

VVCF 単相-三相 4 レグ PWM 電流形コンバータの定常特性 *

根 葉 保 彦 **
松 本 洋 和 **
伊 藤 良 三 **
石 坂 耕 一 **
橋 本 浩 一 郎 ***
加 地 大 樹 ***

Steady-state Characteristics of VVCF Single-to-Three Phase PWM Current Source Converter with Four Legs

Yasuhiko NEBA**, Hirokazu MATSUMOTO**, Ryozo ITOH**, Kouichi ISHIZAKA**,
Koichiro HASHIMOTO*** and Daiki KAJI***

This paper deals with a current source converter between single-phase and three-phase power/load. The converter consists of four legs with eight switching devices. One leg is used in common for single-phase bridge and three-phase bridge circuits. The PWM method with a sinusoidal modulating and a triangular carrier waves is employed to obtain the sinusoidal input and output voltage/current. The tank circuit with LC parallel resonance is inserted in the dc line and this also contributes to shape the waveform into sinusoidal. The experimental waveforms in single-to-three phase conversion are shown and the steady-state characteristics in voltage, current, power factor and efficiency are given. These results of the proposed converter are compared with those of previous presented converter. Moreover, the experimental results in three-to-single phase conversion are shown. These results prove that the four-leg converter can generate sinusoidal voltage/current in the input and the output sides.

Key Words : Current Source Converter, Single-phase, Three-phase, Sinusoidal Wave, PWM, AC-AC Conversion

1. まえがき

単相-三相間の電力変換は一般に、単相コンバータと三相コンバータを直流を介して接続したダブルコンバータ方式による間接変換で行われ、それぞれのコンバータを整流器あるいはインバータとして動作することにより、双方向の電力変換を実現する。また、両コンバータは独立して制御できるため、可変電圧可変周波数

(VVVF) として動作可能である。間接変換の基本回路構成は、単相コンバータが4素子2レグブリッジ回路、三相コンバータが6素子3レグブリッジ回路であり、直流部に電圧平滑コンデンサを有する電圧形と電流平滑インダクタを挿入する電流形がある。電圧形では、入出力電流は正弦波化できるが、電圧はパルス状であるため、電源や負荷インダクタンスの電磁ノイズを発生する可能性がある。これに対し、電流形は電流平滑インダクタの抵抗分による損失のため、効率の点では電圧形に劣るものの入出力電圧、電流が共に正弦波形となる利点があり、電磁ノイズ低減では有利である。

電流形について、2台のサイリスタ三相ブリッジを用

* 平成 23 年 11 月 30 日受付

** 電気工学科

*** 電気工学専攻博士課程前期

いて単相と三相を直接接続する方式⁽¹⁾が示されており、また、筆者らは、1台の三相ブリッジに単相と三相を直接接続したPWM電流形コンバータ⁽²⁾を提案し、正弦波入出力電圧、電流が得られることを示した。しかし、これらのコンバータは動作が電源に依存するため、固定電圧固定周波数(CVCF)の電力変換に限定される。一方、電流形コンバータでは、直流電流が常に導通素子を通流するため、導通損の低減から、その素子数が少ない方が効率向上を期待できる。10個素子から構成されるダブルコンバータでは、常時導通素子は4個であるが、2台のコンバータで素子を共有することによって導通素子数を3個に低減できる8素子3レグ方式⁽³⁾の電流形コンバータを示した。この方式では出力周波数は電源周波数に固定されるが、出力電圧を調整できる可変電圧固定周波数(VVCF)電力変換が可能である。さらに、この8素子3レグ方式と等価な動作が可能で、導通素子を2個にできる8素子4レグ電流形コンバータ⁽⁴⁾の回路構成とPWM法を提案した。

本論文は、8素子4レグ電流形コンバータについて、単相-三相動作および三相-単相動作時の動作波形と定常特性を検討したものであり、実験から正弦波入出力電圧、電流が得られることを明らかにする。また、同動作条件におけるダブルコンバータおよび8素子3レグ方式との特性比較を行い、効率に対する導通素子数低減の効果を検証する。

2. 回路構成とPWM法

図1は4レグ単相-三相電流形コンバータであり、8素子で回路を構成する。同図は単相電源と三相負荷を接続して単相から三相への電力変換を行う場合であり、単相負荷と三相電源を接続すれば、三相から単相への電力変換が可能である。素子 S_p, S_N, S_1, S_4 は2レグ単相ブリッジを構成し、素子 S_1 から S_6 が3レグ三相ブリッジ回路である。素子 S_1 と S_4 を両ブリッジで共用することにより従来のダブルコンバータ方式と比べて使用素子数を低減できるが、このレグのスイッチングが電源に依存するため、本コンバータは可変電圧固定周波数の電力変換を行う。交流側には、素子のオンオフに伴うパルス

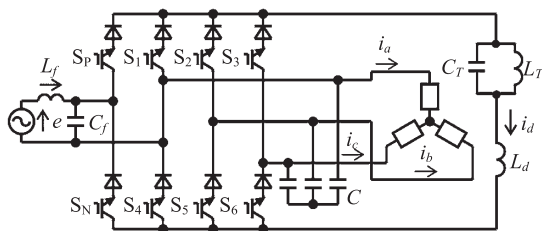


図1 8素子4レグコンバータ
Fig.1. Converter with four legs using eight devices.

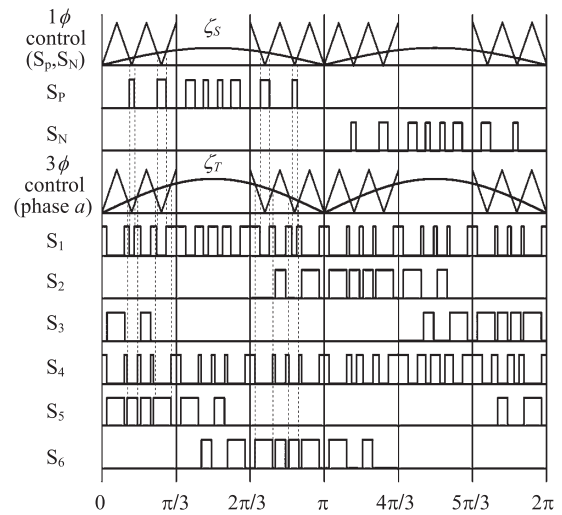


図2 PWM法
Fig.2. PWM method.

電流をバイパスするためのコンデンサ C_f , C を接続し、これらは電源インダクタンスあるいは負荷インダクタンスとフィルタ回路を形成して交流電流、電圧を正弦波にする。また、直流部には、直流電流平滑インダクタ L_d を接続し、単相交流の2倍周波数瞬時電力変動を吸収するLC並列共振のタンク回路を挿入している。

図2はPWM法を示し、単相、三相ともに正弦波変調波による三角波搬送波比較方式によってスイッチングパルスを作成する。この時、単相と三相側 a 相の制御信号を一致し、三相側の b 相と c 相は a 相に対してそれぞれ $2\pi/3$ および $4\pi/3$ 遅れの制御信号でパルスを作成する。例えば、素子 S_p のパルスについて、区間 0 から $\pi/3$ および $2\pi/3$ から π では制御信号の比較によってスイッチング時間を決定する。区間 $\pi/3$ から $2\pi/3$ のパルスは、三相交流電流の対称性から、0 から $\pi/3$ と $2\pi/3$ から π のパルスの論理和で作成する。なお、ここではレグ短絡を共用レグで行っているため、素子 S_1 と S_4 のスイッチングパルスは他素子の3倍となっているが、他レグによる短絡であっても次に示す動作波形や特性と変わることはない。

単相から三相への変換動作では、電源力率を1とするために単相変調波 ζ_s を電源電圧に一致する。三相変調波 ζ_r は、直流電流利用率を最大とするために、素子のスイッチング時間を考慮してできる限り大きい振幅に固定し、単相変調波 ζ_s の振幅を変えて出力電圧を調整する。また、三相から単相への動作においては、電源 a 相電圧と a 相変調波を一致し、単相変調波の振幅固定のもと、三相変調波振幅によって単相出力の調整を行う。なお、三角波搬送波振幅に対する単相および三相正弦波変調波振幅の比をそれぞれ単相変調率 M_s および三相変調率 M_T と定義する。

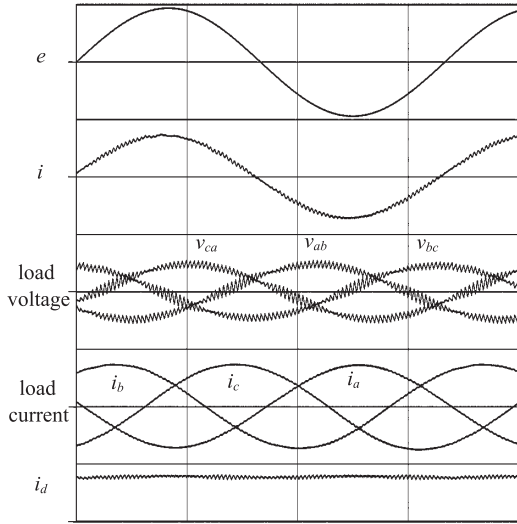


図3 単相-三相変換時の実測波形
(150V/div., 5A/div., 5ms/div.)

Fig.3. Experimental waveforms in single-to-three phase conversion.

3. 実験結果

実験条件は、電源周波数 $f=60\text{Hz}$ 、電源側フィルタインダクタンス $L_f=1.5\text{mH}$ 、電源側フィルタコンデンサ $C_f=10\mu\text{F}$ 、負荷側電流バイパスコンデンサ $C=10\mu\text{F}$ 、 $L_d=10\text{mH}$ 、 $L_T=49.7\text{mH}$ 、 $C_T=35.4\mu\text{F}$ 、搬送波周波数 5.58kHz とした。

< 3・1 > 単相-三相変換 図3は単相-三相変換動作時の実測波形であり、入力電圧 100V 、出力線間電圧 50V ($R=10.7\Omega$ 、 $L=5\text{mH}$ の直列負荷接続、力率 $\cos\phi_L=0.98$) とした。なお、 $M_s=0.90$ 、 $M_T=0.95$ である。単相電源は、ほぼ力率1の正弦波電流となっており、負荷は三相平衡の正弦波電圧、電流が得られていることが確認できる。この時、単相ブリッジは交流から直流への順変換動作、三相ブリッジは直流から交流への逆変換動作となる。図4は2種の力率負荷に対して、 $M_T=0.95$ 一定として、変調率 M_s を変化した時の三相出力線間電圧の特性を示す。いずれの力率でも、変調率に比例して出力調整が可能ながわかる。負荷力率が低いほど調整範囲が広くなり、これは交流側電流が直流電流と変調率に比例することを考慮して、入出力の電力バランスの関係から容易に理解できる。図5は、力率 $\cos\phi_L=0.98$ 、 $M_T=0.95$ 一定のもと、変調率 M_s 変化に対する入力電流 I 、入力力率 pf 、直流電流 I_d 、出力電圧 V 、効率 η の特性を示す。直流電流および出力電圧は M_s に比例関係にある。単相側からブリッジへ流入する電流は直流電流 I_d に比例するが、電源はフィルタコンデンサ C_f への進み充電電流を常に含むため、低変調率領域で力率が低下する。供試条件での最大効率は約87%であり、損失の大部分は素子の導通損と直流側インダクタの抵抗による。

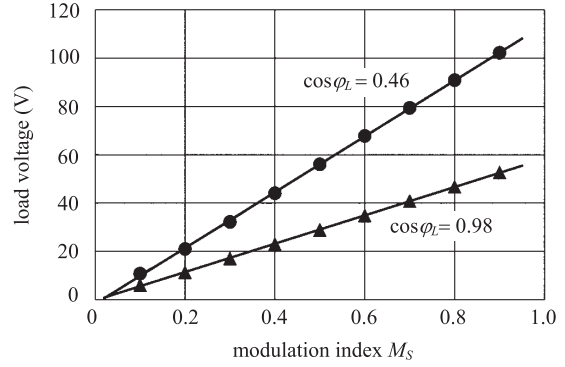


図4 変調率に対する出力電圧
Fig.4. Output voltage versus modulation index.

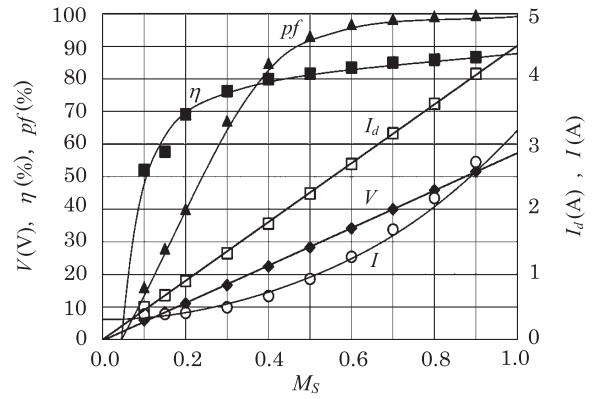


図5 単相-三相変換時の入出力特性
Fig.5. Characteristics in single-to-three phase conversion.

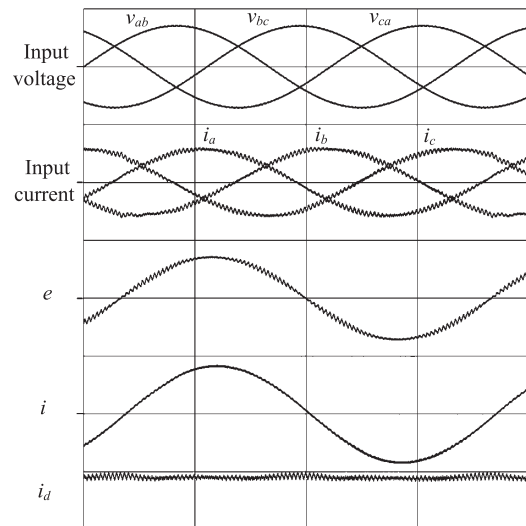


図6 三相-単相変換時の実測波形
(200V/div., 5A/div., 5ms/div.)

Fig.6. Experimental waveforms in three-to-single phase conversion.

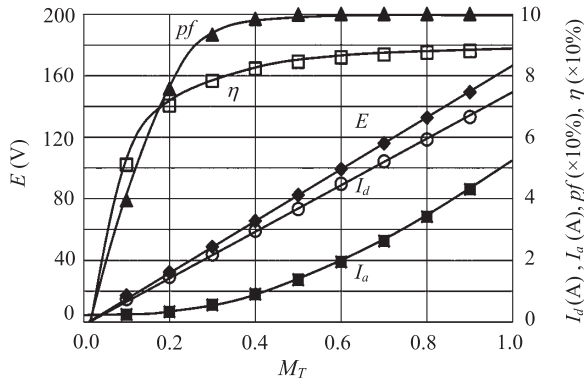


図7 三相-単相変換時の入出力特性
Fig.7. Characteristics in three-to-single phase conversion.

< 3・2 > 三相-単相変換 図6に三相-単相変換動作時の実測波形を示す。なお、入力線間電圧100V、出力電圧100V ($R=34\Omega$, $L=5\text{mH}$ の直列負荷接続), $M_S=0.95$, $M_T=0.61$ である。入出力ともに正弦波電圧、電流となっており、三相-単相変換においても良好な動作波形が得られている。図7は、 $M_S=0.95$ 一定のもと、変調率 M_T 変化に対する定常入出力特性を示す。各特性は本質的に単相-三相変換動作時と変わるところはなく、出力電圧は変調率に比例して調整可能である。効率は最大で約88%であった。

< 3・3 > 他方式との比較 図8にダブルコンバータ方式、図9に8素子3レグ方式の単相-三相PWM電流形コンバータ回路構成を示す。いずれも三相電源と単相負荷を接続すれば三相-単相変換も可能であり、これらは本方式と全く同じ変換動作を行うが、回路構成から導通素子数が異なる。すなわち、電流形コンバータの直流電流連続性から、導通素子数はダブルコンバータ方式が4個、8素子3レグ方式が3個、本提案の8素子4レグ方式が2個となる。ダブルコンバータ方式はVVVFシステム動作が可能であるが、特性比較のためにインバータも電源に同期したVVVFシステムとして動作させ、単相-三相動作の実験から特性比較を行った。なお、他方式の動作実測波形は図3に示した本方式と変わ

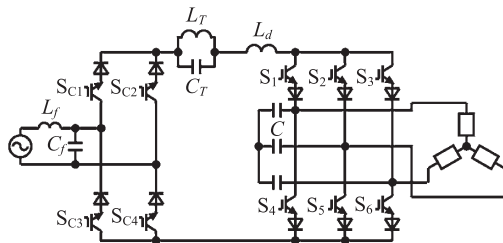


図8 ダブルコンバータ方式
Fig.8. Configuration of double converter.

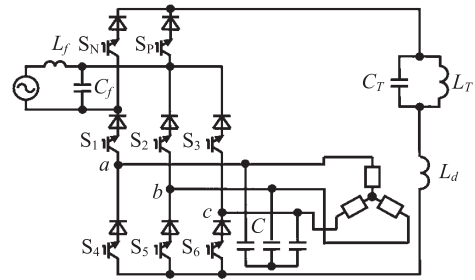


図9 8素子3レグコンバータ
Fig.9. Converter with three legs using eight devices.

るところはないために図示を省略する。図10は三相変調率 M_T を0.95に固定して単相変調率 M_S を変えた場合において、出力線間電圧 V に対する電流および入力力率特性の比較を示す。3方式は同様な特性を有することがわかる。図11は効率特性を比較したものである。高出力範囲において、ダブルコンバータ方式に比べて3レグ方式が約3%、4レグ方式は約6%の向上が得られた。出力電圧に対する電流特性は各方式ともに同じであるの

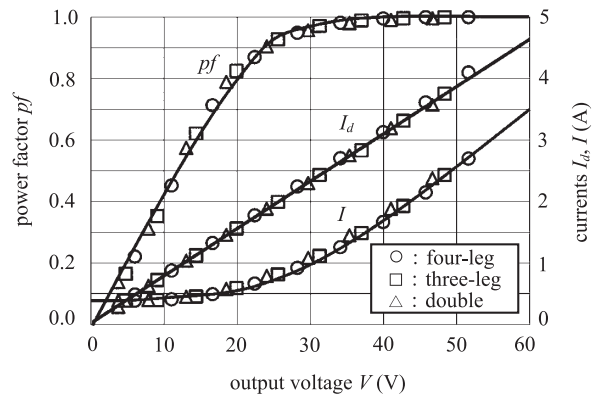


図10 電流、力率特性
Fig.10. Current and power factor.

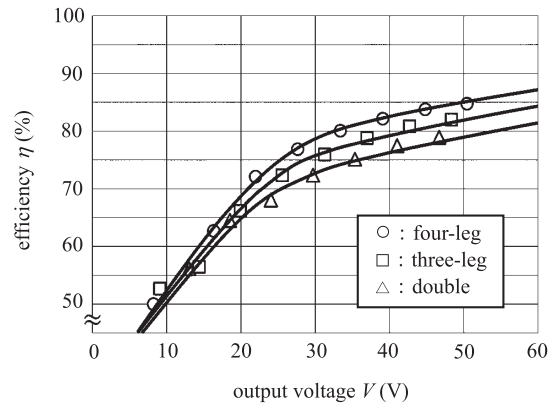


図11 効率特性
Fig.11. Efficiency.

で、インダクタの抵抗分による損失は同等であり、導通素子数の減少による導通損の低減が効率向上に寄与していると考えられる。

4. むすび

本論文は、単相ブリッジと三相ブリッジのレグを共用した 8 素子 4 レグ PWM 電流形コンバータの定常特性について、実験結果を示した。本コンバータは、一般的な三相 PWM で動作し、単相から三相あるいは三相から単相への電力変換が可能であり、いずれの変換動作でも正弦波形の入出力電圧、電流が得られることを明らかにした。また、出力電圧は PWM の操作によって調整でき、VVCF コンバータとして動作する。さらに、本方式は、ダブルコンバータ方式および 8 素子 3 レグ方式と同等の変換動作が可能であることを確認した。3 方式の定常特性の比較を行い、電流通路の導通素子数の少ない本方式が効率の点で優れていることを明らかにした。

参 考 文 献

- (1)常広・森：「サイリスタを用いた単相-三相変換器」，昭和 56 年電気学会全国大会，No.612 (1981-3)
- (2)根葉・廣田・松本・石坂・伊藤：「単相電源を入力とする三相出力 PWM コンバータ」，電学論 D, 129, 12, pp.1226-1227 (2009-12)
- (3)根葉：「電流形 PWM 単相三相コンバータの回路方式」，電学論 D, 118, 9, pp.1093-1094 (1998-9)
- (4)根葉・松本・伊藤・石坂：「4 レグ単相-三相 PWM 電流形コンバータ」，電学論 D, 130, 1, pp.109-110 (2010-1)