

Technical Article

ESS 中雙向 CLLLC 共振轉換器的控制方案



Guangzhi Cui

簡介

單級隔離轉換器，例如雙向電容-電感-電感-電感-電容 (CLLLC) 轉換器，是儲能系統 (ESS) 中常見的轉換器類型，可節省系統成本並提高功率密度。CLLLC 轉換器的增益曲線較為平坦，然而當切換頻率 (f_s) 高於串聯共振頻率 (f_r) 時，增益曲線會出現不理想的過度平坦現象。變壓器和 MOSFET 的寄生電容也會顯著影響轉換器增益 [1]，這將導致轉換器輸出電壓偏離調節範圍。在本篇電源技術指南中，我將介紹一種 CLLLC 控制算法和同步整流 (SR) 控制方法，以消除這種非線性特性，並使用一台 3.6kW 原型轉換器來驗證其性能。圖 1 為住宅 ESS 的方塊圖。

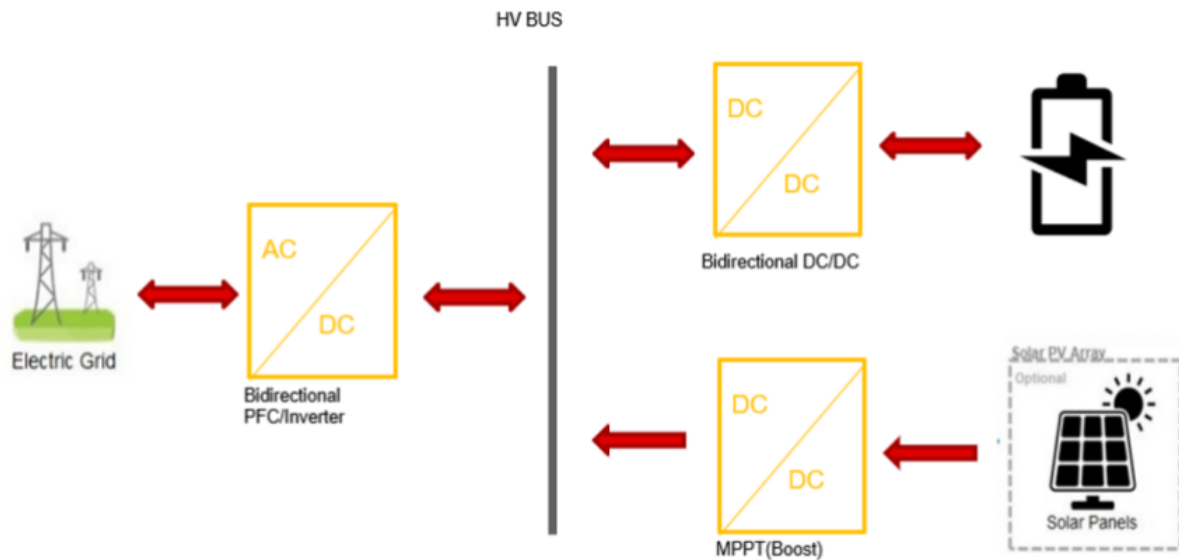


圖 1. 住宅 ESS 方塊圖，包含雙向功率因數校正 (PFC)/逆變器、雙向 DC/DC 轉換器，以及最大功率點追蹤 (MPPT) 功能。來源：德州儀器

控制階段的設計考量

圖 2 顯示具有寄生電容器的全橋 CLLLC 共振轉換器的電路拓撲結構。此拓撲結構由對稱共振電路和全橋結構組成。

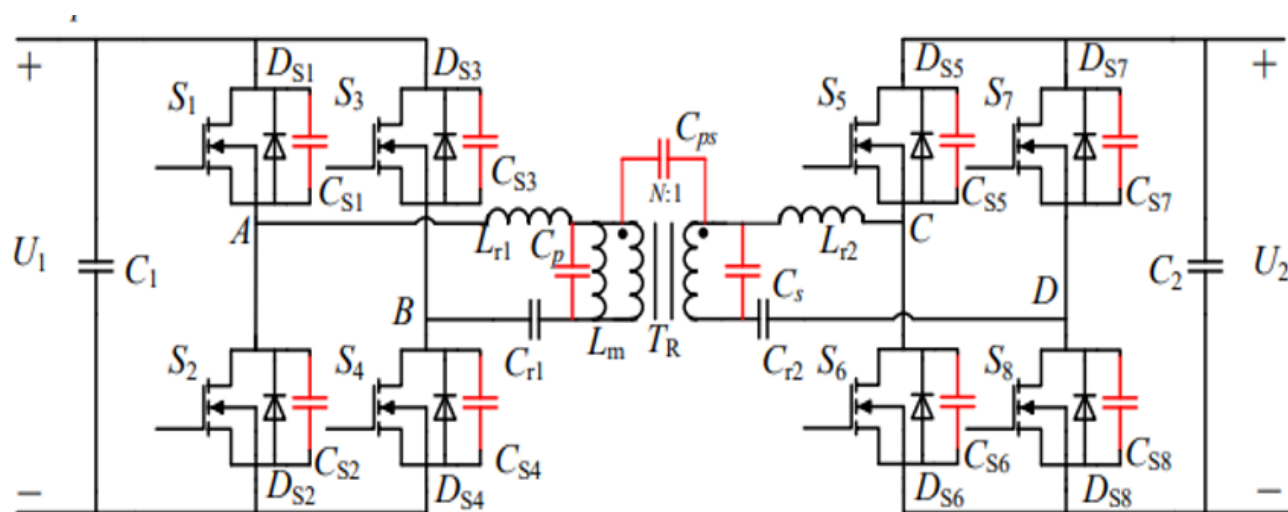


图 2. 具有寄生电容器的全桥 CLLLC 转换器的电路拓撲結構。來源：德州儀器

图 3 顯示 CLLLC 理想的增益曲線。與 LLC 轉換器類似，變頻控制是 CLLLC 共振轉換器常用的控制方案。

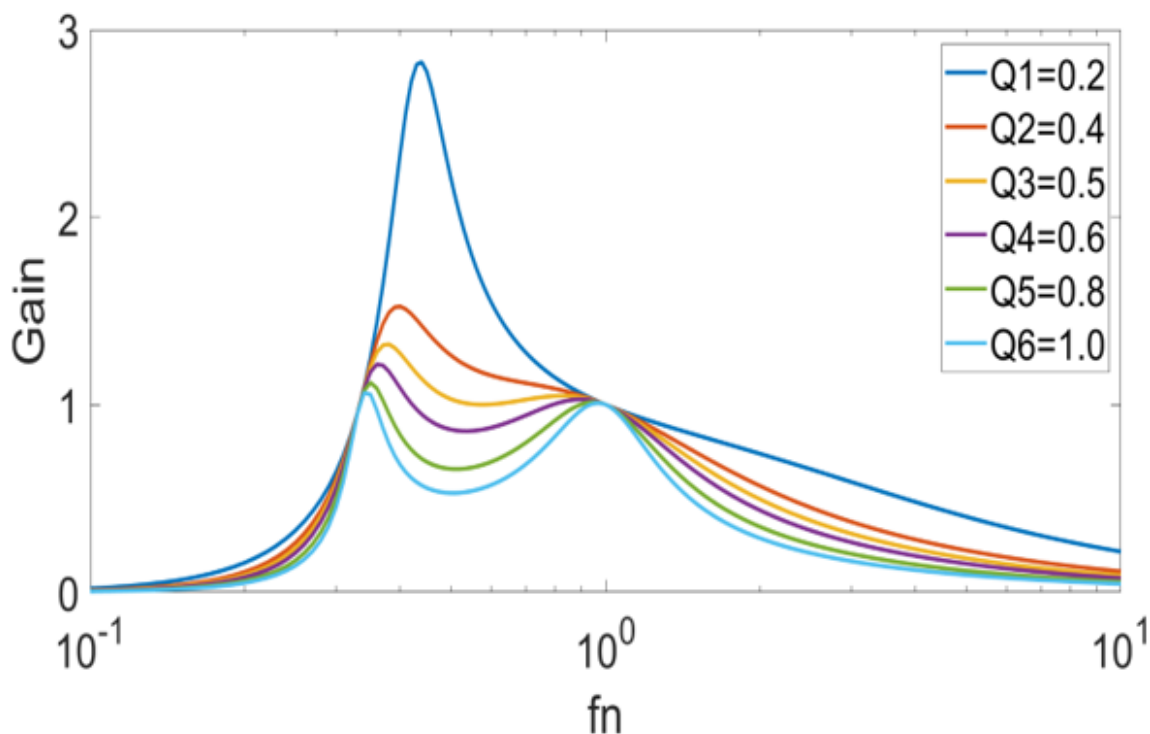


图 3. 採用變頻控制的理想 CLLLC 增益曲線。來源：德州儀器

如前所述，當 f_s 超過 f_r 時，增益曲線會趨於平坦。此外，隨著功率等級提升，轉換器需要在電池側並聯更多 FET 以處理更大電流，這意味著輸出端全橋 FET 的輸出電容 (C_{oss}) 將會變得非常大。考量變壓器繞組間寄生電容與 C_{oss} 等寄生參數時，高頻下的非單調增益曲線問題會特別嚴重，這種情況對應於輕負載條件，如 图 4 所示。

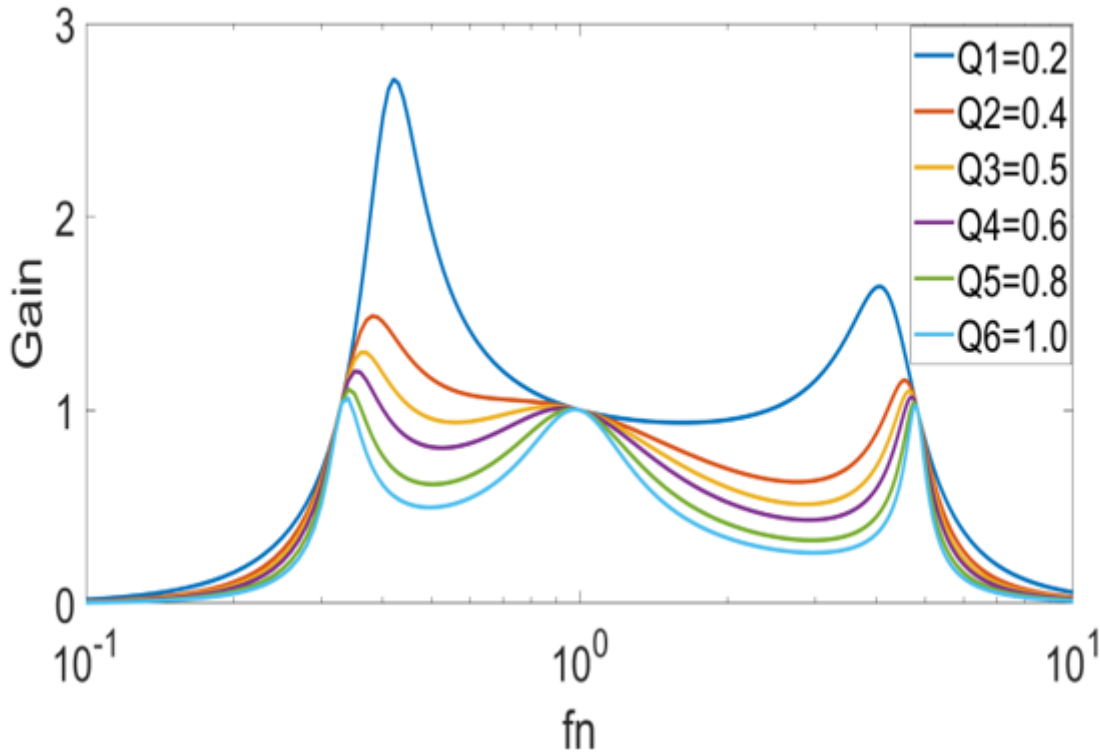


图 4. 考量變壓器繞組間寄生電容及 C_{oss} 等寄生參數的 CLLC 增益曲線。來源：德州儀器

在這種情況下，頻率控制沒有作用。打嗝模式是解決 CLLC 共振轉換器非單調特性的常用方法，但此方法不適用於電池應用，因為當電池電壓較低時，轉換器仍需提供大電流。脈衝寬度調變 (PWM) 與相移控制雖可解決此問題，但 PWM 控制會使電晶體在硬切換狀態下，從而降低效率並限制操作頻率。因此相移控制是較佳的選擇。

控制邏輯

图 5 展示頻率及相移混合控制方案圖表。在啟動階段電池電壓較低時，轉換器需採用軟啟動方式配合較小的充電電流，以抑制高電流突波並延長電池壽命。如果共振電感器值或頻率不夠高，若僅以高頻端進行軟啟動，效果有限。當電池充電接近滿容量時，將轉為小電流涓流充電並維持恆定電壓。這兩種情況都對應轉換器的輕負載工作狀態。在輕負載條件下，由於寄生電容效應，輸出電壓會呈現上升趨勢，根據先前分析最終可能超出調節範圍；此時相移控制可有效調節輸出電壓。控制器的計算結果決定轉換器是否需要進入相移模式。

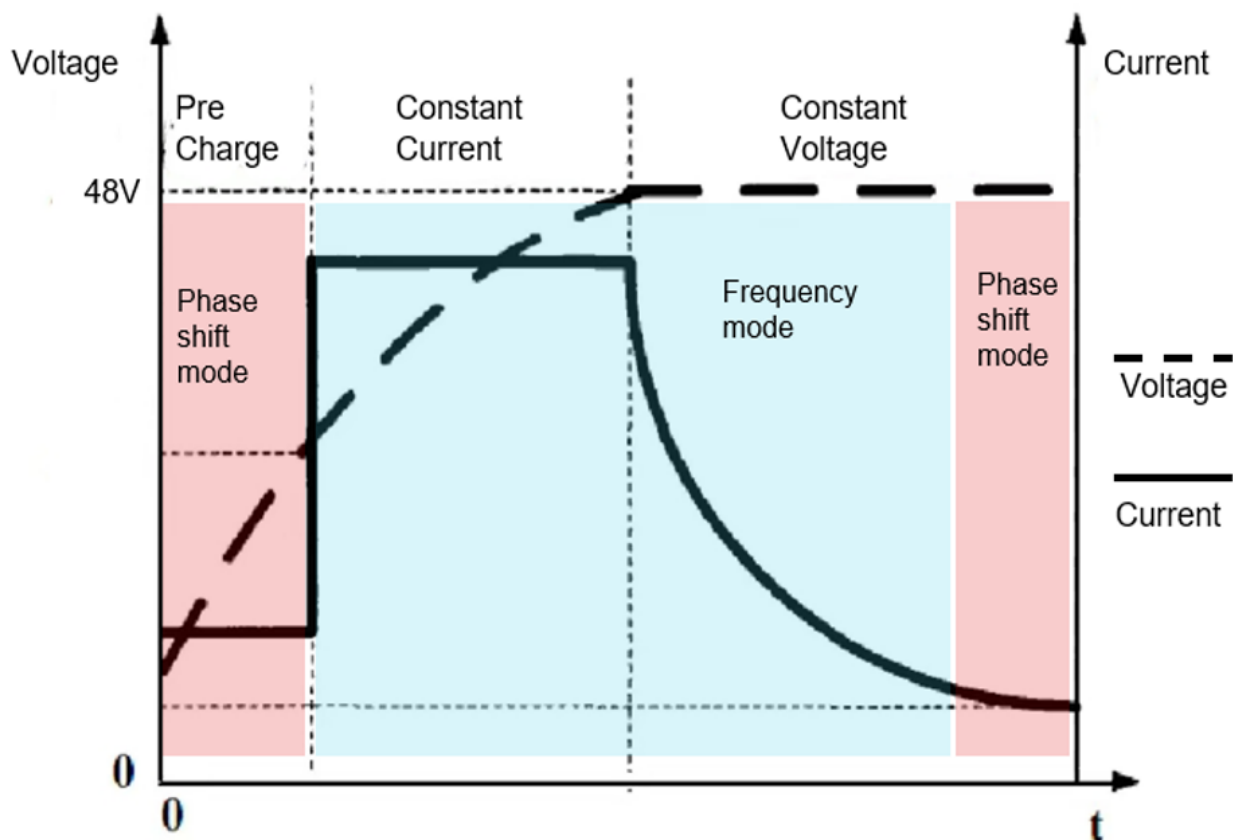


图 5. 不同充電狀態下的控制方案。請注意，在啟動階段電池電壓較低時，轉換器需採用軟啟動方式配合較小的充電電流，以抑制高電流突波並延長電池壽命。來源：德州儀器

图 6 展示頻率和相移之間的調變切換。當負載降低時，系統將提高操作頻率以調節輸出電壓。若計算所得最高頻率高於設定值，轉換器將進入相移調變模式；隨後當負載增加時，相移角會隨之減小以調節輸出電壓。當相移角度降至零時，轉換器將再次進入頻率模式。

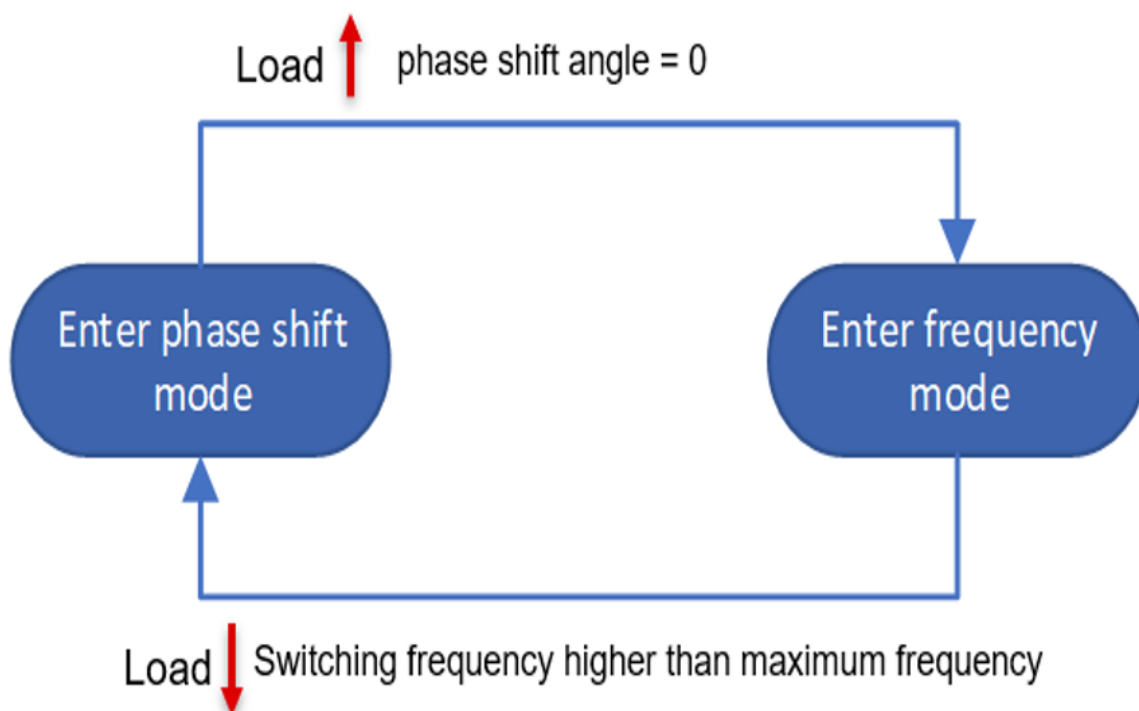


图 6. 频率与相移模式之间的控制方案。当负载降低且相移角为零时，系统将提高操作频率以调节输出电压（频率模式）。如果最大频率高于设定值，相移角度会降低以调节输出电压（相移模式）。来源：德州仪器

寄生电容所造成的问题

在相移模式下，MOSFET 的 C_{oss} 同样会产生此效应，导致共振槽电流与这些电容产生振荡，如图 7 所示。

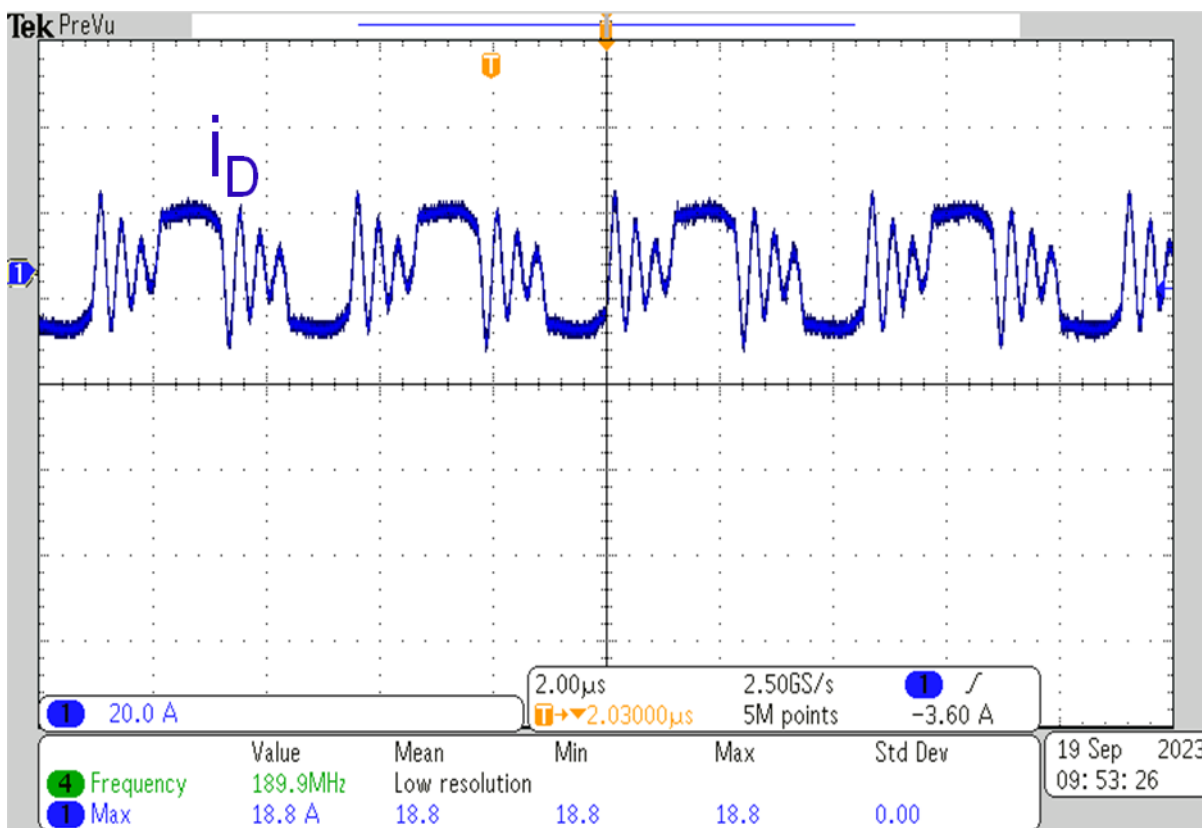


图 7. 開環條件下相移調變模式的共振槽電流波形。來源：德州儀器

图 8 展示 CLLLC 轉換器在考量與不考量 MOSFET C_{oss} 時的增益特性比較。如圖所示，增益曲線會出現波動。在此情況下，閉合迴路控制中的控制器可能將相移角調整至錯誤方向，從而導致大電流突波。

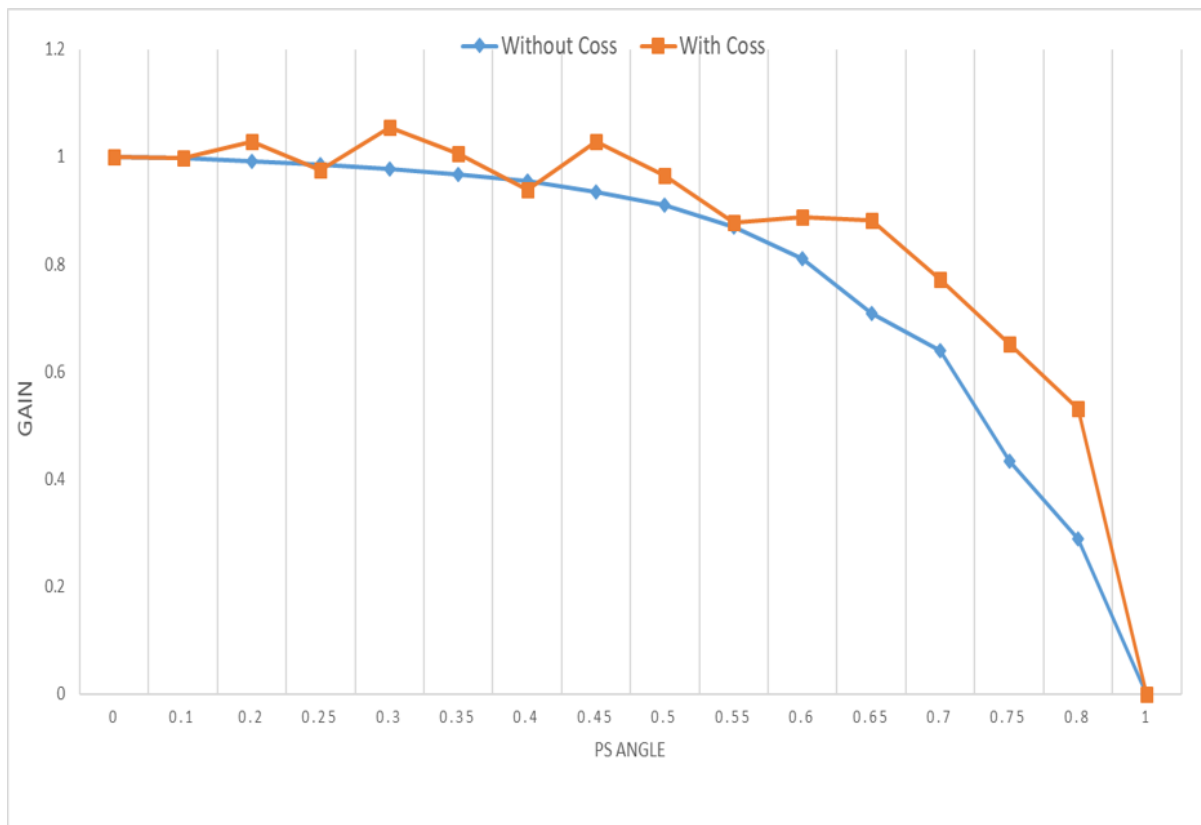


图 8. 相移模式下含和不含 C_{oss} 的增益曲线。来源：德州仪器

增益问题的解决方案

为消除增益的非单调性问题，采用如图 9 所示的 SR 控制方法可有效解决此问题。在共振槽电流振荡期间，若同时导通两个上管或两个下管的 SR 切换，将使变压器次级侧绕组暂时短路，从而让 C_{oss} 不参与共振过程。

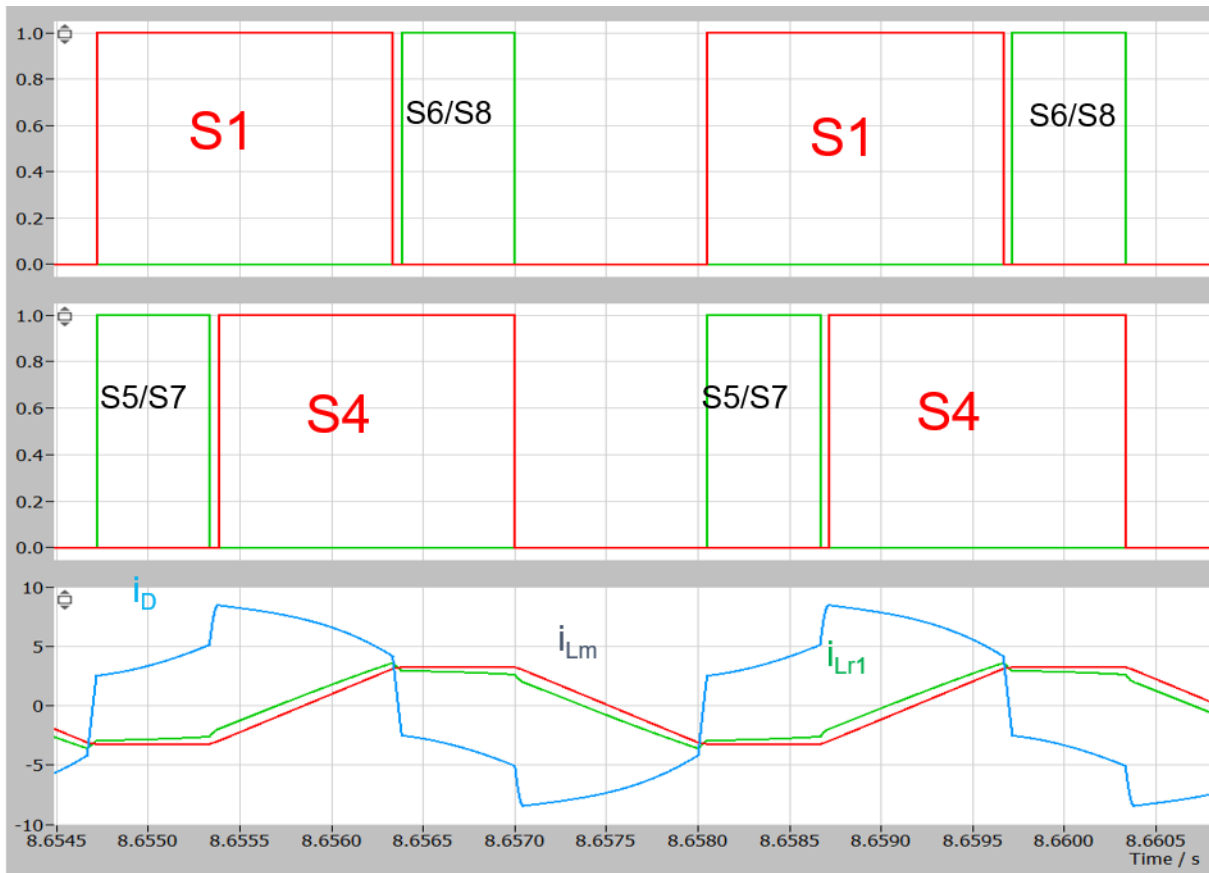


图 9. 所提出的 SR 控制方案可有效消除增益非單調性問題。來源：德州儀器

图 10 展示測試結果；與圖 8 相比沒有振盪。有關更多詳細的分析和測試結果，請參閱參考 [2]。

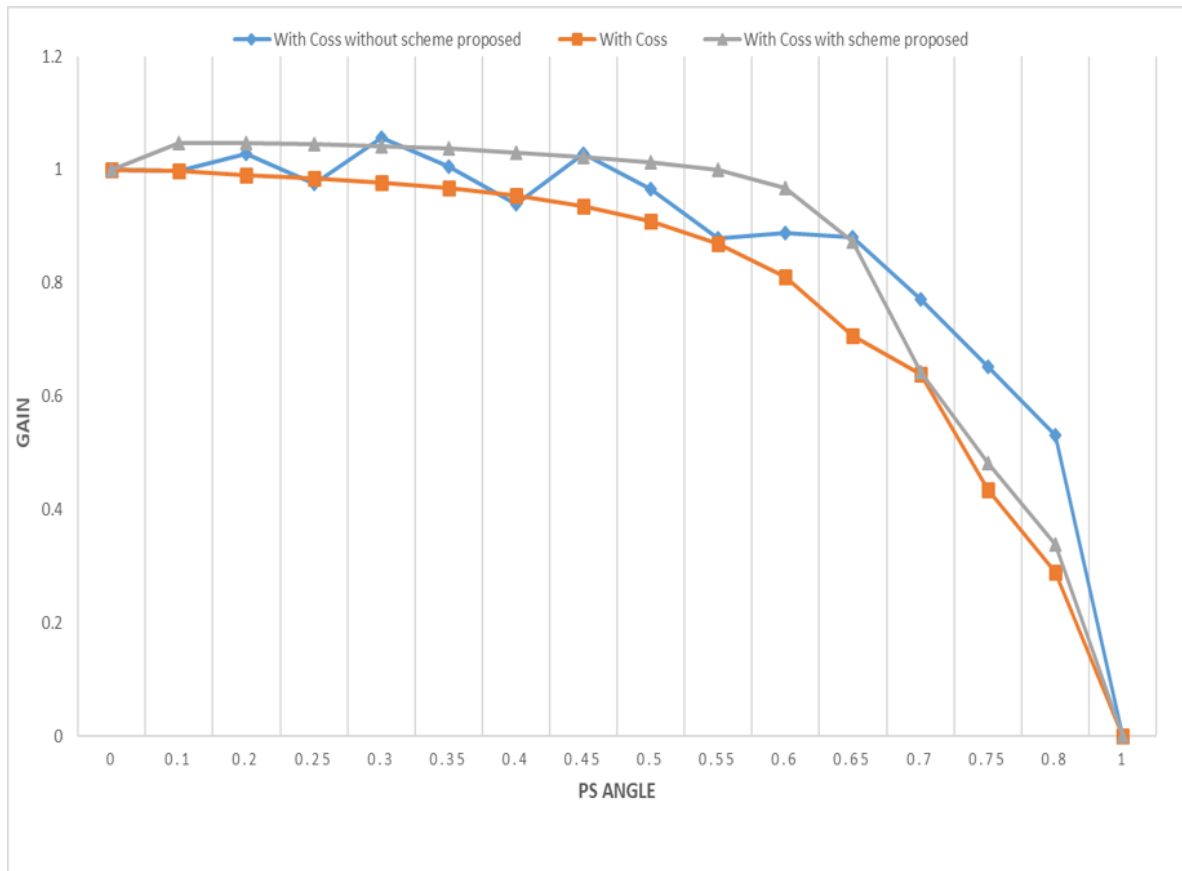


图 10. 採用所提控制方案的相移模式增益曲線（灰色線）。來源：德州儀器

實驗結果

原型 [3] 使用此控制方案來驗證性能。图 11 展示軟啟動波形，而 图 12 則展示採用所提控制方案的相移模式下之共振槽電流波形。

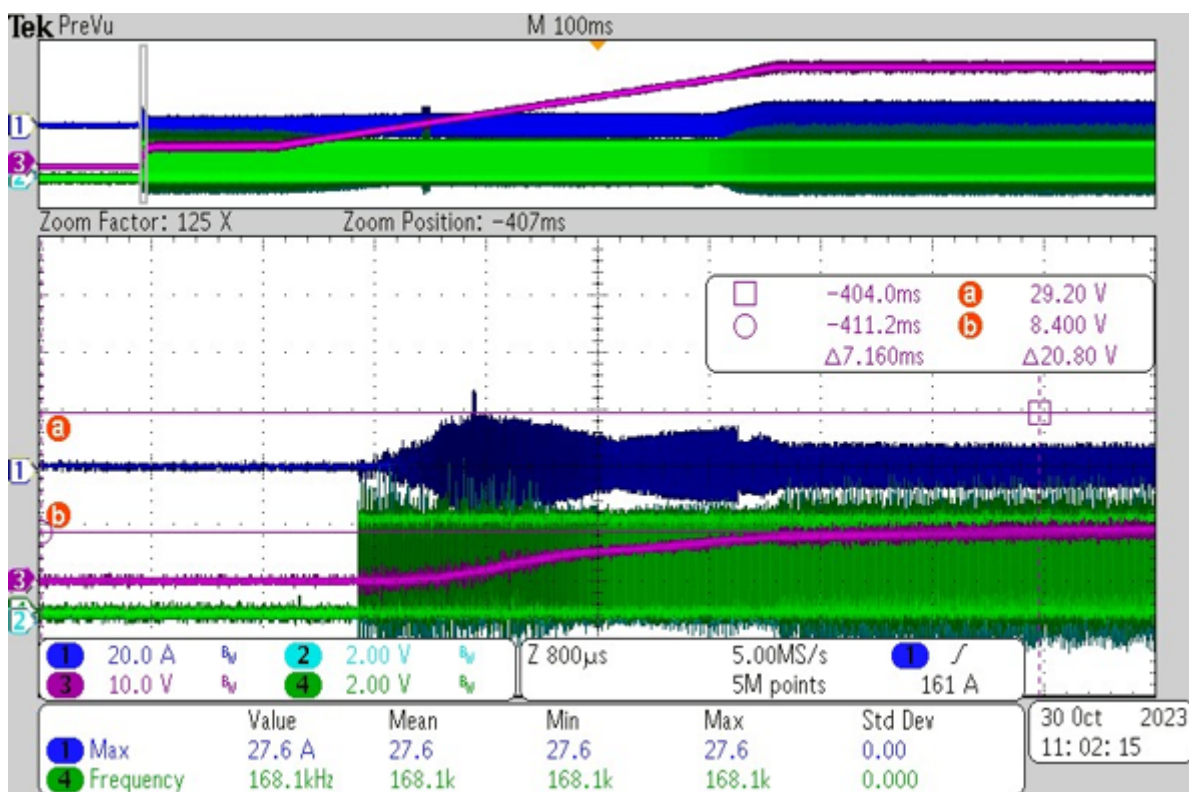


图 11. 具備 750 W 輸出功率的相移軟啟動。來源：德州儀器

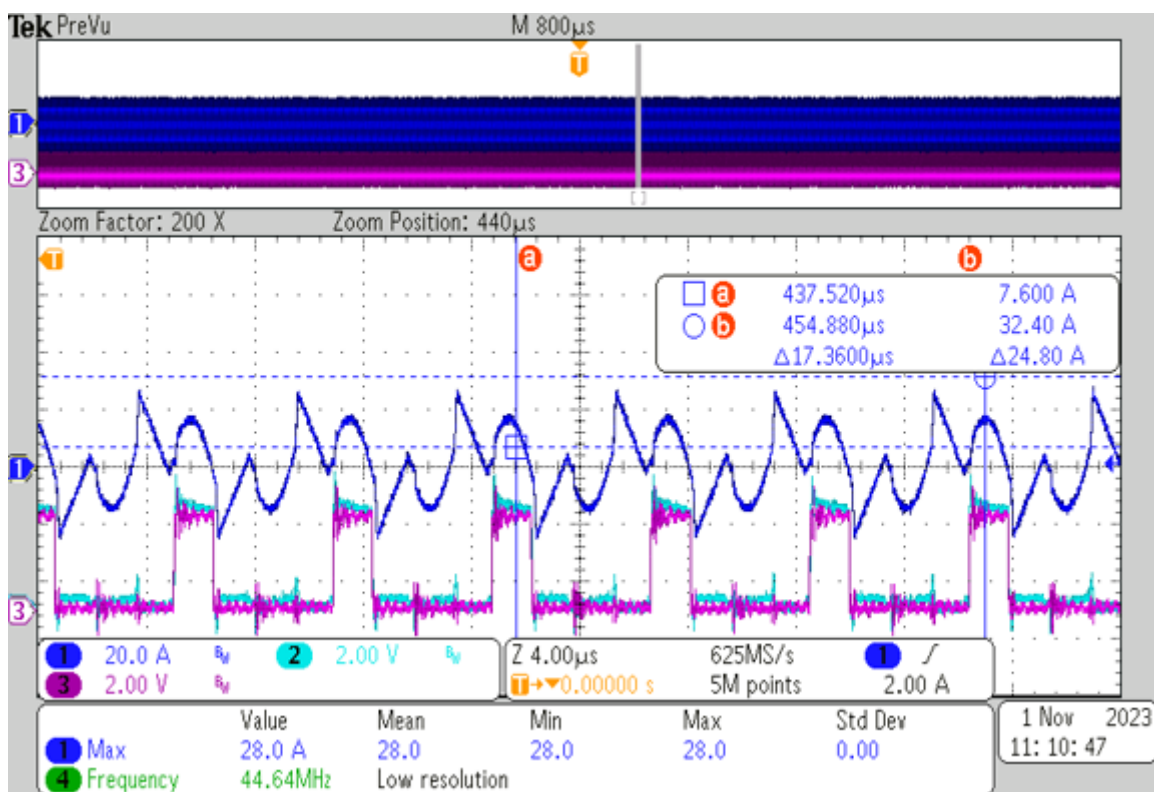


图 12. 採用所提控制方案的相移模式下之共振槽電流波形。來源：德州儀器

图 13 和 图 14 展示頻率/相移調變切換測試。根據測試波形顯示，在輸出功率 750W 的條件下，啟動電流被限制在 28A 以內。共振槽電流無振盪現象，且轉換器能在不同工作條件下平順切換調變模式。

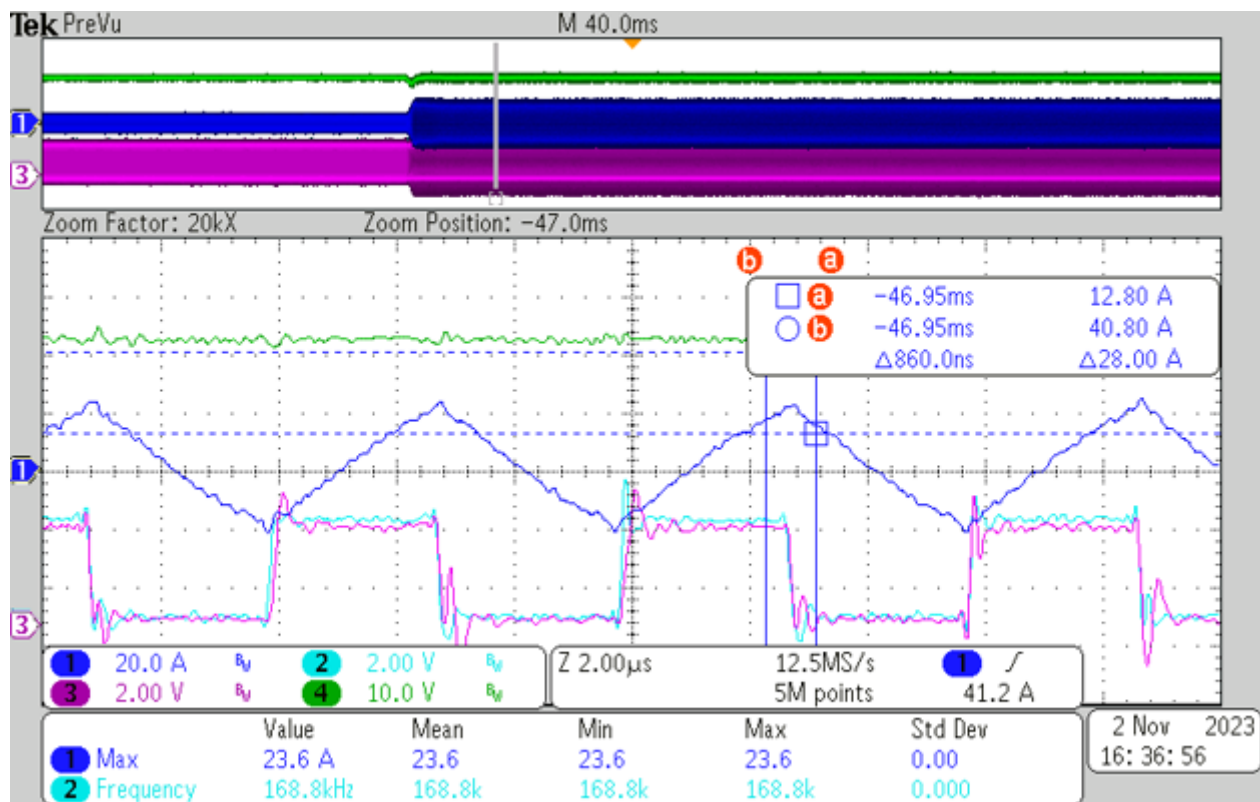


图 13. 相移和频率调变切换：5A 负载的频率模式。来源：德州仪器

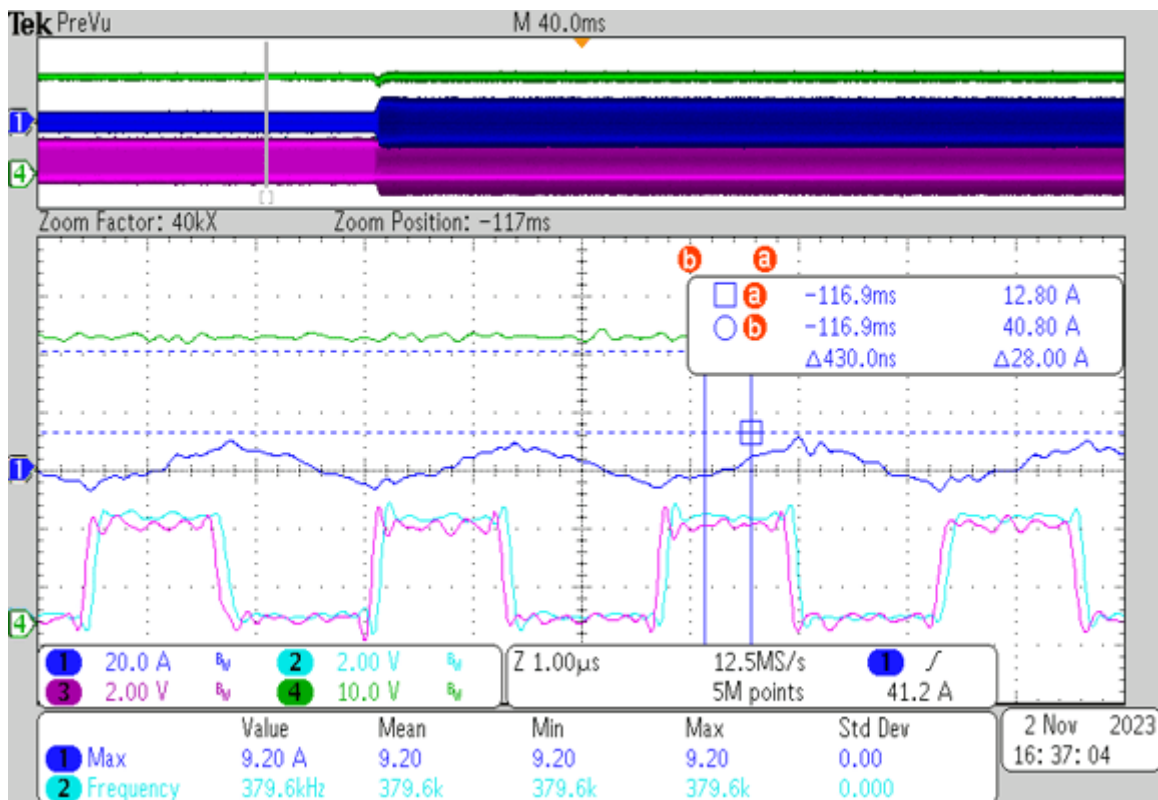


图 14. 相移与频率调变切换：1A 负载的相移模式。来源：德州仪器

結論

所提出的頻率與相移混合控制方案，能有效限制啟動階段的突波電流，並使輕負載條件下的增益特性保持線性。轉換器可在頻率調變和相移調變之間順暢切換。此外，相移控制也會引發增益非單調性問題，並在具有大 C_{OSS} 的設計中導致電流振盪。所提出的 SR 控制方法，能有效解決電流振盪問題，並使增益恢復單調特性。

相關內容

- [用電訣竅 #102：CLLLC 與 DAB 在電動車車載充電器中的比較](#)
- [用電訣竅 #92：高頻諧振轉換器設計注意事項第 2 部分](#)
- [用電訣竅 #134：不要採用艱難的方式進行切換；以 PWM 全橋實現 ZVS](#)
- [用電訣竅 #117：在完整操作條件下進行測試之前，先測量 LLC 諧振電路](#)
- [用電訣竅 #97：型塑 LLC-SRC 增益曲線以符合電池充電器需求](#)
- [用電訣竅 #94：倒置降壓如何為非隔離式返馳提供拓撲替代方案](#)

參考資料

1. Lee, Byoung-Hee、Moon-Young Kim、Chong-Eun Kim、Ki-Bum Park 與 Gun-Woo Moon 所著之「[考量寄生元件效應的 LLC 共振轉換器分析](#)」。發表於《INTELEC 2009 - 第 31 屆國際電信能源會議》，韓國仁川，2009 年 10 月 18-22 日，第 1-6 頁。
2. Tai, Will、Guangzhi Cui 與 Sheng-Yang Yu 所著之「[CLLLC 共振轉換器於相移模式下的增益優化控制方法](#)」。發表於《PCIM Europe 2024：國際電力電子、智慧運動、可再生能源與能源管理展覽暨會議》，德國紐倫堡，2024 年 6 月 11-13 日，第 2513-2518 頁。
3. Cui, Guangzhi 之「[3.6kW 雙向 CLLLC 共振轉換器參考設計](#)」。德州儀器參考設計編號 PMP41042。存取日期：2024 年 11 月 6 日。

先前已發表於 EDN.com。

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 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