

## 位相シフトフルブリッジ方式軽負荷時の励磁電流の振る舞い

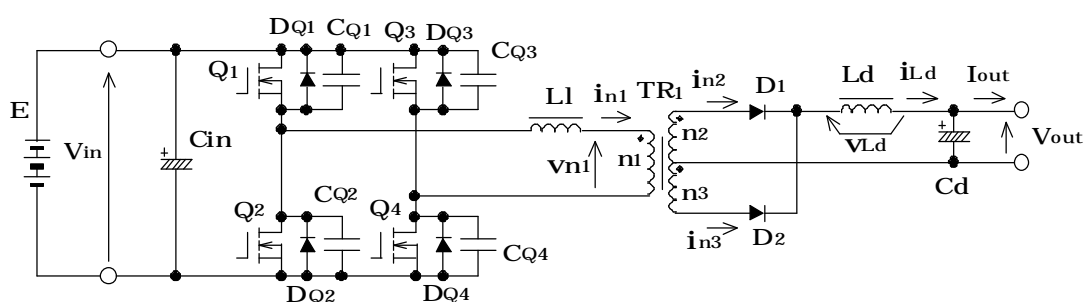
(読んでほしい人：パワーエレクトロニクス技術者)

2017/6/15 舞鶴高専 平地克也

**【あらし】** 近年、位相シフトフルブリッジ方式 DC/DC コンバータは、軽負荷時や微小負荷時でも電力損失を抑制しなければならない用途に使われることが増えています。そのためには、軽負荷時や微小負荷時でもソフトスイッチングを実現する必要があります。軽負荷時にも遅れレグのソフトスイッチングを確保するために、励磁電流を利用することができます。本技術メモでは軽負荷時における励磁電流の振る舞いとソフトスイッチング動作に与える影響を説明します。

### 位相シフトフルブリッジ方式 DC/DC コンバータの回路構成と動作モード

図 1 に位相シフトフルブリッジ方式の回路構成を示します。図 2 にスイッチ素子のタイムチャートと動作モード番号を示します。各動作モードの動作内容とソフトスイッチングの動作原理は平地研究室技術メモ No.20110728<sup>[1]</sup>と No.20110928<sup>[2]</sup>で詳しく説明しているので参照下さい。



(Q1, Q2 を進みレグ、Q3, Q4 を遅れレグとする)

図 1 位相シフトフルブリッジ方式 DC/DC コンバータ

### 位相シフトフルブリッジ方式軽負荷時の遅れレグのソフトスイッチング

位相シフトフルブリッジ方式 DC/DC コンバータでは軽負荷時に遅れレグのソフトスイッチングが難しくなります。平地研究室技術メモではこの問題についてこれまでに次のように取り上げています。

(1) 進みレグのソフトスイッチングと遅れレグのソフトスイッチングのメカニズムの相違

……技術メモ No. 20141214<sup>[3]</sup>

(2) 励磁電流を使って軽負荷時のソフトスイッチングを実現する方法

……技術メモ No. 20140331<sup>[4]</sup>

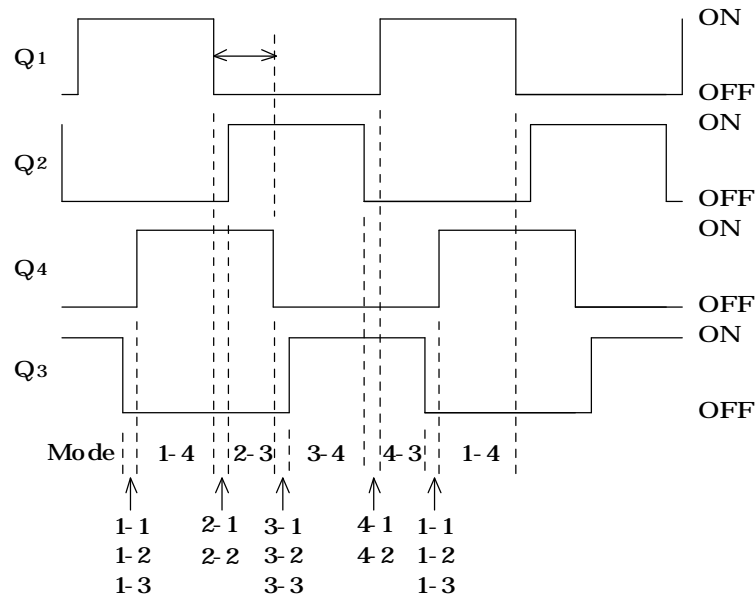
(3) 励磁電流の 2 次側への転流によるソフトスイッチング不成立のメカニズム

……技術メモ No.20140331<sup>[4]</sup>

(4) 補助回路による軽負荷時のソフトスイッチング実現方法

……技術メモ No. 20170501<sup>[5]</sup>

本技術メモではまず(2)と(3)についてそれぞれの場合の電流経路を示して「復習」し、次にその対策を紹介します。



(デッドタイムは実際の値より長く表示している)

図2 スイッチ素子の ON/OFF のタイムチャートと動作モード番号

### 励磁電流による軽負荷時のソフトスイッチング

図3に遅れレグの転流時(Q4からQ3に転流)の電流経路を示します。Mode2-3は環流モードであり、変圧器の漏れインダクタンスLlに蓄積されたエネルギーにより「Ll n1巻線 Q4 Q2 Ll」の経路で負荷電流が環流します。この状態でQ4がターンオフすることによりMode3-1に移行し、Q3とQ4の寄生容量CQ3とCQ4が充放電され、ZVSが実現されます<sup>[2]</sup>。

環流モードの期間中、環流電流in1は次の式に従い徐々に減少します。

$$in1(t) = in1(0) + \frac{1}{L_l} \int_0^t v_{L_l}(t) dt \quad \dots (1)$$

なお、tは環流モード開始時点からの経過時間です。in1(0)は環流モード開始時の環流電流(n1巻線電流)であり、負荷電流に比例します。vLlは漏れインダクタンスLlに印加される電圧であり、スイッチ素子や配線による電圧降下の合計電圧であり、負の値です。したがって、負荷が軽い時はin1(0)が小さいので図3(b)のように環流モードの途中でLlを流れる負荷電流が消滅することがあります。また、消滅しなくても、(2)式を満足できず、CQ3とCQ4の充放電を完了できないことがあります<sup>[2],[5]</sup>。

$$\frac{1}{2} L_l I_{n1}^2 > \frac{1}{2} (C_{Q3} + C_{Q4}) V_{in}^2 \quad \dots (2)$$

なお、In1は環流モード終了時の環流電流です。

しかし、そのような場合でも励磁電流によるソフトスイッチングを期待することができます。図3(b)のようにLlを流れる負荷電流が消滅した場合でも励磁電流は流れ続けているので、この状態でQ4をターンオフすることによりMode3-1に移行し、図3(c)に示すように励磁電流でCQ3とCQ4を充放電させることができます。充放電完了後Mode3-2(図3(d))に移行し、この状態でQ3をター

ンオンさせることにより遅れレグのソフトスイッチングが実現します[4]。

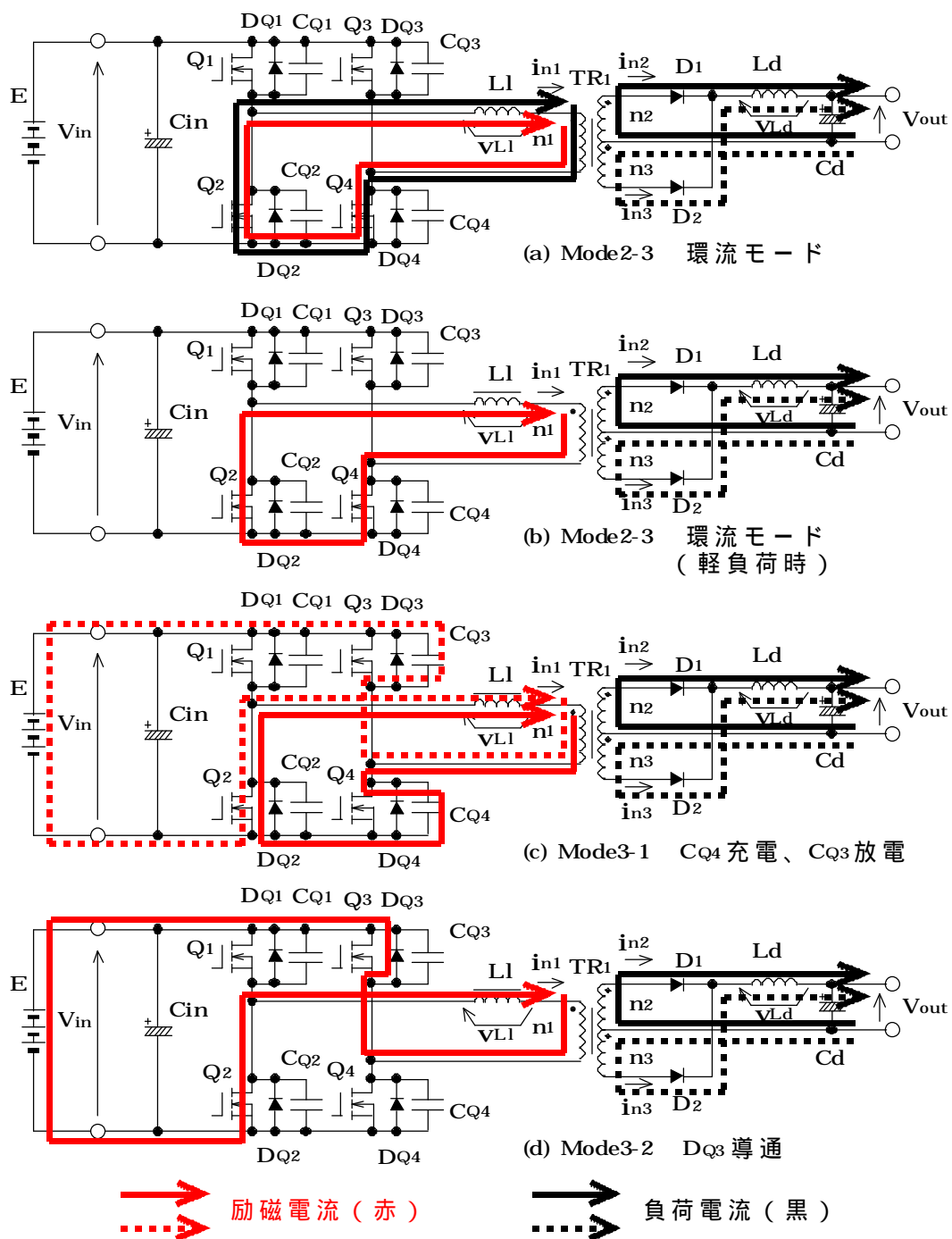


図3 励磁電流による遅れレグの転流動作

### 励磁電流の2次側への転流

このように図3のメカニズムで励磁電流によるソフトスイッチングが実現されるのですが、実際の動作はもう少し複雑です。Mode2-3では軽負荷時でも励磁電流による環流電流を確保できますが、この動作モードでは図4(a)に示すように、励磁電流の電流経路はQ2とQ4を通る1次側の環流電流以外にn3巻線とD2を通る2次側の径路があります。励磁電流は最も流れやすい巻線の流れますが[6]、文献[4]に示したように1次側より2次側の方が流れやすいので、励磁電流は2次側に徐々に転流し

ます。そして Mode3-1 が始まると 2 次側への転流は急速に進行し、 $Q_3, Q_4$  の寄生容量  $C_{Q3}, C_{Q4}$  の充放電が完了せず、ソフトスイッチング失敗となります。ソフトスイッチングを成功させるには漏れインダクタンス  $L_l$  を充分大きくして 2 次側への転流を防ぐ必要があります。

### 平滑リアクトルの電流不連続モード動作の影響

軽負荷時の平滑リアクトル電流  $i_{Ld}$  と励磁電流  $i_m$  の波形を図 5 (a) に示します。平滑リアクトル電流  $i_{Ld}$  の平均値が出力電流  $I_{out}$  です。図 5 (a) では  $i_{Ld}$  はまだ連続モードですが、さらに軽負荷となり  $I_{out}$  が小さくなると図 5 (b) のように  $i_{Ld}$  が不連続モードとなります。 $i_{Ld}$  が 0A となるのは環流モードの末期であり、励磁電流  $i_m$  は最大値となっています。この時の電流経路を図 4 (b) に示します。 $L_d$  には電流が流れないので励磁電流の 2 次側の径路は遮断され、1 次側のみを流れます。この状態で  $Q_4$  がターンオフすると Mode3-1 に移行し、励磁電流のエネルギーで  $Q_3, Q_4$  の寄生容量  $C_{Q3}, C_{Q4}$  の充放電が完了させ、 $Q_3$  の ZVS でのターンオンを可能とすることができます。

さらに出力電流  $I_{out}$  が小さくなった時の波形を図 5 (c) に示します。伝達モードの期間が非常に短くなり、その結果  $n_1$  巻線電圧  $v_{n1}$  の電圧時間積が小さくなり、励磁電流  $i_m$  が小さくなります。このように励磁電流が小さくなると、Mode3-1 での励磁電流のエネルギーによる  $C_{Q3}, C_{Q4}$  の充放電は完了せず、ソフトスイッチング失敗となります。このような場合でもソフトスイッチングを実現させるためには文献[5]で紹介したように補助回路を設けるのが普通ですが、近年、このような場合でも補助回路なしでソフトスイッチングを実現する方法が提案されています[7]。図 5 (d) に示すように伝達モードの時間を短縮するのではなく、周波数を低減させることにより微少負荷に対応します。その結果、励磁電流の大きさを確保することができ、Mode3-1 での  $Q_3, Q_4$  の寄生容量の充放電を実現します。

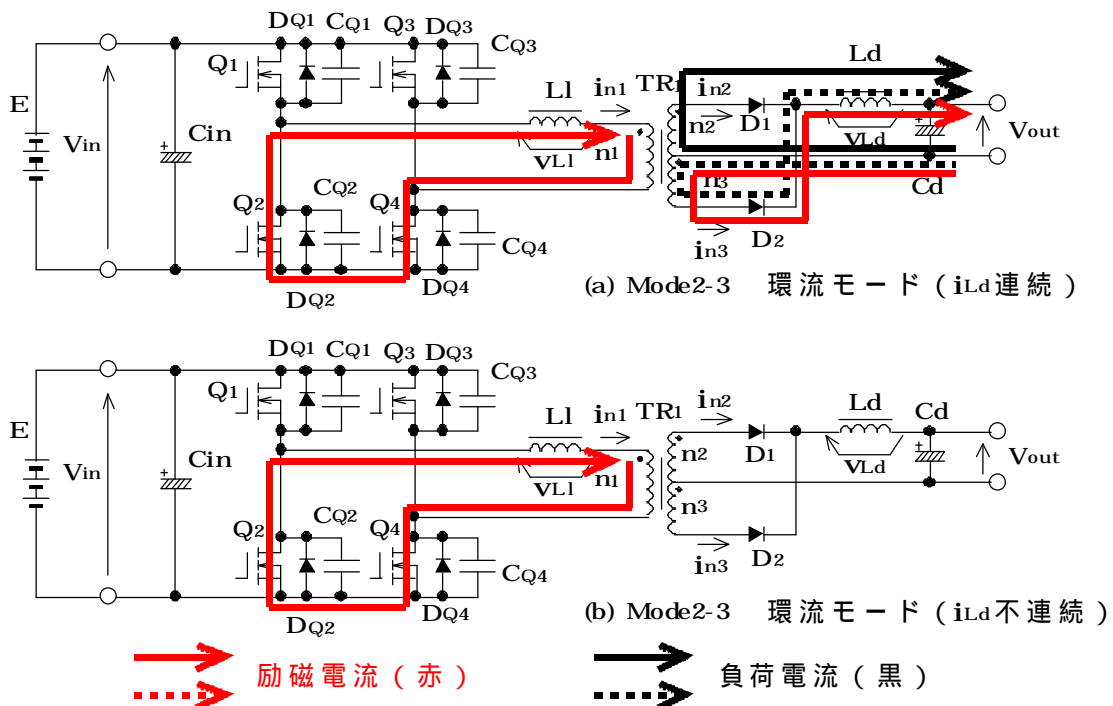
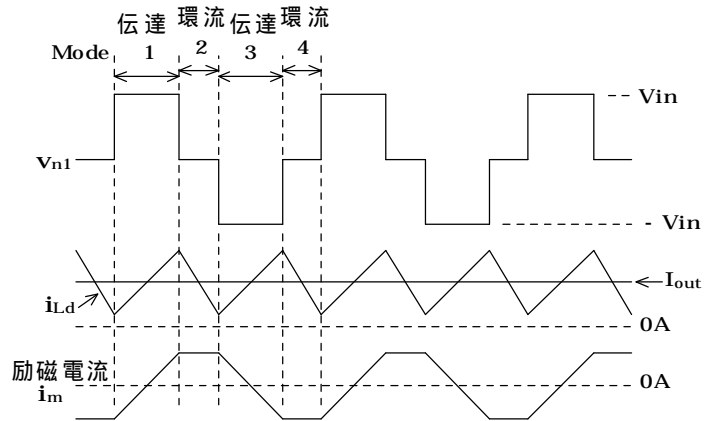
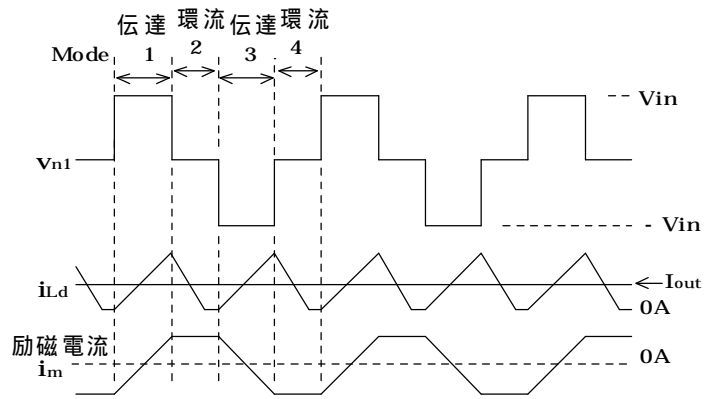


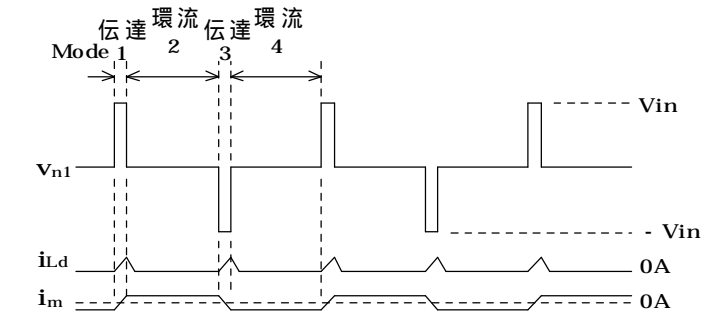
図 4 励磁電流の電流経路



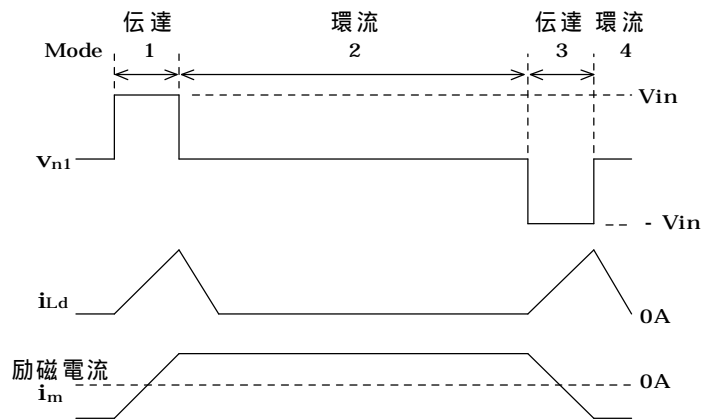
(a) 軽負荷時 (リアクトル電流連続)



(b) 軽負荷時 (リアクトル電流不連続)



(c) 微小負荷時



(d) 微小負荷時 (周波数低減)

図5 軽負荷時の平滑リアクトル電流と励磁電流の波形

## 軽負荷時の動作まとめ

軽負荷時の遅れレグのソフトスイッチングについてまとめると次のようになります。

軽負荷時は変圧器の漏れインダクタンスに蓄積されるエネルギーが小さいので、漏れインダクタンスによるソフトスイッチングは実現できない。

軽負荷時でも励磁電流は小さくならないので、励磁電流のエネルギーによるソフトスイッチングを期待することができる。

しかし、励磁電流の2次側への転流現象が発生するので、励磁電流によるソフトスイッチングを実現するためには、漏れインダクタンスも大きくする必要があります。

平滑リアクトルの電流不連続モード動作を利用すれば、励磁電流の2次側への転流現象を防ぐことができる。

微少負荷時は伝達モードの期間が短くなるので励磁電流が小さくなり、励磁電流によるソフトスイッチングは困難となる。

微少負荷時でもソフトスイッチングを実現するには、補助回路を付加する方法や動作周波数を下げる方法などがある。

## 参考文献

- [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.20110728
- [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
- [3] 平地克也、「進みレグのソフトスイッチングと遅れレグのソフトスイッチング」, 平地研究室技術メモ No.20141214
- [4] 平地克也、「位相シフト方式フルブリッジ型 DC/DC コンバータの励磁電流によるソフトスイッチング」, 平地研究室技術メモ No.20140331
- [5] 平地克也、「位相シフトフルブリッジ方式の軽負荷時のソフトスイッチング方法」, 平地研究室技術メモ No.20170501
- [6] 平地克也、「励磁電流の重要な性質」, 平地研究室技術メモ No. 20100817
- [7] Jong-Woo Kim, Duk-You Kim, Chong-Eun Kim, and Gun-Woo Moon, "A Simple Switching Control Technique for Improving Light Load Efficiency in a Phase-Shifted Full-Bridge Converter with a Server Power System", Proc of ECCE 2015, pp.1485-1488

以上