平地研究室技術メモ No.20200115

電圧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）

2020/1/15 舞鶴高専 平地克也

【あらまし】 平地研究室技術メモ No. 20191001 では電圧共振型昇圧チョッパ、No. 20191021 では電流共振型昇圧チョッパを説明しました。本技術メモでは電圧共振型降圧チョッパを説明します。なお、電流共振型降圧チョッパは別途技術メモを作成予定です。

■電圧共振型降圧チョッパ回路の回路構成

電圧共振型降圧チョッパには「半波型」と「全波型」の 2 種類があります。図１に半波型を示します。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、Cr の電圧 v_{Cr}（スイッチ素子 Q の電圧 v_Q でもある）は必ず正であり、負にはならないので「半波型」の波形となります。

図２に全波型の回路構成を示します。D_Q に加えて Dr を接続しているので共振用コンデンサ Cr の電圧 v_{Cr} は正負双方が可能であり、「全波型」の波形になります。スイッチ素子 Q が FET の場合は D_Q は FET の寄生ダイオードです。Dr を付加すると D_Q は導通しないので、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。

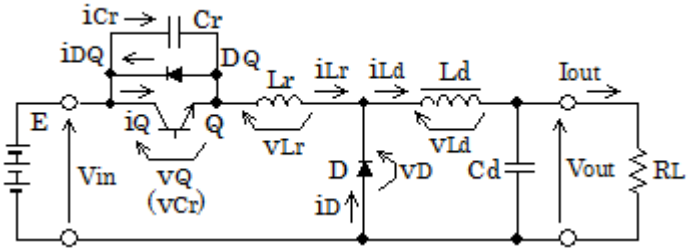


図１　電圧共振型降圧チョッパ（半波型）

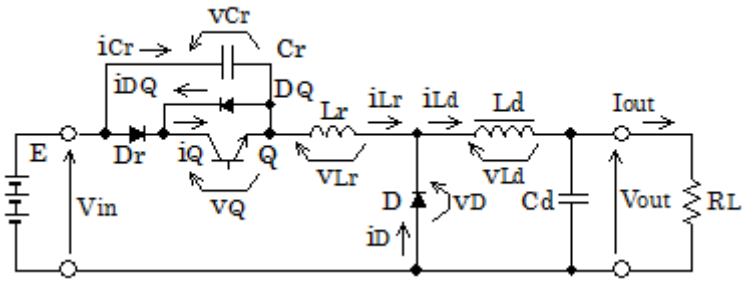
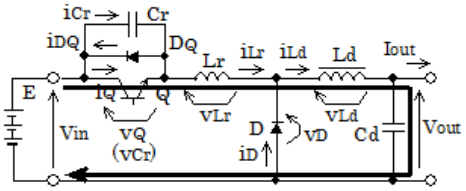


図２　電圧共振型降圧チョッパ（全波型）

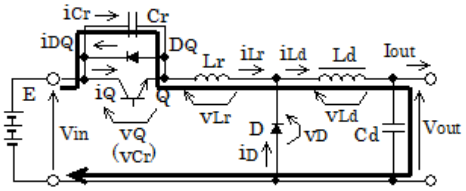
■半波型の動作モードと波形

図３に電圧共振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４にシミュレーション波形、図５にシミュレーション条件を示します。



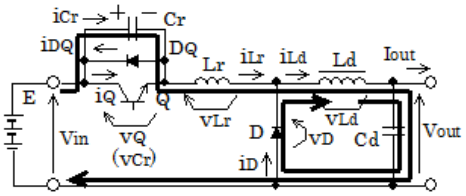
＜モード 1＞　Q はオン

Q がオンしており、出力側に電力が伝達されている。
通常の降圧チョッパで Q がオンしている動作と同じである。
Q が ZVS でターンオフして次のモードに移行する。
このモードの継続時間は自由に選択でき、出力を制御する。



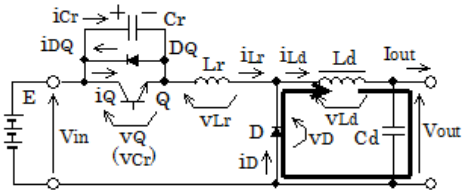
＜モード 2＞　Q はオフ

Q はオフしたが、Ld と Lr のエネルギーで同じ大きさの電流が流れ続け、Q から Cr に転流し、Cr が充電される。
Cr が Vin まで充電されて次のモードに移行する。



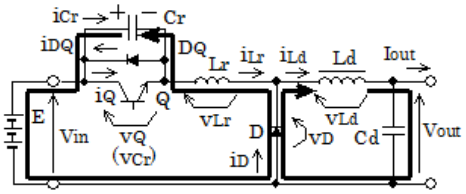
＜モード 3＞　Q はオフ

v_{Cr} が Vin を越えると v_{Lr} が負となり、i_{Lr} が減少を始める。
i_{Ld} はあまり変化しないので $i_{Ld}-i_{Lr}$ の電流が D を流れる。
i_{Lr} は減少を続け 0A となって次のモードに移行する。



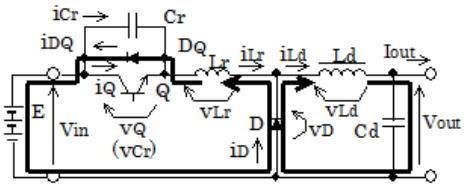
＜モード 4＞　Q はオフ

$i_{Lr}=0$、$i_{Ld}=i_D$ である。Cr は最大値に充電されている。
このモードは一瞬で終了する。



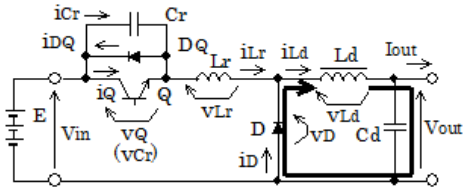
＜モード 5＞　Q はオフ

Cr が電源となって Lr には負方向の電流が流れる。
$v_{Cr}=0$ となって次のモードに移行する。



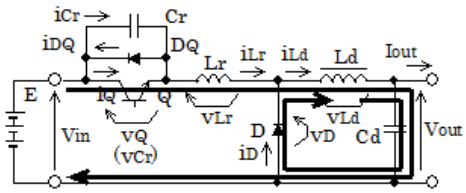
＜モード 6＞　Q はオフからオン

Cr の放電が完了したので Lr の電流は Cr から D_Q に転流する。$v_Q=0$ の状態が維持される。このモードで Q を ZVS でターンオンさせる。i_{Lr} が減少し、0A となって次のモードに移行する。



＜モード 7＞　Q はオン

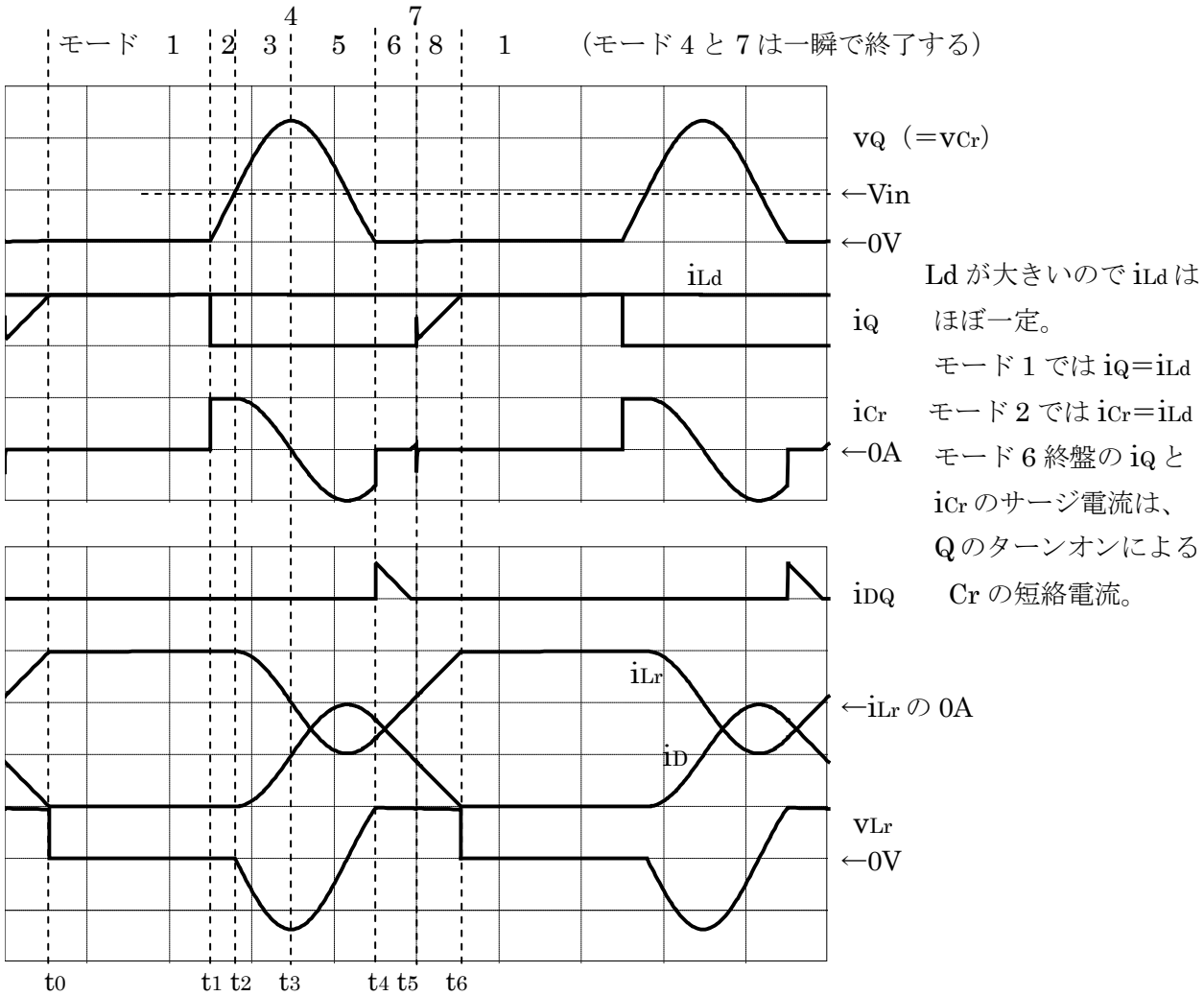
$i_{Lr}=0$、$i_{Ld}=i_D$。このモードは一瞬で終了する。



＜モード 8＞　Q はオン

$v_{Lr}=$Vin であり、i_{Lr} は直線的に増加する。
$i_{Lr}=i_{Ld}$ となってモード 1 に戻る。

図 3　電圧共振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 20A/div、時間の原点は t_0 とし、t_0＝0 とする）

図４　電圧共振半波型のシミュレーション波形

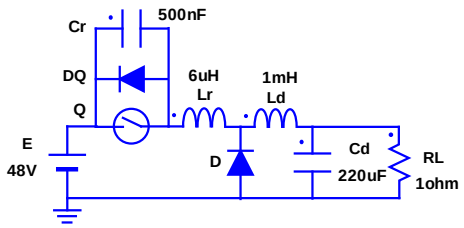


図５　シミュレーション回路（入力電圧 48V、出力電圧 20V、出力電流 20A、f＝50kHz にて）

■半波型の等価回路と成立する式

図６に電圧共振半波型の各動作モードの等価回路を示します。各回路に成立する式は以下のように導出されます。

＜図６(a) モード１＞

Vin－Vout の電圧が Lr と Ld に印加され、i_{Ld}（＝i_{Lr}）が直線的増加します。増加量 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）です。

$$\Delta i_{Ld}=\frac{1}{Lr+Ld}\left(Vin-Vout\right)T_1 \qquad \cdots\cdot(1)$$

図 4 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} は次のように小さくなっています。

$$\Delta i_{Ld}=\frac{1}{6\mu H+1mH}\left(48V-20V\right)\times 8\mu\,\mathrm{sec}=0.19\mathrm{A}$$

i_{Ld} の平均値は出力電流 Iout に等しく、図 4 では 20A です。

＜図 6 (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。Cr が一定の電流 I_{Ld} で充電され、v_{Cr} は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。

$$i_{Cr}=i_{Lr}=I_{Ld}$$

$$v_{Cr}=\frac{1}{Cr}I_{Ld}\times(t-t_1) \qquad \cdots\cdot(2)$$

図 4 では次のように計算されます。

$$v_{Cr}=\frac{1}{500nF}\times 20\mathrm{A}\times(t-t_1)$$

$t=t_2$ の時 $v_{Cr}=Vin$、$T_2=t_2-t_1$ なので、

$$\frac{1}{Cr}I_{Ld}T_2=Vin$$

よって、$T_2=CrVin\div I_{Ld}$

図 4 では、$T_2=500\mathrm{nF}\times 48\mathrm{V}\div 20\mathrm{A}=1.2\mu\,\mathrm{sec}$

＜図 6 (c) モード 3,4,5＞

Cr と Lr が共振しています。v_{Cr} の初期値は Vin、i_{Lr} の初期値は I_{Ld} です。

$$Vin=v_{Lr}+v_{Cr}=Lr\frac{d}{dt}i_{Lr}\left(t\right)+\frac{1}{Cr}\int_{t_2}^{t}i_{Lr}(\tau)d\tau \qquad \cdots\cdot(3)$$

この式を解いて、

$$i_{Lr}=i_{Cr}=I_{Ld}\times\cos\omega_n(t-t_2) \qquad \cdots\cdot(4)$$

ただし、$\omega_n=\dfrac{1}{\sqrt{LrCr}}$

なお、モード 3,4,5 の i_{Lr} 波形（i_{Cr} 波形）はピーク値が I_{Ld} の cos 波形であり、(4)式で表されることは図 4 からも明かなので、必ずしも(3)式を解く必要はありません。i_{Lr} の負のピーク値は$-I_{Ld}$ です。さらに次の式が成立し、この動作モードの全ての電圧・電流を計算することができます。

$$v_{Lr}=Lr\frac{d}{dt}i_{Lr}\left(t\right)=Lr\frac{d}{dt}\left(I_{Ld}\cos\omega_n\left(t-t_2\right)\right)=-\omega_n LrI_{Ld}\sin\omega_n(t-t_2)$$

$$=-I_{Ld}\sqrt{\frac{Lr}{Cr}}\sin\omega_n(t-t_2)$$

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

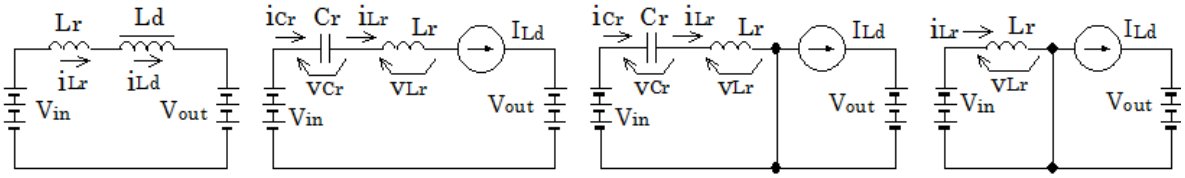
$$i_D=I_{Ld}-i_{Lr}$$

図４では次のように計算されます。

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

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

特性インピーダンス $\sqrt{\frac{Lr}{Cr}}=\sqrt{\frac{6\mu H}{500nF}}=3.46\Omega$



(a) モード１　(b) モード２　(c) モード 3,4,5　(d) モード 6,7,8

図６　電圧共振半波型の各動作モードの等価回路

＜図６(d) モード 6,7,8＞

モード６の i_{Lr} の初期値はモード５の i_{Lr} の最終値 $i_{Lr}(t_4)$なので、次のように計算されます。時刻 t_4 で v_{Cr} はゼロなので、

$$v_{Cr}(t_4)=V_{in}+\sqrt{\frac{Lr}{Cr}}\,I_{Ld}\sin\omega_n t_4=0$$

$$\omega_n t_4=\sin^{-1}\left(-\frac{V_{in}}{I_{Ld}}\sqrt{\frac{Cr}{Lr}}\right)$$

図４では $\omega_n t_4=\sin^{-1}\left(-\frac{48}{20}\frac{1}{3.46}\right)=180^\circ+43.9^\circ=224^\circ$

$$i_{Lr}(t_4)=I_{Ld}\times\cos\omega_n t_4$$

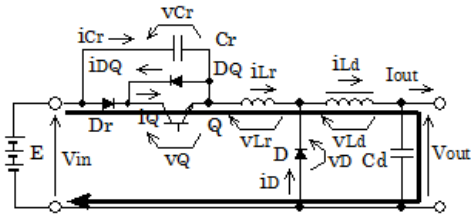
図４では、$i_{Lr}(t_4)=20\times\cos 224^\circ=-14.4\text{A}$

なお、$\omega_4>90$ 度なので、$i_{Lr}(t_4)$は負の値です。モード 6,7,8 では Lr に Vin が正方向に印加されるので、i_{Lr} は次の式で表されます。

$$i_{Lr}(t)=i_{Lr}(t_4)+\frac{1}{Lr}V_{in}\times(t-t_4)$$

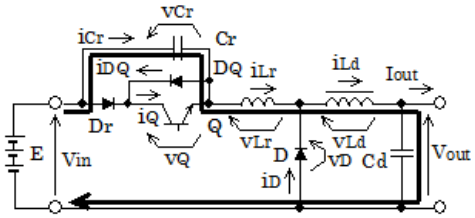
■全波型の動作モードと波形

図７に電圧共振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。前記のように、全波型は半波型に対して Dr を付加しているので、共振用コンデンサ Cr の電圧 v_{Cr} は正負双方が可能であり、図８に示すように「全波型」の波形になります。それに伴い、モード 5～7 の電流経路が変化します。



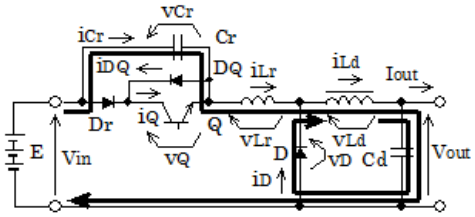
＜モード 1＞　Q はオン

半波型のモード 1 と同じ。



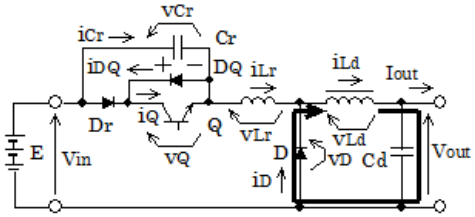
＜モード 2＞　Q はオフ

半波型のモード 2 と同じ。



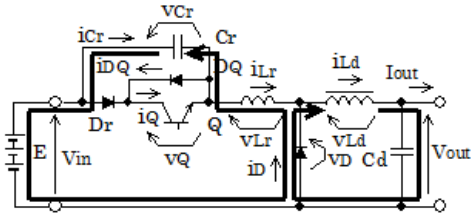
＜モード 3＞　Q はオフ

半波型のモード 3 と同じ。



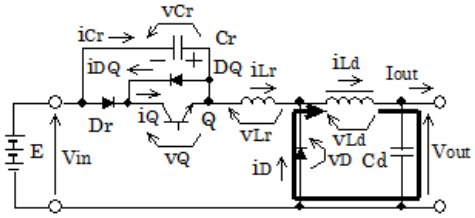
＜モード 4＞　Q はオフ

半波型のモード 4 と同じ。



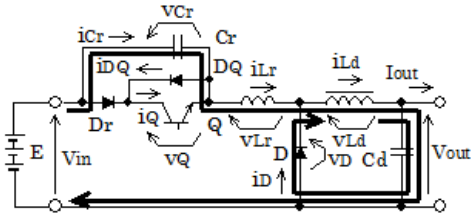
＜モード 5＞　Q はオフからオン

Cr が電源となって Lr には負方向の電流が流れる。半波型のモード 5 と同じ動作であるが、Cr の放電が完了して $v_{Cr}=0$ となっても Dr があるので D_Q は導通しない。Cr は Lr のエネルギーで逆方向に充電され、v_{Cr} は負の電圧となる。Lr には $Vin+|v_{Cr}|$ が負方向に印加され、i_{Lr} は減少を続ける。この間に Q は ZVS でターンオンする。やがて $i_{Lr}=0$ となり、次のモードに移る。



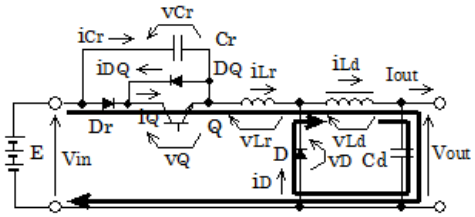
＜モード 6＞　Q はオン

半波型のモード 7 と同じ。このモードは一瞬で終了する。Cr は図示のように負の方向に充電されている。



＜モード 7＞　Q はオン

Cr が放電し、i_{Lr} が増加する。Cr の放電が完了して $v_{Cr}=0$ となり、Cr 電流が Q に転流して次のモードに移行する。

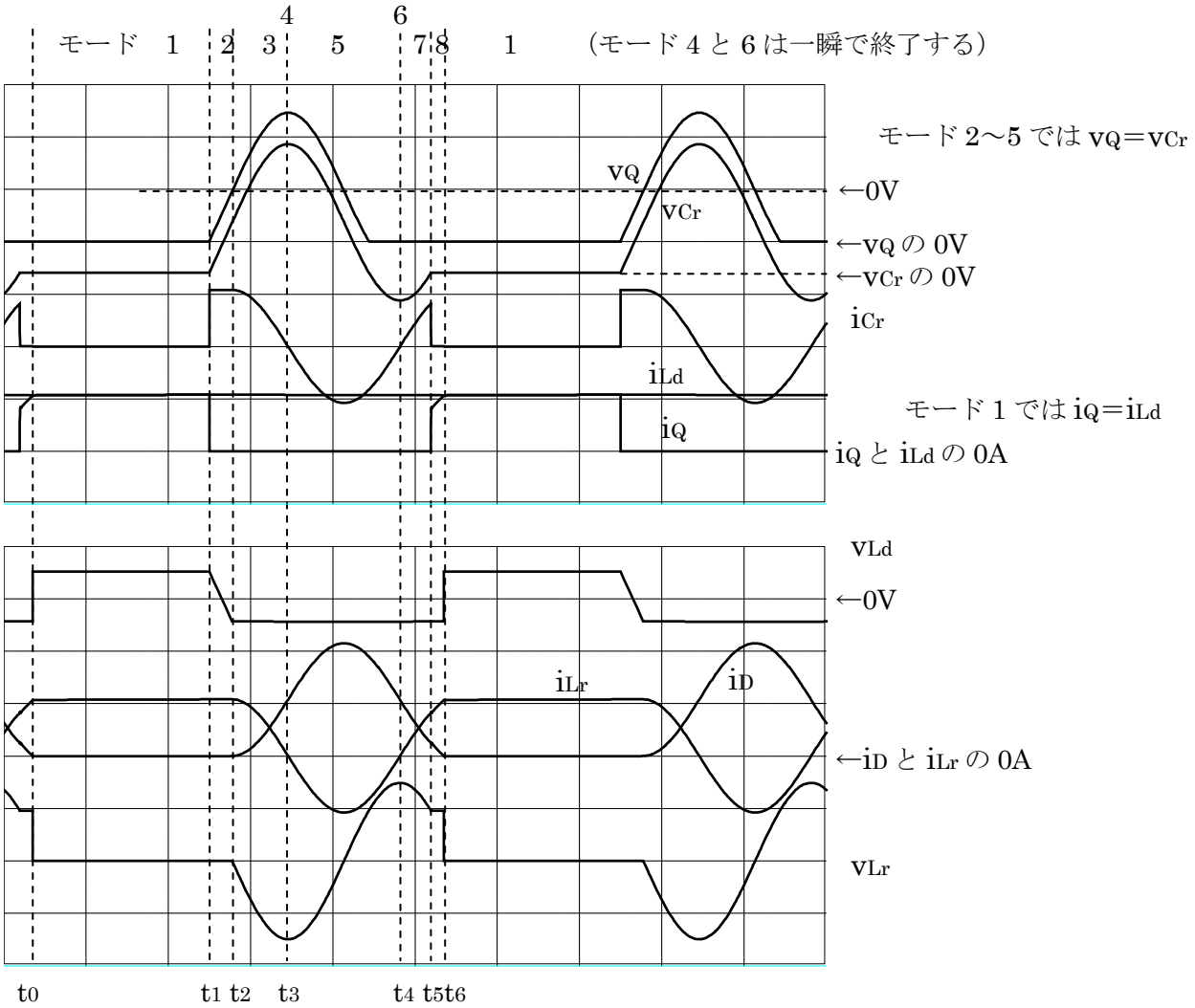


＜モード 8＞　Q はオン

半波型のモード 8 と同じ。

$i_{Lr}=i_{Ld}$ となってモード 1 に戻る。

図 7　電圧共振全波型の動作モードと電流経路（モード 5,6,7 以外は半波型と同じ）



（4μsec/div、電圧は全て 50V/div、電流は全て 20A/div、時間の原点は t_0 とし、t_0＝0 とする）

図 8　電圧共振半波型のシミュレーション波形

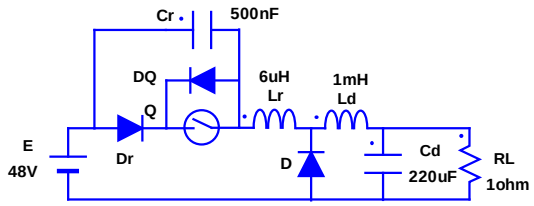


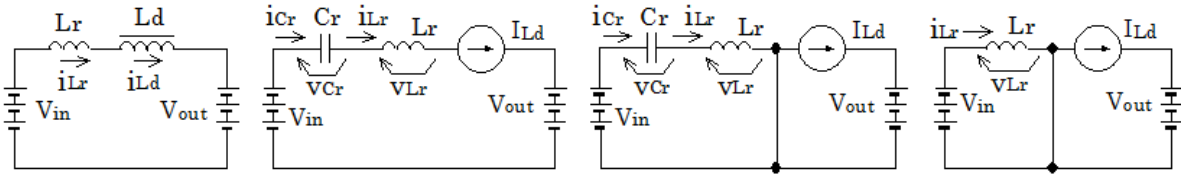
図 9　シミュレーション回路（入力電圧 48V、出力電圧 22V、出力電流 22A、f＝50kHz にて）

■全波型の等価回路と成立する式

図 10 に電圧共振全波型の各動作モードの等価回路を示します。(a)～(d)すべて図 6 の半波型と同じですが、(c)と(d)は対応する動作モードが異なります。(c)は半波型ではモード 3,4,5 でしたが、全波型ではモード 3,4,5,6,7 となります。(d)は半波型ではモード 6,7,8 でしたが、全波型ではモード 8 のみとなります。

等価回路が同じなので成立する式も同じですが、(c)に成立する i_{Cr},v_{Cr},i_{Lr},v_{Lr} の式は全波型ではモード 3,4,5 に加えて 6,7 でも成立します。また、(d)に成立する i_{Lr} の式は全波型ではモード 8 のみ成

立します。



(a) モード 1　　(b) モード 2　　(c) モード 3,4,5,6,7　　(d) モード 8

図 10　電圧共振全波型の各動作モードの等価回路

共振型チョッパ回路の研究の歴史

共振形チョッパ回路は 1980 年代に広く研究されました。当時の研究動向は二宮先生の文献[1]などが参考になります。共振形チョッパ回路は、通常のチョッパ回路のスイッチ素子を「電圧共振スイッチ」または「電流共振スイッチ」に置き換えたものと考え、それぞれを電圧共振型チョッパ回路、電流共振型チョッパ回路と言います。さらに、スイッチ素子の波形によって全波型と半波型に分類します。スイッチ素子の電圧波形または電流波形は正弦波に準ずる波形になるので、これらの回路方式を準共振コンバータ(Quasi Resonant Converter)といいます。このような考え方や分類方法は F. C. Lee らの文献[2][3]などによって広く使われるようになり、日本では原田先生の文献[4]で詳しく紹介されています。

電圧共振型はスイッチ素子の印加電圧が大きくなること、電流共振型はスイッチ素子の電流のピーク値が大きくなること、などの欠点があり、1990 年代以降は準共振に替わって部分共振が広く研究され、実用化されました。しかし、近年電流共振型の一種である LLC コンバータや電圧共振の仲間である E 級スイッチングが注目されています。昨年（2019 年）出版された落合さんの文献[5]は共振型降圧チョッパ回路の出力電圧計算式導出方法などが詳しく紹介されており、参考になります。文献[4]は初心者には難解ですが、[5]は数式の導出過程が分かり易く、詳しく紹介されています。

■参考文献

[1] 二宮保、東徹、「スイッチング電源の最新技術トレンド 共振形コンバータ」、電子技術、1989-3 特別増大号、1989 年

[2] Kwang-Hwa Liu, Bamesh Oruganti, and Fred. C. Lee,"Resonant Switches - Topologies and Characteristics", Proc. of IEEE PESC'85, pp.106-116, (1985)

[3] Kwang-Hwa Liu, and Fred. C. Lee,"Zero-Voltage Swtching Technique in DC/DC Converters", Proc. of IEEE PESC'86, pp.58-70, (1986)

[4] 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

[5] 落合政司、「共振型スイッチングコンバータの基礎」、オーム社、2019 年

以上