

DAB 方式双方向 DC/DC コンバータ

(読んでほしい人：パワエレ初心者)

舞鶴高専 平地克也

DAB 方式の回路構成

前回の技術メモ[1]では「電圧型+電流型」の双方向 DC/DC コンバータを紹介しましたが、今回はそれとは異なる動作原理の双方向 DC/DC コンバータを紹介します。図 1 に回路構成を示します。変圧器の左右双方にフルブリッジを持っているので DAB (Dual Active Bridge) 方式と呼ばれています。大電力の用途に広く研究されています (例えば文献[2])。前回の技術メモ[1]で紹介した図 2 の電圧型+電流型フルブリッジ方式も左右双方にフルブリッジを持っていますが、図 2 ではリアクトル L_1 が右サイドにあるのに対し図 1 では 2 つのフルブリッジの間に配置されます (L_1 と L_2)。 L_1 と L_2 は変圧器の漏れインダクタンスで代用しても OK です。スイッチ素子 $Q_1 \sim Q_8$ の動作は図 1 と図 2 では全く異なり、特性も大きく異なります。

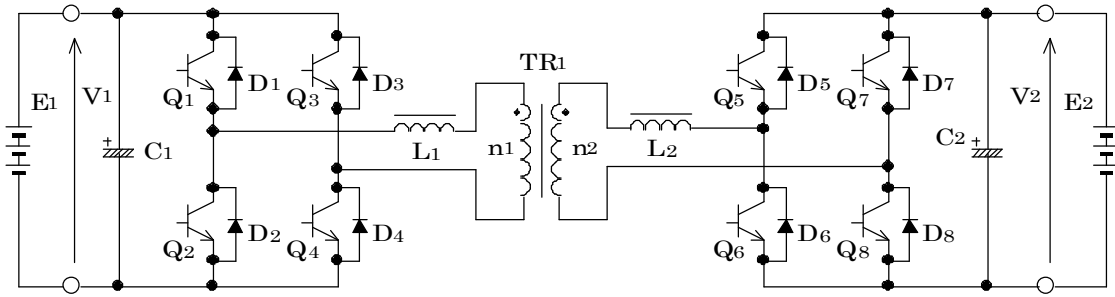


図 1 DAB 方式双方向 DC/DC コンバータ

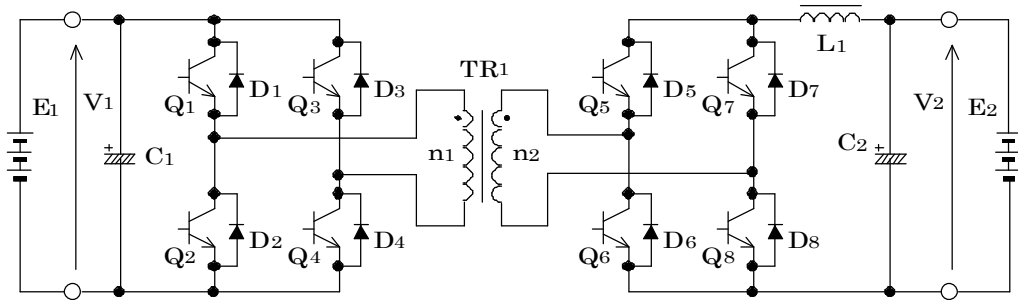


図 2 電圧型+電流型フルブリッジ方式双方向 DC/DC コンバータ

DAB 方式の動作原理

図 3 に DAB 方式の等価回路を示します。図 1 の変圧器 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。リアクトル L は次の式の値になります。

$$L = L_1 + \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 L_2$$

図 3 の等価回路を使って動作原理を考えます。図 4 に各動作モードの電流径路を示します。各動作モードの詳細な動作は次の通りです。

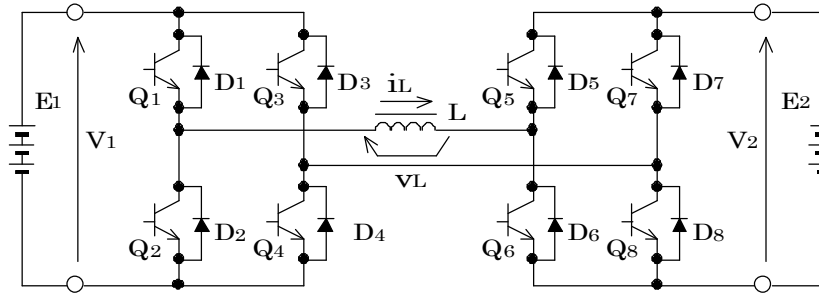


図3 DAB方式双方向DC/DCコンバータの等価回路

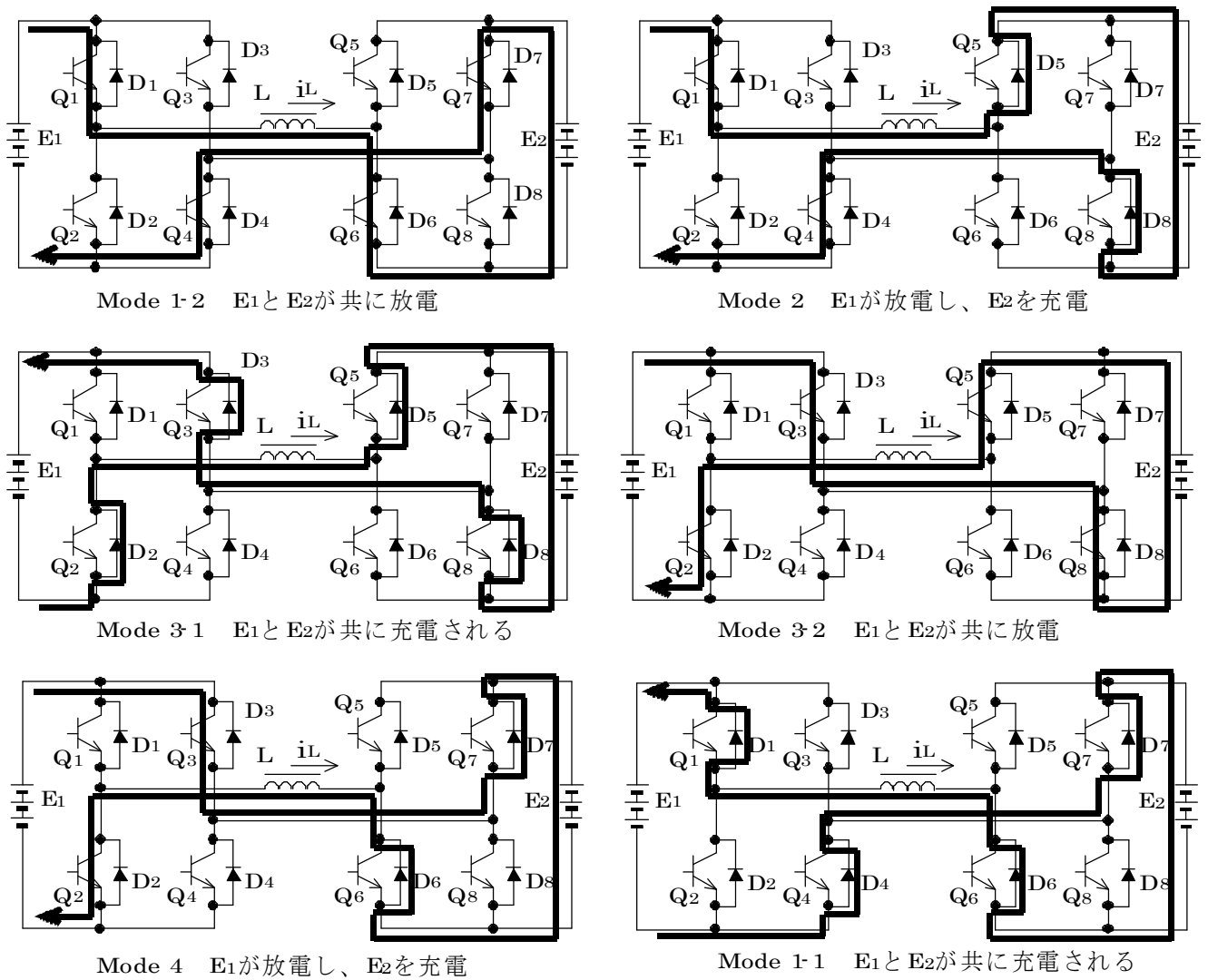


図4 DAB方式の電流経路

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

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 2 (Q₁、Q₄、Q₅、Q₈が ON。電流径路は E₁→Q₁→L→D₅→E₂→D₈→Q₄→E₁)

Q₆、Q₇が OFF した結果 Q₆、Q₇の電流は D₅、D₈に転流する。その結果 E₂は放電から充電に転じる。Q₁、Q₄が OFF 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)

Q₁、Q₄が OFF するが L の電流は同じ方向に流れ続けるので D₂、D₃が導通する。その結果電流は E₁と E₂を共に逆流する。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。

Mode 3-2 (Q₂、Q₃、Q₅、Q₈が ON。電流径路は E₁→Q₃→Q₈→E₂→Q₅→L→Q₂→E₁)

ON しているトランジスタは Mode 3-1 と同じである。L には負方向の電圧が印加されているので L の電流は負の値となり、電流の方向が Mode 3-1 から逆転する。その結果 Mode 3-1 では電流は全てダイオードを流れていたが、Mode 3-2 では全てトランジスタに転流する。i_Lは負方向に急速に増加する。Q₅、Q₈が OFF して次の Mode に移行する。

Mode 4 (Q₂、Q₃、Q₆、Q₇が ON。電流径路は E₁→Q₃→D₇→E₂→D₆→L→Q₂→E₁)

Q₅、Q₈が OFF した結果 Q₅、Q₈の電流は D₆、D₇に転流する。その結果 E₂は放電から充電に転じる。Q₂、Q₃が OFF して次の Mode に移行する。

Mode 1-1 (Q₁、Q₄、Q₆、Q₇が ON。電流径路は E₁→D₄→D₇→E₂→D₆→L→D₁→E₁)

Q₂、Q₃が OFF するが L の電流は同じ方向に流れ続けるので D₁、D₄が導通する。その結果電流は E₁と E₂を共に逆流する。よって、L には E₁ 電圧と E₂ 電圧が加算されて電流とは逆方向に印加され、L の電流は急速に減少する。急速に減少し、0A となって Mode1-2 に移行する。

上記の動作モードから DAB 方式では Q₁～Q₈を適切に制御して E₁と E₂の極性を切り替えて L に印加される電圧を制御していることがわかります。図 5 は E₁と E₂の極性に注目して図 4 を分り易く書き直したものです。図 6 は i_Lの波形に動作モードを記入したものです。図 5、図 6 から i_Lは Mode1 で正方向に増加、Mode3 で負方向に増加、Mode2 と Mode4 で E₁が放電、E₂を充電していることが分かります。

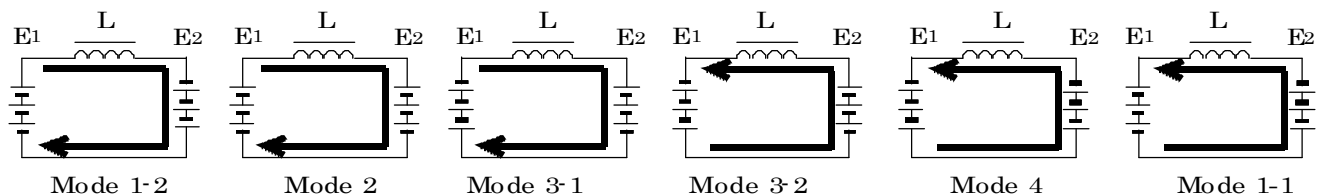


図 5 DAB 方式の原理図

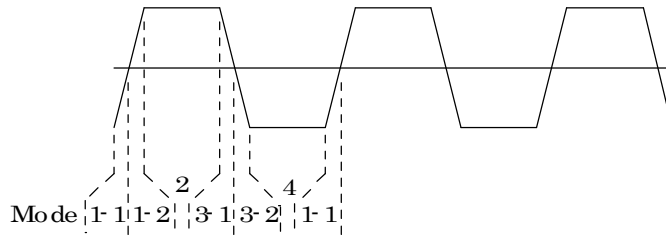


図6 DAB方式のリアクトル電流 i_L の波形と動作モード

図6は E_1 の電圧 V_1 と E_2 の電圧 V_2 が等しい時の波形です。この時は Mode2 と Mode4 では L の電圧 v_L はゼロとなり i_L は変化しません。 $V_1 > V_2$ の時は Mode2 と Mode4 では L には電流を増加させる方向に電圧が印加されます。逆に $V_1 < V_2$ の時は電流を減少させる方向に電圧が印加されます。図7にそれぞれの場合の i_L 波形を示します。

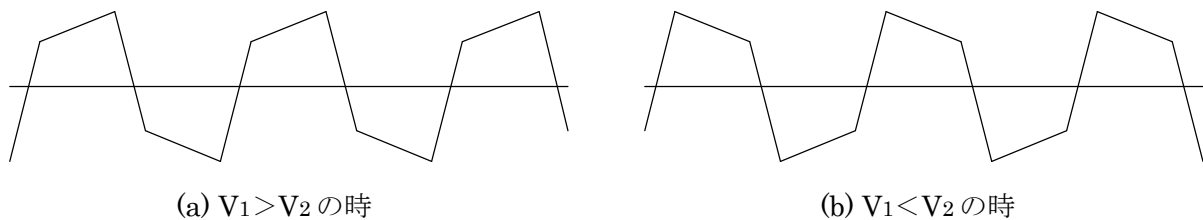


図7 2つの電圧の大小関係による i_L 波形の変化

図4、図5は電力の流れが左から右、即ち E_1 が放電、 E_2 を充電、の時の動作モードを記載しています。電力の流れを逆転させた時の動作モードを図8に示します。図5と比べて Mode1 と Mode3 で L の電流を増加させる方向を逆にしています。

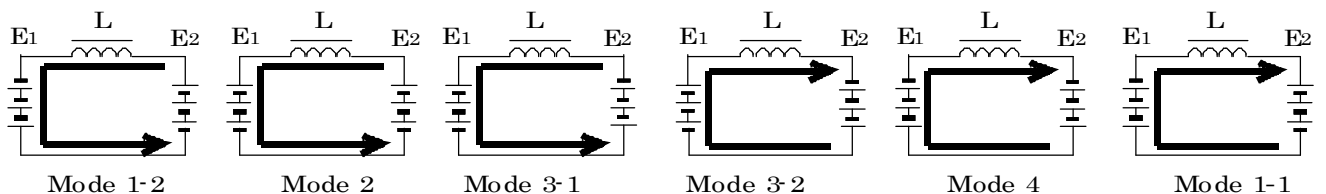


図8 電力の方向を逆転させた時の動作モード (E_2 が放電、 E_1 を充電)

DAB方式の特徴

以上のようにDAB方式は電圧型+電流型とは動作原理が異なるのでその特性も大きく異なります。DAB方式の主な特徴は次の通りです。

(1) 左右の電源電圧の大小関係の自由度が高い

電圧型+電流型では変圧器の変圧比が 1:1 なら電圧型サイドの電源電圧は必ず電流型サイドの電源電圧より大きくする必要がありましたが、DAB方式では図7に示したように双方の電源電圧の大小関係を自由に選べます。

(2) リアクトルの鉄損が大きい

通常の DC/DC コンバータではリアクトル電流 i_L の変動幅 ΔI_L は i_L の最大値の 10~30%程度です。リアクトルの磁束密度 B は i_L に比例するので磁束密度の変動幅 ΔB は飽和磁束密度の 10~30%程度となります。しかし、DAB 方式では図 6 から分かるように大きく正負に変動します。従って ΔB は通常の変圧器と同じく飽和磁束密度の 2 倍近くになります。動作周波数が数 10kHz の通常の DC/DC コンバータでは変圧器は ΔB が大きいので鉄損の少ないフェライトコアを用い、リアクトルは飽和磁束密度の大きい鉄系の鉄心を使いますが、DAB 方式ではリアクトルにもフェライトを使う必要があります。鉄系の鉄心を使うなら動作周波数を充分低くする必要があります。

(3) 電圧型+電流型よりサージ電圧が小さい

電圧型+電流型では電流型で動作する時に変圧器の漏れインダクタンスのためにスイッチ素子に発生するサージ電圧が大きくなる傾向があります^[3]。DAB 方式は図 4 から明かなようにスイッチングの方式が位相シフトフルブリッジ方式の進みレグと同じであり、ターン ON 時は完全な ZVS、ターン OFF 時は ZVS に近いソフトスイッチングが可能です。よって、サージ電圧で苦勞することはないでしょう。

(4) 大容量に向く

左右が共にフルブリッジなので、電圧と電流が大きな用途に向きます。(2)と(3)の特徴を考慮すれば、低い動作周波数で鉄系鉄心のリアクトルでスイッチング速度の遅い大容量素子を使った大電力用の双方向 DC/DC コンバータがこの方式に適しているでしょう。逆に、リアクトルはフェライト鉄心を使うことを前提として(3)の特徴を生かして高周波動作させて大容量だが小型軽量化が必要な用途を目指してもいいでしょう。

参考文献

- [1] 平地克也、「電圧型+電流型双方向 DC/DC コンバータ」、平地研究室技術メモ No.20140104
- [2] 井上重徳、赤木泰文、「次世代 3.3kV/6.6kV 電力変換システムのコア回路としての双方向絶縁形 DC/DC コンバータ」、電気学会論文誌 D、126 巻 3 号、pp.211-217、2006 年
- [3] 吉富大祐、「電流型 DC/DC コンバータのスナバ回路設計方法について」、平地研究室技術メモ No.20110308

以上