

スイッチング損失とは

(読んでほしい人：パワエレ初心者)

2007/7/27 舞鶴高専 平地克也

トランジスタによるスイッチ回路

チョッパ回路やインバータなどの電力変換回路ではトランジスタを「飽和領域」で使用するのでトランジスタの状態は ON と OFF の 2 つのモードのみ考えれば OK です。よってトランジスタは等価的にスイッチと同じものと考えられます。詳細は 2006 年 9 月 18 日の平地研究室技術メモ「チョッパ回路の考え方」を参照下さい。ただし、通常のスイッチでは 1 秒間に数回程度しか ON/OFF できませんが、トランジスタでは 1 秒間に数万回 ON/OFF できます。電力変換回路ではこのような高周波でトランジスタをスイッチ動作させることにより高速応答、高効率、低騒音、小型軽量、などの優れた特性を実現しています。

図 1 はトランジスタ Tr で負荷を ON/OFF させる回路です。ON/OFF の周期を T 、ON 時間を T_{on} とした時のトランジスタの電圧 V_{Tr} と電流 i_{Tr} の例を図 2 に示します。

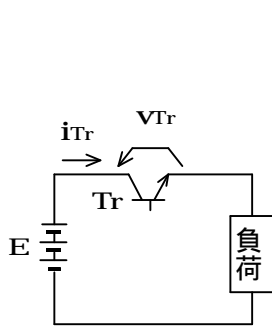


図 1 トランジスタによる
スイッチ回路

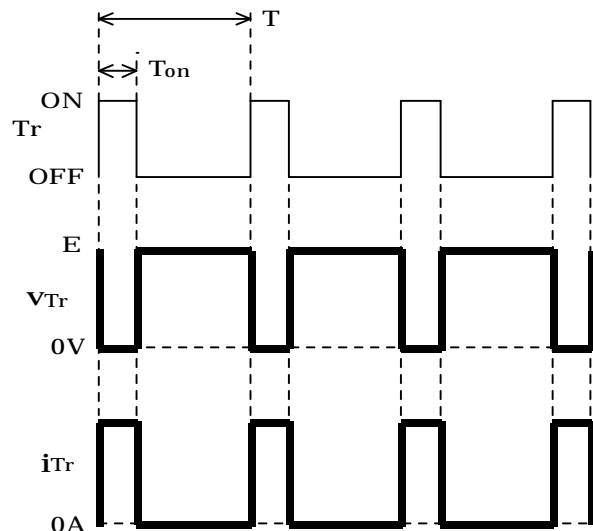
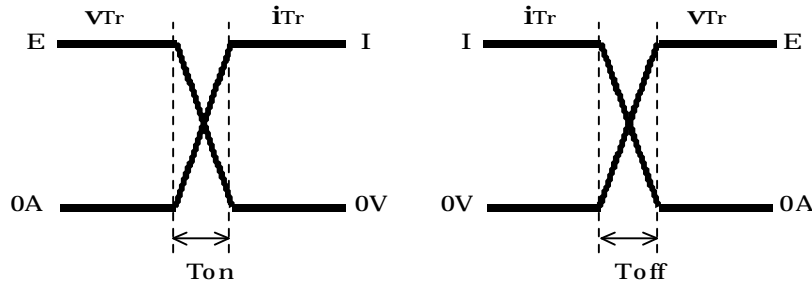


図 2 トランジスタの電圧電流波形

Tr が ON の時は V_{Tr} が $0V$ なのでトランジスタの電力損失は $0W$ です。 Tr が OFF の時は i_{Tr} が $0A$ なのでトランジスタの電力損失はやはり $0W$ です。ON の時も OFF の時もトランジスタの電力損失はゼロなのでトランジスタによるスイッチ回路は電力効率 100%、ということになりますが、実際にはそうはいきません。

スイッチング損失とは

トランジスタが OFF 状態から ON 状態、または ON 状態から OFF 状態に移行するには多少の時間がかかります。よって、例えば OFF 状態から ON 状態に移行する場合、図 3(a)に示すようにトランジスタの電流 i_{Tr} はある時間（ここでは T_{on} ）を経て 0A から I まで上昇します。同様にトランジスタの電圧 v_{Tr} は T_{on} を経て E から 0V まで減少します。なお、OFF 状態から ON 状態に移行することをターン ON、ON 状態から OFF 状態に移行することをターン OFF と言います。



(a) ターン ON 時

(b) ターン OFF 時

図 3 トランジスタのスイッチング波形

T_{on} の間はトランジスタの電圧も電流もゼロではないのでトランジスタには電力損失が発生します。この時のエネルギーは下記のように計算され、 $\frac{1}{6}EI\Delta T_{on}$ [ジュール]となります。ON/OFF の周期は T なのでターン ON 時の電力損失は $\frac{1}{6}EI \frac{\Delta T_{on}}{T}$ [W]となります。同様にターン OFF 時の損失は $\frac{1}{6}EI \frac{\Delta T_{off}}{T}$ [W]となります。このようにトランジスタのスイッチ動作の過渡状態に発生する損失をスイッチング損失と言います。

$$\begin{aligned}
 \text{Ton で発生する損失} &= \int_0^{\Delta T_{on}} \left\{ I \frac{t}{\Delta T_{on}} \times E \left(1 - \frac{t}{\Delta T_{on}} \right) \right\} dt = EI \int_0^{\Delta T_{on}} \left\{ \frac{t}{\Delta T_{on}} \times \left(1 - \frac{t}{\Delta T_{on}} \right) \right\} dt \\
 &= EI \int_0^{\Delta T_{on}} \left\{ \frac{t}{\Delta T_{on}} - \frac{t^2}{\Delta T_{on}^2} \right\} dt = EI \left\{ \frac{1}{\Delta T_{on}} \int_0^{\Delta T_{on}} t dt - \frac{1}{\Delta T_{on}^2} \int_0^{\Delta T_{on}} t^2 dt \right\} \\
 &= EI \left\{ \frac{1}{\Delta T_{on}} \left[\frac{1}{2} t^2 \right]_0^{\Delta T_{on}} - \frac{1}{\Delta T_{on}^2} \left[\frac{1}{3} t^3 \right]_0^{\Delta T_{on}} \right\} = EI \left(\frac{1}{2} \Delta T_{on} - \frac{1}{3} \Delta T_{on} \right) \\
 &= \frac{1}{6} EI \Delta T_{on}
 \end{aligned}$$

実際のスイッチング波形

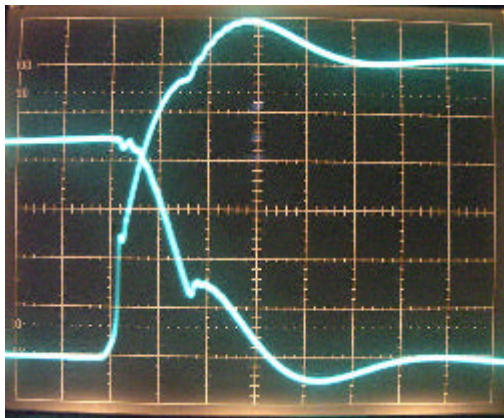
図3の波形ではトランジスタの電圧と電流が同時に、かつ直線的に変化するように描かれていますが、実際には次のような項目が影響を及ぼし、かなり複雑な波形になります。

- ・トランジスタのスイッチング特性
- ・トランジスタのスナバ回路
- ・負荷の種類
- ・トランジスタ周辺のラインインダクタンスや浮遊容量

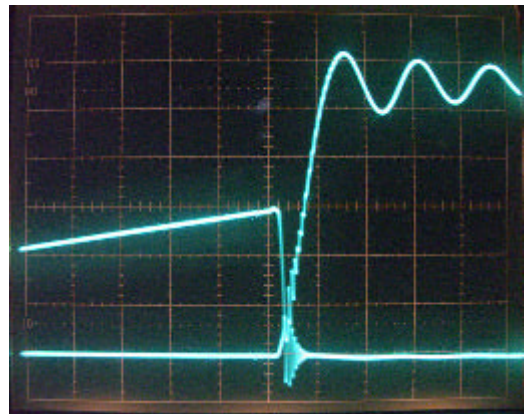
図4(a)にトランジスタのターンOFF時の実測波形を示します。かなり複雑な波形になっていますが、 $T_{off} = 3 \mu\text{sec}$ 、 $T = 50 \mu\text{sec}$ 、 $E = 60\text{V}$ 、 $I = 4.5\text{A}$ として前記の式に代入すると

$$\text{ターンオフ時の損失} = \frac{1}{6} EI \frac{\Delta T_{off}}{T} = 2.7\text{W}$$

と計算されます。実際には電圧の立ち上がりがかなり速いのでこの値よりもっと大きな損失が発生しているでしょう。



(a)ハードスイッチング



(b)ソフトスイッチング

電圧：10V/div 電流：1A/div 時間：1 $\mu\text{sec}/\text{div}$

図4 トランジスタターンオフ時の電圧電流波形

トランジスタの動作周波数を f とすれば $T = \frac{1}{f}$ なので、スイッチング損失の式から明かなようにスイッチング損失は動作周波数 f に比例して増加します。電力変換装置の特性と経済性の改善のためには動作周波数の向上が大きな効果があります。よって、スイッチング損失の抑制は電力変換装置にとって重要な研究課題となっており、それを実現するための有力な手段がソフトスイッチングと呼ばれる技術です。図4(b)はソフトスイッチングを用いた時のターンオフ時の波形です。電流が充分減少してから電圧が上昇しており、スイッチング損失がほとんど発生してないことが分かります。図4(a)のようにソフトスイッチングを用いておらず、スイッチング損失の大きな方式をハードスイッチングと言います。

以上