

將電磁加熱應用的 IGBT 功率損耗降至最低

文・Alan Ball

關鍵字・電磁感應加熱、IGBT、導電損耗、關閉損耗

近年來，人們使用的電器產品數量不斷增多，致使每個家庭內的總耗能穩定上升，不僅大多數西方國家是這樣，新興國家亦是如此。與這些耗能相關的成本也已經增加，因為燃料資源變得更為緊缺，公用事業公司因此而漲價。為了將從電網獲得的功率提升至最高，並因此使電費帳單支出受到控制及減少碳排放，付出更多努力來為室內環境開發更高效能的電器就至關重要了。

電磁感應加熱爐具（以下簡稱「電磁爐」）使用電磁產生的熱能來烹調，其效能比我們熟悉的標準家用電鍋高得多。此外，由於是通過感應而非傳導來產生熱量，其安全性也被證實更高，因為任何人體部位置於炊具表面都不會被燒傷。

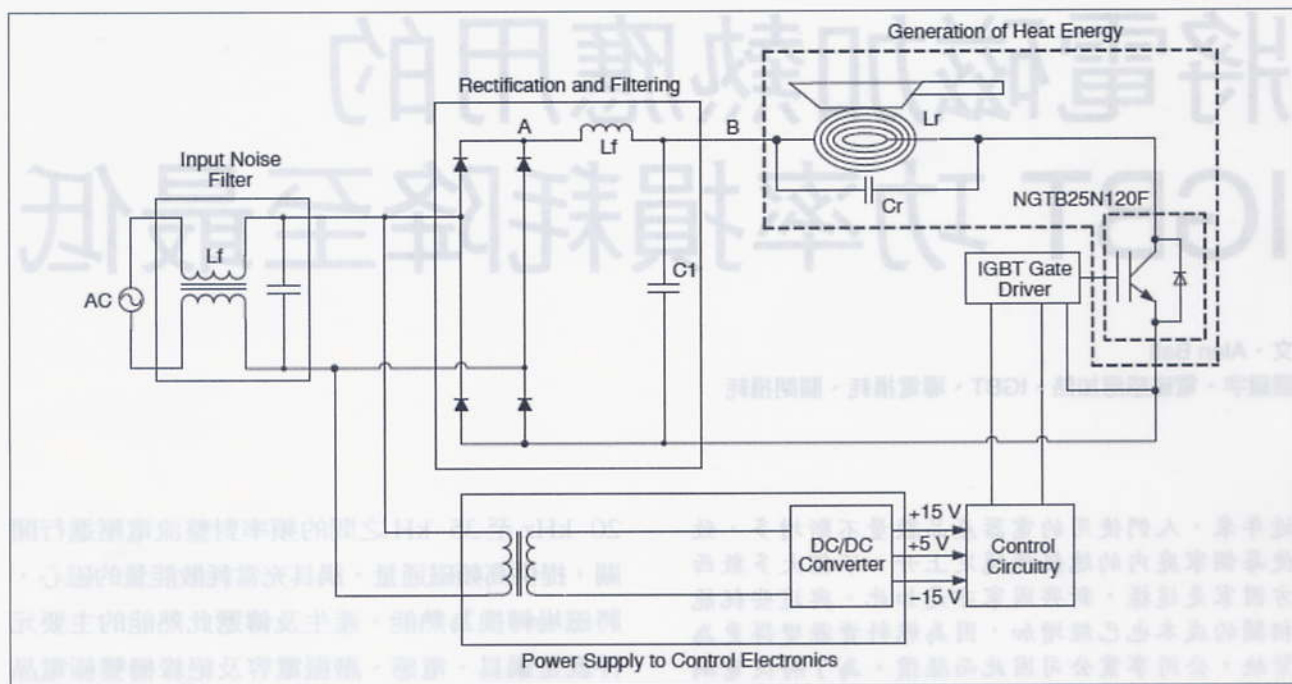
電磁感應加熱的原理

圖 1 描繪了電磁感應加熱應用使用的典型準諧振 (quasi-resonance) 返馳式拓撲結構。電磁能量產生並使用感應方式來傳遞至鍋具。然後在鍋具中轉變為熱能，因而給鍋具加熱。觸發加熱過程的感應涉及到使用二極體等未受控的開關元件來對相對低頻的交流線路輸入電壓進行整流。在

20 kHz 至 35 kHz 之間的頻率對整流電壓進行開關，提供高頻磁通量。鍋具充當耗散能量的磁心，將磁場轉換為熱能。產生及傳遞此熱能的主要元件就是鍋具、電感、諧振電容及絕緣柵雙極電晶體 (IGBT)。

當要產生將熱能傳遞給鍋具所要求的磁場時，電感繞組的幾何尺寸極為重要。電感繞組為螺旋形，並在水平面彼此纏繞。這種配置增加了磁通量的表面積，並使加熱過程具有更高效能。通過使用以相等間距佈設在電感繞組周圍的矩形鐵氧體磁棒，進一步增強了鍋具上這些磁通線的稠密度。多個小型導體的使用將集膚效應 (skin effect) 減至最小，並減小了線圈中的感抗 (IR) 損耗。如圖 1 所示， L_R 是空心電感，並沒有跟傳統鐵磁心電感相同類型的損耗。鍋具必須採用磁性材料製造，使其能夠充當磁心。在電磁爐的開關頻率範圍內，鍋具的厚度極大地影響磁心的能效，而過電流損耗很大。這些損耗將磁場轉變為熱能，在鍋具中產生大量的熱並烹調食物。

阻斷電壓約為 1,200 V 的 IGBT 廣泛應用於單端感應加熱應用。IGBT 在關閉期間仍承受著高電壓，且帶有殘餘電流，滋生不小的開關損耗。在 IGBT 導通狀態期間，由其飽和電壓及負載電



▲圖 1 量測電路

流和結溫 (T_J) 導致的損耗是總體功率損耗的組成部分。這些損耗降低了應用的總效能。理解這些損耗的成因並開發可靠及相對快速的方法來測量損耗很重要，在為電磁爐設計探尋最佳化的 IGBT 設計時尤為如此。

在此應用中，IGBT 的總功率損耗包含導通損耗、導電損耗、關閉損耗及二極體損耗。二極體損耗在總功率損耗中所占比例可以忽略不計，而如果使用了零電壓開關 (ZVS) 技術，可以大幅降低導通損耗。然而，並非在電磁爐所有工作功率等級條件下都能實現 ZVS。由於儲能電路 (tank circuit) 的一端連接至整流輸入電壓，零態開關僅在諧振儲能電路使其電壓到達 0 V 的功率等級時出現。在某些輕載條件下，儲能電路電壓在 IGBT 的集電極不會到達 0 V，因此未實現零態開關，導通功率損耗將增加。

導電損耗

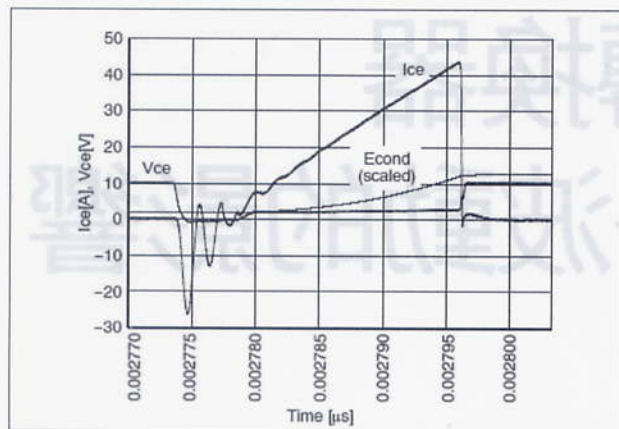
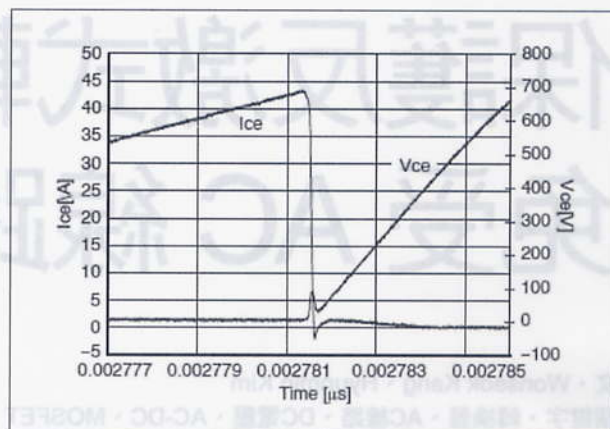
由於總功率損耗的最主要構成部分通常是導電及關閉損耗，我們現在就來更詳細地逐個審視這些損耗。IGBT 平均耗散的功率的數學運算等式如下所示：

$$P_{Ave} = \frac{1}{T_S} \int_0^{T_S} [V_{CE}(t) \times I_{CE}(t)] dt \quad (1)$$

對於導電損耗而言，此等式可以改寫為如下等式：

$$P_{Ave} = V_{CE(sat)}(t, I_{CE}, T_J) \times I_{CE} \times D \quad (2)$$

由此可見，導電損耗取決於負載電流、 $V_{CE(sat)}$ 及占空比。飽和電壓 $V_{CE(sat)}$ 的值並不恆

▲圖 2 $V_{CE(sat)}$ 及 ICE 的變化曲線

▲圖 3 關閉損耗量測結果

定，而是隨著時間變化。導電損耗還取決於負載電流及 IGBT 的 T_J 值。此電磁爐應用中，控制電路以與烹調功率需求成直接比例的方式改變占空比。相應地，烹調功率等級最高時導電損耗就處在最大值，因為等式 2 中的所有參數在此功率等級時都呈現出其最大值。

圖 2 顯示了 $T_J = 67^\circ\text{C}$ 條件下 $V_{CE(sat)}$ 及 ICE 在選定開關週期內的變化。圖 2 中的資料是從在市場上購得的電磁爐獲得的，它使用一個鉗位電路來測量 $V_{CE(sat)}$ 。當 IGBT 關閉時，此電路在 10 V 時鉗位 V_{CE} ，使示波器能夠使用每小格低電壓值 (volt/div) 的設置，這樣才能精確地測量 V_{CE} 。

關閉損耗

從圖 3 中可以清晰地看到電磁爐的關閉損耗波形。影響這些損耗的因素包括 IGBT 殘餘電流、 V_{CE} 歪曲率及開關頻率。殘餘電流來自於 IGBT 關閉後漂移區留下的少量載流子。影響這些少量電荷載流子結合率的因素包括摻雜深度、緩衝層厚度及使用的摻雜技術。開關頻率由所要求的炊

具功率等級及應用的開關控制演算法決定。重要的是在設計及開發過程的每一個階段確認目標應用中的 IGBT 性能。性能的確證可以通過量測應用中 IGBT 損耗來實現。

電磁爐已經被證明擁有比傳統電熱鍋高出約 25% 的效能。在軟開關電磁爐應用中，當尋求為系統指定 IGBT 時，導電損耗及關閉損耗是要考慮的最重要損耗，它們在總體損耗中占主要比例。精確地測量這些損耗，能夠幫助在系統開發過程期間提供必要的資料來評估 IGBT 性能，因而確保將能效等級提升至最高。

本文作者 Alan Ball 任職於安森美半導體

et.Asia-info.net

電子 機械 自動化與控制領域 專業搜尋網站

ET 電子技術雜誌

搜尋