

## 電流型プッシュプル方式 DC/DC コンバータの偏磁現象について

(読んでほしい人：パワエレ技術者)

2011/1/31 舞鶴高専 平地克也

### はじめに

先月の平地研究室技術メモ(1)では電流型プッシュプル方式 DC/DC コンバータ(図1)の基本的な特性について説明した。今回は本 DC/DC コンバータの変圧器の偏磁現象について説明する。偏磁現象は DC/DC コンバータの破損を招く危険な現象として DC/DC コンバータの技術者には広く知られており、必ずその防止対策を施さねばならないものとされている。しかし、その常識は通常の(電圧型の) DC/DC コンバータに関するものであり、電流型 DC/DC コンバータについては偏磁現象に関する詳細は知られていない。本技術メモでは電流型プッシュプル方式 DC/DC コンバータの偏磁現象に関する実験結果を報告し、電流型 DC/DC コンバータには偏磁に関する従来の常識は適用できないことを説明する。

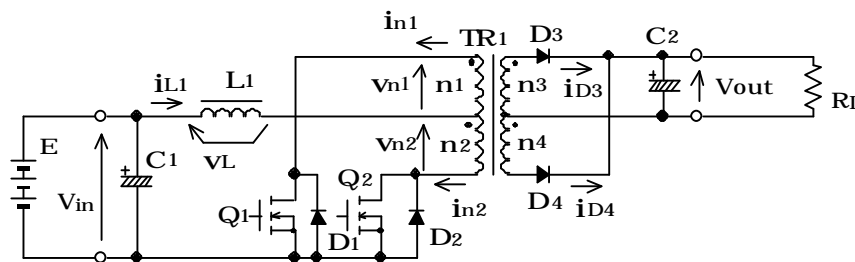


図1 電流型プッシュプル方式 DC/DC コンバータ

### 電流型プッシュプル方式 DC/DC コンバータの励磁電流の経路

先月の技術メモ(1)で電流型プッシュプル方式 DC/DC コンバータの動作モードと電流経路を説明した。しかし、この説明では変圧器の励磁電流については考慮されていなかった。図2に励磁電流も含めた各動作モードにおける電流経路を示す。以下に各動作モードの説明を示す。説明の都合上 Mode2 から説明を始める。

< Mode2 : Q1 OFF、Q2 ON >

L1 は電流源として動作しており、L1 n2 Q2 E L1 の経路で負荷電流が流れる。この電流に対応してトランスの2次側に n3 D3 RL n3 の経路で負荷電流が流れる。n2 コイル電圧 vn2 は次の式で与えられる。

$$v_{n2} = V_{out} \frac{n_2}{n_3} \quad \dots \dots (1)$$

この電圧により励磁電流 im は直線的に増加する。im の増加量 Δim は次の式で与えられる。

$$\Delta i_m = \frac{1}{L_m} v_{n2} T_2 = \frac{1}{L_m} V_{out} \frac{n_2}{n_3} T_2 \quad \dots \dots (2)$$

なお、 $T_2$  は Mode2 の継続時間である。

< Mode3 : Q1、Q2 共に ON >

Q1 と Q2 が共に ON しているのでトランス TR1 の 1 次コイルは短絡状態であり、トランスの電圧はゼロである。リアクトル L1 は TR1 を介して Q1 と Q2 でグラウンドに短絡された状態となり、電源電圧  $V_{in}$  が印加される。L1 電流  $i_{L1}$  は直線的に増加する。

トランスの電圧がゼロなので励磁電流  $i_m$  は変化せず、Mode2 終了時点と同じ大きさで流れ続ける。 $i_m$  の電流経路は TR1 の 1 次コイル Q2 Q1 TR1 の 1 次コイル、となる。

< Mode4 : Q1 ON、Q2 OFF >

Mode3 から Q2 がターン OFF して Mode4 に移行する。L1 は電流源として動作し、L1 n1 Q1 E L1 の径路で負荷電流が流れる。この電流に対応してトランスの 2 次側に n4 D4 RL n4 の径路で負荷電流が流れる。n1 コイル電圧  $v_{n1}$  は次の式で与えられる。

$$v_{n1} = V_{out} \frac{n_1}{n_4} \quad \dots \quad (3)$$

$$n_1 = n_2, \quad n_3 = n_4 \quad \text{より、}$$

$$v_{n1} = V_{out} \frac{n_2}{n_3} \quad \dots \quad (4)$$

この電圧は(1)式で与えられる Mode2 の  $n_2$  コイル電圧と大きさは同じだが極性は逆である。よって、この電圧により励磁電流  $i_m$  は直線的に減少する。 $i_m$  の減少量  $\Delta i_m$  は次の式で与えられる。

$$\Delta i_m = \frac{1}{L_m} v_{n2} T_4 = \frac{1}{L_m} V_{out} \frac{n_2}{n_3} T_4 \quad \dots \quad (5)$$

なお、 $T_4$  は Mode4 の継続時間であり、Mode2 の継続時間  $T_2$  と等しい。よって、Mode4 では  $i_m$  は Mode2 での増加量と同じ値だけ減少する。 $i_m$  の電流経路は負荷電流と同じく、L1 n1 Q1 E L1 の径路である。

< Mode1 : Q1、Q2 共に ON >

Mode3 と同じく Q1 と Q2 は共に ON しているので Mode3 と同様に励磁電流  $i_m$  は変化せず、Mode4 終了時点と同じ大きさで流れ続ける。ただし、Mode2 終了時点と Mode4 終了時点では  $i_m$  の方向は逆なので Mode3 と Mode1 は電流の方向は逆になる。よって、 $i_m$  の電流経路は TR1 の 1 次コイル Q1 Q2 TR1 の 1 次コイル、となる。

### 励磁電流の波形

以上各動作モードの励磁電流の変化から励磁電流  $i_m$  の波形は図 3 のようになることが分かる。図 3 には参考のために変圧器 1 次コイル電圧  $v_{n2}$  とリアクトル L1 の電圧電流波形 ( $v_{L1}$ 、 $i_{L1}$ ) も記載している。なお、通常励磁電流  $i_m$  はリアクトル電流  $i_{L1}$  よりかなり小さい値であるが、分かり易くするためにこの図では  $i_m$  を大きく記載している。

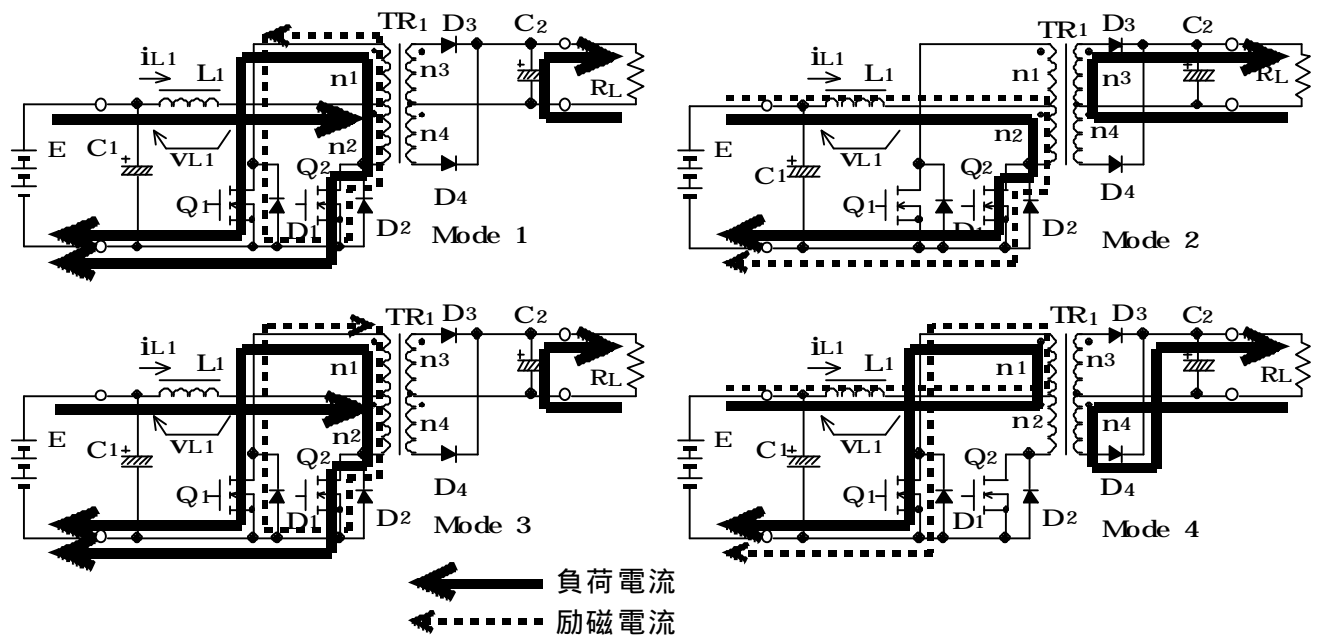


図2 電流型プッシュプル方式DC/DCコンバータの電流経路

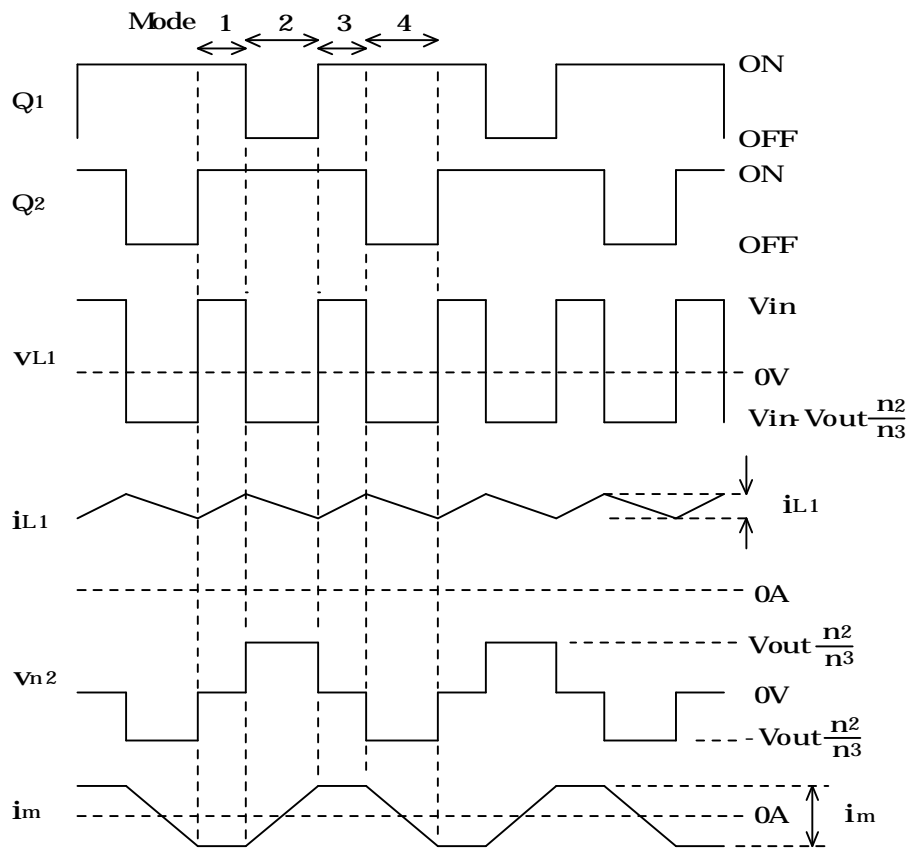
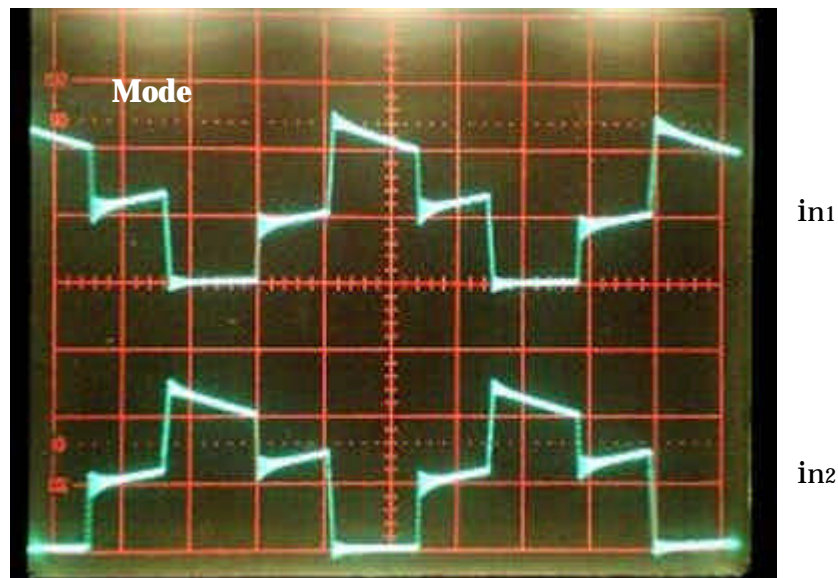


図3 各動作モードの励磁電流  $i_m$  の変化

励磁電流を直接見ることはできないが、図4に示す変圧器の  $n_1$  コイル電流  $i_{n1}$  と  $n_2$  コイル電流  $i_{n2}$  の波形から励磁電流を推定することができる。図4から Mode1 では  $i_{n1} > i_{n2}$ 、Mode3 では  $i_{n1} < i_{n2}$  となっていることが分かる。これは図2から分かるように、Mode1 では励磁電流が  $n_1$  コイルの負荷電流と同じ方向に流れており、逆に Mode3 では励磁電流が  $n_1$  コイルの負荷電流と逆方向に流れているからである。



上 :  $i_{n1}$  下 :  $i_{n2}$  5A/div 10  $\mu$  sec/div

図4  $n_1$  コイル電流  $i_{n1}$  と  $n_2$  コイル電流  $i_{n2}$

### 偏磁発生時の電流波形の変化

偏磁発生時の波形の変化を測定するために図5に示すように変圧器の1次コイルと直列にダイオード  $D_5$  を挿入した。図5(a)のように  $n_2$  側に  $D_5$  を挿入すると  $Q_1$  が ON 時の  $v_{n1}$  の方が  $Q_2$  が ON 時の  $v_{n2}$  よりも大きくなる。よって、 $Q_1$  が ON 時の励磁電流が大きくなる方向に偏磁が発生する。逆に図5(b)のように  $n_1$  側に  $D_5$  を挿入すると  $Q_2$  が ON 時の励磁電流が大きくなる方向に偏磁が発生する。それぞれの場合の  $n_1$  巻線の電流波形  $i_{n1}$  と  $n_2$  巻線の電流波形  $i_{n2}$  を図6に示す。 $n_2$  側に  $D_5$  を挿入した場合は Mode1 と 3 で  $i_{n1} > i_{n2}$  となっており、 $Q_1$  が ON 時の励磁電流が大きくなっていることが想像できる。逆に  $n_1$  側に  $D_5$  を挿入した場合は Mode1 と 3 で  $i_{n1} < i_{n2}$  となっており、 $Q_2$  が ON 時の励磁電流が大きくなっていることが想像できる。

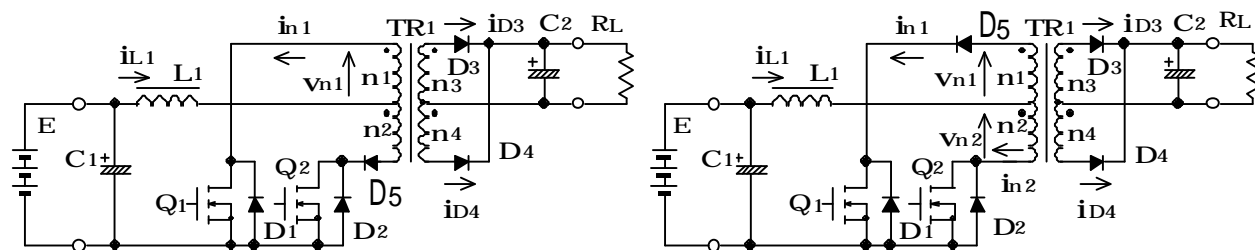
また、偏磁発生時は2次側の2つのダイオード電流  $i_{D3}$  と  $i_{D4}$  に大きな差が発生していることに注意する必要がある。図2から分かるように、Mode2 と Mode4 では  $i_{L1}$  は負荷電流と励磁電流の合計の電流が流れている。よって、次の式が成立する。 $i_{m2}$  は Mode2 の励磁電流、 $i_{m4}$  は Mode4 の励磁電流である。

$$i_{D3} = \frac{n_2}{n_3} (i_{L1} - i_{m2})$$

$$i_{D4} = \frac{n_1}{n_4} (i_{L1} - i_{m4})$$

$n_2$  側に  $D_5$  を挿入した時は  $i_{m2} < i_{m4}$  となるので  $i_{D3} > i_{D4}$  となる。

$n_1$  側に  $D_5$  を挿入した時は  $i_{m2} > i_{m4}$  となるので  $i_{D3} < i_{D4}$  となる。



(a)  $n_2$  側に  $D_5$  を挿入 ( $V_{n1} > V_{n2}$ )

(b)  $n_1$  側に  $D_5$  を挿入 ( $V_{n1} < V_{n2}$ )

図5 偏磁の実験回路

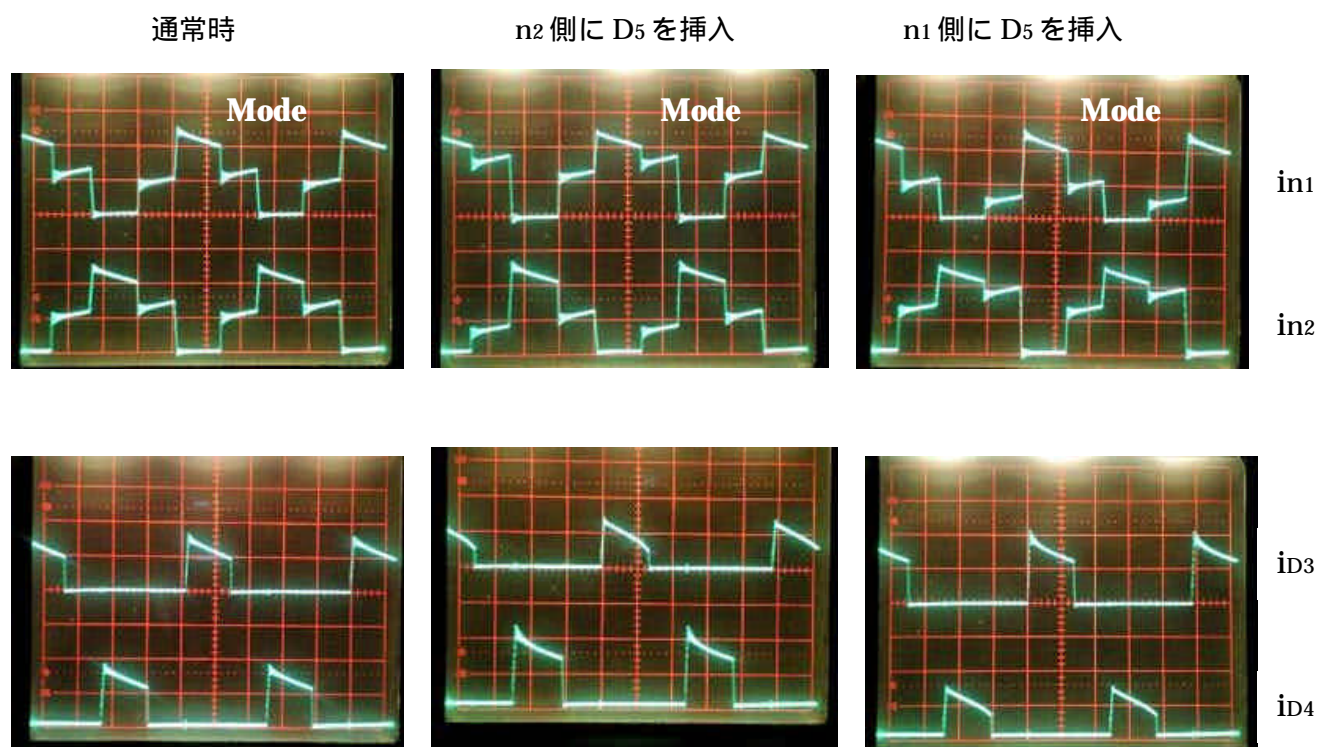


図6 偏磁発生時の波形の変化

左：通常時、中： $n_1$  側に  $D_5$  を挿入、右： $n_2$  側に  $D_5$  を挿入

上段： $n_1$  コイル電流  $i_{n1}$  と  $n_2$  コイル電流  $i_{n2}$ 、下段： $D_3$  電流  $i_{D3}$  と  $D_4$  電流  $i_{D4}$

$i_{n1}$  と  $i_{n2}$  : 5A/div、 $i_{D3}$  と  $i_{D4}$  : 2A/div、共に 10  $\mu$  sec/div

### 電圧型 DC/DC コンバータと電流型 DC/DC コンバータの偏磁発生時の動作の相違について

よく知られているように、電圧型 DC/DC コンバータでは偏磁が発生すると片方向の励磁電流が限りなく増加しスイッチ素子の破損を招く。しかし電流型では変圧器の電流は入力側のリアクトル電流で決まるのでスイッチ素子に過大な電流が流れることはない。しかし図6で見られたように、偏磁が発生するとリアクトル電流に占める励磁電流の割合が増加して出力側ダイオードの電流にアンバランスをもたらす。電圧型 DC/DC コンバータでは偏磁現象は回路の破損を招く恐るべき現象であるが、

電流型ではあまり恐れる必要はないと言える。ただし、整流ダイオードの電流アンバランスなどをもたらすので無視するわけにはいかない。

本技術メモは平地研究室 2010 年度卒研究生藤澤和也の研究成果をまとめたものである。藤澤和也はこの研究成果をパワーエレクトロニクス学会 2010 年度若手のための研究発表会で発表し、優秀賞を受賞している<sup>(2)</sup>。

#### 参考文献

- (1) 平地克也、「電流型プッシュプル方式 DC/DC コンバータ」、平地研究室技術メモ No.20101227、カテゴリ：DC/DC コンバータ、2010 年 12 月
- (2) 藤澤和也、平地克也、「電流型プッシュプル方式 DC/DC コンバータの研究」、パワーエレクトロニクス学会、第 186 回定例研究会、若手のための研究発表会講演予稿集、p.18, 2010