

## DAB 方式のソフトスイッチングの原理とリアクトル電流波形の理論計算

(読んでほしい人：パワエレ初心者)

2015/2/4 舞鶴高専 平地克也

最近 DAB 方式双方向 DC/DC コンバータが注目されています。先日ひさしぶりに電気学会半導体電力変換研究会に参加しましたが、DAB 方式の発表が 3 件もあり熱心に議論されていました。平地研究室技術メモでは No.20140310「DAB 方式双方向 DC/DC コンバータ」で DAB 方式の基本的な動作原理を説明しましたが、今回は DAB 方式のソフトスイッチングの原理とリアクトル電流波形の計算式の導出方法を説明します。DAB 方式ではリアクトル電流波形でほとんどの特性が決まります。ソフトスイッチングの可否や出力容量など主要特性がリアクトル電流波形から計算できます。また、導出した計算式を使って Excel でリアクトル電流波形を描画するワークシートを作りましたので紹介します。

### DAB 方式のソフトスイッチングの原理

図 1 に DAB 方式双方向 DC/DC コンバータの回路図を示します。L<sub>1</sub> と L<sub>2</sub> は TR<sub>1</sub> の漏れインダクタンスまたは外付けリアクトルです。図 2 に図 1 の等価回路を示します。変圧器の 2 次側の部品を全て 1 次側に換算して変圧器を省略しています。

変圧比  $n_1 / n_2 = a$  とすると、

$$L = L_1 + a^2 L_2$$

$$V_2' = aV_2$$

となります。

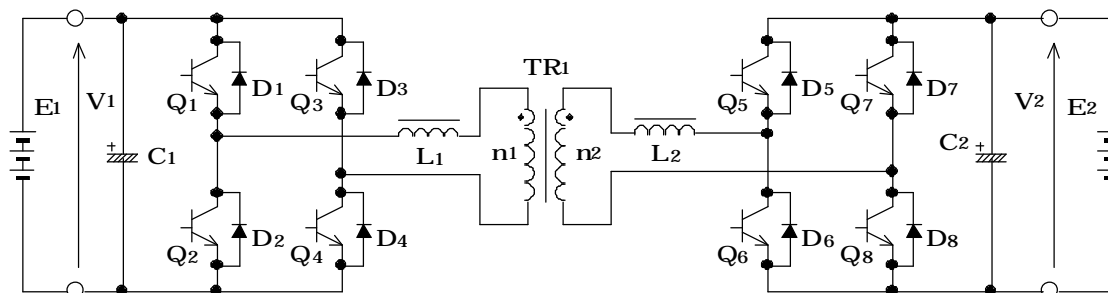


図 1 DAB 方式双方向 DC/DC コンバータ

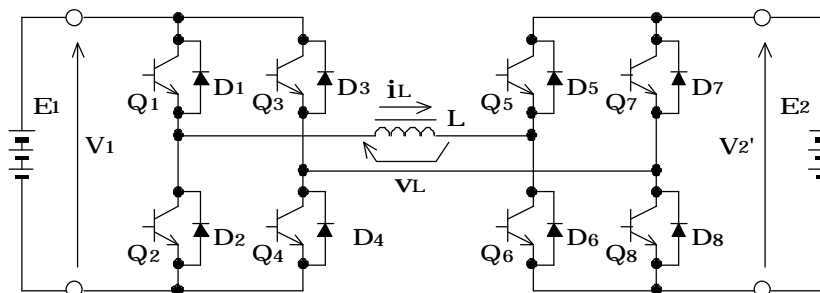


図 2 DAB 方式双方向 DC/DC コンバータの等価回路

前回の DAB 方式の技術メモ No.20140310 では図 2 を使って 6 ケに区分される動作モード毎の電流経路を示して DAB 方式の動作原理の基本を説明しました。今回はまず DAB 方式のソフトスイッチングの原理を説明します。図 3 は図 2 のリアクトル L の電流  $i_L$  の波形と動作モードの番号を示します。動作モードのうち Mode1-3、2-2、3-3、4-2 はいずれも微小時間で終了しますが、ソフトスイッチングの動作に重要です。前回の技術メモ No.20140310 ではこれら 4 つの動作モードは無視しています。図 4 に DAB 方式のソフトスイッチング動作を説明するための電流経路図を示します。スイッチ素子  $Q_1 \sim Q_8$  と並列に接続されたコンデンサ  $C_1 \sim C_8$  はスイッチ素子の寄生容量またはスナバコンデンサです。ソフトスイッチング動作の検討には  $C_1 \sim C_8$  を考慮する必要があります。

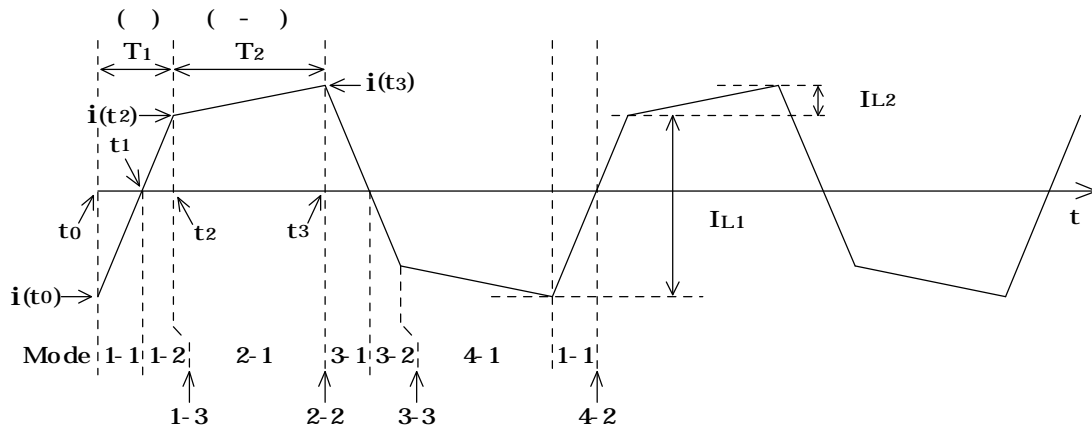


図 3 DAB 方式のリアクトル電流  $i_L$  の波形と動作モード

各動作モードの概要を以下に説明します。

Mode 1-2 ( $Q_1$ 、 $Q_4$ 、 $Q_6$ 、 $Q_7$  が ON。電流経路は  $E_1 - Q_1 - L - Q_6 - E_2 - Q_7 - Q_4 - E_1$ )

$E_1$  と  $E_2$  が直列につながり、 $E_1$  の電圧と  $E_2$  の電圧が加算されて L に印加されている。よって、L の電流は急速に増加する。 $E_1$ 、 $E_2$  は共に放電している。 $Q_6$ 、 $Q_7$  が OFF して次の Mode に移行する。

Mode 1-3 ( $Q_1$ 、 $Q_4$  が ON。電流経路は  $E_1 - Q_1 - L$  2 つに分岐)

$Q_6$ 、 $Q_7$  が OFF した結果  $E_2$  側の 4 つの素子は全て OFF となる。それでもリアクトル電流  $i_L$  は同じ値で流れ続ける。次の 2 つの径路を流れることができる。

$L - C_6 - C_8 - Q_4$

$L - C_5 - C_7 - Q_4$

その結果、 $C_6$  と  $C_7$  は充電され、 $C_5$  と  $C_8$  は放電される。充放電に要する時間は  $i_L$  の大きさとコンデンサの容量で決まり、1 周期に対して無視できるほど小さいが  $Q_6$ 、 $Q_7$  のターン OFF 時間よりは充分長い値となるように設計する。その結果  $Q_6$ 、 $Q_7$  のターン OFF はソフトスイッチングとなる。コンデンサの充放電が完了して次の Mode に移行する。

Mode 2-1 ( $Q_1$ 、 $Q_4$ 、 $Q_5$ 、 $Q_8$  が ON。電流経路は  $E_1 - Q_1 - L - D_5 - E_2 - D_8 - Q_4 - E_1$ )

コンデンサの充放電が完了したので  $i_L$  はコンデンサから  $D_5$  と  $D_8$  に転流する。 $Q_5$ 、 $Q_8$  は  $D_5$  と  $D_8$  が導通してから ON させるので  $Q_5$ 、 $Q_8$  のターン ON は ZVS である。 $E_2$  は充電されるようになり、この状態がしばらく継続後  $Q_1$  と  $Q_4$  が OFF して次の Mode に移行する。

Mode 2-2 (Q5、Q8 が ON。電流径路は L D5 E2 D8 2 つに分岐)

Q1 と Q4 が OFF した結果 E1 側の 4 つの素子は全て OFF となる。それでもリアクトル電流  $i_L$  は同じ値で流れ続ける。次の 2 つの径路を流れることができる。

L D5 E2 D8 C4 C2 L

L D5 E2 D8 C3 C1 L

その結果、C1 と C4 は充電され、C2 と C3 は放電される。充放電に要する時間は Mode1-3 と同様に  $i_L$  の大きさとコンデンサの容量で決まり、1 周期に対して無視できるほど小さいが Q1、Q4 のターン OFF 時間よりは充分長い値となるように設計する。その結果 Q1、Q4 のターン OFF はソフトスイッチングとなる。

コンデンサの充放電が完了して次の Mode に移行する。

Mode 3-1 (Q2、Q3、Q5、Q8 が ON。電流径路は E1 D2 L D5 E2 D8 D3 E1)

コンデンサの充放電が完了したので  $i_L$  はコンデンサから D2 と D3 に転流する。Q2、Q3 は D2 と D3 が導通してから ON させるので Q2、Q3 のターン ON は ZVS である。E1 と E2 は共に充電される。よって、L には E1 電圧と E2 電圧が加算されて逆方向に印加され、L の電流は急速に減少する。急速に減少し、0A となって次の Mode に移行する。

このように全ての素子の ON/OFF はソフトスイッチングとなります。なお、Mode3-2 から 1-1 は Mode1-2 から 3-1 と  $i_L$  の方向が逆転するだけで同じ動作となるので説明は省略します。

### リアクトル電流波形の理論計算

次にリアクトル電流の理論波形を導出します。図 3 のリアクトル電流波形で各パラメータを次のように定めます。

$t_0$  Mode1-1 開始時刻

$t_1$  Mode1-2 開始時刻

$t_2$  Mode2-1 開始時刻

$t_3$  Mode3-1 開始時刻

なお、Mode1-3、2-2、3-3、4-2 (コンデンサ充放電の Mode) は充分短いのでこの計算では無視しています。

$i(t_0)$  時刻  $t_0$  のリアクトル電流

$i(t_1)$  時刻  $t_1$  のリアクトル電流

$i(t_2)$  時刻  $t_2$  のリアクトル電流

$i(t_3)$  時刻  $t_3$  のリアクトル電流

$T_1$  Mode1 の継続時間

$T_2$  Mode2 の継続時間

1 周期を  $2\pi$  [rad] とした時の  $T_1$  の角度

$IL_1$  Mode1 のリアクトル電流変化量

$IL_2$  Mode2 のリアクトル電流変化量

図 3 から明かなように次の式が成立します。

$T_2$  の角度 = -

$$i(t_0) = -i(t_3)$$

$$i(t_1) = 0$$

$$i(t_2) = i(t_3) - I_{L2}$$

$$i(t_3) = (I_{L1} + I_{L2}) / 2$$

Mode1 ではリアクトルに  $V_1 + V_2'$  が印加されるので次の式が成立します。

$$I_{L1} = (V_1 + V_2') T_1 / L$$

Mode2 ではリアクトルに  $V_1 - V_2'$  が印加されるので次の式が成立します。

$$I_{L2} = (V_1 - V_2') T_2 / L$$

よって、

$$I_{L1} + I_{L2} = (V_1 + V_2') T_1 / L + (V_1 - V_2') T_2 / L = ((T_1 + T_2)V_1 + (T_1 - T_2)V_2') / L$$

1 周期を  $T$  とすると  $T_1$  と  $T_2$  に関して次の式が成立します。

$$T_1 = ( \quad / 2 ) T = \quad /$$

$$T_2 = ( \quad - \quad ) / \quad \times (T / 2) = ( \quad - \quad ) /$$

$T_1$ 、 $T_2$  を  $I_{L1} + I_{L2}$  の式に代入して、

$$I_{L1} + I_{L2} = ( V_1 + (2 \quad - \quad ) V_2' ) / ( \quad L )$$

よって

$$i(t_3) = ( I_{L1} + I_{L2} ) / 2 = ( V_1 + (2 \quad - \quad ) V_2' ) / (2 \quad L)$$

$$i(t_2) = i(t_3) - I_{L2} = ((2 \quad - \quad ) V_1 + \quad V_2') / (2 \quad L)$$

図 3 の Mode1 において、三角形の相似性より、

$$(t_1 - t_0) : (t_2 - t_1) = -i(t_0) : i(t_2) = i(t_3) : i(t_2)$$

よって、

$$t_1 - t_0 = T_1 \times i(t_3) / (i(t_2) + i(t_3))$$

$$t_2 - t_1 = T_1 \times i(t_2) / (i(t_2) + i(t_3))$$

$t_0$  を起点として  $t_0 = 0$  とし、リアクトル電流の理論波形を描画するために必要な式を全てまとめると以下ようになります。

$$t_1 = T_1 \times i(t_3) / (i(t_2) + i(t_3))$$

$$t_2 = T_1$$

$$t_3 = T_1 + T_2$$

$$T_1 = \quad /$$

$$T_2 = ( \quad - \quad ) /$$

$$i(t_0) = -i(t_3)$$

$$i(t_1) = 0$$

$$i(t_2) = ((2 \quad - \quad ) V_1 + \quad V_2') / (2 \quad L)$$

$$i(t_3) = ( V_1 + (2 \quad - \quad ) V_2' ) / (2 \quad L)$$

$$V_2' = aV_2 \quad (\text{ただし、} a = n_1 / n_2)$$

$$= 2 \quad f$$

よって、以下の 6 ケの数値が分かれば理論波形を描画できます。

動作周波数  $f$ 、リアクトルのインダクタンス  $L$ 、入力電圧  $V_1$ 、出力電圧  $V_2$ 、変圧比  $a$ 、角度  
Excel で作成した理論波形描画用ワークシートを公開しています。

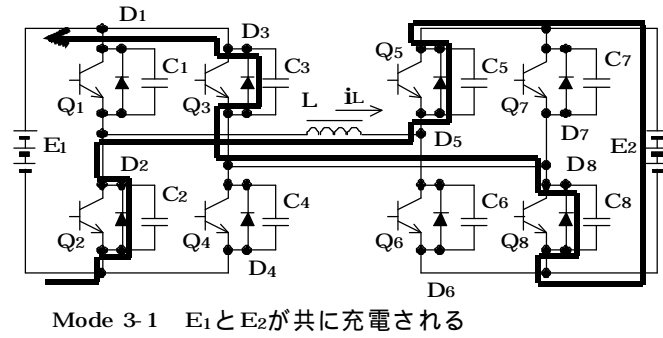
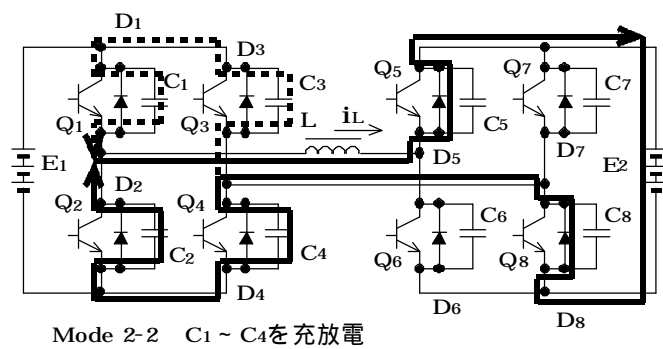
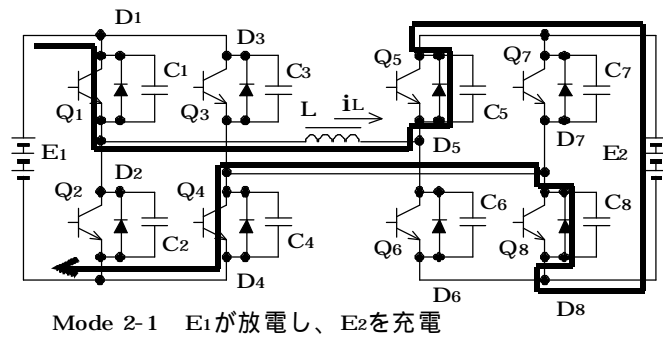
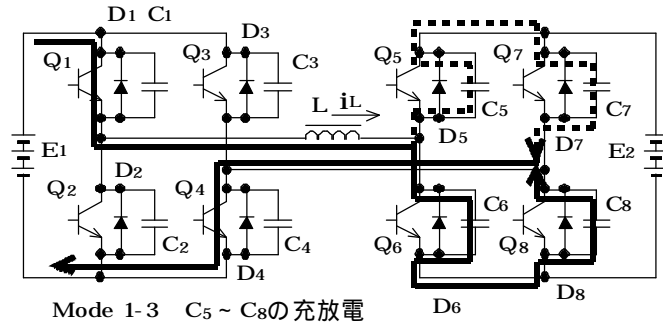
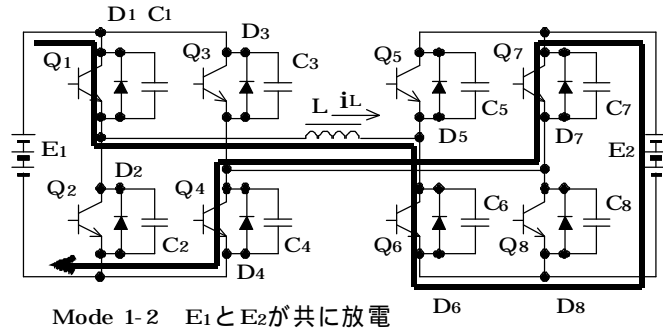


図4 DAB方式のソフトスイッチング動作

## リアクトル電流波形の計算例

理論波形描画用ワークシートで作成したリアクトル電流波形の例を以下に示します。

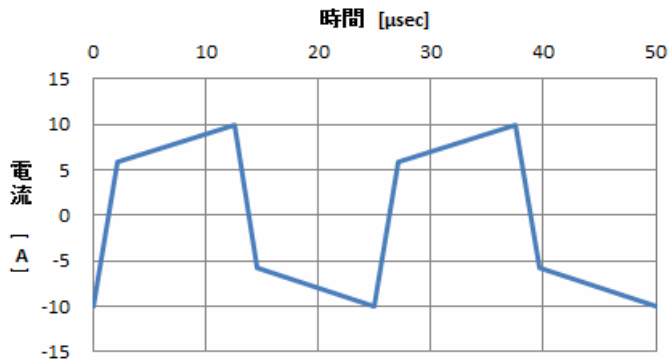


図 5

$V_1 = 400\text{V}$ 、 $V_2 = 180\text{V}$ 、 $f = 40\text{kHz}$   
 $L = 100\ \mu\text{H}$ 、 $n_1 / n_2 = 2$ 、 $\theta = 30^\circ$   
 出力電流 13.9A、出力電力 2500W  
 $V_1 > V_2'$  なので Mode2 で  $i_L$  は増加している。

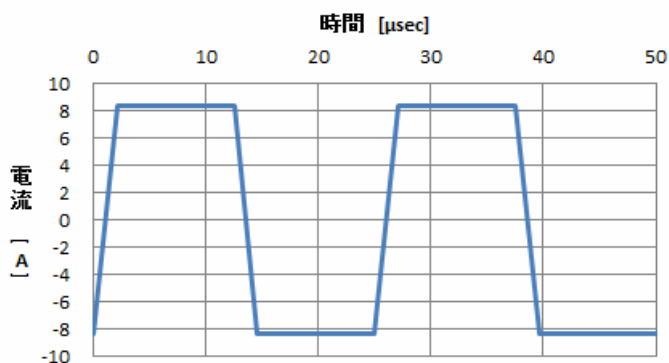


図 6

$V_1 = 400\text{V}$ 、 $V_2 = 200\text{V}$ 、 $f = 40\text{kHz}$   
 $L = 100\ \mu\text{H}$ 、 $n_1 / n_2 = 2$ 、 $\theta = 30^\circ$   
 出力電流 13.9A、出力電力 2778W  
 $V_1 = V_2'$  なので Mode2 で  $i_L$  は一定。

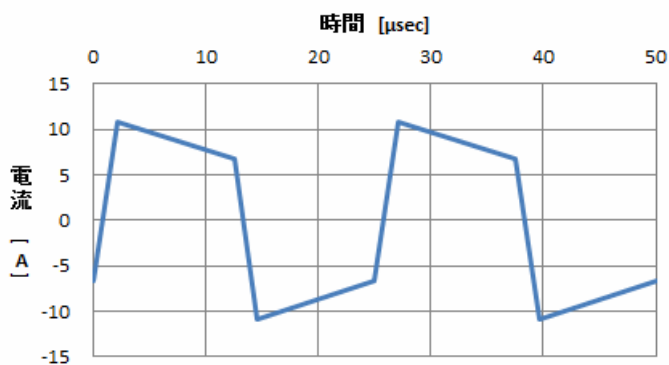


図 7

$V_1 = 400\text{V}$ 、 $V_2 = 220\text{V}$ 、 $f = 40\text{kHz}$   
 $L = 100\ \mu\text{H}$ 、 $n_1 / n_2 = 2$ 、 $\theta = 30^\circ$   
 出力電流 13.9A、出力電力 3056W  
 $V_1 < V_2'$  なので Mode2 で  $i_L$  は減少。

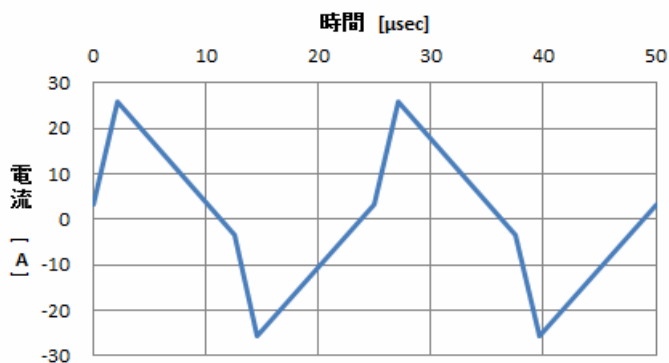


図 8

$V_1 = 400\text{V}$ 、 $V_2 = 340\text{V}$ 、 $f = 40\text{kHz}$   
 $L = 100\ \mu\text{H}$ 、 $n_1 / n_2 = 2$ 、 $\theta = 30^\circ$   
 出力電流 13.9A、出力電力 4722W  
 $V_1 < V_2'$  なので Mode2 で  $i_L$  は大きく減少し、 $i(t_3) < 0$  となっている。  
 この状態ではソフトスイッチングできない。

以上