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

（読んでほしい人：パワエレ技術者）

2019/10/1 舞鶴高専 平地克也

【あらまし】 ソフトスイッチングの主流の回路方式は、電圧共振・電流共振から部分共振に移行してすでに 20 年以上経過しましたが、近年電圧共振の仲間である E 級スイッチングや電流共振の一種である LLC 方式が注目されています。パワエレ技術者は電圧共振・電流共振の古い回路方式もよく理解しておく必要がありそうです。本技術メモでは電圧共振の基本回路である電圧共振型昇圧チョッパ回路の動作原理と特性の概要を説明します。

■電圧共振型昇圧チョッパ回路の概要

電圧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 と並列に Cr、ダイオード D と直列に Lr を挿入しています。Lr と Cr が共振して Q の電圧波形は正弦波状になり、ソフトスイッチング（ZVS）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。

ZVS 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。8 個の動作モードがあり、Q はモード 1 の終わりで ZVS でターンオフし、モード 6 の途中で ZVS でターンオンします。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 のスイッチ素子電圧 v_Q 波形から分かるように、モード 2 からモード 5 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 はオフ状態を維持しなければならないので、Q のオフ時間は 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 のオン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。

電圧共振の回路では、スイッチ素子の電圧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 v_Q のピーク値は 100V になっています。通常の昇圧チョッパでは v_Q のピーク値は出力電圧（図 3 では 36V）に等しいので 3 倍近い値となります。動作条件によっては、さらに高い電圧となります。スイッチ素子に高耐圧が要求されることと、動作周波数が変化することが電圧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。

なお、図 3 ではモード 6 の途中で i_{Cr} と i_Q に小さなサージ電流が見えますが、これは D_Q が導通している時に Q がターンオンしたので、D_Q の電圧降下の電圧を有する Cr の Q による短絡電流です。

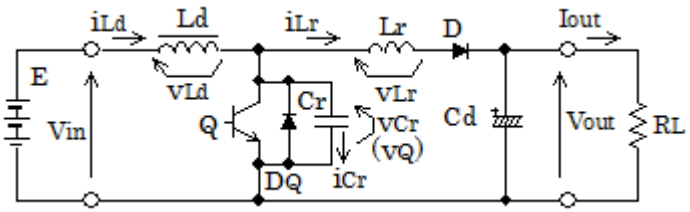
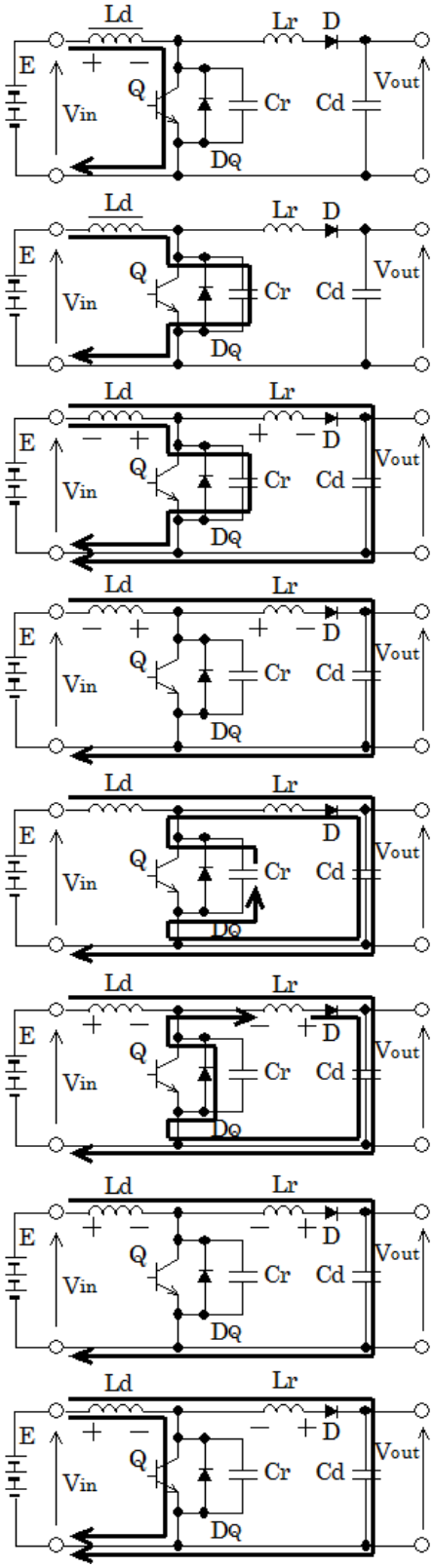


図 1　電圧共振型昇圧チョッパ



＜モード 1＞

Q はオン、Ld 電流増加、Ld にエネルギー蓄積。

Q が ZVS でターンオフして次のモードへ。

＜モード 2＞

Ld 電流が Q から Cr に転流、Cr 電圧増加。

Cr 電圧 v_{Cr} が Vout を越えて次のモードへ。

＜モード 3＞

v_{Cr}＞Vout なので v_{Lr}＞0。Lr 電流 i_{Lr} 増加。

i_{Lr}＝i_{Ld} となってモード 4 へ。

＜モード 4＞

i_{Lr}＝i_{Ld} なので i_{Cr}＝0

i_{Lr} は引き続き増加中であり、このモードは一瞬で終了する。

＜モード 5＞

i_{Lr}＞i_{Ld}、Cr は放電に転じる。

Cr の放電が完了して次のモードへ。

＜モード 6＞

Cr の放電が完了したので Lr 電流は Cr から D_Q に転流する。

このモードで Q が ZVS でターンオンする。

v_{Lr}＝－Vout であり、i_{Lr} は減少。i_{Lr}＝i_{Ld} となって次のモードへ。

＜モード 7＞

i_{Lr}＝i_{Ld}

i_{Lr} は引き続き減少中であり、このモードは一瞬で終了する。

＜モード 8＞

i_{Lr}＜i_{Ld} であり、i_{Ld}－i_{Lr} の電流が Q に流れる。

v_{Lr}＝－Vout を継続しており、i_{Lr} は減少。i_{Lr}＝0 となってモード 1 に戻る。

図２　動作モードと電流経路

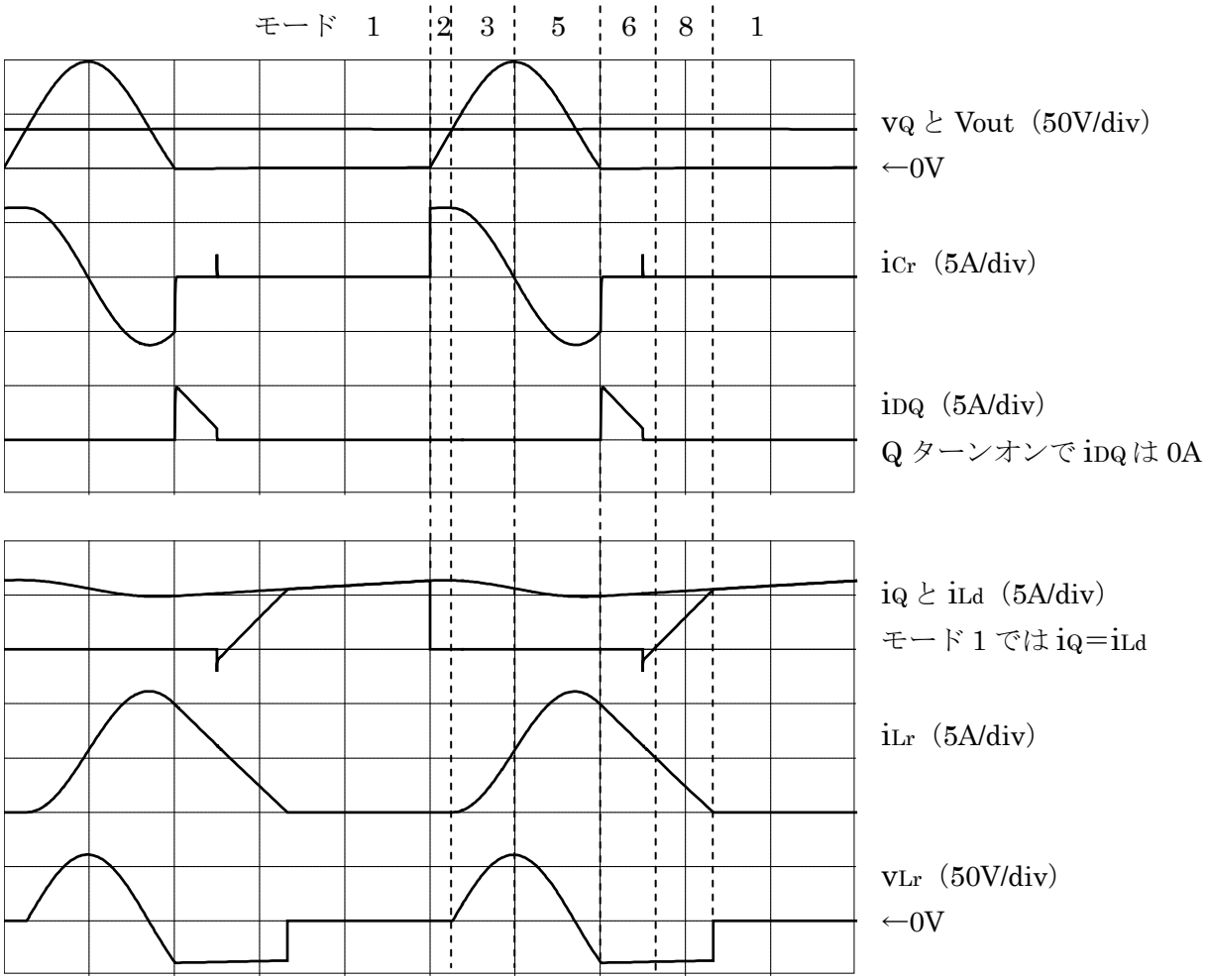


図３　シミュレーション波形（10μsec/div）

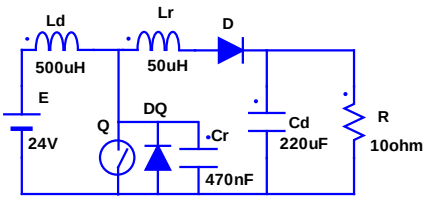


図４　シミュレーション回路

（動作周波数 20kHz、Q の通流率 0.5、Vout＝36V）

■各動作モードの等価回路と成立する式

各動作モードの等価回路を図５に示します。平滑リアクトル Ld のリプル電流は無視し、E と Ld を定電流源 ILd 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＞

ILd を Q で短絡しています。

＜モード 2＞

定電流 I_{Ld} で Cr を充電しています。次の式が成立します。

$$v_{Cr}=\frac{1}{C_r}I_{Ld}t$$

v_{Cr} が Vout に達すると i_{Lr} が流れ初め、モード 2 は終了します。モード 2 の継続時間を T_2 とすると、

$$V_{out}=\frac{1}{C_r}I_{Ld}T_2 \quad \text{より、} T_2=\frac{V_{out}}{I_{Ld}}C_r$$

＜モード 3～5＞

モード 3～5 全て等価回路は同じですが、モード 3 では $i_{Cr}>0$、モード 4 では $i_{Cr}=0$、モード 5 では $i_{Cr}<0$、となります。次の式が成立します。

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

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

$$v_{Cr}(t)=V_{out}+v_{Lr}(t)$$

$$I_{Ld}=i_{Cr}(t)+i_{Lr}(t)$$

以上の微分方程式を解くと、

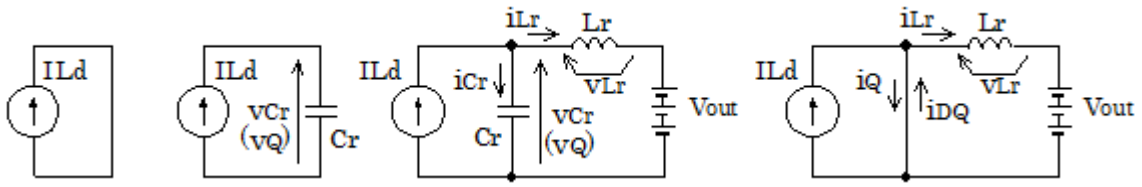
$$i_{Cr}(t)=I_{Ld}\times\cos\left(\frac{1}{\sqrt{L_rC_r}}t\right)$$

$$v_{Cr}(t)=V_{out}+I_{Ld}\sqrt{\frac{L_r}{C_r}}\sin\left(\frac{1}{\sqrt{L_rC_r}}t\right)$$

＜モード 6～8＞

モード 6～8 全て等価回路は同じですが、モード 6 では D_Q に電流が流れ、モード 8 では Q に電流が流れます。モード 6 では次の式が成立します。

$$i_{DQ}(t)=i_{DQ}(0)-\frac{1}{L_r}V_{out}t$$



＜モード 1＞　＜モード 2＞　＜モード 3～5＞　＜モード 6～8＞

図 5　各動作モードの等価回路

$i_{DQ}(0)$はモード 6 の i_{DQ} の初期値ですが、モード 5 の $|i_{Cr}|$ の最終値であり、$v_{Cr}(t)$が 0 になる時刻の $i_{Cr}(t)$の値（負の値）の絶対値です。
モード 8 では次の式が成立します。

$$i_Q(t) = -i_{DQ}(0) + \frac{1}{L_r} V_{out} t$$

なお、本技術メモの内容は、舞鶴高専平地研究室専攻科 2 年生奥村悦理の昨年度の研究内容の一部を分かり易くまとめたものです。

以上