ポンプ回路を用いたソフトスイッチング単相倍電圧整流器

正員 伊藤 良三* 正員 石坂 耕一*

Soft-Switched Single-Phase Voltage-Doubler Rectifier Using Pump Circuits

Ryozo Itoh*, Member, Kouichi Ishizaka*, Member

Soft-switched single-phase voltage-doubler rectifier using pump circuits is presented. The active power devices in the full-bridge resonant switch are allowed to turn on and off under zero-current switching (ZCS) and zero-voltage switching (ZVS) conditions, respectively. The switching transition is mainly governed by a series resonance. The experimental prototype employing two dual-switch power modules with insulated-gate bipolar transistors is implemented to investigate the operation under the pulse-width modulation. The experimental results confirm that the input current can be waveshaped sinusoidally with a near-unity power factor.

キーワード：単相整流器，倍電圧，ソフトスイッチング，ポンプ回路，正弦波入力電流

Keywords: single-phase rectifier, voltage-doubler, soft switching, pump circuit, sinusoidal input current

1. まえがき

ロスレススナバの機能を併せ持つ共振スイッチを用いることによって、可制御素子がゼロ電流スイッチング (ZCS) でターンオン、ゼロ電圧スイッチング (ZVS) でターンオフする単相昇圧形整流器が実現できる⁽¹⁾。本レターは、これと等価な働きをするフルブリッジ構成の共振スイッチ⁽²⁾とポンプ回路を組み合わせたソフトスイッチング単相倍電圧整流器を提案したものであり、パルス幅変調法としてチャージコントロール⁽³⁾を適用した実験から、入力電流をほとんど力率1で正弦波状に制御できることを明らかにする。

2. 主回路構成と動作原理

図 1 に本レターで提案する単相倍電圧整流器を示す。共振スイッチは、それぞれ Q_1 , Q_2 , D_1 , D_2 および Q_3 , Q_4 , D_3 , D_4 から成る 2 個の IGBT モジュールとインダクタ L_r , キャパシタ C_r で構成される⁽²⁾。また、インダクタ L とキャパシタ C は不連続な インダクタ電流 i_r の高調波を減衰させる低域通過フィルタとして動作し、 $D_5 \sim D_8$ は、主に IGBT ターンオフ時におけるポンプ用キャパシタ C_{1p} , C_{1n} の充放電回路を確保するためのダイオードである。一方、図 2 は電圧・電流制御ブロック図であり、積分器、コンパレータおよび RS フリップフロップから成るチャージコントロールによって、スイッチング周期毎に $|i_r|$ の積分値に比例した電荷 q が制御される。 q の基準 q^* は予め ROM に書き込まれた単位大きさの正弦全波整流信号と PI 制御器の出力の積に

図1 提案するソフトスイッチング単相倍電圧整流器
Fig. 1. Proposed soft-switched single-phase voltage-doubler rectifier.

図2 電圧・電流制御ブロック図

Fig. 2. Voltage and current control block diagram.

* 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3 動作モード

Fig. 3. Modes of operation.

よって与えられ、その結果、各スイッチング周期の $|i_r|$ の時間積分値が正弦波状に変化する。なお、 f および f_s は各々電源周波数とスイッチング周波数であり、出力電圧 e_2 はその基準値 e_2^* を変えることにより調整される。ここで、 C_{1p} , C_{1n} , C_2 が十分大きいとすると、各キャパシタの電圧は一定と仮定でき、回路の対称性並びに後述するモード4の動作から $e_{1p} = e_{1n}$, $e_{1p} = e_2 - e_{1n}$ であるので、 $e_{1p} = e_{1n} = e_2/2$ が成立する。したがって、電源電圧 v が正での一スイッチング周期における動作モードは、 $e_{1p} = e_{1n} = E$ としたとき、図3のように表すことができる。以下、簡単のため、低域通過フィルタを無視し、 Q_2 , Q_3 にオンゲート信号 v_{gQ} が印加される t_0 までは $i_r = 0$, $e_r = E > v$ の状態にあるものとして動作モードの概略を説明する。

(1) t_0 で Q_2 , Q_3 にオンゲート信号が印加されると、 t_0 まで $i_r = 0$ であったので、 Q_2 , Q_3 はZCSでターンオンする。その結果、 L_r と C_r の直列共振によって i_r が正弦波状に増加し、 e_r は低下する。(2) t_1 で $e_r = 0$ になると、 D_1 , D_4 がターンオンする。したがって、 i_r は D_1 - Q_3 と Q_2 - D_4 の枝に分流し、 v/L_r に比例して直線的に増加する。一方、 e_r は0に保たれる。(3) q が t_2 で q^* に達すると、 Q_2 , Q_3 のオンゲート信号が遮断される。 t_2 まで $e_r = 0$ であったので、 Q_2 , Q_3 はZVSでターンオフする。このとき、 i_r は D_1 , D_4 を通って流れ、 L_r と C_r の直列共振によってピーク値に至る。また、 e_r は i_r/C_r に比例して上昇する。(4) t_3 で e_r が E に達すると D_5 , D_8 が導通を開始する。したがって、 i_r は、 C_{1p} - D_5 - D_4 と D_1 - C_2 - D_8 - C_{1n} に分流しながら、 $(v-E)/L_r$ に比例して直線的に減少する。他方、 e_r は E にクランプされる。(5) t_4 で i_r が0になると、導通状態にあった総てのダイオードがターンオフし、再び Q_2 , Q_3 にオンゲート信号が印加される t_5 まで $i_r = 0$, $e_r = E$ が維持される。モード5は、 Q_2 , Q_3 にオンゲート信号が印加される前の状態に等しく、スイッチング周期毎にモード1からモード5の動作が繰り返される。なお、 $v < 0$ のときの動作は、 Q_2 および Q_3 の役割を各々 Q_1 と Q_4 に置き換えて考えればよい。

3. 実験結果

本レターでは、回路定数を $L = 1.36 \text{ mH}$, $C = 6 \mu\text{F}$, L_r

図4 実測動作波形

Fig. 4. Experimental operating waveforms.

$= 19.8 \mu\text{H}$, $C_r = 0.1 \mu\text{F}$, $C_{1p} = C_{1n} = C_2 = 2200 \mu\text{F}$, $R_L = 198 \Omega$, $R_s = 1.8 \text{ k}\Omega$, $C_s = 2200 \text{ pF}$ とし、電源電圧 $V = 50 \text{ V}$ ($f = 60 \text{ Hz}$), $f_s = 10.02 \text{ kHz}$ に設定して実験を行った。図4は、出力電圧 e_2 の平均値が 180 V となるように e_2^* を調整したときの実測動作波形を示し、入力電流 i の実効値は 3.97 A である。図より、入力電流はほぼ力率1で正弦波状に制御されていることがわかる。ちなみに、入力電流歪みの主な原因となる低次高調波成分の基本波に対する割合は、FFTアナライザによる実測から、第3次、5次、7次、9次、11次、13次の順に各々 3.752% , 1.300% , 0.671% , 0.580% , 0.348% , 0.340% であった。また、このときの実測総合歪み率 (THD) は 4.146% 、実測総合力率は 0.995 であった。

4. あとがき

以上、フルブリッジ構成の共振スイッチとポンプ回路を組み合わせたソフトスイッチング単相倍電圧整流器を提案し、ほとんど力率1の正弦波入力電流が得られることを示した。今後、シミュレーションから実験結果の検証を行う予定である。最後に、本研究の装置作成および実験に協力された福岡大学大学院博士課程前期学生樋口義隆君に紙面を借りて深謝する。

(平成17年11月16日受付)

文 献

- (1) N. Kimura, T. Morizane, and K. Taniguchi: "Analysis of PFC Boost Converter with Soft-Switching Configuration", *T. IEE Japan*, Vol.119-D, No.5, pp.617-627 (1999-5) (in Japanese)
木村紀之・森實俊充・谷口勝則:「ソフトスイッチング単相昇圧形力率改善コンバータの特性解析と高調波抑制」, 電学論 D, **119**, 5, pp.617-627 (1999-5)
- (2) R. Itoh, K. Ishizaka, H. Kiyotake, and H. Okada: "Soft-Switched Single-Phase Boost Rectifier Using Full-Bridge Resonant Switch", *IEEE Electronics Letters*, Vol.38, No.16, pp.843-844 (2002-8)
- (3) K. Wang, D. Boroyevich, and F.C. Lee: "Charge Control of Three-Phase Buck PWM Rectifiers", *IEEE Applied Power Electronics Conference*, pp.824-831 (2000-2)