

ハーフブリッジ形 DC/DC コンバータの動作原理と偏磁抑制メカニズム

(読んでほしい人：パワエレ初心者)

2013/2/4 舞鶴高専 平地克也

平地研究室技術メモ No.20111101 「DC/DC コンバータの偏磁現象の基本」(文献[1])において、フルブリッジ型やプッシュプル型の DC/DC コンバータでは偏磁現象が発生しやすいが、ハーフブリッジ型では偏磁現象が発生しにくいことを説明しました。今回の技術メモではハーフブリッジ形に備わっている偏磁現象を抑制するメカニズムを説明します。

ハーフブリッジ形 DC/DC コンバータの動作原理

まず、ハーフブリッジ型 DC/DC コンバータの基本的な動作原理を説明します。図 1 に回路構成を示します。L_m は高周波変圧器 TR₁ の励磁インダクタンス、i_m は励磁電流です。スイッチ素子は Q₁ と Q₂ の 2 つがあり、それぞれの ON/OFF に応じて 4 つの動作モードがあります。図 2 に 4 つの動作モードと回路各部の理論波形を示します。図 3 に各動作モードにおける電流経路を示します。電流経路は負荷電流と励磁電流の 2 つに分けて示しています。以下、各動作モードを説明します。

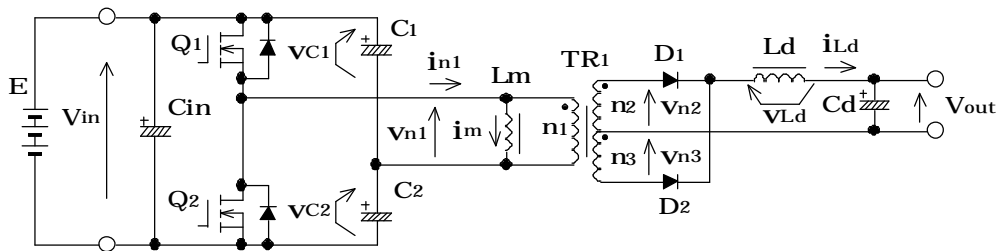


図 1 ハーフブリッジ形 DC/DC コンバータ

< Mode 1 : Q₁ が ON、Q₂ が OFF >

Q₁ が ON しているため図 3 に示すように負荷電流が Q₁ - n₁ - C₂ の経路で流れて C₂ が充電されます。同時に、C₁ - Q₁ - n₁ - C₁ の経路でも負荷電流が流れて C₁ は放電します。励磁電流は Q₁ - L_m - C₂ と C₁ - Q₁ - L_m - C₁ の経路で流れますが、励磁電流は実際には n₁ 巻線を通るので実際の電流経路は負荷電流と同じです。図 2 の i_m 波形に示すように励磁電流は Mode1 の前半は負の値、後半は正の値となります。図 3 の電流経路では後半の方向を示しています。変圧器の電圧 v_{n1}、v_{n2}、v_{n3} は正の値となるので 2 次側では D₁ が導通し、n₂ - D₁ - L_d の経路で負荷電流が流れます。次の式が成立します。

$$\text{変圧器の } n_1 \text{ 巻線電圧 } v_{n1} = v_{C1} = \frac{1}{2} V_{in}$$

$$\text{励磁電流 } i_m \text{ の変化量 } i_m = \frac{1}{L_m} v_{n1} T_1 = \frac{1}{L_m} v_{C1} T_1 = \frac{1}{2} \frac{1}{L_m} V_{in} T_1$$

$$\text{変圧器の } n_2 \text{ 巻線電圧 } v_{n2} = \frac{1}{2} V_{in} \frac{n_2}{n_1}$$

$$\text{リアクトル } L_d \text{ の電圧 } v_{Ld} = v_{n2} - V_{out} = \frac{1}{2} V_{in} \frac{n_2}{n_1} - V_{out}$$

$$\text{リアクトル } L_d \text{ の電流の変化量 } i_{Ld} = \frac{1}{L_1} v_{Ld} T_1 = \frac{1}{L_1} \left(\frac{1}{2} V_{in} \frac{n_2}{n_1} - V_{out} \right) T_1$$

なお、 T_1 は Mode1 の継続時間です。この状態で Q_1 が OFF して Mode2 に移行します。

< Mode 2 : Q_1 、 Q_2 共に OFF >

Q_1 が OFF するので負荷電流、励磁電流共に変圧器 TR_1 の 2 次側に転流します。負荷電流は平滑リアクトル L_d に蓄積されたエネルギーにより $n_2 \rightarrow D_1 \rightarrow L_d$ と $n_3 \rightarrow D_2 \rightarrow L_d$ の 2 つの径路で流れます。励磁電流は変圧器 TR_1 に蓄積されたエネルギーにより $n_3 \rightarrow D_2 \rightarrow D_1 \rightarrow n_2 \rightarrow n_3$ の径路で循環します。励磁電流は D_1 を逆流することになりますが、 D_1 には励磁電流より大きな負荷電流が順方向に流れており、 D_1 を流れる合計の電流は順方向です。なお電気の世界の常識では励磁電流は変圧器の 1 次側を流れますが、DC/DC コンバータの高周波変圧器では励磁電流は 1 次側にも 2 次側にも流れます^{[2][3]}。次の式が成立します。

$$\text{変圧器の } n_1 \text{ 巻線電圧 } v_{n1} = 0$$

$$\text{励磁電流 } i_m \text{ の変化量 } i_m = \frac{1}{L_m} v_{n1} T_2 = 0$$

$$\text{変圧器の 2 次電圧 } v_{n2} = v_{n3} = 0$$

$$\text{リアクトル } L_d \text{ の電圧 } v_{Ld} = -V_{out}$$

$$\text{リアクトル } L_d \text{ の電流の変化量 } i_{Ld} = \frac{1}{L_1} v_{Ld} T_2 = -\frac{1}{L_1} V_{out} T_2$$

なお、 T_2 は Mode2 の継続時間です。この状態で Q_2 が ON して Mode3 に移行します。

< Mode 3 : Q_2 が ON、 Q_1 が OFF >

Q_2 が ON しているため図 3 に示すように負荷電流は $C_1 \rightarrow n_1 \rightarrow Q_2$ と $C_2 \rightarrow n_1 \rightarrow Q_2 \rightarrow C_2$ の径路で流れて C_1 は充電、 C_2 は放電されます。励磁電流は $C_1 \rightarrow L_m \rightarrow Q_2$ と $C_2 \rightarrow L_m \rightarrow Q_2 \rightarrow C_2$ の径路で流れますが、励磁電流は実際には n_1 巻線を通るので実際の電流径路は負荷電流と同じです。図 2 の i_m 波形に示すように励磁電流は Mode3 の前半は正の値、後半は負の値となります。図 3 の電流径路では後半の方向を示しています。変圧器の電圧 v_{n1} 、 v_{n2} 、 v_{n3} は負の値となるので 2 次側では D_2 が導通し、 $n_3 \rightarrow D_2 \rightarrow L_d$ の径路で負荷電流が流れます。

次の式が成立します。

$$\text{変圧器の } n_1 \text{ 巻線電圧 } v_{n1} = -v_{C2} = -\frac{1}{2} V_{in}$$

$$\text{励磁電流 } i_m \text{ の変化量 } i_m = \frac{1}{L_m} v_{n1} T_3 = -\frac{1}{L_m} v_{C2} T_3 = -\frac{1}{2} \frac{1}{L_m} V_{in} T_3$$

$$\text{変圧器の } n_3 \text{ 巻線電圧 } v_{n3} = -\frac{1}{2} V_{in} \frac{n_3}{n_1} = -\frac{1}{2} V_{in} \frac{n_2}{n_1}$$

$$\text{リアクトル } L_d \text{ の電圧 } v_{Ld} = -v_{n3} - V_{out} = \frac{1}{2} V_{in} \frac{n_2}{n_1} - V_{out}$$

リアクトル L_d の電流の変化量
$$i_{Ld} = \frac{1}{L_d} v_{Ld} T_3 = \frac{1}{L_d} \left(\frac{1}{2} V_{in} \frac{n_2}{n_1} - V_{out} \right) T_3$$

なお、 T_3 は Mode3 の継続時間で、 T_1 と同じ値です。この状態で Q_2 が OFF して Mode4 に移行します。

< Mode 4 : Q_1 、 Q_2 共に OFF >

Q_2 が OFF するので負荷電流、励磁電流共に TR_1 の 2 次側に転流します。負荷電流は平滑リアクトル L_d に蓄積されたエネルギーにより Mode 2 と同じく $n_2 D_1 L_d$ と $n_3 D_2 L_d$ の 2 つの径路で流れます。励磁電流は変圧器 TR_1 に蓄積されたエネルギーにより $n_2 D_1 D_2 n_3 n_2$ の径路で循環します。Mode 2 とは逆の方向になります。励磁電流は D_2 を逆流することになりますが、 D_2 には励磁電流より大きな負荷電流が順方向に流れており、 D_2 を流れる合計の電流は順方向です。

次の式が成立します。全て Mode 2 と同じです。

変圧器の n_1 巻線電圧 $v_{n1} = 0$

励磁電流 i_m の変化量
$$i_m = \frac{1}{L_m} v_{n1} T_4 = 0$$

変圧器の 2 次電圧 $v_{n2} = v_{n3} = 0$

リアクトル L_d の電圧 $v_{Ld} = -V_{out}$

リアクトル L_d の電流の変化量
$$i_{Ld} = \frac{1}{L_1} v_{L1} T_4 = -\frac{1}{L_1} V_{out} T_4$$

なお、 T_4 は Mode 4 の継続時間で、 T_2 と同じ値です。この状態で Q_1 が ON して Mode 1 に戻ります。

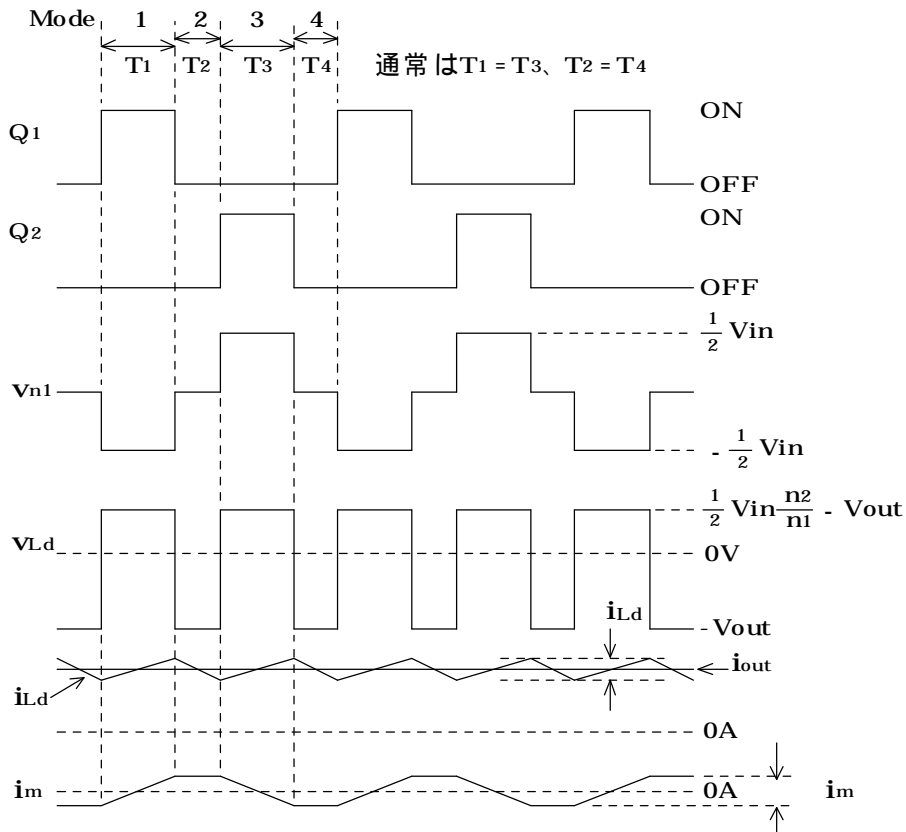


図2 ハーフブリッジ形 DC/DC コンバータの動作モードと理論波形

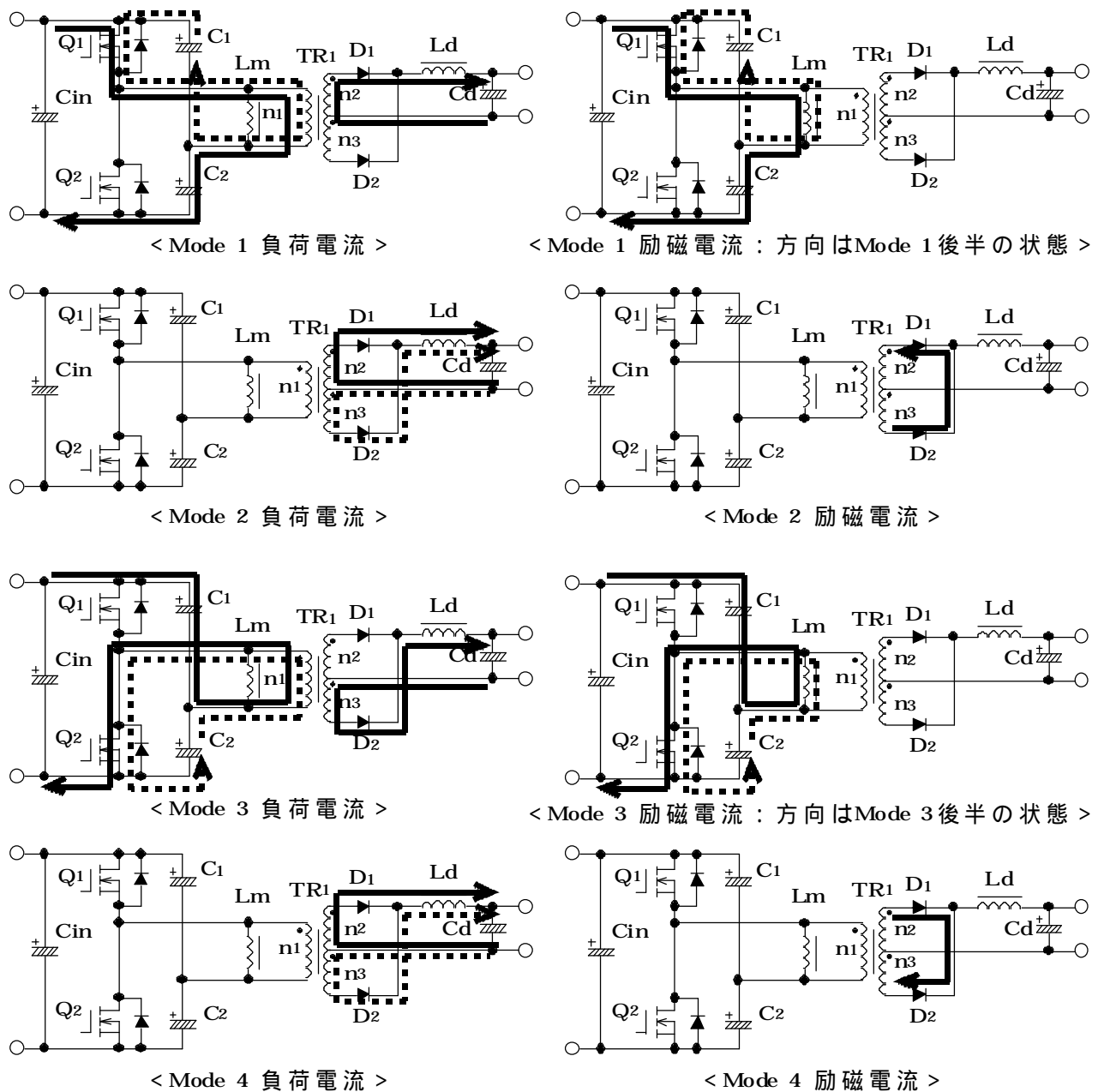


図3 ハーフブリッジ形 DC/DC コンバータの各動作モードの電流経路

偏磁現象の発生原理

偏磁現象の発生原理は文献[1]で詳しく説明していますが、概略を以下に示します。各動作モードにおける励磁電流 i_m の変化量 Δi_m は前節で説明したように次の通りです。

$$\text{Mode 1} \quad \Delta i_m = \frac{1}{L_m} v_{n1} T_1 = \frac{1}{L_m} v_{C1} T_1 \quad \dots \text{正の値であり、増加}$$

$$\text{Mode 2} \quad \Delta i_m = \frac{1}{L_m} v_{n1} T_2 = 0$$

$$\text{Mode 3} \quad \Delta i_m = \frac{1}{L_m} v_{n1} T_3 = -\frac{1}{L_m} v_{C2} T_3 \quad \dots \text{負の値であり、減少}$$

$$\text{Mode 4} \quad i_m = \frac{1}{L_m} v_{n1} T_4 = 0$$

したがって、 i_m は Mode 1 で増加、Mode 2 と 4 では一定、Mode 3 で減少となります。通常は次の式が成立し、Mode 1 の増加量と Mode 3 の減少量が均衡しており、図 2 の i_m 波形に示したように i_m は 0A を中心として安定しています。

$$v_{C1} = v_{C2} = \frac{1}{2} V_{in}$$

$$T_1 = T_3$$

$$\text{よって、Mode 1 の } i_m + \text{Mode 3 の } i_m = \frac{1}{L_m} v_{C1} T_1 - \frac{1}{L_m} v_{C2} T_3 = 0$$

今、何らかの原因で $T_1 > T_3$ となった場合を考えます。次の式が成立します。

$$\text{Mode 1 の } i_m + \text{Mode 3 の } i_m = \frac{1}{L_m} v_{C1} T_1 - \frac{1}{L_m} v_{C2} T_3 > 0$$

よって、この場合 i_m は図 4 に示すように 1 サイクル毎に少しずつ増加します。この状態が継続すれば i_m は大きな正の値となります。これが偏磁現象です。

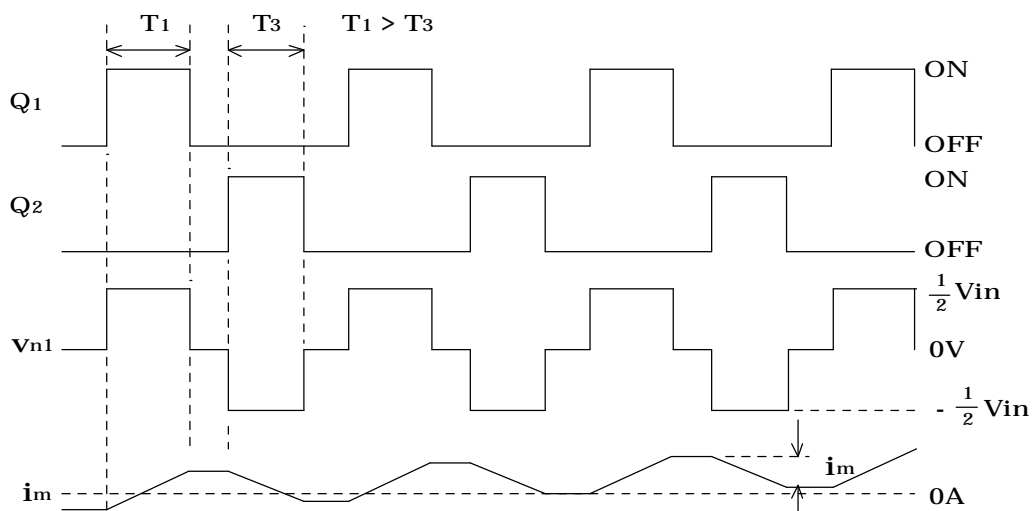


図 4 偏磁発生時の励磁電流 i_m の変化

ハーフブリッジ型 DC/DC コンバータの偏磁現象抑制原理

上記のように、Mode 1 の継続時間 T_1 が Mode 3 の継続時間 T_3 より大きくなった場合は励磁電流 i_m は限りなく増加し、スイッチ素子の破損を招く可能性があります。文献 1 で説明したようにフルブリッジ型 DC/DC コンバータでは実際にこのような現象が発生します。しかし、ハーフブリッジ型には以下に示すように自動的に偏磁現象を抑制するメカニズムがあり、 i_m の増加がいつまでも継続することはありません。

1 頁に説明したように、Mode 1 では変圧器の 1 次側は負荷電流と励磁電流は同じ径路を流れ、 C_1 は放電、 C_2 は充電されます。電流径路は次の 2 つです。

径路 1 : C_1 Q_1 n_1 C_1 \dots C_1 は放電

径路 2 : Q_1 n_1 C_2 \dots C_2 は充電

通常の状態では励磁電流 i_m は図 2 に示したように Mode 1 の前半は負の方向、後半は正の方向ですが、 $T_1 > T_3$ となり偏磁が発生すると図 4 のように i_m は常に正の方向になります。この時の負荷電流と励磁電流の径路と方向を図 5 に示します。負荷電流と励磁電流の径路と方向は同じなので、偏磁が発生すると i_m の増加に伴って C_1 の放電電流と C_2 の充電電流は増加します。

一方、2 頁に説明したように、Mode 3 では負荷電流と励磁電流は次の径路を流れ、 C_1 は充電、 C_2 は放電されます。

径路 1 : C_1 n_1 Q_2 \cdots C_1 は充電

径路 2 : C_2 n_1 Q_2 C_2 \cdots C_2 は放電

通常の状態では励磁電流 i_m は Mode 3 の前半は正の方向、後半は負の方向ですが、偏磁が発生すると図 4 のように i_m は常に正の方向になります。この時の負荷電流と励磁電流の径路と方向を図 5 に示します。励磁電流の方向は負荷電流とは逆なので、偏磁が発生すると i_m の増加に伴って C_1 の充電電流と C_2 の放電電流は減少します。

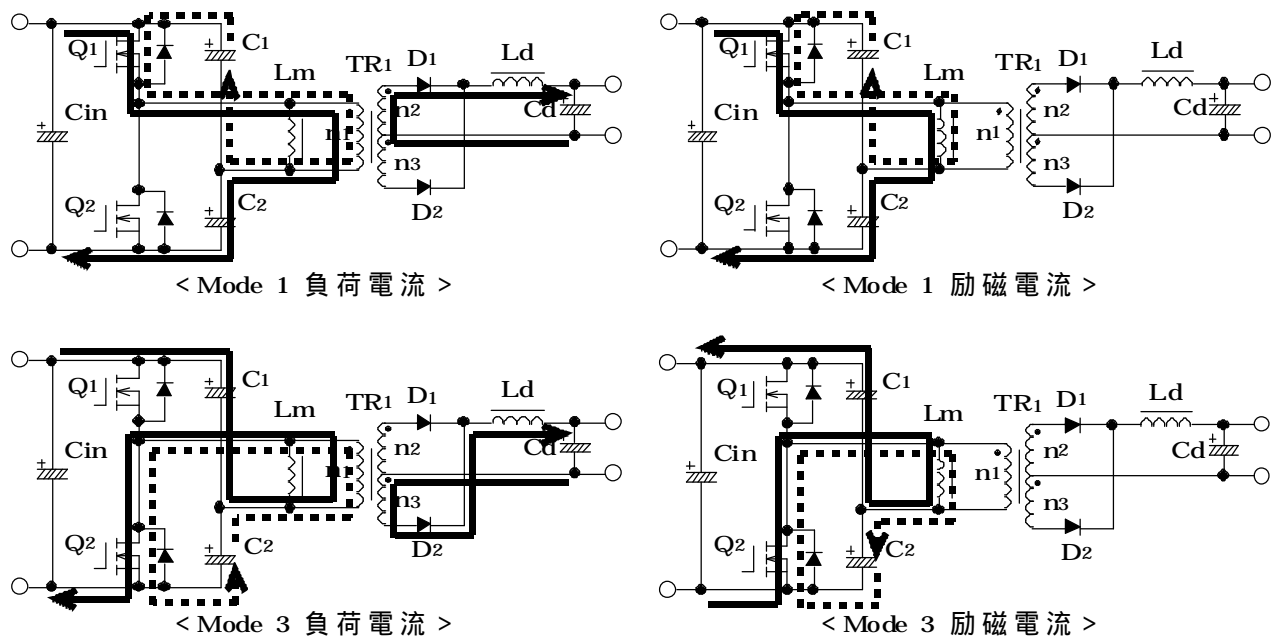


図 5 $T_1 > T_3$ で偏磁発生時の負荷電流と励磁電流の径路と方向

$T_1 > T_3$ で偏磁が発生した時の C_1 と C_2 の充放電状態をまとめると表 1 のようになります。 C_1 は放電が増加し、充電が減少するので C_1 電圧 v_{c1} は低下します。 C_2 は充電が増加し、放電が減少するので C_2 電圧 v_{c2} は上昇します。よって、 $v_{c1} < v_{c2}$ となります。

表 1 $T_1 > T_3$ で偏磁が発生した時の C_1 と C_2 の充放電状態

	Mode 1	Mode 3
C_1	放電 偏磁すると増加	充電 偏磁すると減少
C_2	充電 偏磁すると増加	放電 偏磁すると減少

Mode 1 と Mode 3 の励磁電流 i_m の変化量 i_m の式を再度示します。

$$\text{Mode 1} \quad i_m = \frac{1}{L_m} v_{n1} T_1 = \frac{1}{L_m} v_{c1} T_1 \quad \dots \text{正の値であり、増加}$$

$$\text{Mode 3} \quad i_m = \frac{1}{L_m} v_{n1} T_3 = - \frac{1}{L_m} v_{c2} T_3 \quad \dots \text{負の値であり、減少}$$

何らかの原因で「 $T_1 > T_3$ 」となると偏磁が発生し、「 i_m の増加 > i_m の減少」となりますが、その結果上記のように「 $v_{c1} < v_{c2}$ 」となります。 v_{c1} の減少と v_{c2} の増加は「 $v_{c1} T_1 = v_{c2} T_3$ 」となるまで続きます。「 $v_{c1} T_1 = v_{c2} T_3$ 」となると「 i_m の増加量 = i_m の減少量」となり、 i_m の増減は均衡し、偏磁現象の進行は解消されます。例えば、 T_1 が T_3 の 1.1 倍になって偏磁が発生した場合、自動的に v_{c2} は v_{c1} の 1.1 倍となり、 i_m は正負バランスし、偏磁現象の進行は停止します。このように、ハーフブリッジ型 DC/DC コンバータには自動的に偏磁を抑制する機能が備わっているのです。

参考文献

- [1] 平地研究室技術メモ No.20111101 「DC/DC コンバータの偏磁現象の基本」
- [2] 平地研究室技術メモ No.20100817 「励磁電流の重要な性質」
- [3] 平地研究室技術メモ No.20110228 「電圧型プッシュプル方式 DC/DC コンバータの励磁電流について」

以上