

# 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

熊切 有希\* 野口 季彦 野口 有理 (静岡大学)

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

Yuki Kumakiri\*, Toshihiko Noguchi, Kuniyoshi Noguchi (Shizuoka University)

This paper proposes a new method of output current reconstruction of a multi-phase inverter and describes the concept of a switching-state time-series matrix. The proposed method extends and generalizes a theory to reconstruct output currents of a three-phase inverter to an N-phase inverter. First, simulations of the output current reconstruction of a five-phase inverter and a fifteen-phase inverter show effectiveness of this method. Finally, this paper shows some experimental results of the current reconstruction in the prototype five-phase inverter.

**キーワード** : スイッチング状態時系列行列, 多相インバータ, 電流復元, 電流センサレス  
(Switching-state time-series matrix, multi-phase inverter, current reconstruction, current sensorless )

### 1. はじめに

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適用されており, 製品のコストダウンや回路構成の簡素化に役立っている。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。さらに, 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, 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非常に大きい。本稿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した。このアルゴリズムは三相の出力電流復元法を内包し, 共通のアルゴリズムをもって, より多くの相数をもつインバータの出力電流復元を単純な演算で実現できる。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, 本稿では線形外挿を用いて補正する手法を採用し, 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うことにより, 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導入し, 復元された電流で回転座標における電流制御のシミュレーションを行い, 復元電流による電流制御の実用性を確認する。さらに極端な多相化を行った場合でも提案法が有効であることを確認するため, 十五相インバータでの電流復元シミュレーションを行った。最後に五相インバータを試作して実際に電流復元を行い, 復元精度等について実機検証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

三角波キャリア比較 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<sup>(1)</sup>。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 の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, 直流バス電流の関係を表 1 に示す。このように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を例に挙げて検討する。この場合も図2に示したように各switching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switching状態の一例を図3に示す。図に示したswitching状態を縦に分割し、そのときのswitching状態Sa~Seの組み合わせをベクトルI~Vとする。ベクトルI~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~Vを行成分とし、上から時系列に並べた行列をswitching状態時系列行列と定義して(2)のように表現する。

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

なお、 $I_{dcn}$ はそれぞれのswitching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switching状態(1, 1, 1, 1, 1)に置き換えている。この一行目の成分を展開した式は平衡交流の条件式にはかならない。(2)のswitching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。

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

switching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、switching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換えを行うことで、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。

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

各switching状態に対応した直流バス電流をN-1回取得し、(4)のようにその電流ベクトルとswitching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すべての相の出力電流

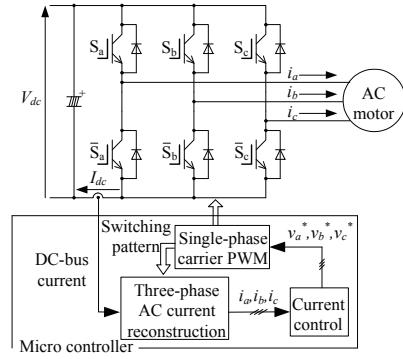


図1 三相インバータと制御ブロック図  
Fig. 1. Block diagram of three-phase inverter and controller.

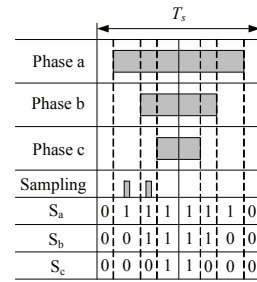


図2 三角波比較PWMパターン  
Fig. 2. Sub-harmonic PWM pattern.

表1 スwitching状態と直流バス電流および相電流の関係  
Table 1. Switching states and relationship between DC-bus current and phase currents.

Switching States Sa, Sb, Sc	000	001	010	011	100	101	110	111
$I_{dc}$	0	$I_c$	$I_b$	$-I_a$	$I_a$	$-I_b$	$-I_c$	0

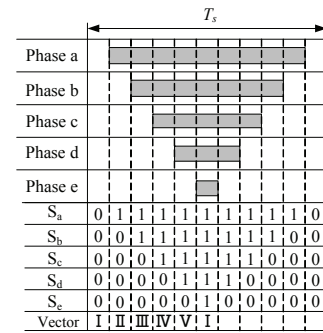


図3 五相インバータのPWMパターンの例  
Fig. 3. Example of PWM patterns of five-phase inverter.

表2 スwitching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.

Switching State Vector	I	II	III	IV	V
$I_{dc}$	0	$I_a$	$I_a + I_b$	$I_a + I_b + I_c$	$I_a + I_b + I_c + I_d$

を復元することができる。

#### 4. シミュレーションによる検証

**〈4.1〉 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本手法は各相の電圧指令値が交差する点でそれに対応したパルス幅が等しくなる状態が出現する。実際の機器の場合、この近傍ではADコンバータの変換時間に起因して電流取得ミスが発生する。よってこの期間では復元を行わず、過去の復元履歴を用いた線形外挿を行うものとする。以降のシミュレーションではこの補正を用いる。N回目の復元電流の値を  $I_k$  として  $I_k$  は(5)で表される。

$$I_k = I_{k-1} + (I_{k-1} - I_{k-2}) \quad (5)$$

**〈4.2〉 五相電流制御シミュレーション** ここではシミュレーションで提案法を用いた出力電流復元の有効性を確認する。また、復元電流を用いて任意の周波数で回転する  $d-q$  軸座標上で電流制御を行い、復元電流を用いた電流制御の可能性についても検証する。図4に五相インバータの主回路と制御ブロック図を示す。制御回路はスイッチング状態と直流バス電流の情報から五相の復元電流を出力し、復元電流に対して五相-二相変換および二相-回転座標変換を施す。その後、PI制御器により電圧指令値を生成し、回転座標-五相の変換が行われ、再びPWM信号が出力される。五相-二相変換および二相-回転座標変換の式をそれぞれ(6), (7)に、その逆変換を(8), (9)に示す。

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{5} \begin{bmatrix} 1 & \cos \frac{2}{5}\pi & \cos \frac{4}{5}\pi & \cos \frac{6}{5}\pi & \cos \frac{8}{5}\pi \\ 0 & \sin \frac{2}{5}\pi & \sin \frac{4}{5}\pi & \sin \frac{6}{5}\pi & \sin \frac{8}{5}\pi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_d \\ i_e \end{bmatrix} \quad (6)$$

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

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_d \\ i_e \end{bmatrix} = \frac{2}{5} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \cos \frac{2}{5}\pi & \sin \frac{2}{5}\pi \\ \cos \frac{4}{5}\pi & \sin \frac{4}{5}\pi \\ \cos \frac{6}{5}\pi & \sin \frac{6}{5}\pi \\ \cos \frac{8}{5}\pi & \sin \frac{8}{5}\pi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (8)$$

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

シミュレーションにおいては前述の線形外挿を導入し、かつ電流取得にかかる時間とデッドタイムを考慮した場合を想定する。各シミュレーションパラメータを表3に示す。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、電流値はオン信号が出力された後、表3に示す取得時間が経過した後の電流値が用いられる。なお電圧指令値に対しては10kHzの三角波キャリアでPWMを行う。提案法を用いた五相インバータで電流制御を

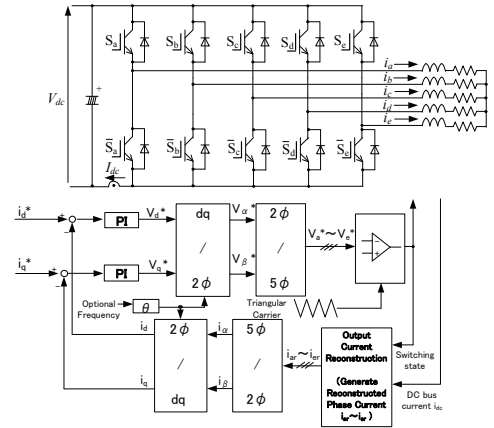


図4 五相インバータ電流制御ブロック図  
Fig. 4. Block diagram of five-phase inverter and current controller.

表3 五相インバータのシミュレーションパラメータ  
Table 3. Simulation parameters of five-phase inverter.

Power Supply Voltage	480 V
Carrier Frequency	10 kHz
Operation Frequency	100 Hz
Dead Time	2 μs
Acquisition Time	1 μs
Load	$R = 0.3 \Omega, L = 5 \text{ mH}$
$d$ -Axis Reference Current	0 A
$q$ -Axis Reference Current	50 A

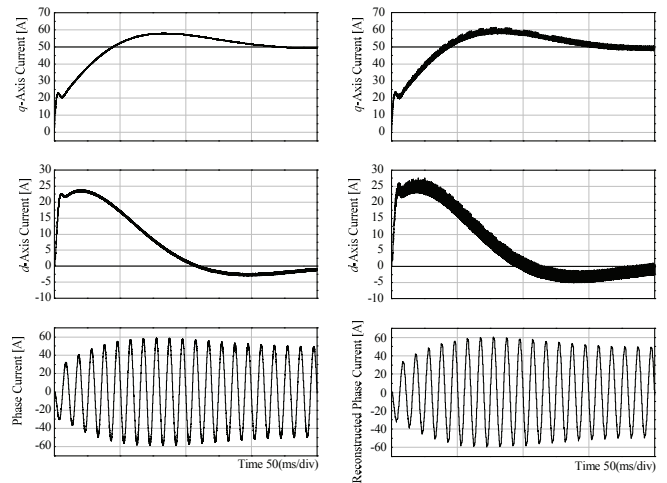


図5 五相インバータの電流制御シミュレーション結果  
Fig. 5. Result of current control simulation in five-phase inverter.

行ったときのシミュレーション結果を図5に示す。図5から復元電流が実電流と似たような波形であることがわかる。また、復元電流を用いて回転座標上で電流制御を行った場合でも実電流による制御と同等の制御が実現されていることがわかる。電流取得時間により復元不可能な期間の影響を線形外挿を行うことで排除したため、復元電流波形に大きな誤差は生じていない。以上のシミュレーション結果から統一された提案アルゴリズムにより、多相インバータでも出力電流を復元できることを確認した。

〈4・3〉 十五相電流復元シミュレーション ここではより極端な多相化を行った場合について、提案する電流復元法をシミュレーションにより検証する。図 6 に本稿で取り扱う一般的な多相フルブリッジインバータの構成を示す。十五相インバータは一相分の上下アームを並列に 15 組並べた回路である。表 4 に十五相インバータのシミュレーションパラメータを示す。なお、このシミュレーションにおいてはデッドタイムや電流取得時間は考慮していない。位相差が  $\frac{2}{15}\pi \text{ rad}$  である十五相電圧指令値をオープンループで

入力し、三角波キャリア比較 PWM を行う。図 7 に全相の復元電流と実電流のシミュレーション波形を示す。

同図から十五相フルブリッジインバータにおいても、提案する一般化された電流復元アルゴリズムを用いて、各相の出力電流が良好に復元され、復元電流と実電流が相似であることを確認できる。ただし、五相インバータの場合と比べて復元不可能な期間が基本波一周内に多く存在するため、線形外挿による誤差が大きいことがわかる。以上のように、極端な多相化を行った場合でも提案法により電流復元を行うことができるが、多相化するにつれて復元不可能な期間の頻度が多くなり、そのような期間でどのように電流取得を行うのが今後の課題である。

## 5. 実機検証

〈5・1〉 実験回路および復元動作 前章では提案する出力電流復元法の有効性をシミュレーションにより確認した。ここでは試作した五相フルブリッジインバータを用いて、実際の電流復元可能性とともに復元精度について検証を行う。

図 8 に試作した五相インバータの制御ブロック図と主回路を示す。負荷は  $R-L$  負荷とし、主回路は三菱電機製インテリジェントパワーモジュール PS21994 を 2 個使用して、最大で六相フルブリッジインバータとして動作が可能である。直流バスの電流センサは LEM 製ホール CT LA-25-NP を使用する。また、電流取得に必要な時間は主に AD 変換にかかる時間が占めるため、実機においては 65 Msps (sample per second) の高速 AD コンバータを用いて電流取得時間の影響をできるだけ排除している。PWM の制御に関してはルネサスエレクトロニクス製マイコン V850IH4-H を使用し、オンチップデバッグエミュレータ MINICUBE2 を用いてマイコンへの書き込みを行う。プログラミングソフトは CubeSuite+ を用いている。

電圧指令値は位相差が  $\frac{2}{5}\pi \text{ rad}$  である 100 Hz の三角波を正弦波に代えてオープンループで入力し、三角波キャリア比較 PWM を行う。出力されたスイッチング状態と直流バス電流から復元電流を出力し、各相の実電流と比較する。制御回路側は、PWM 信号の出力を行うとともに各相の上アーム信号に同期して電流値のサンプリングを開始する。また、

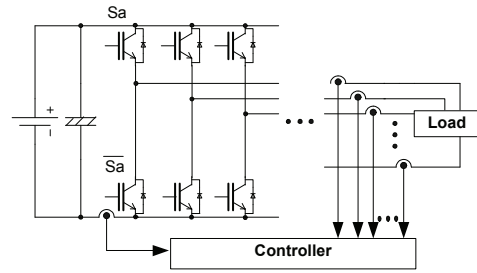


図 6 一般化された多相インバータ  
Fig. 6. Generalized configuration of multi-phase inverter.

表 4 十五相インバータのシミュレーションパラメータ  
Table 4. Simulation parameters of fifteen-phase inverter

Power Supply Voltage	480 V
Carrier Frequency	10 kHz
Operation Frequency	100 Hz
Load	$R = 0.3 \Omega, L = 5 \text{ mH}$

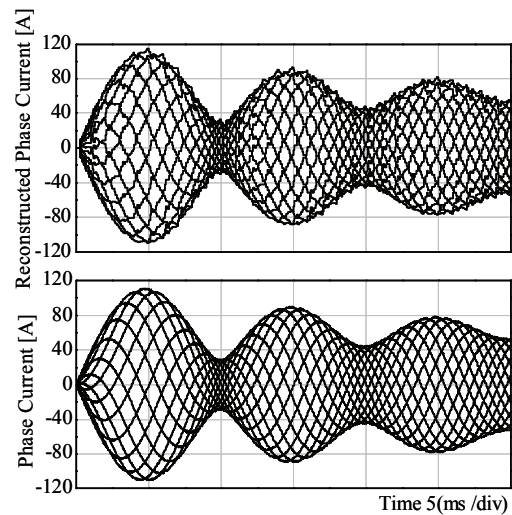


図 7 十五相インバータの電流復元シミュレーション結果  
Fig. 7. Simulation result of current reconstruction of fifteen-phase inverter.

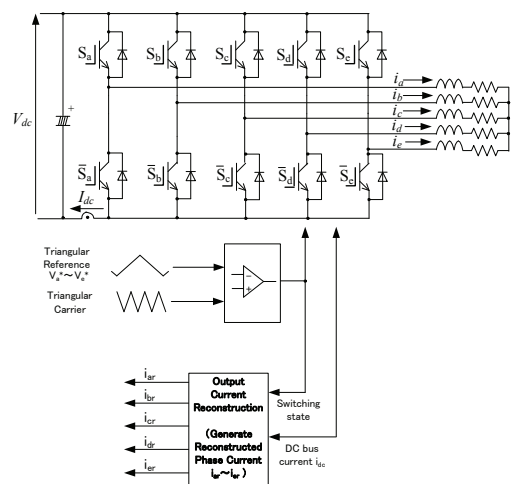


図 8 実機五相インバータの制御ブロック図  
Fig. 8. Block diagram of test circuit of five-phase inverter.

サンプリングと同時に各相がどの順番でオンしたのかも記録する。全ての相の上アームがオンになり、キャリア三角波が最小値をとる点で電流復元が行われる。先ほど記録さ

れた順番がそのまま電圧指令値の大小関係となり、この情報と直流バス電流の情報を基に各相の電流が(4)に基づいて復元される。

また、実験波形とシミュレーションとの整合性を取るため、実機と同様のパラメータでシミュレーションを行った。表5にシミュレーションおよび実機の各パラメータを、図9に実験回路の写真を示す。変調率を下げすぎると各相のパルス幅がほぼ等しくなり、復元可能な期間が狭くなるため、電源電圧を変化させて変調率を変更しないように実験を行った。

**〈5・2〉 実験結果** 図10の左にシミュレーションで得られた一相分の相電圧、電流および線間電圧を、右に実機波形を示す。同図から試作した実機がシミュレーションと同様に五相インバータとして正しく動作していることがわかる。

図11左に復元不可能な期間において線形外挿を行わなかった場合のシミュレーション結果を、右に実機波形を示す。なお、インバータの直流バス電源電圧は50Vである。電圧指令値が交差し、五相中二相のパルス幅がほぼ等しくなる点において、電流取得時間に起因する電流復元ミスが生じていることがわかる。これはシミュレーション上でも実機でも同様に起こり得る現象であり、このような期間で線形外挿などの補償を行う必要がある。また、復元精度の良い期間とそうでない期間が生じているが、これについては今後の検討課題である。ただし、最も精度の良い期間においては平均相対誤差が3.3%となり、十分な精度で電流復元を実現できている。

図12に線形外挿を行った場合の全相の復元電流波形と、一相分の復元電流と実電流の比較を示す。これ以降の実験結果は全てインバータの直流バス電源電圧を100Vとして得られたものである。これを見てわかるように線形外挿により復元不可能な期間における電流復元ミスがなくなり、全相で実電流波形と相似な復元相電流波形が得られている。図11と同様に復元精度が良い期間と悪い期間があるが、最も精度の良い期間で平均相対誤差は3.2%であり、良好な復元動作が行えている。

図13に一相ごとの復元相電流と実相電流との比較波形を、図14に全相の実相電流および復元相電流波形を示す。なお、図13と図14は同時に取得されたものであり、単純に比較できる。図11および図12と同様に復元精度の悪い期間と良い期間が存在するが最も精度の良い区間で、全ての相が平均相対誤差5%以内の良好な復元精度をもっている。また全ての相で実相電流波形と相似かつほぼ一致する復元電流波形が得られた。

## 6. まとめ

本稿では三相インバータ電流センサレスシステムの直流バス電流から各相の出力電流を復元する手法について、三相システムを内包する概念としてスイッチング状態時系列行列を提案するとともに、それを用いてより多相化された

表5 五相インバータのシミュレーションおよび実機パラメータ  
Table 5. Simulation and test circuit parameters of five-phase inverter.

Carrier Frequency	10 kHz
Reference Frequency	100 Hz
DC Supply Voltage	50 or 100 V
Load	$R = 4.6 \Omega, L = 3.23 \text{ mH}$

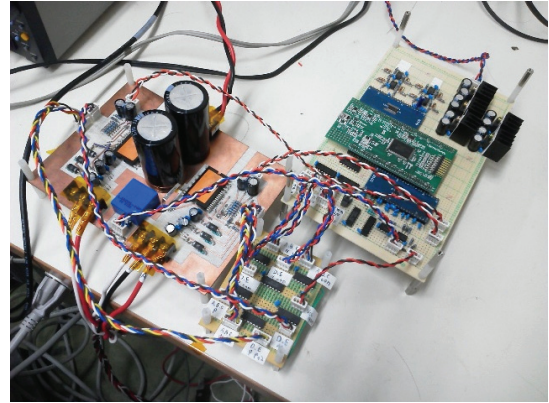
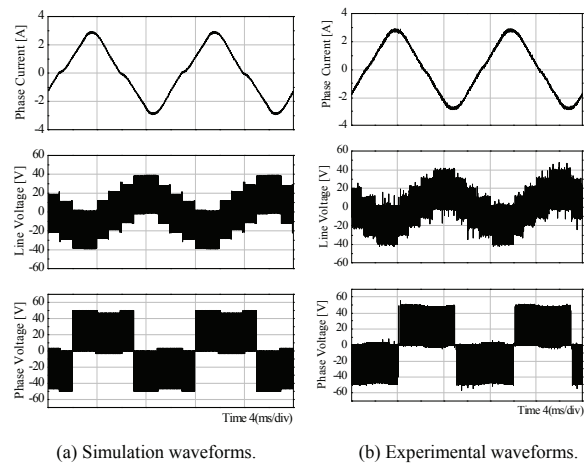


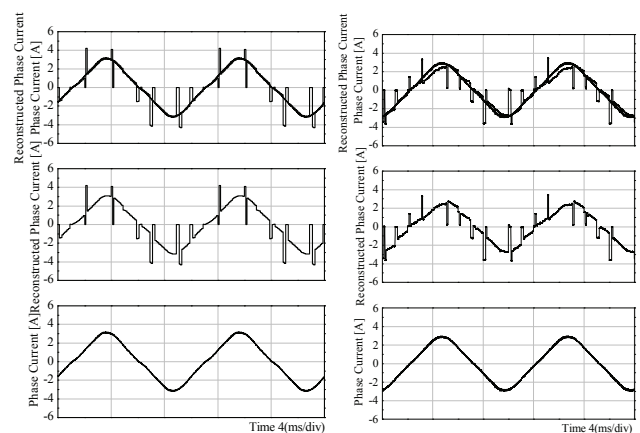
図9 実験回路写真  
Fig. 9. Photograph of test circuit.



(a) Simulation waveforms. (b) Experimental waveforms.

図10 シミュレーションおよび実機回路動作波形

Fig. 10. Simulation and experimental waveforms of test circuit.



(a) Simulation waveforms. (b) Experimental waveforms.

図11 復元電流と実電流の比較(線形外挿なし)

Fig. 11. Comparison of reconstructed current and real current without outerpolation (simulation and experimental results).

フルブリッジインバータの出力電流を復元する手法について述べた。N相のフルブリッジインバータにおいては1制御周期内に出現するスイッチング状態と各スイッチング状態で取得される N-1 個の直流バス電流を利用して各相の電流を復元することが可能である。電流復元は相数に関わらず(4)で表される統一されたアルゴリズムで行われる。また、各スイッチング状態で直流バス電流を取得するこの手法は根本的に各相のパルス幅に差がない場合は復元を行うことができない。本稿ではこの問題を解決する方策として線形外挿を用いた補償を導入した。

提案法の有効性を確かめるため五相インバータの電流制御シミュレーションおよび十五相インバータの電流復元シミュレーションを行った。五相インバータのシミュレーションでは提案法による出力電流復元が三相以上の多相インバータでも可能であることを示すと同時に、復元電流を用いて回転座標上で電流制御を行い、実電流を用いた場合と同等の制御が期待できることを示した。十五相インバータの電流復元シミュレーションでは更なる多相化を行った場合でも、提案法を用いることにより出力電流を復元可能であることを示した。

実機検証では試作した五相インバータを用いて出力電流の復元を行った。実験結果から五相全ての相で実電流と相似かつほぼ一致する復元電流波形を得ることができた。このように提案法によって復元された電流は実機でも平均相対誤差 5%以内の良好な復元精度をもつことが確認された。また、復元不可能な期間による影響は大きく、線形外挿や復元不可能期間に直流バス電流を取得するための工夫が重要であることも示した。

## 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.
- (2) H. Kim and T. M. Jahns : "Phase Current Reconstruction for AC Motor Drives Using a DC Link Single Current Sensor and Measurement Voltage Vectors," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 21, no. 5, pp. 1413-1419, Sep. 2006.
- (3) 金丸就吾・野口季彦:「インバータの直流バス電流を用いた三相交流電流復元法とそれに適したパルス幅変調法」,平成 20 年電気学会産業応用部門大会, vol. 1, No. 3p.p. 101-104, (2008 年)
- (4) 野口有理・野口季彦 「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」,平成 24 年電気学会全国大会, 4 - 079, (2012)
- (5) 野口有理・野口季彦 「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」,平成 24 年電気学会産業応用部門大会, vol.1, I - 103, (2012)

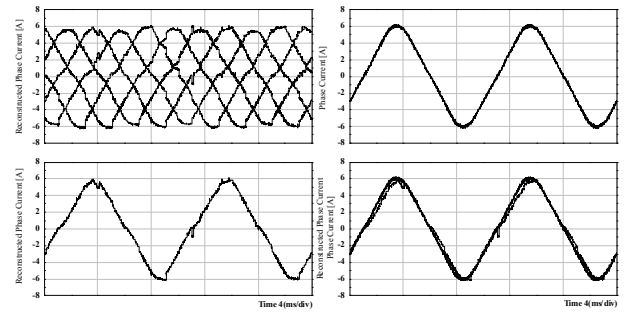


図 12 全相復元電流波形および一相分の比較

Fig. 12. Reconstructed waveforms of all phase currents and comparison between reconstructed and real

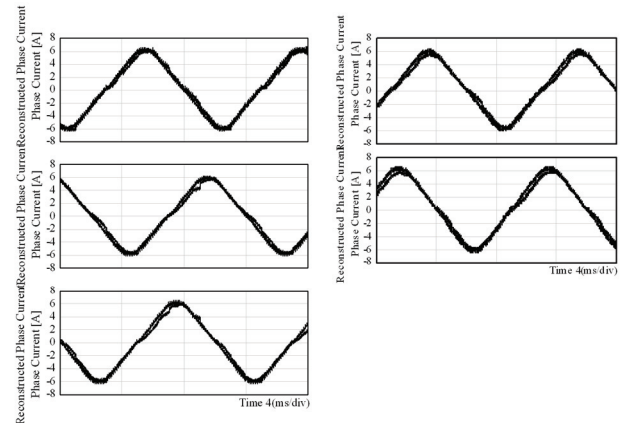


図 13 一相ごとの復元電流と実電流比較波形

Fig. 13. Comparison between reconstructed and real currents of every phase .

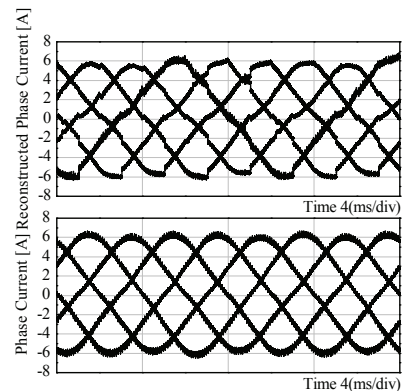


図 14 全相の復元電流および実電流

Fig. 14. Reconstructed current and real current (all phases).