

主動 EMI 濾波器 IC 如何降低單相和三相電源系統中的共模輻射，並提升功率密度。



Timothy Hegarty

摘要

電磁干擾 (EMI) 輸入濾波器的精巧高效設計，是高密度切換穩壓器的主要挑戰之一，而且對於在汽車、企業、航太和其它極度受限的系統環境中達成電氣化完整效益，極為重要。例如，車載充電器和伺服器機架電源供應器係屬高功率應用，而在這些應用中，減小 EMI 濾波器零組件體積以協助讓解決方案符合具挑戰性的外形尺寸是相當重要的，尤其是隨著具有快速切換特性的寬能隙 (以氮化鎵 [GaN] 和碳化矽 [SiC] 為基礎) 功率半導體裝置的出現，可能會導致更高的共模 (CM) 輻射量。

由於接觸電流安全要求，用於商業 (A 類) 和住宅 (B 類) 環境的 CM 濾波器通常具備有限的 Y 電容，因此需要大尺寸的 CM 扼流圈才能達到必要的衰減，但在最後會造成濾波器設計使用體積龐大、笨重且昂貴的被動式零組件。主動式 EMI 濾波器 (AEF) 電路的部署可為新一代電源轉換系統提供更精實的濾波器設計。空間有限的應用 (例如上述那些應用) 透過利用主動型電力濾波器積體電路 (IC) 來大幅縮減磁性元件和總體濾波器尺寸，所以其進一步最佳化時機已經成熟。

本技術白皮書在感測、注入和控制技術方面紮實地闡述 AEF 電路的理論背景和一般原理，在單相和三相 AC 電源系統中透過使用德州儀器的一系列獨立 AEF IC 實現實用電路，達到 CM 噪音抑制之目的。3.3 kW 功率因數校正 (PFC) AC/DC 穩壓器的量測結果將說明 EMI 減少與節省電路板空間的優點。

目錄

1 簡介.....	3
2 EMI 頻率範圍.....	3
3 適合高功率電網應用的被動 EMI 濾波器.....	4
4 主動 EMI 濾波器.....	5
5 廣泛的 AEF 電路.....	6
6 CM 主動濾波器電路選擇.....	8
7 電容放大的概念.....	9
8 實際 AEF 實作情況.....	10
9 實際結果.....	11
9.1 低壓測試.....	11
9.2 高壓測試.....	12
10 摘要.....	14
11 參考.....	14

圖

图 2-1. 由 IEC 與 CISPR 分級的諧波電流與傳導性 EMI 頻率範圍.....	3
图 2-2. 9 kHz 至 30 MHz 頻率範圍內的 CISPR 準峰值和平均限值.....	3
图 3-1. 適用於單相系統 (a) 和三相系統 (b) 的典型二階被動 EMI 濾波器.....	4
图 3-2. 採用圖騰柱 PFC 中的傳統單相被動 EMI 濾波器參考設計.....	5
图 4-1. 具有感測、增益和注入階段的 AEF 基本概念。控制結構可以是 FB (a) 或 FF (b).....	5
图 5-1. 單相等效的基本主動濾波器結構 (四個 FB 和兩個 FF 電路) 根據控制、感測和注入技術進行分類：FB-CSVI (a)、FB-CSCI (b)、FB-VSVI (c)、FB-VSCI (d)、FF-VSVI (e) 和 FF-CSCI (f).....	6
图 6-1. 說明 CM 濾波與注入電容器倍增的基本原則的簡化原理圖.....	8
图 7-1. 注入支路 Z_{INJ} 的範例：啟用 AEF 與傳統 Y 電容器的比較，顯示透過主動回饋動作在更高頻率下增強的等效電容.....	9
图 8-1. CM 衰減的典範單相 (a) 和三相 (b) AEF 實作.....	10
图 8-2. TPSF12C3-Q1 三相獨立式 AEF IC 內部配置圖.....	11
图 9-1. 低電壓測試設定電路圖.....	11
图 9-2. 採用 AEF 的單相濾波器實作.....	12
图 9-3. AEF 停用與起用下的 EN 55032 B 類 EMI 結果.....	12
图 9-4. 具有 TIDM-1007 的 EMI 性能：使用相同濾波器停用與啟用 AEF.....	13
图 9-5. 具有 TIDM-1007 的 EMI 性能：相較於大型扼流器被動式濾波器的小型扼流器 AEF 設計.....	13
图 9-6. 由 AEF 實現的尺寸縮減：被動濾波器 (a)；主動濾波器 (b).....	13
图 9-7. 由 AEF (a) 實現的面積、體積、成本與重量縮減；扼流器大小比較 (b).....	13
图 9-8. 被動式設計 (2×12 mH) 與主動式設計 (4 mH 與 1 mH) 中所選 CM 扼流器的阻抗特性.....	14

表

表 5-1. 圖 5-1 的 AEF 電路依拓撲 (控制、感測與注入技術) 進行分類.....	7
表 9-1. 適用於被動和主動濾波器實作的 CM 扼流器零組件詳細資訊.....	14

註冊商標

所有商標均為其各自所有者的財產。

1 簡介

高密度應用的共模 (CM) 濾波器通常會對 Y 電容的總值產生與接觸電流安全要求相關的限制，因此需要大型 CM 扼流器來實現目標角頻率或濾波器衰減特性。得到的結果是折衷採用被動式濾波器設計，以及體積龐大、沉重且昂貴的 CM 扼流器，佔掉濾波器整體尺寸一大部分。

不過，主動 EMI 濾波器 (AEF) 電路可為新一代電源管理系統提供更精巧的濾波器設計。因此，空間有限的應用可使用 [主動式電源供應器濾波器積體電路 \(IC\)](#) 縮減磁性元件與整體濾波器尺寸。附帶的好處包括降低功率損耗以執行更出色的熱管理，使機械與封裝設計更容易，能夠降低密閉空間內零組件間的電磁耦合，也能降低成本。

2 EMI 頻率範圍

高頻率切換網路是切換模式 AC/DC 穩壓器能源轉換的重要元件。然而，這些切換網路也是輸入電流諧波和傳導性 EMI 的固有來源，對於共用相同電網連接輸入來源之相鄰設備的正常運作可能造成影響。

圖 2-1 說明由電磁相容性 (EMC) 標準組織分類的諧波和傳導性 EMI 頻率範圍，例如國際電子電機委員會 (IEC) 和國際無線電干擾特別委員會 (CISPR)。

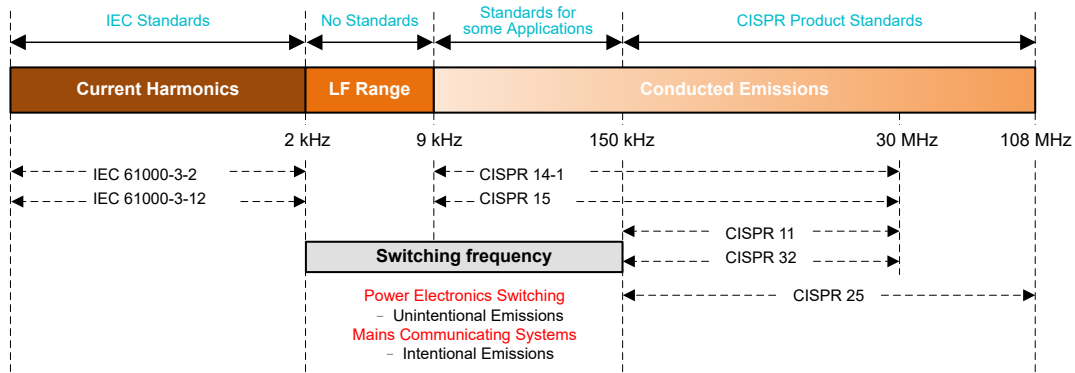


圖 2-1. 由 IEC 與 CISPR 分級的諧波電流與傳導性 EMI 頻率範圍

運用 PFC 技術可使輸入電流諧波符合 IEC 61000-3-2/-12 在頻率高達 2 kHz 時所設定的限制。但為了使高頻雜訊電流衰減，並符合從 150 kHz [11] 開始的分級頻率範圍內的傳導放射規格 (例如工業用 CISPR 11、車用 CISPR 25)，EMI 濾波器仍為強制性濾波器，如 **圖 2-2** 所示。

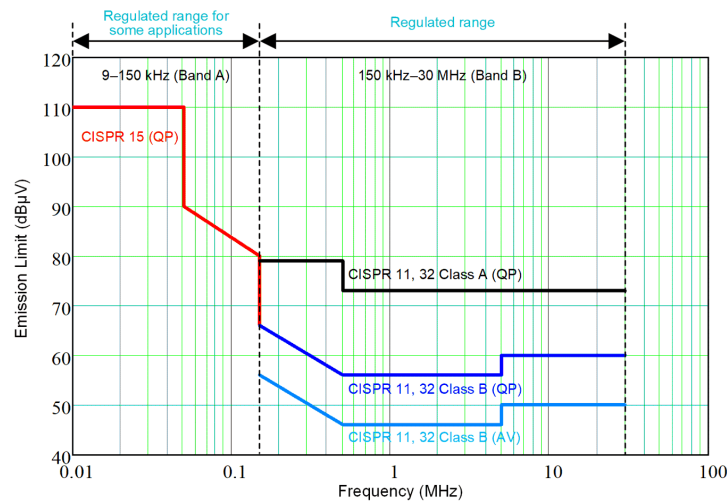


圖 2-2. 9 kHz 至 30 MHz 頻率範圍內的 CISPR 準峰值和平均限值

如 **圖 2-2** 所示，目前只有家用電器和照明應用的 CISPR 14-1 和 CISPR 15 產品標準指定放射限制低至 9 kHz。然而，隨著標準化活動持續進行，即將納入現有 IEC 61000-6-3 通用 EMI 標準 [11-2] 的 9 至 150-kHz 頻帶和適用放射限制，勢必會影響 EMI 濾波器未來衰減低於 150 kHz 的設計。要在廣大的頻率範圍中降低 EMI，需相對較大的被動元件。

3 適合高功率電網應用的被動 EMI 濾波器

遵守旨在限制傳導放射等級的 EMC 法規，必須在切換穩壓器和電源輸入來源之間插入低通 EMI 濾波器。圖 3-1 說明千瓦級電網連接應用中的單相（三線）與三相（四線）系統的典型濾波器整備。L、N 和 PE 分別指帶電、中性和保護性接地端子。如圖所示，多階濾波器提供高滾降率，這在高功率 AC 線路應用中很常見，而在這些應用中，CM 雜訊通常比差模 (DM) 雜訊更難以緩解。雖然 圖 3-1 省略了突波脈衝防護和電阻放電的零組件，但該電路圖合併了一個與輸入電源串聯的線路阻抗穩定網路 (LISN)，能夠測量總 EMI，包括 DM 和 CM 傳播零組件。

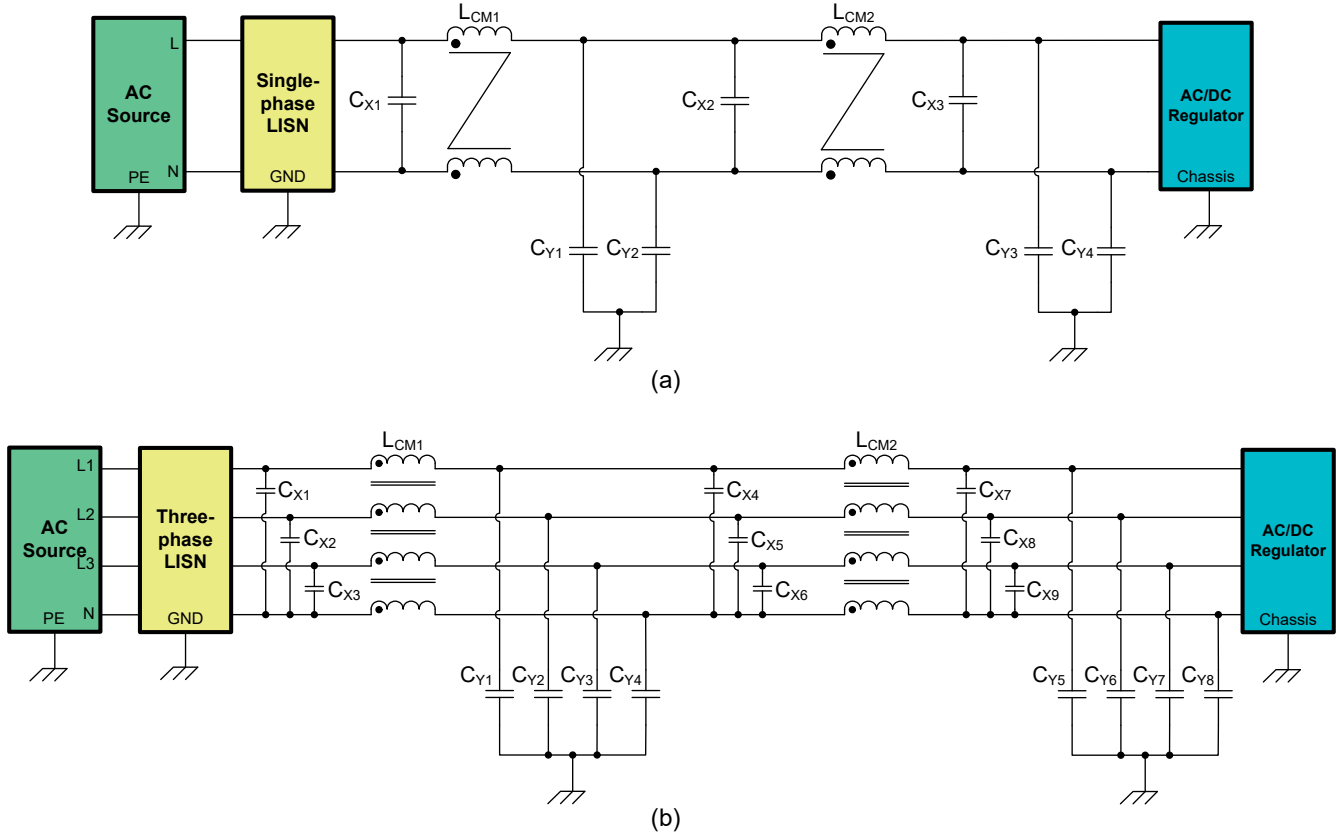


圖 3-1. 適用於單相系統 (a) 和三相系統 (b) 的典型二階被動 EMI 濾波器

在較高層級，被動 EMI 濾波器代表一種直覺式、直接且傳統的方法，能減少電力電子電路的傳導放射，即使被動元件的尺寸、重量和成本在部分應用中會造成明顯的約束。此類被動濾波器設計需插入高阻抗串列元件 (DM 電感器、CM 扼流器) 和低阻抗分流元件 (X 和 Y 電容器)，才能在 EMI 電流傳播路徑中造成阻抗不相符。低階切換諧波通常會根據所需的角頻率 (或多階設計中的多角頻率) 決定被動濾波器零組件的尺寸。

以 圖 3-1 中的單相電路圖為例，CM 扼流器 L_{CM1} 和 L_{CM2} 以及 Y 額定電容器 C_{Y1} 至 C_{Y4} (連接 AC 電源線與接地) 可提供 CM 衰減。源自切換穩壓器的 CM 電流，會先經由穩壓器端 Y 電容器傳回，接著再經由位於 CM 扼流器之間的 Y 電容器傳回。任何剩餘 CM 電流的替代傳回路徑都是透過 LISN 設定的測量阻抗，其顯然有損 EMI 性能。

如簡介所述，安全規範會將 Y 電容總值限制在相對低的值 (通常低於 10 nF)，而所需角頻率所需的扼流器 CM 電感則相對較高，範圍為數毫亨利，使得扼流器變得又大、又重、又貴。與 DM 衰減相比，X 電容器 C_{X1} 至 C_{X3} 的值可能較大 (通常為 2.2 μ F)，進而允許使用 CM 扼流器的洩漏電感來實現低值 DM 電感。

實際上，CM 扼流器操控 EMI 濾波器的大小，如 圖 3-2 中所示的 [3] 實際實作，並在 EMI 濾波器設計過程中帶來一些挑戰，包括體積龐大、熱管理問題、噪音、濾波器共振和零組件之間的電磁耦合。此外、濾波器零組件的寄生元件 (尤其是 CM 扼流器) 也會影響高頻率性能和可達成的衰減。濾波器中使用的離散元件採用不同製造商的不同外型規格，且未經過最佳化以配合彼此，因此會影響濾波器實作的空間設計與組裝。

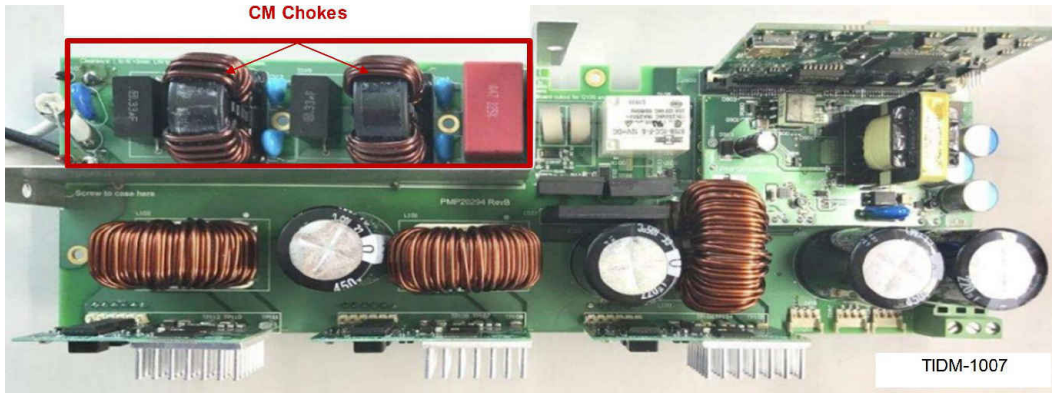


圖 3-2. 採用圖騰柱 PFC 中的傳統單相被動 EMI 濾波器參考設計

4 主動 EMI 濾波器

許多刊物 [4-7] 對於 AEF 的應用敘述甚詳，其中將該應用結果與傳統被動式設計相比，發現濾波器尺寸和體積明顯縮減不少。與被動 EMI 濾波器相似之處在於、AEF 電路可連接 EMI 來源和 EMI 耐受性元件之間的線路，如 圖 4-1 中所示。與被動濾波器不同的是，AEF 電路採用主動裝置與控件來感測殘留 (DM 或 CM) 電壓或電流干擾，並注入相反訊號以直接將雜訊干擾抵銷。根據等幅反相訊號疊加定理，注入的電壓或電流理論上可以抵銷，或使來自 EMI 來源的事件雜訊電壓或電流貢獻無效，這在本質上是一種破壞性干擾。此策略通常套用在聲學環境中，並隨後應用於 EMI。



圖 4-1. 具有感測、增益和注入階段的 AEF 基本概念。控制結構可以是 FB (a) 或 FF (b)

預期 AEF 可顯著降低 EMI，所以與具有同等衰減的傳統被動式設計相比，濾波器尺寸更小。伴隨 AEF 一起的其它 (較小) 被動元件連接到功率級並改善整體衰減，而這些電路即為所謂的混合 EMI 濾波器 (HEF)。AEF 與 HEF 電路的設計與實作取決於傳導路徑 (DM 或 CM) 以及所需的感測、增益與注入階段。如 圖 4-1 所示，取消訊號會透過回饋 (FB) 或前饋 (FF) 方法，直接從量測的訊號產生。

5 廣泛的 AEF 電路

圖 5-1 說明六種根據感測到的雜訊參數 (電壓或電流)、注入抵消訊號的方法 (電壓或電流) 以及主動控制技術 (FB 或 FF)，進行廣泛的主動濾波器配置。

- 電壓感測 (VS) 或電流感測 (CS)
- 電壓注入 (VI) 或電流注入 (CI)
- FB 控制或 FF 控制結構

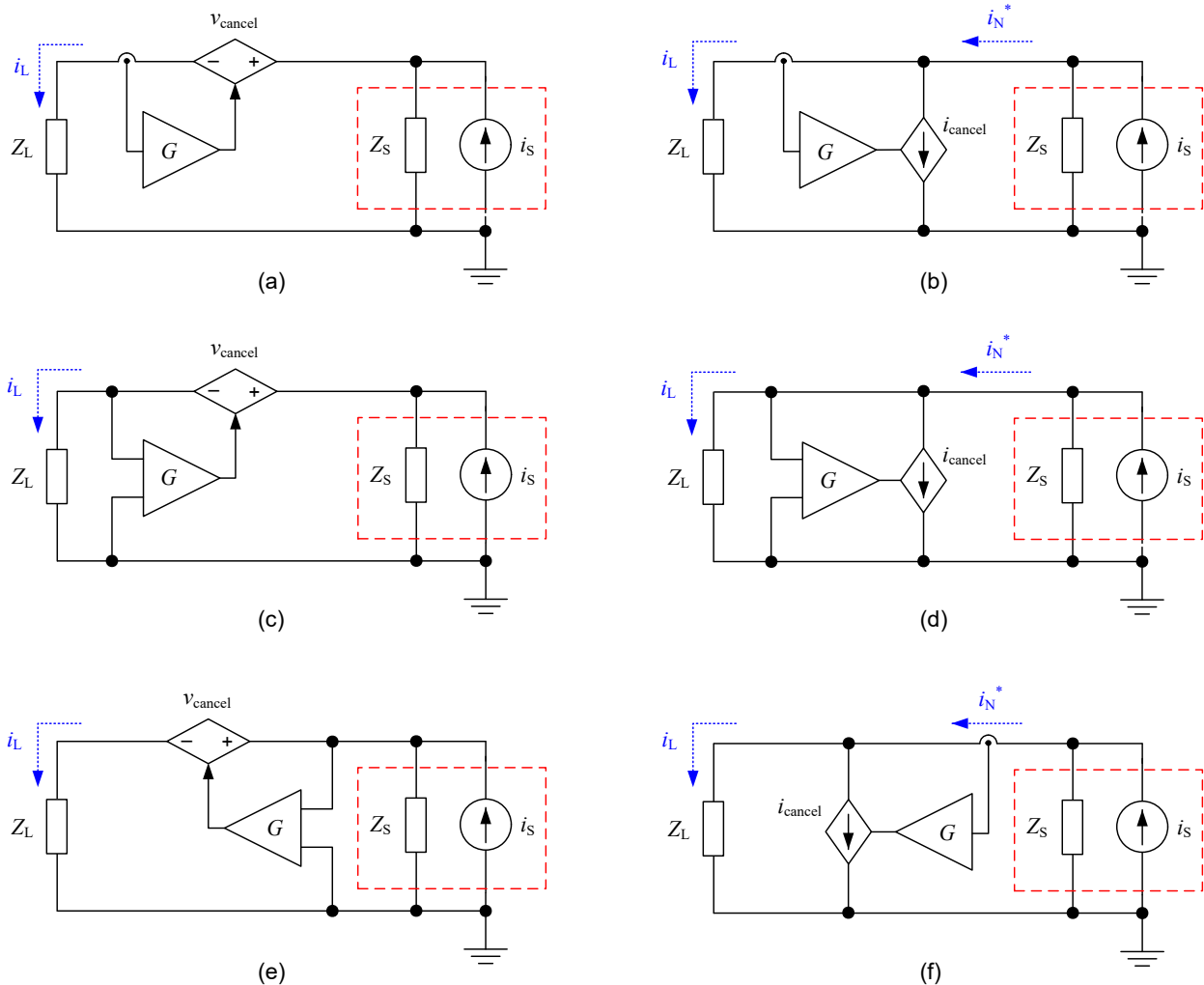


圖 5-1. 單相等效的基本主動濾波器結構 (四個 FB 和兩個 FF 電路) 根據控制、感測和注入技術進行分類：FB-CSVI (a)、FB-CSCI (b)、FB-VSVI (c)、FB-VSCI (d)、FF-VSVI (e) 和 FF-CSCI (f)

圖 5-1 中的術語 i_S 和 Z_S 表示功率級的諾頓等效雜訊電流來源和並聯來源阻抗。 Z_L 是雜訊接收端 (或 EMI 耐受性元件) 的負載阻抗，例如用於 EMI 量測的 LISN。 G 代表主動電路的增益。新增不同的被動元件以取代 Z_S 和 Z_L 會形成不同的混合電路。

從控制立場來看，FB 設計會感測 EMI 耐受性元件的殘餘干擾、反轉訊號、以高增益 G 放大訊號，並在系統中注入抵消訊號，在所需頻率範圍內將感測到的參數驅動至零。相較之下，FF 設計會感測 EMI 來源的干擾、反轉訊號、以均一增益放大訊號，並將訊號注入 EMI 耐受性元件。FF 的放大器均一增益設定必須有高度準確性，如此 EMI 和反 EMI 訊號才會相抵消，使 FF 設計更加困難。

在雜訊感測方面，VS 和 CS 元件通常分別為電容器和 CS 變壓器 (或現有磁性元件上的輔助繞組串聯)。在雜訊抵消方面，VI 設計使用受控系列電壓來源阻止雜訊電流向 LISN，而 CI 設計則涉及受控制分流電流來源，重新路由由雜訊來源產生的雜訊電流，以防止雜訊流進，並由 LISN 測量。VI 和 CI 設計分別利用負載有效地建立分壓器和電流分配器。一般而言，變壓器可包含串聯元件，而電容器可執行分流導電通路。

表 5-1 概括了 圖 5-1 中所包含的 AEF 電路的特徵，包括插入損耗運算式和高衰減 [4] 的電路狀況。 Y_S 和 Y_L 分別代表 FB-VSCI 設計的雜訊來源和負載的導納。

表 5-1. 圖 5-1 的 AEF 電路依拓撲 (控制、感測與注入技術) 進行分類

AEF 拓撲		控制 (FB/FF)	感測 (VS/CS)	注入 (VI/CI)	插入損耗 (IL)	高衰減狀態
a	FB-CSVI	意見反應	電流	電壓	$\left 1 + \frac{G}{Z_S + Z_L}\right $	$ G \gg Z_S + Z_L $
b	FB-CSCI	意見反應	電流	電流	$\left 1 + \frac{Z_S}{Z_S + Z_L} \cdot G\right $	$ Z_S \gg Z_L $
c	FB-VSVI	意見反應	電壓	電壓	$\left 1 + \frac{Z_L}{Z_S + Z_L} \cdot G\right $	$ Z_S \ll Z_L $
d	FB-VSCI	意見反應	電壓	電流	$\left 1 + \frac{G}{Y_S + Y_L}\right $	$ G \gg Y_S + Y_L $
e	FF-VSVI	前饋	電壓	電壓	$\left \frac{1}{1-G} \cdot \left(1 - \frac{Z_S}{Z_S + Z_L} \cdot G\right)\right $	$G = 1, Z_S \ll Z_L $
f	FF-CSCI	前饋	電流	電流	$\left \frac{1}{1-G} \cdot \left(1 - \frac{Z_L}{Z_S + Z_L} \cdot G\right)\right $	$G = 1, Z_S \gg Z_L $

$IL = i_{L,w/oAEF} / i_{L,w/AEF}$ 是未安裝和安裝 AEF 的濾波器輸出電流的商，通常使用 50-Ω 來源和負載阻抗進行測量，並且與可實現的 EMI 衰減相關。如 表 5-1 中所示，每個 AEF 拓撲都需要特定的阻抗行為才能達到高衰減。

6 CM 主動濾波器電路選擇

由於 CS 和 VI 的磁性元件都是大型尺寸，而且是可能的自訂零件（抵銷了 AEF 啟用的縮小尺寸），因此最好選擇能排除使用額外磁性元件的 AEF 拓撲。VSCI 實作將電容與低電壓主動式電路結合以用於感測和注入，進而實現更小的尺寸 [5]。

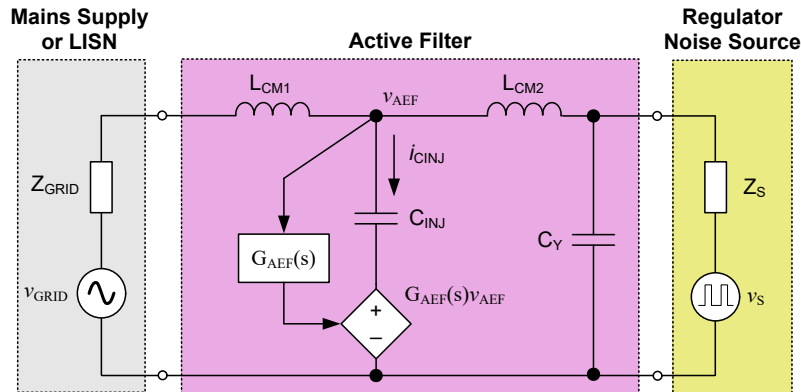


图 6-1. 說明 CM 濾波與注入電容器倍增的基本原則的簡化原理圖

图 6-1 顯示簡化的單相電路圖，說明 CM 濾波器設定中所選 FB-VSCI 電路的基本原則。如前所述，此 AEF 拓撲的主要構想為使用與等效被動濾波器中 Y 電容相似的注入電容器，以降低 CM 扼流器的值，而 CM 扼流器是高功率濾波器中最大的元件。

戴維南等效 CM 雜訊來源由電壓來源 v_S 與來源阻抗 Z_S 串聯組成，後者屬於電容性。電源阻抗 Z_{GRID} 通常是電感式。CM 扼流器受指定為 L_{CM1} 和 L_{CM2} ，也當作去耦合元件，可實現高衰減 FB-VSCI 設計所要求的高來源阻抗和負載阻抗（參見表 5-1 中的“d”列）。

有了連接 AC 線路的 Y 級感測與注入電容器，電路的用途是縮減整體濾波器體積，但會利用主動式電路維持低頻接地漏電流的低數值，進而塑造注入電容器的頻率回應，有效提升高頻率的數值。相反的，相關頻率範圍內的這個放大的注入電容器是降低相對於具等效衰減被動式濾波器值的 CM 扼流器電感的關鍵。

電路的優點：

- 具有廣泛運作頻率範圍和高穩定裕度的簡單濾波器結構。
- CM 扼流器尺寸縮小，體積、重量、功耗和成本更低，同時在低扼流器自我寄生和高自諧振頻率 (f_{SRF}) 的情況下，也可獲得更好的高頻率性能。
- 無額外磁性元件，僅限 Y 級感測與注入電容器，對尖峰接觸電流的影響最小（根據 IEC 60990 測量）。
- 使用參考至底盤接地的低電壓 AEF IC 強化安全性。
- 一種獨立式 AEF IC，可在濾波器元件附近位置提供靈活性。
- 對線路電壓突波的抗擾度符合 IEC 61000-4-5 標準。

7 電容放大的概念

CM 雜訊變少的 AEF 電路可放大 CM 扼流器的表觀電感，或相關頻率範圍 Y 電容器的表觀電容。為 CM 衰減配置的 VSCI AEF 使用放大器級作為注入電容器 C_{INJ} 的電容倍增器。就是這個主動電容的高值支援 CM 扼流器的低值以達到衰減目標。

請見 圖 6-1，方程式 1 顯示注入電容有效地以 G_{AEF} 倍增，這是從電源線到放大器輸出的 CM 電壓增益：

$$v_{C_{INJ}} = [1 - G_{AEF}(f)]v_{AEF} \quad (1)$$

$$i_{C_{INJ}} = C_{INJ} \frac{dv_{C_{INJ}}}{dt} = [1 - G_{AEF}(f)] C_{INJ} \frac{dv_{AEF}}{dt}$$

$$\Rightarrow C_{INJ,active}(f) = |1 - G_{AEF}(f)| C_{INJ}$$

圖 7-1 顯示啟用及停用 FB-VSCI AEF 電路時的注入網路阻抗的模擬圖。高於 2 kHz (特別是高於 100 kHz) 的低阻抗是由 4.7-nF 注入電容器的主動電路及其相關阻尼網路所造成的電容放大。

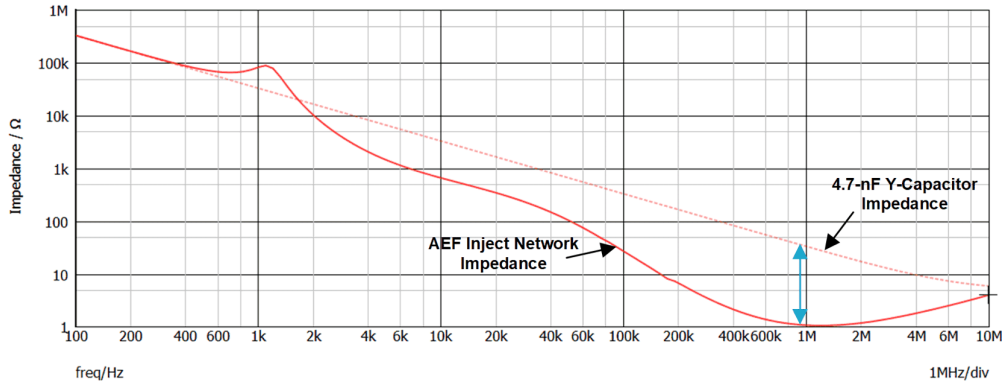


圖 7-1. 注入支路 Z_{INJ} 的範例：啟用 AEF 與傳統 Y 電容器的比較，顯示透過主動回饋動作在更高頻率下增強的等效電容

8 實際 AEF 實作情況

圖 8-1 顯示了使用 TPSF12C1、TPSF12C1-Q1、TPSF12C3 和 TPSF12C3-Q1 獨立式 AEF IC 系列且採用單相和三相電源系統 [8-11] 之具有 FB-VSCI 配置的 CM 衰減的實際 AEF 實作情況。該設置與圖 3-1 中的二階被動濾波器相似，唯一差別在於 AEF IC 目前位於 CM 扼流器之間，為 CM 電流提供了較低的阻抗分流路徑。

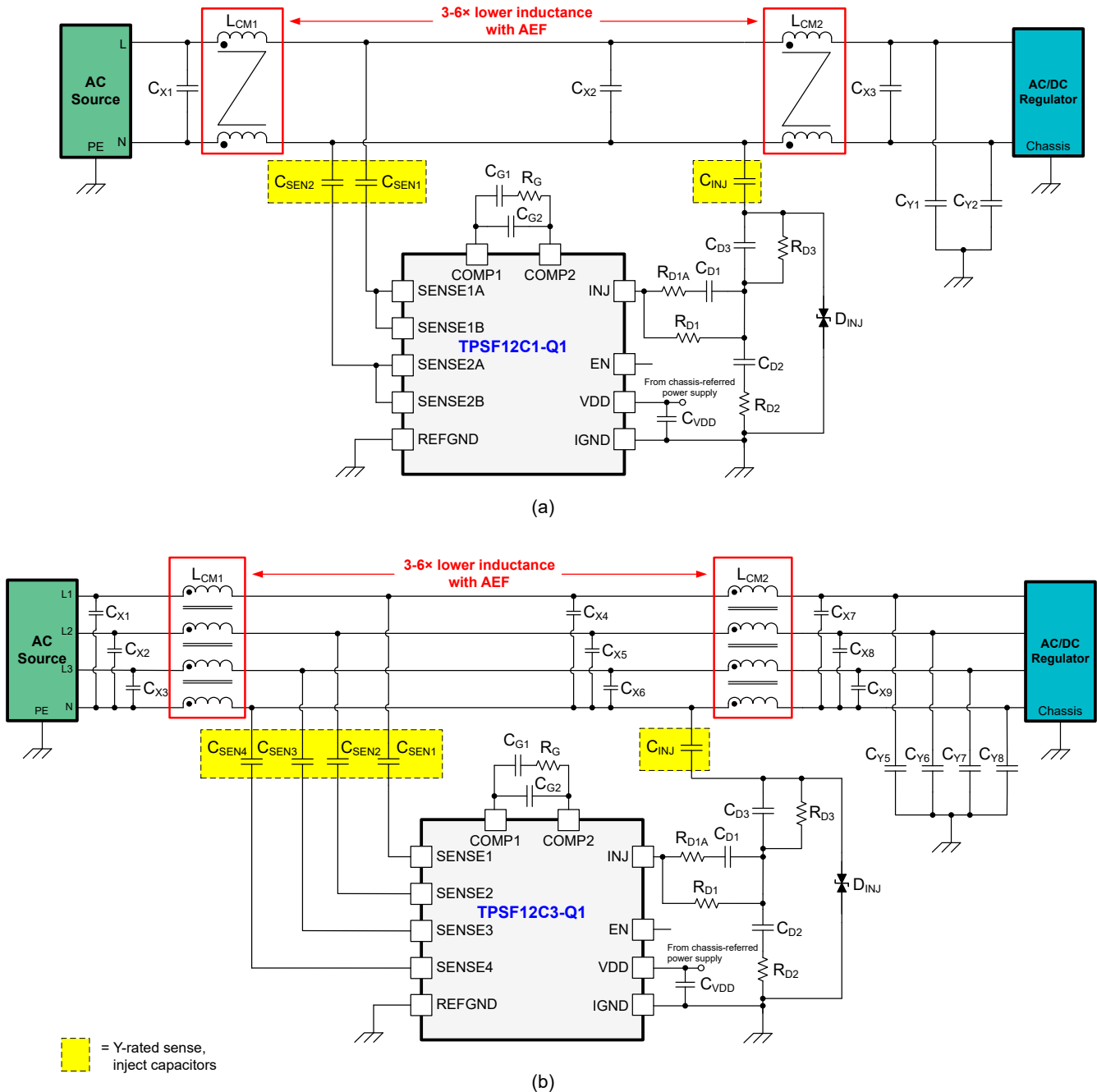


圖 8-1. CM 衰減的典範單相 (a) 和三相 (b) AEF 實作

此裝置系列的感測針腳使用一組 Y 額定感測電容器與電源線接合，通常為 680 pF，並饋入高通濾波器和訊號組合器，如圖 8-2 的 IC 配置圖所示。IC 拒絕線路頻率 (50 或 60 Hz) AC 電壓與 DM 干擾，同時可利用外部可調阻尼電路擴大高頻 CM 干擾，並維持閉迴路穩定性。

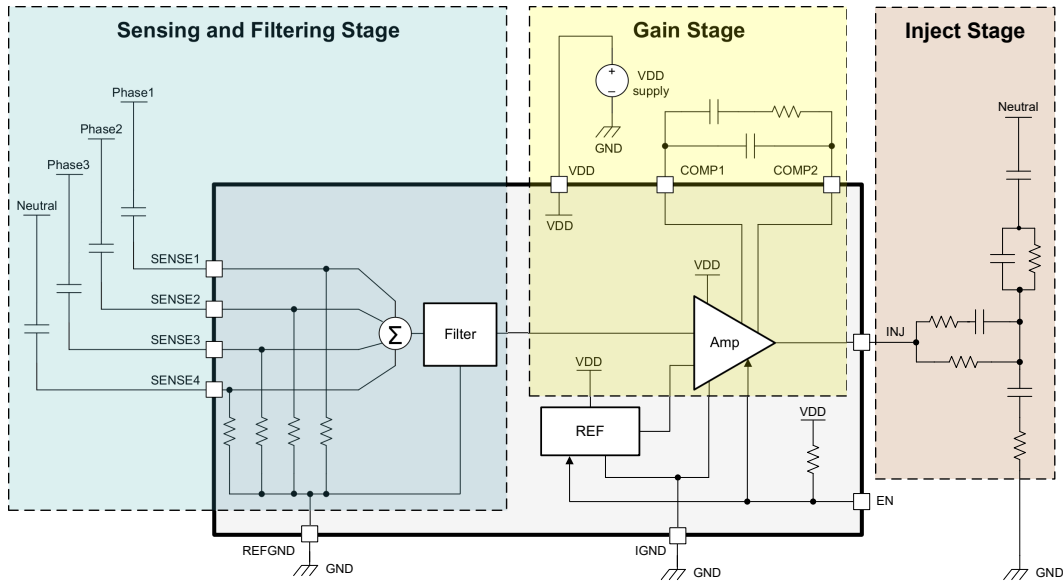


图 8-2. TPSF12C3-Q1 三相獨立式 AEF IC 內部配置圖

COMP1 和 COMP2 針腳之間的零組件形成了一個延遲網路，因而建立了訊號放大增益的特性。功率放大器在 INJ 的輸出是透過阻尼和穩定性網路（請參閱 图 8-1 中附有下標 “D” 參考指示代號的零組件）和 Y 級注入電容器 C_{INJ} （通常為 4.7 nF）將所需的抵消雜訊的訊號注入電源線。IC 內含整合式濾波、補償及保護電路。VDD 偏壓電源的範圍為 8 V 至 16 V，額定電壓為 12 V，並參考系統機箱接地。

介於兩個 CM 扼流器間的 X 電容器，在電源線路間有效地提供 CM 方面的低阻抗路徑，通常可達低 MHz 頻率。此路徑讓電流能夠只透過一個注入電容器，注入其中一條電源線路（通常為中性）。若三相濾波器為三線路系統且無零線，TPSF12C3-Q1 的 SENSE4 接腳會連接至接地，注入電容器則會透過 X 電容器的人造星點連接耦合。

9 實際結果

9.1 低壓測試

图 9-1 顯示使用 TPSF12C1-Q1 主動濾波器 IC 所實現之具有 CM 雜訊衰減的單相 AEF 電路的電路圖。此設計包含穩壓器端與電網端 Y 電容器。LISN 提供 EMI 接收器的適當介面，用於 150 kHz 至 30 MHz 的 EMI 量測。

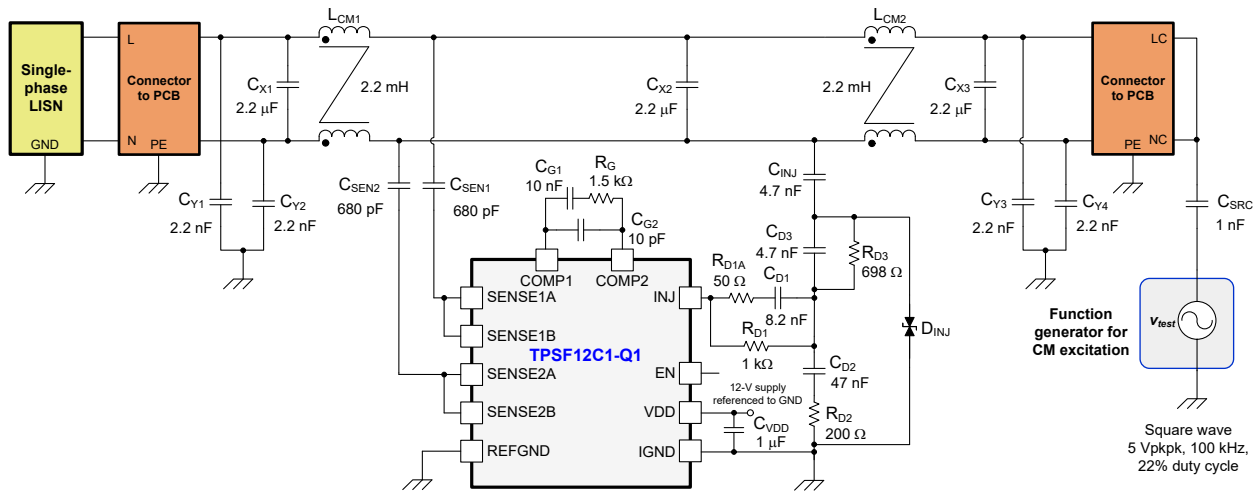


图 9-1. 低電壓測試設定電路圖

如 图 9-1 所示，從函數產生器導出的方波訊號，代表方便的 CM 雜訊激發來源，而 1-nF 電容器模擬切換穩壓器的真實 CM 雜訊來源阻抗。調整來源電壓的振幅和轉換時間，這會設定適當的雜訊振幅，以及在 LISN 測到的頻譜包絡。

這種附帶訊號注入的簡單低壓測試，有助於在連接到高壓工作環境中的切換穩壓器之前，在 EMI 室中促進濾波器的安全和便利的性能表徵。

图 9-2 顯示濾波器電路板的實作方式。图 9-3 使用準峰值 (QP) 與平均 (AV) 雜訊偵測器，在停用並啟用 AEF 時呈現 EMI 結果。如 图 9-3 所示，AEF 在低頻率範圍 (100 kHz 至 3 MHz) 下提供最高 30 dB 的 CM 雜訊衰減，讓濾波器能夠透過兩個 2-mH 奈米晶扼流器，實現與具兩個 12-mH 扼流器的被動式濾波器設計相等的 CM 衰減性能。

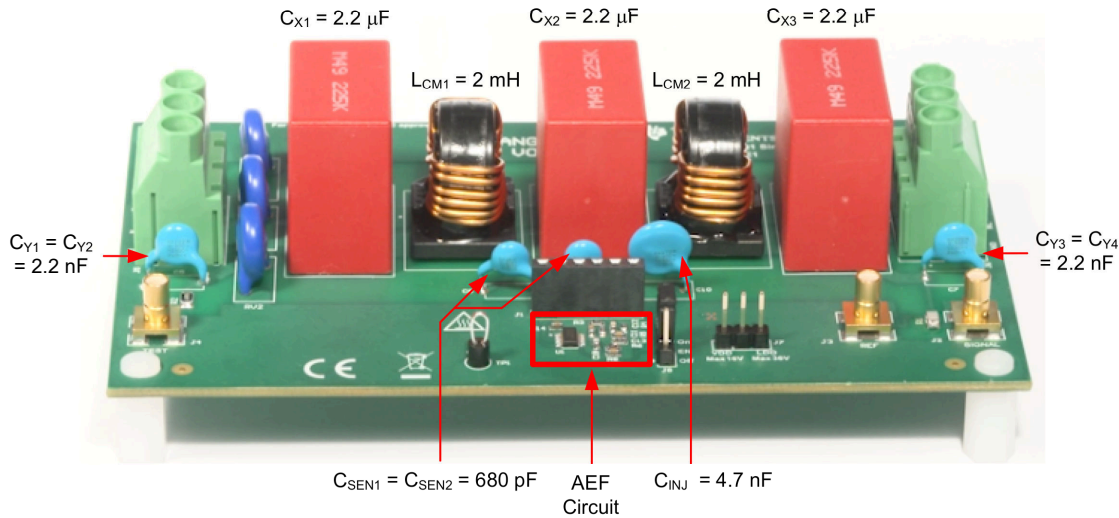


图 9-2. 採用 AEF 的單相濾波器實作

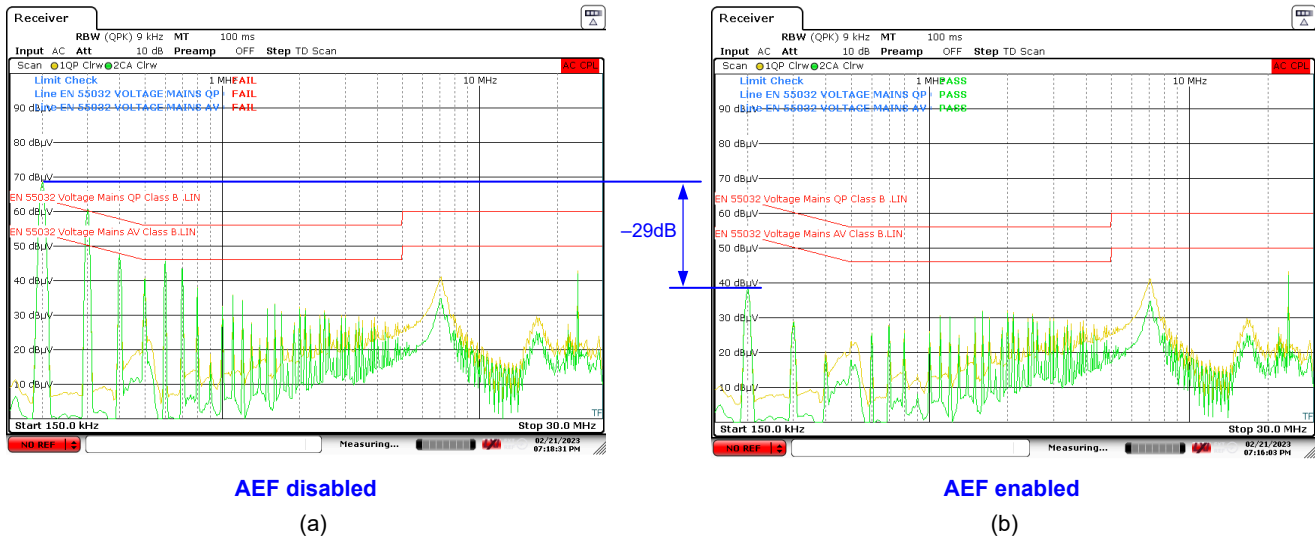


图 9-3. AEF 停用與起用下的 EN 55032 B 類 EMI 結果

9.2 高壓測試

图 9-4 和 图 9-5 展示利用高效率 GaN CCM 圖騰柱免橋接功率因數修正 (PFC) 參考設計 (TIDM-1007, 如 图 3-2 所示) 的功率級，以 TPSF12C1-Q1 單相 AEF IC 測量的 CM EMI 性能，其為一款 3.3 kW 單相免橋接 PFC 轉換器 [3]，附帶 LMG3410 GaN 功率裝置，切換頻率為 100 kHz。

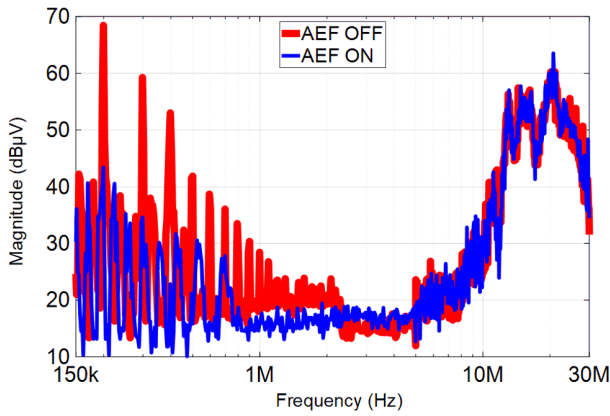


图 9-4. 具有 TIDM-1007 的 EMI 性能：使用相同濾波器 停用與啟用 AEF

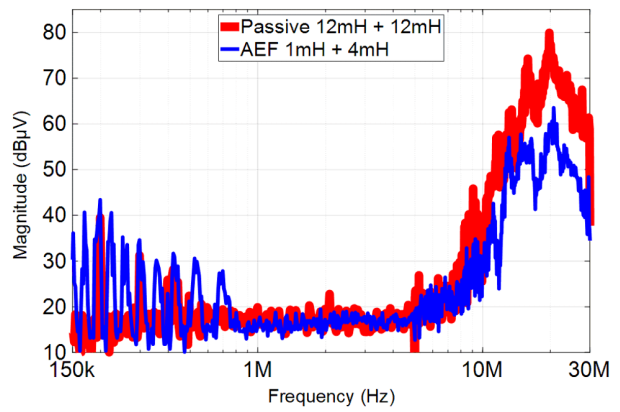


图 9-5. 具有 TIDM-1007 的 EMI 性能：相較於大型扼流器被動式濾波器的小型扼流器 AEF 設計

如 图 9-4 所示，AEF 可在低頻率範圍 (150 kHz 至 3 MHz) 下提供最高 15 至 30 dB 的 CM 雜訊衰減，讓濾波器能夠藉由 1-mH 及 4-mH 奈米晶扼流器，實現與具兩個 12-mH 扼流器的被動式濾波器設計相等的 CM 衰減性能，如 图 9-5 所示。為公平比較，這些扼流器衍生自相同元件系列，核心材料也相似 (廠商：Würth Elektronik)。此外，由於繞組內寄生電容較低，AEF 架構設計的較小尺寸扼流器在 10 MHz 以上的頻率下提供更好的衰減。

图 9-6 顯示用於 EMI 結果的濾波器的照片，如 图 9-5 所示。AEF 使 CM 扼流器的體積減少了 52%，如 图 9-7 中的重點標示。

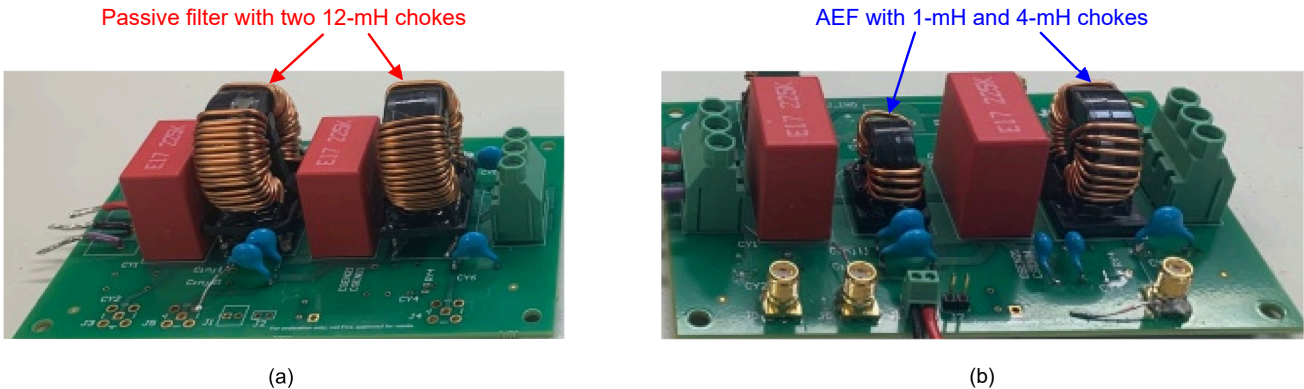


图 9-6. 由 AEF 實現的尺寸縮減：被動濾波器 (a)；主動濾波器 (b)

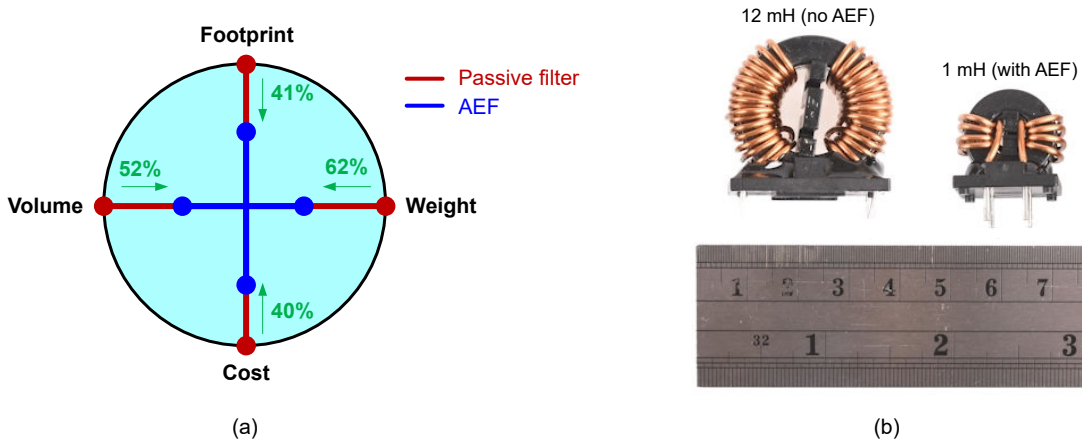


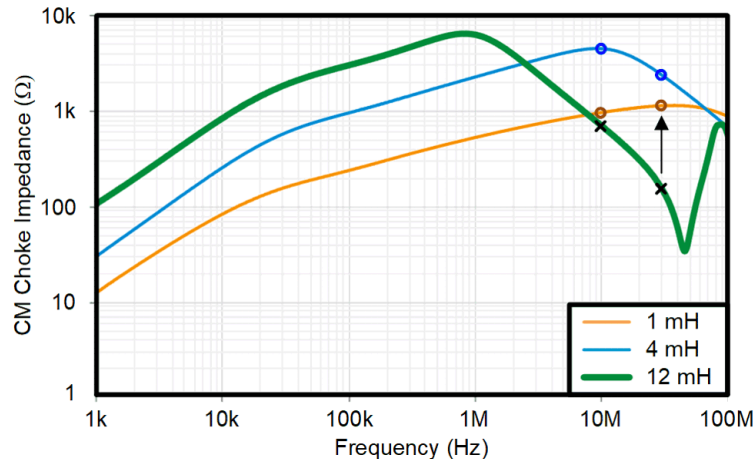
图 9-7. 由 AEF (a) 實現的面積、體積、成本與重量縮減；扼流器大小比較 (b)

表 9-1 擷取 图 9-6 中反白顯示的 CM 扼流器的適用參數。AEF 在 10 A_{RMS} (P_{CU} = 6 W - 2.36 W = 3.64 W，忽略因溫度上升所造成的繞組電阻) 下，減少 60% 總銅耗，代表零組件操作溫度降低，電容器使用壽命增加。

表 9-1. 適用於被動和主動濾波器實作的 CM 扼流器零組件詳細資訊

濾波器	CM 扼流器零組件編號	數量	L_{CM} (mH)	R_{DCR} (m Ω)	f_{SRF} (MHz)	尺寸 (長 × 寬 × 高, 公釐)	質量 (g)	P_{Cu} (W)
被動式	7448051012	2	12	15	0.8	23 × 34 × 33	36	3.0
活躍	7448041104	1	4	8.5	10	19 × 28 × 28	17	1.7
	7448031501	1	1	3.3	40	17 × 23 × 25	10	0.66

图 9-8 為 CM 扼流器提供阻抗曲線以強調具有更高自諧振頻率和提升的高頻性能的更小尺寸零組件。作為因繞組內電容較低而導致高頻下較高 CM 阻抗的範例，電網側 CM 扼流器的阻抗在 30 MHz 時從 150 Ω 增加到 1.1 k Ω (當從被動式設計的 12 mH 增加到主動式設計的 1 mH 時)。图 9-8 中 10 MHz 和 30 MHz 處顯示的 × 和 o 標記，標定了被動式 and 主動式設計各自的阻抗。對於主動式設計，高於 10 MHz 的較高扼流器阻抗在很大程度上排除了對電網側 Y 電容器的需求。


图 9-8. 被動式設計 (2×12 mH) 與主動式設計 (4 mH 與 1 mH) 中所選 CM 扼流器的阻抗特性

如同預期，與單相設計中常見的垂直安裝扼流器相比，三相電路中水平安裝的扼流器通常可減少更大比例的體積。

10 摘要

電源半導體技術和封裝的最新發展可提高電源供應器的效率與功率密度。然而，提升切換性能與縮小封裝使這些效益產生，也是提高 CM 放射特徵的部分原因。新一代電力電子要實現更高密度、更佳性能、更低重量及更低成本、需要一種新的 EMI 濾波器設計方法。在這種情況下，EMI 濾波器級的精巧且高效率設計是高密度切換穩壓器設計的主要挑戰之一，特別是在解決方案尺寸與成本至上的汽車與工業應用方面。

主動濾波器實作的實際結果 (如上述) 可抑制測量的 CM 雜訊特徵，表示當以等效的純被動設計為基準時，CM 扼流器零組件的體積顯著減少。其他優點包括減少功耗以提升熱管理並提升系統級可靠性、降低零組件重量以強化機械穩固性、因扼流器寄生電容降低而提升高頻率效能，以及降低成本。

11 參考

- 德州儀器白皮書：[電源供應器傳導式 EMI 規格概要](#)
- 德州儀器白皮書：[給工程師的 DC/DC 穩壓器低 EMI 指南](#)
- 「[高效率 GaN CCM 圖騰柱免橋接功率因數校正 \(PFC\) 參考設計。](#)」德州儀器參考設計編號 TIDM-1007。
- Son, Yo-Chan 和 Sul, Seung-Ki。「[Generalization of Active Filters for EMI Reduction and Harmonics Compensation \(EMI 降低和諧波補償的主動濾波器概述\)](#)」。出版於《*IEEE Transactions on Industry Applications*》第 42 冊，編號 2 (2006 年 3 月至 4 月)：第 545-551 頁。
- Heldwein, Marcelo Lobo, Hans Ertl, Juergen Biela 和 Johann W. Kolar。「[Implementation of a Transformerless Common-Mode Active Filter for Offline Converter Systems \(離線轉換器系統的無變壓器共模主動濾波器的實作\)](#)」。出版於《*IEEE Transactions on Industrial Electronics*》第 57 冊，編號 5 (2010 年 5 月)：第 1772-1786 頁。
- Narayanasamy, Balaji 和 Luo, Fang。「[A Survey of Active EMI Filters for Conducted EMI Noise Reduction in Power Electronic Converters \(對於降低電力電子轉換器中傳導 EMI 雜訊的主動 EMI 濾波器調查\)](#)」。出版

於《*IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*》第 61 冊，編號 6 (2019 年 12 月)：第 2040-2049 頁。

7. Kumar, Ashish, Hou, Yuetao, Ramadass, Yogesh, Merkin, Tim, Hegarty, Timothy, Obidat, Abdallah. 「An Active EMI filter for High-Power Off-Line Applications (適合高功率離線應用的主動 EMI 濾波器)」。出版於《*2023 Applied Power Electronics Conference and Exhibition*》2023 年 3 月 19-23 日。
8. 德州儀器 [電源供應器濾波器 IC](#) 登陸頁面。
9. 適用於單相系統的 [TPSF12C1](#) 和 [TPSF12C1-Q1](#) 共模主動 EMI 濾波器。
10. 適用於三相系統的 [TPSF12C3](#) 和 [TPSF12C3-Q1](#) 共模主動 EMI 濾波器。
11. 德州儀器技術文章：[獨立式主動 EMI 濾波器 IC 如何縮減共模濾波器尺寸](#)

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 © 2023, 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 © 2023, Texas Instruments Incorporated