単相ソフトスイッチング電流形可逆整流器の一構成

正員 伊藤 良三 (福岡大)

正員 石坂 耕一 (福岡大)

学生員 倉永 智司 (福岡大)

正員 岡田 英彦 (大分大)

A Single-Phase Soft-Switched Current-Source Reversible Rectifier Configuration

Ryozo Itoh, Member, Kouichi Ishizaka, Member, Satoshi Kuranaga, Student Member (Fukuoka University), Hidehiko Okada, Member (Oita University)

To provide a thyristor rectifier with pulsewidth modulated operations and zero-voltage and/or zero-current switchings, two resonant switches, which consist of LC resonant circuit plus other switching devices and diodes, are connected with a thyristor bridge in series and in parallel. The arrangement tested, using four insulated-gate bipolar transistors, is implemented to investigate the operations under the sinusoidal pulsewidth modulation. The experimental results confirm that AC current can be sinusoidally waveshaped with reduced harmonic distortion.

キーワード：単相可逆整流器，電流形，ソフトスイッチング，ZVS，ZCS，正弦波入力電流

パワーフローが可逆な電流形整流器をソフトスイッチングで動作させるために，スナバエネルギー回生形スイッチをブリッジ構成する方法⁽¹⁾，LC共振を利用した共振スイッチを整流器ブリッジと並列に接続する方法⁽²⁾が報告されている。しかし，前者は交流側インダクタのエネルギーをキャパシタで処理するために大容量キャパシタを必要とし，キャパシタの充放電時間が大きいためにパルス幅変調の適用が困難である。また，後者は共振キャパシタの電圧検出を必要とする。本レターは，このような欠点を解決するために，サイリスタブリッジに2個の共振スイッチを直列および並列接続した回路構成を提案したものであり，交流電流の正弦波化が可能であることを明らかにする。

図1にスイッチング素子としてIGBTを用いた単相ソフトスイッチング電流形可逆整流器を示す。ただし，共振インダクタ L_r は2個の共振スイッチで共用し， D_b は Q_3 ， Q_4 に印加される逆電圧を阻止するためのダイオード，LCは交流電流に含まれる高調波を吸収させるフィルタである。なお，インバート動作を必要としない場合には，サイリスタ $T_1 \sim T_4$ はダイオードに置き換えることができ，このとき並列接続共振スイッチは不要で D_b が環流ダイオードの働きをする。スイッチング周波数が十分高いと仮定すると，ブリッジ端子電圧 e は一スイッチング周期の間はほとんど変化しないのでこれを一定値 E としたとき，例えば $e > 0$ の動作モードは図2のように表される。ただし， Q_1 ， Q_2 と Q_3 ， Q_4 のオン信号は相補の関係にあるものとする。また， t_0 ， t_1 ， t_2 は適用するパルス幅変調法によ

て決まる。最初，モード0のように $i_1 = I_d$ が Q_1 ， Q_2 に分流しているとして，動作の概略を説明する。 $t = t_0$ で Q_1 ， Q_2 がZVSでターンオフされると， Q_3 ， Q_4 にオン信号が印加されたにもかかわらず i_2 は流れず，モード1に示すように $i_1 = I_d$ が D_1 ， D_2 をとおって流れ続け， C_{r1} は直線状に充電される。 e_{r1} が上昇して $E - e_{r1} = e_{r2}$ になると i_2 がZCSで流れ始め，モード2の共振回路を形成する。モード2において C_{r2} が放電し e_{r2} が零になるとモード3の共振状態へ移行し， i_2 は Q_3 ， Q_4 に分流する。

この後， i_1 が零まで減少すると C_{r1} の充電が終了し，バイパスモードに相当するモード4で動作する。 $t = t_4$ に

図1 提案する単相ソフトスイッチング電流形可逆整流器

Fig. 1. Proposed single-phase soft-switched current-source reversible rectifier.

図 2 $e > 0$ の動作モード
Fig. 2. Operating modes at $e > 0$.

いて Q_3, Q_4 は ZVS でターンオフ, Q_1, Q_2 は ZCS でターンオンされ, モード 5 で示す共振回路が形成される。このとき, C_{r1} は放電, C_{r2} は充電を開始する。 e_{r2} が上昇して i_2 が零になると C_{r2} の充電が終了モード 6 へ移行する。モード 6 では C_{r1} は $i_1 = I_d$ で放電を続け, e_{r1} が零に達すると i_1 が Q_1, Q_2 に分流するモード 7 で動作するようになる。モード 7 はモード 0 に等しく, 改めて Q_1, Q_2 がターンオフされるとモード 1 へ移行する。なお, 図 1 のサイリスタは ZCS でターンオン・ターンオフされる。

本レターでは, 三角波搬送波と正弦波変調波を比較する正弦波パルス幅変調を用い, 動作条件および回路定数を電源電圧 50 V, 電源周波数 60 Hz, 搬送波周波数 10.68 kHz, $L = 1.369$ mH, $C = 8$ μ F, $L_r = 8.5$ μ H, $C_{r1} = C_{r2} = 1$ μ F のように設定して実験を行った。ただし, $T_1 \sim T_4$ にはターンオフ時間が 15 μ s の高速サイリスタを用い, Q_1, Q_2 と同じオン信号を交流電源の半サイクルごとに T_1, T_4 と T_2, T_3 に分配して印加した。三角波搬送波に対する正弦波変調波の比を変調率 M で定義したとき, 図 1 の整流器は, M および制御遅れ角 α を調整することにより入出力の制御が可能である。図 3, 図 4 は, 一例として, $M = 0.5$, $I_d = 5$ A に固定し, 各々 $\alpha = 0$ および $\alpha = \pi$ に設定したときの実測交流電圧・電流波形である。

図より, 交流電流はフィルタ共振周波数に等しい周波数

図 3 $\alpha = 0$ のときの交流電圧・電流
Fig. 3. AC voltage and current at $\alpha = 0$.

図 4 $\alpha = \pi$ のときの交流電圧・電流
Fig. 4. AC voltage and current at $\alpha = \pi$.

で脈動する成分を含むが, ほぼ設定位相で正弦波状に制御されていることがわかる。一方, $\alpha = 0$ と $\alpha = \pi$ で交流電流の大きさが異なる。この理由は, 以下のように説明される。 $e > 0$ のとき, 図 2 に示したモード 1 の継続時間は, 動作状態に大きく依存し, ほぼ E に比例する。これは, 図 1 の整流器で考えると, 直列接続共振スイッチの導通時間が近似的に Q_1, Q_2 がオフした時点の e の大きさに比例して長くなることを意味する。逆に, $e < 0$ のときは, 並列接続共振スイッチの導通時間が e の大きさに比例して長くなる。従って, 2 個の共振スイッチが交互に導通することを考慮すると, 交流電源が直流回路と連結される時間が, Q_1, Q_2 にオン信号を印加した時間より, $e > 0$ のとき増加し, $e < 0$ のとき減少するからである。なお, 図 3 に示した交流電流の FFT アナライザによる実測ひずみ率は 1.226%, 図 4 のそれは 4.928% であった。また, 図 3 の実測総合効率率は 0.998, 図 4 のそれは 0.985 であった。

以上, 単相ソフトスイッチング電流形可逆整流器を提案し, 正弦波パルス幅変調によって交流電流を正弦波化できることを示した。三相システムへ応用するにはサイリスタブリッジを三相構成にするだけでよいと考えられ, 今後検討する所存である。

最後に, 本研究は九州電力総合研究所との共同研究で行われたことを付記し, 誌面を借りて関係各位に深謝する。

(平成 11 年 6 月 28 日受付, 同 11 年 8 月 10 日再受付)

文 献

- (1) 西川・T. Pai・嶋村・内野:「スナバエネルギー回生形 GTO 変換器」, 平 5 電気学会全国大会, No. 529
- (2) G. Moschopoulos and G. Joos: "A Novel Soft-Switched PWM Current Source Rectifier/Inverter", *IEEE Power Electronics Specialists Conf.*, 978 (1994)