

Application Brief

電池充電應用中的 LLC 諧振控制器：在廣泛輸出電壓範圍內實現高效率



Gowthamraja RM

在電動工具充電器、汽車車載充電器與工業充電器等領域，充電技術的最新進展正促使設計日益緊湊，以在各種負載位準下維持高功率密度與一致的效率。這些設計還提供了嚴苛環境下的性能強化，可承受廣泛的溫度波動和更長時間的運作使用。

半橋式 LLC 拓撲結構非常適合 <1.3kW 功率範圍的充電設計。除了此功率位準外，設計人員通常會改用全橋式 LLC 和相移全橋式 (PSFB) 拓撲結構，以將傳導損耗降到最低並提高效率。UCC25661x 是 TI 最新的 LLC 控制器，相較於前代產品和傳統的 PWM 控制器，可提供更優異的穩壓能力及整合式保護。

UCC25661x 是 TI 最新的離散式 LLC 控制器，具備多項優勢，例如控制器能夠產生高達 750kHz 的諧振等，因此可實現小巧的外形尺寸與高功率密度。在低負載下實作兩種突衝模式，可實現高待機效率，同時消除可聞噪聲。在充電應用中使用輸入功率比例控制 (IPPC) 機制可使裝置產生顯著差異。IPPC 與充電控制或混合磁滯控制等傳統控制機制不同，可在 LLC 轉換器設計中實現最佳的廣泛輸入電壓 (V_{in}) 與廣泛輸出電壓 (V_{out}) 運作。簡單來說，這種廣泛 V_{in}/V_{out} 能力的實現，是因為控制器在調節過程中是根據輸入功率而非輸入電流或頻率來進行控制。下文將進一步詳細說明這些優點。

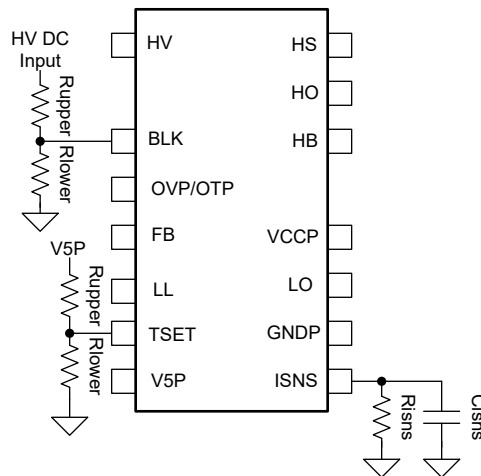


圖 1. IPPC 接腳特定連接

UCC25661x 中的 IPPC 輔助功能使此裝置適用於電池充電應用。以下接腳與 IPPC 相關聯：

1. FB 接腳：FBReplica 取決於流入 FB 接腳的電流，從而實現廣泛輸出電壓 V_{out} 。
2. ISNS 接腳：此接腳用於為電路提供逐週期的 OCP 保護，直接連接至諧振槽。該接腳使用電阻電壓係數 (VCR) 合成器產生內部諧振電容器電壓。
3. BLK 接腳：此接腳用於確定控制器的增益。此外，該接腳還具有過壓/欠壓 (BI/BO) 閾值設定，用於開啟和關閉控制器。
4. TSET 接腳：此接腳用於設定控制器的最低頻率運作，並設定控制器的積分器時間常數。不同的 TSET 選項可設定不同的最低頻率。

表 1. IPPC 在電池充電應用中的優勢

功能	系統優點	系統影響
內部 VCR 合成器	VCR 訊號是透過將帶前饋增益的補償斜率增加到從 ISNS 接腳感測到的訊號上，從而在內部合成。此處可省去外部 VCR 定時電容器。	減少兩個 VCR 電容器，從而降低系統級設計的 BoM
廣泛輸入電壓範圍	由於這裡的回饋訊號與輸出功率成正比，因此 FB 訊號在 V_{in} 和 F_{sw} 變化時的變化較小。	在輸入電壓範圍中維持高效率，同時維持低漣波
無硬切換	V_{TL} 和 V_{TH} FET 的關閉時間（適應性失效時間）由 FB 接腳上的前一個週期輸出決定，從而能夠防止硬切換。	在整個負載範圍內實現高效率，並具有良好的熱性能
OLP 觸發點的變化降至最低	在輸出電壓變化時，OLP 觸發點幾乎保持不變，同時維持恆定功率位準	增強防護，防止功率急劇上升
防止不必要的突衝模式運作	即使在電池電壓較低的情況下，由於 IPPC 的作用，控制器也不會進入故障突衝模式。IPPC 消除了切換頻率對控制電壓的影響，因此電池電壓不會決定控制器的工作頻率，反之亦然。	縮短電池充電時間並提升效率
預偏壓啟動	當電池在啟動時已經有負載的情況下，無需外部電路來保護控制器或電池。一般而言，當啟動期間已存在一些負載時，ACDC PSU 會進入硬切換，導致損耗較高。UCC25661x 可防止這種模式切換和損耗。	無硬切換並將損耗降至最低

通常，電池充電客戶會在閉合迴路的 DC-DC 拓撲結構中實作具有回饋的定電流定電壓 (CC-CV) 迴路。這種實作方式可為多種電池芯組合 (例如 6S 和 12S 電池組) 提供高效率、安全性及電池芯平衡。系統會根據電池負載電阻，以 CC 模式或 CV 模式運作。

1. CC 模式：在 CC 運作模式下，電池電壓從較低值逐漸增加到所需的最高電壓值。電池充電電流值保持恆定。
2. CV 模式：在 CV 運作模式下，電池電壓保持在所需的恆定值，而電流則急劇下降至接近零值。因此，充電功率也會降至較低的值。
3. 涓流充電：為防止電池自行耗盡，系統會以小型突衝充電封包提供約 0A 的電流。當系統偵測到負載電阻略有下降時，就會出現這種現象。

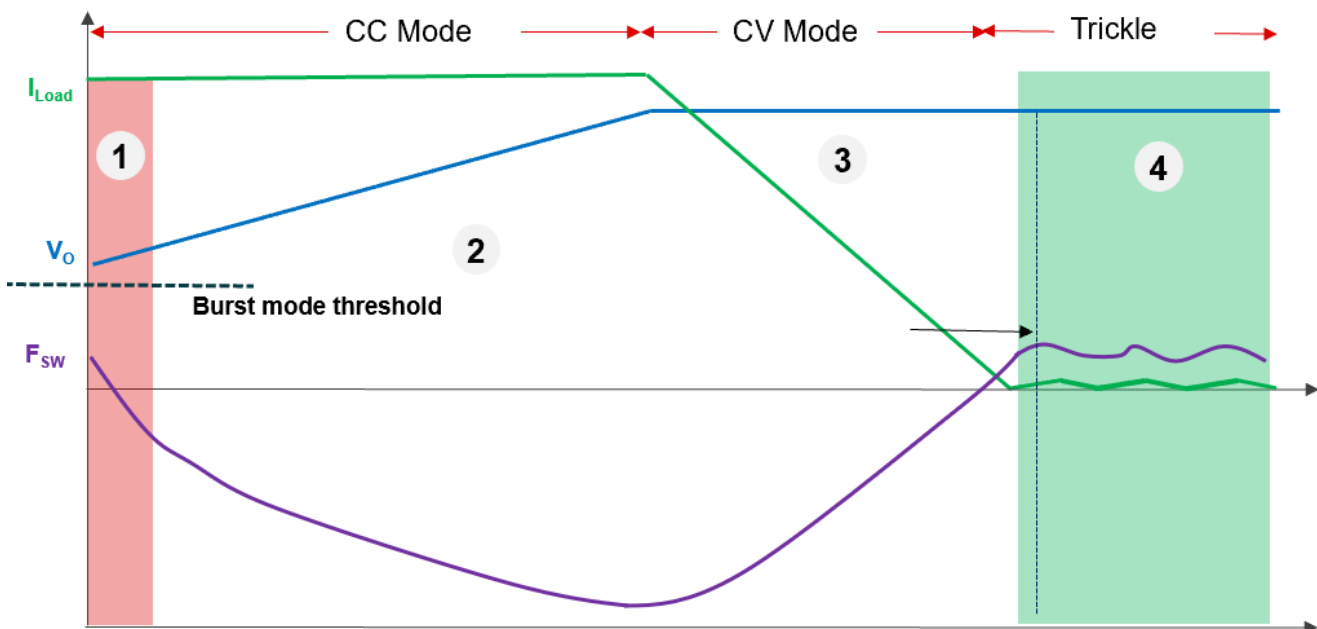

图 2. CC-CV 迴路設定中的不同運作區域

图 2 顯示了在不同運作模式下的 V_o 、負載電流和切換頻率的變化：

1. 區域 1：電池電壓非常低。傳統的 LLC 控制在突衝模式下運作，但 IPPC 可防止控制器進入不必要的突衝模式運作。在此區域內，切換頻率也較高。
2. 區域 2：提供峰值電流，直到電池電壓達到所需值。在恆定電流模式下，產生的功率也會很高，切換頻率會逐漸降低。如果此處的電池電壓非常低（例如，剛離開區域 1 時），傳統的 LLC 控制器的設計可能仍在突衝模式下運作，導致電池充電電流出現巨大的漣波和不必要的可聞噪聲。
3. 區域 3：在此期間，電流逐漸降至接近零值。提供的功率也會逐漸降低，因此在恆定電壓模式期間切換頻率會增加。
4. 區域 4：存在涓流充電以使電池保持在充滿電的模式。控制器會產生小的充電突衝，以避免電池放電。

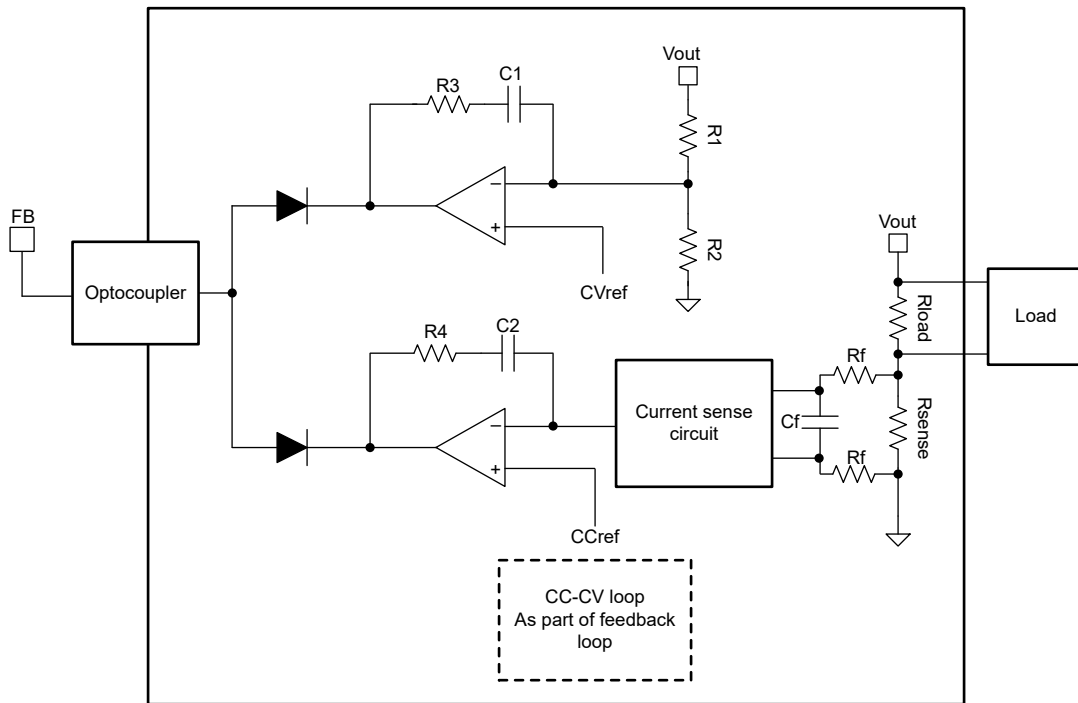
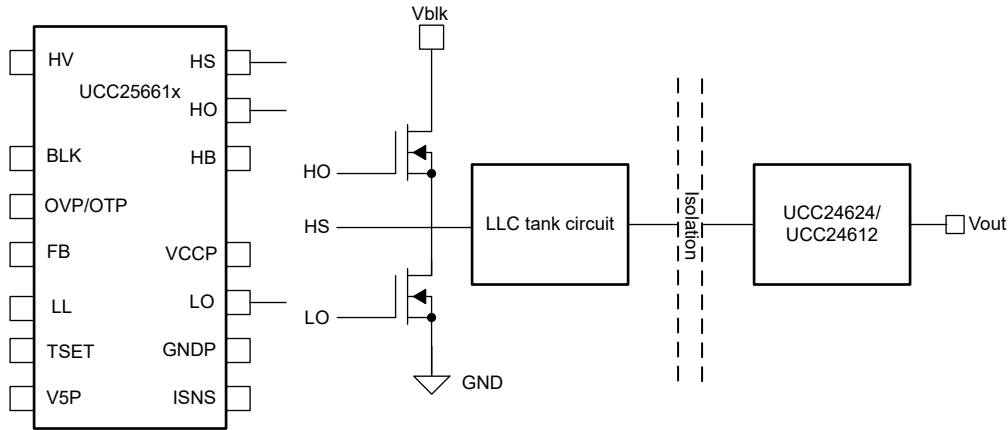


图 3. 使用 UCC25661x 實作典型的 CC-CV 迴路

图 3 中的方塊圖說明了 UCC25661x 在 CC-CV 參考迴路中的設計方式。兩個參考值 CCref 和 CVref 是根據公式方程式 1 和 方程式 2，透過電阻分壓器以 5V 輸入而設定，其中 H = 電流放大器增益：

$$CC_{ref} = \left(\frac{V_{out}}{R_{load}} \right) \times R_{sense} \times H \quad (1)$$

$$CV_{\text{ref}} = \left(\frac{R2}{R1 + R2} \right) \times V_{\text{out}} \quad (2)$$

此參考點決定了電池充電器是在電流控制還是電壓控制下運作。由於在電池充電器的情況下，輸出電壓會隨著輸出電阻的增加而增加，因此我們需要確保滿足電壓增益。因此，我們會取一個 V_{out} 範圍（最大值、最小值、典型值），並嘗試將 LLC 增益與 M_g 曲線進行匹配。由於 UCC25661x 具有廣泛 V_{out} 範圍，因此我們可以隨著 V_{out} 的變化為增益曲線提供良好的裕度。您可以透過插入 V_{out} 值、電路參數來查看 [UCC25661x 設計計算器](#)，並查看這些值的增益曲線。

總之，德州儀器的 UCC25661x 在電池充電技術領域取得了顯著進步，為嚴苛的應用提供了獨特的最佳化和簡化的設計。此控制器採用 IPPC 機制和廣泛輸入/輸出電壓運作範圍，從根本上簡化了 CC-CV 充電迴路的設計和實作。與傳統 LLC 諧振控制器通常需要複雜的調校和最佳化不同，UCC25661x 能夠在廣泛的輸入電壓和負載條件下，從本質上最大化功率傳輸效率並維持嚴格的電壓調節。如需詳細設計準則和應用特定建議，請參閱德州儀器網站上的 [UCC25661x 產品規格表](#) 和相關應用說明。

註冊商標

所有商標均為其各自所有者的財產。

重要聲明與免責聲明

TI 以「現狀」及所含一切錯誤提供技術與可靠數據 (包含產品規格書)、設計資源 (包含參考設計)、應用或其他設計建議、網頁工具、安全資訊和其他資源，且不承擔所有明示或默示保證，包括但不限於適銷性或用於特定用途之適用性的任何默示保證，或不侵害第三方智慧財產的任何默示保證。

所述資源可供專業開發人員應用 TI 產品進行設計使用。您應自行負責 (1) 選擇適合您應用的 TI 產品，(2) 設計、驗證與測試您的應用，與 (3) 確保應用符合適用標準，以及任何其他安全、安保、法規或其他要求。

這些資源得進行修改且無需通知。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 或任何第三方的智慧財產權授權許可。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](#)、[TI 的通用品質指南](#) 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 提供此等資源並不會擴大或以其他方式改變 TI 對於 TI 產品的適用保證或保證免責聲明。除非 TI 明確將某產品指定為自訂或客戶指定型號，否則 TI 產品均為標準、類比、通用裝置。

TI 反對並拒絕您可能提出的任何附加或不同條款。

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

上次更新 10/2025

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATASHEETS), 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 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](#), [TI's General Quality Guidelines](#), or other applicable terms available either on 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. Unless TI explicitly designates a product as custom or customer-specified, TI products are standard, catalog, general purpose devices.

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

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

Last updated 10/2025