

## Technical Article

## 幫助汽車設計師藉由 LLC 拓撲結構提升功率密度與系統可靠性



Andrew Plummer



車用電源設計師產出的成品除了需符合外型尺寸與效率等規格外，還必須選擇合適的拓撲結構與控制器，以符合國際標準化組織 ISO 26262 所定義的汽車安全完整性等級標準。過去設計師會採用簡單的類比脈衝寬度調變 (PWM) 控制器，並配置於半橋式拓撲結構中。但對於需要進階保護機制或更高效率的系統而言，PWM 控制器可能無法滿足需求。

最新的混合動力或電動車 (EV) 為了最大化續航力與安全性，需要更高的功率密度、輕負載性能與更佳的可靠性，因此促使設計師積極探索用於動力系統的創新架構，例如輔助模組、備援模組、分散式模組與區域模組。為了減少排放，摩托車、高爾夫球車、堆高機，甚至割草機的製造商皆開始投入於高電壓電池組、電動化車型與充電基礎設施的發展。輕型電動車 (LEV) 設計師需要能提供高功率密度、同時不犧牲成本或可靠性的產品。

與 PWM 控制器型半橋式轉換器相比，電感 - 電感 - 電容 (LLC) 拓撲結構因其固有的共振與零電壓切換 (ZVS) 特性，能提供更佳的效率與電磁相容性 (EMC)。儘管 LLC 拓撲結構具備諸多優勢，包括極低的待機功耗與低可聽噪音，但電動車製造商對於是否採用 LLC 拓撲結構一事卻始終持保留態度，原因在於其操作輸入電壓範圍受限。車用 DC/DC 轉換器必須支援廣泛的輸入電壓、輸出電壓，或兩者兼具，才能在冷車啟動、暫態變化或碰撞相關事件中維持穩定性能。

UCC25661 (Q1) 等 LLC 控制器的技術創新，正在推動 LLC 拓撲結構於汽車與電動車充電應用中的全新使用情境。在電動車領域中，LLC 拓撲結構可應用於冗餘電源、輔助電源、區域模組電源或熄火後的持續供電電源。對於輕型電動車，LLC 拓撲結構可用於車載 DC/DC 轉換器，或車外的充電器/轉接器。在上述各種應用中，為了提升車輛續航力並降低成本，高效率與最小尺寸都是不可或缺的關鍵，特別是在車輛內部配有多個 LLC 轉換器時更是如此，如圖 1 的區域模組所示。

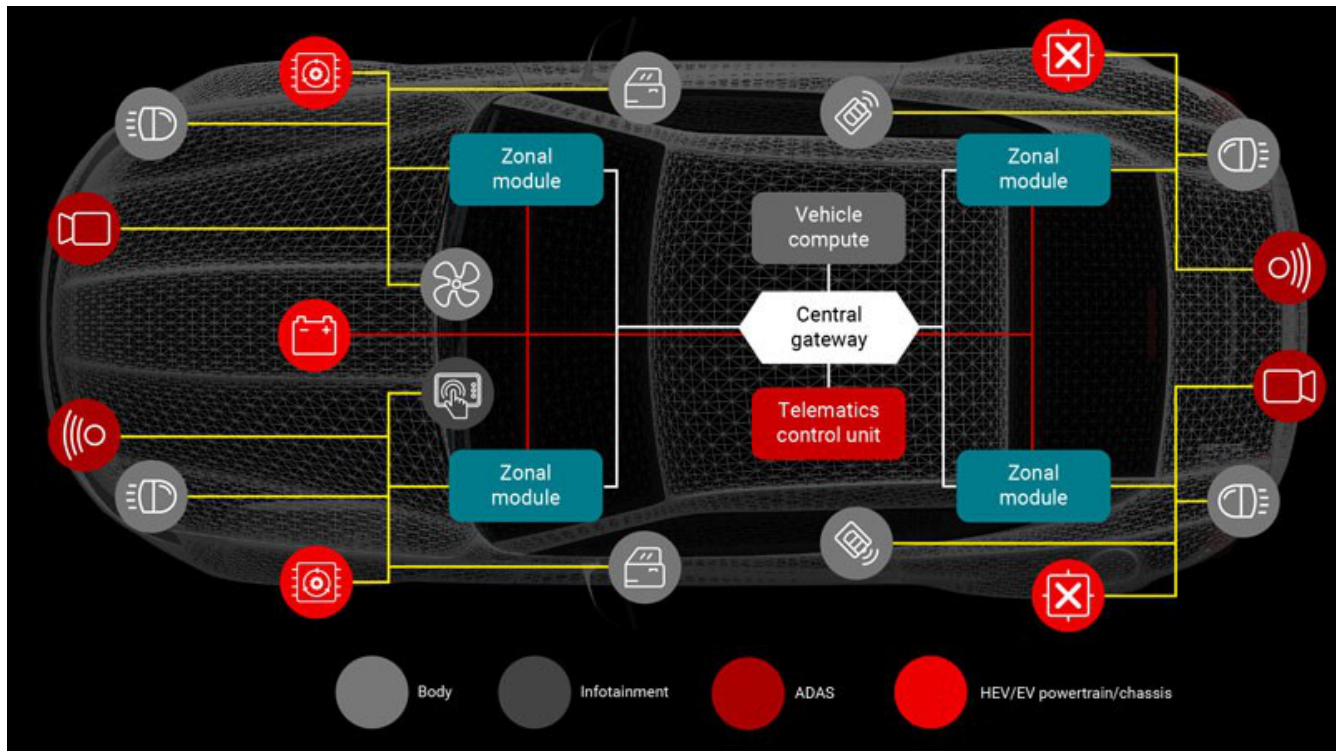


图 1. 區域架構

### 在汽車系統中運用 LLC 拓撲結構提升功率密度

在隔離式電源供應器中，磁性元件通常決定其體積與重量。體積與切換頻率成反比，因為在固定輸出功率下，每個切換週期所需儲存或輸送的能量較少。

UCC25661-Q1 LLC 控制器具備 750kHz 共振頻率，有助於縮減磁性元件的尺寸與重量，進而降低成本並提升可靠性。在車輛中部署多個 LLC 轉換器，更能加倍體現使用小體積、低重量磁性元件的效益。

PWM 控制器雖可支援高頻率運作，但由於採用硬切換，在未使用大型 EMI 濾波器的情況下，要符合如國際無線電干擾特別委員會 (CISPR) 25 所規範的 EMI 限制將十分困難。由於功率級中具有共振電路，因此 LLC 控制器天生具備軟切換特性。因此，相較於硬切換的半橋式拓撲結構，LLC 拓撲結構產生的傳導性 EMI 與切換損耗更少。

圖 2 說明了硬切換與軟切換 (ZVS) 之間的差異。

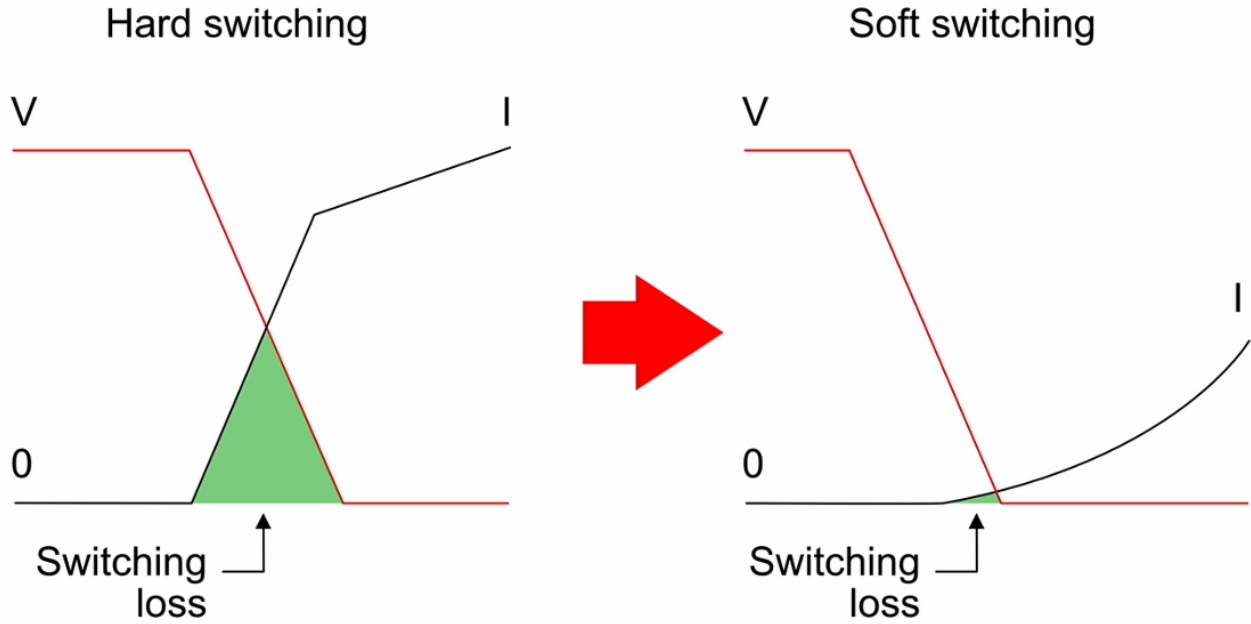


圖 2. 半橋式 PWM 控制器與 LLC 控制器的切換事件波形範例

### 透過 IPPC 解鎖全新應用場景

UCC25661-Q1 LLC 控制器整合 TI 的輸入功率比例控制 (IPPC) 功能，可支援如電池充電（輕型電動車轉接器、充電站或輔助電源）等寬輸出電壓應用。IPPC 同樣支援電動車中電池供電 DC/DC 系統的寬輸入電壓應用。輕型電動車正在從 12V 至 36V 的低電壓電池組，過渡至 48V 甚至高於 96V 以上的電壓，盡可能延長行駛距離。

得益於支援寬輸出電壓範圍的 LLC 架構，工程師得以設計出在低電池電壓下不會進入突衝模式的 LLC 轉換器，進而保護電池壽命。在調整突衝模式的性能穩定性時，IPPC 亦可縮短開發時間。UCC25661-Q1 中的 IPPC 可大幅降低控制器在供電時所需的切換頻率，突破傳統 LLC 控制定律的限制。此機制移除後，可協助工程師避免在車內與車外的電池應用中觸發不必要的過載保護。

在停用功率因數校正，且不啟動過載功率限制的情況下，IPPC 也能提升供電效率。混合突衝模式不僅可降低可聽噪音，也可改善輕負載與無負載下的效能，對於防止電池耗盡至關重要。

UCC25661-Q1 配備強大的保護功能，包括預偏壓啟動、緩啟動與電容區域規避機制，打造高度可靠的電源設計。

### 透過整合功能簡化並保護您的電源供應單位

UCC25661-Q1 的自適應緩啟動功能可穩定逐步提高供應電壓，讓連接至 VDD 針腳的電容器在啟動前充分充電，以保護電源供應器免受突波電流的衝擊。

根據負載條件，採用 LLC 控制器的電源轉換器可能在電容區或共振區中運作。在電容區域運作可能對功率級造成嚴重損壞。雖然多數 LLC 控制器可在偵測到電容區運作時停止運行，但 UCC25661-Q1 具備電容區域規避機制，可主動終止開極驅動，進而避免損壞。

## 結論

電動車仰賴如 LLC 拓撲結構等隔離式電源架構的進展，以及 IPPC 等控制方法，以實現符合次世代架構需求的 DC/DC 轉換器設計。以 UCC25661-Q1 LLC 控制器為基礎的隔離式 DC/DC 轉換器，能在維持性能的同時，以相同甚至更小的體積提供更高效率的功率輸出。

## 其他資源

- 歡迎閱讀以下應用說明：
  - [UCC25661x-Q1 系列 750kHz 寬輸入/輸出電壓範圍 LLC 控制器，針對輕載效率最佳化的產品規格表。](#)
  - [UCC25661x 選擇指南。](#)
- 歡迎查看以下參考設計：
  - [通用輸入、500W 恆定電流與恆定電壓電動自行車充電器參考設計。](#)
  - [適用於輕型電動二輪車的 750W 車外充電器參考設計。](#)

## 註冊商標

所有商標皆屬於其各自所有者之財產。

## 重要聲明與免責聲明

TI 均以「原樣」提供技術性及可靠性數據（包括數據表）、設計資源（包括參考設計）、應用或其他設計建議、網絡工具、安全訊息和其他資源，不保證其中不含任何瑕疵，且不做任何明示或暗示的擔保，包括但不限於對適銷性、適合某特定用途或不侵犯任何第三方知識產權的暗示擔保。

所述資源可供專業開發人員應用 TI 產品進行設計使用。您將對以下行為獨自承擔全部責任：(1) 針對您的應用選擇合適的 TI 產品；(2) 設計、驗證並測試您的應用；(3) 確保您的應用滿足相應標準以及任何其他安全、安保或其他要求。

所述資源如有變更，恕不另行通知。TI 對您使用所述資源的授權僅限於開發資源所涉及 TI 產品的相關應用。除此之外不得複製或展示所述資源，也不提供其它 TI 或任何第三方的知識產權授權許可。如因使用所述資源而產生任何索賠、賠償、成本、損失及債務等，TI 對此概不負責，並且您須賠償由此對 TI 及其代表造成的損害。

TI 的產品均受 [TI 的銷售條款](#) 或 [ti.com](#) 上其他適用條款，或連同這類 TI 產品提供之適用條款所約束。TI 提供所述資源並不擴展或以其他方式更改 TI 針對 TI 產品所發布的可適用的擔保範圍或擔保免責聲明。

TI 不接受您可能提出的任何附加或不同條款。

郵寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated

## 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](https://www.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 © 2025, Texas Instruments Incorporated