

通常のフルブリッジ型 DC/DC コンバータのサージ電圧発生メカニズム

(読んでほしい人：パワエレ技術者)

2016/1/7 舞鶴高専 平地克也

前々回の平地研究室技術メモ^[1]において位相シフト方式フルブリッジ型 DC/DC コンバータのサージ電圧について説明しました。位相シフト方式はいわゆるソフトスイッチング方式ですが、1次側のスイッチ素子にはサージ電圧は発生しないものの2次側の整流ダイオードにはサージ電圧が発生することを説明しました。今回は位相シフト方式ではなく、通常のフルブリッジ型 DC/DC コンバータのサージ電圧発生メカニズムを説明します。この方式はいわゆるハードスイッチング方式ですが、適切に設計すれば位相シフト方式と同様に1次側のスイッチ素子のサージ電圧はほぼ完全に抑制することができます。2次側の整流ダイオードには位相シフト方式とほぼ同じメカニズムでサージ電圧が発生します。

動作の概要

通常のフルブリッジ型 DC/DC コンバータの動作モードと電流経路を図1に示します。Mode 1 から Mode 4 を繰り返しています。各動作モードの概要は次の通りです。

【Mode 1】Q1とQ4がON。1次側から2次側に電力が伝達されている。

【Mode 2】Q1~Q4全てOFF。Ldのエネルギーで2次側を負荷電流が環流している。

【Mode 3】Q2とQ3がON。1次側から2次側に電力が伝達されている。

【Mode 4】Mode 2と同じ。

なお、平地研究室技術メモ No. 20110728^[2]で各動作モードで成立する式などを詳しく説明しているので参照下さい。

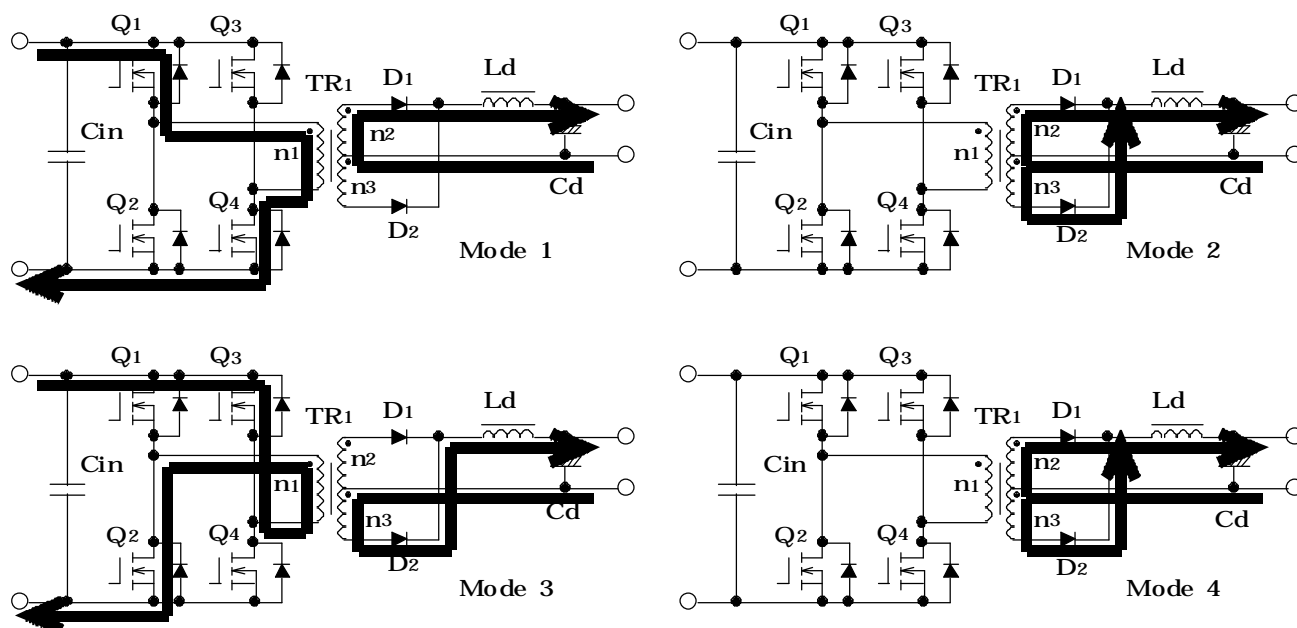
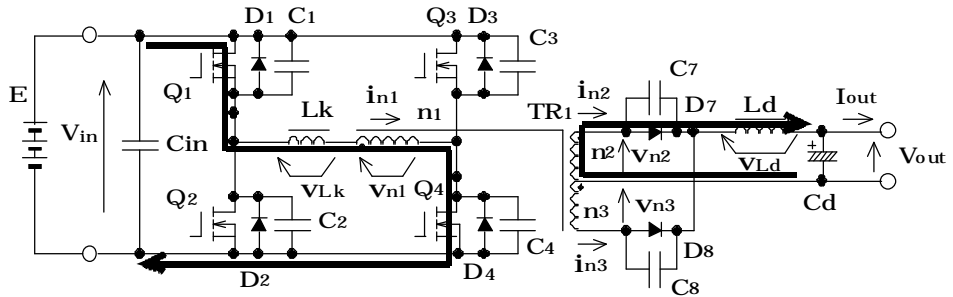


図1 通常のフルブリッジ型 DC/DC コンバータの電流経路

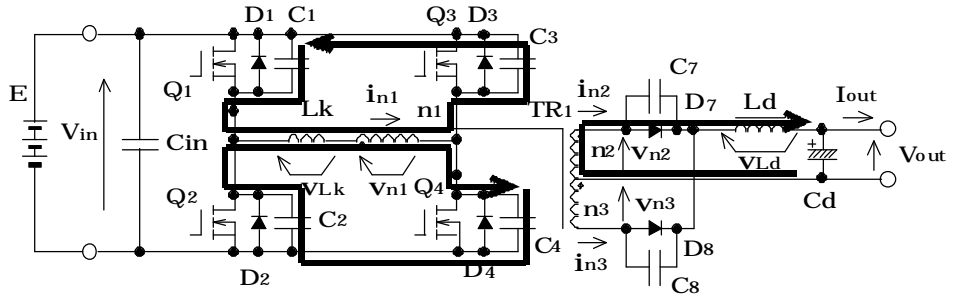
ターンオフ時の動作モード

Mode 1 の状態から Q_1Q_2 がターンオフして Mode 2 に移行する時に過渡的に 3 つの動作モードが発生します。これを Mode A,B,C とします。各動作モードの電流経路を図 2 に示します。

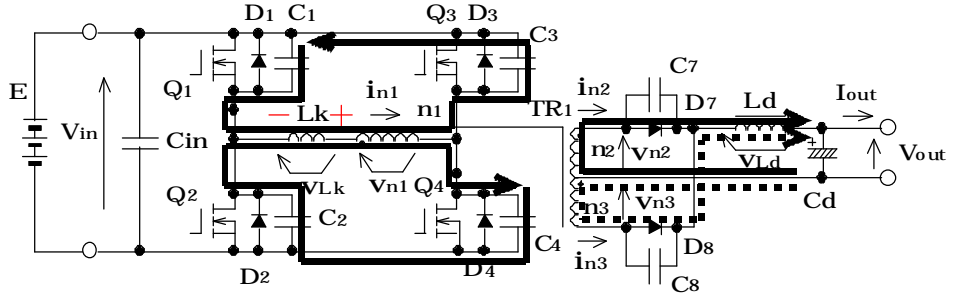
【Mode 1】
(Q_1Q_4 が ON)
2 次側に電力伝達。



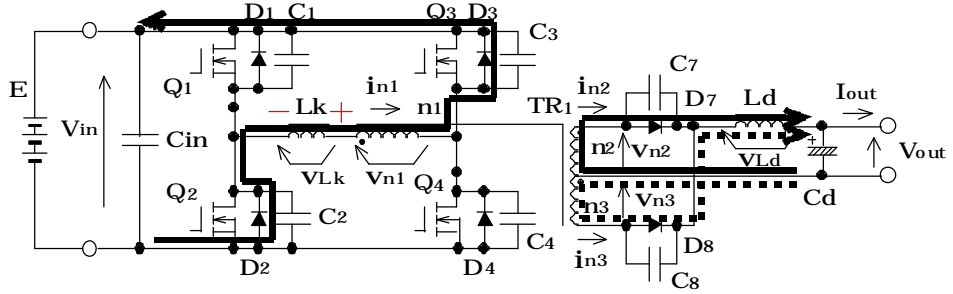
【Mode A】
($Q_1 \sim 4$ 全て OFF)
寄生容量の充放電。
2 次側は D_7 のみ導通。



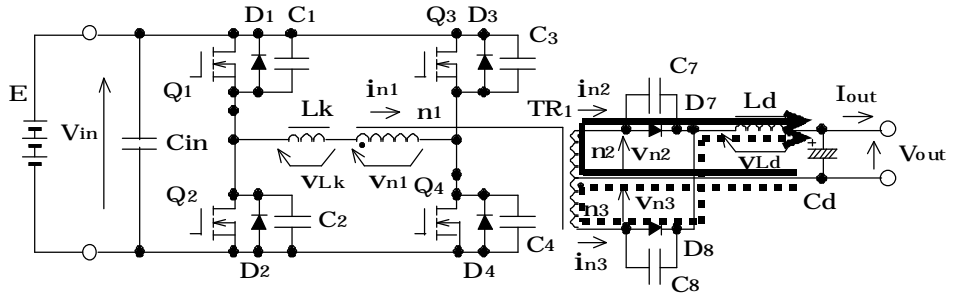
【Mode B】
($Q_1 \sim 4$ 全て OFF)
寄生容量の充放電。
 D_7D_8 共に導通。



【Mode C】
($Q_1 \sim 4$ 全て OFF)
寄生ダイオード
 D_2D_3 導通。



【Mode 2】
($Q_1 \sim 4$ 全て OFF)
負荷電流が 2 次側
を環流。
 $i_{n2} = i_{n3}$



(L_k は TR_1 の漏れインダクタンス、 $D_1 \sim 4$ は FET の寄生ダイオード、 $C_1 \sim 4$ は FET の寄生容量)

図 2 ターンオフ時の動作モード

以下に全ての動作モードの動作の概要を説明します。

【Mode 1】 Q₁ と Q₄ が ON

2 次側に電力が伝達されています。Q₁ と Q₄ が同時にターンオフして Mode A に移行します。

【Mode A】 Q₁~4 全て OFF

Q₁Q₄ がターンオフしたので C₁C₄ が充電されます。次の式が成立します。

$$v_{n1} = V_{in} - (C_1 \text{ 電圧} + C_4 \text{ 電圧}) - v_{Lk}$$

ただし、 $v_{Lk} = 0$

C₁C₄ の充電に伴い C₁ 電圧と C₄ 電圧は急速に増加しますが、 $V_{in}/2$ に達するまでは $v_{n1} > 0$ であり 2 次側の整流ダイオードは D₇ のみ導通しています。C₁ 電圧と C₄ 電圧が $V_{in}/2$ に達して $v_{n1} = 0$ となると Mode B に移行します。

【Mode B】 Q₁~4 全て OFF

変圧器 TR₁ の巻線電圧は 0V となり、D₇ と D₈ が共に導通して L_d の電流は 2 次側を環流します。変圧器の巻線電流には次の式が成立します。

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

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

各部の電圧には次の式が成立します。

$$v_{Ld} = -V_{out}$$

$$v_{Lk} = V_{in} - (C_1 \text{ 電圧} + C_4 \text{ 電圧}) - v_{n1}$$

ただし、 v_{n1} は 0V なので、

$$v_{Lk} = V_{in} - (C_1 \text{ 電圧} + C_4 \text{ 電圧}) < 0$$

v_{Lk} は負となるので図 2 の Mode B に記載のように L_k は右が + 左が - となり L_k の電流は徐々に減少します。C₁ と C₄ の充電が進んで C₁ 電圧と C₄ 電圧が V_{in} を越えると Mode C に移行します。

【Mode C】 Q₁~4 全て OFF

C₁ 電圧 + C₂ 電圧 = C₃ 電圧 + C₄ 電圧 = V_{in} なので、

C₁ 電圧と C₄ 電圧が V_{in} を越えると C₂ 電圧と C₃ 電圧は負となり D₂D₃ が導通します。

その結果 $v_{Lk} = -V_{in}$ となります。この期間に L_k のエネルギーは電源に回生されます。Mode B と同様に次の式が成立します。

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

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

$v_{Lk} = -V_{in}$ なので i_{n1} (L_k 電流) は急速に減少し、その結果 i_{n2} は減少し i_{n3} は増加します。 i_{n1} が 0 となって Mode 2 に移行します。

【Mode 2】 Q₁~4 全て OFF

負荷電流が 2 次側を環流します。Q₂Q₃ がターンオンするまでこの状態が保たれます。巻線電流は次のようになります。

$$i_{n2} = i_{n3}$$

$$i_{n1} = 0$$

ターンオフ時のサージ電圧発生原理

このように、Mode A、Mode B において C_1C_4 が充電されて C_1C_4 の電圧即ち Q_1Q_4 の電圧は急速に上昇しますが、Mode C において D_2D_3 が導通するので C_1C_4 の電圧は電源電圧 V_{in} にクランプされ、それ以上の大きな電圧になることはありません。つまり、 Q_1Q_4 のターンオフ時 Q_1Q_4 には基本的にはサージ電圧は発生しません。

しかしながら、実際のフルブリッジ型 DC/DC コンバータではスイッチ素子のターンオフ時に大きなサージ電圧が発生し、スイッチ素子の破損を防ぐためにスナバ回路を挿入しなければならないことがあります。サージ電圧発生の原因は図 3 に示すようにコンデンサ C_{in} とスイッチ素子の間のラインインダクタンス L_{line} と考えられます。 C_{in} と Q_1-4 の間の配線が長くなり、 L_{line} が無視できない場合は Mode B から Mode C に移行する間に図 3 に示す過渡的な動作モード Mode B' が現れます。

前記のように Mode B において C_1 電圧と C_4 電圧が V_{in} を越えると D_2D_3 が導通して Mode C に移行しようとしませんが、ラインインダクタンス L_{line} のためにこの移行は瞬時には完了せず、図 3 に示すように C_1C_4 充電の径路がしばらくの間併存します。その結果、 C_1C_4 の電圧は V_{in} を超えて上昇します。これは即ち Q_1Q_4 にサージ電圧が発生することを意味します。サージ電圧の結果 L_{line} の電圧には図 3 に図示の方向に電圧が発生します。次の式が成立します。

$$V_{Lline} = C_1 \text{ 電圧} - V_{in} > 0$$

$$V_{Lk} = -C_4 \text{ 電圧} - C_1 \text{ 電圧} < 0$$

L_{line} のインダクタンスは L_k のインダクタンスに比べて充分小さいので L_{line} の電流 i_{Lline} は急速に増加し、やがて L_k 電流 (即ち i_{n1}) と同じ値となり C_1C_4 の充電が終了し Mode C に移行します。なお、実際には完全に Mode C に移行する前に C_1C_4 と L_k の共振によりしばらく C_1C_4 の充放電が継続します。

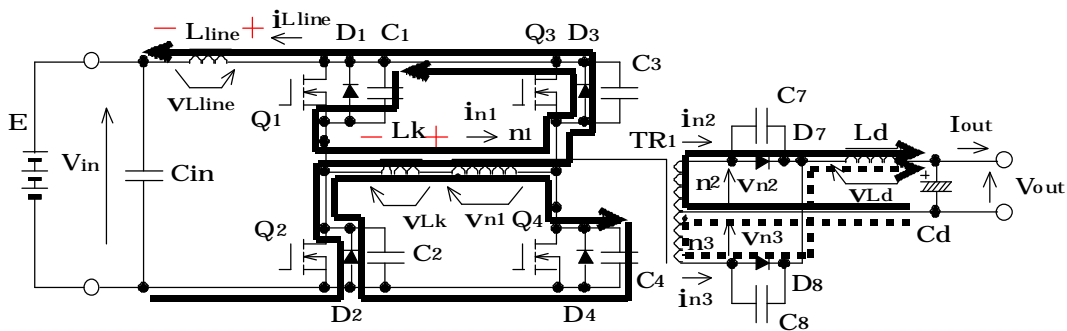


図 3 ラインインダクタンス L_{line} が無視できない場合の動作モード (Mode B')

ターンオン時のサージ電圧発生原理

通常方式のフルブリッジ型 DC/DC コンバータではスイッチ素子がターンオンする時に OFF しているスイッチ素子にサージ電圧が発生します。 Q_1Q_4 がターンオンする時には Q_2Q_3 にサージ電圧が発生します。この原因もラインインダクタンス L_{line} と考えられます。

図 4 に Q_1Q_4 がターンオンした瞬間の電流経路を示します。 C_1C_4 は Q_1Q_4 で短絡されて瞬時に放

電します。C2C3は電源からラインインダクタンス Lline を介して充電されます。したがって Lline が無視できない値なら C2 および C3 との直列共振が発生し、C2 電圧と C3 電圧即ち Q2 電圧と Q3 電圧にサージ電圧とその後のリングング電圧が発生します。

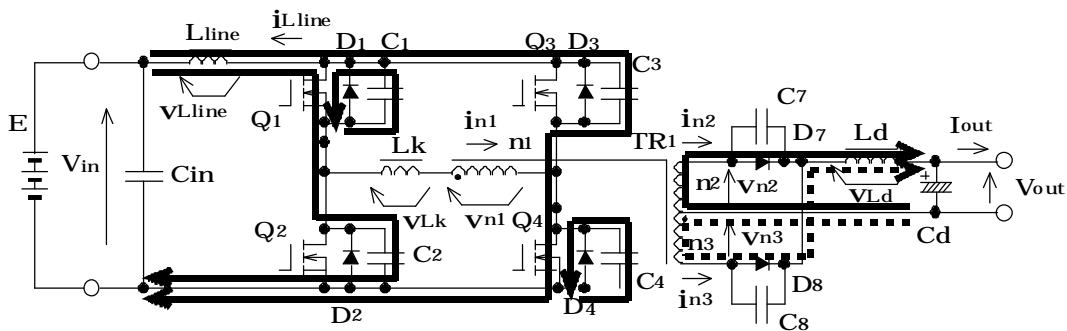


図4 Q1Q4 ターンオン時の電流経路

ターンオン時の2次側整流ダイオードのサージ電圧発生原理

図5に Mode 2 の状態から Q2Q3 がターンオンして Mode 3 に移行する時の詳細な動作モードを示します。Mode 2 と Mode 3 の間に過渡的な動作モード (Mode D,E,F) があります。それぞれの動作モードの概要を説明します。

【Mode 2】Q1~4 全て OFF

負荷電流が2次側を環流しています。各巻線の電流には次の式が成り立ちます。

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

$$i_{n2} = i_{n3}$$

$$i_{n1} = 0$$

Q2Q3 がターンオンして次のモードに移行します。

【Mode D】Q2 と Q3 が ON

Q2Q3 がターンオンしたので図示のように「Cin Q3 n1 Lk Q2 Cin」の径路で1次側に電流が流れ始めます。同時に図4で示した Q1Q4 がターンオンの場合と同様に C1~C4 の急速な充放電が生じますがこの電流経路は煩雑さを避けて図5には図示していません。1次側の電流の増加に伴って i_{n2} は減少、 i_{n3} は増加します。 i_{n2} が 0A となると次のモードに移行します。

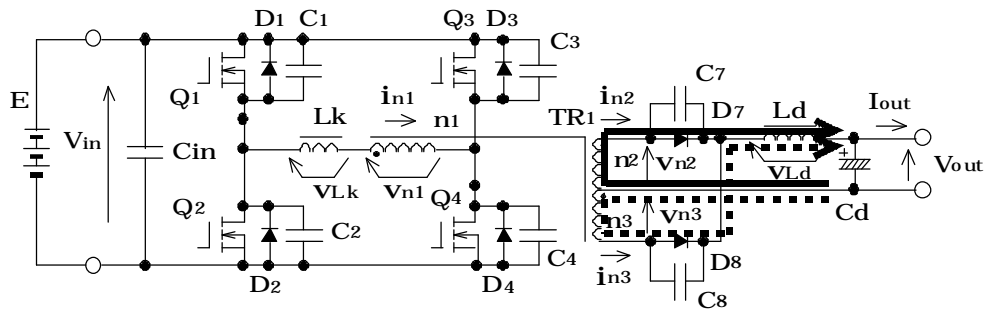
【Mode E】Q2 と Q3 が ON

i_{n2} が 0A となると D5 に逆電圧が印加されて D5 のリカバリ期間の間リカバリ電流 i_{rr} が流れます。リカバリ期間が終了して次のモードに移行します。

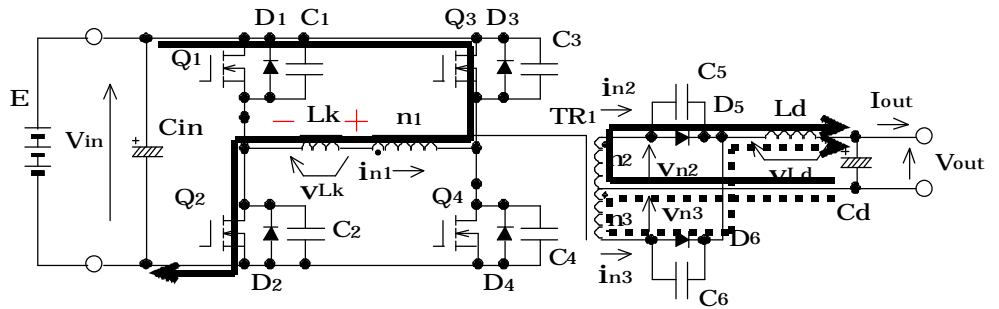
【Mode F】Q2 と Q3 が ON

リカバリ期間終了後も Lk のエネルギーで $n2$ 巻線には負方向の電流が流れ続けます。その結果 C5 は充電が継続され大きな電圧が発生し、これが即ち D5 のサージ電圧です。

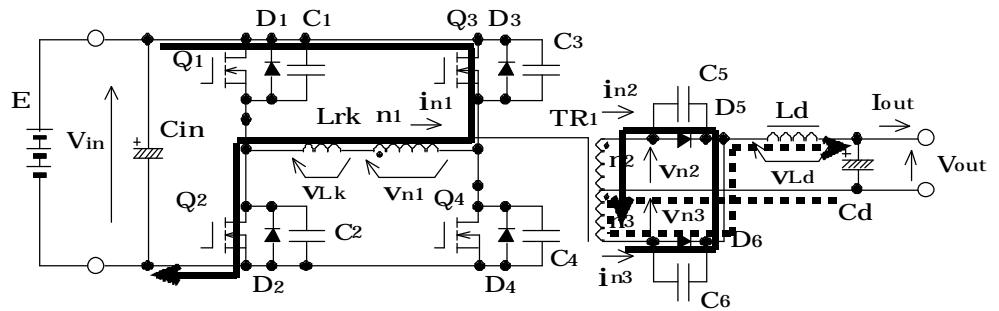
【Mode 2】
(オフ期間)



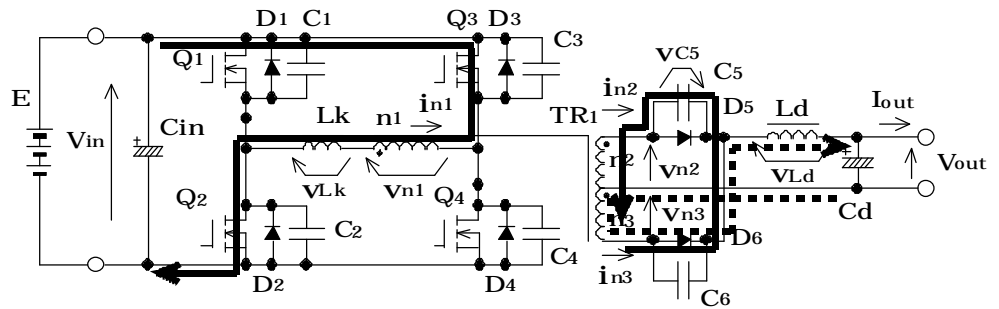
【Mode D】
(Q2Q3 ターンオン)



【Mode E】
(D5のリカバリ期間)



【Mode F】
(サージ電圧発生)



【Mode 3】
(電力伝達)

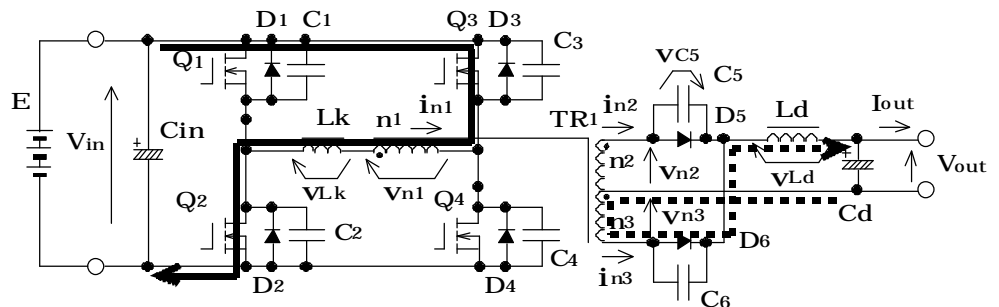


図5 2次側整流ダイオードのサージ電圧発生原理

このように Mode F で D₅ にサージ電圧が発生しますが、このメカニズムは文献 1 で説明した位相シフト方式フルブリッジ型 DC/DC コンバータのサージ電圧発生メカニズムと同じです。従って図 5 の Mode D,E,F は文献 1 の図 3 の Mode A,B,C と同じ式が成立し、同じ等価回路で表せますので詳細は文献 1 を参照下さい。

通常のフルブリッジ方式の実用的価値

以上説明したように通常のフルブリッジ方式は位相シフト方式と同様に 2 次側の整流ダイオードにはサージ電圧が発生しますが 1 次側のスイッチ素子はラインインダクタンスを抑制することでスナバレスでもサージ電圧を抑制できます。経験豊富なメーカーは部品配置を工夫してスナバレスを実現しています。私は時々パワエレメーカーで DC/DC コンバータを見学させていただく機会がありますが、某メーカーで通常のフルブリッジ方式の 100kW の DC/DC コンバータを見せていただいたことがあります。このような大容量でも巧みな部品実装でスナバレスを実現しておられました。

ハードスイッチング方式はソフトスイッチング方式より劣っているようなイメージがありますが、実際の製品には今なおハードスイッチング方式が広く使用されています。今回検討したようにフルブリッジ型 DD コンでは通常方式でも位相シフト方式と同様にサージ電圧の抑制が可能です。通常方式では 1 次側スイッチ素子の寄生容量の電力回生はできませんが、動作周波数が数 10kHz なら寄生容量の放電に伴う電力損失は無視できます。位相シフト方式はソフトスイッチングは可能ですが、欠点もいろいろあります。多くの用途で通常方式が今なお広く使用されているのは経験豊富なメーカーの適切な判断の結果と思います。

< 参考文献 >

- [1] 平地克也、「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」、平地研究室技術メモ No.20151018
- [2] 平地克也、「位相シフト方式フルブリッジ型 DC/DC コンバータの基本」、平地研究室技術メモ No.20110728

以上