平地研究室技術メモ No.20190918

アクティブクランプ方式１石フォワード型 DC/DC コンバータの長所のご紹介

（読んでほしい人：パワエレ初心者）

2019/9/18 舞鶴高専 平地克也

【あらまし】 平地研究室技術メモではこれまで、アクティブクランプ方式１石フォワード型 DC/DC コンバータについて、ソフトスイッチングの難しさ[1-6]や負方向の直流励磁[7]など、アクティブクランプ方式の欠点を詳しく説明してきました。しかしながら、アクティブクランプ方式は総合的に見て優れた回路方式であり、通常の 1 石フォワード方式にはない沢山の長所があります。今回は長所をまとめて紹介します。

■通常の１石フォワード方式での計算

まず、通常の 1 石フォワード型での基本的なパラメータの計算を行います。回路構成は図１、設計仕様は表１とします。入力電圧は 48V 系と 60V 系の兼用を想定しています。

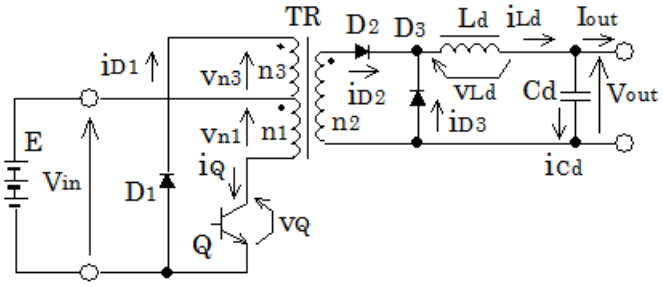


図１　通常の１石フォワード方式

表１　設計仕様

入力電圧	Vin	36V～72V
出力電圧	Vout	5V 一定
出力電流	Iout	最大 20A

・スイッチ素子 Q の印加電圧 v_Q の最大値 v_{Qmax} は入力電圧 Vin の最大値の 2 倍なので、
v_{Qmax}＝72V×2＝144V

・Vout＝Vin×(n_2/n_1)×α なので、変圧比 n_1/n_2＝Vinmin÷Vout×α_{max}＝36÷5×0.45＝3.24
よって、若干の余裕を見て n_1/n_2＝3 とする。α は Q の通流率で、最大値を 0.45 とする。

・Q の電流 i_Q の最大値 i_{Qmax} は Ld 電流のピーク値を 1 次側に換算したものなので、
i_{Qmax}＝20A×1.1÷3＝7.33A
なお、Ld のリプル電流含有率は 20%p-p とし、ピーク値は平均値の 1.1 倍とした。

■アクティブクランプ方式での計算

回路構成は図２、設計仕様は通常の１石フォワードと同じく表１とします。次の式が成立します。

Vout＝Vin×(n_2/n_1)×α

よって、α＝(Vout÷Vin)×(n1/n2)

v_{Q1}＝Vin＋v_{C2}

v_{C2}＝Vin$\dfrac{\alpha}{1-\alpha}$　よって、v_{Q1}＝Vin＋Vin$\dfrac{\alpha}{1-\alpha}$＝Vin$\dfrac{1}{1-\alpha}$

α ＝(Vout÷Vin)×(n_1/n_2)を代入して、

$$v_{Q1}=V_{in}\frac{1}{1-\left(V_{out}\div V_{iN}\right)\left(n_1\div n_2\right)}$$

この式をグラフにすると図３となります。

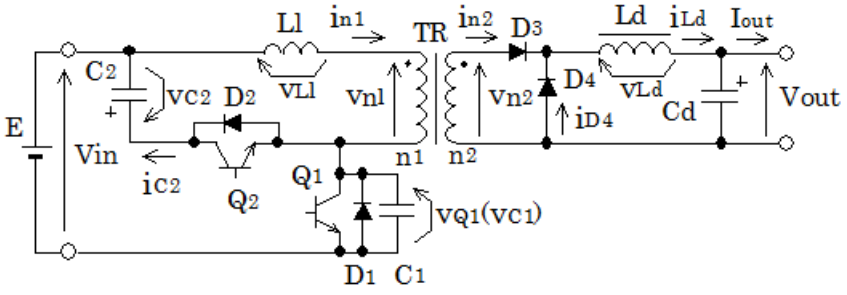


図２　アクティブクランプ方式１石フォワード型 DC/DC コンバータ

アクティブクランプ方式では、v_Q は Vin と v_{C2} の合計になりますが、Vin が増加すれば v_{C2} は減少するので、v_Q は図３のように複雑に変化します。

n_1/n_2＝4 を選択すると v_Q は Vin＝72V の時に最大値 100V となります。

n_1/n_2＝5 を選択すると v_Q は Vin＝36V の時に最大値 118V となります。

i_{Qmax} は次のようになります。

n_1/n_2＝4 を選択すると、i_{Qmax}＝20A×1.1÷4＝5.5A

n_1/n_2＝5 を選択すると、i_{Qmax}＝20A×1.1÷5＝4.4A

また、通流率の式 α ＝(Vout÷Vin)×(n_1/n_2)をグラフで表すと図４となります。

n_1/n_2＝4 を選択すると、α_{max}＝0.56、n_1/n_2＝5 を選択すると、α_{max}＝0.69 となります。

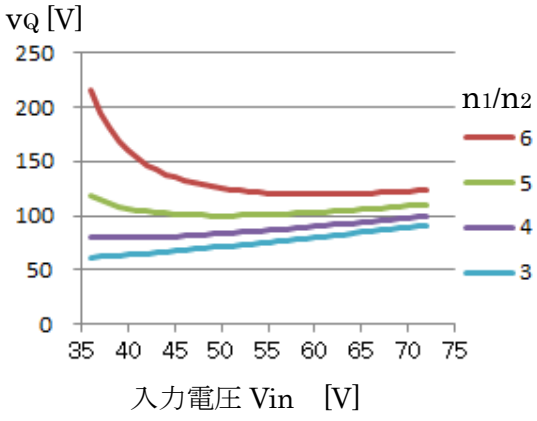


図３　アクティブクランプ方式の v_Q の変化

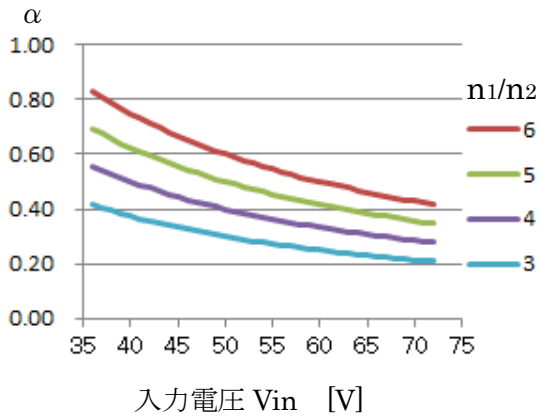


図４　アクティブクランプ方式の α の変化

■アクティブクランプ方式の長所

＜計算結果の比較＞

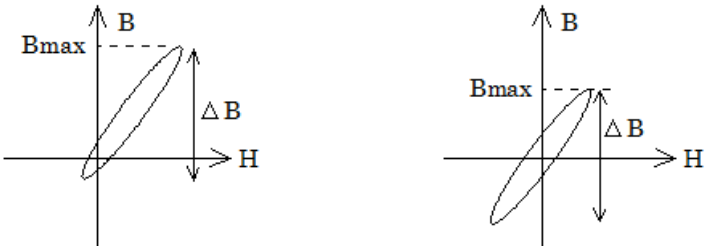
以上の計算結果を表２にまとめました。アクティブクランプ方式はスイッチ素子の電圧、電流ともに通常の 1 石フォワード方式より有利となります。アクティブクランプ方式には変圧比の選択肢があり、v_{Qmax} と i_{Qmax} のどちらを優先するかで変圧比を選びます。また、1 石フォワード方式とは異なり、通流率を 0.5 以上にできます。通常 α_{max} は 0.6～0.7 程度にします。

表２　計算結果まとめ

	通常の１石フォワード	アクティブクランプ	アクティブクランプ
変圧比 n_1/n_2	3	4	5
v_{Qmax}	144V	100V	118V
i_{Qmax}	7.33A	5.5A	4.4A
α_{max}	0.45	0.56	0.69

＜BH 曲線の相違＞

通常の１石フォワード方式の変圧器は片励磁なので、図５(a)に示すように、BH 曲線の大部分は第１象限に存在します。一方、アクティブクランプ方式はクランプコンデンサ C_2 の電圧を負方向に印加するので両励磁となり、図(b)に示すように、原点を中心として第１象限と第３象限に等しく存在します。したがって、アクティブクランプ方式は ΔB が同じなら Bmax は約半分になるので、変圧器の小型化が可能です。



(a) 通常の１石フォワード方式　　(b) アクティブクランプ方式

図５　BH 曲線の相違

＜同期整流の駆動回路＞

同期整流を用いた１石フォワード方式の回路構成を図６に示します。同期整流用 FET の Q_2,Q_3 にはいろんな駆動方法がありますが、最も簡単な駆動方法は図６のように変圧器 TR の２次巻線電圧を直接 FET のゲートに与える方法です。TR の巻線電圧が正の時は Q_2 がオンし、負の時は Q3 がオンします。1 石フォワード方式の変圧器巻線電圧波形を図７に示します。Q_1 がオンの時は、v_{n1} は正となり Q_2 が導通します。Q_1 がオフの時は、モード２では v_{n1} が負となり Q_3 がオンしますが、モード３と４では電圧が低下してしまい、FET をオンさせることができません。なお、1 石フォワード型の動作モードと変圧器の電圧波形については平地研究室技術メモ No.20061125[7]と No.20070106[8]を参照下さい。

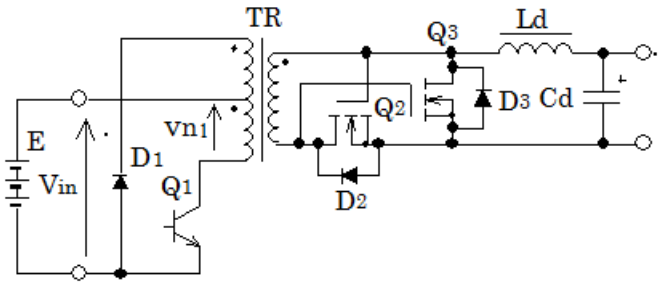


図６　同期整流を用いた１石フォワード方式

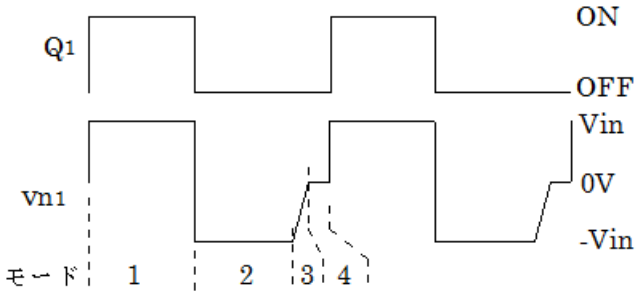


図７　通常の１石フォワード方式の変圧器１次巻線電圧波形

同期整流を用いたアクティブクランプ方式の回路構成を図８に示します。アクティブクランプ方式の変圧器巻線電圧波形を図９に示します。通常の１石フォワード方式とは異なり、Q_1 がオフの間は変圧器の１次巻線にはクランプコンデンサ C_2 の電圧が負方向に印加され、$v_{n1} = -v_{C2}$ となります。したがって、Q_1 のオフ期間全体で Q_4 はオンを継続します。このように、アクティブクランプ方式は同期整流の使用に便利な回路方式です。

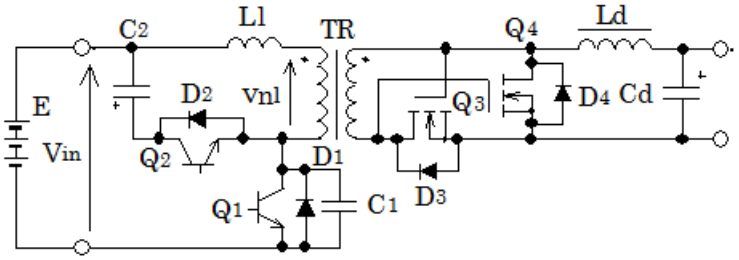


図８　同期整流を用いたアクティブクランプ方式

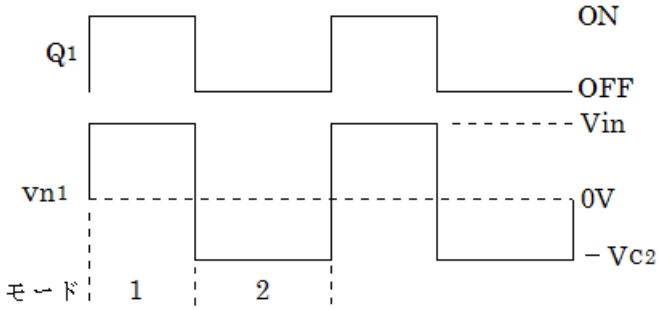


図９　アクティブクランプ方式の変圧器巻線電圧

■若干の留意事項

以上、アクティブクランプ方式の長所を多数紹介しましたが、若干の留意事項があります。クランプコンデンサの電圧 v_{C2} は応答が遅いので、電源急変があった場合はスイッチ素子に前記の計算以上の電圧が印加される可能性があります。また、技術メモ No.20190811[6]で説明しているように、「負方向の励磁電流」が発生した場合は、変圧器の|Bmax|は図 5 (b)以上になる可能性があります。

■参考文献

[1] 平地研究室技術メモ No.20080519、「アクティブクランプ方式 1 石フォワード形 DC/DC コンバータ」

[2] 平地研究室技術メモ No.20080622、「アクティブクランプ方式のソフトスイッチング成立条件」

[3] 平地研究室技術メモ No.20080721、「アクティブクランプ方式の実験とシミュレーション」

[4] 平地研究室技術メモ No.20081219、「アクティブクランプ方式 1 石フォワード型 DC/DC コンバータのソフトスイッチング成立判別シート」

[5] 平地研究室技術メモ No.20090520、「アクティブクランプ方式 DC/DC コンバータのソフトスイッチング成立条件の導出」

[6] 平地研究室技術メモ No.20190811、「アクティブクランプ方式 1 石フォワード型 DC/DC コンバータの負方向の直流励磁」

[7] 平地研究室技術メモ No.20061125、「フォワード型 DC/DC コンバータの励磁電流について」

[8] 平地研究室技術メモ No.20070106、「フォワード型 DC/DC コンバータの 2 次側を流れる励磁電流」

以上