩的紋波。其中幅值偏差的影響是輕微的，通過增加開關頻率可使它進一步減小。

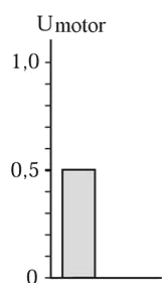
馬達電壓的產生

靜態運行時如下圖所示，控制馬達電壓向量 U_{ω} 去遵循一條圓的軌跡。

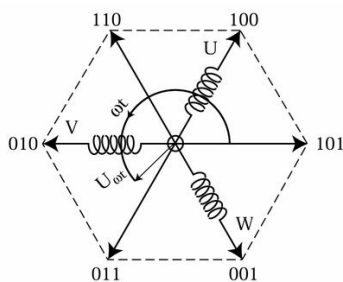
電壓向量的長度是對馬達電壓、旋轉速度及相應的運行頻率的一個度量。相鄰向量短脈衝的平均值構成了馬達的電壓。

Danfoss 的 *SFVM* 有以下的特點：

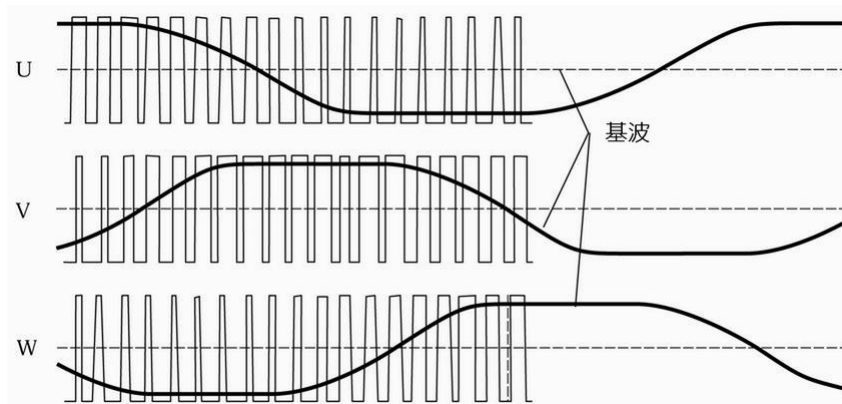
- 對於給定的參考量，電壓向量可被控制得沒有幅度和角度的偏差。
- 每一次通斷都是從 000 或 111 開始，這使每個電壓向量有三種開關模式。
- 電壓向量的平均值是由相鄰向量以及零向量 000、111 的短脈衝得到。



a) 預置輸出電壓
(額定電壓的 50%)



b) 通過對相鄰可調電壓向量的脈寬調製產生理想的電壓向量 U_{α}

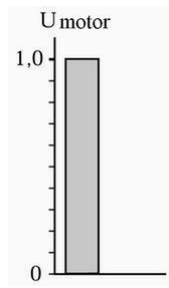


c) 逆變器 U, V, W 三相的控制信號時序

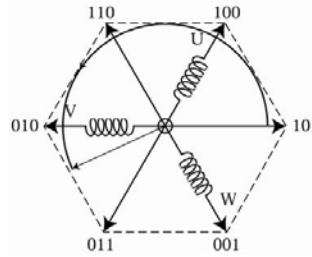
基於空間向量調製 (*SFVM*) 的轉矩 PWM 的瞬間記錄，
其中輸出電壓為馬達額定電壓的 50%

上圖中預置的參考 (基準) 電壓 (U_{α}) 是 50%。如圖所示，輸出電壓以相鄰向量的短脈衝平均值的形式產生，例如這裏的某一區段輸出電壓就是由 011、001 及 000、111 等向量的短脈衝產生。

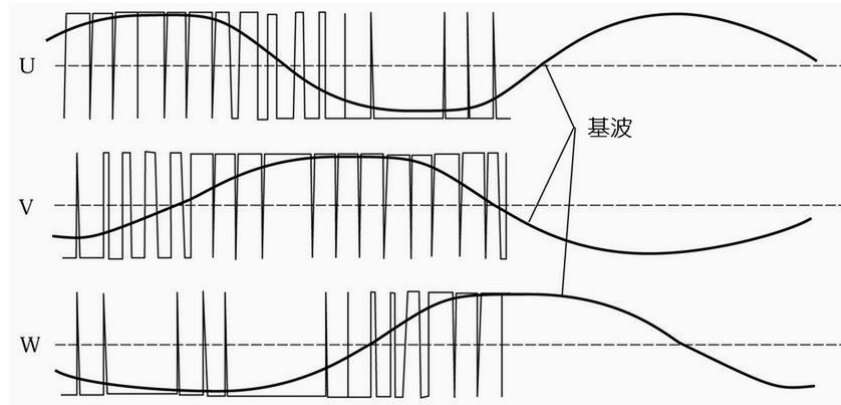
100% 的馬達電壓的產生如下圖所示。



a) 預置輸出電壓
(額定電壓的 100%)



b) 通過對相鄰可調電壓向量的脈寬調製產生理想的電壓向量 U_{ot}



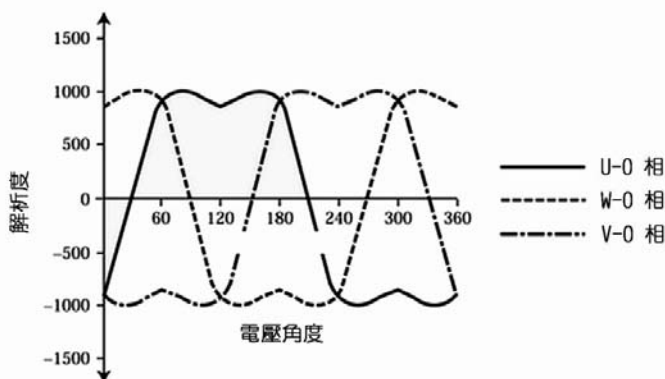
c) 逆變器 U、V、W 三相的控制信號時序

基於空間向量調製 (SFAVM) 的轉矩 PWM 的暫態記錄，
其中輸出電壓為馬達額定電壓的 100%

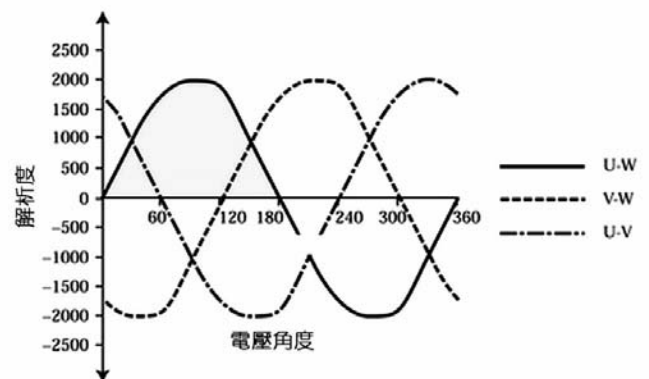
SFAVM 在逆變器的控制系統和功率電路之間建立了一種聯繫。這一調製對於控制電路的控制頻率來講是同步的，面對於馬達電壓的基頻來講是異步的。

控制與調製的同步化對於大功率的控制 (電壓向量、磁通向量的控制) 是有利的，因為電壓向量的控制系統可以直接控制並且不受限制 (幅值、角度、角速度都可控)。

為了大大減少線上的計算時間，不同角度的電壓值可以用表給出。採用 SFAVM 以及產生給馬達的輸出電壓時可用向量調製表，下圖就是這一向量調製表的簡圖。



由向量調製表給出的輸出 (SFAVM)



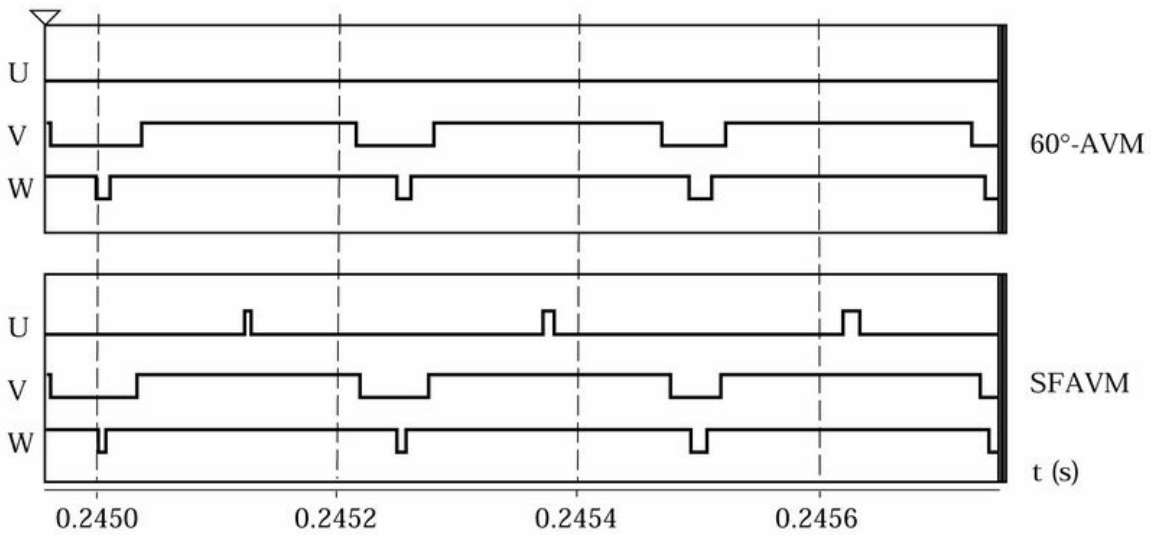
對馬達的輸出線電壓

60° AVM

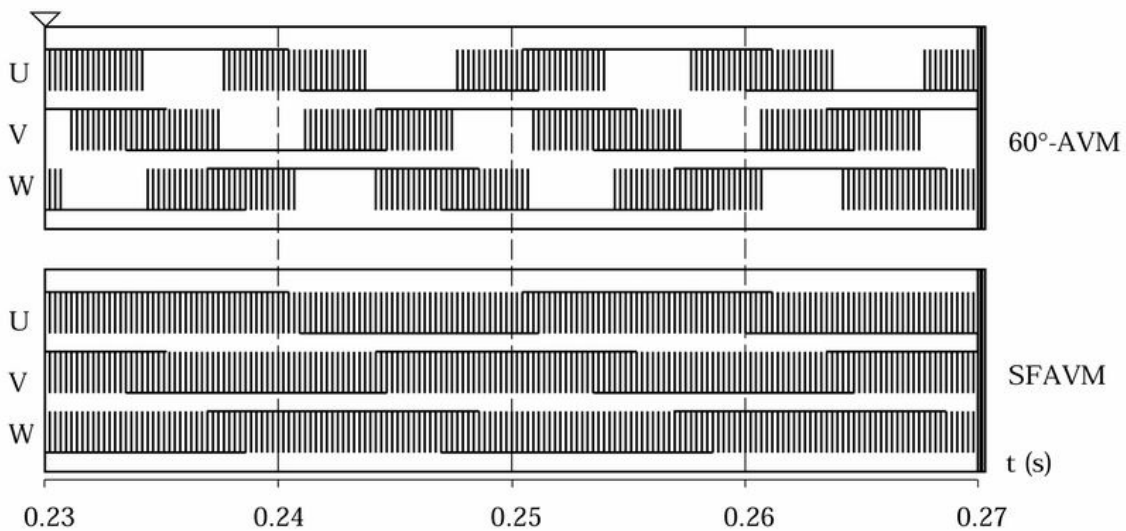
當用 60° AVM (Asynchronous Vector Modulation 異步向量調製) 取代 SFAVM 時，可依據以下方法來決定電壓向量：

- 在一個通斷週期中僅使用一個零向量 (000 或 111)
- 每一次通斷不總是從零向量 (000 或 111) 開始
- 在逆變器的 1/6 週期 (60°) 裏，有一相的開關狀態是不變的，保持 0 或 1。其他兩相的開關正常動作。

下圖給出了 60° AVM 與 SFAVM 的開關序列比較 (a) 圖所示是一個較短的區間 (b) 圖所示是幾個週期。



某 60° 區間內的 60°AVM 和 SFAVM 的開關序列



若干週期內的 60°AVM 和 SFAVM 的開關序列