

## 2石フォワード型 DC/DC コンバータの基本動作

(読んでほしい人：パワーエレクトロニクス技術者)

2016/10/12 舞鶴高専 平地克也

2石フォワード型 DC/DC コンバータ(図1)は同じフォワード型である1石フォワード型とおおむね同様の動作を行います。しかしながら「ソフトさ」においては1石フォワード型とは大きな差があり、2石フォワード型の方が格段に優れていることを平地研究室技術メモ No.20160131、「DC/DC コンバータの評価指標“ソフトさ”の提案」で説明しました。本技術メモでは2石フォワード型の基本動作を詳しく説明します。1石フォワード型と共通点が多いので、できれば1石フォワード型について説明している次の技術メモも併せて見てください。

No.20061124、「フォワード型1石式 DC/DC コンバータの動作」

No.20061125、「フォワード型 DC/DC コンバータの励磁電流について」

No.20061224、「フォワード型 DC/DC コンバータの励磁電流について(その2)」

No.20061230、「フォワード型 DC/DC コンバータの負方向の励磁電流」

No.20070106、「フォワード型 DC/DC コンバータの2次側を流れる励磁電流」

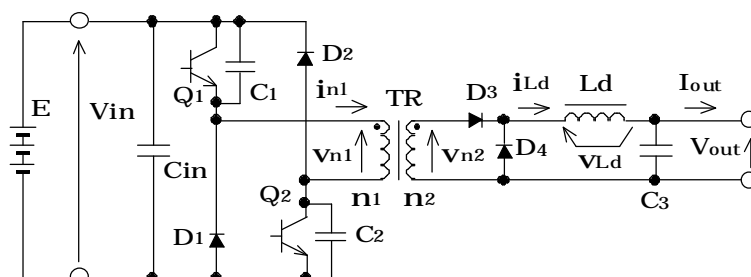


図1 2石フォワード型 DC/DC コンバータ (C1C2は Q1Q2の寄生容量)

### 各動作モードの電流経路と波形

2石フォワード型 DC/DC コンバータ(図1)の動作モードと電流経路を図2に示します。主要電圧電流波形を図3に示します。なお、C1C2はスイッチ素子 Q1Q2の寄生容量ですが、スナバを使用している場合は寄生容量とスナバコンデンサ容量の合計です。T1T2T3T4はそれぞれモード1234の継続時間です。以下に図2図3を用いて各動作モードの概要を説明します。

#### <モード1>

Q1とQ2がオンしており、n1巻線には入力電圧 Vin が印加されている。よって、励磁電流 im はモード1の期間に次の式で与えられる im 増加する。Ton は Q1 の ON 時間であり、モード1の継続時間 T1 に等しい。Lm は励磁インダクタンスである。

$$i_m = \frac{1}{L_m} v_{n1} T_{on} = \frac{1}{L_m} V_{in} T_{on}$$

2次巻線 n2 には  $V_{in} \frac{n_2}{n_1}$  の電圧が生じ、ダイオード D2 が導通し、2次側に電力が供給される。

平滑リアクトル  $L_d$  の電流  $i_{Ld}$  はモード 1 の期間に次の式で与えられる  $i_{Ld}$  増加する。

$$i_{Ld} = \frac{1}{L_d} v_{Ld} T_{on} = \frac{1}{L_d} (V_{in} \frac{n_2}{n_1} - V_{out}) T_{on} \quad \dots (1)$$

次の式が成立する。

$$i_{D3} = i_{Ld}$$

$$i_{Q1} = i_{Q2} = i_{n1} = \frac{n_2}{n_1} i_{Ld} + i_m$$

なお、 $i_m$  は  $i_{Ld}$  と比較するとかなり小さいが図 3 では  $i_m$  の変化をわかりやすくするために  $i_m$  を拡大して描画している。

$Q_1$  と  $Q_2$  がターンオフしてモード 2 に移行する。

<モード 2>

$Q_1$  と  $Q_2$  はオフ状態であるが、励磁電流は流れ続けねばならない。そこで図 2 のように  $D_1$  と  $D_2$  が導通して励磁電流は電源  $E$  に回生される。 $n_1$  巻線には入力電圧  $V_{in}$  が逆方向に印加されるので励磁電流は減少し、やがて 0A となりモード 3 に移行する。モード 2 の励磁電流の変化  $i_m$  は次の式で与えられる。

$$i_m = \frac{1}{L_m} v_{n1} T_2 = \frac{1}{L_m} (-V_{in}) T_2$$

平滑リアクトル  $L_d$  の電流は  $D_4$  を通って還流する。 $L_d$  には出力電圧  $V_{out}$  が逆方向に引加されるのでモード 2 での  $i_{Ld}$  の変化  $i_{Ld}$  は次の式で与えられる。

$$i_{Ld} = \frac{1}{L_d} v_{Ld} T_2 = \frac{1}{L_d} (-V_{out}) T_2 \quad \dots (2)$$

次の式が成立する。

$$i_{D1} = i_{D2} = i_{n1} = i_m$$

$$i_{D4} = i_{Ld}$$

<モード 3>

モード 2 では  $C_1$  と  $C_2$  は共に  $V_{in}$  に充電されている。したがってモード 3 では図 2 に示すように  $C_1$  と  $C_2$  が直列となって  $2V_{in}$  の電源となり、 $n_1$  巻線  $v_{n1}$  には  $V_{in}$  が負方向に印加され、励磁電流が図 2 のように負方向（下から上）に流れ、徐々に増加する。 $C_1$  電圧  $v_{c1}$  と  $C_2$  電圧  $v_{c2}$  が  $\frac{1}{2} V_{in}$  まで放電すると  $v_{c1} + v_{c2} = V_{in}$  となり  $v_{n1}$  は 0V となる。 $C_1 C_2$  がさらに放電すると  $n_1 n_2$  巻線電圧  $v_{n1}$  は正となり  $v_{n2}$  も正となるので  $D_3$  が順バイアスされて導通し、励磁電流は  $n_1$  巻線から  $n_2$  巻線に転流してモード 4 に移行する。

よって、このモードは  $C_1 C_2$  と励磁インダクタンス  $L_m$  の共振であり、 $v_{c1}$  と  $v_{c2}$  の初期値は  $V_{in}$  最終値は  $\frac{1}{2} V_{in}$  である。 $i_m$  の初期値は 0A である。したがって次の式が成立する。なお、モード 3 の開始を  $t=0$  としている。モード 3 の終了は  $t=T_3$  である。

$$i_m(t) = \frac{1}{L_m} \int_0^t v_{n1}(t) dt = \frac{1}{L_m} \int_0^t (V_{in} - v_{C1}(t) - v_{C2}(t)) dt = \frac{1}{L_m} \int_0^t (V_{in} - 2v_c(t)) dt$$

$$v_c(t) = V_{in} - \frac{1}{C} \int_0^t i_m(t) dt$$

$$v_c(T_3) = V_{in} - \frac{1}{C} \int_0^{T_3} i_m(t) dt = \frac{1}{2} V_{in}$$

なお、 $v_{C1}(t) = v_{C2}(t) = v_c(t)$ としている。

これらの式を解けばモード3の継続時間  $T_3$  およびモード3における励磁電流と  $C_1C_2$  電圧の変化を表す式を導出できる。

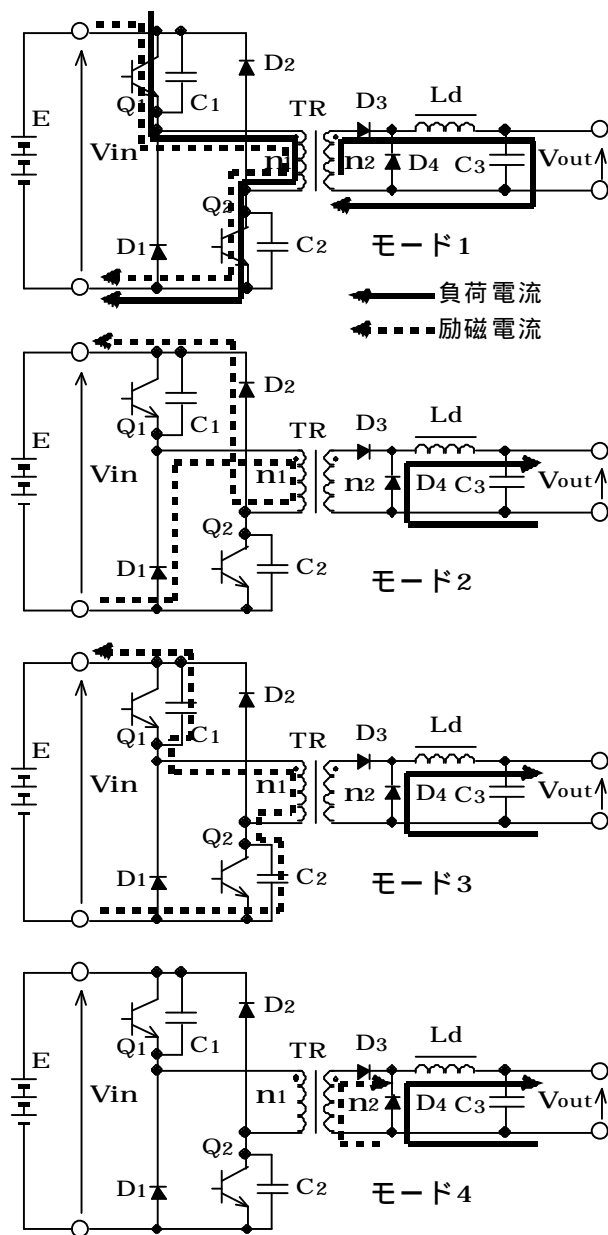


図2 動作モードと電流経路

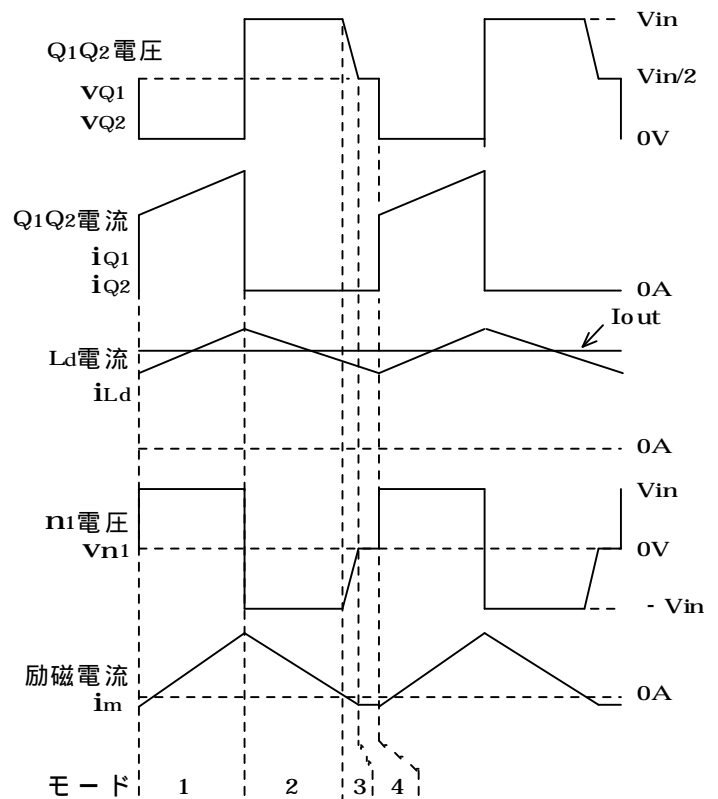


図3 主要電圧電流波形  
(励磁電流は拡大して描画している)

#### <モード4>

励磁電流は  $n_2$  巻線を流れている。C1C2の放電はモード3で完了しているので図3に示したようにモード4では  $Q_1Q_2$  の電圧は一定である。D3とD4が共に導通しているので  $v_{n2} = v_{n1} = 0$  であり、励磁電流は変化しない。モード4の  $n_2$  巻線を通る励磁電流を  $I_{m4}$  とし、モード3終了時点の  $n_1$  巻線を通る励磁電流を  $i_m(T_3)$  とすると次の式が成立する。

$$I_{m4} = i_m(T_3) \frac{n_1}{n_2}$$

この状態で  $Q_1$  と  $Q_2$  がターンオンしてモード1に移行する。

#### 出力電圧計算式の導出

モード1での平滑リアクトル電流  $i_{Ld}$  の増加  $i_{Ld}$  は(1)式で与えられます。モード2では  $i_{Ld}$  は減少し、減少値  $i_{Ld}$  は(2)式で与えられます。モード3、モード4でもモード2と同様に減少するので減少値の合計は次の式で与えられます。

$$i_{Ld} = \frac{1}{L_d} (-V_{out})(T_2 + T_3 + T_4)$$

増加と減少は均衡しているので

$$\frac{1}{L_d} (V_{in} \frac{n_2}{n_1} - V_{out})T_{on} + \frac{1}{L_d} (-V_{out})(T_2 + T_3 + T_4) = 0$$

1周期を  $T$ 、 $T_{on} = T$  とすると、

$$\frac{1}{L_d} (V_{in} \frac{n_2}{n_1} - V_{out})T + \frac{1}{L_d} (-V_{out})T(1 - \quad) = 0$$

$$(V_{in} \frac{n_2}{n_1} - V_{out}) + (-V_{out})(1 - \quad) = 0$$

よって、 $V_{out} = \frac{n_2}{n_1} V_{in}$  ……これは1石フォワード型と同じ式です。

#### 1石フォワード型との基本動作の相違点と共通点

1石フォワードは巻き上げコイルなどで変圧器リセット時の励磁電流の経路を確保しているのに対し、2石フォワードでは  $D_1D_2$  により励磁電流の経路を確保しています。そのためリセット時(モード2)のスイッチ素子印加電圧は入力電圧  $V_{in}$  でクランプされるので耐圧の低いスイッチ素子を使用できます。

変圧器の漏れインダクタンスによるサージ電圧の発生に1石と2石で大差があることは技術メモ No.20160131 で説明した通りです。

上記2項目以外の動作はおおむね1石と同じです。動作モードが4つあること、モード3で励磁電流が2次側に転流すること、出力電圧の計算式、などすべて1石と2石で共通です。変圧器のBH曲線は図4のようになり、大部分が第1象限に存在しますが、励磁電流が負となるモード3と4では3象限に移動します。これも1石と2石で共通です。

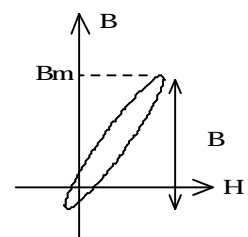


図4 BH曲線

以上