

## 12. 直流チョップ回路(昇降圧チョップ、サイリスタチョップ)

「チョップ」(chopper) とは英語で「切り刻むもの」の意であり、電流(電圧)を切り刻んでいるかのように制御している意味である。主に電車の主電動機の制御や直流安定化電源(AC アダプタ)等に用いられる。入力電圧より下げる制御を「降圧チョップ」、スイッチング時に発生するスパイク電流を用いて入力電圧より上げる制御を「昇圧チョップ」と呼ぶ。

### 12.1 降圧チョップ回路(Step-Down Chopper)

図1(a)に常圧チョップの基本回路を示す。 $E_1$ は直流電源の電圧である。 $S$ はスイッチで、オン期間を  $T_1$ 、オフ期間を  $T_2$  とする。負荷抵抗  $R$  の両端の電圧を出力電圧  $e_2$  とする。各部の電圧波形を図1(b)に示す。出力電圧  $e_2$  の平均値を  $E_2$  とすると、 $E_2$  とは次式のように得られる。

$$E_2 = \frac{T_1}{T_1 + T_2} E_1 = \frac{\alpha T_0}{T_0} E_1 = \alpha E_1 \tag{1}$$

ただし、 $T_0 = T_1 + T_2$ ,  $\alpha = T_1/T_0$ . ( $\alpha$  をデューティ比  $0 \leq \alpha \leq 1$ )

$E_2$  を制御するためには  $\alpha$  を変える必要がある。 $E_2$  を自由に制御できるような回路をチョップ回路、この時の制御方式を TRC (Time Ratio Control) という。

$e_2$  の脈動を少なくし、平滑な直流に近づけるために平滑回路がある。

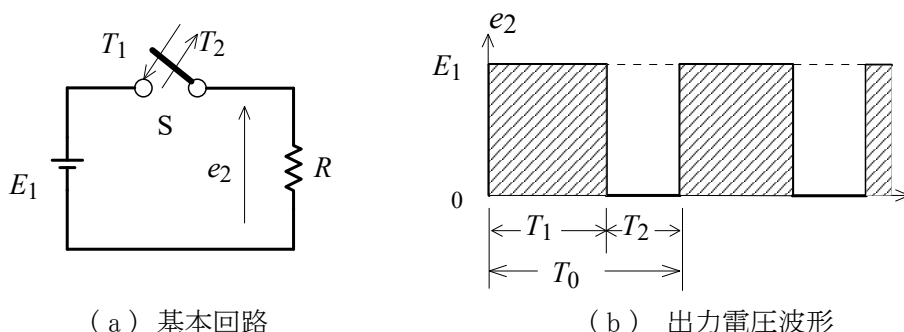


図1 降圧チョップの基本動作

※ $e_2$  の脈動を少なくして直流に近づける。(平滑化)

図2(a)に平滑回路を示す。この回路では、スイッチ  $S$  がオンの期間には  $E_1-S-D_1-L-R-E_1$  の経路で負荷に電流が流れ、インダクタンス  $L$  に電磁エネルギーが蓄えられる。

一方、オフの期間では  $L$  に蓄えられたエネルギーが放出され、 $L-R-D_2-L$  の経路を経て負荷に電流が流れる。この場合、 $D_2$  をフライホイールダイオード(環流ダイオード)と呼ぶ。

出力電流を図2(b)に示す。 $T_1$  期間で  $L$  にエネルギーが蓄えられ、 $T_2$  期間で放出する。

電圧  $e_2$  及び  $e_2'$  を図2(c)に示す。 $e_2 = Ri_2$  である。インダクタンス  $L$  に蓄えられる電磁エネルギーは  $L$  に加わる電圧  $\times$  時間に比例 ( $\because E \cdot dt = N \cdot d\phi$ ) し、これは放出される電磁エネルギーに等しい。

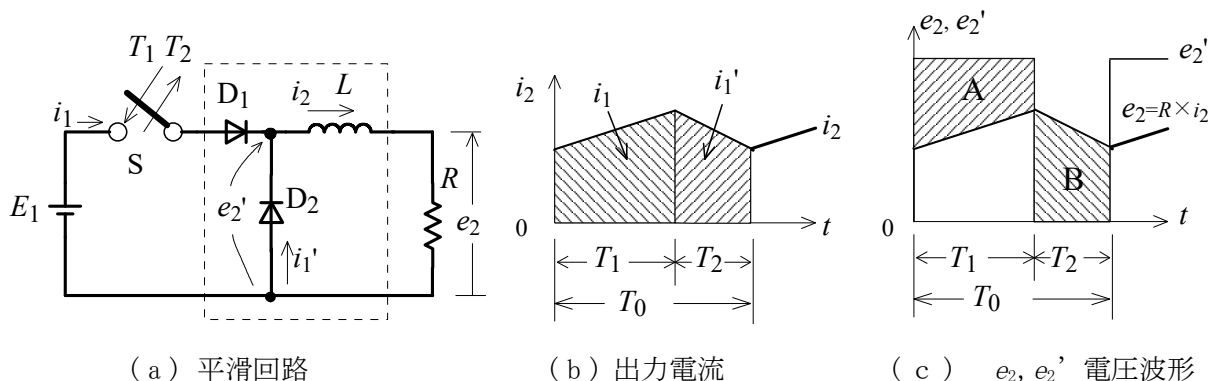
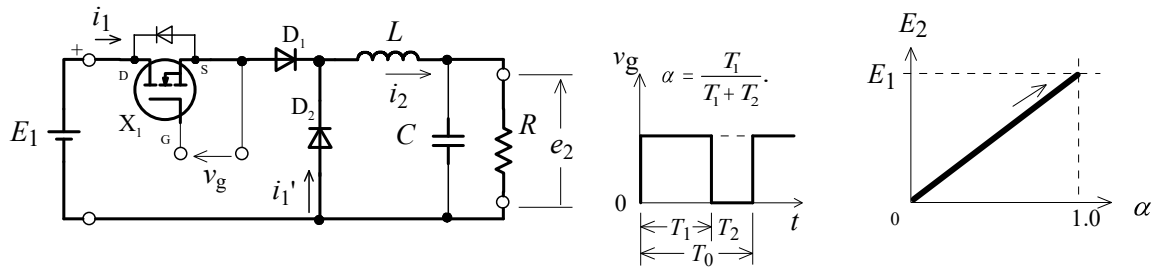


図2 平滑回路の効果



(a) MOSFET による降圧チョップ回路 (b) ゲート電圧  $v_g$  (c) 出力制御特性概略  
 図3 MOSFET 降圧チョップ回路例

従って、斜線 A と斜線 B の面積は等しくなり、平滑化された出力電圧の平均値は(1)式と同様に  $E_2 = \alpha E_1$  である。

図3(a)に MOSFET による降圧チョップ回路例、(b)にゲート電圧、(c)に制御特性概略を示す。

### 12.2 昇圧チョップ回路(Step-Up Chopper)

図4(a)に昇圧チョップの原理構成を示す。図中、 $E_1$ は直流電源の電圧、 $e_2$ は出力電圧である。スイッチ S でオン時間を  $T_1$ 、オフ時間を  $T_2$  とする。 $L$ は昇圧用のインダクタンスである。

この回路の各部の電圧及び電流波形を図4(b)に示す。回路動作をスイッチ S がオンの( $T_1$  期間)状態から説明する。

#### ①スイッチ S がオンの期間( $T_1$ 期間)

$E_1$ が  $L$ に印加される。電流  $i$ が増加し、 $L$ には電磁エネルギーが蓄えられる。

#### ②スイッチ S がオフの期間( $T_2$ 期間)

$L$ に流れる電流が急変するため、 $L$ に誘導起電力が発生し、蓄えられた電磁エネルギーが放出され、ダイオード D を通ってコンデンサ C が充電される。

このとき誘導起電力の極性は図3(a)に示す方向(電流の変化を妨げる方向、レンツの法則)であり、スイッチ両端の電圧  $e_d$ を  $E_1$ よりも上昇させる方向である。

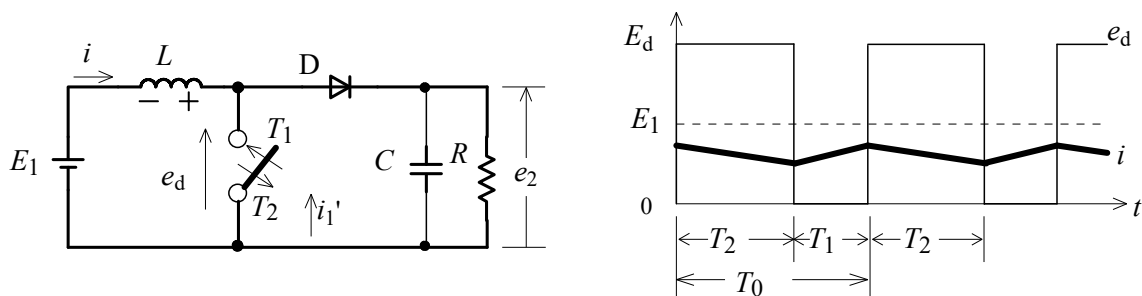
ここで、 $e_d$ の最大値を  $E_d$ とすると、 $E_d$ は次のように求めることができる。

すなわち、 $L$ に蓄えられるエネルギーと放出するエネルギーは等しい。

エネルギーは  $L$ に加わる電圧×時間に比例( $\because E \cdot dt = N \cdot d\phi$ )する(前述のとおり)。蓄えられる期間は  $T_1$ であり、 $L$ の電圧は  $E_1$ 。一方、放出する期間は  $T_2$ で  $L$ の電圧は  $E_d - E_1$ である。従って、

$$E_1 \cdot T_1 = (E_d - E_1) \cdot T_2 \rightarrow \therefore E_d = \frac{T_1 + T_2}{T_2} E_1 = \frac{T_1 + T_2}{T_1 + T_2 - T_1} E_1 = \frac{T_1 + T_2}{T_1 + T_2 - \alpha(T_1 + T_2)} E_1 = \frac{1}{1 - \alpha} E_1 \quad (2)$$

ただし、 $\alpha = \frac{T_1}{T_1 + T_2}$  であり、 $0 \leq \alpha < 1$

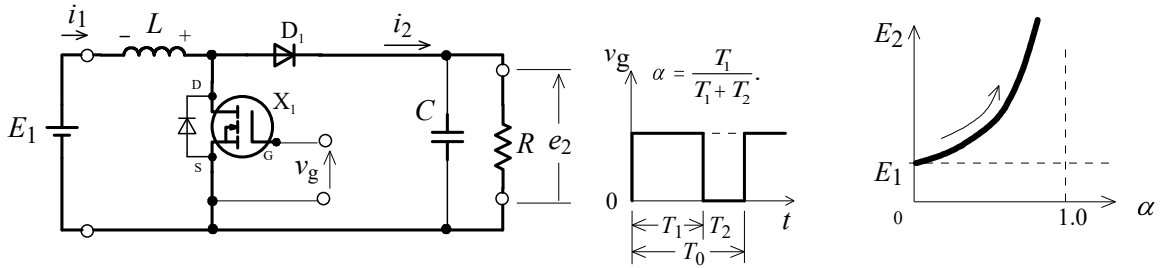


(a) 基本構成 (b) 出力電圧波形

図4 昇圧チョップの原理

(2)式より、 $\alpha$  の値を1に近づけると、 $E_d > E_1$ となり昇圧チョップパとなることがわかる。出力電圧  $e_2$  はコンデンサ  $C$  により  $E_d$  に保持された値となる。

図5(a)に MOSFET による昇圧チョップパ回路例、(b)にゲート電圧、(c)に制御特性概略を示す。



(a) MOSFET による昇圧チョップパ回路 (b) ゲート電圧  $v_g$  (c) 出力制御特性概略

図5 MOSFET 昇圧チョップパ回路例

### 12.3 昇降圧チョップパ回路(Back-Boost Chopper)

昇降圧チョップパは、 $\alpha$  の値により降圧と昇圧の機能を持ち、出力は負電圧で得られる。

図6(a)に昇降圧チョップパの原理構成を示す。図中、 $E_1$  は直流電源の電圧、 $E_2$  は出力電圧である。スイッチ  $S$  のオン時間を  $T_1$ 、オフ時間を  $T_2$  とする。 $L$  はインダクタンスであり、 $C$  は出力電圧をピーク値で保持するためのコンデンサである。ダイオード  $D$  は  $E_1$  からの電流を阻止する向きに接続される。この回路の各部の電圧及び電流波形を図6(b)に示す。図中、 $i_1$  及び  $i_2$  は  $L$  を流れる電流を示す。

この回路では、まずスイッチ  $S$  が閉じる  $T_1$  の期間、 $E_1$  が  $L$  に加わるため、電流  $i_1$  が流れて  $L$  に電磁エネルギーが蓄えられる。

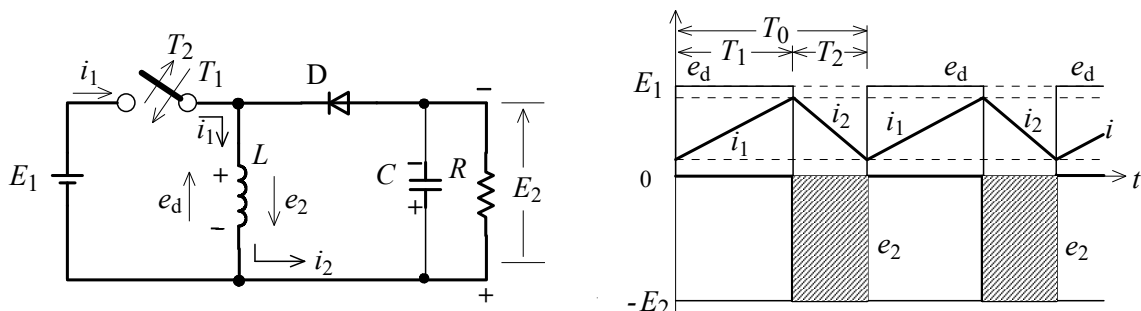
次いで、 $S$  が開く  $T_2$  の期間では、 $L$  に蓄えられた電磁エネルギーが放出するため、誘導起電力  $e_2$  が図6(a)の矢印の向きに発生する。この  $e_2$  により、 $e_2$ - $R$ - $D$ - $e_2$  の経路で電流  $i_2$  が流れる。コンデンサ  $C$  により  $e_2$  の最大値が保持されて出力電圧  $E_2$  となる。 $E_2$  は、図6(a)の矢印の向きであり、負値となる。

前述のとおり、電磁エネルギーは  $L$  に加わる電圧×時間に比例 ( $\because E \cdot dt = N \cdot d\phi$ ) する。蓄えられる期間  $T_1$  で  $L$  の電圧が  $E_1$  で、放出する期間  $T_2$  で  $-E_2$  である。従って、 $E_2$  は次式のように得られる。

$$E_1 \cdot T_1 = -E_2 \cdot T_2 \rightarrow \therefore E_2 = -\frac{T_1}{T_2} E_1 = -\frac{T_1}{\frac{1-\alpha}{\alpha} T_1} E_1 = -\frac{\alpha}{1-\alpha} E_1. \quad (3)$$

ただし、 $\alpha = \frac{T_1}{T_1 + T_2}$  であり、 $0 \leq \alpha < 1$

図7(a)に MOSFET による昇降圧チョップパ回路例、(b)ゲート電圧、(c)制御特性概略を示す。



(a) 基本回路

(b) 各部電圧・電流波形

図6 昇降圧チョップパの原理

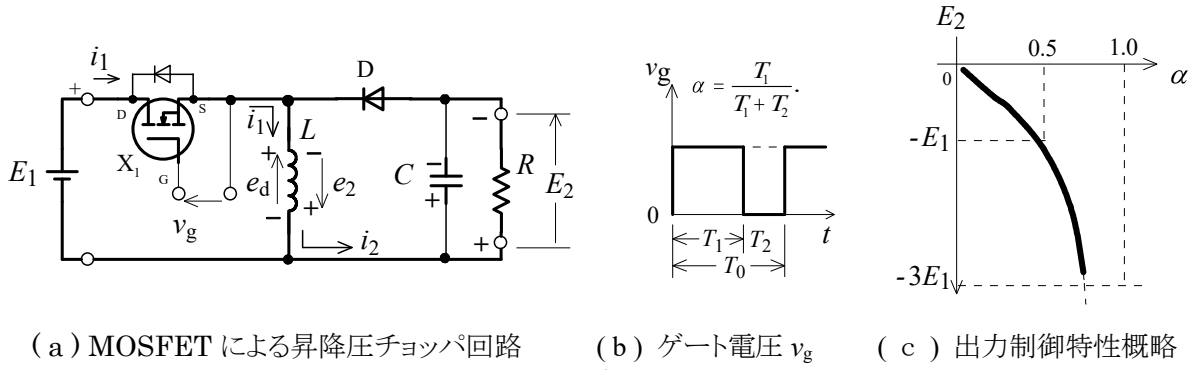


図7 MOSFET 昇降圧チョップ回路例

※降圧チョップと昇圧チョップを組み合わせた回路

図8(a)に降圧チョップと昇圧チョップを組み合わせた回路の構成例を示す。両チョップとしての電流経路を同図(b)に示す。図中、実線Aが降圧チョップ経路であり、 $E_1$ - $T_1$ - $L$ -負荷- $E_1$ の経路で降圧チョップとして動作する。この時、 $D_2$ は環流ダイオードとなる。

一方、同図(b)の破線Bは昇圧チョップで動作する経路を示す。この場合では負荷が電源となり、負荷- $L$ - $T_2$ -負荷の経路と  $D_1$ - $C_1$ - $E_1$  経路で昇圧チョップとして、電源に電力を供給(回生)する。

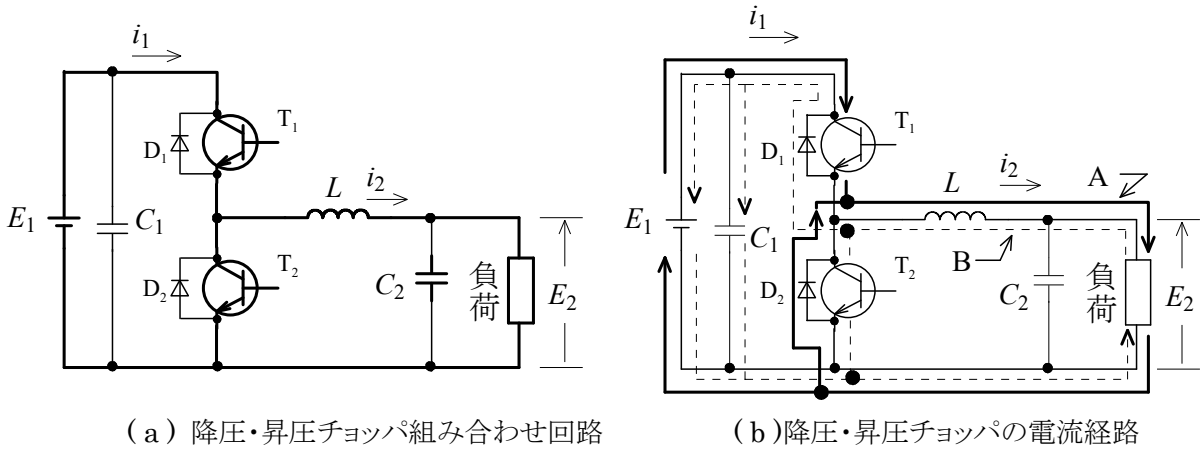


図8 降圧・昇圧組み合わせ回路

12.4 サイリスタチョップ回路

[1]サイリスタチョップ回路(その1)

図9(a)に、サイリスタチョップ(その1)の基本回路を示す。Thはサイリスタである。インダクタンス  $L_o$ 、コンデンサ  $C_o$  及びダイオード  $D_o$  は Th をオフさせる回路(これを転流回路という)である。この回路では、ある時刻にサイリスタ Th をオンさせると、オフ時刻は  $L_o$ 、 $C_o$  の共振により自動的に決定される。サイリスタが自動的にオフする時刻付近の各部の電圧及び電流を図9(b)に示す。まず、Th がオフの状態ですwitch S を閉じると、 $C_o$  の電圧が  $E_1$  に瞬時に充電される。

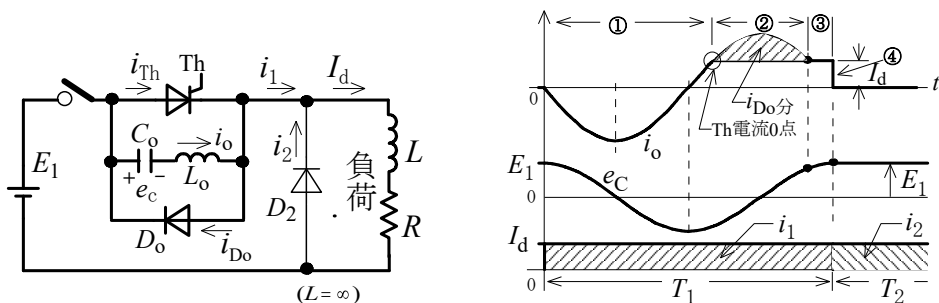


図9 サイリスタチョップ(その1)回路の動作

モード①: Th をオンさせる。

- ・負荷電流  $I_d$  が Th を通って負荷に供給される。
- ・ $C_o$  の電荷は、 $C_o$ -Th- $L_o$  を通って放電する。この期間の  $i_o$  及び  $e_c$  はコンデンサ  $C_o$  の初期電圧を  $E_1$  として次式で得られる。

$$i_o = -E_1 \sqrt{\frac{C_o}{L_o}} \cdot \sin \frac{1}{\sqrt{L_o C_o}} t, \quad e_c = E_1 \cos \frac{1}{\sqrt{L_o C_o}} t. \quad (4)$$

- ・ある時刻に Th を流れる電流 ( $I_d - i_o$ ) がゼロとなって、Th がオフになる。

モード②: Th がオフすると、 $i_o$  は  $E_1$ - $C_o$ - $L_o$ - $L$ - $R$  の順に流れて  $I_d$  ( $L=\infty$  のため) となり、一部はダイオード  $D_o$  を流れる。

モード③:  $i_{D_o} = 0$  となって  $D_o$  がオフする。

- ・負荷電流  $I_d$  は  $E_1$ - $C_o$ - $L_o$  を通って電源から供給される。
- ・このときの  $e_c$  の変化は  $e_c = (1/C_o) I_d \times t$  となり直線的。

モード④:  $e_c > E_1$  となり、 $i_1 = 0$ 。一方、環流ダイオード  $D_2$  がオンとなり、チョップ動作が完了する。

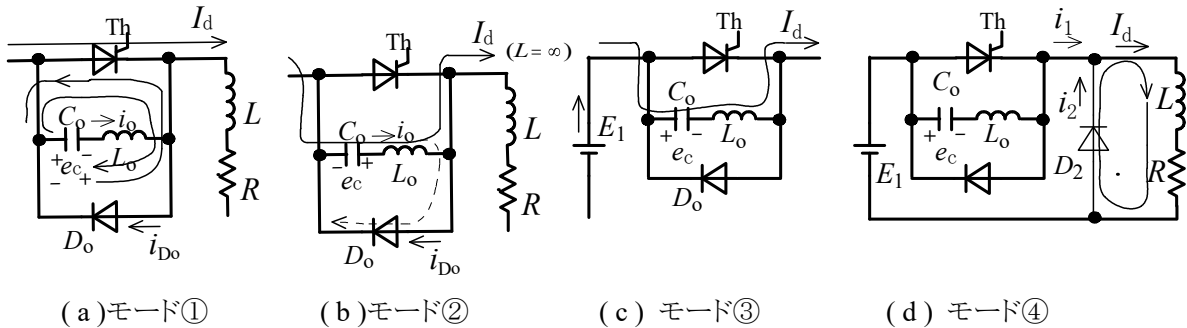


図10 各モードにおける動作

## [2] サイリスタチョップ回路(その 2)

図 11 (a) に、サイリスタチョップ(その 2)の基本回路を示す。Th<sub>1</sub> は主サイリスタである。Th<sub>2</sub> は Th<sub>1</sub> をオフさせるための補助サイリスタである。コンデンサ  $C_o$ 、インダクタンス  $L_o$ 、ダイオード  $D_o$  及び Th<sub>2</sub> を含めて転流回路と呼ぶ。この回路では、Th<sub>1</sub> をオンさせてチョップ回路を導通させ、Th<sub>2</sub> をオンさせてチョップ回路をオフさせる。

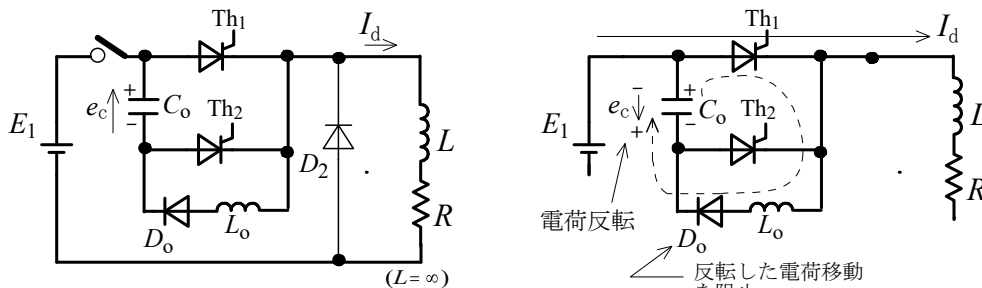
回路の動作には、まず Th<sub>2</sub> をオンさせて  $C_o$  に電圧  $E_1$  を充電させておく必要がある。

モード①: Th<sub>1</sub> をオンさせる。

- ・負荷電流  $I_d$  は Th<sub>1</sub> を通じて負荷に供給される。
- ・ $C_o$  の電荷が  $C_o$ -Th<sub>1</sub>- $L_o$ - $D_o$ - $C_o$  の経路で逆転する。電荷移動の経路を図11 (b) に示す。

モード②: Th<sub>2</sub> をオンさせる。

- ・ $C_o$ -Th<sub>2</sub>-Th<sub>1</sub>- $C_o$  の経路で Th<sub>1</sub> に逆電圧 ( $e_c = E_1$ ) が加わるため、Th<sub>1</sub> がオフする。
- ・同時に  $E_1$ - $C_o$ -Th<sub>2</sub>- $L$ - $R$ - $E_1$  の経路で  $C_o$  が充電される。

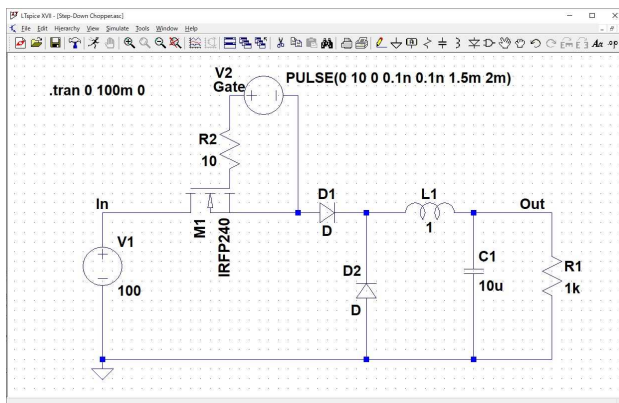


(a) サイリスタチョップ(その 2)基本回路 (b)  $C_o$  の電荷移動の経路

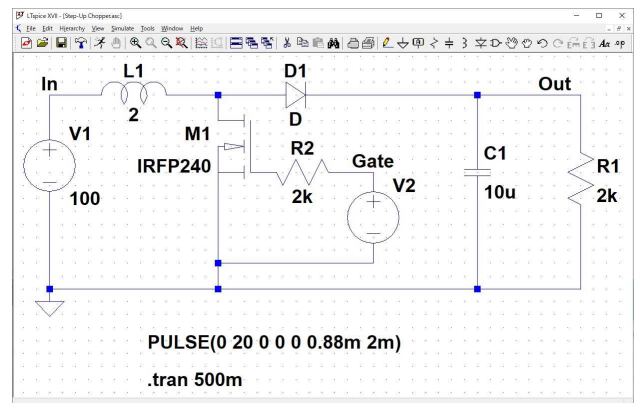
図11 サイリスタチョップ(その 2)回路の動作

## 12.5 演習課題

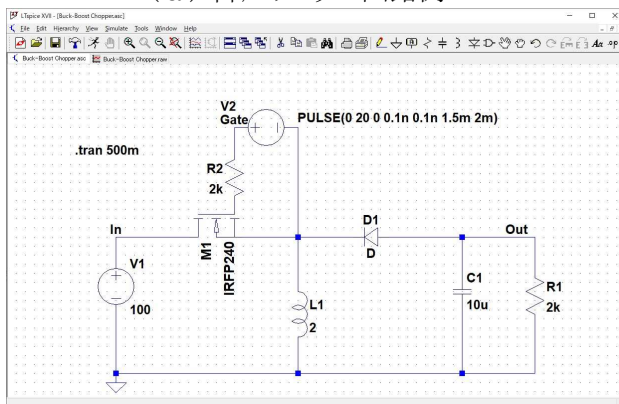
- (1) 降圧チョップ回路(図3に示す)を LTspiceXVII で構成し、Transient シミュレーションを実行せよ。ただし、 $V_1=100V$ , MOSFET(IRFP240)は内蔵ライブラリのもの使用し、デューティ比  $\alpha$  を任意とし 100msec まで負荷抵抗両端の電圧を計算せよ。SPICE 回路例を図12(a)に示す。
- (2) 昇圧チョップ回路(図5)を構成し、シミュレーションを実行せよ。ただし、 $V_1=100V$ , MOSFET(IRFP240)を使用し、デューティ比任意で 500msec まで負荷抵抗の電圧を計算せよ。SPICE 回路例を図12(b)に示す。結果を理論値と比較し、異なる場合は理由を考察せよ。
- (3) 昇降圧チョップ回路(図7)を構成し、シミュレーションを実行せよ。ただし、 $V_1=100V$ , MOSFET(IRFP240)を使用し、デューティ比任意で 500msec まで負荷抵抗の出力電圧を計算せよ。SPICE 回路例を図12(c)に示す。結果を理論値と比較し、異なる場合は理由を考察せよ。
- (4) サイリスタチョップ(その2)(図11に示す)を構成せよ。サイリスタは x2n4171 を使用し、サブサーキットを表1に示す。500msec まで負荷抵抗を流れる電流を計算せよ。SPICE 回路例を図12(d)に示す。結果を理論値と比較し、異なる場合は理由を考察せよ。



(a) 降圧チョップ回路例



(b) 昇圧チョップの回路例



(c) 昇降圧チョップ回路例

(d) サイリスタチョップの回路例

図12 演習のための SPICE 回路例

表1 サイリスタ(x2N4171)のサブサーキット

**** subcircuit definitions	
*300v 8a	
.subckt x2N4171 1 2 3	
* terminals: a g k	
qp 6 4 1 pout off	df 6 4 zf
qn 4 6 5 nout off	dr 1 4 zr
rf 6 4 600k	dgk 6 5 zgk
rr 1 4 400k	.model zf d (is=3.2f ibv=100u bv=300
rgk 6 5 112	+ rs=90k)
rg 2 6 4.61	.model zr d (is=3.2f ibv=100u bv=400)
rk 3 5 8.13m	.model zgk d (is=3.2f ibv=100u bv=5)
	.model pout pnp (is=3.2p bf=1 cje=670p)
	.model nout npn (is=3.2p bf=100 rc=32.5m
	+ cje=670p cjc=134p tf=179n tr=25.5u)
	.ends x2n4171