SESEPIC转换器设计

Outline

- SEPIC 電路之應用範圍
- SEPIC 電路之特徵概述
- SEPIC 電路之工作原理
- SEPIC 電路之數學描述
- SEPIC 電路之元件參數
- SEPIC 電路之範例運算

SEPIC 電路之應用範圍

SEPIC（Single-Ended Primary Inductance Converter）拓撲方式的電源具有對輸入電壓進行升降壓轉換功能，可在輸出端得到恒定的電壓，因此正越來越受到電池電源設計者的注意。

雖然 SEPIC 電路比 BUCK 或 BOOST 電路需要更多的元件，但是具有較寬的輸入範圍，能在較少的電池供電的情況下工作。SEPIC電路中額外的元件 cost 通常可以透過節省電池得到補償。

自70 年代中期以來，人們一直對 SEPIC 技術感興趣，但僅僅是作一些理論上的探討，複雜性妨礙了 SEPIC 技術的應用。然而近年来，為盡可能延長電池的使用時間，尤其是攜帶式產品的廣泛應用，對升降壓（BUCK-BOOST）電路的需求迅速增加。

在許多攜帶式設備中， 採用鋰電池對 3V 電路供電，鋰電池電壓範圍為 4.2V (充滿電時) 到 2.7V (當接近放電結束時)，對於這樣的應用，SEPIC無疑是值得考慮的方式。

SEPIC 電路之特徵概述

SEPIC 電路的一個重要應用是功率因素修正电路（PFC），可減少電力傳輸線中的諧波成分。升壓型（BOOST）電路在這種運用中也很理想，但是由於升壓電路的輸出電壓比輸入電壓高，因而元件需要較大的功率。

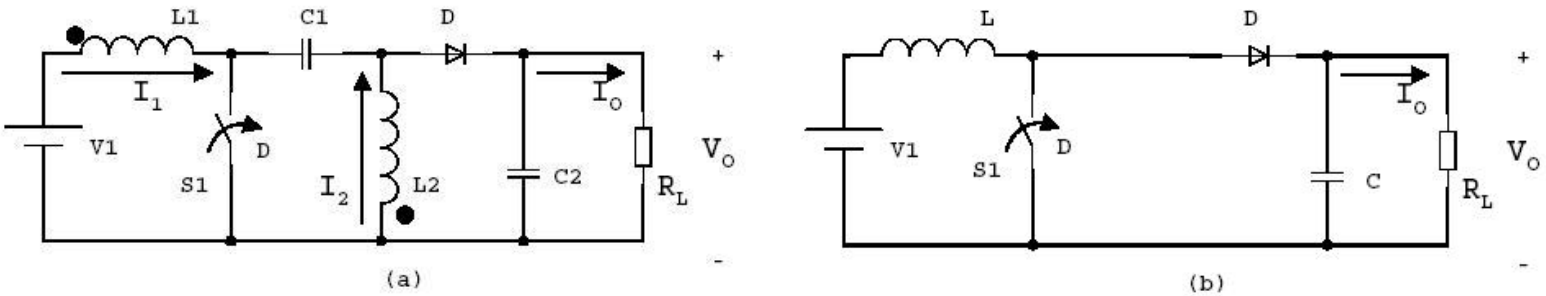
但由於在電容上的電流漣波相對較高，SEPIC 電路通常被限制在小功率應用場合。對電流需求相對較大的應用中，如桌上型設備和其它應用，BUCK 电路架構將更合適。

SEPIC 電路具有下列優點：

- 短路保護
- 以 GND 電位為參考的開關元件容易驅動
- 輸入和輸出電壓具有相同性
- 理論上輸入電流漣波可以減小至零

SEPIC 電路之工作原理

圖一：對（a） SEPIC 電路（b）BOOST 升壓電路進行了比較。SEPIC 比 BOOST 電路所採用元件數量更多。因為 SEPIC 電路的額外元件為電抗性，所以通常誤以為它的工作原理比較複雜；實際上它的兩個電感可以按圖中所示的同名端繞製在同一磁芯上。



圖一。電源拓撲。（a）SEPIC（b）升壓-Boost

假設電路已經達到它的穩定狀態（圖1a）。一個開關周期始於S1導通，電流I_1通過L_1從輸入電壓源流到公共端。同樣的，電容C_1等效於一個電壓源，電流I_2通過L_2從C_1流到公共端，如圖中箭頭方向所示。兩個電流都增大。當S_1關掉時，電流I_1通過C_1和D流入到C_2和負載電阻R_L；電流I_2通過D流入到C_2。當電容充電時，這兩個電流都線性下降，負載電流I_O從C_2流入到負載。

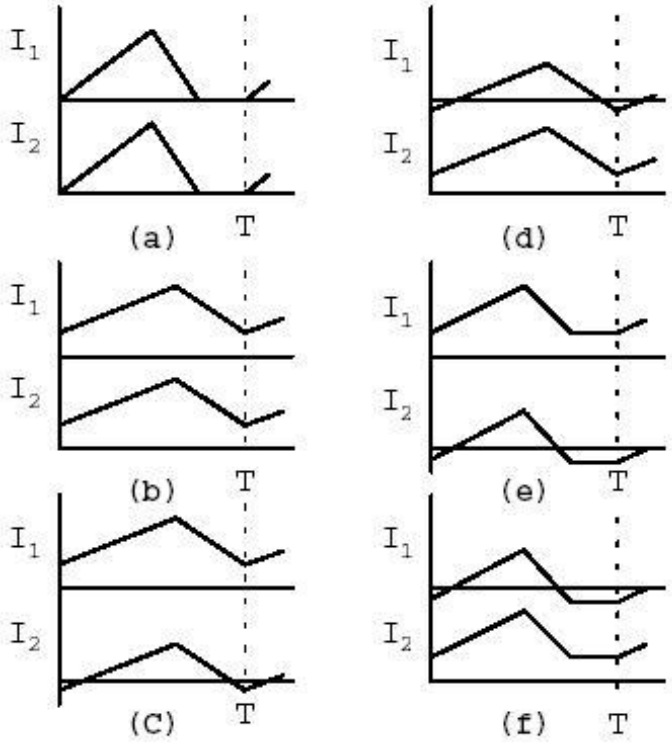
圖二所示為 SEPIC 電路的六個基本工作模式。

圖2b 描述了上述工作過程：兩個電感的電流都為正向並連續。

圖2a 對於非連續工作模式，在開關周期结束之前，電感电流下降到0。

圖2c 和2d 描述了兩個電感的電流是連續的，但是在部分開關周期中其中一個電流進入了反向。

在2e 和2f 中，電感中的電流雖然相等但是方向相反。

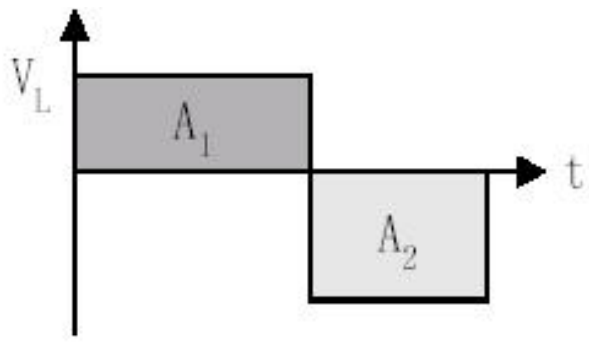


圖二。不同工作模式下的電感電流波形

SEPIC 電路之數學描述

借助於圖1a 等效電路的幫助，我們可以推導出 SEPIC 電路的數學模型。

假設C_1，C_2 上的電壓是恒定的，開關和二極體的壓降可以忽略不計。對於工作在穩定狀態下的電感，在一個完整的開關周期中，它的電壓與時間的關係曲線在一個周期內的積分等於零（如圖3）。



圖三。在一個周期內一個電感中的磁通量等於零，因為A1=A2

因為圖四中A_1、A_2所代表的面積相等，L_1上的電壓表達方式如下：

$V_1 * D = (1-D) * (V_{C1}+V_O - V_1)$ ..... (1)

其中，D為開關的 Duty cycle 比率；V_{C1}为C_1上的電壓值；V_1 為L_1上的電壓；V_O為輸出電壓。

同樣由L_2可得： $V_{C1} * D = (1-D) * V_O$ ..... (2)

由等式（1）和（2）求得： $V_{C1} = V_1$ ..... (3)

用V_1替換（1）或（2）中的V_{C1}，可得到SEPIC的傳遞函数為：

$V_O / V_1 = D / (1 - D)$ ……（4）解得：

$D = V_O / (V_O - V_1)$ ……（5）

假設轉換效率为100%，輸入功率等於輸出功率：

$V_1 * I_1 = V_O * I_O$ ……（6）

實際應用中，可以達到 85% 的效率。同理想情況相比，輸入端電流大約增大18%。根據等式（5）和（6），Duty cycle 比率也可由輸入和輸出電流表達為：

$D = I_1 / (I_O + I_1)$ ……（7）

在（1 - D）的開關關閉的時間內（圖1a），下列等式成立：

$I_O = (I_1 + I_2) * (1 - D)$ ……（8）

由等式（7）和（8）得：

$I_O = I_2$ ……（9）

SEPIC 電路之元件參數

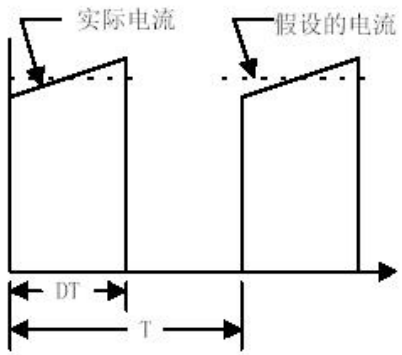
功率元件應根據它們的負載來選擇。開關S_1：在關閉期間根據圖1a可得：

$V_{S1} = V_{C1} + V_O = V_1 + V_O$ ..... (10)

開關電流的平均有效值可以由下式決定（圖4）：

$$I_{1rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^{DT} I_p^{\,2}\,dt}$$

T為開關周期



圖四。開關電流與開關電流時間的函數

解上述等式消去T得：

$$I_{1rms} = I_p\sqrt{D} \quad \text{..... (11)}$$

$$I_{S1} = (I_1 + I_2)\sqrt{D} \quad \text{..... (12)}$$

以等式（8）得：二極體在開關S_1導通時（圖1a）

$V_D = V_O + V_{C1} = V_O + V_1$ ..... (13)

在開關關閉時： $I_M = I_O$ ..... (14)

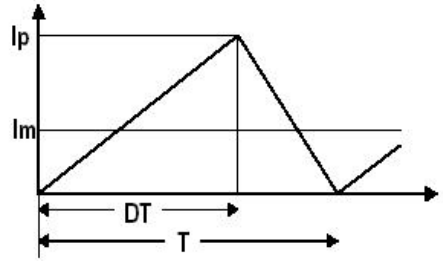
I_M 是二極體的平均電流。它的均方根有效值（rms）透過等式（11）求得：

$$I_{Drms} = (I_1 + I_2)\sqrt{(1-D)} = \frac{I_O}{\sqrt{(1-D)}}$$ ……（15）

電感的參數基於其電流的均方根有效值（rms）

$$I_{1rms} \cong I_1 = \frac{I_O D}{(1-D)}$$ ……（16）

$$I_{2rms} = I_O$$ ……（17）



圖五。電感處於臨界值時的電感電流

電容的參數需由電流和電壓兩個參數來決定，對於C_1：

$$I_{C1} = \sqrt{\left(I_2\sqrt{D}\right)^2 + \left(I_1\sqrt{1-D}\right)^2}$$

由上式，根據等式（7）和（9）可得：$I_{C1} = I_O\sqrt{\frac{D}{(1-D)}}$ ……（18）

同樣的，對於C_2：

$$I_{C1} = \sqrt{\left(I_2\sqrt{D}\right)^2 + \left(I_1\sqrt{1-D}\right)^2}$$ ……（19）

$$V_{C1} = V_1$$ ……（20）

$$V_{C2} = V_O$$ ……（21）

為確定電感值，可以用臨界值（L_{1C}, L_{2C}）作為基礎來分析。臨界值就是指在滿載的情況下，電感電流又回到了零（參見圖5）

$$I_m = \frac{I_{p1}}{2}$$

$$I_{p1} = 2I_{AVI} = 2I_1$$

$$I_{p1} = \frac{2I_O}{(1-D)} \quad \text{.....（22）}$$

$$I_{p1} = \frac{V_1 t_{on}}{L_{1C}} \frac{V_1 DT}{L_{1C}} = \frac{V_1 D}{L_{1C} f_S} \quad \text{.....（23）}$$

fs：代表開關頻率

由公式（22）和（23）相等，可得：

$$I_{1C} = \frac{V_1(1-D)}{2 f_S I_O} \quad \text{.....（24）}$$

$$I_{p2} = 2I_{m2} = 2I_2 = 2I_O \quad \text{.....（25）}$$

$$I_{p2} = \frac{V_{c1} t_{on}}{L_{2C}} = \frac{V_1 D}{L_{2C} f_S} \quad \text{.....（26）}$$

由公式（25）和（26）相等，可得：

$$L_{2C} = \frac{V_1 D}{2 f_S I_O} \qquad \text{.....（27）}$$

$$\frac{L_{2C}}{L_{1C}} = \frac{D}{(1-D)} = \frac{V_O}{V_1} \qquad \text{.....（28）}$$

電容C_1：可以用下列的能量等式來計算電容值。

V_1：C_1上的電壓

fs：開關頻率

$$E = \frac{C_1\left[V_1^2 - V_1^2(t)\right]}{2} = \frac{P_O}{f_s} \Rightarrow C_1 = \frac{2P}{\left[V_{1\min}^2 - V_{1\min}^2(t_1)\right] f_s} \qquad \text{.....（29）}$$

t_1：開關關閉的時間

R_L放電。

$$I_o = \frac{C_2 dV_{C2}}{dt} = \frac{V_{C2}}{R_L}$$

$$\frac{dV_C}{dt} \cong \frac{\Delta V_{C2}}{\Delta t} = \frac{\Delta V_{C2}}{t_{on}} = \frac{\Delta V_C f_s}{D} = \frac{V_C}{R_L C_2}$$

$$C_2 = \frac{V_C}{\Delta V_C f_s R} = \frac{V_C}{\Delta V_C f_S R_{\min}} \qquad \text{.....（30）}$$

SEPIC 電路之範例運算

例：V_1= 6V, V_{1max}= 8V, V_{1min}= 5V, P_O=10W, I_{Omin}=40mA, fs= 300KHz

$$I_O = \frac{P_O}{V_O} = 2A$$

$$R_{L\max} = \frac{V_O}{I_{O\min}} = 125\Omega$$

$$R_{L\min} = \frac{V_O}{I_{O\max}} = 2.5\Omega$$

$$D_{\min} = \frac{V_O}{V_O + V_{1\max}} = 0.38$$

$$D_{\max} = \frac{V_O}{V_O + V_{1\min}} = 0.56$$

開關S_1：$V_{S1} = V_O + V_{1\max} = 13V$

$$I_{S1rms} = \frac{I_O\sqrt{D_{\max}}}{(1 - D_{\max})} = 3.4A$$

二極體D：$V_D = V_O + V_{1\max} = 13V$

$$I_{Dm} = I_O = 2A$$

$$I_{Drms} = \frac{I_O}{(1 - D_{\max})} = 3A$$

電感L_1：$I_{1rms} = \frac{I_O D_{\max}}{(1 - D_{\max})} = 2.5A$

$$L_1 = \frac{V_{1\max}(1 - D_{\min})}{2fI_{O\min}} = 207\mu H$$

電感L_2：$I_{2rms} = I_O = 2A$

$$L_2 = \frac{L_1 V_O}{V_1} = 207\mu H$$

電容C_1：假設在開關導通期間，其兩端電壓差為 0.2V

$$C_1 = \frac{2P_o}{\left[V_{1\min}^2 - V_{1\min}^2(t_1)\right]f} = 43\mu F$$

電容C_2：假設輸出漣波為 50mV

$$C_2 = \frac{V_C D_{\max}}{\Delta V_C f_S R_{L\min}} = 75\mu F$$

ESR：通常電容的等效串聯電阻（ESR）決定了它的量值。ESR 是由電容內的銅箔所引起的分布电阻。

$$ESR = \frac{\Delta V_{C2}}{I_{O\max}} = \frac{0.05}{2} = 25m\Omega$$

在選擇電容時，應確保計算所得的ESR值與它所公布的開關頻率下的ESR值相一致。