平地研究室技術メモ No.20180407A

LLC 方式 DC/DC コンバータのデッドタイム設計方法

（読んでほしい人：パワエレ技術者）

2018/4/7 舞鶴高専 平地克也

2018/5/8　A 改訂

【あらまし】　LLC 方式 DC/DC コンバータ（LLC コンバータ）はソフトスイッチング実現のためにデッドタイム（DT）の調整が必要です。本技術メモではデッドタイムの役割、不適切な場合のソフトスイッチング失敗のメカニズム、適切なデッドタイムの計算方法を説明します。

■LLC 方式 DC/DC コンバータのデッドタイムとソフトスイッチングの可否

LLC コンバータ（図１）は平地研究室技術メモ No. 20150501[1]で説明している「部分共振定番方式」でソフトスイッチングを実現しています。スイッチ素子 Q1,Q2 のターンオフ時のソフトスイッチングは、Q_1,Q_2 と並列のコンデンサ C_{Q1},C_{Q2} で実現されます。C_{Q1},C_{Q2} の充電に時間を要するので、Q_1,Q_2 電圧の立ち上がりが緩やかとなり、ZVS が実現します。Q_1,Q_2 が FET で電流があまり大きくなければ、C_{Q1}.C_{Q2} は Q_1,Q_2 の寄生容量だけで OK です。ターンオン時のソフトスイッチングは変圧器 TR_1 の励磁電流で C_{Q1},C_{Q2} の電荷を引き抜くことにより実現されます。この動作原理は平地研究室技術メモ No. 20140529[2]で説明していますが、概略は次の通りです。図２の電流径路図で説明します。

＜Mode 1-2＞　Q_1 がオンしており、Cr と Lr が共振し、2 次側に電力が供給されています。共振が終わって次の Mode に移行します。

＜Mode 2＞　Q_1 は引き続きオンしていますが、Cr と Lr の共振が終わったので、Q_1 の電流は励磁電流だけとなります。この状態で Q_1 がターンオフして次の Mode に移行します。

＜Mode 3＞　Q_1 がターンオフしても励磁電流は同じ大きさで流れ続けるので[3]、図示の経路で流れて C_{Q1} を充電、C_{Q2} を放電します。充放電が完了して次の Mode に移行します。

＜Mode 4＞　励磁電流はさらに流れ続けるので、D_{Q2} が導通します。この Mode の期間中に Q_2 がターンオンして ZVS が実現されます。

このように、Q_2 は Mode 4 の期間中にターンオンしなければならないので、Q_2 のターンオンは早すぎても遅すぎてもソフトスイッチング失敗となります。したがって、Q_1 のターンオフから Q_2 のターンオンまでの時間（これをデッドタイムという）を適切に設定する必要があります。

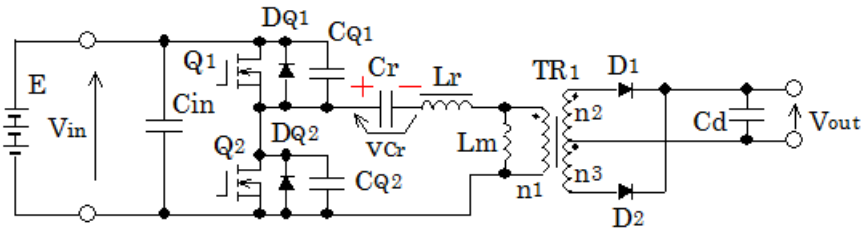


図１　LLC 方式 DC/DC コンバータ

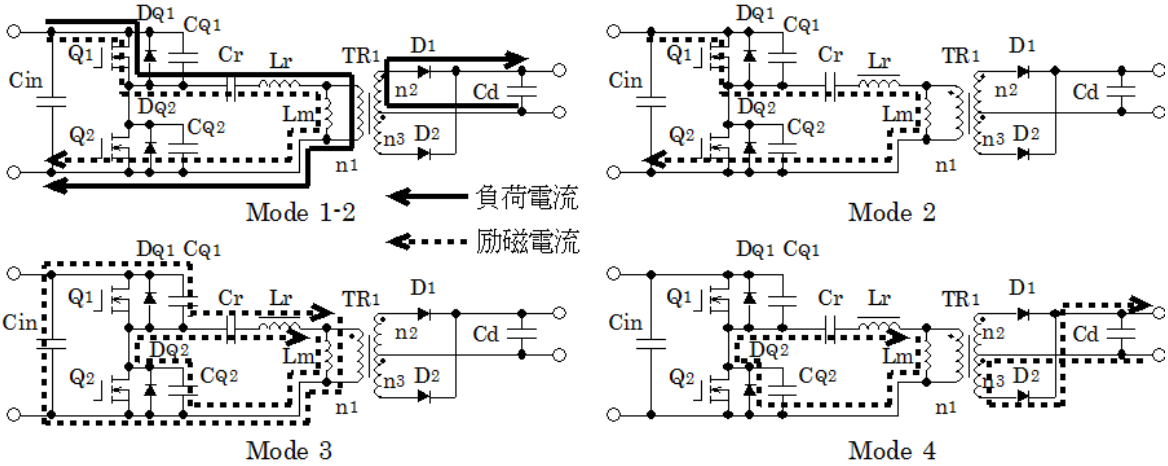


図２　Q_1 ターンオフから Q_2 ターンオンまでの動作モードと電流径路（文献[2]の図５より）

■ソフトスイッチング成功時と失敗時の波形

図３～６にソフトスイッチング成功時と失敗時のシミュレーション波形を示します。シミュレーション回路を図７、シミュレーション条件を表１に示します。シミュレーションソフトは SCAT です。

＜図３：デッドタイムが適切でソフトスイッチング成功＞

・Q_1 がターンオフして Q_1 電流が流れ終わっています‥‥図３の①

・C_{Q1} が充電されて Q_1 電圧が上昇しています（Mode 3 に該当）‥‥図３の②

・D_{Q2} が導通しています（Mode 4 に該当）‥‥図３の③

・次に、Q_2 がターンオンして励磁電流は D_{Q2} から Q_2 に転流します。D_{Q2} 電流が流れ終わった時刻が Q2 がターンオンした時刻です。

・Q_1 のターンオフ時、Q_1 電圧はゆっくり上昇しており（図３の②）、Q_1 のターンオフは ZVS となっています。

・Q_2 は D_{Q2} が導通した後でターンオンするので Q_2 のターンオンも ZVS です。

・図３には示していませんが、Q_1 のターンオンと Q_2 のターンオフも同様に ZVS です。

＜図４：デッドタイムが小さすぎてソフトスイッチング失敗＞

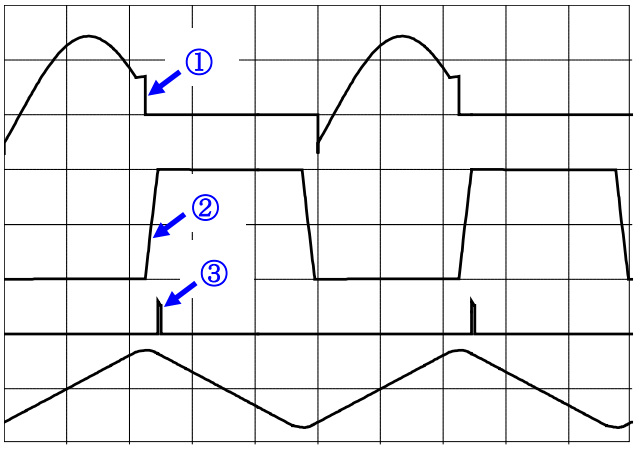
・Q_1 がターンオフして Q_1 電流が流れ終わっています‥‥図４の①

・C_{Q1} が充電されて Q_1 電圧が上昇しています（Mode 3 に該当）‥‥図４の②

・デッドタイムが小さ過ぎ、C_{Q1} の充電完了前に Q_2 がターンオンして Q_1 電圧が瞬時に 400V に上昇しています‥‥図４の③

・Q_1 のターンオン時も同様の現象が発生しており、図４から確認できます。励磁電流による CQ1 の放電の途中で Q_1 がターンオンしており、Q_1 電圧がいきなり 0V になっています‥‥図４の④

・図４の⑤の大きなサージ電流は、Q_1 ターンオン時の C_{Q1} の短絡電流です。



Q1 電流 1A/div

Q1 電圧 200V/div

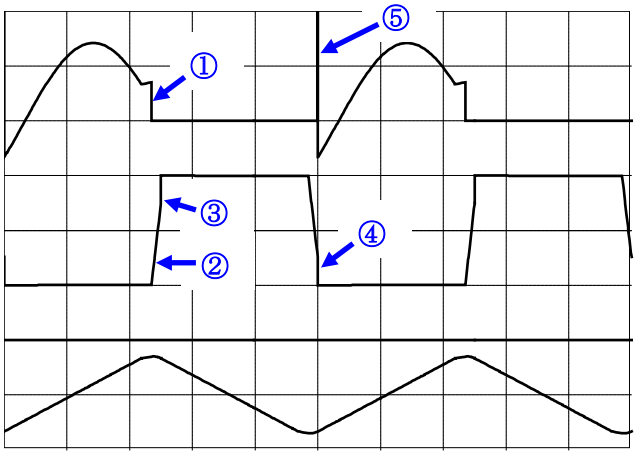
DQ2 電流 1A/div

Lm 電流 1A/div

（励磁電流）

図 3
デッドタイム適切
（DT＝5%）
f＝70kHz、fr＝80kHz
Vin＝400V
Vout＝21.1V
Iout＝7.03A

（2.857 μ sec/div）



Q1 電流 1A/div

Q1 電圧 200V/div

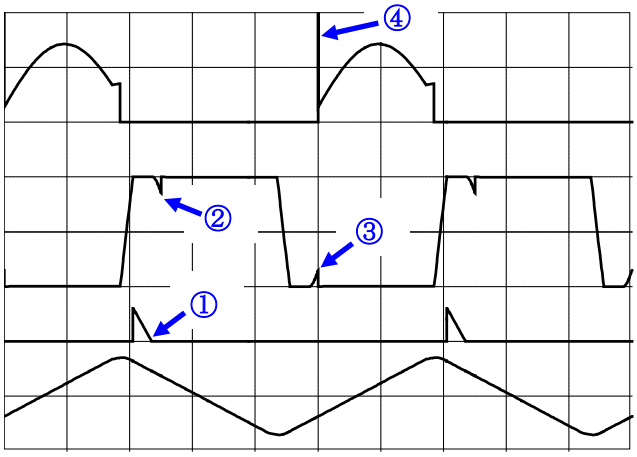
DQ2 電流 1A/div

Lm 電流 1A/div

（励磁電流）

図 4
デッドタイム小
（DT＝3%）
f＝70kHz、fr＝80kHz
Vin＝400V
Vout＝21.1V
Iout＝7.03A

（2.857 μ sec/div）



Q1 電流 1A/div

Q1 電圧 200V/div

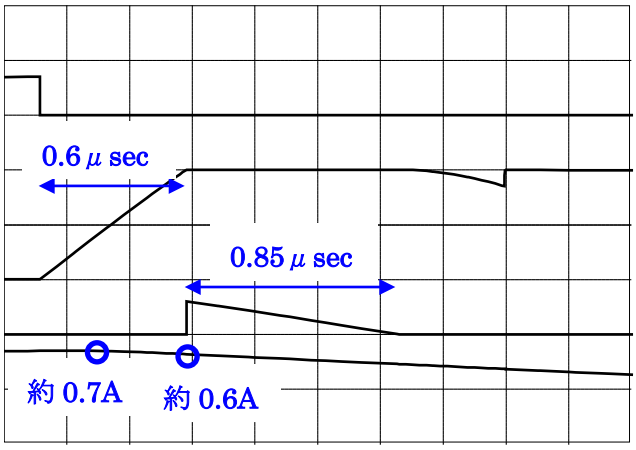
DQ2 電流 1A/div

Lm 電流 1A/div

（励磁電流）

図 5
デッドタイム大
（DT＝13%）
f＝70kHz、fr＝80kHz
Vin＝400V
Vout＝21.0V
Iout＝7.00A

（2.857 μ sec/div）



Q1 電流 1A/div

Q1 電圧 200V/div

DQ2 電流 1A/div

Lm 電流 1A/div

（励磁電流）

図 6
デッドタイム大
（DT＝13%）
Q1 ターンオフ時拡大
f＝70kHz、fr＝80kHz
Vin＝400V
Vout＝21.0V
Iout＝7.00A
（0.25 μ sec/div）

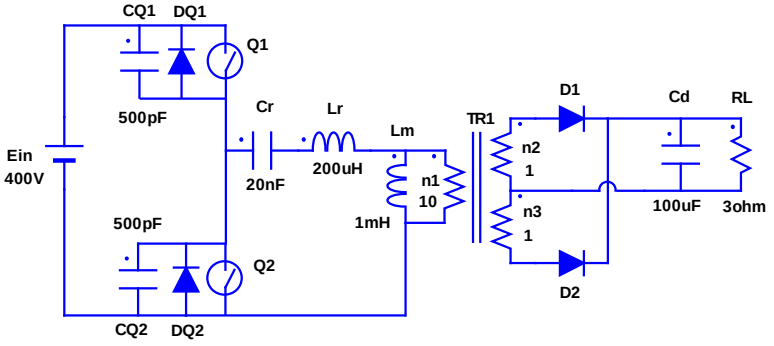


図７　シミュレーション回路

表１　シミュレーション条件

入力電圧　Vin	400V
負荷抵抗　RL	3Ω
動作周波数　f	70kHz
共振周波数　fr	80kHz
変圧比　n1：n2：n3	10：1：1

＜図５：デッドタイムが大きすぎてソフトスイッチング失敗＞

・Mode 4 まで（D_{Q2} が導通するまで）は図３と同じです。

・しかし、デッドタイムが大きすぎて、Q2 がターンオンする前に D_{Q2} 電流が流れ終わっています
　‥‥図５の①

・D_{Q2} 電流が流れ終わると同時に C_{Q1} の放電が始まり、Q_1 電圧が低下しています‥‥図５の②
　これは、励磁電流が全て 2 次側に転流し、その後 C_{Q1} の放電と C_{Q2} の充電が開始されたためです。
　このときの電流径路を図８に示します。

・逆に Q_2 のターンオフ時は Q_1 電圧が上昇します‥‥図５の③
　この状態で Q_1 がターンオンするので、C_{Q1} が短絡されて Q_1 に大きなサージ電流が発生します
　‥‥図５の④

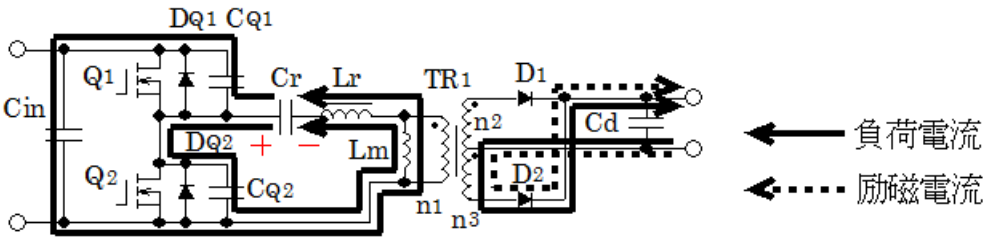


図８　C_{Q1} の放電と C_{Q2} の充電の電流径路

＜図６：図５の Q_1 ターンオフ時の拡大波形＞

・図６は図５の Q_1 ターンオフ時を拡大したものです。次のことがわかります。

・C_{Q1},C_{Q2} の充放電時間は約 0.6μsec

・C_{Q1},C_{Q2} 充放電時の励磁電流は約 0.7A
・D_{Q2} の導通時間は約 0.85μsec
・したがって、デッドタイムの適切な時間は 0.6μsec～1.45μsec となります。
動作周波数は 70kHz なので、1 周期は 14.29μsec であり、適切なデッドタイムは 4.2%～10.1%となります。（0.6μsec÷14.29μsec＝4.2%、1.45μsec÷14.29μsec＝10.1%）

■各動作モードの等価回路と成立する式

デッドタイムの適切な設計には Mode 3 と Mode 4 の継続時間の見積もりが必要です。Mode 3 では励磁電流で C_{Q1},C_{Q2} を充放電しますが、この間励磁電流の大きさはほぼ一定なので、励磁インダクタンスは定電流源とみなすことができます。Cr と Lr は電流の大きさに影響を与えないので無視します。したがって、Mode 3 の等価回路として図 9 (a)を得ます。定電流 I_{Lm} が 1/2 に分流し、C_{Q1} を充電し、C_{Q2} を放電します。充放電の結果、C_{Q1} の電圧 v_{CQ1} は 0 から Vin に変化し、C_{Q2} の電圧 v_{CQ2} は Vin から 0 に変化します。(b)のように書き替えると C_{Q1} 電圧の極性が逆転して 0 から－Vin への変化となります。(b)から C_{Q1} 電圧に Vin を加算して C_{Q1} 電圧の初期値を変更すると(c)を得ます。したがって、C_{Q1} と C_{Q2} は並列接続されて I_{Lm} で Vin から 0 まで放電されることと等価です。コンデンサ C を電流 I で ΔT の時間放電した時の電圧の変化量 ΔV（減少量）は次式で表されます。

$$\Delta V = \frac{1}{C} I \Delta T$$

よって、$\Delta T = C\dfrac{\Delta V}{I}$

図 9 (c)では、$T_3 = (C_{Q1} + C_{Q2})\dfrac{V_{in}}{I_{Lm}}$ ・・・・ (1)

T_3 は Mode 3 の継続時間です。それぞれの値は次の通りです。

Vin＝400V、I_{Lm}≒0.7A、T_3≒0.6μsec、C_{Q1}＋C_{Q2}＝500pF×2＝1000pF

(1)式に代入すると右辺は 0.57μsec となり、左辺 0.6μsec にほぼ一致します。

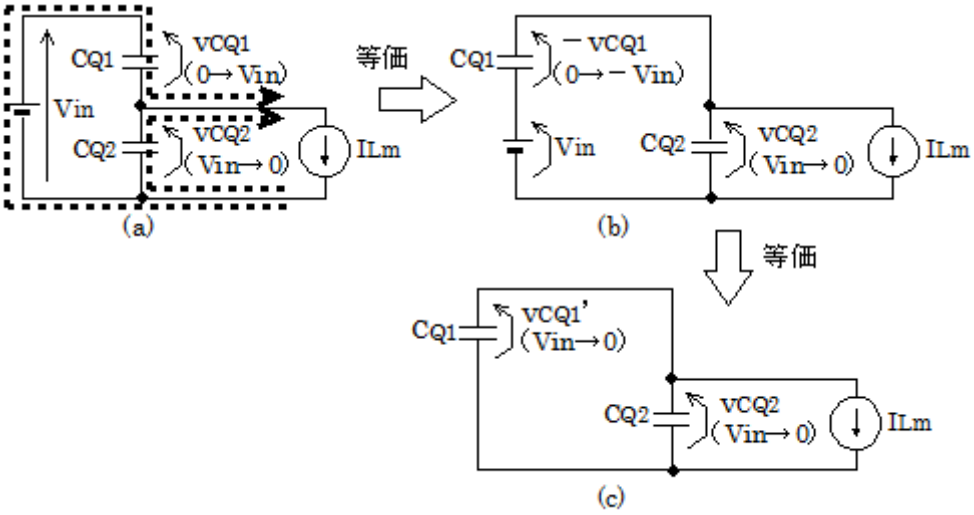


図 9　Mode 3 の等価回路

Mode 4 では図２に示すように、励磁電流の径路は Cr,Lr を通る１次側の径路と D_2 を通る２次側の径路があります。この期間中、Cr 電圧は大きくは変化しないので定電圧源と考え、励磁電流も大きくは変化しないので定電流源と考え、出力電圧 Vout は一定なので平滑コンデンサ Cd を定電圧源と考えると図１０の等価回路を得ます。Vout’は Vout の１次側換算値であり、Vout’＝Vout×(n_1／n_2)です。リアクトル L に ΔT の時間電流 V を印加した時の電流の変化 ΔI は次式で表されます[4]。

$$\Delta I = \frac{1}{L} V \Delta T$$

よって、$\Delta T = L\frac{\Delta I}{V}$

図１０では、$T_4 = Lr\frac{\Delta i_{Lr}}{v_{Lr}}$　・・・・　(2)

$v_{Lr} = v_{Cr} - Vout'$

T_4 は Mode 4 の継続時間、Δi_{Lr} は Mode 4 期間中の Lr 電流の変化量（減少量）であり、Mode4 開始時の励磁電流と同じ値です。通常 $v_{Cr} > Vout'$ であり、Mode 4 の期間中 Lr 電流 i_{Lr} は減少します。図６の場合、それぞれの値は次の通りです。

$\Delta i_{Lr} \fallingdotseq 0.6A$、$Lr = 200\mu H$、$T_4 \fallingdotseq 0.85\mu sec$、$v_{Cr} = 350V$、$Vout' = 21.0V \times 10 = 210V$

なお、v_{Cr} は図６には表示してません。これらの値を(2)式に代入すると、右辺は ~~0.595~~ 0.857 となり、左辺 ~~0.6~~ 0.85 とおおむね一致します。

このように、(1)式と(2)式を使うと Mode 3 と Mode 4 の継続時間 T_3 と T_4 を算出することができます。ただし、T_4 の計算には v_{Cr} と Δi_{Lr} の値が必要です。これらの値は主に Mode 1 と Mode 2 で決まり、計算も可能ですが、やや複雑です。T_4 の見積もりは実用的には計算よりもシミュレーションの方が良いでしょう。

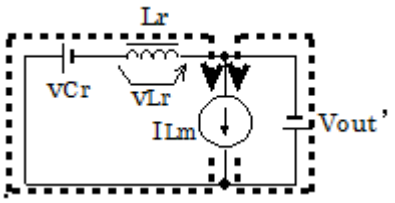


図１０　Mode 4 の等価回路

[1] 平地克也、「部分共振定番方式」、平地研究室技術メモ No. 20150501
[2] 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
[3] 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
[4] 平地克也、「リアクトル電流の考え方」、平地研究室技術メモ No.20080207

以上

A 改訂：6 頁中央付近誤記修正 0.595 → 0.857、0.6 → 0.85