平地研究室技術メモ No.20180502

# 各種回路方式の「ソフトさ」比較

（読んでほしい人：パワエレ技術者）

2018/5/2 舞鶴高専 平地克也

**【あらまし】** DC/DC コンバータは歴史的に、ハードスイッチングの回路方式がまず開発され、その欠点を克服するためにソフトスイッチングの回路方式が開発された、という経緯があります。したがって、ハードスイッチングはスイッチング損失が大きくて高周波化が困難な古い回路方式、ソフトスイッチングはスイッチング損失を抑制できて高周波化に対応できる新しい回路方式、というイメージが浸透しているように思われます。しかし実際には、ソフトスイッチングの回路方式でもスイッチング損失や大きなサージ電圧サージ電流が発生する場合もあり、逆にハードスイッチングの回路方式でもスイッチング損失がほとんど発生しない場合もあります。DC/DC コンバータの回路方式をハードスイッチング／ソフトスイッチングと 2 者択一で考えることはあまり意味がなく、個々の回路方式の動作を詳しく解析して、実際のスイッチング動作がどの程度ソフトであるか比較検討する必要があります。この比較検討を各種回路方式の「ソフトさ」比較と呼びたいと思います。本技術メモでは DC/DC コンバータの各種回路方式の「ソフトさ」比較の例を紹介します。

## ■各種回路方式の「ソフトさ」比較一覧表

各種回路方式の「ソフトさ」を厳密に数値で表現することは困難ですが、各種回路方式を相対的に比較検討することは可能です。ためしに表 1 を作成してみました。

表 1　各種回路方式の「ソフトさ」比較一覧表

| | | ソフトさ評価指標 | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ターンオン時 | | | | | ターンオフ時 | | | | |
| 回路方式 | 種類 | ① | ② | ③ | ④ | ⑤ | ⑥ | ⑦ | ⑧ | 得点 | 関連技術メモ |
| 降圧チョッパ | ハードSW | × | × | × | × | × | × | × | − | 0 | 20060918 |
| 昇圧チョッパ | ハードSW | × | × | × | × | × | × | × | − | 0 | 20080214など |
| 昇降圧チョッパ | ハードSW | × | × | × | × | × | × | × | − | 0 | 20080117 |
| １石フォワード方式 | ハードSW | × | × | × | × | × | × | × | × | 0 | 20061124など |
| ２石フォワード方式 | ハードSW | × | × | × | × | × | △ | ○ | ○ | 5 | 20161012など |
| フライバックトランス方式（CCM） | ハードSW | × | × | × | × | × | × | × | × | 0 | なし |
| フライバックトランス方式（DCM） | ハードSW | △ | △ | ○ | ○ | △ | △ | △ | △ | 10 | なし |
| フルブリッジ方式（PWMFB） | ハードSW | × | × | × | × | × | △ | ○ | ○ | 5 | 20110728など |
| ハーフブリッジ方式 | ハードSW | × | × | × | × | × | △ | ○ | ○ | 5 | 20130204など |
| プッシュプル方式 | ハードSW | × | × | × | × | × | × | × | × | 0 | 20110629など |
| 電流型フルブリッジ方式 | ハードSW | × | × | × | × | × | × | × | × | 0 | 20100228など |
| 電流型プッシュプル方式 | ハードSW | × | × | × | × | × | × | × | × | 0 | 20110131など |
| 電流共振型ハーフブリッジ方式 | 電流共振 | △ | △ | ○ | ○ | × | ○ | ○ | ○ | 12 | なし |
| 電圧共振型1石フォワード方式 | 電圧共振 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | 16 | なし |
| アクティブクランプ方式１石フォワード型 | 部分共振 | ○ | ○ | × | × | ○ | ○ | ○ | ○ | 12 | 20100630など |
| 位相シフトフルブリッジ方式（PSFB） | 部分共振 | △ | × | × | × | △ | ○ | ○ | △ | 7 | 20170711など |
| LLC方式 | 部分共振 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | 16 | 20171211など |
| DAB方式 | 部分共振 | ○ | ○ | − | − | ○ | ○ | ○ | ○ | 16 | 20150214など |

①～⑧はソフトさの評価指標です。スイッチ素子のターンオン時は 5 つの評価指標、ターンオフ時は 3 つの評価指標が考えられます。

－－－スイッチ素子ターンオン時－－－

① スイッチ素子ターンオン時の電圧と電流の重なり解消

② スイッチ素子ターンオン時のサージ電流抑制
③ ダイオードのリカバリ特性によるサージ電流の抑制
④ ダイオードターンオフ時のサージ電圧の抑制
⑤ スイッチ素子の寄生容量とスナバ容量のエネルギー回生

－－－スイッチ素子ターンオフ時－－－
⑥ スイッチ素子ターンオフ時の電圧と電流の重なり解消
⑦ スイッチ素子ターンオフ時のサージ電圧抑制
⑧ 変圧器の漏れインダクタンスのエネルギー回生

＜各評価指標の注意事項＞
②（スイッチ素子のサージ電流）は、ダイオードのリカバリ電流に起因する場合と寄生容量やスナバ容量の短絡に起因する場合があります。
③（ダイオードのリカバリ特性によるサージ電流）は、普通はスイッチ素子のターンオンの瞬間に発生します。
④（ダイオードのサージ電圧）は、普通は③（ダイオードのリカバリ特性によるサージ電流）が流れ終わった瞬間に発生します。
⑤（寄生容量とスナバ容量のエネルギー回生）は、多くの場合、スイッチ素子のターンオンの直前に実施されます。
⑤（寄生容量とスナバ容量のエネルギー回生）が○なら、普通は①も○となります。
⑧(漏れインダクタンスのエネルギー回生)は通常、スイッチ素子ターンオフの直後に実施されます。
⑧（漏れインダクタンスのエネルギー回生）が×なら、普通は⑦（スイッチ素子のサージ電圧抑制）も×となります。

表１の「得点」は○を 2 点、△を 1 点として各回路方式の点数を加算したものです。ソフトさ比較の目安です。なお、表１はあくまでもソフトさを比較したものであり、回路方式そのものの優劣を比較したものではありません。例えばフライバック方式（DCM）ではハードスイッチングの回路方式にもかかわらずソフトさは高得点ですが、変圧器の巻線電流が不連続なので、そのピーク値が大きいという欠点があります。そのため、用途はおおむね数 W～数 10W の小容量に限られます。

■各種回路方式のソフトさ検討
＜降圧チョッパ、昇圧チョッパ、昇降圧チョッパ＞
これらのチョッパ回路はハードスイッチングの回路であり、全項目×となります。ソフトスイッチングの回路方式も広く研究されており、様々な回路方式が提案されていますが、広く普及した回路方式はありません。なお、これらのチョッパ回路には変圧器がないので⑧（漏れインダクタンスのエネルギー回生）は評価しません。

＜１石フォワード方式と２石フォワード方式＞
１石フォワード方式と２石フォワード方式はともにフォワード方式であり、同じ原理で動作してい

ますが、ソフトさには大きな差があります（平地研究室技術メモ No. 20160131）。２石フォワード方式は変圧器の漏れインダクタンスに蓄積されたエネルギーを効果的に電源に回生することができ、部品配置を適切に行えはスナバレスでサージ電圧を抑制することができます。条件がそろえば、スナバレスでもターンオフ時の電圧・電流の重なりが抑制さます（条件：スイッチ素子のターンオフが高速、素子の出力容量が大きい、電流が小さい）。

一方、1 石フォワード方式は変圧器の漏れインダクタンスの蓄積エネルギーを効果的に電源に回生することができないので、素子のサージ電圧は大きな CR スナバや CRD スナバで抑制しなければなりません。漏れインダクタンスの蓄積エネルギーの大部分はスナバ回路で消費されます。

＜フライバックトランス方式＞

フライバックトランス方式は変圧器電流の制御方法によってソフトさが大きく変化します。電流連続モード（CCM）なら全ての項目が×ですが、電流不連続モード（DCM）ならダイオードの電流は自然に 0A になるので③と④は○です。さらに、スイッチ素子のターンオンのタイミングを制御して、寄生容量が最も放電したタイミングでターンオンさせる、いわゆるバレースイッチング（valley switching）を行えば、①②⑤もおおむね実現することができます。また、バレースイッチングを前提にスイッチ素子と並列にスナバコンデンサを接続すれば⑥⑦⑧もおおむね実現できます。

＜フルブリッジ、ハーフブリッジ、プッシュプル＞

フルブリッジ方式は通常の方式と位相シフト方式があります。通常の方式は PWM 制御を行うので PWMFB と略記します。位相シフト方式は PSFB と略記します。PSFB は部分共振の回路ですが、技術メモ No.20151018 で説明しているように、2 次側の整流ダイオードにはサージ電圧が発生します。また、技術メモ No.20141214 などで説明しているように、「遅れレグ」のソフトスイッチングは必ずしも実現できません。一方、PWMFB はハードスイッチングの回路ですが、技術メモ No. 20160107 で説明しているように、変圧器の漏れインダクタンスは効果的に電源に回生でき、部品配置を工夫すればスナバレスでターンオフ時のサージ電圧を抑制することができます。また、条件がそろえば、スナバレスでもターンオフ時の電圧・電流の重なりが抑制されます（条件：スイッチ素子のターンオフが高速、素子の出力容量が大きい、電流が小さい）。

ハーフブリッジ方式のソフトさはフルブリッジ方式（PWMFB）と同じです。プッシュプル方式は変圧器の漏れインダクタンスのエネルギー回生動作が難しく、全ての項目が×となります。電流型も漏れインダクタンスの回生動作が困難であり（技術メモ No.20100228、No.20110308）、全項目が×です。

＜電流共振型、電圧共振型＞

電流共振型（図１）はスイッチ素子の印加電圧が方形波であり、スイッチ素子は寄生容量に電荷が蓄積された状態でターンオンします。したがって、⑤は×となります。動作周波数が高い場合（数 100kHz 以上）は、寄生容量の放電による電力損失やサージ電流が無視できない（文献[1]の 5.4.3 節）ので、①②も○とは言えません。電圧共振型はターンオン、ターンオフともにスイッチ素子はゼロ電圧スイッチング（ZVS）を行うので電流共振型のような問題はなく、全項目が○となります。ただし、電圧共振型１石フォワード方式（図２）は、充分大きな漏れインダクタンス Ll を設けなければ①②

を実現できません（文献[1]の 5.5.2 節）。

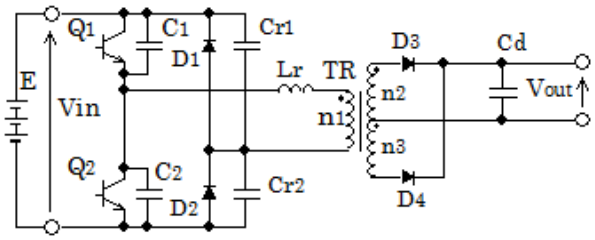


図１　電流共振型の例

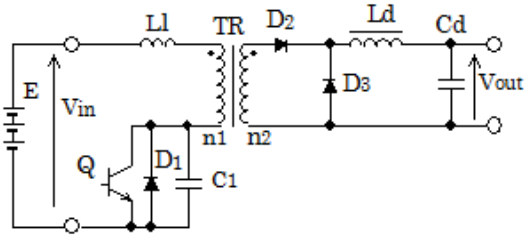


図２　電圧共振型の例

＜部分共振型＞

アクティブクランプ方式１石フォワード型は２次側整流ダイオードに電流が流れている状態でスイッチ素子がターンオンするので③④は×です。また、①②は漏れインダクタンスを充分大きくしなければ○になりません（技術メモ No.20100630 など）。位相シフトフルブリッジ方式は前記のように２次側整流ダイオードにサージ電圧が発生し、また、遅れレグのソフトスイッチングに問題があります。LLC 方式と DAB 方式はソフトさが高く、全項目○です。ただし、LLC では過負荷時にソフトスイッチングが困難となり（技術メモ No.20150906 など）、DAB では入出力の電圧変動が大の時にソフトスイッチングが困難となります（技術メモ No.20150214 など）。なお、LLC 方式は周波数制御が必要な電流共振型ですが、ソフトスイッチングの方式は部分共振です（技術メモ No.20140529）。

**■参考文献**

[1] 平地克也、「DC/DC コンバータの基礎から応用まで」、発行所：電気学会、発売元：オーム社、2018 年 1 月

以上