

電流共振型 DC/DC コンバータの昔の常識と最近の動向

(読んでほしい人：パワエレ初心者)

2015/11/16 舞鶴高専 平地克也

電流共振型 DC/DC コンバータには「ZCS で動作するのでスイッチング損失なし」「共振の途中でスイッチ素子をターンオフさせてはいけない」というような常識があったと思います。しかし近年はこのような常識に反する現象や使われ方が増えてきました。電流共振型 DC/DC コンバータの最近の動向を説明します。

電流共振型 DC/DC コンバータの昔からの常識

図 1 に電流共振型 DC/DC コンバータのスイッチ素子の電圧電流波形を示しています。スイッチ素子の周辺に設けた L と C の共振現象を利用して電流を正弦波状の波形とします。電流がゼロの状態ですwitchingするので ZCS (ゼロ電流スイッチング) が成立しており、スイッチング損失は発生しません。共振の途中でスイッチ素子を ON/OFF させることはできないので負荷の変動に対しては図 1 に示すようにスイッチ素子の OFF 期間 T_{OFF} を変化させることにより出力電圧の制御を実現します。その結果動作周波数は変化します。

以上の説明が電流共振形 DC/DC コンバータの昔からの常識であったと思います。

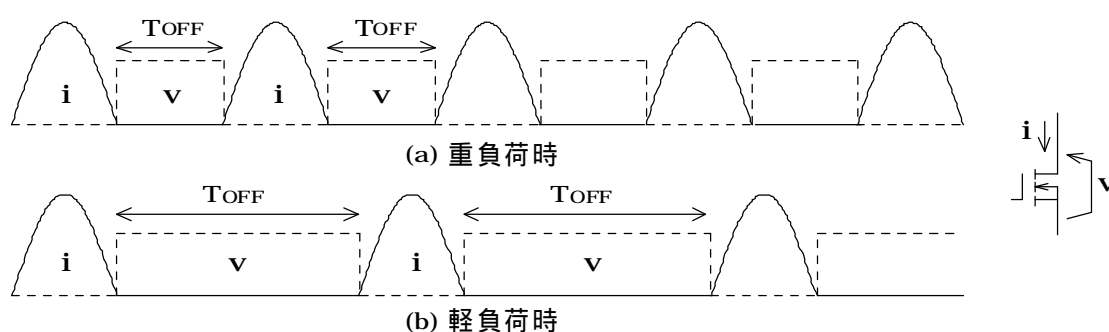


図 1 電流共振型 DC/DC コンバータのスイッチ素子の電圧電流波形

電流共振型 DC/DC コンバータのスイッチング損失

図 2 に電流共振形 DC/DC コンバータの例を示します。ハーフブリッジの回路構成で C_r と L_r が共振します。C_{Q1} と C_{Q2} は Q₁ と Q₂ の寄生容量です。この回路のシミュレーション波形を図 3 に示します。C_r と L_r の共振の結果 Q₁ 電流が正弦波状に変化しており、ZCS が成立していることが分かります。しかし、Q₁ がターンオンした瞬間に一瞬の間大きなサージ電流が流れています。これは Q₁ のターンオンに伴って発生した C_{Q1} の放電電流です。寄生容量の放電電流なのでオシロスコープで実測することはできませんがシミュレーションではこのようにはっきりと現れます。寄生容量を 1nF とするとこの放電に伴う電力損失は次のように計算できます。なお、動作周波数 f は 20kHz としています。

$$\text{電力損失} = \frac{1}{2} CV^2 \times f = \frac{1}{2} \times 1\text{nF} \times (300\text{V})^2 \times 20\text{kHz} = 0.9\text{W}$$

Q₂ も同じ損失が発生するので合計 1.8W です。これがこの回路のスイッチング損失となりますが、1.8W 程度なら出力電力 1220W と比べて充分小さく無視してもいいでしょう。しかし、動作周波数が 20kHz ではなく 200kHz ならスイッチング損失は 18W となり無視できません。

このように、電流共振型 DC/DC コンバータは高い周波数(数 100kHz 以上)で動作させるとスイッチング損失が大きくなるので、「電流共振型 DC/DC コンバータは ZCS で動作するのでスイッチング損失なし」という昔からの常識は通用しません。近年、電流共振型的一种である LLC コンバータが広く使われるようになりましたが、LLC コンバータは電流共振型ではあるものの ZCS ではなく、ZVS で動作しています。詳細は平地研究室技術メモ No.20140529、「LLC 方式 DC/DC コンバータの回路構成と動作原理」を見て下さい。そのため LLC 方式は数 100kHz でも使用できます。

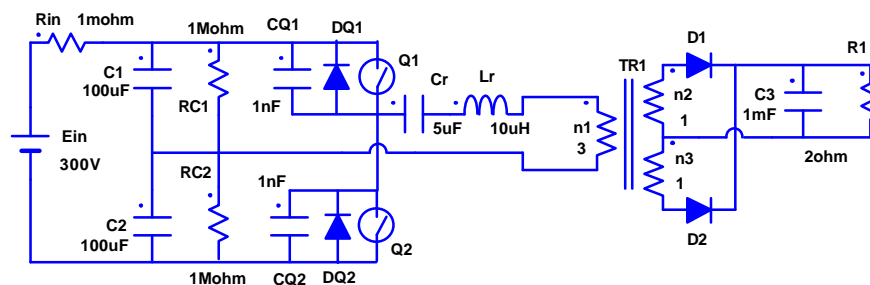
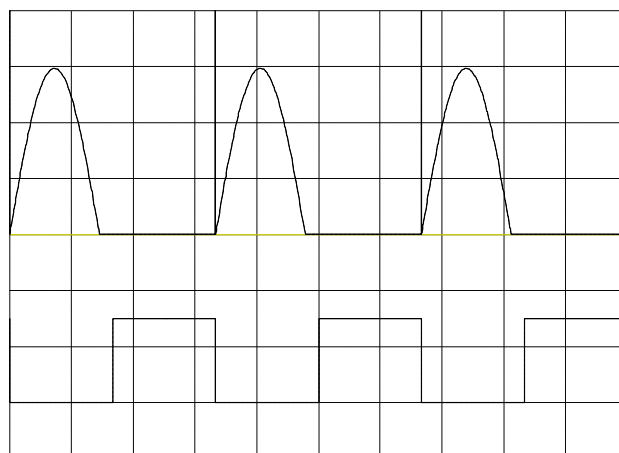


図 2 電流共振型 DC/DC コンバータの例



Q₁ 電流 5A/div

Q₁ 電圧 200V/div

図 3

Q₁ の電圧電流波形
 入力電圧 300V
 出力電圧 49.4V
 出力電流 24.7A
 出力電力 1220W
 動作周波数 20kHz

共振の途中でターンオフしても良い?

電流共振型 DC/DC コンバータは共振の途中でスイッチ素子をターンオフさせると ZCS が成立しなくなるので共振が終了してからターンオフさせねばならない、とされています。しかし、この昔からの常識も最近では通用しません。図 4 に LLC 方式 DC/DC コンバータの回路図を示します。この回路を 90kHz で動作させた時のスイッチ素子の電圧電流波形を図 5 に示します。Q₁ 電流がいきなり 0A になっており、共振の途中で無理矢理 Q₁ をターンオフさせていることが分かります。当然 ZCS は成立していませんが、Q₁ ターンオフ後 Q₁ 電圧波形は緩やかに立ち上がっており、ZVS が成立しています。これは Q₁ の寄生容量 C_{Q1} がスナバコンデンサの役割を果たして部分共振が成立しているためです。

参考に図4の回路の出力電圧 / 周波数特性を図6に示します。Cr と Lr の共振周波数 f_r は 80kHz であり、図5の動作周波数 90kHz は f_r を越えています。LLC 方式では通常は f_r より低い周波数で動作させますが、図5のように f_r より高い周波数で動作させることも条件によっては可能です。

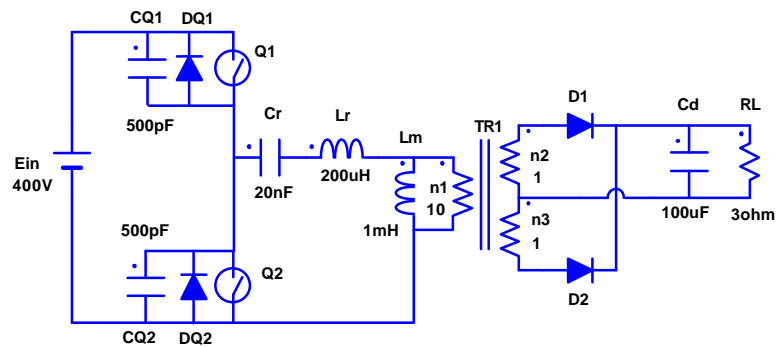
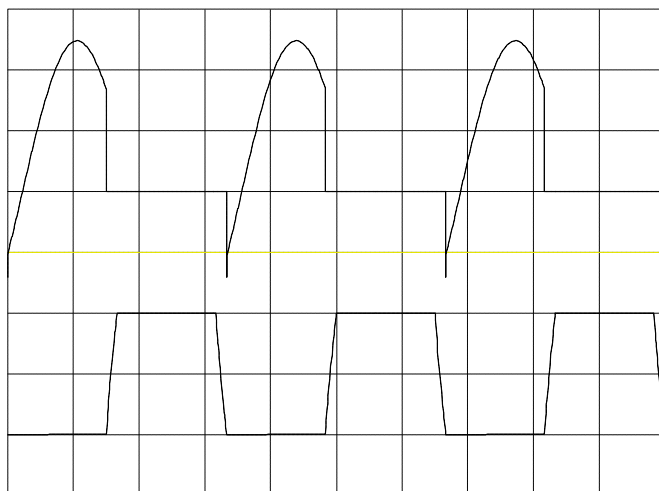


図4 LLC方式DC/DCコンバータ(平地研究室技術メモ No.20140529の図7と同じ)



Q1 電流 0.5A/div

Q1 電圧 200V/div

図5

Q1の電圧電流波形

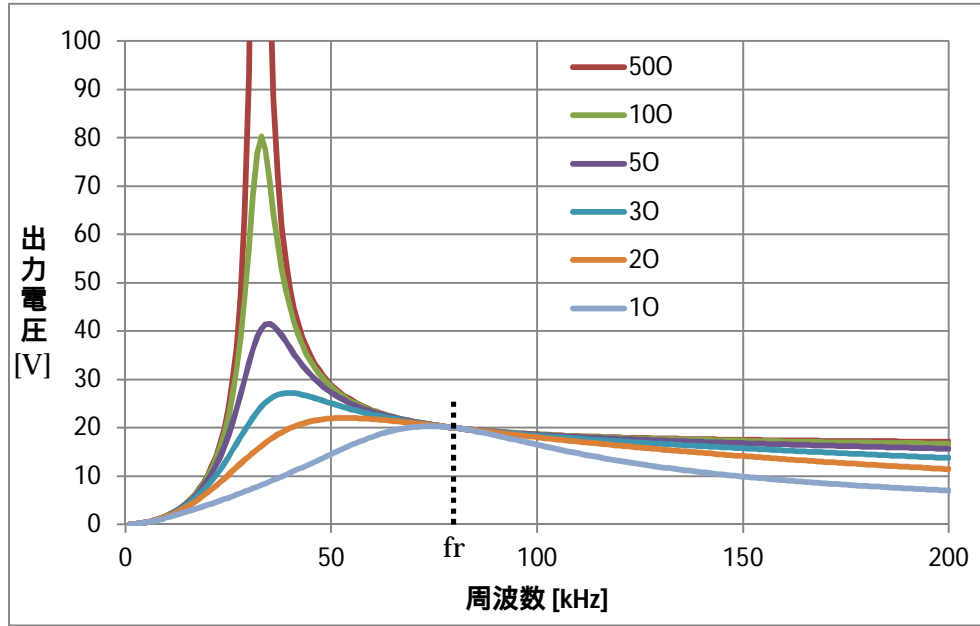
入力 400V

出力電圧 19.5V

出力電流 6.51A

出力電力 127W

動作周波数 90kHz



(RLを50 から1 まで6段階に変化させている)
 図6 LLCコンバータ(図4)の出力電圧の周波数特性
 (平地研究室技術メモ No.20140529の図9と同じ)

以上