

## ソフトスイッチングの種類と定義

(読んでほしい人：パワエレ初心者)

2015/9/25 舞鶴高専 平地克也

高周波電力変換技術は 1970 年代に使われ初め、1980 年代に電圧共振・電流共振が普及し、さらに 1990 年代に部分共振が普及しました。部分共振の普及に伴ってソフトスイッチングという言葉が定着しましたが、その定義が研究者によって異なり、やや混乱状態となりました。そこで電気学会ではソフトスイッチングの明確な定義を定めました。電気学会の定義はスイッチング損失には甘く、サージ電圧・サージ電流には厳しいと言えます。

### ソフトスイッチングの種類と開発経過

ソフトスイッチング技術の開発経過はおおむね次のように概観できます<sup>[1][2]</sup>。

#### < 1970 年代：高周波電力変換技術の普及 >

1970 年代に半導体スイッチ素子を使った高周波電力変換技術が本格的に使われ始めました。昇圧チョッパ、降圧チョッパ、フルブリッジ方式、ハーフブリッジ方式、フォワード型、フライバック型などの基本的な回路方式は全てこの頃までに確立しています。高周波電力変換技術は電源装置の大幅な小型軽量化と電力変換効率の向上をもたらしました。さらなる小型軽量化のためには動作周波数の向上が大きな効果を発揮しますが、それに伴うスイッチング損失の増加と高周波ノイズによる障害が大きな問題となりました。

#### < 1980 年代：電圧共振、電流共振の普及 >

そこで 1980 年代にスイッチング損失と高周波ノイズ抑制のためにソフトスイッチング方式が普及しました。ただし当時は「ソフトスイッチング」という言葉はまだ使用されておらず、「共振形」と呼ばれていました。図 1 にスイッチ素子の電圧電流波形を示します。通常のスイッチング（ハードスイッチング）では(a)のようにスイッチ素子のターンオフとターンオンの瞬間に電圧  $v$  と電流  $i$  の重なり期間が生じてスイッチング損失が発生します。また、 $v$  や  $i$  にサージ電圧やサージ電流が発生して高周波ノイズの原因となります。そこでスイッチ素子の近傍リアクトルやコンデンサを設けて共振現象を発生させ、それを利用してスイッチング損失と高周波ノイズを抑制する方式が開発されました。「電圧共振」では(b)に示すようにスイッチ素子の電圧  $v$  を半サイクルの間共振させて変化を緩やかにしてスイッチング損失と高周波ノイズを抑制します。電流共振

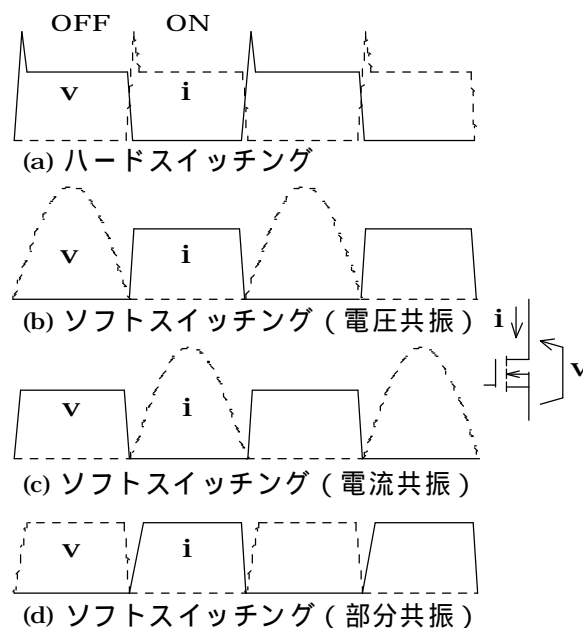


図 1 各種ソフトスイッチングの電圧電流波形

では(c)に示すように  $i$  を共振させます。このように共振型の回路方式によりスイッチング損失と高周波ノイズの抑制は実現できましたが、図 1 から明かなように電圧共振ではスイッチ素子の電圧  $v$  のピーク値が大となり、電流共振ではスイッチ素子の電流  $i$  のピーク値が大となります。  $v$  や  $i$  のピーク値の増加はスイッチ素子の電力損失の増大とコストアップをもたらします。また電圧共振、電流共振では共振の途中でスイッチ素子をスイッチングすることはできないので PWM 制御が困難となり、周波数制御が必要となります。

< 1990 年代：部分共振の普及 >

そこで 1990 年代には  $v$  や  $i$  のピーク値増加の抑制と PWM 制御実現のために部分共振が普及しました。部分共振は図 1 (d)に示すようにスイッチ素子のスイッチングの瞬間だけ共振現象を発生させて  $v$  と  $i$  の重なり期間を無くす方法です。ソフトスイッチングという言葉は部分共振の普及と共に広く用いられるようになりました。当時は電圧共振・電流共振と区別するために部分共振のことをソフトスイッチングと呼ぶことが多かったのですが、最近は全て含めてソフトスイッチングと呼ばれています。また、2000 年代以降も部分共振が広く使用されています。

### ソフトスイッチングの定義

電圧共振や電流共振では図 1 (b)(c)のように電圧や電流が正弦波状に変化するので図 1 (a)のハードスイッチングとは明かに区別できますが、図 1 (d)の部分共振は(a)のハードスイッチングとかなり似ています。また、電圧共振では(b)のように電圧  $v$  が完全に 0V になった状態で電流  $i$  が増加し、電流共振では(c)のように電流  $i$  が完全に 0A になった状態で電圧  $v$  が増加するのでスイッチング損失はゼロと言えますが、部分共振ではスイッチング損失が完全にゼロとは言えない回路方式が多いのが実情です。そのため、部分共振の新しい回路方式が次々と開発されていた 1990 年代にはソフトスイッチングの定義が研究者によって異なり、かなりの混乱状態となりました。そこで電気学会ではソフトスイッチングの明確な定義を検討し、次のように決めました<sup>[3]</sup>。

……スイッチング過程における半導体バルブデバイスの電圧 - 電流平面上の軌跡が最大電圧点、最大電流点および原点を結ぶ三角形の領域内で動くスイッチング動作  
(半導体バルブデバイスとはスイッチ素子のこと)

この定義を図示すると図 2 のようになります。この図はスイッチ素子の電圧  $v$  と電流  $i$  をそれぞれ横軸、縦軸とし、スイッチング時の  $v$  と  $i$  の軌跡を平面上に表したものです。スイッチ素子が ON 状態ではスイッチ素子の電流  $i$  は  $I_{on}$ 、電圧  $v$  は 0V なので動作点は図 2 の ON の丸印の位置になります。OFF 状態ではスイッチ素子の電流  $i$  は 0A、電圧  $v$  は  $V_{off}$  なので動作点は図 2 の OFF の丸印の位置になります。スイッチ素子のターンオフ時は ON の位置から OFF の位置に移動しますが、その全軌跡が両者を結ぶ点線の内側に収まっておればソフトスイッチング成功、外側に少しでもはみ出すとソフトスイッチング失敗でありハードスイッチングとなります。ターンオンの時も同様です。図 3 にこの定義による境界状態の波形を示します。図 3 (a)の時は図 2 の ON の位置から OFF の位置にちょうど点線上を移動します。(b)の時は OFF の位置から ON の位置にちょうど点線上を移動します。

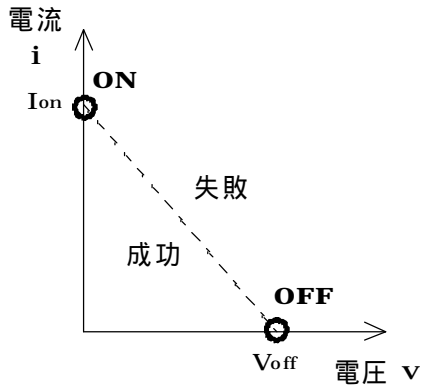


図2 電気学会の定義

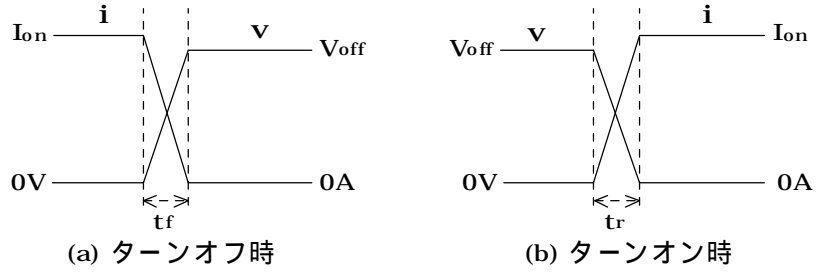


図3 電気学会の定義による境界状態の波形

図4 (a)にソフトスイッチング成功の波形を示し、その時の  $v_i$  軌跡を図5 (a)に示します。 $v_i$  軌跡は全て点線の内側に収まっています。失敗の場合を図4 (b)図5 (b)に示します。 $v_i$  軌跡は点線の外側にあります。 $v$  がオーバーシュートした場合(即ちサージ電圧が発生した場合)の波形を図4 (c)に示します。この場合の  $v_i$  軌跡は図5 (c)となります。軌跡の大部分は点線の内側に収まっていますが、サージ電圧の部分が  $V_{off}$  より高いので点線からはみ出してソフトスイッチング失敗です。

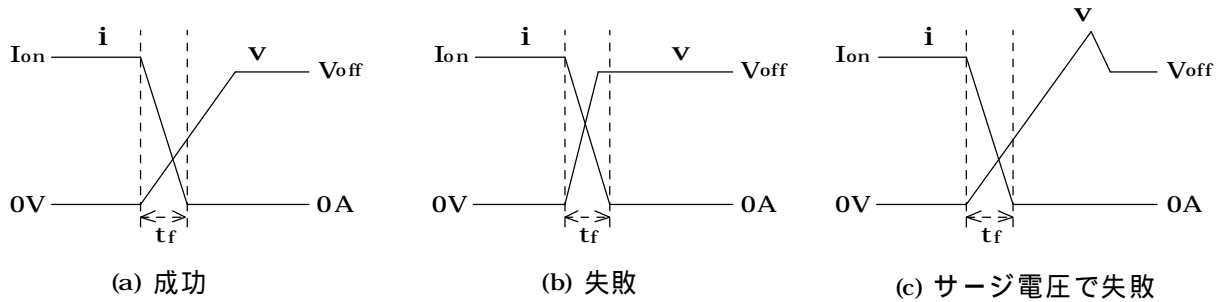


図4 スイッチ素子ターンオフ時の電圧電流波形の例

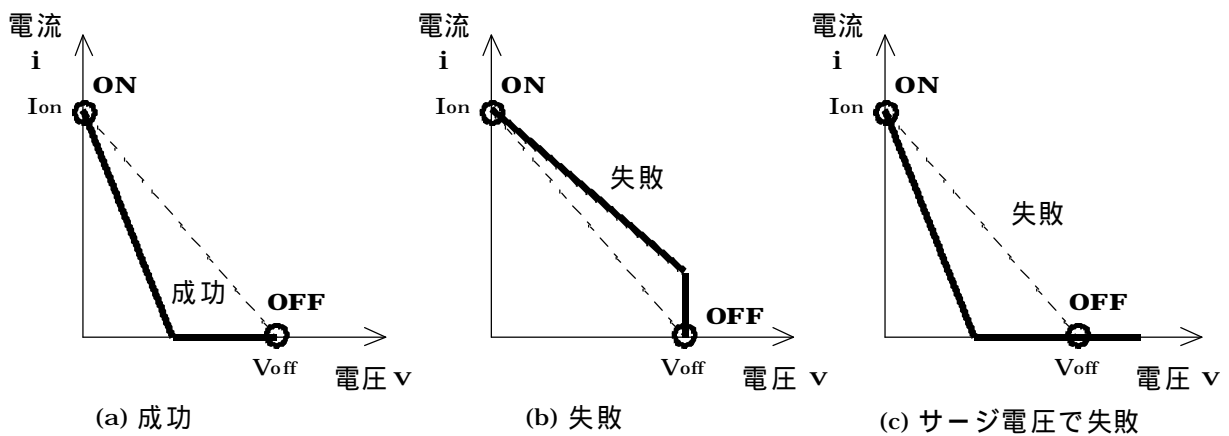
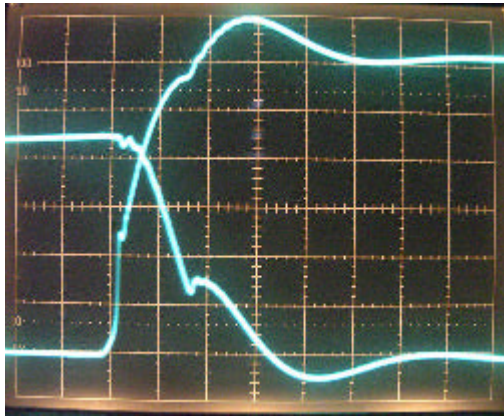
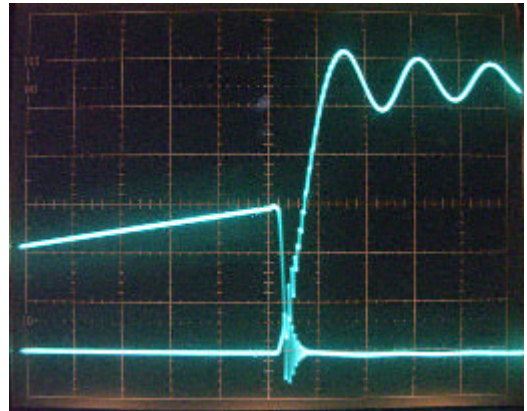


図5 スイッチ素子ターンオフ時の  $v_i$  軌跡の例

図6にスイッチ素子ターンオフ時の電圧電流波形の実測例を示します(文献[4]の図4より)。(a)では電流が充分減少する前に電圧が急速に立ち上がっており、さらにサージ電圧も少し発生しており、ソフトスイッチング失敗であることが分かります。(b)は部分共振の回路の波形なので電流がほぼ0Aになってから電圧がゆっくり立ち上がっており、ソフトスイッチング成功とりたい所ですが、残念ながら電圧波形に少しリングング(サージ電圧)が発生しており、電気学会の定義に厳密に従えばソフトスイッチング失敗です。



(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：1μsec/div

図6 スイッチ素子ターンオフ時の電圧電流波形の実例

なお、ソフトスイッチングの境界となる図3(a)の時のスイッチング損失は $\frac{1}{6}V_{off}I_{on}\frac{t_f}{T}$ と計算されます[4](Tは1周期です)。電気学会の定義はスイッチング損失には甘く、サージ電圧・サージ電流には厳しいと言えるでしょう。

## 文献

- [1] 平地克也、「ソフトスイッチング技術の最新動向」、電気学会誌、Vol.125, No.12, pp.754-757, (2005)
- [2] 平地克也、「新・回路レベルのEMC設計：電力変換装置のEMI対策技術ソフトスイッチングの基礎」、月刊EMC、2015年10月号
- [3] 「電気学会電気専門用語集 No.9 パワーエレクトロニクス」、コロナ社
- [4] 平地克也、「スイッチング損失とは」、平地研究室技術メモ No.20070727