

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

(読んでほしい人：パワエレ初心者)

2011/9/28 舞鶴高専 平地克也

回路構成とタイムチャート

平地研究室技術メモ No.20110728 にて位相シフト方式フルブリッジ型 DC/DC コンバータ (以下位相シフトフルブリッジ DD コンと略す) の基本動作を説明した(1)。本技術メモではこの回路方式のソフトスイッチングの原理を説明する。図 1 にソフトスイッチングの可能な位相シフトフルブリッジ DD コンの回路構成を示す。文献(1)で紹介した回路に対して 4 つのスイッチ素子 $Q_1 \sim Q_4$ と並列にコンデンサ $C_{Q1} \sim C_{Q4}$ を追加している。ソフトスイッチングを実現するにはこれらのコンデンサが必要である。

- (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、カテゴリー：DC/DC コンバータ、2011 年 7 月

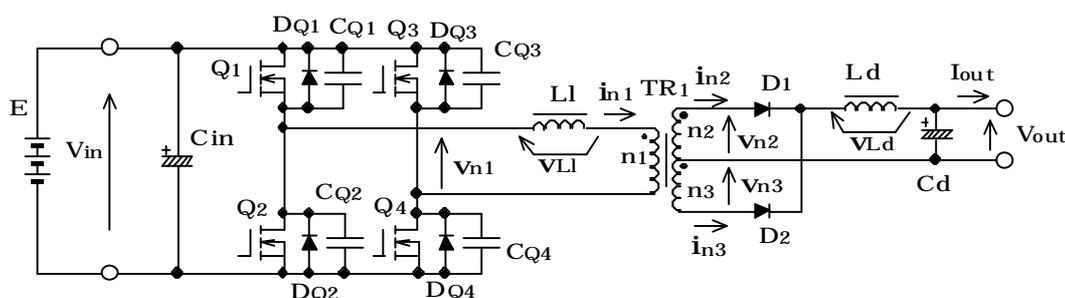


図 1 位相シフト方式フルブリッジ型 DC/DC コンバータ

(L_1 は TR_1 の漏れインダクタンス。 $D_{Q1} \sim D_{Q4}$ は $Q_1 \sim Q_4$ の寄生ダイオード)

図 2 にスイッチ素子 $Q_1 \sim Q_4$ の ON/OFF のタイムチャートと動作モードを示す。平地研究室技術メモ No.20110728 で説明したように、 Q_1 と Q_2 および Q_3 と Q_4 はそれぞれ互い違いに ON/OFF する。しかし、正確には図 2 に示すように全ての素子のターンオンには少し遅延時間を設けねばならない。例えば Q_2 のターンオンは Q_1 のターン OFF と同時ではなく、 Q_1 のターン OFF から少し時間を置いてから行われる。この短い遅延時間がソフトスイッチングの実現に重要な役割を果たす。

平地研究室技術メモ No.20110728 ではこの回路方式は $Q_1 \sim Q_4$ の ON/OFF に応じて Mode 1 ~ Mode 4 の 4 つの動作モードがあることを説明した。しかし、コンデンサ $C_{Q1} \sim C_{Q4}$ の付加、およびターンオンの遅延時間の存在を考慮すれば動作モードは複雑になる。例えば、図 2 に示すように Mode 1 はさらに Mode 1-1 ~ Mode 1-4 に細分化される。このうち Mode 1-1 ~ Mode 1-3 の 3 つの動作モードは Q_4 のターンオンの短い遅延時間の間に発生する。同様に Mode 2、Mode 3、Mode 4 もそれぞれ 3 つまたは 4 つの動作モードに細分化され、各スイッチ素子のターンオン遅延時間の間に沢山の動作モードが発生する。位相シフトフルブリッジ DD コンのソフトスイッチング動作を検討するためには、やや煩雑ではあるが、これら全ての動作モードにおける電流経路と回路各部の電圧電流波形を正確に理解しなければならない。

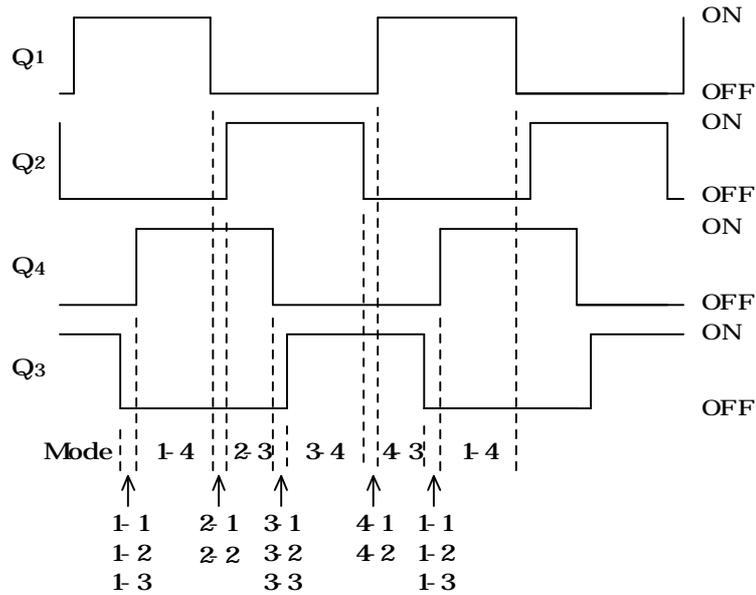


図2 スイッチ素子の ON/OFF と動作モード

ソフトスイッチングを実現した時の回路の動作

図3に位相シフトフルブリッジ DD コンにおいてソフトスイッチングを実現した時の各動作モードの電流経路を示す。なお、動作モードは14ヶあるので図3は3頁に渡って記載されている。以下、図3を参照しながら全ての動作モードの動作を説明する。説明の都合上 Mode 1-4 から説明を開始する。

【Mode 1-4】Q1 と Q4 が ON

Q1 と Q4 が ON しているので変圧器 TR1 の 1 次側には入力電圧 V_{in} が印加されており D1 が導通して 2 次側に電力が供給されている。変圧器の漏れインダクタンス L1 には大きな電流が流れておりエネルギーが蓄積されている。L1 のエネルギーがこの回路の動作に大きな影響を与える。

Q1 がターン OFF して次の動作モードに移行する。

【Mode 2-1】Q4 のみ ON

Q1 がターンオフすると次の径路で C_{Q1} が充電される。

電源 E のプラス側 C_{Q1} n1 巻線 Q4 電源 E のマイナス側

Q1 ターンオフの瞬間は C_{Q1} の電圧は 0V なので Q1 のターンオフは ZVS である。ただし、 C_{Q1} があまり小さいと Q1 がターンオフして電流がゼロになる前に C_{Q1} の電圧が上昇してしまい、ZVS とならない。 C_{Q1} の充電時間が Q1 のターンオフ時間より充分大きくなるように C_{Q1} の容量を選択する。

C_{Q1} の充電と同時に C_{Q2} が次の径路で放電する。

C_{Q2} n1 巻線 Q4 C_{Q2}

C_{Q1} と C_{Q2} の充放電が完了すると次の動作モードに移行する。

【Mode 2-2】Q₄のみ ON

C_{Q1} と C_{Q2} の充放電が完了しても L₁ のエネルギーがまだ残っているので L₁ の電流は次の径路で流れ続ける。

L₁ (n₁ 巻線) Q₄ D_{Q2} L₁

この状態で Q₂ がターンオンして次の動作モードに移行する。この時 D_{Q2} が導通しているため Q₂ の電圧はほぼ 0V である。よって、Q₂ のターンオンは ZVS である。

【Mode 2-3】Q₂ と Q₄ が ON

L₁ のエネルギーで引き続き次の径路で電流が循環する。Q₂ の電流は負方向(ソースからドレイン) である。

L₁ (n₁ 巻線) Q₄ Q₂ L₁

L₁ には Q₄ と Q₂ の電圧降下が逆方向 (v_{L1} が負の方向) に印加される。そのため L₁ の電流は徐々に減少し、L₁ のエネルギーも徐々に減少する。

Q₄ がターン OFF して次の動作モードに移行する。

【Mode 3-1】Q₂のみ ON

Q₄ がターンオフすると次の径路で C_{Q4} が充電される。

L₁ (n₁ 巻線) C_{Q4} Q₂ L₁

Q₄ ターンオフの瞬間は C_{Q4} の電圧は 0V なので Q₄ のターンオフは ZVS である。ただし、C_{Q4} があまり小さいと Q₄ がターンオフして電流がゼロになる前に C_{Q4} の電圧が上昇してしまい、ZVS とならない。C_{Q4} の充電時間が Q₄ のターンオフ時間より充分大きくなるように C_{Q4} の容量を選択する。

C_{Q4} の充電と同時に C_{Q3} が次の径路で放電する。

L₁ (n₁ 巻線) C_{Q3} E Q₂ L₁

C_{Q4} と C_{Q3} の充放電が完了すると次の動作モードに移行する。なお、C_{Q4} と C_{Q3} の充放電は L₁ のエネルギーで行われる。よって、充放電が完了するには Mode 3-1 の開始時点において L₁ に十分なエネルギーが残っていなければならない。

【Mode 3-2】Q₂のみ ON

C_{Q4} と C_{Q3} の充放電が完了しても L₁ のエネルギーがまだ残っているので L₁ の電流は次の径路で流れ続ける。

L₁ (n₁ 巻線) D_{Q3} E Q₂ L₁

この状態で Q₃ がターンオンして次の動作モードに移行する。D_{Q3} が導通しているため Q₃ の電圧はほぼ 0V である。よって、Q₃ のターンオンは ZVS である。

【Mode 3-3】Q₂ と Q₃ が ON

引き続き L₁ のエネルギーで次の径路で電流が流れる。

L₁ (n₁ 巻線) Q₃ E Q₂ L₁

L₁ には入力電圧 V_{in} が逆方向に印加され L₁ の電流は急速に減少し、すぐに反転して次の動作モードに移行する。

【Mode 3-4】 Q₂ と Q₃ が ON

Mode 3-3 から L₁ の電流の方向が反転し、次の径路で電流が流れる。

電源 E のプラス側 Q₃ n₁ 巻線 Q₂ 電源 E のマイナス側

変圧器 TR₁ の 1 次側には入力電圧 V_{in} が負方向に印加されており 2 次側に電力が供給される。TR₁ の電圧が負なので 2 次側は D₂ が導通する。

Q₂ がターン OFF して次の動作モードに移行する。

【Mode 4-1】 Q₃ のみ ON

Q₂ がターンオフすると次の径路で C_{Q2} が充電される。

電源 E のプラス側 Q₃ n₁ 巻線 C_{Q2} 電源 E のマイナス側

C_{Q2} の充電と同時に C_{Q1} が次の径路で放電する。

C_{Q1} Q₃ n₁ 巻線 C_{Q1}

この動作モードは Mode 2-1 と対称の関係にある。Mode 2-1 では C_{Q1} が充電、C_{Q2} が放電されたのに対し、このモードでは C_{Q2} が充電、C_{Q1} が放電される。

C_{Q2} と C_{Q1} の充放電が完了すると次の動作モードに移行する。

【Mode 4-2】 Q₃ のみ ON

この動作モードは Mode 2-2 と対称の関係にある。

C_{Q2} と C_{Q1} の充放電が完了しても L₁ のエネルギーがまだ残っているので L₁ の電流は次の径路で流れ続ける。

L₁ (n₁ 巻線) D_{Q1} Q₃ L₁

この状態で Q₁ がターンオンして次の動作モードに移行する。D_{Q1} が導通しているため Q₁ の電圧はほぼ 0V である。よって、Q₁ のターンオンは ZVS である。

【Mode 4-3】 Q₁ と Q₃ が ON

Mode 2-3 と対称の関係にある。

L₁ のエネルギーで引き続き次の径路で電流が循環する。

L₁ (n₁ 巻線) Q₁ Q₃ L₁

Q₃ がターン OFF して次の動作モードに移行する。

【Mode 1-1】 Q₁ のみ ON

Mode 3-1 と対称の関係にある。

Q₃ がターンオフすると次の径路で C_{Q3} が充電される。

L₁ (n₁ 巻線) Q₁ C_{Q3} L₁

C_{Q3} の充電と同時に C_{Q4} が次の径路で放電する。

L₁ (n₁ 巻線) Q₁ E C_{Q4} L₁

C_{Q3} と C_{Q4} の充放電が完了すると次の動作モードに移行する。

【Mode 1-2】Q₁のみ ON

Mode 3-2 と対称の関係にある。

C_{Q3} と C_{Q4} の充放電が完了しても L_I のエネルギーがまだ残っているので L_I の電流は次の径路で流れ続ける。

L_I (n₁ 巻線) Q₁ E D_{Q4} L_I

この状態で Q₄ がターンオンして次の動作モードに移行する。D_{Q4} が導通しているため Q₄ の電圧はほぼ 0V である。よって、Q₄ のターンオンは ZVS である。

【Mode 1-3】Q₁ と Q₄ が ON

Mode 3-3 と対称の関係にある。

引き続き L_I のエネルギーで次の径路で電流が流れる。

L_I (n₁ 巻線) Q₁ E Q₄ L_I

L_I には入力電圧 V_{in} が電流を妨げる方向に印加され L_I の電流は急速に減少し、すぐに反転して Mode 1-4 に移行する。

位相シフトフルブリッジ DD コンのソフトスイッチング実現のための課題

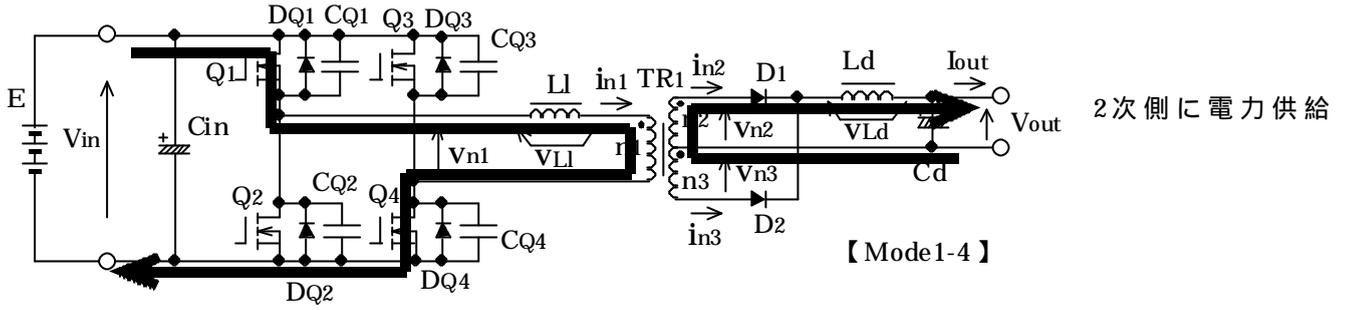
このように、位相シフトフルブリッジ DD コンでは変圧器の漏れインダクタンス L_I とコンデンサ C_{Q1} ~ C_{Q4} の働きにより、スイッチ素子 Q₁ ~ Q₄ の全ての ON/OFF 動作において ZVS を実現することができる。ただし、動作モードの説明の中でも記載したように、ZVS の実現には次の 2 つの条件を満たさねばならない。

- (1) C_{Q1} ~ C_{Q4} の充放電の時間がスイッチ素子のターンオフ時間より充分長くなるように C_{Q1} ~ C_{Q4} の容量を決定しなければならない。
- (2) 変圧器の漏れインダクタンス L_I に蓄積されるエネルギーは C_{Q1} ~ C_{Q4} の充放電を完了させることができる充分な大きさを持たねばならない。

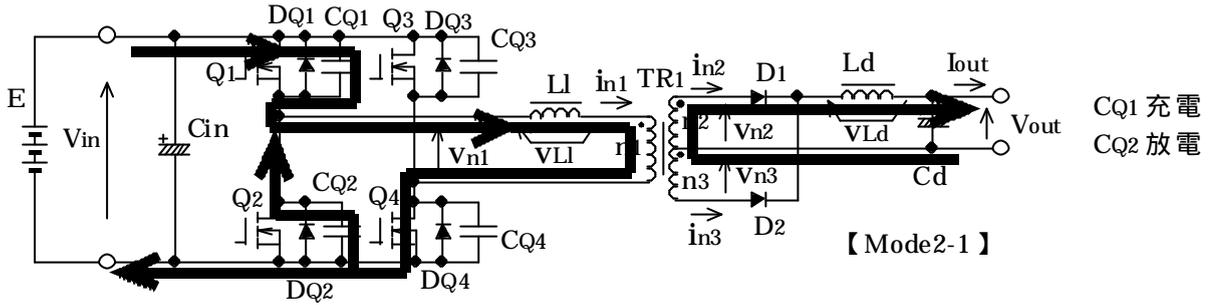
L_I に蓄積されるエネルギーは負荷電流に比例する。したがって、軽負荷時は L_I のエネルギーは小さく、(2)の条件を満たすことはできない。軽負荷時も ZVS を実現させるためには別の方法、例えば変圧器 TR₁ の励磁電流を使って C_{Q1} ~ C_{Q4} を充放電するような方法を適用しなければならない。また、負荷が重い時でも、(2)の条件を満足させるには L_I のインダクタンスをかなり大きくしなければならない。そのためには漏れ磁束を増やす必要があるが、高周波の漏れ磁束は巻線の損失を増加させるので特別な対策が必要となる。また、Mode 2-3 と Mode 4-3 では変圧器の 1 次側に循環電流が流れるが、この電流による損失も無視できない。

このように、位相シフトフルブリッジ DD コンでソフトスイッチングを実現するためには問題も多く、ハードスイッチングよりかえって効率の悪化を招くことが多い。無理にソフトスイッチングを目指さない設計が現実的である。このような問題点を改善するために改良された回路方式が沢山提案されている。しかしまだ決定版はなく、今なお研究されている。

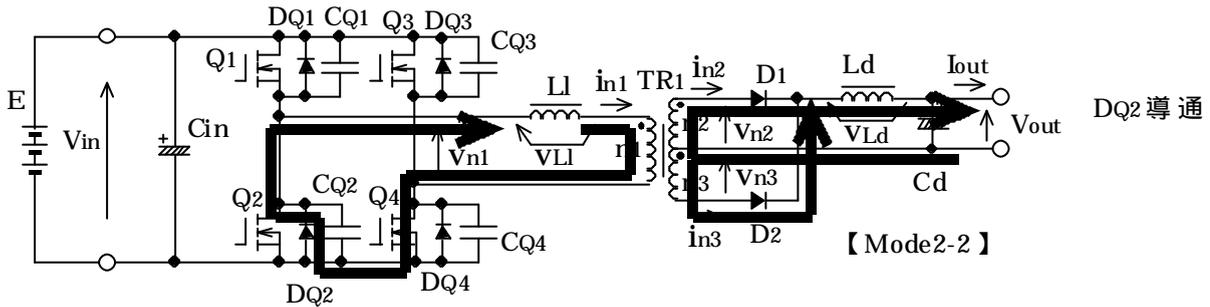
図3 ソフトスイッチングを実現した時の電流経路



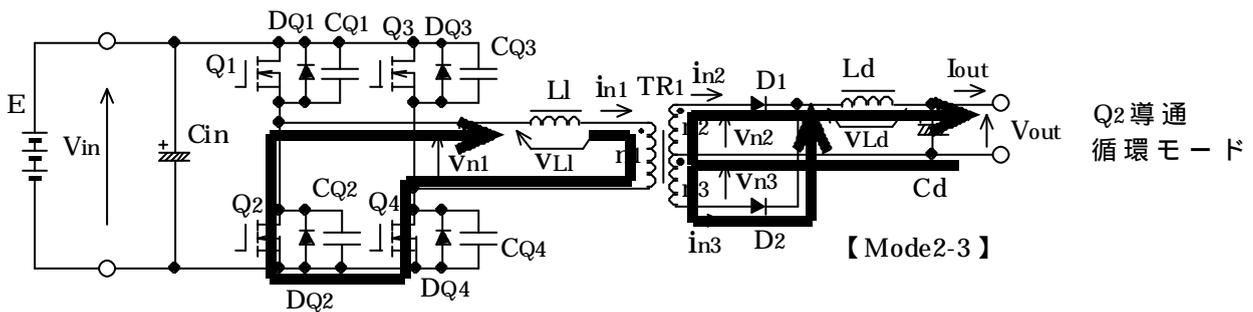
Q1ターンオフ (ZVS)



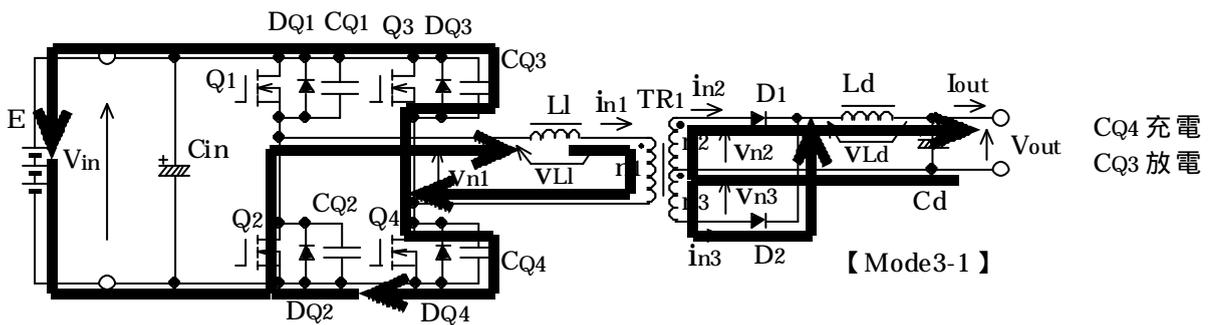
CQ1, CQ2 充放電完了



Q2ターンオン (ZVS)

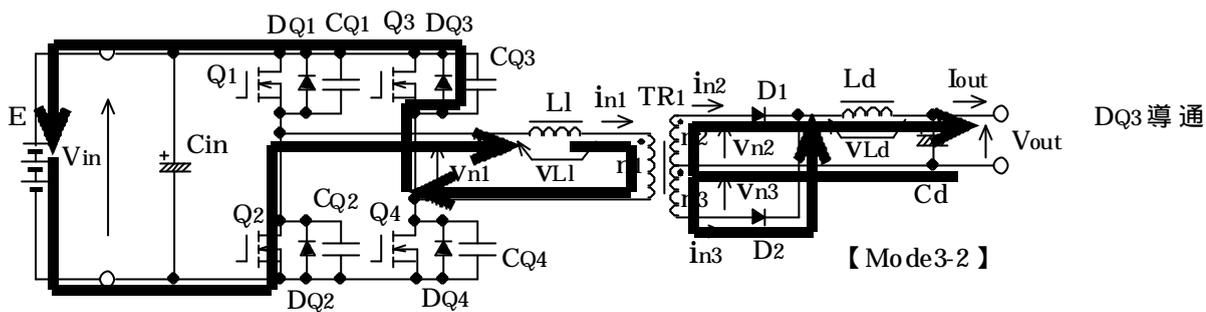


Q4ターンオフ (ZVS)

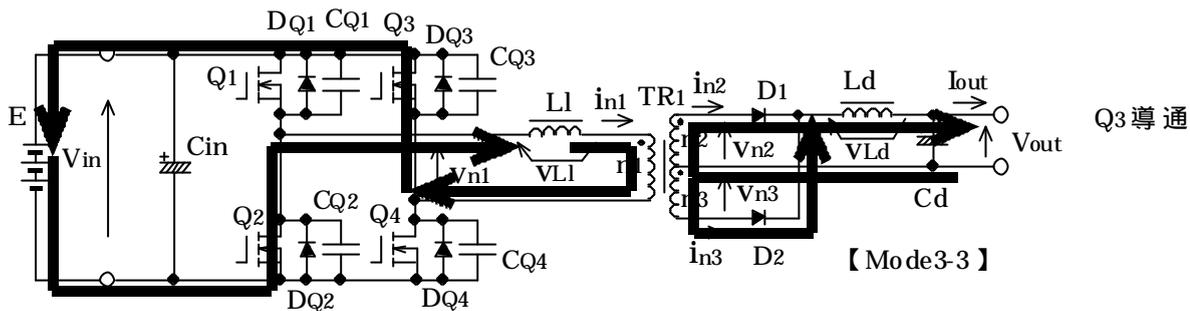


CQ4, CQ3 充放電完了

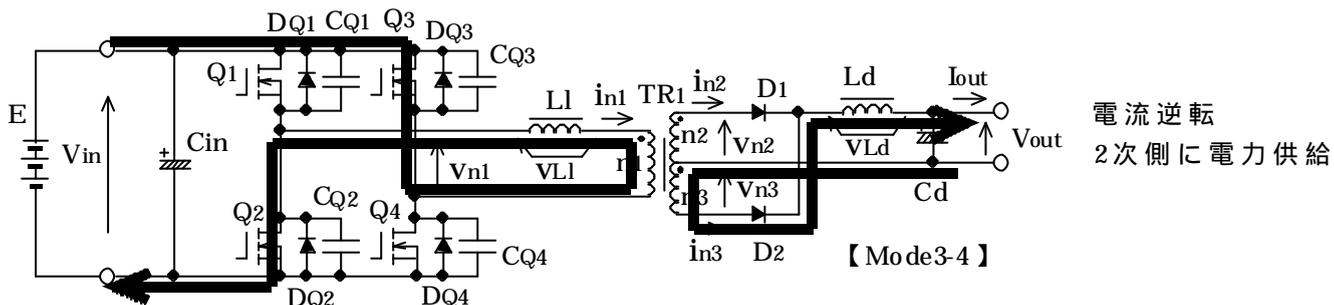
図2 ソフトスイッチングを実現した時の電流経路（前頁から続く）



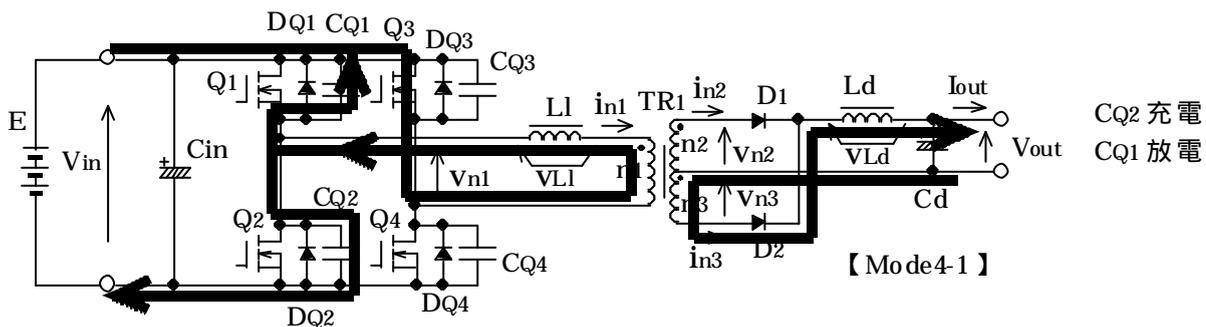
Q3 ターンオン (ZVS)



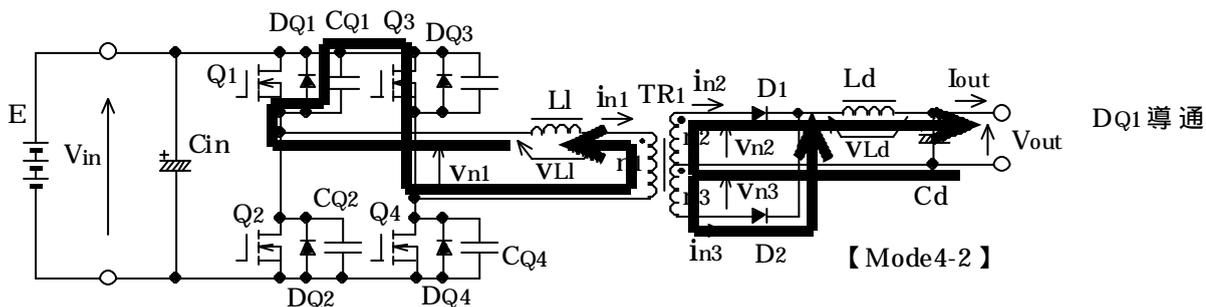
L1 のエネルギー - 放出完了



Q2 ターンオフ (ZVS)

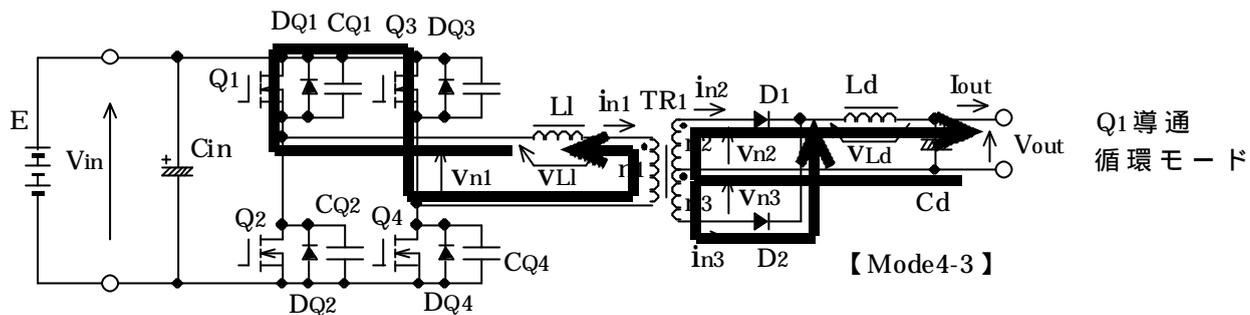


CQ2, CQ1 充放電完了

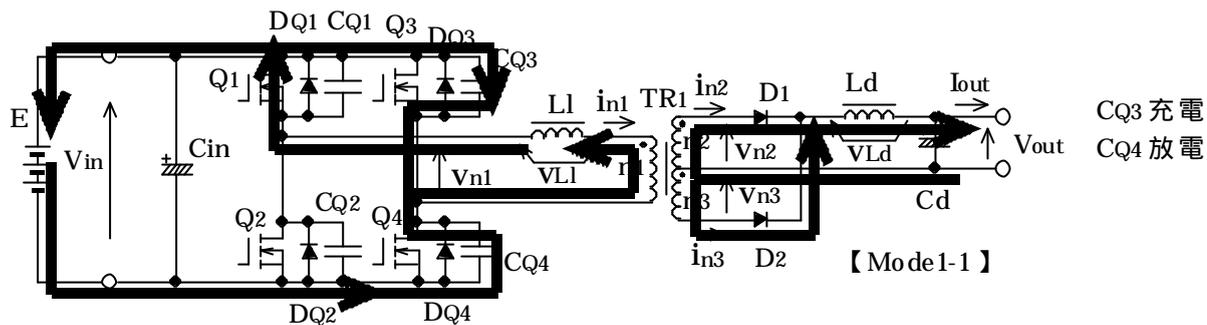


Q1 ターンオン (ZVS)

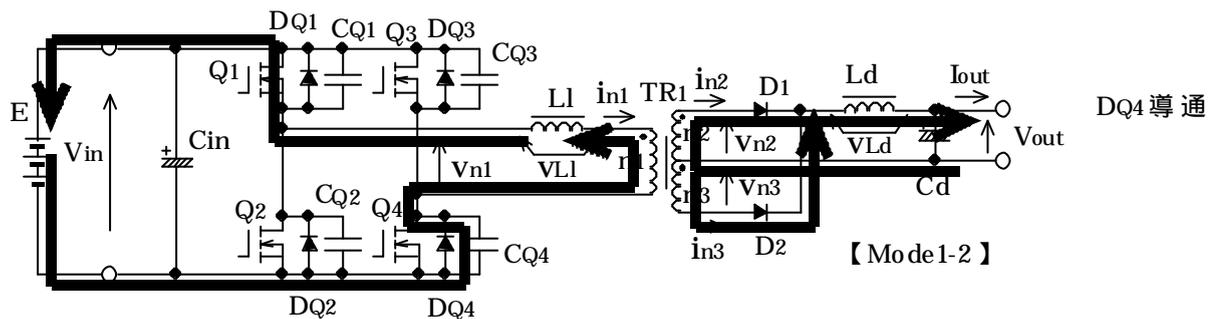
図2 ソフトスイッチングを実現した時の電流経路（前頁から続く）



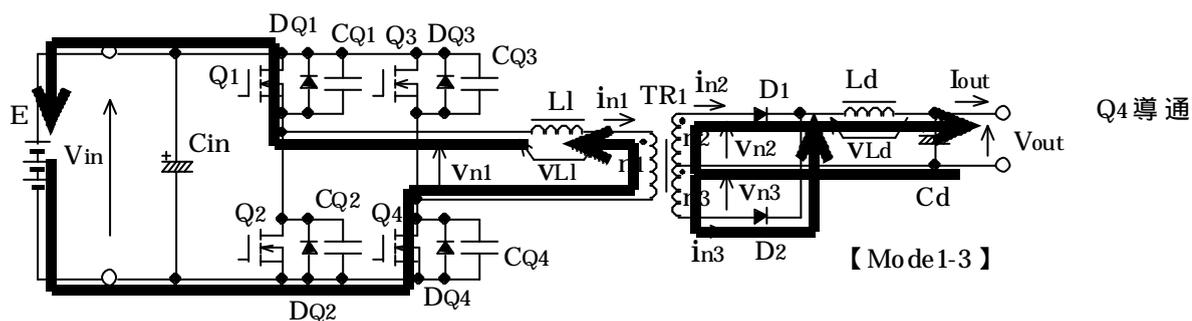
Q3 ターンオフ (ZVS)



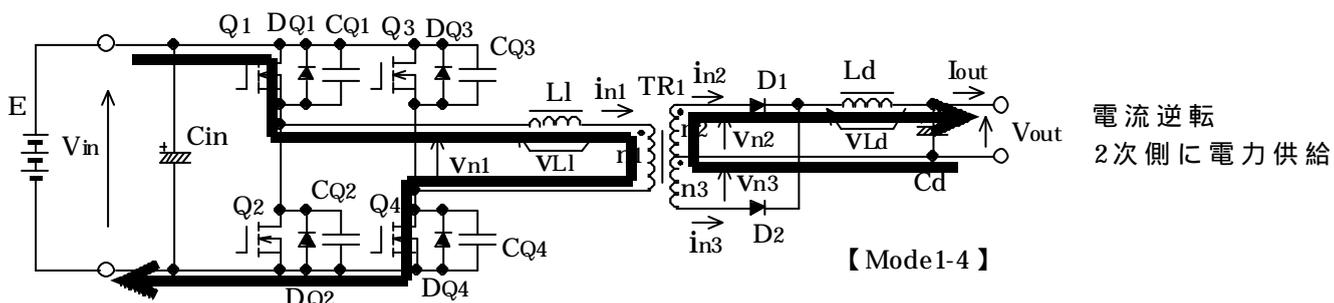
CQ3, CQ4 充放電完了



Q4 ターンオン (ZVS)



L1 のエネルギー放出完了



以上