

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

学生員 金丸 就吾* 正員 野口 季彦 (長岡技術科学大学)

Three-Phase AC Current Reconstruction Using Inverter DC-Bus Current and Pulse Width Modulation Method Suitable for It

Shugo Kanemaru*, Student Member, and Toshihiko Noguchi, Member (Nagaoka University of Technology)

Abstract — This paper proposes a new pulse width modulation (PWM) method suitable for three-phase AC current reconstruction by sampling the DC-bus current of the inverter. The proposed PWM pattern allows the reconstruction even at low-frequency and low-voltage operation range, where zero-voltage vectors are frequently generated by the inverter. The paper presents some computer simulation results to demonstrate the excellent performance of the proposed method.

キーワード：三相交流電流復元, パルス幅変調, 直流バス電流, インバータ

Keywords : Three-phase AC current reconstruction, pulse width modulation, DC-bus current, inverter

1. はじめに

近年、交流モータドライブの分野において、ロータの位置センサだけでなく、インバータの交流電流センサも省いたセンサレス制御の研究が盛んに行われている^{(1)~(4)}。交流電流センサレス化の手法として、モータモデルに基づくシミュレータにより電流を推定するものや、インバータの直流バス電流と PWM パターンを用いて電流を復元するものがある。特に、後者については単相三角波キャリアによりパルス幅変調にする方式と、三相三角波キャリアによる方式がある。単相三角波キャリアは多くのインバータ制御用マイクロコントローラに標準装備されており実装が容易である反面、モータの運転周波数と印加電圧が低い領域では三相交流電流を復元することが非常に困難となる。これはインバータからゼロ電圧ベクトルが出力され、モータとインバータ間で還流して直流バス電流を検出できる期間が極端に短くなるからである。一方、三相三角波キャリア方式にはそのような還流モードがないため、どのような運転周波数と印加電圧においても三相交流電流を復元することができる。ただし、三相三角波キャリアを搭載したマイクロコントローラは標準的ではないため、実装やコストの観点から大きな制約を受ける。

そこで、本論文では一般的な単相三角波キャリアを搭載したマイクロコントローラを用いて、PWM パターンを若干操作するだけで、モータの運転周波数や印加電圧に関わらず三相交流電流を復元できる手法を提案する。計算機シミュレーションにより従来法と提案法の復元特性を比較評価し、提案法により良好な結果が得られたので報告する。

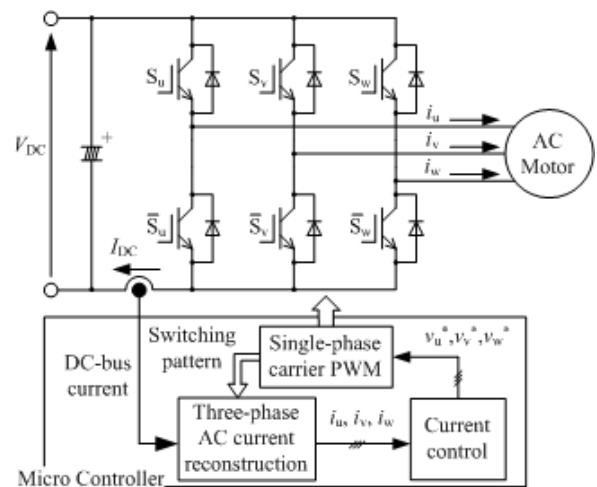


図1 システム構成
Fig. 1. System configuration.

	T_s							
U	[Pulse pattern for phase U]							
V	[Pulse pattern for phase V]							
W	[Pulse pattern for phase W]							
Sampling								
S_u	0	1	1	1	1	1	1	0
S_v	0	0	1	1	1	1	0	0
S_w	0	0	0	1	1	0	0	0

図2 従来の三角波比較 PWM パターン
Fig. 2. Conventional sub harmonic PWM pattern.

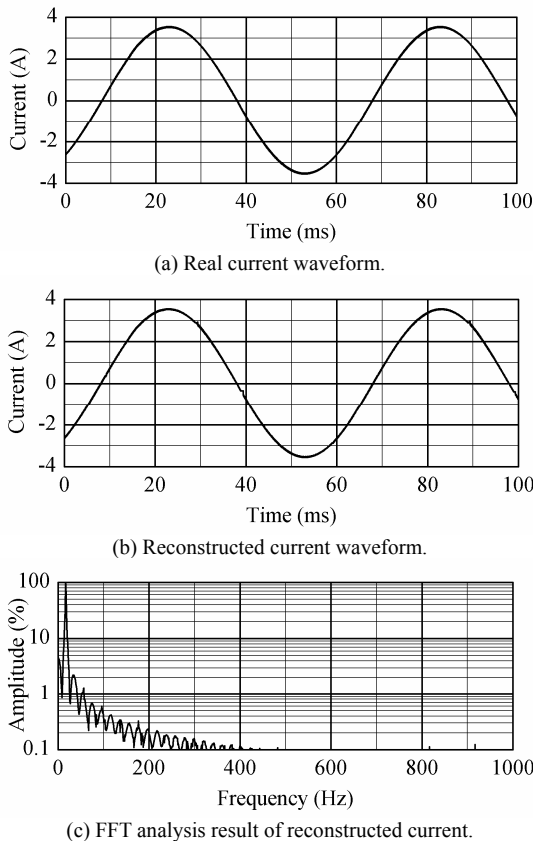


図3 理想的な従来法により復元されたモータ電流波形 (16.7 Hz)
Fig. 3. Waveforms of motor line current reconstructed by ideal conventional method at 16.7 Hz.

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

Motor	PM motor
Inertia constant	$1.270 \times 10^{-3} \text{ (kgm}^2\text{)}$
Damper constant	$3.515 \times 10^{-3} \text{ (Ns/m)}$
Winding resistance	0.52 (Ω)
d axis inductance	7.3 (mH)
q axis inductance	14.2 (mH)
Number of pole pairs	2
DC-bus voltage	270 (V)
Carrier frequency	10 (kHz)
Dead time	4 (μs)
Load torque	0.7 (Nm)

2. 直流バス電流を用いた三相交流電流の復元法

〈2-1〉 従来の三相交流電流復元法 図1は三相インバータと交流モータから成るシステム構成を示している。インバータの出力に交流電流センサをもたないため、直流バスに設置された短絡保護用の電流センサと PWM パターンを用いて三相交流電流を復元する。

いま、単相三角波キャリアによりパルス幅変調を行った結果、図2のような PWM パターンが生成されたとする。単相三角波キャリアの1制御周期 T_s において、PWM パターンは制御周期の中央に対して対称に出力され、各相のスイッチング状態 (S_u, S_v, S_w) は、(0, 0, 0), (1, 0, 0), (1, 1, 0), (1, 1, 1) のように遷移する。このとき、インバータのスイッチング状態が (0, 0, 0) や (1, 1, 1) となり

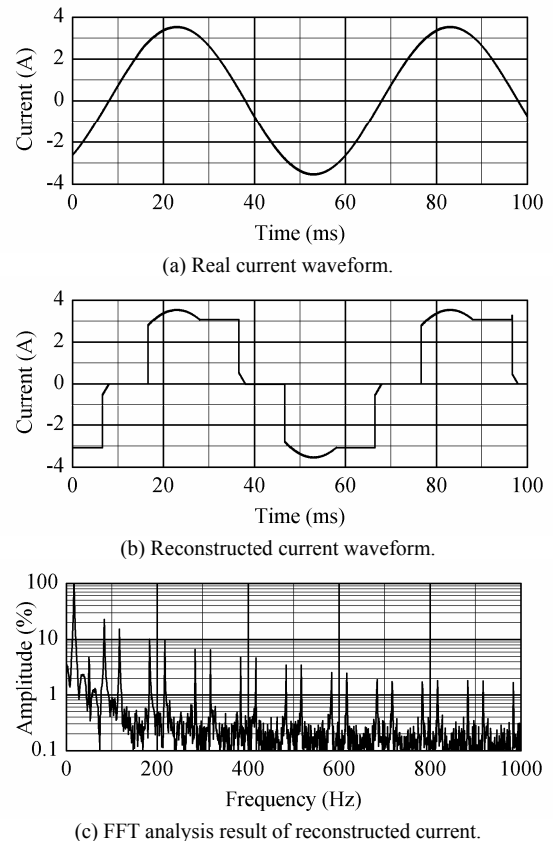


図4 サンプリングの制約を考慮した場合の従来法により復元されたモータ電流波形 (16.7 Hz)
Fig. 4. Waveforms of motor line current reconstructed by conventional method with sampling restriction at 16.7 Hz.

ゼロ電圧ベクトルが出力されると、モータとインバータ間の還流モードが発生し直流バスに電流が流れなくなる。一方、(1, 0, 0), (1, 1, 0) のスイッチング状態においては、それぞれ $i_u, -i_w$ が直流バス電流 I_{DC} として流れるため、同時検出は不可能であるが、2相の電流情報を得ることができる。これら2相の電流値を用いて残りの相の電流は容易に演算可能である。

〈2-2〉 従来法の問題点 図3は表1に示す条件で、マイクロコントローラや A/D 変換器の遅延時間を排除して、上記三相交流電流の復元を行ったシミュレーション結果である。同図(a)は実電流波形、(b)は復元された電流波形、(c)は復元電流の FFT 解析結果を示している。モータの運転周波数を 16.7 Hz と低く設定しているので印加電圧も低く、ゼロ電圧ベクトルに比べて非ゼロ電圧ベクトルの期間が極端に短い。しかし、マイクロコントローラや A/D 変換器の遅延時間がまったくない理想的な電流サンプリングを行っているため、ほぼ完全に三相交流電流を復元できている。

ここで、マイクロコントローラが非ゼロ電圧ベクトルのスイッチング状態を出力した後、A/D 変換器に対して直流バス電流のサンプリングを指示するまでに一定の遅延時間が必要な場合を考える。モータの運転周波数と印加電圧が低い領域では、図2で例示した (0, 0, 0) や (1, 1, 1) のスイッチング状態が支配的となる一方で、(1, 0, 0) や

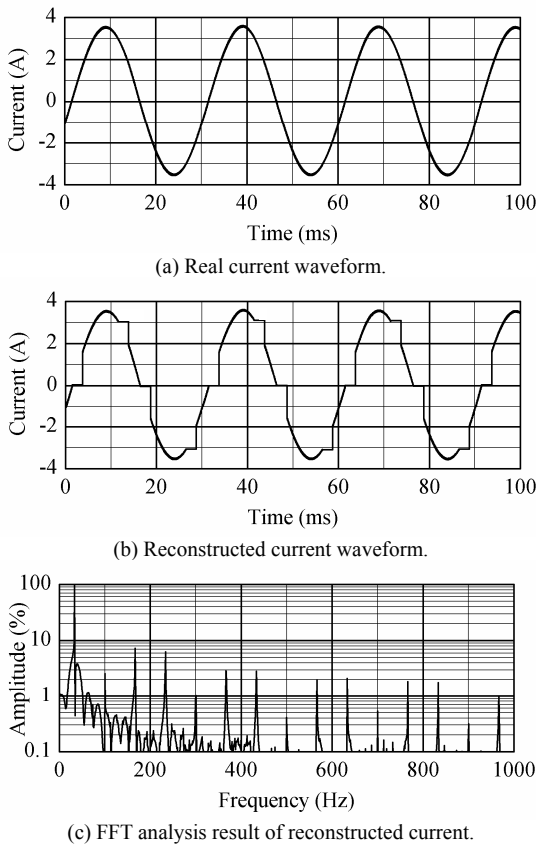


図 5 サンプリングの制約を考慮した場合の従来法により復元されたモータ電流波形 (33.3 Hz)
 Fig. 5. Waveforms of motor line current reconstructed by conventional method with sampling restriction at 33.3Hz.

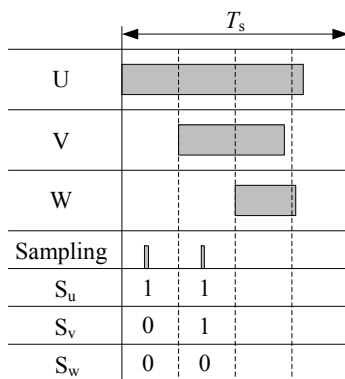


図 6 提案する三相交流電流復元に適した PWM パターン
 Fig. 6. Proposed PWM pattern suitable for three-phase AC current reconstruction.

(1, 1, 0) の期間が遅延時間より短くなり直流バス電流のサンプリングを行うことが不可能となる。電流のサンプリングを行うことができない場合は、前回の制御周期でサンプルホールドされた電流値を使用して三相交流電流の復元を行わざるを得ない。

〈2・3〉 シミュレーションによる復元特性の検証 図 4 にマイクロコントローラから A/D 変換器に対して直流バス電流のサンプリング指令が出されるまでの遅延時間を $3 \mu s$ 一定とし、図 3 と同じく 16.7 Hz で運転した場合のシミュレーション結果を示す。図 4 と図 3 の復元された電流波形を

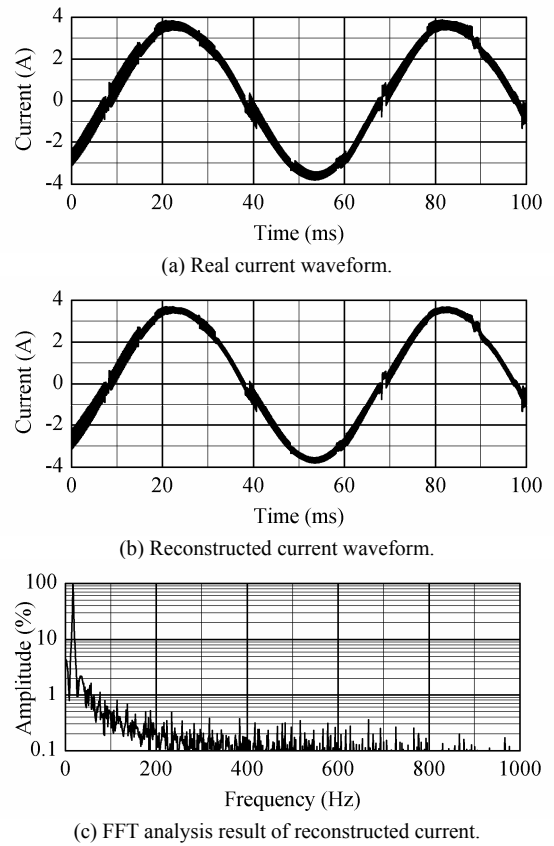


図 7 提案法により復元されたモータ電流波形 (16.7 Hz)
 Fig. 7. Waveforms of motor line current reconstructed by proposed method at 16.7 Hz.

比較すると、遅延時間があると三相交流電流の復元が正常に行われず、3 相のうち 2 相の電圧指令値が等しくなるタイミングを契機に電流値が得られなくなる。その結果、復元された電流波形は矩形波状に大きく歪む。図 4(c) の FFT 解析結果から、大きなピークをもつ不連続スペクトルとして高調波成分が含有されていることがわかる。

図 5 は運転周波数を 33.3 Hz に変更し、同様の復元特性を確認した結果である。運転周波数が高くなったため印加電圧も高くなり、直流バス電流のサンプリングが不可能な機会が少なくなる。したがって、図 4 の場合と比べて復元された電流波形の欠損も軽減され実電流波形に近づく。しかし、FFT 解析結果からもわかるように不連続な高調波スペクトルはなおも残存している。

3. 三相交流電流復元に適したパルス幅変調法とその復元特性

〈3・1〉 三相交流電流復元に適したパルス幅変調法 一般的なパルス幅変調は各相電圧指令値と単相三角波キャリアを比較することにより、1 制御周期 T_s におけるスイッチング状態「1」の期間と「0」の期間の割合を決めている。そのため「1」の期間の割合が等しければ、それを分割したりタイミングを変化させたりしても平均出力電圧は変わらない。そこで、本論文では 1 制御周期 T_s を 4 等分して PWM パターンを操作し、どのような運転周波数と印加電圧でも

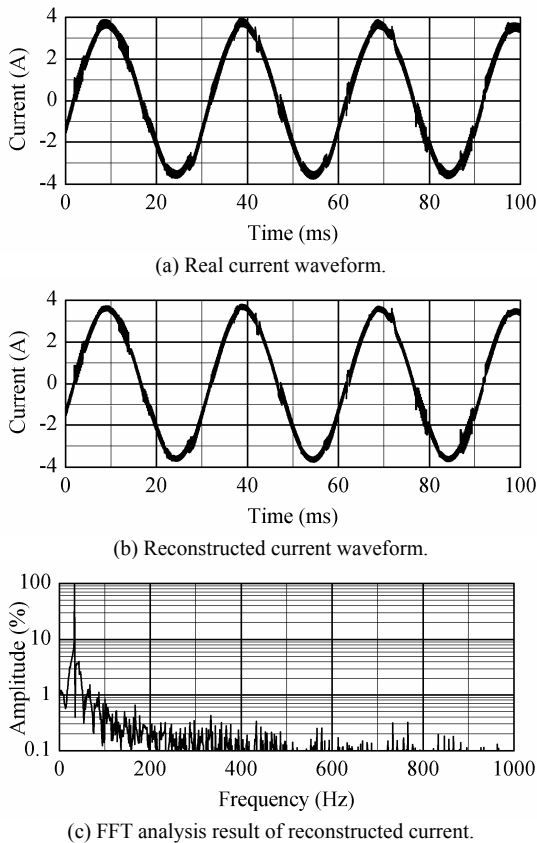


図8 提案法により復元されたモータ電流波形(回転数33.3Hz)
Fig. 8. Waveforms of motor line current reconstructed by proposed method at 33.3Hz.

三相交流電流を復元できる手法を提案する。

図1に示した従来法に対応する提案法のPWMパターンを図6に示す。電流制御系から電圧指令値が出力されると、単相三角波キャリアを考慮して各相のスイッチング状態「1」の期間を計算することができる。各相の計算結果のうち、最も長い「1」の期間をもつ相から順に1/4周期ずつずらしてスイッチングさせる。これにより、非ゼロ電圧ベクトルである(1, 0, 0), (1, 1, 0)の期間が必ず $T_s/4$ 確保されるので、マイクロコントローラからA/D変換器に対して直流バス電流のサンプリング指令が出されるまでの遅延時間を下回ることにはない。提案法は従来法と同様に2つのスイッチング状態を利用して直流バス電流から2相分の交流情報を得るため電流検出の同時性はないが、検出が完了する1/2周期までにはゼロ電圧ベクトルが発生しないため確実に電流検出を行うことが可能である。

〈3・2〉シミュレーションによる提案法の検証 図7および図8に提案法のシミュレーション結果を示す。シミュレーション条件は従前と同様である。16.7Hzで運転した場合でも33.3Hzで運転した場合でも、良好に三相交流電流が復元されており、突出した低次高調波は見られない。ただし、PWMパターンが1制御周期内で非対称となるため、実電流および復元された電流波形に高周波のリプルが現れる。また、提案法のFFT解析結果は運転周波数に関わらずほぼ同じ特性を示しており、低次高調波が少なく全体としてスペクトルが分散していることがわかる。このような特性はモータの電磁騒音を低減する観点からも重要である。

4. まとめ

本稿では、一般的な単相三角波キャリアを搭載したマイクロコントローラを想定し、そのPWMパターンを若干操作するだけでモータの運転周波数や印加電圧に関わらず三相交流電流を復元できる手法を検討した。計算機シミュレーションにより従来法と提案法の復元特性を比較評価した結果、提案する手法は良好に三相交流電流を復元でき、復元された電流波形は低次高調波が十分抑圧されスペクトルも分散した周波数特性を有することが確認された。

今後、提案法を実機で検証し、三相交流電流の復元特性を実験的に評価する所存である。また、PWMパターンの非対称性に起因した復元電流の歪についてさらに考究し、有効な補償法を検討したいと考えている。

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) 川端幸雄・遠藤常博・高倉雄八:「位置センサレス・モータ電流センサレス永久磁石同期モータ制御に関する検討」, 平成14年電気学会産業応用部門大会, vol. 1, p.p. 665-668 (2002年)
- (3) 福本・渡邊・濱根・林:「三相PWMインバータの直流電流検出による交流電流演算の一手法」, 電気学会論文誌D, 127巻5号, p.p. 181-188 (2007年)
- (4) 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.