

プッシュプル方式 DC/DC コンバータの励磁電流による出力電圧異常について

(読んでほしい人：パワエレ技術者)

2011/6/29 舞鶴高専 平地克也

はじめに

平地研究室技術メモ No.20110228⁽¹⁾ではプッシュプル方式 DC/DC コンバータ(図1)の基本動作と励磁電流の振る舞いについて説明しました。励磁電流は普通は変圧器の1次巻線を通りますが、プッシュプル方式 DC/DC コンバータでは2つのスイッチ素子(Q₁、Q₂)が共に OFF している時は変圧器の2次側を循環して流れることを示しました。今回の技術メモでは励磁電流の影響で軽負荷時に出力電圧が跳ね上がる現象が発生することを説明します。軽負荷時に平滑リアクトルの電流が不連続となって出力電圧が跳ね上がる現象が発生することは良く知られています。しかし、励磁電流の影響で同様の現象が発生することはあまり知られていません。本技術メモではこの現象の実測データと発生原理を説明します。

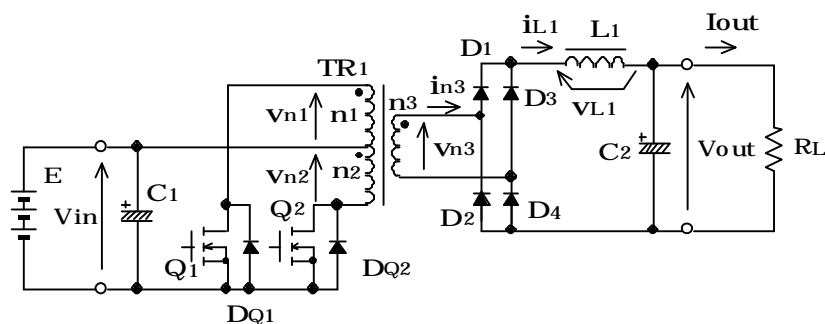


図1 プッシュプル方式 DC/DC コンバータ

プッシュプル方式 DC/DC コンバータの出力電圧特性

図2にプッシュプル方式 DC/DC コンバータ(以下 PP 方式 DD コンと略す)の出力電圧特性を示します。出力電流 I_{out} と通流率 を変化させて出力電圧 V_{out} を測定しています。

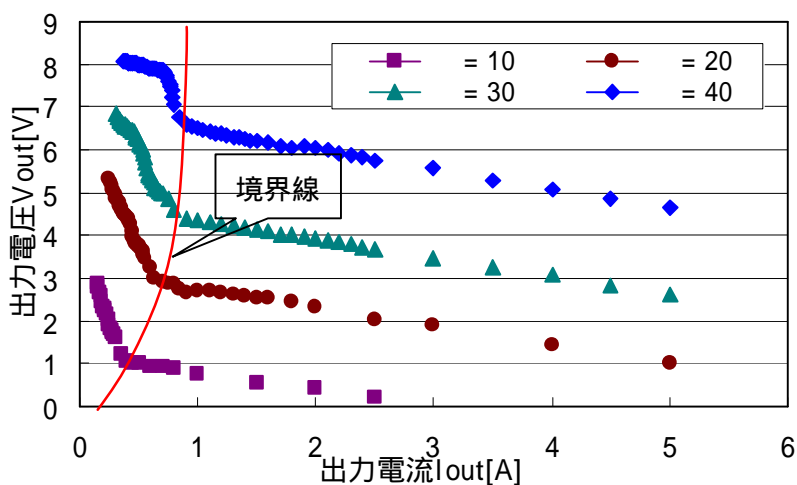


図2 プッシュプル方式 DC/DC コンバータの出力電圧特性

図2から境界線の左右で動作モードが変化していることが分かります。境界線の右側で V_{out} が緩やかに低下しているのは FET の ON 抵抗や巻線抵抗による電圧降下の影響です。境界線の左側で V_{out} が急上昇しているのは平滑リアクトルの電流不連続モードが原因のように見えますが、実際には図2の試験中は平滑リアクトル L_1 の電流は連続モードを維持していました。また、平滑リアクトルの電流不連続モードでは出力電流が減少するに従って出力電圧は限りなく上昇しますが、図2では通流率が 40% の時は上昇が頭打ちになる傾向が見られます。なお、使用した試作機の仕様は次の通りです。

定格入力電圧	24V
定格出力	5V5A
動作周波数	20kHz
最大通流率	45%
変圧器の巻き数比	$n_1 : n_2 : n_3 = 8 : 8 : 3$

PP 方式 DD コンの励磁電流の経路

図3にPP方式DDコンの電流経路を示します。左が負荷電流、右が励磁電流です。Mode 1 (Q_1 が ON) では負荷電流と励磁電流は Q_1 と n_1 コイルを通過して同じ経路を流れます。Mode 2 (Q_1 、 Q_2 共に OFF) では励磁電流は次の2つの経路で2次側を環流します。

n_3 D1 D3 n_3
 n_3 D2 D4 n_3

なお、Mode3 (Q_2 が ON) なども含めた詳細の説明は文献(1)を参照下さい。

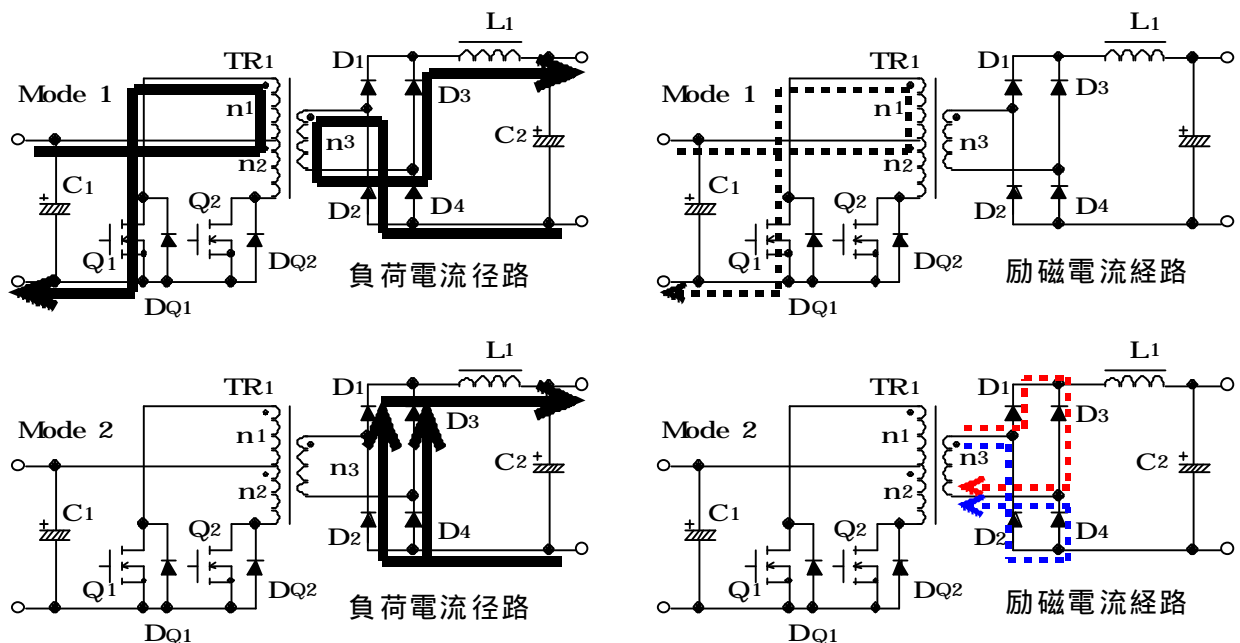


図3 PP方式DDコンの電流経路 (左: 負荷電流、右: 励磁電流)

軽負荷時の動作

図3から、Mode 2ではD2とD3はダイオードの逆方向に励磁電流が流れることとなりますが、この時はD2、D3には負荷電流が順方向に流れており、励磁電流と負荷電流の合計の電流は当然順方向に流れています。則ち、「ダイオード電流 = 負荷電流 - 励磁電流 > 0A」。しかしながら、軽負荷時、負荷電流が励磁電流よりも小さい場合はダイオード電流はマイナスになってしまいます。ダイオードはマイナス電流(逆方向の電流)は流せないため、負荷電流を上回る励磁電流はどこか別の場所を流れる必要があります。励磁電流の法則「励磁電流は最も流れやすい巻線を通る⁽²⁾」に従えば図4に示すように、「n1巻線 C_{Q1} C_{Q2} n2巻線」を流れることとなります。なお、C_{Q1}はQ₁の寄生容量、またはスナバコンデンサ、C_{Q2}はQ₂の寄生容量、またはスナバコンデンサです。その結果、C_{Q1}は充電され、C_{Q2}は放電するので変圧器TR1の電圧v_{n1}とv_{n2}は上昇することとなります。

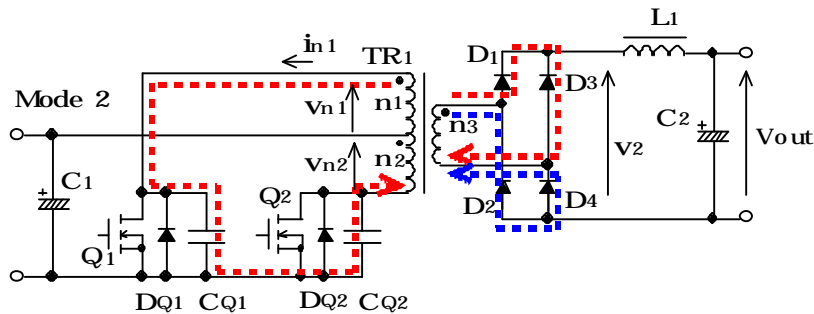
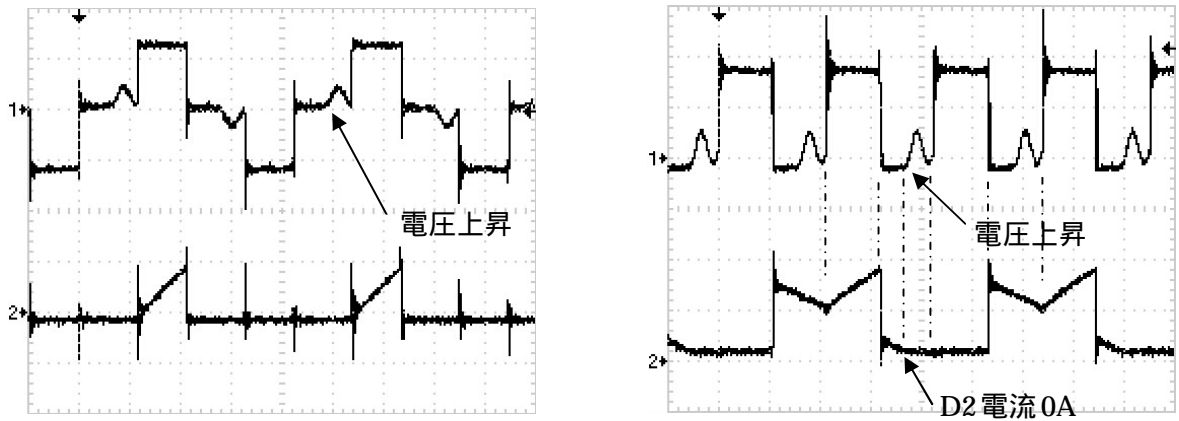


図4 軽負荷時の励磁電流の径路

図5に軽負荷時の各部の電圧、電流波形を示します。図5(a)は変圧器の電圧v_{n1}です。Mode 2(図5で と表示)の途中で電圧の上昇が見られます。これはC_{Q1}が充電、C_{Q2}が放電された結果と考えられます。上昇はすぐに終わり、その後低下しますが、これは励磁電流が減少してC_{Q1}、C_{Q2}の充放電が完了し、逆にC_{Q1}の放電、C_{Q2}の充電が始まったためと考えられます。図5(b)に2次側整流電圧v₂とD₂電流の波形を示します。Mode 2(と表示)の途中でv₂の上昇が見られます。これはv_{n1}のMode 2の電圧上昇に対応するものです。v₂電圧の平均値が出力電圧V_{out}なのでV_{out}は正



上：電圧 v_{n1} 下：電流 i_{n1}

50V/div 0.5A/div

(a) 1次側電圧電流波形

上：2次側整流電圧 v₂ 下：D₂電流

5V/div 0.5A/div

(b) 2次側電圧電流波形

図5 軽負荷時の波形(通流率 = 25%、出力電流 I_{out} = 0.5A)(25μsec/div)

規の値より上昇することになります。 v_2 の電圧上昇は D_2 電流が 0A になると同時に始まっています。この時点で「負荷電流 > 励磁電流」が成立しなくなったものと考えられます。なお、Mode 2 と Mode 4 における D_2 電流の減少は L_1 電流のリプル成分によるものです。

励磁電流が負荷電流よりかなり大きい時の動作

負荷電流がかなり小さく、励磁電流が負荷電流よりもかなり大きい場合は前記の C_{Q1} 、 C_{Q2} の充放電はすぐに完了し C_{Q1} は電源電圧の 2 倍、 C_{Q2} は 0V となります。その後励磁電流は図 6 に示すように「 n_2 巻線 電源 D_{Q2} n_2 巻線」の径路で流れます。 D_{Q2} は Q_2 の寄生ダイオードです。

このときの 1 次側電圧、電流波形を図 7 に示します。Mode 2 の開始後すぐに C_{Q1} は充電が完了し、 v_{n1} は電源電圧と等しくなります。同時に D_{Q2} が導通して n_2 巻線には負方向に励磁電流が流れます。Mode 2 の途中で励磁電流は流れ終わり、 C_{Q1} の放電と C_{Q2} の充電が始まっています。その後 Q_2 がターン ON して Mode 3 が始まり、 n_2 巻線には正方向の電流が流れます。なお、負荷電流は小さいので、Mode 3 における i_{n2} の多くは励磁電流です。 v_{n1} 波形から V_{out} は正規の値よりかなり大きな値になることが分かります。

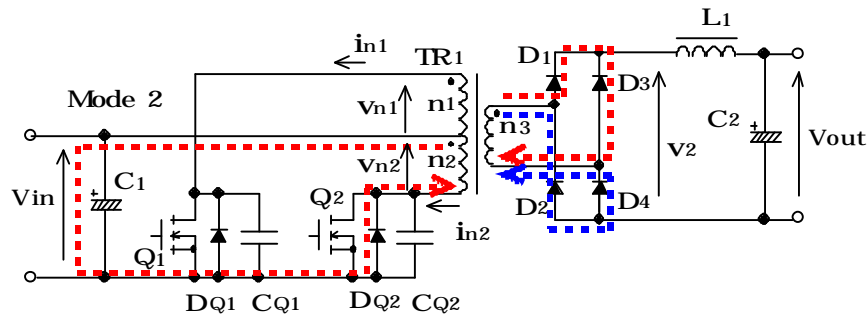
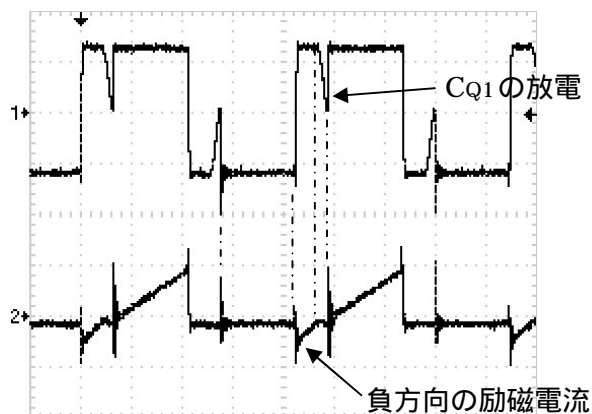


図 6 励磁電流が負荷電流よりかなり大きい時の電流径路



上：電圧 v_{n1} 下：電流 i_{n2}

50V/div 0.5A/div

(通流率 = 35%、出力電流 $I_{out} = 0.4A$) (25 μ sec/div)

図 7 励磁電流が負荷電流よりかなり大きい時の 1 次側波形

なお、本技術メモの内容は平地研究室 2010 年度専攻科卒業生秋庭康佑の卒業研究の一部です。

参考文献

- (1) 平地克也、「電圧型プッシュプル方式 DC/DC コンバータの励磁電流について」、平地研究室技術メモ No.20110228、カテゴリ：DC/DC コンバータ、2011 年 2 月
- (2) 平地克也、「励磁電流の重要な性質」、平地研究室技術メモ No.20100817、カテゴリ：DC/DC コンバータ、2010 年 8 月

以上