

SEPIC

の基本原則

Herman Neufeld/山口英彦

入力電圧の変化に対して、降圧になっても昇圧になっても一定の電圧出力を得ることのできるSEPIC (Single-Ended Primary Inductance Converter) 構成の回路が電源システム設計者のあいだで注目を集めている。本稿では、SEPICで構成される電源回路の動作の基本原則を解説する。

SEPIC (Single-Ended Primary Inductance Converter) 構成の回路については、1970年代なかばに考案されて以来、つねに注目されていた。しかしこれは、理論の観点によるものであった。回路が複雑になり、実用化が難しかったため普及しなかった。

しかしながら、ここ数年の間に状況が変わってきた。とくに携帯機器では、電池寿命をのばす必要性から、ステップダウン/ステップアップ・コンバータの要求が高まっている。SEPICは、標準的なポータブル・システムに適した回路である。

たとえば3Vで動作する回路は、リチウム・イオン電池1セルで動作可能である。しかし、一つの電池セルの電圧は、満充電の4.2Vから放電時の2.7Vまで変化する(図1)。そのため降圧と昇圧の両方が必要になるのである。

とはいうものの、SEPIC回路は、電池2~3セルで動作するステップダウンまたはステップアップ・コンバータに比べて多くの部品を必要とする。SEPIC構成の回路にすることで増える部品のコストは、電池のセル数を減らせることで、たいいていは相殺できる。

SEPICを用いるときに問題となるのは、力率補正(PFC: Power-Factor

Correction)である。つまり電源ラインの高調波成分を抑えることである(PFCは入力フィルタ・コンデンサを用いることで位相進みを抑える)。このようなアプリケーションでは昇圧回路が理想的かもしれない。しかし、高規格の部品が必要になってしまう。ステップアップ・コンバータの出力電圧は、入力電圧より常に高いからである。

SEPICとステップアップ構成の回路を比較したものが図2である。まず部品数が違うことがわかる。そして図2(a)のSEPIC構成の回路では、リアクタンスが増えたことにより、動作はより複雑になる。図2(b)は昇圧回路である。しかしながら、二つのインダクタは、点で示した極性をもつ一つの磁心で構成することができる。

SEPIC構成の回路は、以下のような特徴がある。

- (1) 回路短絡時の保護
- (2) グラウンドを基準としたスイッチ・エレメントは動作が簡単
- (3) 入力電圧と出力電圧が同じ極性
- (4) 入力電圧リップルが理論上はゼロに抑えられる

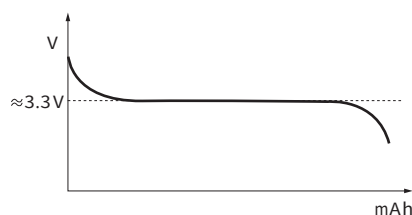
コンデンサによる比較的高いリップルの電流のために、SEPICコンバータの用途は一般的に低電圧のアプリケーションに限られている。携帯型コンピュータなどの比較的大電流を必要とするアプリケーションでは、ステップダウン構成のほうがSEPICより適している。

動作について

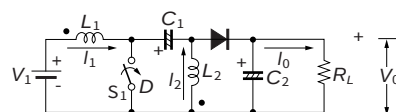
●SEPIC構成回路の動作

図2(a)において、コンバータは規則的な動作をしていると仮定する。スイッチング・サイクルは、 S_1 がONになったときからはじまる。電流 I_1 は、入力電圧源からインダクタ L_1 を通して共通ライン側に流れる。同様に電流 I_2 は、電圧源とみなされるコンデンサ C_1 からインダクタ L_2 を通して共通ライン側へと、図の矢印の向きに流れる。こうして電流が増大する。

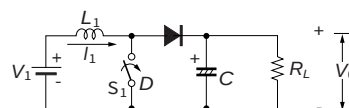
S_1 がOFFになると、 I_1 はコンデンサ C_1 とダイオードを通してコンデンサ C_2 と負荷 R_L に流れる。 I_2 は、ダイオードを通して C_2 に流れる。二つの電流は、コンデンサのチャージに合わせて傾斜的に下がる。



(図1) リチウム・イオン電池の放電曲線(温度および放電率一定)

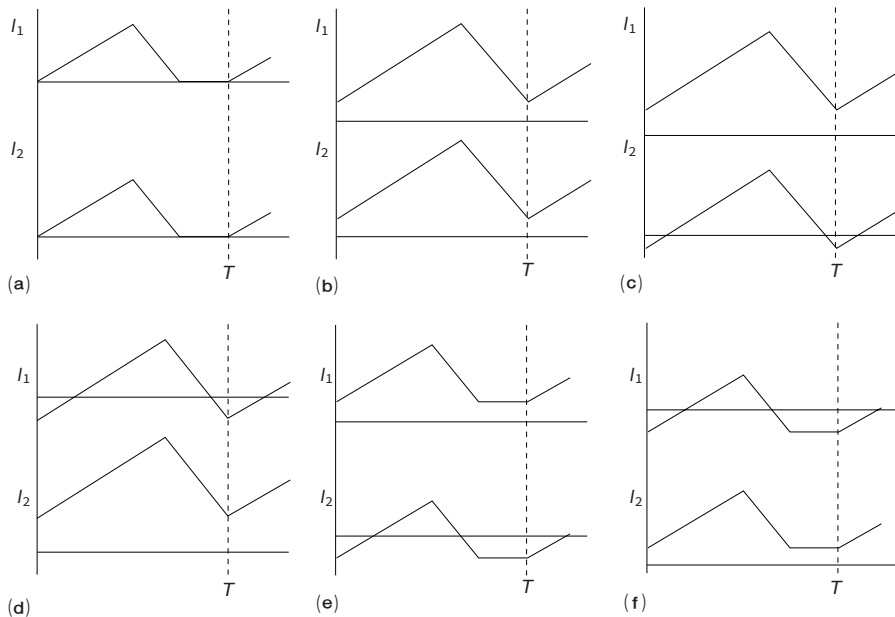


(a) SEPIC



(b) ステップアップ ($V_1 < V_0$)

(図2) DC-DCコンバータの等価回路



【図3】 SEPIC構成の回路の動作モードによるインダクタ電流の比較

そして電流 I_0 はコンデンサ C_2 から負荷 R_L に向かって流れる。

●動作モード

【図3】に、SEPICコンバータの六つの動作モードを示す。【図3(b)】は二つのインダクタの電流が正方向に連続的に流れている状態である。【図3(a)】に示す不連続モードでは、インダクタの電流はスイッチング・サイクルが終わる前にゼロ以下に下がっている。

【図3(c)】と【図3(d)】は、インダクタの電流は連続的であるがスイッチング・サイクルの中で負方向に流れる状態がある。【図3(e)】と【図3(f)】は、インダクタの電流が等しく逆方向に流れている状態である。【図2(a)】の回路を照らし合わせてみると、【図3(e)】と【図3(f)】の動作を理解しやすくなるだろう。



数学的な説明

SEPIC構成の回路の数学的な説明は、【図2(a)】の等価回路をもとにして行うことができる。

コンデンサ C_1 と C_2 の電圧が一定であると仮定する。そして、スイッチとダイオ

ードによる電圧降下は無視する。回路が規則的に動作しているときのインダクタでは、電圧と時間の積を完全なスイッチング・サイクルで積分するとゼロになる。【図4】において、電圧と時間の積である A_1 と A_2 のエリアは等しくなければならないので、 L_1 の電圧は以下のように書くことができる。

$$V_1 D = (1 - D)(V_{C1} + V_0 - V_1) \quad (1)$$

D はスイッチング周期におけるONの時間(デューティ比)である。つまり $1 - D$ は、スイッチOFFの時間になる。この式を L_2 についてあてはめる。

$$V_{C1} D = (1 - D)V_0 \quad (2)$$

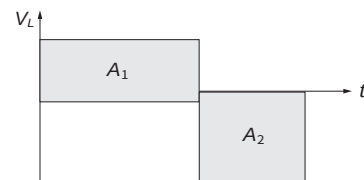
式(1)と式(2)を V_{C1} について解く。

$$V_{C1} = V_1 \quad (3)$$

式(1)と式(2)で、 V_{C1} に V_1 を代入すると、SEPIC構成の回路の伝達関数を得ることができる。

$$\frac{V_0}{V_1} = \frac{D}{1 - D} \quad (4)$$

これを D について解く。



【図4】 1サイクルではインダクタの磁束はゼロになる($A_1 = A_2$)

$$D = \frac{V_0}{V_0 - V_1} \quad (5)$$

効率が100%であると仮定すると、入力電力と出力電力は等しくなるので、以下のような式。

$$V_1 I_1 = V_0 I_0 \quad (6)$$

実用的には85%の効率を達成する。理想ケースと比較すると、この効果は入力電流が18%増えたこととほぼ同等である。式(5)と式(6)を使うと、デューティ比は、以下のように、入力電流と出力電流で表すことができる。

$$D = \frac{I_1}{I_0 + I_1} \quad (7)$$

$(1 - D)$ のOFF期間は、以下のように表現できる。

$$I_0 = (I_1 + I_2)(1 - D) \quad (8)$$

式(7)と式(8)から、

$$I_0 = I_2 \quad (9)$$

となる。



部品定格の計算

使用する電源部品は、定格を考慮して選択しなければならない。

●スイッチ S_1

【図2】において、スイッチがOFFの期間は、

$$V_{S1} = V_{C1} + V_0 = V_1 + V_0 \quad (10)$$

である。スイッチ電流の実効値は、【図5】のように定義される。ここで、 T はスイッチング時間である。