

減少漏電感發生機率

返馳式轉換器效能大躍進

● Christophe Basso

導致返馳式轉換器(Flyback Converter)在高線路電壓工作時輸出功率失控源頭的兩個變數，為採用不連續導通模式(DCM)工作轉換器的傳播延遲，以及採用連續導通模式(CCM)工作的電源傳播延遲與從連續導通模式過渡到不連續導電模式的模式過渡的組合因素。

推導功率轉換公式期間，根據在實際應用電路方面的經驗，可估計不同的總轉換器能效值。本文將放棄估測能效，透過開關斷開時變壓器漏電感的作用，實際計算理論上的最大傳輸功率。

分析功率傳輸情形

返馳式轉換器透過逐週期儲存及釋放能量來工作。不像降壓或升壓等其他轉換，返馳式轉換器從源頭獲取的能量在電源開關導通期間並不直接傳輸給負載，在此期間，初級電感 L_p 中的電流逐漸增大，而次級端被阻斷二極體斷開與負載的連接。當控制器指示功率金屬氧化物半導體場效電晶體(MOSFET)關斷時，一定量的能量已儲存在變壓器初級電感中。此能量將透過磁耦合傳遞至次級端，並會透過此時導電的二極體饋送電流至輸出電容及負載。

如果在關斷時間期間所儲存的全部能量耗盡，轉換器就採用DCM工作。反之，如果在關斷時間的末段變壓器中仍然留存某些能量，轉換器就採用CCM工作。然而，牽涉到變壓器的轉換過程並不完美。圖1描繪所謂的返馳式轉換器使用的PI(π)模型，可確認返馳式配置中常見的相反位置所置的繞組點。由於「進入」初級點的電流必須在點上離開次級端，會發現一些線路中輸出二極體的存在將在初級端或次級端施加電流迴圈(Current Circulation)，但並非同時進行。因此，返馳式轉換器中的磁配置通常被稱作耦合電感，而非真正的變壓器。

在這種模型中， L_p 是勵磁電感，也稱作初級電感。在初級迴圈的電流透過其鐵顆粒為磁心施加能量，當磁心儲能完成後，初級端及次級端耦合。在返馳式轉換器中，儘管存在初級電流迴圈，但次級端無電流，因為繞組配置阻斷次級端二極體。

L_{leak1} 和 L_{leak2} 是證實初級端與次級端之間不完全耦合的標誌。換句話說，初級端及次級端的某些感應線路並不會在相對繞組閉合，而是在空中閉合--這就是漏電感。串列電感 L_{leak1} 及 L_{leak2} 的存在表徵此

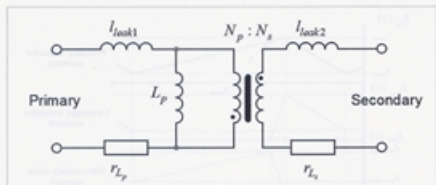


圖1 雙繞組變壓器的PI模型顯示初級端和次級端的漏電元件。

漏電感。由於 \$L_{leak1}\$ 及 \$L_p\$ 為串列配置，流過 \$L_p\$ 的電流也流過 \$L_{leak1}\$。

\$N_p : N_s\$ 為兩個繞組之間的有效圈數比。為了便利起見，此圈數比通常針對初級來標準化，標記為 \$N\$。例如，如果 \$N=0.05\$，表示圈數比為 \$1:0.05\$，即次級端的圈數等於初級端的 \$1/20\$。\$r_{Lp}\$ 是 \$r_{Lp}\$ 電阻，用以表徵銅線直流導電損耗。

透過增加電容或者是磁心損耗或非線性特性等額外項，可使此模型更為複雜。另一方面，使用此PI模型的輕型版本，僅包含一個漏電感項 \$L_{leak}\$ 及一個初級電感 \$L_p\$。可進一步簡化這種方法，假定圈數比為 \$1\$，且完全不帶隔離。這樣一來，圖2就代表導通期間的返馳式轉換器，其中 \$L_p\$ 和 \$L_{leak}\$ 明顯呈現為串列形式。\$V_{clamp}\$ 指的是RCD網路或大多數商用返馳式設計中存在的瞬態電壓抑制器(TVS)提供的鉗位電壓。

在導通時間期間，電流 \$I_p\$ 流過變壓器初級，並以下述等式定義的斜率上升：

$$S_{on} = \frac{V_{in}}{L_p + L_{leak}} \quad \text{.....公式1}$$

次級端沒有電流迴圈，因為變壓器的點配置反向偏置輸出二極體。當初級端峰值電流到達控制器規定的目標電流 \$I_{peak}\$ 時，功率MOSFET斷開。此時，初級電壓反

向，旨在保持安培-圈數(Ampere-Turns)恆定。此時次級端二極體導電，透過兩個繞組的耦合提供一條通往初級電流 \$I_p(t)\$ 的路徑。由於二極體導電，輸出電壓 \$V_{out}\$ 加整流器正向壓降 \$V_f\$ 反射到初級電感兩端，迫使電流以下述斜率減小：

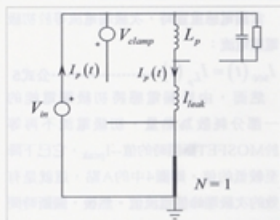


圖2 返馳式轉換器在導通時間期間為變壓器初級電感及漏電感提供能量。

$$S_{off} = \frac{V_{out} + V_f}{L_p} \quad \text{.....公式2}$$

然而，漏電感中突然中斷的電流也會以相同方向保持流動。為避免出現任何不連續狀況，除漏極電容，還必須給此電流提供安全的路徑。在經典設計中，此電流將流向低阻抗電壓源 \$V_{clamp}\$，耗盡儲存在漏電感中的能量。從圖3可以確認，漏電感被施加相當於 \$V_{clamp}\$ 減去反射電壓 \$(V_{out} + V_f)\$ 的電壓，故決定如下的向下斜率公式：

$$S_{leak} = \frac{V_{clamp} - (V_{out} + V_f)}{L_{leak}} \quad \text{.....公式3}$$

由於兩個電感串列連接，漏電感中的電流迴圈表示相同的電流流過初級電感。由於初級電感正為次級電感饋送能量，漏電感轉移儲存的某些能量，令其在鉗位網路

上浪費為熱量。如圖3所示，次級端電流等於：

$$I_{\text{sec}}(t) = I_{L_p}(t) - I_{\text{leak}}(t) \dots\dots\dots \text{公式4}$$

由於開關斷開時兩個電流相等，次級端電流從0開始躍升，直到電感電流完全重置。在開關斷開事件期間，重置時間 Δt 推遲變壓器次級端電流的出現。

當漏電感重置時，次級端電流等於初級電感電流：

$$I_{\text{sec}}(t) = I_{L_p}(t) \dots\dots\dots \text{公式5}$$

然而，由於漏電感將初級端電能的一部分耗散為熱量，初級電流不再等於MOSFET斷開時的值 $-I_{\text{peak}}$ ，它已下降至較低的值，即圖4中的A點，這就是有效的次級端峰值電流值。然後，關斷時間持續，直到初級電感電流達到0(DCM或在CCM情況下達到其谷底值)，向下斜率的計算如公式2所示。

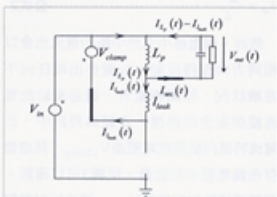


圖3 在關斷時間期間，由於漏電感中也有電流流動，它轉移儲存在初級電感中的某些能量，直到漏電感出現重置。

探討平均輸出電流

利用圖4波形，現在就可推導出一些等式，以估計控制器檢測到故障條件時，輸出二極體流過的最大直流輸出電流。首先，須要估計漏電感重置時間 Δt ，知道電

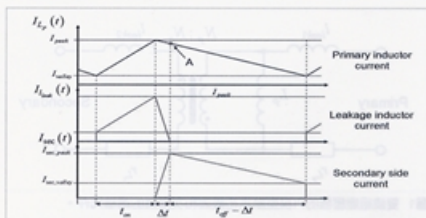


圖4 漏電感需要時間來重置，此重置時間實際上延緩電流從初級端傳輸至次級端。

感電流增加到峰值 I_{peak} ，然後以公式3給定的斜率下降至0，因此可得知：

$$\Delta t = \frac{I_{\text{peak}}}{S_{\text{leak}}} = \frac{I_{\text{leak}} I_{\text{peak}}}{V_{\text{clamp}} - (V_{\text{out}} + V_f)} \dots\dots\dots \text{公式6}$$

如果假定變壓器圈數比 N 不同於1，此等式就變形為：

$$\Delta t = \frac{I_{\text{leak}} I_{\text{peak}}}{V_{\text{clamp}} - (V_{\text{out}} + V_f)/N} \dots\dots\dots \text{公式7}$$

圖4中的A點是 I_{peak} 在以斜率 S_{leak} 下降 Δt 時間後達到的值。

$$I_A = I_{\text{peak}} - S_{\text{leak}} \Delta t \dots\dots\dots \text{公式8}$$

結合公式7和公式3，可更新並推導出漏電感重置時次級端峰值電流的表達式：

$$I_A = I_{\text{peak}} - \frac{(V_{\text{out}} + V_f)}{N L_p} \frac{N I_{\text{leak}} I_{\text{peak}}}{N V_{\text{clamp}} - (V_{\text{out}} + V_f)} \dots\dots\dots \text{公式9}$$

如果重整此等式並將A點電流乘除 N 來推算次級端電流，就得到：

$$I_{\text{sec, peak}} = \frac{I_{\text{peak}}}{N} \left[1 - \frac{I_{\text{leak}}}{L_p} \frac{1}{N V_{\text{clamp}} - (V_{\text{out}} + V_f)} \right] \dots\dots\dots \text{公式10}$$

如果轉換器採用CCM工作，次級端谷底電流就不變化，因為不再具有漏電感項的影響：

$$I_{\text{sec, valley}} = \frac{I_{\text{valley}}}{N} \dots\dots\dots \text{公式11}$$

有此二等式在手，我們現在就可以計算次級端濾波電流 ΔI_L ：

$$\Delta I_{L,sec} = I_{sec,peak} - I_{sec,valley} \dots \text{公式12}$$

為了幫助計算輸出平均電流，圖5提供關斷期間次級端電流的放大視圖。

為了估算這樣波形的平均值，最簡單的方式就是將其畫分為易於計算的多個面，然後計算各個面的面積相加，隨後再將結果除以訊號週期：

$$I_{sec,avg} = \frac{A_1 + A_2 + A_3}{T_{sw}} \dots \text{公式13}$$

現在使用公式7、10、11及12，就可獲得下述公式來獲得輸出二極體中迴圈的直流電流：

$$I_{sec,avg} = \frac{I_{sec,peak} \Delta t + \frac{\Delta I_L (t_{off} - \Delta t)}{2} + I_{sec,valley} (t_{off} - \Delta t)}{T_{sw}} \dots \text{公式14}$$

此等式表示的是流過輸出二極體並提供給負載的直流電流，圖5訊號中的交流部分流入輸出電容，在故障條件(如過載環境)下時，此控制器將初級端峰值電流提高至其最大值。如果允許的最大感測電壓為 V_{sense} ，那麼在開關斷開期間變壓器的最大峰值電流為：

$$I_{p,max} = \frac{V_{sense,max}}{R_{sense}} + \frac{V_{in}}{L_p} t_{prop} \dots \text{公式15}$$

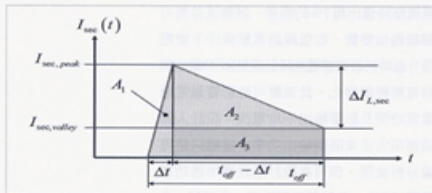


圖5 透過將電流訊號畫分為不同的面，並計算各個面的面積來獲得次級端平均電流。

有了這些元件值，就能以數值示例來計算最大功率。

計算傳輸功率

假定構造的65瓦(W)轉換器具有下列元件值及工作電壓：

$V_{in,HLL}$ 為直流輸入高線路電壓--370伏特(V)、 $V_{in,LLL}$ 為直流輸入低線路電壓--120V、 V_{out} 為輸出電壓--19V、 L_p 為變壓器初級電感--600微亨(μ H)、 I_{leak} 為變壓器漏電感--2 μ H、 t_{prop} 為總傳播延遲--350奈秒(ns)、 R_{sense} 為感測電阻--0.33歐姆(Ω)、 V_{sense} 為允許的最大感測電壓值--0.8V、 T_{sw} 是65kHz頻率條件下的開關週期--15.4 μ s、N是次級端與初級端圈數比--0.25，以及 V_{clamp} 是所選擇的RCD網路上的鉗位電壓電平--107V。

首先，可計算故障條件下低線路電壓及高線路電壓時的峰值電流：

$$I_{peak,max,LL} = \frac{V_{sense,max}}{R_{sense}} + \frac{V_{in,LL}}{L_p} t_{prop} = \frac{0.8}{0.33} + \frac{120}{600\mu} \times 350n = 2.49A \dots \text{公式16}$$

$$I_{peak,max,HLL} = \frac{V_{sense,max}}{R_{sense}} + \frac{V_{in,HLL}}{L_p} t_{prop} = \frac{0.8}{0.33} + \frac{370}{600\mu} \times 350n = 2.64A \dots \text{公式17}$$

接下來計算谷底電流，基於兩種輸入線路電壓條件來計算，推導出以下結果：

$$I_{valley,LL} = I_{peak,max,LL} - \frac{T_{sw} V_{in,LL} (V_f + V_m)}{L_p (V_f + V_m + N V_{in,LL})} = 2.49 - \frac{15.4\mu \times 120 \times (19 + 0.5)}{600\mu \times (19 + 0.5 + 0.25 \times 120)} = 1.28A \dots \text{公式18}$$

$$I_{valley,HLL} = I_{peak,max,HLL} - \frac{T_{sw} V_{in,HLL} (V_f + V_m)}{L_p (V_f + V_m + N V_{in,HLL})} = 2.64 - \frac{15.4\mu \times 370 \times (19 + 0.5)}{600\mu \times (19 + 0.5 + 0.25 \times 370)} = 0.99A \dots \text{公式19}$$



公式14要求兩種輸入電壓條件下的關斷時間值，可使用初級值來輕易計算，公式為：

$$t_{off} = \frac{N(I_{peak,max} - I_{valley})}{(V_{out} + V_f)} L_p \quad \text{.....公式20}$$

低線路電壓和高線路電壓兩種極端條件下，數值變成：

$$t_{off,LL} = \frac{N(I_{peak,max,LL} - I_{valley,LL})}{(V_{out} + V_f)} L_p$$

$$= \frac{0.25 \times (2.49 - 1.28)}{19 + 0.5} \times 600\mu = 9.3 \mu A \quad \text{.....公式21}$$

$$t_{off,H} = \frac{N(I_{peak,max,H} - I_{valley,H})}{(V_{out} + V_f)} L_p$$

$$= \frac{0.25 \times (2.64 - 0.99)}{19 + 0.5} \times 600\mu = 12.7 \mu A \quad \text{.....公式22}$$

計算兩種輸入線路電壓條件下的漏電感重置時間 Δt ：

$$\Delta t_{LL} = \frac{NI_{peak,max,LL}}{NV_{clamp} - (V_{out} + V_f)}$$

$$= \frac{0.25 \times 2u \times 2.49}{0.25 \times 107 - (19 + 0.5)}$$

$$= 171ns \quad \text{.....公式23}$$

$$\Delta t_{H} = \frac{NI_{peak,max,H}}{NV_{clamp} - (V_{out} + V_f)}$$

$$= \frac{0.25 \times 2u \times 2.64}{0.25 \times 107 - (19 + 0.5)}$$

$$= 182ns \quad \text{.....公式24}$$

使用這些數字，可計算出漏電感重置時的次級端峰值電流：

$$I_{sec,peak,LL} = \frac{I_{peak,max,LL}}{N} \left(1 - \frac{I_{peak,max,LL}}{L_p \frac{NV_{clamp}}{V_{out} + V_f}} \right)$$

$$= \frac{2.49}{0.25} \times \left(1 - \frac{2u}{600u} \times \frac{0.25 \times 107}{19 + 0.5} - 1 \right)$$

$$= 9.9A \quad \text{.....公式25}$$

$$I_{sec,peak,H} = \frac{I_{peak,max,H}}{N} \left(1 - \frac{I_{peak,max,H}}{L_p \frac{NV_{clamp}}{V_{out} + V_f}} \right)$$

$$= \frac{2.64}{0.25} \times \left(1 - \frac{2u}{600u} \times \frac{0.25 \times 107}{19 + 0.5} - 1 \right)$$

$$= 10.4A \quad \text{.....公式26}$$

基於上述公式，可以推導出次級端漣波電流：

$$\Delta I_{L,sec,LL} = I_{sec,peak,LL} - \frac{I_{valley,LL}}{N}$$

$$= 9.9 - \frac{1.28}{0.25} = 4.78A \quad \text{.....公式27}$$

$$\Delta I_{L,sec,H} = I_{sec,peak,H} - \frac{I_{valley,H}}{N}$$

$$= 10.4 - \frac{0.99}{0.25} = 6.44A \quad \text{.....公式28}$$

現在是時候來運用公式14給出的平均電流公式：

$$I_{sec,avg,LL} = \frac{I_{sec,peak,LL} \Delta t_{LL} + \frac{\Delta I_{L,sec,LL} (t_{off,LL} - \Delta t_{LL})}{2} + I_{sec,valley,LL} (t_{off,LL} - \Delta t_{LL})}{T_{sw}}$$

$$\text{.....公式29}$$

$$I_{sec,avg,LL} = \frac{9.9 \times 171n + \frac{4.78 \times (9.3u - 171n)}{2} + 1.28 \times (9.3u - 171n)}{15.4u}$$

$$= \frac{846n + 21.8u + 46.7n}{15.4u} = 4.5A \quad \text{.....公式30}$$

$$I_{sec,avg,H} = \frac{I_{sec,peak,H} \Delta t_{H} + \frac{\Delta I_{L,sec,H} (t_{off,H} - \Delta t_{H})}{2} + I_{sec,valley,H} (t_{off,H} - \Delta t_{H})}{T_{sw}}$$

$$\text{.....公式31}$$

$$I_{sec,avg,H} = \frac{10.4 \times 182n + \frac{6.44 \times (12.7u - 182n)}{2} + 0.99 \times (12.7u - 182n)}{15.4u}$$

$$= \frac{946n + 40.3u + 49.6n}{15.4u} = 5.9A \quad \text{.....公式32}$$

為檢驗計算是否正確，以新控制器構建一款65W電源。為檢驗保護電路實際動作前可能提供的最大功率，以兩種直流輸入電壓120V及370V來為轉換器供電，同時在輸出端施加可變負載。低線路電壓時，最大直流電流為4.2A，而在高線路電壓時此值增加至5.9A。比較公式30和公式32，低線路電壓時僅出現7%的誤差。該數值差異可歸結幾個變數，如低線路電壓條件下變壓器升溫時初級電感電流降低或是RCD鉗位網路電壓輕微變化。此電壓可能影響漏電感重置時間及影響輸出平均電流，設計人員須應用方法來限制輸出功率。這雖只是理論分析途徑，但可在設計階段應用過功率保護(OPP)，並封裝原型後進一步測試。● (本文作者任職於安森美)