単相 PWM 電流形インバータ太陽光発電システムの直流インダクタ 電圧-時間バランスによる降圧チョッパスイッチング法

正員 根葉 保彦* 学生員 竹田 博一*
学生員 和田 浩司*

Switching Method of Step-down Chopper for DC Inductor Volt-second Balance in Single-phase PWM Current Source Inverter-PV Generation System

Yasuhiko Neba*, Member, Hirokazu Takeda*, Student Member, Hiroshi Wada*, Student Member

This paper presents a switching method of step-down chopper in single-phase current source inverter for photovoltaic generation. The on and off times of the chopper switch depend on the inverter PWM operation and the utility voltage, and these are determined by utilizing per carrier cycle volt-second balance for the dc inductor. The experimental result proves that the proposed strategy achieves the smoothing dc current and allows the dc reactor to be greatly reduced.

キーワード：降圧チョッパ，電圧-時間バランス，電流形インバータ，太陽光発電，単相回路

Keywords: step-down chopper, volt-second balance, current source inverter, photovoltaic generation, single-phase system

1. まえがき

PWM 電流形インバータによる太陽光発電システムは，系統との連系が容易で制御が簡単である反面，単相系統の場合には，非常に大きな直流電流平滑インダクタを必要とするので，システムが大型化する欠点がある。この一解決策として，系統の 2 倍周波数で PWM を行う降圧チョッパの適用が検討され，直流電流平滑化によりインダクタの値を低減できることが報告されている^{(1)~(3)}。しかし，この方法は系統電圧を正弦波，太陽電池電圧を一定としてチョッパ PWM パターンを作成するため，電圧に歪みや変動がある場合，インダクタを小さく設定した時に十分な平滑直流電流が得られず，結果として系統電流波形の歪みを誘発する。本レターは，系統連系太陽光発電 PWM 電流形インバータシステムにおいて，リアクトルに印加される電圧の時間バランスによるチョッパスイッチング法を提案するものであり，実験から，本方法が直流電流の平滑化に有効であることを明らかにする。

2. 回路構成と PWM 動作原理

図 1 は PWM 電流形インバータによる単相系統連系太陽光発電システム構成図を示す。太陽電池 PV は降圧チョッパを介して直流部の電流平滑インダクタ L_d と直列に接続する。インバータは PWM によって直流電流を正弦波電流

図 1 降圧チョッパインバータ PV システム構成

Fig. 1. Inverter-PV system with step-down chopper.

に変換し，PV 発電電力を系統へ逆潮流する。図 2 はインバータおよびチョッパ素子のスイッチングパルスとインダクタに印加される直流部電圧 e_d と e_{dc} の関係を示す。インバータを正弦波変調波 ξ による三角波比較方式 PWM でスイッチングする時，直流電圧 e_d はスイッチングパルスと同じ時間で系統電圧 e をチョッピングしたパルス列電圧となり，その基本波は系統の 2 倍周波数で変動する⁽⁴⁾。直流電流を平滑化するためには，搬送波周期 T_c において，パルス電圧 e_d の平均値に対応する電圧 e_{dc} をチョッパで出力し，インダクタ L_d に印加される電圧-時間バランスを維持する。すなわち，周期 T_c における e_{dc} 電圧パルスの面積 A_{ch} が e_d の面積 A_{in} と等しくなるようにチョッパのパルス幅 T_{ch} を決定する。この時，インバータのスイッチング時間は設定する変調波 ξ によって既知となるので，検出する系統電圧 $e(k)$ と PV 電圧 $e_{PV}(k)$ を用いて次式で計算する。

$$T_{ch} = T_{in} e(k)/e_{PV}(k) \dots \dots \dots (1)$$

* 福岡大学工学部電気工学科
〒814-0180 福岡市城南区七隈 8-19-1
Dept. of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Fukuoka University
8-19-1, Nanakuma, Jonan-ku, Fukuoka 814-0180

図2 スwitchingと電圧，電流波形

Fig. 2. Switching and voltage/current waveforms.

図3 動作波形 (200 V/div, 5 A/div, 5 ms/div)

Fig. 3. Experimental waveforms.

直流電流 i_d のスイッチングリプルは e_d と e_{dc} のパルスタイミングに依存するので，リプル最小化のためにチョッパパルスは搬送波谷点を中心として分配し，PV 動作電圧は系統電圧最大値より大きく設定する。また，インバータは系統電圧利用率を考慮してできる限り大きい振幅の変調波で PWM 動作する。なお，実際のパルスはソフトウェアによる割り込みで作成しているため， $k+1$ 番目の出力パルス計算に用いる電圧は k および $k-1$ で検出した電圧値による線形近似で推定した。

3. 実験結果

図3は太陽電池をほぼ最大出力 ($P_{PV} = 473 \text{ W}$, $E_{PV} = 175 \text{ V}$, $I_{PV} = 2.7 \text{ A}$) で動作した時の各部実測波形を示す。実験条件は $E = 100 \text{ V}$, $L_f = 1 \text{ mH}$, $C_f = 10 \mu\text{F}$, $C = 1000 \mu\text{F}$, 直流インダクタ L_d を 10 mH に設定してスイッチング周波数を 9.6 kHz とした。直流電流 i_d は平滑化され，正弦波系統電流 i が得られていることが確認できる。なお，系統電圧 e の高調波含有率は第3次 3.0% ，第5次 0.1% ，総合歪

図4 直流電圧，電流波形 (100 V/div, 4 A/div, 1 ms/div)

Fig. 4. DC voltage/current waveforms.

み率 3.3% ，PV 電圧の変動 (p-p 間電圧) は約 10 V であり，系統電流 i の高調波含有率は第3次 1.3% ，第5次 0.7% ，総合歪み率 3.3% であった。図4は電源半周期の直流部電圧，電流波形を示す。直流電圧 e_d と e_{dc} はそれぞれ系統電圧，PV 電圧の一部がスイッチングに対応して現れる波形となる。直流電流はこれらの電圧パルスに対応するリプルを含むが，搬送波1周期毎のインダクタ印加電圧の時間バランスにより，平均値が一定に維持されるため平滑電流となることがわかる。直流電流の平均値 $I_d = 6.9 \text{ A}$ に対する2倍周波数変動分含有率は 0.7% であり，非常に小さいことを確認した。

4. むすび

以上，系統連系太陽光発電 PWM 電流形インバータシステムの直流インダクタを低減するために，降圧チョッパを接続した回路において，インダクタに印加する電圧-時間バランスの原理により直流電流を平滑化するチョッパスイッチング法を示し，良好な動作波形が得られることを明らかにした。本方法によれば系統電圧が歪む場合でも平滑直流電流が得られるので，インダクタをさらに小さく選定できると考えられ，今後スイッチングタイミングと電流リプルの関係などを含めて特性を検討する予定である。

(平成16年9月24日受付)

文 献

- (1) 阿南文政・他：「単相 PWM 電流形インバータのチョッパ回路付加による直流リアクトル低減について」，平5電気関係学会九州支部連合大会，No.417 (1993-10)
- (2) Y. Monden, et al.: "A Utility Interactive Photovoltaic Power System with a Current Source Inverter and a DC-DC Converter", *T. IEE Japan*, Vol.116-D, No.6, pp.718-719 (1996-6) (in Japanese)
門田行生・他：「電流形インバータと DC-DC コンバータを用いた太陽光発電系統連系システム」，電学論 D, **116**, 6, pp.718-719 (1996-6)
- (3) K. Shimotsuura, et al.: "Steady-state analysis of single-phase utility interactive PV-inverter by using PWM step-down chopper", 2002 National Convention Record, IEE Japan, No.4-024 (2003-3) (in Japanese)
下津浦敬士・他：「PWM 降圧チョッパ制御による単相系統連系太陽光発電インバータの定常解析」，平15電気学会全大，No.4-024 (2003-3)
- (4) Y. Neba, et al.: "Models for single-phase PWM converters", *T. IEE Japan*, Vol.115-D, No.2, pp.176-177 (1995-2) (in Japanese)
根葉保彦・他：「単相 PWM コンバータのモデル化」，電学論 D, **115**, 2, pp.176-177 (1995-2)