

利用 LTspice 的 FFT 分析功能測量電容器有效漣波電流

本文為電源設計人員提供了一套行之有效的方法，可用於測量開關電源中鋁電解電容 (Al-Ecaps) 的有效漣波電流，該參數是估算電容使用壽命的關鍵依據。這套方法藉由 LTspice 處理實測資料，能夠精準計算有效漣波電流，而漣波電流正是導致電容內部發熱、加速性能衰減的核心誘因。這套方法將示波器擷取的資料轉換為分段線性 (PWL) 訊號源，透過自動快速傅立葉轉換 (FFT) 分析，計入與頻率相關的加速因數。藉由這套工作流便無需使用昂貴測試設備，也不必依賴過於簡化的近似估算，即可完成對電容有效漣波電流及對應內部溫升的驗證。

■文：Ino Lorenz Ardiente / ADI 資深系統設計工程師
Bryan Angelo Borres / ADI 資深產品應用工程師

電源設計方案的穩固性，立足於產品具有可預測的長久使用壽命。對於常規開關電源 (SMPS)，可靠性往往取決於鋁電解電容 (Al Ecap) 的特性¹。與其他類型的電容器不同^{2,3}，鋁電解電容採用液態電解質，易出現擴散與揮發現象，因而成為整機首要壽命瓶頸，更是決定系統工作壽命的關鍵因素^{1,4}。

鋁電解電容的預估壽命 (L_X) 可透過如下模型計算：將製造商標稱的額定壽命，與一組考慮應用中電氣及熱特性的加速因數相乘得到。該通用乘法公式可表示為：

$$L_X = L_0 \times K_T \times K_V \times K_R \quad (1)$$

其中， L_0 為額定壽命或電容設計壽命， K_T 為熱加速因數， K_V 為電壓加速因數， K_R 為漣波電流加速因數^{4,5}。公式 1 會因電容器製造商而異；公式 2 顯示了一個範例⁶。

$$L_X = L_0 \times 2^{\frac{K_T(T_0 - T_X)}{10}} \times 2^{\frac{\Delta T_0 - \Delta T}{A}} \times K_V \quad (2)$$

其中， L_X 和 L_0 以小時為單位， K_T 為環境溫度加速因數， T_0 為類別溫度範圍的上限 (以 °C 為單位)， T_X 為實際環境溫度 (以 °C 為單

位)， ΔT_0 為額定漣波電流引起的內部溫升 (以 °C 為單位)， ΔT 為實際漣波電流引起的內部溫升 (以 °C 為單位)， A 為漣波電流所致溫升的加速因數。

什麼是漣波電流？

漣波電流 (I_R) 是指流經電容器的電流，通常產生於濾波應用中的充放電迴圈過程。漣波電流產生的內部發熱，與電流及元件等效串聯電阻 (ESR) 呈二次函數關係，如公式 3 所示。由此產生的功耗會轉化為熱量，致使電容內部溫升 (ΔT)⁶。

$$P_D = I_R^2 \times ESR \quad (3)$$

由於 SMPS 由主電源頻率和開關頻率元件組成，因此公式 3 所描述的電容內部功耗可進一步推導為公式 4，其中 I_{f1} 、 I_{f2} 和 I_{fn} 為頻率 f_1 到 f_n 的漣波電流有效值 (A rms)， F_{fn} 為頻率補償因數 (頻率倍增係數)，而 f_0 則是漣波電流基準頻率⁶。

$$P_D = I_{f1}^2 \times ESR_{f1} + I_{f2}^2 \times ESR_{f2} + \dots + I_{fn}^2 \times ESR_{fn} \quad (4)$$

$$ESR_{fn} = \frac{ESR_{f0}}{F_{fn}^2} \quad (5)$$

結合公式 4 與公式 5，可透過公式 6 將任意頻率下的漣波電流折算為基準頻率下的有效值 (I_{f0})⁶。

$$I_{f0} = \sqrt{\left(\frac{I_{f1}}{F_{f1}}\right)^2 + \left(\frac{I_{f2}}{F_{f2}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{I_{fn}}{F_{fn}}\right)^2} \quad (6)$$

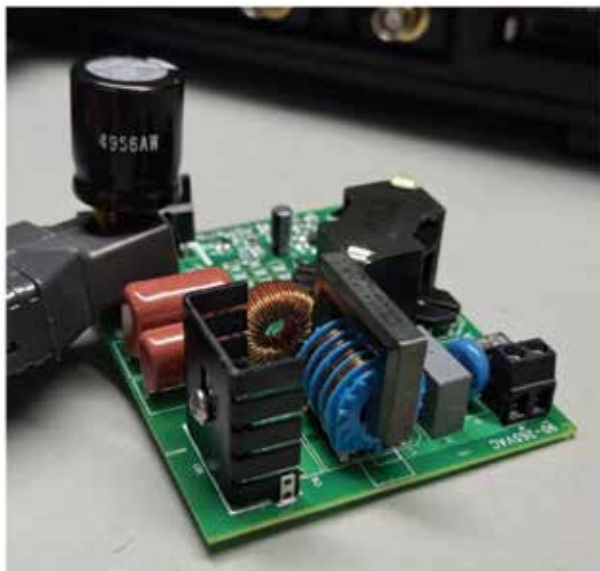
此外，由漣波電流引起的內部溫升 (ΔT) 近似值可透過公式 4 計算。式中 I_x 為電容實際工作漣波電流有效值 (A rms)， I_o 為類別溫度上限條件下、經頻率補償後的額定漣波電流有效值 (A rms)。公式 7 的計算結果可代入公式 2 中，用於推算電容器的預估壽命 (單位：小時)⁶。

$$\Delta T = \left(\frac{I_x}{I_o}\right)^2 \times \Delta T_o \quad (7)$$

利用 LTspice 測量電容器漣波電流

在功率因數校正 (PFC) 轉換器中，輸出端的鋁電解電容不僅會承受整流環節產生的 100Hz 或 120Hz 低頻漣波電流，還會承受轉換器開關工作所產生的高頻漣波電流。透過快速

圖 1：在電容引線上增加短接延伸段，以便使用電流探頭進行漣波電流測量

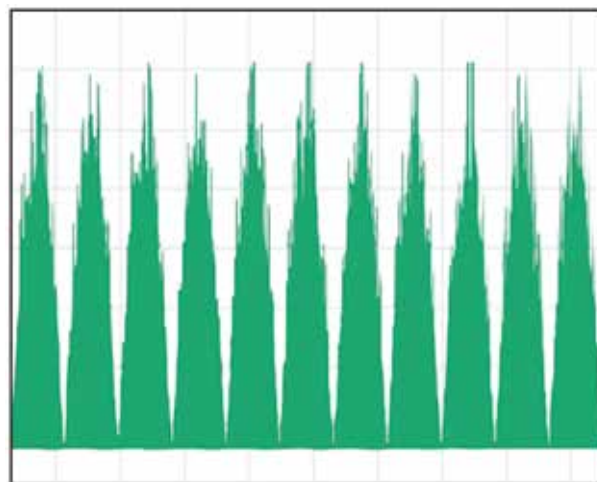


傅立葉轉換 (FFT) 分析，可得到各頻譜分量下的漣波電流有效值。透過引入頻率補償係數並對各有效值進行求和計算，即可利用公式 6 得出總有效漣波電流。

為展示如何利用 LTspice 測量電容器漣波電流，本文採用 DC2104A 評估板進行實驗。該展示板是一款基於 LT8312 的離線式、邊界導通模式 (BCM) 功率因數校正 (PFC) 升壓轉換器，可輸出單路 400V、150W 穩壓電壓，適用於需要穩定輸入匯流排的應用場景。

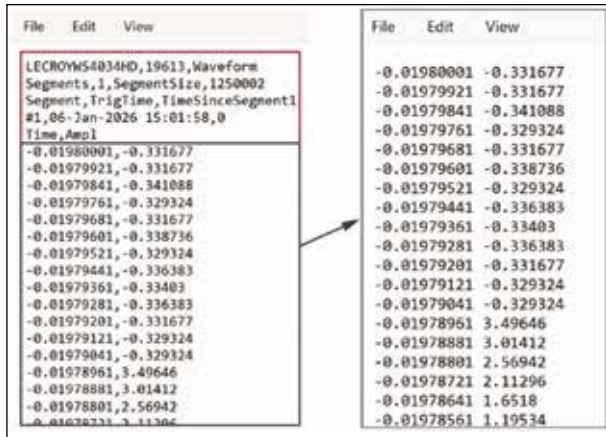
首先，需在電容器接腳上加裝短接延伸段，以便連接電流探棒，如圖 1 所示。使電路在預期漣波電流最大的輸入輸出條件下工作，並調整示波器視圖，讓時間視窗盡可能包含波形週期的整數倍，如圖 2 所示。在漣波電流波形中，低頻分量對電容內部發熱的影響遠大於高頻分量。因此，在執行 FFT 分析時，使用的時間視窗必須等於最低頻率分量的整數倍；本範例中採用 120Hz (100Hz)。

圖 2：波形週期的整數倍 (120Hz)



接下來，將示波器擷取到的漣波電流波形匯出為 CSV 檔案格式。為確保 LTspice 能正確識別示波器匯出的 CSV 資料，資料集格式必須與圖 3 所示格式一致。具體操作步驟為：在文字編輯器中打開 CSV 檔，刪除標題行，然後將

圖 3：將示波器匯出的 CSV 檔編輯為 LTspice 可識別的格式。

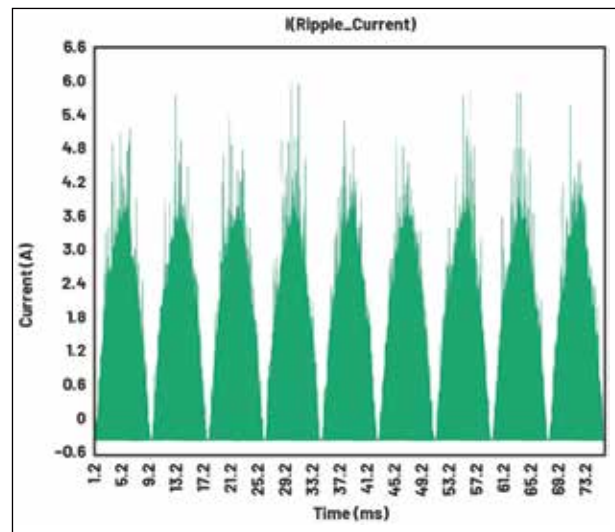


所有逗號分隔符號替換為空格。

資料格式編輯完成後，在 LTspice 中創建一個新的原理圖，並複製圖 4a 中顯示的配置。該原理圖由一個分段線性 (PWL) 電壓源與一個 1Ω 電阻負載構成。按照圖 4b 所示，將編輯好的 CSV 檔分配至 PWL 電壓源；然後執行瞬態模擬，模擬時間需與示波器擷取資料的時間跨度保持一致。在運行模擬前，務必確保使用的是最新版本的 LTspice。完成上述操作後，檢測電阻中的電流即可得到漣波電流波形，如圖 5 所示。

為實現精準的 FFT 分析，輸入波形必須連續且具有週期性。如果示波器或 LTspice 中

圖 5：LTspice 中 DC2104A 評估板上主電容的漣波電流



顯示的波形在邊緣處存在間斷點，對該類資料執行 FFT 分析會導致結果與真實值出現顯著偏差。針對此一問題，可透過施加窗函數來平滑間斷點，使波形呈現連續特性⁷。而在 LTspice 中，還可透過縮放波形來消除低頻間斷點。具體方法是調整時間軸，使其顯示波形週期的整數倍，本示例中波形頻率為 120Hz (100Hz)。操作時，可按右鍵時間軸，相應修改最左值、刻度間距與最右值。如圖 5 中的示例所示，最左值為 1.2ms，最右值為 76ms。

在波形視窗處於活動狀態時，按圖 6a 所

圖 4：(a) 含 PWL 電壓源與電阻的 LTspice 原理圖 (左)；(b) 將資料分配至 PWL 電壓源 (右)

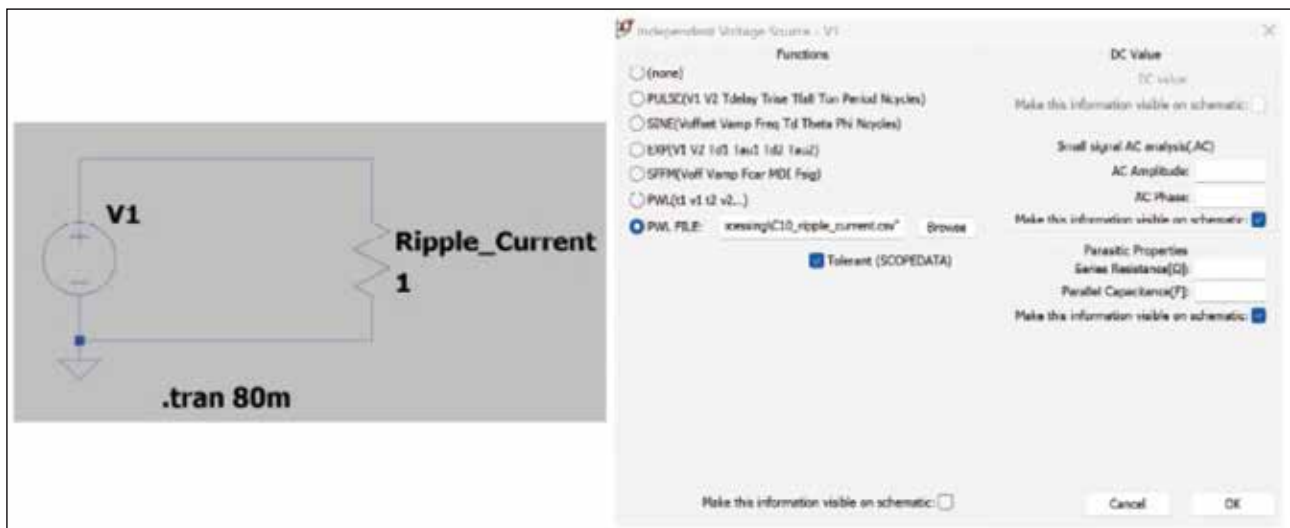


圖 6：(a) LTspice FFT 功能；(b) 使用目前縮放區間

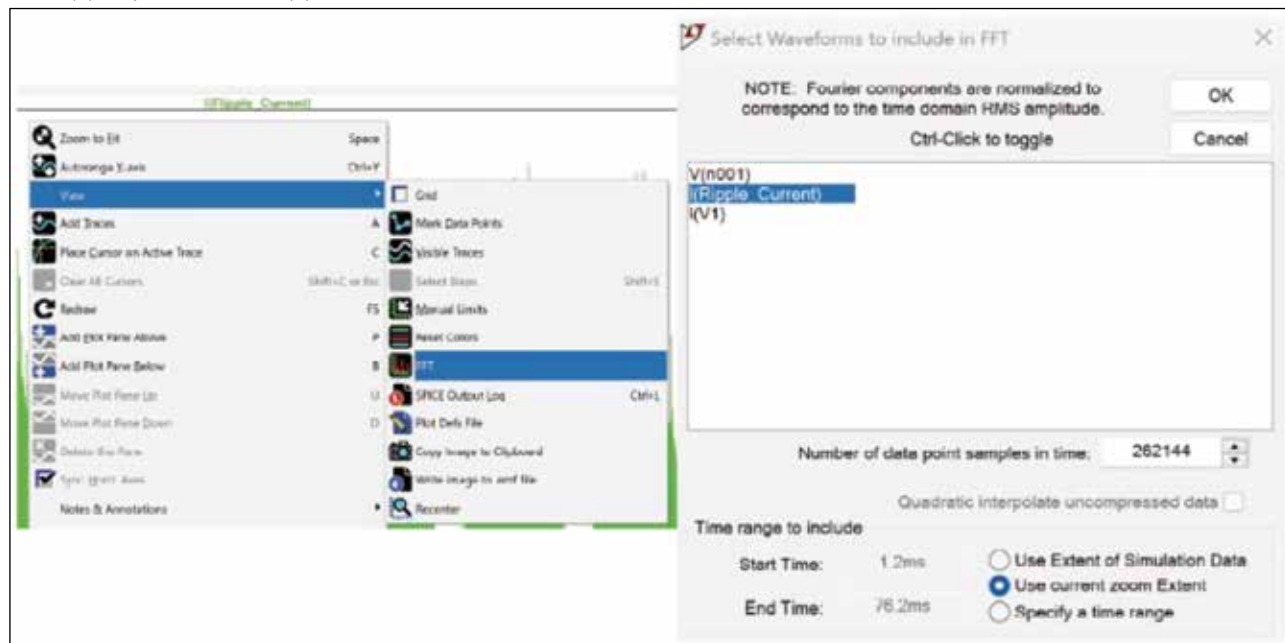
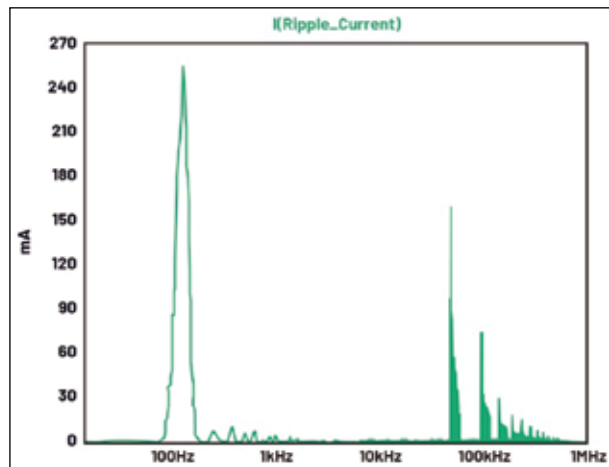


圖 7：DC2104A 評估板上主電容漣波電流的 FFT 分析結果



示操作，在功能表列依次按一下 View (視圖)→FFT。執行該操作後，軟體將基於圖 6b 中所選的目前縮放區間資料，生成 FFT 分析結果。按

圖 8：對各頻率分量的幅值進行計算與排序，以求解有效漣波電流

D2						
fx -SQRT(B2^2+C2^2)						
	A	B	C	D	E	F
1	Freq.	I(Ripple_Current) (Re)	I(Ripple_Current) (Im)	Magnitude	Frequency Multiplier	I^2 [Arms/120Hz]
2	120.00	-2.66E-01	9.30E-03	0.265435201	1	0.065247188
3	106.67	1.76E-01	-6.30E-03	0.176000925	1	0.030976326
4	133.33	1.72E-01	-5.60E-03	0.171945469	1	0.029565244
5	48653.33	-1.13E-01	1.13E-01	0.159676007	1.4	0.013040969
6	48533.33	1.24E-01	-8.55E-02	0.150968797	1.4	0.011628356

右鍵 Y 軸並選擇線性顯示方式，按右鍵 X 軸並將範圍設定為 10Hz 至 1MHz，即可得到如圖 7 所示的漣波電流頻域波形。

從功能表列中，選擇 File(檔)>Export Data as Text(匯出資料為文字檔)，以生成包含 FFT 結果的 CSV 檔。資料可採用直角座標格式或極座標格式匯出。關鍵步驟是透過公式 8 計算各頻率下的幅值(D 列)，再按數值從大到小排序(F 列)，如圖 8 所示。

$$I_{\text{ripple(mag)}} = \sqrt{I_{\text{ripple(Re)}}^2 + I_{\text{ripple(Im)}}^2} \quad (8)$$

其中， $I_{\text{ripple(Re)}}$ 為直角座標格式下漣波電流資料的實部， $I_{\text{ripple(Im)}}$ 為虛部。

計算基頻下的漣波電流時，需採用電容器

資料手冊中提供的頻率校正係數 (E 列)。根據資料中得到的漣波電流頻率 (A 列)，確定所需採用的電容頻率校正係數。然後，使用公式 6 計算電容的有效漣波電流。

在邊界導通模式 PFC 轉換器中，開關頻率不是固定不變的，因此務必對盡可能多的頻率分量求和，才能更貼近實際漣波電流，本文範例即採用此種方式。不過，在開關頻率固定的連續導通模式 PFC 轉換器中，只需選取開關頻率及其諧波處的少量漣波電流峰值即可簡化計算。對前 1000 個最大峰值點計算得到的有效漣波電流為 0.76 A rms。隨後可透過公式 7 計算預估內部溫升 (ΔT)；其中，電容額定參數（如額定漣波電流 (IO) 及其對應內部溫升 (ΔT_O)）均取自製造商的資料手冊。

結論

LTspice 模擬為評估電源設計中鋁電解電容的有效漣波電流提供了高效可靠的方法。此外，模擬輸出能夠清晰呈現各頻率對應的頻譜分量，結合源自資料手冊的頻率校正係數，即可精準計算電容的內部溫升與使用壽命。

參考資料

¹ Martin, “MTBF – Is It A Prediction of a Power Supply’s Operating Life?” TDK Lambda, 2020 年 2 月。

² Bryan A. Borres、Ino L. Ardiente、Jahres R. Satur、Flordeliza Valiente 和 Jesus Martinez, “Design Optimization of a Two-Phase Interleaved Transition Mode Boost Converter for Power Factor Correction”, 2019 年 IEEE 第 11 屆人形機器人、奈米技術、資訊技術、通訊與控制、環境及管理國際會議 (HNNICEM), 2020 年 4 月。

³ Tianyu Chen、Sen Li 和 Babak Fahimi, “Analysis of DC-Link Voltage Ripple in Voltage Source Inverters Without Electrolytic Capacitor”, IECON 2018 – IEEE 工業電子學會第 44 屆年會, 2018 年 12 月。

⁴ Marcantonio Catelani、Lorenzo Ciani、Roberto Singuaroli 和 Andrea Mannucci, “Electrolytic Capacitor Lifetime Prediction In Ground Mobile Applications”, 第 13 屆 IMEKO TC10 技術診斷研討會, 2014 年 6 月。

⁵ “Lifetime Estimation of Capacitors”, AIC tech Inc.

⁶ “Lifetime of Aluminum Electrolytic Capacitors”, 日本貴彌功株式會社。

⁷ “How to Measure Ripple Current Using the FFT Analysis Function”, 日本貴彌功株式會社

⁸ “Snap-in Aluminum Electrolytic Capacitors”, Rubycon。 

COMPOTECHAsia 臉書

每週一、三、五與您分享精彩內容

<https://www.facebook.com/lookcompotech>