平地研究室技術メモ No.20210422

並列共振型 DC/DC コンバータ

（読んでほしい人：パワエレ技術者）

2021/4/22 舞鶴高専名誉教授 平地克也

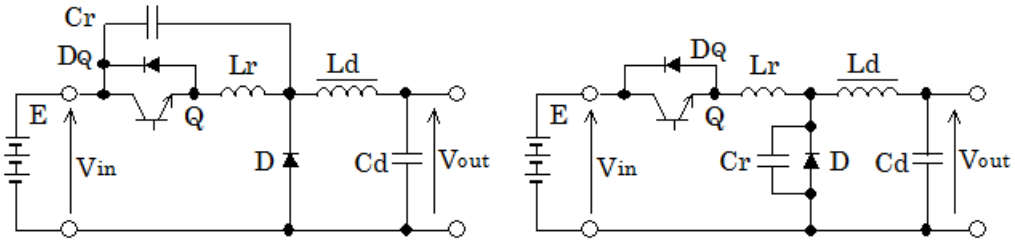
【あらまし】 並列共振型 DC/DC コンバータは、電流共振型の絶縁型 DC/DC コンバータです。スイッチング損失と高周波ノイズの抑制を期待して 1980 年代から 90 年代に広く研究され、実用化されました。しかし欠点も多く、近年はあまり使われません。この方式の欠点を克服するために開発された回路方式が直列共振型であり、それをさらに改良した回路方式が近年広く使用されるようになった LLC コンバータです。新しい DC/DC コンバータの研究のためには 1980 年代、90 年代の古い研究成果も学習する必要があります。

■並列共振型 DC/DC コンバータの回路構成

平地研究室技術メモでは次のように共振型のチョッパ回路を説明してきました。

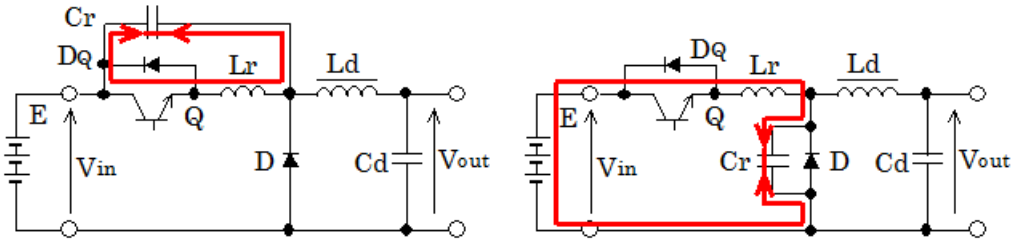
No.20191021：電流共振型昇圧チョッパ回路
No.20200317：電流共振型降圧チョッパ回路
No.20191001：電圧共振型昇圧チョッパ回路
No.20200115：電圧共振型降圧チョッパ回路

一般に、絶縁形 DC/DC コンバータはチョッパ回路に何らかの方法で変圧器を挿入した回路と考えられます[1]。本技術メモでは電流共振型降圧チョッパ回路に変圧器を挿入して絶縁形とした DC/DC コンバータを説明します。図１(a)に平地研究室技術メモ No.20200317 で説明した電流共振型降圧チョッパ回路を示します。このチョッパ回路から Cr の位置を変更し、フライホイールダイオード D と並列に Cr を設けた回路を図(b)に示します。(a)と(b)は Cr の位置が異なるので共振電流の径路は相違しますが、動作原理は同じです。(a)(b)それぞれの共振電流の径路を図２に示します。



(a) タイプ１　　(b) タイプ２

図１　全波電流共振型降圧チョッパ



(a) タイプ１　　(b) タイプ２

図２　全波電流共振型降圧チョッパの共振電流の径路（赤色の線）

図１(b)の回路に変圧器を挿入して構成された絶縁形の DC/DC コンバータを図３に示します。図１(b)のスイッチ素子 Q を Q_1～Q_4 のインバータに置き換えています。図３において Q_1 と Q_4 がオンすれば図１(b)で Q がオンした時と同様に、Lr と Cr が共振すると同時に出力側に電力が伝達されます。また、図３において Q_2 と Q_3 がオンしても Lr を Cr が共振すると同時に出力側に電力が伝達されます。ただし、Q_1 と Q_4 がオンした時は Cr は正方向に充電されますが、Q_2 と Q_3 がオンした時は Cr は負方向に充電されます。したがって、図３では v_{Cr} が交流になるので、Cr と並列に変圧器 TR を挿入することができ、さらに変圧器の出力を D_5,D_6 で整流しています。この回路では、変圧器を介して負荷と並列に共振コンデンサ Cr が接続されているので、一般に「並列共振型」と呼ばれています。スイッチング損失と高周波ノイズを抑制できる絶縁形 DC/DC コンバータの回路方式として注目され、1980 年代から 90 年代に広く研究され、実用化されました（文献[2]～[5]）。

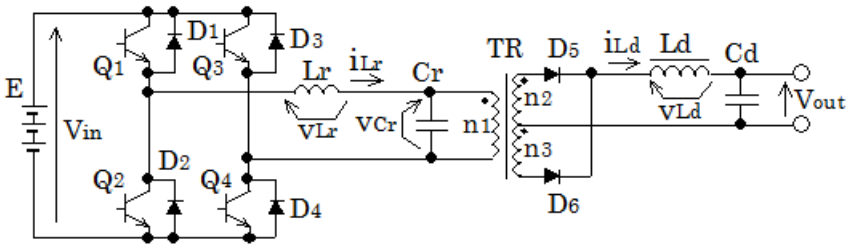


図３　変圧器を有する全波電流共振型降圧チョッパ
（並列共振型フルブリッジ方式 DC/DC コンバータ）

■並列共振型 DC/DC コンバータの動作モードと電流経路

電流共振型降圧チョッパの動作モードと電流経路は平地研究室技術メモ No. 20200317 で詳しく説明されていますが、並列共振型は電流共振型降圧チョッパに変圧器を挿入したものなので、動作原理は同じであり、動作モードも同じです。Cr の位置変更と変圧器挿入のために電流経路は異なります。図４に動作モードと電流経路を示し、以下に各動作モードの概要を説明します。

＜モード 1＞

Q_1～Q_4 はすべてオフしている。平滑リアクトル Ld に蓄積されたエネルギーで負荷に電力供給されている。整流ダイオード D_5 と D_6 はともに導通しており、変圧器の電圧は 0V なので、v_{Cr}＝0V である。このモードの長さは自由に制御することができ、1 周期に対するこのモードの割合で出力電圧が決まる。このモードから Q_1 と Q_4 がターンオンして次のモードに移行する。Q_1,Q_4 には Lr が直列に接続されているので Q_1,Q_4 のターンオンは ZCS である。

＜モード 2＞

Q_1 と Q_4 がオンしたので Lr に電源電圧 Vin が印加される。v_{Lr}＝Vin であり、i_{Lr} は直線的に増加する。i_{Ld} はあまり変化しないので、i_{Lr} の増加に対応して i_{D5} が増加し、i_{D6} は減少する。次の式が成立する。

$i_{D5}+i_{D6}=i_{Ld}$

$i_{Lr}=(i_{D5}-i_{D6})\times(n_2/n_1)$

i_{D5} が増加して $i_{D5}=i_{Ld}$ となり、次の動作モードに移行する。

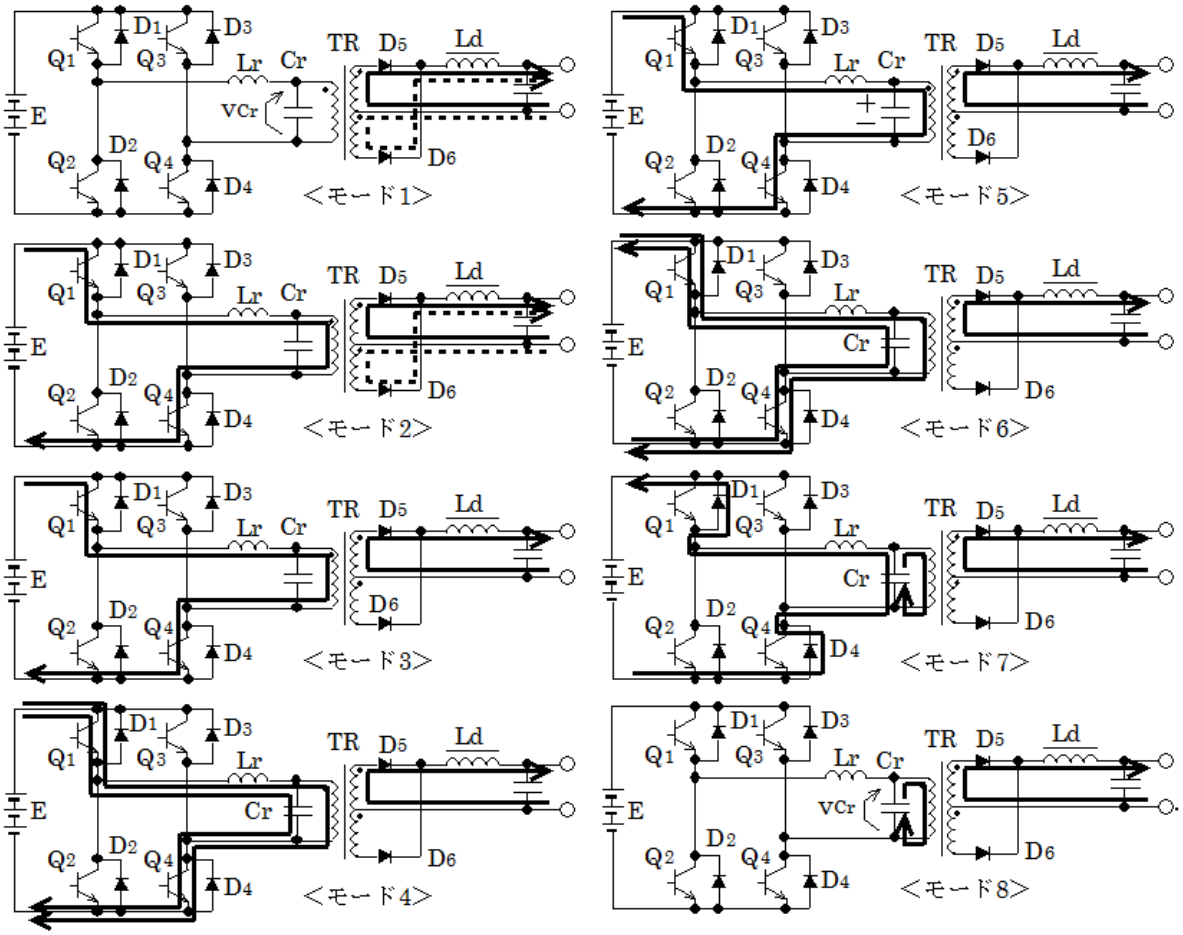


図４　並列共振型 DC/DC コンバータの動作モードと電流経路

＜モード 3＞

$i_{Lr}=i_{D5}\times(n_2/n_1)$で、$i_{D6}=0$ である。この動作モードは一瞬で終わり、すぐに次の動作モードに移行する。

＜モード 4＞

E→Q_1→Lr→Cr→Q_4→E の径路で共振が始まる。Q_1 と Q_4 には Ld 電流の 1 次側換算値と Lr と Cr の共振電流の双方が流れる。共振の半サイクルが経過すると共振電流は 0A となり、次のモードに移行する。

＜モード 5＞

共振の半サイクルが終了した瞬間の動作モードである。この時共振電流はゼロ、Cr は図示の極性にピーク値に充電されており、$v_{Cr}=2Vin$ となる。このモードは一瞬で終了し、逆方向の共振電流が流れ始めて次の動作モードに移行する。

＜モード 6＞

Cr の電圧（2Vin）と電源電圧 Vin の差が v_{Lr} に印加されて逆方向の共振が開始される。i_{Lr} は共振電

流と i_{Ld} の 1 次側換算値の合計なので、i_{Lr} は減少する。共振電流 i_{Cr} の大きさが i_{Ld} を越えると i_{Lr} は負となり、次の動作モードに移行する。

＜モード 7＞
負方向の共振電流が Ld 電流の 1 次側換算値を超えたので、共振電流は Lr を逆流し、D_1 と D_4 が導通して電源に回生される。この状態で Q_1 と Q_4 が ZVS かつ ZCS でターンオフする。やがて負方向の共振電流は減少に転じ、Ld 電流の 1 次側換算値と等しくなって i_{Lr}＝0 となり、モード 8 に移行する。

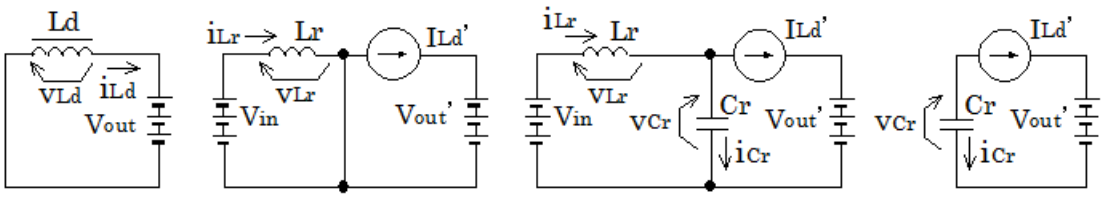
＜モード 8＞
Cr の電荷が Ld の電流で引き抜かれる動作モードである。Cr の放電電流は Ld 電流の 1 次側換算値に等しい。放電が完了して v_{Cr}＝0V となってモード 1 に戻る。その後、Q_2 と Q_3 がオンして負の半サイクルが始まり、モード 2～8 が繰り返される。ただし、負の半サイクルなので、1 次側の電流の方向は逆になり、2 次側では D_6 が導通する。

■各動作モードの等価回路

図４に示した各動作モードの電流経路から、各動作モードの等価回路は図５のように考えられます。平滑コンデンサ Cd と負荷は定電圧源 Vout とみなし、さらにモード 2～8 では 1 次側に換算して Vout ’としています。リアクトル Ld はモード 2～8 では定電流源 I_{Ld} とみなし、さらに 1 次側に換算して I_{Ld} ’としています。

モード 1 は通常の降圧チョッパのフライホイールダイオードが導通している動作モードと同じであり、平滑リアクトル Ld のエネルギーが出力（Vout）に伝達されています。Ld には Vout が負方向に印加されてその電流 i_{Ld} は直線的に減少します。モード 2 では入力電圧 Vin が共振リアクトル Lr に正方向に印加されてその電流 i_{Lr} は直線的に増加します。モード 3～7 は Lr と Cr の共振モードです。Lr には共振電流 i_{Cr} に Ld 電流の 1 次側換算値 I_{Ld} ’が加算されて流れます。モード 8 は Cr の電荷が I_{Ld} ’で引き抜かれるモードであり、Cr 電圧 v_{Cr} は直線的に減少します。

これらの等価回路を用いて各動作モードに成立する式を導出することができ、この回路方式のソフトスイッチング成立範囲や出力電圧計算式を導出することができます。（後日実施して報告します）



(a) モード 1　(b) モード 2　(c) モード 3～7　(d) モード 8

（I_{Ld} ’と V_{out} ’はそれぞれ I_{Ld} と V_{out} の 1 次側換算値）

図５　並列共振型 DC/DC コンバータの等価回路

■並列共振型 DC/DC コンバータの長所・短所と歴史的価値

＜スイッチング損失＞

前記のように、スイッチ素子はモード 1 終了時に ZCS でターンオンするが、ZVS ではないので、スイッチ素子の寄生容量の電荷は短絡されてスイッチ素子のオン抵抗で消費されてスイッチング損失となります。モード 7 で ZVS かつ ZCS でターンオフするのでターンオフ時にはスイッチング損失は発生しません。しかし、共振終了時にスイッチ素子の寄生容量が急速に充電されるので、寄生容量とリアクトル Lr との共振が発生してサージ電圧が大きくなる可能性があります。

＜導通損失＞

スイッチ素子ターンオフ時のソフトスイッチング実現のために、大きな共振電流を流してモード 7 でスイッチ素子の並列ダイオードを導通させる必要があります。したがって、スイッチ素子には負荷電流に大きな共振電流が加算されて流れ、導通損失が増加します。共振電流の大きさは負荷電流とは無関係なので、特に軽負荷時は共振電流の割合が大きく、効率が悪化します。

＜制御特性＞

スイッチ素子のオフ時間を制御することによりモード 1 の長さを変化させて出力電圧を制御します。オン時間は Lr と Cr の共振周期でほぼ決まるので、制御できません。したがって、出力電圧を下げる場合はオフ時間を長くする結果、動作周波数が低下します。出力電流の大きさは出力電圧に影響しません。定電圧制御を行う場合は入力電圧の変動にのみ対応すればいいので、動作周波数の変動範囲はあまり大きくなりません。

上記の特性のうち、軽負荷時の効率低下が最大の欠点であり、負荷変動を伴う用途には使いにくい回路方式と言えます。この欠点を克服している回路方式が「直列共振型」であり、さらに直列共振型を改良した回路方式が LLC コンバータです。LLC コンバータの研究のためには 1980 年代、90 年代の共振型回路方式の研究成果を学習する必要があります。

■参考文献

[1] 平地克也、「DC/DC コンバータとは」、平地研究室技術メモ No.20110516

[2] Juichi Tanaka, Itsuo Yuzurihara and Takashi Watanabe, “Analysis of a Full-Bridge Parallel Resonant Converter”, Proc. of INTELEC’91, pp.302-307

[3] 伊藤泰一、伊藤悦郎。赤井弘道、「共振形スイッチング電源ユニットの開発」、GS News、第 51 巻 2 号、pp.33-40 、1992 年 12 月

[4] 伊藤泰一、伊藤悦郎。「共振形コンバータの通信用電源への応用」、パワーエレクトロニクス研究会論文誌、19 巻、pp.77-84, (1993)

[5] 星川静夫、末吉誠、久保田善一、「3 相入力高力率整流器ユニット(48V100A)」、京三サーキュラー、Vol.47, No.6, (1996)

以上