平地研究室技術メモ No.20190805

DC/DC コンバータの負帰還動作

（読んでほしい人：パワエレ初心者）

2019/8/5 舞鶴高専 平地克也

【あらまし】 一般に DC/DC コンバータには、特定の動作条件に対して唯一の安定動作点があります。大きな外乱が与えられて一時的に動作点が変化しても、自動的に安定動作点に復帰するように負帰還機能が働きます。通常の DC/DC コンバータでは、出力電圧の負帰還機能により安定動作点が決まりますが、アクティブクランプ方式 1 石フォワード形 DC/DC コンバータでは、出力電圧以外にクランプ電圧にも負帰還機能があります。DC/DC コンバータの動作解析では負帰還機能の確認が必要です。

■唯一の安定動作点

図 1 の回路の動作を考えます。昇圧チョッパに類似の回路ですが、出力端に定電圧源 E_2 を接続して出力電圧を固定しています。E_2 の電圧が 80V、100V、120V それぞれの場合について、リアクトルに流れる電流 i_L の時間変化を考えます。ただし、i_L の初期値は 100A とし、スイッチ素子 Q のスイッチング周波数は 50kHz、通流率は 0.5 とします。したがって、Q のオン時間とオフ時間は共に 10 μ sec です。

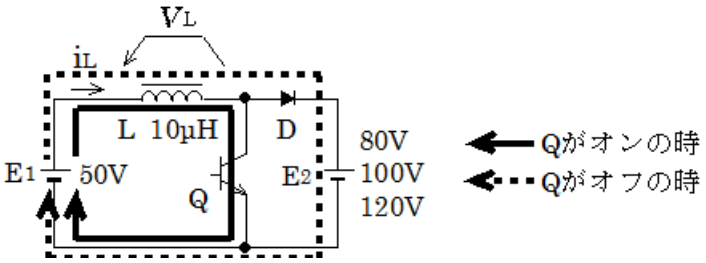


図 1　検討する回路

Q がオンの時は図 1 の実線の径路で電流が流れ、リアクトル電圧 v_L は電源 E_1 の電圧 50V となります。Q がオフの時は点線の径路で電流が流れ、v_L は E_1 と E_2 の差の電圧となり、次のように計算されます。

E_2＝80V のとき： v_L＝50V－80V＝－30V

E_2＝100V のとき：v_L＝50V－100V＝－50V

E_2＝120V のとき：v_L＝50V－120V＝－70V

リアクトル電流 i_L の変化 ΔI は次の式で与えられます（この式の詳細は技術メモ No.20080207[1] を参照下さい）。なお、ΔT は v_L の継続時間です。

$$\Delta I = \frac{1}{L} v_L \Delta T$$

この式に代入して Q がオンの時とオフの時、それぞれの ΔI は次のように計算されます。

＜Q がオンの時＞

$$\Delta I = \frac{1}{L} v_L \Delta T = \frac{1}{10\mu H} \times 50V \times 10\mu\sec = \frac{1}{10 \times 10^{-6}} 50 \times 10 \times 10^{-6} = 50\text{A}$$

＜Q がオフの時＞　オンの時と同様に計算して、

E_2＝80V のとき：ΔI＝－30A

E_2＝100V のとき：ΔI＝－50A

E_2＝120V のとき：ΔI＝－70A

リアクトル電流 i_L の初期値は 100A なので、上記の ΔI を使って i_L の時間変化を図２のように描画できます。図からわかるように、時間経過とともにリアクトル電流は増減を繰り返しながら、E_2＝80V ならば全体として徐々に増加し、やがて無限大に到ります。逆に、E_2＝120V ならば徐々に減少し、やがて 0A に到ります。E_2＝100V のときのみ、増加と減少が釣り合って安定動作となります。

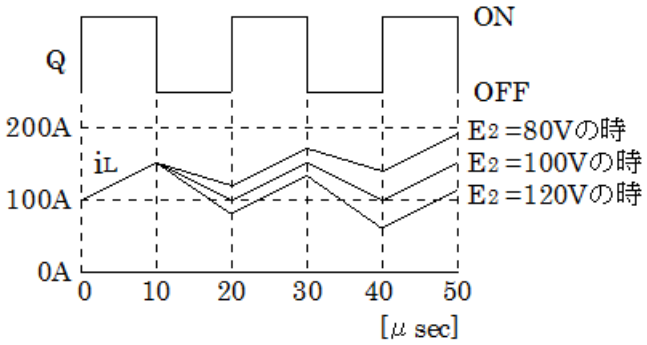


図２　リアクトル電流 i_L の変化

図１の出力側電圧源 E2 をコンデンサ C と負荷抵抗 R に変更すれば図３の昇圧チョッパとなります。コンデンサ C の電圧（チョッパの出力電圧）Vout が 80V であった場合、図２の E_2＝80V の時のように、リアクトル電流 i_L は限りなく増加しようとします。しかしながら、定電圧源 E_2 の場合には i_L が増加しても E_2 の電圧は変化しませんが、コンデンサ C の場合では、i_L が増加するとコンデンサの充電電流も増加し、出力電圧 Vout は増加します。そして、Vout が 100V に達すると i_L は増減が釣り合い、Vout は一定となり動作は安定します。逆に、Vout が 120V の場合は i_L は減少し、その結果 Vout は減少し、やがて 100V の安定動作点に到ります。

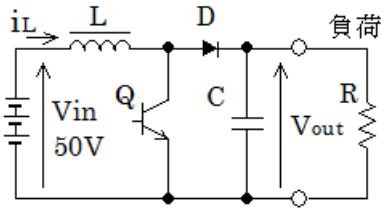


図３　昇圧チョッパ

以上の動作をまとめると、出力電圧 Vout に対して、次のような負帰還動作が実現されていると考えられます。

Vout が 100V より小 → リアクトル電流 i_L が増加 → Vout が増加

Vout が 100V より大 → リアクトル電流 i_L が減少 → Vout が減少

‥‥ やがて Vout が 100V となり、安定に動作する。

一般に、すべての DC/DC コンバータは出力電圧の負帰還機能を持っており、自動的に唯一の安定電圧で動作します。

＜負帰還機能とは＞
出力の一部を入力に戻すことにより出力を所定の値に近づける機能です。ネガティブフィードバック（negative feedback）とも言います。電気の世界で一番有名なのはオペアンプによる負帰還増幅回路でしょう。平地研究室技術メモでは負帰還増幅回路の原理も詳しく説明していますので参照下さい。
‥‥平地研究室技術メモ No. 20140731、「OP アンプの基本」

■シミュレーションによる負帰還機能の確認

負帰還機能が動作していることを実験確認することは難しいですが、シミュレーションなら可能です。図４の回路でシミュレーションを行い、図５の結果を得ました。図２と同様に、i_L の初期値は 100A、Vout（C の電圧）の初期値は 80V としています。E_1 と L の値も図２と同じです。動作周波数と通流率も図２と同じです。なお、図４は文献[2]と同じものを使用しています。

図５によると、Vout の初期値が 80V なので、最初の 3 サイクルは図２と同様に i_L は増減を繰り返しながら全体として徐々に増加しています。その結果 Vout も徐々に増加しています。そして 4 サイクル目に安定動作電圧である 100V に達し、i_L の増加は終了しています。その後若干の振動を経て 20 サイクル程度でほぼ完全に 100V に整定しています。コンデンサ C の電流 i_C は、最初の数サイクルは正の半サイクル（充電）の面積が大きく、負の半サイクル（放電）の面積が小さく、全体として充電されていることが確認できます。約 20 サイクル以降は正負の面積が均衡しており、安定動作していることが確認できます。

なお、このシミュレーションでは早く整定させるためにコンデンサ C の容量を小さく（50μF）しています。実際の昇圧チョッパではもっと大きなコンデンサが用いられ、もっとゆっくりと整定します。Vout のリプル電圧もほとんど発生しません。

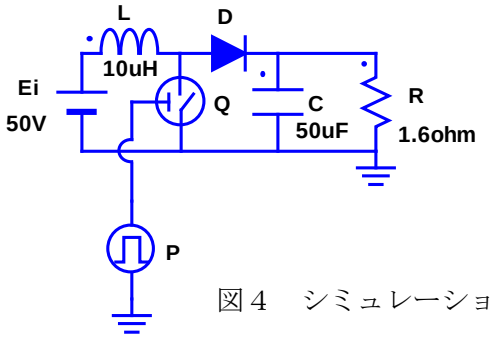
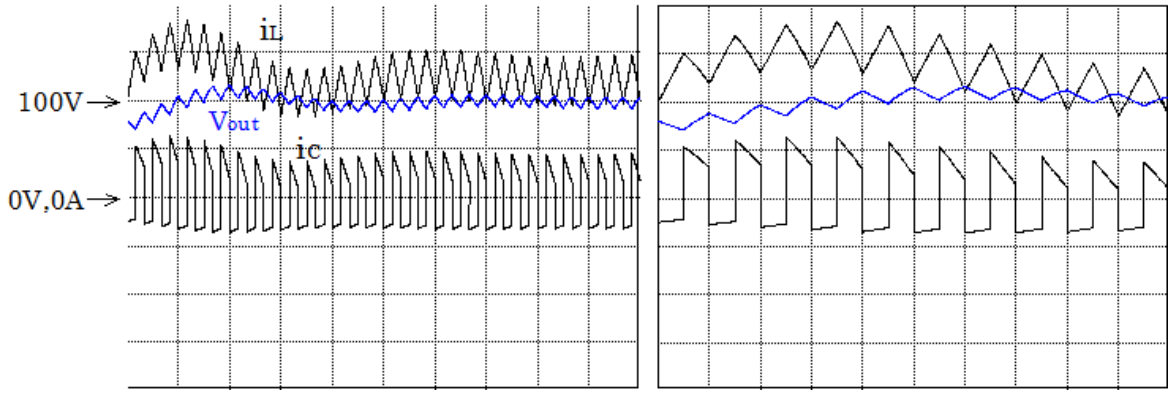


図４　シミュレーション回路（SCAT による）



(a) 30 サイクル　60μsec/div　　(b) 最初の 10 サイクルを拡大　20μsec/div

i_L は 50A/div、Vout は 50V/div、i_C は 100A/div

図５　昇圧チョッパの過渡応答（Vout の初期値は 80V）

■昇圧チョッパの出力電圧の導出

昇圧チョッパの安定動作点では図 2 の E_2＝100V のように、i_L はトランジスタ Q がオン時の増加分とオフ時の減少分が同じ値となっています。このことを利用して、安定動作点の出力電圧 Vout を以下のように導出できます。なお、Ton はトランジスタ Q のオン時間、Toff はオフ時間です。

Q がオン時の i_L の変化量：　$\Delta I = \frac{1}{L} v_L T_{on} = \frac{1}{L} V_{in} T_{on}$

Q がオフ時の i_L の変化量：　$\Delta I = \frac{1}{L} v_L T_{off} = \frac{1}{L} (V_{in} - V_{out}) T_{off}$

安定動作点では、両者の和が 0A となるので、

$$\frac{1}{L} V_{in} T_{on} + \frac{1}{L} (V_{in} - V_{out}) T_{off} = 0 \quad \cdots\cdot(1)$$

1 周期を T とし、Q の通流率をαとすると、

Ton＝Tα　、　Toff＝T(1－α)

この関係を(1)式に代入して、

$$\frac{1}{L} V_{in} T\alpha + \frac{1}{L} (V_{in} - V_{out}) T(1-\alpha) = 0$$

この式を整理すると、昇圧チョッパの出力電圧の公式、

$$\text{Vout} = \frac{1}{1-\alpha} \text{Vin} \quad \cdots\cdot(2)$$

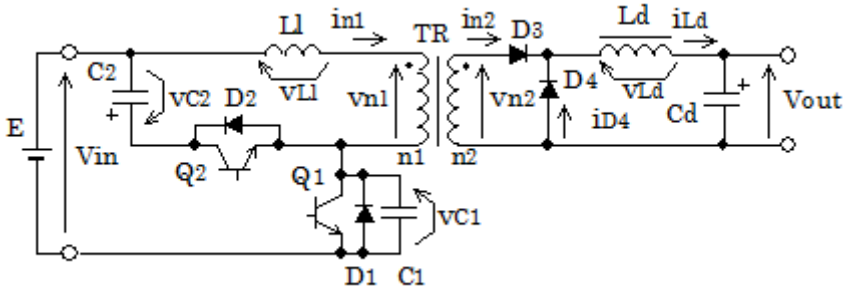
が得られます。

■アクティブクランプ方式１石フォワード型 DC/DC コンバータの場合

以上、昇圧チョッパの負帰還機能を説明しましたが、すべての DC/DC コンバータは出力電圧の負帰還機能があり、自動的に所定の安定動作点で動作することにより出力電圧が決まります。アクティブクランプ方式１石フォワード型 DC/DC コンバータ（以下、アクティブクランプ方式と略す）も出力電圧の負帰還機能がありますが、それ以外にもう一つの負帰還機能があり、重要な役割を果たして

います。

図６にアクティブクランプ方式の回路構成を示します。2 つのスイッチ素子 Q_1 と Q_2 は短いデッドタイムを挟んで交互に ON/OFF します。通常の１石フォワード型とは異なり、Q_1 と Q_2 はソフトスイッチングが可能であり、効率の向上が期待できます。図７に 2 つの動作モードと電流径路を示します。モード１は Q_1 がオン、Q_2 がオフの動作であり、整流ダイオード D_3 が導通して出力側に電力が伝達されます。モード 2 は Q_1 がオフ、Q_2 がオンの動作であり、励磁電流 i_m はコンデンサ C_2 を通って流れ、負荷電流はフライホイールダイオード D_4 を通って環流します。モード１とモード 2 共に、前半と後半で励磁電流 i_m の方向が逆転します。図８に Q_1,Q_2 のタイムチャートと主要な電圧・電流波形を示します。デッドタイムは無視しています。なお、アクティブクランプ方式の動作の詳細は文献[3～6]を参照ください。



（Ll は変圧器 TR の漏れインダクタンス）

図６　アクティブクランプ方式１石フォワード形 DC/DC コンバータ

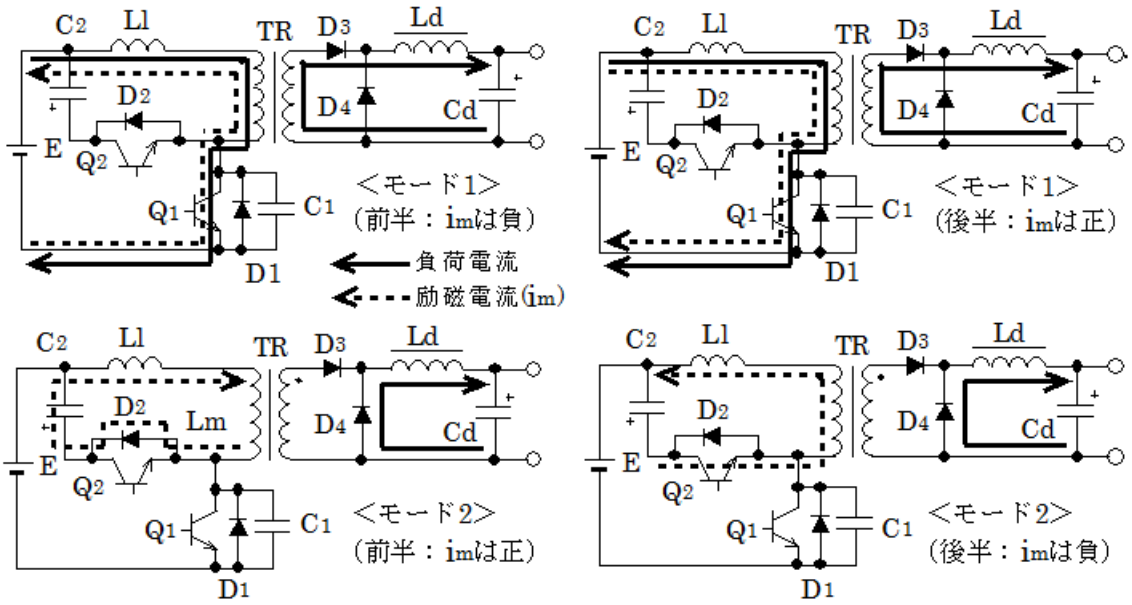


図７　アクティブクランプ方式１石フォワード形の 2 つの動作モード

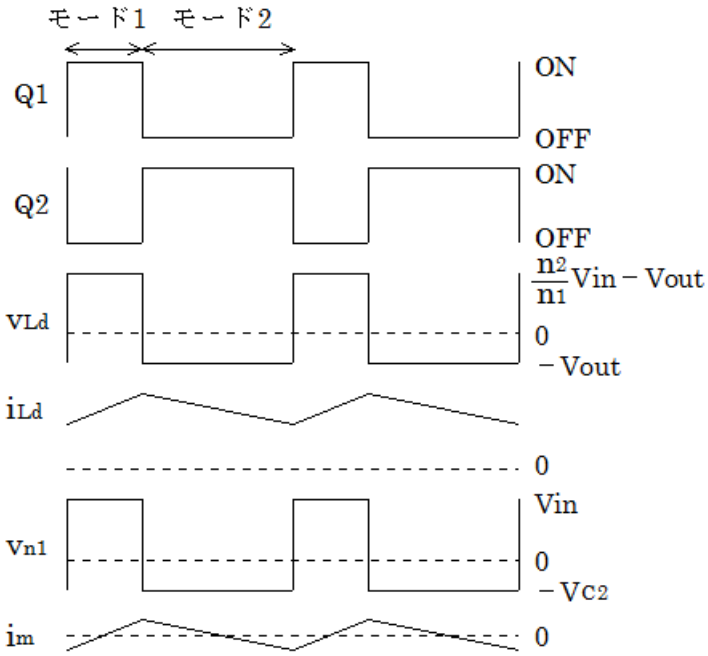


図８　アクティブクランプ方式１石フォワード形の主要波形

モード１での平滑リアクトル Ld の電流 iLd の変化量ΔIL1 は次のように計算されます。なお、T1 はモード１の継続時間で Q1 のオン時間です。α は Q1 の通流率です。

$$\Delta I_{L1} = \frac{1}{L} v_{Ld} T_1 = \frac{1}{L}\left(\frac{n_2}{n_1} V_{in} - V_{out}\right) T\alpha$$

モード２での平滑リアクトル Ld の電流 iLd の変化量ΔIL2 は次のように計算されます。なお、T2 はモード２の継続時間で Q1 のオフ時間です。

$$\Delta I_{L2} = \frac{1}{L} v_{Ld} T_2 = \frac{1}{L}\left(-V_{out}\right) T\left(1-\alpha\right)$$

定常状態では両者の合計は 0A なので、

$$\Delta I_{L1} + \Delta I_{L2} = \frac{1}{L}\left(\frac{n_2}{n_1} V_{in} - V_{out}\right) T\alpha + \frac{1}{L}\left(-V_{out}\right) T\left(1-\alpha\right) = 0$$

整理して、

$$\Delta I_{L1} + \Delta I_{L2} = \frac{T}{L}\left(\frac{n_2}{n_1} V_{in}\alpha - V_{out}\right) = 0$$

よって、

$$\mathrm{Vout} = \frac{n_2}{n_1} \mathrm{Vin} \times \alpha \quad \cdots\cdot(3)$$

この式がアクティブクランプ方式の出力電圧の公式です。何らかの原因で Vout が(3)式とは異なる電圧になった場合は、次のような負帰還機能が働いて自動的にこの電圧に復帰します。

$$\mathrm{Vout} < \frac{n_2}{n_1}\mathrm{Vin} \times \alpha \text{ の時 } \cdots\cdots \ \Delta I_{L1} + \Delta I_{L2} > 0 \ \rightarrow \ \mathrm{iLd}\text{ 増加} \ \rightarrow \ \mathrm{Vout}\text{ 増加}$$

$$\mathrm{Vout} > \frac{n_2}{n_1}\mathrm{Vin} \times \alpha \text{ の時 } \cdots\cdots \ \Delta I_{L1} + \Delta I_{L2} < 0 \ \rightarrow \ \mathrm{iLd}\text{ 減少} \ \rightarrow \ \mathrm{Vout}\text{ 減少}$$

■もう一つの負帰還機能

アクティブクランプ方式のもう一つの負帰還機能はコンデンサ C_2 の電圧 v_{C2} に関するものであり、v_{C2} が変圧器の励磁電流 i_m の変化に負帰還され、その結果 v_{C2} に唯一の安定動作電圧を生じます。なお、C_2 はスイッチ素子 Q_1 の印加電圧をクランプする機能があるので、クランプコンデンサと呼ばれます。v_{C2} はクランプ電圧と呼ばれます。

図７の電流経路と図８の主要波形から分かるように、変圧器の１次巻線 n_1 にはモード１で電源電圧 Vin が印加されて励磁電流 i_m は増加し、モード２でクランプ電圧 v_{C2} が負方向に印加されて i_m は減少します。それぞれ次のように計算されます。なお、α は Q_1 の通流率です。

モード１での i_m の変化 $\Delta \mathrm{Im1} = \dfrac{1}{L_m} V_{in} T \alpha$

モード２での i_m の変化 $\Delta \mathrm{Im2} = -\dfrac{1}{L_m} V_{C2} T \left(1-\alpha\right)$

定常状態では両者の合計は 0A なので、

$$\Delta \mathrm{Im1} + \Delta \mathrm{Im2} = \frac{1}{L_m} V_{in} T \alpha - \frac{1}{L_m} V_{C2} T \left(1-\alpha\right) = 0$$

整理して、

$$\Delta \mathrm{Im1} + \Delta \mathrm{Im2} = \frac{T}{L_m}\left\{V_{in}\alpha - V_{C2}\left(1-\alpha\right)\right\} = 0$$

よって、

$$v_{C2} = V_{in}\frac{\alpha}{1-\alpha} \quad \cdots\cdots(4)$$

何らかの原因で v_{C2} が(4)式とは異なる電圧になった場合は、次のような負帰還機能が働いて自動的にこの電圧に復帰します。

$v_{C2} < V_{in}\dfrac{\alpha}{1-\alpha}$ の時 $\cdots\cdots \Delta \mathrm{Im1} + \Delta \mathrm{Im2} > 0$ → i_m 増加 → v_{C2} 増加

$v_{C2} > V_{in}\dfrac{\alpha}{1-\alpha}$ の時 $\cdots\cdots \Delta \mathrm{Im1} + \Delta \mathrm{Im2} < 0$ → i_m 減少（負方向に増加） → v_{C2} 減少

i_m の増減と v_{C2} の増減の関係を分かり易くするために図９を参照下さい。正常に動作している時は i_m は正負対称ですが、i_m が増加すると正方向にバイアスがかかるので、モード２の前半（i_m は正）の期間が長くなり、後半（i_m は負）の期間が短くなります。図７に示すように、C_2 はモード２の前半に充電され、後半に放電します。したがって、i_m が増加すると充電より放電が少なくなり v_{C2} は増加します。i_m が減少した時は逆の現象が発生します。

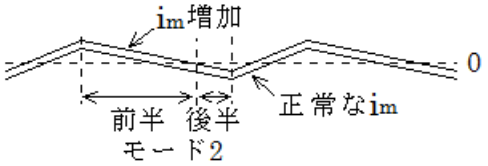


図９　i_m が増加した時の波形

このように、アクティブクランプ方式は 2 つの負帰還機能があるので通常の DC/DC コンバータより動作は複雑です。電源急変があった場合は、クランプ電圧 v_{C2} は新たな安定動作電圧に移行しなければなりませんが、C_2 の容量が大きいと移行に時間がかかり、その間励磁電流 i_m の異常な状態が続きます。早く整定させるために C_2 の容量はなるべく小さくする必要があります。

■参考文献

[1] 平地克也、「リアクトル電流の考え方」、平地研究室技術メモ No.20080207
[2] 平地克也、「昇圧チョッパはなぜ「昇圧」できるのか？」、平地研究室技術メモ No.20080214
[3] 平地克也、「アクティブクランプ方式 1 石フォワード形 DC/DC コンバータ」、平地研究室技術メモ No.20080519
[4] 平地克也、「アクティブクランプ方式のソフトスイッチング成立条件」、平地研究室技術メモ No.20080622
[5] 平地克也、「アクティブクランプ方式の実験とシミュレーション」、平地研究室技術メモ No.20080721
[6] 田中孝明、平地克也、「アクティブクランプ方式 DC/DC コンバータのソフトスイッチング成立条件の検討」、電気学会半導体電力変換研究会資料、SPC09-6, pp.31-36, 2009

以上