

摘要

此技術白皮書將探索牽引逆變器的重要系統趨勢、架構與技術。我們也將說明牽引逆變器所使用的裝置與技術，包括隔離、高電壓域和低電壓域技術。最後，本文件將著重於系統工程概念與設計，以加快牽引逆變器設計時間。

目錄

1 簡介.....	2
2 架構與趨勢.....	3
3 實現牽引逆變器的關鍵技術.....	4
4 微控制器.....	5
4.1 Sitara 系列.....	5
4.2 即時控制 MCU.....	6
5 隔離式開極驅動器.....	7
6 低電壓偏壓電源供應器.....	9
7 高電壓偏壓，備援電源.....	10
8 DC 鏈路主動放電.....	10
9 轉子位置感測.....	11
10 隔離式電壓與電流感測.....	12
11 系統工程與參考設計.....	12
12 結論.....	13
13 參考.....	13

圖

圖 2-1: 三階 T 型逆變器.....	3
圖 3-1: 牽引逆變器系統方塊圖.....	4
圖 4-1: 含 AM2634-Q1 的牽引逆變器系統方塊圖.....	5
圖 4-2: 牽引逆變器控制的 TMU 改善.....	6
圖 5-1: UCC5870-Q1 開極驅動器強度.....	7
圖 5-2: 競爭裝置開道驅動強度.....	7
圖 5-3: 具可調式開極驅動器實作的 UCC5870-Q1 設計圖.....	8
圖 5-4: 具可調式開極驅動器實作的 UCC5870-Q1 設計電路板.....	8
圖 5-5: 具有 5.5-Ω 開極電阻器的弱驅動器.....	8
圖 5-6: 具有 0.5-Ω 開極電阻器的強驅動器.....	8
圖 6-1: UCC14240-Q1 EVM 電路板.....	9
圖 8-1: 以智慧型 AFE 為基礎的 DC 鏈路主動放電.....	10
圖 8-2: 測試波形.....	10

表

表 5-1. 400-V 匯流排電壓下的切換能源比較.....	8
表 5-2. 800-V 匯流排電壓下的切換能源比較.....	9

## 商標

C2000™, Code Composer Studio™, and LaunchPad™ are trademarks of Texas Instruments.

Arm® and Cortex® are registered trademarks of Arm Limited.

所有商標均為其各自所有者的財產。

## 1 簡介

牽引逆變器是電動車 (EV) 傳動系統的核心。因此逆變器在增加全球 EV 使用上扮演著十分重要的角色。牽引馬達可將電池或發電機的 DC 電源轉為 AC 電源，為永磁電機 (PMSM)、感應馬達 (IM)、外激式同步馬達 (EESM) 和切換式磁阻馬達 (SRM) 等牽引驅動馬達提供電力，以提供優異的扭力和加速能力。牽引逆變器也會在車輛滑行或煞車時轉換馬達的回收能量，並為電池充電。

在測量牽引逆變器性能時，需考量幾個重要設計優先順序與取舍：

- 功能安全與保全 - 功能安全設計通常採用 ISO 26262 或電子安全車輛侵入保護應用程序，其中包括安全診斷、系統級故障模式與影響分析、故障模式、影響和診斷分析，以及硬體安全模組 (HSM)。
- 重量與功率密度 - 寬能隙開關與動力系統整合是實現高功率密度逆變器設計的關鍵技術。OEM 的逆變器功率密度目標持續成長，例如美國市場在 2025 年前將達 100 kW/L。使用 SiC 可啟用 800-V DC 匯流排電壓，降低額定電流與線束。具備快速控制迴路的 MCU 讓您可以使用高速輕量馬達與動力系統整合，例如與 DC-DC 轉換器整合的逆變器。
- 效率 - 系統效率包含再生煞車模式下的牽引逆變器效率、馬達效率和逆變器效率。
- 性能及可靠性 - 透過馬達扭力控制、電流感測迴路及馬達扭力暫態響應來測量逆變器系統性能。可靠性包含電源模組可靠性、馬達可靠性和隔離等。
- 系統成本 - 除了電動機和線束外，主要元件包括：
  - EMI 濾波器
  - DC 鏈路電容器
  - 匯流排
  - MCU 和控制電子元件
  - 電源模組和驅動平台電子元件
  - 電流感測器
  - 逆變器外殼和冷卻

## 2 架構與趨勢

牽引逆變器的架構因車輛類型而異。插電式混合動力車 (PHEV) 和電池電動車 (BEV) 都具三相電壓來源逆變器拓撲，功率位準範圍為 100 至 500-kW。電池組可直接連接至逆變器 DC 輸入，也可使用 DC/DC 升壓逆變器提高電池電壓，提供逆變器受控制的 DC 電壓。

二階逆變是電動車和業界最常見的電源轉換器，功率範圍可達數十千瓦，功率則可達數百千瓦。切換頻率通常在 5 kHz 至 30 kHz 範圍內，目前三階逆變器越來越受歡迎，因為逆變器可提供更高的功率能力 (超過 300 kW)、更高的效率和更低的諧波失真，並允許使用更精巧的電磁干擾 (EMI) 濾波器。在許多拓撲中，中性點嵌位及 T 型中性點嵌位 (TNPC) 是最具競爭力的設計。圖 2-1 說明三階 TNPC 逆變器的範例。

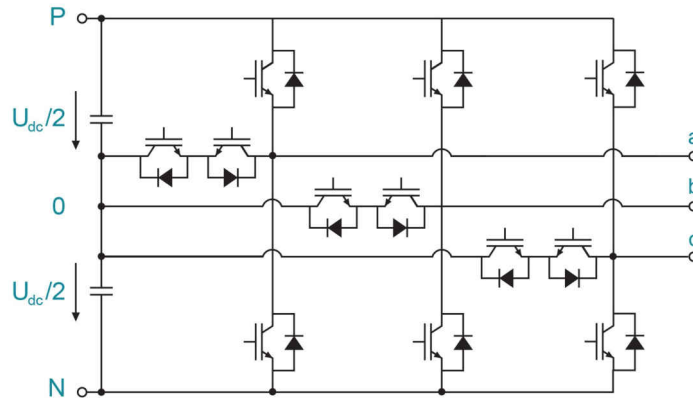


圖 2-1. 三階 T 型逆變器

第二種趨勢則是雙馬達架構。Tesla 早在 2012 年就推出了 Model S 車款，這是一款後輪驅動的全尺寸豪華轎車，運用 85-kWh 電池組提供最遠 426 公里行駛距離。2014 年 Tesla 宣布推出 Model S 全輪驅動版本，其中前後輪軸皆配備電動馬達。自此之後，雙逆變器就由多家 OEM 採用，像是 Chevy Volt PHEV、Toyota Prius HEV 和 Cadillac CT6 PHEV。

第三個改善系統整合的趨勢是採用電動軸，將電力電子、電動馬達和變速箱整合在精巧的系統機殼中。電動軸可提升馬達性能，因為此設計可實現更高的扭矩和最高速度，例如 20-k RPM。其更佳的冷卻效果和線圈繞組結構，可提升功率密度和馬達效率。

牽引逆變器功能的其他趨勢包括：

- 提升功率位準與汽車安全完整性等級 (ASIL) (100 kW 至 500 kW，ASIL C 至 ASIL D)
- 改用 800-V 技術並提升切換暫態電壓
- 輕鬆調整閘極驅動器強度以減少過衝、使效率最佳化並減少 EMI
- 不使用解析器而改用電感式位置感測技術，以降低成本
- 將主動放電整合至閘極驅動器積體電路 (IC)，以降低成本並節省空間

### 3 實現牽引逆變器的關鍵技術

牽引逆變器需要**隔離技術**、在低電壓域中採用的技術，以及在高電壓域中採用的技術。TI 在絕緣式閘極驅動器、數位隔離器、隔離式類比轉數位轉換器及固態繼電器中採用的電容隔離技術，將強化訊號隔離整合在電容電路中，並以二氧化矽作為介電質。**圖 3-1** 說明牽引逆變器系統的範例。隔離層（紅色虛線）將低電壓域及高電壓域分隔。

在低電壓域中，微控制器 (MCU) 會產生脈衝寬度調變 (PWM) 訊號至電源開關。MCU 會在封閉迴路中執行感測和速度控制，並處理主機功能以滿足強制性硬體和軟體安全性及安全程式碼執行的要求。此外，執行安全電源樹狀結構可防止 MCU 和重要電源軌斷電。連接至 12-V 汽車電池的電源管理積體電路 (PMIC) 或系統晶片可為 MCU 供電。MCU 會與解析器或霍爾效應感測器的類比前端介面。

高電壓域中的主要功能包括：

- 電源開關 - 通常為碳化矽 (SiC) 或絕緣閘極雙極電晶體 (IGBT) 型電源模組，由具備保護和監控功能的絕緣式閘極驅動器控制
- 絕緣式閘極驅動器 - 允許在高電壓與低電壓單元間進行資料與電源傳輸的隔離裝置，同時防止來自高電壓域的危險 DC 或未受控制暫態電流流動
- 偏壓電源 - 一種電氣隔離的電源供應器，可從低電壓側取得輸入並產生閘極驅動電壓至電源開關
- 隔離式電壓及電流感測 - 感測 DC 鏈路電壓及馬達相位電流，並確保在馬達上施加正確扭力
- 主動放電 - 將 DC 匯流排電壓放電至安全電壓。可產生反電動勢 (EMF) 的馬達類型需要主動放電。聯合國歐洲經濟委員會第 94 號條例規定 DC 匯流排電壓降至安全電壓 (60 V) 的時間不得超過 5 秒。此外也需包含診斷電路對重要功能執行自檢，以防止系統故障。

逆變器控制和安全方案也會因車輛類型而異。例如永磁同步馬達 (PMSM) 具有高效、低扭矩漣波和大速度範圍，因此可加以運用。PMSM 通常使用空間向量 PWM 控制，又稱為磁場定向控制。以與轉子磁性垂直的定子向量方式控制定子電流將會產生扭力。更新定子電流會使定子通量向量一直保持在與轉子磁鐵呈 90 度的位置。PHEV 和 BEV 中其他常見的馬達類型包括感應馬達、外激式同步機及切換式磁阻機。

為了減少昂貴的稀土材料永久磁鐵，外激式同步馬達 (EESM) 的使用逐漸增加，不僅可做為車輛副軸，也可用作主軸移動裝置使用。使用此馬達的目標是降低成本 (例如 100-kW 的峰值功率約需 1.5 kg 磁鐵)，及減少製造與維護的工作量。EESM 機器類型包括傳導性 EESM 和感應式 EESM (iEESM)。使用 EESM 的商用車輛包括 Toyota Prius、Chevrolet Bolt EV、Ford Focus Electric、VW e-Golf、BMW iX3 等。

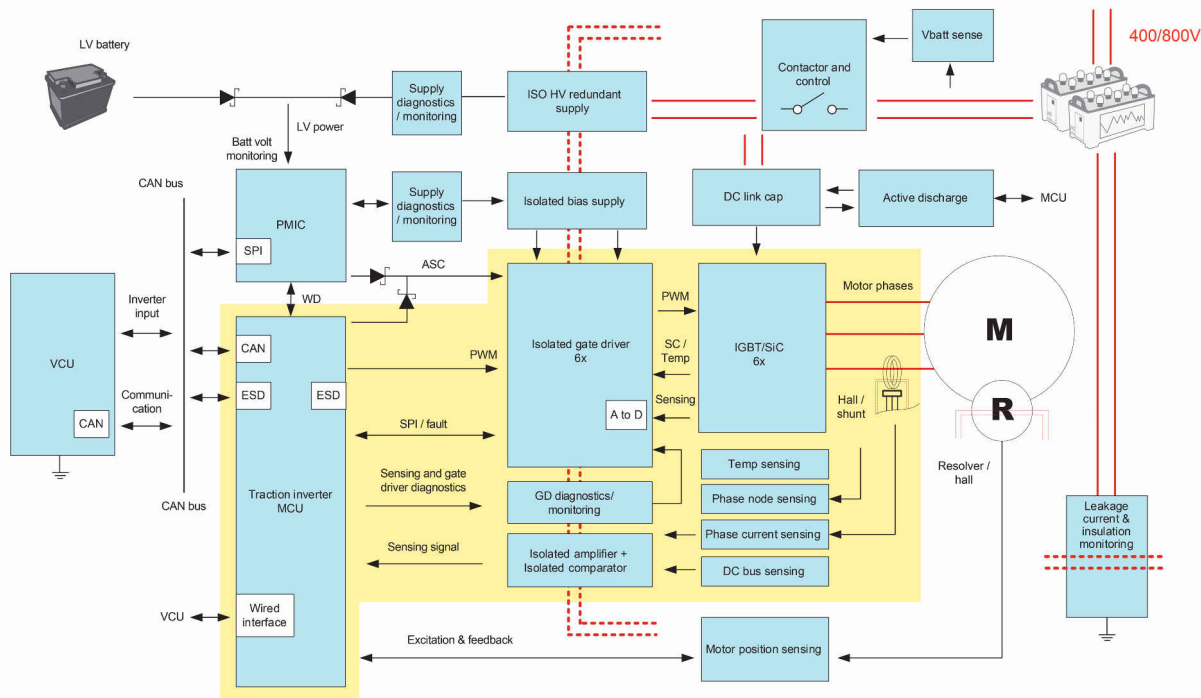


圖 3-1. 牽引逆變器系統方塊圖

## 4 微控制器

定義逆變器架構和規格後，下一步是選擇 MCU。TI 提供適合 HEV 和 EV 應用的強大 **微控制器** 代表產品，其中包括 Arm® Cortex® R5F 型 Sitara 系列，和具即時控制功能和快速控制迴路的高效能 C2000™ MCU 系列。

### 4.1 Sitara 系列

**Sitara MCU 系列** 中的 Arm Cortex-R5F 叢集包含兩個 R5F 核心。核心周圍有許多伴隨記憶體，例如 L1 快取和緊密耦合記憶體 (TCM)、標準 Arm CoreSight™ 偵錯與追蹤架構、整合式向量中斷管理器 (VIM)、ECC 聚合器和其他各種模組。即時控制加速器沿襲了傳統 C2000 控制模組。加速器包括：類比轉數位轉換器 (ADC)、類比較器、緩衝數位轉類比轉換器、強化型脈衝寬度調變器 (EPWM)、強化式擷取、強化相位差編碼器脈衝、快速序列介面、 $\Sigma \Delta$  濾波器模組及交錯型加速器。其他優點包括：適用分離式安全分解、硬體安全模組 (HSM) 和以 AUTOSAR 提供 CAN-FD 支援的彈性 lockstep 選項。byAM2634-Q1 控制的牽引逆變器系統方塊圖如 **圖 4-1** 中所示。

Code Composer Studio™ 軟體專案資料夾包含牽引逆變器展示程式碼。解析器迴路的執行方式如下：將一個 PWM 通道設定成透過直接記憶體存取和較高頻率下的數位轉類比轉換器 (DAC) 觸發解析器激磁訊號更新，其他三個 PWM 通道則產生逆變器訊號並產生 ADC SOC。解析器激磁訊號會從 DAC 對齊 ADC 取樣的所需相位。多個 ADC 單元可共用相同的晶片系統 (SOC)。

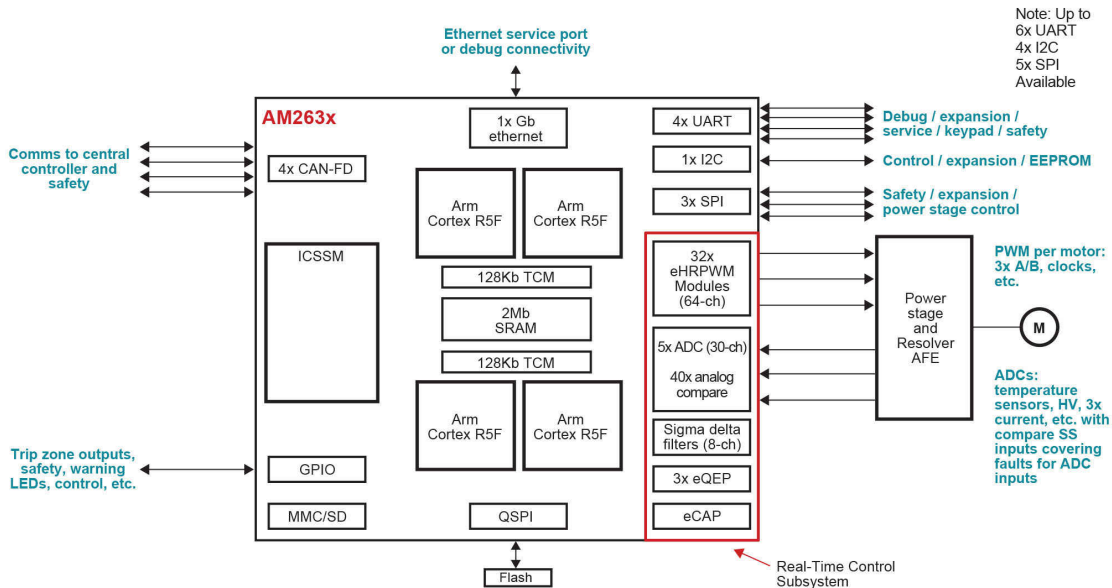


圖 4-1. 含 AM2634-Q1 的牽引逆變器系統方塊圖

## 4.2 即時控制 MCU

TI C2000 MCU 系列在數位電源與馬達控制應用方面提供領先的即時控制性能已超過 20 年。這些 MCU 整合了快閃記憶體、類比轉數位轉換器(ADC)、數位訊號處理器 (DSP) 和脈衝寬度調變 (PWM) 單元，且非常成功；如 TMS320F28003x 和 TMS320F2837x。C2000 系列範圍涵蓋獨立式逆變器到完整動力系統整合，包括：牽引轉換器、車載充電器 (OBC)、高電壓 DC-DC 轉換器、電池管理系統 (BMS)、暖氣通風與空調 (HVAC)，未來的 F29x 系列更可提供數百倍的每秒百萬指令 (MIPS)。

TI C2000 MCU 包含下列功能，可協助加快牽引逆變器的控制演算法：

- 狀態機架構 32 位元浮點控制律加速器可從主要 DSP 核心磁場定向控制獨立執行程式碼
- 此系列中某些設備支援 32 位元浮點運算或 64 位元浮點
- 三角函數數學單位 (TMU) 提供固有指示，以支援轉換與扭力迴路計算中常見的常用三角函數。使用以 TMU 為基礎的指示，可大幅減少週期數。圖 4-2 展示如何透過 TMU 進行牽引逆變器控制演算法改善。
- 複雜數學方程式中維持比和循環冗餘檢查運算的週期數減少

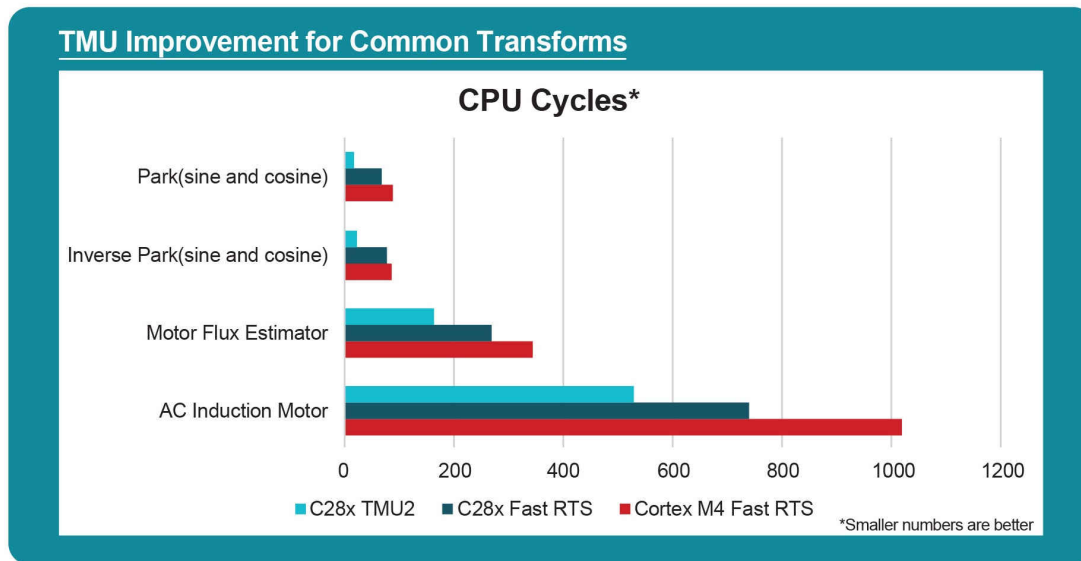


圖 4-2. 牽引逆變器控制的 TMU 改善

## 5 隔離式開極驅動器

**TI 開極驅動器隔離** - 高達  $5.7 \text{ kV}_{\text{RMS}}$  - 可協助防止觸電，並提供更高工作電壓、更寬廣爬電距離與間隙距離，以提升系統可靠性。主要隔離式開極驅動器系列共有兩個：智慧型驅動器 UCC21750-Q1 系列和安全驅動器 UCC5870-Q1 系列。UCC21750-Q1 系列包括牽引逆變器中電源模組的保護功能，例如快速過電流和短路偵測、分流電流感測支援、故障報告、主動米勒箝制、輸入與輸出側電源供應器欠電壓鎖定偵測。隔離式類比轉 PWM 感測器可幫助簡化溫度或電壓感測。

**UCC5870-Q1 驅動器系列** 包含以下功能：

- 符合功能安全標準的隔離式單通道開極驅動器，支援高達  $1\text{-kV}_{\text{RMS}}$  工作電壓及超過 40 年的隔離層壽命，並提供低零件間偏斜和  $>100 \text{ V/ns}$  共模雜訊抗擾性 (CMTI)
- 高 30-A 峰值驅動強度可減少功率切換損失，並免除驅動電路上的緩衝電路，進而降低成本。
- 溫度感測器可監控電源模組的溫度，並允許操作溫度高達特定溫度限制，有助於支援寬廣運作範圍
- 配備米勒箝制以防止誤開啟，並讓開關能視需要快速切換以達到效率目標

圖 5-1 與 圖 5-2 展示了 UCC5870-Q1 及競爭裝置在下列測試條件下的 30-A 驅動強度：

- $V_{\text{cc}2} - V_{\text{ee}2} = 23 \text{ V}$
- $R_{\text{gon}} = R_{\text{goff}} = 0 \ \Omega$
- 負載電容 =  $1 \ \mu\text{F}$

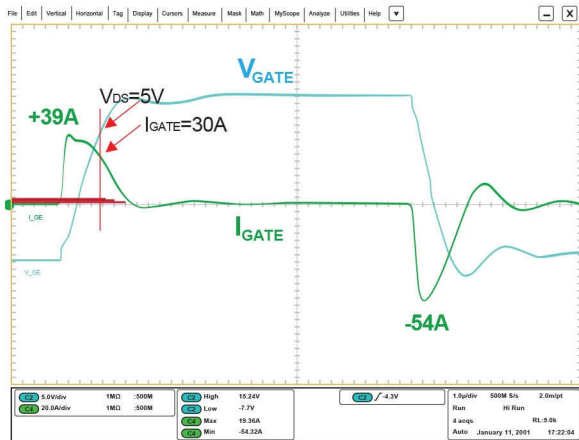


圖 5-1. UCC5870-Q1 開極驅動器強度

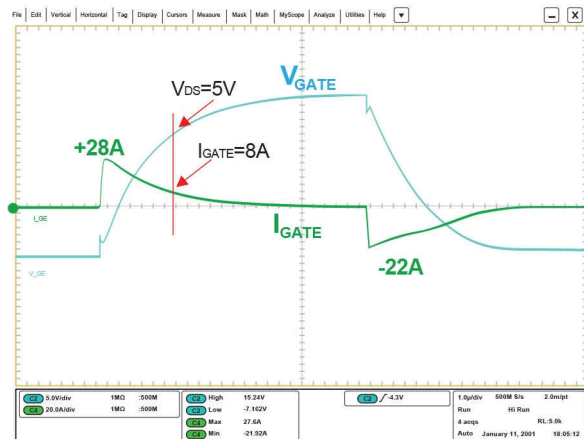


圖 5-2. 競爭裝置開道驅動強度

提升牽引逆變器效率並降低 EMI 的方法之一，是調整控制電壓轉換率的開極驅動輸出，進而在溫度、負載和電壓等各種條件下改變切換速度。舉例來說，當電池電壓耗盡時，暫態電壓 (dv/dt) 自然較小，開極驅動器輸出也可調整以加快開關轉換。

圖 5-3 與 圖 5-4 說明以 UCC5870-Q1 為基礎的可調式開極驅動實作。圖 5-3 展示設計圖，圖 5-4 則說明與 Company WolfSpeed 的 XM3 半橋式電源模組系列相連接的設計電路板。

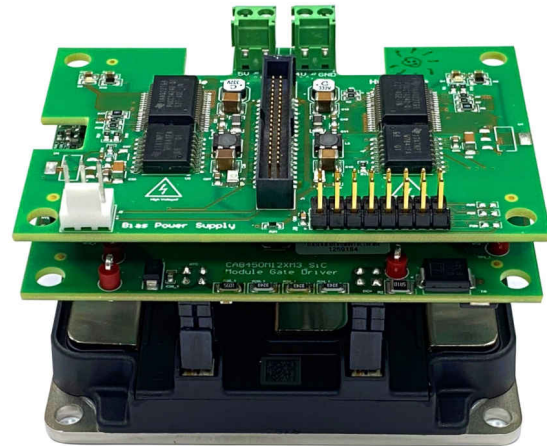
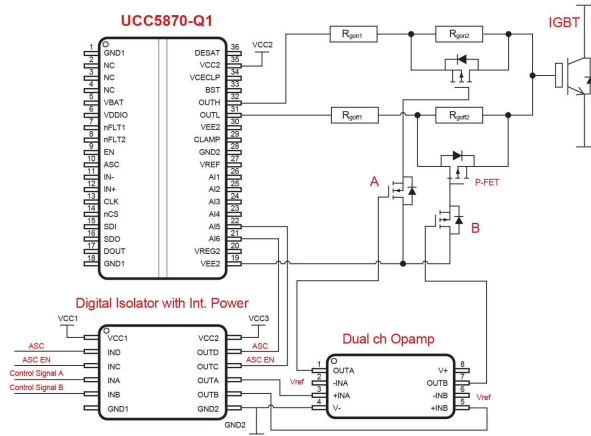


圖 5-3. 具可調式開極驅動器實作的 UCC5870-Q1 設計圖

圖 5-4. 具可調式開極驅動器實作的 UCC5870-Q1 設計電路板

圖 5-5 與 圖 5-6 顯示雙脈衝測試波形。上升邊緣的平均切換  $dv/dt$  速度從  $4.6 \text{ kV}/\mu\text{s}$  增加到  $21 \text{ kV}/\mu\text{s}$ 。下降邊緣的平均切換  $dv/dt$  速度從  $3.8 \text{ kV}/\mu\text{s}$  增加到  $13.5 \text{ kV}/\mu\text{s}$ 。

下列兩個影像都是在  $800\text{-V}$  匯流排下以雙脈衝測試波形收集而得。



圖 5-5. 具有  $5.5\text{-}\Omega$  開極電阻器的弱驅動器



圖 5-6. 具有  $0.5\text{-}\Omega$  開極電阻器的強驅動器

表 5-1 說明在  $400\text{-V}$  匯流排電壓下，弱驅動 ( $5.5\text{-}\Omega$  開極電阻) 與強驅動電流 ( $0.5\text{-}\Omega$  開極電阻) 間的切換能量比較。

表 5-1.  $400\text{-V}$  匯流排電壓下的切換能源比較

參數	弱驅動器 ( $5.5\text{-}\Omega$ 開極電阻)	強驅動器 ( $0.5\text{-}\Omega$ 開極電阻)
汲極至源極電壓	400 V	400 V
汲極至源極電流	200 A	200 A
開啟能源	2.364 mJ	893 $\mu\text{J}$
關閉能源	2.12 mJ	898 $\mu\text{J}$
汲極至源極電壓 ( $V_{DS}$ ) 過衝	88 V	150 V



表 5-2 顯示在 800-V 匯流排電壓下，弱驅動與強驅動電流間的切換能源比較。

表 5-2. 800-V 匯流排電壓下的切換能源比較

參數	弱驅動器 (5.5-Ω 閘極電阻)	強驅動器 (0.5-Ω 閘極電阻)
汲極至源極電壓	800 V	800 V
汲極至源極電流	400 A	400 A
開啟能源	2.03 mJ	1.124 mJ
關閉能源	2.0 mJ	1.245 mJ
汲極至源極電壓 ( $V_{DS}$ ) 過衝	120 V	230 V

## 6 低電壓偏壓電源供應器

在牽引逆變器中，**低電壓偏壓電源**通常會連接至 12-V 電池等低電壓來源，以為閘極驅動器供電。TI 提供各種解決方案：包含具整合式場效電晶體 (FET) 與整合式磁性元件的轉換器、具整合式 FET 與外部磁性元件的轉換器，以及具外部 FET 與外部磁性元件的控制器。

UCC14240-Q1 隔離式 DC/DC 轉換器模組可在環境溫度 105°C 時提供 1.5 W 輸出功率，並提供  $\pm 1.3\%$  的輸出電壓調節。本裝置提供基本與強化隔離版本，以及超過 150 V/ns 共模瞬態抗擾性性能。圖 6-1 說明 UCC14240-Q1 的 (EVM) 電路板影像，採用小巧、3.5 mm、寬體 SOIC 整合式封裝。

UCC25800-Q1 裝置是一款具有超低 EMI 放射的電感器電感器電容器共振轉換器。此裝置可讓設計運用具更高洩漏電感的變壓器，但寄生一次到二次電容大幅降低，並提供可調整過電流保護、輸入過電壓保護、過熱保護和接腳故障保護等保護功能。

SN6507-Q1 為搭載整合式 MOSFET 的高頻推拉式變壓器驅動器，並擁有可提供廣泛輸入電壓範圍的工作週期控制。此裝置整合控制器和兩個 0.5-A NMOS 電源開關以切換不同相位。此裝置也包括可編程緩啟動、展頻時脈及接腳可配置電壓轉換率控制。

LM2518x-Q1 系列為一次側穩壓 (PSR) 返馳式轉換器，具備整合式電源開關，並可在 4.5 V 至 42 V 的廣泛輸入電壓範圍中運作。隔離輸出電壓會從一次側返馳電壓進行取樣，因此無需光耦合器、電壓參考或變壓器的第三個繞組來進行輸出電壓穩壓。邊界導通模式 (BCM) 切換可實現小巧的磁性設計，並可帶來高於  $\pm 1.5\%$  負載與線路穩壓性能。

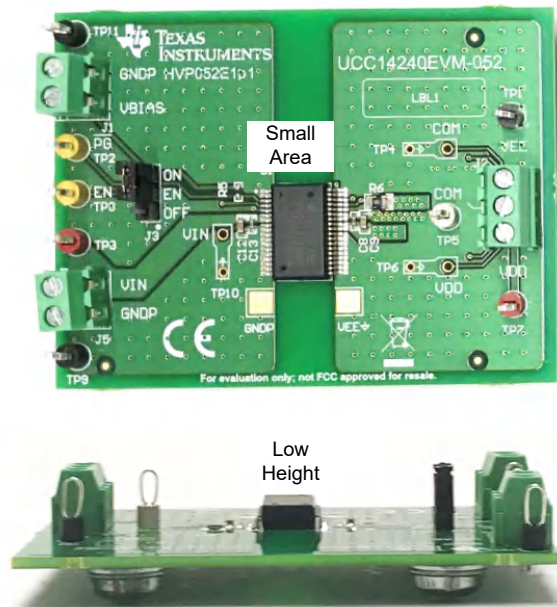


圖 6-1. UCC14240-Q1 EVM 電路板

## 7 高電壓偏壓，備援電源

牽引逆變器系統通常需要高電壓電源供應器，以從高電壓電池轉換電源並連接至低電壓側，進而建立備援電源路徑並提升安全性。當輸入電壓低至 50 V 時，可能需要啟動此高電壓電源供應器，且 800-V 電池也必須能以最高 1 kV 運作。車輛拋錨或牽引逆變器故障導致高壓電瓶分離時，可能會發生啟動電壓降低的情況。馬達會開始旋轉並扮演發電機的角色，將非控制電壓導入 DC 匯流排。為了控制電壓並使電壓不超過 50 V (可安全觸摸)，輔助電源供應器必須開啟並啟動安全相關電路，以釋放 DC 鏈路電容器 (主動放電) 或使馬達主動短路。

TI 提供各種參考設計以滿足此需求：

1. 德州儀器，[UCC28C5y-Q1 EVM：40V - 1kV 輸入、15Vout、40W PSR 返馳](#)
2. 德州儀器，[TIDA-01505 - 支援再生煞車系統測試的車用 40-V 至 1-kV 輸入返馳參考設計](#)
3. 德州儀器，[PMP22288 - 適合汽車逆變器電源的 15-W 返馳參考設計](#)
4. 德州儀器，[PMP10200 - 超廣泛輸入電壓範圍 PSR 返馳式轉換器參考設計](#)

## 8 DC 鏈路主動放電

每個 EV 牽引逆變器都需要 DC 鏈路主動放電，以做為重要安全功能。在以下條件和要求下，需要放電電路以釋放 DC 鏈路電容器中的能量：

- 在緊急情況下或維修期間，系統中的電壓必須在 2 秒內能供安全觸摸
- 在車輛鑰匙拔除時，DC 鏈路電容器必須保持放電
- 系統級安全要求 ASIL D
- 應可在 MCU 故障時獨立運作

TI 針對不同系統級需求提供數種主動放電設計：

- 使用 [TPSI3050-Q1](#) 進行電晶體開啟和關閉控制。TPSI3050-Q1 強化式隔離開關驅動器具備整合式 10-V 閘極電源，不需二次偏壓電源即可驅動放電電源開關。
- 使用 AFE539F1-Q1 裝置控制 PWM。AFE539F1-Q1 智慧 AFE 具備適用 PWM 和自訂波形產生器的內建非揮發性記憶體。本裝置新增可編程性及邏輯，可省去彌補 DAC 電路、MCU 電路及整個離散電路間差距的軟體需求。[圖 8-1](#) 和 [圖 8-2](#) 顯示設計方塊圖和測試波形。

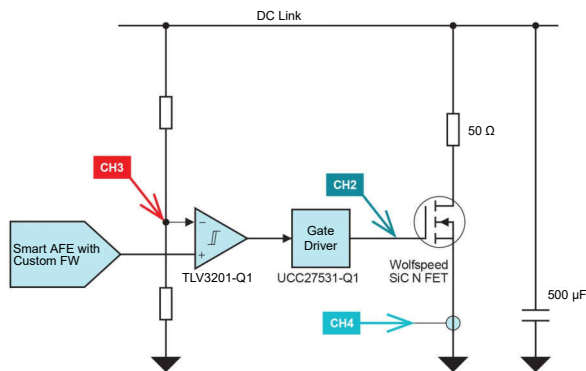
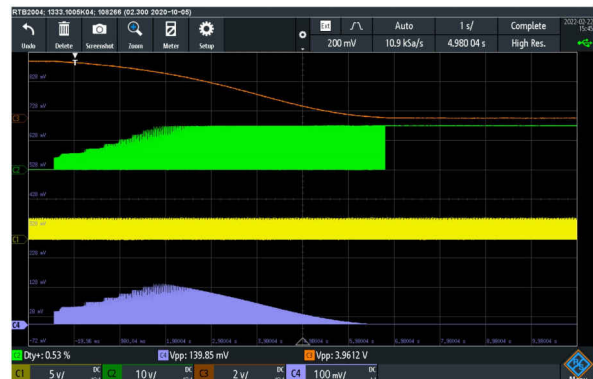


圖 8-1. 以智慧型 AFE 為基礎的 DC 鏈路主動放電



CH1：AFE539F1-Q1 輸出  
CH2：閘極驅動器 (UCC27531-Q1) PWM 輸出  
CH3：電阻分壓器後的 DC 鏈路電壓  
CH4：SiC FET 汲極至源極電流

圖 8-2. 測試波形

- 透過電源模組上的線性偏壓或 PWM 式脈衝線性切換在功率級中放電，以構成短路。TI 具有三態功能的絕緣式閘極驅動器，可透過使用離散類比電路的電源模組進行主動放電。放電設定檔會鏡射到電容器中的電流源參考，其中 100- $\mu$ A 定電流汲極代表 1-A 定放電電流。閘極電壓穩壓器可調節閘極至源極電壓，並將電源模組驅動至線性區。
- 透過馬達繞組釋放能量。繞組式放電可分為多個階段。這些階段包括快速放電階段或匯流排電壓穩壓階段。快速產生大量 d 軸電流可減少 DC 鏈路能量，而 q 軸電流必須為零。TI Sitara 或 C2000 MCU 的快速迴路控制以及安全隔離閘極驅動器包括序列周邊介面 (SPI) 可編程性，六個 ADC 通道可提供可靠且順暢的控制放電。

## 9 轉子位置感測

馬達轉子位置感測器會測量轉子軸的角度位置。為讓速度回饋迴路控制滿足 EV 應用安全要求，馬達位置感測器扮演非常重要的角色。在位置控制方面，感測器可在整個動作中啟用已知 (安全) 位置、馬達速度和位置，並提供回饋給扭力控制迴路。

可變磁阻解析器感測器採用旋轉變壓器的原理。變壓器有一個主要繞組和兩個次要繞組，位置彼此呈直角。將激發電壓 ( $V_{EXC}$ ) 套用到主要繞組 (透過 TI 的 [ALM2403-Q1](#) 或 [TAS5431-Q1](#) 激發放大器產生) 會導致電流產生磁通量 ( $\Phi$ )。通量會透過次要繞組，分別根據轉子角度 ( $\theta$ ) 和電感  $V_{SIN}$  與  $V_{COS}$  進行分配。回饋訊號會從差動訊號轉換為 ADC 的單端輸出。安全 MCU 會從解析器次級繞組的電壓比計算  $\theta$ 。

電感位置感測器採用非磁力技術，可用於高速馬達位置感測。感測器利用渦電流原理來偵測在一組線圈上方移動的金屬目標位置。位置感測器介面 IC 會將 RX 線圈的輸入訊號轉為從 MCU 處理的差動正弦及餘弦輸出訊號。

## 10 隔離式電壓與電流感測

牽引轉換器系統運用 [隔離式感測器](#) 進行電壓與電流測量，例如 DC 鏈路電壓與馬達相位電流。TI 的 AMC1311B-Q1 及 AMC1351-Q1 隔離式放大器和 AMC1305-Q1 隔離式調變器設計，可協助實現高精度、高頻寬、低延遲及低溫度漂移，以進行隔離式電流和電壓感測。產品系列提供基本與強化型隔離額定值。以二氧化矽為基礎的電容隔離層可支援高階磁場抗擾性。

## 11 系統工程與參考設計

TI 的系統工程團隊致力於從 TI 廣泛的產品組合中開發最佳化系統設計，從而幫助客戶加快其系統設計週期。部分先前開發的參考設計將於下列清單中詳細說明：

- [TIDM-02009](#)：

TIDM-02009 是經 ASIL D 安全概念評估的高速牽引、雙向 DC/DC 轉換參考設計。

此參考設計展現如何以單一 TMS320F28388D 即時 C2000 MCU 控制 HEV 或 EV 牽引逆變器和雙向 DC-DC 轉換器。牽引控制運用軟體式解析器轉數位轉換器 (RDC) 將馬達驅動至高達 20,000 RPM 的高速。DC-DC 轉換器則採用峰值電流模式控制 (PCMC) 技術，以及全橋相移式轉換器 (PSFB) 拓撲與同步整流 (SR) 機制。牽引逆變器級使用由 UCC5870-Q1 智慧閘極裝置驅動的碳化矽 (SiC) 功率級。PCMC 波形是使用最先進的 PWM 模組和比較器子系統 (CMPSS) 中的內建傾斜補償產生。ASIL 分解系統功能安全概念由 TÜV SÜD 評估，展示最高 ISO 26262 ASIL D 的系統級安全完整性，以實現代表性安全目標。

- [PMP22817](#)：

PMP22817 是配備整合式變壓器參考設計的汽車 SPI 可編程閘極驅動器和偏壓電源。

此參考設計可為牽引逆變器中的電源開關提供隔離式偏壓電源與隔離式閘極驅動器。偏壓電源和驅動器皆可為 800-VDC 匯流排應用提供所需的高隔離。隔離式偏壓同時提供 24 VDC +15-V 和 -5-V 閘極驅動偏差。隔離式驅動器提供快速開啟與關閉這些高功率開關所需的高電流，並提供進階防護功能。PMP22817 設計也提供經測試的 DC-DC 單端主要電感器轉換器 SEPIC 關閉汽車電池電壓 (6 V 至 42 V，其中包括突波與下降電壓) 以提供穩壓 24 V。

- [TIDA-01527](#)

TIDA-01527 是具有 C2000™ 微控制器和  $\pm 0.1^\circ$  準確度的離散式解析器前端參考設計。

此參考設計為激磁放大器和解析器感測器類比前端。此設計僅會在 1 合 2 印刷電路板 (PCB) 上執行離散式零組件和標準運算放大器。提供的演算法和程式碼範例使用含 TMS320F28069M MCU 的 C2000 微控制器 (MCU) LaunchPad™ 開發套件，以進行訊號處理及角度計算。參考設計採用了出色的分散式訊號處理方法。此方法可將系統準確性提高 250%，同時將硬體成本和複雜性保持在合理程度。

## 12 結論

汽車牽引逆變器的趨勢正朝 800-V 技術、高功率密度 (往大於 50 kW/L 發展)、高效率 (> 99%) 和高安全 (ASILD) 需求方向發展。TI 的 MCU、絕緣式閘極驅動器、隔離式偏壓電源、安全 PMIC、主動放電、位置感測、隔離電壓及電流感測等技術與裝置，可幫助實現具強化可靠性與低成本的高性能安全牽引逆變器系統。

## 13 參考

有關 C2000 為即時訊號鏈帶來的優點 (包括 SW 基準) 詳細資訊，請參閱 [展示 C2000™ 控制 MCU 最佳化訊號鏈的即時基準](#) 應用說明。

如需更多智慧型 AFE 資訊，請參閱 [什麼是智慧型 DAC?](#) 技術文章。

閱讀 [以可靠且經濟實惠的隔離技術解決高電壓設計難題](#) 白皮書。

## IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATA SHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you will fully indemnify TI and its representatives against, any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#) or other applicable terms available either on [ti.com](http://ti.com) or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may have proposed.

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
Copyright © 2022, Texas Instruments Incorporated