

## Technical Article

## 高頻共振轉換器設計考量，第 2 部分



Sheng-Yang Yu

本系列第一期內容著重探討影響共振轉換器設計的重要寄生參數，以及元件選擇標準與變壓器設計。本期內容將著重於共振轉換器同步整流器 (SR) 設計考量。

共振轉換器的運作狀態可能比脈衝寬度調變轉換器複雜得多。以 图 1 中的電感器-電感器-電容器-串聯共振轉換器 (LLC-SRC) 為例，一般 LLC-SRC 設計共有四種常見狀態 (图 2)，其具備指定的負載條件與切換頻率 ( $f_{sw}$ ) 相對位置，以及串聯共振頻率 ( $f_r$ )。若為  $f_{sw} r$ ，整流器二極體會在啟動開關 ( $Q_1$  或  $Q_2$ ) 關閉前變為零。因此，在將金屬氧化半導體場效電晶體 (MOSFET) 應用作為整流器 (即 SR) 時，SR 必須在低於 50% 占空比的情況下關閉，以避免整流器電流迴流。否則，變頻器效率會因循環電流過大而受損。

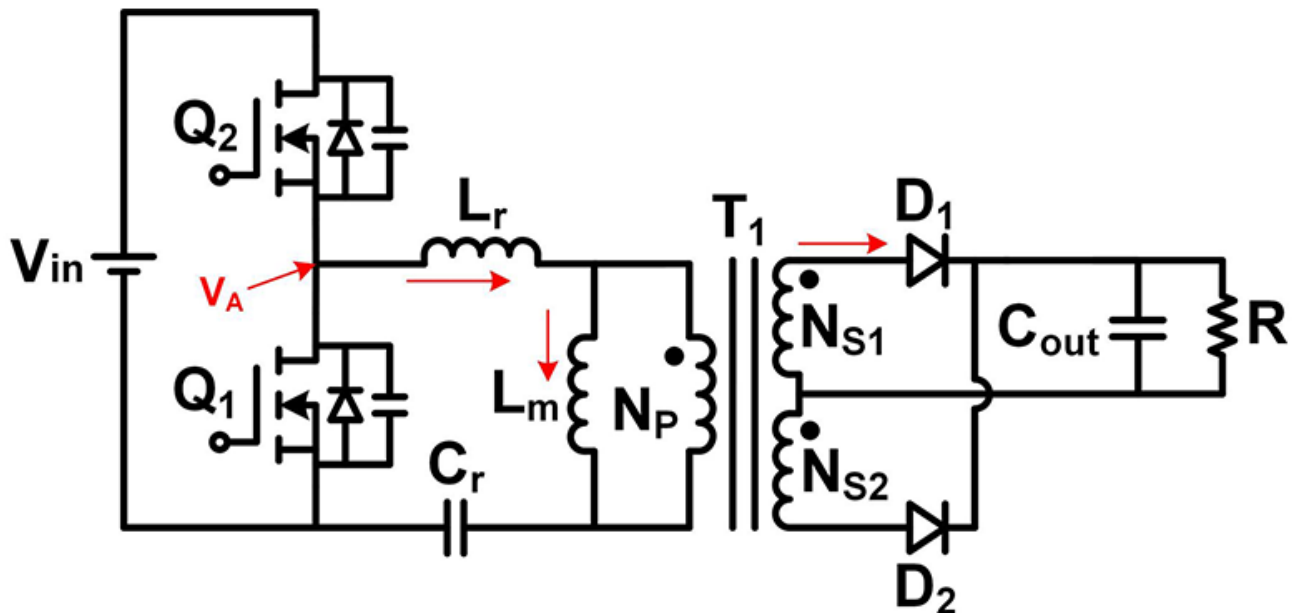


图 1. 電感器-電容器串聯共振轉換器 (LLC-SRC) 提供允許高頻率運作的軟切換功能。

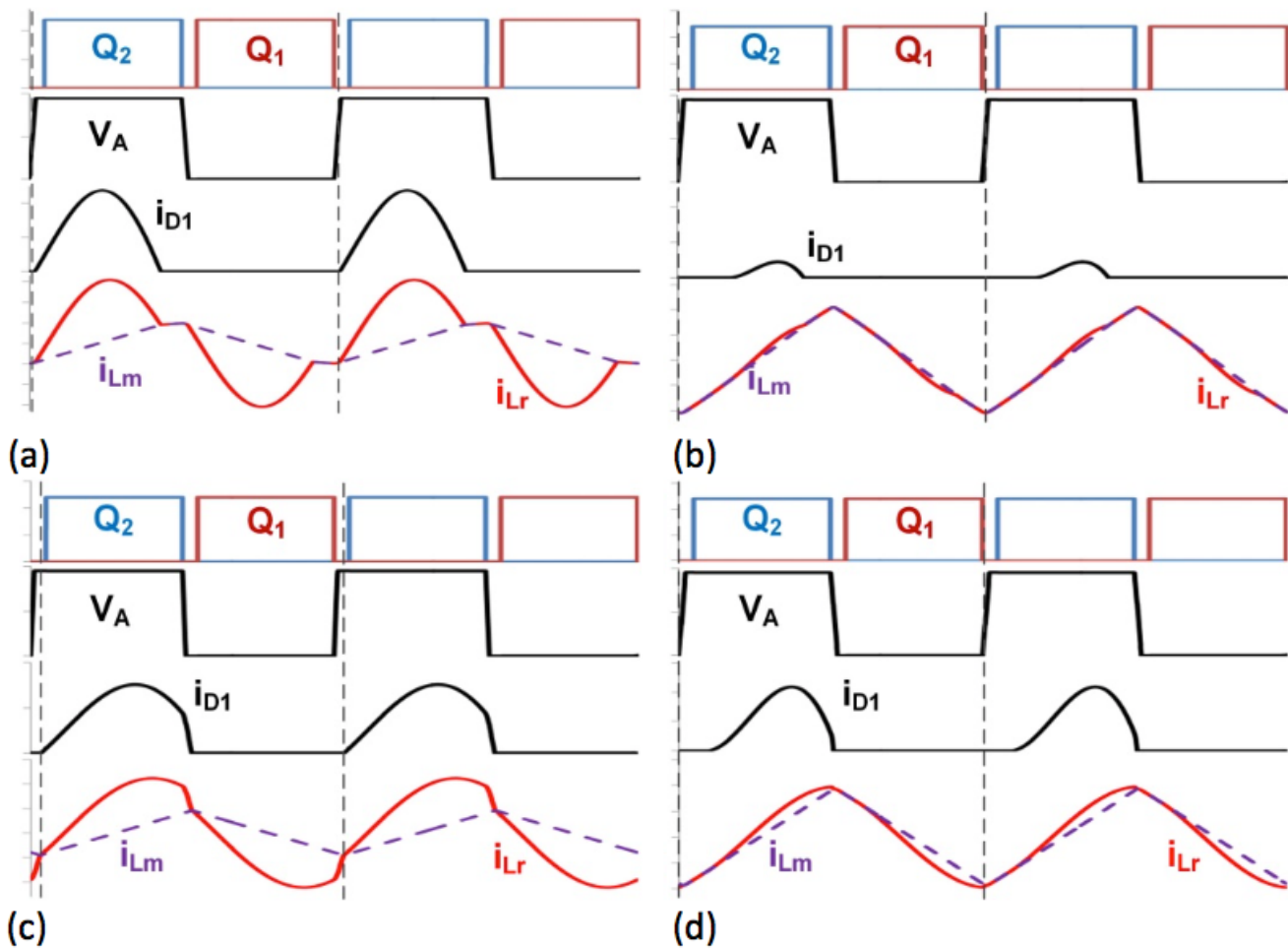


图 2. 針對處於重負載與  $f_{sw} < f_r$  (a)、輕負載與  $f_{sw} < f_r$  (b)、重負載與  $f_{sw} > f_r$  (c)，以及輕負載與  $f_{sw} > f_r$  (d) 時的 LLC-SRC 運作狀態，必須執行電流感測以避免在套用 SR 時輸出整流器產生反向電流流動。

若為  $f_{sw} < f_r$ ，處於重負載時的實際整流器電流傳導時間為  $0.5/f_r$ 。因此在處於  $f_{sw} < f_r$  時，可將重負載下的 SR 傳導時間限制在略低於  $0.5/f_r$ ，並在較輕負載下停用 SR [1]。不過，此開環 SR 控制方法無法將轉換器效率最佳化。

更可靠的 SR 控制方法是透過 MOSFET 汲極至源極電壓 ( $V_{DS}$ ) 感測 [2] 图 3()。基本上，此 SR 控制方法會將 MOSFET  $V_{DS}$  與兩個不同電壓閾值進行比較，以開啟和關閉 MOSFET。一些較新的  $V_{DS}$  感測 SR 控制器 (如德州儀器的 UCC24624) 甚至還有第三個電壓閾值，可啟動比例閘極驅動器以最小延遲快速關閉 SR。



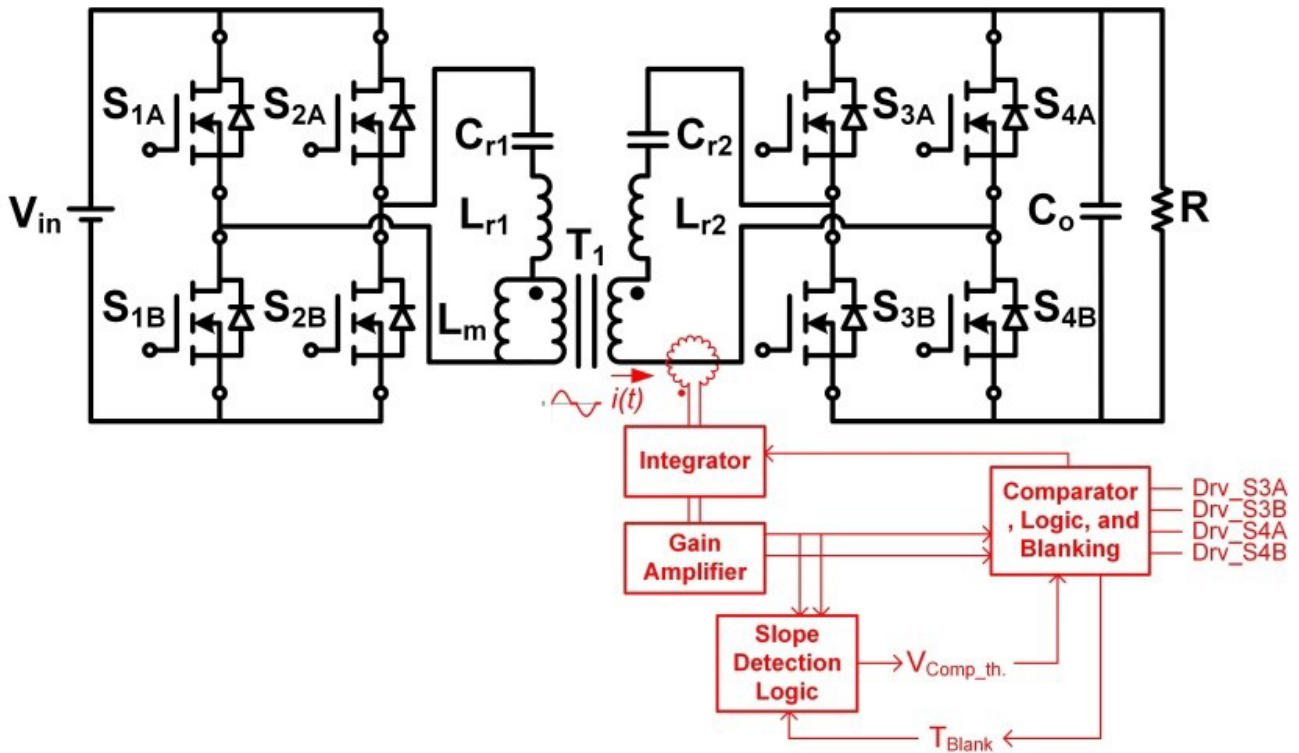


图 4. Rogowski 線圈 SR 控制可在 CLLLC-SRES-DAB 轉換器中，實現精確的高頻 SR 感測與控制。

在 Rogowski 線圈後新增整合器可產生處於相位的電壓，甚至會引導原始時變電流。因此，您可將整合商輸出的零電壓交叉設定為略早於時變電流零電流交叉，以適應可能的傳播和控制延遲。然後將放大的積分器輸出訊號與指定的比較器閾值進行比較，以產生接近最佳化 SR 傳導時間的 SR 驅動訊號。插入控制電路中的額外斜率偵測邏輯，可在不同負載條件下進一步最佳化 SR 傳導時間。由於 Rogowski 線圈會透過磁通量感應電流，因此沒有電壓電平限制。此外，Rogowski 線圈使用空芯而非磁芯材質，因此其頻寬在沒有飽和限制的情況下相當高；因此即使在百萬赫茲位準共振轉換器上也沒有頻率限制問題，這與  $V_{DS}$  感測 SR 控制方法不同。

图 5 說明了此處建議的方法。將图 5 中的可變電流定義為  $i(t)$ ，並假設將 Rogowski 線圈垂直放置在變壓器繞組上，您可使用 方程式 1 將 Rogowski 線圈繞組輸出電壓計算如下：

$$V_{1_0}(t) = \frac{-AN\mu_0}{l} \frac{di(t)}{dt} \quad (1)$$

其中， $A$  是每一圈 Rogowski 線圈的截面積（假設 Rogowski 線圈的截面積皆相同）， $N$  是 Rogowski 線圈的圈數， $l$  是 Rogowski 線圈環的周長，而  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$  為滲透常數。

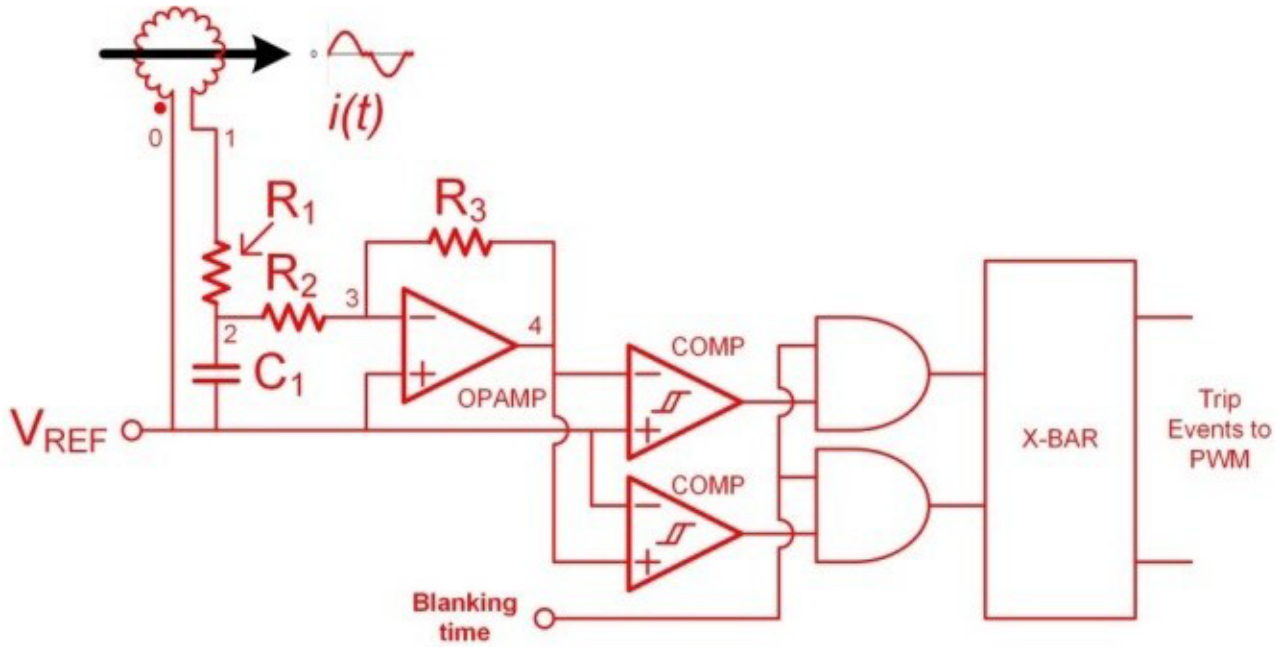


图 5. 被动整合器可讓 Rogowski 線圈 SR 控制電路預測零電流交互計時。

假設使用建議感測電路中使用的理想運算放大器，[方程式 2](#) 表示 Rogowski 線圈輸出  $v_{1\_0}$  與被動積分器輸出  $v_{2\_0}$  之間的電壓關係：

$$\frac{dv_{2\_0}(t)}{dt} + \left( \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_1} \right) v_{2\_0}(t) = \frac{v_{1\_0}(t)}{R_1 C_1} \quad (2)$$

您可採用 [方程式 3](#) 形式求解 [方程式 2](#) 中的差動方程式

$$v_{2\_0}(t) = \frac{1}{I} \int I \frac{v_{1\_0}(t)}{R_1 C_1} dt + \frac{a_0}{I} \quad (3)$$

其中， $a_0$  為常數，以 [方程式 4](#) 表示。

$$I = e^{\left( \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_1} \right) t} + constant \quad (4)$$

為了更輕鬆地瞭解如何調整被動積分器與放大器的相位差，我們假設時變電流為純正弦，這將使 Rogowski 線圈輸出電壓與積分器輸出為純正弦。換句話說，求解 [方程式 1](#) 與 [方程式 2](#) 得到的答案為  $i(t)$ ，假設  $v_{2\_0}(t) = a_1 \sin(\omega t)$ ，則可將 [方程式 2](#) 重寫為 [方程式 5](#)：

$$i(t) = \frac{a_1 l}{AN\mu_0} \sin\left(\omega t + \phi + \frac{\pi}{2}\right) \quad (5)$$

其中 [方程式 6](#)

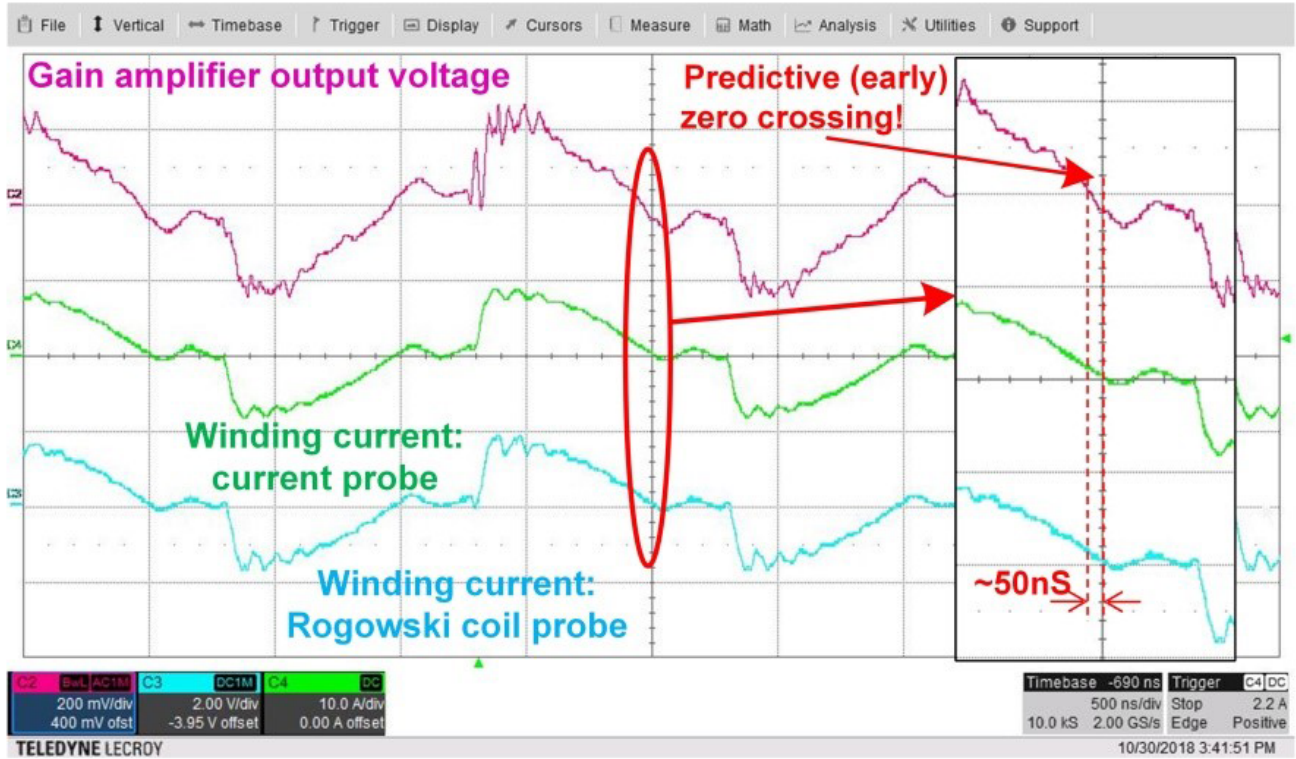
$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{a_1 \omega}{a_2}\right) = \tan^{-1}\left[\frac{\omega}{\left(\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_1}\right)}\right] \quad (6)$$

若翻轉 Rogowski 線圈的針腳配置，時變電流會變為 [方程式 7](#)：

$$i(t) = \frac{a_1 l}{AN\mu_0} \sin\left(\omega t + \phi - \frac{\pi}{2}\right) \quad (7)$$

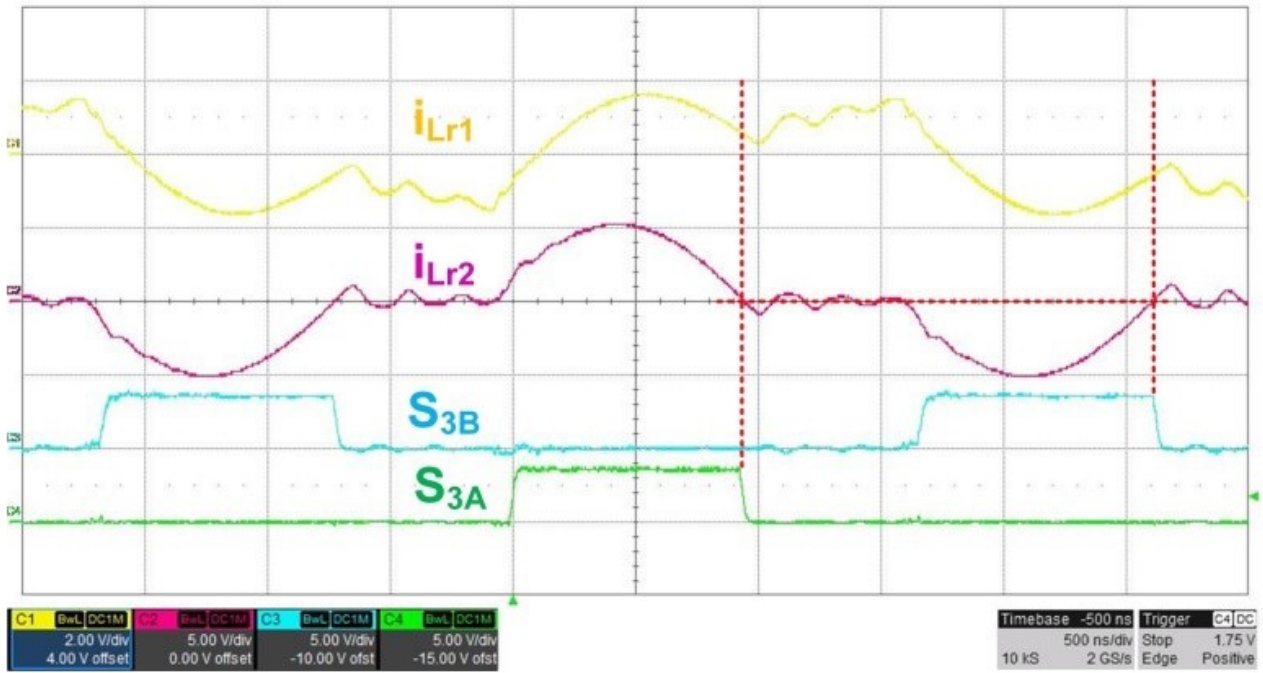
若透過改變  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $C_1$  和  $f_{sw}$  ( $\omega = 2\pi f_{sw}$ ) 的值，針對 **方程式 3** 設為  $\Phi = -\pi/2$ ，並針對 **方程式 4** 設為  $\Phi = \pi/2$ ，且在 Rogowski 線圈輸出與積分器輸入之間具有正確的連接極性，則積分器輸出  $v_{20}(t)$  可與 SR 電流  $i(t)$  處於同一相位。此外，您可在實際應用中設定積分器波形，以產生 SR 電流。因此在控制器與驅動器的反應時間和傳播延遲方面，SR 關閉計時仍可巧妙地處於零電流交叉點。

**图 6** 顯示感測電路的繞組電流量測與增益放大器輸出電壓。如各位所見，編程零電壓交互比實際感測電流更早關閉時，可適應傳播和控制延遲。

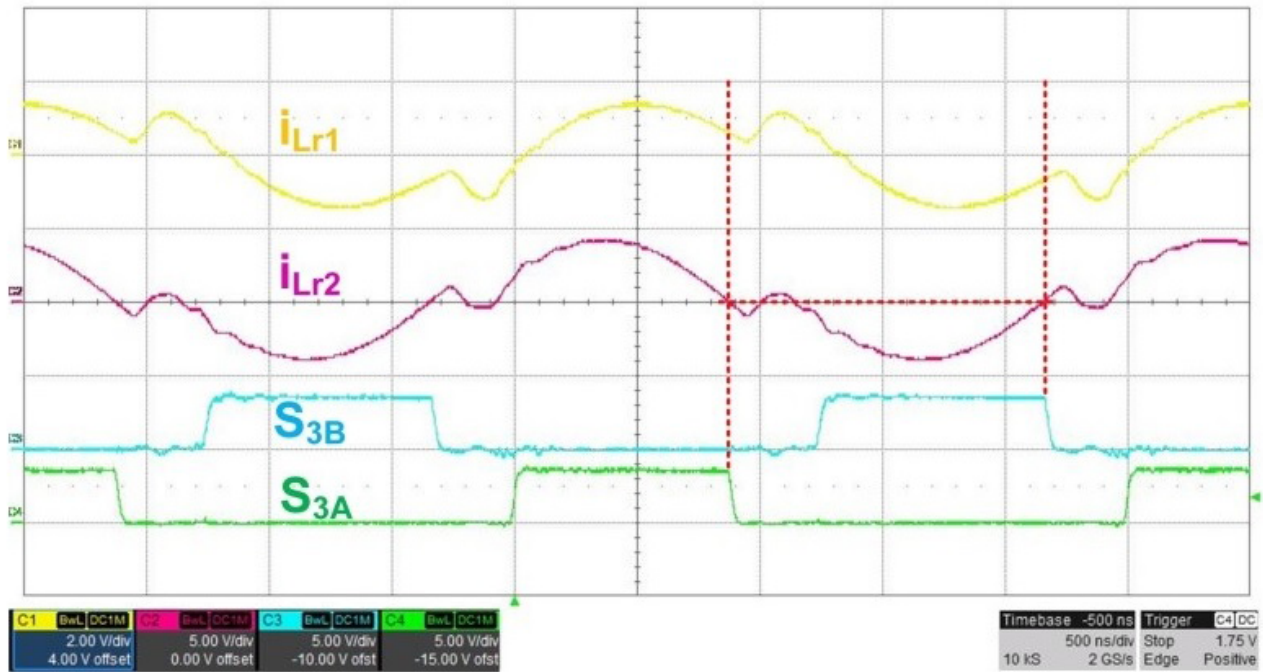


**图 6.** 此 SR 電流量測比較顯示了預測性 SR 感測，因為積分器輸出的零電流交叉比實際零電流交叉更早。

**图 7** 說明切換頻率低於串聯共振頻率時的理想 SR 關閉計時。



(a)



(b)

图 7. SRS 在 300 kHz (a) 和 400 kHz (b) 的完全零电流交叉处关闭。

## 參考

1. J. Wang 與 B. Lu : 「[適用於 LLC 共振轉換器的開環同步整流器驅動器](#)」，出處：《APEC》第 2048-2051 頁，2013 年。
2. [適用於 LLC 共振轉換器的 UCC24624 雙通道同步整流器控制器](#)，德州儀器
3. M.H.Samimi、A. Mahari、M.A. Farahnakian 和 H. Mohseni，「[Rogowski 線圈原則與應用：A Review](#)」，IEEE 感測器期刊第 15 冊，第 651-658 頁，2015 年。
4. B. Zhao、Q. Song、W. Liu 和 Y. Sun，「[適用於高頻連結電源轉換系統的主動橋接式隔離雙向 DC-DC 轉換器](#)」，電力電子的 IEEE 交易，第 29 冊，第 4091-4106 頁，2014 年。

## 相關文章

- [用電訣竅 #89：高頻諧振轉換器設計注意事項第 1 部分](#)
- [使用準諧振和諧振轉換器](#)
- [使用 Rogowski 電流探針測量小阻抗](#)
- [使用數位控制實現高效諧振模式](#)
- [用電訣竅 #84：跳脫 LLC 串聯共振轉換器框架](#)

先前發佈於 [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