

部分共振定番方式

(読んでほしい人：パワエレ初心者)

2015/5/1 舞鶴高専 平地克也

3種類のソフトスイッチングと部分共振定番方式

ソフトスイッチングには図1に示すように、電流を共振させてスイッチング損失を抑制する電流共振と電圧を共振させることによりスイッチング損失を抑制する電圧共振とスイッチング動作の瞬間だけ共振させる部分共振の3つの方式があります。電流共振と電圧共振は1980年代に開発されて広く実用化されましたが、共振している電流または電圧のピーク値が大きくなるのでスイッチング損失は抑制できるものの導通損失が増加するという欠点がありました。さらにPWM制御ができず、動作周波数を変化させねばならないという欠点もありました。

そこで1990年代からこの2つの欠点を解消した部分共振が開発され、現在は部分共振がソフトスイッチングの主流となっています。部分共振の「スイッチングの瞬間だけ共振させる」という動作を実現することは簡単ではありません。実現のためにいろんな方式が提案されていますが、1つだけ広く普及している方式があります。

ターンOFF：コンデンサで電圧の立ち上がりを遅らせてZVS。

ターンON：リアクトルでコンデンサの電荷を引き抜いてZVS。

という方式です。今回の技術メモではこの方式を詳しく紹介します。この方式は特別な名前は付いていませんが、ここでは「部分共振定番方式」と呼ぶことにします。

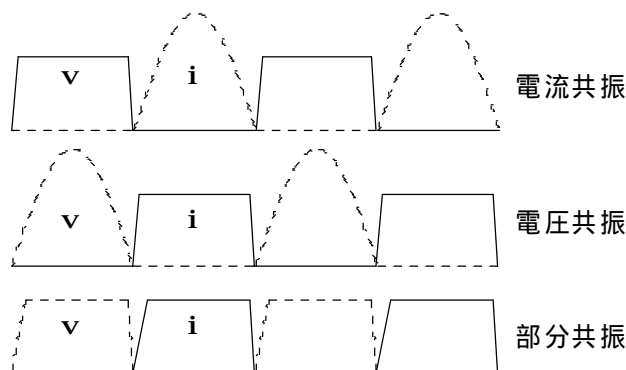


図1 3種類のソフトスイッチング

回路構成とターンOFF動作

図2に部分共振定番方式を実現するための基本的な回路構成を示します。Q₁がソフトスイッチングを実現させたいスイッチ素子、D_{Q1}はQ₁の寄生ダイオード、C_{Q1}はQ₁の寄生容量と外付けスナバコンデンサの合計です。

ターンOFF時の動作は簡単です。Q₁がターンOFFするとQ₁を流れていた電流がC_{Q1}に転流し、C_{Q1}の電圧v_{Q1}は徐々に増加します。増加の速度はC_{Q1}の容量に依存します。C_{Q1}が小さい時は図3(a)のようにv_{Q1}は速く立ち上がります。C_{Q1}を大きくすると図3(b)のようにv_{Q1}の立ち上がりが遅くなり、スイッチング損失は減少します。(b)の状態ではおおむねZVSが実現していると言えるでしょう。

なお、電気学会ではソフトスイッチングを図4のように定義しています^[4]。すなわち、スイッチ素子の電圧/電流平面においてON時の動作点とOFF時の動作点を結ぶ線より内側で動作しておればソフトスイッチング OK、外にはみ出すとソフトスイッチング NG です。この定義に従うと図3(a)もソフトスイッチングとなります。

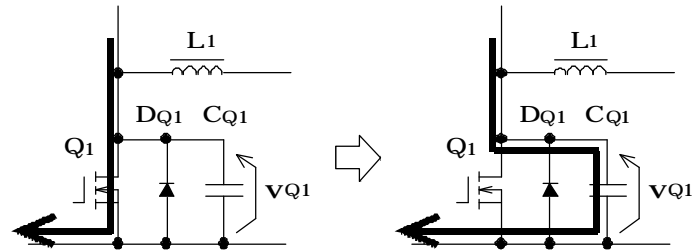


図2 部分共振定番方式の回路構成とターン OFF 時の動作

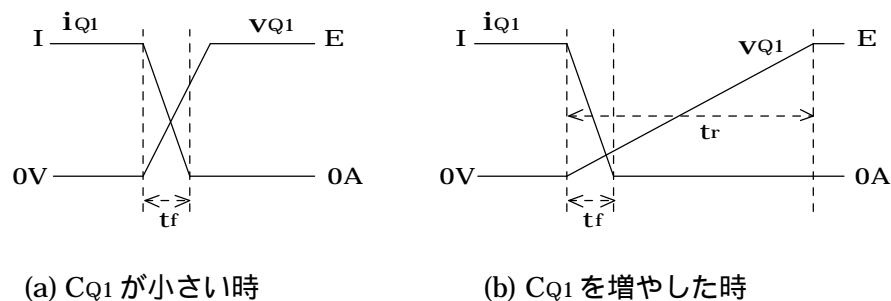


図3 スイッチ素子のターン OFF 時の電圧電流波形

v_{Q1} の立ち上がり時間 t_r の計算例を以下に示します。

$$I = 10\text{A}, E = 400\text{V}, C = 10\text{nF} \text{ なら}$$

$$t_r = C \times E \div I = 400\text{nsec}$$

この定数なら t_r は FET の電流立ち下がり時間 t_f (数 10nsec) より充分大であり、ZVS を実現していると言えます。

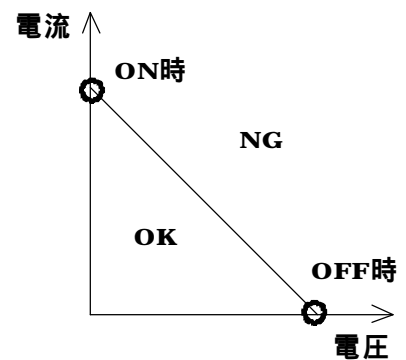


図4 電気学会のソフトスイッチングの定義

ターン ON 動作

以上のように部分共振定番方式ではコンデンサ C_{Q1} に電荷を蓄積することによりターン OFF 時の ZVS を実現しますが、次にスイッチ素子がターン ON する時にこの電荷が貯まったままならターン ON がハードスイッチングとなってしまいます。したがって、ターン ON までに C_{Q1} の電荷を引き抜いて v_{Q1} を 0V とした状態で Q_1 をターン ON させる必要があります。部分共振定番方式では図5に示す方法でこの動作を実現しています。

(a) C_{Q1} 電荷引き抜き : L_1 に蓄積されたエネルギーで C_{Q1} の電荷を引き抜く

- (b) D_{Q1} 導通 : C_{Q1} の電荷引き抜きが完了すると D_{Q1} が導通する。
- (c) Q_1 ターン ON : D_{Q1} が導通している状態で Q_1 をターン ON させて ZVS を実現。
- (d) ON 状態 : やがて Q_1 の電流が反転して通常の ON 状態となる。

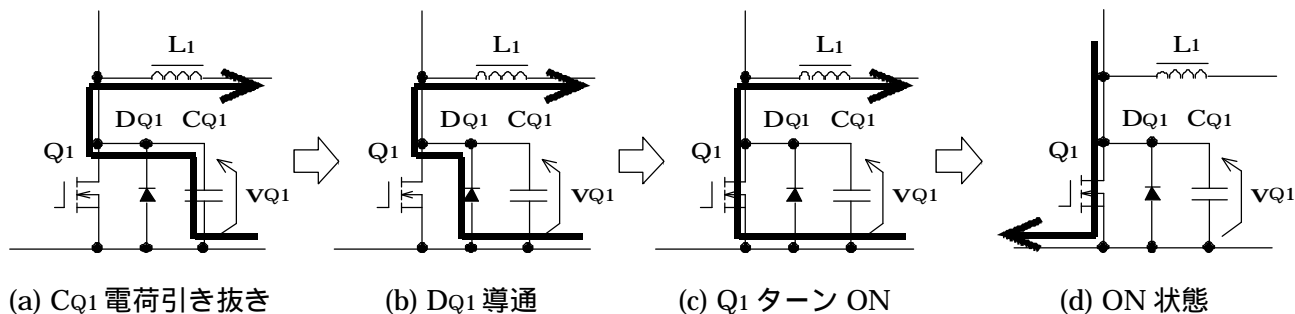


図 5 部分共振定番方式のターン ON 動作

図 5 の動作を実現した例を図 6 に示します。図 6 は平地研究室技術メモ No.20080519^[2]の各動作モード説明図 (図 2) から抜粋したものです。Mode 4 では C_2 Q_2 L_m C_2 の径路で電流が流れています。 L_m はトランス TR_1 の励磁インダクタンスであり、この電流は励磁電流です。この状態で Q_2 をターン OFF させると Mode 5 となり、図のように L_m のエネルギーで C_1 の電荷を引き抜きます。

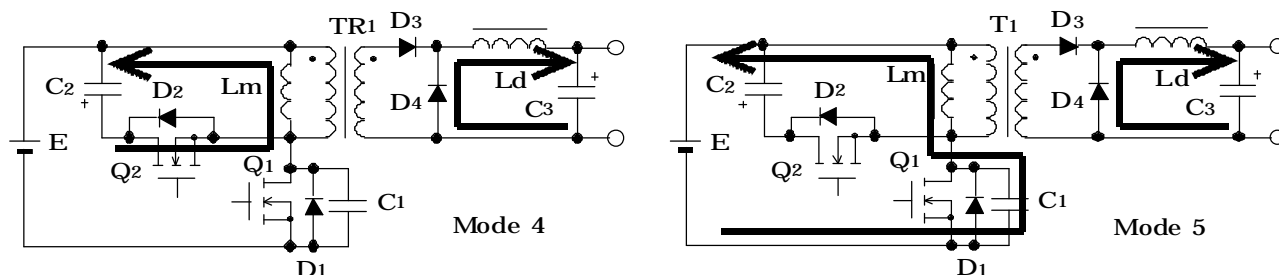


図 6 アクティブクランプ方式 1 石フォワード型 DC/DC コンバータの Q_1 ターン ON 時の動作

部分共振定番方式を実現した DC/DC コンバータ

表 1 に部分共振定番方式を実現した主要な DC / DC コンバータの一覧表を示します。各 DC / DC コンバータにおいて L_1 に該当する部品とこの DC / DC コンバータを解説した平地研究室技術メモの番号も示します。近年広く使われているソフトスイッチング方式の DC / DC コンバータの多くが部分共振定番方式を採用していることが分かります。なお、LLC コンバータは電流共振の動作もしており、周波数制御を行いますが、ソフトスイッチングのメカニズムは部分共振定番方式となっています。

表1 部分共振定番方式を実現した DC/DC コンバータ

DC/DC コンバータの名称	L ₁ に該当する部品	平地研究室技術メモ
アクティブクランプ型 1 石フォワード	励磁インダクタンス	No. 20080519
位相シフトフルブリッジ	漏れインダクタンス or 励磁インダクタンス	No. 20110928 No. 20140331
非対称ハーフブリッジ	平滑リアクトル	No.20090514
LLC	励磁インダクタンス	No.20140529
DAB	主リアクトル	No.20150204
BHB	平滑リアクトル	No.20120430
電流不連続モード昇降圧チョッパ	平滑リアクトル	No.20150324

参考文献

- [1] 電気学会編、「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
- [2] 平地克也、「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」、平地研究室技術メモ No.20080519

以上