

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

(読んでほしい人：パワエレ初心者)

2014/3/31 舞鶴高専 平地克也

概要

位相シフト方式フルブリッジ型 DC/DC コンバータの4つのスイッチ素子は、スイッチング動作の順序に応じて進みレグの2つの素子と遅れレグの2つの素子に分けられます。このうち進みレグの2つの素子は容易にソフトスイッチングを実現できますが、遅れレグの2つの素子は必ずしもソフトスイッチングを実現できません。

遅れレグでソフトスイッチングを実現する方法には変圧器の漏れインダクタンスを利用する方法と励磁インダクタンスを利用する方法の2つがあります。DC/DC コンバータでは変圧器の励磁電流が2次側に転流する現象がよく発生しますが、位相シフトフルブリッジ型においてもこの現象が発生します。励磁インダクタンスを利用してソフトスイッチングを実現する場合は励磁電流の2次側への転流現象がソフトスイッチングの障害となります。この障害を防ぐためにはある程度の漏れインダクタンスが必要となります。

進みレグと遅れレグのスイッチング動作

図1に位相シフトフルブリッジ型の回路構成を示します。平地研究室技術メモ No.20110728^[1]にてこの回路の基本動作、No.20110928^[2]にてソフトスイッチングの原理を説明していますので参照下さい。電力変換装置ではブリッジ接続の1相分を構成する複数のスイッチ素子をレグと言います。図1では Q_1 と Q_2 が1つのレグを構成し、 Q_3 と Q_4 がもう一つのレグを構成しています。図2に各スイッチ素子の ON/OFF のタイミングと動作モードの番号を示します。図2では Q_1 と Q_2 の ON/OFF は Mode4-1,2 で行われ、 Q_3 と Q_4 の ON/OFF は少し遅れて Mode1-1,2,3 で行われます。したがって Q_1 と Q_2 を進みレグ、 Q_3 と Q_4 を遅れレグと言います。なお、図2は平地研究室技術メモ No.20110928^[2]の図2と同じものであり、各動作モードの動作の詳細はこの技術メモに記載しています。

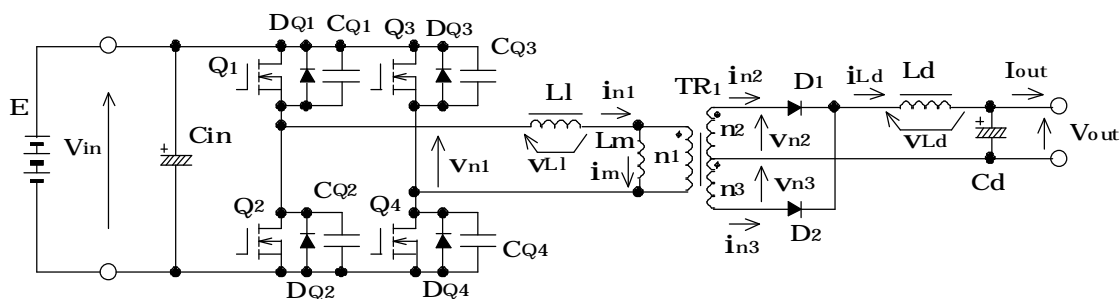


図1 位相シフト方式フルブリッジ型 DC/DC コンバータ

(L_1 は TR_1 の漏れインダクタンス、 L_m は励磁インダクタンス)

($D_{Q1} \sim D_{Q4}$ は $Q_1 \sim Q_4$ の寄生ダイオード、 $C_{Q1} \sim C_{Q4}$ は $Q_1 \sim Q_4$ の寄生容量 + 外付けコンデンサ)

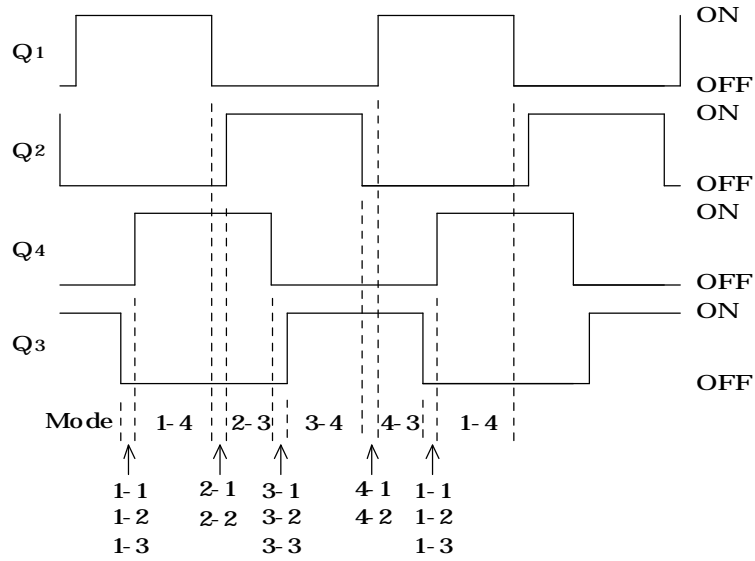
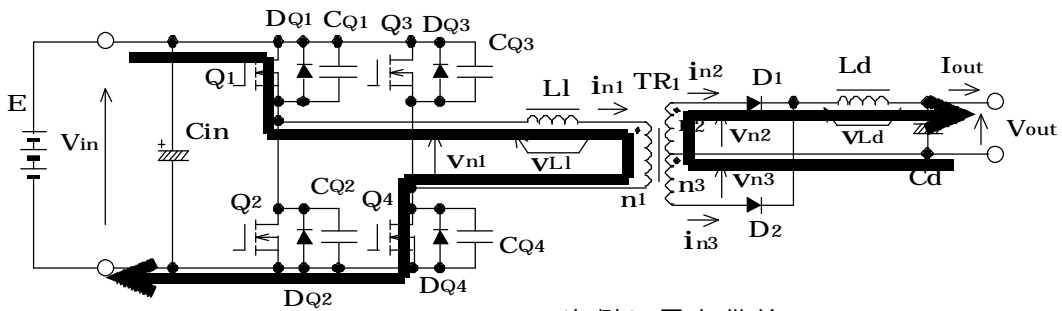
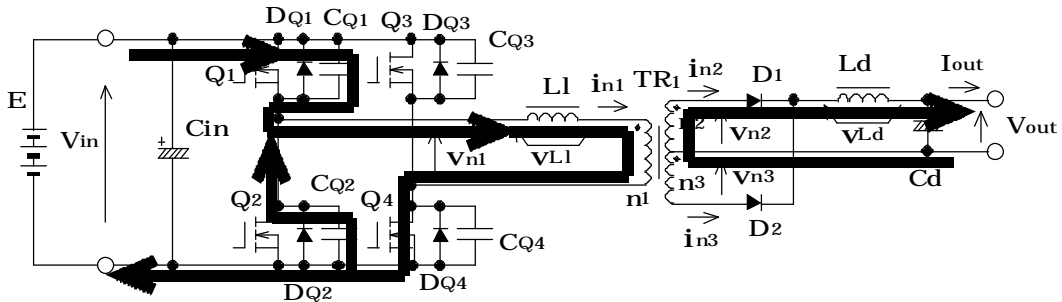


図2 スイッチ素子の ON/OFF と動作モード

図3に進みレグのZVS動作の原理を示します。図3(a)の Mode1-4 では Q_1 と Q_4 が ON しており、2次側に電力を供給しています。変圧器の漏れインダクタンス L_l には負荷電流が流れており $\frac{1}{2}LI^2$ のエネルギーが蓄積されています。この状態で Q_1 がターン OFF して Mode2-1 となり、図3(b)に示すように、「電源 E のプラス側 C_{Q1} n_1 巻線 Q_4 電源 E のマイナス側」の径路で C_{Q1} が充電され、「 C_{Q2} n_1 巻線 Q_4 C_{Q2} 」の径路で C_{Q2} が放電されます。この充放電が完了した状態で Q_2 がターン ON するので ZVS となります。



(a) Mode1-4 2次側に電力供給



(b) Mode2-1 C_{Q1} と C_{Q2} を充放電

図3 進みレグのZVS動作

図4に遅れレグのスイッチング動作を示します。図4(a)のMode2-3は循環モードであり、Llに蓄積されたエネルギーでLl(n1) Q4 Q2 Llの径路で電流が循環しています。この状態でQ4がターンOFFしてMode3-1となります。Q4がターンOFFしてもLlに蓄積されたエネルギーで電流は流れ続け、図4(b)に示すように、「Ll(n1巻線) CQ4 Q2 Ll」の径路でCQ4が充電され、「Ll(n1巻線) CQ3 E Q2 Ll」の径路でCQ3が放電されます。充放電が完了した時点でQ3がターンONするとZVSが成立します。したがって、ZVS成立のためにはMode2-3終了のQ4ターンOFFの時点(循環モード終了の時点)でLlに十分なエネルギーが蓄積されている必要があります。

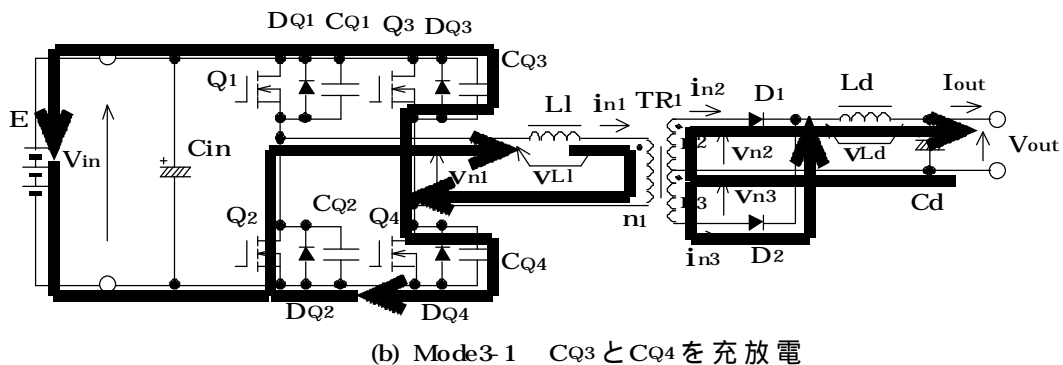
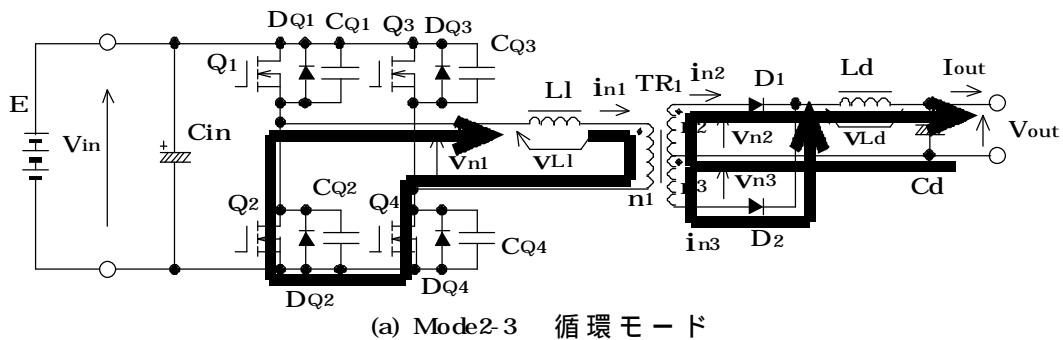


図4 遅れレグのスイッチング動作

励磁電流による遅れレグのスイッチング動作

前記のように、遅れレグのZVS成立には漏れインダクタンスLlに十分なエネルギーが蓄積されている必要があります。しかし、負荷が軽い時はLlのエネルギー $\frac{1}{2}LI^2$ は小であり、ZVSは実現できません。また、負荷が重い時でも循環モードの時間が長ければその間にQ2やQ3の電圧降下などでLlのエネルギーは失われ、循環モード終了時点で十分なエネルギーが残存してない場合もあります。そのような場合は漏れインダクタンスの代わりに励磁インダクタンスのエネルギーを使ってZVSの実現を図ることになります。

図5に励磁インダクタンスLmのエネルギーを使って励磁電流imで遅れレグのZVSを実現する場合の電流径路を示します。上記のように軽負荷時や循環モードが長い時はLlのエネルギーが完全に失われることもありますが、その場合でも図5(a)に示すように励磁電流は流れ続けます。この状態

で Q4 がターン OFF すれば図 5 (b) のように励磁電流で CQ3 と CQ4 の充放電を完了させることができます。

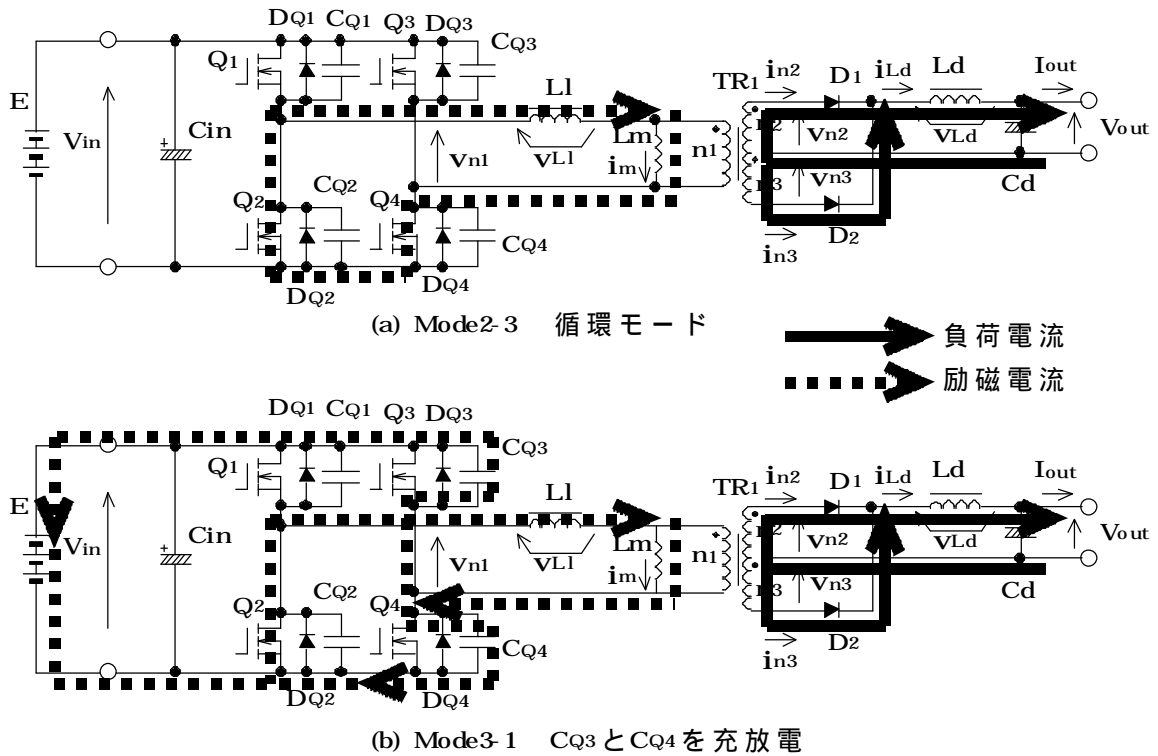


図 5 励磁電流による遅れレグの ZVS

励磁電流の 2 次側への転流による ZVS 失敗

このように、励磁電流を使えば漏れインダクタンスのエネルギーが不十分でも容易に ZVS を実現できるように思えますが、実際の動作はやや複雑です。DC/DC コンバータの変圧器では励磁電流は 1 次巻線を通れるとは限らず、最も流れやすい巻線を通れます^[3]。図 5 (a) の循環モードでも励磁電流は 1 次巻線を通れるとは限らず、図 6 に示すように次の 2 つの径路が考えられます。

1 次側の径路 : Lm(n1 巻線) Q4 Q2 L1 Lm

2 次側の径路 : n3 巻線 D2 Ld Cd n3 巻線

図 5 (a) のように、励磁電流が全て 1 次側の径路を流れ、2 次側には負荷電流のみ流れた場合、2 次側巻線の電流は次のようになります。

$$i_{n2} = i_{n3} = \frac{1}{2} i_{Ld}$$

逆に、励磁電流が全て 2 次側の径路を流れた場合、2 次側巻線の電流は次のようになります。

$$i_{n2} = \frac{1}{2} (i_{Ld} - \frac{N_1}{N_2} i_m)$$

$$i_{n3} = \frac{1}{2} (i_{Ld} - \frac{N_1}{N_2} i_m) + \frac{N_1}{N_2} i_m = \frac{1}{2} (i_{Ld} + \frac{N_1}{N_2} i_m)$$

なお、n1、n2、n3 巻線のターン数を N1、N2、N3 とし、N2 = N3 です。im は励磁電流、iLd はリアクトル Ld の電流です。iLd の平均値 = 出力電流 Iout です。

以上の式から次のことが分かります：

- ・励磁電流が全て 1 次側を流れた場合、2 次巻線 n_2 、 n_3 の電流は L_d の電流を等しく分担する。
- ・励磁電流が全て 2 次側を流れた場合、2 次巻線 n_2 、 n_3 の電流は励磁電流の 2 次側換算値の分だけアンバランスする。

1 次側の径路と 2 次側の径路とどちらが流れやすいか考えます：

- ・励磁電流が 1 次側を流れる場合は Q_2 と Q_4 の電圧降下が発生する。
- ・励磁電流が 2 次側を流れる場合は n_2 巻線と n_3 巻線の電流分担が変わるだけ。

よって、位相シフトフルブリッジ型の循環モードでは励磁電流は 2 次巻線の方が流れやすい、と言えます。したがって、漏れインダクタンス L_l がゼロなら Mode2-3 では励磁電流は全て 2 次側に転流してしまい、励磁電流による ZVS は実現できません。ZVS の実現にはある程度の L_l が必要であり、図 6 に示すように L_l のエネルギーである程度の励磁電流を 1 次側に残存させる必要があります。

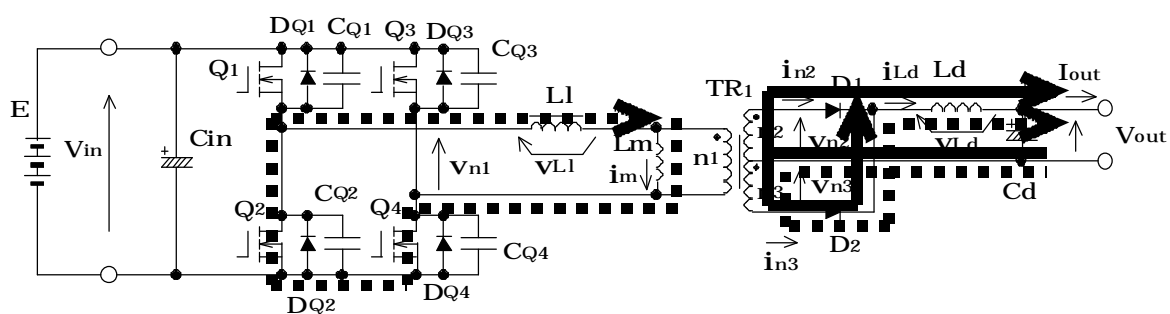


図 6 循環モードでの励磁電流の 2 次側への転流

まとめ

位相シフトフルブリッジ型のソフトスイッチングについて次のようにまとめることができます。

次の いずれか場合は漏れインダクタンスによる ZVS は実現できない。

漏れインダクタンス L_l が小さい時・・・即ち、変圧器の結合率が高い時

動作周波数が低い時・・・循環モードの時間が長く、 L_l の電流が減衰してしまう

負荷が軽い時・・・負荷電流が小さいと L_l の電流も小さく、 L_l のエネルギーが小さい

このような場合は漏れインダクタンスではなく、励磁インダクタンスで ZVS を実現する必要があります。しかしその場合も励磁電流の 2 次側への転流を防ぐためにある程度の漏れインダクタンスが必要です。

参考文献

- [1] 平地研究室技術メモ No.20110728 「位相シフト方式フルブリッジ型 DC/DC コンバータの基本」
- [2] 平地研究室技術メモ No.20110928 「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」
- [3] 平地研究室技術メモ No.20100817 「励磁電流の重要な性質」

以上