

スイッチング状態時系列行列の提案と 多相インバータの出力電流復元への応用

学生員 野口 有理 正員 野口 季彦 (静岡大学)

A Proposal of Time-Series Switching-State Matrix and Application of Output Current Reconstruction to the Multi-Phase Inverter

Kuniyoshi Noguchi, Student Member, Toshihiko Noguchi, Member (Shizuoka University)

This paper proposes a new method of output current reconstruction of multi-phase inverter and describes the concept of time-series switching-state matrix. The proposed method expands the way to reconstruct output current of three-phase inverter to N-phase inverter. But, some condition that the controller can't reconstruct the current exists due to the conversion time of AD converter. To avoid the reconstruction fails, this paper proposes linear interpolation. First, the simulation of output current reconstruction of five-phase inverter shows the result of linear interpolation and the effectiveness of this method. Finally, this paper shows it is able to control the output current using the reconstructed current in d-q axis rotating frame for multi-phase inverter.

キーワード：多相インバータ，スイッチング状態時系列行列，電流センサレス

Keywords : multi-phase inverter, switching-state matrix, current sensor-less

1. まえがき

一般的な三相インバータの電流センサレスシステムは空調機などに応用されている。このシステムはインバータのスイッチング状態に対応した直流バス電流と各相の電流の関係から、直流バスに設置されたCTのみを用いてインバータの出力電流を復元するものである。これにより本来相電流のフィードバック等に必要であったCTを減らし、システムのコスト削減、省スペース化に貢献することができる。しかし、多相化されたシステムでは、相数の増加に応じて多くのCTが必要となるため、多相インバータでは電流センサレスシステム導入によるコスト削減と省スペース化の効果はさらに大きい。この論文では新たにスイッチング状態時系列行列を提案し、これを用いて各スイッチング状態における相電流と直流バス電流の関係を再検討することで、多相インバータの出力電流復元アルゴリズムを一般化、体系化した。しかし、実際の装置ではADコンバータの変換時間により復元に必要な直流バス電流値を取得できない期間が存在する。この区間においては、従来スイッチングパルスを強制的にずらし、電流値を取得するなどの工夫がとられているが、本論文では線形外挿を用いて補正する方法を提案し、変換時間を考慮した五相インバータの電流復元シミュレーションを行い、提案法と線形外挿を用いた補正の有効性を確認する。また、五相とd-q軸回転座標の相互変換を行い、復元された電流を用いて、回転座標上で電流制御が可能かどうかシミュレーションを行ったので報告する。

2. 三相インバータの出力電流復元法

PWMを用いた三相インバータの出力電流復元法は種々の論文で述べられている⁽¹⁾。ここでは、三相インバータの出力電流復元法を概説する。まず、図1に一般的な三相フルブリッジインバータを例としてインバータ、モータ制御システムのブロック図を示す。三角波キャリア一周期のPWMスイッチング波形の一例を図2に、一制御周期内に出現するスイッチング状態とそのときの相電流と直流バス電流の関係を表1に示す。このようにPWM三角波キャリアの一周期内に二相分の電流値を取得し、残りの一相を三相交流の平衡条件

$$I_a + I_b + I_c = 0 \quad (1)$$

から演算する。ただし、 T_s の間に電流の時間的変化が少ないことが前提となる。

3. スwitching状態時系列行列

三相インバータにさらにレグを並列接続した五相インバータについて考える。この場合も図2に示したように各スイッチング状態で直流バスから電流値を取得する方法をとる。一制御周期内に現れるスイッチング状態は図3に示すような形になる。図に示したスイッチング状態を縦に分割し、そのときのスイッチング状態 $S_a \sim S_e$ の組み合わせをベクトル $I \sim V$ とする。ベクトル $I \sim V$ の区間に直流バスに流れる電流をまとめると表2ようになる。ここで、ベクトル $I \sim V$ を行成分とし、上から時系列に並べた行列をス

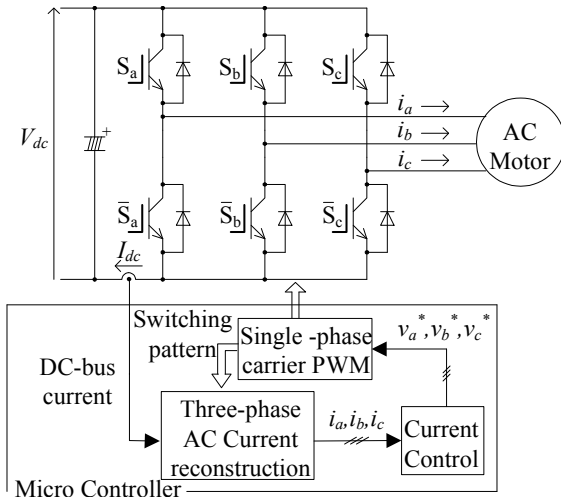


図1 三相インバータと制御ブロック図
Fig. 1. Block diagram of three-phase inverter and controller.

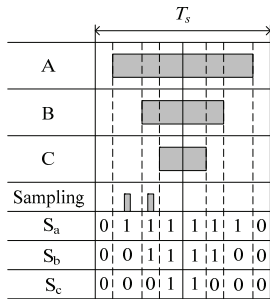


図2 三角波比較PWMパターン
Fig. 2. Sub-harmonic PWM pattern.

表1 スイッチング状態および直流バス電流と相電流の関係
Table 1. Switching states and relationship between DC-bus current and phase currents.

Switching States S _a , S _b , S _c	000	001	010	011	100	101	110	111
I _{dc}	0	I _c	I _b	-I _a	I _a	-I _b	-I _c	0

スイッチング状態時系列行列と定義する。なお、 I_{dcn} はそれぞれのスイッチング状態で取得された直流バス電流値を表し、一行目は直流バスに電流が流れないという点で等価なスイッチング状態(1, 1, 1, 1, 1)に置き換えている。このようにすることで一行目の成分を展開した式は平衡交流の条件式を表すことになる。(2)のスイッチング状態時系列行列の逆行列を用いて(2)を変形すると(3)のようになり、取得された電流値 I_{dcn} から相電流を復元することができる。

スイッチング状態時系列行列はベクトル I ~ V の組み合わせにより多数の形が存在するが規則性があり、例えばパルス幅が最大である相の電流値を演算する行は必ず(0, 1, 0, 0, 0)で固定される。このような規則性を用いて N 相インバータに拡張し、その出力電流復元法を考える。規則

$$\begin{bmatrix} I_{dc1} \\ I_{dc2} \\ I_{dc3} \\ I_{dc4} \\ I_{dc5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_d \\ I_e \end{bmatrix} \quad (2)$$

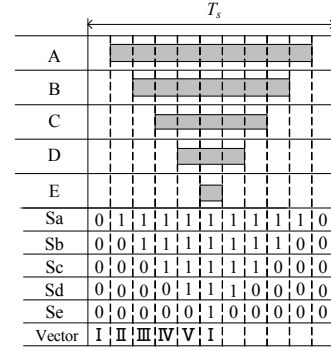


図3 五相インバータのPWMパターン
Fig. 3. Example of PWM pattern of five-phase inverter.

表2 スイッチング状態 I ~ V における直流バス電流
Table 2. DC currents in switching states from I to V.

Vector	I	II	III	IV	V
I _{dc}	0	I _a	I _a +I _b	I _a +I _b +I _c	I _a +I _b +I _c +I _d

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_d \\ I_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dc1} \\ I_{dc2} \\ I_{dc3} \\ I_{dc4} \\ I_{dc5} \end{bmatrix} \quad (3)$$

性を整理すると、スイッチング状態時系列行列の逆行列は(3)の左辺を PWM パルス幅が最大相から最小相の順となるように行の入れ替えを行うことで常に同一の逆行列を用いて(3)に基づきインバータ出力電流の復元を実現することができる。これをさらに N 相インバータの場合に拡張すると、(4)のように表すことができる。

$$\begin{bmatrix} I_{nmax} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ I_{nmin} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & -1 & 1 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dc1} \\ \vdots \\ \vdots \\ I_{dcn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

各スイッチング状態に対応した直流バス電流を N - 1 回取得し、そのベクトルとスイッチング状態時系列行列の逆行列をかけることにより $I_{nmax} \sim I_{nmin}$ を演算する。それを PWM パルス幅の大小関係に基づいて各相電流に振り分けることでインバータの出力電流を復元する。

4. 線形外挿による補正

各スイッチング状態で直流バス電流値を取得する方法は各相の電圧指令値が交錯する点で各相のパルスのデューティがほぼ等しくなる状態が出現する。実際の機器の場合、この付近では AD コンバータの変換時間に起因する電流値取得ミスが発生することが考えられる。よってこの期間は復元を行わず、過去の復元履歴を用いた線形外挿を行い、復元電流を補正する方法を提案する。N 回目の復元電流の値を X_n として X_n は次の(5)式で表される。

$$X_n = X_{n-1} + (X_{n-1} - X_{n-2}) \quad (5)$$

5. 五相インバータの出力電流復元シミュレーション

提案法を用いた電流復元を行い、かつ電流取得にかかる時間を考慮した場合について考える。表3に示すパラメータで、スイッチング状態時系列行列を用いた五相インバータの出力電流復元シミュレーションを行った。演算に用いられる直流バス電流は各相のオン信号に同期してサンプルされるが、取得時間を考慮し、電流値はオン信号が出力された後、表3に示す取得時間経過した後の電流値を用いる。図4に線形外挿を適用しない場合の復元波形、適用した場合の復元波形を示す。電圧指令値はオープンループで入力し、三角波キャリア比較により、PWMを行う。また結果は一相分のみを示す。これにより、提案法を用いて良好にインバータの出力電流を復元できており、線形外挿による補正も効果的であることがわかる。

6. 座標変換と電流制御

復元された電流を用いて回転座標上での電流制御が可能かどうかシミュレーションを行うために五相から回転座標への相互変換を考える。ここでは五相から二相への変換を行い、その後回転座標への変換を行う。五相から二相への変換式を(6)に、二相から回転座標への変換式を(7)にそれぞれ示す。

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{5} \begin{bmatrix} 1 & \cos 72^\circ & \cos 144^\circ & \cos 216^\circ & \cos 288^\circ \\ 0 & \sin 72^\circ & \sin 144^\circ & \sin 216^\circ & \sin 288^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_d \\ i_e \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \frac{2}{5} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (7)$$

また回転座標から二相、二相から五相の座標変換は(6)および(7)から変換式(8)、(9)のようになる。

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_d \\ i_e \end{bmatrix} = \frac{2}{5} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \cos 72^\circ & \sin 72^\circ \\ \cos 144^\circ & \sin 144^\circ \\ \cos 216^\circ & \sin 216^\circ \\ \cos 288^\circ & \sin 288^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (8)$$

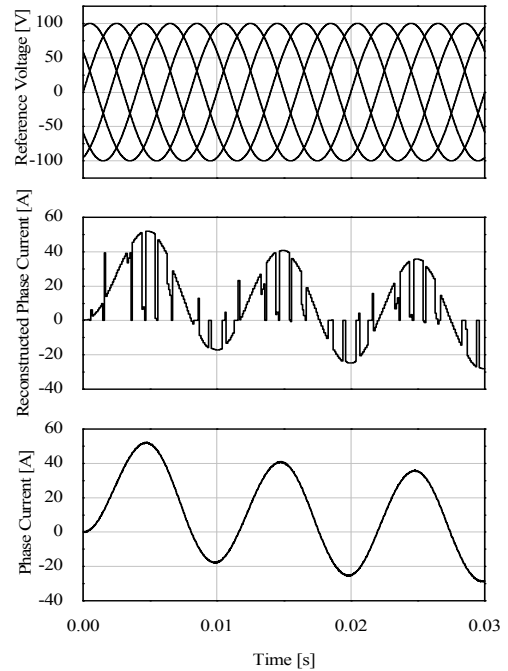
$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \quad (9)$$

ここで各座標変換は相対変換を用いている。復元された電流をフィードバックし、座標変換を行い、電流制御閉ループを形成する。電流制御系のブロック図を図5に示す。回転座標変換では任意の周波数をもつ、一定の角速度で回転する座標系を考えるものとする。この周波数はインバータ側で要求される周波数である。

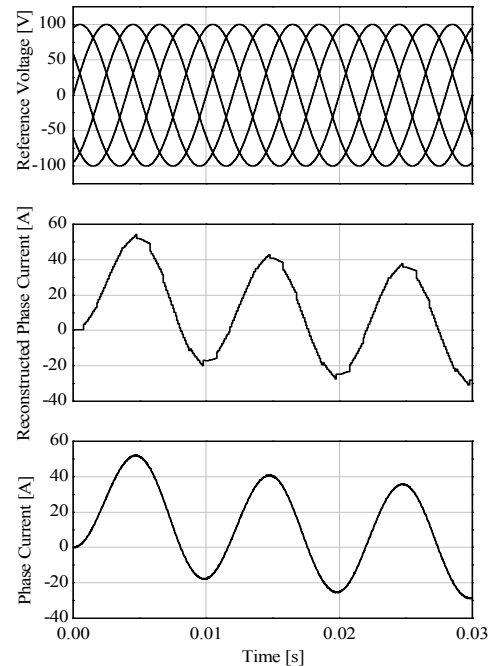
表3 シミュレーションのパラメータ

Table 3. Simulation parameters.

Power Supply Voltage	480 V
Carrier Frequency	10 kHz
Reference Voltage	200 V _{p-p}
Reference Frequency	100 Hz
Load	R = 0.3 Ω , L = 5 mH
Acquisition Time	1 μs



(a) Without linear interpolation.



(b) With linear interpolation.

図4 復元電流波形

Fig. 4. Reconstructed phase current wave form.

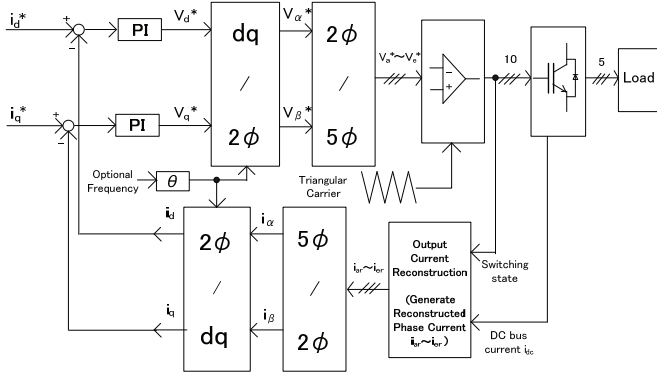


図 5 電流制御ブロック図
Fig. 5. Current control block diagram.

表 4 電流制御シミュレーションのパラメータ

Table 4. Current control simulation parameters.

Power Supply Voltage	480 V
Carrier Frequency	10 kHz
Reference Frequency	100 Hz
Load	$R = 0.3 \Omega$, $L = 5 \text{ mH}$
Acquisition Time	$1 \mu\text{s}$
d Axis Reference Current	0 A
q Axis Reference Current	50 A

7. 復元電流を用いた電流制御シミュレーション

スイッチング状態時系列行列の概念を基に直流バス電流から復元された電流値を用いて、回転座標上での電流制御シミュレーションを行った。前述の電流取得時間を考慮するので、電流復元が行えない期間が存在する。この期間は線形外挿による復元電流の補正を行うこととする。まず、復元された電流を用いず、実電流を用いて電流制御を行う。その後、復元電流を用いて電流制御を行い、実電流を用いた場合の結果と比較して、復元電流を用いた電流制御が有効であることを確認する。表 4 にシミュレーションのパラメータを示す。図 6 に実電流を用いた場合のシミュレーション結果と復元電流を用いた場合の結果を示す。

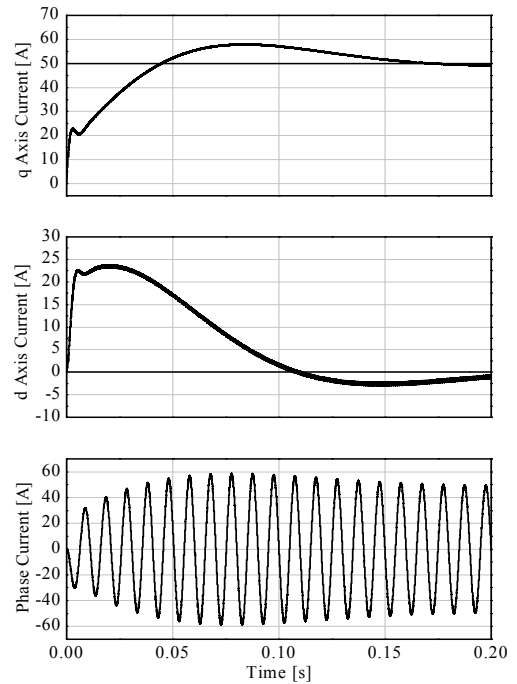
シミュレーション結果から復元電流を用いて電流制御を行った場合でも実電流の結果と同様の波形が得られ、実電流の代わりに復元電流を用いた場合でも十分な電流制御が可能であることがわかる。

8. まとめ

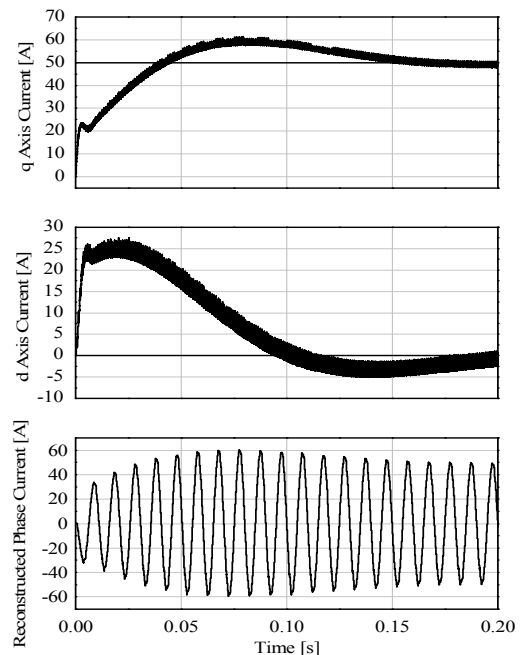
本論分では新しくスイッチング状態時系列行列の概念を導入することで、従来の三相インバータの出力電流復元法を N 相の多相インバータの出力電流復元アルゴリズムに一般化、体系化した。また、実際の機器で生じることが考えられる電流復元が不可能な期間についてシミュレーションで考察するとともに、線形外挿による補正を提案し、その効果を確認した。さらに、このような方法で出力された復元電流を用いて回転座標上で電流制御を行った場合の制御特性についてシミュレーションを行った。その結果、実電流を用いた場合の電流制御波形とほぼ同様の波形が得られ、復元電流を用いた電流制御が有効であることを確認した。

文 献

(1) Y. Murai, Y. Tanizawa, and M. Yoshida, "Three-Phase Current-Waveform-Detection on PWM Inverters from DC Link Current-Steps," Proceedings of 1995 International Power Electronics Conference (IPEC-Yokohama '95), vol. 1, p.p. 271-275, 1995.



(a) Current control using the phase current.



(b) Current control using the reconstructed phase current.

図 6 電流制御シミュレーション

Fig. 6. Current control simulation.