

Technical Article

跳出 LLC 串聯諧振轉換器的思維框架



Sheng-Yang Yu

十多年來，電源供應器產業廣泛應用了如圖 1 所示的電感器-電感器-電容器 (LLC) 串聯諧振轉換器 (LLC-SRC)，其帶有兩個諧振電感器（兩個 "L"： L_m 和 L_r ），以及一個諧振電容器（一個 "C"： C_r ）作為低成本、高效率的隔離功率級。LLC-SRC 具有軟開關性質，無需複雜的控制機制。其軟開關功能可使用額定電壓較低的元件，並且還提供高轉換器效率。與用於其他軟開關拓撲（例如相位轉移全橋式轉換器）的控制器相比，其簡單的控制方案（具有固定 50% 工作週期的可變頻率調變）所需的控制器成本更低。

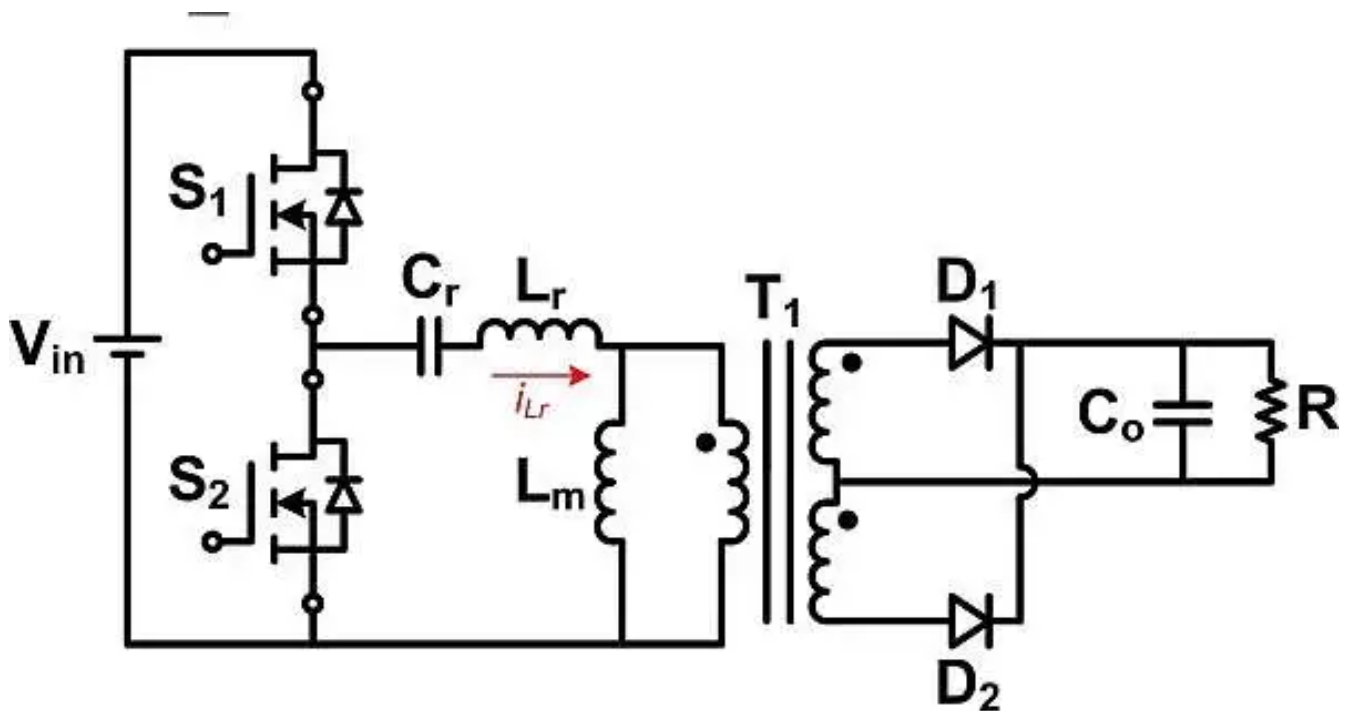


圖 1. LLC-SRC

儘管 LLC-SRC 可以實現比硬開關返馳和順向轉換器高得多的效率，但如果要實現最佳效率，仍然存在一些設計挑戰。首先，在 LLC-SRC 設計中，兩個諧振電感器的比率 (L_m 對 L_r) 可能必須小於 10，才能達到足夠寬的可控範圍。同時，您需要在 L_m 上使用較大的電感來降低循環電流，這意味著您需要保持較大的 L_r 電感以保持較低的諧振電感器比率。

有趣的是，串聯諧振電感器 L_r 中的電流是完全交流電，沒有任何直流成分，這意味著磁通密度變化很大 (ΔB 很高)。高 ΔB 代表與交流相關的電感器損耗高。如果電感器纏繞在鐵氧體磁芯上，則磁芯氣隙附近的邊緣效應會導致較高的繞組損耗。

L_r 上的電感較大表示電感器上的匝數較多，交流繞組損耗較高。這就是為什麼許多 LLC-SRC 設計將鐵粉磁芯應用於諧振電感器，作為繞組損耗和磁芯損耗之間的取捨。然而，高 ΔB 會在諧振電感器上產生相當大的損耗，不是高繞組損耗就是高磁芯損耗。

LLC-SRC 設計中的第二個挑戰是如何最佳化同步整流器 (SR) 控制。LLC-SRC 整流器電流通導時序取決於負載條件和開關頻率。LLC-SRC SR 控制最前景看好的方法是感測 SR 場效電晶體 (FET) 汲極至源極電壓 (V_{DS})，並在 V_{DS} 低於或高於特定位準時開啟和關閉。 V_{DS} 感測方法需要毫伏級的準確度，因此只能在積體電路中實現。自我

驅動或其他低成本 SR 控制方案不適用於 LLC-SRC，因為它們採用電流饋入電容負載輸出配置。因此，LLC-SRC SR 控制器電路的成本通常高於其他拓撲。

為了解決高電感器損耗和 SR 控制這兩項挑戰，同時仍能善用諧振轉換器可提供的多數優點，請考慮使用改進的 CLL 多諧振轉換器 (CLL-MRC)，如圖 2 所示。

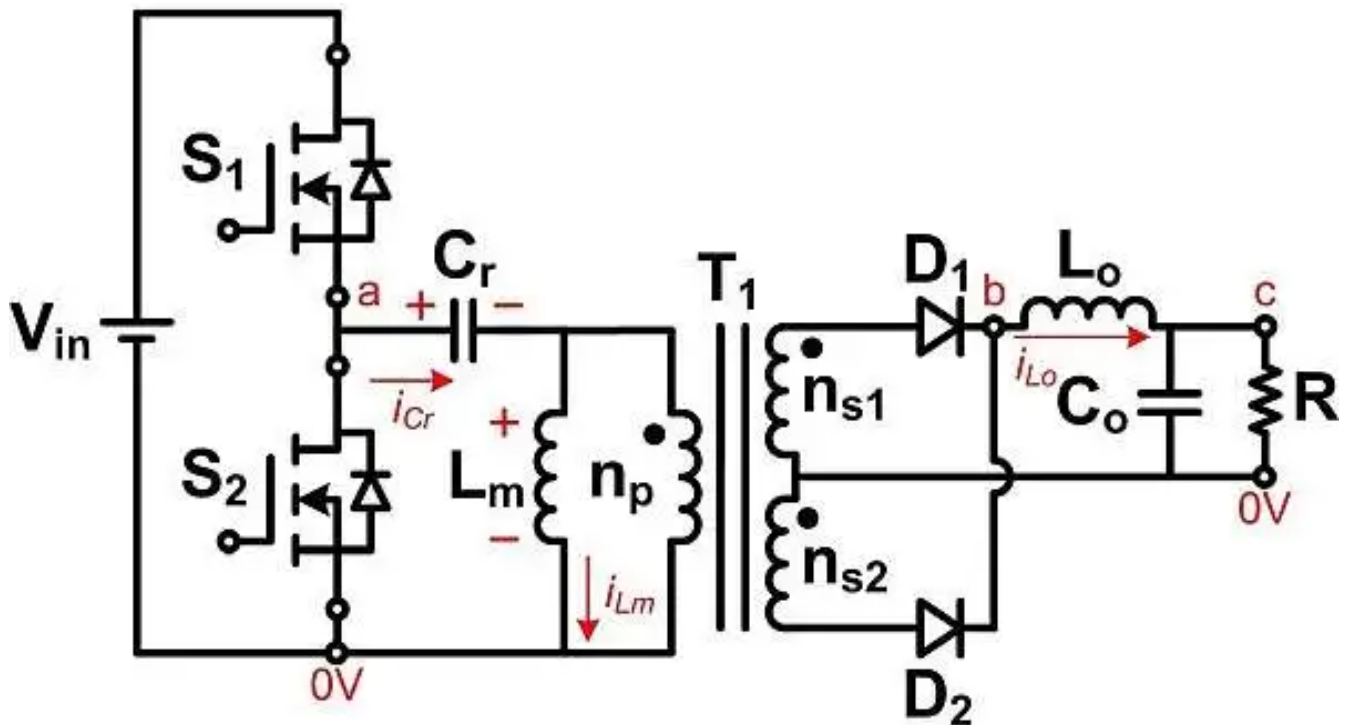


圖 2. 改進的 CLL-MRC

與所有三個諧振元件（一個電容器和兩個電感器）都位於輸入側的 CLL-MRC 不同，改進的 CLL-MRC 將一個電感器從輸入側移至輸出側，並將該電感器放置在整流器 - L_o 之後，如圖 2 中所示。此修改可允許諧振電感器上的直流電流含量，這意味著更小的 ΔB ，以及可能更低的磁芯損耗。

圖 3 說明了改進的 CLL-MRC 如何運作，其中 f_{sw} 是轉換器的開關頻率，而 $f_{r1} = \{2\pi [C_r (L_{r1} // L_{r2})]\}^{-0.5}$ 是兩個諧振頻率的其中之一。當 f_{sw} 低於 f_{r1} 時，輸出繞組電流在開關週期結束前降至零，就像 LLC-SRC 中的輸出繞組電流一樣。現在輸出端有了一個電感器。簡單的電容器和電阻器組可以感測輸出電感器電壓。每次發生大幅度的電壓變化 (dV/dt) 時，就是開啟或關閉 SR 的時機。因此，SR 控制方案的成本低於 V_{DS} 感測方案。

當 f_{sw} 高於 f_{r1} 時，輸出電感器電流以連續傳導模式工作。換句話說， ΔB 變得更小，電感器交流損耗可以小得多，且轉換器效率可能比 LLC-SRC 更高。

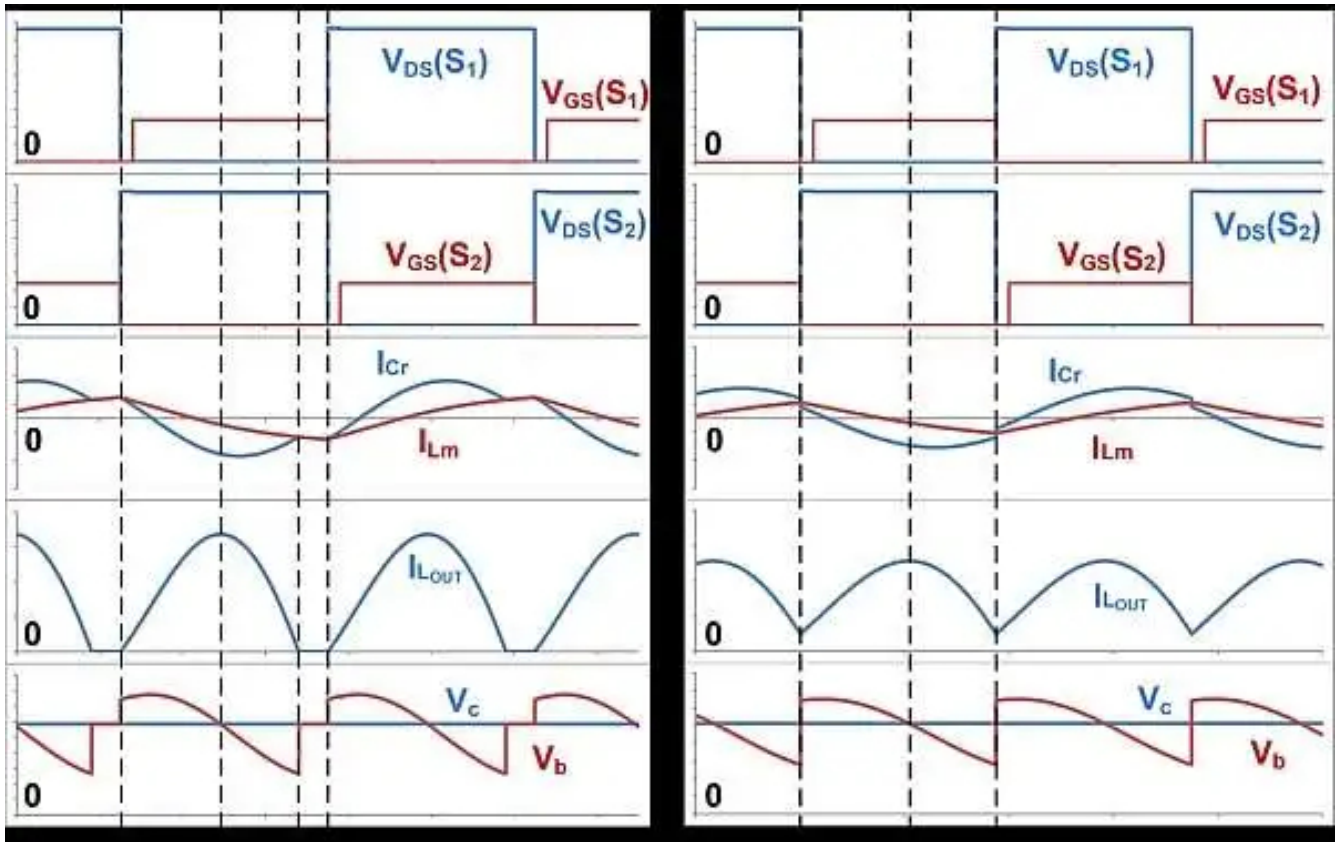


图 3. 改進的 CLL-MRC 主要波形： $f_{sw} < f_{r1}$ (左)； $f_{sw} > f_{r1}$ (右)

為了驗證這些性能假設，我建立了 LLC-SRC 和改進的 CLL-MRC 功率級，兩者使用完全相同的元件和參數。唯一的區別是將 $72 \mu\text{H}$ 電感器用作 LLC-SRC 諧振電感器，將 $1 \mu\text{H}$ 電感器用作改進的 CLL-MRC 輸出電感器。

图 4 顯示兩個功率級的效率測量值。輸入電壓較低時， f_{sw} 小於 f_{r1} ，因此改進後的 CLL-MRC 中的 L_o 電流仍處於不連續傳導模式，具有較大的 ΔB 。因此，在這種操作條件下，改進後的 CLL-MRC 沒有效率優勢。

當輸入電壓變高時， f_{sw} 高於 f_{r1} ， L_o 電流處於連續傳導模式。在 430V 輸入下，改進的 CLL-MRC 其效率比 LLC-SRC 高 1%。從這項比較可以看出，如果將改進後的 CLL-MRC 設計為始終在高於 f_{r1} 的頻率下工作，則其在整個範圍內的效率性能可能優於 LLC-SRC。

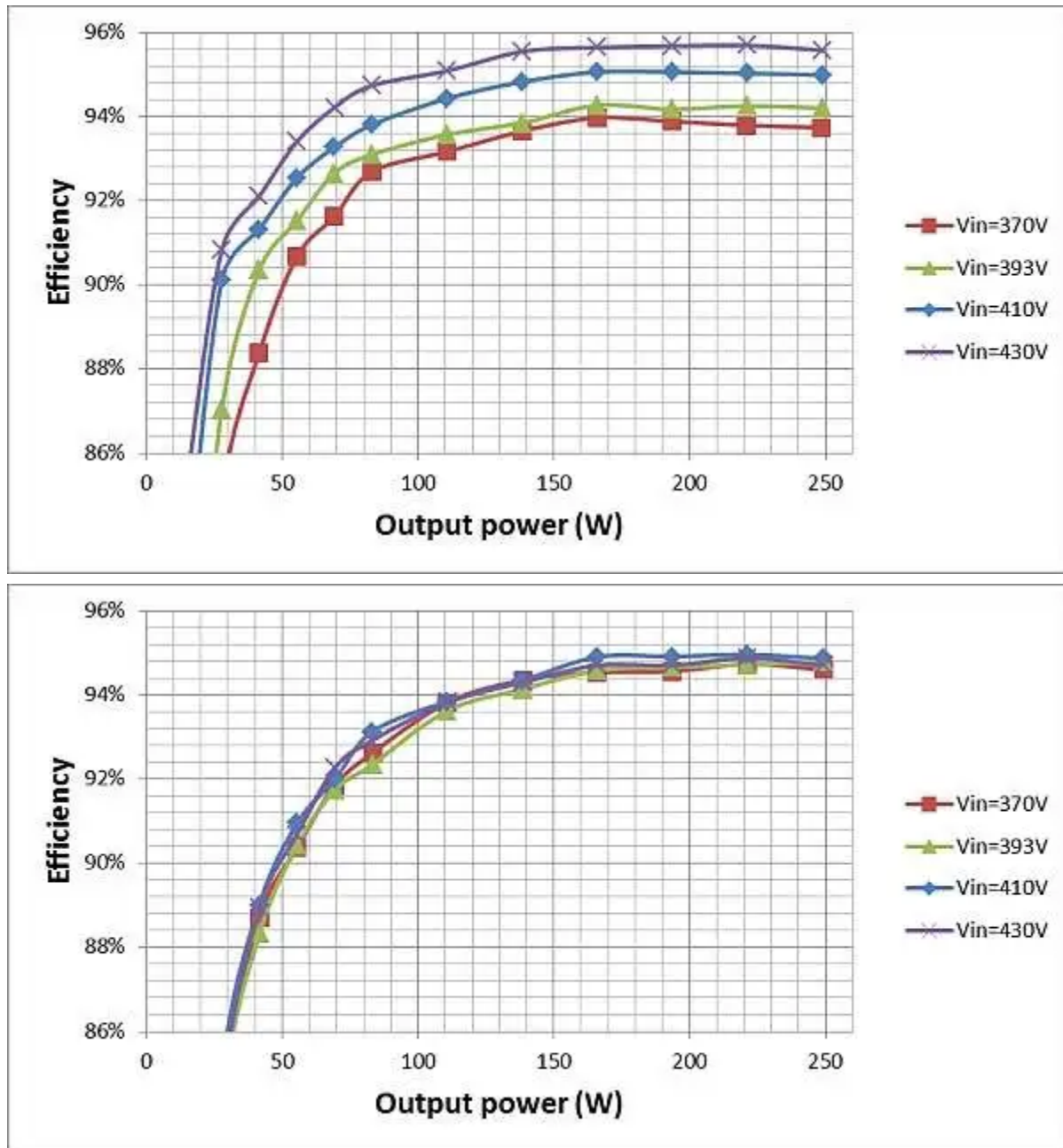


图 4. 不同輸入電壓位準的轉換器效率：改進的 CLL-MRC (上)；LLC-SRC (下)

LLC-SRC 確實是一種很好的拓撲結構，並提供了許多吸引人的功能。但視應用而定，它可能不是最佳解決方案。有時您必須跳出思維框架，才能以更低的電路成本實現更高的效率。

其他資源

- 閱讀德州儀器電源設計研討會上的這些論文：
 - 「[設計 LLC 諧振半橋式電源轉換器](#)」。
 - 「[諧振轉換器拓撲調查](#)」。
 - 「[同步整流器的控制與設計挑戰](#)」。
- 查看「[400V DC 輸入轉 28V/9A 輸出、精巧型高效率 CLL 全橋式轉換器參考設計](#)」。

相關文章

- [LLC 諧振拓撲結構可降低開關損耗，提高效率](#)
- [使用數位控制實現高效諧振模式](#)
- [選擇半橋式諧振 LLC 轉換器和一次側 MOSFET 時的設計考量](#)
- [使用準諧振和諧振轉換器](#)
- [用電訣竅 #77：設計 CCM 返馳轉換器](#)

前述內容發佈於 [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