

多機能チョッパ回路のご紹介

(読んでほしい人：パワエレ初心者)

2012/8/31 舞鶴高専 平地克也

概要

図1の回路はトランジスタとダイオードが2つずつあるちょっと変わったチョッパ回路ですが、後で詳しく説明するようにいろんなタイプの動作を行うことができます。例えば昇圧チョッパや降圧チョッパと同じ動作を行うことができ、昇降圧チョッパの動作もできます。さらに、同じ昇降圧動作でもいろんなパターンの動作方法があります。この回路には定まった名称がありませんが、いろんなタイプの動作ができるのでここでは多機能チョッパ回路と呼ぶことにします。

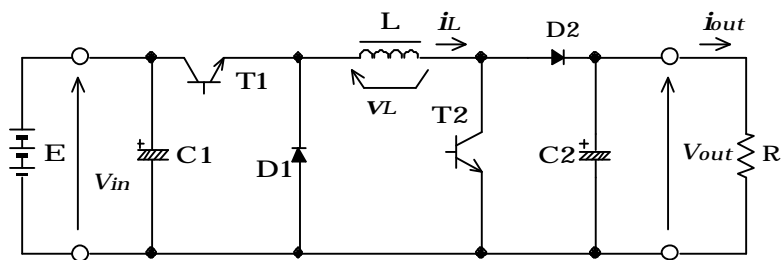


図1 多機能チョッパ回路

昇圧 / 降圧 / 昇降圧動作

降圧動作

図2に多機能チョッパ回路のいろんな動作を示します。(a)は降圧動作です。Q1が高周波でON/OFFし、Q2は常時OFFです。比較のために(b)に通常の降圧チョッパの動作を示します。(a)と(b)は電流経路が全く同じであり、(a)は降圧チョッパとして動作していることが分かります。従って(a)の動作では出力電圧 V_{out} は通常の降圧チョッパと同じく次の式で表されます。

$$V_{out} = V_{in} a$$

は Q_1 の通流率です。

昇圧動作

(c)は昇圧動作です。Q1は常時ON、Q2が高周波でON/OFFします。比較のために(d)に通常の昇圧チョッパの動作を示します。(c)と(d)は電流経路が全く同じであり、(c)は昇圧チョッパとして動作していることが分かります。従って(c)の動作では出力電圧 V_{out} は通常の昇圧チョッパと同じく次の式で表されます。

$$V_{out} = V_{in} \frac{1}{1-a}$$

は Q_2 の通流率です。

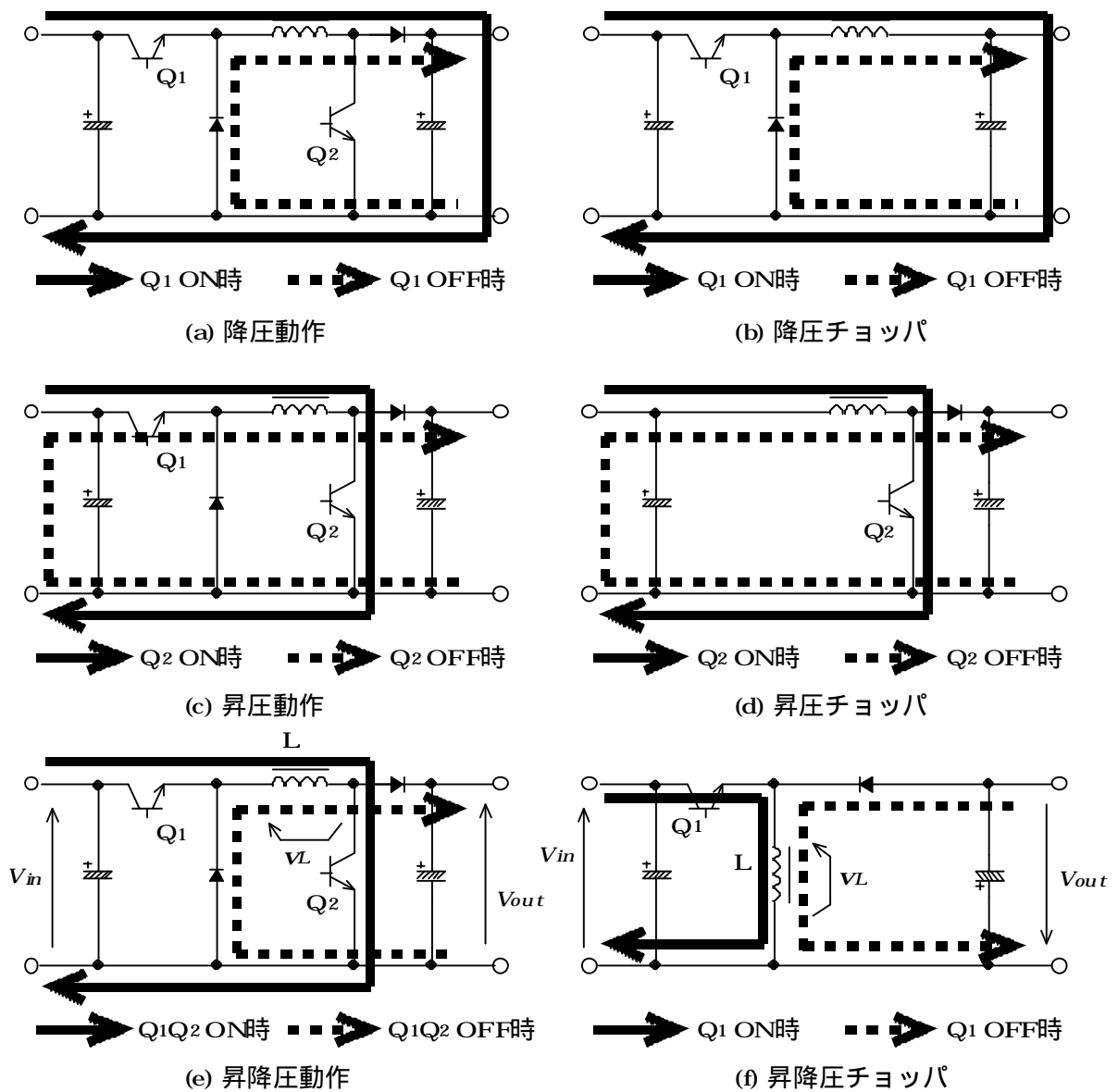


図2 多機能チョッパ回路のいろんな動作（矢印は電流径路）

昇降圧動作

(e)は昇降圧動作です。Q₁とQ₂が同時に高周波でON/OFFします。Q₁とQ₂がONの時は実線の径路で電流が流れ、リアクトルLには入力電圧 V_{in} が印加されます。よって、 $v_L = V_{in}$ 。Q₁とQ₂がOFFの時は点線の径路で電流が流れ、Lには出力電圧 V_{out} が逆方向に印加されます。よって、 $v_L = -V_{out}$ 。

比較のために(d)に通常の昇降圧チョッパの動作を示します。(e)と同様にQ₁がONの時は $v_L = V_{in}$ 、Q₁がOFFの時は $v_L = -V_{out}$ となることが分かります。従って(e)の出力電圧は通常の昇降圧チョッパと同じく次の式で表されます。

$$V_{out} = V_{in} \frac{a}{1-a}$$

は Q_1 と Q_2 の通流率です。

通常の昇降圧チョッパでは(f)にも示しているように出力電圧 V_{out} は入力電圧 V_{in} と逆の極性になります。(e)では図から明かなように V_{out} は V_{in} と同じ極性です。従って、昇圧も降圧もしたいが、出力電圧がマイナスになるのは困る、と言う場合は(e)の動作がよく使われます。そのため、この回路を「非反転昇降圧チョッパ」と呼ぶこともあります。

昇圧降圧混合動作

昇圧降圧混合動作の動作原理

前節では多機能チョッパの基本的な3つの動作を紹介しましたが、他にもいろんな動作をさせることができます。図3は「 Q_1Q_2 共に ON」と「 Q_1 が ON、 Q_2 が OFF」と「 Q_1Q_2 共に OFF」の3つのパターンで ON/OFF させています。「 Q_1Q_2 が ON」と「 Q_1 が ON、 Q_2 が OFF」の2つのパターンに注目すればこれは(c)と同じ昇圧動作です。「 Q_1 が ON、 Q_2 が OFF」と「 Q_1Q_2 共に OFF」の2つのパターンに注目すればこれは(a)と同じ降圧動作です。したがって図3は昇圧動作と降圧動作が混合していると考えられるので昇圧降圧混合動作と呼ぶことにします。

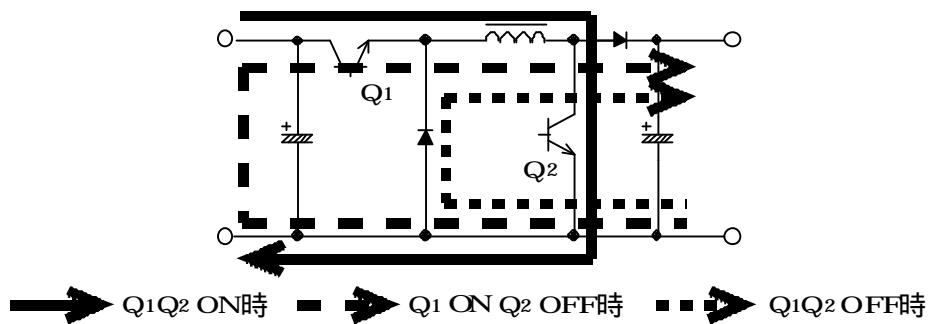


図3 昇圧降圧混合動作

昇圧降圧混合動作の入出力電圧比

図4に Q_1 と Q_2 のタイムチャートを示します。3つのパターンの時間は次のようになります。

T_1 … Q_1Q_2 共に ON

T_2 … Q_1 が ON、 Q_2 が OFF

T_3 … Q_1Q_2 共に OFF

T は 1 周期です。

この動作では Q_1 と Q_2 が別のタイミングで ON/OFF するので2つの通流率を定める必要があります。次のように定義します。

Q_1 の通流率を 即ち、 $= (T_1 + T_2) / T$

Q_2 の通流率を 即ち、 $= T_1 / T$

次のように比例係数 k を定義します。

$k = \frac{Q_2}{Q_1}$ 即ち、 $k = \frac{T_1}{T_1 + T_2}$ なので $0 < k < 1$

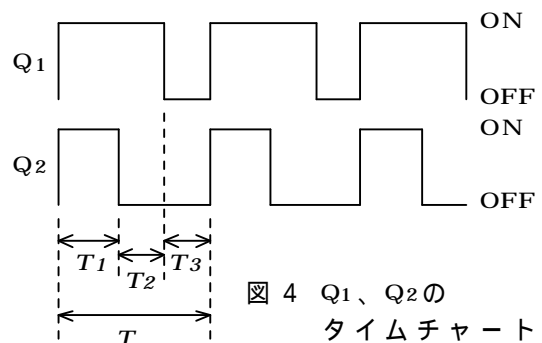


図4 Q_1 、 Q_2 のタイムチャート

よって k は「 Q_1 が ON している時間に占める Q_2 が ON している時間の割合」を示します。 $k=0$ なら $=0$ であり、 Q_2 は常時 OFF、 Q_1 のみ ON/OFF するので、図 2 (a)の降圧動作と同じ動作をしていることを意味します。逆に $k=1$ なら Q_1 と Q_2 が常に同時に ON/OFF していることになるので、これは図 2 (e)の昇降圧動作と同じ動作をしていることを意味します。 $0 < k < 1$ ではさらに図 2 (c)の昇圧動作も加味された動作をします。詳しく計算すれば、出力電圧 V_{out} は a と k を使って次の式で与えられることが分かります。計算方法は文献(1)を参照下さい。

$$V_{out} = V_{in} \frac{a}{1 - ka}$$

昇圧比 V_{out} / V_{in} をグラフに表すと図 5 となります。図 5 から次のことが分かります。

- ・ k を定めることにより昇圧比の最大値(V_{out} / V_{in}) $_{max}$ が決まる。
例えば $k=0.5$ なら (V_{out} / V_{in}) $_{max}=2$ である。
- ・ Q_1 の通流率 a を 0 から 1 まで制御することにより昇圧比を 0 から (V_{out} / V_{in}) $_{max}$ まで制御できる。
例えば、入力電圧 V_{in} が 12V の時、出力電圧 V_{out} を 0V から 24V まで変化させたいなら、 $k=0.5$ とし、 a を 0 から 1 まで変化させれば良いことが分かります。

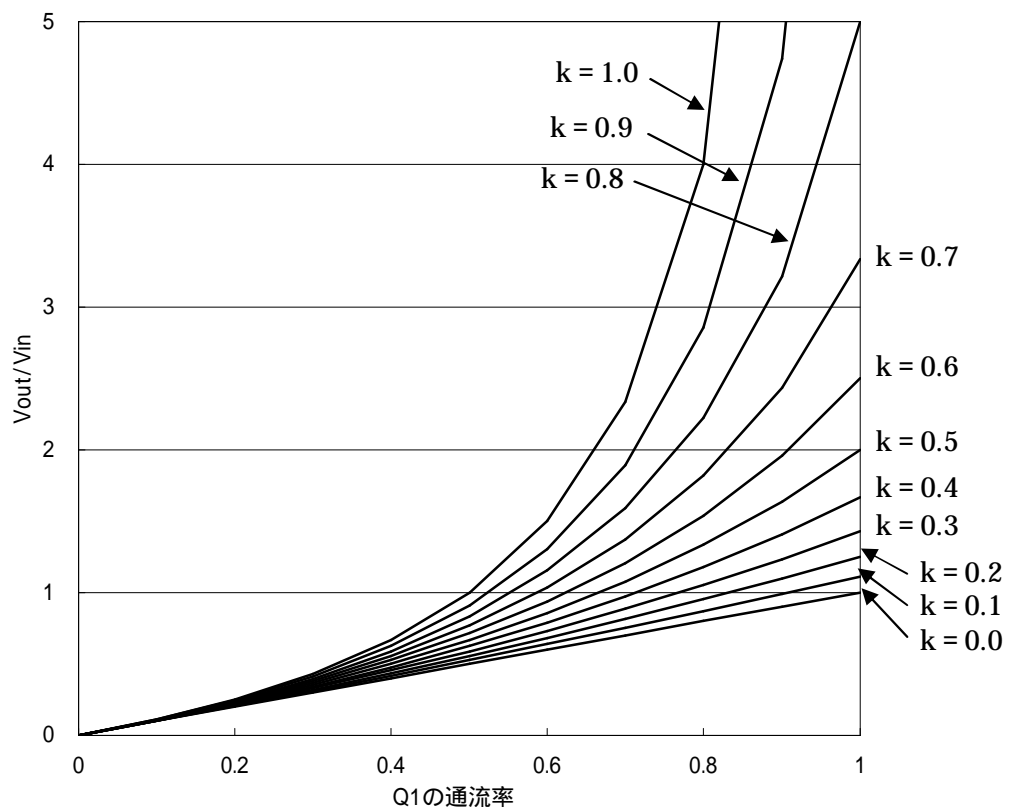


図 5 昇圧降圧混合動作の昇圧比の変化

昇圧降圧混合動作の特長

昇圧降圧混合動作は前記のように k によって昇圧比の上限が定まるのでいわば「上限付き非反転昇降圧チョッパ」と言うことができます。上限が存在することはこの動作の制約条件ではありますが、

実用的には無限大の昇圧が必要という例は希でしょう。多くのアプリケーションでは昇圧比の上限はある有限の値になっており、昇圧降圧混合動作を適用できるでしょう。

昇圧降圧混合動作は図 2 (e) の昇降圧動作と比較するとリアクトル L の電流 i_L の平均値 i_{Lave} と高周波のリプル成分 Δi_L を抑制できるという大きな利点があります。よって、L の銅損と鉄損と磁束密度を減らすことができ L の小形軽量化を実現できます。詳しく計算すれば、例えば最大昇圧比 ($V_{out} / V_{in} max$) が 2 の場合、 i_{Lave} と Δi_L は次の値となることが分かります。

$$\text{昇降圧動作 (図 2 (e))} \quad i_{Lave} = 3I_{out} \quad \Delta i_L = \frac{1}{L} V_{in} \frac{2}{3} T$$

$$\text{昇圧降圧混合動作 (図 3)} \quad i_{Lave} = 2I_{out} \quad \Delta i_L = \frac{1}{L} V_{in} \frac{1}{2} T$$

なお、 V_{in} は入力電圧、 I_{out} は出力電流です (図 1 参照)。 T は動作周期です (図 4 参照)。 計算方法は文献(1)を参照下さい。

昇圧降圧混合動作の制御回路

図 6 に昇圧降圧混合動作を実現するための制御回路の一例を示します。出力電圧 V_{out} を抵抗 R_1 、 R_2 で分圧した値 V_{out}' を目標値電圧 V_{ref} と比較します。 V_{out}' と V_{ref} の誤差を OP1 と R5 で増幅して ver とします。 ver を鋸歯状波 v_T で変調して Q1 の駆動信号とします。このように制御することにより $V_{out}' = V_{ref}$ となるように Q1 が PWM 制御されます。出力電圧 V_{out} は次の式で与えられます。

$$V_{out} = V_{ref} \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

また、 ver は R3 と R4 で分圧されて ver' となり、 ver' を v_T で変調して Q2 の駆動信号とします。その結果 Q2 は Q1 と同時に ON し、Q1 より早く OFF します。よって、Q1、Q2 は図 4 のタイムチャートで ON/OFF されることになり、昇降圧混合動作が実現します。Q1 の ON 時間に対する Q2 の ON 時間の割合 k は R3 と R4 の分圧比で与えられます。

$$k = \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

このように昇圧降圧混合動作は簡単な制御回路で実現することができます。なお、 C_1 は位相補償のために設けます。

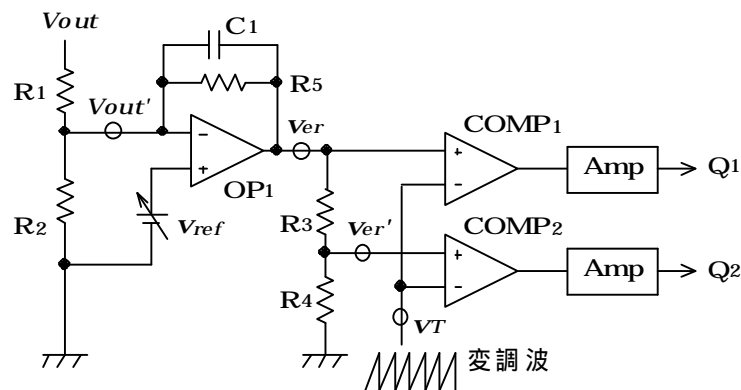


図 6 昇圧降圧混合動作の制御回路の一例

循環モードを付加した動作

Q₁ を OFF、Q₂ を ON とすると L の電流は「L → Q₂ → D₁ → L」の径路で循環します。この動作モードを循環モードと呼ぶことにします。図 2 (e) の昇降圧動作に循環モードを加えると図 7 となります。Q₂ と D₁ の電圧降下を無視すれば循環モードでは L の電圧は 0V なので L の電流は変化しません。この循環モードを加えることによりリアクトル電流 i_L のリップル電流 Δi_L を抑制することができます。そのかわり、 i_L の平均値 i_{Lave} は増加します。例えば、ある動作条件で計算すると i_L は 0.78A から 0.52A に抑制できるのに対し、 i_{Lave} は 2.00A から 2.98A に増加します。計算の詳細は文献(1)を参照下さい。

同様にして降圧動作（図 2 (a)）や昇圧動作（図 2 (c)）でも循環モードを加えることができます。いずれの場合も i_L は抑制できますが、 i_{Lave} は増加します。 i_L を抑制できるので鉄損は減少しますが、 i_{Lave} が増加するので銅損は増加し、磁束密度も増加します。したがって、通常の用途では循環モードを加えてもあまり得にはならないでしょう。しかしながら、何か特殊な用途では循環モードが威力を発揮することがあるかもしれません。循環モードはとりあえずは引き出しにしておくことにしましょう。

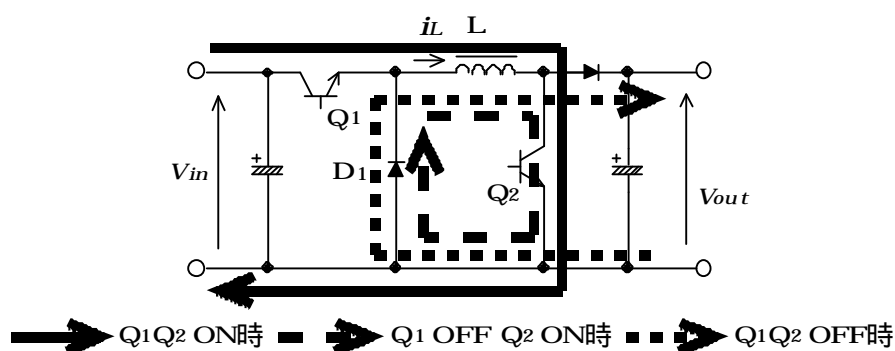


図 7 循環モード付き昇降圧動作

< 備考 >

文献(1)では本技術メモのさらに詳しい内容が紹介されていますので参照下さい。文献(2)では昇降圧動作（図 2 (e)）と昇圧降圧混合動作（図 3）の電力損失計算式が紹介されています。なお、本技術メモは 2010 年度平地研究室専攻科卒業生高見親法の研究成果の概要を分かり易くまとめたものです。

< 参考文献 >

- (1) 高見親法、平地克也、三島智和、「降圧チョッパ/昇圧チョッパ縦続接続方式の全動作モードの検討」、2011 年度パワーエレクトロニクス学会誌、Vol.37, pp.89-96
- (2) 茂木進一、西田保幸、「各種 DC-DC コンバータにおけるスイッチング損失の比較」、2011 年度パワーエレクトロニクス学会誌、Vol.37, pp.203-209

以上