

## 位相シフトフルブリッジ型 DC/DC コンバータの整流ダイオードのサージ電圧発生原理

(読んでほしい人：パワエレ技術者)

2015/10/18 舞鶴高専 平地克也

位相シフトフルブリッジ型は容量の大きな DC/DC コンバータの定番の回路方式であり、ソフトスイッチング可能で高周波ノイズも少ないとされています。確かに 1 次側のスイッチ素子はソフトスイッチングを実現できますが、2 次側の整流ダイオードにはターンオフ時に大きなサージ電圧が発生することがあります。サージ電圧抑制のための対策回路は 1990 年代から検討されていますが、決定版はなく、現在も研究が続けられています。論文はいくつか発表されていますが、サージ電圧の発生原理が正確に分かりやすく説明されたものは見当たりません。本技術メモではサージ電圧の発生メカニズムを詳しく説明します。

### 位相シフトフルブリッジ型 DC/DC コンバータの動作の概要

図 1 に位相シフトフルブリッジ型の基本的な動作モードを示します。電力が 1 次側から 2 次側に伝達される伝達モードと変圧器の漏れインダクタンスのエネルギーで電流が 1 次側を還流する還流モードを交互に繰り返します。位相シフトフルブリッジ型の基本的な動作原理は文献[1]で詳しく説明しているので参照下さい。整流ダイオード D5D6 にサージ電圧が発生するのは還流モードから伝達モードに移行する時です。

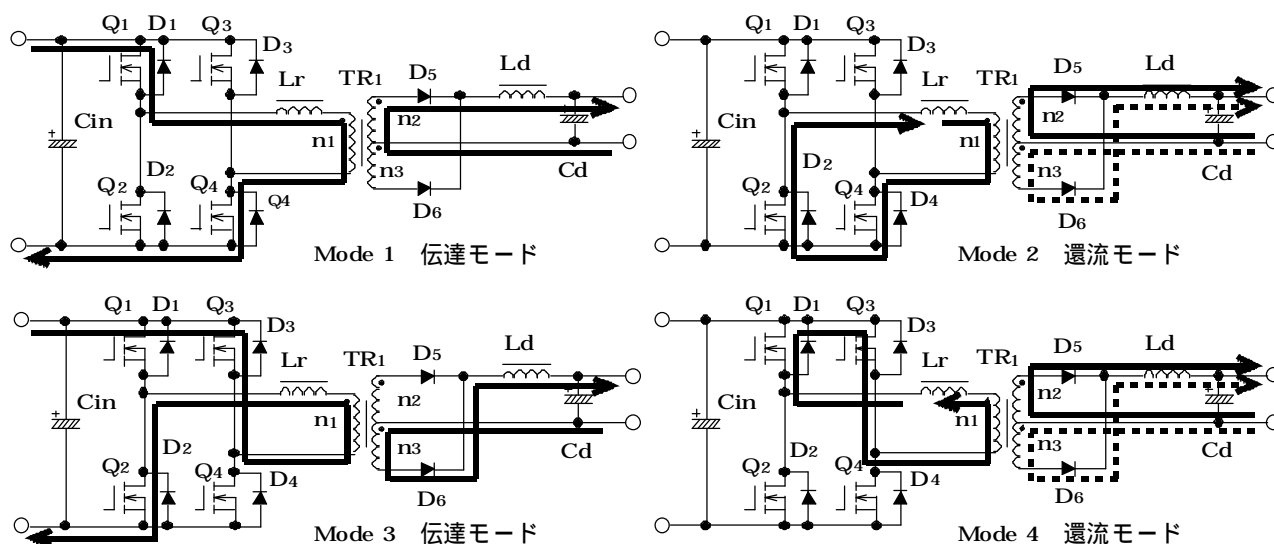


図 1 位相シフトフルブリッジ型 DD コンの 4 つの動作モード  
(Lr は変圧器 TR1 の漏れインダクタンスまたは外付けリアクトルです)

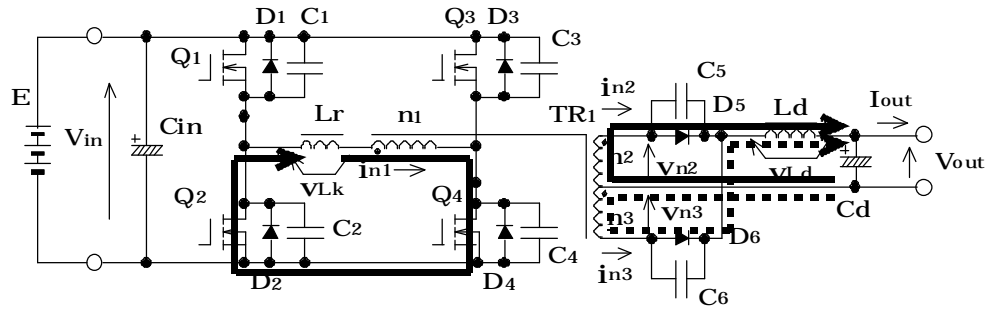
図 2 に還流モードから伝達モードに移行する時の詳しい動作モードを示します。図 2 は文献[2]の図 2 から抜粋したものです。Q4 のターンオフ時は C4 が充電されるので Q4 の電圧は充電に伴って徐々に増加するので ZVS です (Mode3-1)。Q3 のターンオンは D3 が導通している時に行われるのでやはり ZVS です (Mode3-2)。このように 1 次側スイッチ素子はソフトスイッチングを実現しています。

【Mode 2-3】

(還流モード)

Lr のエネルギーで 1 次側を電流が還流。

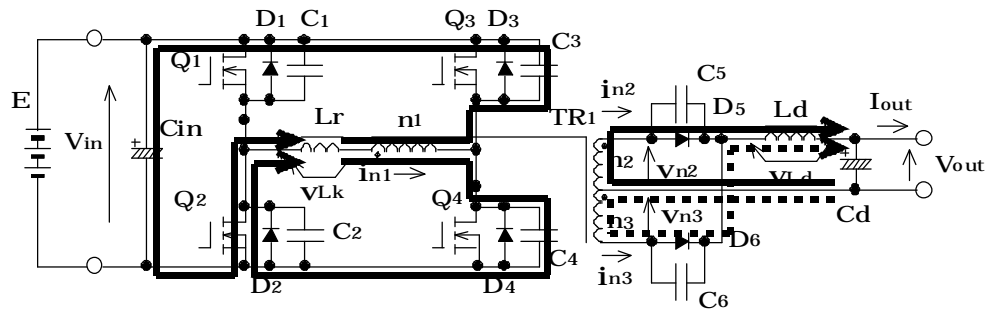
Q4 ターン OFF で次のモードへ。



【Mode 3-1】

(C4 充電 C3 放電)

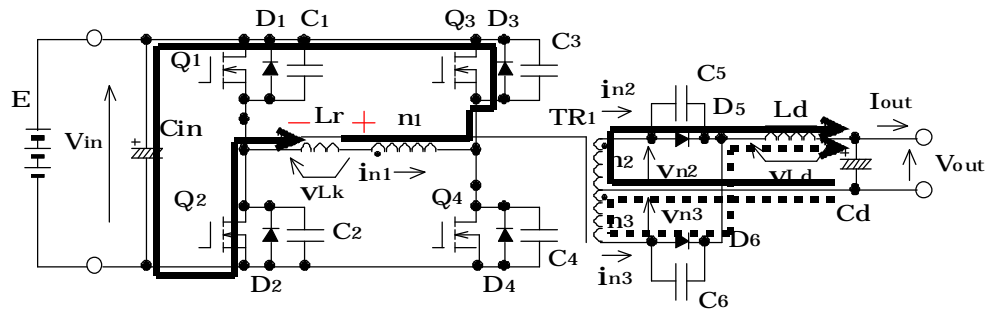
Lr のエネルギーで C4 は充電、C3 は放電される。充放電完了で次のモードへ。



【Mode 3-2】

(D3 導通)

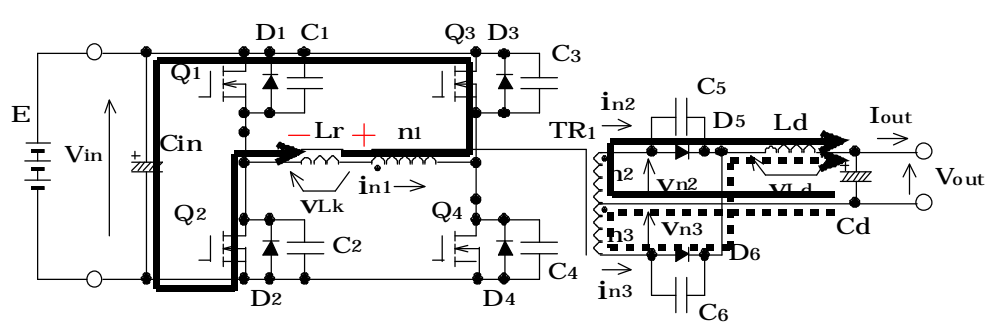
D3 が導通、Lr のエネルギーは Cin に回生される。Q3 ターンオンで次のモードへ。



【Mode 3-3】

(Q3 導通)

Lr の電流は急速に減少し、方向が逆転して次のモードへ。



【Mode 3-4】

(伝達モード)

電源から 2 次側に電力が伝達される。2 次側は D5 は OFF し、D6 のみ導通している。

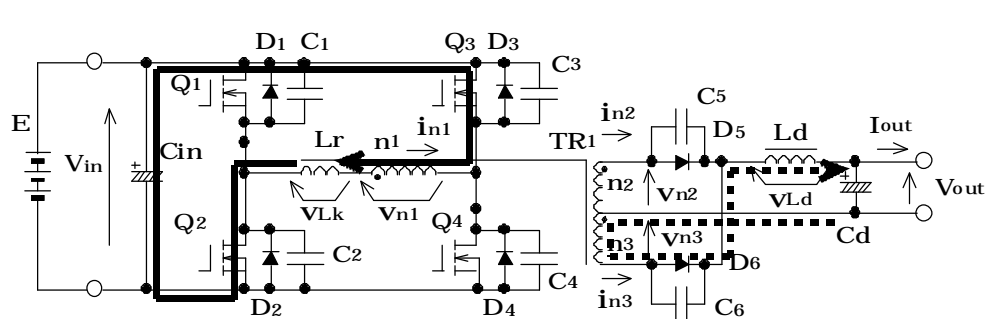


図 2 還流モードから伝達モードに移行するときの動作モード

(平地研究室技術メモ No. 20110930<sup>[2]</sup>の図 2 より)

(D1 ~ D4 は Q1 ~ Q4 の寄生ダイオード、C1 ~ C4 は Q1 ~ Q4 の出力容量とスナバコンデンサ)

### サージ電圧発生メカニズム

図2の Mode3-3 では次の式が成立します。

$$v_{n1} = v_{n2} = v_{n3} = 0V$$

$$v_{Lr} = -V_{in} \dots\dots(1)$$

$$I_{n1} = \frac{1}{L_r} (-V_{in}) T \dots\dots(2)$$

$I_{n1}$  は  $n1$  巻線電流 ( $L_r$  の電流)  $i_{n1}$  の変化量、 $T$  は時間です。式(2)に従って  $i_{n1}$  は急速に減少します。よって  $i_{n1}$  は短時間で 0A となり次の動作モードに移行します。図2では Mode3-3 の次は Mode3-4 になっていますが、実はこの間に過渡的な動作モードが3つ存在し、そのために整流ダイオード  $D_5$  に大きなサージ電圧が発生します。3つの動作モードを図3に示します。それぞれの動作モードを以下に説明します。

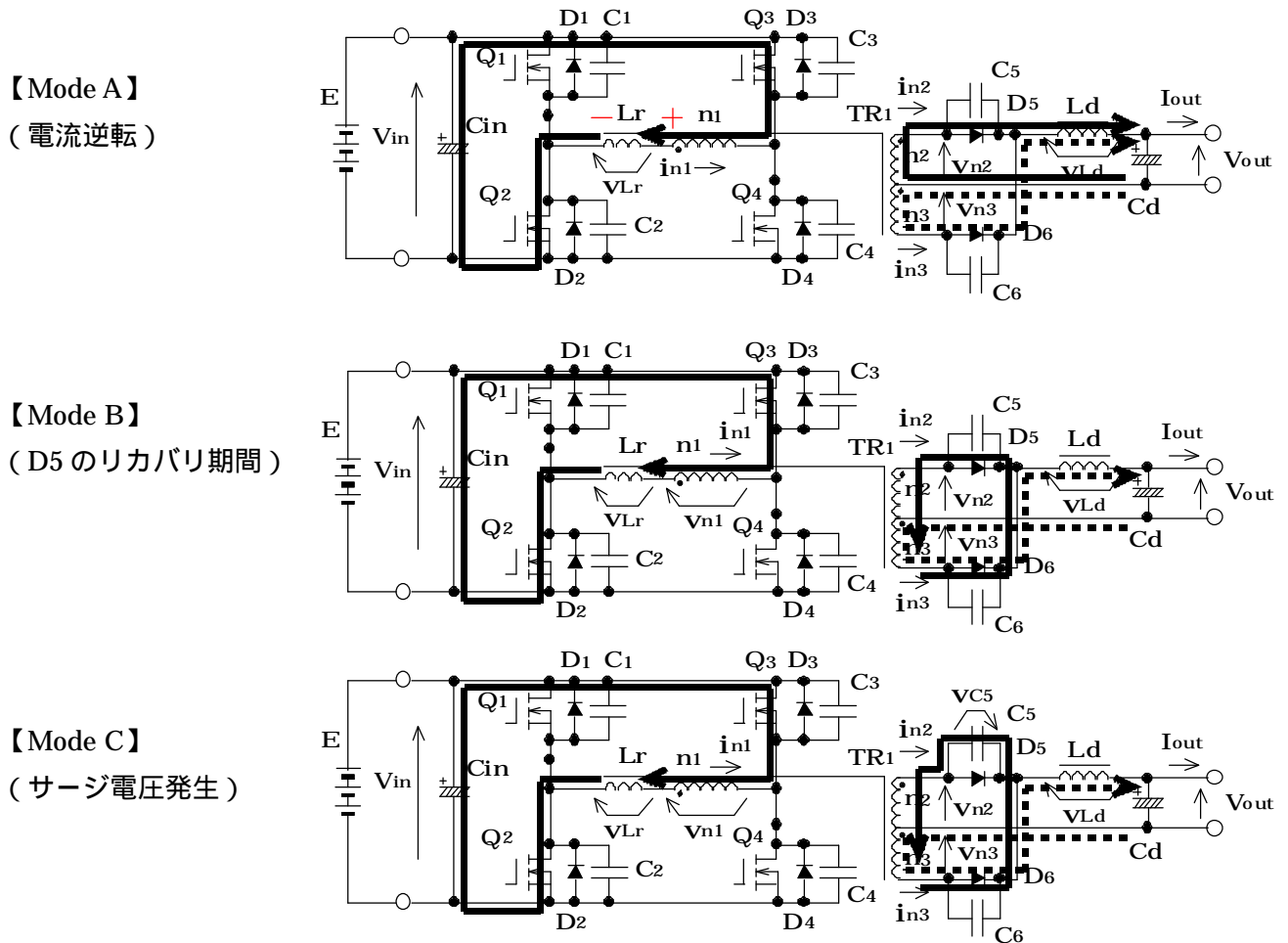


図3 整流ダイオードにサージ電圧が発生する時の動作モード

#### 【Mode A】

Mode 3-3 で  $i_{n1}$  は 0A になりますが、その後も  $L_r$  には電源電圧  $V_{in}$  が逆方向に印加され続けるので

(1)式(2)式はそのまま成立します。そのため $i_{n1}$ は急速に負方向に増加します。TR1の各巻線の電流には次の式が成立します。よって、 $i_{n1}$ の負方向への増加に伴い $i_{n2}$ は急速に減少します。

$$i_{n2} + i_{n3} = iLd$$

$$(i_{n2} - i_{n3}) \frac{n_2}{n_1} = i_{n1}$$

$$\text{よって、 } i_{n2} = \frac{1}{2} \left( \frac{n_1}{n_2} i_{n1} + iLd \right)$$

ただし $i_{n1}$ は負の値です。

従って、 $(-i_{n1})$ が $(\frac{n_2}{n_1} iLd)$ まで、即ち $iLd$ の1次側換算値まで増加すると $i_{n2}$ は0Aとなり、次の動作モードに移行します。

#### 【Mode B】

$i_{n2}$ は即ちD5の電流なので、 $i_{n2}$ が0Aになった後D5のリカバリ時間 $t_{rr}$ の間リカバリ電流 $i_{rr}$ が流れます。この動作モードでは次の式が成立します。

$$i_{n3} = iLd + i_{rr}$$

$$i_{n2} = -i_{rr}$$

$$i_{n1} = -\frac{n_2}{n_1} (i_{n3} - i_{n2}) = -\frac{n_2}{n_1} (iLd + i_{rr} + i_{rr}) = -\frac{n_2}{n_1} (iLd + 2i_{rr})$$

$$v_{n1} = v_{n2} = v_{n3} = 0V$$

$$v_{Lr} = -V_{in}$$

リカバリ電流が流れ終わると次の動作モードに移行します。

#### 【Mode C】

リカバリ期間が終わってもLrは電流を流し続けるので2次側巻線にも電流が流れ続けます。その結果D5のリカバリ電流はC5に転流します。C5はD5の接合容量にスナバ容量を加算したものです。この動作モードでは次の式が成立します。

$$i_{n3} = iLd - i_{n2}$$

$$i_{n1} = -\frac{n_2}{n_1} (i_{n3} - i_{n2})$$

$$v_{n1} = \frac{n_1}{n_2} v_{n2}$$

$$v_{n2} = v_{n3} = \frac{1}{2} v_{C5}$$

$$v_{Lr} = - (V_{in} + v_{n1})$$

$$i_{n1} = \frac{1}{L_r} \int_0^t v_{Lr} dt + I_{n10}$$

$$v_{C5} = \frac{1}{C_5} \int_0^t (-i_{n2}) dt$$

なお、t は Mode C 開始からの時間、 $I_{n10}$  は Mode C 開始時の  $i_{n1}$  の値（初期値）です。 $v_{C5}$  の初期値は 0V です。これらの式から次のことが分かります。

- ・  $L_r$  と  $C_5$  が直列共振している。
- ・  $v_{C5}$ （即ち  $D_5$  電圧）はかなり大きな値に充電される。即ち、 $D_5$  に大きなサージ電圧が生じる。
- ・  $v_{C5}$  は  $i_{n1}$  の初期値が大きいほど大きくなる。

$L_r$  と  $C_5$  の共振現象は回路の抵抗成分により徐々に減衰し、やがて終了し、次の動作モード（Mode 3-4）に移行します。

### サージ電圧発生時の等価回路

以上の検討により Mode C で  $L_r$  と  $C_5$  の共振現象が発生して  $D_5$  にサージ電圧が生じることが分かりますが、等価回路を用いて Mode C を分かり易く検討します。図 3【Mode C】の 2 次側を等価回路で表現した回路図を図 4 に示します。 $L_d$  は定電流源と考えます。 $C_5$  は図 3 では  $n_2$  巻線  $n_3$  巻線双方にまたがって接続されていますが、図 4 のように  $n_3$  巻線だけに接続されていると考えます。その代わり  $C_5$  の容量を 4 倍とします。 $D_5$  は OPEN、 $D_6$  は SHORT します。

図 4 の 2 次側部品を 1 次側に換算し、 $Q_2Q_3$  を SHORT し、さらに Mode C の動作に無関係の部品を消去すると図 5 (a) となります。また、 $L_d$  電流は単に一定の電流を回路に流しているだけであり、 $C_5$  の電圧には無関係なので削除すると図 5 (b) となります。図 5 (b) は  $L_r$  と  $C_5'$  の単純な直列共振回路であり、電流  $i$  の初期値が 0A なら  $C_5'$  の電圧  $v_{C5}'$  は図 5 (c) に示すようにピーク値が  $2V_{in}$  の正弦波となります。実際には  $i$  の初期値はリカバリ電流の 1 次側換算値 ( $2I_{rr} \frac{n_2}{n_1}$ ) となり、 $v_{C5}'$  のピーク

ク値は  $2V_{in}$  よりもっと大きくなります。なお、 $C_5'$  は  $C_5$  の 1 次側換算値であり  $4C_5 \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2$  となり

ます。また、回路には抵抗成分が存在するので共振現象は減衰して  $v_{C5}'$  は  $V_{in}$  に整定します。なお、

$$v_{C5} = 2 \frac{n_2}{n_1} v_{C5}' \text{ です。}$$

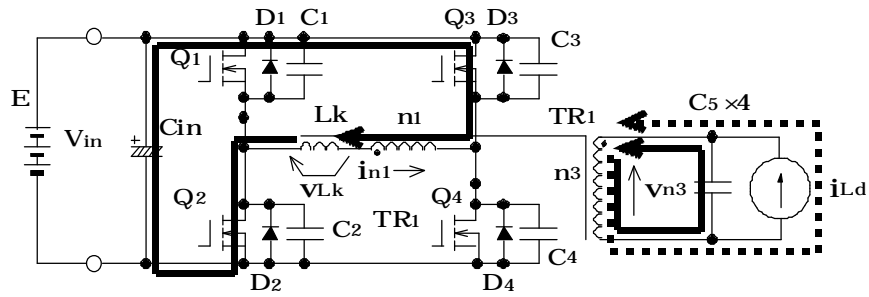


図4 Mode C の 2 次側を等価回路で表現

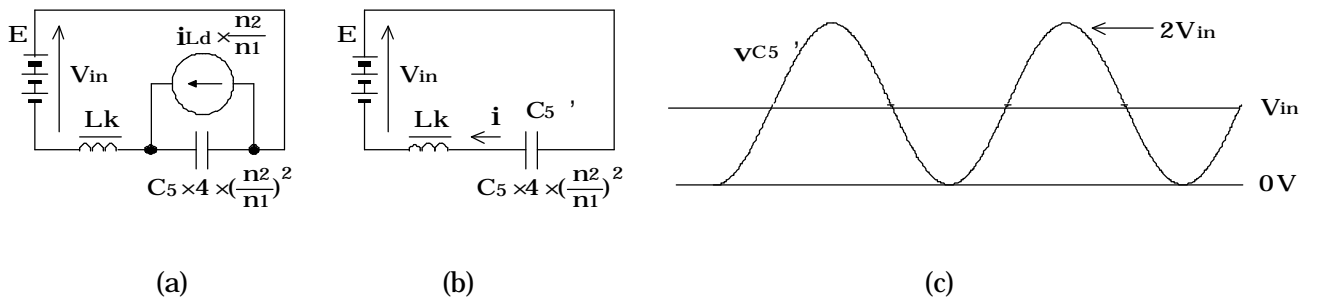


図5 Mode C の等価回路と波形

### 文献

- [1] 平地克也、「位相シフト方式フルブリッジ型 DC/DC コンバータの基本」、平地研究室技術メモ No. 20110731
- [2] 平地克也、「位相シフト方式フルブリッジ型 DC/DC コンバータのソフトスイッチングの原理」、平地研究室技術メモ No. 20110928

以上