平地研究室技術メモ No.20191211

スイッチ素子ターンオフ時のサージ電圧発生メカニズム

（読んでほしい人：パワエレ技術者）

2019/12/11 舞鶴高専 平地克也

【あらまし】 ハードスイッチングの電力変換回路では、スイッチ素子のターンオフ時にサージ電圧が発生します。発生の原因は多くの場合、スイッチ素子近傍のインダクタンス成分の影響で、スイッチ素子の寄生容量が過大に充電されることによるものです。本技術メモでは昇圧チョッパを使って実験し、スイッチ素子ターンオフ時のサージ電圧発生メカニズムを詳しく検討します。

■昇圧チョッパの動作モードと電流径路

昇圧チョッパの回路構成を図１に示します。コンデンサ Cp はスイッチ素子 Q（FET）の寄生容量です。電圧・電流は矢印の方向を正の方向と定義します。図１には Q がオンの時（モード 1）とオフの時（モード 5）の電流径路も記入しています（モード 2,3,4 はターンオフ過渡時の動作モード）。Q がターンオフすると電流径路は実線から点線に急変し、その瞬間に Q のドレイン・ソース間にサージ電圧が発生します。サージ電圧の発生メカニズムはラインインダクタンスの誘導起電力を使って次のように説明されることが多いようです。

‥‥スイッチ素子 Q がターンオフすると Q→D→Cd→Q の径路の電流が急変する。その結果、この径路のラインインダクタンスに、電流の変化をさまたげる方向に大きな誘導起電力が発生し、それが Q に印加されてサージ電圧となる。サージ電圧抑制のためには Q→D→Cd→Q のループを極力小さくしてラインインダクタンスを小さくしなければならない。

このような説明も間違いではありませんが、誘導起電力を計算することは困難であり、サージ電圧を定量的に検討することはできません。サージ電圧の計算には、誘導起電力は使わず、Q のサージ電圧を Q の寄生容量 Cp の過充電と考え、Cp の充電過程の計算方法を検討する必要があります。

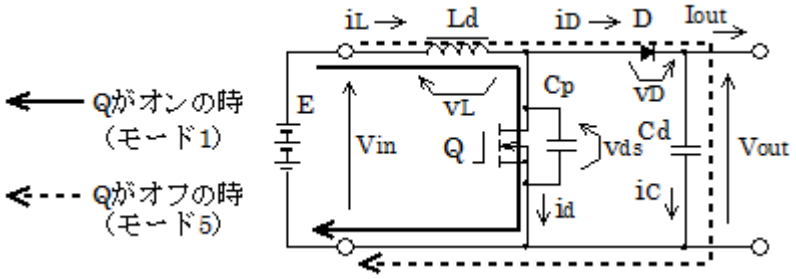
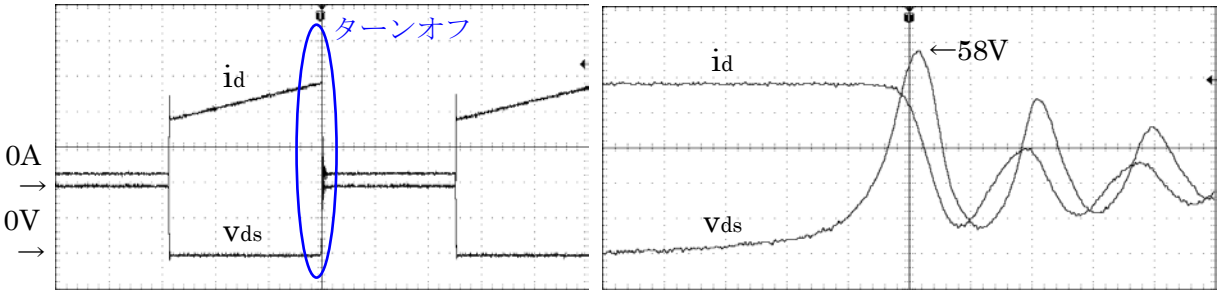


図１　昇圧チョッパの回路構成と電流経路

■サージ電圧の発生メカニズム

図２にスイッチ素子 Q（FET）の v_{ds} と i_d の実測波形を示します。(a)は全体の波形、(b)はターンオフ時の拡大波形です。ターンオフすると、v_{ds} は 0V から 24V に上昇しますが、過渡的に 58V まで上昇しています。これがサージ電圧であり、Q の寄生容量 C_p は最大 58V まで充電されていることを意味しています。



(a) 全体の波形（10μsec/div）　　(b)ターンオフ時の拡大波形（50nsec/div）

図２　スイッチ素子 Q（FET）の v_{ds} と i_d 波形（電圧：10V/div、電流 1A/div）

図３は図２(b)の波形をいったん表計算ソフト（Excel）に取り込み、表計算ソフトのグラフ作成機能を用いて描画させたものです。ただし、電流プローブには若干の応答遅れがあるので、i_d 波形を 6.4nsec だけ進めて（左にずらせて）います。電流プローブの応答遅れは条件によって変化するので、完全に正確な補正は困難ですが、ここでは他の実験結果からおおむね妥当と思われる 6.4nsec を一律に進めています。

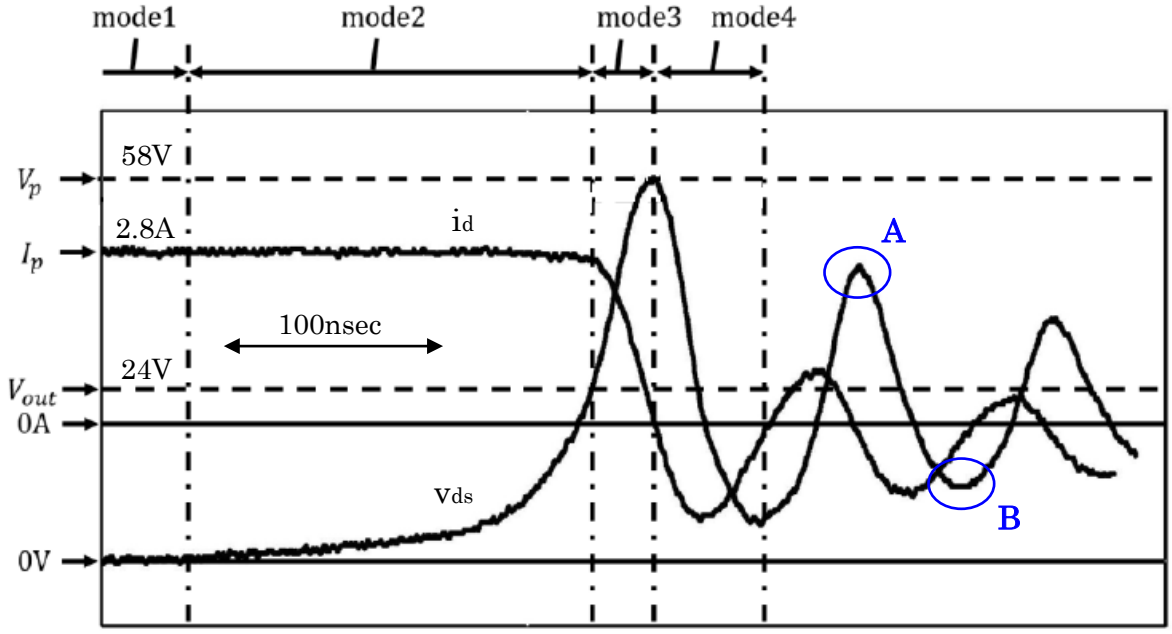


図３　ターンオフ時の FET の波形と動作モード（図２(b)より）

昇圧チョッパのターンオフの過渡時には、図３に示したように、モード 2,3,4 の 3 つの動作モードが発生します。図４に定常状態であるモード 1 と 5 も含めた 5 つの動作モードの電流経路を示します。それぞれの動作モードの概要は以下の通りです。

＜モード 1＞　定常状態（スイッチ素子オン時）

スイッチ素子 Q がオンしており、リアクトル L_d には電源電圧 V_{in} が印加されます。等価回路は図５(a)となります。次の式が成立します。

$v_L = V_{in}$

$$\Delta i_L = \frac{1}{L_d} V_{in} T \alpha$$ （T は Q のスイッチング周期、α は Q の通流率）

$$I_p = \frac{V_{out} I_{out}}{V_{in}} + \frac{1}{2} \Delta i_L$$

Δi_L はモード 1 期間の i_L の増加量です。
I_p はモード 1 終了時の L_d 電流の値で、L_d 電流のピーク値であり、図 3 では 2.8A です。

＜モード 2＞　ターンオフ過渡時

モード 1 においてスイッチ素子がターンオフするとモード 2 に移行します。ただし、スイッチ素子のターンオフは瞬時に行われることはなく、スイッチ素子が FET なら、チャンネルの抵抗値 R_{ch} が数 10nsec をかけて徐々に増加することによりターンオフを実現します。R_{ch} の増加に伴いスイッチ素子の電圧 v_{ds} は徐々に増加します。それに伴いスイッチ素子の寄生容量 C_p は充電されます。したがって、図 4 (b)に示すように L_d の電流 i_L は Q のチャンネルを通る電流と C_p を充電する電流 i_{Cp} に分流します。この時の等価回路を図 5 (b)に示します。なお、I_p は前記のようにモード 1 終了時の L_d 電流であり、ターンオフ過渡時のリアクトル L_d は定電流源 I_p とみなすことができます。

R_{ch} はやがて無限大となってチャンネルを流れる電流は 0A となり、C_p を充電する電流のみとなります。その状態を図 4 (c)に示します。R_{ch} が図 3 のどの時点で無限大となったか正確に判別することは困難ですが、無限大となるまでをモード 2-1、無限大となってからをモード 2-2 と呼ぶことにします。C_p が Vout まで充電されると次の動作モードに移行します。

＜モード 3＞　ターンオフ過渡時

C_p が Vout まで充電されると D の逆バイアスが解消され、D の電流 i_D が流れ始めます。この時の電流経路を図 4 (d)に示します。理論的には、D の逆バイアスが解消されれば i_{Cp} は瞬時に全て i_D に転流しますが、実際には i_D の電流経路には図 5 (c)の等価回路に示すようにインダクタンス成分 L_p と抵抗成分 R_p が存在するので、i_{Cp} から i_D への転流は徐々に行われます。したがって、図 4 (d)に示すように i_{Cp} と i_D の双方が流れます。この時、C_p は i_{Cp} により Vout 以上に充電され、v_{ds} のサージ電圧となります。サージ電圧がピークとなった時点で次のモードに移行します。

＜モード 4＞　ターンオフ過渡時

高電圧に充電された C_p が放電を開始します。電流経路を図 4 (e)に示します。この時の等価回路はモード 3 と同じく図 5 (c)となります。モード 3 とモード 4 は図 5 (c)の回路において C_p と L_p が共振している状態と考えられます。共振期間中はモード 3 とモード 4 が繰り返されます。共振電流はこの径路の抵抗成分 R_p のために徐々に減衰し、0.5 μsec 程度で共振が終了して定常状態に移行します。

＜モード 5＞　定常状態（スイッチ素子オフ時）

電流経路を図 4 (f)に示します。$v_L = V_{in} - V_{out}$ なので、v_L は負となり、i_L は徐々に減少します。

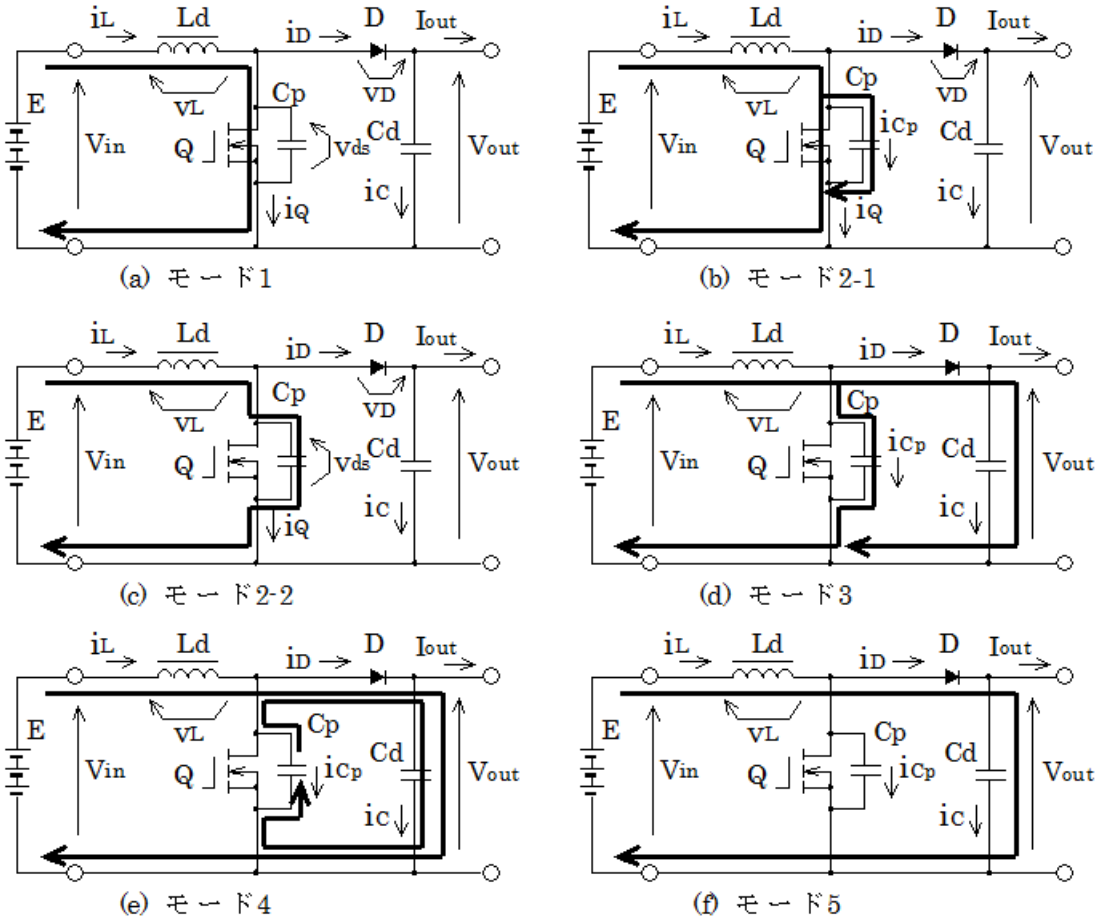


図４　各動作モードの電流径路

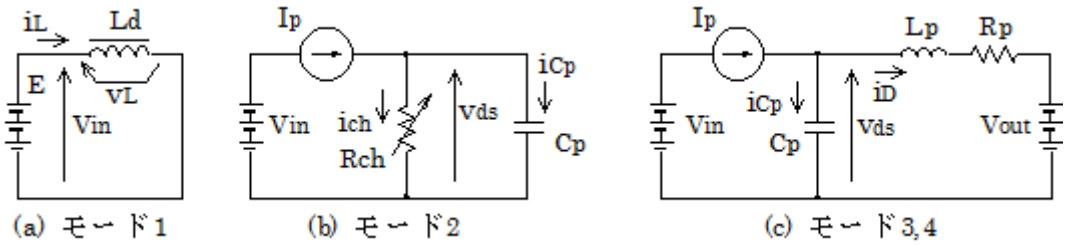


図５　各動作モードの等価回路

■ターンオフ過渡時の Vds の計算式

図５の等価回路からターンオフ過渡時の Vds の計算式は次のように求まります。

＜モード２＞

図５(b)より、

$$\mathrm{Ip}=\frac{v_{ds}(t)}{R_{ch}}+\mathrm{Cp}\frac{d}{dt}v_{ds}(t)$$

この式を解くと v_{ds} は次式で与えられます。

$$v_{ds}(t)=R_{ch}I_p(1-e^{\frac{-1}{R_{ch}C_p}t}) \quad \cdots\cdot(1)$$

ただし、チャンネル抵抗 R_{ch} は数 10mΩから∞Ωまで変化する時間の関数なので、この式を使って v_{ds} 波形を作図することはできません。

モード 2 の後半（モード 2-2）では R_{ch} は無限大なので i_{ch} はゼロであり、次の式が成立します。

$$I_p=i_{Cp}=C_p\frac{d}{dt}v_{ds}(t)$$

よって、

$$v_{ds}(t)=\frac{1}{C_p}I_pt+v_{ds}(0) \quad \cdots\cdot(2)$$

$v_{ds}(0)$はモード 2-2 の v_{ds} の初期値です。

＜モード 3 とモード 4＞

図 5 (c)より次の式が成立します。

$$I_p=i_{Cp}(t)+i_D(t)$$

$$i_{Cp}(t)=C_p\frac{d}{dt}v_{ds}(t)$$

$$v_{ds}(t)=V_{out}+R_pi_D(t)+L_p\frac{d}{dt}i_D(t)$$

これらの式を解いて、

$$v_{ds}(t)=e^{\frac{-R_p}{2L_p}t}(V_a\sin\omega t+V_b\cos\omega t)+R_pI_p+V_{out} \quad \cdots\cdot(3)$$

ただし、

$$V_a=I_p\frac{2L_p-R_p^2C_p}{\sqrt{C_p\left(4L_p-C_pR_p^2\right)}}$$

$$V_b=-R_pI_p$$

$$\omega=\frac{\sqrt{C_p\left(4L_p-C_pR_p^2\right)}}{2C_pL_p}\fallingdotseq\frac{1}{\sqrt{C_pL_p}}$$

(3)式より、v_{ds} は $V_{out}+R_pI_p$ を収束値とする減衰振動であることが分かります。また、振動の角周波数 ω は R_p を無視すれば、$\omega=\frac{1}{\sqrt{C_pL_p}}$ です。

■ターンオフ過渡時のスイッチ素子の電圧電流計算

以上のように、等価回路からターンオフ過渡時の v_{ds} の計算式を求めることができましたが、これらの式を使って v_{ds} 波形を作図するにはいくつかの問題があります。前記のように、チャンネル抵抗

R_{ch}は大きく変化するのでモード2-1のv_{ds}波形の作図は困難です。

また、モード2-2とモード3、モード4では、スイッチ素子の寄生容量C_pの値が必要ですが、この値はv_{ds}によって大きく変化します。実験に使用したスイッチ素子（2SK2967）の寄生容量の電圧特性を図6に示します。図4、図5のC_pは図6のC_{oss}に該当しますが、0Vから58Vの範囲で約10000pFから400pFまで変化します。v_{ds}の実測波形（図3）によると、v_{ds}の振動の山の部分（図3のAの部分）は変化が速いのに対し、谷の部分（図3のBの部分）は変化が遅くなっています。あたかも、山の部分では共振周期が短く、谷の部分では共振周期が長くなっているように見えます。これはC_pが山の部分では小さく、谷の部分では大きくなっていることが原因と考えられます。

また、モード3とモード4の計算では、配線のインダクタンス成分L_pと抵抗成分R_pの値が必要ですが、これらの正確な測定は簡単ではありません。

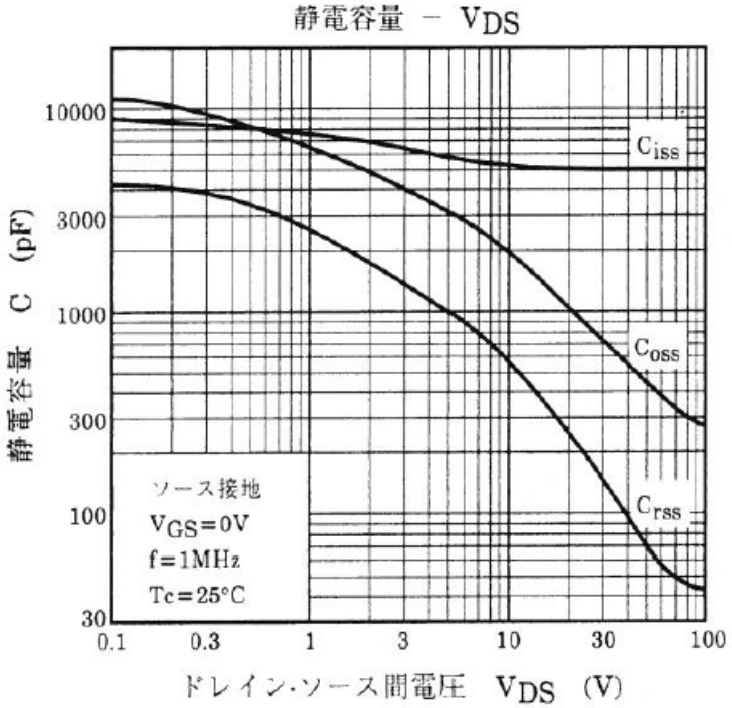


図6　使用したスイッチ素子（2SK2967）の寄生容量の電圧特性

このように、通常の状態では導出した式(1)(2)(3)を使用してv_{ds}波形を描画することは困難ですが、導出した式の妥当性を確認するために次のように実験と計算を行いました。

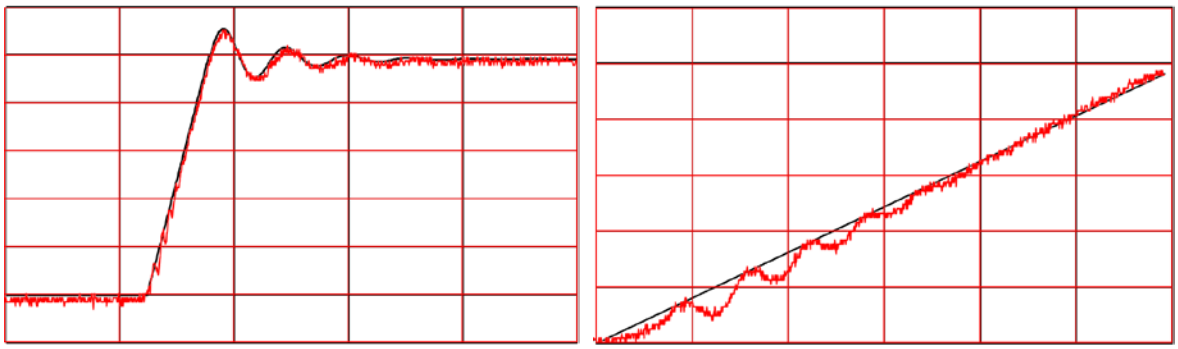
・スイッチ素子と並列に0.1μFのスナバコンデンサを接続する。
・スイッチ素子の寄生容量≪0.1μFなので、C_p＝0.1μF一定とみなすことができる。
・Cpが大きいのでモード2でのv_{ds}の上昇速度が遅く、モード2-1は無視することができる。よって、式(1)は使用せず、式(2)のみ使用し、$v_{ds}(0)=0$とする。

実験と計算に使用した定数を表1に示します。スイッチ素子ターンオフ時のv_{ds}の実測値と式(2)(3)によるv_{ds}の計算値を図7(a)(b)に示します。拡大波形である図(b)の実測値では一部に振動が見られますが、これはスイッチ素子の寄生容量と外付けの0.1μFの配線インダクタンスで共振が発生して

いるものと推定します。なお、表１の Lp と Rp の値は図(a)の振動周期と減衰速度の計算値が実測値に合うように定めています。

表１　実験と計算に使用した定数

入力電圧 Vin	12V
出力電圧 Vout	23.5V
Ld 電流ピーク値 Ip	2.3A
スイッチ素子の通流率 α	0.5
Cp	0.1μF
Lp	0.221μH
Rp	0.25Ω



(a)時間軸は 2μsec/div　　(b) 時間軸は 200nsec/div

図７　0.1μF 外付けにてターンオフ時の v_{ds} 波形（赤：実測波形、黒：計算波形、5V/div）

なお、本技術メモの内容は 2018 年度平地研究室卒研生赤井鈴鹿の卒業論文の一部を分かり易くまとめたものです。

以上