平地研究室技術メモ No.20200420

E 級スイッチングによる昇圧チョッパの概要

（読んでほしい人：パワエレ技術者）

2020/4/20 舞鶴高専名誉教授 平地克也

【あらまし】 近年、非接触給電の分野で E 級スイッチングが注目されています。E 級スイッチングは古くからある技術で、DC/DC コンバータの分野では 1980 年代に広く研究されました。しかしながら、E 級スイッチングにはいくつかの克服の困難な課題があり、DC/DC コンバータの分野で実用化されることはありませんでした。近い将来、非接触給電で実用化されるなら、パワーエレクトロニクスの分野で E 級スイッチングが実用化された初めての例となるでしょう。本技術メモでは E 級スイッチングの理解の一助として、1980 年代に広く研究された E 級スイッチングによる昇圧チョッパの概要を説明します。

■E 級スイッチングによる昇圧チョッパの回路構成

図 1 に電圧共振型昇圧チョッパの回路構成を示します。この図は技術メモ No.20191001「電圧共振型昇圧チョッパの概要」[1]の図 1 と同じものです。図 2 に E 級スイッチングによる昇圧チョッパの回路構成を示します。図 1 に対して、Lr と直列の Cr、およびバイパス用ダイオード D_1 が追加されています。電圧共振型昇圧チョッパでは、スイッチ素子の電圧は正弦波状の波形となりますが、電流は矩形波状の波形です[1]。図 2 の E 級スイッチングでは、Lr と Cr の共振のため、スイッチ素子の電流波形も正弦波状となります。また、図 1 では共振用リアクトル Lr の電流 i_{Lr} は常に正ですが、図 2 ではバイパスダイオード D_1 のために i_{Lr} は正負双方向に流れます。

このように、E 級スイッチングは電圧共振と類似点が多いですが、2 つの部品の追加のためにやや複雑な動作となります。

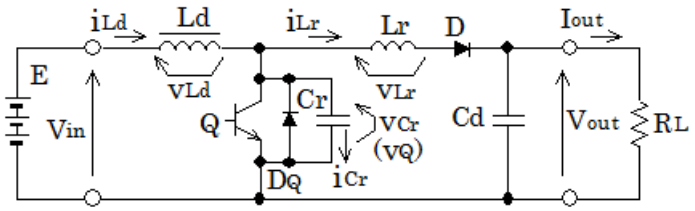


図 1　電圧共振形昇圧チョッパ

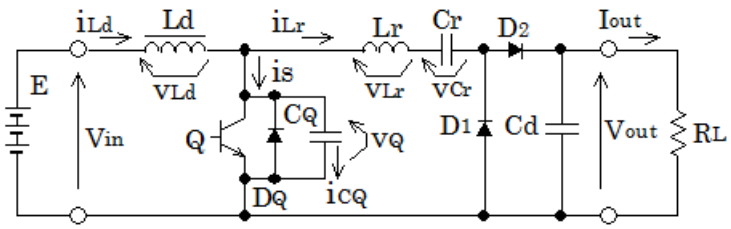


図 2　E 級スイッチングによる昇圧チョッパ

■E 級スイッチングの電圧波形

次の 2 つの条件を満足するスイッチングが E 級スイッチングと呼ばれています。

①スイッチ素子ターンオン時のスイッチ素子電圧がゼロ

②スイッチ素子ターンオン時のスイッチ素子電圧波形の傾きがゼロ

図 3 にこれらの条件を図示しています。(a)は上記の①のみを満足する波形であり、ゼロ電圧スイッチング（ZVS）と呼ばれています。(b)は①②双方を満足しているので E 級スイッチングです。

E 級スイッチングの成立条件を図 4 に示します。ZVS を実現するためには、図 4 の回路図のようにスイッチ素子 Q と並列にコンデンサ C を設ける必要があります。そして、Q がターンオンするまでに何らかの方法で C の放電を完了させて $v_Q=0$ とすれば①が成立します。さらに②を成立させるには、図 4 の v_Q と i_C に示すように、$v_Q=0$ となった時点で C の放電電流 i_C も 0A となる必要があります。したがって、絶妙のタイミングでコンデンサ C の充放電を制御する必要があり、特定の動作条件に対して E 級スイッチングを実現するには C の容量など部品定数をきっちり合わせ込む必要があります。通常 DC/DC コンバータでは、入力電圧や出力電流が変化しても正常動作する必要がありますが、このような変化に対して常に E 級スイッチングが成立するように設計することは困難です。

図 2 の回路構成で②は成立せず、①のみ成立させた動作は「準 E 級スイッチング」と呼ばれています。準 E 級スイッチングなら入力電圧や出力電流の変化に対応することができます。

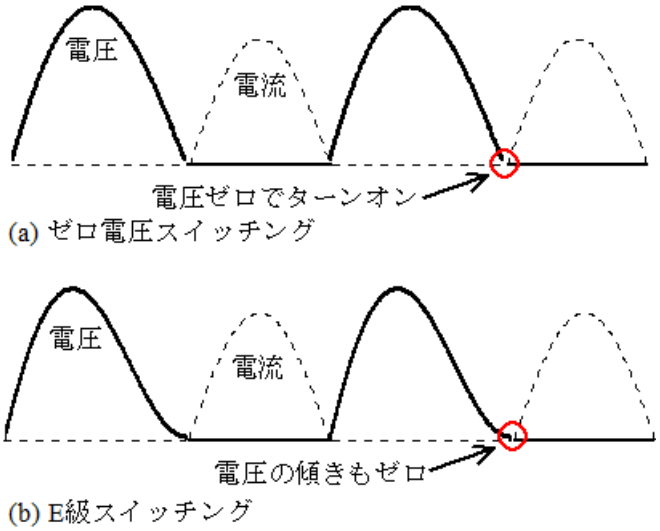


図 3　ゼロ電圧スイッチングと E 級スイッチング

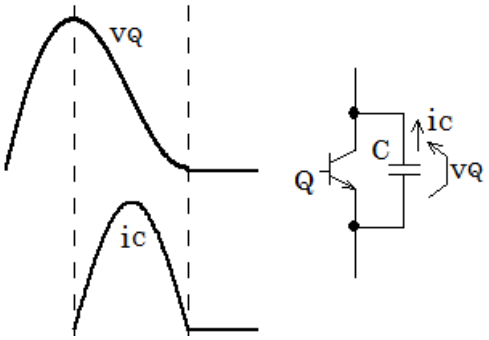
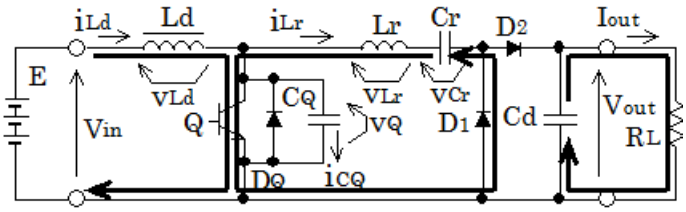


図 4　E 級スイッチング成立条件

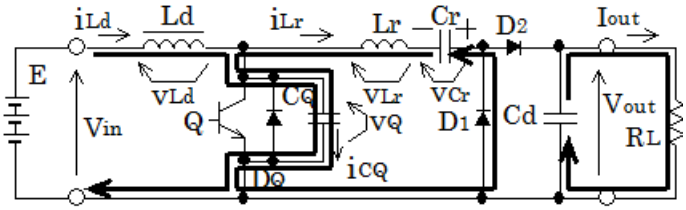
■準 E 級スイッチングの動作モードと電流径路

図 5 に準 E 級スイッチングの動作モードと電流径路を示します。Lr と Cr には常時正弦波状の共振電流 i_{Lr} が流れます。Ld はかなり大きなインダクタンスを用い、その電流 i_{Ld} はリプル成分の小さな直流電流です。共振電流 i_{Lr} と直流電流 i_{Ld} は、スイッチ素子 Q のオンオフに応じて電流径路が変化し、10 個の動作モードを生じます。Q のターンオフはモード 1、ターンオンはモード 7 で行われ、共に ZVS となります。



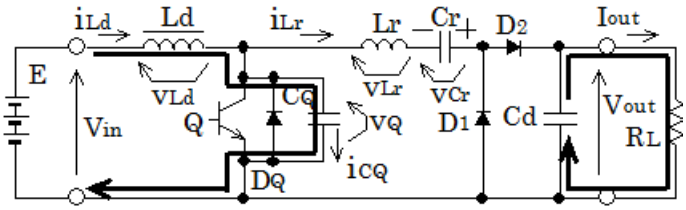
＜モード 1＞　Q はオン

Q には Ld 電流および Lr と Cr の共振電流が流れている。i_{Lr} は負である。Q がターンオフして次のモードに移行する。



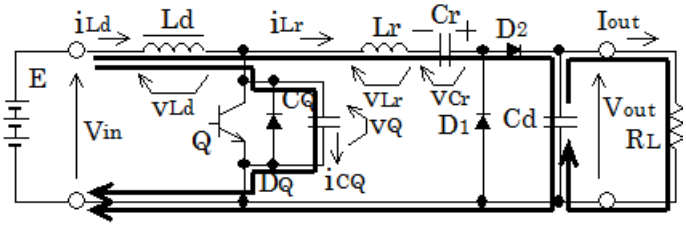
＜モード 2＞　Q はオフ

Q がターンオフしたので Ld 電流と共振電流は Q から C_Q に転流する。C_Q 電圧 v_Q は 0V から徐々に増加するので、Q のターンオフは ZVS である。共振電流の大きさ $|i_{Lr}|$ は徐々に減少し、0A となって次のモードに移行する。



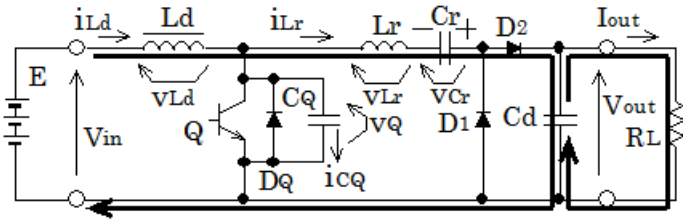
＜モード 3＞　Q はオフ

共振電流が 0A となったので C_Q は Ld 電流のみで充電される。このモードは一瞬で終了し、すぐに逆方向の共振が始まり、次のモードに移行する。



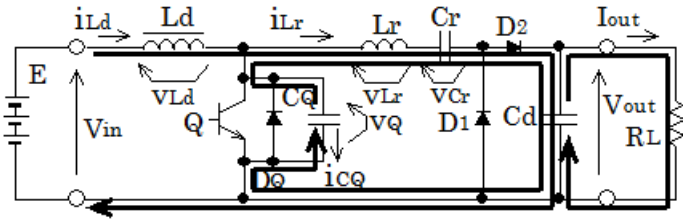
＜モード 4＞　Q はオフ

i_{Lr} が正の方向の共振が始まる。Ld 電流は i_{Lr} と i_{CQ} に分流する。「$i_{Lr}+i_{CQ}=i_{Ld}$＝ほぼ一定」なので、共振電流 i_{Lr} が増加するにつれて、i_{CQ} は減少する。$i_{CQ}=0$ となって次のモードに移行する。



＜モード 5＞　Q はオフ

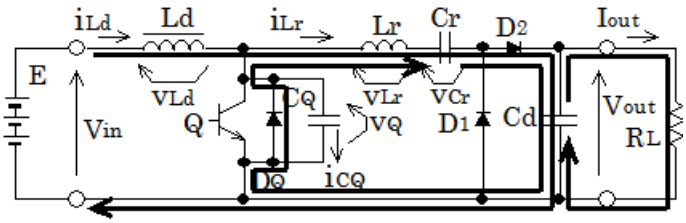
$i_{CQ}=0$ となったので Ld 電流は全て LrCr 共振回路に供給される。共振電流は引き続き増加するので、このモードは一瞬で終了し、次のモードに移行する。



＜モード 6＞　Q はオフ

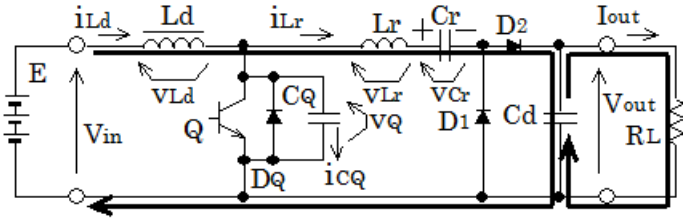
LrCr 共振電流のうち Ld 電流を越えた部分は C_Q から供給される。C_Q の放電が完了し、$v_Q=0$ となって次のモードに移行する。

――― 次頁に続く ―――



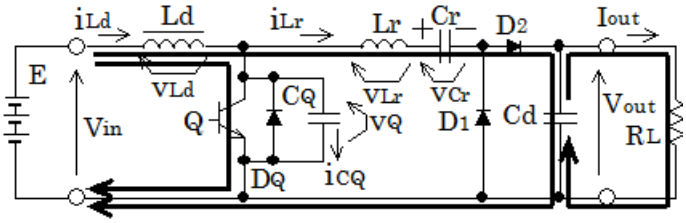
＜モード 7＞　Q はオフからオンへ

v_Q＝0V となったので共振電流は C_Q から D_Q に転流する。このモード中に Q は ZVS でターンオンする。共振電流は徐々に減少し、i_{Lr}＝i_{Ld} となって次のモードに移行する。



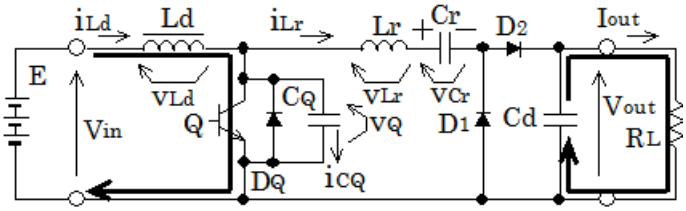
＜モード 8＞　Q はオン

i_{Lr}＝i_{Ld} なので Ld 電流は全て LrCr 共振回路に供給される。共振電流は引き続き減少するので、このモードは一瞬で終了して次のモードに移行する。



＜モード 9＞　Q はオン

共振電流の減少により i_{Lr}＜i_{Ld} となったので、Ld 電流は Q に分流する。共振電流がさらに減少して 0A となって次のモードに移行する。



＜モード 10＞　Q はオン

共振電流が 0A となったので Ld 電流は全て Q を流れる。このモードは一瞬で終了し、すぐに逆方向の共振が始まり、モード 1 に戻る。

図５　準 E 級スイッチングによる昇圧チョッパの動作モードと電流径路

■準 E 級スイッチングの回路各部の電圧・電流波形

図６に準 E 級スイッチング動作時の回路各部のシミュレーション波形を示します。図７にシミュレーション条件を示します。この条件は文献[2]の図７(a)の実験条件を流用しています。図７のシミュレーション波形は文献[2]図７(a)の実験波形とほぼ一致しています。なお、文献[2]は E 級スイッチングを用いた昇圧チョッパの実験結果を示すと同時に、詳しく解析してその特性を導出しており、参考になります。

図６から次の動作が確認できます。

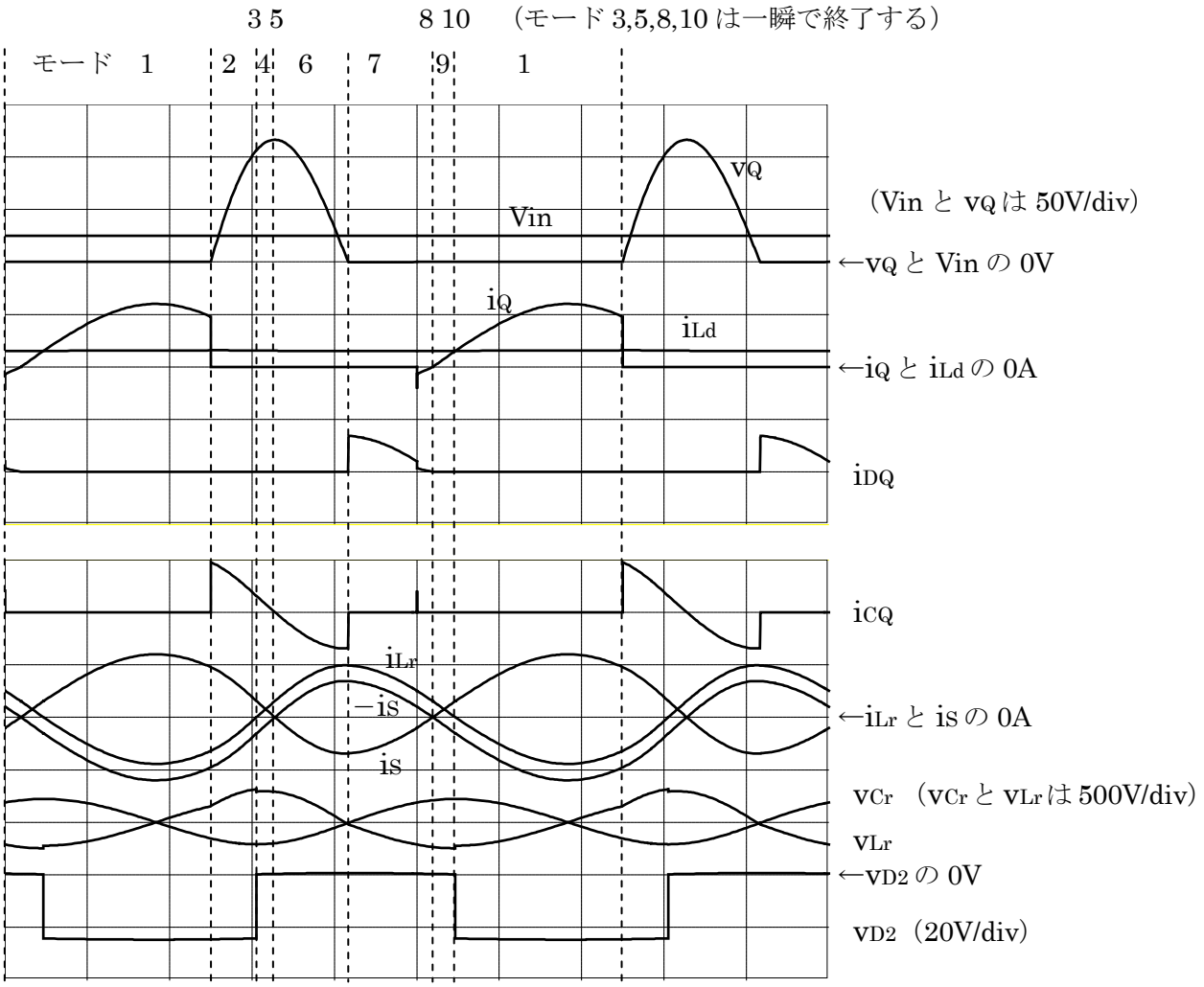
・Q はモード１終了時にターンオフし、共振電流が Q から C_Q に転流している。

・Q の電圧 v_Q はモード２で徐々に増加しており、Q のターンオフは ZVS である。

・モード６終了時に共振電流は C_Q から D_Q に転流している。

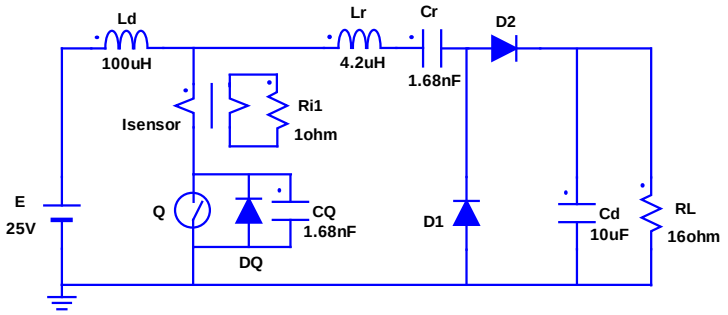
・Q はモード７で ZVS でターンオンしている。

・i_S は Q,D_Q,C_Q の電流の合計であるが（図２参照）、i_{Lr}－(－i_S)＝i_{Lr}＋i_S＝i_{Ld} が常に成立している。



（電流は全て 5A/div）　（Vout＝24V、Iout＝1.5A にて）

図６　準 E 級スイッチング動作時の波形（2 サイクル分を表示、96.62nsec/div）



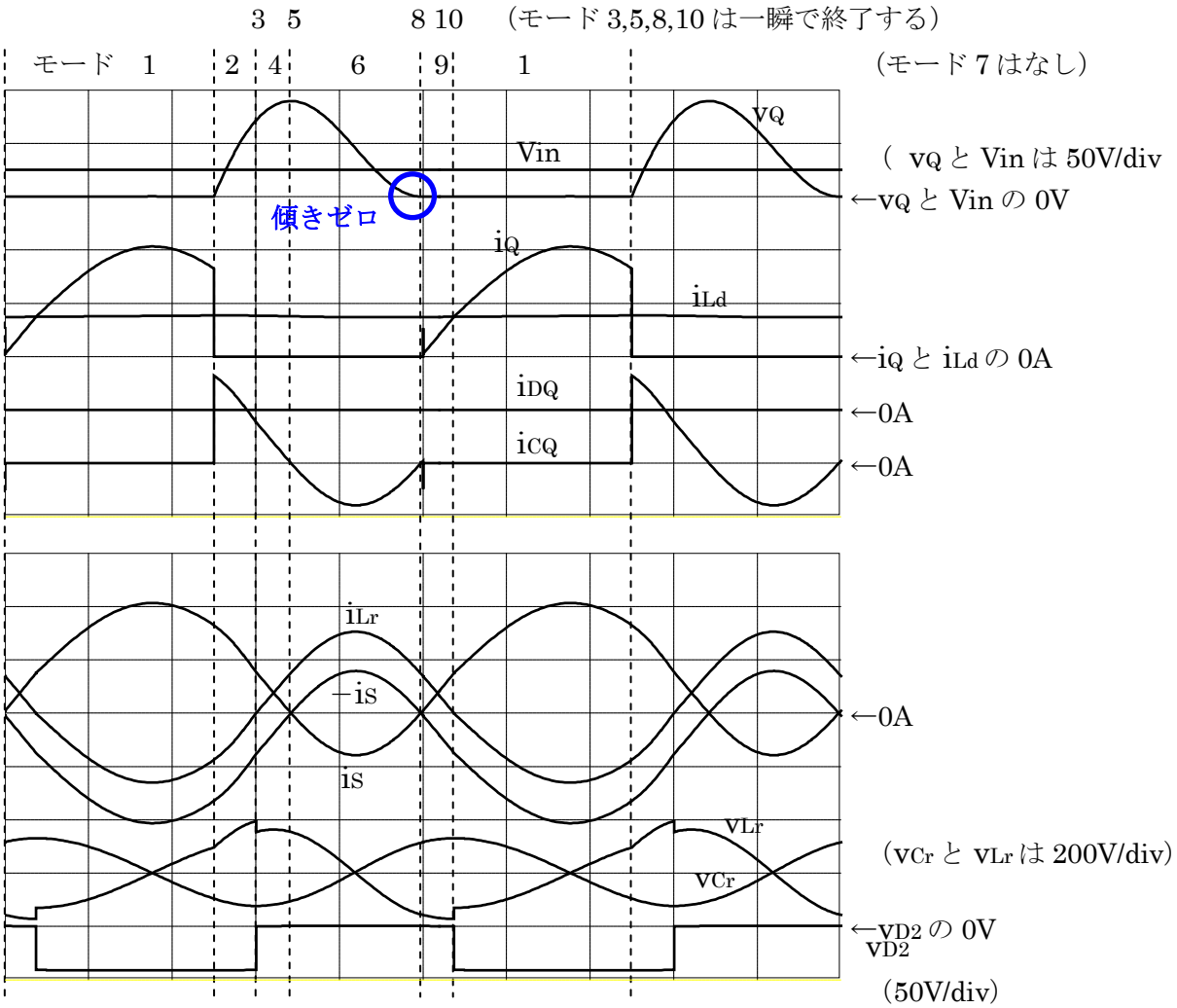
（動作周波数：2.07MHz、Q の通流率：0.5）

図７　図６のシミュレーション条件

■E 級スイッチングの回路各部の電圧・電流波形

図７のシミュレーション条件から次の２項目を変更したシミュレーション結果を図８に示します。

(1) 負荷抵抗を 16Ω から 45.15Ω へ　　(2) 動作周波数を 2.07MHz から 2.11MHz へ



（電流は全て 2A/div）（Vout＝40.7V、Iout＝0.9A、RL＝45.15Ω にて）
（動作周波数：2.11MHz、Q の通流率：0.5）
図８　E 級スイッチング動作時の波形（2 サイクル分を表示、94.79nsec/div）

図８の vQ 波形はモード 6 終了時に傾きがゼロになっており、E 級スイッチングを実現していることが分かります。CQ 電流 icQ はモード 6 終了時にゼロになっており、2 頁の図４で説明した E 級スイッチングの成立条件が満たされていることが分かります。モード 6 終了と同時に Q はターンオンしており、その後、Q の電流 iQ が増加します。したがって、準 E 級動作では存在した DQ が導通する動作モード（モード 7）は存在しません。図８では iDQ は常に 0A になっています。

なお、E 級スイッチング動作が実現するのは、図７の部品定数では 5 頁の(1)(2)の条件の時のみであり、その他の条件では準 E 級スイッチングまたはハードスイッチングとなります。また、図６図８から分かるように、スイッチ素子の電圧・電流のピーク値は通常の昇圧チョッパより大変大きくなります。

■参考文献

[1] 平地克也、「電圧共振型昇圧チョッパの概要」、平地研究室技術メモ No.20191001

[2] 顧文建、原田耕介、「E 級共振スイッチを用いた DC-DC コンバータの回路方式と特性解析」、電気情報通信学会論文誌 B-1, Vol.J74-B-1, No.6, 1991 年 6 月

以上