

# 単相-三相マトリックスコンバータの 空間ベクトルを用いたパルス密度変調方式

中田 祐樹\*, 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Pulse Density Modulation Control using Space Vector for a Single-phase to Three-phase Matrix Converter  
Yuki Nakata, Jun-ichi Itoh (Nagaoka University of Technology)

## 1. はじめに

近年、非接触電力伝送など高周波の回路が盛んに研究されている<sup>(1)</sup>。このとき、変換器の入力は100kHz以上の高周波、出力は商用系統を想定する低周波であり、パルス密度変調(PDM)制御が適用できる。

著者らは、PDM制御を適用した単相-三相マトリックスコンバータを提案している<sup>(2)</sup>。PDM制御を用いることでゼロ電圧スイッチング(ZVS)が可能となるが、インダイレクト形回路においてデルタ-シグマ変換を用いたPDM制御法を適用した場合、出力波形に逆電圧パルスとクランプ現象が発生する。

本論文では、出力波形の改善手法として空間ベクトル変調(SVM)を基にしたPDM制御法を提案する。また、試作機による実験を行い、この2つのPDM制御手法について比較検討を行い、出力電圧波形の改善を確認したので報告する。

## 2. 回路構成と制御方式

図1に今回検討を行った単相-三相インダイレクトマトリックスコンバータ(IMC)の回路構成を示す。これは、整流器とインバータから構成される。本論文では、非接触給電の受電端を模擬して、入力は高周波の正弦波電圧源とする。この入力電圧の半周期を制御の最小単位(パルス)として扱い、スイッチングを行うことでPDM制御を適用できる。PDM制御では一定幅のパルスの密度およびその正負で波形を形成する。また、入力の半周期毎に現れるゼロクロス点でスイッチングを行うことでZVSが可能となる。ZVSによりスイッチング損失をほぼゼロにできる。なお、直流リンクには保護回路として、ダイオードとキャパシタ、放電抵抗で構成されるクランプスナバを接続している。

図2にデルタ-シグマ変換を用いたPDM制御ブロックを示す。スイッチングに用いるPDM信号は各相の指令値をデルタ-シグマ変換することで得られる。また、入力電圧のゼロクロス点と同期させることでZVSを実現する。しかし、この手法は図1のインダイレクト形の回路構成において、出力電圧波形に逆電圧パルスとクランプ現象が発生する。その結果、出力電圧のリップルとひずみの増加を招き、ZVSが得られないためスイッチング損失も増加する。

クランプ現象は、この制御法では出力電圧ベクトルと出力電流ベクトルの位相が瞬時的に30度以上になるスイッチングパターンが存在することに起因する。この改善法として、SVMを基にしたPDM制御法を提案する。

図3にSVMを基にしたPDM制御ブロックを示す。SVMでは、電圧ベクトルを出力する際に近接した基本ベクトル

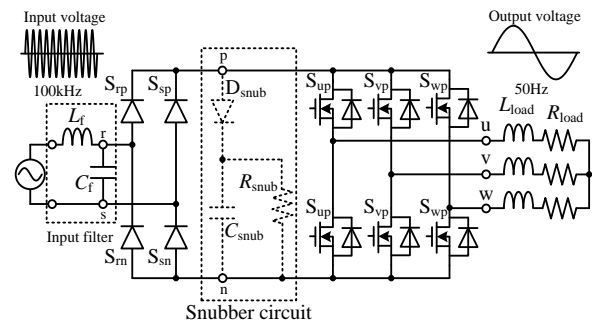


Fig. 1. Single-phase to three-phase indirect matrix converter.

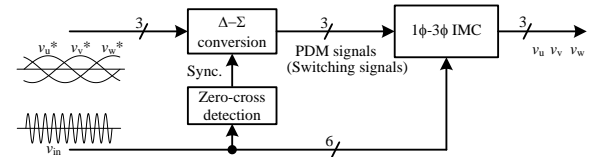


Fig. 2. PDM control block diagram using delta-sigma conversion.

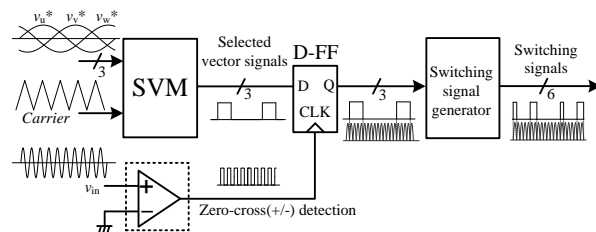


Fig. 3. PDM control block diagram based on SVM.

を選択し出力するため、出力電流ベクトルに対して出力電圧ベクトルの位相の変化を最小にできる。これにより、出力電圧のクランプ現象は発生しない。SVMの選択ベクトル信号をD-FFに入力し、入力電圧のゼロクロス検出信号をCLKに入力することで、出力Qはゼロクロス検出信号のエッジで同期する。この信号からスイッチング信号を生成することによりZVSを実現する。

## 3. 入力フィルタの設計

一般的な高周波電源は出力インピーダンス50Ωに整合されており、接続される回路インピーダンスとの整合をとる必要がある。そこで、インピーダンス整合回路として入力フィルタを接続しなくてはならない。

図4に入力フィルタの構成を示す。これは、インダクタンス $L_f$ とキャパシタ $C_f$ で構成される。抵抗 $R_{load}$ は接続される負荷を模擬したものである。入力側からのインピーダンスの実部が50Ω、虚部が0Ωになるように $L_f$ と $C_f$ の値を設

計することで整合できる。 $C_f$ 、 $L_f$ は(1)式に示すとおりである。ここで、 $\omega=2\pi f$ は入力電圧角周波数である。入力周波数 $f$ を100kHz、 $R_{load}$ を100 $\Omega$ とすると、 $C_f=16$ nF、 $L_f=80$  $\mu$ Hとなる。実験にもこの値を使用した。

$$\begin{cases} C_f = \frac{1}{\omega R_{load}} \sqrt{\frac{R_{load}}{50} - 1} \\ L_f = \frac{C_f R_{load}^2}{1 + (\omega C_f R_{load})^2} \end{cases} \quad (1)$$

#### 4. 実験結果

提案する2つの制御法の検証を行うため、実機による動作確認を行った。入力電圧は100kHz、100V、出力電圧は50Hz、50Vの正弦波とし、今回は無負荷でスイッチングし、各制御法の動作確認を行った。

図5にデルタ-シグマ変換を用いたPDM制御法を適用した動作波形を示す。(a)より、出力には周波数50Hzの正弦波電圧が出力されている。また、この制御法では、逆電圧パルスが発生しており、これはリップルの原因となる。(b)は(a)における区間Aを拡大したものである。(b)より、入力電圧のゼロクロス付近でスイッチングできていることが確認できる。しかし、実際にはゼロクロス点から約1 $\mu$ s遅れてスイッチングしている。この遅れは、ゼロクロス点を検出する回路とゲートドライブ回路(GDU)の遅れと、インバータのデッドタイムである。

図6に出力電圧の高調波解析結果を示す。結果より、出力電圧は出力周波数50Hzに対して低次高調波をほとんど含んでいないことがわかる。出力電圧のTHDは40次までで1.68%となった。また、高次では入力電圧周波数100kHzの2倍の周波数である200kHzの整数倍高調波を含んでいることがわかる。なお、今回の実験ではクランプ現象は発生していない。負荷を接続した際は、クランプ現象が発生し、THDがさらに悪化すると予想される。

図7にSVMを基にしたPDM制御法を適用した動作波形を示す。(a)より、出力には周波数50Hzの正弦波電圧が出力されている。また、この制御法では、スイッチングによるサージが発生しているが、逆電圧パルスは発生していない。これにより、出力電圧波形の改善が確認できる。(b)に(a)における区間Bの拡大図を示す。(b)より、インバータは入力電圧のゼロクロス付近でスイッチングできていることが確認できる。また、約1 $\mu$ sのゼロクロス点からのスイッチング遅れが存在する。

次に、図8に出力電圧の高調波解析結果を示す。結果より、出力電圧は出力周波数50Hzに対して低次高調波をほとんど含んでいない。出力電圧のTHDは40次までで1.48%となった。また、SVMのキャリア周波数5kHzと入力電圧周波数100kHzの2倍の周波数である200kHzの整数倍高調波を多く含んでいることがわかる。

#### 5. まとめ

本論文では、入力を高周波、出力を低周波とする単相-三相IMCにおけるPDM制御法について、実験により検討を行った。入力電圧を100kHzとして、どちらの制御法も、出力には50Hzの正弦波電圧を得られており、入力電圧のゼロクロス付近でのスイッチングを確認した。また、デルタ-シ

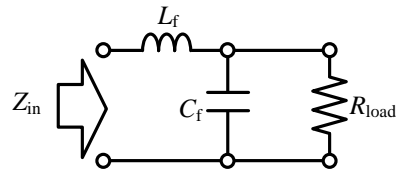
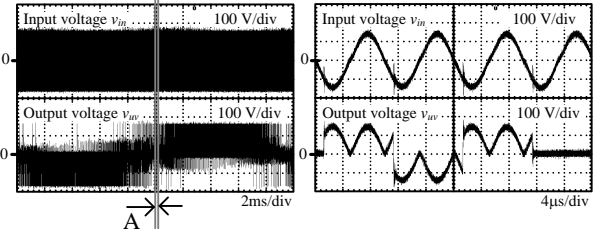


Fig. 4. Design of input filter.



(a) Input and output voltage waveforms. (b) Extended each waveform.

Fig. 5. Operation waveforms of the proposed circuit in the experiment with PDM using delta-sigma conversion.

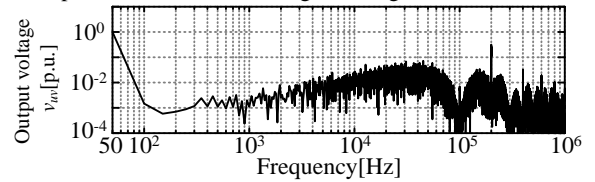
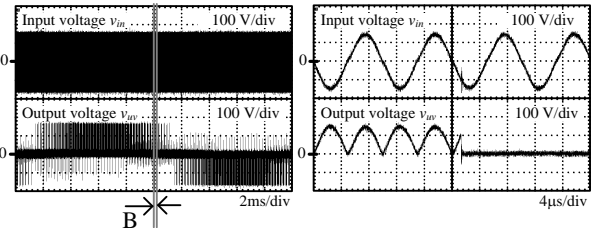


Fig. 6. Harmonics analysis of output voltage with PDM control using delta-sigma conversion.



(a) Input and output voltage waveforms. (b) Extended each waveform.

Fig. 7. Operation waveforms of the proposed circuit in the experiment based on SVM.

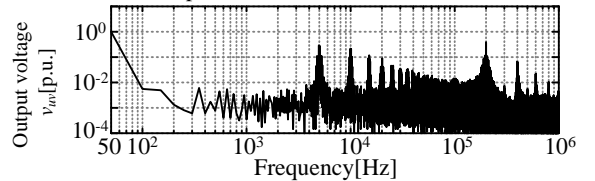


Fig. 8. Harmonics analysis of output voltage with PDM control based on SVM.

グマ変換を用いた方式では、出力電圧に逆電圧パルスを確認した。そして、SVMを基にしたPDM制御法では、逆方向電圧パルスが発生していないことを確認した。高調波解析では、それぞれの制御法の出力電圧THDはそれぞれ1.68%、1.48%となった。

今後は、負荷を接続した実験による各制御法の比較検討を行う予定である。なお、本研究は平成21年度産業技術研究助成事業の支援を受けており、関係各位に感謝の意を表します。

#### 文献

- (1) 黒田：電子情報通信学会誌，Vol.93，No.11 pp.964-968 (2010)
- (2) 中田・伊東：東京支部新潟支所大会，IV-07，p.114 (2010)