

What's fun in EE

臺大電機系科普系列



如何掌握看不見的電？—— 直流電源轉換的方法

陳耀銘／國立臺灣大學電機工程學系副教授

楔子

「電能」是各式各樣的能量形式中，最容易被傳輸與轉換，也最容易被人類所使用的一種能量來源。生活周遭很多物品都是以電能作為其能量的來源。所以，我們常聽到：這個東西「要插電」或是「噁呷電（台語）」。甚至，也常常用「電」來形容一個人的精神狀態。如：「這位小朋友已經玩到沒電了」，或是「工作太累了，我需要充電」。這些都是相當傳神的描述。

電能的來源（以下簡稱電源）依其產生電流方式的不同，可分成直流（Direct Current；簡稱 DC）與交流（Alternating Current；簡稱 AC）兩類。DC 電源所產生的電流為單方向，而 AC 電源則產生具有往返雙方向的電流。如果沒有特別說明，一般所稱的電源，指的是能夠產生特定形式與特定大小的「電壓源」。例如台電所提供的電源為 110 伏特 AC 電源，汽車用的蓄電池則是 12 伏特 DC 電源。至於這些電源能夠提供多少電流呢？就得視情況而定。不過，一般而言，只要不超出電源本身的電流提供能力限制，電源的輸出電流是由負載（Load）所決定的。例如一般家庭用的電源是 AC 110 伏特，不管是點亮幾盞電燈，電源電壓依然維持 AC 110 伏特，但其所提供的電流大小則隨著點亮電燈數量的增多而變大。

既然不同的電源有電壓大小不同的差異，那麼吸收電能的負載可以適用於任何一種電源嗎？當然不行！你知道電腦的 CPU 若直接施予 AC 110 伏特的市電之後會發生什麼事嗎？千萬不要試！因為會「爆炸」哦！這就是為何每台

電腦裡面都必須要有電源供應器的原因。市電的 AC 電源必須經過適當「轉換」，才能符合負載的電壓需求，正確供給電能予負載。圖一很簡單地表示出電源、電源轉換器、負載等三者之間的關聯。電能轉換器的輸入端與電源相接，輸出端與負載相接。功能就是將電源的電壓形式與大小，轉換成符合負載需求的形式與大小。



圖一 電源轉換器扮演電能傳遞的角色



臺灣大學電機工程學系

10617 台北市 大安區 羅斯福路四段一號

Email: dept@cc.ee.ntu.edu.tw

http://www.ee.ntu.edu.tw/





由於電源與負載各自有 AC 或 DC 形式，所以電源轉換器依輸入 / 輸出電壓形式的不同，可以分成四類：AC-AC，DC-DC，AC-DC，DC-AC。不同類型的電源轉換器，所採用的原理與所需要的技術都不相同。由於篇幅限制，本篇文章只介紹相同電源形式（AC-AC 與 DC-DC）的電壓高低轉換的原理。

AC 電源轉換

AC 電源的電壓高低值轉換，可以藉由一般大眾熟知的變壓器（Transformer）來達成。變壓器的構造很簡單，將不同的金屬線圈繞在同一個導磁的鐵磁材料即可。根據磁通量變動會產生感應電壓的法拉第定律，可以推導出不同線圈上的感應電壓與金屬線圈之繞線匝數成正比。這裡，順道說一個小故事：早期的電力傳輸系統在佈建的時候，原本有採用 AC 或 DC 不同形式的競爭。不過，AC 電源可藉由變壓器達到升降壓的功能，讓電力在長距離的傳輸之下，其電壓不會因為傳輸線上的損耗而下降。只要在電力傳輸線適當的地方加上變壓器升壓，就可以維持長距離電力傳輸線上電壓的恆定。所以 AC 電源很快就成為電力傳輸的固定形式。但是，為何 DC 電源不能用變壓器達成升降壓呢？這在電機系的「電路學」這門課程中會介紹，在此先賣個關子不談。不過，聰明的你也許可以自己找出答案哦！

名詞解析

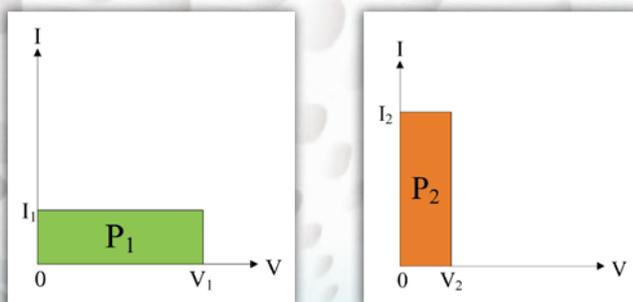
AC 電源的電壓大小可以很容易地藉由變壓器來達成電源轉換，那 DC 電源呢？如果不能用變壓器，那又該如何是好？接下來，在開始探究如何進行 DC 電源轉換之前，讓我們先對與電能相關的重要專有名詞做一些簡單的回顧。

電壓（Voltage）：用來說明電荷在電場中因所在位置不同，而造成能量（電位能）差異的物理量，或稱之為電位差。在電路中，某一點的電壓大小，事實上指的是此點和參考點（通常被定義為零電壓）之間的電位能差異。電壓的代號常用英文字母 V 表示，其單位則用伏特（Volt；V）表示。一伏特（V）的電位能差等於一庫侖（Q）的電荷具有一焦耳（J）的能量。可用數學式表示為： $V = J / Q$ 。

電流（Current）：單位時間內通過固定截面積之淨電荷數。電流的代號常用英文字母 I 表示，而其單位則用安培（Ampere；A）表示。一安培（A）等於一秒鐘（s）有一庫侖（Q）的電荷通過。數學表示式為： $A = Q / s$ 。

功率（Power）：單位時間內的能量變化，也就是能量的變化率。功率的代號常用英文字母 P 表示，而功率的單位用瓦特（Watt；W）表示。一瓦特（W）等於一秒鐘（s）有一焦耳（J）的變化量。可記為 $W = J / s$ 。

電壓、電流與功率是電能計算上的三個最重要的參數。他們彼此之間的關係就是大家很早就學到的：功率等於電壓乘上電流（ $P = V \times I$ ）。幾個簡單的觀念有助於大家對電壓、電流與功率物理意義的了解。「高電壓」表示每顆電子具有「高能量」。「大電流」表示電子的「數量多」。「大功率」表示特定時間內有「高能量」。另外，相同大小的「電能」，可以是「高電壓小電流」或是「低電壓大電流」的形式出現。通常為了方便說明起見，可以先不考慮時間因素造成的變動，也就是假設電壓與電流在某一段時間內皆是常數，然後我們可以用圖



(a) 高電壓小電流

(b) 低電壓大電流

圖二 電壓、電流與功率關係圖

二來表示這三者之間的關係。水平軸代表電壓（V），垂直軸代表電流（I），則區域面積就是功率（P）。在圖二中，(a)(b) 兩者皆有相同大小的長方形面積，即 $P_1 = P_2$ 。但是 (a) 圖中的電壓高，(b) 圖中的電壓低（ $V_1 > V_2$ ）。圖二同時也暗示了電源轉換的基本概念：電源可以藉由某種方法將之從圖二 (a) 的狀態轉換成圖二 (b) 的狀態，而且保持功率大小不變。





直流電源轉換

如何將一個 DC 電源從高電壓轉換成低電壓呢？最容易被想到的方法就是利用分壓定理（Voltage Division）。所謂分壓定理就是串聯的電阻上，每個電阻所分得的電壓高低與其電阻值成正比。如圖三所示為兩個電阻 R_1 與 R_2 串聯，則電阻 R_1 上的分壓 V_1 與電阻 R_2 上的分壓 V_2 的比值，就是 $V_1 : V_2 = R_1 : R_2$ 。因此，如果想要將圖三中 12V 的電源轉成 5V 的電源，只要找到電阻 R_1 與 R_2 符合 $R_1 : R_2 = 7 : 5$ 的關係是就可以了，不是嗎？但是這會不會太簡單了？有陷阱嗎？聰明如你，內心一定想到這其中必有詐。只是……好像又沒錯。好吧！讓我們繼續探索下去。

首先，第一個疑問：電阻 R_1 與 R_2 比值固定為 7 : 5 之下，實際電阻值大小的差異會造成甚麼不同的影響呢？且讓我們用兩組實際的電阻值來說明吧！第一組為 $R_1 = 7\Omega$ 與 $R_2 = 5\Omega$ ，第二組為 $R_1 = 700\Omega$ 與 $R_2 = 500\Omega$ 。馬上就可以根據歐姆定律（Ohm's Law）算出採用第一組電阻值時，12V 電源將有 1A 電流流出。

$$I_1 = \frac{12V}{(7 + 5)\Omega} = 1A$$

而採用第二組的電阻值時，12V 電源流出之電流則降為 0.01A。

$$I_2 = \frac{12V}{(700 + 500)\Omega} = 0.01A$$

很明顯的差異，不是嗎？問題是哪一組才是我們想要的選擇呢？再仔細算下去吧！採用第一組電阻時，12V 電源所提供的功率為：

$$P_1 = 12V \times 1A = 12W$$

而採用第二組電阻之功率為：

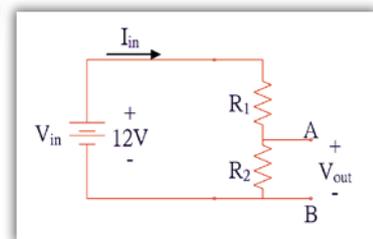
$$P_2 = 12V \times 0.01A = 0.12W$$

因為我們的目標只是將電壓降低，而不限制 12V 電源的功率輸出，因此，必須採用第一組電阻值，才能符合輸出功率的要求。不過，如果這個思考邏輯是正確的，那麼 R_1 與 R_2 的電阻值豈不是越低越好？最好是零（或是 10 的負 100 次方之類的）。但是要達到這麼低的電阻值，豈不是要用金屬導線，甚至是超導體？這……到底是怎樣？

別擔心，假設我們真的將電阻值降到趨近於零，那麼 12V 電源輸出的電流依歐姆定律計算，將會趨近無窮大。

$$I = \frac{12V}{(0 + 0)\Omega} \approx \infty A$$

事實上，這裡會有 2 點不合理的地方：一、電阻值趨近零時，已無法正確得到 7 : 5 的比值。二、即使真的可以得到比值 7 : 5 且又趨近零值的電阻，也沒有可以輸出無窮大電流的電壓源。相信此時很多牙齒堅硬（鐵齒）的同學一定會說：未來若真的有可以輸出無窮大電流的「理想電源」出現，那問題就迎刃而解了，不是嗎？好吧！讓我們利用一個「接近」理想的電路進行分析吧！



圖三 利用電阻分壓原理達成降低電壓



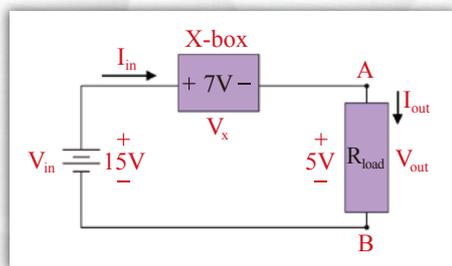


假設圖三中 $R_1 = 7 \times 10^{-10} \Omega$, $R_2 = 5 \times 10^{-10} \Omega$ (夠小了吧!), 而且 12V 電流可以輸出足夠的電流 $I = 12V / (12 \times 10^{-10}) \Omega = 1 \times 10^{10} A$ (夠大了吧!)。此時, 輸出電壓 V_2 就是我們要的 5V, 且電源可以輸出很大的功率。這太簡單了, 沒甚麼挑戰! 等等! 容我提醒一個重點: 我們要把電源電壓從 $V_{in} = 12V$ 轉成 $V_{out} = 5V$ 且經由 V_{out} 送出去給負載。在圖三中, 負載還沒接呢? 如果利用電阻分壓 (R_1 與 R_2) 來降低電壓, 那負載接上之後能正確輸出電壓嗎? (心中開始懷疑了吧!)

假設一個 120V, 60W 的燈泡, 電阻值為 $R_L = 2 \Omega$ 接在圖三 AB 兩端, 你將會發現, 輸出電壓 V_{out} 因為電阻 R_2 與 R_L 並聯, 且 R_2 電阻遠小於 R_L 的關係, 所以根據分流原理 (Current Division), 電流將幾乎全部流過 R_2 而不會流到 R_L 。也就是說負載 R_L 將無法獲得電能的傳輸。除非 R_L 的值遠小於 R_2 , 才会有幾乎全部的電流流到 R_L 。然而, 就又與前面所必要的條件相抵觸。也就是說, 即使千辛萬苦將上述的理想電源與準確的電阻值找到, 結果還是無法達成我們想要的目的。

繞了一大圈, 卻得到互相矛盾的兩個要件, 這有點「裝肖維」的嫌疑? 別急! 這是用來證明利用已知的電阻分壓是無法達成降低 DC 電源電壓之目的。那到底該怎麼做呢? 這次, 讓我們改用克考夫電壓定律 (Kirchoff's Voltage Law) 來試試。

首先, 請看圖四的示意圖。如果我們能夠發明一個裝置, 姑且稱之為「X-box」, 其能夠產如圖四所示的電壓大小與極性。依據克考夫電壓定律: 一個電路迴圈因為起點與終點是相同的, 所以其迴圈上各個元件之電壓 (電位能) 總和為零。所以可以寫出下列式子: $V_{in} = V_x + V_{out}$ 。如此一來, 只要讓 X-box 產生 7V 的電壓, 就可以將 $V_{in} = 12V$ 的電源轉降成所要的 $V_{out} = 5V$ 出現在輸出端 AB 兩點。同時因為串聯電路元件之電流要相等的緣故, 所以輸出電流 I_{out} 就是由 12V DC 電源流出之電流 I_{in} 。如此便可以順利達成 DC 電源轉換之目的。



圖四 利用串聯的 X-box 來達成降低電壓

問題是這個神奇的 X-box 真的存在嗎? 答案是肯定的。不過這不是遊戲機, 而是真正利用電晶體和一些電子零件所製造出來的電路。不僅如此, 這個 X-box 還可以透過適當的控制訊號, 將其電壓大小任意變動, 這樣, 輸出端的電壓便可以很自由的隨之變動, 獲得正確的控制。

事實上, 你可能已經有在使用這個 X-box 而自己不知道而已! 一個簡單的實例就是「音響」, 或稱之為「功率放大器」。音響的功能是產生一個快速變動的電壓給一個具有固定電阻的負載—喇叭。

因為送給喇叭的變動電壓製造出變動電流, 繼而產生變動的磁場去吸引或排斥喇叭內的薄膜。此薄膜被一吸一推之間連帶震動空氣分子, 產生聲音。所以, 音響可以被視為一種電源供應器, 將固定的輸入電源降壓輸出得到變動的輸出電壓提供負載 (喇叭) 使用。由於輸出電壓變動的控制受麥克風或 CD 播放器等低功率訊號的控制, 所以看起來像是把低功率信號放大成高功率信號, 用以推動喇叭, 因此又常被稱為功率放大器。另外, 如果有機會在工廠或實驗室看到可調整輸出電壓的「電源供應器」, 那就是圖四中的 X-box。一般而言, 從電源供應器的面板就可以控制輸出電壓大小。由於輸出電壓與控制信號呈現良好的線性 (Linearity) 關係, 因此常被稱為「線性式電源轉換器」。好奇的你也許會問 X-box 的內部到底是甚麼呢? 這就說來話長了! 還好, 大學的電機系課程 (如電路學、電子學等) 會有詳細的介紹, 今天就不在此介紹!

DC 電源轉換的方法到這裡似乎已經獲得圓滿解決。不算太難, 對吧! 不過, 我們還需要一些指標用來判斷這些電源轉換器的優劣, 也就是用來區別「路邊攤擴音器」與「百萬級音響」的方法。這些指標當中, 以「電源轉換效率」是我們今天的討論重點。由於能源不足的時代來臨, 除了開發新能源之外, 對於已經在使用的電能, 也需要提升其使用效率。





電源轉換效率 (Efficiency) 的定義為輸出功率 (P_{out}) 與輸入功率 (P_{in}) 的比值，且通常用百分比 (%) 表示。由於在圖四中，串聯電流相同的緣故，所以功率與電壓成正比，此時，效率的數學式可以表示如下：

$$E_{ff} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100\%$$

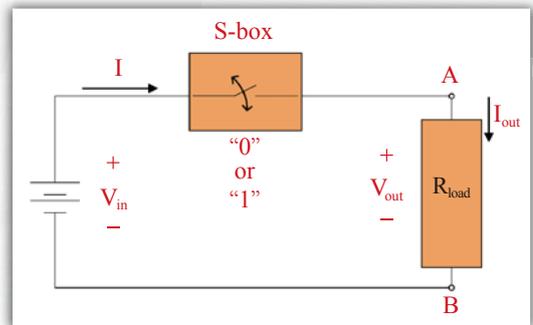
假設 $V_{in} = 12V$ ， $V_{out} = 5V$ ，則 $E_{ff} = 41.67\%$ 。也就是說只有 41.67% 的電能傳送到輸出端。那剩下的 58.33% 到哪裡去了呢？當然就是被這個「電源轉換器」所吸收，然後再以「熱」的形式將這些能量散發掉。有聽過「發燒級音響」一詞嗎？現在你終於明白為什麼了吧！因為它真的會發熱（很燙哦！）。

切換式電源轉換

為了解決轉效率低落的問題，勢必要另外找出一種新的方法來進行電源轉換。相較於傳統的「線性式」操作，新的方法則被稱為「切換式」(Switching Mode)。切換式操作的基本概念就好像把固定長寬的一張長方形紙（想像長寬代表電壓與電流，面積代表功率），依需求切成大小不同的小紙片單元，然後再把這些紙片單元拼湊成另一個長寬尺寸不同但面積相同的長方形紙。其實，不只是長方形，甚至是三角形、梯形或圓形，只要紙片單元切得夠細，拼貼回去的形狀就越能接近目標的形狀。如果從較遠的距離望過去（經過一些必要的處理），連小紙片單元彼此之間的接縫，或是輪廓的參差不齊，都不會被察覺，也就是說可以達到很好的轉換效果。

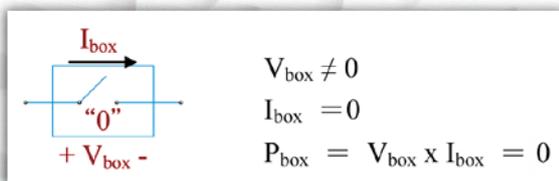
圖五是切換式電源轉換器的示意圖，姑且先用 S-box 來稱呼這個切換式電源轉換器吧！此 S-box 的功能就像是一個電路開關，用來控制電流的流通與否。因此，S-box 有兩個狀態：

- 開關打開 (Open) 時，稱之為「0」狀態。此時 S-box 等效為開路電路，電流無法流通過去，電能無法傳遞，輸出端 V_{out} 電壓大小為零。
- 開關閉合 (Closed) 時，稱之為「1」狀態。此時 S-box 等效為短路電路，電能因電流通過而從輸入 DC 電源送至輸出端提供給負載。因為 S-box 呈現短路狀態，本身沒有電壓降，故輸出端電壓 V_{out} 等於輸入端電壓 V_{in} 。

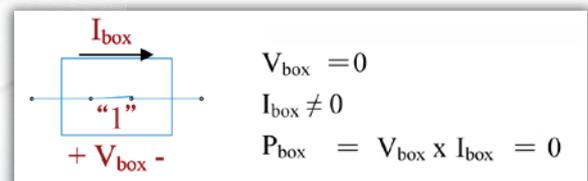


圖五 利用切換式的 S-box 來達成降低電壓

圖六為 S-box 在兩種不同狀態之下的電壓、電流與功率的示意圖。在狀態「0」時，S-box 可用「開路」等效之，故電流為零。在狀態「1」時，S-box 可用「短路」等效之，故電壓為零。因此，不管是「0」或是「1」，電壓或電流其中有一項為零，所以其消耗的电功率 P 是電壓與電流的乘積，亦會為零。也就是說電源藉由 S-box 傳送到輸出端的過程中，將不會因 S-box 的存在，而有功率損失。因此，電能轉換效率可以達到 100%。這真是令人太興奮，不是嗎！且慢，我們不是從小就被灌輸能量轉換過程一定會有損失嗎？難道又有什麼隱藏的玄機？



(a) 狀態「0」



(b) 狀態「1」

圖六 S-box 在兩種不同狀態之下的電壓、電流與功率的示意圖





不錯，天底下沒有一件事物是完美無缺點的。還記得 S-box 的操作方法是所謂的切換式，也就是兩個狀態不斷的變換嗎？實際上 S-box 在「0」或「1」的狀態變化之間，是需要一點點短暫的時間的。這段時間被稱之為「暫態」。在狀態切換的暫態期間，出現在 S-box 上的電壓或是電流必須要從一個非零的數值變化成零，或是相反趨勢變化。總之，在這段暫態期間內，其電壓與電流的大小值均不是零，也就是會有功率損失。因為此功率損失是開關切換所造成的，因此又被稱之為切換損失（Switching Loss）。而且隨著開關每秒切換次數（頻率）的增加，切換損失也會隨之增加。這是切換式電源轉換器的主要功率損失來源。即使如此，切換式電源轉換器的效率還是遠高於線性式電源轉換器。因此，除了少數特殊應用之外，目前電源轉換器幾乎都是採用切換式電路結構。

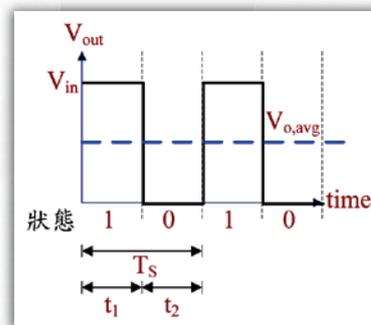
接下來再來談談輸出端電壓大小該如何調節與控制？圖七為藉由 S-box 的「0」與「1」切換操作，而出現在輸出端所得到之電壓波形 V_{out} 。S-box 經歷過一次「0」與「1」狀態總共所需要的時間，稱為一個週期（Period），記為 T_s 。狀態「1」的時間長度若表示為 t_1 ，狀態「0」的時間長度表示為 t_2 ，則 $T_s = t_1 + t_2$ 。在一個週期內， V_{out} 之平均電壓可以由下列公式計算得到：

$$V_{o,avg} = \frac{1}{T_s} (t_1 \cdot V_{in} + t_2 \cdot 0) = \frac{t_1}{T_s} V_{in} \quad (1)$$

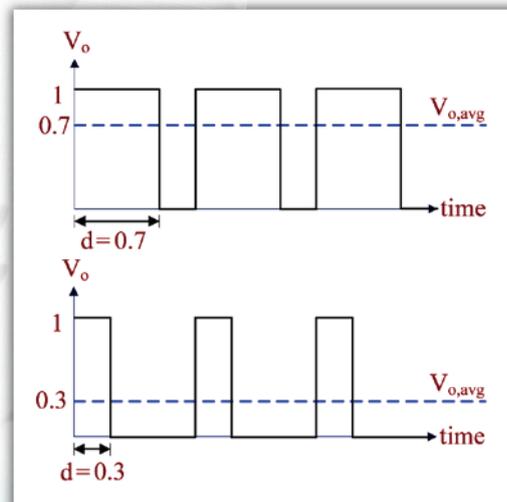
上式中，比值 t_1/T_s 通常稱之為責任比（Duty Ratio），代表的意思是這個開關在一個週期內，處於傳導電能狀態「1」的時間百分比。通常用符號 d 表示，且其大小範圍為 $0 \leq d \leq 1$ 。因此，方程式 (1) 可以進一步簡化成：

$$V_{o,avg} = d \cdot V_{in} \quad (2)$$

理論上，只要改變參數 d ，就可以控制輸出電壓的平均值大小。在圖七中，輸出電壓 V_{out} 的波形其實是一種週期性的脈波（Pulse），時間 t_1 便是這個脈波的寬度。因為輸出電壓 V_{out} 是由調節 d ，也就是 t_1 的大小，來達成控制的，因此這類型的控制方式被稱為脈波寬度調變（Pulse Width Modulation），簡稱 PWM。圖八所顯示的是在不同大小的 d 之下，可以得到等比例變化的不同輸出電壓平均值。當然，要得到真正穩定的平均輸出電壓值，還要經過另外處理，例如：加上具有平穩電壓功用的濾波電容器，或是將切換的週期變短等等手段。不過，這些更進一步後續處理的方式目前暫且不談，留待將來有機會再做深入介紹。



圖七 週期性的脈波輸出電壓及其平均值



圖八 責任比 d 不同，輸出電壓平均值隨之等比例變化

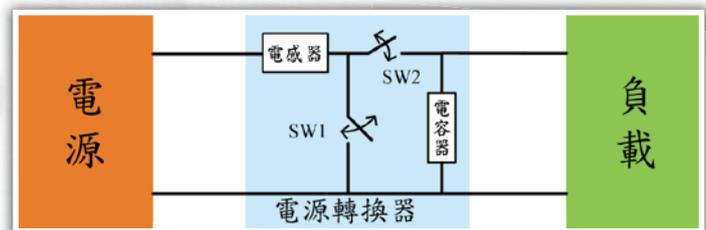




截至目前為止，本文所介紹的 DC 電源轉換之方法，都是將較高的 DC 電壓大小轉換成較低的電壓。如果要反過來將 DC 電源從低電壓轉換到較高電壓，是否可以用相同的辦法達成呢？以圖四的 X-box 來說，如果輸出電壓要高於輸入電壓的話，那麼 X-box 的電壓極性便要反轉，也即是說其右端的電壓必須高於左端。不過這樣一來，X-box 就會跟輸入電源具有一樣的電壓特性。也就是說 X-box 此時必須是另一個電源，然後與輸入電源串聯疊加起來，供給較高的電壓給輸出負載。這聽起來好像怪怪的，是不是？沒錯，如果是這樣的話，X-box 就已經不是電源「轉換器」了，而是一個電源「供應器」！這與我們所需要的功能不同。換個角度來看，如果有辦法製造出可以產生任意電壓的 X-box，為何不直接產生較高的電壓供應給負載呢？所以，X-box 的功能有限，無法達成升壓的要求。

那麼切換式操作的 S-box 呢？如過重新審視方程式 (2) 就可以發現，因為 d 最大等於 1 的緣故，輸出電壓最高只能達到與輸入電壓相等的地步，所以也無法達成升壓的功能。果真如此，是否又要另創新的方法呢？別急！切換式電源轉換器的原理依然可以運用在這裡，只是要採用額外的儲能元件電感器 (Inductor)，以及較多的能量處理步驟。

圖九所示是升壓型電源轉換器的簡單示意圖。電感器是一種具有平穩電流能力的元件，當它透過一個切換開關 SW1 與 DC 電源形成一個串聯迴路時，適度調節此切換開關的責任週期便可以控制電感器內的電流大小，然後再藉由電感器本身的特性讓這個電流維持平穩。此時因為電流呈現穩定的特性，因此原本的輸入電壓源、切換開關與電感器就可以合在一起被當成是一種具恆定電流輸出的電流源。然後再將這個電流源透過另一個切換開關 SW2 的連結與調節，將電流固定注入到一個穩壓電容器上。此時電容器上的電壓會為電流的注入而上升，這種現象一般被稱之為「充電」。如果將此穩壓電容器與轉換器的輸出端連結，那麼轉換器的輸出電壓便會跟著持續上升，達到升壓的效果。當然，為了維持輸出電壓在某個特定的大小值，開關 SW1 與 SW2 必須被適時的開啟與關閉，才能達到輸出與輸入能量的平衡，進而達成輸出電壓控制的目的。目前升壓型電源轉換器的輸出電壓控制，也是採用前面介紹過的 PWM 控制方法。限於篇幅，電源轉換器的細部電路與控制細節就留待以後有機會再介紹了！



圖九 升壓型電源轉換器的簡單示意圖

尾聲

電能的使用是人類現代科技與文明能夠突飛猛進的主因。電源如果不能正常供給，甚至沒有了電源，很難想像人類生活將倒退到什麼地步。目前，能源政策已漸漸成為各個國家經濟持續發展的重要命脈。在這個能源日益短缺的關鍵時代，需要更多人投入新能源的開發與提升電能有效利用的研究。希望本篇關於電能轉換技術的初步介紹，能夠激起讀者們對於電能使用與轉換的興趣，懂得珍惜每一份得來不易的電源，甚至未來以電能相關產業為生涯志向。

