

變壓器設計實務

爲了介紹 Magnetics Designer 的功能，以下使用 Magnetics Designer 設計 50W 順向式轉換器的高頻變壓器，此變壓器的電氣特性可以轉換成 IsSpice 的模型並進行電路模擬。

7.5.1 電路特性描述

順向式轉換器電路如圖 7.5.1 所示。當功率晶體 Q1 turn on 時，由於一次側繞組 N_p 的極性黑點與輸入電源電壓的正端連接，電流 I_{pri} 流經變壓器的一次側繞組，並將能量儲存於其中，電感器上有壓降存在，電流 I_{pri} 線性上升。由於變壓器的一次側繞組 N_p 與二次側繞組 N_s 有相同的極性，二極體 D1 順向偏壓而導通，飛輪二極體 D2 逆向偏壓而截止。當功率晶體 Q1 turn off 時，跨於變壓器一次側的繞組電壓反向而極性改變，此時二極體 D1 逆向偏壓而截止，儲存於電感與輸出電容的能量經由順向偏壓的飛輪二極體 D2 轉移至負載。而儲存在變壓器鐵心中的能量必須釋放掉，所以，電路中必須有去磁 (demagnetization) 繞組 N_r ，就是利用變壓器的第三繞組與二極體 D_r 互相串聯一起，而達到變壓器去磁作用。順向式轉換器的主要波形如圖 7.5.2 所示。

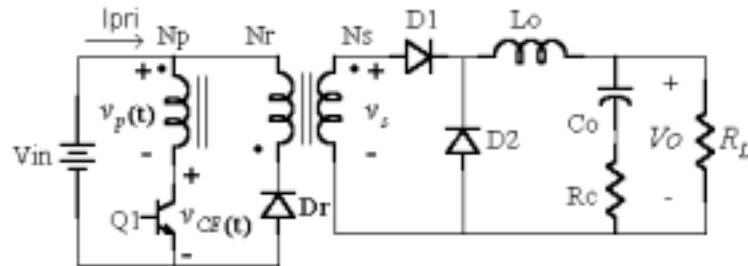


圖 7.5.1 順向式轉換器電路

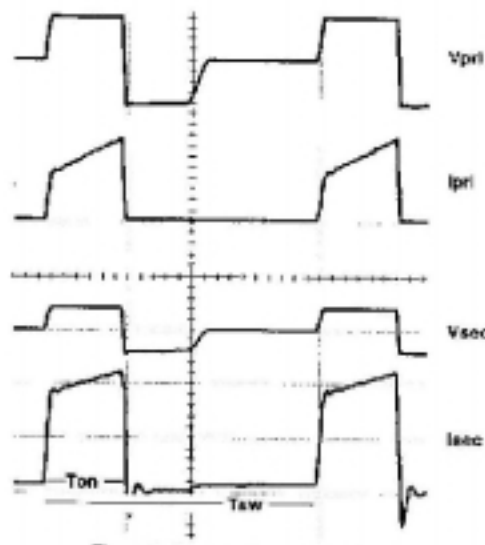


圖 7.5.2 順向式轉換器電路的主要波形
高頻變壓器的設計規格如下：

鐵心形式	=Pot core,Ferrite,Magnetics
材料種類	=F(高頻, 100 度)
最大繞線窗利用因數(Kw)	=90%
最大溫升	=50 度
最大室溫	=25 度
磁通形式	=半波(Half Wave)
波形形式	=方波(Square wave)
輸出功率	=57W
操作頻率(Frequency)	=100KHz
一次側電壓(Vpri)	=40Vavg
一次側直流電流(Idc-pri)	=1.43Adc
一次側交流電流(Iac-pri)	=1.44Aac(rms)
二次側電壓 Vsec(5V)	=11.4Vavg.
二次側直流電流 Idc(5V)	=5Adc
二次側交流電流 Iac(5V)	=5.05Aac(rms)
返馳電壓 Vflyback	=40Vavg
去磁繞組電流 Iac(40V)	=200mA(rms)

下列的方程式描述轉換器的電氣特性：

輸出電壓：

$$V_o = D \cdot k_t \cdot \eta \cdot V_{in} \quad (7.5.1)$$

其中 V_o ：輸出電壓， D ：開關的工作週期， η ：轉換器的效率， V_{in} ：輸入電壓， k_t ：變壓器的匝數比

峰對峰值電感電流：

$$\Delta I_L = \frac{(1-D) \cdot T_{sw}}{L} (V_o + V_{fwd}) \quad (7.5.2)$$

其中 ΔI_L ：峰對峰值電感電流， V_{fwd} ：整流器的順向電壓， T_{sw} ：切換時間
 L ：電感值

平均電感電流：

$$I_{l(ave)} = I_o = \frac{V_o}{R_o} \quad (7.5.3)$$

其中 I_o ：輸出電流， R_o ：負載電阻

順向式轉換器的最大工作週期為 50%，功率晶體 Q1 的最大工作週期發生在輸入電壓最低與輸出電流最大時，最大的穩態輸出在 10Adc 為+5Vdc，最小輸入電壓為 40V。考慮整流器的順向壓降，變壓器二次側電壓輸出必須大於 5.7V，使用先前的方程式，切換頻率為 100KHz 與 8uH 的輸出電感，峰對峰值電感電流 $\Delta I_L = 3.56A$ ，因此 $I_p=10+3.56/2=11.78A$ ， $I_m=10-3.56/2=8.22A$ ，跨於

變壓器二次側的平均電壓為 $5.7/0.5=11.4V$ 。

$$I_{dc(sec)} = \frac{D \cdot (I_p + I_m)}{2} = \frac{0.5(11.78 + 8.22)}{2} = 5A \quad (7.5.4)$$

$$I_{rms(sec)} = \sqrt{D \left(I_p \times I_m + \frac{1}{3} (I_p - I_m)^2 \right)} = 7.11A \quad (7.5.5)$$

$$I_{ac(sec)} = \sqrt{I_{rms}^2 - I_{dc}^2} = 5.05A \quad (7.5.6)$$

變壓器的匝數比為 $40/11.4=3.508$ ，一次側直流電流 $I_{dc(pri)} = 5/3.508 = 1.43A_{dc}$ ，一次側交流電流 $I_{ac(pri)} = 5.05/3.508 = 1.44A_{rms}$ 。順向式轉換器的磁通形式為半波，輸出功率=57W，操作頻率為 100KHz，最大室溫為 25 度，最大溫升為 50 度。

7.5.2 Magnetics Designer 的設計步驟

首先選取適用的鐵芯與材質，當使用者輸入頻率值後，鐵芯精靈會自動選取適當的鐵芯尺寸，如果需要使用者修改顯示於下方之鐵芯資料庫，亦可選取 "Lock" 固定以選取之尺寸或由程式自動最佳化處理尺寸大小，然後在變壓器視窗中輸入相關繞組電壓值與電流值等規格。首先在鐵芯的資料視窗中選擇材料與族系為 Family POT Ferrite，如圖 7.5.3 所示。然後填入 Frequency=100k，Power=57，供應商(Vendor)選定 Vendor MAGNETICS，點選 Auto Select，此時的鐵芯幾何形狀(Geometry)為 Geometry 18mm x 11mm，最後點選 Apply，鐵芯瀏覽器將會選擇最小的鐵芯以符合所需要的頻率與功率規格。



圖 7.5.3 鐵芯的資料視窗

將鐵芯的資料視窗切換到變壓器設計視窗，如圖 7.5.4 所示。在 Frequency(Hz) 中鍵入操作頻率 100K(100KHz)，在 Waveform 中選擇 Square(方波)，由於方波含有較高的諧波成分，點選此項可以計算交流損失(AC losses)。在 Flux Swing

的選項中點選 Half Wave(磁通形式為半波)。接著，在變壓器設計視窗的左下角點選 **Add**，此時增加二次側繞組與去磁繞組。將滑鼠移到 Volts Avg Specified 的欄位填入一次側電壓為 40，在 AC Current 的欄位填入 1.44(1.44Arms)，在 DC Current 的欄位填入 1.43(1.43Adc)。接著填入二次側繞組的資料，Volts Avg Specified 的欄位填入二次側電壓為 11.4，在 AC Current 的欄位填入 5.05(5.05Arms)，在 DC Current 的欄位填入 5(5Adc)。接著填入去磁繞組的資料，Volts Avg Specified 的欄位填入一次側電壓為 40，在 AC Current 的欄位填入 0.2(0.2Arms)，在 DC Current 的欄位填入 0(0Adc)。在 Trise(max)的欄位中填入最大允許之溫升值 50 度，在 Kwindow 的欄位中填入繞線窗利用因數(Window utilization factor,Kw)為 90%。

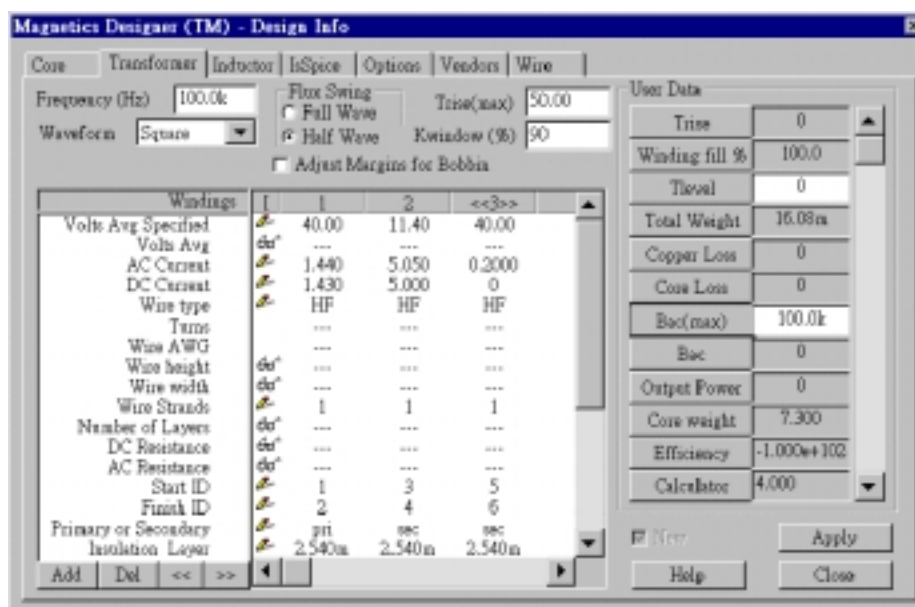
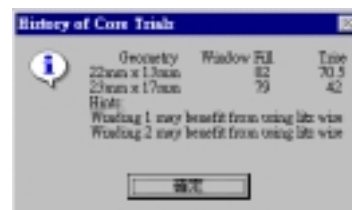


圖 7.5.4 變壓器設計視窗

再回到變壓器設計視窗，點選右下角的

Apply，緊接著產生 History of Core Trials 的對話

盒，此對話盒包括 Magnetics Designer 建議的鐵芯幾何形狀(Geometry)、繞線窗的繞線百分比(Window Fill)與溫升(Trise)。此外，此對話盒還會有繞線方式的提示，Magnetics Designer 會建議使用者切割最高的功率繞組而採用兩組或兩組以上的導線使用並聯繞線的方式，在相同的鐵芯下，使用並聯繞線的方式會得到較佳的溫升效果。此外，Magnetics Designer 也會根據交流電阻與直流電阻的比值建議使用者繞線的材質，此材質可以是多芯絞線(Litz wire)或是薄片式導線(Foil)...等等。



由上圖 History of Core Trials 的對話盒可以得知，Magnetics Designer 選擇了兩個鐵芯幾何形狀 22mm*13mm 與 23mm*17mm，由溫升 42 度與繞線窗的繞線

百分比 79%選擇 23mm*17mm 比較符合設計需求。點選確定，變壓器設計視窗中的參數已經做了修正，如圖 7.5.6 所示。

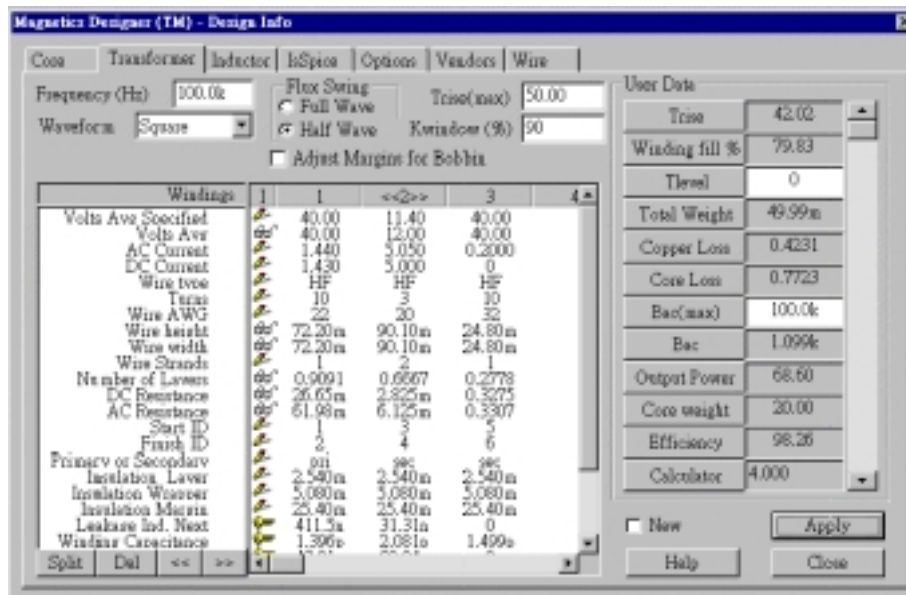


圖 7.5.6 輸入繞組電氣規格後的變壓器設計視窗

如圖 7.5.6 所示的變壓器設計視窗有滿足設計要求的規格，但是仍然有需要改進。由上圖 History of Core Trials 的對話盒可以看出，較小的鐵芯幾何形狀 22mm*13mm 的溫升為 70.5 度與繞線窗的繞線百分比 82%，這項資料提供了改進的空間。Magnetics Designer 是根據變壓器設計視窗中的資料變更來選擇不同的鐵芯幾何形狀，而鐵芯幾何形狀的改變會明顯的影響到變壓器的特性。此時回到鐵芯的資料視窗，我們選定了鐵芯的幾何形狀為 22*13mm，並且點選了 Lock Geometry 這個選項，最後點選 ，如圖 7.5.7 所示。

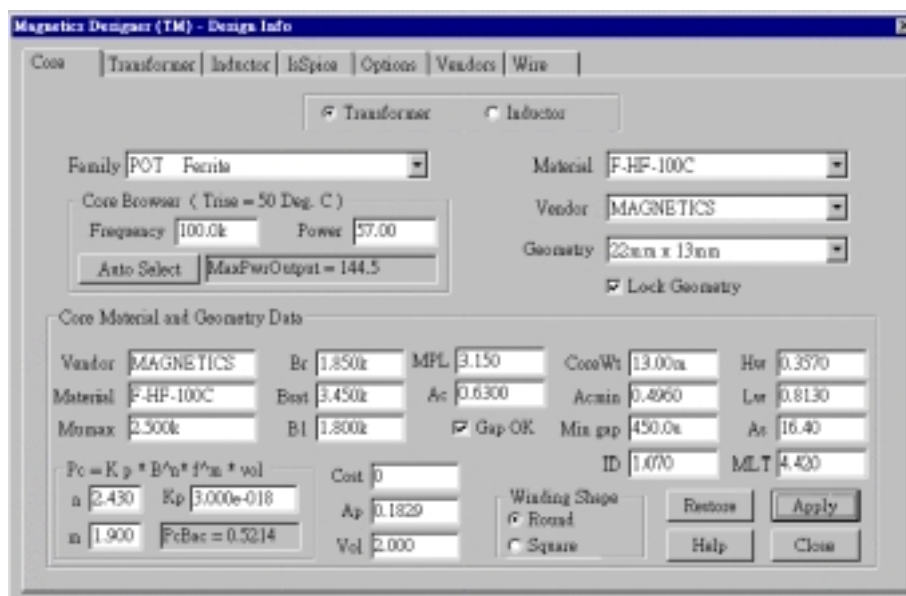


圖 7.5.7 回到鐵芯的資料視窗固定鐵芯幾何形狀為 22mm*13mm

由於我們已經改變了鐵芯的幾何形狀，此時必須立刻回到變壓器設計視窗點選 New 這個選項，然後接著按下 ，緊接著產生如圖所示的 History of

Core Trials 的對話盒，此時得到溫升為 70.5 度，繞線窗的繞線百分比 82%。點選 **確定**，變壓器設計視窗中的參數已經做了修正，Magnetics Designer 會針對最新選定鐵芯的幾何形狀來更新繞組的特性，如圖 7.5.8 所示。由於溫升的數值(70.5 度)已經超過我們所設定的限制(50 度)，第一繞組與第二繞組的交流電阻遠大於直流電阻，而銅損也大於鐵損 3~4 倍左右，History of Core Trials 的對話盒提供了提示，一次側與二次側繞組更改繞線材質為多芯絞線(Litz wire)的方式來作設計。

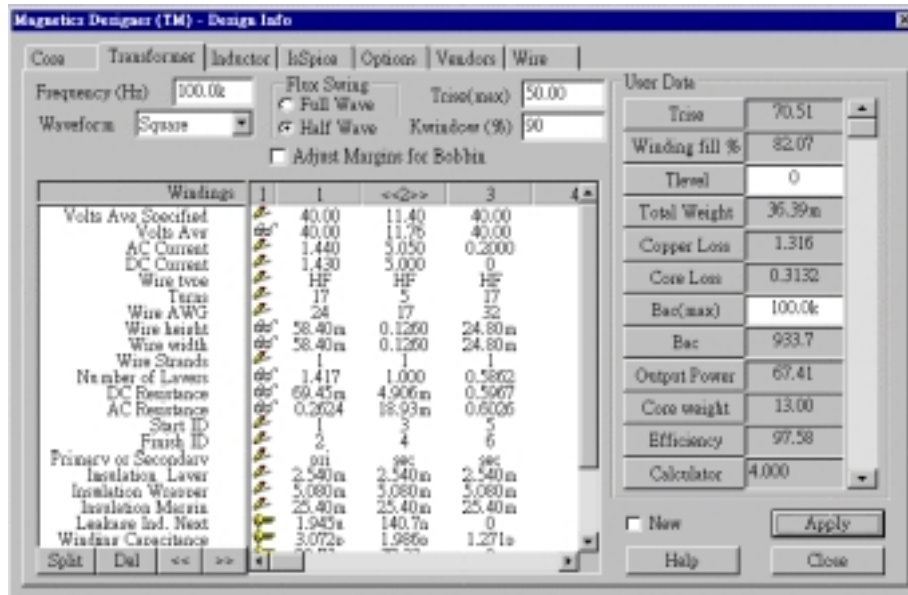


圖 7.5.8 固定鐵芯幾何形狀為 22mm*13mm 後的變壓器設計視窗

此時我們使用一般實作上較常用的切割繞組來達到改進的效果。點選第一組繞組的任一參數，在變壓器設計視窗的左下角點選 **Split**，此時增加與第一組繞組相同的第四組繞組，如圖 7.5.9 所示。

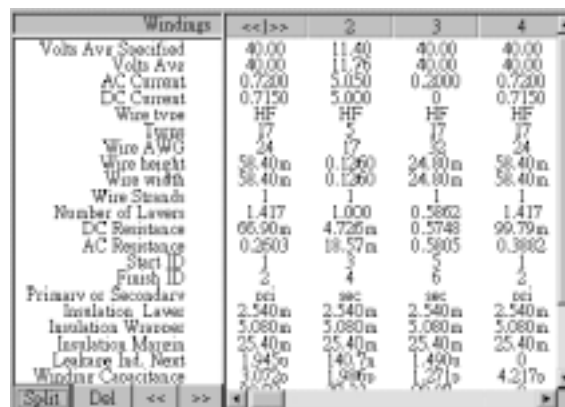
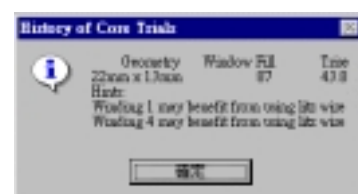


圖 7.5.9 切割一次側繞組後增加第四組繞組

注意此時的 AC Current 與 DC Current 的額定值已經成為原來的一半了，此時的第一組繞組與第二組繞組的交流電阻仍然是直流電阻的 2 倍左右，交流電阻的數值愈大代表高頻操作所產生的集膚效應與鄰近效應愈明顯。另外銅損若遠大於鐵損也是一



個參考的依據，在此變壓器視窗右邊的 User Data 中可以得知，銅損大於鐵損 2 倍左右。完成後點選 New 這個選項，然後接著按下 ，緊接著產生如圖所示的 History of Core Trials 的對話盒，點選 ，變壓器設計視窗中的參數已經做了修正，如圖 7.5.10 所示。

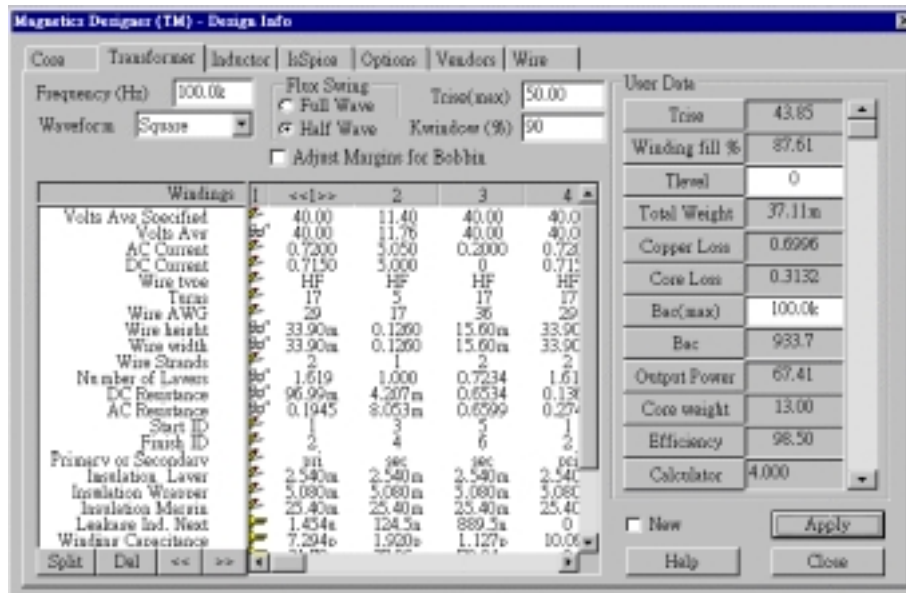


圖 7.5.10 切割一次側繞組後的變壓器設計視窗

此時可以發現，第二組繞組的交流電阻仍然大了些，而銅損也遠大於鐵損。這裡我們針對二次側(第二組)繞組作繞線材質的修正，點選第二組繞組的 Wire type 將 HF 更改為 Litz，也就是使用多芯絞線來繞製，如圖 7.5.11 所示。完成

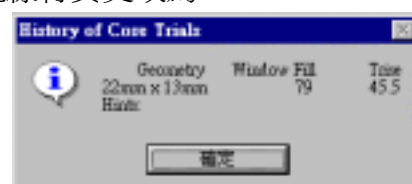


後點選 New 這個選項，然後接著按下 ，緊接著產生如圖所示的 History of Core Trials 的對話盒。

Windings	1	<<->	3	4
Volts Ave Specified	40.00	11.40	40.00	40.00
Volts Ave	40.00	11.76	40.00	40.00
AC Current	0.7200	5.050	0.2000	0.7200
DC Current	0.7150	5.000	0	0.7150
Wire type	HF	Litz	HF	HF
Turns	17	5	17	17
Wire AWG	29	17	36	29
Wire height	33.90m	0.1780	15.60m	33.90m
Wire width	33.90m	0.1780	15.60m	33.90m
Wire Strands	2	1	2	2
Number of Layers	1.619	1.667	0.7234	1.619
DC Resistance	97.48m	5.449m	0.8588	0.1772
AC Resistance	0.1950	5.449m	0.8674	0.3544
Start ID	1	3	5	1
Finish ID	2	4	6	2
Primary or Secondary	pri	sec	sec	pri
Insulation Layer	2.540m	2.540m	2.540m	2.540m
Insulation Wrapper	5.080m	5.080m	5.080m	5.080m
Insulation Margin	25.40m	25.40m	25.40m	25.40m
Leakage Ind. Next	3.252u	403.1u	1.153u	0
Winding Capacitance	7.294e	3.809e	1.166e	12.58e

圖 7.5.11 將二次側(第二組)繞組的繞線材質更改為 Litz

當我們固定鐵芯幾何形狀 22mm*13mm，由溫升 45.5 度與繞線窗的繞線百分比 79%是符合設計需求的，而一次側繞組與二次側繞組的交流電阻接近於直流電阻，銅損約等於鐵損。點選



確定後，變壓器設計視窗中的參數已經做了最終的修正，如圖 7.5.12 所示。

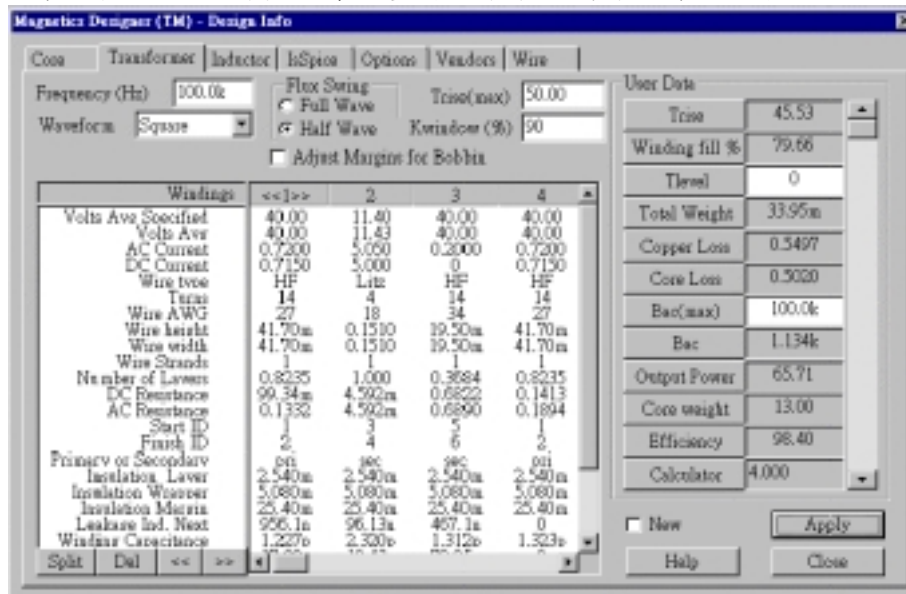


圖 7.5.12 二次側繞組的繞線材質更改為 Litz 後的變壓器設計視窗

7.5.3 Magnetics Designer 的獨特功能

Magnetics Designer 擁有兩個獨特的功能，第一個獨特的功能是建立了我們所設計的變壓器與電感轉換為 SPICE 模型的能力，完成了變壓器的參數輸入以後，進入 IsSpice 的資料視窗，如圖 7.5.13 所示。這裡表示此例的變壓器設計資料轉換為電路符號與 SPICE 相容的子電路串接檔(subcircuit netlist)模型視窗，此模型包括所有的鐵芯損與銅損、交流與直流電阻、漏電感與磁化電感和繞組電容。使用者可應用此 SPICE 模型經由在實際生產製造變壓器或電感之前，使用 IsSpice 模擬驗證設計結果。

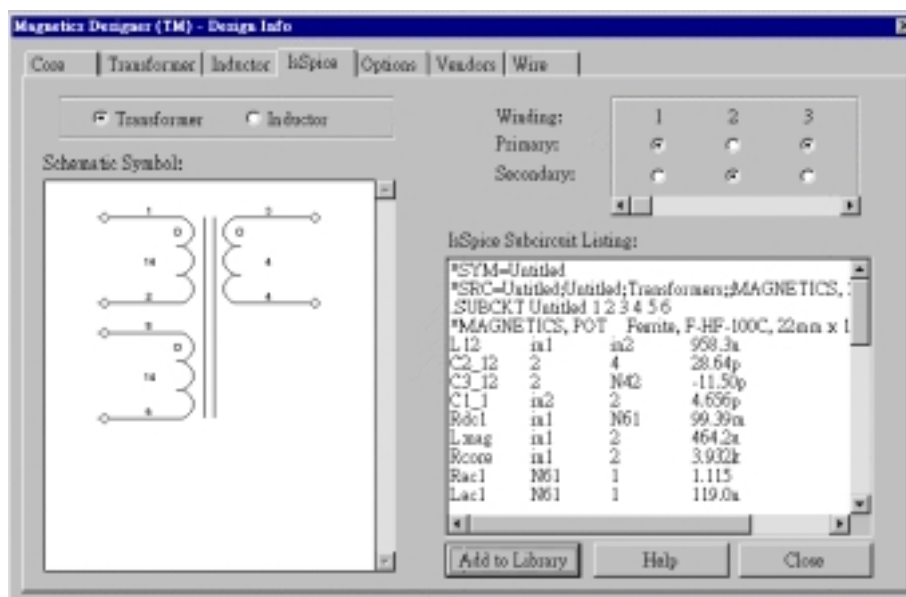
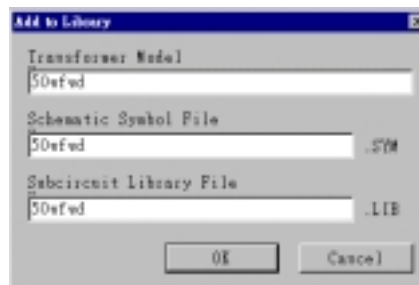


圖 7.5.13 Magnetics Designer 針對設計完成的變壓器來產生 SPICE 模型

在 IsSpice 的資料視窗中點選 **Add to Library** ，



此時出現 Add to Library 的對話盒。在 Transformer Model 中填入此變壓器元件的名稱 (此例中為 50wfd)，在 Schematic Symbol File 中填入元件符號名稱，此元件符號名稱 (50wfd.sym) 必須儲存在 c:\Spice8Rx\sn\symbols 的目錄下，在 Scbcircuit Library File 中填入元件模型名稱，此元件模型名稱 (50wfd.lib) 必須儲存在 C:\Spice8Rx\pr 的目錄下。接著回到 WIN95 的檔案總管，在 C:\Spice8Rx\sn 的目錄下尋找檔案 sym.@@@，然後使用記事本打開，在最後一行填入..\sn\symbols\50wfd.SYM，儲存原來的檔名即可。由於 Magnetics Designer 的原始設計是支援 SpiceNet7.x 的版本，在目前所使用的 SpiceNet8.x 的版本上必須做一修正。



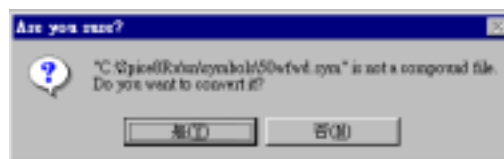
所以此時我們必須回到 SpiceNet 電路圖編輯器，在主選單中點選 Edit/Edit Symbol 進入符號編輯器，在符號編輯器的主選單中點選 File/Open



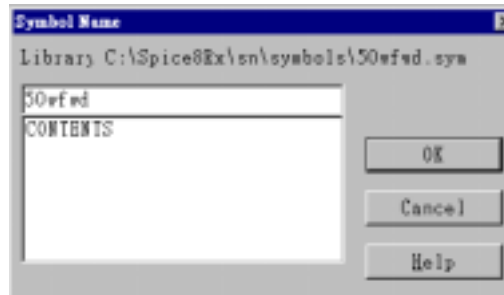
Symbol 開啓 50wfd.sym，此時畫面上出現一個 Convert Symbol 的對話盒，目的是詢問使用者是否將 SpiceNet7.x 的版本轉換為目前所使用的 SpiceNet8.x 的版本，此時點選 **Yes(Y)**，我們之



前在 Magnetics Designer 中建立的元件就出現在畫面上，接著在符號編輯器的主選單中點選 File/Save Symbol，為了存回原來的檔名，我們在檔案名稱中填入 50wfd，此時畫面上出現一個 Are you sure? 的對話盒，目的是詢問使用者是否轉換為 SpiceNet8.x 所使用的檔案，此時點選 **Yes(Y)** 進入 Symbol Name 的對話盒，



然後填入元件名稱後點選 **OK** 跳出，此時整個轉換過程結束。最後回到程



式集中的 ICAP_4Rx 作 MakeDB，在 MakeDB 的對話盒中點選 **Compile** 後，

整個建立變壓器的設計步驟與過程宣告完成。我們回到 SpiceNet 電路圖編輯器，在主選單中點選 Parts/Parts Browser 進入元件瀏覽器，在變壓器元件資料中就可以找到我們所建立的元件(50wfd MAGNETICS,22mm*13mm)了，如圖 7.5.14 所示。

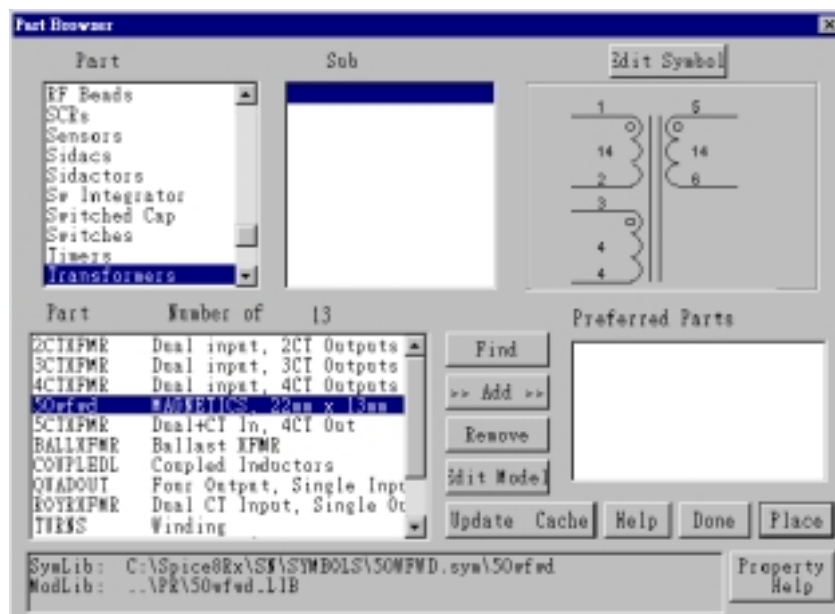
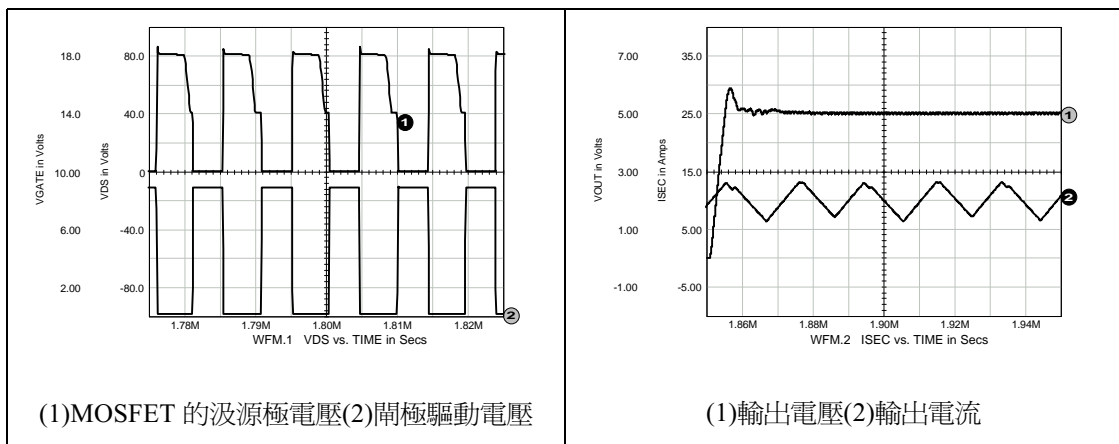
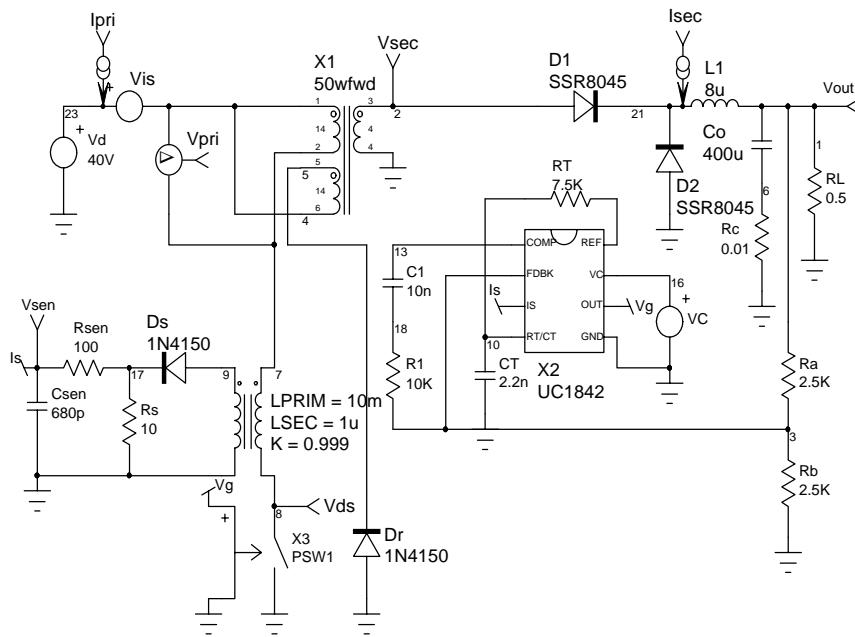


圖 7.5.14 自建完成的電感器模型可提供 IsSpice 做電路模擬

7.5.4 IsSpice 的電路模擬結果分析

圖 7.5.15 是使用 Magnetics Designer 作一個 50W 順向式轉換器的變壓器設計，其 SpiceNet 電路圖與 IsSpice 的模擬結果。IsSpice 包含了許多 PWM IC、功率半導體與電力電子元件模型，當 IsSpice 的電路模擬功能與 Magnetics Designer 的磁性元件設計功能結合後，兩者所能描述的電路與電氣特性更加接近實際的應用電路，這是其他模擬軟體所無法比擬的。



(1)MOSFET 的汲源極電壓(2)閘極驅動電壓

(1)輸出電壓(2)輸出電流

圖 7.5.15 50W 順向式轉換器的 SpiceNet 電路圖與 IsSpice 的模擬結果

Magnetics Designer 第二個獨特的功能是計算變壓器與電感特性之數學方程式與計算法則。以一個新的溫度變數為範例，如圖 7.5.16 所示的溫升方程式對話盒。溫度方程式是使用銅損、鐵損、鐵芯截面積與室溫參數，舉例來說，使用者可直接讀取如輸出功率或漏抗等數值，亦可觀察計算此數值之數學方程式。而使用者除了可以自行修改數學方程式，亦可加上使用者定義選項後，重新計算之變壓器視窗，使 Magnetics Designer 變成使用者特定用途之特殊應用軟體。

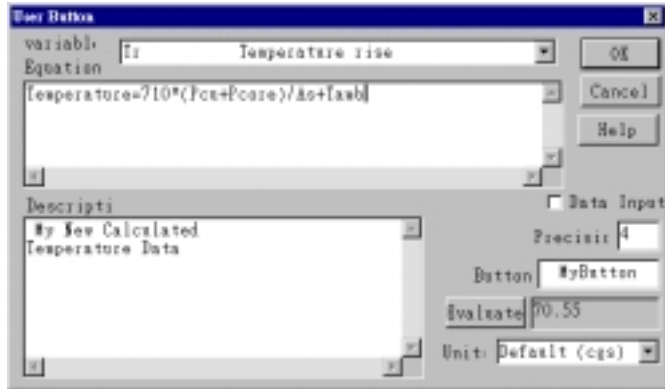


圖 7.5.16 溫升方程式的對話盒

7-5-4 Magnetics Designer 輸出報告

當使用者設計完成變壓器或電感後，Magnetics Designer 會將電氣特性與繞組規格產生完整的輸出報告。針對本文的變壓器設計，在主功能欄中選取 Reports/Transformer Winding Sheet，這是用來說明如何製造變壓器與電感，可提供製造商製作。繞組規格表中含有相關的鐵芯材質與繞製規格(匝數、繞線線徑與型式、絕緣層厚度等)等資料，如圖 7.5.17 所示。在主功能欄中選取 Reports/Transformer Summary，這是關於電氣特性的功能報告表，包含鐵芯的製造商、尺寸、電氣規格等資料，如圖 7.5.18 所示。

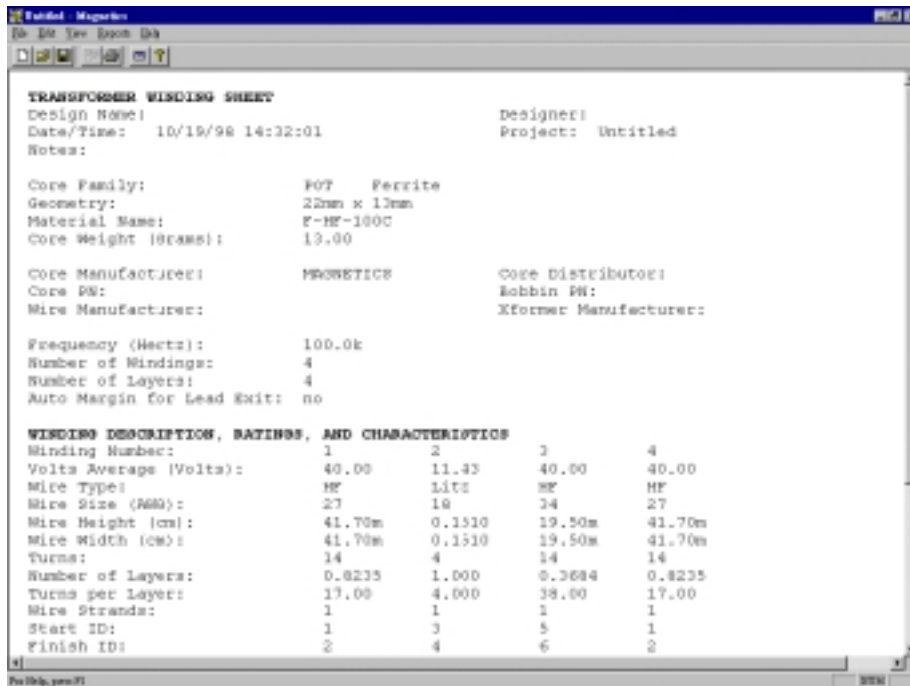


圖 7.5.17 可提供製造商的繞組規格表(Transformer Winding Sheet)

TRANSFORMER PERFORMANCE SUMMARY			
Design Name:		Designer:	
Date/Time:	10/19/98 14:21:55	Project:	Untitled
Notes:			
TRANSFORMER DESCRIPTION			
Core Family:	POT Ferrite	Core Weight (Grams):	13.00
Geometry:	22mm x 12mm	Total Gap (cm):	2.118
Material Name:	F-HF-100C	Spacer Thickness (cm):	1.059
Manufacturer:	MAGNETICS	Window Fill (%):	80.08
CORE DESCRIPTION			
Eff. Core Area (cm ²):	0.6300	Min. Core Area (cm ²):	0.4960
Winding Length (cm):	0.8130	Winding Height (cm):	0.3570
Avail. Window (cm ²):	0.2902	Area Product (cm ⁴):	0.1829
Min. Core Gap (cm):	450.0u	Volume (cm ³):	2.000
Inside Diameter (cm):	1.070	Surface Area (cm ²):	16.40
Mean Length Turn (cm):	4.420	Winding Shape:	Round
Max. Permeability:	2.500k	Max. B, linear u (Gauss):	1.800k
Req. Flux Density (Gauss):	3.450k	Req. Flux Density (Gauss):	1.050k
Mean Mag. Path Len. (cm):	3.150		
TRANSFORMER PERFORMANCE DATA			
Flux Swing Type:	half wave	Input Waveform:	square
Output Power (Watts):	65.71	Magnetizing Ind. (Henry):	464.2u
RK Flux Density (Gauss):	3.684k	Core Loss (Watts):	0.5020
AC Flux Density (Gauss):	1.134k	Copper Loss (Watts):	0.5503
Ambient Temp. (deg C):	25.00	Core RmAc (cm ⁴):	0.1829
Temp. Rise (deg C):	45.55	Frequency (Hertz):	100.0K
Volts/Turn:	2.657		
USER DEFINED PERFORMANCE DATA			

圖 7.5.18 電氣特性的規格報告表(Transformer Summary)

參考資料：

- [1] “Magnetics Designer Application Note”, Intusoft,1997.
- [2] S.M.Sandler,”SMPS Simulation with SPICE 3”,McGraw-Hill Companies,1997.