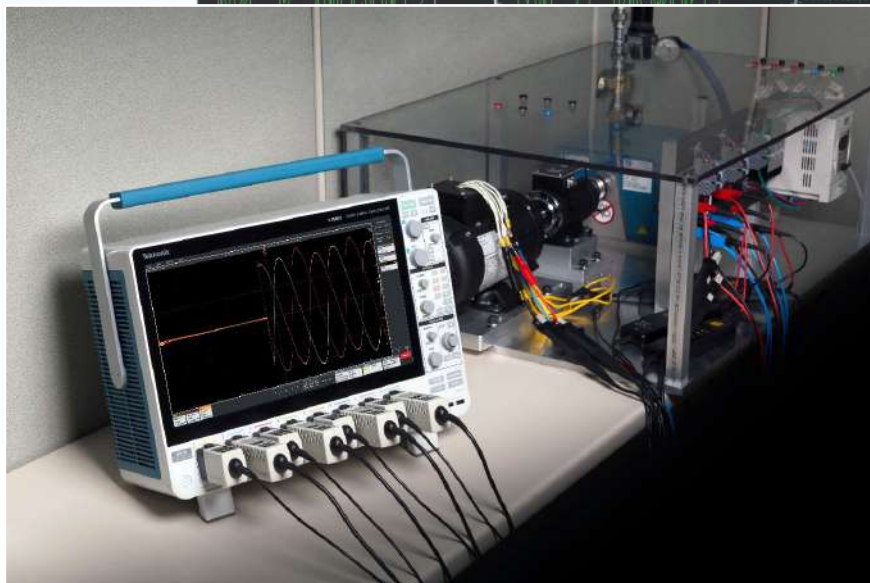
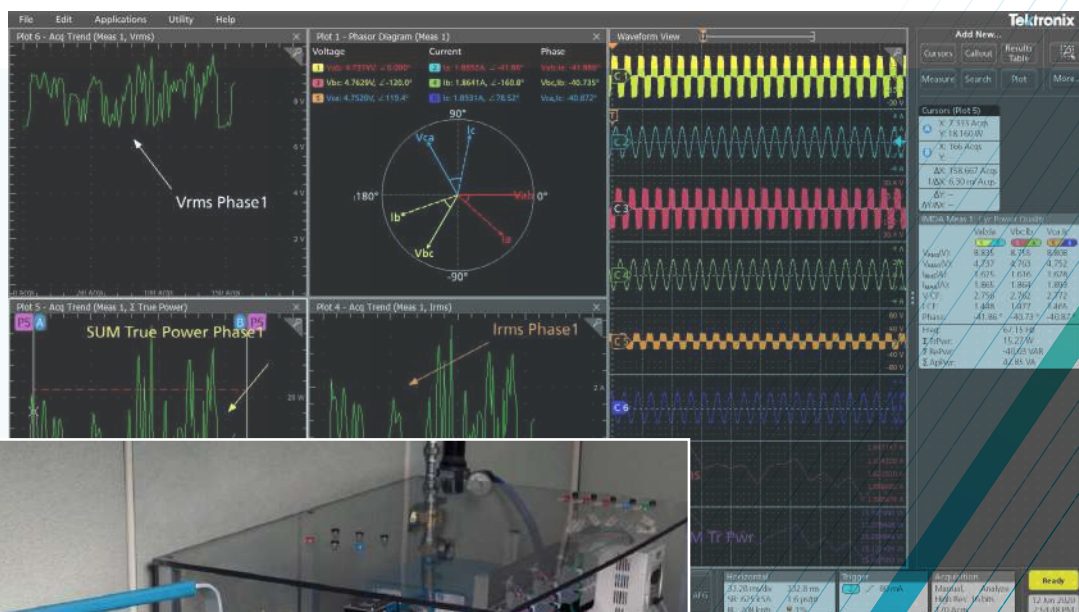


使用示波器量測三相馬達驅動器

入門手冊



使用示波器量測三相馬達驅動器

大多數的現代馬達驅動系統皆使用某種形式的調變來控制頻率，進而控制馬達的速度。在大多數的情況下，這些變頻驅動器 (VFD) 是透過輸出精心控制的脈寬調變 (PWM) 波形來達成此目的。這些系統通常以三相輸出功率，因為這是電動馬達的最佳組態。

自電氣工程的早期階段以來，三相交流感應馬達 (ACIM) 一直是工業生產的主要動力。這些馬達不僅可靠、高效、經濟實惠，而且幾乎不需要維護。然而，市場上有許多不同類型的馬達和驅動器。交流感應馬達 (ACIM) 的效率低於無刷直流馬達 (BLDC) 和永磁同步馬達 (PMSM)。同步 BLDC 和 PMSM 比交流感應馬達更高效、更輕盈，但需要更先進的控制演算法。

儘管每種類型的系統都具有獨特的特性，但馬達驅動器都使用脈寬調變技術來改變提供給馬達的頻率和電壓。

由於對這些 PWM 波形進行調變，因此進行穩定的示波器量測可能具有挑戰性。除了量測驅動器的輸出外，用於評估驅動器輸入階段效能的量測 (例如諧波、功率和功率因數) 也很重要。使用者也可以使用感應器進行機械量測。由於涉及的訊號如此多，因此，若要使用示波器獲得系統的良好視圖，即需要仔細管理量測通道。

本入門手冊介紹了在示波器上使用逆變器、馬達和驅動分析軟體進行量測的方法，以提供對變頻驅動器的輸入、直流匯流排和輸出的穩定、準確的電氣量測，以及對馬達的機械量測。

在本入門手冊中，您將瞭解：

- 基本的變頻驅動結構
- 脈寬調變 (PWM) 基礎知識
- 如何選擇和設定示波器探棒
- 選擇正確的接線組態
- 如何在變頻驅動器上進行量測
 - 電氣量測
 - 輸入量測
 - 直流匯流排量測
 - 輸出量測
 - DQ0 量測
 - 機械量測
 - 速度、方向和加速度

本應用摘要說明在 Tektronix 8 通道 5 系列 B MSO 示波器上進行的這些量測，示波器配備了逆變器馬達驅動分析軟體，可以對 PWM 波形進行穩定、準確的量測。

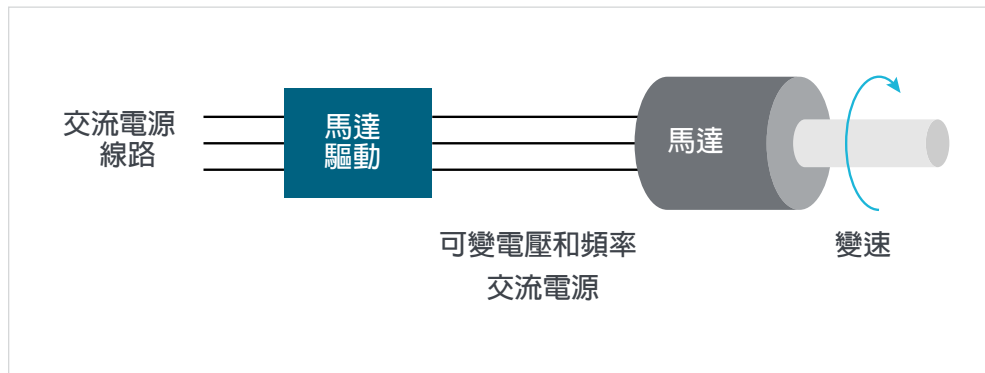


圖 1：馬達驅動器調變馬達的輸入以控制速度和扭矩。

PWM 馬達驅動原理

脈波寬度調變的形式用於驅動多種類型的馬達，包括有刷直流馬達、交流感應馬達、無刷直流馬達和永磁同步馬達。PWM 允許驅動器改變提供給馬達的頻率和電壓。

儘管 PWM 驅動器的原理已被理解多年，但功率半導體、控制電子設備和微處理器的進步和成本降低顯著地刺激了此類驅動器的使用。向量控制方法進一步加快了這個過程，讓設計人員能夠同時獲得直流馬達的效率和可控性以及交流馬達的可靠性。BLDC 和 PMSM 正在廣泛的應用中取代有刷直流馬達和交流感應馬達，不僅包括工業應用，還包括電動工具、電器和電動汽車。

圖 2 為三相變頻驅動器基本元件的方框圖。

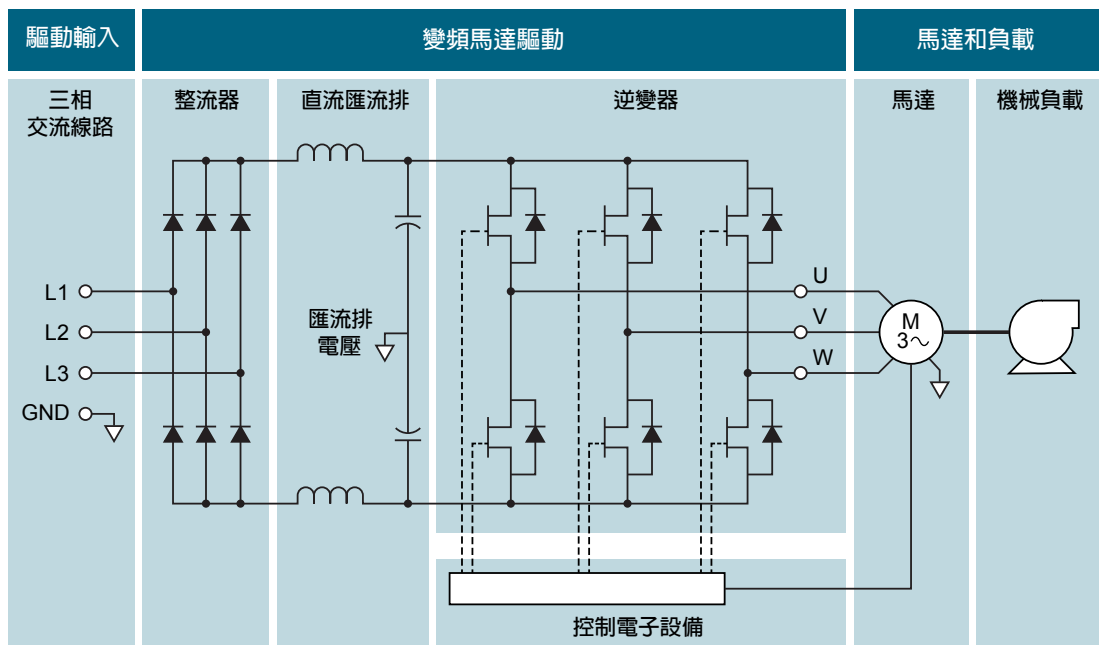


圖 2：三相馬達驅動器，分解為功能區塊。

PWM 驅動器可以由直流、單相交流或三相交流供電。圖 2 顯示了由三相電源供電的 VFD，這在工業設備中很常見。三相電源經過整流和濾波後產生直流匯流排，為驅動器的逆變器部分供電。逆變器由三對半導體開關 (MOSFET、GTO、功率電晶體、IGBT 等) 和相關的二極體組成。每對開關皆為馬達的一個相提供功率輸出。這種基本架構可以適應多種類型的馬達，但控制電子設備在回饋和複雜性方面差異很大。以下是用於驅動馬達的幾種常見 PWM 形式的簡要說明。

6 步進/梯形驅動器

這種類型的驅動器會與 BLDC 馬達一起使用。BLDC 馬達高效且體積小。這種馬達具有直流馬達的優點，但沒有電刷磨損，可以透過相對簡單的 6 步進或梯形 PWM 策略進行電子換向。一組典型的 PWM 波形如下所示。

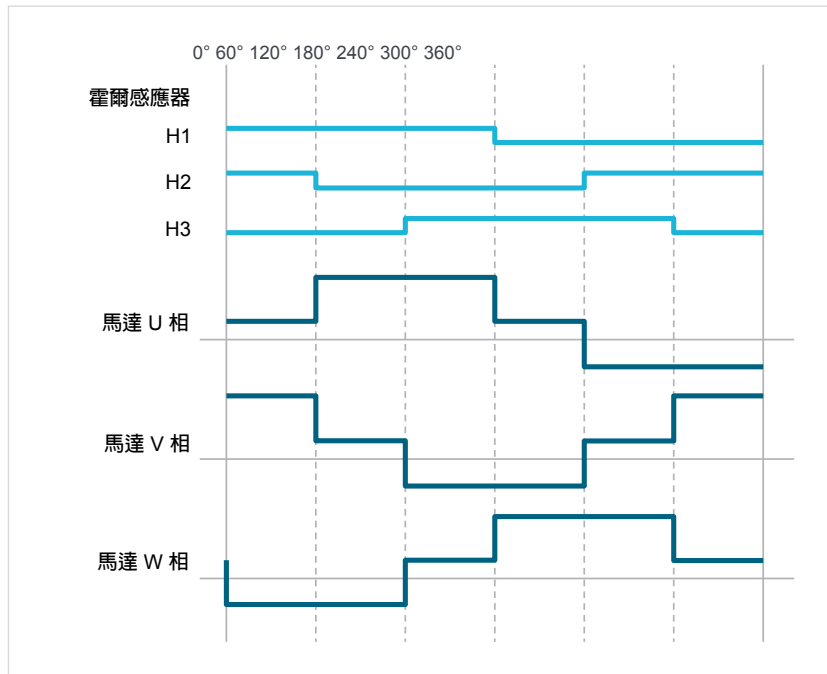


圖 3：霍爾感應器向簡單的 6 步進控制器提供回饋。驅動器輸出 U、V 和 W 應用於馬達的定子。

純量驅動器

用於驅動交流感應馬達的簡單 VFD 透過改變驅動馬達的 PWM 波形的基頻來控制速度。為了保持全轉矩，驅動器中的控制系統保持 PWM 波形的電壓和基頻之間的比率。這些被稱為純量驅動器。

控制電子裝置會產生三個相隔 120° 的低頻正弦波，用於調變每對開關的脈波寬度。

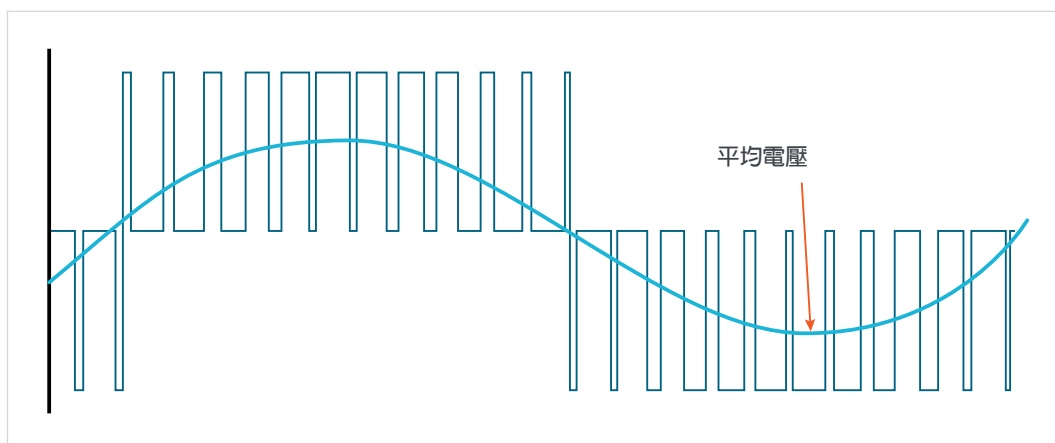


圖 4：A 相和 B 相之間的脈寬調變波形的平均相間電壓是正弦曲線。

提供給馬達繞組的平均電壓近似為正弦曲線。馬達繞組的其他兩相則具有相隔 120° 的相似平均電壓。

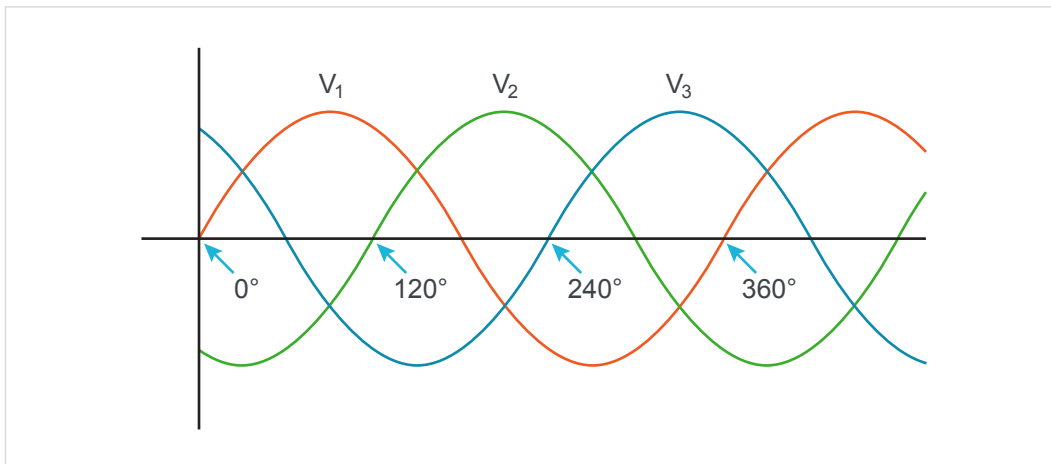


圖 5：三相電壓訊號，隨時間繪製

在很大程度上，馬達表現為逆變器輸出電壓的電感器。由於電感器對更高頻率具有更高的阻抗，因此馬達消耗的大部分電流是由於 PWM 波形輸出中的低頻分量所造成。這導致馬達汲取的電流近似為正弦曲線。

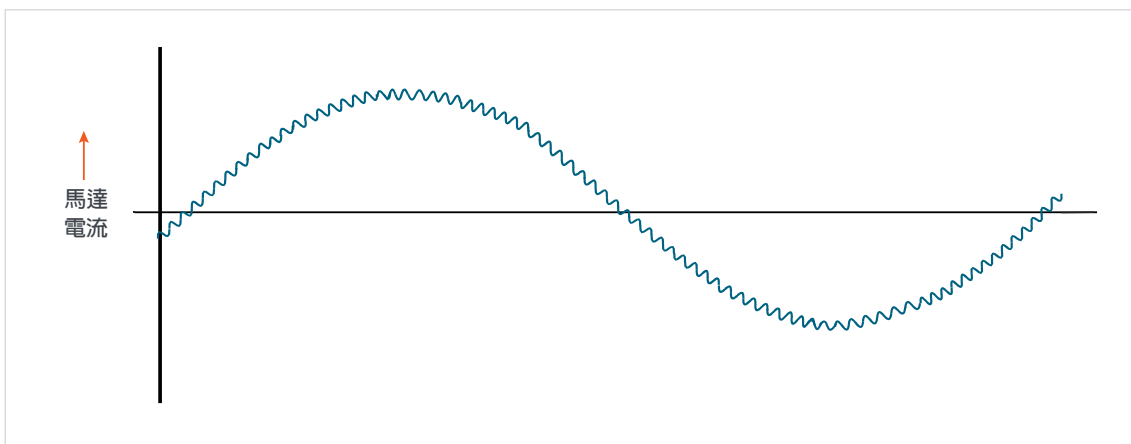


圖 6：由於馬達是感性負載，並且可以抵抗電流的快速變化，因此馬達汲取的電流近似為正弦曲線。

透過控制調變波形的振幅和頻率，以及控制 V/Hz 比，PWM 驅動器可以提供三相電源以驅動馬達達到所需的速度。

向量驅動器 / 磁場定向控制

用於交流感應馬達和同步馬達的更先進的驅動器採用向量驅動技術。這些驅動器比純量驅動器更靈活、更高效，但也更複雜。

向量驅動器與純量驅動器的相似之處在於其以正弦電流驅動馬達，但向量驅動器提供更平穩的操作、更快的加速和卓越的扭矩控制。這些控制系統通常使用磁場定向控制 (FOC)，並且比純量驅動器複雜得多。

向量 D 和 Q 是正交向量，其大小與馬達內的轉矩和磁通量有關。

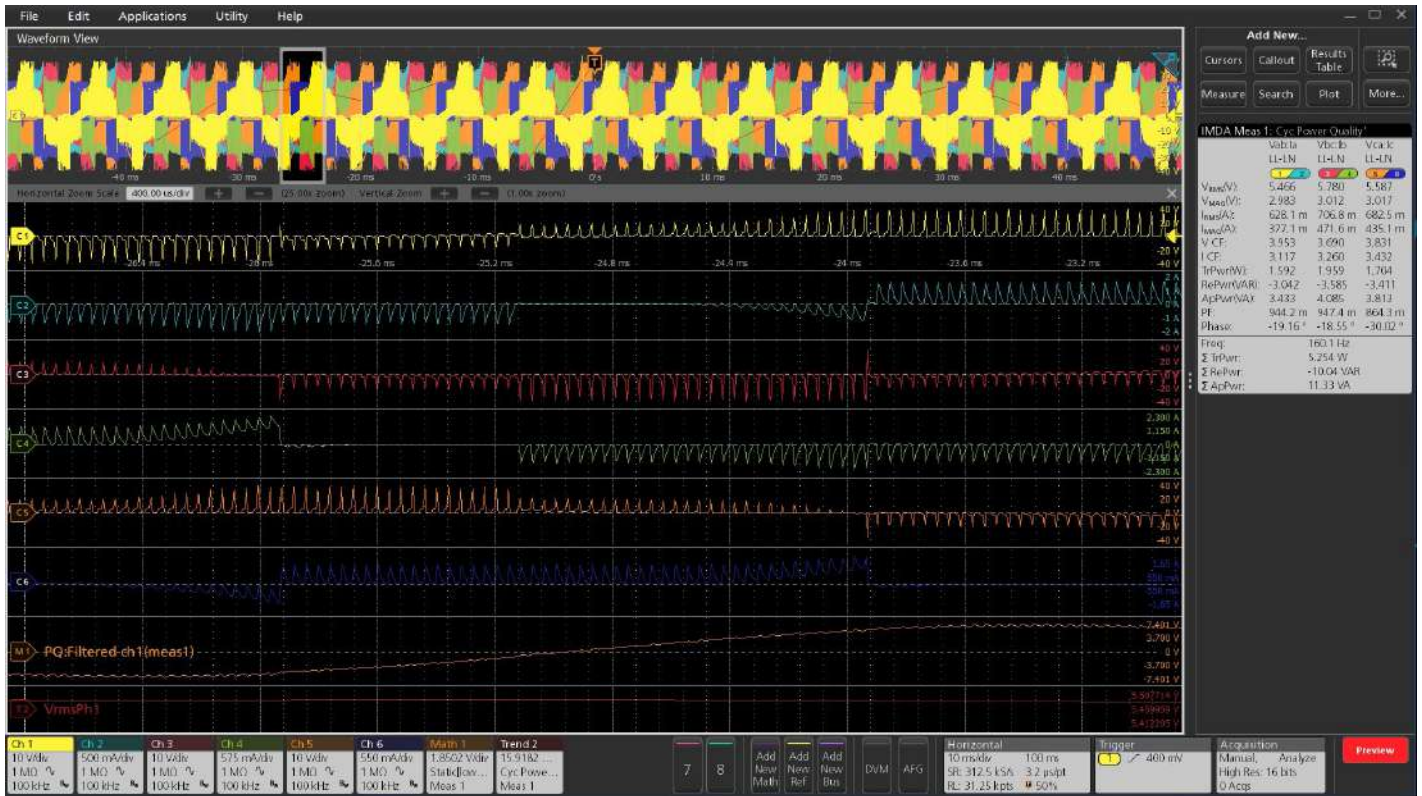


圖 7：向量或磁場定向控制使用複雜的 PWM 波形。

控制系統必須量測轉子的位置以使系統同步。這通常透過使用霍爾感應器或正交編碼器介面 (QEI) 等感應器來完成 (也會使用無感應器系統，其中控制系統使用馬達的反電動勢來確定轉子位置)。控制器使用克拉克 (Clarke) 和帕克 (Park) 轉換來計算 D 和 Q 的大小，然後使用這些值作為設定點控制迴路。

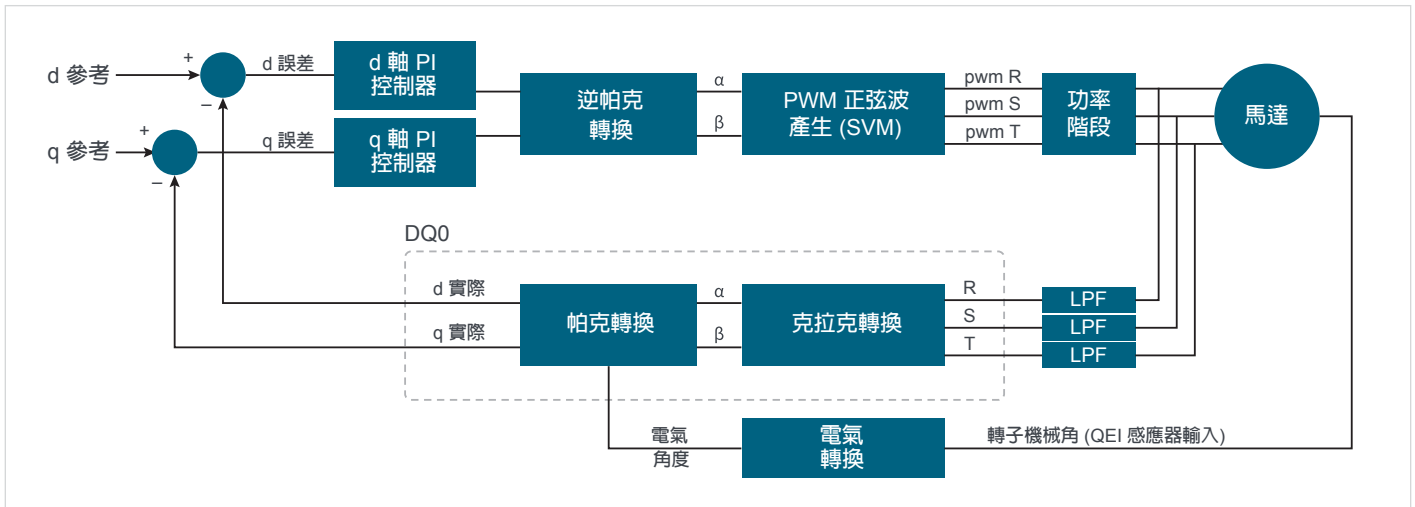


圖 8：向量控制系統方框圖

連接至 VFD 系統

示波器探棒選擇

在變頻驅動系統上進行電源量測需要電壓和電流探棒。在為馬達驅動量測選擇示波器電壓探棒時，請務必考慮：

- 馬達驅動量測涉及相對較高的電壓。例如，480 Vac 三相馬達驅動器中的直流匯流排電壓通常約為 680 Vdc。確認探棒頭和用於連接探棒的附件的額定電壓。
- 共模電壓也可能相對較高。也就是說，量測值通常相對於接地「浮動」，因此可能不使用以接地為參考的探棒。起務必要確保訊號浮動不超過探棒的共模電壓額定值。
- 大多數感興趣的頻率低於 200 MHz，因此具有此頻寬的探棒應該足以滿足大多數日常量測。
- 探棒應涵蓋廣泛的量測任務。

由於這些原因，通常會建議使用高壓差動探棒作為電力電子逆變器子系統、驅動輸入/輸出和控制系統量測的通用電壓探棒。



圖 9：Tektronix 差動探棒 (例如 THDP0200) 和 Tektronix 交流/直流電流探棒 (例如 TCP0030A) 為許多 VFD 量測情況提供了良好的覆蓋範圍。

注意： 接地參考被動式探棒不應該用於量測相電壓。中性端子可能不處於接地電位，導致大量電流流過探棒和示波器接地。這很危險，可能會導致 DUT 或示波器受到衝擊或損壞。

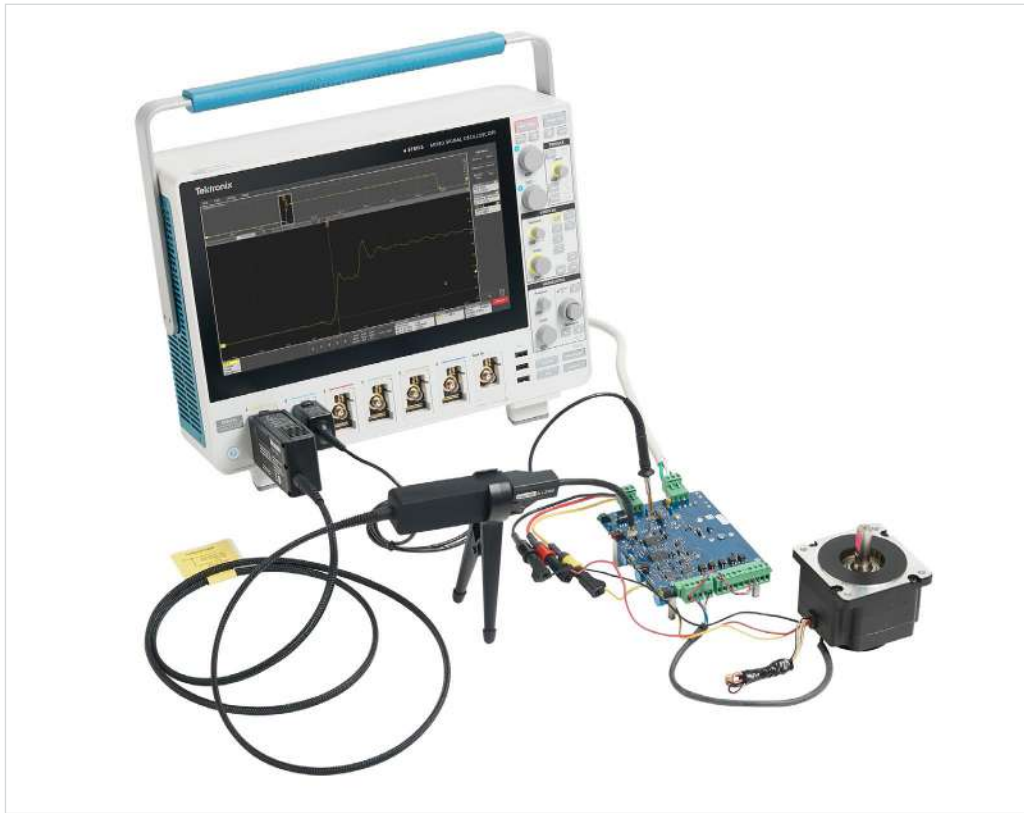


圖 10：IsoVu 光隔離電壓探棒提供極高的共模抑制比，最大值為 2500 V，並提供高達 1 GHz 的頻寬。

下列是建議用於馬達驅動應用的探棒：

機型	描述
高壓 (差動) 探棒： THDP0100/0200	THDP 系列探棒是對各種電力電子逆變器和馬達驅動子系統進行非接地參考、浮動量測的良好通用選擇。根據型號，這些探棒可以執行浮動在接地上方數百伏特的量測，並量測高達 6000 V 的差動電壓。提供 100 MHz 和 200 MHz 型號。
光隔離電壓探棒 IsoVu TIVP 系列：	IsoVu 探棒可提供極高的共模抑制。特別適合在切換式電路中進行精確的高端 VGS 量測，並且通常用於驗證 SiC 和 GaN 應用。 提供各種探棒頭。MMCX 探棒頭可提供高達 250 V 的高訊號完整性。方形引腳探棒頭可提供 0.100 英寸 (2.54 公釐) 間距 (可用於高達 600 V 的應用) 和 0.200 英寸 (5.08 公釐) 間距 (可用於應用高達 2500 V)。
電流探棒 TCP0030A 和 TCP0150A	交流/直流電流量測探棒。TCP0030A 提供大於 120 MHz 的頻寬，可選擇 5 A _{RMS} 和 30 A _{RMS} 量測範圍。對於更高的電流，TCP0150A 高達 150 A _{RMS} 。

示波器探棒設定

在進行任何電源量測之前，必須採取一些重要步驟。電流探棒必須消磁，所有探棒都應該進行偏斜校正，才能獲得準確的結果。

請務必在進行量測之前對電流探棒執行消磁程序，以消除探棒磁芯中的任何殘留磁化。殘留磁化會導致不準確的量測。此程序通常是透過從電流探棒的鉗口移除所有導體，並透過按下按鈕啟動程序執行。Tektronix 電流探棒 (如 TCP0030A) 會在使用前自動提示您執行消磁程序。

偏斜校正程序會校正任意兩個不同示波器通道之間的各種傳播延遲，包括探棒和探棒佈線。這很重要，因為相位關係對於 VFD 系統上的許多量測而言十分重要。基本程序是為通道提供同步訊號，並調整每個通道的延遲以對齊通道。Tektronix 可提供電源量測偏斜校正夾具 (P/N 067-1686-xx) 來協助解決此問題。

連接電流探棒時，請務必注意探棒上的箭頭。當電流探棒連接在負載的線路端時，箭頭應指向負載。如果電流探棒連接在負載的返回端，箭頭應遠離負載。

若需要更多有關電源量測探棒選擇和設定的資訊，請參閱《[使用示波器對電源供應器進行準確電壓量測的探測技術](#)》和《[使用示波器對電源供應器進行準確電流量測](#)》。

接線組態

通常，VFD 的輸入和輸出都使用三相。但是，商業、住宅或汽車驅動系統中使用的一些 VFD 可能由單相交流或直流供電。此外，三相系統可以採用兩種組態進行接線和建模：星形 (或 Y 形) 和三角形。接線組態決定了電源分析中使用的運算方式，因此，請務必瞭解和選擇正確的接線組態，才能獲得預期的結果。這些組態適用於馬達驅動器的輸入和輸出。圖 11 顯示了 IMDA 解決方案在部分 Tektronix 示波器上支援的接線組態。

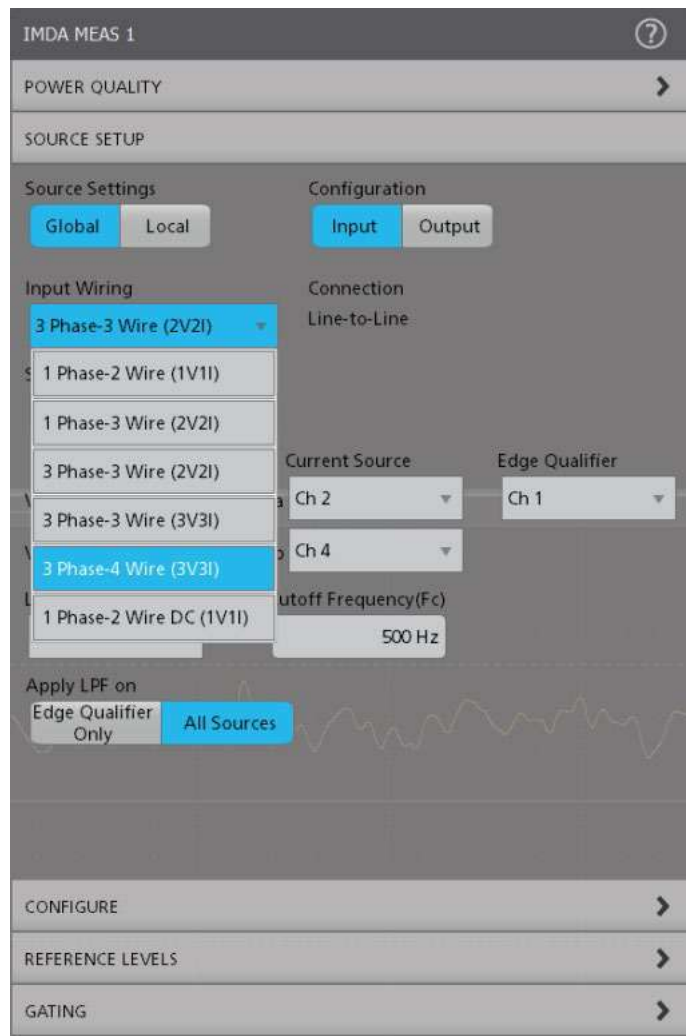


圖 11：在 IMDA 軟體中透過下拉式清單選擇輸入接線。

單相連接

單相雙線 (1V1I)

需要兩個通道：一個用於電壓，一個用於電流，如圖 12 所示，量測電壓。測得的總功率 $P = V * I$ 。單相交流和直流電源使用相同的設定。

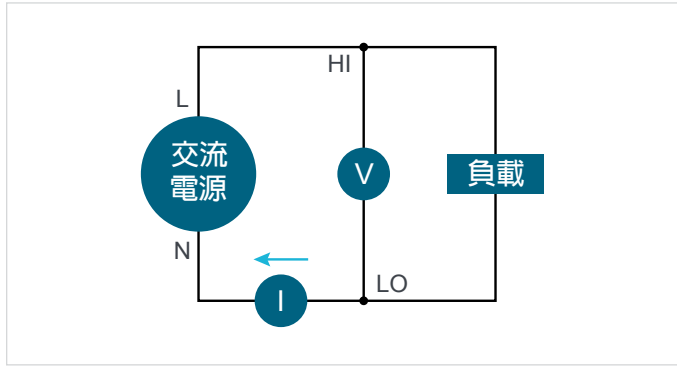


圖 12：單相兩線交流量測。直流電源使用相同的設定。

單相三線 (2V2I)

單相三線組態在馬達驅動應用中很少見，但在北美住宅應用中很常見，其中一個 240 V 和兩個 120V 電源可用，並且每個支腳上可能有不同的負載。量測這種來源將需要兩個電壓通道和兩個電流通道。測得的總功率為 $V * I (Load1 + Load2)$ 。

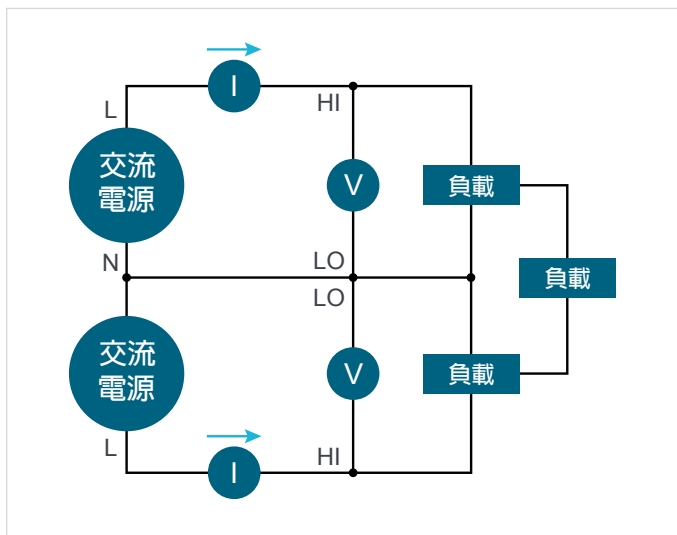


圖 13：單相三線接線在工業環境中很少見，但在消費和輕型商業環境中很常見。

三相連接

量測具有 2 個電壓通道和 2 個電流通道的三相三線系統 (2V2I)

馬達驅動器通常使用三線輸出，只需使用示波器上的 2 個電壓和 2 個電流通道即可準確量測 (馬達驅動輸入更可能使用四線系統)。當三條接線將電源連接到負載時，至少需要兩個瓦特計來量測總功率。需要兩個電壓通道和兩個電流通道，如圖 14 所示。電壓通道會在相位之間連接，其中一個相位作為參考。負載和電源可以採用三角形或星形組態接線，但之間不得有中性導體。在這種情況下，兩個瓦特計可以計算提供給負載的總功率 (請參見側欄：「4 個示波器通道如何量測三相系統？」)

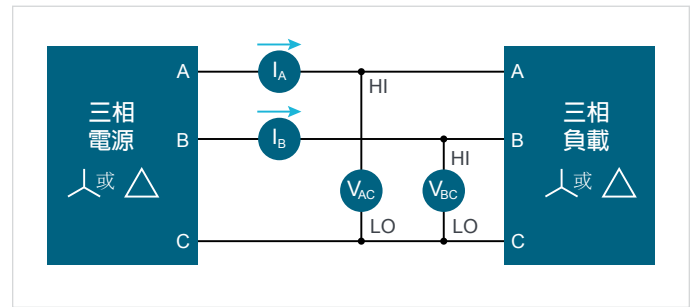


圖 14：三相三線，2 瓦特計方法。

圖 14 顯示了接線，圖 16 顯示了用於量測 2V2I 連接的 IMDA 來源設定。Select Lines 控制項會建立用作電壓參考的相位。在此範例中，在 A 相和 B 相上量測電流，在 A 和 B 相上量測相對於 C 相的電壓。即，量測值為 V_{AC} 、 V_{BC} 、 I_A 和 I_B 。在此範例中，總實功率 ($\Sigma TrPwr$) 為：

$$\text{瞬時功率 } P1 = V_{AC} * I_A$$

$$\text{瞬時功率 } P2 = V_{BC} * I_B$$

$$\Sigma TrPwr = P1 + P2$$

4 個示波器通道如何量測三相系統？

Blondel 定理指出，對於 N 線系統，量測相對於其中一根線的電壓，可以使用 N-1 個瓦特計來量測總功率。

例如，在星形或三角形的三線系統中，系統的總功率可以透過使用 2 個電壓通道和 2 個電流通道來確定。例如，星形系統如圖 15 所示。根據「基爾霍夫電流定律」(Kirchoff's Current Law)，如果已知其中兩個電流，則可以找到系統中的所有電流。系統中的電壓可以透過量測相對於第三相的兩相來確定。

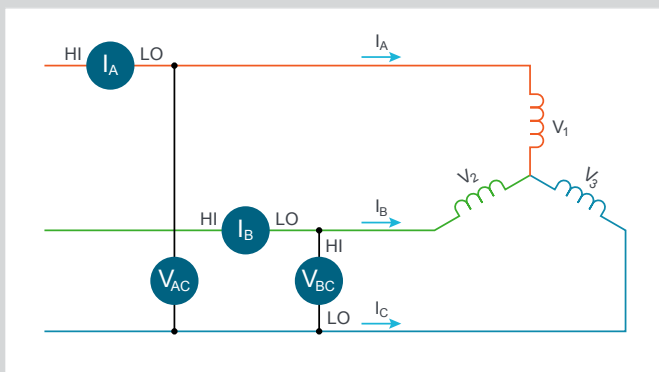


圖 15：這個三線星形系統 (無中性線) 用於說明如何使用兩瓦特計法來量測三相系統。

每個瓦特計量測的瞬時功率是瞬時電壓和電流取樣的乘積。

瓦特計 1 由 i_A 和 v_{AC} 組成，其中

$$p_1 = i_A (v_{AC}) = i_A (v_1 - v_3)$$

瓦特計 2 由 i_B 和 v_{BC} 組成，其中

$$p_2 = i_B (v_{BC}) = i_B (v_2 - v_3)$$

$$p_1 + p_2 = i_A (v_1 - v_3) + i_B (v_2 - v_3) = i_A v_1 - i_A v_3 + i_B v_2 - i_B v_3$$

$$p_1 + p_2 = i_A v_1 + i_B v_2 - (i_A + i_B) v_3 \quad (\text{公式 1})$$

根據基爾霍夫電流定律，

$$i_A + i_B + i_C = 0, \text{ so } i_A + i_B = -i_C \quad (\text{公式2})$$

代入公式 1 中的 $(i_A + i_B)$ ：

$$p_1 + p_2 = i_A v_1 + i_B v_2 + i_C v_3 \text{ 這是所有三相的總瞬時功率。}$$

因此，三線系統中的總功率可以透過使用兩個電壓通道和兩個電流通道組成兩個瓦特計來確定。

參考文獻：Blondel, A.；多相電流能量的量測；[國際電氣大會論文集](#)；1893 年 8 月；美國電氣工程師學會

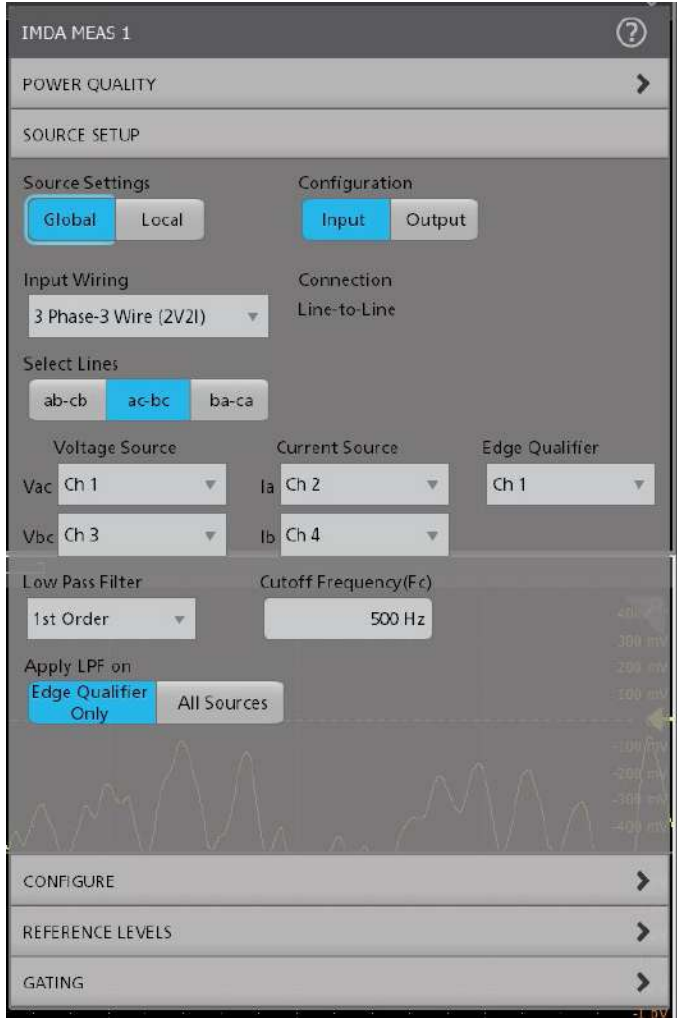


圖 16：使用兩瓦特計法設定三線系統。在 A 相和 B 相上量測電流，在 A 和 B 相上量測相對於 C 相的電壓。

量測具有 3 個電壓通道和 3 個電流通道的三相三線系統 (3V3I)

即使只需要兩個瓦特計來量測三線系統中的總功率，使用三個瓦特計也有優勢。三瓦特計組態需要六個示波器通道：3 個電壓和 3 個電流。這種 3V3I 組態提供單獨的相電壓和每個單獨相位的功率，這在兩瓦特計組態中無法使用。

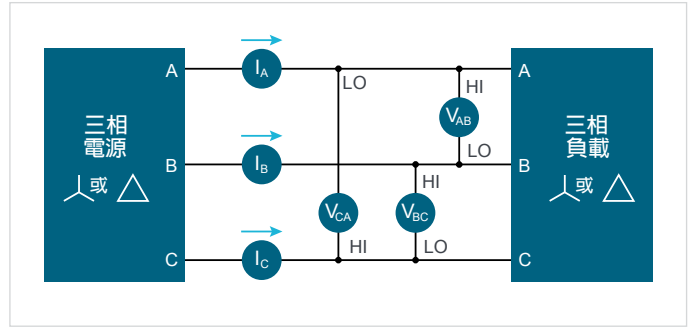


圖 17：三相三線系統，使用 3 個電壓和 3 個電流通道 (三個瓦特計) 量測。

對於使用 3V3I 量測的三線系統，IMDA 軟體包括一個將線路間 (L-L) 電壓轉換為線與中性點間 (L-N) 電壓的設定。儘管此系統中沒有物理中性點，但可以從瞬時線與中性點間電壓確定瞬時線路間電壓。

$$V_{AN} = \frac{V_{AB} - V_{CA}}{3}$$

$$V_{BN} = \frac{V_{BC} - V_{AB}}{3}$$

$$V_{CN} = \frac{V_{CA} - V_{BC}}{3}$$

這種逐點 LL-LN 轉換表示相對於單個參考的所有電壓，並校正每個相位的電壓和電流之間的相位關係。透過在轉換開啟和關閉時注意相量圖上的相位關係，您可以看到 LL-LN 轉換的相位校正。若開啟 LL-LN 轉換，即可透過將相電壓和相電流相乘來計算瞬時功率。例如，我們便可以找到提供給負載的總實功率 ($\Sigma TrPwr$)。

$$\Sigma TrPwr = (V_{AN} * i_A) + (V_{BN} * i_B) + (V_{CN} * i_C)$$

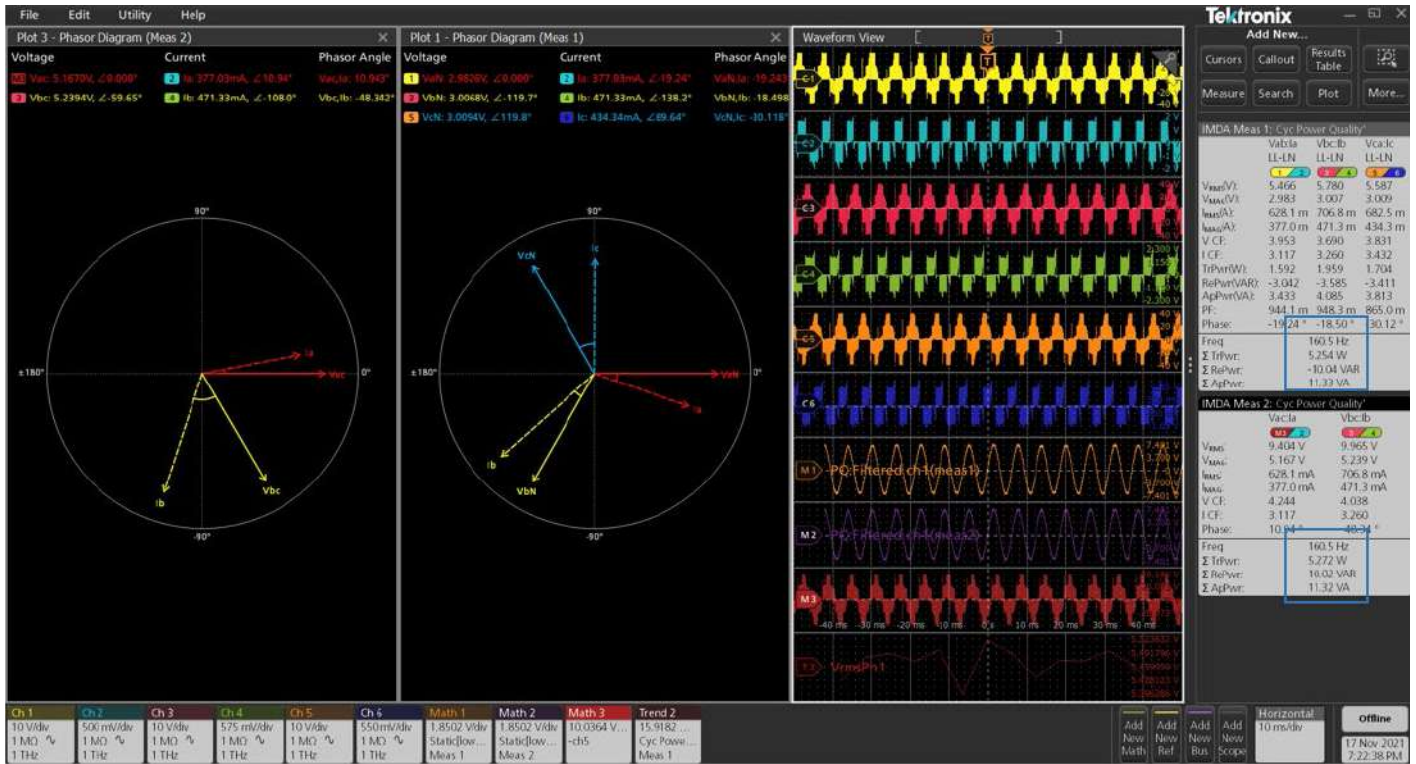


圖 18：啟動 LL-LN 轉換的 3V3I 組態提供了每相的實功率、無功功率和虛功率以及所有相的總和的讀數。請注意，總功率量測值與使用「雙瓦特計」(2V2I) 組態觀察到的功率量測值相當。

量測具有 3 個電壓通道和 3 個電流通道的三相四線系統 (3V3I)

在線路和驅動器或驅動器和馬達之間使用中線導體的系統中，需要三個電壓通道和三個電流通道來量測總功率。此類四線系統如圖 19 所示。電壓皆是相對於中線進行量測。可以使用向量數學從相電壓振幅和相位準確計算相電壓。總功率 $\Sigma TrPwr = P1 + P2 + P3$ 。

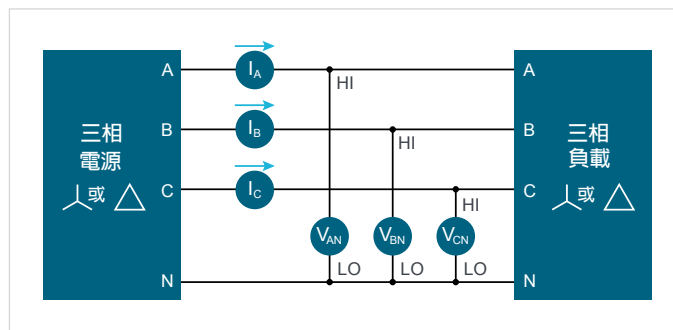


圖 19：三相四線 (三瓦特計法)

VFD 系統區塊的量測

不同的量測和技術用於 VFD 系統內的不同功能區塊。我們將描述這些區塊中每一個 (輸入、直流匯流排、輸出和馬達) 我們將描述關鍵量測值，並注意其在 5 和 6 系列 MSO 的 IMDA 分析工具中的位置。

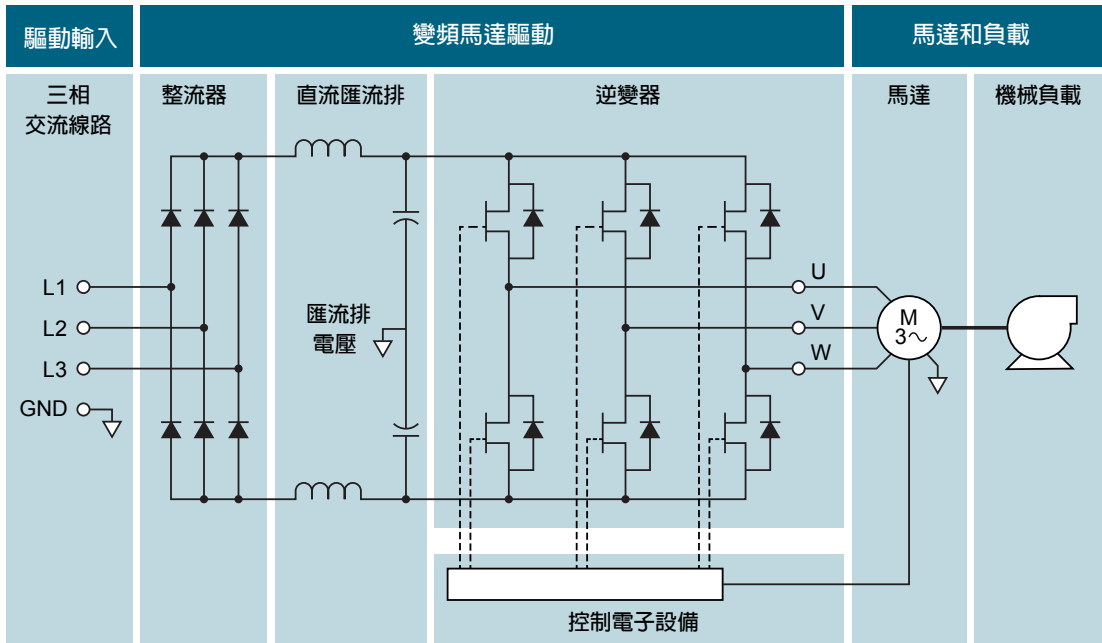


圖 20：在驅動器輸入、直流匯流排、輸出和馬達上使用了不同的量測值。

三相自動設定

IMDA 軟體包括一個三相自動設定功能，可根據所選的接線組態自動設定電壓和電流來源。軟體將會在示波器上最佳化設定垂直、水平、擷取和觸發參數，並可對所有有功電源量測進行。這顯著地簡化了量測設定，尤其是對於 VFD 輸出上的 PWM 波形。

輸入 (線路) 量測

大多數工業和重型商用 VFD 具有三相輸入。較小型的驅動器可以使用單相線性電壓。特別是在電動汽車和其他電池供電的應用中，驅動器通常採用直流供電。IMDA 電源軟體支援上述所有這些組態 (請參見「接線組態」)。在 IMDA 量測套件中，Power Quality (電源品質) 和 Harmonics (諧波) 群組用於量化驅動器的功耗以及驅動器對配電系統的預期影響。

電源品質

Power Quality (電源品質) 量測群組包括分析驅動器功耗特性的量測。這些相同的量測值也可用於驅動器的輸出 (請參見下文「輸出量測」)。圖 21 顯示了 Electrical Analysis (電氣分析) 區段中的 Power Quality (電源品質) 量測。選擇 Power Quality (電源品質) 量測會產生相量圖、波形和量測標記。顯示了設定繞組的 PQ 能量和功率數學波形。功率波形是使用數學演算法建立 (將每個相位的電壓和電流波形相乘)。

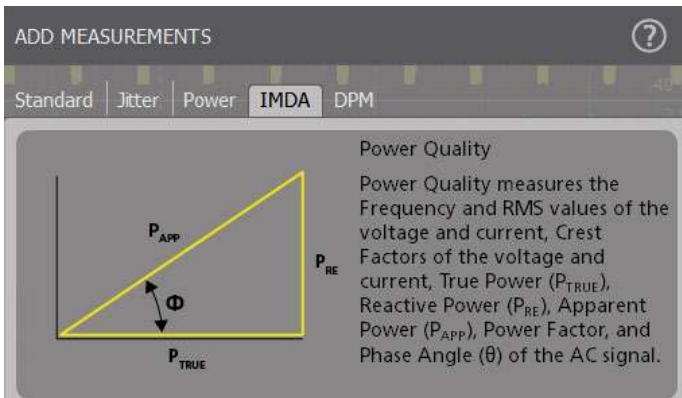


圖 21：在 Tektronix IMDA 軟體中，量測被分解為 Power Quality (電源品質)、Harmonics (諧波)、Ripple (漣波) 和 Efficiency (效率)。DQ0 和機械量測作為選項提供。

Power Quality (電源品質) 量測有助於確認您的探棒和接線組態是否正確。如果一或多個電源量測顯示負讀數，請檢查您的電流探棒 (與負功率讀數相關的通道上的探棒) 是否反向連接。若為三相系統，請檢查相量圖。在正常情況下，電壓實際上應相同，相間相差 120° 。

相量圖：圖 22 所示的相量圖是一個圓形圖，表示各相的電壓和電流之間以及電壓和電流之間的振幅和相角。理想情況下，平衡的三相具有大小相等且彼此異相正好 120° 的向量。

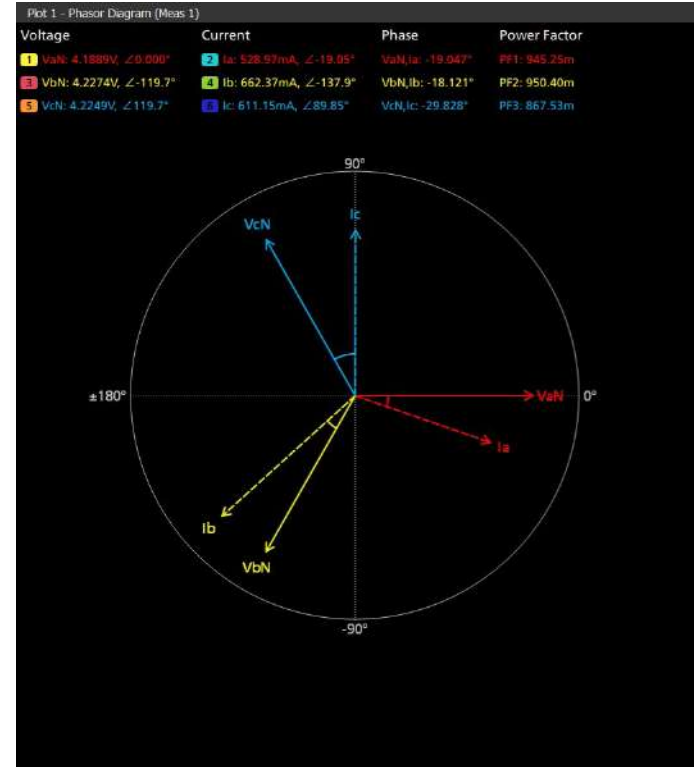


圖 22：相量圖顯示了所有相位上的電壓和電流之間的關係。圖表一目了然，顯示了系統的平衡以及電壓和電流 (電容或電感) 之間的相移。

相量圖 (圖 22) 顯示了每個相的以下量測值：

- RMS 電壓和相對於參考相電壓的角度 (圖 22 中的 VaN)
- RMS 電流和相對於參考相電壓的角度
- 電壓和電流之間的相位
- 功率因數

Power Quality (電源品質) 量測標記 (圖 23 中顯示了範例) 提供了許多量測值。在此範例中，3V3I 組態為每個相位提供以下量測值：

- V_{RMS} ：在整數個週期內量測的相電壓 RMS 值。相電壓的數量因接線組態而異。
- V_{MAG} ：在馬達運作頻率下測得的相電壓振幅。運作頻率是電壓訊號的基頻，透過應用 FFT 確定。
- I_{RMS} ：在整數個週期內測得的相電流 RMS 值。電流的數量可能因接線組態而異。
- I_{MAG} ：在馬達運作頻率下量測的相電流訊號振幅。運作頻率是電流訊號的基頻，透過應用 FFT 確定。
- **波峰因數 (VCF 和 ICF)**：峰值電壓或電流與 RMS 電壓或電流的比率 (正弦波的波峰因數為 1.414)。

- **實功率 (TrPwr)**：實功率由下式計算

$$TrPwr = \frac{1}{T} \int (v(t) \cdot i(t)) dt$$

在離散域中，這是：

$$TrPwr = \frac{1}{N} \sum (v(n) \cdot i(n))$$

其中 $n = 1, 2 \dots N$ ， N 是取樣數。

實功率 (P) 是傳遞到負載電阻部分的實際功率，以瓦特為單位。請注意，只有純正弦波的實功率才等於

$$V_{RMS} \times I_{RMS} \times \cos(\varphi)$$

其中 φ 是電壓波形和電流波形之間的角度。

- **虛功率 (ApPwr)** 為：

$$ApPwr = V_{RMS} \cdot I_{RMS}$$

其中 V_{RMS} 和 I_{RMS} 是根據電壓和電流波形計算得出。

單位是 VA。

請注意，對 MATH1 功率波形執行 RMS 計算不等效，不會提供正確的結果。

- **無功功率 (RePwr)** 計算公式如下：

$$RePwr = \sqrt{(ApPwr^2 - TrPwr^2)}$$

單位是 VAR，或無功伏安。

- **功率因數 (PF)** 為：

$$PF = \frac{TrPwr}{ApPwr}$$

功率因數為兩個功率的比率，一般視為無維度。這種計算優於使用相位的餘弦，因為不僅考慮了基頻，還考慮了所有量測的頻率分量。

- **相位角 (Phase)** 計算公式如下：

$$Phase = \cos^{-1} \left(\frac{TrPwr}{ApPwr} \right) = \cos^{-1}(PF)$$

單位是度。與功率因數計算一樣，這種方法考慮了完整的量測頻譜。

對於任何多相系統，Power Quality (電源品質) 量測結果會提供以下總計：

- **頻率 (Freq)** 由低通濾波邊緣源的週期計算得出。
- **總實功率 (STrPwr)** 是所有相的實功率之總和。
- **總無功功率 (SRePwr)** 是所有相的無功功率之總和。
- **總虛功率 (SApPwr)** 是所有相的虛功率之總和。

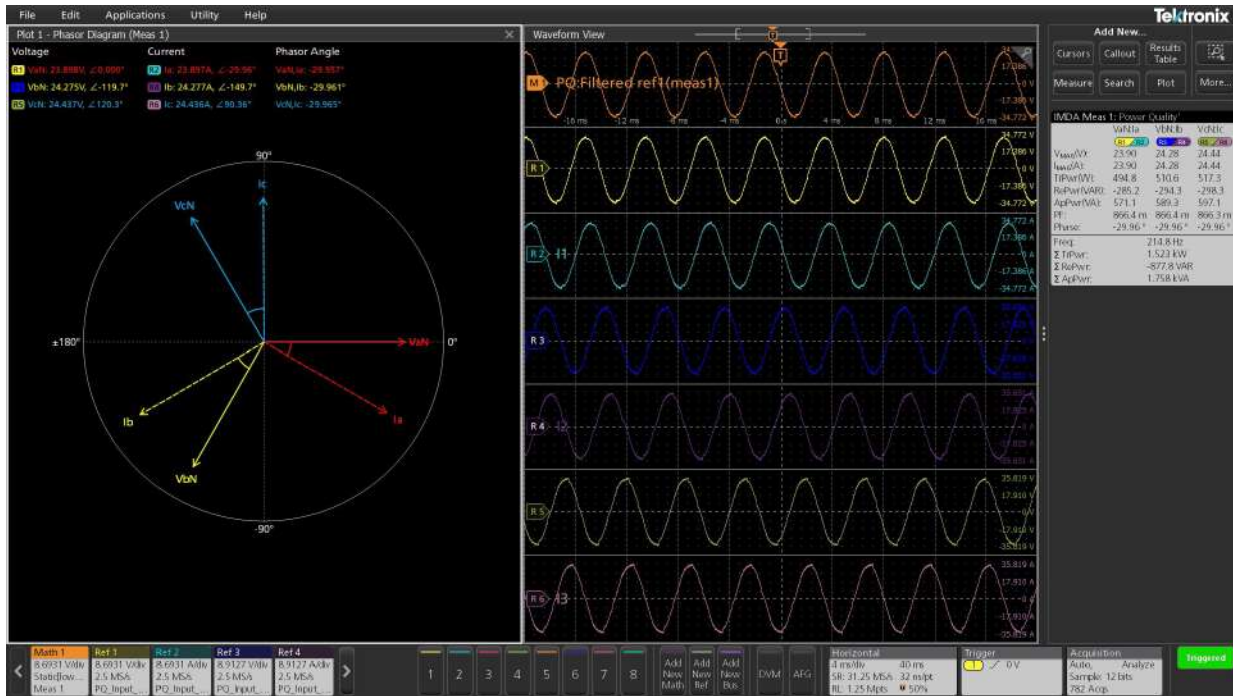


圖 23：馬達驅動器輸入（線路）端的電源品質量測。

諧波

諧波量測繪製基頻及其諧波處的訊號振幅，並量測訊號的 RMS 振幅和總諧波失真。可以根據 IEEE-519 或 IEC 61000-3-2 標準或自訂限制來評估量測結果。例如，可以將 IEC61000-3-12 標準的限制加載為 csv 檔案並針對這些限制進行測試。測試結果可記錄在詳細的報告中，以指示通過/失敗狀態。

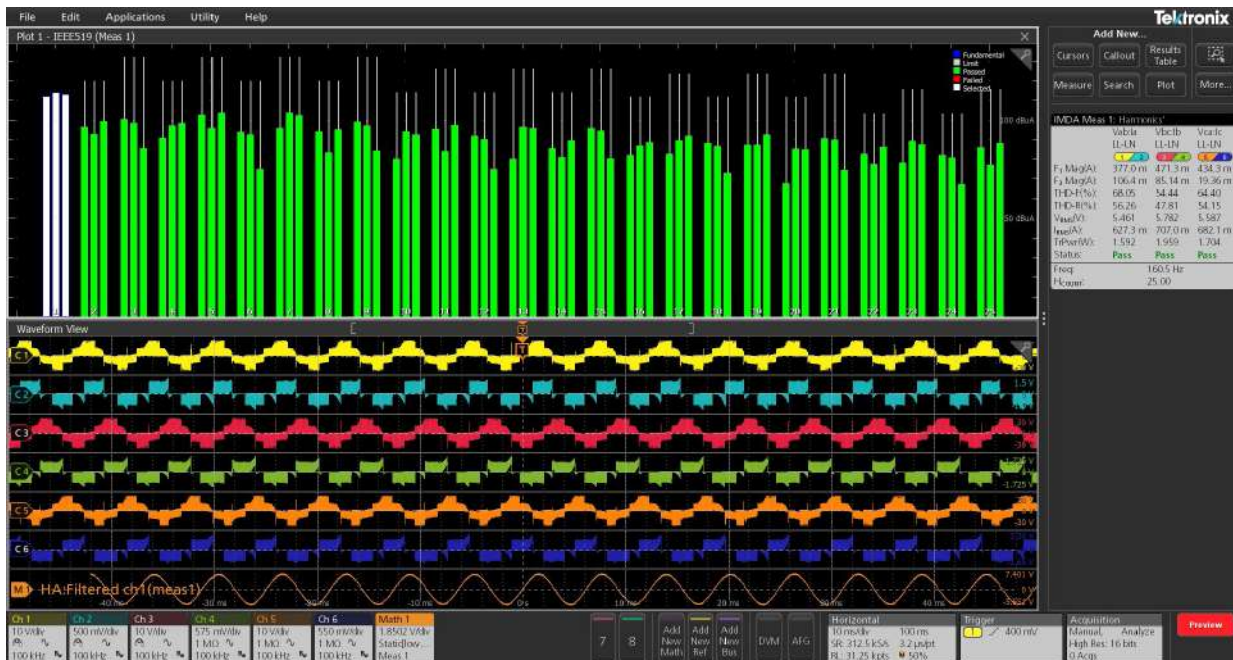


圖 24：可以在馬達驅動器的輸入和輸出上量測諧波。此範例顯示驅動器三相輸出的諧波

直流匯流排量測

漣波可以在兩個不同的測試點量測，即在直流匯流排和切換半導體上。

線性漣波：此量測提供相應交流電壓訊號的線路頻率部分的 RMS 和峰對峰值量測。

切換漣波：此量測提供相應電壓訊號的 RMS 和峰對峰值量測。

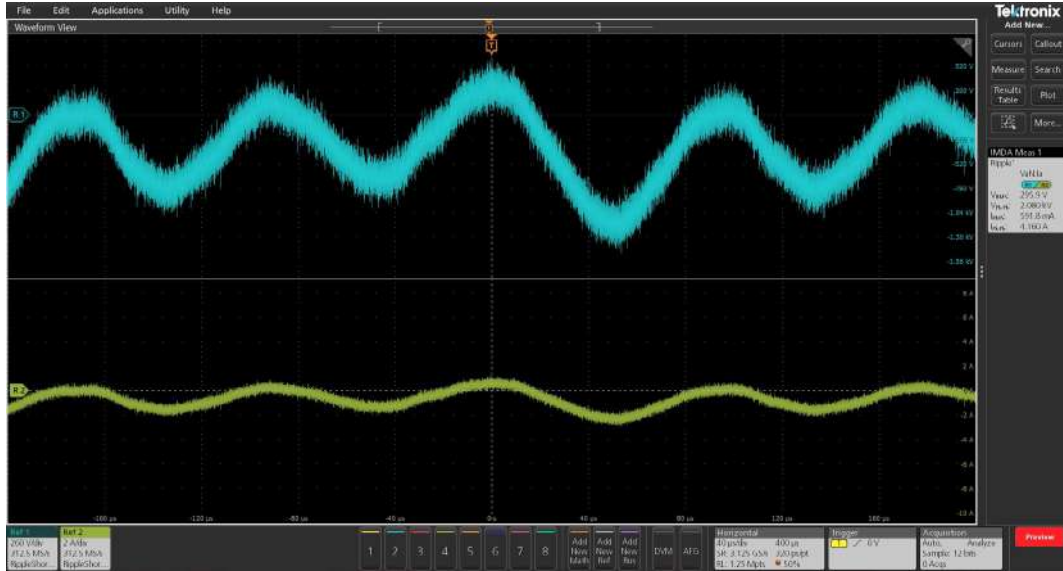


圖 25：直流匯流排上的漣波。

切換分析

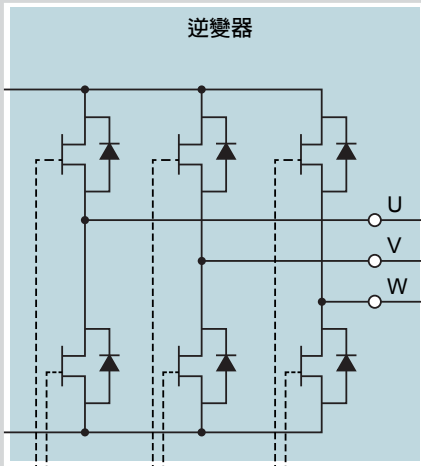


圖 26：切換分析切換損耗量測有助於最佳化逆變器設計。

在設計或驗證 VFD 內的切換電路時，瞭解與驅動器切換階段相關的損耗非常重要。選項 5-PWR 和 6-PWR 提供切換損耗

量測和迴轉率。電壓探棒連接在開關上，並連接電流探棒以量測通過開關的電流。您可以新增多個量測值以取得每個開關的量測值。

5/6-PWR 分析套件包括以下量測：

切換損耗：量測切換裝置導通、關斷和導通區域的平均瞬時功率或能量。量測會建立一個功率波形，該波形是針對每對 V 和 I 波形計算。

dv/dt：量測電壓從基本參考位準 (R_B) 上升到頂部參考位準 (R_T)，或從頂部參考位準 (R_T) 下降到基本參考位準 (R_B) 時的變化率 (迴轉率)。量測會建立一個功率波形，該波形是針對每對 V 和 I 波形計算。

di/dt：量測電流從基本參考位準 (R_B) 上升到頂部參考位準 (R_T)，或從頂部參考位準 (R_T) 下降到基本參考位準 (R_B) 時的變化率 (迴轉率)。量測會建立一個功率波形，該波形是針對每對 V 和 I 波形計算。

直接正交零 (DQ0) 轉換和量測

克拉克 (Clarke) 和帕克 (Park) 轉換通常用於簡化磁場定向控制系統的實作。圖 8 顯示了磁場定向控制系統的範例。在控制系統中，這些轉換用於將施加在馬達上的三相電壓轉換為正交的 D 和 Q 向量。這些簡化的向量易於縮放和整合以保持所需的電機速度。然後可以使用逆轉換來建立用於逆變器中的脈寬調變的驅動訊號。

這些 D 和 Q 向量可能位於數位訊號處理模組 (例如 FPGA) 的深處，並且可能無法用於直接量測。IMDA 軟體提供選配的 DQ0 分析，可以根據三相輸出電壓或電流透過簡單的設定得出 D 和 Q 的量測值。這讓您可以快速輕鬆地查看控制系統調整的效果。



圖 27：DQ0 相量圖，顯示 D 向量、Q 向量和合成向量 (R)，馬達速度和方向回饋則由正交編碼器感應器提供。

除了 D 和 Q，分析軟體還會顯示合成向量 (R)。透過計算 D 和 Q 的每個取樣點處的 D 和 Q 斜邊向量來計算 R。R 向量從 0 度開始，由 QE1 索引脈波 (Z) 確定。QE1 會根據編碼器的每轉脈波數 (PPR) 和馬達的極對數計算增量角度。透過觀察 R 向量旋轉，可以看出控制系統是否平穩地驅動馬達。同時還可以觀察換向次數，請注意，上方圖 27 中 R 向量圖中的六個失真點，對應於六個換向步驟。圖 28 顯示了 DQ0 量測的來源設定範例。除了選擇來源和連線之外，您還可以指定一個可應用於所有來源或僅應用於邊緣限定器的低通濾波器。這對於減少由 EMI 拾取和切換雜訊引起的雜訊而言十分有用。

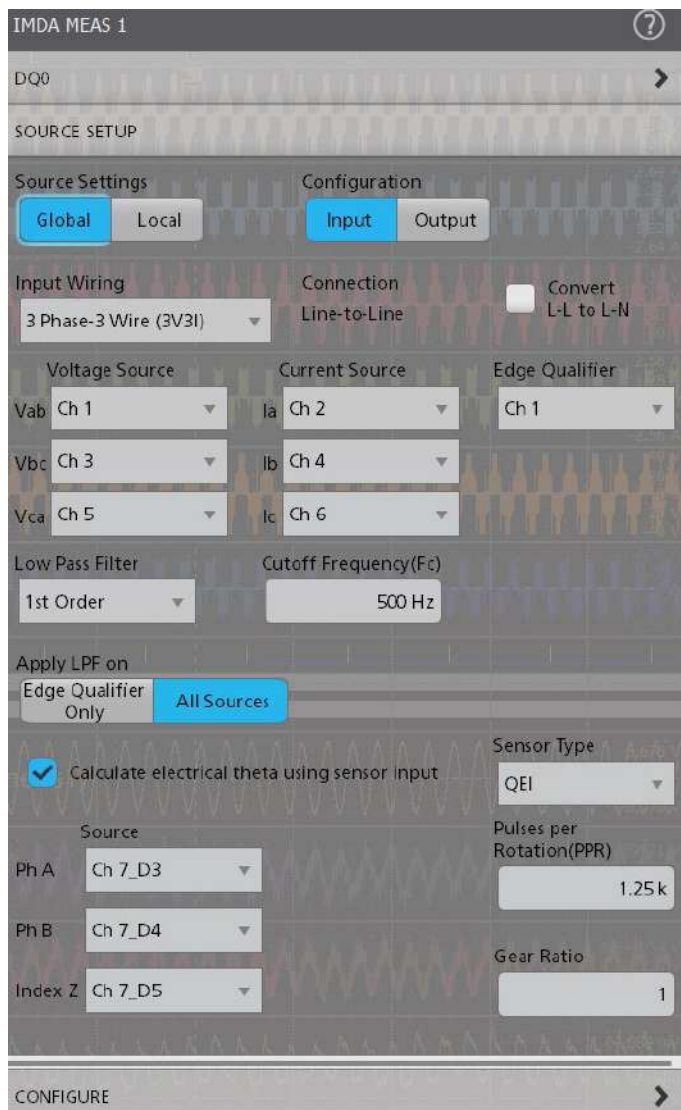


圖 28：在使用正交編碼器介面 (QEI) 的系統上設定示波器以進行 DQ0 量測。

輸出量測

PWM 驅動器的輸出波形很複雜，由與載波相關的高頻分量和與驅動馬達的基頻相關的低頻分量混合組成。在 PWM 波形上進行示波器量測可能具有挑戰性，因為很難實現穩定的觸發。

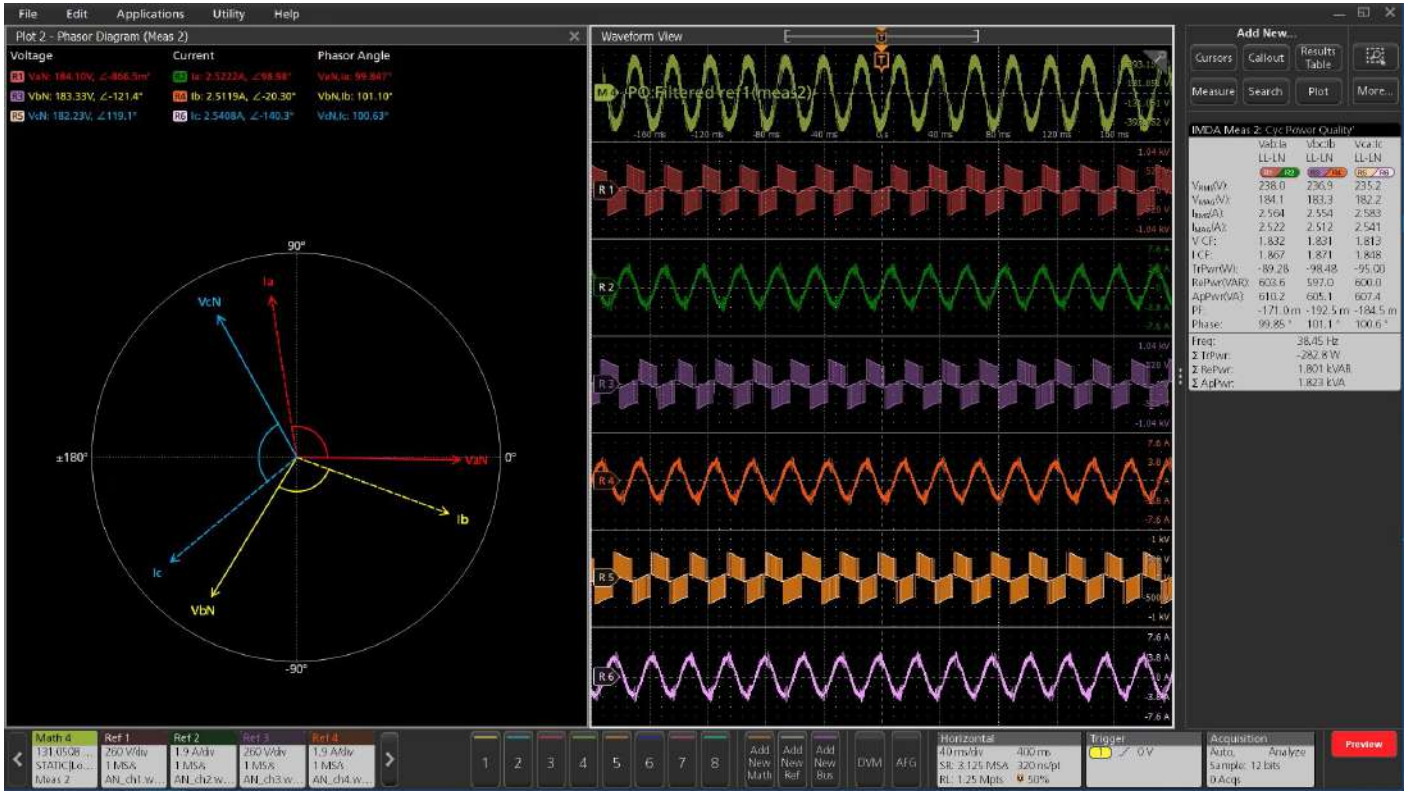


圖 29：此處顯示的 PWM 波形包括頻率為數百 kHz 的載波和馬達響應的低頻平均電壓。

困難點在於波形是在低頻下進行調變。因此，高頻量測 (例如總 rms 電壓、總功率等) 必須在高頻下進行，但要在輸出波形中低頻分量的整數個週期內進行。

IMDA 軟體的主要優勢之一是能夠對 PWM 波形進行穩定量測，在您指定為「邊緣限定元」的通道上解調變 PWM 波形，並將包絡擷取為「數學通道」。這可使量測精確同步。

用於 VFD 輸入的相同電源品質和諧波量測也可用於驅動器的輸出，以檢查電壓、電流、相位和功率。這些在本入門手冊的「輸入量測」部分中有詳細說明。相同的接線組態可用於輸入和輸出量測，但僅可用作輸入的單相三線組態除外。

IMDA Meas 1: Cyc Power Quality'			
	Vab: Ia	Vbc: Ib	Vca: Ic
	LL-LN	LL-LN	LL-LN
	1 2	3 4	5 6
V _{RMS} (V):	5.466	5.780	5.587
V _{MAG} (V):	4.189	4.227	4.225
I _{RMS} (A):	628.1 m	706.8 m	682.5 m
I _{MAG} (A):	529.0 m	662.4 m	611.1 m
V CF:	3.953	3.690	3.831
I CF:	3.117	3.260	3.432
TrPwr(W):	1.592	1.959	1.704
RePwr(VAR):	-3.042	-3.585	-3.411
ApPwr(VA):	3.433	4.085	3.813
PF:	945.3 m	950.4 m	867.5 m
Phase:	-19.05 °	-18.12 °	-29.83 °
Freq:		160.5 Hz	
Σ TrPwr:		5.254 W	
Σ RePwr:		-10.04 VAR	
Σ ApPwr:		11.33 VA	

圖 30：電源品質量測組可快速、穩定地概覽 PWM 輸出，包括電壓、電流、相角、實功率、虛功率、無功功率和功率因數。

效率量測

效率會量測每對輸入和輸出 V 和 I 的輸出功率與輸入功率比例。在 5 和 6 系列 MSO 上，輸入和輸出均採用兩瓦特計法 (V1*I1 和 V2*I2)。這允許使用 8 個輸入通道進行三相輸入和輸出功率的完整量測，如圖 31 所示。

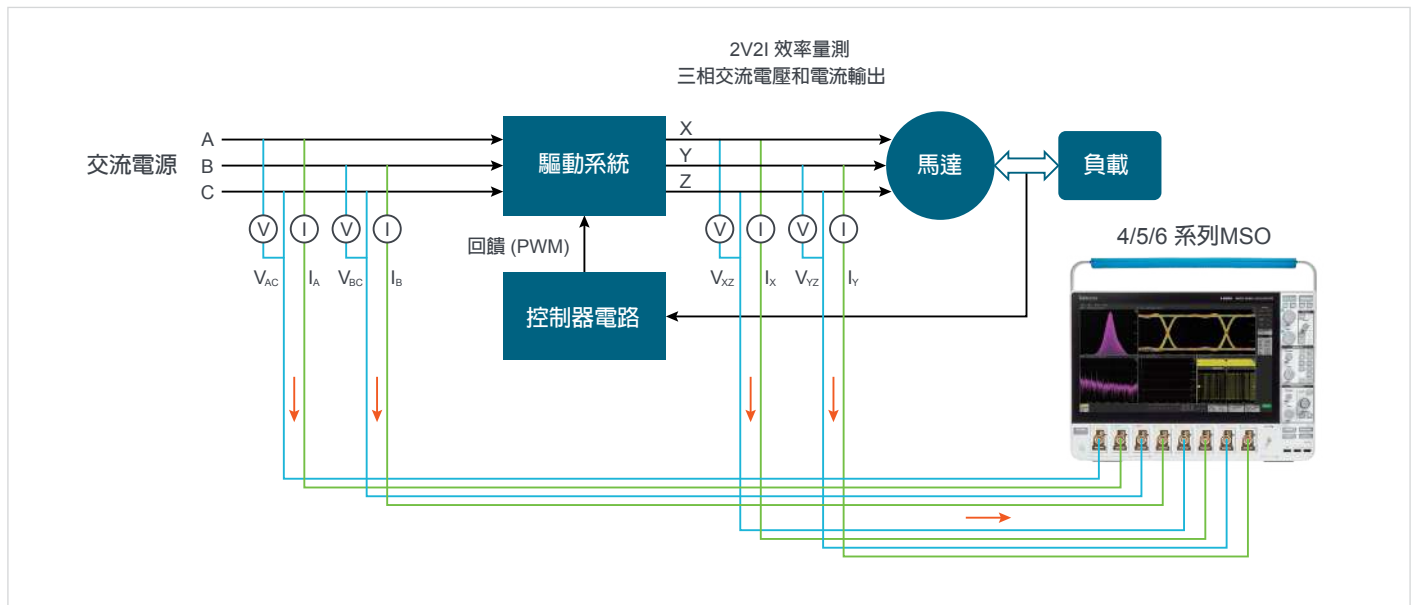


圖 31：使用 8 個示波器輸入量測具有三線輸入和三線輸出的系統的驅動效率。



圖 32：使用 5/6 系列 MSO 示波器設定三線輸入和三線輸出以進行效率量測的設定。

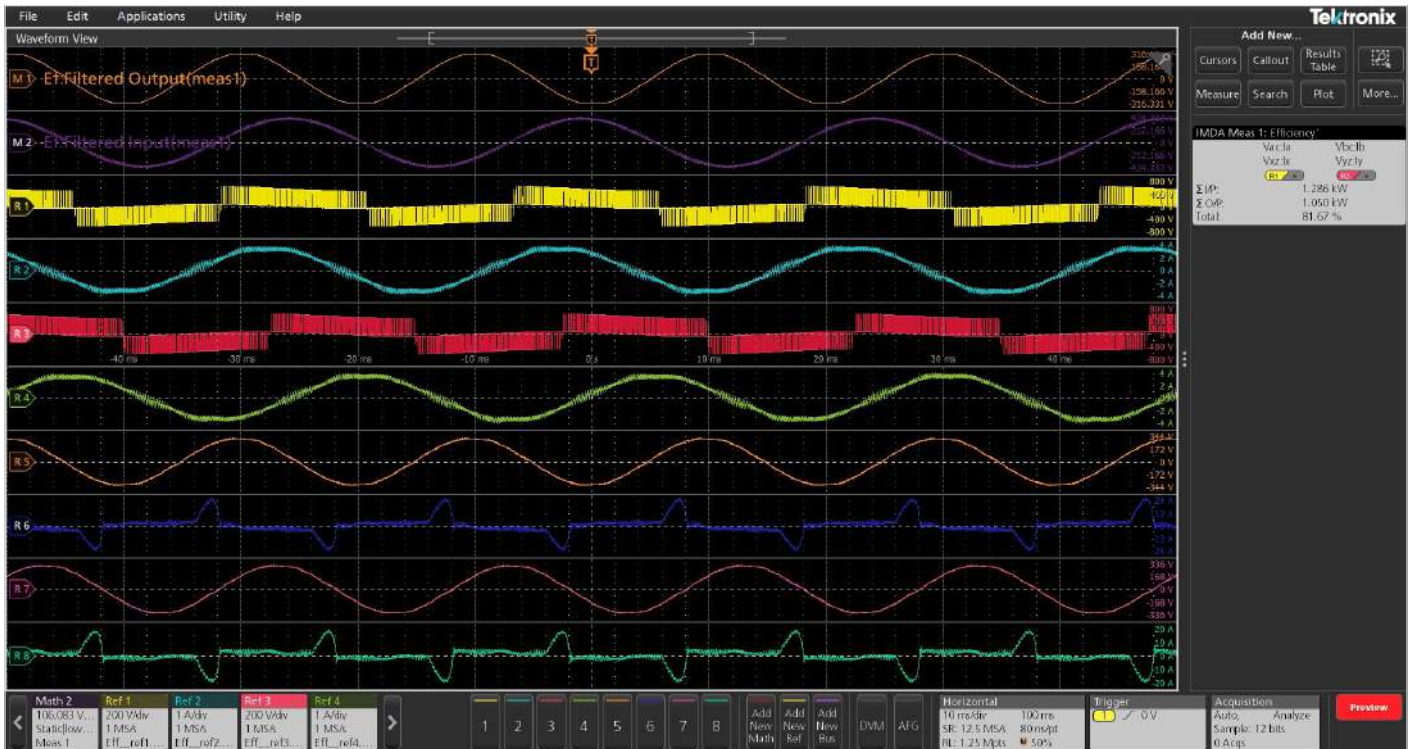


圖 33：使用兩瓦特計法對 VFD 的輸入和輸出進行效率量測。

機械量測

可以透過在馬達的輸出軸上或馬達本身內安裝速度感應器來量測馬達速度。這些感應器產生與馬達速度成比例的電訊號。馬達速度通常是以每分鐘轉數 (RPM，圍繞固定軸在一分鐘內完成的完整旋轉數) 來表述。不同類型的感應器用於量測機械參數，具體取決於馬達和控制系統的類型。含有選項 5/6-IMDA-MECH 的 IMDA 軟體支援霍爾效應感應器和正交編碼器介面 (QEI) 感應器。

霍爾效應感應器

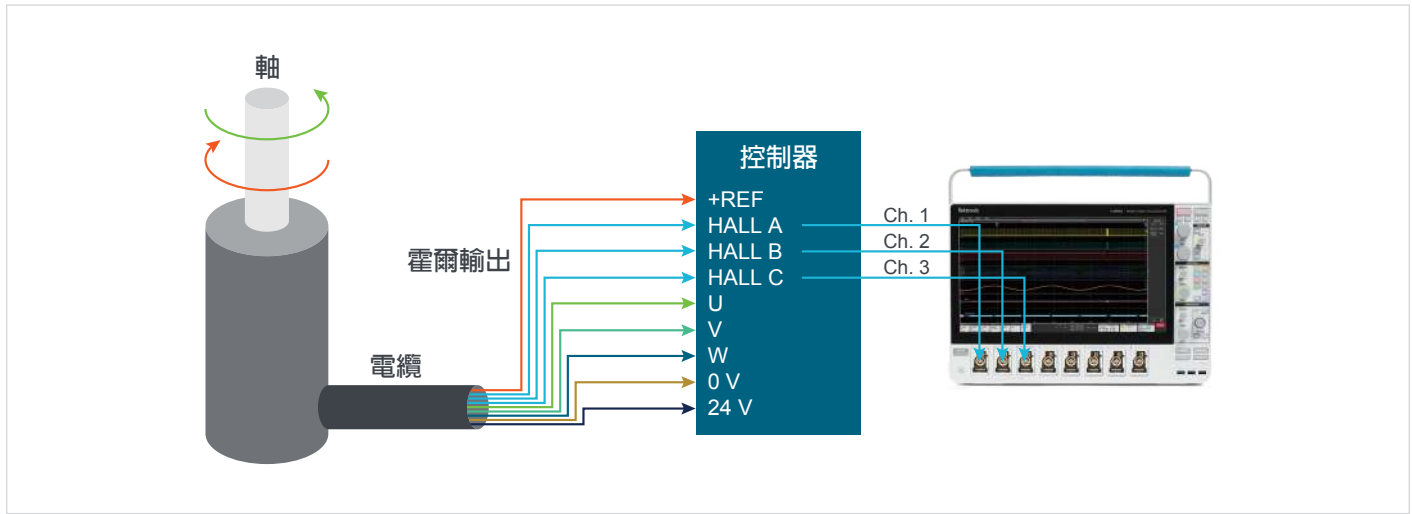


圖 34：5/6 系列 MSO 示波器可以連接到霍爾效應感應器的輸出，以量測速度、加速度和方向。

霍爾效應感應器用於向控制系統提供位置回饋。例如，感應器在 BLDC 馬達中用於監控轉子位置以同步換向。其輸出可用於計算速度、加速度和方向，並產生與速度成正比的脈波輸出，通常用於三重奏。

IMDA 軟體可以使用霍爾感應器輸出來繪製馬達速度和加速度，如圖 36 所示。若要設定量測，請指示極對數和齒輪比，以便軟體可正確量測速度。您可以使用 TPP1000 被動式探棒或高壓差動探棒，例如 THDP0200 或 THDP0100，具體取決於馬達輸出功率和雜訊水平。在 5 或 6 系列 MSO 上，您還可以在任何示波器通道上使用 TLP58 邏輯探棒來量測感應器輸出脈波。在 FlexChannel 輸入之一上使用邏輯探棒可將輸入轉換為 8 個邏輯通道，從而允許單個通道支援多個霍爾感應器。透過將馬達旋轉與速度量測值進行比較，您可以驗證您的連接是否正確。

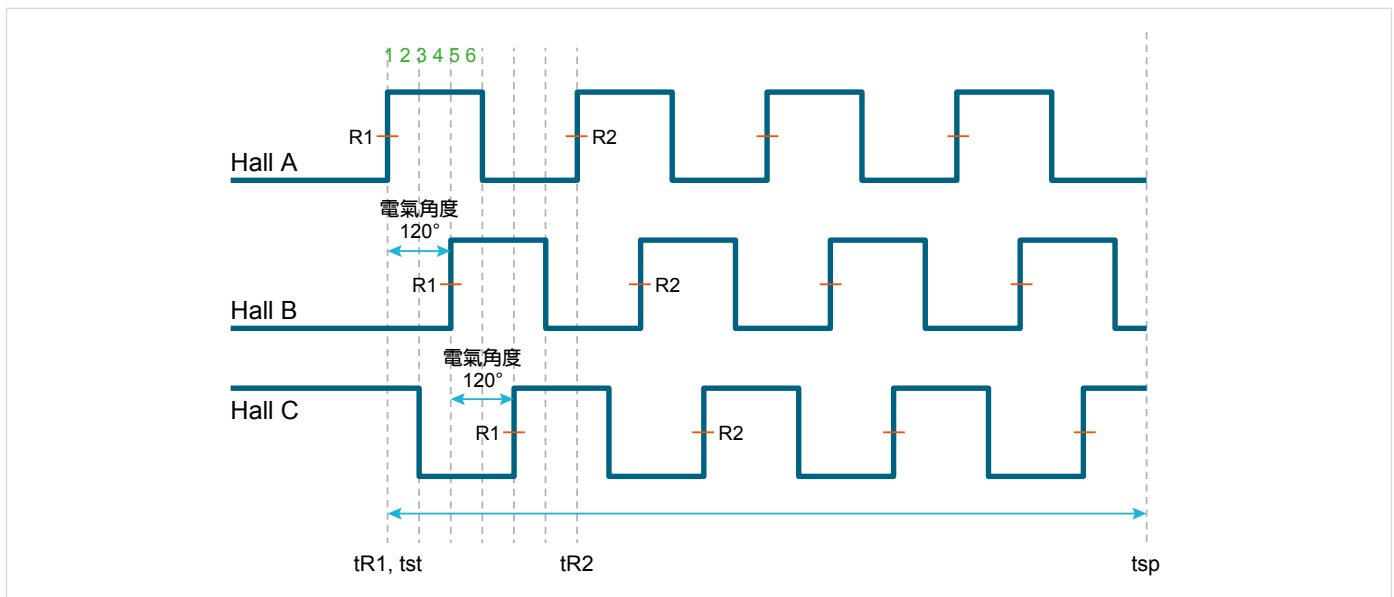


圖 35：三個霍爾感應器提供回饋，控制系統使用該回饋來確定轉子位置。此範例顯示了具有 4 個極對的馬達的 6 步進換向。機械旋轉的開始是 tst。旋轉的結束是 tsp。一次機械旋轉中有四個電循環。IMDA 軟體可以使用此資訊來量測速度、方向和加速度。

速度

機械速度是根據轉子旋轉一圈所需的時間 (以秒為單位) 來計算。速度以每分鐘轉數 (RPM) 為單位。

$$\text{機械速度} = \left(\frac{1}{t_{sp} - t_{st}} \right) (60)G$$

其中停止時間 (t_{sp}) 和啟動時間 (t_{st}) 之間的差值表示轉子的機械旋轉一圈。如圖 36 中指定的極對數決定了每個機械旋轉有多少電循環。齒輪比 (G) 可用於計算轉子和馬達輸出軸之間的任何齒輪。

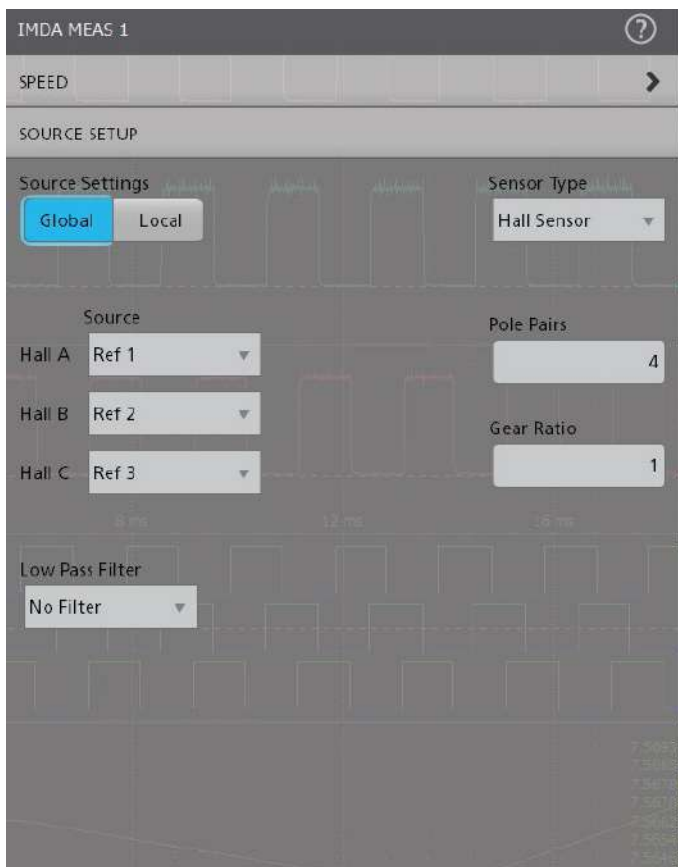


圖 36：在示波器上為使用霍爾感應器的系統設定速度量測。

加速度

加速度是單位時間內速度的變化率

$$\text{加速度} = \frac{\text{速度}_{t_{n+1}} - \text{速度}_{t_n}}{t_{n+1} - t_n}$$

方向

IMDA 軟體使用霍爾感應器輸出的上升邊緣順序或下降邊緣順序來確定馬達的旋轉方向。

若要量測方向，必須指定極對數。考慮一個兩極對馬達 (如圖 37 所示)，其中 A、B 和 C 代表相距 120° 的霍爾感應器位置。第一轉子磁鐵的北極 (N1) 與霍爾感應器 A 相交 0 度並輸出一個上升邊緣。如果設定的旋轉方向是順時針 (A-B-C)，N1 將接下來穿過霍爾感應器 B，與霍爾 A 成 120 度。但是，N2 與霍爾感應器 C 僅 60 度，將首先穿過霍爾 C。因此，對於兩極對馬達，脈波邊緣序列將為 A-C-B。

IMDA 軟體還透過將霍爾 A 感應器上的第一個上升邊緣與 120 度後的下一個邊緣進行比較來驗證方向。例如，如果第一個上升邊緣來自霍爾 A，並且在 120 度處觀察到霍爾 B 的上升邊緣，則確定轉子旋轉順序為 A-B-C，在本範例中為順時針。如果在 120 度後在霍爾 C 上觀察到上升邊緣，則旋轉為 A-C-B 或逆時針。

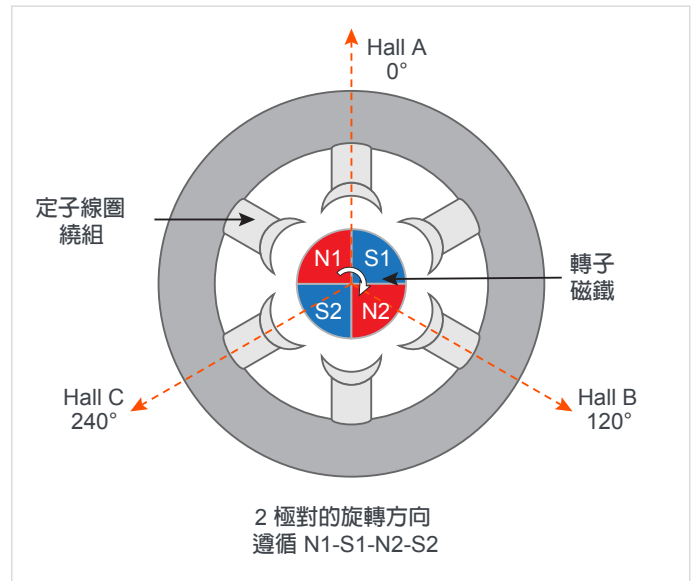


圖 37：若要確定旋轉方向，必須知道轉子上的極對數。

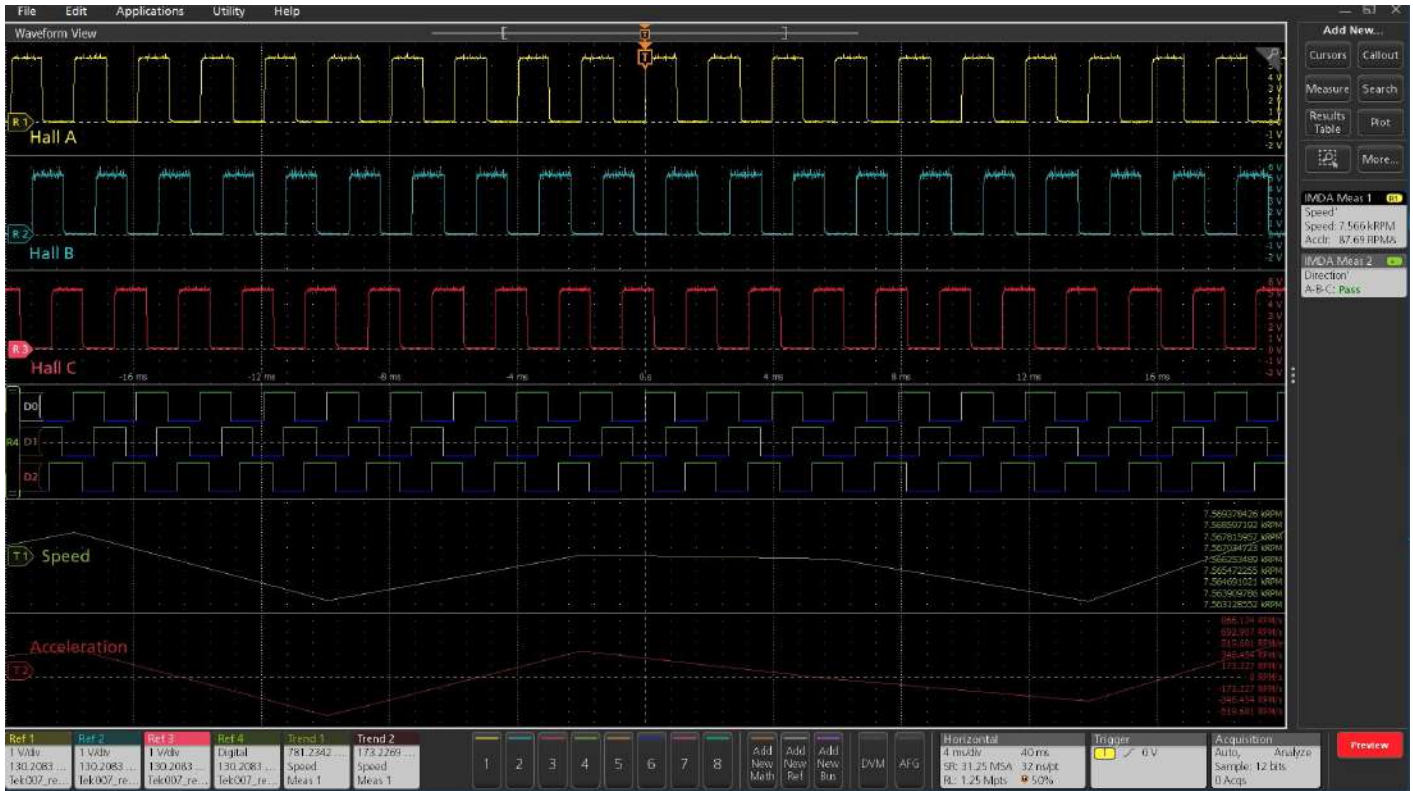


圖 38：霍爾感應器波形和量測。顯示畫面底部的兩條軌跡是速度和加速度的趨勢圖。

正交編碼器介面 (QEI)

正交編碼器介面 (QEI) 由安裝在旋轉軸上的開槽圓盤、光源 (LED) 和光接收器 (光電電晶體) 組成。

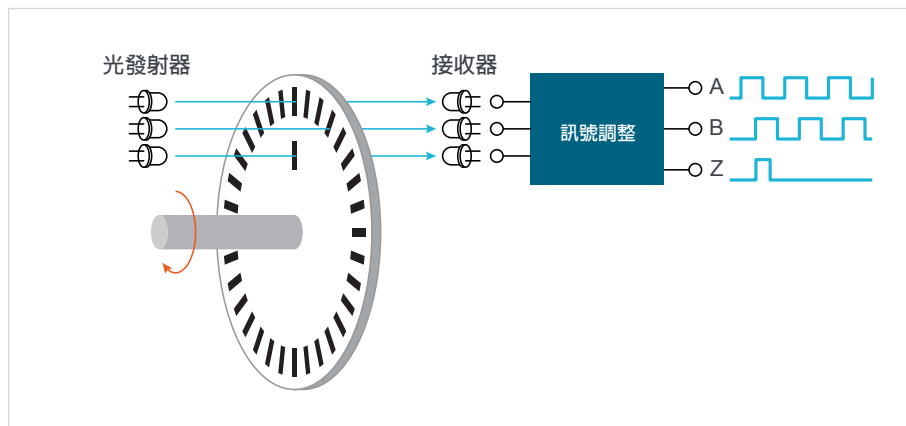


圖 39：正交編碼器的基本操作。

圓盤上的狹縫數量決定了 PPR (每轉脈波數)。LED 發出的光會通過圓盤上的狹縫傳輸到光電電晶體，並轉換為相位相差 90° 的脈波訊號。

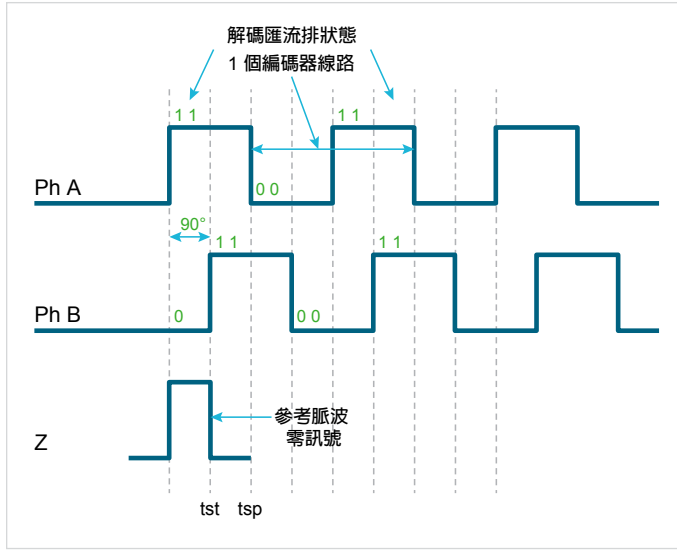


圖 40：正交編碼器介面的脈波碼型。訊號相位相差 90°，導致在 Ph A 的一個週期內發生 4 次狀態轉換：10、11、01 和 00。

$$\text{速度} = \frac{G \cdot 60}{\sum_{n+1} 4 \cdot \text{PPR} \cdot \Delta t(n)}$$

其中速度以 RPM 為單位量測，PPR 是每機械旋轉的脈波數。 Δt_n 是狀態轉換之間的差異，即在 Ph A 上出現邊緣，然後在 Ph B 上出現邊緣。Ph A 的每個脈波週期皆有 4 次狀態轉換，因此每轉有 $4 \cdot \text{PPR}$ 狀態轉換。齒輪比 (G) 可用於縮放速度，以考慮加速 ($G > 1$) 或減速 ($0 < G < 1$) 的感應器。

編碼器的增量角度 (或解析度) 為：

$$\text{增量角} = \frac{360}{4 \cdot \text{PPR}}$$

IMDA 軟體會透過計算轉換次數，並乘以增量角度來計算旋轉角度。

動態量測

馬達驅動分析中的一個常見要求是能夠查看馬達隨時間的響應，以監控 DUT 在加速和變化負載條件下的行為。這些動態量測將有助您瞭解不同條件下電壓、電流、功率和頻率等參數之間的相互依賴性。IMDA 軟體在電源品質量測組中提供了兩種類型的趨勢圖來進行這種分析：

- 時間趨勢圖
- 擷取趨勢圖

每種類型的繪圖都有其優勢，可用於繪製電源品質量測組內支援的子量測。繪圖可以儲存為 CSV 檔案以進行後處理。

時間趨勢圖

時間趨勢圖顯示了單次擷取中每個波形週期的量測值。這對於檢查和關聯量測中的詳細的短期變化非常有用。

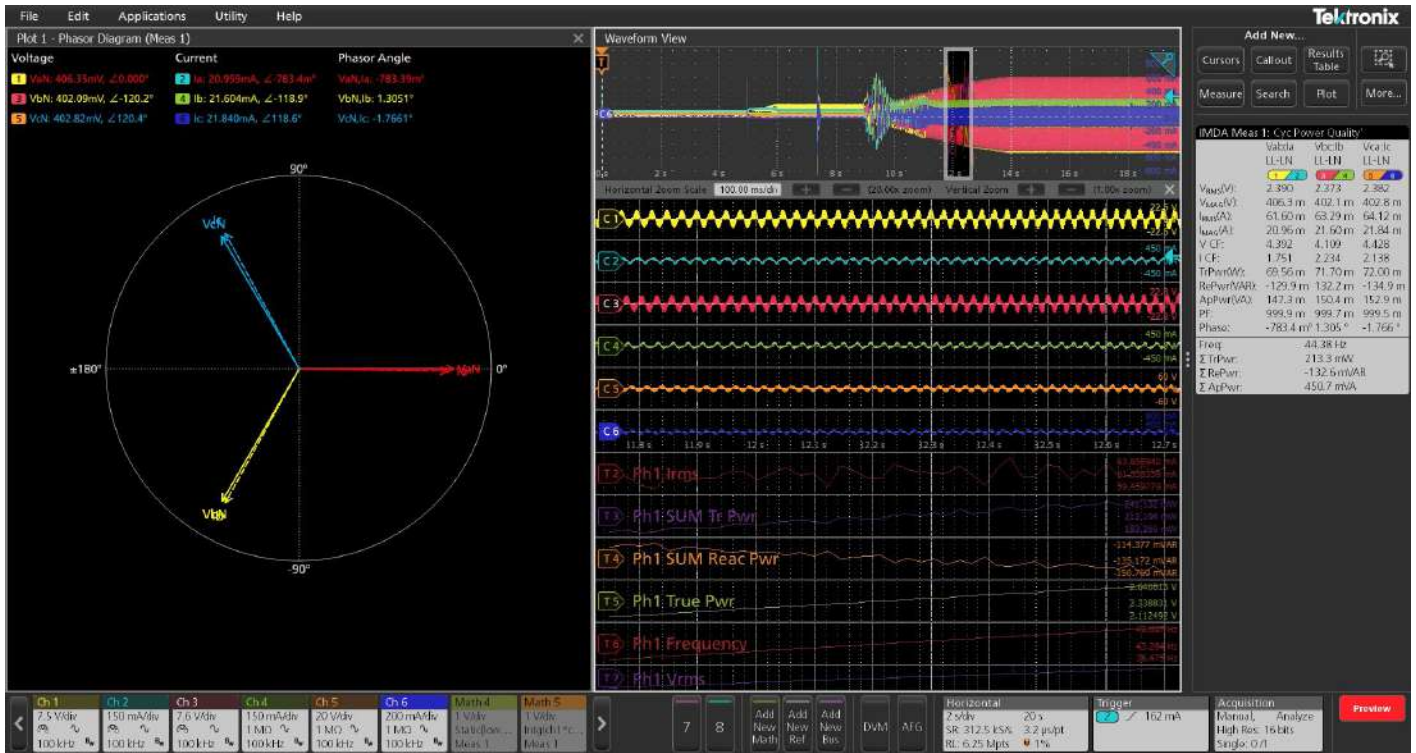


圖 41：IMDA 軟體中的時間趨勢圖記錄量測值在一次擷取中的變化。

擷取趨勢圖

擷取趨勢圖會記錄每次擷取的單個平均量測值。這項功能對長期分析而言非常實用。您可以透過在測試組態期間設定擷取來指定測試持續時間。繪圖可以儲存為 CSV 檔案以進行後處理。當繪圖資料儲存為 CSV 檔案時，時間值可用。

動態負載控制對於三相感應電動馬達和其他電動馬達也很重要。擷取趨勢圖可以在加速、恆速和減速期間觀察量測結果。

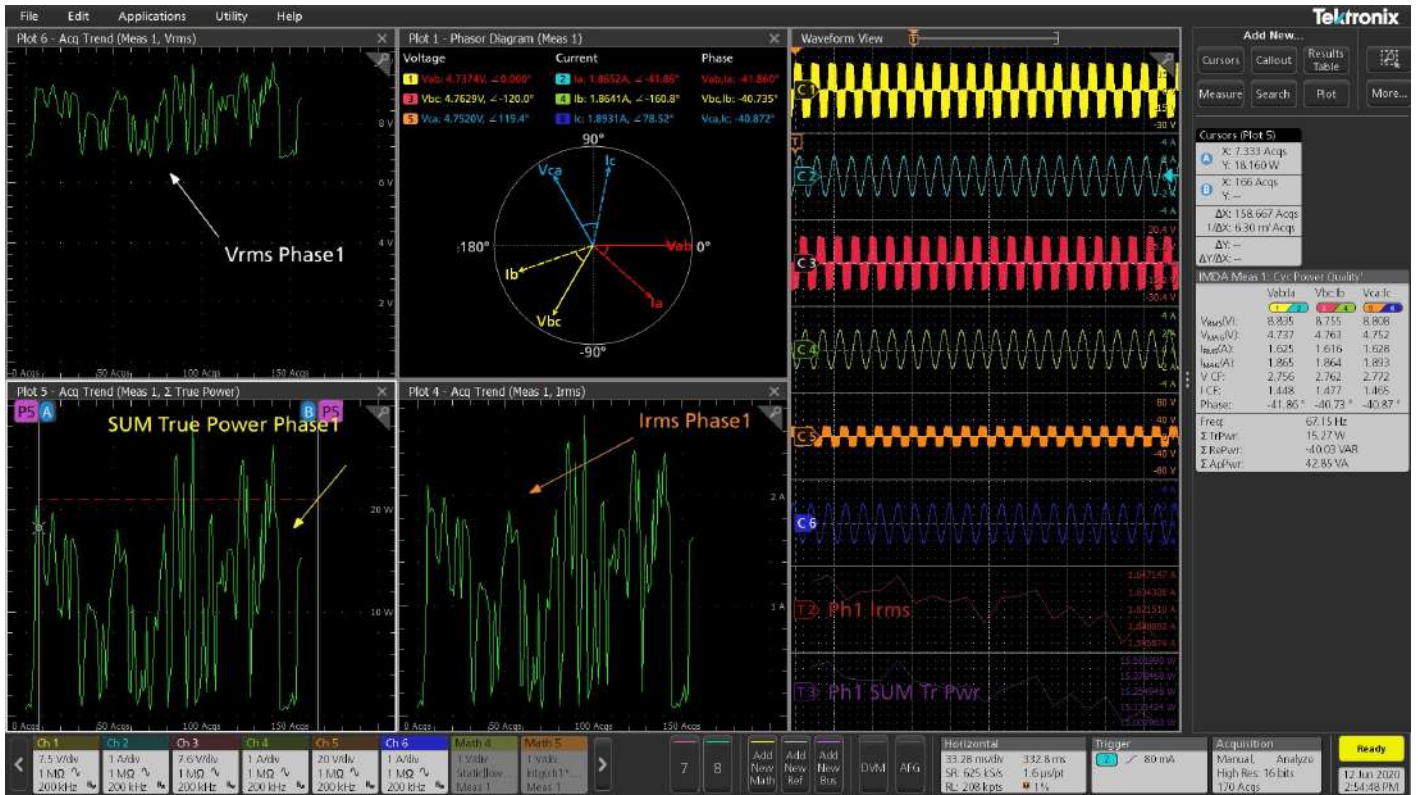


圖 42：擷取趨勢圖記錄量測在多次擷取中的變化。這些是上方的綠色軌跡。請注意，最近一次擷取的波形和量測結果也會顯示。

摘要

對三相馬達驅動器進行量測時，由於必須建立的連線、波形的複雜性和令人生畏的數學計算量等因素，讓整個過程充斥著各種挑戰。Tektronix 5/6 系列 MSO 示波器上的 IMDA 軟體能顯著地降低這些量測的難度，為電源分析儀量測提供了高速取樣系統和即時示波器可視化的優勢。

透過示波器，三相馬達驅動設計人員可以在靜態和動態工作條件下進行分析，觀察電氣和機械參數，進而全面瞭解驅動效能。5 和 6 系列 MSO 中的取樣和處理能力支援 DQ0 量測等功能，使人們能夠深入瞭解控制系統的內部。這些功能目前無法透過電源分析儀達成。

Tektronix 聯絡方式：

澳洲 1 800 709 465
奧地利 00800 2255 4835
巴爾幹半島、以色列、南非及其他 ISE 國家 +41 52 675 3777
比利時 00800 2255 4835
巴西 +55 (11) 3759 7627
加拿大 1 (800) 833 9200
中東歐、烏克蘭及波羅的海諸國 +41 52 675 3777
中歐與希臘 +41 52 675 3777
丹麥 +45 80 88 1401
芬蘭 +41 52 675 3777
法國 00800 2255 4835
德國 00800 2255 4835
香港 400 820 5835
印度 000 800 650 1835
印尼 007 803 601 5249
義大利 00800 2255 4835
日本 81 (3) 67143010
盧森堡 +41 52 675 3777
馬來西亞 1 800 22 55835
墨西哥、中/南美洲與加勒比海諸國 52 (55) 56 04 50 90
中東、亞洲及北非 + 41 52 675 3777
荷蘭 00800 2255 4835
紐西蘭 0800 800 238
挪威 800 16098
菲律賓 1 800 1601 0077
中國 400 820 5835
波蘭 +41 52 675 3777
葡萄牙 80 08 12370
南韓 001 800 8255 2835
俄羅斯及獨立國協 +7 (495) 7484900
新加坡 800 6011 473
南非 +27 11 206 8360
西班牙 00800 2255 4835
瑞典 00800 2255 4835
瑞士 00800 2255 4835
台灣 886 (2) 2656-6688
泰國 1 800 011 931
英國/愛爾蘭 00800 2255 4835
美國 1 800 833 9200
越南 12060128
最後更新日期 2016 年 9 月

若需進一步資訊，Tektronix 維護完善的一套應用指南、技術簡介和其他資源，並不斷擴大，幫助工程師處理尖端技術。請造訪 www.tektronix.com.tw



Copyright © Tektronix, Inc. 版權所有。Tektronix 產品受到已經簽發及正在申請的美國和國外專利的保護。本文中的資訊代替以前出版的所有資料。技術規格和價格如有變更，恕不另行通知。TEKTRONIX 和 TEK 是 Tektronix, Inc 的註冊商標。本文提到的所有其他商標均為各自公司的服務標誌、商標或註冊商標。

2020 年 4 月

48T-61563-2

Tektronix 台灣分公司

太克科技股份有限公司

114 台北市內湖堤頂大道二段 89 號 3 樓

電話：(02) 2656-6688 傳真：(02) 2799-8558

太克網站：tw.tek.com

Tektronix[®]