

## 1. スイッチング操作における問題点

### 3.1 スイッチング方式の種類

スイッチング方式には損失に関する性質によってハードスイッチング方式とソフトスイッチング方式に分けられる。

#### 1.2 ハードスイッチング方式

回路に特別な工夫を施さない場合において半導体素子によるスイッチングを行った時のスイッチの端子電圧 $v_{sw}$ とスイッチに流れる電流 $i_{sw}$ の波形を図1に示す。電流および電圧の変化は過渡的に起こるため、すぐに立ち上がったたり、立ち下がったりすることが無い。この過渡期では電流と電圧が重なり電力損失が発生する。この電力損失の大きさは電流と電圧の積で表され、スイッチング損失と呼ばれる。

また、スイッチがONであってもON電圧が存在するので導通損失も発生する。

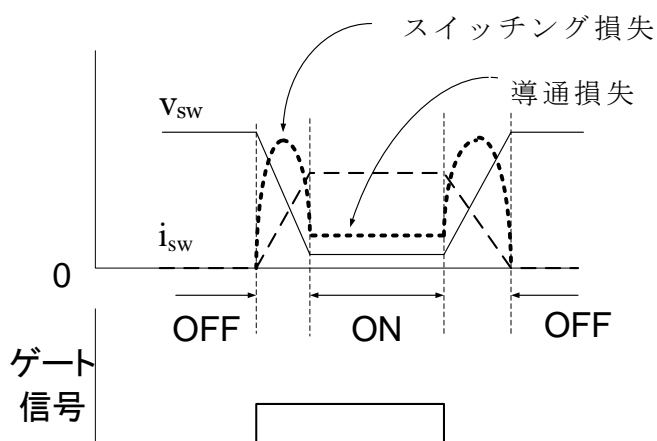


図1 ハードスイッチング方式で発生する損失

#### 1.3 ソフトスイッチング方式

LC共振回路による共振現象を利用し電圧または電流がゼロとなった時間においてスイッチングを行わせる方式である。その電圧、電流波形を図2に示す。

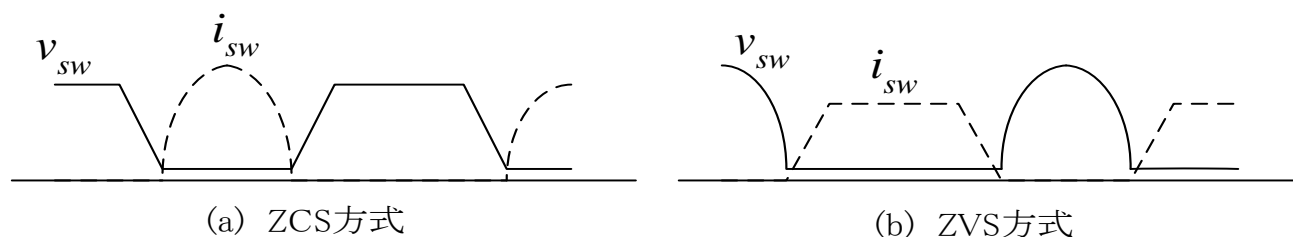


図2 ソフトスイッチングにおける電圧・電流波形

図2(a)ではスイッチがONになってから電流 $i_{sw}$ が正弦波状に徐々に上昇し、再びゆるやかに下降しゼロになってからスイッチをOFFしている。電流がゼロになっている時にスイッチングを行うことからゼロ電流スイッチング(ZCS)と呼ばれる。

図2(b)はスイッチがOFFになってから電圧 $v_{sw}$ が正弦状に上昇し、 $v_{sw}$ がゼロになってからスイッチをONさせているのでゼロ電圧スイッチング(ZVS)と呼ばれる。

また LC 共振回路を付加せずに、デッドタイムを設けることでゼロ電流スイッチング、ゼロ電圧スイッチングを行う方法もある。

いずれの場合でも、電圧と電流の重なりが原理的に存在しないのでスイッチング損失が発生せず、ノイズの発生も抑えることができる。

## 2. DC チョップパにおける回路方式

DC チョップパ回路とは、直流の入力電圧から所定の直流電圧へ変換するスイッチング電源回路である。スイッチの切り替え周波数や透過率を調整することで電力を調整する事が出来る。

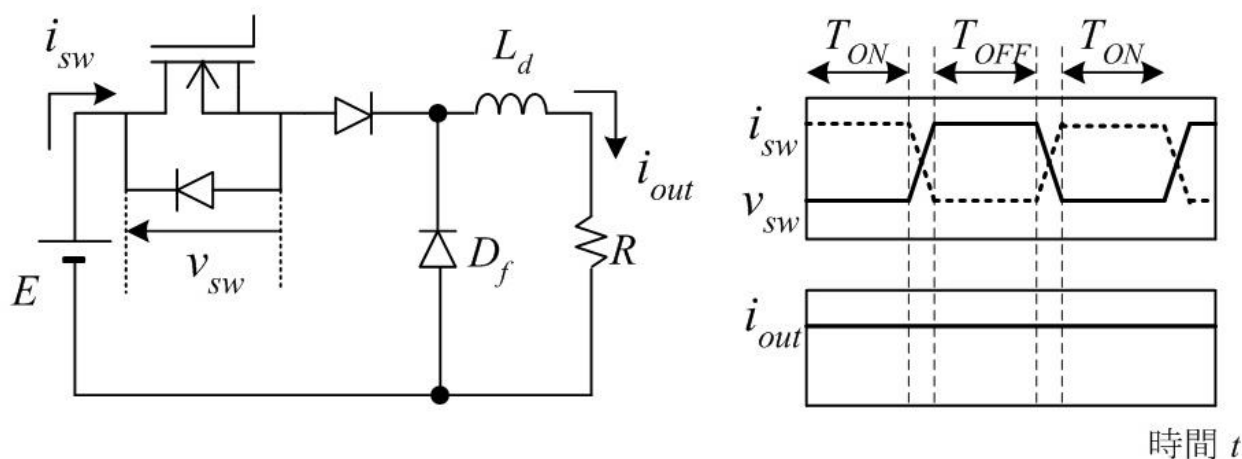
入力電圧より高い出力電圧を生み出し、回生ブレーキなどに使われる DC チョップパを昇圧チョップパ、低い電圧を発生する DC チョップパを降圧チョップパというが、ここでは動作の基本となる降圧チョップパを扱うことにする。

### 2. 1 ハードスイッチング DC チョップパ回路

スイッチ素子として MOSFET を用いた DC チョップパ回路と動作を図 3 に示す。スイッチに ON 信号を与えるとスイッチが ON し、直流電流  $E$  から負荷へ  $i_{out}$  が流れる。平滑インダクタンス  $L_d$  を十分に大きくしておけば  $i_{out}$  はほぼ一定となる。スイッチを OFF させるとスイッチ電流  $i_{sw}$  はゼロとなるが、還流ダイオード  $D_f$  が ON することにより  $L_d \rightarrow R \rightarrow D_f$  のループに負荷電流  $i_{out}$  が流れ続ける。その結果、負荷電流  $i_{out}$  がほぼ一定の直流となる。ここでスイッチの ON 時間を長くすれば  $i_{out}$  は大きくなり、短くすれば  $i_{out}$  は小さくなるので、スイッチング周期  $T_{ON} + T_{OFF}$  に対する ON 時間  $T_{ON}$  の比である透過率

$$\text{透過率} = \frac{T_{ON}}{(T_{ON} + T_{OFF})}$$

を操作することにより負荷電流  $i_{out}$  の大きさを制御することが可能である。しかし、スイッチング方式がハードスイッチングであるためスイッチング損失が大きく、ノイズの発生も問題となっている。通常、スイッチングノイズを抑制するためにスナバ回路をスイッチに対し並列に接続する。



(a) 主回路図

(b) 動作波形

図 3 ハードスイッチング DC チョッパ

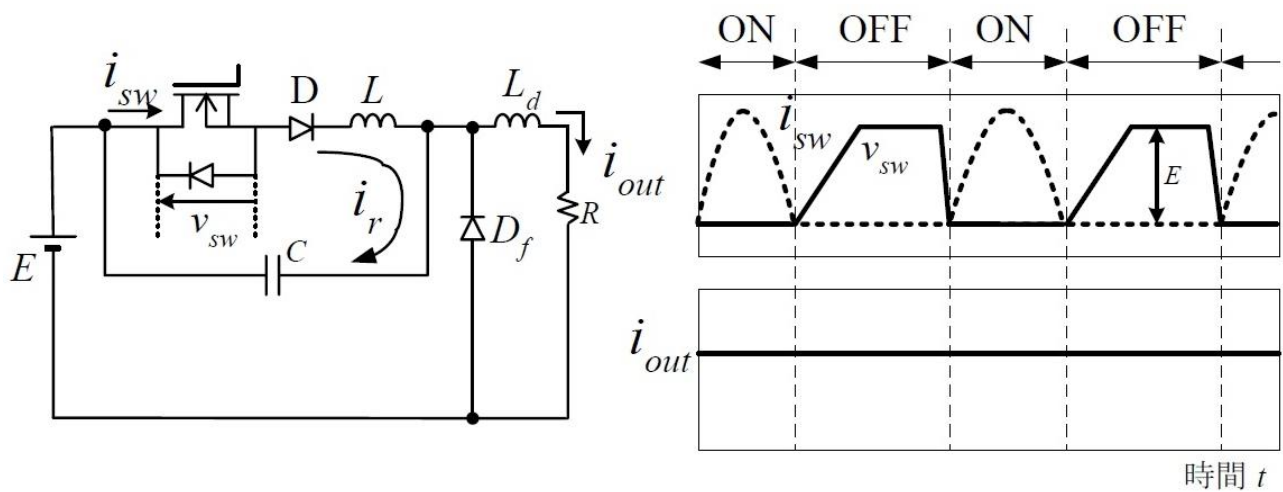
## 2.2 共振型 DC チョッパ回路

LC 共振を利用し、ハードスイッチングの欠点を補い、スイッチング損失の発生を軽減するソフトスイッチング方式の DC チョッパに関する従来の回路方式を以下に述べる

### (1) 電流共振型 DC チョッパ

スイッチ素子として MOSFET を用いた電流共振型 DC チョッパの回路方式と動作波形を図 4 に示す。

ここで平滑インダクタンス  $L_d$  は十分に大きいものとし、当初共振コンデンサには電荷  $E$  が充電されているものとする。スイッチ ON 時には共振コイル  $L$  と共振コンデンサ  $C$  による共振電流  $i_r$  と負荷電流  $i_{out}$  が重畳して流れ、電流  $i_{sw}$  はゆるやかな立ち上がりとなる。 $i_{sw}$  がゼロになるとダイオード  $D$  が OFF する。その時点でスイッチを OFF にすればゼロ電流スイッチング動作となる。その後コンデンサ  $C$  への充電が  $i_r$  と逆向きの電流  $i_{out}$  が流れる。スイッチの端子電圧は一定の負荷電流  $i_{out}$  の積分波形となるから、ゆるやかに立ち上がる。その後、コンデンサは電源電圧  $E$  にクランプされる。ここで当初の状態に戻る。これを繰り返し動作させると、ソフトスイッチング動作による脈流が作られる。



(a) 主回路図

(b) 動作波形

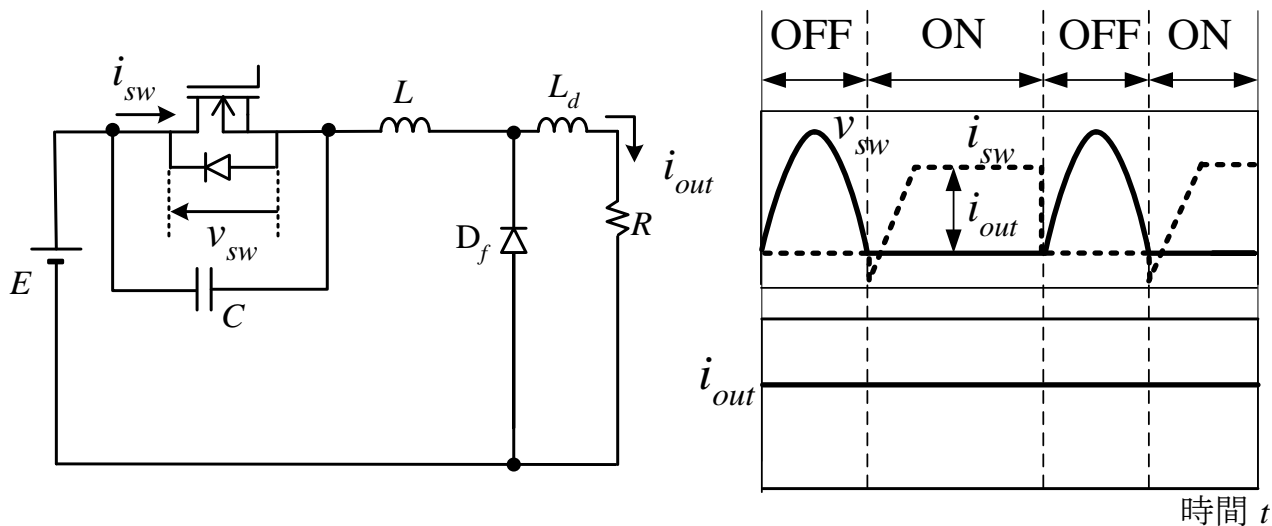
図 4 電流共振型 DC チョッパ

この回路の特徴は以下の通りである。

- ① スイッチを OFF した時及び、スイッチを ON した時も ZCS 動作を行うのでスイッチング損失が少なくノイズの発生を抑える事が出来る。
- ② スイッチに印加される電圧が入力電圧より大きくなることは無い。
- ③ 但し、スイッチを流れる電流は  $i_r + i_{out}$  となり出力電流よりも大きい。
- ④ ON 時間を変化させるとソフトスイッチング動作を行う事ができない。
- ⑤ 出力の調整には ON 時間を一定としたまま、OFF 時間を調整する事によって行うが、出力を低下させるためには動作周波数を大幅に低下させなければならない。動作周波数が低下すると平滑インダクタンスを大きくする必要が生まれる。動作周波数が可聴周波数域になると騒音の発生も問題になる。

## (2) 電圧共振型 DC チョッパ

スイッチ素子として MOSFET を用いた電圧共振型 DC チョッパの回路構成と動作波形を図 5 に示す。



(a) 回路構成

(b) 動作原理

図 5 電圧共振型 DC チョッパ

この回路は電流共振型の回路と双対な回路関係にあり、スイッチ OFF 時に共振電圧波形が発生し、スイッチ ON 時には電流がゆるやかに立ち上がり、ソフトスイッチング動作となっている。

この回路方式における特徴は以下の通りである。

- ① スイッチを ON した時と OFF した時双方でゼロ電圧スイッチング動作を行うことでスイッチング損失が少なく、ノイズの発生も小さい。
- ② スイッチを流れる電流が出力電流を超える事は無い。
- ③ 但し、スイッチにかかる電圧は入力電圧よりも大きい。
- ④ OFF 時間を変えるとソフトスイッチング動作を行う事ができない。
- ⑤ 従って、出力を調整するためには OFF 時間一定のまま、ON 時間を調整すればよいが、出力を増加させるためには動作周波数を大幅に低下させなくてはならない。動作周波数が可聴周波数域になると騒音が発生するという問題がある。
- ⑥ 加えて、この回路方式ではスイッチ素子の耐圧を非常に高くする必要があるが、MOSFET においては高耐圧の製品ほど ON 抵抗が大きい傾向にあり、大電流で動作させる場合導通損失の増加も発生する。

### (3) 可変容量型共振 DC チョッパ(既提案)

電流共振型 DC チョッパ回路の共振回路に新たに第 2 の共振コンデンサと短絡スイッチ  $SW_2$  を加えた構成となっている。ただし  $C_1 > C_2$  である。 $SW_2$  を選択的に ON/OFF させて  $C_2$  を短絡したり、活かしたりすることにより、第 1 の共振コンデンサ  $C_1$  との合成容量を変化させ、共振条件を可変としている。回路の出力電力は  $SW_2$  の ON 時間を操作することにより調整を

行う。図 6 に回路図を示す。

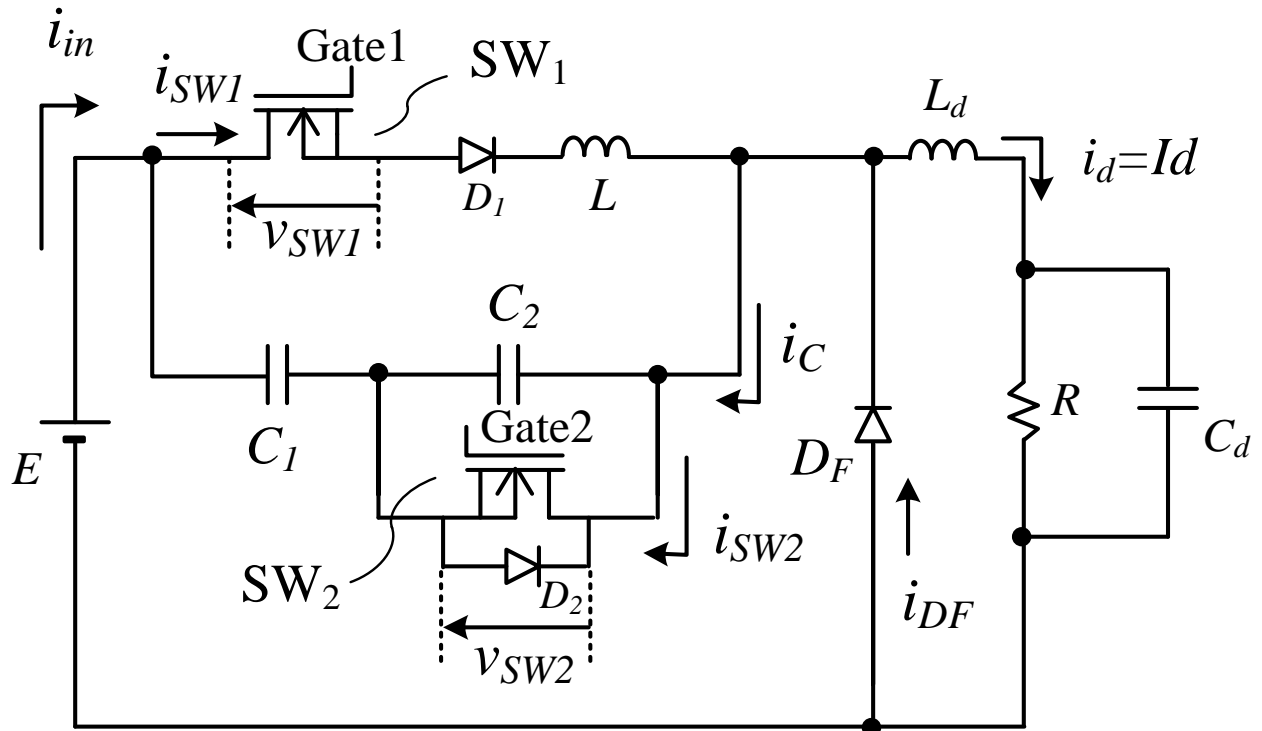


図 6 可変容量型 DC チョッパ回路

$SW_1$ と $SW_2$ の ON/OFF と流れる電流及び端子電圧の変化によって 7 つのモードで動作する。この時の動作波形を図 7 に示す。  
各モード毎の動作説明をする。

◆ モード①

前周期のモード⑦において、第 1 の共振コンデンサ  $C_1$  は予め “+” の極性で  $E[V]$  に充電されているものとする。また、このとき、負荷には還流ダイオード  $D_F$  を介して一定電流  $I_0$  が流れている。ON 信号  $Gate1, Gate2$  を与えると  $SW_1, SW_2$  が ON し、還流ダイオードを流れる電流  $i_{DF}$  が減少するとともに入力電流  $i_{in}$  が増加する。 $i_{sw1}$  は  $LC_1$  共振による共振電流波形となり、緩やかに立ち上がるので  $SW_1$  は ZCS で ON する。一方、 $i_{sw2} = i_{sw1} + I_0$  であるがこのモードでは  $i_{sw1} = i_{in}$  なので  $i_{sw2} = 0$  である。

◆ モード②

$i_{in}$  が増加して  $I_0$  に達すると  $i_{sw2} = i_{sw1} - I_0$  が緩やかに流れ始めるので、 $SW_2$  は ZCS で ON する。 $i_{sw2}$  と  $i_{sw1}$  は  $LC_1$  共振電流となる。 $i_{in}$  は一定値  $I_0$  を保持するので  $i_{sw1} = i_{sw2} + I_0$  である。これを  $T_0$  とおく。

◆ モード③

$SW_2$  への ON 信号  $Gate2$  を切ると  $SW_2$  は OFF し、電流は第 2 の共振コンデンサ  $C_2$  へ転流するので  $i_{sw2} = 0$  となる。ここで、 $C_1 > C_2$  であるから、共振回路の合成共振容量は  $C_1 \cdot C_2 / (C_1 + C_2) \approx C_2$  となり、回路は  $LC_2$  で動作する。 $C_2$  は充電され始め、 $v_{sw2}$  ( $C_2$  の端子電圧) は徐々に増加し、 $i_{sw1}$  と  $i_c$  は減少していく。 $i_{sw2}$  は急にゼロになるが  $v_{sw2}$  は緩

やかに立ち上がるので、 $SW_2$ は ZVS で OFF となる。ここで、 $i_{sw1} = i_c + I_0$ である。 $C_2$ の充電電圧がピーク値を過ぎると  $i_c$ は負へ転じる。 $i_c = -I_0$ になるとき  $i_{sw1} = 0$ となり、ダイオード  $D_1$ が OFF する。このモード③の時間は  $T_r \approx \pi\sqrt{LC_2}$ である。この時点ではまだ、 $C_2$ の充電電圧  $v_{sw2}$ はゼロになっていない。

◆ モード④

共振補助回路には  $C_1 \rightarrow C_2$ の方向に一定電流  $I_0$ が流れ、 $C_2$ は放電していく。 $T_0 + T_r$ とスイッチ素子の OFF 時間などを合わせた相当な時間経過後に  $SW_1$ への ON 信号を切れば、 $SW_1$ は ZCS で OFF する。

◆ モード⑤

$v_{sw2}$ がゼロになるまでの待ち期間である。

◆ モード⑥

$v_{sw2}$ がゼロになると  $SW_2$ の並列ダイオード  $D_2$ が ON して再び  $C_2$ が短絡され、 $SW_2$ は ZVS で ON する。 $C_1$ は “+ -” の極性に充電されていくので、 $SW_1$ の端子電圧  $v_{sw1}$ は上昇する。

◆ モード⑦

$v_{sw1}$ が電源電圧  $E[V]$ に達すると還流ダイオード  $D_F$ が ON し、出力電流  $i_{out}$ は負荷側を還流すると同時に入力電流  $i_{in}$ はゼロとなる。その結果、 $v_{sw1}$ は  $E[V]$ にクランプされる。

以上から、この方式の DC チョッパ回路の特徴は次のようになる。

- ①  $SW_1$ と  $SW_2$ は双方共にソフトスイッチングで動作するため損失が少ない。
- ② スイッチング周期(モード①から⑦までの時間)を固定した状態においても、 $SW_1$ と  $SW_2$ に与える ON 信号の時間を操作すれば出力電力を制御できる。
- ③ コンデンサが付加されたことにより熱損失の増加と重量が増してしまう事が問題として挙げられる。

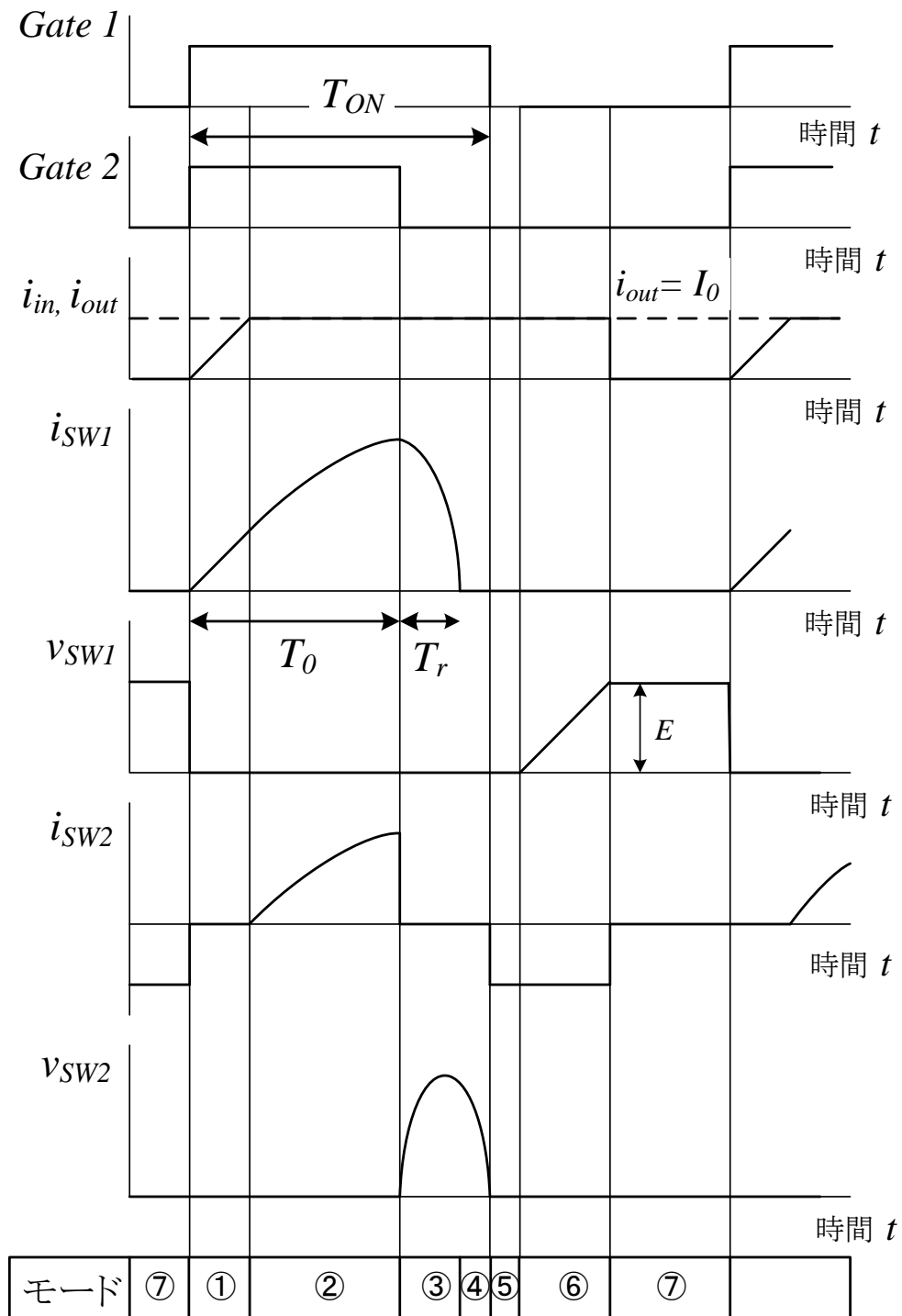


図 6 可変容量型共振 DC チョップパの動作波形

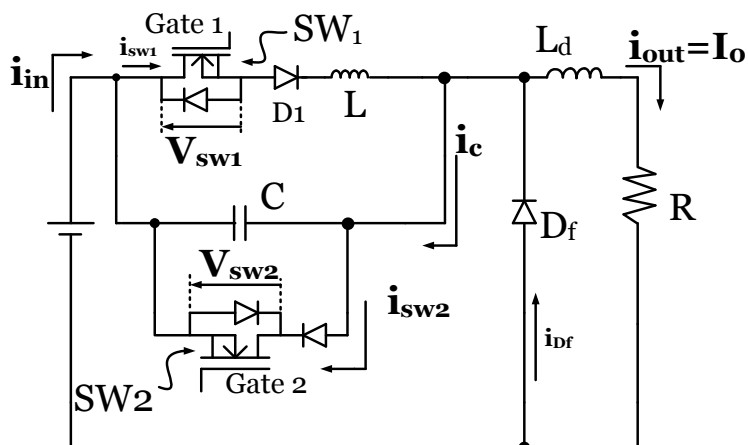
## 5. 新たに提案する DC チョップパ回路

### 5.1 提案する回路方式の動作原理と特徴

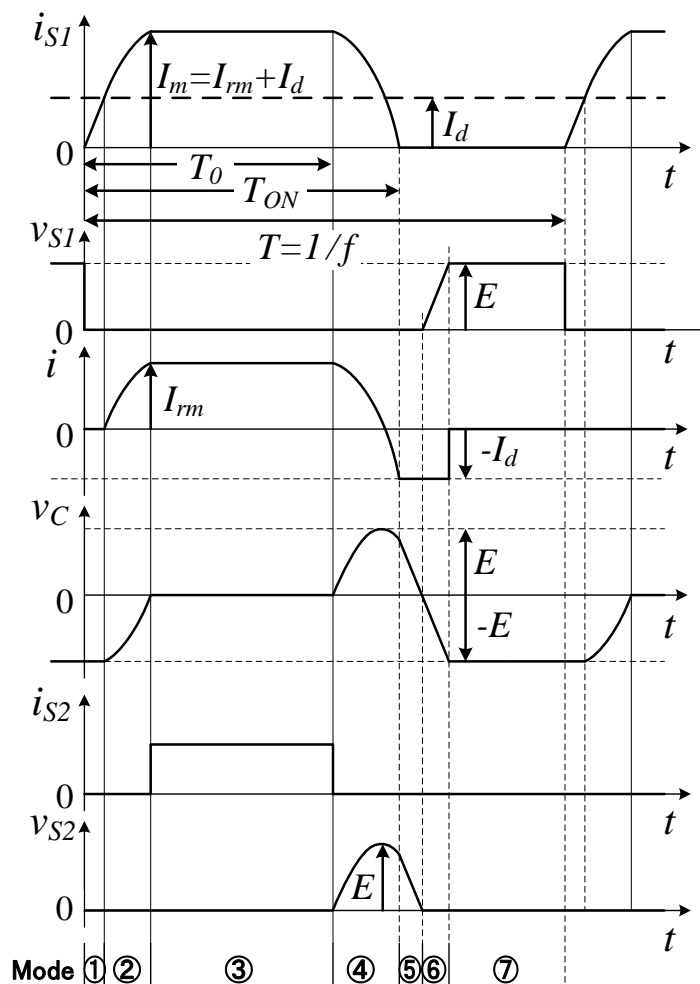
電流共振型 DC チョップパを改良し、LC 共振波形をゼロ電流スイッチングが行われる間だけ利用する方式の回路を提案する。共振波形を部分的に使用する部分共振技術を用いるこ



とで効率化を目指す。この回路の主な回路構成と理論動作波形を図 7 に示す。



(a) 主回路構成



(b) 動作波形

図 7 新たに提案する方式の DC チョップ

この回路では 2 つのスイッチの開閉と流れる電流、端子電圧の挙動について 7 つの状態 (モード) に分けて考える事が出来る。各モードにおける動作は以下の通り。

但しモード⑦において共振コンデンサ C には “+ -” の極性に電荷  $E$  が充電されているものとし、平滑インダクタンスは十分に大きく出力電流  $i_{out}$  は還流ダイオード  $D_f$  を通して流れ、

一定であるとする。

◆ モード①

$Gate1, Gate2$ に信号を与えると $SW_1, SW_2$ が ON し、還流ダイオードを流れる電流 $i_{out}$ が減少するとともに $i_{in}$ が増加する。 $i_{s1}$ の傾きは $E/L$ の直線で増加する。この時 $C$ は「+-」の向きに充電されている。

$C$ が充電されているので、 $i_c = 0$

$L \frac{d^2q}{dt^2} = E$ より(コイルに電流を与えた時、得られる電圧と電流の関係式)

$$i = \frac{E}{L}t \quad (I(0) = 0)$$

$$q = \frac{E}{2L}t^2$$

◆ モード②

$i_{sw1} = I_d$ になると共振電流 $i$ が流れ始めるとともに、 $C$ の電圧 $v_c$ は $-E$ から $0[V]$ へ上昇していく。 $i_{s2} = i_{s1} - I_0$ であるが、このモードでは $i_{sw1} = i_{out}$ なので $i_{sw2} = 0$ である。 $i_{in}$ が $I_0$ に達すると $SW_2$ が ON し共振コンデンサは短絡される。

初期条件： $q = -CE, i = 0$

$$q = A \cos \omega t + B \sin \omega t$$

$$i = -A \omega \sin \omega t + B \omega \cos \omega t$$

初期条件より  $t=0$  のとき  $q=-CE$  なので

$$A = -CE$$

$t=0$  のとき  $i=0$  なので

$$B = 0$$

$$q = -CE \cos \omega t$$

$$i = CE \omega \sin \omega t$$

$$v_c = -E \cos \omega t$$

$$v_c = 0 = -E \cos \omega t_2$$

$$t_2 = \frac{\pi}{2\omega}$$

$$i(t_2) = CE\omega$$

◆ モード③

$v_c = 0$ になると $i$ は最大値 $i_m$ 、 $i_{s1}$ は最大値 $i_m = I_{rm} + I_0$ となる。 $D_2$ が順バイアスとなるので $SW_2$ がオンして $C$ は短絡され、一定値を保つ。モード①からモード③の時間の和が操作量 $T_0$ となる。

初期条件 :  $i = CEw, q = 0$

$$i = CEw$$

$$q = 0$$

◆ モード④

時刻  $t = T_0$  で  $SW_2$  への ON 信号を切ると  $SW_2$  は OFF され、LC 共振による充電が始まり、 $v_c$  が緩やかに上昇するとともに共振コンデンサから負荷へ放電され  $i_{s1}$  と  $i$  は減少する。  $i_{s1} = 0$  になると  $D_1$  がオフし、以後、  $i_{s1} = 0$  を維持する。 ことのき、  $i = -I_d$  である。

初期条件 :  $i = CEw, q = 0$

$$q = A \cos wt + B \sin wt$$

$$i = -A w \sin wt + B w \cos wt$$

初期条件より  $t=0$  のとき  $q=0$  なので

$$A=0$$

$$t=0 \text{ のとき } i=CEw \text{ なので}$$

$$B=CE$$

$$Q = CE \sin wt$$

$$i = CEw \cos wt$$

$i = -id$  のとき Mode4 終了なので、

$$i = -id = CEw \cos wt$$

$$t_4 = \frac{1}{w} \left( \pi - \cos^{-1} \frac{id}{CEw} \right)$$

モード 5 の初期条件のために、モード 4 終了時の  $V_c$  の値が知りたい  $q$  の式に  $t_4$  を代入し、 $c$  で割る。

$$\begin{aligned} q &= CE \sin wt_4 = CE \sin \left( \pi - \cos^{-1} \frac{id}{CEw} \right) \\ &= CE \{ \sin \pi \cos(\cos^{-1} \frac{id}{CEw}) - \cos \pi \sin(\cos^{-1} \frac{id}{CEw}) \} \\ &= CE \left( \sin \left( \cos^{-1} \frac{id}{CEw} \right) \right) \\ &= \frac{CE \sqrt{(CEw)^2 - id^2}}{CEw} \\ v_c &= \frac{\sqrt{(CEw)^2 - id^2}}{cw} \end{aligned}$$

◆ モード⑤

$C$  を流れる電流は  $i = -I_d$  なので  $v_c$  は傾き  $-I_d / C$  の直線で減少する。

初期条件 :  $v_c = \frac{\sqrt{(CEw)^2 - id^2}}{cw}, i = -id$

$$v_c = -\frac{1}{c} \int i \, dt$$

$$= -\frac{id}{c} \int dt$$

$$= -\frac{id}{c} t + k$$

$$= -\frac{id}{c} t + \frac{\sqrt{(CEw)^2 - id^2}}{cw}$$

$V_c = -E$  の時モード 5 終了なので

$$-E = -\frac{id}{c} t_5 + \frac{\sqrt{(CEw)^2 - id^2}}{cw}$$

$$t_5 = \frac{CE}{id} t_5 + \frac{\sqrt{(CEw)^2 - id^2}}{cw}$$

◆ モード⑥

$v_c$  は 0[V] を過ぎ、引き続き、傾き  $-I_d/C$  の直線で減少するとともに、 $v_{s1}$  は傾き  $I_d/C$  の直線で増加する。 $v_c = -E$  になると充電が完了し、 $i=0$  となる。このとき、 $v_{s1} = E$  である。

◆ モード⑦

還流ダイオード  $D_f$  が ON し、 $i_{in}$  はゼロとなる。その結果  $v_{sw1}$  は  $E$  に保たれる。  
次のサイクル  $T=1/f$  まで待つモード。OFF 時間として機能する。

以上から、本チョッパ回路の特徴は次のようになる。

- ① スイッチ  $SW_1$  ,  $SW_2$  は双方ともソフトスイッチングによって動作する。
- ② スwitching 周波数(周期)が固定された状態であっても、 $SW_1$  と  $SW_2$  に与える ON 信号の時の制御が行える。
- ③  $SW_1$  の ON 信号を与える時間は  $SW_2$  の導通時間  $T_0$  に LC 共振回路の立ち下がり時間を加えた時間で一定なので実際の操作量は  $T_0$  のみである。
- ④ 操作量  $T_0$  を指定すれば回路はモード①からモード⑤までシーケンシャルに動作する。

## 5.2 動作シミュレーション

動作シミュレーションに用いた回路パラメータを表 1 に示す。動作周波数を可聴周波数より上の 20kHz と定めた。

表 1 回路パラメータ

電源電圧	50 [V]
負荷抵抗	10[Ω]
チョップ周波数	20 [kHz]
共振インダクタンス	9.7[μH]
共振コンデンサ	0.1[μF]
平滑インダクタンス	2[mH]

シミュレーションソフトウェアにはマイウェイ技研のパワーエレクトロニクス回路シミュレータ PSIM version 7.0(開発元は POWERSIM 社)を用いた。シミュレーションソフト上での回路図を図 8 に示す。

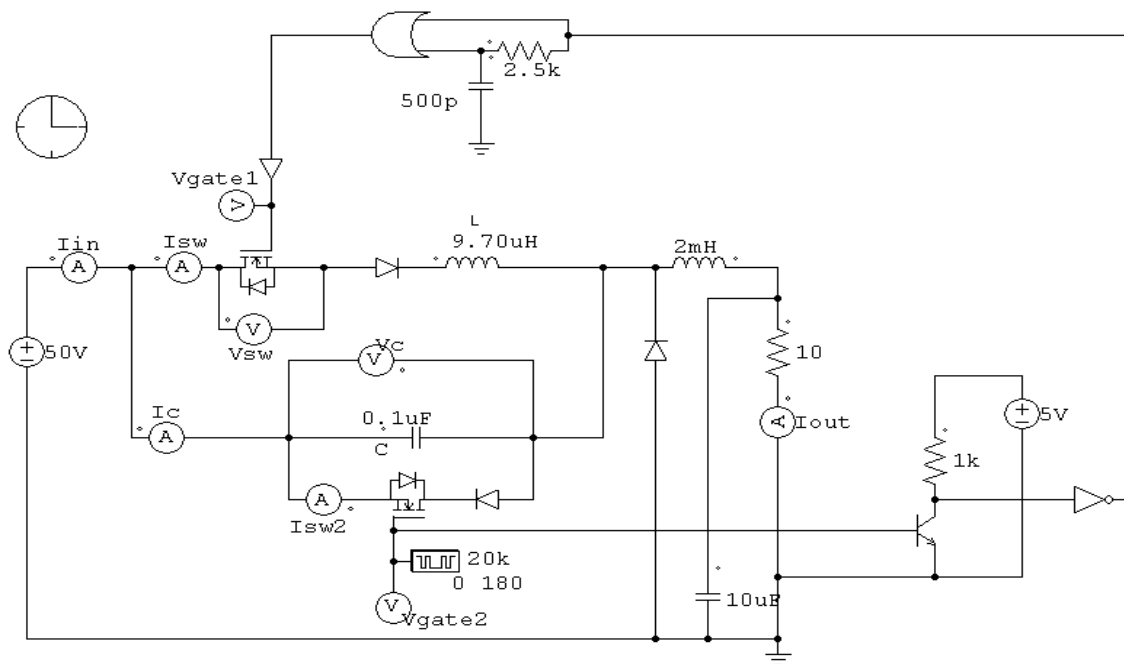
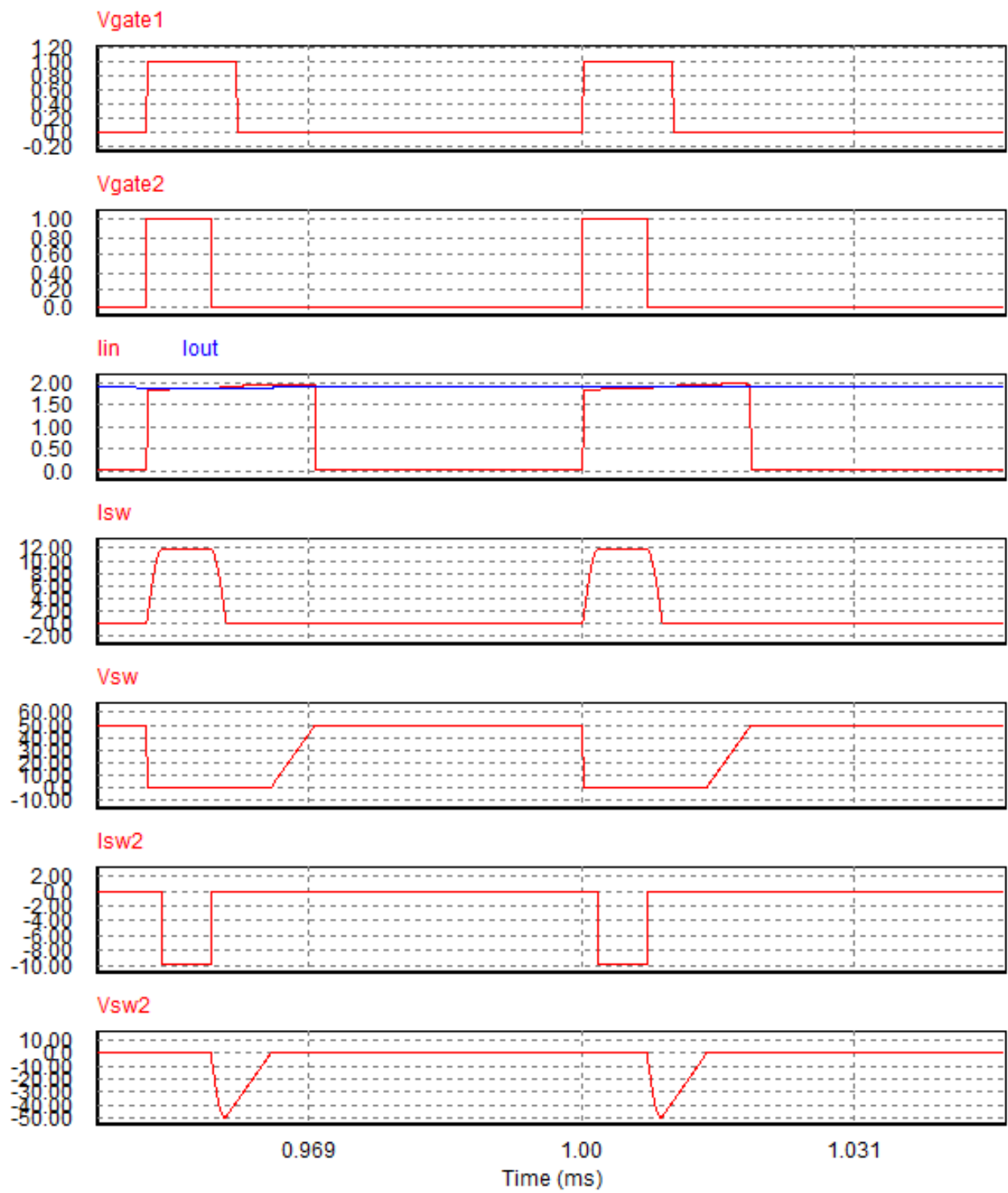
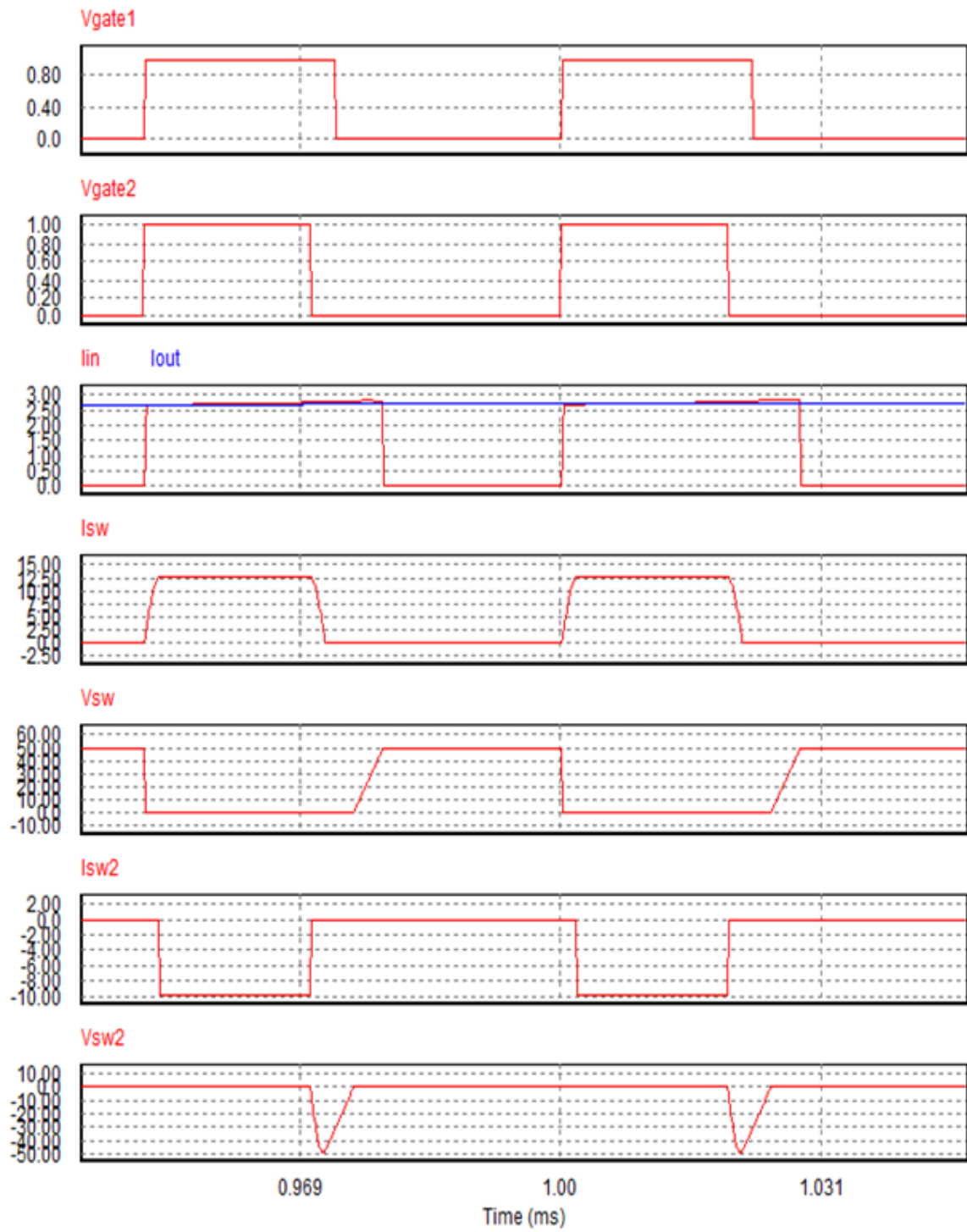


図 8 シミュレーションソフト上における回路図

尚、スイッチ素子とダイオードは理想スイッチとし、回路の損失抵抗や線路インダクタンス、浮遊容量は無視している。ここで、チョップ周期(チョップ周波数の逆数) $T$ に対する共振コンデンサ短絡時間 $T_0$ の比を短絡率 $\alpha$ と定義する。すなわち、 $\alpha = T_0/T$ である。本回路方式においては、短絡率 $\alpha$ を大きくすると透過率も大きくなるので、 $\alpha$ を大きくすれば出力電力は増加する。短絡率を変化させた時のシミュレーション結果を図 9 に示す。



(a)  $\alpha = 30[\%]$

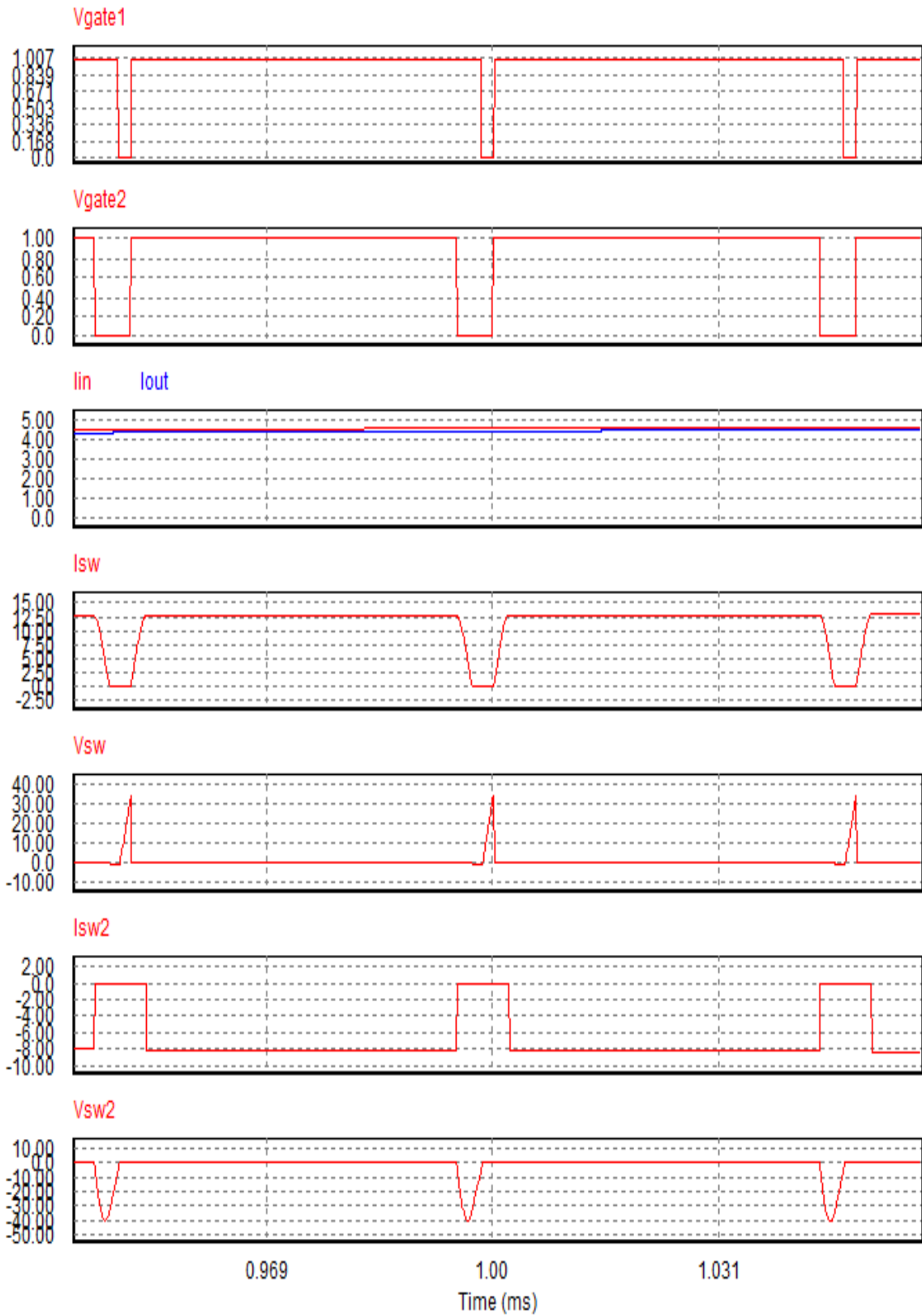


(b)  $\alpha = 50[\%]$



(c)  $\alpha = 70[\%]$

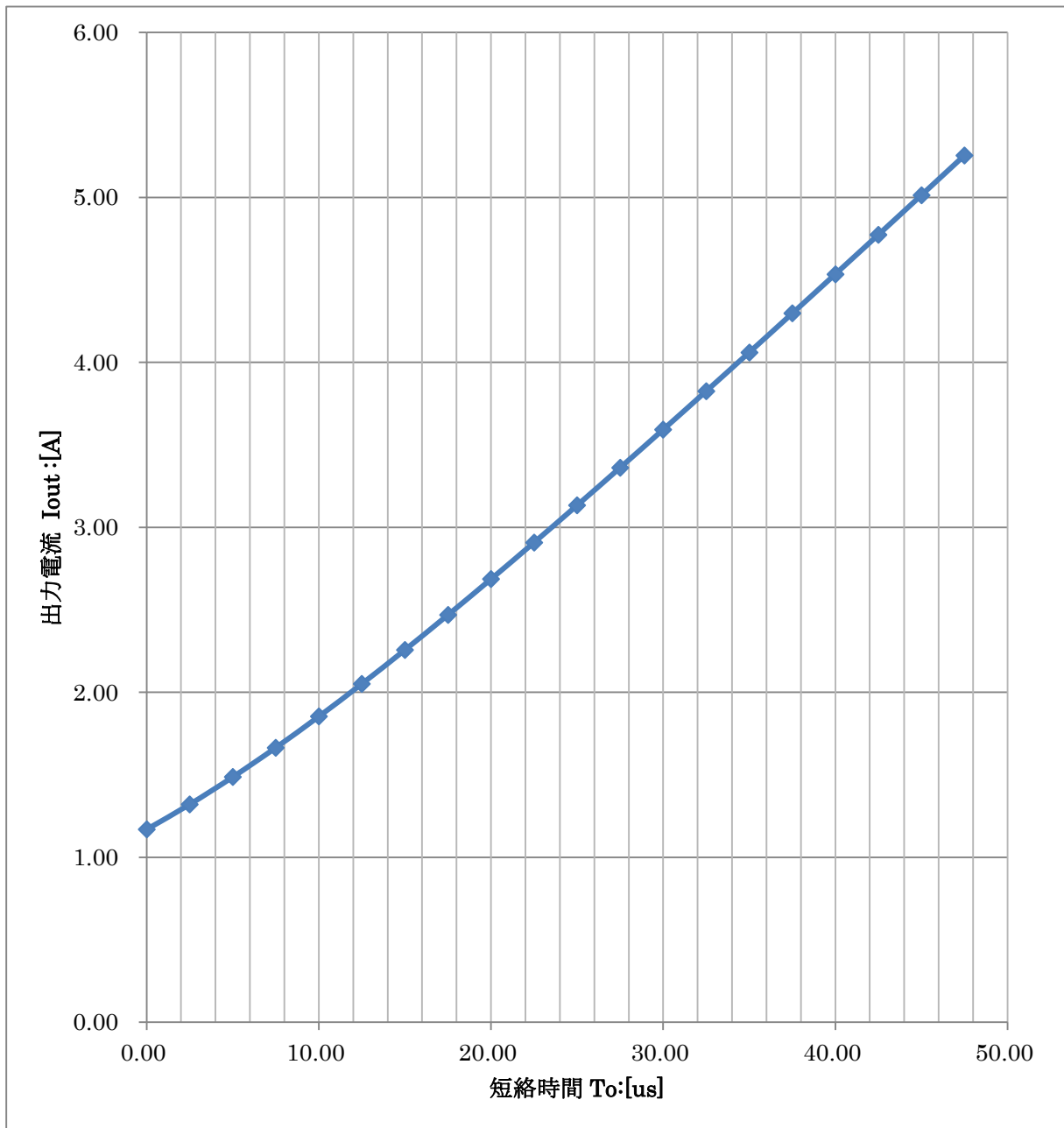




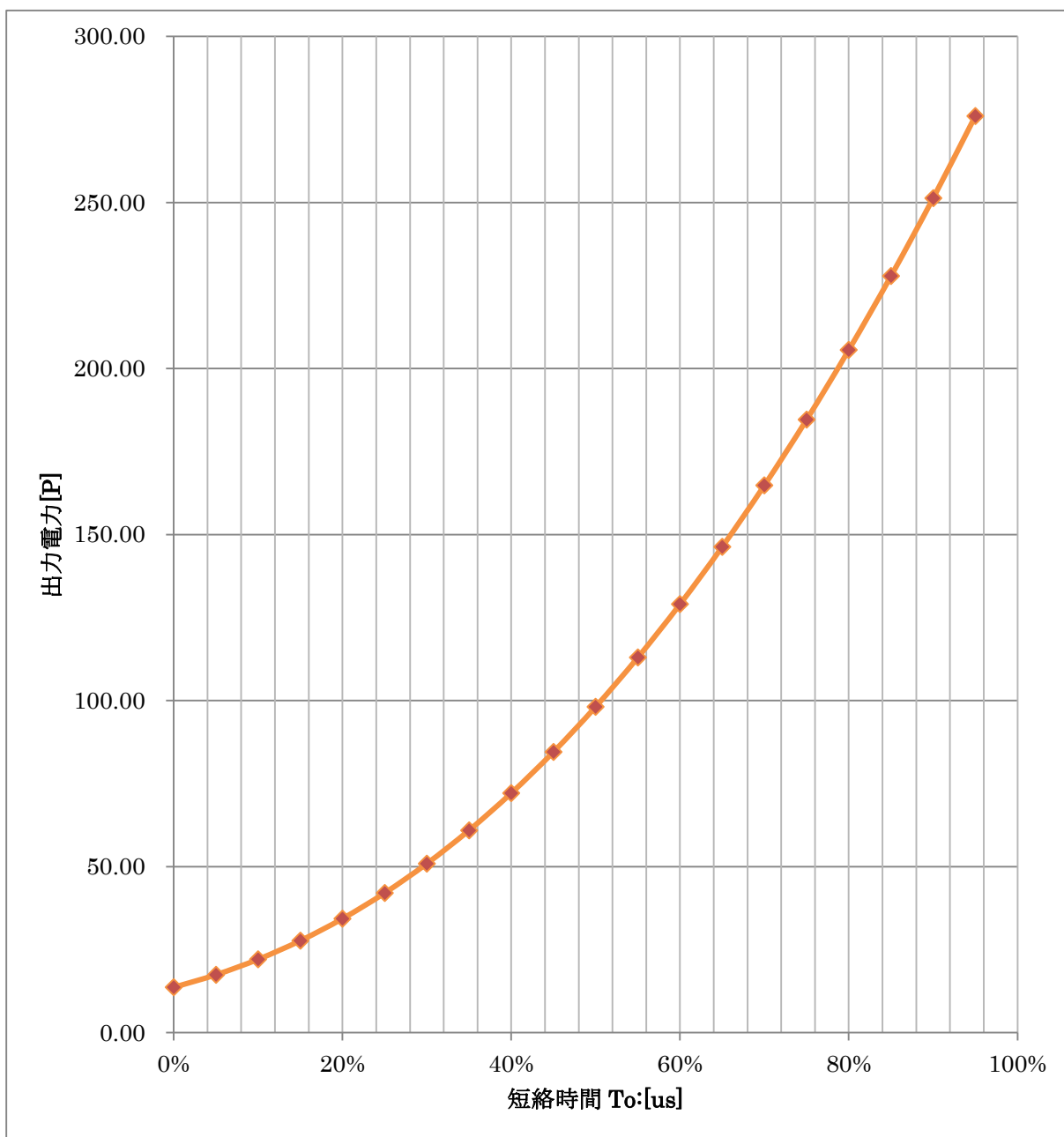
(d)  $\alpha = 90[\%]$

図 9 短絡率を変化させた時のシミュレーション結果

次に短絡率と出力電力の関係を調べた。表 1 の回路パラメータを用いた場合の関係を図 10 において示す。



(a) 短絡率と負荷電流の関係



(b) 短絡率と出力電力の関係

図 10 短絡率と出力の関係

シミュレーション結果から確認できる事は以下の通り。

- ① 図 10 から短絡率を変化させると出力電力を調整することが確認できる。
- ②  $SW_1$ ,  $SW_2$ の双方においてソフトスイッチング動作を行っている。
- ③ しかし、短絡率が90[%]程度に上げるとソフトスイッチング動作が保たれなくなる。  
したがって、透過率は 15[%]から 85[%]の間で行う必要がある。
- ④ 図 10 の (a) の図より短絡率と不可電流はほぼ線形であると言え制御しやすい事が分かる

以上より、動作周波数を下げずに出力の調整を行う事が確認できた。

## 6. まとめ

本論文では、共振型 DC チョップパにおける新しい回路方式を提案し、その動作原理の説明とシミュレーションによる解析を行い、本回路方式の基礎特性を明らかにした。

回路の製作を行ったが、電流共振は確認できず、回路パラメータを見直す必要がある事がわかった。今後はパラメータを見直した上で動作確認を行い、モータ駆動回路への適用を検討して行く。