

## DAB 方式の重要な公式の導出

(読んでほしい人：パワエレ初心者)

2015/2/14 舞鶴高専 平地克也

前回の技術メモ[1]では DAB 方式双方向 DC/DC コンバータのリアクトル電流波形の計算式を導出しました。今回はリアクトル電流波形の計算式を使って重要な公式の導出を行います。出力電流、出力電力、およびソフトスイッチング限界などが計算可能となります。

### DAB 方式の動作の概要と出力電流、出力電力の計算方法

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。L1 と L2 は TR1 の漏れインダクタンスまたは外付けリアクトルです。励磁インダクタンスは無視しています。図 2 にリアクトル電流波形と動作モード番号を示します (文献[1]の図 3 より)。また、平地研究室技術メモ No.20140310 「DAB 方式双方向 DC/DC コンバータ」[2]で詳しく説明したように、DAB 方式はスイッチ素子 Q1 ~ Q8 で 2 つの電源 E1 と E2 の充電 / 放電を適切に切り替えることによりリアクトル電流を制御して出力電力を制御しています。図 3 に充電 / 放電の切替の順序を示します (文献[2]の図 5 より)。図 3 から、電力フローが E1 → E2 の時は E2 は次のように 4 つの動作モードで充電され、2 つの動作モードで放電されていることが分かります。

充電 Mode 2-1、3-1、4-1、1-1

放電 Mode 1-2、3-2

文献[1]で求めた各動作モードのリアクトル電流の式を使えば各動作モードでの E2 の充電電荷と放電電荷を求めることができます。全てを合計すれば 1 サイクルでの充電電荷を導出できます。充電電荷が分かれば充電電流と充電電力も容易に計算できます。

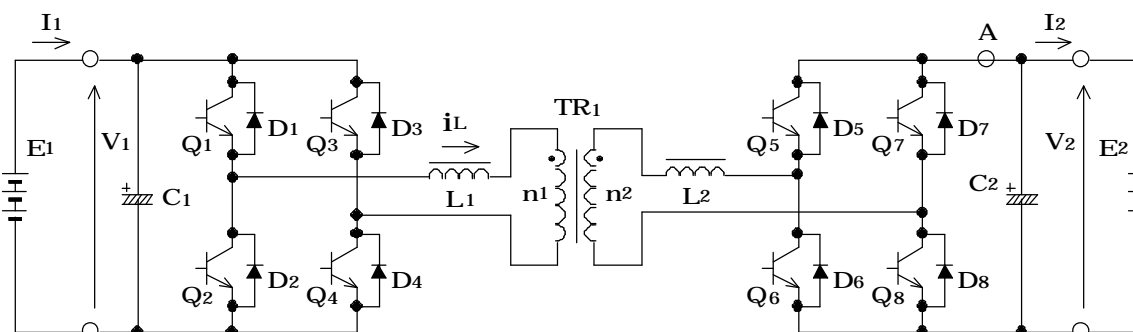


図 1 DAB 方式双方向 DC/DC コンバータ

### 充電電荷、放電電荷の計算

まず、各動作モードでの E2 の充電電荷と放電電荷の計算式を導出します。なお、実際には E2 の電流 I2 は平滑コンデンサ C2 で平滑されて動作モードと無関係のほぼ一定の値となります。ここで導出する電荷は C2 の手前の A 点を通過する電荷の計算と考えて下さい。

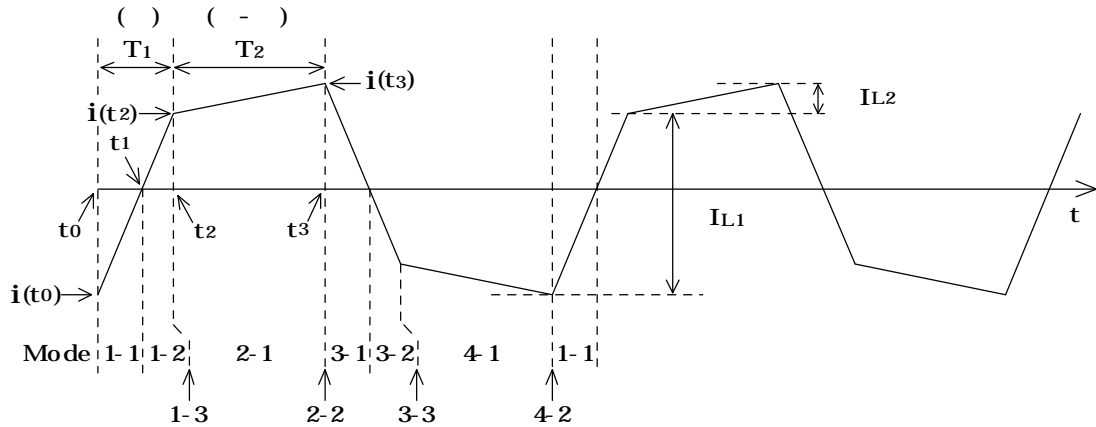


図2 DAB方式のリアクトル電流  $i_L$  の波形と動作モード

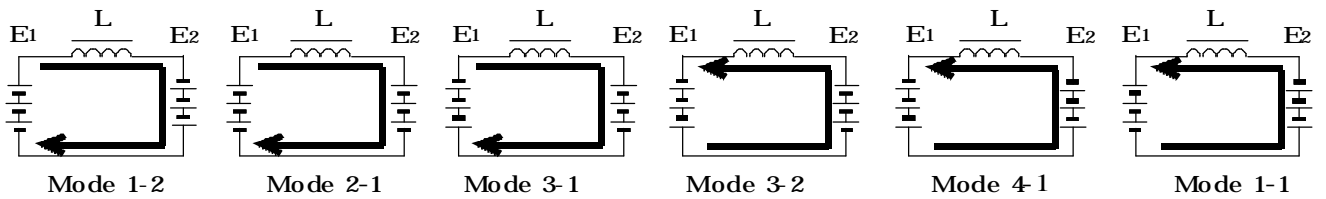


図3 E1とE2の充電/放電の切替順序(電力フローがE1 E2の時)

< Mode1-1での充電電荷  $Q_{1-1}$  >

図2から明かなように、

$$Q_{1-1} = (t_1 - t_0) \times |i(t_0)| \div 2 = (t_1 - t_0) \times i(t_3) \div 2 \quad \dots \dots (1)$$

文献[1]より、

$$t_1 - t_0 = T_1 \times i(t_3) / (i(t_2) + i(t_3)) \quad \dots \dots (2)$$

$$i(t_2) = ((2 - ) V_1 + V_2') / (2 L) \quad \dots \dots (3)$$

$$i(t_3) = ( V_1 + (2 - ) V_2') / (2 L) \quad \dots \dots (4)$$

$$T_1 = / \quad \dots \dots (5)$$

これら(2~5)式を(1)式に代入して整理すると、

$$Q_{1-1} = \frac{\left( pV_1 + (2f - p)V_2' \right)^2}{8w^2 L \left( V_1 + V_2' \right)} \quad \dots \dots (6)$$

なお、 $V_2'$  は出力電圧  $V_2$  を1次側に換算した電圧であり、 $V_2' = (n_1 / n_2)V_2$

< Mode1-2での放電電荷  $Q_{1-2}$  >

図2から明かなように、

$$Q_{1-2} = (t_2 - t_1) \times i(t_2) \div 2 \quad \dots \dots (7)$$

文献[1]より、

$$t_2 - t_1 = T_1 \times i(t_2) / (i(t_2) + i(t_3)) \quad \dots \dots (8)$$

(8)式および(3~5)式を(7)式に代入して、

$$Q_{1-2} = \frac{\left( (2f-p)V_1 + pV_2' \right)^2}{8w^2L(V_1 + V_2')} \dots\dots (9)$$

< Mode2-1 での放電電荷  $Q_{2-1}$  >

図 2 から明かなように、

$$Q_{2-1} = T_2 \times (i(t_2) + i(t_3)) \div 2 \dots\dots (10)$$

文献[1]より、

$$T_2 = ( \quad - \quad ) / \dots\dots (11)$$

(11)式および(3,4)式を(10)式に代入して、

$$Q_{2-1} = \frac{f(p-f)(V_1 + V_2')}{2w^2L} \dots\dots (12)$$

< 1 サイクルの充電電荷  $Q$  >

Mode3-1、3-2、4-1 の充放電電荷はそれぞれ Mode1-1、1-2、2-1 に等しいので、

$$Q = 2 \times (Q_{1-1} - Q_{1-2} + Q_{2-1}) \dots\dots (13)$$

(6)(9)(12)式を(13)式に代入して整理すると、

$$Q = \frac{2V_1 f(p-f)}{w^2L} \dots\dots (14)$$

### 出力電流、電力の計算

「電流 = 1 サイクルの電荷 × 周波数」なので、

$$\text{出力電流 (充電電流) } I_2' = Q \times f \dots\dots (15)$$

なお、 $I_2'$  は出力電流  $I_2$  を 1 次側に換算した電流であり、 $I_2' = (n_2 / n_1)I_2$

(14)式を(15)式に代入して整理すると、

$$I_2' = \frac{V_1}{wL} f \left( 1 - \frac{f}{p} \right) \dots\dots (16)$$

(16)式は  $\frac{f}{p} = 1/2$  の時最大となり、 $I_2'$  の最大値を  $I_2'_{\max}$  とすると、

$$I_2'_{\max} = \frac{V_1 p}{wL 4} \dots\dots (17)$$

出力電力は出力電流の式から以下のように求まります。

$$P = \frac{V_1 V_2'}{wL} f \left( 1 - \frac{f}{p} \right) \dots\dots (18)$$

$$P_{\max} = \frac{V_1 V_2' p}{wL 4} \dots\dots (19)$$

### ソフトスイッチング成立条件の計算

図4に文献[1]で求めた  $V_1 < V_2'$  の時のリアクトル電流  $i_L$  の波形を示します。この時は文献[1]で説明したように全てのスイッチ素子の寄生容量（およびスナバコンデンサ）の充放電が  $i_L$  によって実現されるのでソフトスイッチングが成功します。図5に  $V_1 > V_2'$  の時の  $i_L$  波形を示します。この時は Mode2-1 で  $i_L$  は大きく減少し、 $i(t_3) < 0$  となっているので  $t_3$  の時点で Mode2-2 に移行することができず、 $i_L$  による寄生容量（およびスナバコンデンサ）の充放電ができず、ソフトスイッチング失敗となります。なお、 $t_3$  は Mode2-1 の終了時刻です（図2参照）。

ソフトスイッチング失敗時の電流経路を図6に示します。Mode2-1 では  $E_1$  が放電し  $E_2$  を充電していますが、 $i(t_3) < 0$  となっているので  $t_3$  の時点では Mode2-1' に示すように電流の方向が逆転し、 $E_2$  が放電し  $E_1$  を充電するようになります。その結果  $E_1$  側では  $D_1$  と  $D_4$  が導通しています。この状態で  $Q_1$  と  $Q_4$  がターンオフして  $Q_2$  と  $Q_3$  がターンオンしますので Mode2-1'' に示すように、 $D_1$  と  $D_4$  の逆回復時間の間「 $E_1 - D_1 - Q_2 - E_1$ 」と「 $E_1 - Q_3 - D_4 - E_1$ 」の2つの経路でいわゆる貫通電流が流れてソフトスイッチング失敗となります。

このように、ソフトスイッチングを成功させるためには  $i(t_3) > 0$  が必要条件であり、そのためには次の式を満足する必要がある、これが  $V_1 < V_2'$  の時のソフトスイッチング成立条件となります。

$$i(t_3) = (V_1 + (2 - \dots)V_2') / (2L) > 0 \dots\dots (20)$$

整理して、

$$> \frac{P}{2} \left( 1 - \frac{V_1}{V_2} \right) \dots\dots (21)$$

逆に、 $V_1 > V_2'$  の時は Mode2-1 で  $i_L$  は増加するので、 $i(t_2) > 0$  がソフトスイッチング成立条件となります。そのためには次の式を満足する必要がある、これが  $V_1 > V_2'$  の時のソフトスイッチング成立条件となります。

$$i(t_2) = ((2 - \dots)V_1 + V_2') / (2L) > 0 \dots\dots (22)$$

整理して、

$$> \frac{P}{2} \left( 1 - \frac{V_2'}{V_1} \right) \dots\dots (23)$$

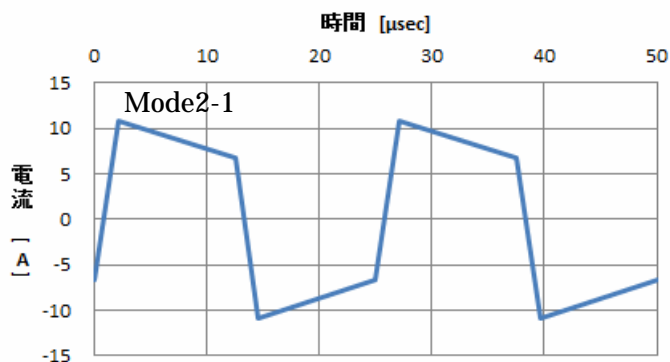


図4  $i_L$  波形（文献[1]の図7より）  
 $V_1 = 400V$ 、 $V_2 = 220V$ 、 $f = 40kHz$   
 $L = 100 \mu H$ 、 $n_1 / n_2 = 2$ 、 $\phi = 30^\circ$   
 出力電流 13.9A、出力電力 3056W  
 $V_2' = 220V \times 2 = 440V$   
 $V_1 < V_2'$  なので Mode2-1 で  $i_L$  は減少。

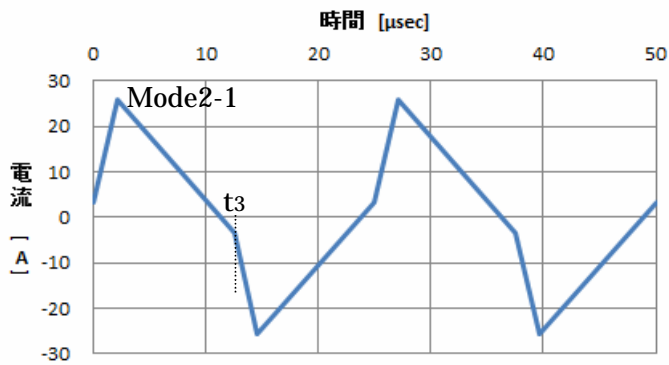


図5  $i_L$  波形 (文献[1]の図8より)

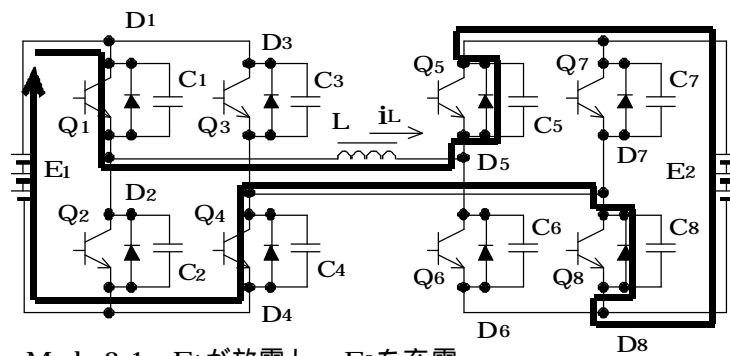
$V_1 = 400V$ 、 $V_2 = 340V$ 、 $f = 40kHz$

$L = 100 \mu H$ 、 $n_1 / n_2 = 2$ 、 $\phi = 30^\circ$

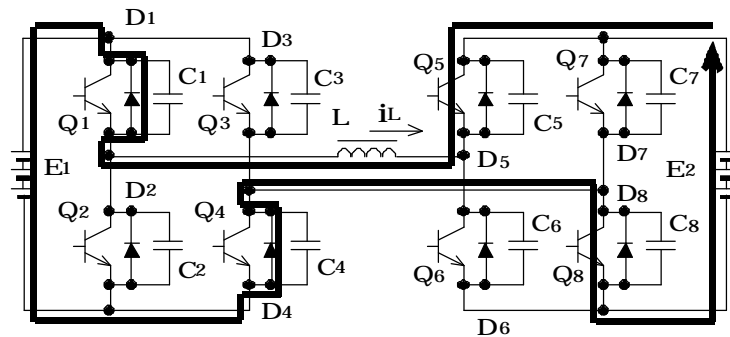
出力電流 13.9A、出力電力 4722W

$V_2' = 340V \times 2 = 680V$

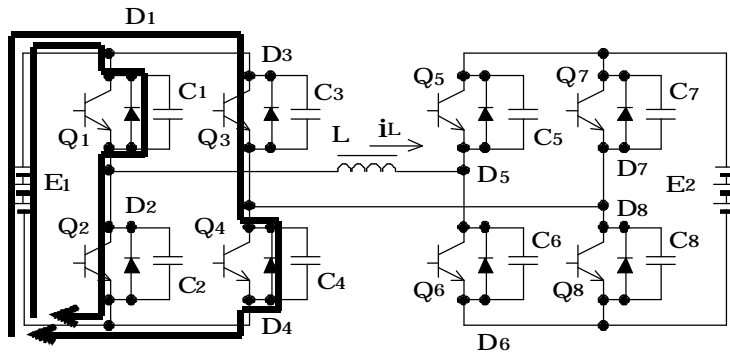
$V_1$   $V_2'$  なのでMode2-1で $i_L$ は大きく減少し、 $i(t_3) < 0$ となっている。



Mode 2-1  $E_1$ が放電し、 $E_2$ を充電



Mode 2-1' 電流の方向が逆転し、 $E_2$ が放電して $E_1$ を充電



Mode 2-1'' 逆回復時間の間に流れる貫通電流

図6 ソフトスイッチング失敗時の電流経路

### DAB 方式の重要な公式まとめ

以上導出した DAB 方式の重要な公式をまとめます。

$$\text{出力電流 } I_2' = \frac{V_1}{\omega L} f \left(1 - \frac{f}{p}\right) \dots\dots (16)$$

$$\text{最大出力電流 } I_2'_{\max} = \frac{V_1 p}{\omega L 4} \dots\dots (17)$$

$$\text{出力電力 } P = \frac{V_1 V_2'}{\omega L} f \left(1 - \frac{f}{p}\right) \dots\dots (18)$$

$$\text{最大出力電力 } P_{\max} = \frac{V_1 V_2' p}{\omega L 4} \dots\dots (19)$$

$$V_1 < V_2' \text{ の時のソフトスイッチング成立条件 } > \frac{p}{2} \left(1 - \frac{V_1'}{V_2}\right) \dots\dots (21)$$

$$V_1 > V_2' \text{ の時のソフトスイッチング成立条件 } > \frac{p}{2} \left(1 - \frac{V_2'}{V_1}\right) \dots\dots (23)$$

昇圧比  $k$  を(24)のように定義すると重要な公式は(25)式以下に整理されます。

$$k = V_2' / V_1 \dots\dots (24)$$

$$\text{出力電力 } P = \frac{V_1^2}{\omega L} k f \left(1 - \frac{f}{p}\right) \dots\dots (25)$$

$$\text{最大出力電力 } P_{\max} = \frac{V_1^2}{\omega L} k \frac{p}{4} \dots\dots (26)$$

$$V_1 < V_2' \text{ の時のソフトスイッチング成立条件 } > \frac{p}{2} \left(1 - \frac{1}{k}\right) \dots\dots (27)$$

$$V_1 > V_2' \text{ の時のソフトスイッチング成立条件 } > \frac{p}{2} (1 - k) \dots\dots (28)$$

これらの公式を使った計算例を図 7、図 8 に示します。

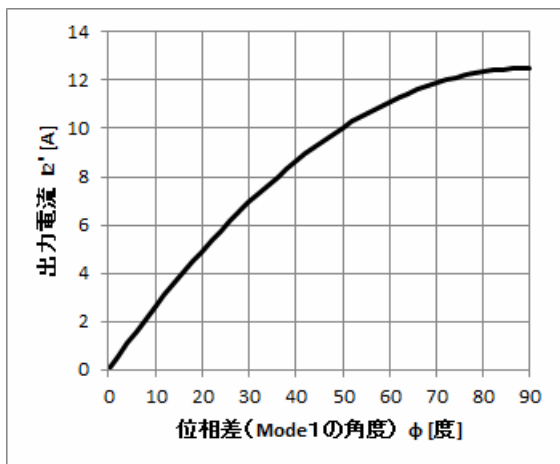


図 7 出力電流  $I_2'$  特性

(図 4 の条件で を変化させた時)

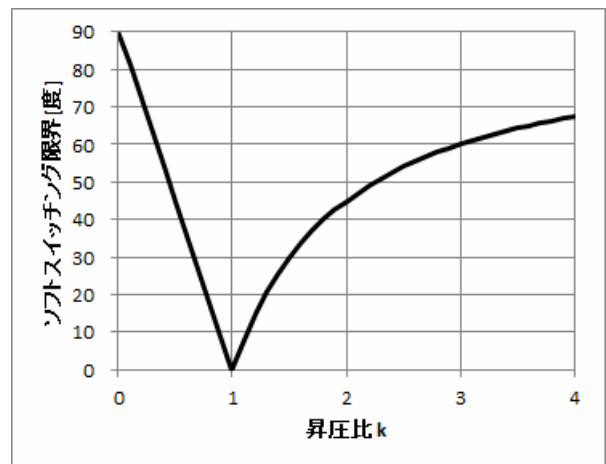


図 8 ソフトスイッチング限界

なお、DAB 方式は最近注目されるようになりましたが、提案されたのは 20 年以上前であり、今回導出した重要な公式も既に 20 年以上前の論文にほぼ同じ形で掲載されています(例えば文献[3])。

#### 参考文献

- [1] 平地克也、「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」、平地研究室技術メモ No.20150204
- [2] 平地克也、「DAB 方式双方向 DC/DC コンバータ」、平地研究室技術メモ No.20140310
- [3] M.H.Kheraluwala, R.W.Gascoigne, D.M.Divan, and E.D.Baumann, "Performance Characterization of a High-Power Dual Active Bridge dc-to-dc Converter", IEEE Tran. on Industry Applications, Vol.28, No.6, pp.1294-1301, (1992)

以上