

教你幾招實用的必殺技！

SiC MOSFET 電動汽車 牽引變頻器設計

SiC 功率 MOSFET 憑藉高效率和功率密度的特性，成為了電動汽車牽引變頻器設計開發的理想之選，但其在應用設計中也面臨著諸多挑戰。本文介紹了電動汽車牽引變頻器的作用，以及採用 SiC 功率 MOSFET 和 IGBT 在設計電動汽車牽引變頻器上的性能優勢，最後透過一個採用 SiC MOSFET 的牽引變頻器實例，分析了最大限度提高該裝置效率的設計技巧。

■作者：Steven Keeping

工程師面臨著對現代電動汽車 (EV) 性能和里程的權衡。更快的加速和更高的巡航速度需要更頻繁、更耗時的充電站。另外，更長里程要求造成了各項進展的不確定性。為了增加續航能力，同時為駕駛者提供更高的性能，工程師需要設計驅動系統，確保盡可能多的電池能量轉移到驅動輪上。同樣重要的是，需要保持驅動系統足夠小，以適應車輛的限制。這些雙重需求需要高效率和低能量密度的元件。

電動汽車驅動系統的關鍵部件是三相電壓源變頻器 (或稱“牽引變頻器”)，它將電池的直流電壓轉換為車輛馬達所需的交流電。打造一個高效率的牽引變頻器對於平衡性能和里程至關重要，而提高效率的關鍵途徑之一就是適當使用寬能隙 (WBG)、碳化矽 (SiC) 半導體元件。

本文將先介紹電動汽車牽引變頻器的作用；然後解釋用 SiC

功率金屬氧化物半導體場效電晶體 (MOSFET) 設計該裝置時，如何才能打造出比使用絕緣閘極雙極性電晶體 (IGBT) 更高效率的電動車驅動系統；文章最後介紹了一個採用 SiC MOSFET 的牽引變

頻器實例，並說明了最大限度地提高該裝置效率的設計技巧。

什麼是牽引變頻器？

電動汽車牽引變頻器將車輛的高壓 (HV) 電池提供的直流電轉

表 1：2021 年典型牽引變頻器要求；與 2009 年相比，如表所示能量密度要求增加了 250%。

Traction inverter characteristic	Value
DC-link voltage	250 – 470 volts 550 – 850 volts
Fundamental frequency	1200 Hz
Switching frequency	10 kHz
Peak phase AC current [30 s]	550 A _{rms}
Maximum continuous phase AC current	300 A _{rms}
Maximum DC current [1 ms]	1600 A
Maximum continuous DC current	450 A
Energy density ¹	250%
Mechanical traction power	240 kW

1. Compared to 390 volt/215 A traction inverter from 2009

資料來源：Steven Keeping

換為馬達所需的交流電，以產生移動車輛所需的扭矩。牽引變頻器的電氣性能對車輛的加速和行駛里程有很大影響。

現代牽引變頻器的高壓電池驅動系統電壓為 400 伏特，或者到最近的 800 伏特。在牽引變頻器電流為 300 安培 (A) 或更大的情況下，由 800 伏特電池系統供電的設備能夠提供超過 200 千瓦 (KW) 的功率。隨著功率的攀升，變頻器的尺寸也在縮小，大幅地增加了功率密度。

擁有 400 伏特電池系統的電動車，需要牽引變頻器採用額定電壓為 600 至 750 伏特的功率半導體元件，而 800 伏特的車輛則

需要額定電壓為 900 至 1200 伏特的半導體元件。牽引變頻器中使用的功率元件也必須能夠處理 30 秒 (s) 超過 500A 的峰值交流電流和 1 毫秒 (ms) 內 1600A 的最大交流電流。此外，用於該設備的開關電晶體和閘極驅動器也必須能夠處理這些大的負載，同時保持高的牽引變頻器效率 (表 1)。

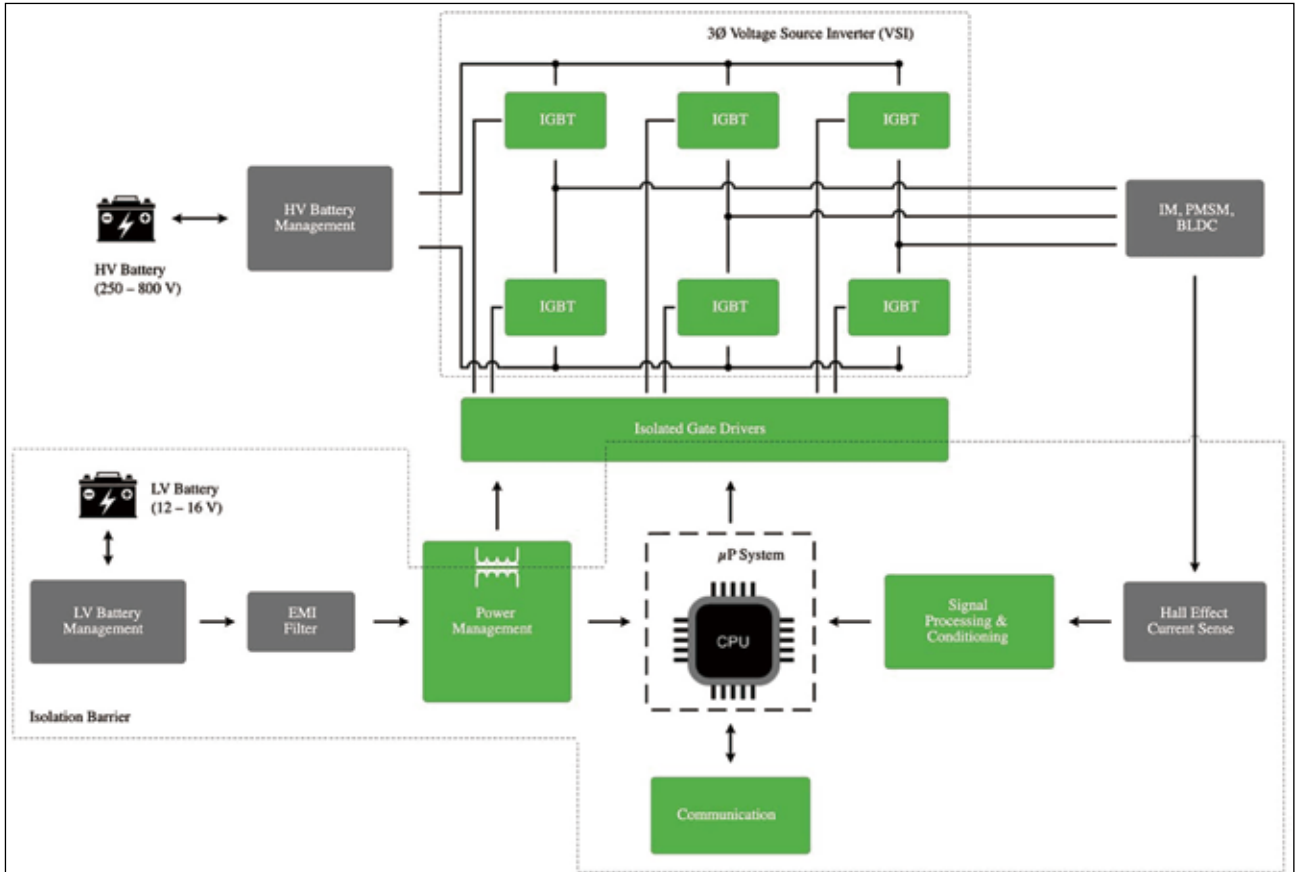
牽引變頻器通常包括三個半橋元件 (高壓側加低壓側開關)，每個馬達相位都有一個，閘極驅動器控制著每個電晶體的低壓側開關。整個元件必須與為車輛其他系統供電的低壓 (LV) 電路進行電隔離 (圖 1)。

圖 1 所示例子中的開關是 IGBT。這類變頻器一直是牽引變頻器的熱門選擇，因為它們能夠處理高電壓，開關迅速，提供良好的效率，而且價格相對便宜。然而，隨著 SiC 功率 MOSFET 成本的下降和它們在商業上的普及，工程師們正在轉向這些元件，因為它們比 IGBT 具有明顯的優勢。

用於高效率閘極驅動器的 SiC MOSFET 的優勢

與傳統矽 (Si) MOSFET 和 IGBT 相比，SiC 功率 MOSFET 的關鍵性能優勢來自於元件的 WBG

圖 1：電動車需要一個三相電壓源變頻器 (牽引變頻器) 以將高壓 (HV) 直流電池電源轉換為車輛馬達所需的交流電源。高壓系統，包括牽引變頻器，與車輛的傳統 12 伏特系統隔離。



圖片來源：onsemi

半導體襯底。矽 MOSFET 的能隙能量為 1.12 電子伏特 (eV)，而 SiC MOSFET 為 3.26eV。這意味著 WBG 電晶體可以承受比矽元件高得多的擊穿電壓，以及由此產生的擊穿場電壓比矽元件高十倍左右。高擊穿場電壓允許在既定電壓下減少元件的厚度，降低“導通”電阻 ($R_{DS(ON)}$)，進而減少開關損耗並提高載流能力。

SiC 的另一個關鍵優勢是它的導熱性，大約比 Si 高三倍。較高的導熱性能使得在一定的功率耗散下結溫 (T_j) 上升較小。SiC MOSFET 還可以容忍比 Si 更高的最大結溫 ($T_{j(max)}$)。矽 MOSFET 的典型 $T_{j(max)}$ 值為 150°C；SiC 元件可以承受高達 600°C 的 $T_{j(max)}$ ，儘管商業元件的額定溫度通常為 175 至 200°C。表 2 提供了 Si 和 4H-SiC (通常用於製造 MOSFET 的 SiC 結晶形式) 之間的性能比較。

高擊穿電壓、低 $R_{DS(ON)}$ 、高導熱性和高 $T_{j(max)}$ 使得 SiC MOSFET 能夠處理比類似尺寸的 Si MOSFET 高得多的電流和電壓。

IGBT 也能夠處理高電壓和高電流，並且往往比 SiC MOSFET 更便宜——這是它們在牽引變頻器設計中得到青睞的一個關鍵原因。IGBT 也有缺點，特別是當開發者希望最大限度地提高能量密度時，由於其“尾電流”和相對較慢的關斷速度，對最大工作頻率有限制。相比之下，SiC MOSFET 能夠處理與 Si MOSFET 相同的高頻開關，但具有 IGBT 的電壓和電流處理能力。

表 2：SiC MOSFET 的擊穿電場、熱導率和最大結溫使之成為大電流和高電壓開關應用中比 Si 更好的選擇。

Properties	Si	4H-SiC	GaN
Bandgap Energy (eV)	1.12	3.26	3.50
Electron Mobility (cm ² /Vs)	1400	900	1250
Hole Mobility (cm ² /Vs)	600	100	200
Breakdown Field (MV/cm)	0.3	3.0	3.0
Thermal Conductivity (W/cm ² °C)	1.5	4.9	1.3
Maximum Junction Temperature (°C)	150	600	400

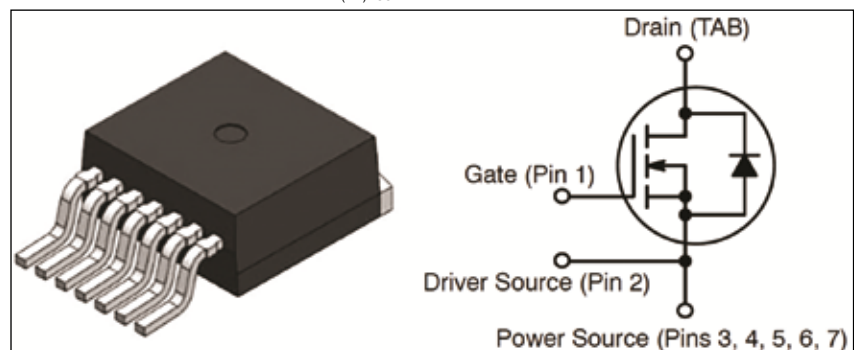
圖片來源：onsemi

SiC MOSFET 應用越來越廣泛

直到最近，由於 SiC MOSFET 的價格相對較高，它們的使用僅限於豪華電動車的牽引變頻器，但價格的下降使 SiC MOSFET 成為更多應用的選擇。

onsemi 的 NTBG020N090SC1 和 NTBG020N120SC1 是這種新一代 SiC 功率 MOSFETS 的兩個實例。

圖 2：NTBG020N090SC1 和 NTBG020N120SC1 N 溝道 SiC 功率 MOSFET 都採用 D²PAK-7L 封裝，主要區別在於其 $V_{(BR)DSS}$ 值分別為 900 和 1200 伏特。



圖片來源：Steven Keeping，使用了 onsemi 的材料

這兩種元件的主要區別是：前者的最大漏源極擊穿電壓 ($V_{(BR)DSS}$) 為 900 伏特，閘源電壓 (V_{GS}) 為 0 伏特，連續漏極電流 (I_D) 為 1 毫安培 (mA)；而後者的最大 $V_{(BR)DSS}$ 為 1200 伏特 (在相同條件下)。這兩個元件的最大 T_j 是 175°C。這兩個元件都是單 N 溝道 MOSFET，採用 D²PAK-7L 封裝 (圖 2)。

NTBG020N090SC1 的 $R_{DS(ON)}$ 為 20 毫歐 (mΩ)， V_{GS} 為

15 伏特 ($I_D = 60\text{ A}$, $T_j = 25^\circ\text{C}$)， $R_{DS(ON)}$ 為 $16\text{ m}\Omega$ ， V_{GS} 為 18 伏特 ($I_D = 60\text{ A}$, $T_j = 25^\circ\text{C}$)。最大連續漏源二極體正向電流 (I_{SD}) 為 148 A ($V_{GS} = -5\text{ V}$, $T_j = 25^\circ\text{C}$)，最大脈衝漏源二極體正向電流 (I_{SDM}) 為 448 A ($V_{GS} = -5\text{ V}$, $T_j = 25^\circ\text{C}$)。

NTBG020N120SC1 則在 V_{GS} 為 20 伏特時具有 $28\text{ m}\Omega$ 的 $R_{DS(ON)}$ ($I_D = 60\text{ A}$, $T_j = 25^\circ\text{C}$)。最大 I_{SD} 為 46 A ($V_{GS} = -5\text{ V}$, $T_j = 25^\circ\text{C}$)，最大 I_{SDM} 是 392 A ($V_{GS} = -5\text{ V}$, $T_j = 25^\circ\text{C}$)。

使用 SiC MOSFET 進行設計

儘管 SiC MOSFET 具有優勢，但希望將 SiC MOSFET 納入其牽引變頻器設計的設計人員應該注意一個重要的複雜問題，即這種電晶體有棘手的閘極驅動要求。其中一些挑戰來自於這樣一個事實：與 Si MOSFET 相比，SiC

MOSFET 表現出較低的跨導、較高的內部閘極電阻，並且閘極開啓閾值可能低於 2 伏特。因此，在關斷狀態下，閘極必須被拉到地電位以下 (通常為 -5 V)，以確保正確的開關。

然而，關鍵的閘極驅動挑戰來自於必須應用大的 V_{GS} (高達 20 V) 以確保低 $R_{DS(ON)}$ 。在太低的 V_{GS} 下操作 SiC MOSFET 可能會導致熱應力，甚至由於功率耗散而失效 (圖 3)。

此外，由於 SiC MOSFET 是一個低增益元件，設計者在設計閘極驅動電路時必須考慮到這對其他幾個重要動態特性的影響。這些特性包括閘極電荷米勒平臺和對過電流保護的要求。

這些複雜的設計要求專用閘極驅動器具有以下屬性：

- 能夠提供 -5 至 20 伏特的 V_{GS} 驅動，以充分利用 SiC MOSFET

的性能優勢。為了提供足夠的開銷以滿足這一要求，閘極驅動電路應能承受 $V_{DD} = 25\text{ V}$ 和 $V_{EE} = -10\text{ V}$ 。

- V_{GS} 必須有快速的上升和下降邊緣，大約為幾奈秒 (ns)。

- 閘極驅動必須能夠在整個 MOSFET 米勒平臺區域內提供數安培的高峰值閘極電流。

- 灌電流的額定值應超過僅對 SiC MOSFET 的輸入電容放電所需的電流。對於高性能的半橋電源拓撲結構，應考慮 10 A 級的最小峰值灌電流額定值。

- 實現高速開關的低寄生電感。

- 小型驅動器封裝能夠盡可能地靠近 SiC MOSFET，以提高能量密度。

- 去飽和 (DESAT) 功能能夠進行檢測、故障報告和保護，以實現長期可靠的運行。

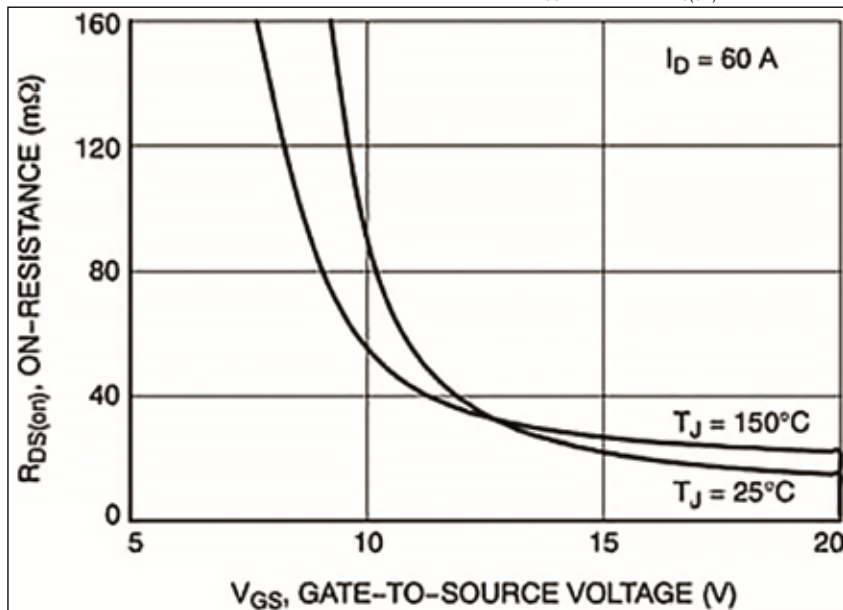
- 一個 V_{DD} 欠壓鎖定 (UVLO) 電平與開關開始前 $V_{GS} > 16\text{ V}$ 的要求相匹配。

- 提供 V_{EE} UVLO 監測能力，以確保負電壓軌在可接受的範圍內。

onsemi 已推出一款閘極驅動器，旨在滿足牽引變頻器設計的上述要求。NCP51705MNTXG SiC MOSFET 閘極驅動器具有高整合度，因此不僅與其 SiC MOSFET 相容，而且與眾多製造商的产品相容。該元件包括許多通用閘極驅動器所共有的基本功能，但也具有使用最小外部元件設計可靠的 SiC MOSFET 閘極驅動電路所必需的專門要求。

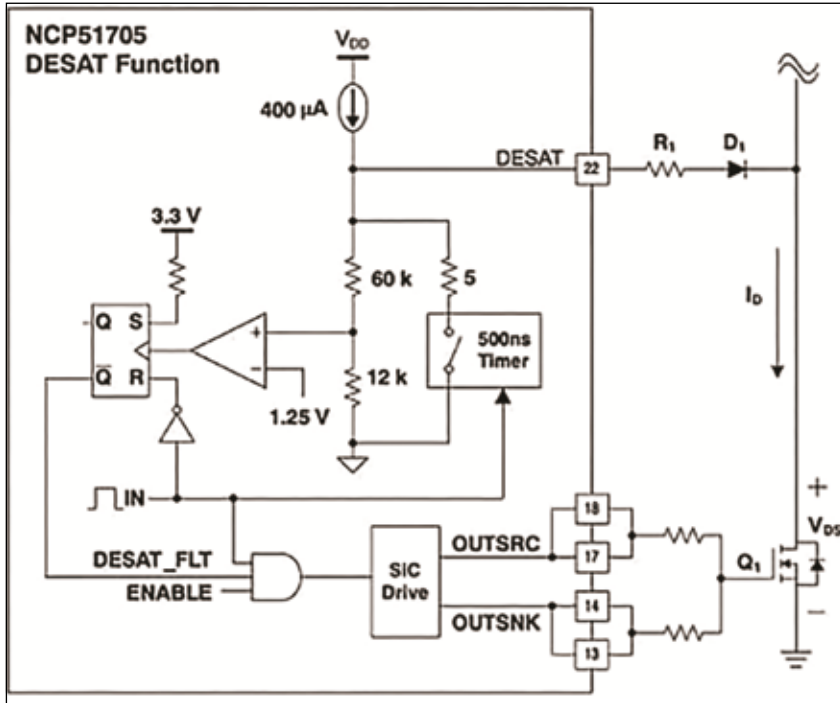
例如，NCP51705MNTXG

圖 3：對於 NTBG020N090SC1 SiC MOSFET，需要高 V_{GS} 以避免高 $R_{DS(ON)}$ 帶來熱應力。



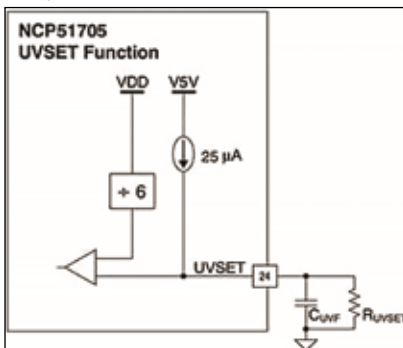
圖片來源：onsemi

圖 4：NCP51705MNTXG 的 DESAT 功能能夠測量 V_{DS} 在最大 I_D 期間的異常行為，並實現過電流保護。



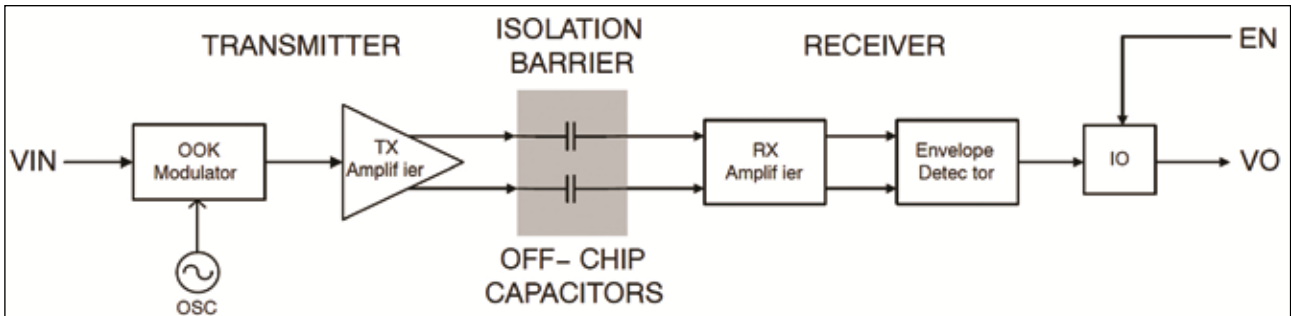
圖片來源：onsemi

圖 5：NCP51705MNTXG SiC MOSFET 的 UVLO 開啓閾值透過 UVSET 電阻 R_{UVSET} 設置，具體電阻值根據所需的 UVLO 開啓電壓 V_{ON} 選擇。



圖片來源：onsemi

圖 6：NCID9211R2 數位隔離器單通道結構的方框圖。晶片外電容器構成了隔離閘。



圖片來源：onsemi

NCP51705MNTXG 閘極驅動器還具有可設定的欠壓鎖定功能。在驅動 SiC MOSFET 時，這是一個重要的功能，因為開關元件的輸出應該被禁用，直到 V_{DD} 高於一個已知的閾值。允許驅動器在低 V_{DD} 下開關 MOSFET 會損壞元件。NCP51705MNTXG 的可設定 UVLO 不僅可以保護負載，而且可以向控制器驗證所施加的 V_{DD} 是否高於開啓閾值。UVLO 的開啓閾值是透過 UVSET 和 SGND 之間的一個電阻設置的 (圖 5)。

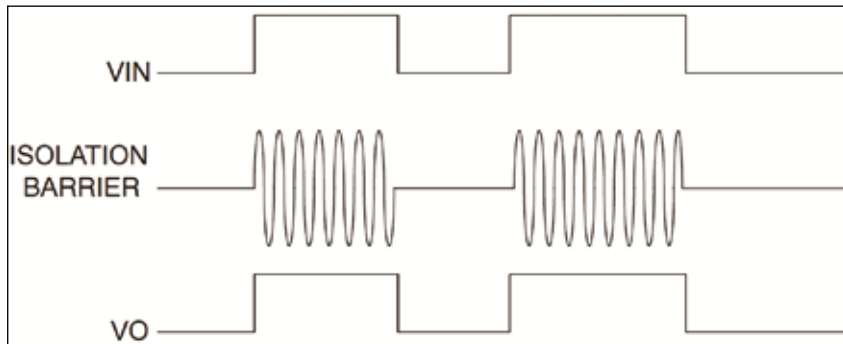
牽引變頻器的數位隔離

為了完成牽引變頻器的設計，工程師必須確保車輛的低壓側電子裝置與通過變頻器的高電壓和電流隔離 (上圖 2)。然而，由於控制高壓閘極驅動器的微處理器在低壓側，任何隔離都必須允許數位訊號從微處理器傳遞到閘極驅動器。onsemi 也提供了一種實現這種功能的元件，即 NCID9211R2，一種高速、雙通道、雙向陶瓷數位隔離器。

NCID9211R2 是一個電隔離的全雙工數位隔離器，允許數位訊號在系統之間傳遞而不產生接地迴路或危險電壓。該元件具有 2000

整合了一個 DESAT 功能，只需使用兩個外部元件就可以實現。DESAT 是 IGBT 和 MOSFET 的一種過電流保護形式，用於監測故障，據此 V_{DS} 就可以上升到最大 I_D 。這可能會影響效率，在最壞的情況下，可能會損壞 MOSFET。圖 4 顯示了 NCP51705MNTXG 如何透過 R_1 和 D_1 的 DESAT 接腳來監測 MOSFET (Q_1) 的 V_{DS} 。

圖 7：NCID9211 數位隔離器使用 OOK 調製跨越隔離閘來傳輸數位資訊。



圖片來源：onsemi

伏特峰值最大工作絕緣能力，100 千伏特 / 毫秒 (kV/ms) 的共模抑制，以及每秒 50 兆位元 (Mbit/s) 的數據傳輸量。

圖 6 所示為晶片外陶瓷電容器構成的隔離閘。

數位訊號使用 ON-OFF 開關鍵控 (OOK) 調製方式穿過隔離閘

進行傳輸。在發射器一側，VIN 輸入邏輯狀態被高頻載波訊號調製。由此產生的訊號被放大並傳輸到隔離閘。接收端檢測隔離閘訊號，並使用包絡檢測技術對其進行解調 (圖 7)。當輸出允許控制 EN 為高電平時，輸出訊號決定了 VO 的輸出邏輯狀態。當發射器電源關閉，

或 VIN 輸入斷開時，VO 默認為高阻抗低電平狀態。

結語

SiC 功率 MOSFET 是高效率和高功率密度電動汽車牽引變頻器的好選擇，但其電氣特徵在閘極驅動器和元件保護方面也帶來獨特的設計挑戰。除了設計上的挑戰，工程師們還必須確保他們的牽引變頻器設計能夠與車輛敏感的低壓電子裝置進行高級別隔離。

如上所述，為方便工程開發，onsemi 推出了一系列 SiC MOSFET、專用閘極驅動器和數位隔離器，以滿足牽引變頻器的要求，並在現代電動汽車的長距離和高性能要求之間取得了更好的平衡。 CTA

經濟部發表全球穿透率最高透明螢幕規格超越韓廠逾兩倍攜手面板大廠 開發智慧座艙系統

經濟部技術處近日在 2023 年 Touch Taiwan 科專成果主題館中，展示 23 項智慧顯示創新科技！其中，全球首創的「高透明顯示系統」，穿透率達 85% 以上，超越韓廠逾兩倍，並與面板大廠合作開發搭載高透明顯示系統的智慧座艙，預計最快兩年將可聯合歐系車廠搶攻上千億元商機。此外，這項技術也與海洋科技博物館合作，將於今年暑假在大型水族缸上打造高達 165 吋的顯示互動系統，未來更可應用在運動賽事、博物館、畫廊等多元場域，民眾透過高透明螢幕除可觀賽、觀展外，更可在玻璃上同步獲取多元資訊，拓展多元的虛實融合體驗。

經濟部技術處處長邱求慧表示，目前大陸面板全球市佔率達 67%，臺灣目前為 18%，略勝日韓的 15%，面對低價競爭，產業需發展高階車用面板等高附加價值產品，才能在全球競爭下彎道超車。經濟部技術處過去 4 年來投入 45 億元新臺幣以開發智慧顯示系統、拓展場域應用、拓展場域應用等三大策略，補助法人及業者投入相關技術研發，至今已累計超過 100 項研發成果、促進研發投資超過 102 億元新臺幣。

工研院在經濟部技術處補助下，持續整合虛實融合技術與系統能量，攜手產業加速開發高價值、差異化創新技術。打造出全球首創高舒適性觀光導覽系統，資訊會因應車子晃動而做對應的動態補償與提供類似遠方恆定水平面圖像，提供乘客舒適不暈眩的虛實融合觀光導覽系統使用體驗，並透過手勢與景點資訊進行互動，帶來更舒適的觀光搭乘體驗。面對產品智慧化趨勢，運用封裝技術將多個晶片高度整合以提升運算速度為必要關鍵，「適應形圖案化 IC 封裝技術整合方案」具備即時調整黃光製程圖案的能力，不需傳統光罩即可讓晶片線路連接率達 100%，此技術已與海內外設備與材料大廠合作，未來可應用於伺服器運算晶片、AI 晶片與智能車晶片先進封裝技術，讓臺灣持續站穩全球供應鏈地位。