

瞬時空間ベクトルによるマトリックスコンバータの スイッチングパターンの比較

学生員 春名 順之介*

正員 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Comparison of Switching Pattern for the Matrix Converter Based on Instantaneous Space Vector

Junnosuke Haruna, Student Member, Jun-ichi Itoh, Member (Nagaoka University of Technology)

This paper proposes a new analysis method of switching pattern for a matrix converter. This method is used an instantaneous space vector and can visualize the relation among an output voltage command or input current command and selected switching pattern. The proposed method can clearly compare the difference points of the control algorithm for the matrix converter and can also consider the characteristics. In this paper, in order to consider availability of the proposed method, several control algorithms for the matrix converter were applied and compared the difference points and characteristics.

キーワード：瞬時空間ベクトル，マトリックスコンバータ，スイッチングパターン，ベクトル図

Keywords : Instantaneous space vector, Matrix converter, Switching pattern, Vector diagram

1. はじめに

近年，交流電源から任意の電圧，周波数に直接変換できるマトリックスコンバータが注目を浴び，盛んに研究されている⁽¹⁻⁴⁾⁽⁶⁾。その背景には，従来のインバータシステムと比較し，小型，軽量，高効率化の点で優れており，加えて，マトリックスコンバータの実現に不可欠な逆耐圧を持つIGBTが開発されていることが挙げられる。

マトリックスコンバータの制御方法の課題として，出力電圧と，入力電流を同時に制御することが挙げられる。入出力波形の制御方式として，仮想AC/DC/AC変換方式⁽¹⁻³⁾や，AC/AC直接変換方式⁽⁴⁾，空間ベクトルによる電圧出力法⁽⁶⁾などがある。これらの制御法は，パルス発生や入出力制御方法の簡単化など様々な着眼点からのアプローチであるが，最終的なPWMパルスの相違については不明瞭である。

そこで，本論文では，マトリックスコンバータのスイッチングパターン生成法を，瞬時空間ベクトルを用いて視覚化し，相違点を比較する解析方法を提案する。提案する解析方法では，マトリックスコンバータが，ある瞬間に選択しうるスイッチングパターンを瞬時空間ベクトル図で図示し，指令値に対してどのパターンを選択しているかを観測することで，最終的な制御方法の相違点を明確化できるという特徴がある。

本稿では，提案する解析方法について説明するとともに，4種類の異なるスイッチングパターン生成アルゴリズムを比較，検討することで，提案した方法の有用性を検討する。

2. スwitchingパターンの解析方法

図1にマトリックスコンバータの回路図を示す。マトリックスコンバータは，出力1相に対して，入力3相が接続されており，それぞれが双方向スイッチで構成されている。

入力 $m(r, s, t)$ 相，出力 $n(u, v, w)$ 相の間に接続されているスイッチを S_{mn} とし，そのスイッチング関数を s_{mn} とすると，出力電圧 $[v_u, v_v, v_w]$ と入力電流 $[i_r, i_s, i_t]$ は，入力電圧を $[v_r, v_s, v_t]$ ，出力電流を $[i_u, i_v, i_w]$ とすれば，(1)，(2)式で表される。

$$\begin{bmatrix} v_u \\ v_v \\ v_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{ru} & S_{su} & S_{tu} \\ S_{rv} & S_{sv} & S_{tv} \\ S_{rw} & S_{sw} & S_{tw} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_r \\ v_s \\ v_t \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_r \\ i_s \\ i_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{ru} & S_{rv} & S_{rw} \\ S_{su} & S_{sv} & S_{sw} \\ S_{tu} & S_{tv} & S_{tw} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} \quad (2)$$

ただし， $s_{mn}=1$: S_{mn} オン， $s_{mn}=0$: S_{mn} オフ

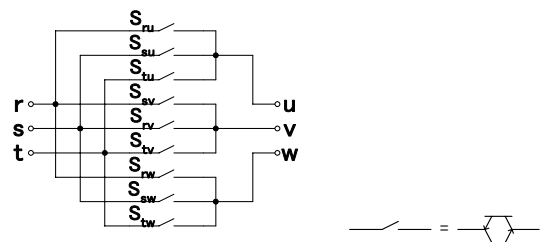


図1 マトリックスコンバータ

Fig. 1. Matrix converter.

マトリクスコンバータの制御条件として、電流が連続であることと、電源短絡をしてはならないことが挙げられる。これらの条件を満たすには、出力 1 相につき、ひとつのスイッチのみしかオンできない。これより、マトリクスコンバータのスイッチングパターンは、全部で $3^3=27$ パターンに制限される⁽⁶⁾。

以下に、瞬時空間ベクトルを用いたスイッチングパターンの解析方法を示す。ここでは、出力電圧について説明を行うが、電流についても同様の方法で解析できる。

〈2・1〉 スイッチングパターンのベクトル図化

図 2 に、マトリクスコンバータの出力電圧ベクトル図を示す。●は出力しうる電圧ベクトル、×は選択された電圧ベクトルの先端を表す。以下に図の表記方法を示す。

まず、(1)式に、入力電圧を代入し、 s_{mn} の全 27 パターンにおける出力電圧ベクトルを計算する。これにより、マトリクスコンバータが、ある電源位相の瞬間にどの電圧ベクトルを出力できるかを明らかにする。次に、入力電圧、出力電圧指令とともにこれらを静止座標変換し、ベクトル図で示す。この結果、入力電圧、出力電圧指令と、マトリクスコンバータの出力しうる電圧ベクトルとの関係を視覚化できる。最後に、出力電圧指令に応じてどのベクトルが選択されているかを示すことで、出力電圧指令ベクトルと選択された電圧ベクトルの関係がわかる。

〈2・2〉 ベクトル図の比較方法

本提案では、異なる制御方法から生成されるスイッチングパターンの相違点を明確化するだけでなく、それらの特徴も比較、検討できる。以下に、その比較方法を示す。

(1) 出力制御判定

マトリクスコンバータは、指令ベクトルの周囲に存在する出力電圧ベクトルをいくつか選択し、それぞれを出力する時間比を調節することにより指令値通りの電圧を出力している。この時間比の調節は、選択ベクトルをベクトル加算することによって、指令ベクトルとすることを表している⁽⁵⁻⁶⁾。従って、ベクトル合成により指令ベクトルを生成できない場合、出力することは不可能である。この条件を視覚化すると、選択ベクトルが、出力指令ベクトルの周囲を囲んでいる必要があることを表している。囲まれていな

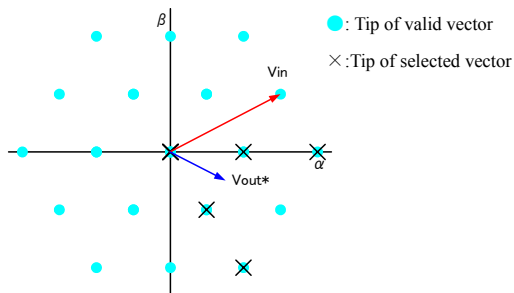


図 2 マトリクスコンバータの出力電圧ベクトル図
Fig.2. Output voltage vector diagram of the matrix converter.

い場合、ベクトル合成で指令値を生成できない。

図 3 に、マトリクスコンバータの出力制御判定を示す。(a)は、指令値を囲むようにベクトルが選択されているので、指令値通りの出力が可能である。対して、(b)では、選択ベクトルは指令値を囲んでいないので、出力不可能となる。

(2) リプル判定

マトリクスコンバータは、選択ベクトルを随時変化させて出力電圧を生成しているため、リプルが発生する。これは、指令ベクトルに対して選択ベクトルの距離が大きいほど大きくなる。よって、指令値により近いベクトルを選択することが望ましい。

図 4(a), (b)に出力指令ベクトル、選択ベクトルとリプルの関係を示す。ここでは選択ベクトルの距離の判定するために、選択ベクトルの頂点を結ぶ多角形について着目する。両者を比較すると、(b)の方が多角形面積は小さい。この場合、指令値に近いベクトルが選択されていることが明らかである。よって、リプルの大小関係は多角形面積に比例するといえる。しかし、選択ベクトルが異なっても、多角形面積が同じ場合がある。その場合は、より指令ベクトルに近いベクトルが選択されていた方がリプルは小さい。

3. 解析結果

本論文では、提案方法の有用性を検証するために、文献(1-4)の制御方式について比較を行った。(1-3)の方式は仮想 AC/DC/AC 変換方式と呼ばれ、仮想整流器と仮想インバータを想定し、仮想整流器側で入力電流を、仮想インバータで出力電圧をそれぞれ制御し、それらを合成することでスイッチングパターンを得る。それぞれ、(1)は、変形キャリアを用いることで入出力波形を改善する方式(以下、変形キャリア方式)、(2)は、仮想整流器側で電圧最大値を調整し、

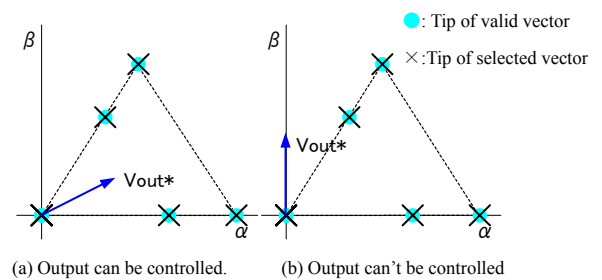


図 3 出力制御判定図

Fig.3. Output control test diagram.

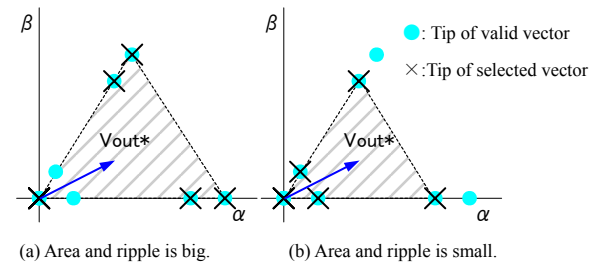


図 4 多角形面積とリプルの関係

Fig.4. Relation between polygonal area and voltage ripple.

仮想インバータ側でPAM制御を行う方式(以下、PAM方式)、(3)は、スイッチング損失が低減できるように、最大、中間、最小相に接続する順序を並び替える方式(以下、並び替え方式)である。(4)はAC/AC直接変換方式と呼ばれ、入力電流、出力電圧を一括で制御し、スイッチングパターンを生成する方式(以下、AC/AC方式)である。

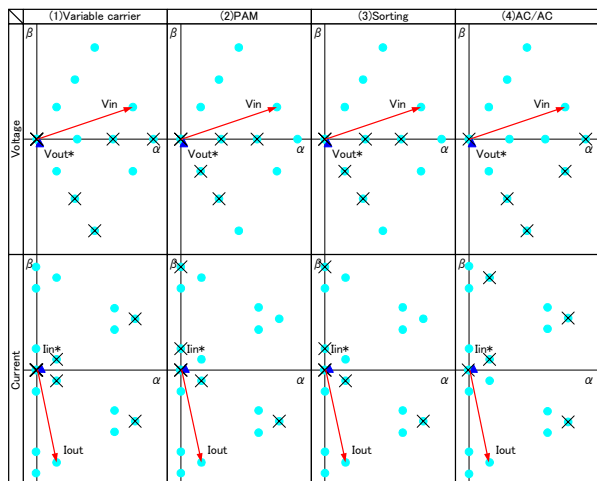
〈3・1〉出力電圧値とスイッチングパターンの関係

表1の条件でシミュレーションを行い、それぞれの制御方式の解析を行った。出力電圧が、低電圧時、中間時、最大電圧について解析し、特徴を比較、検討する。

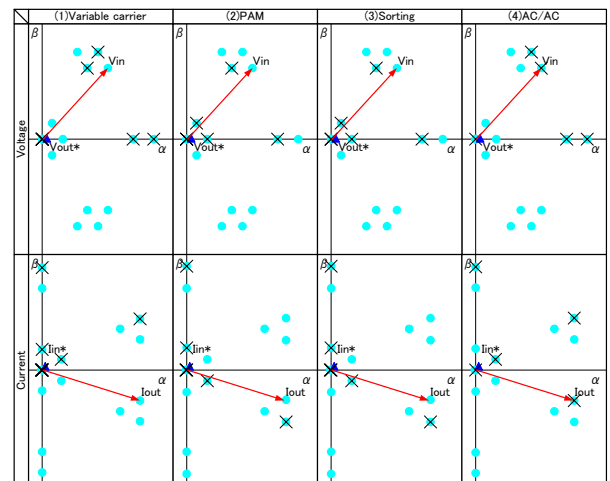
図5に入力R相電圧が最大の時の角度を 0° とし、電源角度が 20° 、 50° の出力電圧、入力電流ベクトル図の解析結果を示す。以下に、それぞれの特徴について考察する。

表1 シミュレーション条件
Table 1. Simulation Condition.

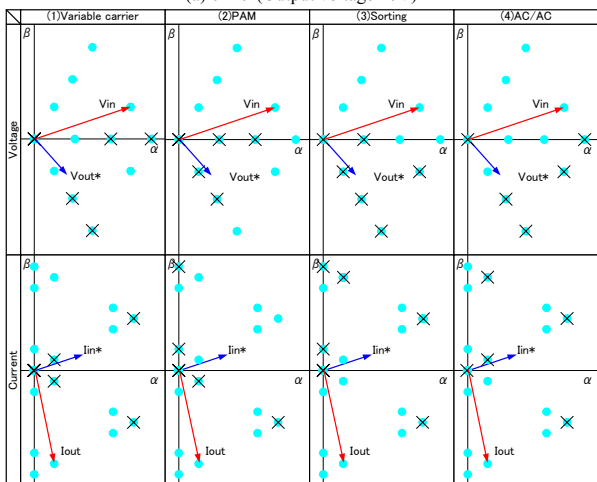
	Input	Output	Load	Carrier frequency
(a), (b)		10[V]/100[Hz]	RL load	10[kHz]
(c), (d)	200[V]/50[Hz]	100[V]/100[Hz]	8.33[Ω]	
(e), (f)		173[V]/100[Hz]	5[mH]	



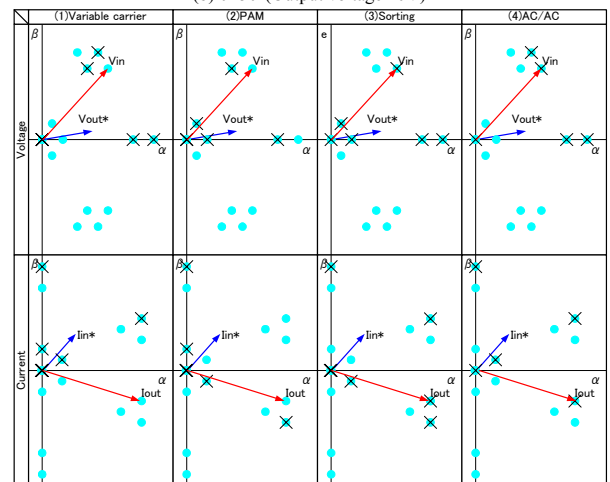
(a) $\theta=20^\circ$ (Output voltage 10V)



(b) $\theta=50^\circ$ (Output voltage 10V)



(c) $\theta=20^\circ$ (Output voltage 100V)

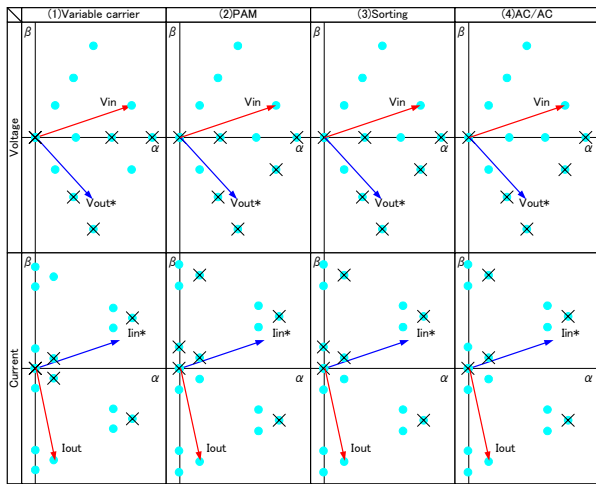


(d) $\theta=50^\circ$ (Output voltage 100V)

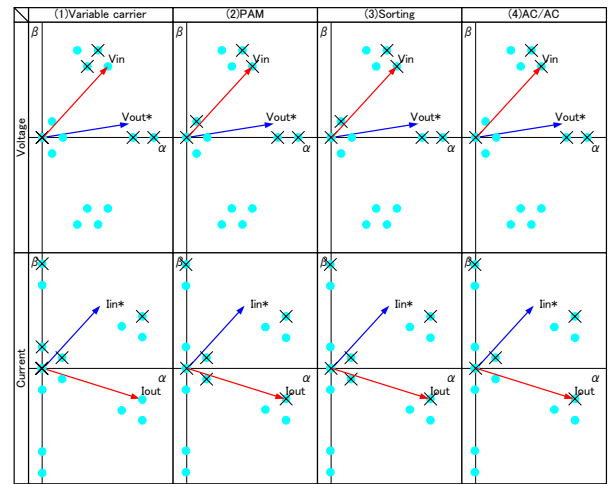
まず、図5(a), (b)に示す、低電圧時の選択ベクトルについて考察する。低電圧出力の場合、入力最大相を用いずに、中間相でスイッチングすることで、電圧精度が向上できることが報告されている⁽²⁾。PAM方式、並び替え方式では、同様のスイッチングパターンを選択しているが、これらは低電圧出力時において、中間相のスイッチングパターンが選択されており、また、選択ベクトルからなる多角形の面積が小さいので、電圧リップルは本質的に小さくなる。対して、変形キャリア方式、AC/AC方式では、中間相だけでなく最大相も選択されており、多角形面積が大きく、相対的に電圧リップルが大きいことが予想される。

次に、図5(c), (d)で示す、中間電圧出力時の選択ベクトルについて考察する。PAM方式では、低電圧出力時と同様に、中間相でスイッチングしているのがわかる。一方、他の方式では、最大相、中間相、最小相を選択している。低電圧出力時においては、PAM方式と並び替え方式に相違点が見られなかったが、このときに選択ベクトルの違いが見られ、両者が異なる制御方法あることが確認できる。

最後に、最大電圧出力時について考察する。最大出力時は、どの方式でも最大相を用いてスイッチングしているので、多角形面積はすべて等しい。PAM方式、並び替え方式



(e) $\theta=20^\circ$ (Output voltage 173V)



(f) $\theta=50^\circ$ (Output voltage 173V)

図5 解析結果 (●は出力ベクトル, ×は選択ベクトル)

Fig.5. Analysis results (● means the tip of valid vector and × means the tip of selected vector).

は、低電圧出力時と同様に全く等しいベクトルを選択しており、制御アルゴリズムが似ていると推測できる。

変形キャリア方式と AC/AC 方式は、出力電圧の大きさによらず、常に同じスイッチングパターンを生成していることがわかる。これらは、スイッチングの自由度が少なく、常にリップルが大きくなる傾向にあると考えられる。

〈3-2〉電圧リップルと電流リップルの関係

前節では、主に電圧ベクトルについて述べたが、ここでは、電流ベクトルと電流リップルについて考察する。PAM 方式などで選択されるベクトルは、多角形面積が小さく、電圧ベクトルに関しては最適であると考えられる。一方、選択される電流ベクトルを見ると、多角形面積が非常に大きく、電流リップルが大きい。これは、出力ベクトルを選択する際に、電圧ベクトルベースでスイッチングパターンの最適化を行うと、電流リップルの増大が起こることを示している。逆に、電流ベクトルの最適化を行った場合は電圧リップルが増大すると予想される。

変形キャリア方式は、電源と同一の方向に回転するベクトルが一切選択されていない。このため、電圧、電流リップルともに、出力電圧に関係なく常に一定であると考えられる。一方、他の方式では、電源電圧の角度によって、リップルの大小が変わってくる。よって、電源位相と指令値の位相が近接している場合は、電源と同一の方向に回転するベクトルが選択した方が、制御特性がよいといえる。

4. まとめ

本論文では、マトリックスコンバータのスイッチングパターンを、指令値に対して選択された出力ベクトルから瞬時空間ベクトルを用いて図示し、解析する方法を提案した。提案法が有用であることを証明するために、アルゴリズムの異なる4つの制御法を解析、比較検討した。それぞれの

制御法のベクトル図化することで、スイッチングパターンの相違点を明確にし、特徴を比較、検討することができたので、提案手法が有効であるといえる。

文 献

- (1) J. Itoh, I. Sato, H. Ohguchi, K. Sato, A. Odaka and N. Eguchi: "A Control Method for the Matrix Converter Based on Virtual AC/DC/AC Conversion Using Carrier Comparison Method", Trans. IEEJ, Vol.124-D, No.5 p457 (2004)
伊東淳一・佐藤以久也・大口英樹・佐藤和久・小高章弘・江口直也: 「キャリア比較方式を用いた仮想 AC/DC/AC 変換方式によるマトリックスコンバータの制御法」, 電学論 D, Vol.124, No.5 p.457 (2004)
- (2) A. Odaka, I. Sato, H. Ohguchi, Y. Tamai, H. Mine and J. Itoh: "A PAM Control Method for the Matrix Converter Based on Virtual AC/DC/AC Conversion Method", JIASC IEEJ, pp. I-203 -I-206 (2005)
小高章弘・佐藤以久也・大口英樹・玉井康寛・美根宏則・伊東淳一: 「仮想 AC/DC/AC 変換方式に基づいたマトリックスコンバータの PAM 制御法」, 平成 17 年電気学会産業応用部門大会, pp.I-203-I-206 (2005)
- (3) J. Itoh, H. Kodachi, A. Odaka, I. Sato, H. Ohguchi and H. Umida: "A High Performance Control Method for the Matrix Converter Based on PWM generation of Virtual AC/DC/AC Conversion", JIASC IEEJ, pp. I-303 -I-308 (2004)
伊東淳一・小太刀博和・小高章弘・佐藤以久也・大口英樹・海田英俊: 「パルスパターンに着目した仮想 AC/DC/AC 変換方式によるマトリックスコンバータの高性能化」, 平成 16 年電気学会産業応用部門大会, pp. I-303 -I-308 (2004)
- (4) J. Oyama, X. Xia, T. Higuchi, K. Kuroki, E. Yamada and T. Koga: "VVVF On-line Control of Matrix Converter", Trans. IEEJ, Vol.116-D, No.6, p644 (1996)
小山純・夏曉戒・樋口剛・黒木恒二・山田英二・古賀高志: 「PWM サイクロコンバータの VVVF オンライン制御」, 電学論 D, Vol.116, No.6, p.644 (1996)
- (5) J. Itoh and K. Fujita: "An Analysis Method of AC-AC Direct Converters by Using Switch Matrix", Trans. IEEJ, Vol.119-D, No.3 p351 (1999)
伊東淳一・藤田光悦: 「スイッチマトリックスを用いた AC-AC 直接変換回路の解析法」, 電学論 D, Vol.119, No.3, p.351 (1999)
- (6) T. Sakamoto and S. Fukuda: "Synthesis of Input and Output Waveforms of Matrix Converters Based on Instantaneous Space Vector Representation", JIASC IEEJ, pp. 383 -388 (1993)
坂本匡大・福田昭治: 「空間ベクトルによるマトリックスコンバータの入出力波形の合成」, 平成 5 年電気学会産業応用部門大会, pp. 383 -388 (1993)