平地研究室技術メモ No.20191021

電流共振型昇圧チョッパ回路の概要

（読んでほしい人：パワエレ技術者）

2019/10/21 舞鶴高専 平地克也

【あらまし】 前回の技術メモ（No.20191001）[1]では、電圧共振型昇圧チョッパ回路の概要を紹介しましたが、今回はそれと対称の関係にある電流共振型昇圧チョッパ回路の概要を紹介します。L と C に共振電流が流れることは電圧共振型と同じですが、電圧共振ではスイッチ素子の電圧が正弦波の一部になったのに対し、電流共振ではスイッチ素子の電流が正弦波の一部になり、電圧は方形波です。そのため、スイッチ素子の寄生容量と共振用リアクトルの間で高周波の激しい振動が発生し、対策が必要となります。また、軽負荷時もスイッチ素子には大きな電流が流れ、効率が低下します。実用的価値はあまりないかもしれませんが、電流共振型の特徴がよく分かるので、ソフトスイッチングの基礎知識として、この回路の概要はぜひ理解しておくべき、と思います。

■回路構成と動作モード

電流共振型昇圧チョッパの回路構成と回路各部の電圧・電流の記号を図１に示します。矢印の方向を正の方向と定義します。通常のハードスイッチングの昇圧チョッパに対して、スイッチ素子 Q と直列に Lr、ダイオード D と並列に Cr を挿入しています。Lr と Cr が共振して Q の電流波形は正弦波の一部となり、ソフトスイッチング（ZCS：ゼロ電流スイッチング）が実現します。なお、Q に FET を使う場合は D_Q は Q の寄生ダイオードで OK です。この回路は文献[2]では「全波型・昇圧型・電流共振型コンバータ」に分類されています。

ZCS が成立している時の各動作モードの電流経路と動作説明を図２に示します。9 個の動作モードがあり、Q はモード１終了時に ZCS でターンオンし、モード８の途中で ZCS かつ ZVS でターンオフします。主要な電圧・電流のシミュレーション波形を図３に示します。シミュレーションの条件を図４のシミュレーション回路に示します。

図３の共振用コンデンサの電流 i_{Cr} の波形から分かるように、モード４からモード８までが共振期間であり、この長さは Lr と Cr の積で決まります。共振期間の間は Q はオン状態を維持しなければならないので、Q のオン時間は Lr と Cr でほぼ決まった値となります。出力電圧の制御は、Q のオフ時間を変化させることによって実現します。したがって、動作周波数と通流率はともに変化します。

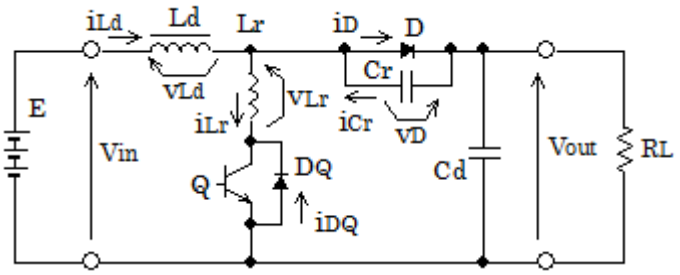
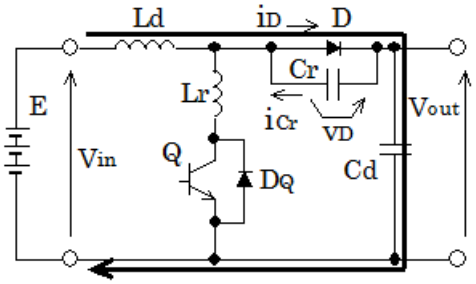


図１　電流共振型昇圧チョッパ回路



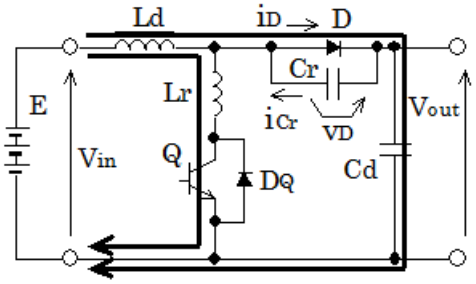
＜モード 1＞

Q はオフしている。

Ld のエネルギーが D を介して出力側に供給されている。

通常の昇圧チョッパの Q がオフしている動作と同じである。

Q がターンオンして次のモードに移行する。

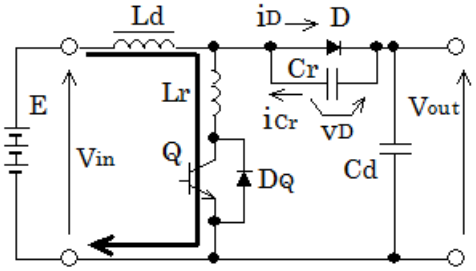


＜モード 2＞

Q がターンオンして導通状態となる。

v_{Lr}＝Vout となり、Lr 電流（Q の電流）はリニアに増加する。

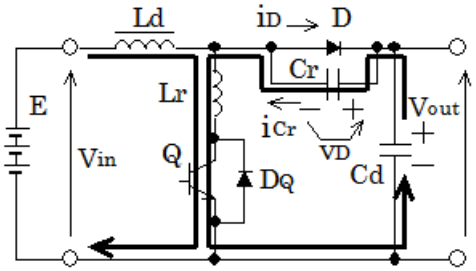
i_Q＝i_{Ld} となり、次のモードに移行する。



＜モード 3＞

i_Q＝i_{Ld} なので、Ld 電流 i_{Ld} が全て Q を流れる。

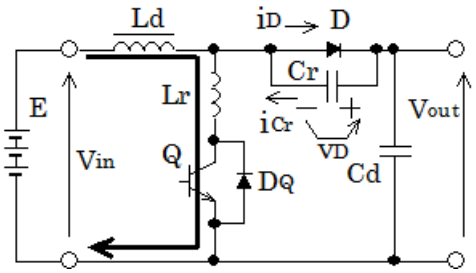
Lr 電流は増加を続けているので、このモードは一瞬で終了し、次のモードに移行する。



＜モード 4＞

Vout が電源となり、Lr と Cr の共振が始まる。

共振電流 i_{Cr} は徐々に増加し、共振の 1/4 サイクル後にピーク電流となり、その後徐々に減少し、共振の 1/2 サイクル後に 0A となり、次のモードに移行する。



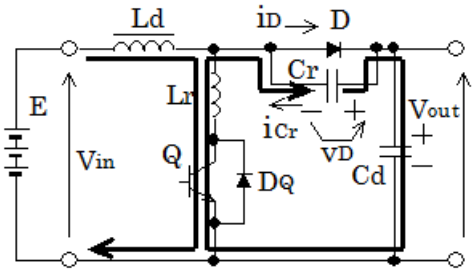
＜モード 5＞

i_{Cr}＝0A

この時、Cr の電圧 v_D はピーク電圧（2Vout）となる。

このモードは一瞬で終了し、次のモードに移行する。

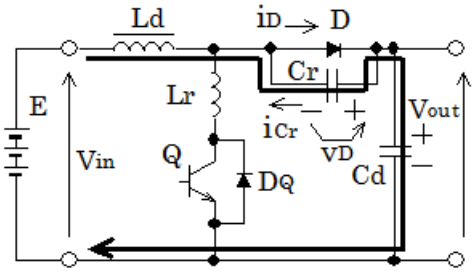
（次頁につづく）



＜モード 6＞

2Vout に充電された Cr 電圧が電源となり、Cr と Lr の負方向の共振が始まる。

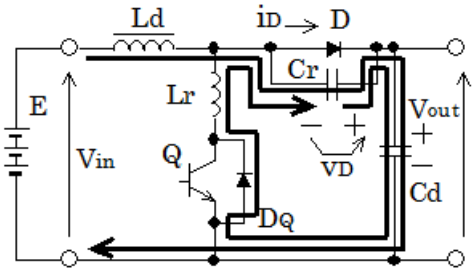
共振電流 i_{Cr} は負方向に徐々に増加し、$-i_{Cr}=i_{Ld}$ となって次のモードに移行する。



＜モード 7＞

$-i_{Cr}=i_{Ld}$ なので Ld 電流は全て Cr に流れ、$i_Q=0$ である。

i_{Cr} は引き続き負方向に増加し、このモードは一瞬で終了する。



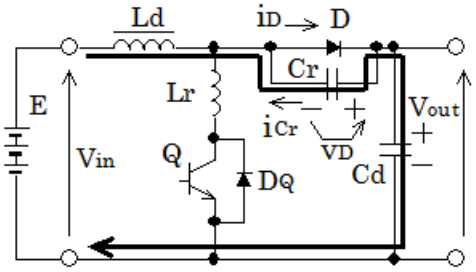
＜モード 8＞

共振電流 i_{Cr} は引き続き負方向に徐々に増加する。

$-i_{Cr}$ が i_{Ld} を越えた部分は D_Q を流れる。

この状態で Q をターンオフさせる。Q のターンオフは ZCS かつ ZVS である。ただし、図 3 のシミュレーションでは Q を理想スイッチとしているので、Q を逆流することができ、Q をターンオフしてから D_Q に転流している。

i_{Cr} は共振の 3/4 サイクル後に負のピーク値となり、その後減少し、$-i_{Cr}=i_{Ld}$ となって次のモードに移行する。



＜モード 9＞

$-i_{Cr}=i_{Ld}$ なので、Ld 電流 i_{Ld} で Cr が放電する。

i_{Ld} はほぼ定電流なので Cr 電圧 v_D はリニアに減少する。

v_D が−0.7V 程度まで減少すると D が導通し、i_{Ld} は Cr から D に転流し、モード 1 に戻る。

図 2　電流共振型昇圧チョッパ回路の動作モードと電流経路

電流共振の回路では、スイッチ素子の電流は正弦波状に変化するので、ピーク値が高くなります。図 3 では i_Q のピーク値は 9A になっています。通常の昇圧チョッパでは、i_Q のピーク値はリアクトル Ld の電流 i_{Ld} のピーク値（図 3 では 2.7A）に等しいので 3 倍以上の値となります。スイッチ素子のピーク電流が大きいことと、動作周波数が変化することが電流共振型の避けられない欠点であり、この回路方式があまり使われない原因です。

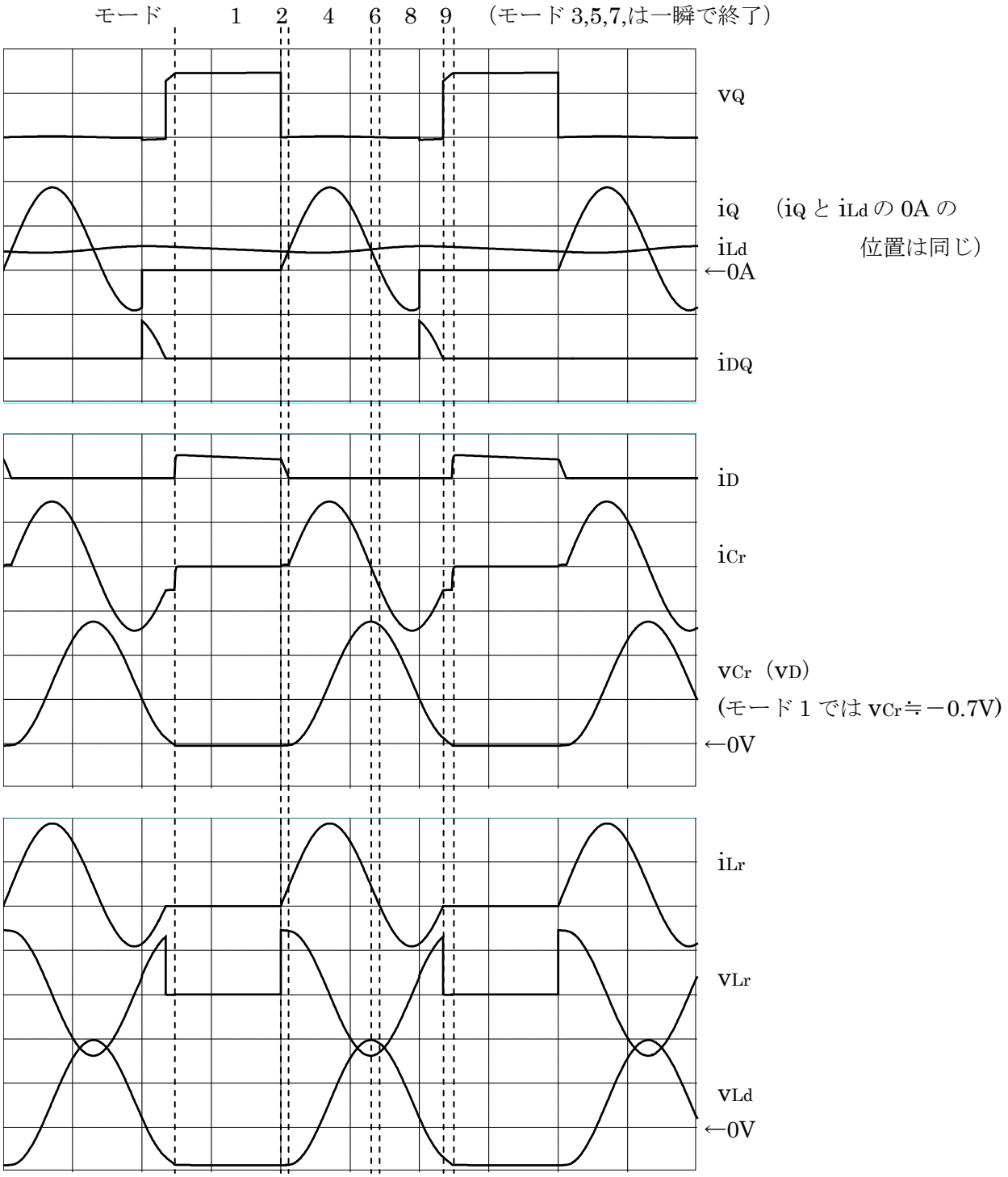
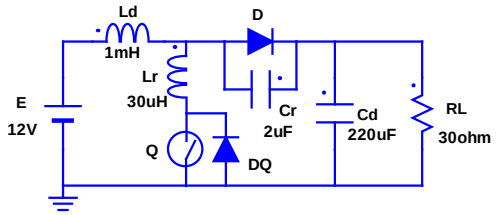


図３　シミュレーション波形（20μsec/div、電圧はすべて 20V/div、電流はすべて 5A/div）



Vin＝12V、Vout＝28V

動作周波数 f＝12.5kHz、通流率α＝0.5

図４　シミュレーション回路

■各動作モードの等価回路と成立する式

電流共振型昇圧チョッパの等価回路を図５(a)～(e)に示します。平滑リアクトル Ld のリプル電流は無視し、定電流源 I_{Ld} で近似します。平滑コンデンサ Cd のリプル電圧も無視し、定電圧源 Vout で近似します。スイッチ素子 Q とダイオード D の電圧降下も無視します。各動作モードの等価回路と成立する式は次のように与えられます。時間 t は各動作モードの開始時刻を t＝0 とします。

＜モード 1＞　図(a)

電流 I_{Ld} で Vin が放電し、Vout を充電しています。

＜モード 2＞　図(b)

Lr に電圧 Vout が印加され、Lr の電流 i_{Lr} は初期値 0A からリニアに増加します。

$$i_{Lr}(t)=\frac{1}{L_r}V_{out}t$$

Vout 充電電流（ダイオード D の電流 i_D）は i_{Lr} の増加分だけ減少します。

$$i_D(t)=I_{Ld}-\frac{1}{L_r}V_{out}t$$

モード 2 の継続時間を T_2 とすると、次の式が成立します。

$$i_D(T_2)=I_{Ld}-\frac{1}{L_r}V_{out}T_2=0$$

よって、$T_2=\dfrac{I_{Ld}}{V_{out}}L_r$

＜モード 3～8＞　図(c)、図(d)

モード 3～7 では、Lr には一定の電流 I_{Ld} と Cr 電流 i_{Cr} の合計が流れます。等価回路は図(c)となります。i_{Cr} は Cr と Lr の共振電流であり、I_{Ld} は無視して図(d)で計算できます。図(d)では次の式が成立します。

$$v_{Cr}(t)=\frac{1}{C_r}\int_0^t i_{Cr}(\tau)d\tau$$

$$v_{Lr}(t)=Lr\frac{d}{dt}i_{Cr}(t)$$

$$Vout=v_{Lr}(t)+v_{Cr}(t)$$

以上の式を解いて、$i_{Cr}(t)$が求まります。

モード 8 では I_{Ld} は Lr ではなく Cr を流れますが、計算には図(d)を使えば OK です。

なお、v_{Cr} は図 1 の v_D と同じです。

以上の微分方程式を解くと、

$$i_{Cr}(t)=Vout\sqrt{\frac{C_r}{L_r}}\sin\left(\frac{1}{\sqrt{L_rC_r}}t\right)\quad\cdots\cdot(1)$$

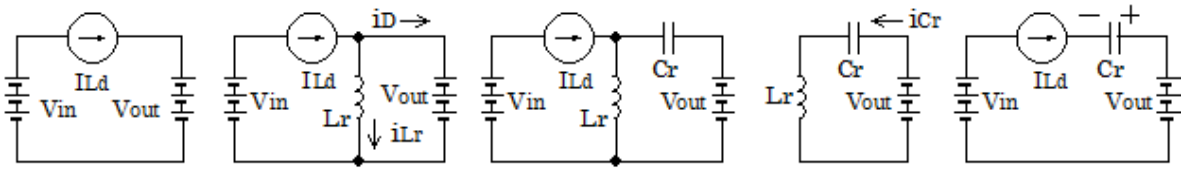
$$v_{Cr}(t)=V_{out}\left\{1-\cos\left(\frac{1}{\sqrt{L_r C_r}}t\right)\right\} \quad \cdots\cdot(2)$$

＜モード 9＞　図(e)

Cr が一定の電流 I_{Ld} で放電し、Cr 電圧はリニアに減少します。

$$v_{Cr}(t)=v_{Cr}(0)-\frac{1}{C_r}I_{Ld}t$$

$v_{Cr}(0)$は v_{Cr} のモード 9 の初期値ですが、モード 8 の最終値と同じであり、式(1)と式(2)で計算されます。



(a)　(b)　(c)　(d)　(e)

図 5　等価回路

■スイッチ素子ターンオフ時のサージ電圧

図 3 に示したように、スイッチ素子 Q の電圧 v_Q は D_Q 電流 i_{DQ} が流れ終わってモード 8 が終了した瞬間に急上昇します。図 6 に実測波形を示します。i_Q が流れ終わった瞬間に v_Q にサージ電圧が発生し、その後しばらくの間大きな振動が継続しています。なお、測定した回路では Q に FET を使用しており、D_Q は Q の寄生ダイオードなので、図 6 の i_Q 波形は Q の電流と D_Q の電流の合計です。サージ電圧が発生した時の電流経路を図 7 に示します。C_Q は Q の寄生容量です。D_Q 電流が流れ終わると平滑コンデンサ Cd が電源となり、点線の径路で電流が流れて C_Q が急速に充電されます。その結果、C_Q が過大に充電されてサージ電圧が発生します。点線の径路は Lr と C_Q の共振電流の径路であり、サージ電圧発生後 C_Q は点線の径路で充放電を繰り返し、v_Q の振動が継続します。

なお、図 3 のシミュレーション波形では v_Q にサージ電圧は発生していませんが、これは Q に理想スイッチを使用しているからであり、C_Q を挿入すればシミュレーションでも実測波形と類似の電圧振動を確認できます。

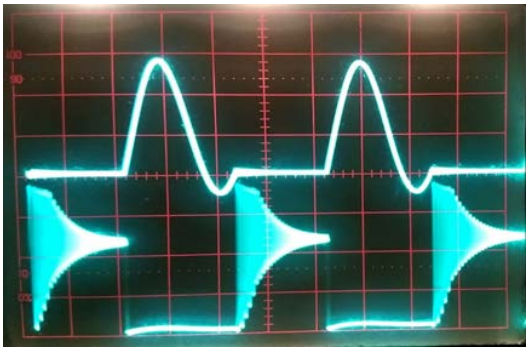


図 6　スイッチ素子のサージ電圧と振動
（上：i_Q、下 v_Q）

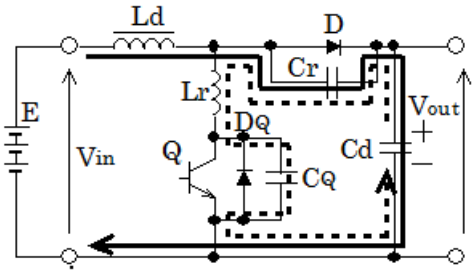


図 7　サージ電圧発生時の電流経路

スイッチ素子 Q のサージ電圧を抑制するための回路を図８に示します。ダイオード Dcla を挿入し、C_Q の電圧を Vout にクランプしています。サージ電圧発生時は Lr のエネルギーで C_Q が充電されますが、Dcla の追加により Lr 電流は Dcla を通って環流し、C_Q は Vout 以上には充電されません。Dcla を追加した時の実測波形を図９に示します。サージ電圧とその後の振動は抑制されています。

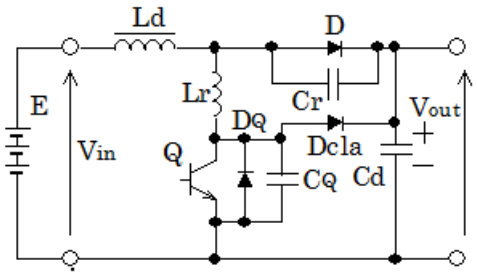


図８　クランプダイオード Ccla の挿入

図９　クランプダイオードの効果
（上：i_Q、下 v_Q）

■負荷変動の影響

電流共振型昇圧チョッパでは、スイッチ素子 Q のオン期間に共振現象が発生するので、オン時間は Cr と Lr の共振周波数で決まります。したがって、出力電圧 Vout の制御は Q のオフ時間で行います。Vout を上げる時はオフ時間を短く、Vout を下げる時はオフ時間を長くします。

この回路方式では、電力損失を無視すれば出力電流 Iout が変動しても Vout はほとんど変化しませんが[2]、実際には Iout が大きいほど損失が大きいので、昇圧動作が必要です。その結果、Vout の定電圧を維持するには、Iout の増加と共に通流率 α と周波数 f は大きくなります。図 10 と図 11 は出力電圧を 24V 一定に保つよう制御した時の α と f の変化を実測したものです。

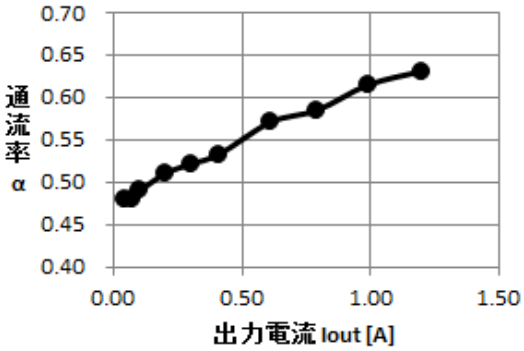


図 10　通流率 α の変化

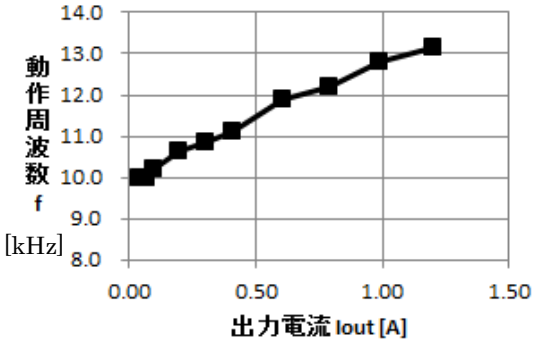


図 11　動作周波数 f の変化

電流共振型昇圧チョッパでは、モード 8 でスイッチ素子 Q をターンオフさせることによりソフトスイッチングを実現します。したがって、ソフトスイッチングの成立条件はモード 8 が存在すること、すなわち Lr の電流が負になる期間が存在することです。図２、図３からわかるように、Lr の電流は、Lr と Cr の共振電流に Ld の電流を加算したものとなります。Ld 電流は出力電流 Iout に比例するので、Iout が大きい時は Lr 電流が負にならず、ソフトスイッチング不可となります。

図 12 は出力電流 Iout を変化させた時の i_Q（＝i_{Lr}）を測定したものです。Iout＝1A ではソフトスイッチング不可、Iout＝0.8A ぐらいがソフトスイッチングの限界であることが分かります。

なお、共振電流の振幅は Iout には無関係に Lr と Cr で決まるので、図(c)のように、Iout＝0.04A の微少負荷時も Q には大きな電流が流れています。したがって、軽負荷時の効率は悪くなります。

(a) Iout＝1.0A　　(b) Iout＝0.8A　　(c) Iout＝0.04A

図 12　負荷変動による i_Q 波形の変化（上：スイッチ素子電流 i_Q、下：ゲート信号 Vgs）
（図 10,11,12 の測定条件：Vin＝12V、Vout＝24V、Iout 可変、Lr＝60μH、Cr＝2μF）

本技術メモは、舞鶴高専平地研究室 2017 年度卒研生岡田裕樹の卒業論文の一部を分かり易くまとめたものです。

■参考文献

[1] 平地研究室技術メモ No. 20191001、「電圧共振型昇圧チョッパ回路の概要」
[2] 原田耕介、二宮保、顧文建、「スイッチングコンバータの基礎」、コロナ社、1992 年

以上