平地研究室技術メモ　No.20090520

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

(読んでほしい人：パワエレ技術者)

2009/5/20 国立舞鶴高専 平地研究室
専攻科 2 年 田中孝明

1　はじめに

アクティブクランプ方式 1 石フォワード形 DC/DC コンバータは簡単な回路構成で容易にソフトスイッチングできるとされており、広く用いられている。しかしながら実際にはソフトスイッチングを実現するには変圧器の設計などに工夫が必要との指摘もある。我々は本回路方式の動作を詳細に検討し、主スイッチ素子ターンオン時に変圧器の励磁電流が 2 次側に転流する現象を発見し、その現象の結果通常の設計ではソフトスイッチングが実現できないことを確認した (1)。そこで、ソフトスイッチングを実現するために変圧器に要求される条件を解析的に明かにし、シミュレーションと実験でその正しさを確認した (2)。そしてその条件を用いて Excel のワークシートで「ソフトスイッチング成立判別シート」を作成し、ホームページで公開した (3)。

本論文では文献 (2) で導出し、文献 (3) の計算に用いているソフトスイッチング成立の条件式の導出過程を詳細に説明する。本論文は文献 (2)(3) を補完するものであり、本論文を読む前にこれらの論文を読んでいただくことを希望する。

(1) 中西剛士、平地克也、「アクティブクランプ方式 DC/DC コンバータの動作解析」、パワーエレクトロニクス学会誌、Vol.33, pp.227, 2008

(2) 田中孝明、平地克也、「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検討」、電気学会半導体電力変換研究会資料、SPC09-6, pp.31-36, 2009

(3) 田中孝明、「アクティブクランプ方式 1 石フォワード型 DC/DC コンバータのソフトスイッチング成立判別シート」、平地研究室技術メモ No.20081219

2　ソフトスイッチング成立の条件 (エネルギー) の導出過程

2.1　成立条件 1

$V_{\mathrm{C1}} = 0$ になるまでに mode9 へ移行しないことをエネルギー保存の法則に従い保障する条件式の導出を行う．励磁電流 < 負荷電流　の場合は V_{C1} が V_{in} から 0 に低下する時点まで，リーケージインダクタンス $\mathrm{L_l}$ にエネルギーが蓄積されていればよい．よって，このときのエネルギーがスナバコンデンサ C1 に充電されているエネルギーより大きければソフトスイッチングを実現できる（エネルギーの概念のみで考えた場合）．この条件が式 (1) である．

$$C_1 V_{in}^2 < L_l I_{n_1}(T_1)^2 \qquad ※\ I_{\mathrm{n1}}(T1) \text{ は時間 } T1 \text{ に 1 次側を流れている電流.} \tag{1}$$

励磁電流 > 負荷電流　の場合も mode9 へ移行しないことが条件となるが，それを言い換えると還流ダイオード D4 が on するまでに $V_{\mathrm{C1}} = 0$ となればよい（励磁電流が負荷電流の値まで転流し D4 が on した後でもソフトスイッチングを実現できる可能性はあるが，この時の条件は次節で述べる）．V_{C1} が V_{in} から 0 に低下するまでの間に $\mathrm{L_l}$ が放出するエネルギーは,

$$\frac{1}{2}L_l\left[I_{n_1}(T_1)^2 - \left\{I_L\frac{n_2}{n_1} + I_{n1}\right\}^2\right] = \frac{1}{2}L_l I_L\frac{n_2}{n_1}\left\{2I_{n_1}(T_1) + I_L\frac{n_2}{n_1}\right\} \qquad ※\ I_{\mathrm{L}} \text{は負荷電流.} \tag{2}$$

である．式 (2) がスナバキャパシタ C1 に蓄えられているエネルギー量より大きければ電荷を完全に放電できる（エネルギーの概念のみで考えた場合）．よって，境界条件は式 (3) のように導出できる．

$$C_1 V_{in}^2 < -L_l I_L \frac{n_2}{n_1}\left\{2I_{n_1}(T_1) + I_L \frac{n_2}{n_1}\right\} \tag{3}$$

2.2 成立条件 2

本条件では，L_l の値が小さい場合でも励磁電流が負荷電流より大きい場合は V_{C1} が V_{in} 以下にまで放電されても，励磁電流の余剰分が引き続き 1 次側を流れる為，本電流により放電状態を維持できる．この状態が C1 の放電完了まで維持できる場合に，ソフトスイッチングを実現できるが，それをエネルギーの観点から保障する．つまり，(2) に示したエネルギー量と，その後に一次側を流れる励磁電流が 0 になるまでに L_l と L_m が放出するエネルギー量の和が C1 に充電されたエネルギー量より大きければよい．

$$\begin{aligned} C_1 V_{in}^2 &< \frac{1}{2}L_l\left[I_{n_1}(T_1)^2 - \left\{I_L\frac{n_2}{n_1} + I_{n1}\right\}^2\right] + \frac{1}{2}(L_m + L_l)\left\{I_L\frac{n_2}{n_1} + I_{n1}(T1)\right\}^2 \\ \therefore C_1 V_{in}^2 &< L_l I_{n_1}(T_1)^2 + L_m\left\{I_{n_1}(T_1) + I_L\frac{n_2}{n_1}\right\}^2 \end{aligned} \tag{4}$$

3 回路方程式とその解

3.1 mode7（補助スイッチターンオフからスナバキャパシタの電圧が V_{in} にまで低下する区間）

この時の等価回路を Fig.1 に示す。

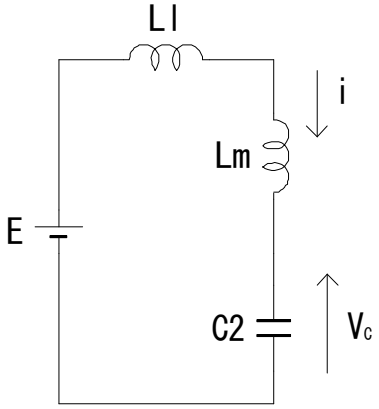

Fig. 1: Equivalent circuit

3.1.1 回路方程式

Fig.1 より、

$$\begin{cases} i &= C_2\frac{dV_C}{dt} \\ (L_m + L_l)\frac{di}{dt} &= E - V_C \end{cases} \tag{5}$$

(5) をまとめる。

$$(L_m + L_l)C_2\frac{d^2V_C}{dt^2} = E - V_C$$

$$\frac{\mathrm{d}^2V_C(t)}{\mathrm{d}t^2} + \frac{V_C(t)}{(Lm+L_l)C_2} = \frac{E}{(Lm+L_l)C_2} \tag{6}$$

(6) の一般解を求める。

(特性方程式)

$$\begin{aligned} r^2 + \frac{1}{A} &= 0 \\ \therefore r &= \pm j\frac{1}{\sqrt{A}} \Longleftarrow (\text{複素数解}) \end{aligned} \tag{7}$$

※簡単のため $A = C_2(Lm + L_l)$ とおいた。

(7) より、(6) の一次独立な解 V_{C1}、V_{C2} を次のように定義する。

$$V_{C1} = \cos\frac{1}{\sqrt{A}}t \tag{8}$$

$$V_{C2} = \sin\frac{1}{\sqrt{A}}t \tag{9}$$

(特殊解 $\psi(t)$ を求める。)

(6) の特殊解 $\psi(t)$ を定数変化法を用いて求める。まず、特殊解の形を次のように定義する。

$$\psi(t) = u_1(t)V_{C1}(t) + u_2(t)V_{C2}(t) \tag{10}$$

$$\dot{u}_1(t) = -\frac{\frac{E}{A}V_{C2}(t)}{W[V_{C1}, V_{C2}](t)} \tag{11}$$

$$\dot{u}_2(t) = \frac{\frac{E}{A}V_{C1}(t)}{W[V_{C1}, V_{C2}](t)} \tag{12}$$

$$\begin{aligned} W[V_{C1}, V_{C2}](t) &= V_{C1}\dot{V}_{C2} - \dot{V}_{C1}V_{C2} \\ &= \frac{1}{\sqrt{A}}[\cos^2\frac{1}{\sqrt{A}}t + \sin^2\frac{1}{\sqrt{A}}t] \\ &= \frac{1}{\sqrt{A}} \end{aligned} \tag{13}$$

(11) を積分

$$\int \dot{u}_1(t)dt = -\frac{E\sqrt{A}}{A}\int \sin\frac{1}{\sqrt{A}}tdt = E\cos\frac{1}{\sqrt{A}}t \tag{14}$$

(12) を積分

$$\int \dot{u}_2(t)dt = \frac{E\sqrt{A}}{A}\int \cos\frac{1}{\sqrt{A}}tdt = E\sin\frac{1}{\sqrt{A}}t \tag{15}$$

(14)(15) を (10) に代入

$$\psi(t) = E\{\cos^2\frac{t}{\sqrt{A}} + \sin^2\frac{t}{\sqrt{A}}\} = E \tag{16}$$

(一般解 $V_C(t)$ と $i(t)$)
(8)(9)(16) より、

$$V_C(t) = M\cos\frac{t}{\sqrt{A}} + N\sin\frac{t}{\sqrt{A}} + E \tag{17}$$

※ M、N は定数
(5)(17) より、

$$i(t) = -\frac{C_2 M}{\sqrt{A}}\sin\frac{t}{\sqrt{A}} + \frac{C_2 N}{\sqrt{A}}\cos\frac{t}{\sqrt{A}} \tag{18}$$

(M・N の導出)
初期条件 (t=0 の時、V_C=V_S) を (17) に代入

$$\begin{aligned} V_\mathrm{S} &= M + E \\ \therefore M &= V_\mathrm{S} - E \end{aligned} \tag{19}$$

初期条件 (t=0 の時、i=I_S) を (18) に代入

$$\begin{aligned} I_\mathrm{S} &= \frac{C_2 N}{\sqrt{A}} \\ \therefore N &= -\frac{I_\mathrm{S}\sqrt{A}}{C_2} \end{aligned} \tag{20}$$

($V_C(t)$・$i(t)$ の導出)
(19)(20) → (17)

$$V_\mathrm{C}(t) = (V_S - E)\cos\frac{t}{\sqrt{C_2(L_m + L_l)}} + \frac{I_S\sqrt{L_m + L_l}}{\sqrt{C_2}}\sin\frac{t}{\sqrt{C_2(L_m + L_l)}} + E \tag{21}$$

(19)(20) → (18)

$$i(t) = -(V_\mathrm{S} - E)\frac{C_2}{\sqrt{L_\mathrm{m} + L_\mathrm{l}}}\sin\frac{t}{\sqrt{C_2(L_m + L_l)}} - I_\mathrm{S}\cos\frac{t}{\sqrt{C_2(L_m + L_l)}} \tag{22}$$

3.1.2 次の状態の初期条件の導出

次の状態の初期時間 t_1 では、V_C =E である。これらの条件を (21)(22) に代入し、この時の電流 i_1 と t_1 を求める。
(t_1 の導出)
(21) より、

$$\begin{aligned} V_C \quad = E &= (V_\mathrm{S} - E)\cos\frac{t_1}{\sqrt{A}} + \frac{I_\mathrm{S}\sqrt{A}}{C_2}\sin\frac{t_1}{\sqrt{A}} + E \\ -\frac{\sin\frac{t_1}{\sqrt{A}}}{\cos\frac{t_1}{\sqrt{A}}} &= \frac{(V_\mathrm{S} - E)C_2}{I_\mathrm{S}\sqrt{A}} \\ -\tan\frac{t_1}{\sqrt{A}} &= \frac{(V_\mathrm{S} - E)C_2}{I_\mathrm{S}\sqrt{A}} \end{aligned}$$

$$\therefore t_1 = -\sqrt{A}\tan^{-1}\frac{(V_\mathrm{S}-E)C_2}{I_\mathrm{S}\sqrt{A}} \tag{23}$$

$$\therefore T_1 = -\sqrt{C_2(L_m+L_l)}\tan^{-1}\frac{(V_\mathrm{S}-E)C_2}{I_\mathrm{S}\sqrt{A}} \quad [\mathrm{sec}] \tag{24}$$

($I_{\mathrm{n1}}(T1)$ の導出)
(24) → (22)

$$\begin{aligned} I_{\mathrm{n1}}(T1) &= -\frac{C_2(V_\mathrm{S}-E)}{\sqrt{A}}\sin\frac{-\sqrt{A}\tan^{-1}\frac{(V_\mathrm{S}-E)C_2}{I_\mathrm{S}\sqrt{A}}}{\sqrt{A}} - I_\mathrm{S}\cos\frac{-\sqrt{A}\tan^{-1}\frac{(V_\mathrm{S}-E)C_2}{I_\mathrm{S}\sqrt{A}}}{\sqrt{A}} \\ &= -R\left[\frac{\frac{C_2(V_\mathrm{S}-E)}{\sqrt{A}}}{R}\sin Q + \frac{I_\mathrm{S}}{R}\cos Q\right] \\ &= -R(\sin\theta\sin Q + \cos\theta\cos Q) \\ &= -R\cos(\theta - Q) \end{aligned}$$

※簡単のため、$R = \sqrt{\left\{\frac{C_2(V_S-E)}{\sqrt{A}}\right\}^2 + {I_S}^2}$
※簡単のため、$Q = \frac{\sqrt{A}\tan^{-1}\frac{(V_\mathrm{S}-E)C_2}{I_\mathrm{S}\sqrt{A}}}{\sqrt{A}}$ とおいた。
※簡単のため、$\theta = \tan^{-1}\frac{C_2(V_\mathrm{S}-E)}{\sqrt{A}I_S}$ とおいた。

$$\therefore I_{\mathrm{n1}}(T1) = -\sqrt{(I_\mathrm{S})^2 + \frac{C_2}{L_\mathrm{m}+L_\mathrm{l}}(V_\mathrm{S}-E)^2} \tag{25}$$

3.2 mode7 終わり〜9' 始まり (スナバキャパシタの電圧が V_{in} に低下してから還流ダイオードがオフするまでの区間)

Fig.2 に本動作区間における等価回路を示す。

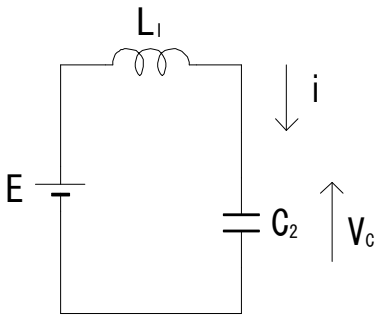

Fig. 2: Equivalent circuit

3.2.1 回路方程式

Fig.1,2 を比較すると、その違いは L_m の有無のみである。よって、Fig.2 における $V_C(t)$ と $i(t)$ は、(17)(18) より、

$$V_C(t) = M\cos\frac{t}{\sqrt{B}} + N\sin\frac{t}{\sqrt{B}} + E \tag{26}$$

$$i(t) = -\frac{C_2M}{\sqrt{B}}\sin\frac{t}{\sqrt{B}} + \frac{C_2N}{\sqrt{B}}\cos\frac{t}{\sqrt{B}} \tag{27}$$

※簡単のため、$B = C_2 L_l$ とおいた。
※ M・N は定数

(M・N の導出)
初期条件 (t=0 の時、V_C=E) を (26) に代入

$$E = M + E$$
$$\therefore M = 0 \tag{28}$$

初期条件 (t=0 の時、i=I_1) を (27) に代入

$$-R = \frac{C_2 N}{\sqrt{B}}$$
$$\therefore N = -\frac{R\sqrt{B}}{C_2} \tag{29}$$

($V_C(t)$・$i(t)$ の導出)
(28)(29) → (26)

$$\begin{aligned} V_C(t) &= -\frac{\sqrt{B}R}{C_2}\sin\frac{t}{\sqrt{B}} + E \\ &= I_{\mathrm{n1}}(T1)\sqrt{\frac{L_{\mathrm{l}}}{C_2}}\sin\frac{t}{\sqrt{B}} + E \end{aligned} \tag{30}$$

(28)(29) → (27)

$$\begin{aligned} i(t) &= -R\cos\frac{t}{\sqrt{B}} \\ &= I_{\mathrm{n1}}(T1)\cos\frac{t}{\sqrt{C_2 L_l}} \end{aligned} \tag{31}$$

3.2.2 次の状態の初期条件の導出

(1) 還流ダイオードに流れる電流 $i_{\mathrm{D}}(t)$ を求める．
還流ダイオードに流れる電流 $i_{\mathrm{D}}(t)$ が 0 となるまでは，励磁インダクタンスは無負荷である．なぜならば，スナバキャパシタの電圧が入力電圧にまで放電された後，励磁電流は徐々に 2 次側へ転流する．つまり，リーケージインダクタンスのエネルギー放出に伴い 1 次側を流れる電流 (この動作モードでは励磁電流) は徐々に減少するが，その減少分が 2 次側へ転流するのである．しかし，2 次側を流れることができる電流の最大値はチョークコイル L によりクランプされた負荷電流の値であり，それ以上の値の励磁電流は 2 次側へ転流できない．この状態において還流ダイオードに流れる電流が 0 となる．この時の時間 T2 を導出する．

$$\begin{aligned} I_{\mathrm{n1}}(T1) &= i(t) - (I_{\mathrm{L}} \times \frac{n_2}{n_1} - i_{\mathrm{D}}(t) \times \frac{n_2}{n_1}) \\ \therefore i_{\mathrm{D}}(t) &= \{I_{\mathrm{n1}}(T1) - I_{\mathrm{n1}}(T1)\cos\frac{t}{\sqrt{C_2 L_{\mathrm{l}}}} + I_{\mathrm{L}}\frac{n_2}{n_1}\}\frac{n_1}{n_2} \end{aligned} \tag{32}$$

(2) $i_{\mathrm{D}}(t)$=0 となる時間 T2
式 (32) に条件を代入

$$0 = I_{\mathrm{n1}}(T1)\left\{1 - \cos\frac{t}{\sqrt{C_2 L_{\mathrm{l}}}}\right\}\frac{n_1}{n_2} + I_{\mathrm{L}}$$

$$
\begin{aligned}
\frac{I_{\mathrm{L}} n_2}{I_{\mathrm{n1}}(T1) n_1} + 1 &= \cos \frac{t}{\sqrt{C_2 L_{\mathrm{l}}}} \\
\therefore T2 &= \sqrt{C_2 L_{\mathrm{l}}} \cos^{-1} \left\{ \frac{I_{\mathrm{L}} n_2}{I_{\mathrm{n1}}(T1) n_1} + 1 \right\}
\end{aligned} \tag{33}
$$

(3) $T2$ における電圧と電流を求める．
(33) → (30)，(31)

$$
V_C(T2) = I_{\mathrm{n1}}(T1) \sqrt{\frac{L_{\mathrm{l}}}{C_2}} \sin \frac{T2}{\sqrt{C_2 L_{\mathrm{l}}}} + E \tag{34}
$$

$$
i(T2) = I_{\mathrm{L}}(T1) \frac{n_2}{n_1} + I_{\mathrm{n1}}(T1) \tag{35}
$$

(4) $V_{\mathrm{C2}}(t) = 0$ になる時間 $T2'$ とその時の電流 $I_{\mathrm{n1}}(T2')$
(30) に条件を代入

$$
\begin{aligned}
0 &= I_{\mathrm{n1}}(T1) \sqrt{\frac{L_{\mathrm{l}}}{C_2}} \sin \frac{T2'}{\sqrt{C_2 L_{\mathrm{l}}}} + E \\
T2' &= \sin^{-1} \left\{ -\frac{E}{I_{\mathrm{n1}}(T1)} \sqrt{\frac{C_2}{L_{\mathrm{l}}}} \right\} \sqrt{C_2 L_{\mathrm{l}}} \qquad (36) \\
I_{\mathrm{n1}}(T2') &= I_{\mathrm{n1}}(T1) \cos \frac{T2'}{\sqrt{C_2 L_{\mathrm{l}}}} \qquad (37)
\end{aligned}
$$

3.3 mode9'（還流ダイオードがオフしてから，i=0 または V_{C}=0 になるまでの区間）

3.3.1 回路方程式

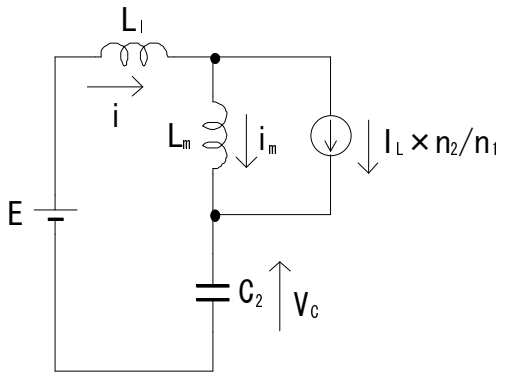

Fig. 3: Equivalent circuit

Fig.3 より

$$
\begin{cases}
i(t) = i_m(t) + I_L \times \frac{n_2}{n_1} \\
L_m \frac{di_m}{dt} = E - V_C(t) - L_l \frac{di}{dt} \\
i(t) = C_2 \frac{dV_C}{dt}
\end{cases} \tag{38}
$$

(38) をまとめる。

$$
L_m \frac{d}{dt} \left(C_2 \frac{dV_C}{dt} - I_L \frac{n_2}{n_1} \right) = E - V_C - L_l C_2 \frac{d^2 V_C}{dt^2}
$$

$$
\left(L_m C_2 + L_l C_2 \right) \frac{d^2 V_C}{dt^2} + V_C = E
$$

$$\frac{d^2V_C}{dt^2}+\frac{V_C}{C_2(L_m+L_l)}=\frac{E}{C_2(L_m+L_l)} \tag{39}$$

結局，(39) は (6) と等しい．よって，一般解 $V_C(t)$ と $i(t)$ は (17)(18) より，

$$V_C(t)=M\cos\frac{t}{\sqrt{A}}+N\sin\frac{t}{\sqrt{A}}+E \tag{40}$$

$$i(t)=-\frac{C_2M}{\sqrt{A}}\sin\frac{t}{\sqrt{A}}+\frac{C_2N}{\sqrt{A}}\cos\frac{t}{\sqrt{A}} \tag{41}$$

※ M、N は定数

(M・N の導出)

初期条件 (t=0 の時、$V_C=V_C(T2)$) を (40) に代入

$$\begin{aligned}\mathrm{V_C(T2)} &= M+E\\ \therefore M &= V_\mathrm{C}(T2)-E\end{aligned} \tag{42}$$

初期条件 (t=0 の時、$I=I_{n1}(T2)$) を (41) に代入

$$\begin{aligned}I_{n1}(T2) &= \frac{C_2N}{\sqrt{A}}\\ \therefore N &= \frac{I_\mathrm{n1}(T2)\sqrt{A}}{C_2}\end{aligned} \tag{43}$$

($V_\mathrm{C}(t)$・$i_\mathrm{n1}(t)$ の導出)

(42)(43) → (40)

$$V_\mathrm{C}(t) = \left\{V_\mathrm{C}(T2)-E\right\}\cos\frac{t}{\sqrt{A}}+I_\mathrm{n1}(T2)\sqrt{\frac{L_\mathrm{m}+L_\mathrm{l}}{C_2}}\sin\frac{t}{\sqrt{C_2(L_\mathrm{m}+L_\mathrm{l})}}+E \tag{44}$$

$$i(t) = -\left\{V_\mathrm{C}(T2)-E\right\}\sqrt{\frac{C_2}{L_\mathrm{m}+L\mathrm{l}}}\sin\frac{t}{\sqrt{A}}+I_\mathrm{n1}(T2)\cos\frac{t}{\sqrt{A}} \tag{45}$$

3.3.2 次の状態の初期値

$V_\mathrm{C}(t)=0$ となる時間 T_3' の導出 (ZVS)

$V_\mathrm{C}(t)=0$ → (44)

$$\therefore T3'=\sqrt{A}\left\{-\pi+\cos^{-1}\frac{-E}{\sqrt{I_\mathrm{n1}(T2)^2\frac{L_m+L_l}{C_2}+(E-V_\mathrm{C}(T2))^2}}+\tan^{-1}\frac{I_\mathrm{n1}(T2)\sqrt{\frac{L_\mathrm{m}+L_\mathrm{l}}{C_2}}}{V_\mathrm{C}(T2)-E}\right\} \tag{46}$$

3.4 mode10'(メインスイッチのボディーダイオードがオンしてから，$I_\mathrm{n1}=0$ になるまでの区間)

メインスイッチはボディーダイオード D1 により短絡されている．また，前動作モードまでに励磁電流は負荷電流と同じ値だけ 2 次側に転流している．よって，等価回路は入力電圧とリーケージインダクタンス $\mathrm{L_l}$，励磁インダクタンス $\mathrm{L_m}$ の 3 つを直列に接続した構成である．そして，初期値は前動作モードの電流の最終値 $I_{\mathrm{n}_1}(T3')$ でありこの等価回路に流れる電流が 0 となるまで，スナバキャパシタの放電状態を維持できる．この時間 T4' を導出する．

$$i_\mathrm{n1}(t) = \frac{E}{L_\mathrm{m}+L_\mathrm{l}}t+I_{\mathrm{n}_1}(T3') \tag{47}$$

I_{n1}=0 となる時間 $T4$'

$$T4' = -\frac{L_{\mathrm{m}} + L_{\mathrm{l}}}{E} I_{\mathrm{n1}}(T3') \tag{48}$$

3.5 リーケージインダクタンスが十分大きい場合にスナバコンデンサ放電完了を維持できる時間

メインスイッチはボディーダイオード D1 により短絡されている．また，励磁電流は全て 2 次側へ転流している為，励磁インダクタンスは無負荷状態である．よって，等価回路は入力電圧とリーケージインダクタンス $\mathrm{L_l}$ の 2 つを直列に接続した構成である．そして，初期条件は前動作モードの最終値 $I_{\mathrm{n1}}(T2')$ であり，本等価回路に流れる電流が 0 となるまで，スナバキャパシタ C1 の放電状態を維持できる．この時間 T23 を導出する．

$$i_{\mathrm{n1}}(t) \quad = \quad \frac{E}{L_{\mathrm{l}}} t + I_{\mathrm{n_1}}(T2') \tag{49}$$

I_{n1}=0 となる時間 $T23$

$$\therefore T23 = \frac{L_{\mathrm{l}}}{E} \left\{ -I_{n1}(T2') \right\} \tag{50}$$

4 まとめ

以上より，アクティブクランプ方式のソフトスイッチング成立の条件は以下の通りとなる．

4.1 成立条件 1

補助スイッチ Q2 ターンオフ後，C1 電圧が V_{in} まで低下し，さらに，リーケージインダクタンス $\mathrm{L_l}$ のエネルギー放出により，C1 は放電状態を維持する (mode8)．この時，$\mathrm{L_l}$ の値が十分大きければ，C1 電荷を完全に引き抜くことができる．このタイミングで Q1 のゲート信号がオンすれば，ZVS を実現できる．本現象を実現するには，C1 電荷を放電するエネルギー量とゲート信号をオンさせるタイミングが重要である．具体的には，C1 電圧が V_{in} にまで低下した時の励磁電流 $I_{n_1}(T_1)$ と負荷電流の大小関係に応じて (51) かつ (53)，または，(52) かつ (53) の不等式を満たせばよい．ただし，T_d は Q2 がオフしてから Q1 がオンするまでの時間である．

・$I_{n_1}(T_1) < I_L$ の場合

$$C_1 V_{in}^2 < L_l I_{n_1}(T_1)^2 \tag{51}$$

・$I_{n_1}(T_1) > I_L$ の場合

$$C_1 V_{in}^2 < -L_l I_L \frac{n_2}{n_1} \left\{ 2I_{n_1}(T_1) + I_L \frac{n_2}{n_1} \right\} \tag{52}$$

$$0 < T_d - T_1 - T_2' < T_{23} \tag{53}$$

4.2 成立条件 2

mode8 終了時に，励磁電流が負荷電流より大きい場合，mode9' に移行する．この時，1 次側を流れる励磁電流 $I_{L_m}(=I_{n_1})$ によって，C1 電荷は引き続き放電される．C1 電荷の放電完了後，Q1 がオンするまで I_{n_1} が流れ続けた場合，ZVS を実現できる．本現象を達成できる境界条件は (54) と (55) に示す不等式が成立する事である．

$$C_1 V_{in}^2 < L_l I_{n_1}(T_1)^2 + L_m \left\{ I_{n_1}(T_1) + I_L \frac{n_2}{n_1} \right\}^2 \tag{54}$$

$$0 < T_d - T_1 - T_2 - T_3' < T_4' \tag{55}$$

$$\begin{aligned}
T_1 &= -\sqrt{C_1(L_m + L_l)}\tan^{-1}\left(\frac{V_S - V_{in}}{I_S}\sqrt{\frac{C_1}{L_m + L_l}}\right) \\
T_2 &= \sqrt{C_1 L_l}\cos^{-1}\left(\frac{n_2 I_L}{-n_1\sqrt{I_S^2 + \frac{C_1}{L_m+L_l}(V_S - V_{in})^2}} + 1\right) \\
T_2' &= \sqrt{C_1 L_l}\sin^{-1}\left(-\frac{V_{in}}{I_{n_1}(T_1)}\sqrt{\frac{C_1}{L_l}}\right) \\
T_{23} &= \frac{L_l}{V_{in}}\left\{-I_{n_1}(T_2')\right\} \\
T_3' &= \sqrt{C_1(L_m + L_l)}\left\{\tan^{-1}\frac{I_{n_1}(T_2)\sqrt{\frac{L_m+L_l}{C_1}}}{V_{C_1}(T_2) - V_{in}} + \cos^{-1}\frac{-V_{in}}{\sqrt{(V_{C_1}(T_2) - V_{in})^2 + I_{n_1}(T_2)^2\frac{L_m+L_l}{C_1}}} - \pi\right\} \\
T_4' &= -I_{n_1}(T_3')\frac{L_m + L_l}{V_{in}}
\end{aligned}$$

※ V_S と I_S は補助スイッチ Q2 ターンオフ時のスナバキャパシタ C1 の電圧と電流