スナバエネルギー回生機能を持つ単相昇圧形整流器

正員 根葉 保彦* 正員 石坂 耕一*

正員 松本 洋和* 正員 伊藤 良三*

Single-Phase Boost Rectifier with Snubber Energy Recovery Feature

Yasuhiko Neba*, Member, Kouichi Ishizaka*, Member, Hirokazu Matsumoto*, Member, Ryoza Itoh*, Member

Single-phase boost rectifier with snubber energy recovery feature operating under the current-mode control with a turn-on at constant clock time is studied. In this rectifier, the resonant circuit consisting of small inductor and capacitor is added in DC circuit. The snubber energy is transferred to an additional resonant capacitor and can next be transferred to the load circuit when an insulated-gate bipolar transistor as the active power device is turned off. The experimental prototype is implemented to investigate the operation. The experimental results confirm that the proposed snubber energy recovery scheme has the feasibility.

キーワード：単相整流器，昇圧，スナバエネルギー回生，共振回路，IGBT

Keywords: single-phase rectifier, step-up, snubber energy recovery, resonant circuit, IGBT

1. まえがき

単相ダイオードブリッジと昇圧形 DC-DC コンバータを縦続接続した整流器⁽¹⁾やその直流回路にポンプ動作用キャパシタを付加した整流器⁽²⁾は、スイッチモードで動作し、可制御素子 1 個で実現できる。反面、可制御素子を保護するために、一般にスナバ回路が使用され、スナバ損失の発生は避けられない。本レターは、可制御素子のスナバエネルギーを有効利用するための共振回路を付加した単相昇圧形整流器を提案したものであり、実験から、その有用性を明らかにする。

2. 回路構成と動作原理

図 1 に本レターで提案する回路構成を示す。この整流器は、単相ダイオードブリッジと昇圧形 DC-DC コンバータを縦続接続した従来の整流器に小さなインダクタ L_r とキャパシタ C_r からなる共振回路を付加したものであり、 C_s はスナバキャパシタである。本整流器の特長は、IGBT で示すスイッチ Q のターンオン時に一旦キャパシタ C_s から C_r に移送蓄積されたスナバエネルギーが Q のターンオフ時に負荷回路へ移送される点にある。ただし、 D_{b1} は C_s の短絡放電、 D_{b2} は電流 i_r の逆流を阻止する。また、 D_r は C_r が逆極性に充電されるのを防ぐ役割を担う。以下、入力電流 i の制御法として電流追従制御を用いたときの $v > 0$ における代表的な動作モードの概略を図 2 を参考にして説明する。ただし、可聴帯域外のクロックパルスによって生成さ

れるオンゲート信号によって Q はターンオンし、 i の絶対値 $|i|$ が電源電圧 v と同位相で可変振幅の正弦全波整流基準波形 $|i^*|$ に達したとき、オンゲート信号は遮断されるものとする。また、 Q がターンオンするまで i は D_r を通って負荷回路へ流れ、 $e_s = e_o$ 、 $e_r = 0$ かつ $i_r = 0$ が成立しているものと仮定する。

(1) クロック周波数 f_c から作成されたセットパルスによって t_0 で Q にオンゲート信号が印加されると Q がターンオンし、 i は Q を通って流れる。また、 C_s は C_s - D_{b2} - L_r - C_r - Q の共振回路で放電し、 i_r が正弦波状に増加しながら C_r を充電する。したがって、 Q の電流は $i + i_r$ に等しい。(2) $e_s = 0$ になる t_1 で i_r は最大値に達し、 D_{b1} がターンオンする。このとき、 Q の電流は i のみとなり、 i_r が減少しながら C_r を充電し続ける。(3) L_r が放電して $i_r = 0$ になる t_2 で e_r は最大値に至り、 D_{b1} がターンオフする。このこと

図 1 提案する単相昇圧形整流器

Fig. 1. Proposed single-phase boost rectifier.

* 福岡大学

〒814-0180 福岡市城南区七隈 8-19-1

Fukuoka University

8-19-1, Nanakuma, Jonan-ku, Fukuoka 814-0180

図2 代表的な動作モード

Fig. 2. Typical modes of operation.

は、 C_s のエネルギーが C_r に移送蓄積されたことを意味する。他方、 Q がターンオフされるまでこの状態が維持される。(4) $|i|$ が $|i^*|$ に達した t_3 で Q のオンゲート信号が遮断され、これまで $e_s = 0$ であったので Q はゼロ電圧スイッチング (ZVS) でターンオフし、 C_s は i によって直線的に充電される。(5) t_4 で $e_s = e_o - e_r$ となると D_{b3} がターンオンし、 i は C_s と C_r を配置した枝に分流して C_s が充電されると共に、 C_r が放電して C_r に蓄積されていたエネルギーが負荷回路へ移送される。(6) e_r が減少して 0 になる t_5 で C_s が最大値 e_o に達すると同時に D_f が導通を開始して i は電源から負荷回路へ流れる。この動作モードは Q がターンオンする前の状態に等しく、次に Q がターンオンするまで回路動作は変化しない。なお、モード(1)と(4)の継続時間は非常に短く、スイッチング周期毎にスナバエネルギーが負荷回路へ供給される。ただし、 v のゼロクロス近傍では、 i が小さく、 C_r が充電されたままの状態では Q がターンオンするために C_s が放電しきれず、 Q はハードスイッチングでターンオフする。

3. 実験結果

本レターでは、動作条件および回路定数を電源電圧の実効値 $V = 100$ [V] ($f = 60$ [Hz]), $L = 1.99$ [mH], $C_s = 0.1$ [μ F], $L_r = 11.5$ [μ H], $C_r = 1.0$ [μ F], $C_o = 2200$ [μ F], $f_c = 20$ [kHz], $R_L = 32.56$ [Ω] に設定して実験を行った。図3は、出力電圧 e_o の平均値が 180 [V] となるように i^* を調整したときのデジタルオシロスコープによる実測波形である。図より、入力電流 i は極性反転直後で $|i|$ が $|i^*|$ に追従できないために歪みを生じるが⁽²⁾、 e_r が 50 [V] 近くに達し、この電圧で充電された C_r のエネルギーが負荷回路へ移送されるので、スナバエネルギーが有効に回生されていることが推察できる。実験では、変換器効率は 93.2 [%] であり、0.1 [μ F] のキャパシタ、33.0 [Ω] の抵抗およびダイオードからなる

図3 実測波形

Fig. 3. Measured waveforms.

従来のスナバを用いたときの変換器効率 90.8 [%] に比べて 2.4% の効率改善が確認できた。なお、図3の状態での入力電流の総合歪み率 (THD) は 4.41 [%]、総合力率は 0.998 であった。

4. あとがき

以上、従来のスイッチモード単相整流器に共振回路を付加した構成を提案し、実験から、スナバエネルギー回生の効果が確認できた。なお、例えば、電流不連続モードで動作するスイッチモード整流器⁽³⁾は入力電流を正弦波化できるが、これに本レターの共振回路を適用すれば、スナバエネルギーの有効利用だけでなく、可制御素子のターンオン・ターンオフ時ともソフトスイッチング動作が可能になるものと考えられ、今後検討する予定である。

(平成21年3月10日受付, 平成21年3月30日再受付)

文 献

- (1) I. Takahashi and W. Ikeshita: "Improvement of Input Current Waveform of a Single-Phase Rectifier Circuit", *T. IEE Japan*, Vol.105-B, No.2, p.82 (1985-2) (in Japanese)
高橋 勲・池下 亘:「単相整流回路の入力電流波形改善」, 電学論 B, **105**, 2, p.82 (1985-2)
- (2) H. Oishi, Y. Neba, K. Ishizaka, and R. Itoh: "Single-Phase Boost Rectifier Adding a Capacitor for Pumping Action in DC Circuit", *T. IEE Japan*, Vol.127-D, No.3, pp.347-348 (2007-3) (in Japanese)
大石隼人・根葉保彦・石坂耕一・伊藤良三:「直流回路にポンプ動作キャパシタを付加した単相昇圧形整流器」, 電学論 D, **127**, 3, pp.347-348 (2007-3)
- (3) A.R. Prasad, P.D. Ziogas, and S. Manias: "An Active Power Factor Correction Technique for Three-Phase Diode Rectifiers", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol.6, No.1, pp.83-92 (1991-1)