平地研究室技術メモ No.20200317

電流共振型降圧チョッパ回路の概要

（読んでほしい人：パワエレ技術者）

2020/3/17 舞鶴高専 平地克也

【あらまし】 平地研究室技術メモでは、これまでに共振型チョッパ回路を次のように説明しました。電圧共振型昇圧チョッパ回路：No.20191001、電流共振型昇圧チョッパ回路：No.20191021、電圧共振型降圧チョッパ回路：No.20200115。今回はこの分野の最後となる電流共振型降圧チョッパ回路を説明します。

■電流共振型降圧チョッパの回路構成

技術メモ No.20200115 で説明した電圧共振型と同様に、電流共振型降圧チョッパ回路には「全波型」と「半波型」の 2 種類があります。図１に全波型を示します。通常の降圧チョッパに対して、共振用のコンデンサ Cr とリアクトル Lr、およびダイオード D_Q が付加されています。スイッチ素子 Q が FET の場合、D_Q は FET の寄生ダイオードで OK です。バイポーラトランジスタや IGBT の場合は外付けする必要があります。D_Q があるので、Lr の電流 i_{Lr} は正負双方に流れることができ、「全波型」の電流波形になります。

図２に半波型の回路構成を示します。Lr と直列に Dr を接続しているので、Lr の電流 i_{Lr} は正方向しか流れないので「半波型」の電流波形になります。Dr を接続すると D_Q には電流が流れないので、Q がバイポーラトランジスタや IGBT の場合は D_Q は不要です。

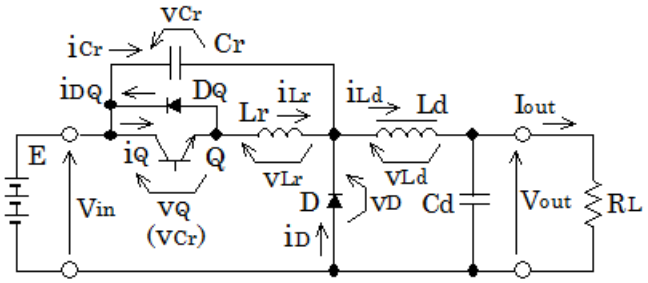


図１　電流共振型降圧チョッパ（全波型）

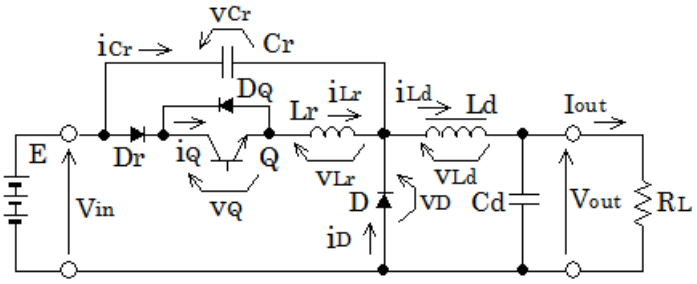


図２　電流共振型降圧チョッパ（半波型）

■全波型の動作モードと波形

図３に全波型の動作モードと電流経路、および各動作モードの動作の概要を示します。図４に各動

作モードの等価回路、図５にシミュレーション条件、図６にシミュレーション波形を示します。

■全波型の各動作モードに成立する式

図４に示した各動作モードの等価回路から、各動作モードに成立する式は以下のように導出されます。

＜図４(a)モード１＞

出力電圧 Vout が Ld に負方向に印加されるので v_{Ld}＝－Vout となり、i_{Ld} は直線的に減少します。変化量 Δi_{Ld} は次の式で与えられます。なお、T_1 はモード１の継続時間（t_1-t_0）であり、図６では 9μsec です。

$$\Delta i_{Ld}=\frac{1}{Ld}(-Vout)T_1$$

図６のシミュレーションでは Ld のインダクタンスはかなり大（1mH）であり、Δi_{Ld} は次のように小さな値となっています。

$$\Delta i_{Ld}=\frac{1}{1mH}(-26V)\times 9\mu\text{sec}=-0.234\text{A}$$

i_{Ld} の平均値は出力電流 Iout に等しく、図６では 26V÷3Ω＝8.67A です。

＜図４(b)モード２＞

Ld のリプル電流を無視し、Ld を定電流源 I_{Ld} で近似しています。I_{Ld}＝Iout＝8.67A です。Lr に入力電圧 Vin が印加され、i_{Lr} は I_{Ld} まで直線的に増加します。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。

$$v_{Lr}=\text{Vin}$$

$$i_Q=i_{Lr}=\frac{1}{Lr}\text{Vin}\times(t-t_1)$$

図６では次のように計算されます。

$$i_Q=i_{Lr}=\frac{1}{6\mu H}\times 48\text{V}\times(t-t_1)$$

時刻 t_2 では $i_{Lr}=I_{Ld}$＝8.67A であり、モード２の継続時間を T_2 とすると $T_2=t_2-t_1$ なので、

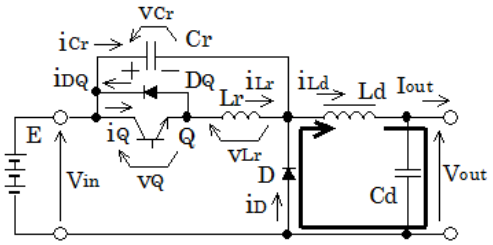
$$8.67\text{ A}=\frac{1}{6\mu H}\times 48\text{V}\times T_2$$

よって、T_2＝1.08μsec

＜図４(c)モード３～７＞

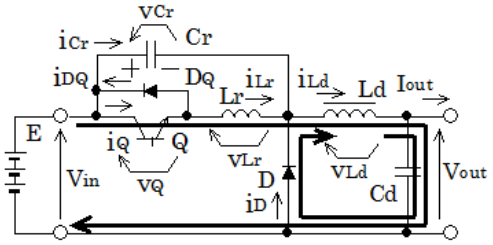
モード３～７は図３の電流経路と図６の波形から明かなように Cr と Lr の共振動作となります。Cr はモード２で Vin まで充電されているので v_{Cr} の初期値は Vin です。したがって、v_{Cr} はピーク値が Vin の cos 波形となり、次式で表されます。

（5 頁に続く）



＜モード 1＞　Q はオフ

Ld の電流が D を介して環流している。Ld のエネルギーは負荷に供給される。通常の降圧チョッパで Q がオフしている動作と同じである。このモードの継続時間を調整することによって、出力電圧を制御できる。Q が ZCS でターンオンして次の動作モードに移行する。

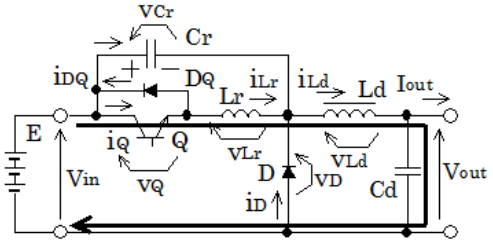


＜モード 2＞　Q はオン

Q がオンしたので Lr に電源電圧 Vin が印加される。

v_{Lr}＝Vin であり、i_{Lr} は直線的に増加する。

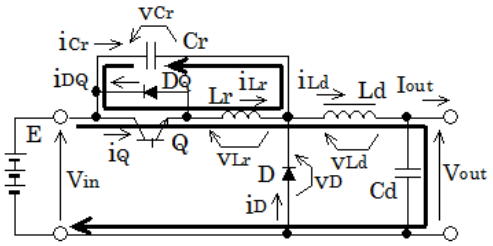
i_{Ld} はあまり変化しないので、i_{Lr} の増加に対応して i_D は減少する。i_{Lr}＝i_{Ld} となり次の動作モードに移行する。



＜モード 3＞　Q はオン

i_{Lr}＝i_{Ld} で、i_D＝0 である。

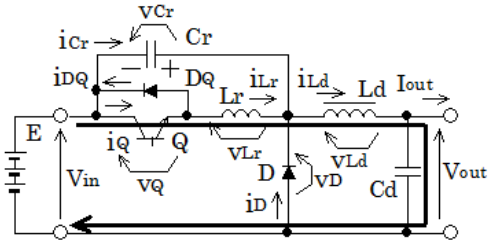
この時、共振用コンデンサ Cr は図示のように正の方向に電源電圧に充電されている。このモードは一瞬で終わり、次のモードに移行する。



＜モード 4＞　Q はオン

Cr の電圧が Lr に印加され、Cr と Lr の共振が始まる。

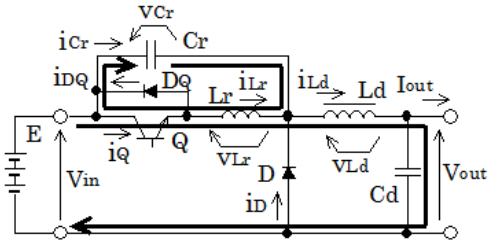
Q の電流には Ld 電流に共振電流が加算される。共振の半サイクルが終了して次のモードに移行する。



＜モード 5＞

共振の半サイクルが終了した瞬間の動作モードである。

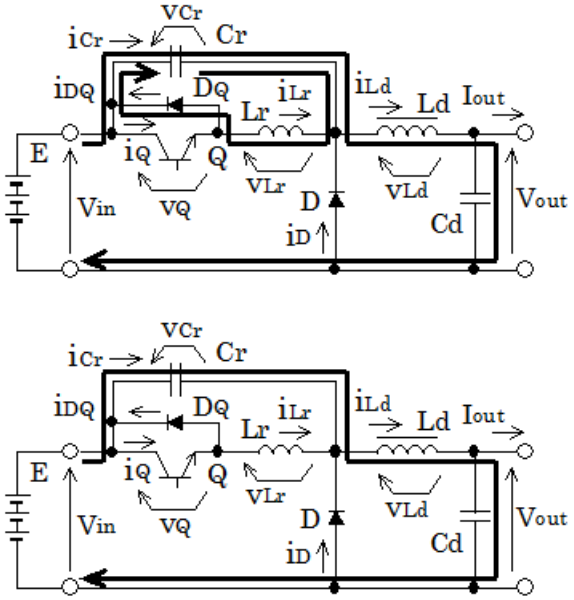
この時共振電流はゼロ、v_{Cr} は負方向に最大値（−Vin）となる。このモードは一瞬で終了し、負方向の半サイクルが開始されて次の動作モードに移行する。



＜モード 6＞

Cr の電圧（−Vin）が v_{Lr} に印加されて負方向の共振を開始する。i_{Lr} は共振電流と i_{Ld} の合計なので、i_{Lr} は減少する。共振電流 i_{Cr} が i_{Ld} を越えると i_{Lr} は負となり、次のモードに移行する。

（次頁に続く）



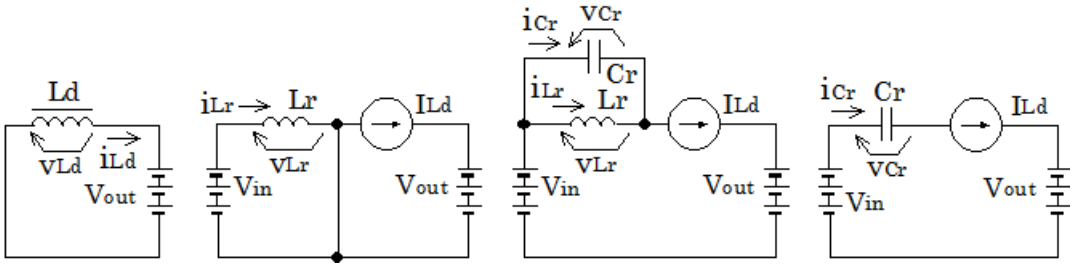
＜モード 7＞

i_{Lr} は負となったので、トランジスタ Q を流れることができず、D_Q に転流する。この動作モードで Q は ZCS かつ ZVS でターンオフする。Cr と Lr の共振が終了し、$i_{Lr}=0$ となって次のモードに移行する。なお、図 6 のシミュレーション波形では i_Q がモード 7 の途中まで流れているが、これはシミュレーションでは Q に理想スイッチを使用しているからである。

＜モード 8＞

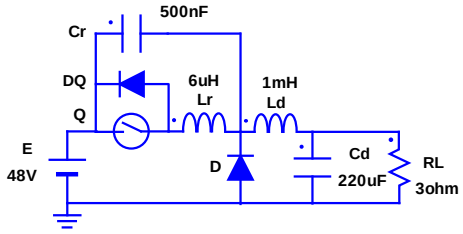
$i_{Lr}=0$ となったので、Cr は i_{Ld} のみで充電される。v_{Cr} が Vin に達すると D が導通してモード 1 に戻る。

図 3　電流共振型降圧チョッパ（全波型）の動作モードと電流経路



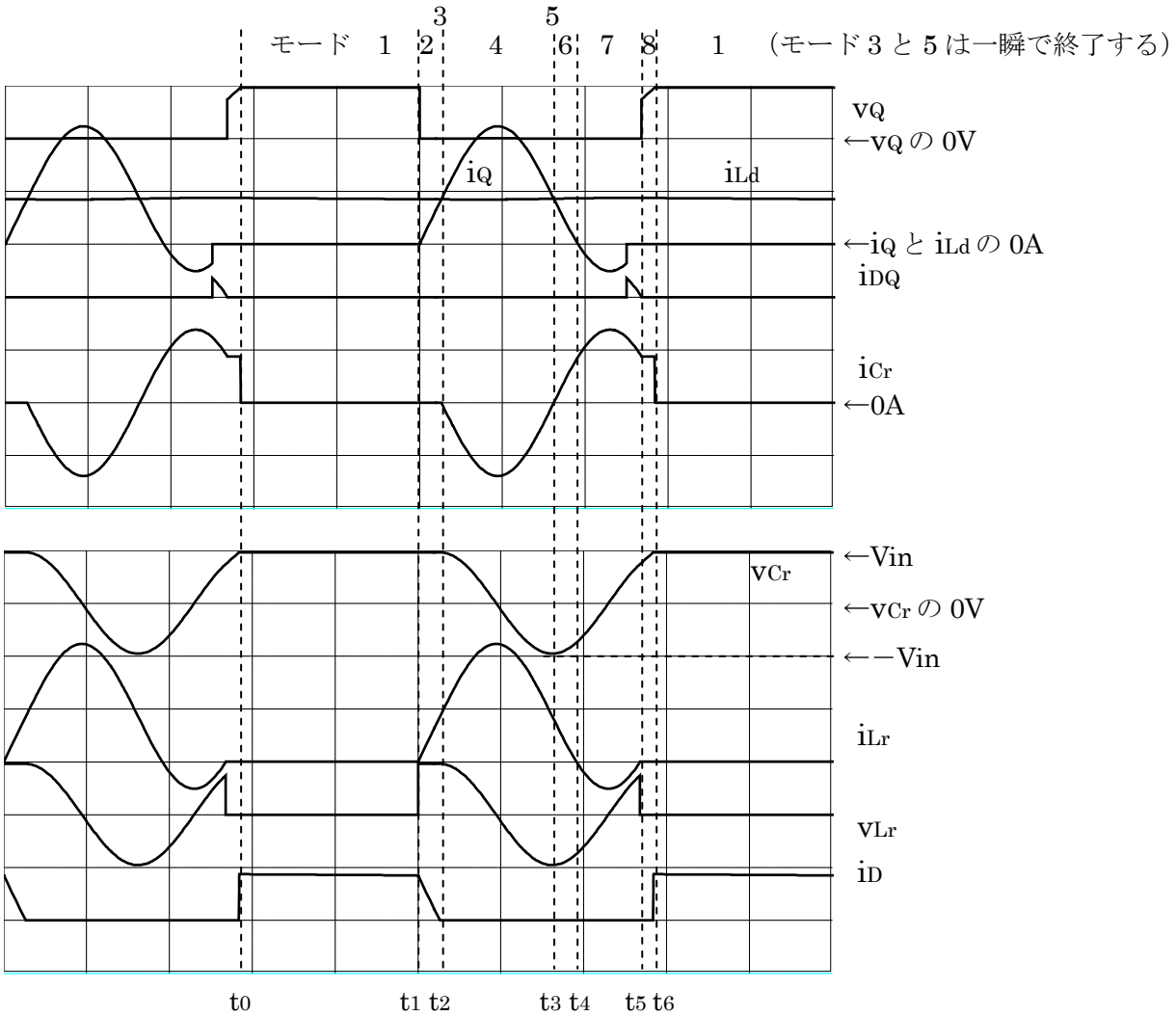
(a) モード 1　　(b) モード 2　　(c) モード 3～7　　(d) モード 8

図 4　電流共振型降圧チョッパ（全波型）の等価回路



（Q の動作周波数は 50kHz、通流率は 0.5、回路の出力電圧は 26V）

図 5　電流共振降圧チョッパ（全波型）のシミュレーション条件



（4μsec/div、電圧は全て 50V/div、電流は全て 10A/div、時間の原点は t_0 とし、$t_0=0$ とする）

図 6　電流共振型降圧チョッパ（全波型）のシミュレーション波形

（2 頁からの続き）

$$v_{Cr}=V_{in}\times\cos\omega_n(t-t_2)$$

ただし、$\omega_n=\dfrac{1}{\sqrt{LrCr}}$

Cr 電流 i_{Cr} は次のように計算されます。

$$i_{Cr}=Cr\frac{d}{dt}v_{Cr}(t)=Cr\frac{d}{dt}\left(V_{in}\cos\omega_n(t-t_2)\right)=-\omega_n CrV_{in}\times\sin\omega_n(t-t_2)$$

$$=-\sqrt{\frac{Cr}{Lr}}V_{in}\times\sin\omega_n(t-t_2)$$

Lr 電流はモード 2 で I_{Ld} まで増加しているので、i_{Lr} の初期値は I_{Ld} です。時刻 t_2 以降は初期値に共振電流$-i_{Cr}$ が加算されるので、

$$i_{Lr}=I_{Ld}-i_{Cr}=I_{Ld}+\sqrt{\frac{Cr}{Lr}}V_{in}\times\sin\omega_n(t-t_2)$$

図３より、モード 3～7 では v_{Lr} は v_{Cr} に等しいので、

$$v_{Lr}=v_{Cr}=V_{in}\times\cos\omega_n(t-t_2)$$

図６では次のように計算されます。

$$\omega_n=\frac{1}{\sqrt{LrCr}}=\frac{1}{\sqrt{6\mu H\times 500nF}}$$

共振周波数 $f_n=\omega_n/2\pi=92\text{kHz}$

$$\sqrt{\frac{Cr}{Lr}}=\sqrt{\frac{500nF}{6\mu H}}=0.289$$

$$v_{Cr}=v_{Lr}=V_{in}\times\cos\omega_n(t-t_2)=48\cos\omega_n(t-t_2)\ [\text{V}]$$

$$i_{Cr}=-\sqrt{\frac{Cr}{Lr}}V_{in}\times\sin\omega_n(t-t_2)=-13.9\sin\omega_n(t-t_2)\ [\text{A}]$$

$$i_{Lr}=I_{Ld}-i_{Cr}=8.67+13.9\sin\omega_n(t-t_2)\ [\text{A}]$$

＜図４(d)モード８＞

モード８の v_{Cr} の初期値はモード７の v_{Cr} の最終値 $v_{Cr}(t_5)$なので、次のように計算されます。時刻 t_5 で i_{Lr} はゼロなので、

$$i_{Lr}=I_{Ld}-i_{Cr}=I_{Ld}+\sqrt{\frac{Cr}{Lr}}V_{in}\times\sin\omega_n(t_5-t_2)=0$$

$$\omega_n(t_5-t_2)=\sin^{-1}\left(-\frac{I_{Ld}}{V_{in}}\sqrt{\frac{Lr}{Cr}}\right)$$

図６では、$\omega_n(t_5-t_2)=\sin^{-1}\left(-\frac{8.67}{48}\frac{1}{0.289}\right)=360^\circ-38.7^\circ=321^\circ$

$$v_{Cr}(t_5)=V_{in}\times\cos\omega_n(t_5-t_2)$$

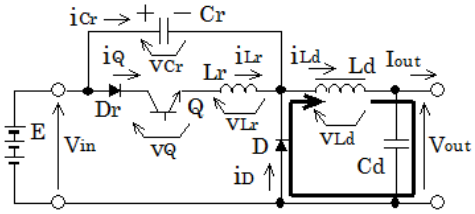
図６では、$v_{Cr}(t_5)=48\times\cos 321^\circ=37.3\text{V}$

モード８では Cr が ILd で充電されるので、v_{Cr} は次の式で表されます。

$$v_{Cr}(t)=v_{Cr}(t_5)+\frac{1}{Cr}I_{Ld}\times(t-t_5)$$

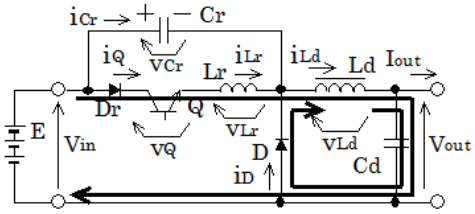
■半波型の動作モードと波形

図７に半波型の動作モードと電流経路、および各動作モードの動作の概要を示します。図８にシミュレーション波形、図９にシミュレーション条件、を示します。半波型では Lr の電流 i_{Lr} が負にならないので、全波型のモード７に該当する動作モードは存在しません。



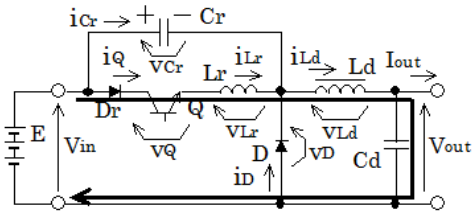
＜モード 1＞　Q はオフ

全波型のモード 1 と同じ。



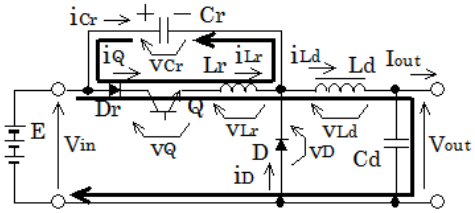
＜モード 2＞　Q はオン

全波型のモード 2 と同じ。



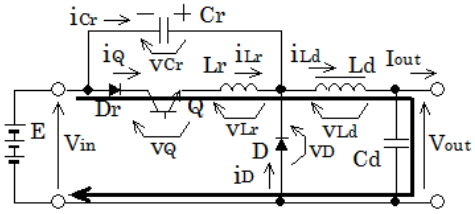
＜モード 3＞　Q はオン

全波型のモード 3 と同じ。



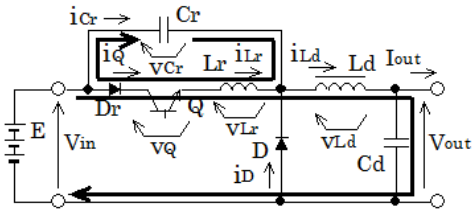
＜モード 4＞　Q はオン

全波型のモード 4 と同じ。



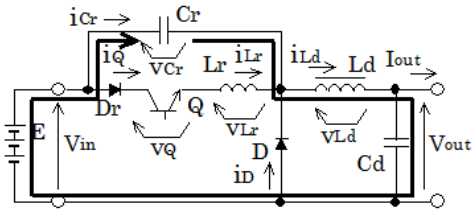
＜モード 5＞　Q はオン

全波型のモード 5 と同じ。



＜モード 6＞　Q はオン

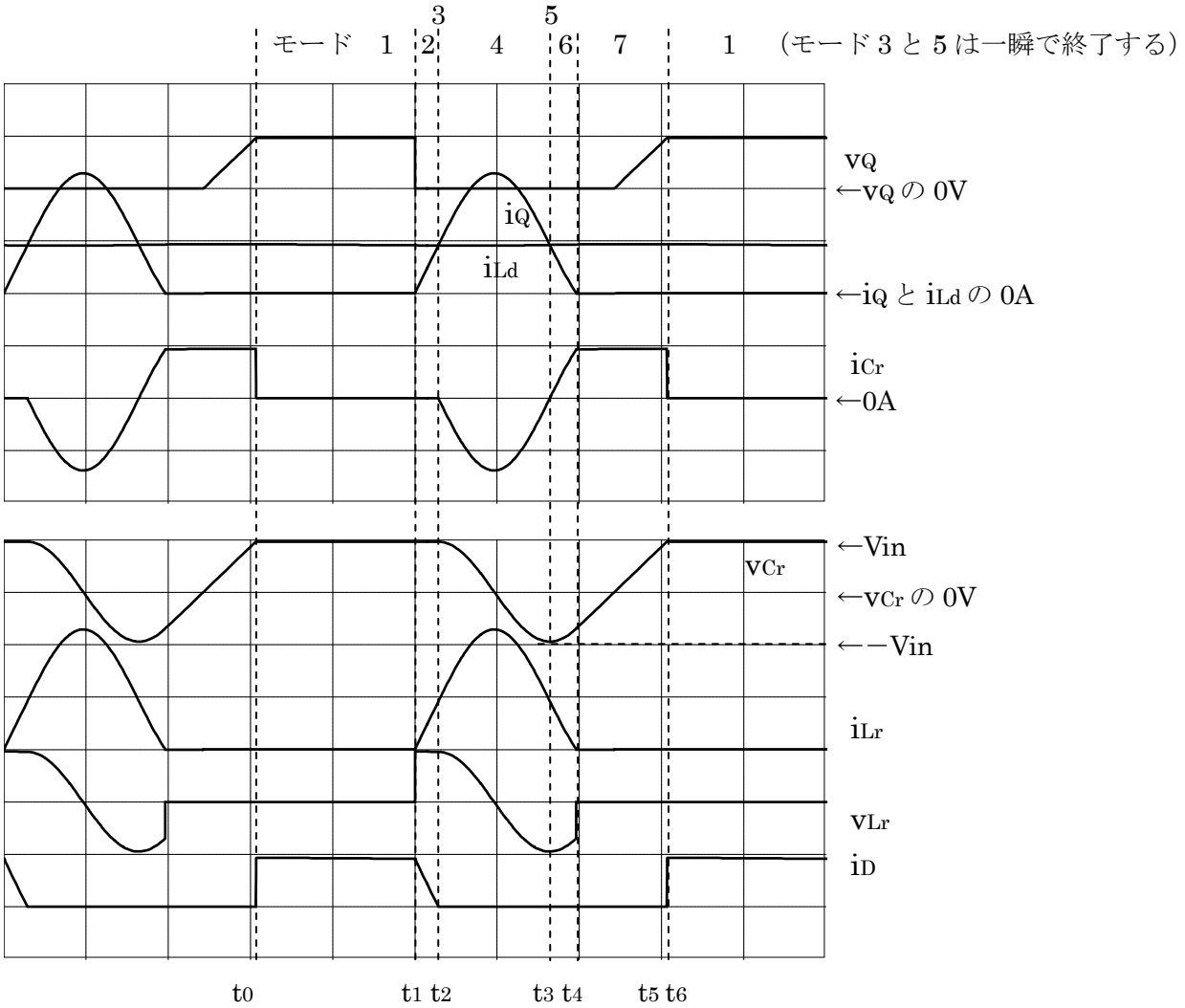
全波型のモード 6 と同じであり、Cr の電圧（−Vin）が v_{Lr} に印加されて負方向の共振を開始する。i_{Lr} は共振電流と i_{Ld} の合計なので、i_{Lr} は減少する。共振電流 i_{Cr} が i_{Ld} と等しくなると i_{Lr} はゼロとなり、Lr と Cr の共振は終了し、次のモードに移行する。



＜モード 7＞　Q はオンからオフ

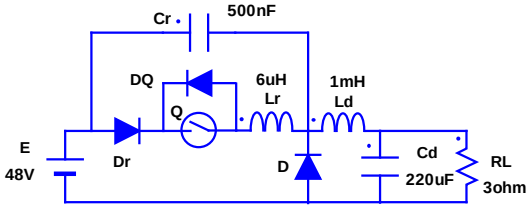
$i_{Cr}=i_{Ld}$ となり、Cr は一定の電流で充電される。この期間で Q は ZCS かつ ZVS でターンオフする。Cr の充電が進み、$v_{Cr}=V_{in}$ となると D の逆バイアスが解消され、D が導通してモード 1 に戻る。

図 7　電流共振型降圧チョッパ（半波型）の動作モードと電流経路



（4μsec/div、電圧は全て 50V/div、電流は全て 10A/div、時間の原点は t_0 とし、t_0＝0 とする）

図 8　電流共振型降圧チョッパ（半波型）のシミュレーション波形



（Q の動作周波数は 50kHz、通流率は 0.45、回路の出力電圧は 28V）

図 9　電流共振降圧チョッパ（半波型）のシミュレーション条件

■半波型の等価回路と成立する式

図 10 に半波型の等価回路を示します。(a)～(d)全て図 4 の全波型と同じですが、(c)と(d)は対応する動作モードが異なります。半波型では全波型のモード 7 に対応する動作モードがないので、(c)に対応する動作モードはモード 3～6 となります。

等価回路が同じなので、成立する式も同じですが、対応する動作モードは異なります。図 9 の動作

条件では次のように計算されます。

モード 3～6 の $v_{Cr}=v_{Lr}=V_{in}\times\cos\omega_n(t-t_2)=48\cos\omega_n(t-t_2)$ [V] ・・・・全波型と同じ

モード 3～6 の $i_{Cr}=-\sqrt{\frac{Cr}{Lr}}V_{in}\times\sin\omega_n(t-t_2)=-13.9\sin\omega_n(t-t_2)$ ・・・・全波型と同じ

$I_{Ld}=V_{out}\div R_L=28V\div 3\Omega=9.33A$

時刻 t_4 では $i_{Cr}=I_{Ld}$ なので、

$-13.9\sin\omega_n(t_4-t_2)=9.33A$

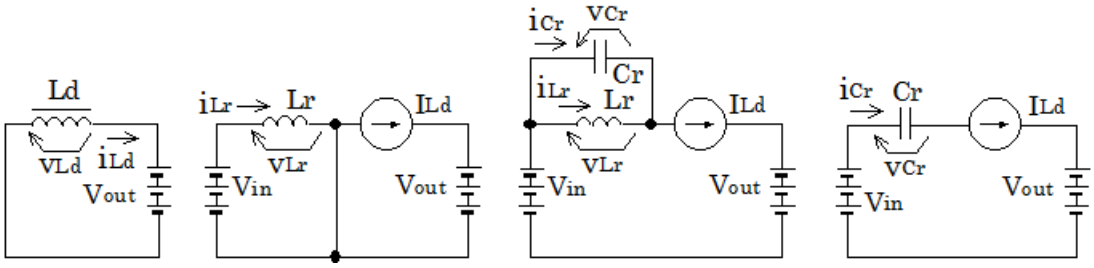
$\omega_n(t_4-t_2)=\sin^{-1}(\frac{9.33}{-13.9})=180^\circ+42^\circ=222^\circ$

なお、$\sin^{-1}(\frac{9.33}{-13.9})$は$-42^\circ$ または $180^\circ+42^\circ$ または $360^\circ-42^\circ$ ですが、今回は $180^\circ+42^\circ$ となります。

$v_{Cr}(t_4)=V_{in}\times\cos\omega_n(t_4-t_2)=48\times\cos222^\circ=-35.7V$

モード 7 では、全波型のモード 8 と同様に、

$v_{Cr}(t)=v_{Cr}(t_4)+\frac{1}{Cr}I_{Ld}\times(t-t_4)$



(a) モード 1　(b) モード 2　(c) モード 3～6　(d) モード 7

図１０　電流共振型降圧チョッパ（半波型）の等価回路

以上