

LLC 方式 DC/DC コンバータにおけるソフトスイッチング失敗のメカニズム

(読んでほしい人：パワエレ技術者)

2015/9/6 舞鶴高専 平地克也

LLC 方式は簡単な回路構成で質の高いソフトスイッチングを実現できることから近年広く使用されるようになりました。平地研究室技術メモでは No.20140529 で回路構成と動作原理を説明しています^[1]。LLC 方式では負荷が重くなるとソフトスイッチングが実現できなくなることが知られており、LLC 方式の専用制御 IC ではこのような動作モードを防止する機能が組み込まれています(例えば文献^[2])。しかしながら、IC メーカーが発行している専用制御 IC の説明書には、なぜ過負荷時にソフトスイッチング失敗となるのか、そのメカニズムを正確に説明したものはないようです。学術論文も各種調査しましたが、正確な説明は見当たりません。

本技術メモでは LLC 方式の過負荷時ソフトスイッチング失敗のメカニズムを詳しく説明します。一般に DC/DC コンバータでは変圧器の励磁電流を使ってソフトスイッチングを実現している場合が多く、また多くの回路では励磁電流が変圧器の 2 次側に転流することによってソフトスイッチング失敗となります(例えばアクティブクランプ方式 1 石フォワード型 DC/DC コンバータ^[3])。LLC 方式もやはり励磁電流の 2 次側への転流によってソフトスイッチング失敗となることがわかりました。なお、本技術メモを読む前に文献^[1]を読んでいただくことを希望します。

- [1] 平地克也、「LLC 方式 DC/DC コンバータの回路構成と動作原理」、平地研究室技術メモ No.20140529
- [2] 山田谷政幸、山路将晴、山本毅、「LLC 電流共振制御 IC "FA5760N"」、富士電機技報、vol.85, No.6, (2012)
- [3] 田中孝明、「アクティブクランプ方式 DC/DC コンバータのソフトスイッチング成立条件の導出」、平地研究室技術メモ No.20090506

LLC 方式のソフトスイッチングの原理

まず、LLC 方式が正常にソフトスイッチングを実現している時の動作モードを以下に示します。各動作モードの電流径路を図 1 に示します。

- Mode 1 Q_1 が ON して電力が 2 次側に伝達されている。 C_r と L_r が共振している。
- Mode 2 C_r と L_r の共振が終了し、励磁電流だけが変圧器の 1 次巻線を流れている。
- Mode 3 Mode2 の状態から Q_1 がターンオフすることにより励磁電流で Q_1 の寄生容量 C_{Q1} を充電し、 Q_2 の寄生容量 C_{Q2} を放電する。
- Mode 4 寄生容量の充放電が完了し、 Q_2 の寄生ダイオード D_{Q2} が導通する。この Mode で Q_2 を ZVS でターンオンさせる。

このように通常動作時は励磁電流によって Q_1 Q_2 の寄生容量が充放電され、充放電完了後 D_{Q2} が導通している間に Q_2 をターンオンさせることにより ZVS を実現しています。

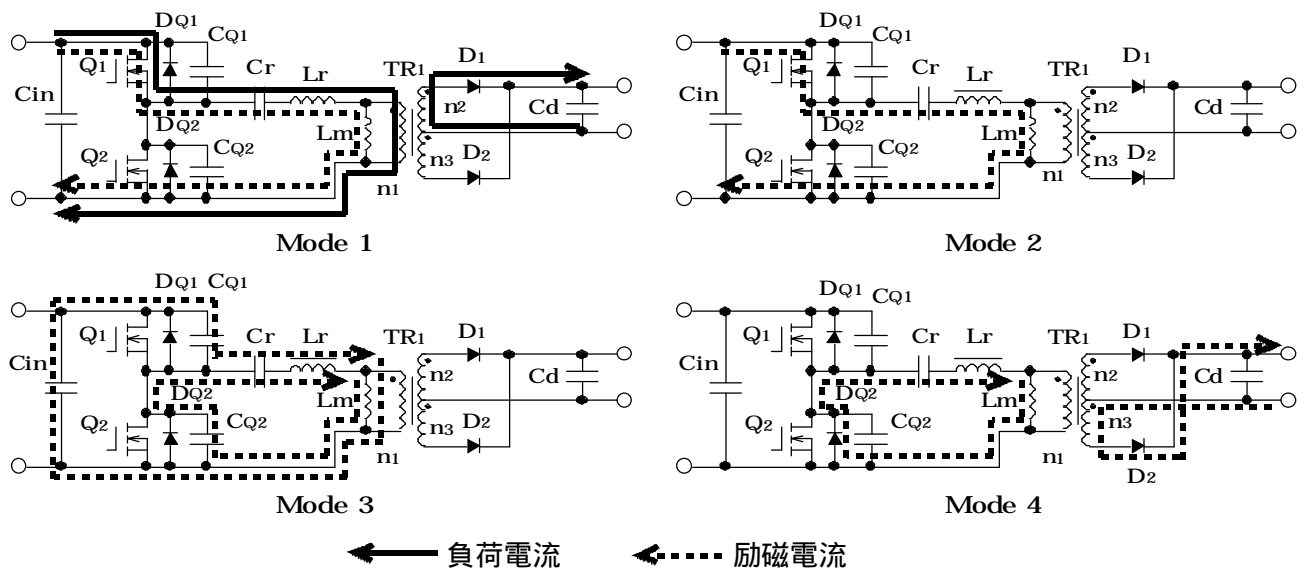


図1 LLC方式のソフトスイッチング成功時の動作モード
 (文献[1]の図5から抜粋。Lmは励磁インダクタンス。)

図2にMode 1の等価回路を示します。2次側の部品は1次側に換算して変圧器を省略しています。平滑コンデンサCdは電圧Voutの定電圧源と見なし、さらに1次側に換算してVout'としています。

$V_{out}' = \frac{n_1}{n_2} V_{out}$ です。励磁電流はLmを流れ、負荷電流はD1を介してVout'を流れます。この時

D1の電圧降下を無視すれば $v_{n1} = V_{out}'$ となります。なお、図2のVinは入力電圧であり、図1のCinの電圧です。

図3にMode 2の等価回路を示します。負荷電流は流れ終わっているためD1とVout'は省略しています。この時、 $(V_{in} - v_{Cr})$ がLrとLmで分圧されているので1次巻線電圧vn1は次の式で表されます。

$$v_{n1} = (V_{in} - v_{Cr}) \frac{L_m}{L_r + L_m} \dots \dots (1) \text{式}$$

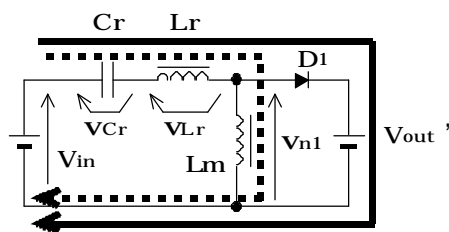


図2 Mode 1の等価回路

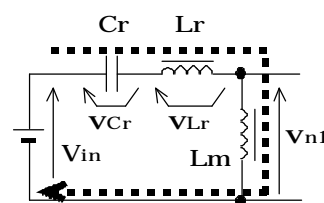


図3 Mode 2の等価回路

過負荷時の動作

LLC コンバータでは負荷が重くなると出力電圧が低下します。文献[1]の図9に出力電圧のグラフを示していますので参照下さい。励磁電流は最も流れやすい巻線を通るので出力電圧が低い場合は励磁電流は Mode2 において 2 次側にも流れます。この時の電流経路を図4の Mode A に示します。励磁電流の一部が 2 次側に転流して D₂ が導通しています。Mode A の等価回路を図5に示します。V_{out}' は図2と同様に C_d の電圧を 1 次側に換算したものです。ただし、図1では D₁ が導通するのに対し図5では D₂ が導通するので V_{out}' は下向きになります。また、図5では v_{n1} = - V_{out}' となるので、v_{Lr} = V_{in} - v_{Cr} - v_{n1} = V_{in} - v_{Cr} + V_{out}' となります。なお、過負荷時は V_{out}' は小さく、また、C_r は Mode1 において大きな電圧に充電されているので、v_{Cr} > V_{in} + V_{out}' が成立し、v_{Lr} は負の値です。よって L_r 電流はすみやかに減少し、その分 D₂ を流れる励磁電流が増加します。L_r 電流はやがて 0A となり方向が逆転します。

方向が逆転した時の電流経路を図4の Mode B に示します。逆転した L_r 電流は Q₁ の寄生ダイオード D_{Q1} を通過して電源に回生されます。この状態で Q₂ がターンオンすると D_{Q1} の逆回復時間の間「C_{in} D_{Q1} Q₂ C_{in}」の経路でいわゆる貫通電流が流れて大きなスイッチング損失が発生します。Mode B の等価回路を図6に示します。大きな電圧に充電されている C_r が電源となって L_r に逆方向（右から左）の電流を流すことが理解できます。

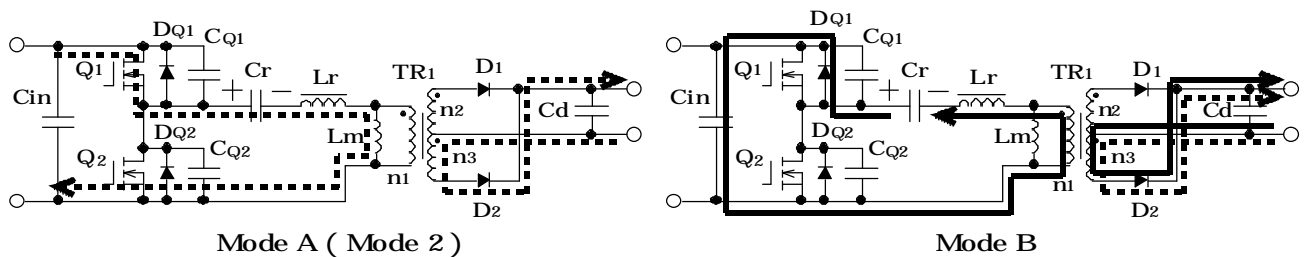


図4 負荷が重い時の電流経路（実線は負荷電流、点線は励磁電流）

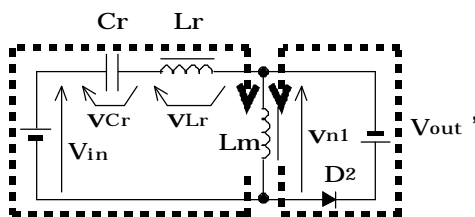


図5 Mode A の等価回路

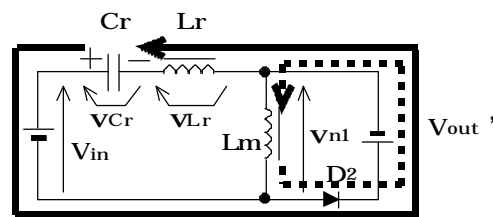


図6 Mode B の等価回路

正常動作時と過負荷時の動作比較

以上、正常動作時（ソフトスイッチング成功時）と過負荷時（ソフトスイッチング失敗時）の動作をまとめると以下のようになります。

< 正常動作時 >

L_r と C_r の共振終了（出力電圧大） 励磁電流は全て 1 次側を流れる Q₁ ターンオフ 励磁電流で Q₁Q₂ の寄生容量を充放電 D_{Q2} 導通 Q₂ が ZVS でターンオン

< 過負荷時 >

Lr と Cr の共振終了（出力電圧小） 励磁電流は 2 次側へ転流 Lr 電流逆転 DQ1 導通 Q2 ターンオン 貫通電流発生

このように、ソフトスイッチングの成否は出力電圧 Vout の大小で決まります。成功時の Mode 2

の n1 電圧 vn1 は(1)式であたえられて $v_{n1} = (V_{in} - v_{Cr}) \frac{L_m}{L_r + L_m}$ であり、失敗時の vn1 は D2 が導通する

ので $v_{n1} = -V_{out}'$ です(Mode A) によって、成否の境界は次のように Mode 2 の $|V_{in} - v_{Cr}| \frac{L_m}{L_r + L_m}$

と $V_{out} (= \frac{n_1}{n_2} V_{out})$ の大小関係で決まります。なお $(V_{in} - v_{Cr})$ は負の値なので絶対値で比較します。

$$|V_{in} - v_{Cr}| \frac{L_m}{L_r + L_m} < \frac{n_1}{n_2} V_{out} \quad \dots \text{D2 導通せず} \quad \text{ソフトスイッチング成功}$$

$$|V_{in} - v_{Cr}| \frac{L_m}{L_r + L_m} > \frac{n_1}{n_2} V_{out} \quad \dots \text{D2 導通する} \quad \text{ソフトスイッチング失敗}$$

正常動作時と過負荷時の波形

図 7 に正常動作時のシミュレーション波形を示します。波形から次のことが分かります。

- Mode 1 で共振電流が流れ終わり Mode 2 では Q1 電流は Lm 電流（励磁電流）と等しくなっている。つまり Mode 2 では Q1 には励磁電流だけが流れている。
- Q1 がターンオフ後、Mode 3（寄生容量の充放電）はすぐに終わり Mode 4（DQ2 の導通）が始まっている。
- Mode 4 開始時点では「DQ2 電流 = Lm 電流」なので励磁電流は全て DQ2 を流れている。その後 Mode 4 の間、励磁電流は徐々に 2 次側に転流して D2 電流が増加している。

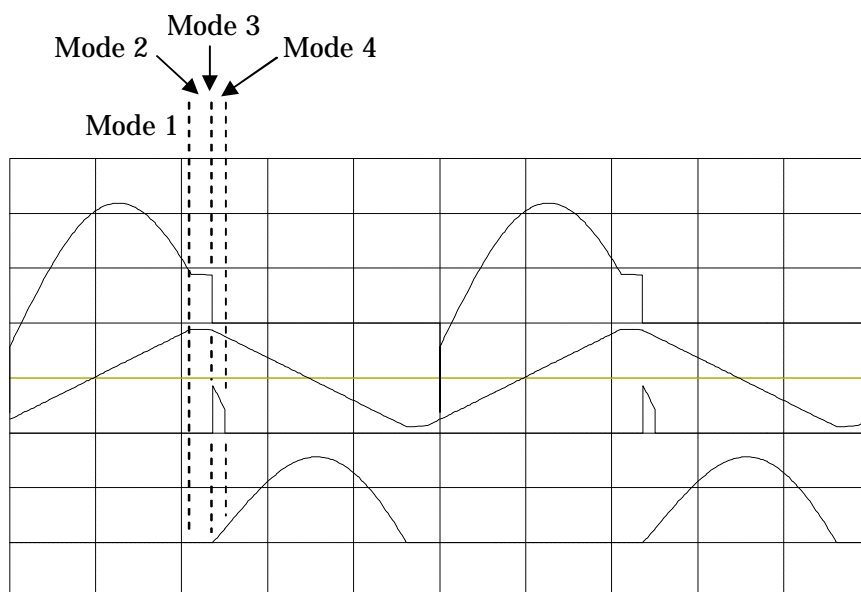


図 7 R1 = 7 にて

Q1 電流

Lm 電流

DQ2 電流

D2 電流

全て 5A/div

図 8 に $R_1 = 2$ として過負荷状態とした時のシミュレーション波形を示します。波形から次のことが分かります。

- Mode 1 で共振が終了し、Mode 1 終了時点では「 Q_1 電流 = L_m 電流」となっている。即ち、励磁電流は全て Q_1 を流れている。
- Mode A で Q_1 電流は減少し、 D_2 電流が増加している。即ち、励磁電流は 2 次側に転流している。Mode A 終了時点では励磁電流は全て D_2 に転流し、 Q_1 電流は 0A となっている。
- Mode B で D_{Q1} が導通している。即ち、図 4 の Mode B に示したように C_r が電源となって L_r 電流の方向が逆転して D_{Q1} を導通させている。

なお、 Q_2 のターンオン時 (Mode B 終了時) に D_{Q1} にリカバリ電流が流れるのですが、このシミュレーションではダイオードのリカバリ特性は表現してないので D_{Q1} のリカバリ電流は図 4 の D_{Q1} 電流波形には見えていません。

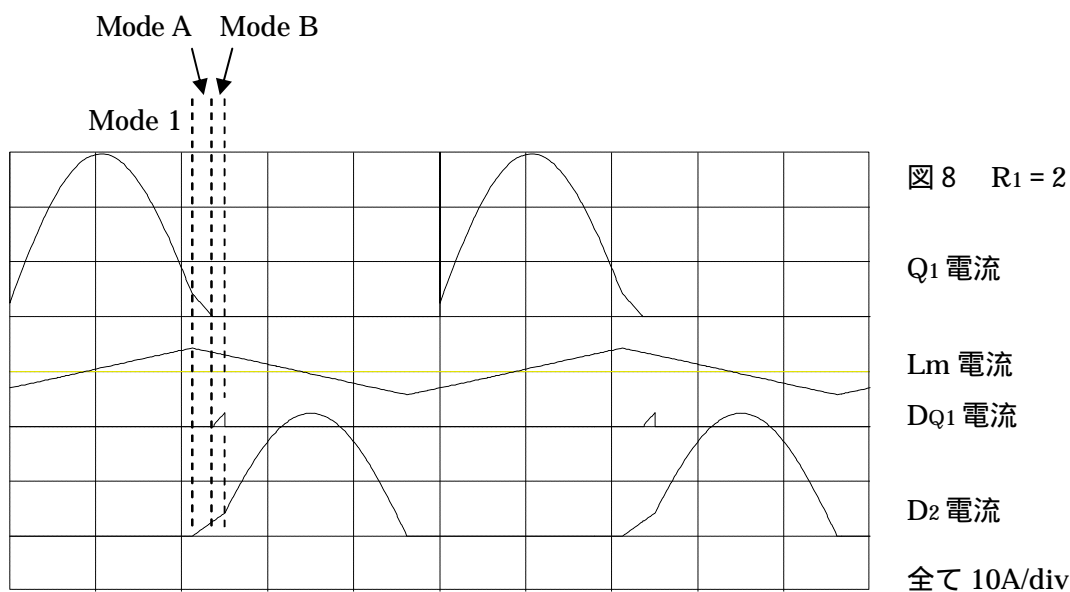


図 8 $R_1 = 2$ にて

正常時と過負荷時のシミュレーション波形から次のことが確認できます

- …… 過負荷時は共振終了後すぐに励磁電流の 2 次側への転流が始まる。正常時は Q_1 がターンオフしてから励磁電流の 2 次側への転流が始まる。この差がソフトスイッチングの可否を決めている。

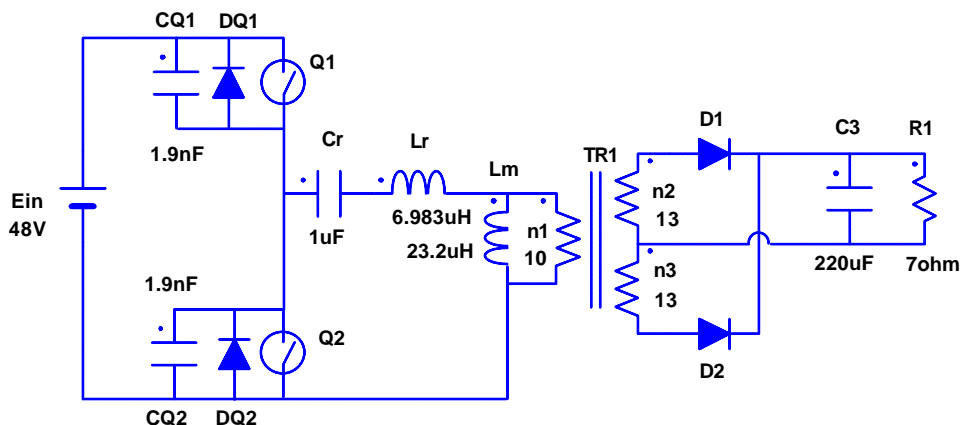


図 9 シミュレーション回路

図9にシミュレーションに用いた回路図を示します。シミュレーションソフトはSCATです。

なお、本技術メモは平地研究室専攻科2年生浦山大の研究成果の一部を分かり易くまとめたものです。実験結果を含む詳しい論文が2015/4/18のパワーエレクトロニクス学会第207回例会で浦山によって発表されており^[4]、2016/3発行のパワーエレクトロニクス学会誌に掲載される予定です。

[4] 浦山大、平地克也、「LLCコンバータのソフトスイッチング成立条件について」、パワーエレクトロニクス学会、JIPE-41-03、2015

以上