

DC/DC コンバータの偏磁現象の基本

(読んでほしい人：パワーレ初心者)

2011/11/1 舞鶴高専 平地克也

DC/DC コンバータの偏磁現象はスイッチ素子の破損を招く恐るべき現象としてパワーレ技術者の間では広く知られている。本技術メモでは偏磁現象の発生原理とその基本的な対策方法を説明する。

フルブリッジ型 DC/DC コンバータの励磁電流

図1にフルブリッジ型 DC/DC コンバータ（以下 FB 型 DD コンと略す）の回路構成を示す。Lm は変圧器 TR1 の励磁インダクタンス、im は励磁電流である。図2にスイッチ素子 Q1 ~ Q4 の ON/OFF のタイムチャートと im の変化を示す。Q1 と Q4 が ON の時は TR1 の 1 次巻線 n1 には電源電圧 Vin が印加され im は増加する。Q1 ~ Q4 全て OFF の時は n1 電圧 vn1 は 0V なので im は変化しない。Q2 と Q4 が ON の時は vn1 = - Vin となり、im は減少して負の値となる。

Q1、Q4 が ON 時の im の増加量 im+ と Q2、Q3 が ON 時の im の減少量 im- は次の式で与えられる。

$$\Delta i_m^+ = \frac{1}{L_m} V_{in} T_1 \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\Delta i_m^- = \frac{1}{L_m} V_{in} T_2 \quad \dots \dots \dots (2)$$

通常動作時は図2のように im+ = im- であり im は 0A を中心値として安定している。

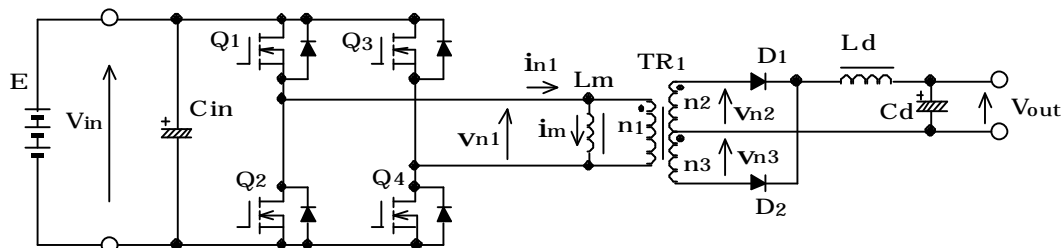


図1 フルブリッジ型 DC/DC コンバータ

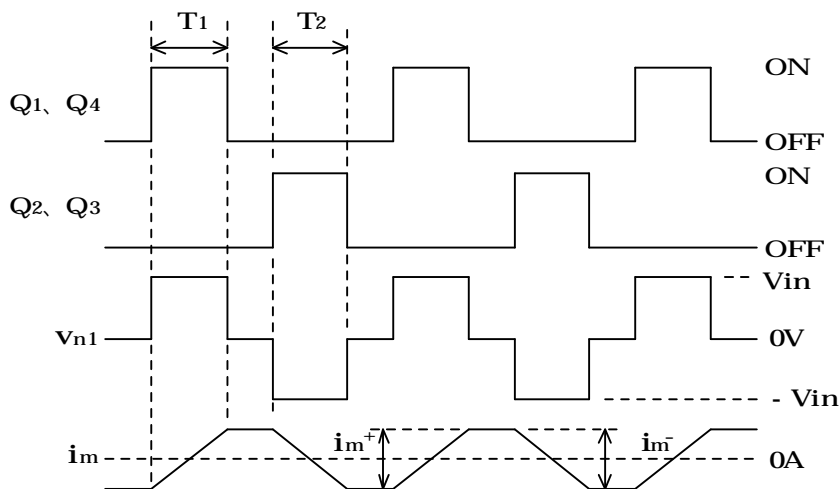


図2 スwitch素子の ON/OFF と励磁電流

偏磁発生時の励磁電流の変化

図3に何らかの原因で $T_1 > T_2$ となった時の波形を示す。 $T_1 > T_2$ なら式(1)、式(2)より $i_{m+} > i_{m-}$ なので i_m は徐々に増加する。これが偏磁現象である。この状態が継続すれば i_m は限りなく増加し、やがて $Q_1 \sim Q_4$ は破損する。偏磁現象は DC/DC コンバータの破損を招く恐るべき現象としてパワーエレクトロニクス技術者の間では広く知られている。

なお、 $T_1 > T_2$ となる原因には $Q_1 \sim Q_4$ のスイッチング速度のバラツキや $Q_1 \sim Q_4$ の駆動回路のバラツキなどが考えられる。このような原因は完全に防ぐことは困難であり、FB 型 DD コンでは何らかの偏磁対策が必要である。

また、図3では変圧器の鉄心の飽和は考慮していないが、実際にはある程度偏磁が進むと鉄心が飽和し、 i_m の増加が急激に加速される。

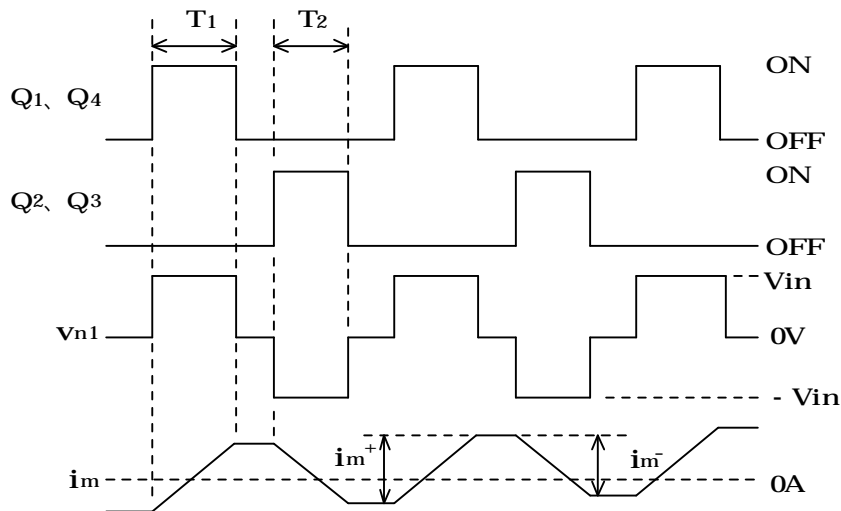


図3 $T_1 > T_2$ で偏磁が発生した時の波形

図4に別の原因で偏磁が発生した場合の波形を示す。図4では $T_1 = T_2$ ではあるが、 n_1 コイル電圧 v_{n1} の負の半サイクルの大きさが正の半サイクルよりだけ小さくなっている。式(1)、式(2)から明かなようにこの場合も $i_{m+} > i_{m-}$ となり偏磁が発生する。このように電圧にアンバランスが発生する原因は $Q_1 \sim Q_4$ の ON 抵抗のバラツキなどが考えられる。

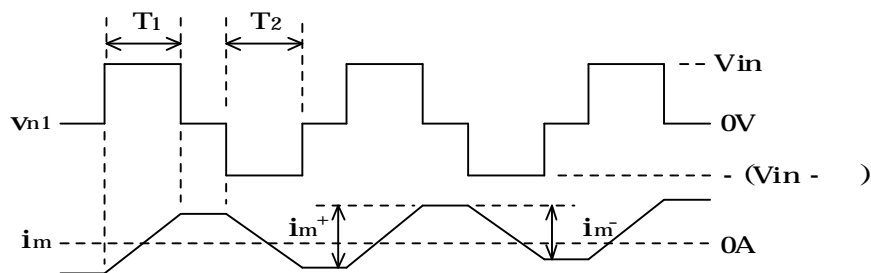


図4 正負の電圧アンバランスで偏磁が発生した時の波形

抵抗挿入による偏磁防止方法

このように FB 型 DD コンでは導通時間 (T_1 、 T_2) と印加電圧 (V_{in} 、 $-V_{in}$) のアンバランスにより偏磁が発生する。このようなアンバランスを完全に避けることは困難であり、偏磁対策が必要である。図5に抵抗挿入による偏磁対策を示す。 n_1 巻線と直列に抵抗 R_1 を挿入している。この場合、

次の式に示すように v_{n1} は R_1 がない時の電圧 v_1 から R_1 の電圧 v_{R1} を減じたものとなる。

$$v_{n1} = v_1 - v_{R1} \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$v_{R1} = R_1 \times i_{n1} \quad \dots \dots \dots (4)$$

図3や図4の場合では i_m は正の方向に増大するので n_1 コイル電流 i_{n1} の大きさは負方向より正方向が大となる。その結果 v_{R1} の大きさも負方向より正方向が大となる。したがって(3)式により v_{n1} は負方向より正方向がより大きく減少し、偏磁が抑制される。以上を整理すると次のようになる。

i_m が正方向に増加 v_{R1} が正方向に増加 正方向の v_{n1} が減少 正方向の i_m 減少
その結果、 i_m の正方向への増加は停止し、平衡状態が保たれる。

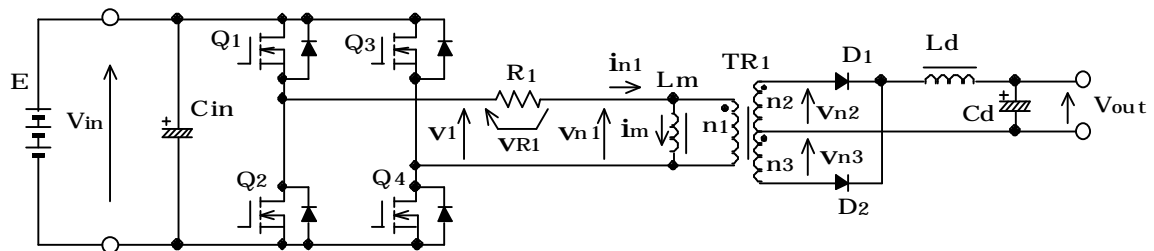


図5 抵抗挿入による偏磁対策

抵抗挿入による偏磁対策は次節で説明するように実際の製品に用いられることは少ないが、 n_1 巻線自身の抵抗成分が上記のメカニズムで偏磁の抑制に効果を発揮している。しかし n_1 巻線の抵抗成分は通常は大変小さいので、多くの場合これだけでは偏磁抑制の効果は不十分である。

実用的な偏磁防止方法

このように、抵抗の挿入により偏磁現象による回路の破損を防ぐことができる。しかしながら、この方法では挿入した抵抗に大きな電流が流れるので抵抗の電力損失が無視できず、実際の製品ではあまり用いられない。そこで図6に示すコンデンサの挿入により偏磁を抑制する方法がよく用いられる。図3、図4のように i_{n1} に正方向の直流成分が生じると v_{C1} にも正方向の直流成分が発生する。その結果正方向の v_{n1} が減少し、偏磁の進行が停止される。

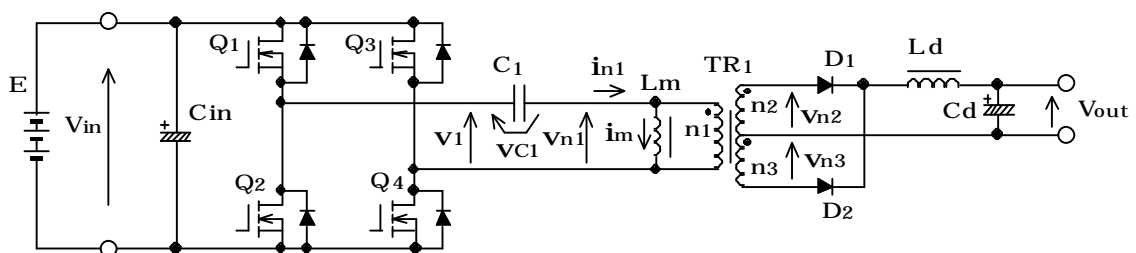


図6 コンデンサによる偏磁防止対策

図7に偏磁抑制のための特別な制御回路を用いる場合を示す。シャント抵抗 SH_1 で i_{n1} を検出し、その直流成分を抽出する。直流成分を抑制するように $Q_1 \sim Q_4$ のパルス幅を微調整する。

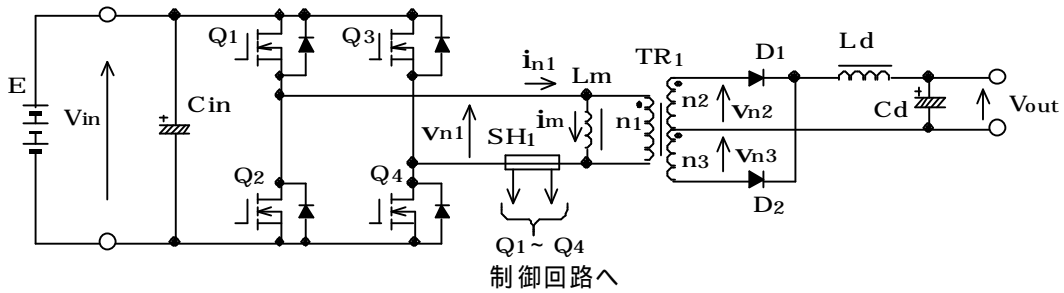


図7 Q1～Q4の制御による偏磁の抑制

その他の回路方式の偏磁現象

プッシュプル型DC/DCコンバータ(図8)もフルブリッジ型と同じメカニズムで偏磁が発生する。Q1とQ2のスイッチング速度の差やON抵抗の差が偏磁の原因となる。プッシュプル型では1次巻線が n_1 と n_2 の2つ存在するので、フルブリッジ型のように1次巻線と直列にコンデンサを挿入する対策は実現できない。図8のように電力損失の発生は覚悟の上で抵抗 R_1 を挿入して対策する場合が多い。

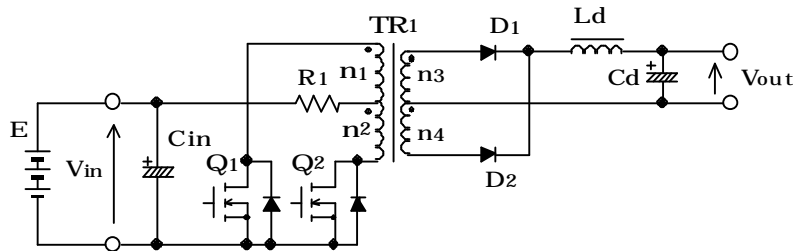


図8 プッシュプル型DC/DCコンバータ

ハーフブリッジ形DC/DCコンバータ(図9)ではプッシュプル型やフルブリッジ型より偏磁は発生しにくい。Q1のON時間がQ2のON時間より長い場合は i_{n1} が正の方向に偏磁が発生するが、この場合は C_1 の電圧 v_{C1} が減少し、 C_2 の電圧 v_{C2} が増加する。その結果正方向の v_{n1} が減少し、偏磁は抑制される。フルブリッジ型の偏磁防止用コンデンサ C_1 と同じ役割をハーフブリッジ型の C_1 と C_2 が果たしていると言える。

なお、偏磁現象はフルブリッジ型やプッシュプル型のように変圧器を正負両方向に励磁する方式のDC/DCコンバータに特有のものであり、フォワード型やフライバック型では発生しない。

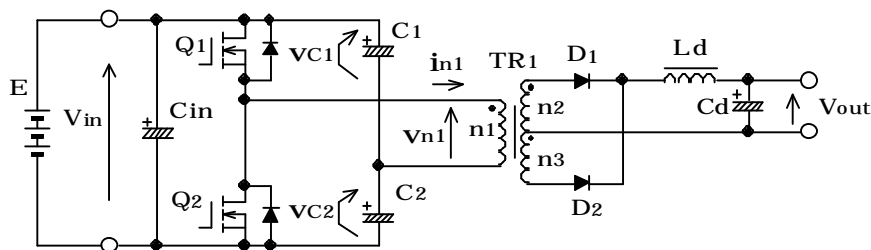


図9 ハーフブリッジ型DC/DCコンバータ

以上