

# 更高效馬達驅動之 基本挑戰及解決方案

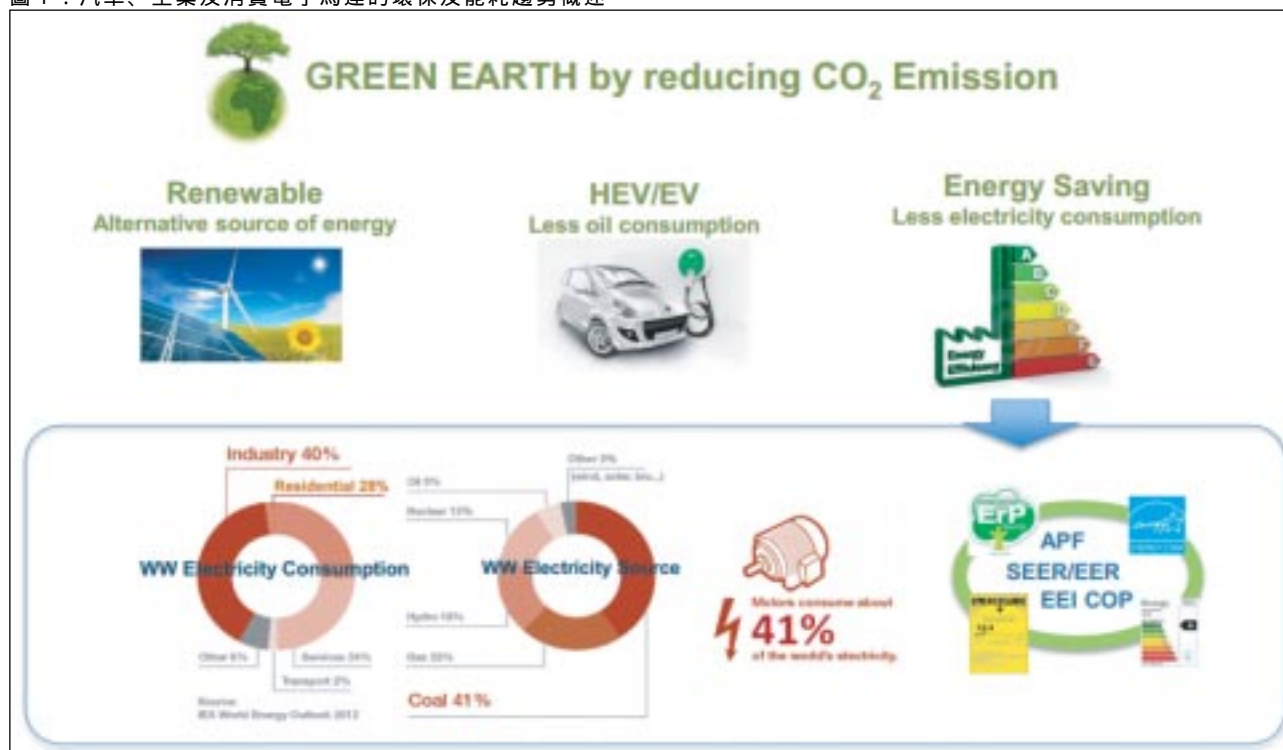
汽車與工業/消費電子馬達行業之間具有類似的需求及挑戰。為了減少CO<sub>2</sub>的排放率，這兩個行業都在尋求替代能源，創建能夠減少傳統能耗的更高效系統。變頻器驅動的馬達將數十年、久經考驗的可靠馬達設計推向需要支援半導體元件及更複雜控制的解決方案。滿足這些需要及挑戰就能夠滿足環保、法規及客戶需要。

作者：Richard Chung、Roy Davis、Steven Hong、  
Sergio Fissore/ 快捷半導體

根據 OICA<sup>[1]</sup>，人類活動導致的氣候變化可能是 21 世紀人類社會面臨的最大挑戰，而 CO<sub>2</sub> 是一個主要副產物(圖 1)。CO<sub>2</sub> 並不是影響氣候變化的唯一因素，但它允許社會各界及各行各業做些積極的事情來控制 CO<sub>2</sub> 對氣候變化的影響。世界資源研究所關於全球資源 CO<sub>2</sub> 排放量的資料表明 16% 來

自機動車輛，44% 來自發電及加熱。40% 電力由工業及消費電子馬達消耗<sup>[2]</sup>。隨著全球人口增加、需求越來越大，城鎮化帶來更多便利性，越來越多的車輛帶來更大移動性，對更多電力的需求意味著需要尋找能夠最大程度地減少 CO<sub>2</sub> 排放量以便最大程度地降低社會成本的其他措施。CO<sub>2</sub> 排放量肯定

圖 1：汽車、工業及消費電子馬達的環保及能耗趨勢概述



會增加，但可透過一些方法來減緩氣候變化。本文針對汽車及馬達行業介紹能夠減緩 CO<sub>2</sub> 增長速度的挑戰及有效解決方案。

## 汽車：車輛電氣化

減少石油燃料及能耗的更高效汽車能夠減少 CO<sub>2</sub> 排放量。每年都投入幾十億美元研發經費，研究替代燃料來源以及如何改進傳統的內燃機。長期挑戰包括冗長的產品設計至生產週期(即 5-7 年)概念，支援新架構、永續性發展、容易獲得，且價格可行的替代燃料來源<sup>[3]</sup>。使用新燃料並不重要，因為車輛設計需要滿足預定的品質及效能標準。近期挑戰包括減少動力系統的重量及尺寸並實現車輛電氣化。車輛電氣化(圖 2)是以電氣系統和電動及混合動力馬達來取代機械系統。實例包括輔以電動增壓的小型化馬達、電子式動力輔助轉向、電動水泵、電氣驅動空調及電氣推動系統。解決這些挑戰有助於減少燃料及能源消耗，從而幫助生產 CO<sub>2</sub> 排放量更少的車輛。

## 工業及消費電子：感應馬達到變頻馬達(ECM、無刷式)

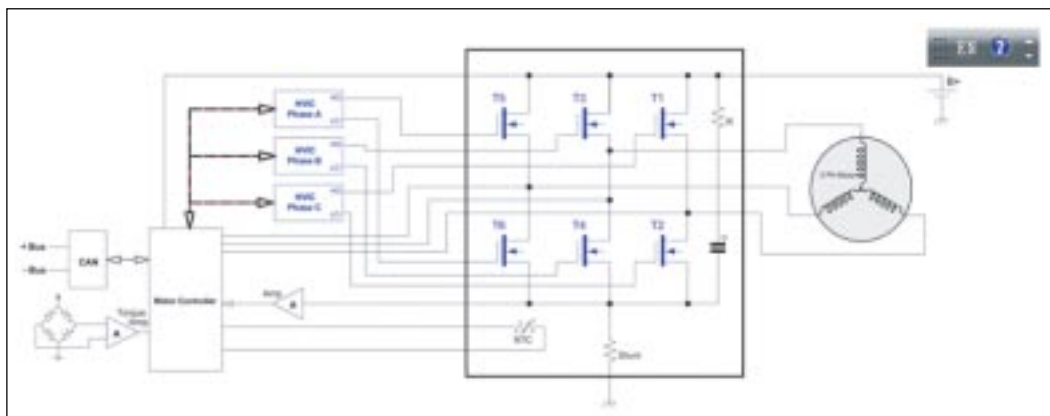
能夠減少電力消耗的更高效馬達有助於減少 CO<sub>2</sub> 排放量。人們在不斷研究更節能的氣冷及水冷系統。挑戰包括長壽命設計(8-15 年無故障壽命)、重點關注可再生、替代能源的研發投資<sup>[4]</sup>、以及能

夠最大程度地提高各種馬達效率的複雜控制及變頻驅動。面臨的挑戰及機遇是尋找合適的應用，繼續使用目前占全球已安裝馬達 90% 的可靠感應馬達，並使用更高效馬達(包括風扇及泵)，來循環及冷卻空氣 / 水。風扇趨勢包括電子整流馬達(ECM)或無刷直流(BLDC)馬達，以及專門的開關磁阻(SR)馬達。對變頻馬達不斷增長的需求可以節省馬達消耗電力的約 30%，或者說節省全球所消耗電力的 12%。更高效馬達有助於降低 CO<sub>2</sub> 排放的增長率。

## 最終影響趨勢的解決方案及權衡

電力系統設計人員必須克服很多挑戰才能生產出耐用、可靠、高效的馬達驅動。在汽車及工業 / 消費電子應用中，環境及應用條件都很嚴峻，並且總體擁有成本必須經過嚴格審查。例如，汽車機架式電動輔助轉向系統可能遇到超過 100°C 的環境溫度，以及高衝擊及振動負載，並且可能會接觸石油產品及受到鹽水噴灑，同時要求提供 150 A 或更高的馬達相電流，而損失最小。家用電器及工業馬達及泵都是針對放置於幾乎沒有強制氣流的外殼中的設計及電路。高效馬達將不同的馬達技術、複雜的控制、熱機械創造性設計、新封裝、及新矽技術融合到功率半導體中。若動力結構及運作條件<sup>[5]</sup>已定義好，則決定效率的因素包括馬達技術的類型、不同脈寬調變(PWM)控制方法及功率分立元件及功率模組之間的選擇。

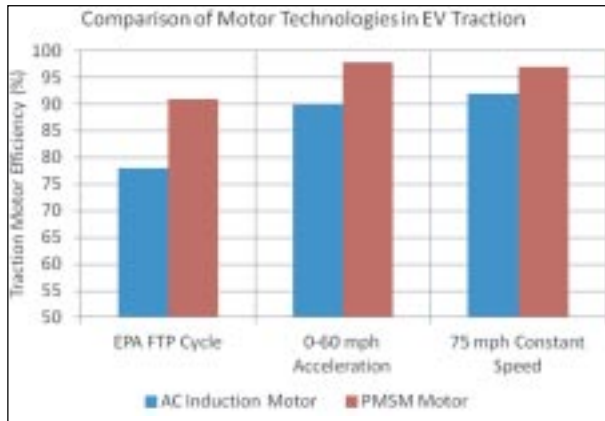
圖 2：電子式動力輔助轉向(車輛電氣化的一個實例)



## 解決方案 #1： 馬達技術的復興和改進

雖然滿載效率評級較高，但是大部分馬達均不是以滿載條件運轉。哪種馬達技術最好？視情況而定。大多數

圖 3：電動汽車牽引馬達效率比較



交流感應馬達(ACIM)在 75% 至 90% 的額定負載下以最高效率運行。ACIM 的轉子及定子損失主要是由銅或鋁電阻產生，而其鐵損(Core loss)是由鐵轉子及定子中的渦電流及滯後效應導致的。對於通常以峰值幾分之一的負載使用馬達的應用而言，透過最佳化預期負載範圍內的效率，每年節省下來的能量相當於節省馬達 / 控制採購價格的 50%。能源部(DOE)預計 44% 的工業馬達(記得 90% 已安裝馬達為感應馬達)始終以低於其額定負載的 40% 運行。平均而言，交流感應馬達(ACIM)僅提供 44% 的效率，而 BLDC 馬達通常以 65% 至 90% 的效率運行。作為電動汽車牽引馬達，圖 3 對 ACIM 及 BLDC 的

馬達效率進行了比較(實際上，此處為室內永磁交流馬達)。由於 BLDC 馬達的永磁轉子結構，BLDC 馬達不會產生轉子銅損。BLDC 馬達還具有更高效變速運行的優勢，而在類似負載條件下傳統 ACIM 僅提供 15-40% 的效率。新馬達技術及驅動馬達的更複雜控制能夠進一步最大化交流感應馬達(ACIM)、正弦馬達(即永磁交流及永磁同步馬達)及 ECM 或無刷直流(BLDC)馬達版本的效率。

### 解決方案 #2：透過 PWM 提高效率的方法

理想的馬達功率波形可以顯著提高效率。有很多種 PWM 方法，每種都有利有弊(表 1)。連續 PWM(CPWM)比如正弦 PWM 及空間向量 PWM(SVPWM)是指三相調變，因功率波形經過馬達全部的三個相位。非連續 PWM(DPWM)是指基於空間向量 PWM 的兩相調變，因為馬達只有兩相進行 PWM，而第三相配合始終「導通」的高側或低側電晶體運行。DPWM 產生較低的開關損失，但會產生施加到馬達的較高輸出紋波電壓。本文沒有提到 DPWM 變化及各種控制方法比如磁場導向控制(FOC)、變頻驅動(VFD)及梯形控制。本文提到的 SVPWM 及 DPWM 方法可視為三次諧波注入(harmonic injection)的技術。通常來說，開關損失及

表 1：按照利弊及應用要求選擇 PWM 類型

PWM類型	描述	利端	弊端
正弦	最基本方法	非常簡單	最大輸出電壓低於SVPWM
空間向量	最普遍的方法	最大輸出電壓高於正弦PWM	計算可能比較複雜
非連續 120LS	每個低側開關的 120° 連續導通	比三相調變產生的開關損失少確保有足夠時間進行自舉充電或檢測高側訊號	高側開關元件具有比低側元件更多的開關損失。 比三相調變產生的諧波更多
非連續 120HS	每個高側開關的 120° 連續導通	比三相調變產生的開關損失少高側開關元件具有比低側元件更少的開關損失	可能需要較大的自舉型電容器 需要比三相調變產生的諧波更多
非連續 60	60° 連續導通過期與基本馬達相對中性點電壓峰值同相	對單個並聯電流檢測有效，因為扇形交叉區域不存在開關過程。高側與低側開關元件之間的平衡損失	比三相調變產生的諧波更多
非連續 60+30	60° 連續導通過期相位對於相位電壓峰值有 30° 的滯後參考	若功率因數角滯後大於 15°，通常會產生最小的開關損失。高側及低側開關元件之間的平衡損失	比三相調變產生的諧波更多

功率波形品質的比較指出，在較低調變下的 SVPWM 及高調變範圍內的 DPWM 方法具有優越的效能。結合恰當的功率半導體元件及恰當的 PWM 控制方法，從而產生恰當的功率波形，是有助於高效推動的一種馬達技術<sup>[6]</sup>。

### 解決方案 #3：功率半導體元選擇的關鍵因素

功率電子設計中一個經常討論的話題是功率模組及離散功率半導體之間的選擇。有人可能會認為使用離散元件的歷史慣性、物理佈局的靈活性以及各個功率半導體廠家提供的廣泛可用元件都是致使功率模組與離散元件之間爭論不休的因素。此外，從既定離散功率半導體元件轉換到功率模組需要額外的客戶研發工作。這絕不是輕而易舉、顯而易見的選擇。需要考慮的 3 個關鍵因素及對應的產物：

電池 / 匯流排互聯、功率級，及馬達

效率

EMI/EMC

熱堆疊設計

PCB 元件到散熱片熱阻

可靠性、成本及產量

空間限制

僅僅為了降低成本而替換有效的離散解決方案，從而追求模組解決方案，通常不是一個好主意。若離散元件不能滿足五個要求中的一個或多個要求，則功率模組可能是最好的解決方案。五個要求是：

可靠性

結構緊湊

電氣效能

增值互聯

熱效能

在電氣、機械及熱領域的交互方面出現關鍵挑戰。包括從直流電源到變頻器功率級的高電流或

低寄生效應互聯，變頻器與馬達之間的高電流介面，從變頻器到支架結構的穩定機械互聯，以及變頻器功率元件及冷卻劑之間的高效熱互聯。冷卻劑或散熱器通常僅僅是熱空氣或高溫金屬。合適的功率模組有助於解決這些挑戰，同時還能實現各個因素與剛才強調的要求之間的平衡。

對於三相 ACIM 及 BLDC 變頻器驅動，存在六個電晶體來驅動三個馬達相位。大多數線路電壓匯流排控制是 IGBT，因為當線路電壓、功率需求及工作溫度上升時，IGBT 具有卓越的傳導效能。線路電壓匯流排輸入及變頻器驅動器通常需要功率因數校正(PFC)級，以便最大化來自市電的電量使用。在較低電壓如 12 V 至 48 V 電池 / 匯流排電壓下，MOSFET 為首選並且是可行的，因為其傳導及開關效能通常超過 IGBT。從變頻器電路到馬達的理想功率波形可以顯著提高效率。

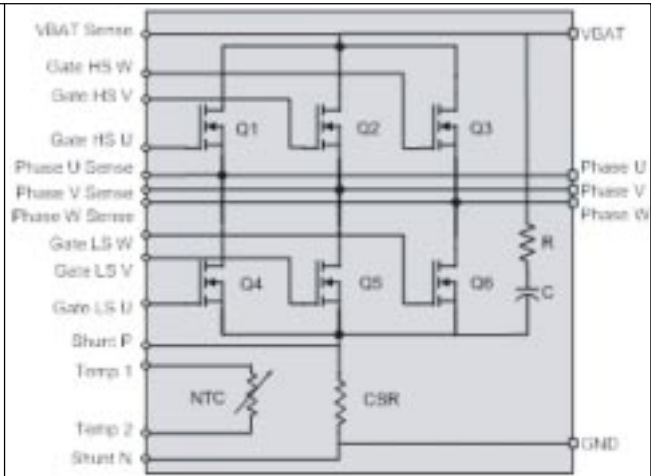
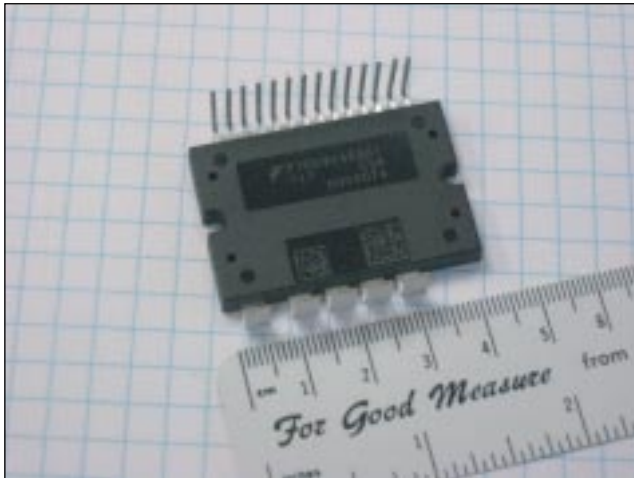
### 設計離散元件與模組時遇到的電氣挑戰

變頻器的主要功能是產生可變電壓及可變頻率交流功率，用於驅動必須體現卓越機電效能(包括高效率)的馬達。12 V 的匯流排可能需要六個 40 V 額定 MOSFET(典型裸片  $R_{ds(on)}$  為 1.15 mΩ)，才能實現高電流及高效率運行。或者，線路電壓匯流排及高電流應用可能需要並聯的多個離散 IGBT。根據特定的靜態及動態驅動特性來篩選 IGBT 成為生產之外的額外步驟，用於「匹配」IGBT，實現均流控制。若沒有匹配的 IGBT，當在高電流應用中每個開關並聯多個元件時，可能出現不想要的熱應力不匹配。功率模組讓矽元件承擔匹配 IGBT 的責任，讓最終用戶無需擔憂。模組中集成了從電池到地的 RC 緩衝電路，緊密耦合到 MOSFET 橋以改進 EMI 效能。還包括用於電流感測的精密分流電阻，可提供電流回饋，實現馬達控制及過流保護。另外，還有一個溫度感測 NTC，用於監控逆變器的發熱情況。

模組通常直接安裝至馬達外殼表面，允許控



圖 4：FTCO3V455A1 3 相變頻器汽車電源模組(APM)



制 PCB 僅沿模組一側連接至訊號引腳(圖 4)。分隔到模組對面的電源引線允許完全隔離控制及電源介面，使得 PCB 上無需存在高電流引線，從而簡化設計及生產。傳熱式直接覆銅技術(DBC：Direct Bond Copper)結構在安裝表面及電氣主動元件之間提供 2500 Vrms 電氣隔離。

由於電源連接位於模組一側並且與控制 PCB 隔離，設計具有非常低電感的電源連接就成為可能，從而為 MOSFET 的直流連接濾波及 BVDSS 的設計留出額外裕量。類似地，由於模組內包含所有高電流傳導路徑，從 VBAT+ 到 GND 產生的極低總電阻有助於提高系統效率，允許提高匯流排電壓利用率，並最大化馬達端子可用的電壓。這樣，系統設計人員在設計馬達時就享有成本優勢。

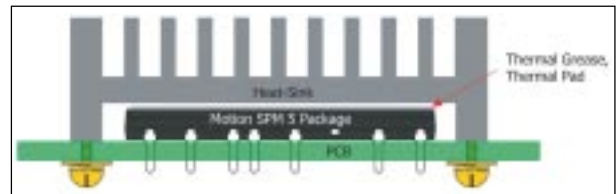
模組內部的 MOSFET 裸片可能位於緊密集成的 RC 濾波器元件附近，以便進行高效的 EMI 抑制，減少電壓瞬變，並以最小的損失順利實現開關過渡。

## 設計離散元件與模組時遇到的機械挑戰

在採用離散包裝元件開發的變頻器中，比如 TO-247、TO-263(D2PAK)或 MO-299 封裝，存在必須由變頻器系統設計人員處理的更多機械介面。包括 MOSFET 封裝至 PCB、PCB 至隔離散熱器、

散熱器至散熱片，還可能由散熱片至下一級元件。這些機械介面與系統的熱效能有密切聯繫。在模組解決方案中，大多數介面都包含到功率模組結構中，只剩下模組到散熱片介面由變頻器系統設計人員處理。遵照 Fairchild 對表面平滑度及安裝螺釘扭矩(或夾合力)的建議，可在變頻器生命週期內實現卓越的熱效能及振動效能。圖 5 顯示眾多透過安裝模組滿足熱效能及振動效能例子中的一個。正確的安裝方法還能夠擴展產品的功率容量<sup>[6]</sup>。

圖 5：眾多擴展模組功率範圍的模組 - 散熱器 - PCB 方法中的一個

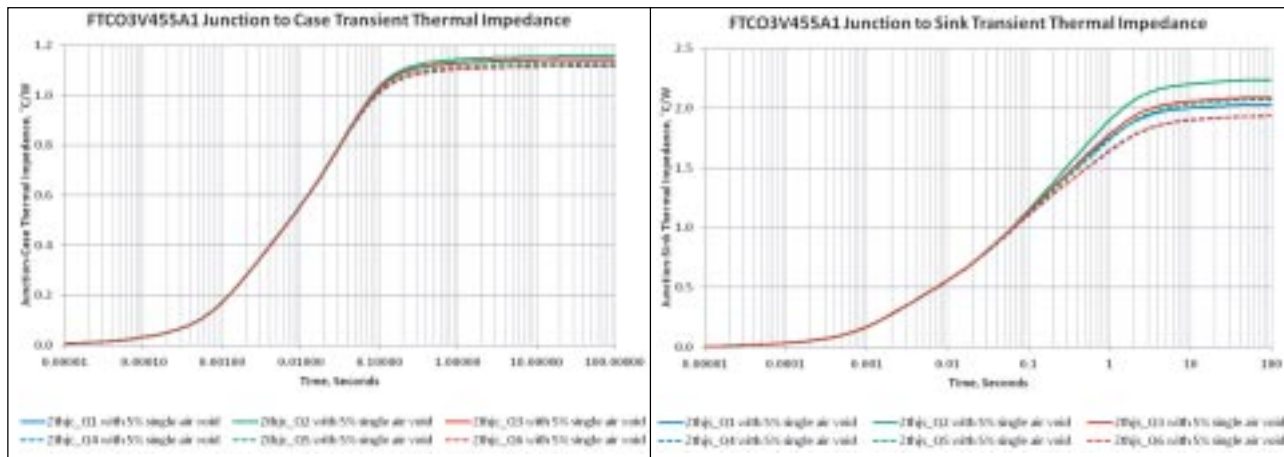


## 設計離散模組時影響可靠性的熱挑戰

與安裝在 PCB 或 IMS 上的六個或更多離散式 MOSFET 封裝元件相比，透過使用功率模組的簡化機械介面設計可獲得極好的熱效能。為了舉例說明，圖 6 顯示 Fairchild FTCO3V455A1 模組所有六個 MOSFET 的接面至殼以及典型接面至散熱片瞬態熱阻<sup>[7]</sup>。接面至散熱片的熱阻假設為採用 30 微米膠層厚度，係數為 2.1 W/(m-K)的導熱材料。

採用這種從散熱片到矽的簡單堆疊，出色的

圖 6：FTCO3V455A1 APM 瞬態熱阻



熱效能使得全變頻器可採用極高功率密度的封裝。APM 的尺寸修剪為 29 mm x 44 mm x 5 mm，可構成約 400 mL 總容量的極緊湊變頻器元件，包括繼電器、直流連接濾波器元件、控制 PCB、散熱片及連接器。工作條件下的電力循環(Power Cycling)及紋波溫度分析最終讓我們知道使用電源時所需的封裝及焊線應力<sup>[8]</sup>。

## 總結

將數十年的線路驅動交流馬達替換為變頻器驅動的高效馬達是一個節能、對環境負責的趨勢，由功率半導體元件及現代機器控制技術實現。採用模組的低成本解決方案順應需要及挑戰，滿足環保、法規及客戶需求。汽車及商用 / 工業馬達行業都在尋求替代能源並創建更高效系統，從而減少傳統能耗並降低 CO<sub>2</sub> 排放率。

## 引用文獻、注釋及參考文件

- [1] OICA 代表「Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles(世界汽車工業國際協會)」或「International Organization of Motor Vehicle Manufacturers(世界汽車工業國際協會)」
- [2] 來源：IEA 世界能源展望。根據能源部(DOE)，包括馬達如泵、傳送機、壓縮機、風扇、混合器、研磨機及其他材料處理及加工設備在內的美國製造行業消耗總電力的大約 54%。

- [3] 替代燃料包括氫、生物燃料、乙醇、電氣及天然氣。
- [4] 來自風力、太陽能、地熱能等的替代能源...
- [5] 影響馬達效率的工作條件：電源電壓、轉速、負載轉矩及溫度
- [6] 擴展功率模組的功率範圍：[http://blog.fairchildsemi.com/2014/attach-heatsink-spm-5-package/#.VGBak\\_nF-So](http://blog.fairchildsemi.com/2014/attach-heatsink-spm-5-package/#.VGBak_nF-So)
- [7] 瞭解更多有關應用 FTCO3V455A1 3 相逆變器汽車電源模組 (APM) 的資訊 <https://www.fairchildsemi.com/application-notes/AN/AN-4160.pdf>
- [8] 不同馬達控制應用需要不同智慧功率模組 (SPM) 解決方案。提供您的技術規格並嘗試不同的 SPM 元件編號，即刻檢視損失結果。接受正弦 PWM、空間向量 PWM 及四種非連續 PWM 方法。 <https://www.fairchildsemi.com/design/design-tools/motion-control-design-tool/> 