

Technical Article

EV 車載充電器 CLLLC vs. DAB



Brent McDonald

為了將電動車 (EV) 的電源最佳化，車載充電器 (OBC) 必須效率高、輕量且體積小。較輕的 EV 需要用來驅動車輛的動力也更少，進而提升整體效率。

OBC 需要支援適當的電網到車輛 (G2V) 電壓和電流電池充電演算法，因此它作為電網和 EV (圖 1) 之間的功率調節介面。此外，它必須能夠從車輛到電網 (V2G) 供電，以便 EV 補充可能發生峰值容量波動的再生能源。

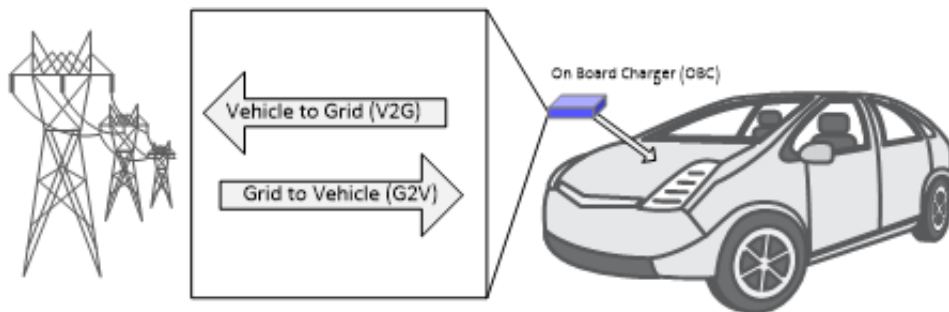


圖 1. OBC 需要支援適當的 G2V 電壓，並從 V2G 供電。

促進電動車電網與高電壓電池間的介面需要電磁干擾 (EMI) 濾波器、功率因數校正 (PFC) 與隔離式 DC/DC 功率級。圖 2 說明此架構。

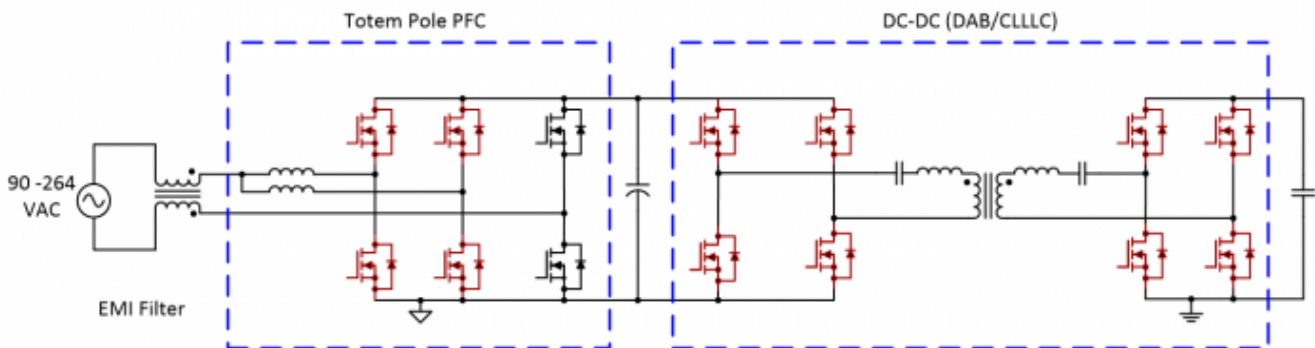


圖 2. 這套簡化電路圖顯示 OBC 如何作為電網與電池間的介面。

討論的範圍限於 DC/DC 級。截至本文撰寫時間點，DC/DC 級的兩種常見選擇為電容器電感器電感器電容器電容器 (CLLC) 和雙主動橋式 (DAB) 拓撲結構 (圖 3 與 4)。兩種選項都可達到小型解決方案尺寸，並提供必要的 G2V 和 V2G 電源需求。

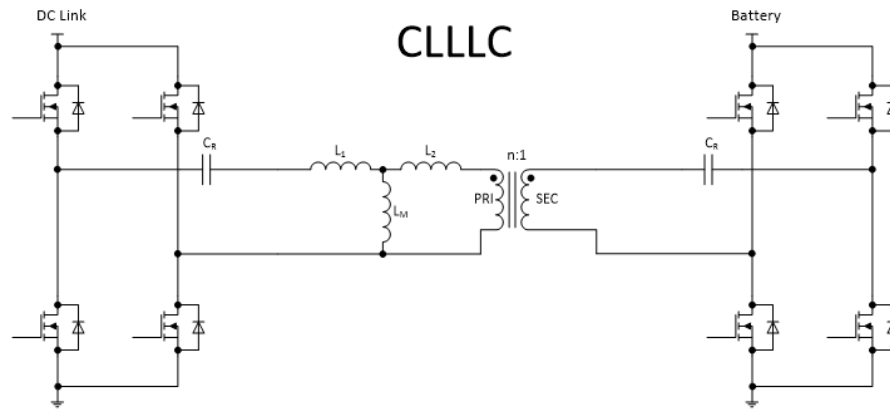


图 3. 本电路圖為 CLLLC 的基本拓撲結構。

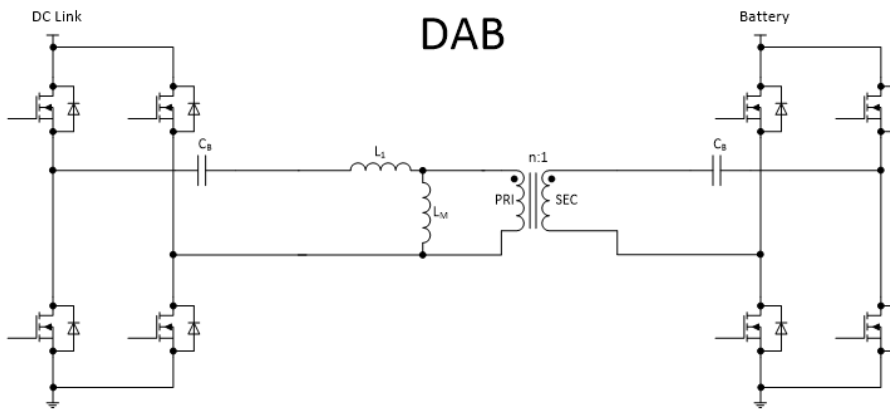


图 4. 在此电路圖中可見 DAB 拓撲結構。

OBC 性能最大化與尺寸縮減

為了解這兩種拓撲結構如何影響 OBC 的尺寸與性能，接下來我們將範圍限制在運作的電池充電階段，或 G2V，同時考慮如何提供開關可耐受的最大電池功率來減少充電時間。例如，考慮使用以下運作條件的開關：

- $P_{DISS} = 20W$
- $\theta_{JA} = 3^{\circ}C/W$
- $T_A = 65^{\circ}C$

開關將為 $T_J = 125^{\circ}C$ ，結果得自等式 1：

$$T_J = P_{DISS} \cdot \theta_{JA} + T_A \quad (1)$$

此設計中的開關無法耐受超過 $125^{\circ}C$ 的溫度，這種條件代表 OBC 可在不犧牲開關的情況下為電池提供的最高功率位準。目標是將開關的功耗降到最低，並盡快為電池充電。

開關大部分的功率損耗主要來自兩個因素：均方根 (RMS) 電流，以及開關維持零電壓開關 (ZVS) 的能力。

因其電容低和快開關快速的特性，德州儀器的 GaN 開關能讓轉換器以比矽晶更高的切換頻率運作。高頻率運作會直接影響無功元件的尺寸，造就較小的變壓器、電感器和電容器。我們先建立 DAB 和 CLLLC 的基準設計，接著探索電路增強以擴大轉換器的 ZVS 範圍。

基準 DAB 和 CLLLC 性能比較

表 1 概述 OBC 的基本要求。

表 1. OBC 功率要求。

Description	Min	Typ	Max	Units
AC input voltage	90	220	264	V _{RMS}
AC input current			32	A _{RMS}
DC output voltage	250	400	450	V
DC output current (constant current mode)			20	A
DC output power (constant power mode): >210-V RMS input			6.6	kW

為 DAB 和 CLLLC 建立詳細的設計有助於確定最可行的電路設計。這項作業的步驟超出本次討論範圍，不過電路模擬最能夠還原開關的損耗並驗證整體功能的符合狀況。我將模擬器設定為在不同功率位準和輸入與輸出電壓上以批次模式執行，並測試了不同的 DAB 和 CLLLC 電感器、電容器和匝比值。在每次模擬執行中，我收集了參數相關資料，例如 VIN、VOUT、開關功率、RMS 電流及開關 ZVS 狀況。表 2 總結兩種最佳拓撲結構設計。

表 2. DAB 和 CLLLC 最佳化設計。

Topology	DAB	CLLLC
Tank	$N_p/N_s = 1.1$ $L = 3.3 \mu\text{H}$ $L_M = 20 \mu\text{H}$	$N_p/N_s = 1.1$ $L_{R,1} = 2 \mu\text{H}$ $L_{R,2} = 2 \mu\text{H}$ $L_M = 14 \mu\text{H}$ $C_{R,1} = 50 \text{ nF}$ $C_{R,2} = 50 \text{ nF}$
Control	Triple phase-shift modulation	Frequency and phase-shift modulation
Variable DC link	400 V to 450 V	400 V to 450 V
f_s	500 kHz	300 kHz-800 kHz

圖 5 說明顯著模擬結果。儘管每個拓撲結構中有八個開關，但圖表僅繪製功率損失最高的開關。每個開關有三張圖。第一張是開關總損失。第二張則是通過開關的 RMS 電流。最右邊的第三張圖顯示特定 GaN 開關在開啟時會遇到的最糟汲極至源極電壓情況。這是 ZVS 損失量的品質因素；此電壓越高，開關的損失就越大。因此，開關的 RMS 電流以及其維持 ZVS 的能力代表了裝置中功率損失的主要部分。

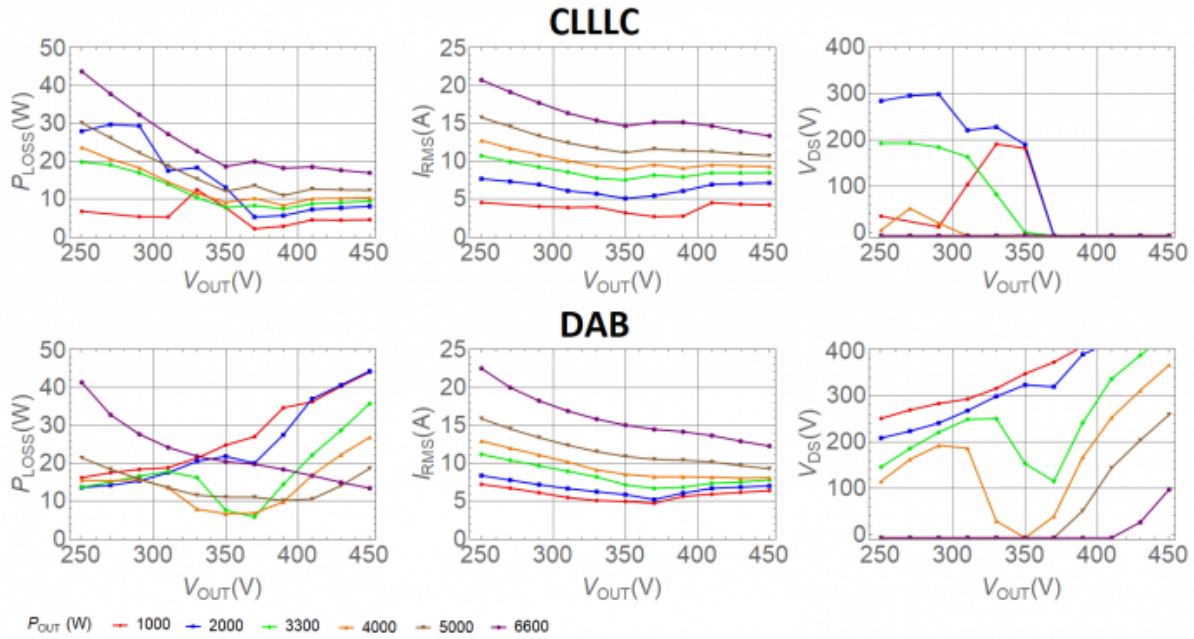


图 5. 模擬結果顯示 CLLC 和 DAB 的 RMS 和 ZVS 基準條件。

有了這些事實加上仔細查證過資料，CLLC 顯然能夠在更大的運作範圍內維持 ZVS，因此強化 ZVS 負責降低 CLLC 開關中的功率損失。話雖如此，在以 6.6kW 運作的情況下，DAB 具有優異性能，源自良好的 ZVS 和在大多數範圍內的低 RMS 電流。綜合這些觀察結果，建議尋求在不影響 RMS 電流的情況下改善 ZVS 的方法。

利用整流電感器改善 ZVS

图 6 與 图 7 顯示圖 3 和圖 4 相同的 CLLC 和 DAB 電路，拓撲加入了額外的電感器 (以黃色標示)，在更大的運作範圍中可提供維持 ZVS 所需的額外電流。現在請設想這些額外電感器隨時都能運作的情況。

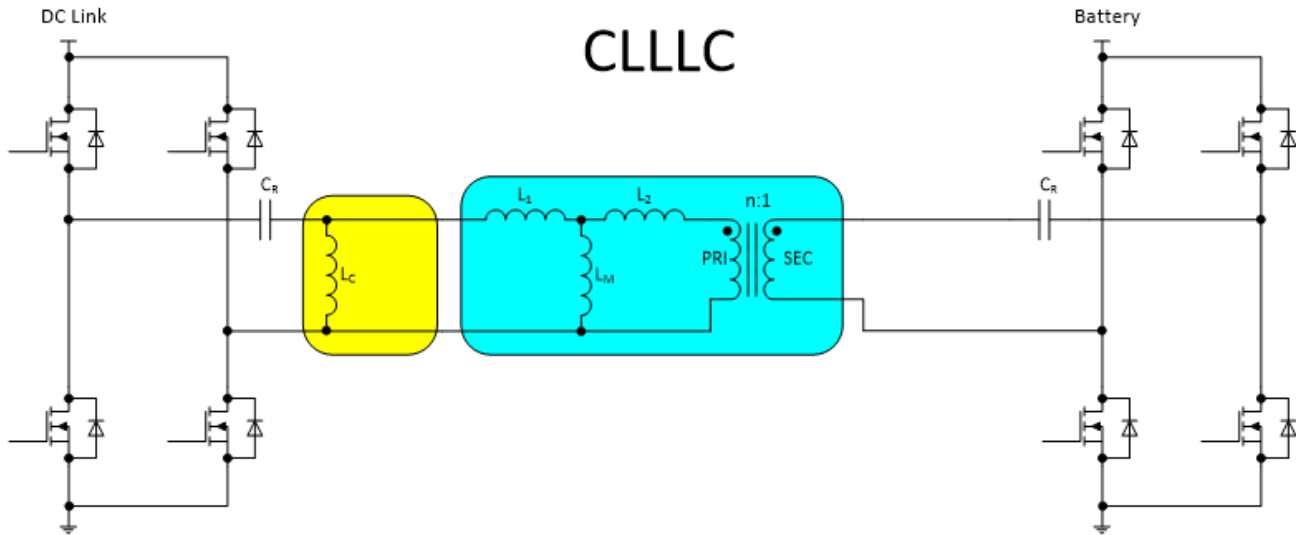


图 6. 本電路圖顯示具有整流電感器的 CLLC。

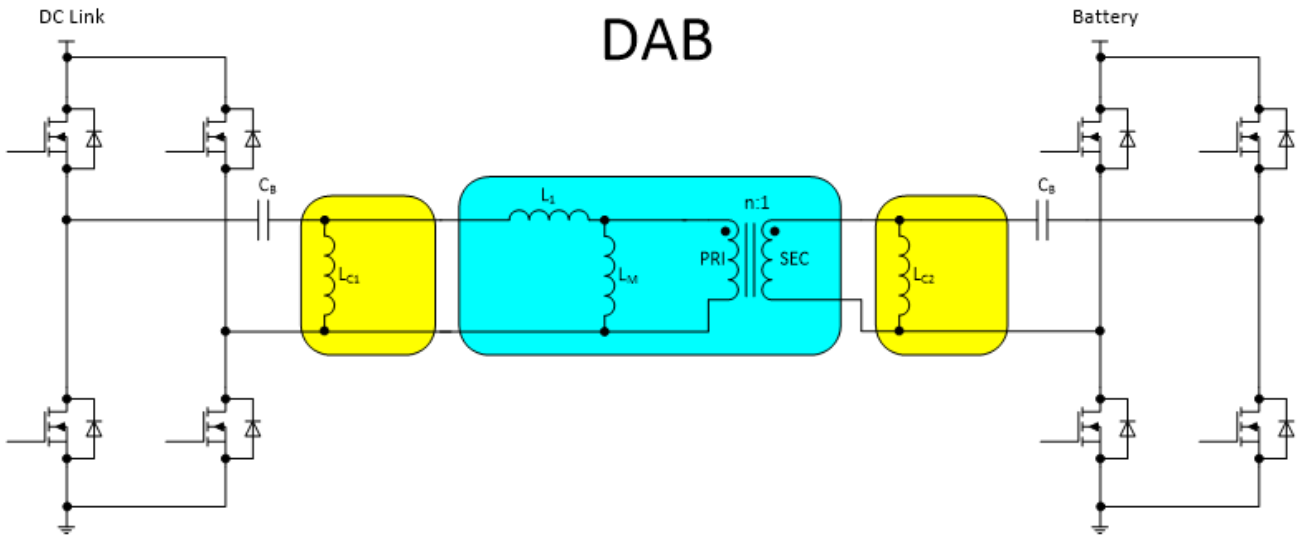


图 7. 此電路圖顯示具有整流電感器的 DAB。

表 3 列出新電感器的值，並為方便起見重複其他電路參數。

表 3. 具有整流電感器 (L_C) 值的 DAB 和 CLLC 設計

Topology	DAB	CLLCC
Tank	$N_p/N_s = 1.1$ $L = 3.3 \mu\text{H}$ $L_M = 20 \mu\text{H}$ $L_C = 20 \mu\text{H}$	$N_p/N_s = 1.1$ $L_{R,1} = 2 \mu\text{H}$ $L_{R,2} = 2 \mu\text{H}$ $L_M = 14 \mu\text{H}$ $C_{R,1} = 50 \text{nF}$ $C_{R,2} = 50 \text{nF}$ $L_C = 50 \mu\text{H}$

图 8 顯示重複图 5 中的模擬後的結果。

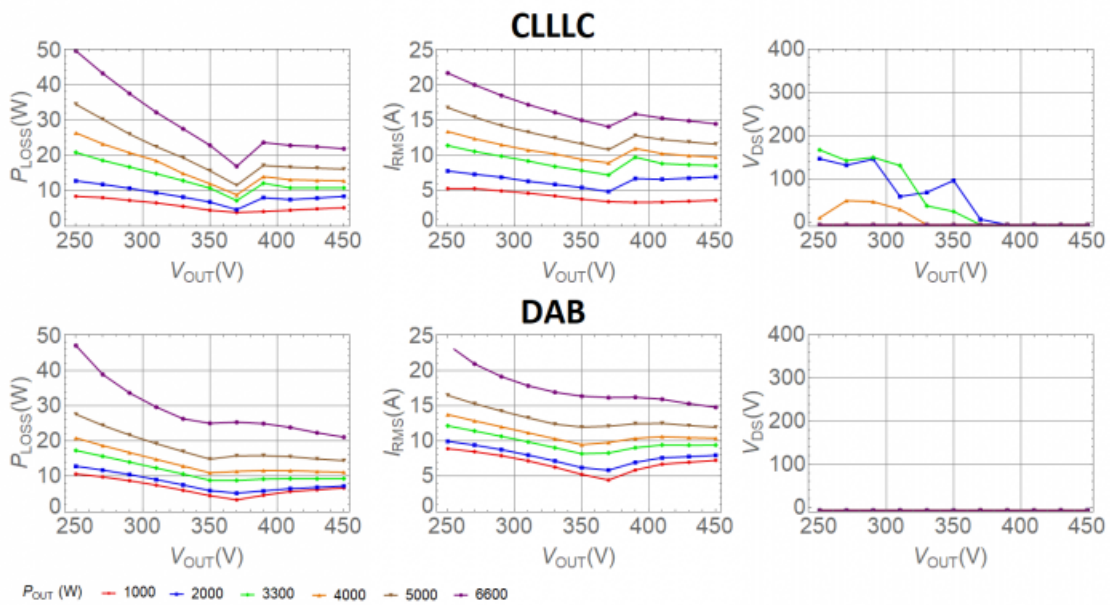


图 8. 各電路的 RMS 和 ZVS 結果顯示 L_C 的影響。

在此情況下，請注意 DAB 能夠在整個運作條件範圍內達到完整 ZVS。GaN 開關的 V_{DS} 在開啟時始終為 0V 的現象就能清楚說明這點。CLLLC 雖然無法達到完整 ZVS，但仍可大幅改善 ZVS。但也請留意，ZVS 改善會大大犧牲兩種拓撲結構中的 RMS 電流。單從功率損失來看，DAB 轉換器具備了大多數範圍的優勢。

讓我們先別拉太遠，回過頭來比較 圖 8 和 圖 5，您會注意到在某些條件下整流電感器會讓損失更嚴重。這就帶出一個問題：是否可以制定出一種混合方法，透過這種方法達到 圖 5 和 圖 8 所示的最低損失？

最小化總損失：魚與熊掌不可兼得

增加整流電感器會讓轉換器維持 ZVS，進而打造出更廣泛的運作條件。當轉換器無法維持 ZVS 時，這種做法大有幫助。整流電感器的問題在於只有當即將損失 ZVS 時才會改善損耗。若轉換器已在 ZVS 中，整流電感器會增加電流而影響運作，導致開關損失更多歐姆。

這種思考過程誕生混合方法測試，測試中整流電感器會在較重負載下關閉，並於較輕負載下開啟。圖 9 說明利用此方法重複模擬後的結果，這樣能讓設計善用每個拓撲結構的低 RMS 電流及高負載下自然的 ZVS 能力。

我很小心只增加足夠的整流電感和運作時間，以放入開關的隔熱外殼，避免不必要的開關 RMS 電流或不必要的解決方案尺寸。請注意，DAB 轉換器在運作範圍內無法達到完整 ZVS。ZVS 狀況已大幅改善，但最多只維持在先前討論過的 20W 開關目標內。

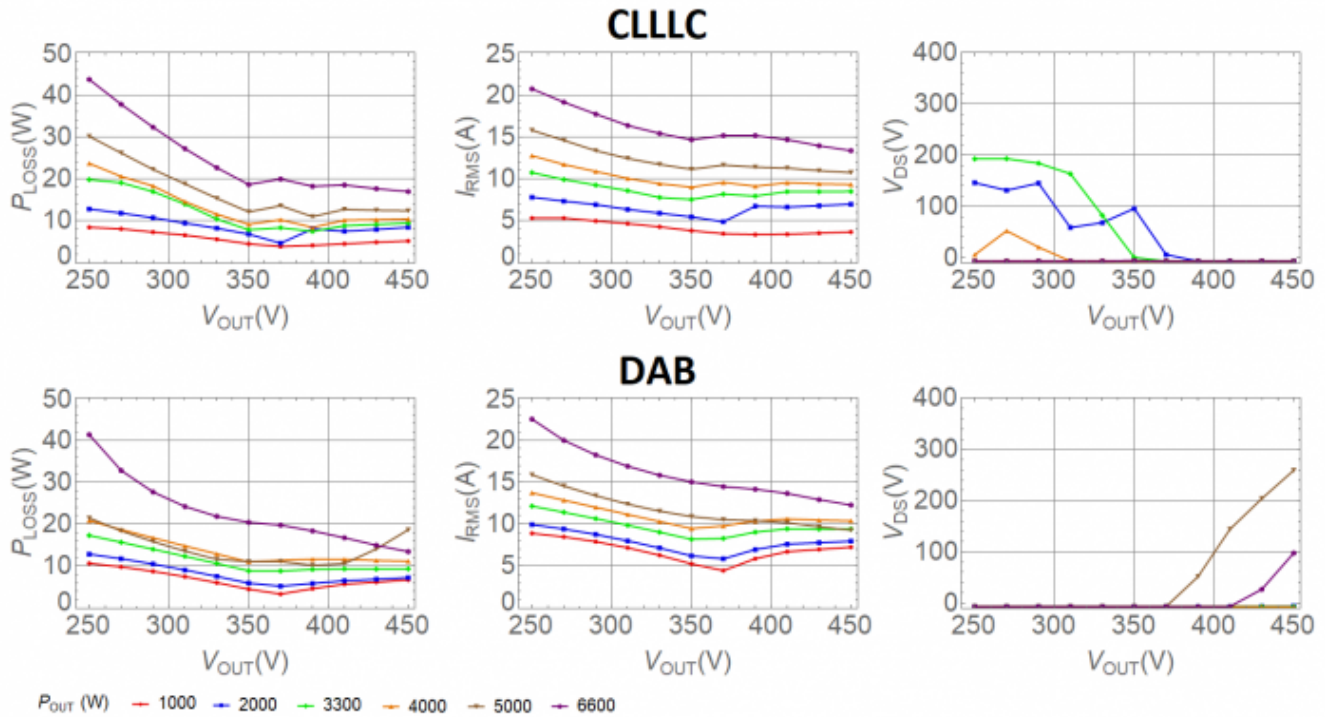


圖 9. 這些都是採用混合方法的 RMS 和 ZVS 結果。

為了更清楚呈現權衡，圖 10 總結出每種情況的功率損失。您可以看到 DAB 轉換器在開關的功率損失方面具有明顯優勢。

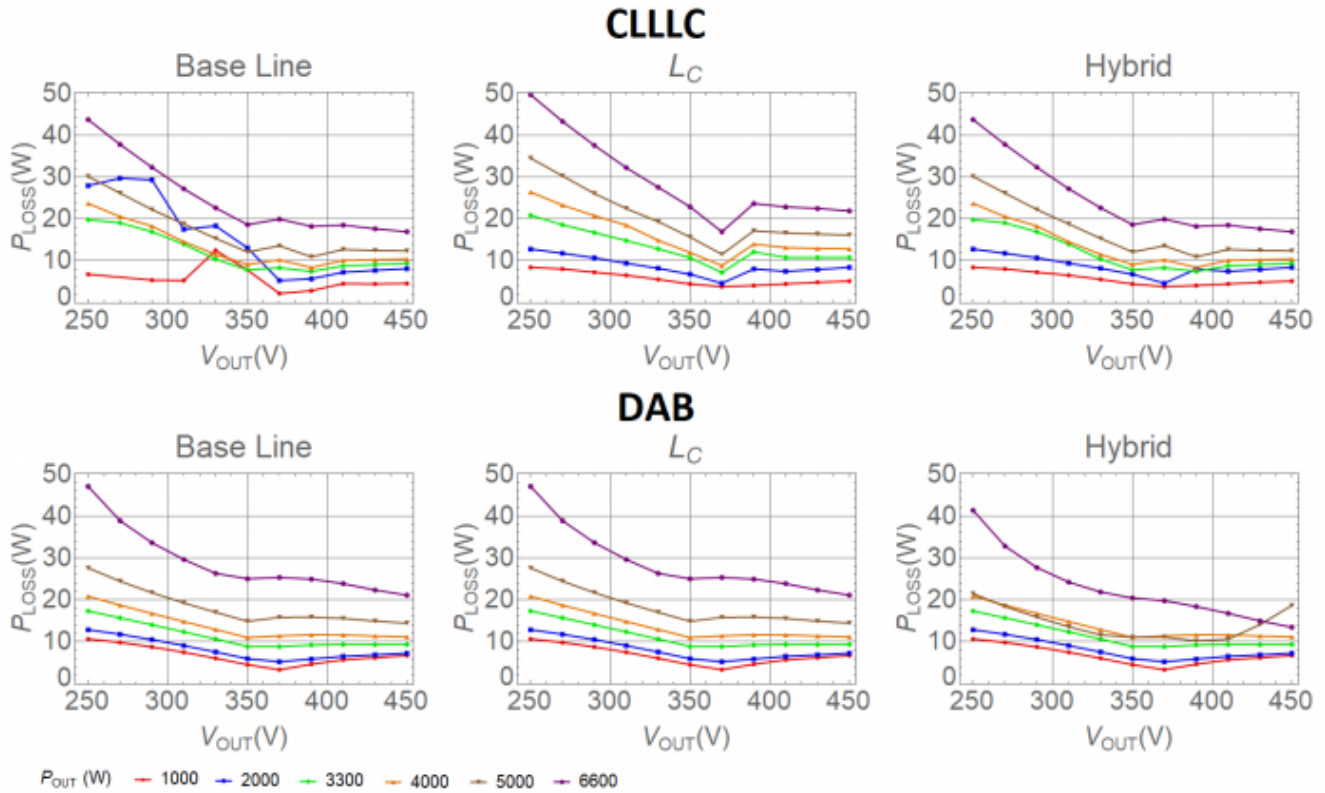


图 10. 每種情況的功率損失總結有助於讓權衡情況一目了然。

為了進一步說明這兩個轉換器之間的性能功能，图 11 重新整理並繪製图 10 中所示的資料。此圖表顯示為各轉換器可提供的最大功率，並假設交換器無法安全耗散超過 20W 功率。切記，20W 代表開關可耐受的最大損失，且仍可讓接點溫度維持在 125°C 以下

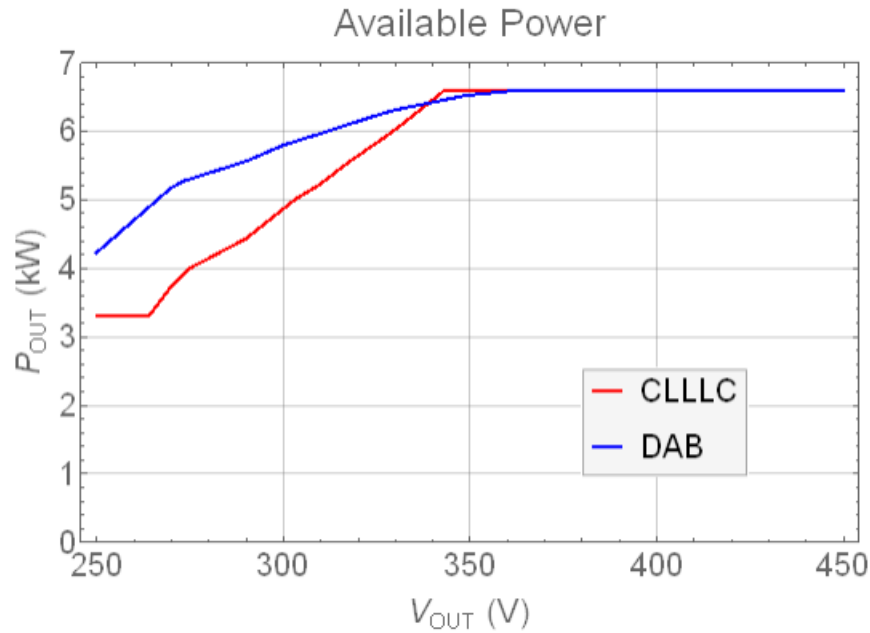


图 11. 此圖顯示各轉換器可提供的最大功率。

CLLLC 和 DAB 誰更優秀？

從 [圖 11](#) 中藍線高於紅線可明顯得知，DAB 轉換器在整個範圍內提供的功率比 CLLLC 多，使人自然認為 DAB 穩贏。但別忘了，最小尺寸與重量是 OBC 的核心要求。DAB 轉換器需要兩個額外的電感器，但 CLLLC 只需要一個。在我看來，勝利該屬於 CLLLC。

如同工程學中大多數的事情一樣，視需求進行權衡往往是最棒的地方。很少會有不勞而獲的時候，這次也不例外。對我來說，CLLLC 輕鬆擠下 DAB，因為它具有明顯的尺寸優勢。

參考

1. de Oliveira, E.F., and P. Zacharias, “[Comprehensive Mode Analysis and Optimal Design Methodology of a Bidirectional CLLC Resonant Converter for E-Vehicles Applications](#),” 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE '19 ECCE Europe), Sept. 3-5, 2019, pp. 1-10.
2. Krismer, F., and J.W. Kolar, “[Efficiency-Optimized High-Current Dual Active Bridge Converter for Automotive Applications](#),” IEEE Transactions on Industrial Electronics 59, no. 7 (July 2012): pp. 2745-2760.
3. Texas Instruments. n.d., “[Gallium nitride \(GaN\): pushing performance beyond silicon](#),” Accessed Oct. 19, 2020.

相關文章

- [電動車充電：科技與智慧型工程將如何使電氣化未來成真](#)
- [電動車無線充電的電力傳輸](#)
- [GaN 支援有效率且符合成本效益的 800V EV 牽引逆變器](#)
- [可攜式充電解決方案為電動車提供路邊協助](#)
- [用電訣竅 #75：車用系統的 USB PD 快充](#)
- [用電訣竅 #92：高頻諧振轉換器設計考量](#)

前述內容均發佈於 [EDN.com](#)。

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 © 2024, 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 © 2024, Texas Instruments Incorporated