

## フルブリッジ型 DC/DC コンバータの偏磁防止用コンデンサの動作

(読んでほしい人：パワエレ技術者)

2016/9/1 舞鶴高専 平地克也

フルブリッジ型 DC/DC コンバータ (図 1) には偏磁が発生し易いという問題点があります。最も広く使用されている偏磁防止対策は 1 次巻線と直列に偏磁防止用コンデンサを挿入することです。今回の技術メモでは偏磁防止用コンデンサの動作を詳しく検討します。なお、偏磁に関する基本的な説明は技術メモ No. 20111101 「DC/DC コンバータの偏磁現象の基本」を参照下さい。

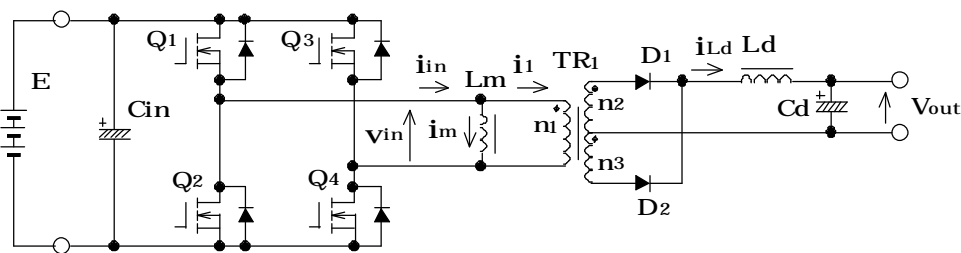


図 1 フルブリッジ型 DC/DC コンバータ ( $L_m$  は励磁インダクタンス)

### 各動作モードの電流経路と波形

フルブリッジ型 DC/DC コンバータの動作モードと電流経路を図 2 に示します。フルブリッジ型には通常的方式と位相シフト方式がありますが、図 2 は通常的方式のものです。この回路の主要な電圧電流波形を図 3 に示します。以下、図 2 と図 3 を使って各動作モードの概要を説明します。

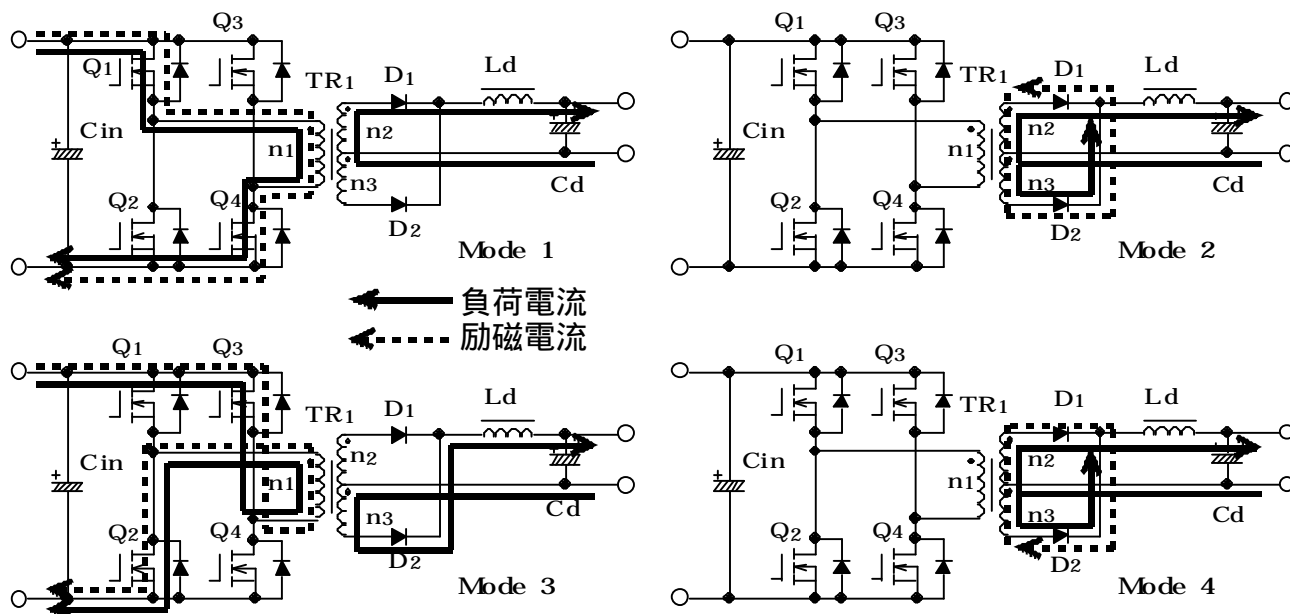


図 2 フルブリッジ型 DC/DC コンバータの動作モードと電流経路

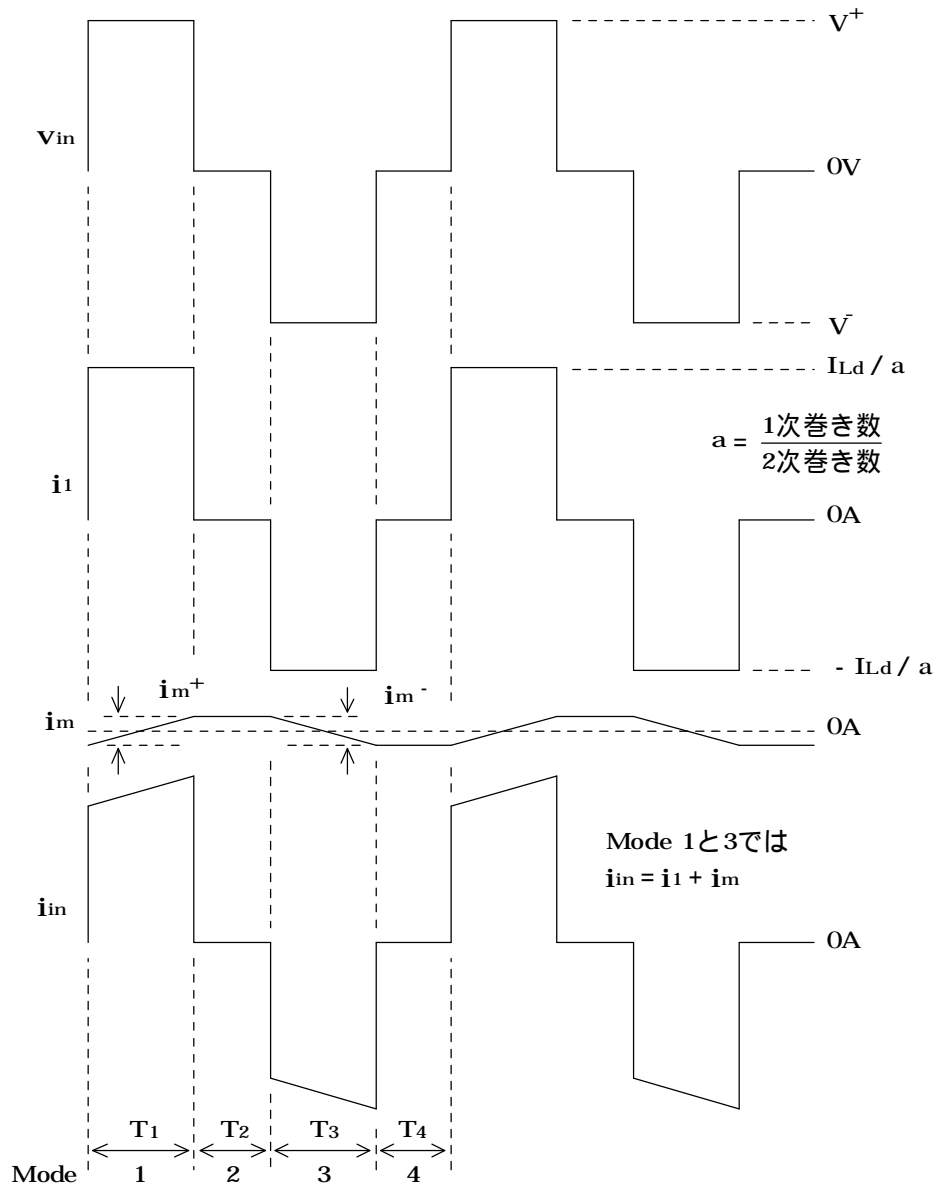


図3 フルブリッジ型の主要な電圧電流波形（偏磁していない時）

< Mode 1 >

Q1Q4がONし、2次側に電力が伝達される。1次巻線には負荷電流  $i_1$  と励磁電流  $i_m$  の双方が流れている。1次巻線の電圧  $v_{in}$  は正の電圧  $V^+$  であり、励磁電流  $i_m$  は次の式に従って増加する。 $T_1$  はMode1の継続時間である。 $L_m$  は励磁インダクタンスである。

$$i_{m^+} = \frac{1}{L_m} V^+ T_1 \quad \dots (1)$$

1次巻線を通る負荷電流  $i_1$  はリアクトル電流  $i_{Ld}$  を変圧比  $a$  で割った値となる。なお、リアクトル電流  $i_{Ld}$  は通常は1~2割程度のリップル成分を含んでいるが、ここではリアクトル  $L_d$  の値は充分大きく、リップルは無視でき、 $i_{Ld}$  は一定の値  $I_{Ld}$  と考えている。よって、図3の  $i_1$  波形は振幅が  $I_{Ld}/a$  の完全な方形波となっている。

1次巻線電流  $i_{in}$  はMode 1では  $i_1$  と  $i_m$  の合計なので図3のように正方向に増加する波形となる。

< Mode 2 >

Q<sub>1</sub> ~ Q<sub>4</sub> は全て OFF しており、1 次側には電流が流れない。L<sub>d</sub> 電流は 2 つの 2 次巻線 n<sub>2</sub>n<sub>3</sub> に 1/2 ずつ分流している。励磁電流は最も流れやすい巻線を通るので図 2 のように n<sub>2</sub>n<sub>3</sub> 巻線を還流する。D<sub>1</sub>D<sub>2</sub> 双方が導通しているので変圧器の巻線電圧は 0V となり、励磁電流 i<sub>m</sub> の大きさは変化しない。なお、D<sub>1</sub> には励磁電流が逆流するが、励磁電流は負荷電流に比べて充分小さく、D<sub>1</sub> 電流は順方向である。

< Mode 3 >

Q<sub>2</sub>Q<sub>3</sub> が ON し、2 次側に電力が伝達される。励磁電流は負荷電流と同じ経路で n<sub>1</sub> 巻線を通っている。n<sub>1</sub> 巻線の電圧 v<sub>n1</sub> は負の電圧 V<sup>-</sup> であり、励磁電流 i<sub>m</sub> は次の式に従って減少する。

$$i_m^- = \frac{1}{L_m} V^- T_3 \dots (2)$$

なお、T<sub>3</sub> は Mode 3 の継続時間である。

i<sub>1</sub> は Mode 3 では - I<sub>Ld</sub> / a である。

i<sub>1</sub> に i<sub>m</sub> を加算した 1 次巻線電流 i<sub>in</sub> は図 3 のように負方向に増加する波形となる。

< Mode 4 >

Mode 2 と同じ動作である。ただし、励磁電流の方向は Mode 2 の逆である。

### 偏磁が発生した時の波形

前記のように励磁電流 i<sub>m</sub> は Mode 1 で i<sub>m</sub><sup>+</sup> 増加し、Mode 3 で i<sub>m</sub><sup>-</sup> 減少します。理想的には増加と減少は釣り合っており、i<sub>m</sub><sup>+</sup> + i<sub>m</sub><sup>-</sup> = 0A です。しかし(1)式(2)式から分かるように V<sup>+</sup> と |V<sup>-</sup>| の大きさ、または T<sub>1</sub> と T<sub>3</sub> の長さに差があると i<sub>m</sub><sup>+</sup> + i<sub>m</sub><sup>-</sup> = 0A が成立しなくなってしまいます。V<sup>+</sup> と |V<sup>-</sup>| の大きさの差は Q<sub>1</sub> ~ Q<sub>4</sub> の ON 抵抗のバラツキ、T<sub>1</sub> と T<sub>3</sub> の長さの差は FET 駆動回路の遅延時間のバラツキなどが考えられます。これらのバラツキは完全に無くすることは困難であり i<sub>m</sub><sup>+</sup> + i<sub>m</sub><sup>-</sup> は完全には 0A になりません。仮に i<sub>m</sub><sup>+</sup> + i<sub>m</sub><sup>-</sup> = 0.1mA とすると、i<sub>m</sub> は 1 サイクル毎に 0.1mA ずつ正方向に増加し、1 万サイクル後には正方向に 1A 偏磁します。動作周波数が 20kHz なら 1 万サイクルは 0.5 秒なので、偏磁は短時間の間に進行します。

図 4 に偏磁発生時の波形を示します。励磁電流 i<sub>m</sub> が正方向に偏磁しています。1 次巻線電流 i<sub>in</sub> は i<sub>m</sub> と i<sub>1</sub> の加算値なので図 4 のように正方向に片寄った波形になります。(なお、i<sub>1</sub> は偏磁の有無によらず図 3 の波形です)。偏磁が進行すると i<sub>in</sub> は FET の許容電流を越え、FET は破損します。

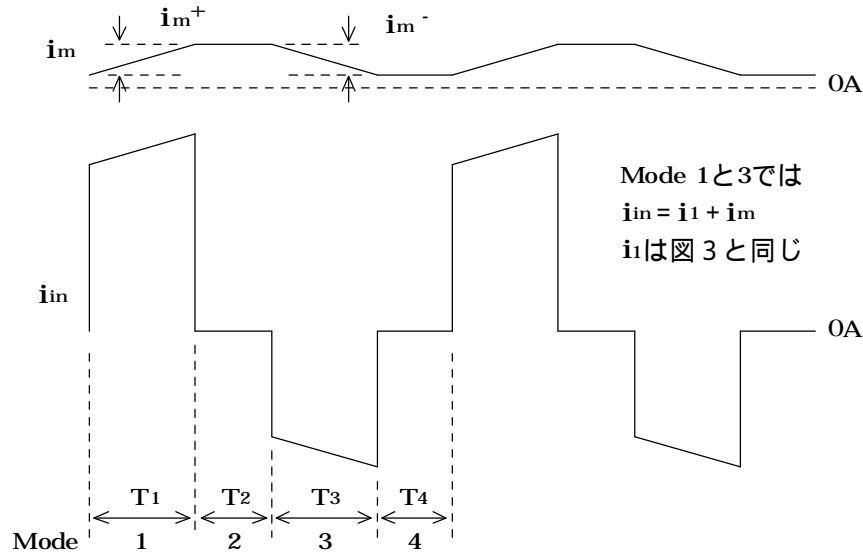


図4 偏磁発生時の波形

### 偏磁防止用コンデンサの効果

図1の回路に偏磁防止用コンデンサ  $C_1$  を挿入した回路を図5に示します。偏磁防止用コンデンサの効果を知り易く図示した波形図を図6に示します。 $i_m$  は図4と同様に正方向に偏磁していると考えます。1次巻線電流  $i_{in}$  も図4と同様に正方向に片寄っています。コンデンサ  $C_1$  は  $i_{in}$  で充放電されるので図6に示すように  $C_1$  電圧  $v_{C1}$  は正方向に直流成分が発生し、増加します。

$v_{C1}$  と  $v_{in}$  と  $v_{n1}$  は次の関係にあります。

$$v_{n1} = v_{in} - v_{C1}$$

$v_{C1}$  が正方向にバイアスされているので  $v_{n1}$  は図6に示すように負方向にバイアスされます。この場合、 $i_m^+$  と  $i_m^-$  は次の式で与えられます。

$$i_m^+ = \frac{1}{L_m} \int_0^{T1} v_{n1} dt \quad \dots (3) \quad (\text{積分範囲は Mode 1 の期間})$$

$$i_m^- = \frac{1}{L_m} \int_{T1+T2}^{T1+T2+T3} v_{n1} dt \quad \dots (4) \quad (\text{積分範囲は Mode 3 の期間})$$

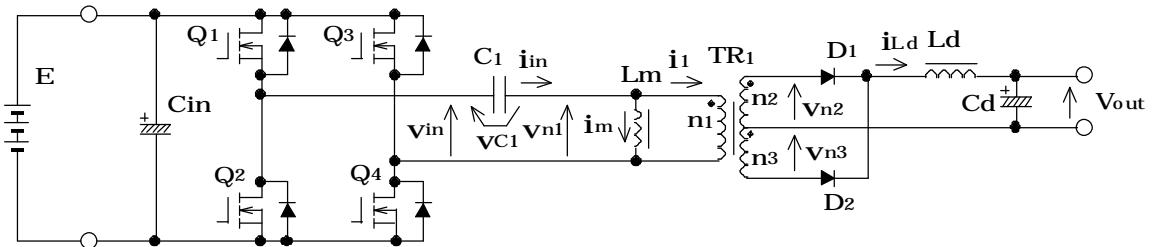


図5 偏磁防止用コンデンサ  $C_1$  を挿入した回路

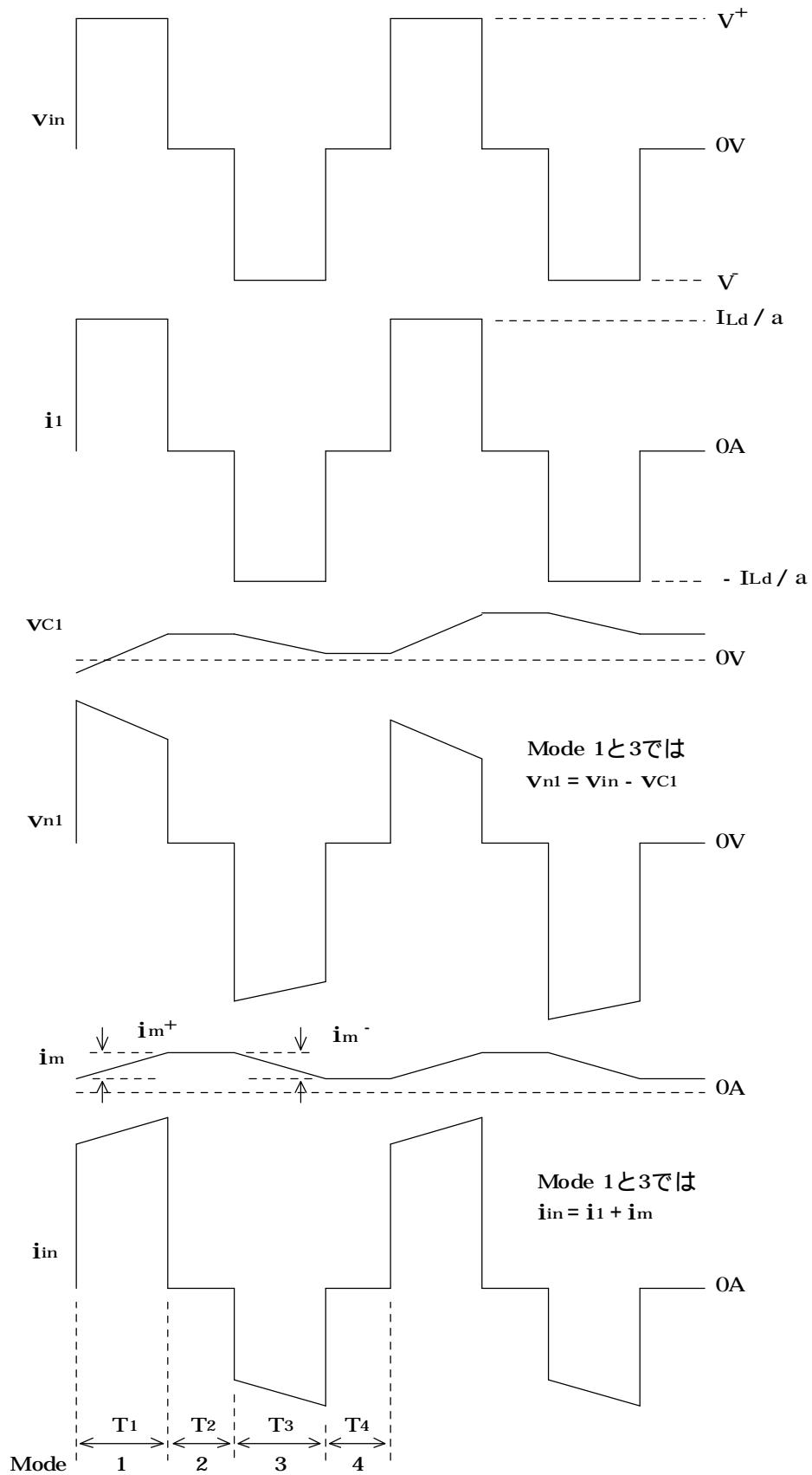


図6 偏磁防止用コンデンサの効果

図6の場合、 $v_{n1}$ は負方向にバイアスされているので  $i_{m^+} + i_{m^-} < 0A$  となり、励磁電流  $i_m$ は減少します。その結果  $i_m$ の偏磁は解消されます。次のような負帰還作用が働いていると言えます。

$i_m$ が正に偏磁  $i_{C1}$ が正にバイアス  $v_{C1}$ が正にバイアス  $v_{n1}$ が負にバイアス  $i_m$ が減少  $i_m$ の偏磁解消

逆に、 $i_m$ が負方向に偏磁した場合は次のように逆方向に負帰還作用が働いて偏磁が解消されます。

$i_m$ が負に偏磁  $i_{C1}$ が負にバイアス  $v_{C1}$ が負にバイアス  $v_{n1}$ が正にバイアス  $i_m$ が増加  $i_m$ の偏磁解消

$C_1$ の効果で偏磁が解消された時の各部の波形を図7に示します。 $v_{C1}$ は正方向にバイアスされており、その直流成分を  $V_{C1DC}$ とします。次の式が成立します。

$$i_{m^+} = \frac{1}{L_m} \int_0^{T_1} v_{n1} dt = \frac{1}{L_m} \int_0^{T_1} (v_{in} - v_{C1}) dt = \frac{1}{L_m} \left( \int_0^{T_1} V^+ dt - \int_0^{T_1} v_{C1} dt \right) = \frac{1}{L_m} (V^+ T_1 - V_{C1DC} T_1)$$

$$i_{m^-} = \frac{1}{L_m} \int_{T_1+T_2}^{T_1+T_2+T_3} v_{n1} dt = \frac{1}{L_m} \int_{T_1+T_2}^{T_1+T_2+T_3} (v_{in} - v_{C1}) dt$$

$$= \frac{1}{L_m} \left( \int_{T_1+T_2}^{T_1+T_2+T_3} V^- dt - \int_{T_1+T_2}^{T_1+T_2+T_3} v_{C1} dt \right) = \frac{1}{L_m} (V^- T_3 - V_{C1DC} T_3)$$

よって、

$$i_{m^+} + i_{m^-} = \frac{1}{L_m} (V^+ T_1 - V_{C1DC} T_1) + \frac{1}{L_m} (V^- T_3 - V_{C1DC} T_3)$$

$$= \frac{1}{L_m} (V^+ T_1 + V^- T_3 - V_{C1DC} (T_1 + T_3)) \quad \dots (5)$$

前記のように、 $V^+$ と $|V^-|$ の大きさが同じで  $T_1$ と $T_3$ の長さも同じなら  $V^+ T_1 + V^- T_3 = 0$ であり、 $C_1$ が無くても偏磁は発生しません。しかし、 $V^+$ と $|V^-|$ の大きさ、または  $T_1$ と $T_3$ の長さにバラツキがあれば  $V^+ T_1 + V^- T_3 \neq 0$ であり、偏磁が発生します。しかし、 $C_1$ が挿入されていると(5)式から分かるようにこれらのバラツキが有っても、

$$V_{C1DC} = \frac{V^+ T_1 + V^- T_3}{T_1 + T_3} \quad \dots (6)$$

であれば  $i_{m^+} + i_{m^-} = 0$ とすることができます。 $C_1$ が存在すれば上記の負帰還動作により  $V_{C1DC}$ は自動的に(6)式の値になるのです。

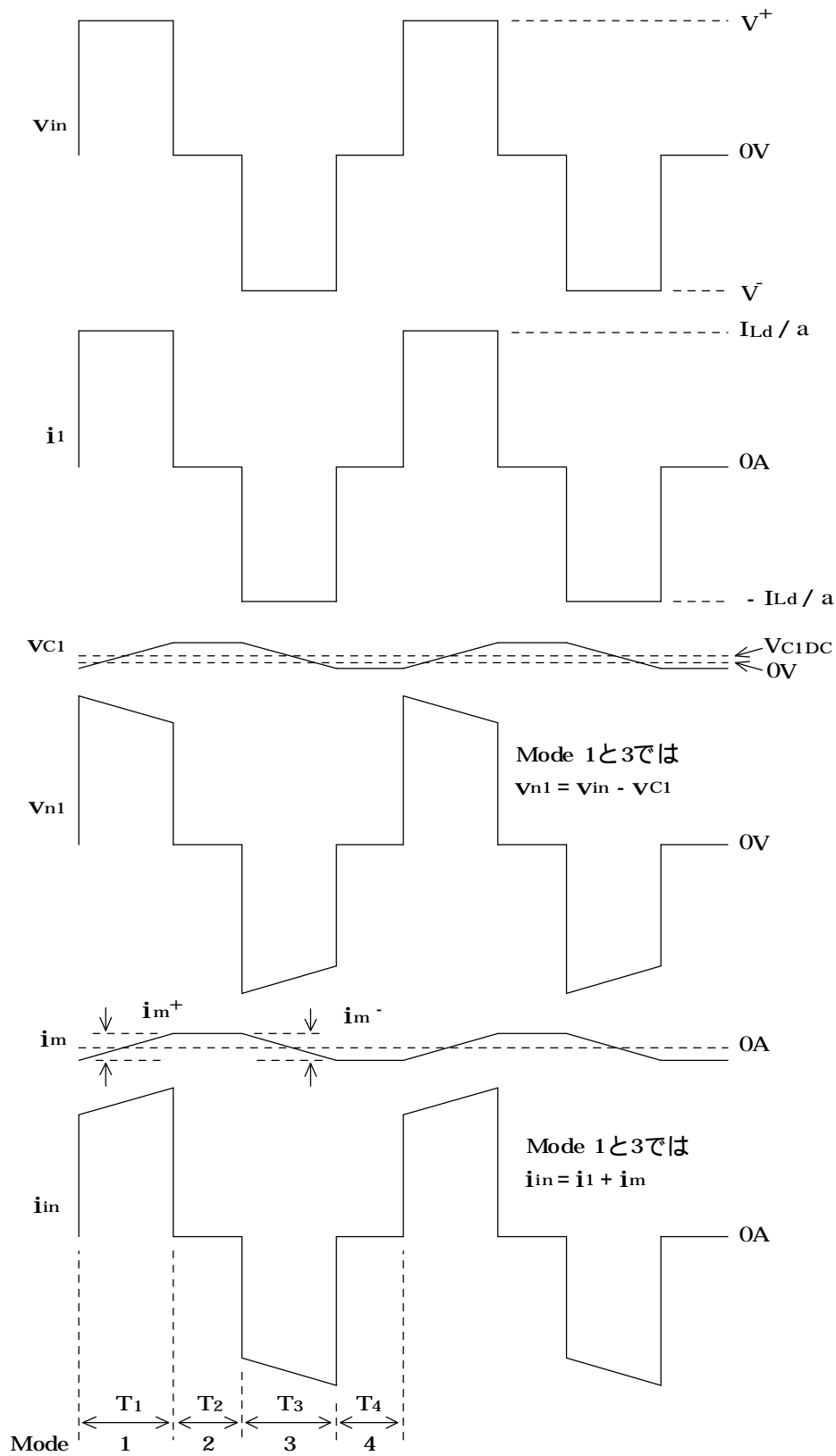


図7 偏磁防止用コンデンサで偏磁を抑制している時の波形

以上