

LLC コンバータのソフトスイッチング成立領域の詳細な検討

(読んでほしい人：パワエレ技術者)

2016/02/12 舞鶴高専 専攻科 2年 浦山大

LLC コンバータ (LLC 方式 DC/DC コンバータ) は簡単な回路構成でソフトスイッチングを実現できます。このソフトスイッチングは常に成立するわけではなく、一般的に出力電圧がピークとなる周波数 (以下ピーク周波数と略す) より高周波であれば成立するといわれています。しかし、実際にはピーク周波数より高周波であってもソフトスイッチングが成立しない領域があります。この領域は、励磁電流が 2 次側へ転流する時間がピーク周波数では長すぎるため発生します。本技術メモでは、このソフトスイッチングが成立しない領域の発生原因を詳しく説明します。

■はじめに

LLC コンバータは、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。詳しい動作原理については平地研究室技術メモ No.20140529 で説明されています^[1]。また、LLC コンバータに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という特徴があります。これは、ソフトスイッチングを実現するための励磁電流が 1 次側から 2 次側へ転流することが原因でした。詳しくは平地研究室技術メモ No.20150906^[2]や文献^[3]で説明されています。

LLC コンバータの回路図を図 1 に示します。D_{Q1}、D_{Q2} は FET の寄生ダイオード、C_{Q1}、C_{Q2} は出力容量となっています。本回路は 2 つのリアクトル L_r 、 L_m と 1 つのコンデンサ C_r から構成され、2 つの共振周波数を持ちます。第 1 共振周波数 f_m は励磁インダクタンス L_m とコイル L_r そして、コンデンサ C_r によって決定されます。第 2 共振周波数 f_r はコイル L_r とコンデンサ C_r によって決定されます。

LLC コンバータの周波数特性を図 2 に示します。LLC コンバータは、図 2 に示すように 3 つの動作領域を持ちます。領域①は共振周波数 f_r より高い周波数で動作させています。この領域では負荷の

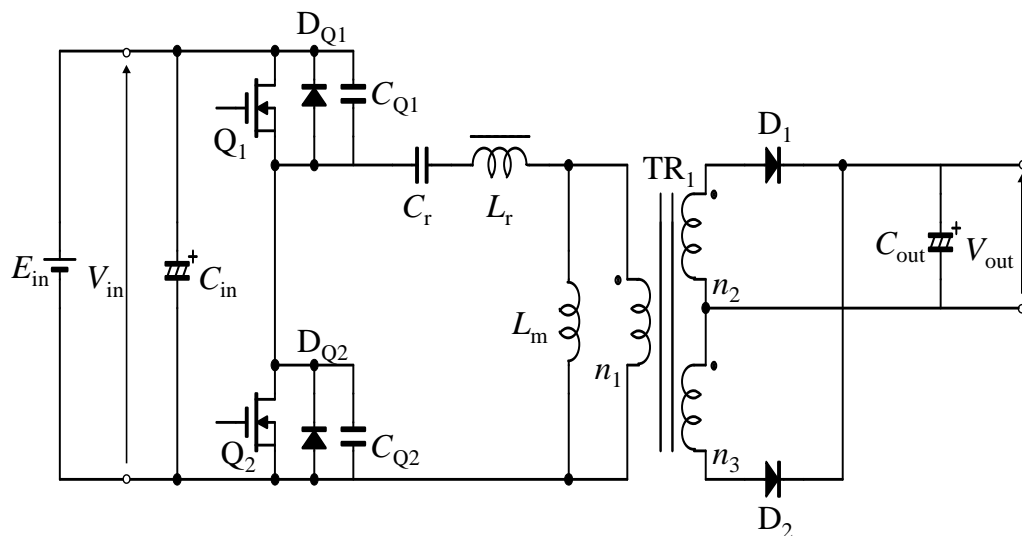


図 1 LLC コンバータの回路図

条件によらず ZVS を成立させることができます。2つの共振周波数 (f_m , f_r) 間の領域では負荷によって領域②もしくは領域③の動作となります。領域②では、ZVS 動作が行われソフトスイッチングが成立します。詳しい動作説明は文献[1]、[2]、[3]を参照してください。領域③では、ハードスイッチングとなり大きな損失が発生します。よって、LLC コンバータを使用する際は領域③を避けて使用します。

領域②、領域③の境界は一般的にピーク周波数を結んだ線であるといわれています[4][5][6]。しかし、実際に測定を行うとピーク周波数より高周波の領域でもソフトスイッチングが不成立となる領域があります(図3の斜線部)。本技術メモでは、この領域が発生するメカニズムを説明します。

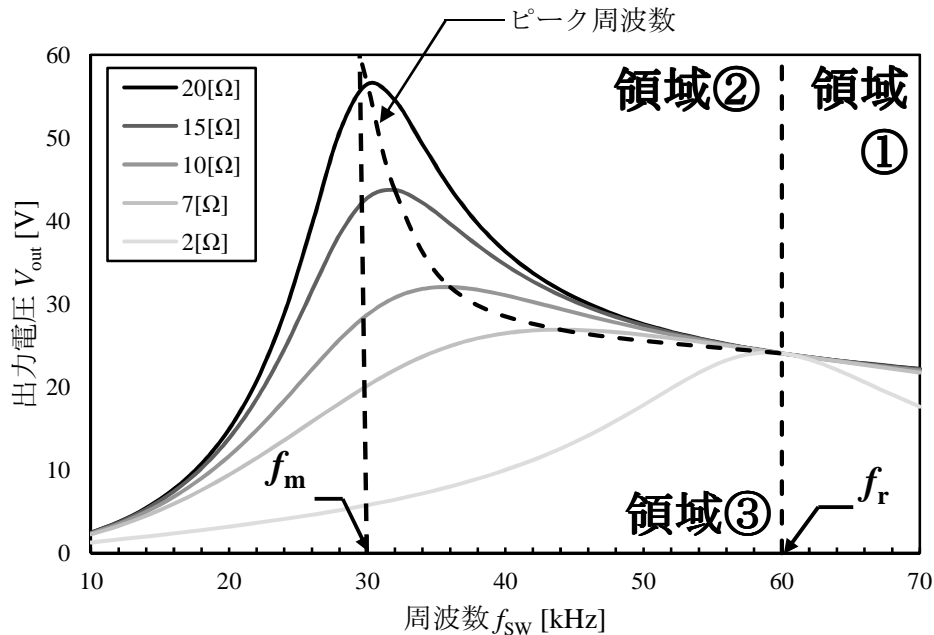
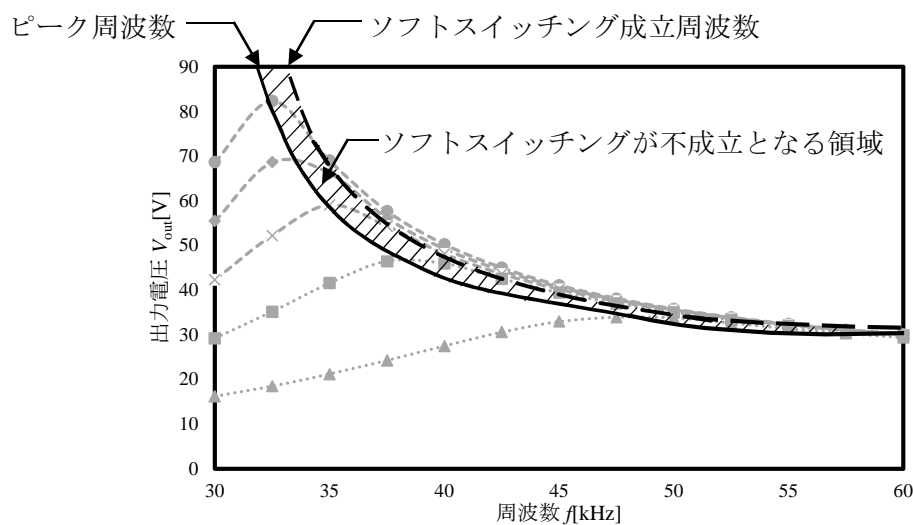


図2 LLC コンバータの出力電圧の周波数特性



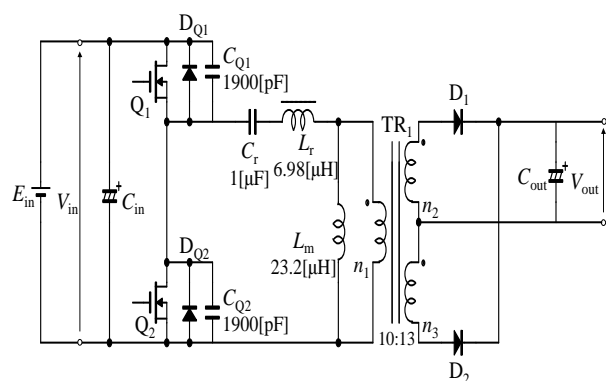
(斜線部がソフトスイッチング不成立となる領域。)

(イメージを伝えるため描いたもので実際の領域とは若干異なる。)

図3 ソフトスイッチングが不成立となる領域 (イメージ図)

■ピーク周波数とソフトスイッチングの成立する周波数が不一致であることの確認

図4に示す LLC コンバータ試作器を用いてピーク周波数とソフトスイッチングの成立する周波数（以下、ソフトスイッチング成立周波数と略す）が不一致となることを確認します。LLC コンバータ試作器から得られた出力電圧の周波数特性を表1、図5に示します。ソフトスイッチングの成否は波形（図6）より、 Q_1 電流のサージが確認できなければ成立したとします。 Q_2 電圧のサージは波形を測定するための配線が原因であるため無視します。表2には各負荷抵抗のピーク周波数、表3には各負荷抵抗のソフトスイッチング成立周波数を示します。図5に表2、表3の測定結果を上書きしたものを図7に示します。図7の実線はピーク周波数を結線したものの、破線はソフトスイッチング成立周波数を結線したものです。破線の歪みは測定点数の不足から発生しています。動作周波数が破線の周波数以上であればソフトスイッチングが成立し、破線の周波数よりも低ければ不成立となります。図7より、ピーク周波数とソフトスイッチング成立周波数が不一致であることが確認されました。



記号	名称	パラメータ
f_m	第1共振周波数	29.0 [kHz]
f_r	第2共振周波数	60.2 [kHz]
f_{sw}	スイッチング周波数	55 [kHz]
E_{in}	入力電圧	48 [V]
V_{out}	出力電圧	31.9 [V] ($R_o=7[\Omega]$)
Dead time	デッドタイム	480 [nsec]

図4 LLC コンバータ試作器の回路定数とその仕様

表1 LLC コンバータの周波数特性表（実測値）

周波数 f [kHz]	出力電圧 V_{out} [V] (負荷抵抗 2[Ω]~20[Ω])									
	20[Ω]	18[Ω]	16[Ω]	14[Ω]	12[Ω]	10[Ω]	8[Ω]	6[Ω]	4[Ω]	2[Ω]
30	47.2	43.5	40.0	36.0	32.1	28.8	23.8	18.9	14.3	7.2
35	58.9	56.8	53.3	48.8	43.8	38.9	32.2	25.5	18.6	8.8
40	48.9	48.0	46.6	45.2	43.3	41.4	37.7	30.8	23.1	11.1
45	41.0	40.7	39.9	39.4	37.7	37.3	35.5	33.0	26.8	14.3
50	36.1	35.8	35.3	35.1	33.4	33.7	32.6	31.0	28.3	17.6
55	32.8	32.6	32.2	32.1	30.3	31.1	30.3	29.1	27.0	20.3
60	30.5	30.4	30.0	29.9	27.6	29.2	28.5	27.6	26.0	21.2

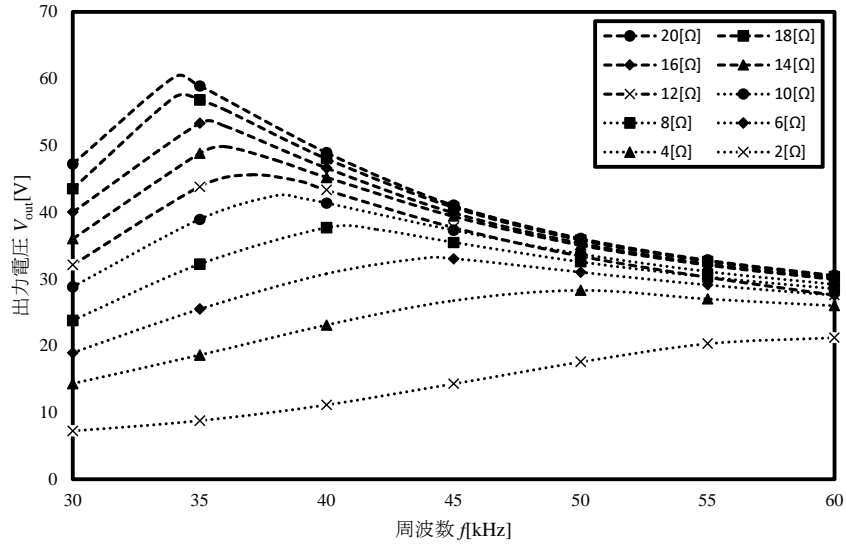
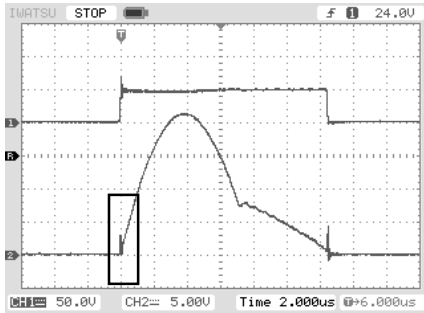


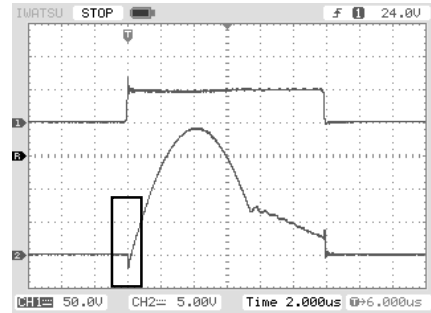
図5 LLCコンバータの周波数特性図（実測値）



(a) $f_{sw}=40$ [kHz]

(ピーク周波数)

ソフトスイッチングの成否は I_{Q1} のサージで判断します。こちらの I_{Q1} 波形にはサージが発生しているため、ソフトスイッチング不成立となります。



(b) $f_{sw}=42$ [kHz]

(ソフトスイッチング成立周波数)

ソフトスイッチングの成否は I_{Q1} のサージで判断します。こちらの I_{Q1} 波形にはサージが発生していないため、ソフトスイッチング成立となります。

I_{Q1} の流れ初めに存在するマイナスの部分は FET の寄生ダイオード D_{Q1} の導通です。

上： Q_2 電圧波形 V_{Q2} (50[V/div])、下： Q_1 電流波形 I_{Q1} (5[A/div]) ($R_o=8[\Omega]$ 、2[μ sec/div])

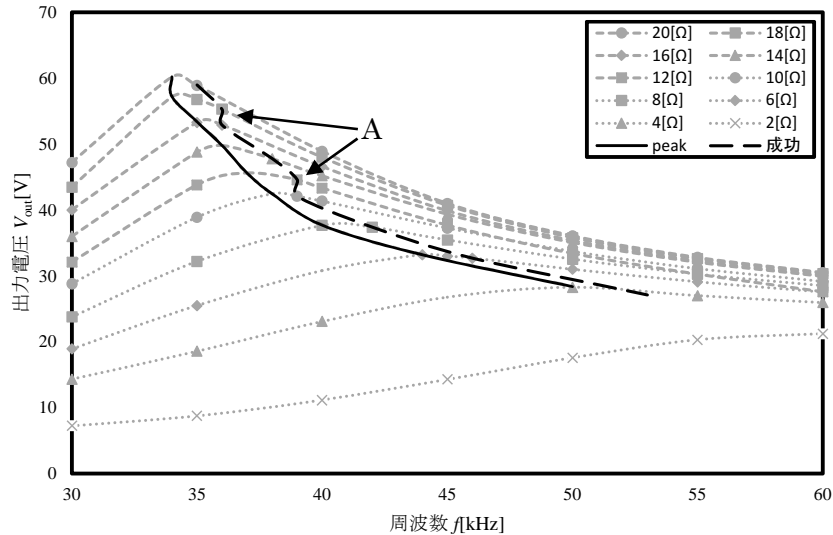
図6 ソフトスイッチングの成否判断波形（実測）

表2 ピーク周波数（実測値）

負荷抵抗 R_o [Ω]	周波数 f [kHz]	出力電圧 V_{out} [V]
20	34	60.2
18	34	57.2
16	35	53.4
14	36	49.8
12	37	45.6
10	38	42.5
8	40	37.7
6	44	33.2
4	51	27.5

表3 ソフトスイッチング成立周波数（実測値）

負荷抵抗 R_o [Ω]	周波数 f [kHz]	出力電圧 V_{out} [V]
20	35	59.0
18	36	55.3
16	36	52.9
14	38	47.8
12	39	44.6
10	39	42.1
8	42	37.4
6	46	32.7
4	53	27.1



(A 点で発生している歪みは測定点数の不足が原因)

(実線はピーク周波数を結んだもの、破線はソフトスイッチング成立周波数を結んだものです。)

図7 ソフトスイッチングの成否判定図 (実測値)

次に、シミュレーションでピーク周波数とソフトスイッチング成立周波数が一致しないことを確認します。シミュレーションソフトには SCAT (Switching Converter Analysis Tool) を使用します。シミュレーションは実測時と同様、図4の回路定数で行いました。

出力電圧の周波数特性を表4、図8に示します。ソフトスイッチングの成否は波形(図9)より、 Q_1 電流のサージが確認できなければ成立したとします。表5には各負荷抵抗のピーク周波数、表6にはソフトスイッチング成立周波数を示します。図8に表5、表6の測定結果を上書きしたものを図10に示します。図10の実線はピーク周波数を結線したものの、破線はソフトスイッチング成立周波数を結線したものです。図10より、試作器と同様にシミュレーションでもピーク周波数とソフトスイッチング成立周波数が不一致であることが確認されました。つまり、ピーク周波数より高周波の領域であってもソフトスイッチングが不成立となる領域を確認できました。

表4 LLCコンバータの周波数特性表 (シミュレーション)

周波数 f [kHz]	出力電圧 V_{out} [V] (負荷抵抗 2[Ω]~20[Ω])									
	20[Ω]	18[Ω]	16[Ω]	14[Ω]	12[Ω]	10[Ω]	8[Ω]	6[Ω]	4[Ω]	2[Ω]
30	68.6	61.7	55.5	48.9	42.3	35.8	29.2	22.7	16.2	8.6
32.5	82.3	76.1	68.6	60.6	52.2	43.7	35.2	26.8	18.5	9.6
35	69.0	67.8	66.2	63.8	59.1	51.2	41.5	31.4	21.2	10.8
37.5	57.7	56.9	56.1	55.3	54.3	52.2	46.4	36.1	24.3	12.2
40	50.3	49.8	49.3	48.7	48.1	47.4	46.0	39.7	27.5	14.0
42.5	45.0	44.7	44.4	44.0	43.6	43.1	42.5	40.4	30.6	16.1
45	41.1	40.1	40.7	40.4	40.2	39.8	39.4	38.8	33.0	18.5
47.5	38.1	38.0	37.9	37.7	37.5	37.3	37.0	36.5	33.9	21.3
50	35.8	35.7	35.6	35.5	35.4	35.2	35.0	34.7	33.8	24.2
52.5	33.9	33.9	33.8	33.7	33.6	33.5	33.4	33.1	32.6	26.8
55	32.4	32.4	32.3	32.3	32.2	32.1	32.0	31.8	31.4	28.5
57.5	31.1	31.1	31.1	31.1	31.0	30.9	30.8	30.6	30.3	28.8
60	30.1	30.1	30.1	30.0	30.0	29.9	29.8	29.7	29.4	28.5

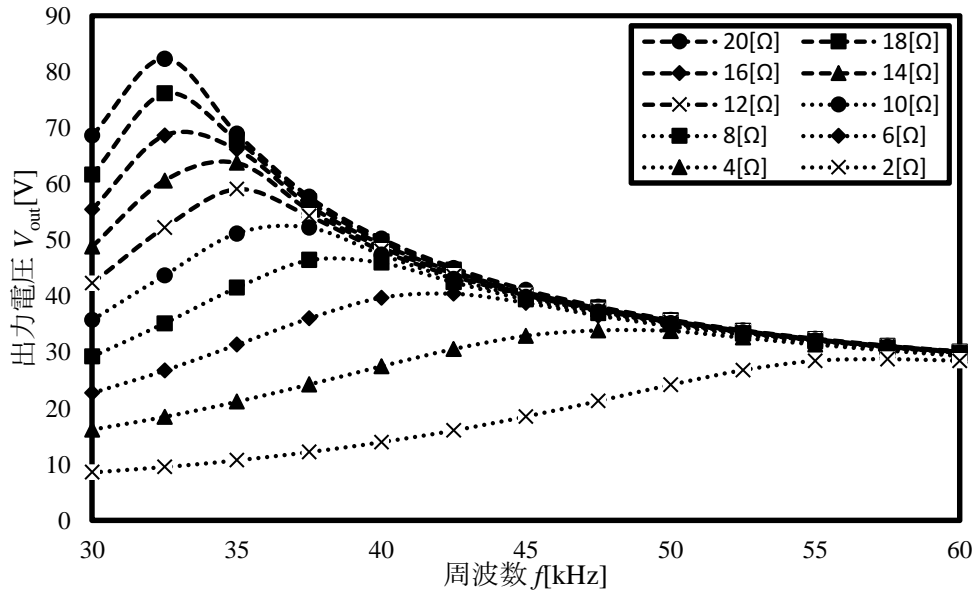
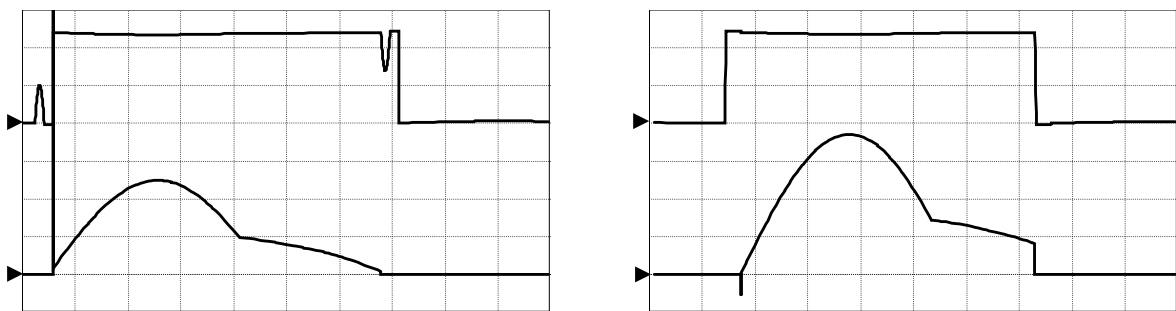


図 8 LLC コンバータの周波数特性図 (シミュレーション)



(a) $f_{sw}=38.2[\text{kHz}]$

(ピーク周波数)

I_{Q1} 波形を見ると上方向に大きなサージが確認できます。よって、ソフトスイッチングは不成立です。

(b) $f_{sw}=42.6[\text{kHz}]$

(ソフトスイッチング成立周波数)

I_{Q1} 波形にサージが発生しておらず、ソフトスイッチングが成立しています。

上 : Q_2 電圧波形 V_{Q2} (20[V/div])、下 : Q_1 電流波形 I_{Q1} (10[A/div]) ($R_o=8[\Omega]$ 、2[$\mu\text{sec/div}$])

図 9 ソフトスイッチングの成否判断波形 (シミュレーションにて) (▶は GND を指す)

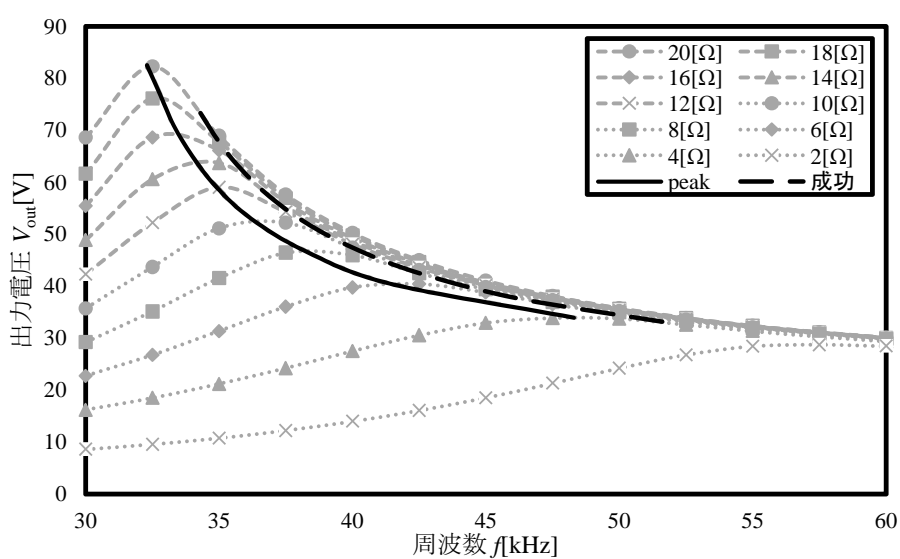
注 : 図 9(b)の I_{Q1} の流れ初めに見える下方向へのサージは寄生ダイオード D_{Q1} の導通が原因です。LLC コンバータではソフトスイッチングを実現するために、FET の寄生ダイオードを導通させることで電圧をゼロに落としています。しかし、ダイオードの導通には順方向電圧が必要であるため FET の出力容量 C_{Q1} には約 0.7[V] の電圧が印加されます。この電圧が原因で Q_1 をターン ON した際に、 C_{Q1} の放電電流が I_{Q1} のサージとして見えています。

表5 ピーク周波数
(シミュレーション)

負荷抵抗 $R_o[\Omega]$	周波数 $f[\text{kHz}]$	出力電圧 $V_{out} [\text{V}]$
20	32.3	82.5
18	32.8	76.8
16	33.3	71.0
14	34.0	65.1
12	34.9	59.1
10	36.2	53.0
8	38.2	46.9
6	41.4	40.5
4	48.3	34.0

表6 ソフトスイッチング成立周波数
(シミュレーション)

負荷抵抗 $R_o[\Omega]$	周波数 $f[\text{kHz}]$	出力電圧 $V_{out} [\text{V}]$
20	34.3	73.3
18	35.0	67.8
16	35.8	62.7
14	36.9	57.3
12	38.2	52.4
10	40.1	47.2
8	42.6	42.4
6	46.3	37.6
4	52.0	32.9



(実線はピーク周波数を結んだもの、破線はソフトスイッチング成立周波数を結んだものです。)

図10 ソフトスイッチングの成否判定図 (シミュレーション)

■ LLC コンバータの動作説明

ピーク周波数とソフトスイッチング成立周波数が不一致となるメカニズムを説明する前に LLC コンバータの動作を説明します。まず、ソフトスイッチングが正常に実現している際の動作を簡単に説明します。詳しい説明は文献[1]、文献[3]を参照ください。各動作モードの電流経路を図 11 に、各部波形を図 12 に示します。

Mode 1 Q_1 が ON しており、 C_r と L_r の共振電流が流れている。

Mode 2 C_r と L_r の共振が終了し、1 次側の励磁電流が流れている。

Mode 3 Q_1 のターン OFF 後、励磁電流が FET の出力容量 C_{Q1} を充電、 C_{Q2} を放電する。

Mode 4 出力容量の充放電が完了し、寄生ダイオード D_{Q2} が導通する。このとき Q_2 をターン ON させると Q_2 電圧がゼロであるため、ZVS が実現できる。

Mode 5 Q_2 が ON しており、 C_r と L_r の共振電流が流れている。

以上、正常にソフトスイッチングが実現している際は 1 次側を流れている励磁電流により出力容量が充放電され、充放電完了後 D_{Q2} 導通時に Q_2 をターン ON させることで ZVS を実現させています。

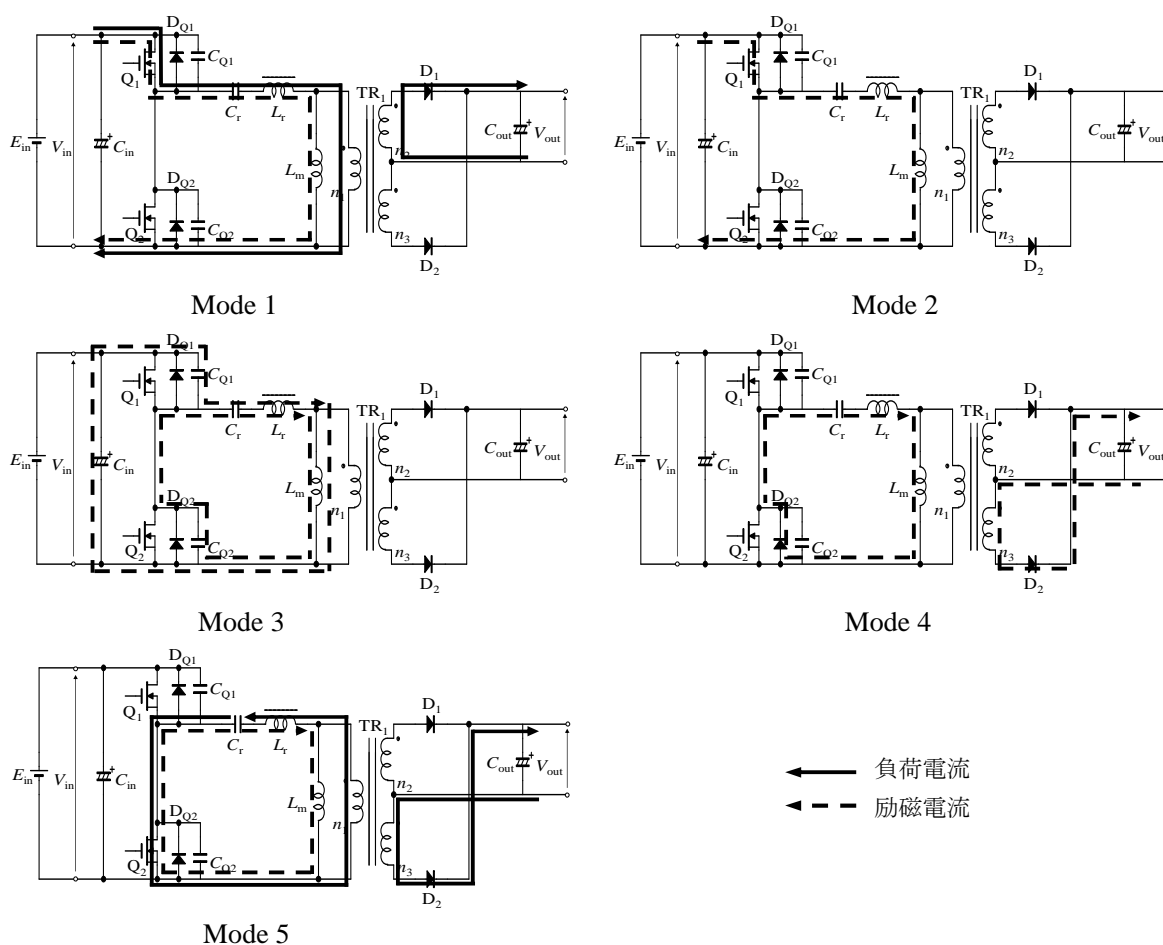
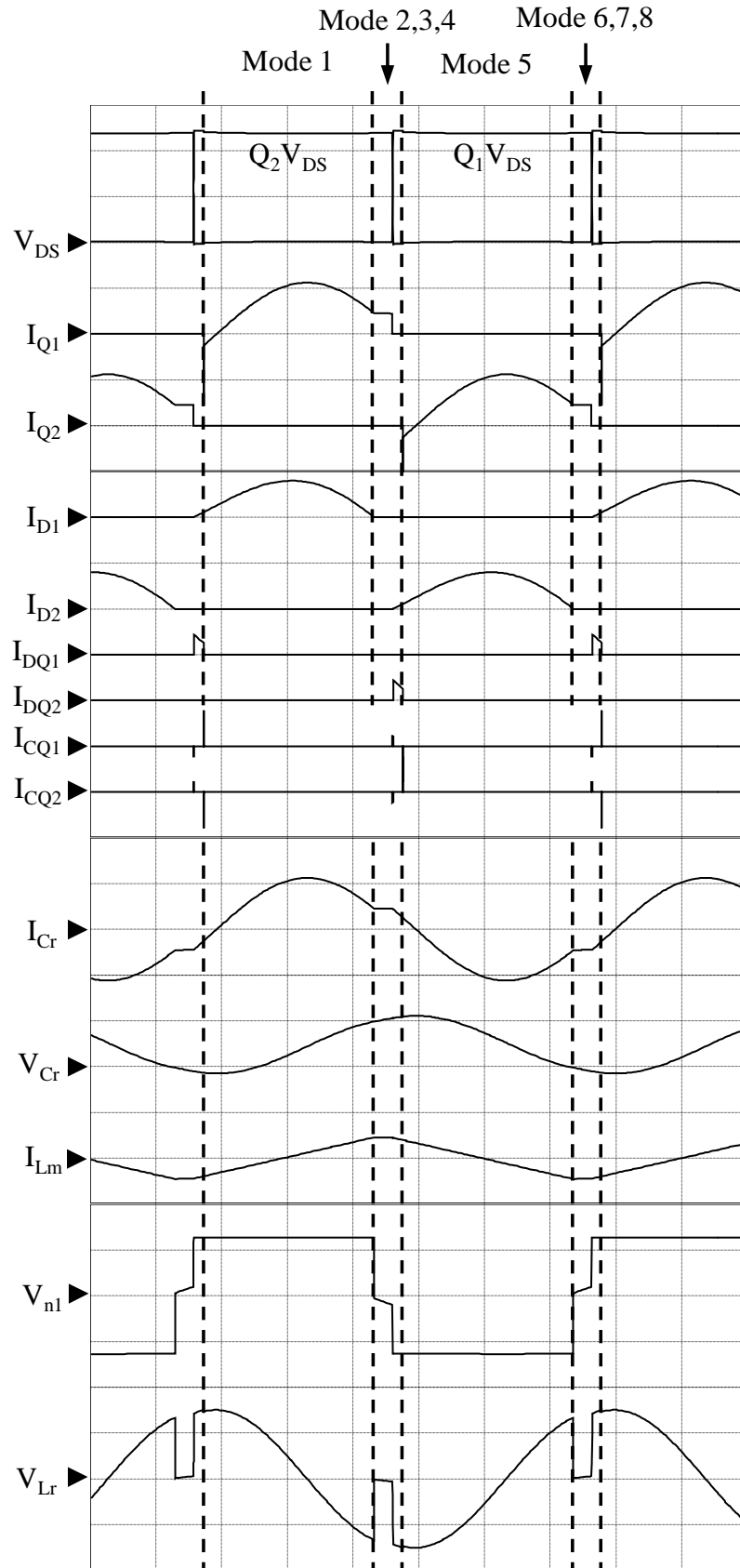


図 11 ソフトスイッチング成立時の電流経路 (文献[3]より抜粋)



(V_{DS}, V_{n1}, V_{Lr} 20[V/div]、電流はすべて 10[A/div]、 V_{Cr} 50[V/div])

($R_o=7[\Omega]$ 、 $V_{in}=48[V]$ 、3[$\mu\text{sec/div}$])

図 12 正常動作時のシミュレーション波形

次に、ソフトスイッチングが不成立となる（過負荷時）メカニズムを簡単に説明します。詳しい説明は文献[2]、[3]をご参照ください。各動作モードの電流経路を図 13 に、各部波形を図 14 に示します。

- Mode 1 ソフトスイッチング成立時と同様、 Q_1 が ON しており C_r と L_r の共振電流が流れている。共振終了後、次の Mode へ移行する。
- Mode A ソフトスイッチングが不成立となる過負荷時は出力電圧 V_{out} が低いため、励磁電流は流れやすい 2 次側へ徐々に転流する。すべて 2 次側へ転流すると Mode B へ移行する。
- Mode B C_r が電源となり Q_1 の寄生ダイオード D_{Q1} が導通する。この状態で Q_2 をターン ON させると Q_2 電圧がゼロではないためハードスイッチングとなる。
- Mode C Q_2 がターン ON し、 D_{Q1} のリカバリー時間(T_{rr})の間 $C_{in} \rightarrow D_{Q1} \rightarrow Q_2 \rightarrow C_{in}$ の経路で貫通電流が流れ、スイッチング損失が発生する。 T_{rr} 終了後、次の Mode へ移行する。
- Mode D 励磁電流は流れやすい 1 次側へ徐々に転流する。すべて転流すると次の Mode へ移行する。
- Mode 5 ソフトスイッチング成立時と同様、 Q_2 が ON しており C_r と L_r の共振電流が流れている。

このように、ソフトスイッチング成立時は 1 次側を流れていた励磁電流が 2 次側へ転流することでソフトスイッチングが不成立となります。

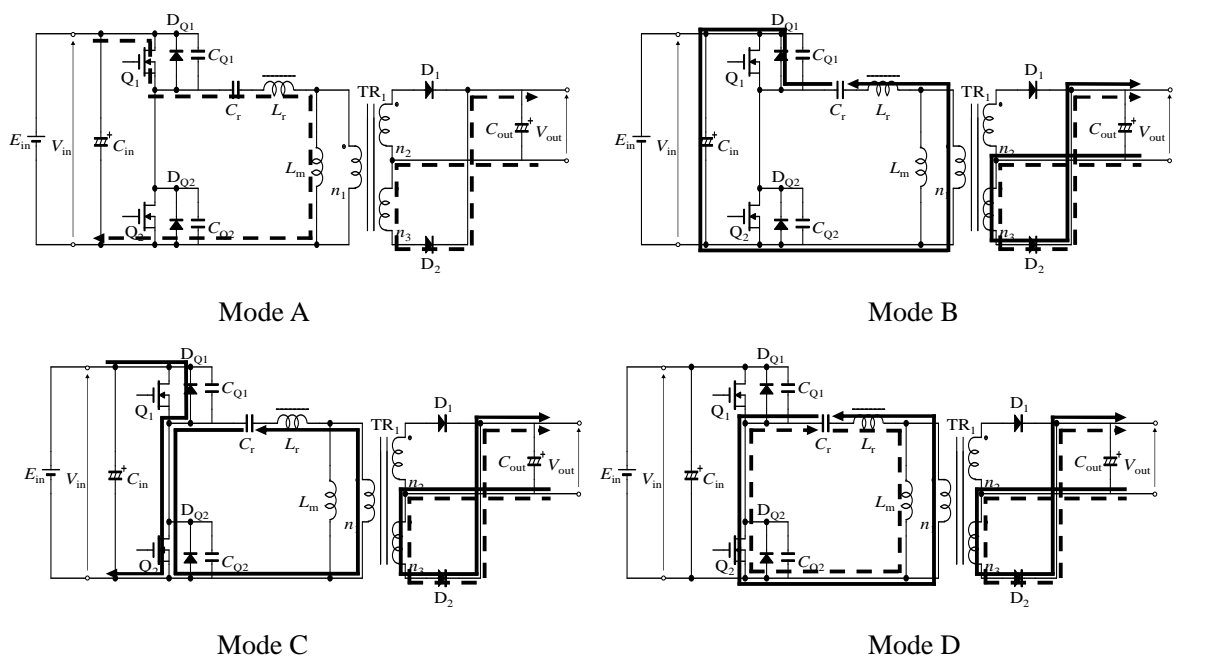
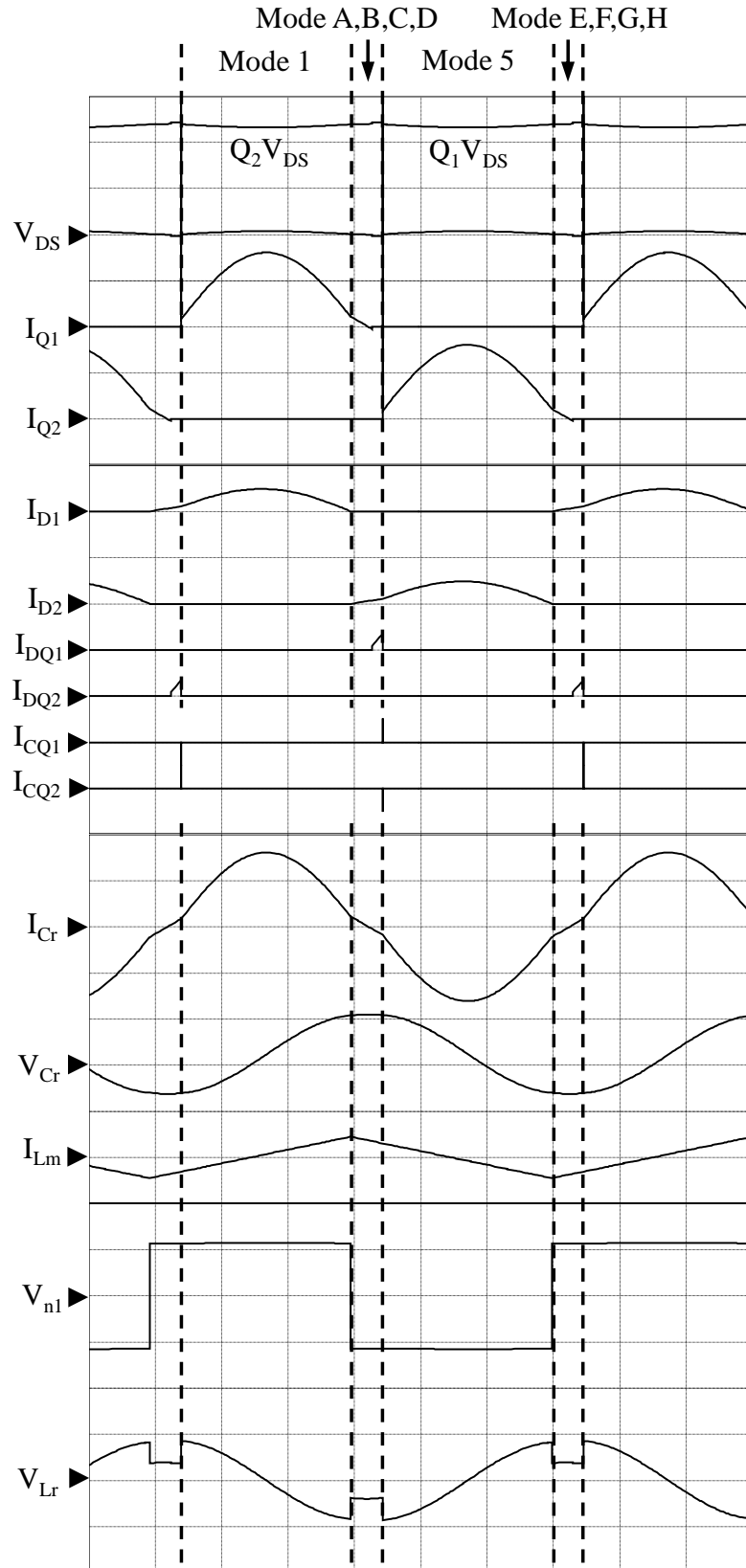


図 13 ソフトスイッチング不成立時の電流経路（文献[3]より抜粋）
 (Mode 1 と Mode 5 は図 11 に示す)

負荷電流
 励磁電流



(V_{DS}, V_{nl} 20[V/div]、 I_{Q1}, I_{Q2}, I_{Cr} 20[A/div]、 I_{D1}, I_{D2} 50[A/div]、 I_{DQ1}, I_{DQ2}, I_{Lm} 10[A/div]、

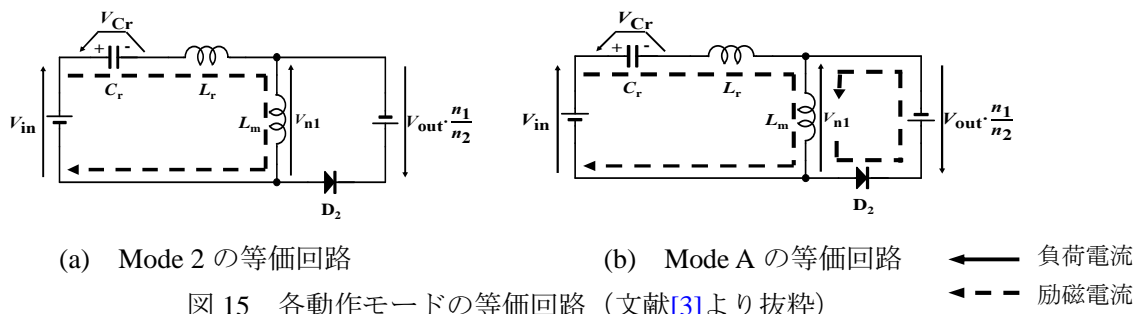
I_{CQ1}, I_{CQ2} 1[kA/div]、 V_{Cr}, V_{Lr} 100[V/div])

($R_o=2[\Omega]$ 、 $V_{in}=48[V]$ 、 $3[\mu\text{sec/div}]$)

図 14 過負荷時のシミュレーション波形

■ LLC コンバータの境界条件

次に、出力電圧がどの程度であれば励磁電流が2次側へ転流するのか、境界条件を説明します。励磁電流が1次側を流れている Mode 2 の等価回路と2次側を流れている Mode A の等価回路を図 15 に示します。この等価回路は C_{out} を定電圧源とみなしており、2次側を1次側へ換算しています。



Mode 2 のとき、変圧器の1次側電圧 V_{n1} は(1)式から求めることができます。Mode A のとき、 V_{n1} は D_2 が導通しているため(2)式で求めることができます。

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

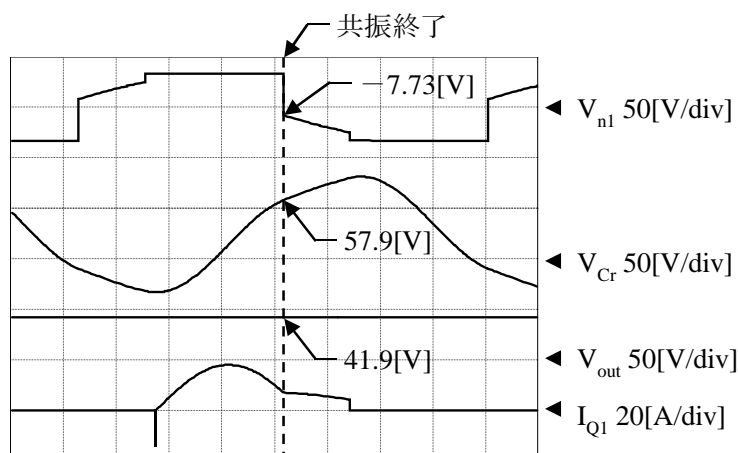
$$V_{n1} = -V_{out} \times \frac{n_1}{n_2} \dots \dots (2) \text{式}$$

(1)式、(2)式を実際の波形を用いて確認します。図 16 がソフトスイッチング成立時 (Mode 2) の波形、図 17 がソフトスイッチング不成立時 (Mode A) の波形です。

図 16 の I_{Q1} は図 9(b) の I_{Q1} と同様の波形でありソフトスイッチング成立時の波形です。Mode 2 の動作となる共振終了時の各部電圧値および図 4 に示した各回路定数を(1)式に代入すると以下のようになります。

$$V_{n1} = (V_{in} - V_{Cr}) \times \frac{L_m}{L_r + L_m} = (48 - 57.9) \times \frac{23.2 \times 10^{-6}}{6.98 \times 10^{-6} + 23.2 \times 10^{-6}} = -7.61 [\text{V}]$$

共振終了時の V_{n1} 電圧 $-7.73[\text{V}]$ とほぼ同じとなるため(1)式が妥当であると確認できます。



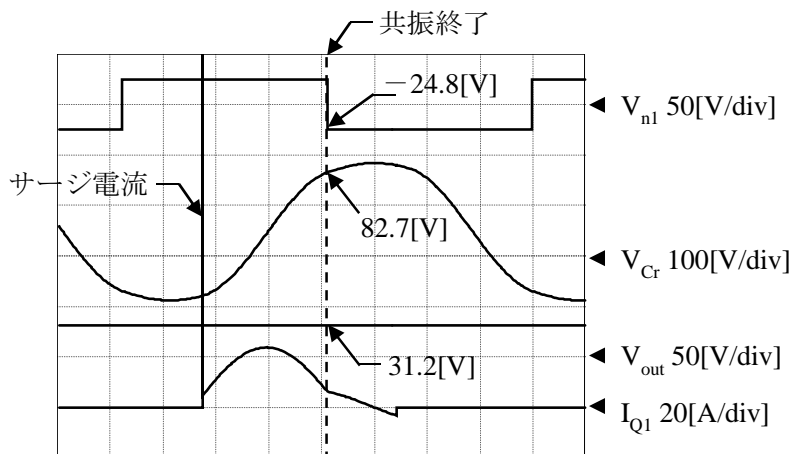
($R_o=8[\Omega]$ 、 $f_{sw}=43[\text{kHz}]$ 、 $3[\mu\text{sec}/\text{div}]$) (◀は GND を表す)

図 16 ソフトスイッチング成立時のシミュレーション波形

図 17 は I_{Q1} のサージからわかるようにソフトスイッチング不成立時（過負荷時）の波形です。はじめに説明したように負荷が重くなることでソフトスイッチングが不成立となることが確認できます。Mode A の動作となる共振終了時の各部電圧値および図 4 に示した各回路定数を(2)式に代入すると以下のようになります。

$$V_{n1} = -V_{out} \times \frac{n_1}{n_2} = -31.2 \times \frac{10}{13} = -24[\text{V}]$$

共振終了時の V_{n1} 電圧 $-24.8[\text{V}]$ とほぼ同じとなるため(2)式が妥当であると確認できます。



($R_o=4[\Omega]$ 、 $f_{sw}=43[\text{kHz}]$ 、 $4[\mu\text{sec}/\text{div}]$) (◀は GND を表す)

図 17 ソフトスイッチング不成立時のシミュレーション波形

ソフトスイッチングの成否の境界は(1)式と(2)式の大小関係で決定されます。なお、 $(V_{in}-V_{Cr})$ は負の値であるため絶対値で比較します。

$$\left| V_{in} - V_{Cr} \right| \times \frac{L_m}{L_r + L_m} < V_{out} \times \frac{n_1}{n_2} \cdots \cdots D_2 \text{は導通しない} \rightarrow \text{ソフトスイッチング成立}$$

$$\left| V_{in} - V_{Cr} \right| \times \frac{L_m}{L_r + L_m} > V_{out} \times \frac{n_1}{n_2} \cdots \cdots D_2 \text{が導通する} \rightarrow \text{ソフトスイッチング不成立}$$

■ピーク周波数とソフトスイッチング成立周波数が不一致となるメカニズム

以上で説明したように、ソフトスイッチングの成否は出力電圧 V_{out} の大小で決定されます。この理論では、出力電圧が最も高くなるピーク周波数でもソフトスイッチングは成立することになります。しかし、実際には上記で確認したようにピーク周波数とソフトスイッチング成立周波数は一致しません。不一致となる原因は共振終了時から FET_Q2 がターン ON するまでの時間にあります。ピーク周波数で LLC コンバータを動作させた際の波形を図 18 に示します。ピーク周波数では出力電圧が大

きいため共振終了直後 $\left| V_{in} - V_{Cr} \right| \times \frac{L_m}{L_r + L_m} < V_{out} \times \frac{n_1}{n_2}$ の関係が成立しソフトスイッチング成立時の動作

(Mode 2) となります。具体的に値を代入すると以下のようになり、上記の関係を確認することができます。

$$|V_{in} - V_{Cr}| \times \frac{L_m}{L_r + L_m} = |48 - 70.5| \times \frac{23.2 \times 10^{-6}}{6.98 \times 10^{-6} + 23.2 \times 10^{-6}} = 17.3[\text{V}]$$

$$V_{out} \times \frac{n_1}{n_2} = 46.9 \times \frac{10}{13} = 36.1[\text{V}]$$

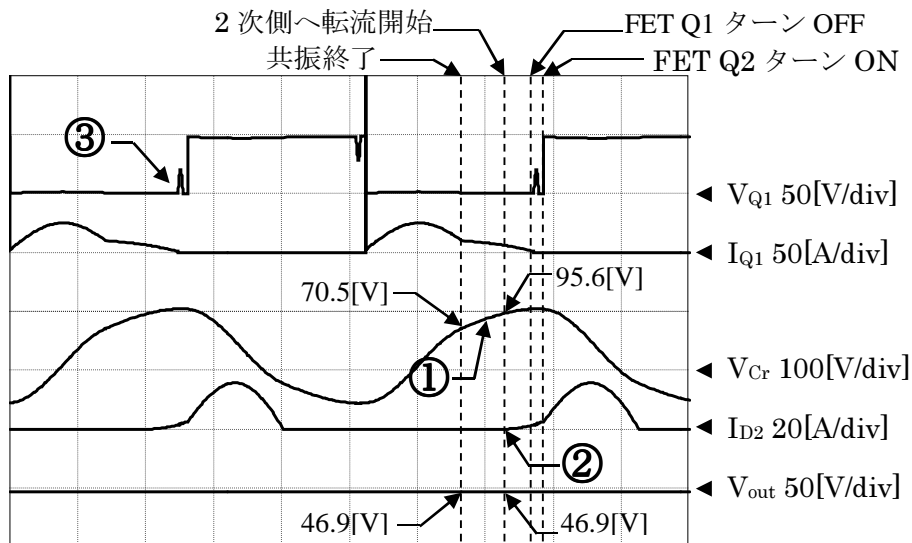
しかし、図 18 に示した波形からわかるように共振終了後も V_{Cr} は上昇を続けます (図 18_①点)。この上昇は Q_2 がターン ON するまで続きます。その結果、(1)式と(2)式の大小関係が逆転し $|V_{in} - V_{Cr}| \times \frac{L_m}{L_r + L_m} > V_{out} \times \frac{n_1}{n_2}$ の関係となります。具体的に、2 次側へ転流する時点での値を代入すると以下のようになり、この関係が成立していることを確認できます。

$$|V_{in} - V_{Cr}| \times \frac{L_m}{L_r + L_m} = |48 - 95.6| \times \frac{23.2 \times 10^{-6}}{6.98 \times 10^{-6} + 23.2 \times 10^{-6}} = 36.6[\text{V}]$$

$$V_{out} \times \frac{n_1}{n_2} = 46.9 \times \frac{10}{13} = 36.1[\text{V}]$$

この関係が成立すると励磁電流は 2 次側へ転流を開始します。これは図 18 に示した I_{D2} 波形から確認できます (図 18_②点)。励磁電流がすべて 2 次側へ転流するとソフトスイッチング不成立時の動作 (Mode B) となり、FET の出力容量を放電できないためソフトスイッチング不成立となります。

以上より、出力電圧 V_{out} が最も高くなるピーク周波数でもソフトスイッチング不成立となるメカニズムを解明できました。



($R_o=8[\Omega]$ 、 $f_{sw}=38.2[\text{kHz}]$ (ピーク周波数)、 $5[\mu\text{sec}/\text{div}]$ 、◀は GND を指す)

図 18 ピーク周波数時の各部シミュレーション波形

■ピーク周波数でソフトスイッチングが不成立となる場合分け

ソフトスイッチングは励磁電流がすべて 2 次側へ転流することで不成立となります。ピーク周波数で動作させた場合、共振終了後から Q_2 がターン ON するまでの時間が長い場合励磁電流がすべて 2 次側へ転流してしまいソフトスイッチング不成立となります。ここでは、ピーク周波数で動作時にソフトスイッチングが不成立となる場合を詳しく説明します。以下に、ソフトスイッチングが成立する際、動作モードがどのタイミングで切り替わるかを記載します。

Mode 2 C_r と L_r の共振終了後開始

Mode 3 Q_1 がターン OFF すると開始

Mode 4 FET の出力容量を充放電後開始

Mode 5 Q_2 がターン ON すると開始

<Mode 2 動作時に励磁電流がすべて 2 次側へ転流した場合>

Mode 2 動作時、つまり Q_1 がターン OFF するまでに励磁電流がすべて 2 次側へ転流した場合は Mode 1→Mode 2→Mode A→Mode B→Mode C→Mode D→Mode 5 と動作します。

<Mode 3 動作時に励磁電流がすべて 2 次側へ転流した場合>

Mode 3 動作時、つまり出力容量を充放電中に励磁電流がすべて 2 次側へ転流した場合は Mode 1→Mode 2→Mode A→Mode 3'→Mode 3'の逆充放電→Mode B→Mode C→Mode D→Mode 5 と動作します。Mode 3'は励磁電流がすべて 2 次側へ転流する前 (Mode A 動作時) に Q_1 がターン OFF することで発生します。Mode 3'の電流経路を図 19 に示します。Mode 3'では励磁電流が出力容量を充放電しつつ 2 次側へ転流しています。図 18 では励磁電流が出力容量の充放電を完了する前にすべて転流したため、 V_{Q1} 波形に③点のようなノイズが発生しました。

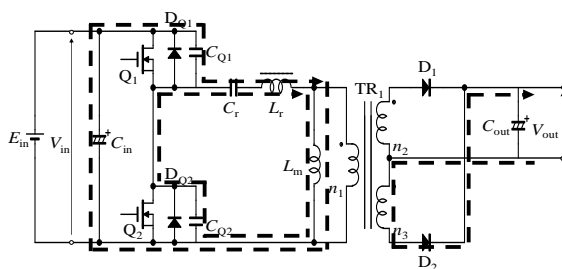


図 19 Mode 3' 電流経路

<Mode 4 動作時に励磁電流がすべて 2 次側へ転流した場合>

Mode 4 動作時、つまり Q_2 がターン ON するまでに励磁電流がすべて 2 次側へ転流した場合は Mode 1→Mode 2→Mode A→Mode 3'→Mode 4→Mode 3'の逆充放電→Mode B→Mode C→Mode D→Mode 5 と動作します。このとき、 V_{Q1} 波形には図 20 の①点に示したような振動が発生します。



($R_o=4[\Omega]$ 、 $f_{sw}=48.3[\text{kHz}]$ (ピーク周波数)、 $4.5[\mu\text{sec}/\text{div}]$ 、◀は GND を指す)

図 20 ピーク周波数時の各部シミュレーション波形(Mode 4 動作時に励磁電流がすべて転流)

以上がピーク周波数で動作時に発生しうる動作モードの推移です。いずれも励磁電流がすべて 2 次側へ転流しソフトスイッチングが不成立となります。

■ソフトスイッチング成立周波数で動作時の場合分け

ソフトスイッチング成立周波数で動作させた場合は共振終了後から FET_Q₂ がターン ON するまでの時間がピーク周波数よりも短く、励磁電流がすべて 2 次側へ転流する前に FET_Q₂ がターン ON するのでソフトスイッチングが成立します。ここでは、ソフトスイッチング成立周波数での動作を詳しく説明します。

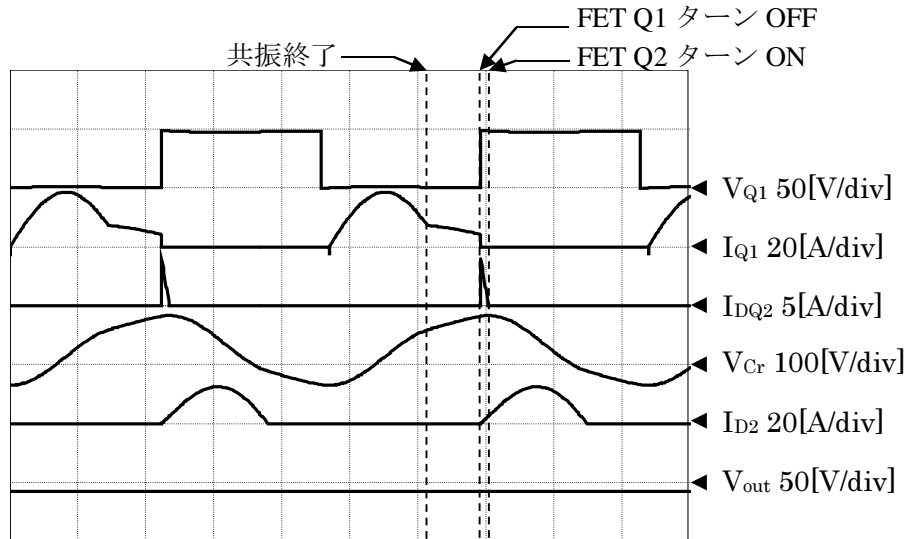
<転流時間がないとき>

転流時間がないときは図 11 で説明したソフトスイッチング成立時と同じく Mode 1→Mode 2→Mode 3→Mode 4→Mode 5 と動作します。ソフトスイッチング成立周波数での波形を図 21 に示します。

<転流時間があるとき>

Mode 2 動作時に $|V_{in} - V_{Cr}| \times \frac{L_m}{L_r + L_m} > V_{out} \times \frac{n_1}{n_2}$ の関係が成立すると励磁電流は 2 次側へ転流を開始します。しかし、転流時間が短いため励磁電流がすべて 2 次側へ転流せず、Mode 4 動作時に FET_Q₂ がターン ON します。その結果、Mode 1→Mode 2→Mode A→Mode 3'→Mode 4→Mode 5 と動作します。

以上より、ピーク周波数とソフトスイッチング成立周波数の不一致は励磁電流の転流時間が原因であるといえます。試作器の波形より得られた、励磁電流が 2 次側へ転流している時間を表 7 に示します。表 7 より、転流時間が長いことでソフトスイッチングが不成立となっていることが確認できました。



($R_o=8[\Omega]$ 、 $f_{sw}=42.6[\text{kHz}]$ (ソフトスイッチング成立周波数)、 $5[\mu\text{sec}/\text{div}]$ 、◀は GND を指す)

図 21 ソフトスイッチング成立周波数時の各部シミュレーション波形

表 7 転流時間

(a) ピーク周波数で動作

負荷抵抗 R_o [Ω]	2次側へ転流して いる時間 t [μsec]
20	1.3
18	2.6
16	1.7
14	1.8
12	1.4
10	2.8
8	2.6
6	2.8
4	2.2

(b) ソフトスイッチング成立周波数で動作

負荷抵抗 R_o [Ω]	2次側へ転流して いる時間 t [μsec]	動作モード
20	0	
18	0	
16	0	Mode 2→Mode 3→
14	0	Mode 4
12	0	
10	1	Mode 2→Mode A→
8	1.6	Mode 3'→Mode 4
6	0.2	
4	0.9	

■ピーク周波数とソフトスイッチング成立周波数が不一致となるメカニズムのまとめ
 本技術メモの内容をまとめると以下ようになります。

<ピーク周波数>

- ・ピーク周波数とは、各負荷で出力電圧がピークとなる周波数を指します。
- ・この周波数では、負荷にかかわらずハードスイッチングとなります。
- ・Mode 2 動作時に励磁電流がすべて 2 次側へ転流した場合
 Mode 1→Mode 2→Mode A→Mode B→Mode C→Mode D→Mode 5
- ・Mode 3 動作時に励磁電流がすべて 2 次側へ転流した場合 (図 18)
 Mode 1→Mode 2→Mode A→Mode 3'→Mode 3' の逆充放電→Mode B→Mode C→Mode D→Mode 5
- ・Mode 4 動作時に励磁電流がすべて 2 次側へ転流した場合 (図 20)
 Mode 1→Mode 2→Mode A→Mode 3'→ Mode 4→Mode 3' の逆充放電→Mode B→Mode C→Mode D→Mode 5

<ソフトスイッチング成立周波数>

- ・ソフトスイッチング成立周波数とは、各負荷でソフトスイッチングが成立する周波数を指します。
- ・この周波数は、ピーク周波数よりも高周波です。
- ・2 次側への転流時間がある場合
 Mode 1→Mode 2→Mode A→Mode 3'→Mode 4→Mode 5
- ・2 次側への転流時間がない場合 (図 21)
 Mode 1→Mode 2→Mode 3→Mode 4→Mode 5

<ピーク周波数とソフトスイッチング成立周波数が不一致となる理由>

- ・励磁電流が 2 次側へ転流している時間の長さが不一致となる原因です。
- ・励磁電流の 2 次側へ転流は p.12 に示した(1)式と(2)式の大小関係によって決定されます。

- ・ $|V_{in} - V_{Cr}| \times \frac{L_m}{L_r + L_m} < V_{out} \times \frac{n_1}{n_2}$ 励磁電流は転流しない。

- ・ $|V_{in} - V_{Cr}| \times \frac{L_m}{L_r + L_m} > V_{out} \times \frac{n_1}{n_2}$ 励磁電流は 2 次側へ転流する。

- ・共振終了時点では $|V_{in} - V_{Cr}| \times \frac{L_m}{L_r + L_m} < V_{out} \times \frac{n_1}{n_2}$ の関係が成立しているため励磁電流は転流しませ

んが図 18_①点で示したように V_{Cr} は Q_2 がターン ON するまで増加し続けます。その結果、大小関係が逆転し励磁電流は 2 次側へ転流を開始します。

・ソフトスイッチング成立周波数では転流時間が短いため、励磁電流がすべて 2 次側へ転流することはありませんがピーク周波数の場合は転流時間が長いため、励磁電流がすべて 2 次側へ転流してしまいます。その結果、ピーク周波数ではハードスイッチングとなります。

■参考文献

- [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] 平地克也、「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」、平地研究室技術メモ No.20150906
- [3] 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
- [4] Peter B. Green、「評価基板 IRPLLED5 IRS2548D 搭載の 40V/1.4A の低電圧 LED 駆動回路」、International Rectifier、アプリケーション・ノート AN-1169
- [5] 「LLC 電流共振ブリッジコンバータ制御 IC MCZ5203SE」、新電元工業株式会社、アプリケーションノート ver.1.0
- [6] Adnaan Lokhandwala、「IR1168 Dual SmartRectifier™ 制御 IC を使用した二次側整流の設計」、International Rectifier、アプリケーション・ノート AN-1139