

スイッチング状態時系列行列を用いた 多相インバータの出力電流復元法

野口 有理*, 野口 敏彦 (静岡大学)

Output Current Reconstruction of Multi-Phase Inverter Using Time-Series Switching-State Matrix

Kuniyoshi Noguchi, Toshihiko Noguchi, (Shizuoka University)

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witching 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

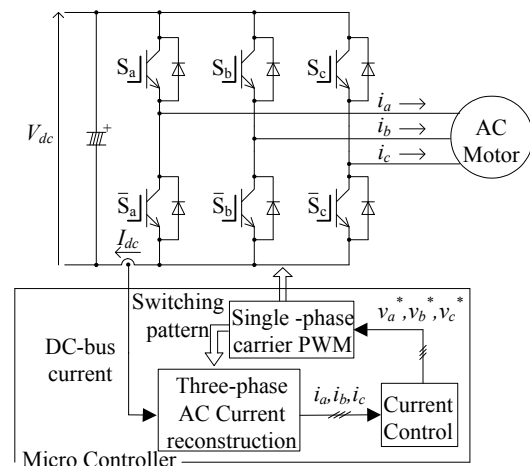


図 1 三相インバータと制御ブロック図
Fig. 1. Block diagram of three-phase inverter and controller.

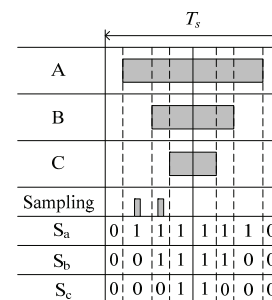


図 2 三角波比較 PWM パターン
Fig. 2. Sub-harmonic PWM pattern.

表 1 スwitching 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

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 のようになる。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イッチング状態時系列行列と定義する。

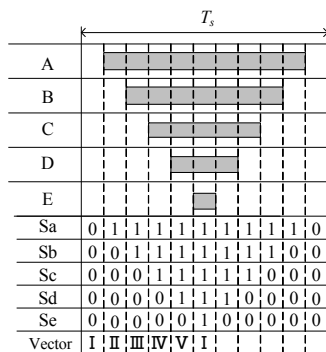


図3 五相インバータのPWMパターンの例
Fig. 3. Example of PWM pattern of five-phase inverter.

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	$I_a + I_b$	$I_a + I_b + I_c$	$I_a + I_b + I_c + I_d$

図3のスイッチング状態を例にとると、表2とスイッチング状態時系列行列から直流バス電流と相電流の関係は(2)で表すことができる。

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

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。

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

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。

表4 シミュレーションのパラメータ

Table 4. Simulation parameters.

Power Supply Voltage	240 V
Carrier Frequency	10 kHz
Reference Voltage	200 V _{p-p}
Reference Frequency	60 Hz
Load	$R = 0.3 \Omega, L = 5 \text{ mH}$

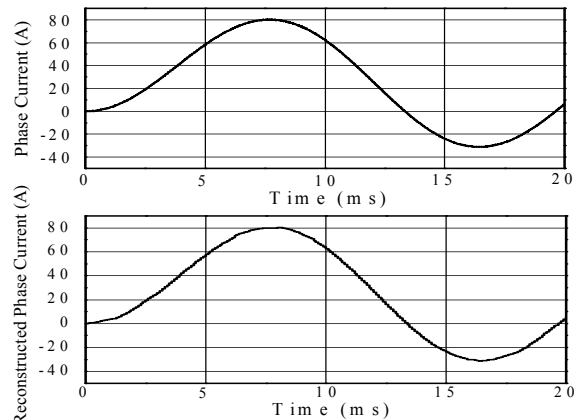


図4 シミュレーション結果

Fig. 4. Simulation result.

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

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 $I_{n \max} \sim I_{n \min}$ 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ことができる。

4. 五相インバータの出力電流復元シミュレーション

表4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。一相分のみの結果を図4に示す。これにより、提案する手法を用いて良好にインバータ出力電流を復元できていることがわかる。

5. まとめ

スイッチング状態時系列行列を用いて五相インバータの出力電流復元シミュレーションを行い、その有効性を確認した。さらにN相に多相化した場合でも、 $N - 1$ 個の直流バス電流値、パルス幅の大小関係、スイッチング状態時系列行列の逆行列を用いて復元できることを示した。

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.