

リアクトル電流逆流動作によるチョッパ回路のソフトスイッチング

(読んでほしい人：パワエレ初心者)

2016/5/1 舞鶴高専 平地克也

チョッパ回路(図1)は様々な種類の電気製品で広範囲に使用されており、ソフトスイッチングへの要求も強く、昔から非常に沢山のソフトスイッチングの回路方式が提案されています。図2に一つの例を示します。図1(b)の昇圧チョッパに対して $Q_2Q_3D_2D_3L_2C_4$ の部品を追加してソフトスイッチングを実現しています^[1]。この回路で確かにソフトスイッチングは実現できますが、これだけ沢山の部品を追加したのではあまり実用的とは言えません。これまでに提案された多数の回路方式のほとんどは図2と同様にあまり実用的とは言えず、ほとんどの製品ではいままの図1のハードスイッチング方式が使用されています。

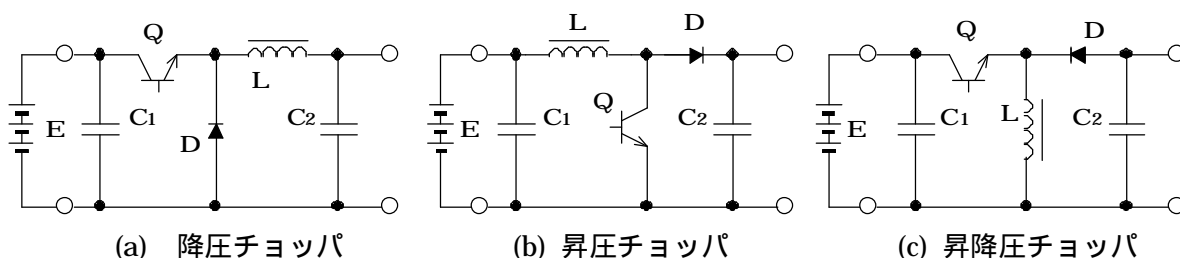


図1 チョッパ回路

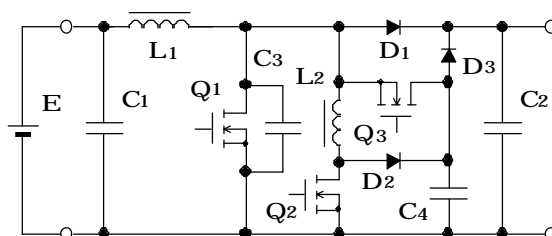


図2 ソフトスイッチング方式チョッパ回路の例

チョッパ回路でソフトスイッチングの実用化が進まない理由の一つは図2のように部品点数が増加することです。そこで、本技術メモでは追加部品なしでチョッパ回路のソフトスイッチングを実現する方法を紹介します。

リアクトル電流逆流動作

図3にチョッパ回路のリアクトル電流波形を示します。通常のチョッパ回路では(a)のように直流電流に三角波のリプル成分が重畳された波形となっています。(b)に三角波のリプル成分を大きくして一部の区間で負の値となり逆流している電流波形を示します。リアクトル電流がこのように逆流区間を含む波形となるように制御すると容易にソフトスイッチングを実現することができます。ただしチョッパ回路の出力電流はリアクトル電流の平均値に比例するので、(b)の波形では(a)の波形に比べてリアクトル電流のピーク値は約2倍になります。

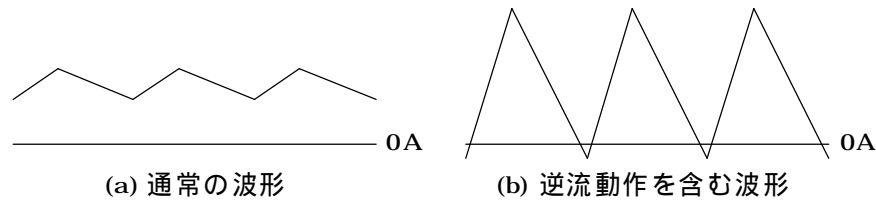


図3 チョッパ回路のリアクトル電流波形

リアクトル電流逆流動作を用いたソフトスイッチング方式降圧チョッパ

リアクトル電流 i_L が図3 (b)のような逆流区間を含む波形となる降圧チョッパ回路を図4に示します。図1 (a)の通常の降圧チョッパに対してダイオード D を FET Q_2 に置き換えた回路となっています。通常の同期整流型降圧チョッパと同じ回路です。この回路で平滑リアクトル L_1 のインダクタンスを小さな値とすれば i_L は図3 (b)の波形となります。なお、 D_1D_2 は Q_1Q_2 の寄生ダイオード、 C_1C_2 は Q_1Q_2 の寄生容量またはスナバコンデンサです。

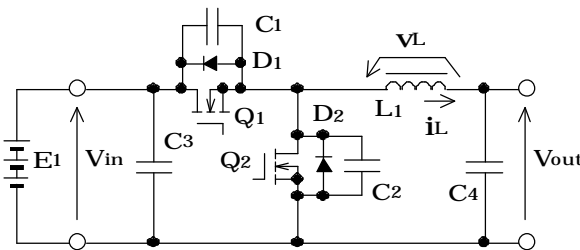


図4 リアクトル電流逆流動作を用いたソフトスイッチング方式降圧チョッパ

図5にこの回路の各動作モードの電流径路を示します。図6にリアクトル L_1 の電圧 v_L 、電流 i_L の波形を示します。以下、各動作モードを詳しく説明します。

Mode 1 (電力供給モード)

Q_1 が ON して V_{in} から V_{out} に電力を供給しています。

$v_L = V_{in} - V_{out} > 0$ なので i_L は増加します。

Q_1 がターン OFF して次の Mode に移行します。

Mode 2 (スナバコンデンサ充放電モード)

Q_1 がターン OFF しても i_L は同じ大きさに流れ続けます。

i_L は図5のように 1/2 づつ 2 つに分流して片方で C_1 を充電し、片方で C_2 を放電します。

C_1 の容量が適切なら Q_1 のターン OFF は ZVS となります。

C_1C_2 の充放電が完了して次の Mode に移行します。

Mode 3 (還流モード)

C_2 の放電が完了したので D_2 が導通します。

この動作モードの間に Q_2 を ZVS でターン ON させます。

$v_L = -V_{out} < 0$ なので i_L は減少します。

やがて i_L は負の値となり次の Mode に移行します。

Mode 4 (逆流モード)

i_L が負の状態です。この状態の存在がこの回路方式の特徴でありソフトスイッチング実現の鍵となります。

Q_2 がターン OFF して次の Mode に移行します。

Mode 5 (スナバコンデンサ充放電モード)

Q_2 がターン OFF しても i_L は同じ大きさで流れ続けます。

i_L は図のように 1/2 づつ 2 つに分流して片方で C_1 を放電し、片方で C_2 を充電します。

C_2 の容量が適切なら Q_2 のターン OFF は ZVS となります。

C_1C_2 の充放電が完了して次の Mode に移行します。

Mode 6 (回生モード)

C_1 の放電が完了したので D_1 が導通します。

この動作モードの間に Q_1 を ZVS でターン ON させます。

$$v_L = V_{in} - V_{out} > 0 \quad \text{なので } i_L \text{ は増加します。}$$

やがて i_L は正の値となり Mode 1 に戻ります。

この回路方式の特徴は i_L が負の状態 (Mode 4 の状態) を作り、リアクトル L_1 のエネルギーで C_1C_2 を充放電する (Mode 5) ことです。したがって Mode 4 で L_1 には C_1C_2 を充放電するために必要なエネルギーを蓄積する必要があります。この条件から i_L の負のピーク値が決まります。

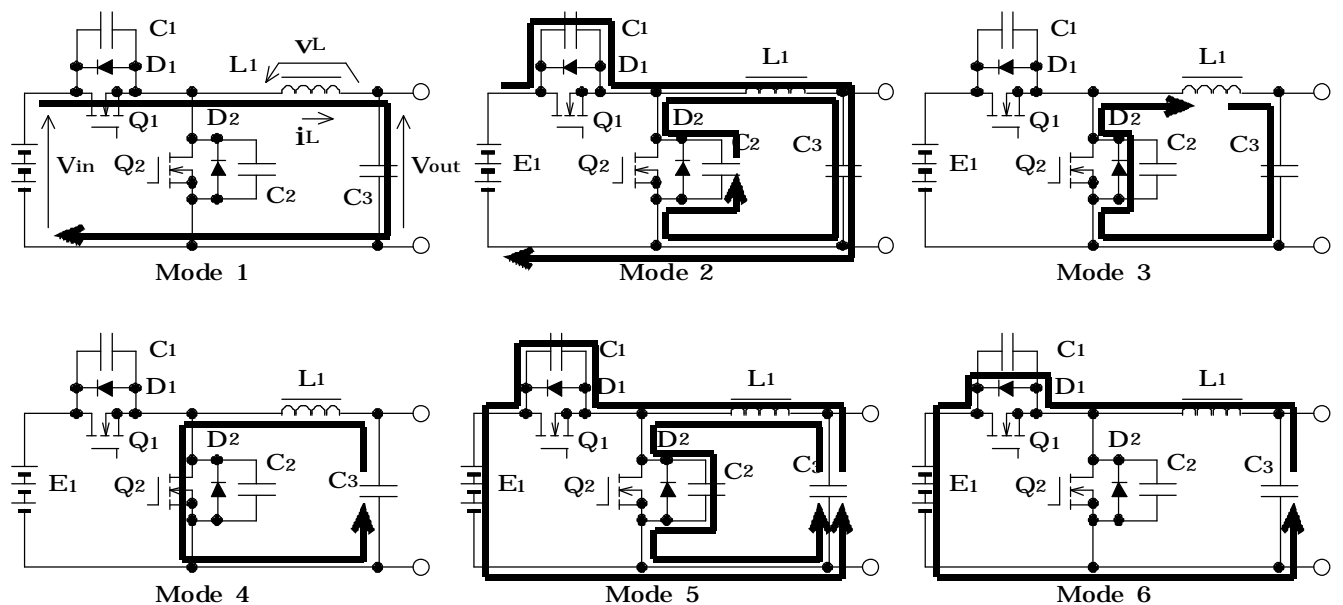


図5 ソフトスイッチング方式降圧チョップの電流経路

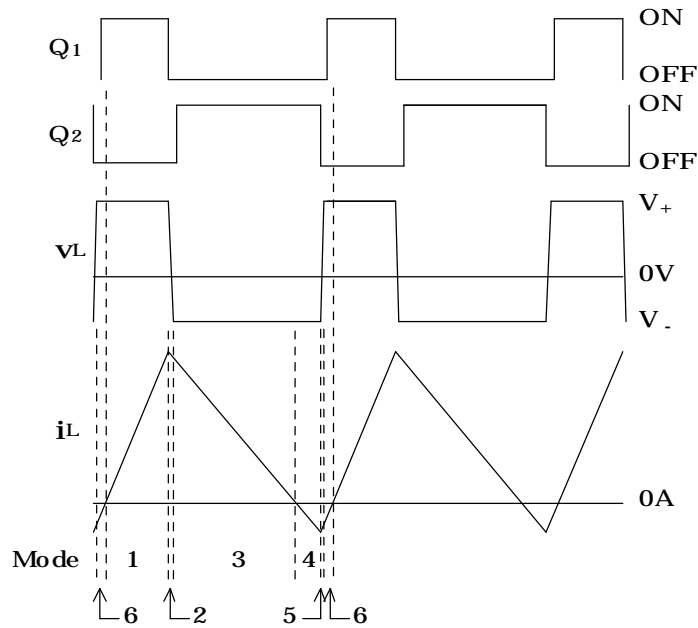


図6 リアクトルの電圧電流波形

表1 リアクトル電圧 v_L の正負のピーク値 V_+ と V_-

	V_+	V_-
降圧チョッパ	$V_{in} - V_{out}$	$-V_{out}$
昇圧チョッパ	V_{in}	$V_{in} - V_{out}$
昇降圧チョッパ	V_{in}	$-V_{out}$

リアクトル電流逆流動作を用いたソフトスイッチング方式昇圧チョッパ

降圧チョッパと同様にリアクトル電流 i_L に逆流区間を設ければ昇圧チョッパもソフトスイッチング動作が可能です。この動作を実現するための回路を図7に示します。図1(b)の通常の昇圧チョッパに対してダイオードDをFET Q_2 に置き換えた回路となっています。降圧チョッパと同様にリアクトル L_1 のインダクタンスを小さな値とすれば i_L は逆流動作を含む図3(b)の波形となります。 D_1D_2 は Q_1Q_2 の寄生ダイオード、 C_1C_2 は Q_1Q_2 の寄生容量またはスナバコンデンサです。

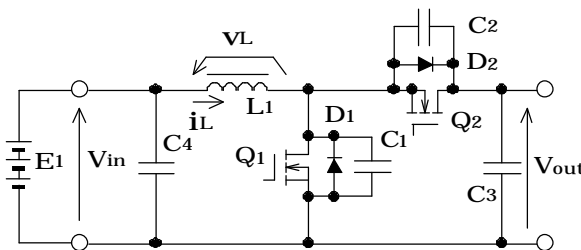


図7 リアクトル電流逆流動作を用いたソフトスイッチング方式昇圧チョッパ

図8にこの回路の各動作モードの電流径路を示します。以下、各動作モードを説明します。

Mode 1 (蓄積モード)

Q₁ が ON して L₁ にエネルギーを蓄積します。

$v_L = V_{in} > 0$ なので i_L は増加します。

Q₁ がターン OFF して次の Mode に移行します。

Mode 2 (スナバコンデンサ充放電モード)

Q₁ がターン OFF しても i_L は同じ大きさを流れ続けます。

i_L は図のように 1/2 づつ 2 つに分流して片方で C₁ を充電し、片方で C₂ を放電します。

C₁ の容量が適切なら Q₁ のターン OFF は ZVS となります。

C₁C₂ の充放電が完了して次の Mode に移行します。

Mode 3 (伝達モード)

C₂ の放電が完了したので D₂ が導通します。

この動作モードの間に Q₂ を ZVS でターン ON させます。

L₁ のエネルギーが出力側に伝達されます。

$v_L = V_{in} - V_{out} < 0$ なので i_L は減少します。

やがて i_L は負の値となり次の Mode に移行します。

Mode 4 (逆流モード)

i_L が負の状態です。降圧チョッパと同様にこの状態の存在がこの回路方式の特徴でありソフトスイッチング実現の鍵となります。

Q₂ がターン OFF して次の Mode に移行します。

Mode 5 (スナバコンデンサ充放電モード)

Q₂ がターン OFF しても i_L は同じ大きさを流れ続けます。

i_L は図のように 1/2 づつ 2 つに分流して片方で C₁ を放電し、片方で C₂ を充電します。

C₂ の容量が適切なら Q₂ のターン OFF は ZVS となります。

C₁C₂ の充放電が完了して次の Mode に移行します。

Mode 6 (回生モード)

C₁ の放電が完了したので D₁ が導通します。

この動作モードの間に Q₁ を ZVS でターン ON させます。

$v_L = V_{in} > 0$ なので i_L は増加します。

やがて i_L は正の値となり Mode 1 に戻ります。

以上のようにソフトスイッチングの原理は降圧チョッパと同じです。Mode 4 で L₁ には C₁C₂ を充放電するために必要なエネルギーを蓄積する必要があります。この条件から i_L の負のピーク値が決まります。リアクトルの電圧電流波形も降圧チョッパと同じく図 6 の通りです。ただしリアクトル電圧 v_L の波形は正負のピーク値 V_+ と V_- の大きさが降圧チョッパとは異なります。表 1 を参照下さい。

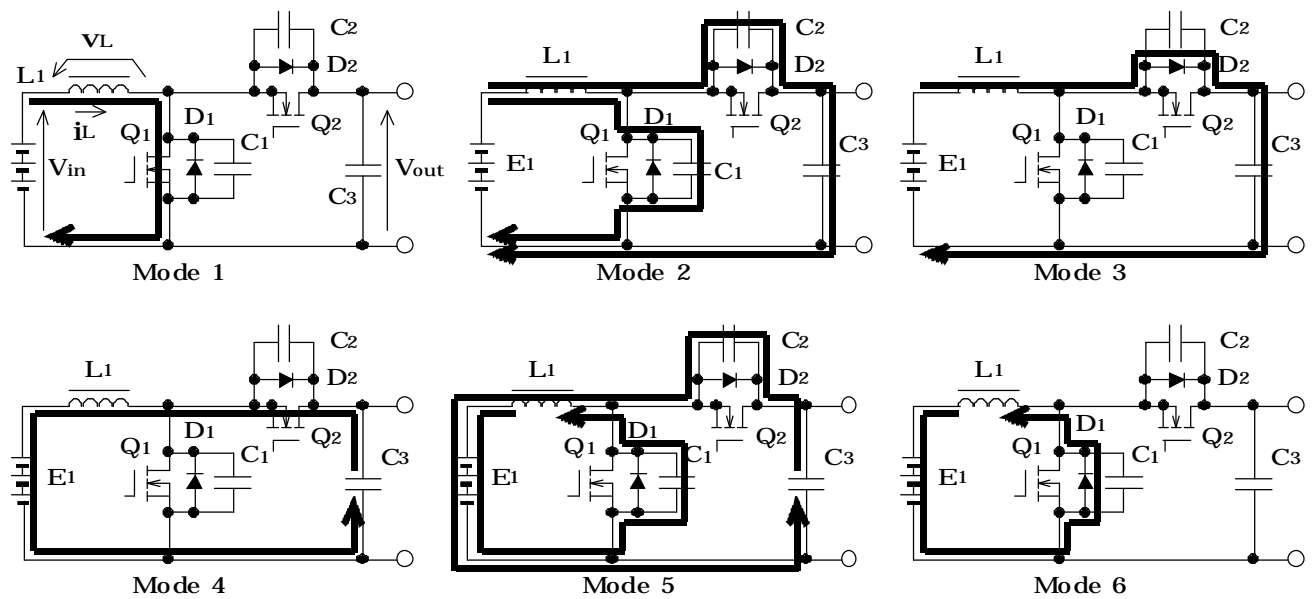


図 8 ソフトスイッチング方式昇圧チョッパの電流経路

リアクトル電流逆流動作を用いたソフトスイッチング方式昇降圧チョッパ

降圧チョッパ・昇圧チョッパと同様にリアクトル電流 i_L に逆流区間を設ければ昇降圧チョッパもソフトスイッチング動作が可能です。この動作を実現するための回路を図 9 に示します。図 1 (c) の通常の昇降圧チョッパに対してダイオード D を FET Q_2 に置き換えた回路となっています。リアクトル L_1 のインダクタンスを小さく設計すれば i_L は逆流動作を含んだ図 3 (b) の波形となります。 $D_1 D_2$ は $Q_1 Q_2$ の寄生ダイオード、 $C_1 C_2$ は $Q_1 Q_2$ の寄生容量またはスナバコンデンサです。

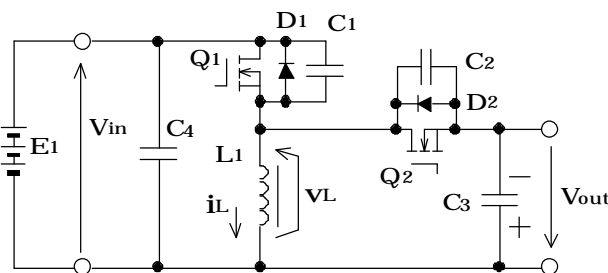


図 9 リアクトル電流逆流動作を用いたソフトスイッチング方式昇降圧チョッパ

図 10 にこの回路の各動作モードの電流経路を示します。以下、各動作モードを説明しますが内容は昇圧チョッパとほとんど同じです。相違点は Mode 3 の v_L の値だけです。

Mode 1 (蓄積モード)

Q_1 が ON して L_1 にエネルギーを蓄積します。

$v_L = V_{in} > 0$ なので i_L は増加します。

Q_1 がターン OFF して次の Mode に移行します。

Mode 2 (スナバコンデンサ充放電モード)

Q₁ がターン OFF しても i_L は同じ大きさを流れ続けます。

i_L は図のように 1/2 づつ 2 つに分流して片方で C₁ を充電し、片方で C₂ を放電します。

C₁ の容量が適切なら Q₁ のターン OFF は ZVS となります。

C₁C₂ の充放電が完了して次の Mode に移行します。

Mode 3 (伝達モード)

C₂ の放電が完了したので D₂ が導通します。

この動作モードの間に Q₂ を ZVS でターン ON させます。

L₁ のエネルギーが出力側に伝達されます。

$v_L = -V_{out} < 0$ なので i_L は減少します。

やがて i_L は負の値となり次の Mode に移行します。

Mode 4 (逆流モード)

i_L が負の状態です。降圧チョッパや昇圧チョッパと同様にこの状態の存在がこの回路方式の特徴でありソフトスイッチング実現の鍵となります。

Q₂ がターン OFF して次の Mode に移行します。

Mode 5 (スナバコンデンサ充放電モード)

Q₂ がターン OFF しても i_L は同じ大きさを流れ続けます。

i_L は図のように 1/2 づつ 2 つに分流して片方で C₁ を放電し、片方で C₂ を充電します。

C₂ の容量が適切なら Q₂ のターン OFF は ZVS となります。

C₁C₂ の充放電が完了して次の Mode に移行します。

Mode 6 (回生モード)

C₁ の放電が完了したので D₁ が導通します。

この動作モードの間に Q₁ を ZVS でターン ON させます。

$v_L = V_{in} > 0$ なので i_L は増加します。

やがて i_L は正の値となり Mode 1 に戻ります。

降圧チョッパ・昇圧チョッパと同様に Mode 4 で L₁ には C₁C₂ を充放電するために必要なエネルギーを蓄積する必要があります。この条件から i_L の負のピーク値が決まります。リアクトルの電圧電流波形も降圧チョッパ・昇圧チョッパと同じく図 6 の通りです。ただし、V₊ と V₋ の値は表 1 のように回路によって異なります。

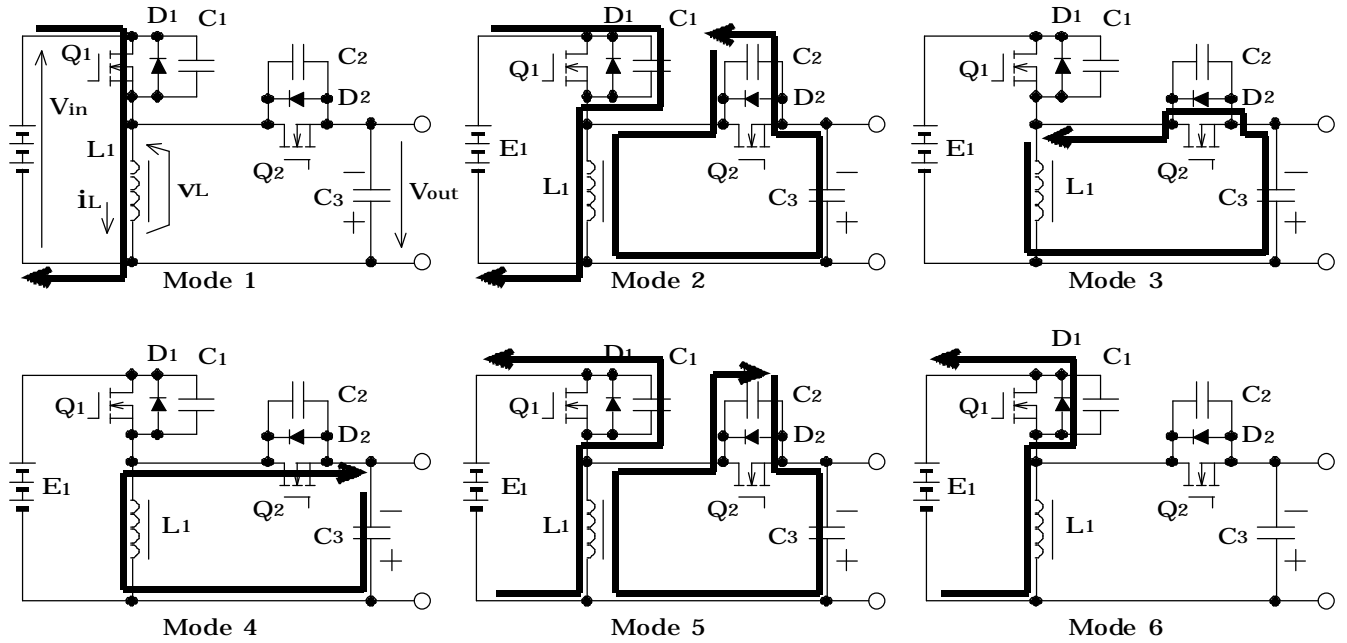


図 10 ソフトスイッチング方式昇降圧チョップパの電流経路

この方式の実用性

以上のように「リアクトル電流逆流動作」を用いたチョップパ回路は簡単な回路構成でソフトスイッチングを実現できるのでこれまでに数多く提案されてきた部品点数の多いソフトスイッチング方式チョップパ回路とは異なり、実用的価値が高いと言えます。ただし、この方式には大きな欠点が 2 つあります。1 つは図 3 の説明で示したようにリアクトル電流のピーク値が通常のチョップパ回路の約 2 倍になると言うことです。スイッチ素子 Q_1Q_2 にもリアクトル電流と同じ電流が流れるのでそのピーク電流も 2 倍になります。したがって容量の大きなチョップパ回路での実用化は難しいでしょう。小容量でかつ ON 抵抗の小さい低耐圧の FET が使用できる低電圧の分野では適切な回路方式と言えるでしょう。

もう一つの大きな欠点は軽負荷時の損失が大きいことです。図 3 にチョップパ回路のリアクトル電流 i_L の波形を示しましたが、軽負荷時の波形を追記した図を下記に示します。チョップパ回路の出力電流はリアクトル電流の平均値に比例するので軽負荷時の i_L は平均値は低下しますが、リップル成分は変化しません。したがって本回路方式では軽負荷時は必要以上に大きな負方向の電流が流れ、導通損失が大きくなります。

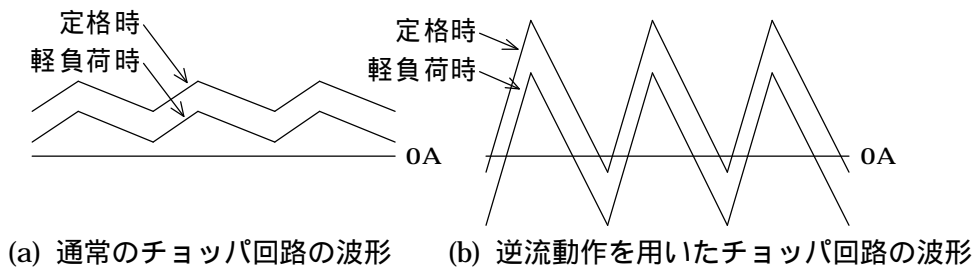


図 11 軽負荷時のリアクトル電流 i_L の波形

本回路方式の以上のような特徴を考えると、本回路方式は小容量で負荷変動の少ない用途に向いていると考えられます。そのような用途の 1 つの例が LED 照明です。平地研究室技術メモ No. 20150324「LED 照明用高効率コンバータ」で具体的な例を紹介しているので参照下さい。小容量で負荷変動の少ない用途は他にも沢山あるので、今後本回路方式の実用化が広がる可能性があります。

双方向 DC/DC コンバータへの応用

図 4 に示したソフトスイッチング方式降圧チョッパの Vout 部分に電圧源 E2 を接続すると図 1 2 となります。図 1 2 は実は平地研究室技術メモ No.20140104「電圧型 + 電流型双方向 DC/DC コンバータ」の図 1「昇圧チョッパ + 降圧チョッパ方式双方向 DC/DC コンバータ」と全く同じものです。E1 を入力、E2 を出力とすれば図 1 2 は降圧チョッパですが、E2 を入力、E1 を出力とすれば図 1 2 は昇圧チョッパとなります。つまり、昇圧チョッパ + 降圧チョッパ方式双方向 DC/DC コンバータは回路はそのままリアクトルのインダクタンスを小さくするだけでソフトスイッチング動作を実現することができます。昇圧チョッパ + 降圧チョッパ方式に限らず、全ての電圧型 + 電流型双方向 DC/DC コンバータは回路構成を変更することなくリアクトル電流逆流動作によるソフトスイッチングを実現することができます。

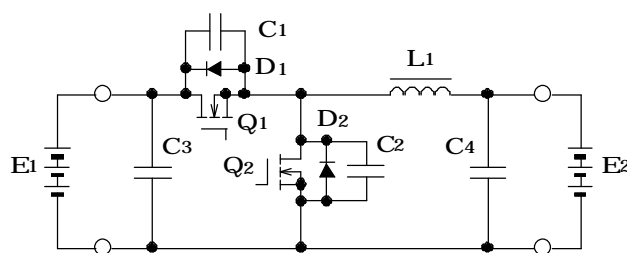


図 1 2 双方向 DC/DC コンバータ

参考文献

- [1] 吉川隆之、谷口勝則、平地克也、蒲新太郎、「高効率部分共振 PWM コンバータ」, 電気学会産業応用部門大会, pp.239-244 (1993)

以上