

DC/DC コンバータの評価指標「ソフトさ」の提案

(読んでほしい人：パワエレ技術者)

2016/1/31 舞鶴高専 平地克也

DC/DC コンバータの回路方式を評価する場合、「ハードスイッチング方式」「ソフトスイッチング方式」と 2 者択一のラベル貼りをするのはあまり意味がなく、各スイッチ素子のスイッチングがどの程度ソフトであるか詳しく評価する必要があります。この評価を回路の「ソフトさ」の評価と呼びたいと思います。ソフトさは数字で表すことは困難ですが、各種回路方式のソフトさの比較は可能です。

DC/DC コンバータの「ソフトさ」評価の必要性

平地研究室技術メモ No.20151018「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」ではソフトスイッチング方式と言われている位相シフトフルブリッジ型でも 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。また、平地研究室技術メモ No.20151116「電流共振型 DC/DC コンバータの昔の常識と最近の動向」では動作周波数が高い場合は電流共振形でも無視できないスイッチング損失が発生することを説明しました。逆に、平地研究室技術メモ No.20160107「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」ではハードスイッチング方式である通常のフルブリッジ型でも FET のサージ電圧をスナバレスで抑制できることを説明しました。

このようにソフトスイッチングの成否はかなり複雑であり、ソフトスイッチング方式と言われている DC/DC コンバータでもスイッチング損失やサージ電圧が発生することもあり、逆にハードスイッチングと言われている DC/DC コンバータでもスイッチング損失やサージ電圧が発生しないこともあります。したがって、ある回路を評価する場合「ハードスイッチング方式」「ソフトスイッチング方式」と 2 者択一のラベル貼りをするのではなく、各スイッチ素子のスイッチングがどの程度ソフトであるか詳しく評価する必要があります。この評価を回路の「ソフトさ」の評価と呼びたいと思います。

1 石フォワード型と 2 石フォワード型のソフトさの違いについて

「ソフトさ」という評価指標を取り入れると DC/DC コンバータを新しい視点で見ることが出来ます。1 石フォワード型 DC/DC コンバータ (図 1) と 2 石フォワード型 DC/DC コンバータ (図 2)

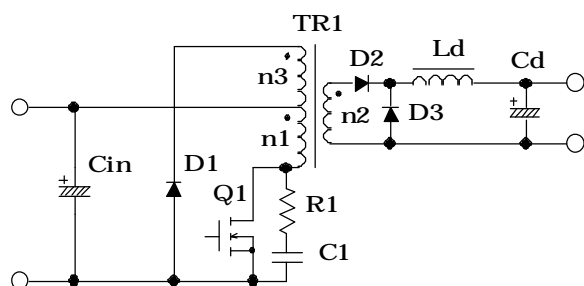


図 1 1 石フォワード型 DC/DC コンバータ

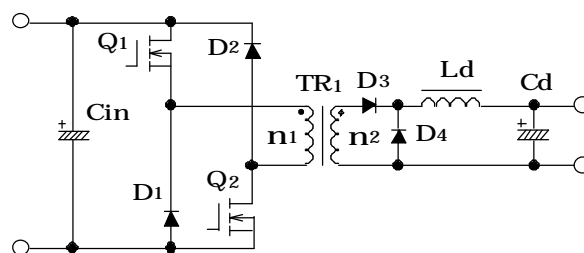
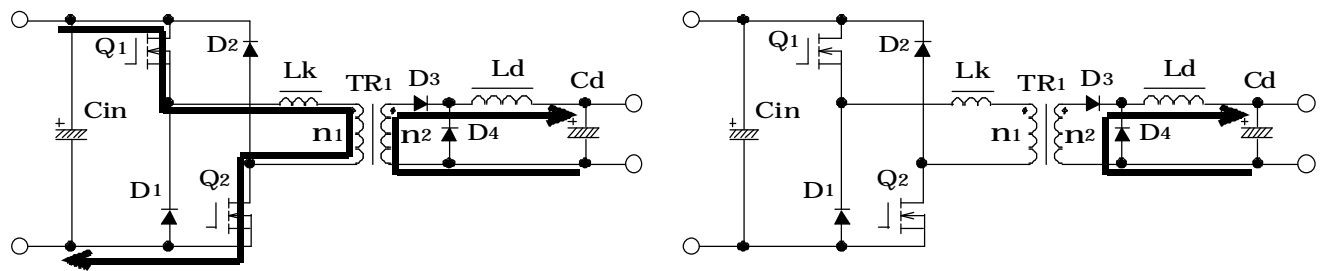


図 2 2 石フォワード型 DC/DC コンバータ

はどちらもフォワード型で同じ原理で動作しているので特性も似ているのですが、「ソフトさ」には大差があり、そのため用途にも大きな差があります。

図3に2石フォワード型の2つの動作モードを示します。FET Q1とQ2は同時にON/OFFします。FETがONの時は図3(a)のように2つのFETを通して電流が流れ、変圧器2次側のD3が導通し、電力が1次側から2次側に伝達されます。FETがOFFの時は図3(b)のようにLdに蓄積されたエネルギーによりD4を通して電流が循環します。また、FETがONの時は変圧器TR1に大きな電流が流れているのでTR1の漏れインダクタンスLkにエネルギーが蓄積されています。



(a) FETがONの時
(b) FETがOFFの時
(LkはTR1の漏れインダクタンス)(励磁電流は無視している)

図3 2石フォワード型DC/DCコンバータの2つの動作モードと電流経路

FETがターンオフした直後の過渡状態に図4の動作モードが出現します。Lkに蓄積されたエネルギーのためにD1とD2が導通して図4の径路で電流が流れます。この動作モードでLkのエネルギーは電源に回生されます。従って2石フォワード型では変圧器の漏れインダクタンスが大きくても効率の低下やFETのサージ電圧の発生を抑制することができます。しかし、図1の1石フォワード型では2石フォワード型と同じ動作はできません。n1巻線とn3巻線の結合をなるべく高くして漏れインダクタンスのエネルギーをD1を介して電源に回生するよう設計しますが、それでもFETのサージ電圧抑制のためにR1C1のようなスナバ回路が欠かせません。

このように2石フォワード型は漏れインダクタンスのエネルギー回生動作を効果的に行う機能を持っているので1石フォワード型よりかなりソフトさが高いと言えます。そのため2石フォワード型ではかなり大きな容量のDC/DCコンバータを作ることができます。私も昔2石フォワード型で5kWのDC/DCコンバータを作ったことがあります^[1]。一方1石フォワード型では大きな容量のDC/DCコンバータを作るとは困難です。通常数10W～数100Wで使用されます。

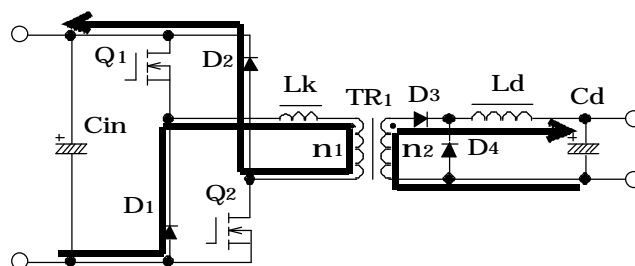


図4 FETがターンオフした直後の過渡状態の動作

ソフトさの評価指標

このように「ソフトさ」という評価基準を用いると各種回路方式の特徴をより鮮明に把握することができます。近年 LLC 方式 DC/DC コンバータが広く使われるようになりましたが、LLC 方式は 1 次側の FET のみならず 2 次側のダイオードのサージ電圧も完全に防ぐことができるのでソフトさの高い回路方式と言えます。LLC 方式が広く普及した原因の 1 つがソフトさの高さにあると言えるでしょう。

ソフトさを数字で表現することは困難ですが、2 種類の回路のソフトさの比較は可能です。次のような動作がソフトさを増す指標です。このようなソフトな動作をどれだけ実現しているかでソフトさの高低を評価することができます。

- スイッチ素子ターンオン時の v と i の重なり解消
- スイッチ素子ターンオフ時の v と i の重なり解消
- スイッチ素子ターンオフ時のサージ電圧抑制
- スイッチ素子の寄生容量とスナバ容量のエネルギー回生
- 整流ダイオードのリカバリ特性によるサージ電流の抑制
- 整流ダイオードターンオフ時のサージ電圧の抑制
- 変圧器の漏れインダクタンスのエネルギー回生

なお、ここでは DC/DC コンバータに限定してソフトさを検討しましたが、インバータや PFC コンバータでも同様の検討を行うことができるでしょう。

参考文献

- [1] 平地、高橋、福井、友国、「48V100A スイッチング電源ユニットを使った通信用直流無停電電源システムについて」、ユアサ時報、第 66 号、pp.27-35, 1989
(ユアサ時報は GS ユアサ(当時は湯浅電池)の技術誌です)

以上