工頻機及高頻機的設計與應用展望

摘要

功率電子設備的技術進步，與功率器件的性能提高及新器件的不斷出現有著密切的關係。50 年來，隨著功率半導體器件的進步，UPS 設備經歷了由帶多個輸出工頻變壓器到單個輸出工頻變壓器的演變過程，而性能更好的大功率 IGBT 器件和更先進的控制技術的出現，提供了為 UPS 電路設計的新的發展可能性，走向無隔離變壓器、小型化、節能化和綠色環保化的方向。這就是人們所說的 “高頻機” 。這種機型展現了了 UPS 電路技術最新演進，也代表著 UPS 技術的發展方向。與傳統的帶輸出變壓器的 UPS 相比，它在進一步縮小體積、減輕重量、改善性能、提高效率等方面，都取有明顯的改善和進步。(註：工頻機指的內建隔離變壓器的 UPS；高頻機為無隔離變壓器的 UPS)

一、UPS 電路的演變史反映了 UPS 電路技術的發展歷程

最初的 UPS 輸出變頻器都是帶有變壓器的。應該說，採用輸出變壓器是 UPS 變頻器輸出電路形式所決定的。變頻器電路技術演變過程：是否必須用變壓器，如何配置變壓器，是否可能去掉變壓器。

UPS 電路技術的演進直接受功率半導體器件發展影響：從可控矽（晶閘管）(SCR)到雙極型功率電晶體 (NPN transistor)以及電子控制級的 IGBT 等功率半導體器件的出現， 引導 UPS 輸出電路由四個變壓器到一個變壓器的演變，如圖 1-3 所示。

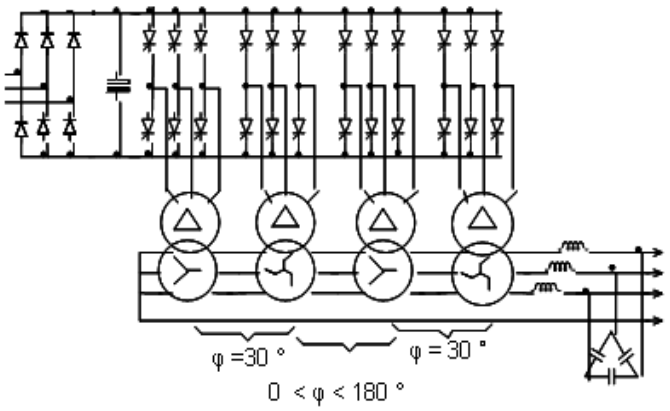

圖 1 第一代 UPS 的典型逆變電路結構

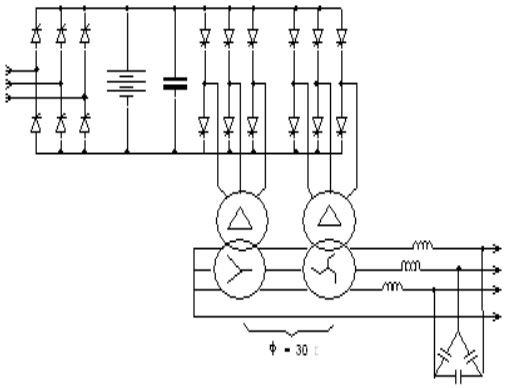

圖 2 只用兩個變壓器的 PWM 控制逆變電路

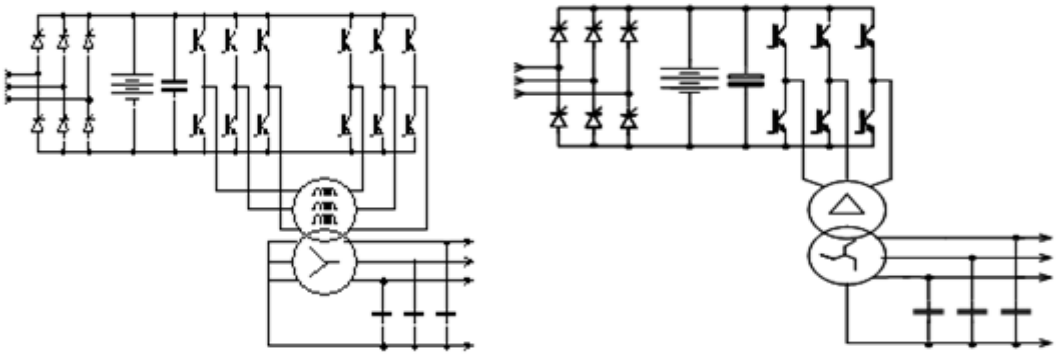

圖 3.只用一個輸出變壓器的變頻器電路

自 20 世紀 80 年代起，UPS 變頻器開始只含有一個變壓器。圖 3 是當前傳統雙變換 UPS 輸出變頻器最常用的電路形式。

二、UPS 輸出隔離變壓器的功能

當前的電路設計，隨著功率半導體器件的發展，已經可以把輸出隔離變壓器，從電路設計拿掉。目前，在應用上對於此類 UPS 的”抗干擾”、“緩衝負載的突變”等一些可靠度的表現的仍有一些存疑。惟有充份瞭解傳統 UPS 輸出隔離變壓器的功能，才能客觀地看待此類 UPS。而這種存疑，是源於對隔離變

壓器的功能和在變頻器電路中的作用不甚瞭解之故。應該說這個變壓器是工頻機全橋變頻器不可分離的構成部分，而且它的作用也很簡單：升壓和產生三相四線輸出的零線。

1）輸出變壓器的功能之一是為單相負載提供所需的零線

傳統雙轉換 UPS 輸出變壓器的一個重要功能是在 UPS 輸出端產生單相負載供電時所需要的中性線（通常稱之為零線）。

帶輸出變壓器的 UPS 的 DC/AC 變頻器通常是由全橋電路組成，如圖 4 和圖 5 所示。輸出端必須加變壓器，否則就完不成輸出單相或三相四線交流電壓的功能。所以此變壓器應視為產生輸出零線的變壓器。

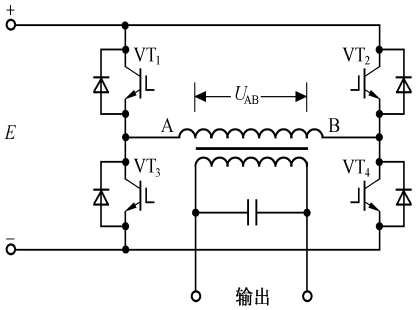

圖 4 單相 UPS 輸出 DC/AC 變頻器

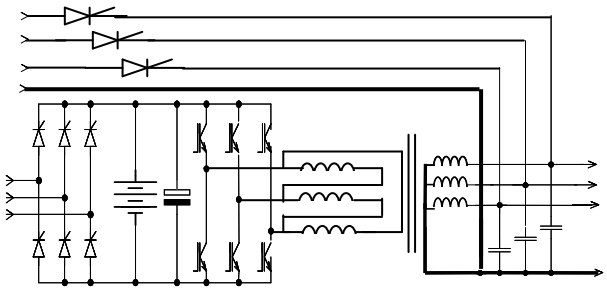

圖 5 三相 UPS 輸出全橋 DC/AC 變頻器

以單相 UPS 輸出 DC/AC 變頻器為例，它是一個全橋逆變電路，每個橋臂有兩個串聯 IGBT(VT_1--VT_4)，輸出交變電壓 U_{AB} 由兩個橋臂的中點 A 和 B 引出。

當 VT_1 和 VT_4 同時通導（VT_2 和 VT_3 截止）時，由直流電壓 E 形成的電流回路是電壓 E 的正端—VT_1—負載 A 端—負載—B 端—VT_4—電壓 E 的負端；而 VT_2 和 VT_3 同時導通（VT_1、VT_4 截止）時，由直流電壓 E 形成的電流回路是電壓 E 正端—VT_2—負載—B 端—負載 A 端—VT_3—電壓 E 的負端。如果 VT_1 和 VT_4 與 VT_2 和 VT_3 交替導通的週期是 50Hz，則加在負載上的電壓 U_{AB} 是幅值為直流電壓 E 的 50Hz 方波或者准方波，如果 VT_1 和 VT_4 以及 VT_2 和 VT_3 都以高頻正弦波脈寬調製（SPWM）規律導通和截止，則負載端電壓 U_{AB} 是幅值可調整的正弦波。

值得注意的是，通常單相負載的輸入電壓要求有一根零線，而且這根零線在系統中（系統輸入變壓器的輸出端）是要接大地的，顯然，如果把圖 4 單相電路中的 A 或者 B 任一點做輸出零線接地，都會使輸入電壓通過導通的半導體功率器件對零線短路而立即燒毀變頻器。但是，在 A 和 B 兩端接輸出隔離變壓器，並通過隔離變壓器向負載供電，則變壓器次級的兩個輸出端都可做為零線輸出。

這裡不僅需要輸出隔離變壓器產生零線，為了 UPS 轉旁路時也能正常供電，輸出變壓器產生的零線還必須與系統輸入的零線連接在一起。

2）輸出變壓器的功能之二是對輸出電壓的匹配作用

傳統大中型 UPS 主回路結構採用可控矽整流將輸入的交流電整流為直流電，電池直接（或經過 DC/DC 變換）掛在直流母線上。當輸入市電正常時，靠整流電路可控矽的調節為 IGBT 結構的橋式變頻器供電。從系統結構可以看出，從整流輸入到逆變輸出的過程中，每個環節都是降壓環節：可控矽整流是為了提供恒定的直流電壓而採取的一種整流方式，由於可控矽整流要“斬掉”一部分輸入電壓，所以其輸出電壓恒定的代價是輸出電壓恒定在低於全波整流輸出電壓的某個數值上。而逆變環節同樣是一個降壓環節，從可控整流輸入來的直流電在通過變頻器逆變出正弦交流電的過程中通常採用的是脈寬調製（PWM）方法，其結果同樣是輸出電壓等級的再次降低。正是由於上述的原因，在此種結構的 UPS

變頻器中，輸出變壓器起著電壓匹配和提升的作用，將變頻器輸出的電壓升至到合理的輸出範圍。

在實際應用中，輸出變壓器通常採用圖 5 的接法，變壓器初級是三角型，如果不考慮該隔離變壓器有升降壓的作用，當三個初級線圈的電壓都是 380V 時，次級是星型，三個次級線圈的電壓都是 220V，那麼初次級線圈的匝比應該是：N1: N2=380/220=1:0.578。

對於沒有升壓功能的隔離變壓器，當要求輸出相電壓為 220V 時，變壓器原邊的峰值電壓應該是：220V ×1.414×1.732=538.8V

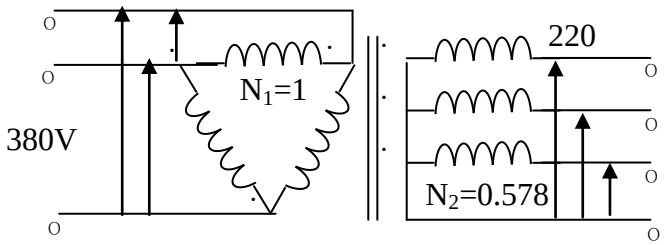

圖 5 三角形/星形變壓器電路參數

考慮到變頻器 PWM 工作方式，為變頻器供電的直流電壓要高於變壓器原邊的峰值電壓，最小極限值通常取變壓器原邊峰值電壓的 1.2 倍以上，即：

538.8V×1.2=646.56V

但是，輸入 AC/DC 變換器能給出的直流母線電壓是多少呢？

當考慮輸入電壓下限 10%時，輸入三相線電壓全波整流的最高直流電壓的理論值是：

380V×1.414×0.9=483V

實際上考慮到 AC/DC 轉換過程的降壓因素，大中型 UPS 的電池（直接跨接在直流母線上）通常配置 32-34 節，額定電壓為 384V-408V，浮充電壓（即 AC/DC 變換後的直流母線電壓）為 432V -459V，電池放電下線電壓為 340V-362V。

UPS 直流母線電壓的下限值（340V-362V）與輸出電壓要求的變壓器原邊的峰值電壓（646.56V）之間的差別就應該由輸出變壓器採用升壓方法來解決，所以，輸出變壓器的升壓比應該是 ：646.56V/（340V-362V），即 1.9~1.78。

也就是說，輸出變壓器的實際升壓比應該是：1:1.9~1:1.78。

3）輸出變壓器是隔離變壓器，但在系統中沒有隔離功能

在 UPS 供電系統中，UPS 設備的一個至關重要的功能是當輸出超載或者 UPS 變頻器故障時，自動轉靜態旁路供電，另外，在系統中還設置了維護旁路，當 UPS 需要維護時可手動轉維護旁路向負載供電。執行這兩個操作時，都是由旁路輸入三相四線電壓直接向負載供電，所以系統的零線要與負載端的零線必須短接在一起。這就決定了帶輸出變壓器的 UPS 的變壓器次級新產生的零線必須連接到輸入電源系統的零線上，如圖 6 所示。也就是說，UPS 機內的變壓器沒有系統隔離的功能，如果系統需要隔離，或系統存在零-地電壓差較大的問題，UPS 機內的變頻器輸出變壓器對此是無能為力的。

當系統需要 UPS 有隔離功能時，必須額外配置隔離變壓器。

隔離變壓器的配置方法有兩種：

第一種方法：在旁路輸入端配置與 UPS 同功率的隔離變壓器，這樣 UPS 內置的輸出

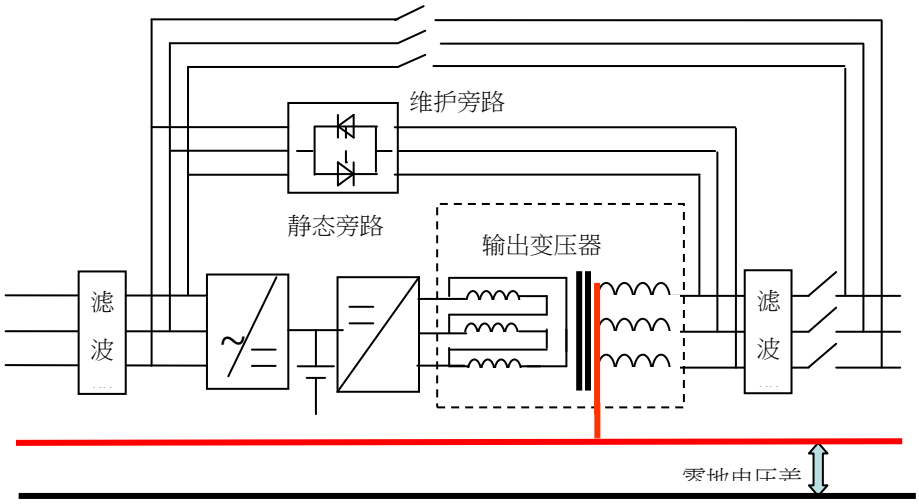

圖 6 輸出變壓器零線的連接

變壓器的輸出零線和旁路隔離變壓器輸出零線都可以接在系統地線上(重新組成接地系統) ，這就實現了 UPS 輸出與供電系統的真正隔離。用這種接法的優點是，在 UPS 正常工作模式下，旁路隔離變壓器空載運行，不影響 UPS 的輸出性能和系統效率。缺點是，當 UPS 轉旁路時，變壓器突然帶載工作，其輸出電壓瞬間會低於轉換前 UPS 檢測到的電壓 (變壓器空載電壓) ，如果轉換前 UPS 檢測到的電壓已經處於 UPS 同步運行限定的可以轉旁路運行的下限，那麼轉換後因變壓器的壓降而使輸出電壓低於負載供電電壓的下限，負載可能會因此而間斷或宕機。

第二種方法：把變壓器配置在 UPS 的輸出端，此方法可使 UPS 供電系統與負載做到理想的、完全的電氣隔離，特別是當 UPS 供電系統在物理位置上與負載距離較長時，可把變壓器放在接近負載端，例如一些大型資料中心，在負載列頭櫃輸入端加裝隔離變壓器。此方法的缺點是變壓器的阻抗會影響到 UPS 對負載供電的穩定精度、供電能力和動態特性。

4) 關於隔離變壓器的抗干擾功能

由於變壓器的阻抗有一定的感性成分，因而說這個變壓器具有一定的抗干擾作用是可以理解的。但是變頻器輸出變壓器卻不是為抗干擾而設置的，它的抗干擾能力也是有限的。

在供電系統中，產生干擾的原因和干擾現像是多種多樣的，其中包括諸如高壓脈衝、尖峰毛刺、電湧、暫態過電壓、射頻干擾（EFI）和電磁干擾（EMI）等等。但是，就其干擾形式和傳輸途徑而言，大體可分為兩類：一是共模干擾，二是差模干擾。共模干擾存在于電源任一相線和零線與大地之間，共模干擾有時也稱縱模干擾、不對稱干擾或接地干擾，是由於輻射或串擾耦合到電路中的，是載流體與大地之間的干擾。而差模干擾存在於電源相線與零線之間及相線與相線之間，差模干擾有時也稱常模干擾、橫模干擾或對稱干擾，是載流導體之間的干擾。

目前，人們通常採用的抑制干擾的措施主要有給被保護的設備並聯瞬變干擾抑制器和在電子設備的輸入端安裝電源線濾波器兩種方式。採用變壓器提高抗干擾能力是有一定作用的，但這裡講的變壓器應是特殊的“超級隔離變壓器”，而非普通的線性變壓器。

並不是隔離變壓器就能抗干擾，普通變壓器的抗干擾能力是有限的。對於輸入電壓中存在的低頻干擾和電壓畸變，變壓器不可能也不允許“抗干擾”。否則通過變壓器傳輸的電壓波形就會失真。對由地線環路帶來的設備間的相互高頻干擾有一定的抑制作用，但因繞組間存在的分佈電容，使它對共模干擾的抑制效果隨干擾頻率的升高而下降。

變壓器是靠磁耦合實現原邊和副邊的電壓變換的，因而它不具備抗差模干擾的功能。在 1kHz~100MHz 的干擾頻率範圍內，普通隔離變壓器對共模和差模干擾的衰減能力都微乎其微。對普通隔離變壓器的共模抑制能力的分析表明，要提高對共模干擾的抑制能力，關鍵是減小變壓器繞組的匝間耦合電容，為此需要在變壓器初、次級間加設遮罩層，如圖 7 和圖 8 所示。

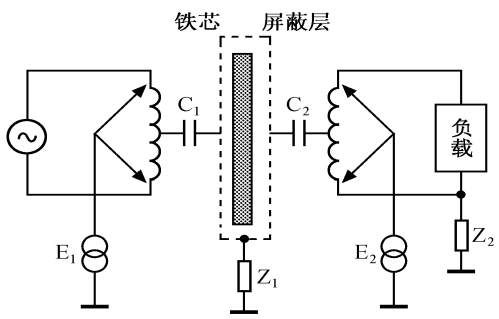

圖 7 帶抗共模干擾遮罩層的隔離變壓器

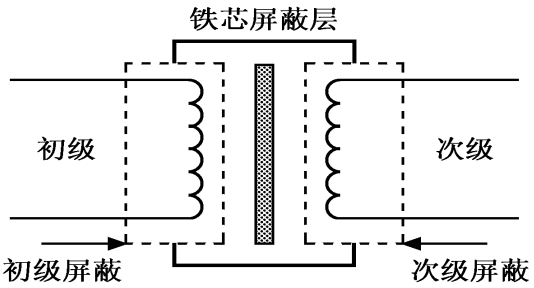

圖 8 超級遮罩隔離變壓器

圖 7 中，C_1 為初級繞阻與遮罩層之間的分佈電容， C_2 為次級繞阻與遮罩層之間的分佈電容，Z_1 為遮罩層接地阻抗，Z_2 為負載的對地阻抗，E_1 為初級干擾（共模型）電壓，E_2 為 E_1 通過偶合傳導到次級的干擾（共模型）電壓。如果 C_1 和 C2 的阻抗遠大於遮罩層接地阻抗，則偶合傳導到次級的干擾電壓 E_2 就會遠小於 E_1。

超級遮罩隔離變壓器有 3 遮罩層，靠近初級繞阻的遮罩層連接在初級中性線上，可以濾掉初級出現的高頻差模干擾。而對 50Hz 的工頻電壓則不產生任何影響，靠近次級繞阻的遮罩層連接在次級中性線上，可以濾掉次級出現的高頻差模干擾。中間遮罩層則與變壓器外殼連在一起，再接大地，主要用來濾掉共模干擾。

三、無輸出變壓器 UPS 的電路形式

無輸出變壓器 UPS 視設計功率的大小，所用的具體電路形式也不盡相同，這裡僅就大功率 UPS 的主電路結構形式（見圖 9）來討論它是如何完成三相四線輸出和系統升壓功能的，因為要求三相四線輸出和系統升壓是傳統 UPS 必須帶輸出變壓器的兩個根本理由，當新的拓樸結構本身具備這兩個功能時，輸出變壓器也就自然沒有存在的必要了。

圖 9 主要表示了與是否需要變壓器這一論題有關的電路框圖，輸入部分是 IGBT-PFC 整流電路，後面部分是三相半橋逆變電路，中間是電池配置示意圖。這裡電池組用了兩組 400V 電池組，串聯後直接跨接在直流母線上。下面主要敘述 IGBT-PFC 整流電路和三相半橋逆變電路的工作狀態。

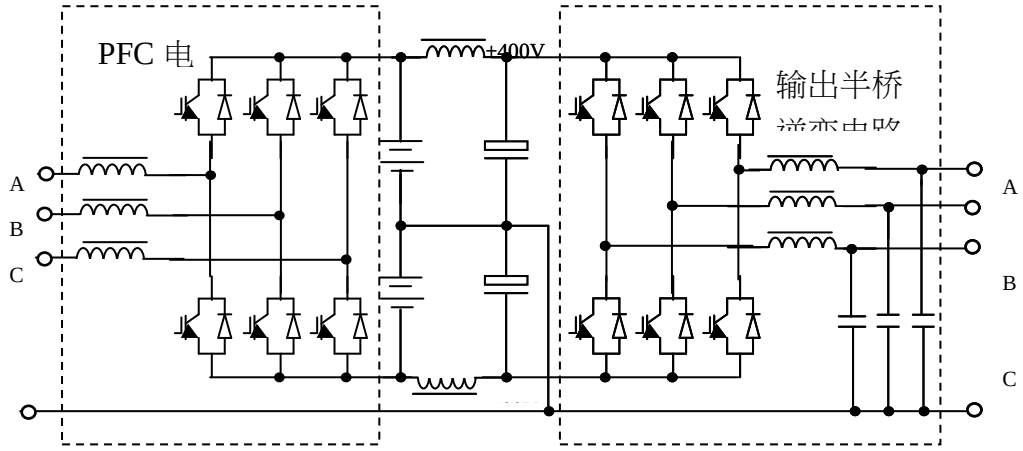

圖 9 無輸出變壓器 UPS 的主電路結構

1）無輸出變壓器 UPS 是如何向負載提供三相四線制電壓的

圖 9 中，輸出半橋逆變電路由三組 IGBT 橋臂組成，每組與公用電容（電池）電路組成單相半橋變頻器。三個半橋電路可獨立輸出功率，由他們形成的三個 $50H_Z$ 單相正弦波電壓彼此相差 120^o，所以只要看一下一個半橋電路的工作過程，就可瞭解三相電路的工作狀態。

如圖 10 所示，假定橋臂的上面的 IGBT 用 VT_1 和 VD_1 表示，下面的 IGBT 用 VT_2 和 VD_2 表示,與電池並連的電容分別是 C_1 和 C_2，續流電感為 L。

圖 10 所示為主變頻器逆變狀態等效電路及工作過程。我們分析其工作過程時，先按輸出電壓正半周和負半周把它分解為兩個降壓型開關電路（Buck）。在輸出電壓的正半周時，降壓開關電路由開關管 VT_1、續流二極體 VD_2 和電感 L

組成。VT_1 導通時電容 C_1 上的正電壓（400V）通過電感 L 向負載輸出功率，電感 L 中的電流線性上升；當 VT_1 由導通轉為截止後，由於電感 L 的續流作用，感應電壓使 VD_2 導通，續流電流流經電容 C_2，其電流方向實際上是給電容 C_2 充電。在輸出電壓的負半周時，降壓開關電路由開關管 VT_2、續流二極體 VD_1 和電感 L 組成。VT_2 導通時，電容 C_2 上的負電壓（-400V）通過電感 L 形成輸出電壓的負半周，電感 L 中電流線性上升，VT_2 由導通轉為截止後，由於電感的續流作用使二極體 VD_1 導通，其電流方向實際上是給電容 C_1 充電。在電路中，輸出電容 C 是容量不大的交流濾波電容器，設置它的主要目的是與電感 L 一起濾除變頻器高頻（15KH 左右）開關脈動電壓和干擾成分，當開關管的控制波形按正弦規律變化（SPWM）時，輸出電壓肯定是平滑的正弦波。

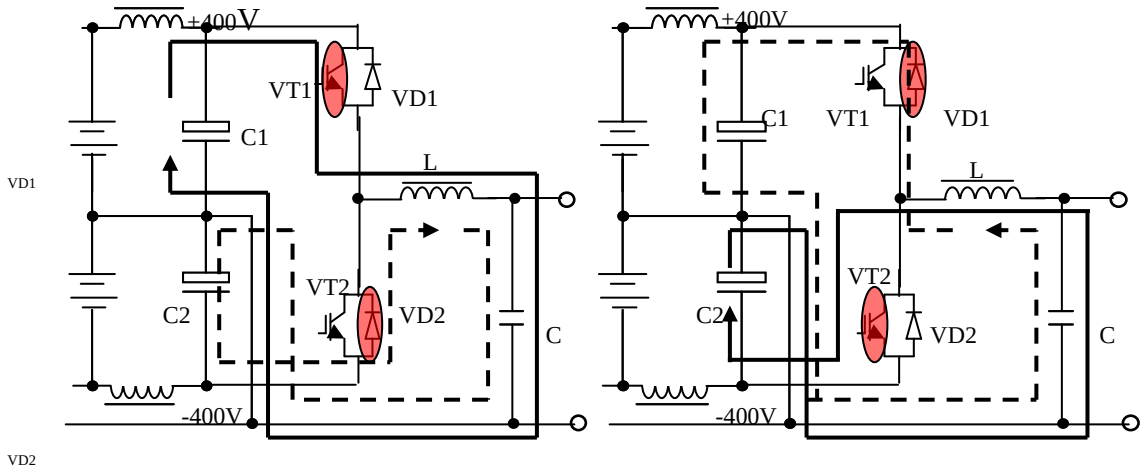

圖 10 單相半橋變頻器的等效電路及工作過程

由圖 10 所示的工作過程可知，三個半橋電路可分別輸出三個穩定的正弦波電壓，控制電路使三個穩定的正弦波電壓相位差為 120º，於是就形成了三相四線制輸出，公共零線則是由直流母線的電容中點引出，而無需再配置輸出隔離變壓器。

2）PFC 技術可同時完成輸入功率因數校正和升壓功能

採用高頻整流技術（IGBT-PFC）同時完成對輸入功率因數校正和提升電壓的功能，是無輸出變壓器 UPS 電路技術的另一重要的標誌性的特點。

圖 11 是單相升壓式（Boost）電路原理。與一般 AC/DC 整流變換所不同的是，在橋式整流與大容量直流電容之間加入了 PFC 電路環節，該環節由電感 L、開關管 VT 和二極體 VD 以及相應的控制電路組成，控制電路接收輸入電壓波形頻率和相位、輸入電流波形和數值、輸出直流電壓幅值 3 種回饋信號，並以 PWM 方式控制開關管的導通和截止，其工作過程如下：

功率開關管 VT 導通時，二極體 VD 因反向偏置而截止，輸入電壓通過開關管 VT 向電感 L 充磁，電感電流（即此時的輸入電流）I_L 的變化規律直接取決於電感 L 值和此時的輸入電壓瞬時值，其增加值則同時與 L 值、此時刻輸入電壓的瞬時值及開關管導通時間有關。開關管 VT 截止時，由於電感 L 的續流作用而感應一個電壓迭加在輸入電壓上，使二極體 VD 正嚮導通，電感 L 將貯存的磁能轉化為電能向電容 C_2 充電並向負載輸出，輸入電流 I_L 下降，I_L 下降速率與電感 L 值、此時刻輸入電壓瞬時值，以及負載（即直流電壓 U_2 的輸出負載）大小有關，其減小值除取決於以上因素外，還與開關管 VT 的截止時間有關。顯然，當輸入電壓 U_1 以正弦規律變化時，控制電路以 PWM 方式對開關管 VT 進行控制，當工作頻率足夠高（例如 15~20kHz）時，輸入電流必然是一個與輸入電壓同相且波形相同的正弦波。

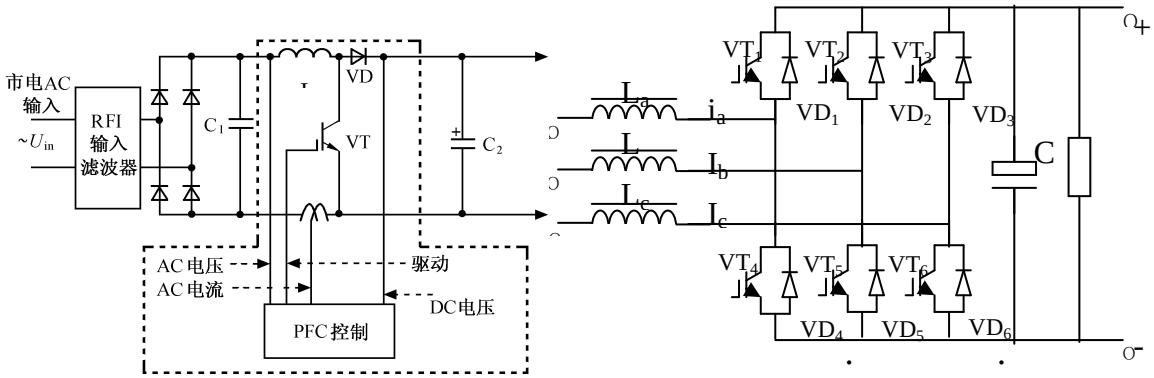

圖 11 輸入功率因數校正（PFC）原理框圖　　圖 12 六開關三相 PFC 原理電路

對於三相輸入的大功率傳統雙變換 UPS，其輸入電路是三相整流形成統一的直流母線(同時配備一組蓄電池)，輸入功率因數校正和升壓原理與單相相似，每個橋路由上下兩隻開關管及與其反並聯的二極體組成，每相電流可通過該相橋臂上的這兩隻開關管控制。如 A 相電壓為正時，VT_4 導通使電感 L_a 上電流 i_a 增大，電感 L_a 充電儲能；VT_4 關斷時，電感 L_a 感應電壓迭加在輸入電壓 U_A 上（升壓），使與 VT_1 並聯的二極體 VD_1 導通，電流 i_a 通過 VD_1 流向負載，在電感能量釋放過程中電流 i_a 逐漸減小。同樣 A 相電壓為負時，可通過 VT_1 和 VT_4 反並聯的二極體 VD_4 對電流 i_a 進行控制。

六開關三相 PFC 原理電路的輸入電壓是 380V，峰值是 537V，所以此電路升壓後的輸出直流電壓可升至 800V（±400V），此值正是 UPS 輸出三相半橋電路所需要的直流母線電壓。

四、無變壓器 UPS 的性能優勢

這裡的討論僅限於是否帶輸出變壓器這兩種電路結構的不同而帶來的設備性能的差異，不包括與產品研製定型和生產水準有關的因素而造成的性能差別：

無輸出變壓器 UPS 的性能優勢是針對帶輸出變壓器 UPS 由於自身的電路結構而不可能達到的固有的缺點而言，包括成本、效率、重量和體積等，當然還包括在設備電氣性能方面的改進和提高。這些與當前社會提倡的降低能源損耗、節省資源消耗、提倡綠色產品趨勢是一致的。

1）高輸入功率因數低輸入電流失真度

為了完成系統升壓功能，PFC 整流環節成為“高頻機”的重要組成部分和必要條件，同時它又把 UPS 輸入功率因數提高到理想的數值：0.99，把輸入電流總諧波失真度 THDI 降低到 5%以下，所以說輸入功率因數高、電流失真度低是

“高頻機”最顯著的優點之一。這不僅消除了 UPS 對電網的諧波污染，它還可明顯地降低前端設備和線纜的容量。表 1 為兩種結構 UPS 的總電流失真度、總電流有效值和線纜配置要求。

表 1：UPS 的總電流失真度、總電流有效值和線纜配置要求比較表

<table>
<tr><th></th><th>無輸出變壓器 UPS</th><th>帶輸出變壓器 UPS</th><th>客戶利益</th></tr>
<tr><td>輸入電流總諧波失真度</td><td>100%負載下，4-5%</td><td>100%負載下， 8.5%
(12-pulses)</td><td rowspan="4">合理選配：
- 線纜
- 發電機組
- 變壓器
- 斷路器</td></tr>
<tr><td>輸入總電流</td><td><table><tr><th>額定功率</th><th>輸入電流</th></tr><tr><td>300 kVA</td><td>442 A</td></tr><tr><td>400 kVA</td><td>587 A</td></tr><tr><td>500 kVA</td><td>735 A</td></tr></table></td><td><table><tr><th>額定功率</th><th>輸入電流</th></tr><tr><td>300 kVA</td><td>554 A</td></tr><tr><td>400 kVA</td><td>751 A</td></tr><tr><td>500 kVA</td><td>935 A</td></tr></table></td></tr>
<tr><td>輸入纜線選型</td><td><table><tr><th>額定功率</th><th>mm²</th></tr><tr><td>300 kVA</td><td>1 x 240</td></tr><tr><td>400 kVA</td><td>2 x 150</td></tr><tr><td>500 kVA</td><td>2 x 240</td></tr></table></td><td><table><tr><th>額定功率</th><th>mm²</th></tr><tr><td>300 kVA</td><td>2 x 180</td></tr><tr><td>400 kVA</td><td>2 x 240</td></tr><tr><td>500 kVA</td><td>5 x 120</td></tr></table></td></tr>
<tr><td>輸入端柴油發電機機配置</td><td>1:1.3</td><td>1:2~4</td><td>消除輸入低功率因數和高諧波電流的影響</td></tr>
</table>

從表 1 中資料可以看出，由於帶輸出變壓器 UPS（例如 12 脈衝整流）的輸入功率因數低，輸入電流諧波電流大，其輸入電流明顯地大於無輸出變壓器的 UPS，增加量在 27%左右。前端變壓器、斷路器和線纜的規格都要相應的增大，其中線纜的截面要增加接近一倍。特別是當輸入端有備用柴油發電機時，由於諧波電流和 12 脈衝移相變壓器、無源濾波器的影響，UPS 與油機容量的配比從無輸出變壓器 UPS 的 1:1.3 增大到 1:2~4。

表 1 是輸出滿負載時的資料，當實際應用中負載減輕時，12 脈衝（+11 次無源濾波）的輸入功率因數還會明顯地減小，輸入電流諧波成分明顯增大。

2）工作效率高

無輸出變壓器 UPS 的整機效率之所以比帶變壓器 UPS 的效率高，主要來自兩個方面，一是去掉了變壓器的損耗，大功率變壓器的損耗通常在 2%左右；二是系統直流母線電壓的提高減少電路工作損耗 0.5%左右，如果排除電路設計和生產水準差異因素，電路結構的變化可使整機工作效率提高 2.5%左右。表 2 是一組典型的測試資料。

表 2　UPS 工作效率比較表（按照輸出功率因數 0.9 計算）

<table>
<tr><th>不同負載率時的效率</th><th>無輸出變壓器 UPS</th><th>帶輸出變壓器 UPS</th><th colspan="4">客戶利益（年電費節省 ￥）</th></tr>
<tr><td rowspan="2">100%
40%
25%</td><td rowspan="2">94%至
95%
93 至
94%
91.4 至
93.6%</td><td rowspan="2">92.5%至
93%
91.6 至
92.5%
89.5 至
91.6%</td><td>負載</td><td>25%</td><td>40%</td><td>100%</td></tr>
<tr><td>300 kVA</td><td>13140</td><td>14716</td><td>52560</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td>400 kVA</td><td>17520</td><td>19621</td><td>70080</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td>500 kVA</td><td>21900</td><td>26280</td><td>87600</td></tr>
<tr><td>機內溫度</td><td>35°C</td><td>40°C</td><td colspan="4">一旦製冷系統癱瘓，UPS 可運行更長時間，並能在更為苛刻的環境中運行。</td></tr>
</table>

整機效率的提高，不僅可有效的降低能源損耗，還意味著設備本身損耗小，以 500KVA 的 UPS 的滿載效率相比，無輸出變壓器 UPS 的效率提高了 2.0%，就相當於機內減少了 10KW 的發熱量。這對提高設備運行的可靠性和降低對環境的要求是有利的。

表 2 資料僅僅考慮了設備本身的效率的提高，如果把因輸入功率因數的提高，而使輸入裝置（濾波器、開關、線纜等）容量和損耗的降低，以及 12 脈衝整流時的輸入變壓器的損耗計算在內的話，那麼無變壓器 UPS 對整個系統效率的貢獻應超過 4%。

3）重量輕、體積小

資料中心基礎設施是一項費用昂貴的固定資產投資，機房內設備對承重的要求和佔用空間越來越受到人們的重視。同時，重量輕體積小的設備還可以減少對運輸和安裝難度的要求，當然在這方面費用的降低也是可觀的。

表 3 給出了兩種結構 UPS 在功率密度、體積和重量等方面的比較資料。

表 3 UPS 功率密度、體積和重量比較表

	無輸出變壓器 UPS			帶輸出變壓器 UPS			客戶利益
寬度和底面積： - 配備維護旁路 - 不含電池	容量	mm	m²	容量	mm	m²	節省更多空間，運輸安裝成本低
	300 kVA	1 412	1.20	300 kVA	1 600	1.52	
	400 kVA	1 412	1.20	400 kVA	1 600	1.52	
	500 kVA	1 812	1.54	500 kVA	1 600	1.52	
功率密度： - 配備維護旁路 - 不含電池	容量	kW / m²		容量	kW / m²		更高功率密度，更小占地面積，運輸安裝成本低
	300 kVA	225		300 kVA	158		
	400 kVA	300		400 kVA	211		
	500 kVA	292		500 kVA	263		
重量： - 不含電池		kg			kg		減輕機房承重要求，運輸安裝成本低
	300 kVA	960		300 kVA	1650		
	400 kVA	1110		400 kVA	2030		
	500 kVA	1470		500 kVA	2070		

從表 3 具體資料可以看出，與帶輸出變壓器 UPS 相比，無輸出變壓器 UPS 在功率密度、占地面積、重量等方面的貢獻是：

功率密度（kW / m²）可提高 40%左右；

占地面積（m²）可減少 25%左右；

重量減少 50-80%。

4）成本低

與帶輸出變壓器 UPS 相比，無輸出變壓器 UPS 去掉的環節包括：輸出隔離變壓器；輸入 12 脈衝移相變壓器及 11 次無源濾波器。所以無輸出變壓器的 UPS 可降低成本是不言而喻的事實。

但是，當我們討論成本時，應全面地考慮以下四個方面：

- 生產和購置成本；
- 能源運行成本（工作效率高，包括空調費用的降低）；
- 占地少、承重要求小和運輸安裝成本；
- 資源浪費成本。
-

第四點實際上是很重要的，為了減少資源浪費，以半導體代替銅和鋼鐵資源早已成為工業和電子設備發展的趨勢，是具有重大經濟意義和社會意義的基本策略。

5）對電性能指標的改進

無輸出變壓器 UPS 的各項電性能指標絕大多數都相當於帶輸出變壓器 UPS，而有些指標卻顯示出無輸出變壓器 UPS 更優越的性能。除以上講到的輸入功率因數、工作效率、 體積重量和成本外，以下指標也有明顯地改善：

① 輸入電壓範圍更寬：帶輸出變壓器 UPS 對於適應輸入電壓±15%的變化已很不易，而無輸出變壓器 UPS 可在±25-30%範圍內正常工作，不僅表現出對電網很強的適應能力，還可延長電池的使用壽命。

② 輸出能力強：這體現在兩個方面，一是輸出半橋變頻器三相獨立的輸出功率，提高了三相負載不平衡的適應能力；二是去掉了工頻變壓器，變頻器工作頻率又較高，輸出濾波環節阻抗小，所以輸出動態性能更好，負載階躍從 100 到 0%或從 0 到 100%變化時，輸出電壓的變化都可限制在±2%，並在 20-40 毫秒內返回到±1%的容限範圍以內。

五、關於無輸出變壓器 UPS 工作可靠性的討論

設備的可靠性與多種因素有關，包括：電路研製定型水準、技術人員技術水準和經驗、器件選用差別、生產工藝水準、品質管制流程等。電路結構變化有個技術成熟的過程，當然還包括所選用的器件性能和可靠性對新電路結構的適應能力。所以說電路結構的變化對設備可靠性是有影響的，影響大小最終取決於兩個因素：電路技術成熟程度和器件水準。

1）技術成熟是毋庸置疑的

無變壓器 UPS 採用的新技術主要有兩點：一是輸入 IGBT 整流(PFC)技術，二是輸出半橋逆變技術。這兩項技術產生由來已久，已成為電力電子設備的經典技術，應用也非常廣泛，所以技術成熟程度是毋庸置疑的。雖然把這兩項技術集成起來用於無變壓器 UPS 中僅是最近十年的事情，因電路定型水準和參數選擇的差異也可能存在設備可靠性問題，但出現可靠性的根本原因卻不是電路結構和新技術的應用造成的。

2）當前器件性能水準完全能夠滿足新電路結構提出的要求

在無變壓器 UPS 中，對器件性能要求高的環節主要是半橋式變頻器，而關鍵的參數又是功率開關器件 IGBT 的耐壓（V_{CES}）和輸出電流（有效值和峰值）能力，當前的 IGBT 的輸出能力可以完全滿足 400-500KVA 的大功率無輸出變壓器 UPS。

值得注意的是，在無變壓器 UPS 的輸出半橋逆變電路中，輸出電壓是由 ±400V 直流母線電壓直接形成的，輸入電流有效值等於輸出電流有效值。而傳統的帶輸出變壓器 UPS 是通過輸出變壓器升壓形成的，在升壓比為 1:1.9 或 1:1.78 時，同時考慮三角型/星型接法輸出電流有效值是輸入有效值的 1.73 倍，所以全橋變頻器輸入電流有效值是輸出電流有效值的 1.9/1.73=1.1（或 1.78/1.73=1.03 倍）。資料說明，對同樣輸出功率的 UPS，無輸出變壓器 UPS 對 IGBT 的電流輸出能力的要求並不比比傳統的帶輸出變壓器 UPS 高。也就是

說，從 IGBT 的電流輸出能力來看，能做多大功率的帶輸出變壓器 UPS，就可以做到多大的無輸出變壓器 UPS。

從功率器件的耐壓參數和壽命考慮，輸出是否帶變壓器對器件的要求還是有區別的。與帶輸出變壓器 UPS 相比，無輸出變壓器 UPS 的輸出變頻器對 IGBT 的耐壓提出了更高的要求。在帶輸出變壓器 UPS 的輸出全橋變頻器中，IGBT 的耐壓就是直流母線電壓，一般在 400 多伏，而在無輸出變壓器 UPS 的輸出半橋變頻器中，直流母線電壓是±400V，要求 IGBT 的耐壓要大於 800V。儘管當前的器件耐壓水準普遍大於 1200V，所以器件的靜態耐壓已不成問題，但是在變換器的工作過程中，IGBT 的 di/dt 和 dv/dt 也是兩倍的關係，這對器件的可靠性和工作壽命都會產生明顯的影響。

3）輸出隔直流問題

由於控制環節故障使一個 IGBT 連續導通時，或在一個 IGBT 或二極體短路的情況下，400V 直流母線電壓會直接輸出到負載端（此時電感變成阻抗很小的導線）。單相負載輸入整流後的直流母線額定電壓是 311V，考慮負載輸入允許的+15%的上限，直流母線最高電壓是 357V，並聯在整流電路輸出端的濾波電容耐壓通常是 400V。當 UPS 發生這種故障時輸出直流電壓會接近 400V，濾波電容和 DC/DC 變換器都會因輸入電壓過高而受到影響。

出現這種情況在理論上是有可能的。然而，如果出現這一危險情況，即使缺少了專門的直流分量檢測電路（例如，檢測電路故障或參數飄移等），也可以根據從另一個 IGBT 收到的驅動信號得知，直流電壓可能發生短路，從而立即終止變頻器的工作，同時斷開變頻器與後面負載的連接。通常變頻器的輸出端配備有一個靜態旁路開關，它可在變頻器停止工作時迅速將負載切換到旁路市電供電，以保證負載供電的持續進行。變頻器保護和轉旁路供電的動作時間很短，可在輸出電壓上升過程中完成，因而不會對負載安全造成影響。在大量設備的實際運行中，這種故障幾乎沒有出現過。

4）無輸出變壓器 UPS 的可靠性指標

如果不知道平均故障間隔時間 MTBF，或者廠商提供的 MTBF 資料是不可信的，那麼可用 UPS 的效率和輸出能力各項指標來衡量它的可靠性，這些指標包

括整機工作效率、輸出超載能力、輸出電流峰值係數、啟動負載時輸出電流浪湧係數和輸出功率因數等。

以下是已推向市場的 500KVA 無輸出變壓器 UPS 的可量化的可靠性指標：

- 輸出功率因數：0.9；
- 變頻器短路能力：150ms：2.5–3In（輸出 400V）；
- 變頻器超載能力：125% In：10 分鐘；135% In：1 分鐘；150% In：30 秒
- 額定電壓下的輸出電流峰值因數：3 :1
- 動態性能：± 2%，從 0 到 100%或從 100 到 0%的負載階躍變化
- 效率：94.5%（50 到 100%負載率）

這些資料說明，無輸出變壓器 UPS 的輸出能力和可靠性指標與傳統帶輸出變壓器 UPS 一樣，都達到了很高的水準。可靠性已再不是無輸出變壓器 UPS 技術的關鍵問題。

從目前市場面來看，三相高頻機所占的市場份額有逐年成長的趨勢，甚至於在亞州以外的區域，已超過工頻機。換言之，隨著技術的成熟與可靠度的指標受到肯定之後，高頻機已廣被接受。可預見未來，除非在因電網環境惡劣和負載性質特殊而對可靠性要求尤其高的場合，以及對輸出隔直流有特殊要求的場合仍可能選用帶輸出變壓器的 UPS 以外，在一般的資訊系統特別是資料中心供電系統中，高頻機會是三相機的主流。