

マトリックスコンバータを利用した高効率電力変換

特集

伊東 淳一 (いとう じゅんいち)

小高 章弘 (おたか あきひろ)

佐藤 以久也 (さとう いくや)

1 まえがき

近年、省エネルギー化の要求に伴いインバータの適用範囲は広がっているが、今後、インバータのさらなる普及拡大には、今まで以上の低コスト化、小型化、高効率化が求められる。また、環境への整合性もより重視される傾向にあり、インバータの入力電流に含まれる高調波への何らかの対策が必要である。

富士電機では、インバータのように直流に変換することなく、電源電圧から直接任意の大きさ、周波数の出力電圧を発生できるマトリックスコンバータを開発している。これはインバータに対して、高効率、小型、長寿命、低入力電流高調波といった特長があり、前述の要求を実現できる可能性が高い。本稿では、マトリックスコンバータとその実用化を実現する新技術について紹介する。

2 マトリックスコンバータの原理

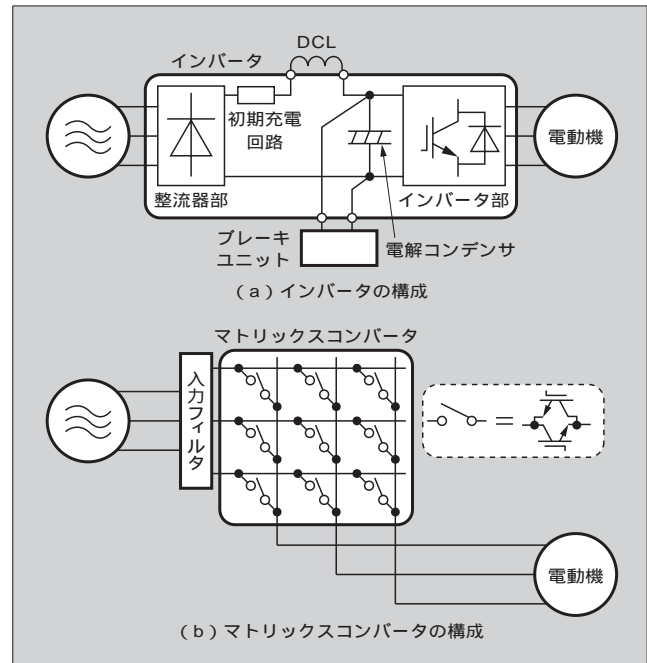
図1にインバータとマトリックスコンバータとの回路構成を対比して示す。インバータはよく知られるとおり、整流器部により入力された交流電圧を直流電圧に変換し、インバータ部でIGBTなどのスイッチング素子を高速でオンオフすることにより、直流電圧を短冊状に切り出して所望の交流電圧に変換する。直流部には、電圧リプルを抑制するために電解コンデンサが使われている。これに対し、マトリックスコンバータは交流スイッチを格子（Matrix）状に並べ、これらを高速でオンオフし、入力交流電圧を短冊状に切り出すことで所望の出力電圧を直接得る。ここでは、電解コンデンサのような大きなエネルギー蓄積要素が不要となる。ただし、スイッチング素子には交流電圧が印加されるため順逆両方向の電圧をオンオフできる機能が必要である。

図1(a)に示すように、インバータでは直流中間部に接続された電解コンデンサの突入電流を抑制するため、初期充電回路が必要となる。また、整流器部にダイオード整流器を用いると入力電流に多くの高調波が発生する。そこで入

力電流の高調波を低減するため、直流リアクトル（DCL）が挿入される。加えて、電動機に大きな制動トルクを発生させる場合、直流部にブレーキユニットを接続する必要がある。用途によっては、入力電流の高調波の低減や制動時のエネルギー処理のため回生コンバータが用いられる。しかし、マトリックスコンバータは入力電流と出力電圧を同時に制御できるので、回生コンバータとインバータを用いたシステムと同等である。すなわち、入力電流を正弦波状に制御することにより、入力電流に低次の高調波はほとんど発生せず、加えて制動時の電力回生動作もできる。さらに、直流中間部の大型電解コンデンサが不要なため、初期充電回路は必要なく、小型化と長寿命化が可能である。

図2に回生コンバータとインバータとを用いたシステムとマトリックスコンバータの損失と盤構成の比較を示す。マトリックスコンバータではインバータと回生コンバータのほかに、フィルタコンデンサ、リアクトルや昇圧リアク

図1 インバータとマトリックスコンバータの比較



伊東 淳一
 パワーエレクトロニクス装置の研究・開発に従事。現在、富士電機アドバンステクノロジー(株)エレクトロニクス技術研究所副主任研究員。電気学会会員。博士(工学)。

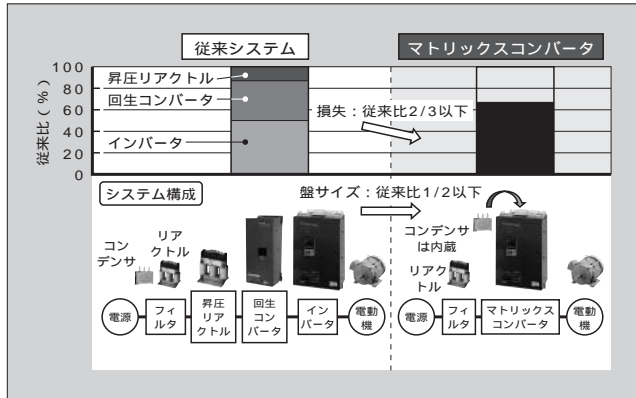


小高 章弘
 パワーエレクトロニクス装置の研究・開発に従事。現在、富士電機アドバンステクノロジー(株)エレクトロニクス技術研究所副主任研究員。電気学会会員。



佐藤 以久也
 パワーエレクトロニクス装置の研究・開発に従事。現在、富士電機アドバンステクノロジー(株)エレクトロニクス技術研究所。電気学会会員。

図2 回生コンバータとインバータのシステムに対するマトリックスコンバータの比較



トルが必要となるが、マトリックスコンバータではフィルタだけでよい。したがって、システムを盤内に構成した場合、内部を簡素化でき、盤のサイズを1/2以下と大幅に省スペース化できる。また、交流から交流へ1回で変換するため、損失が従来のシステムの2/3以下と少なく、低損失化を実現できる。

③ マトリックスコンバータを実用化する新技術

マトリックスコンバータの回路構成と原理は古くから知られているが、実用するには幾つかの課題があった。ここでは、これらの課題を解決する新技術を紹介する。

3.1 高速自己消弧形デバイスの逆阻止化技術

表1にマトリックスコンバータに用いる交流スイッチの実現方法を示す。従来のIGBTをはじめとする高速の自己消弧形デバイスは逆方向に電圧を印加できない。そのため、従来は表1 aのように、IGBTに直列にダイオードを接続する必要があった。このダイオードにより導通損失が増加し、効率が低下する。

富士電機では、逆方向にも耐圧がある逆阻止IGBTを新たに開発した⁽¹⁾。従来のIGBTは、逆電圧を印加するとIGBTチップをウェーハから切り離すときにできるダイシング面に漏れ電流が流れ、耐圧を確保できない。そこで、開発した逆阻止IGBTではダイシング部に深い分離層を形成し、ダイシング面を覆うことで漏れ電流が流れるのを防ぎ逆耐圧を確保する。これは近年のIGBT製造技術の発達により実現可能になった。逆阻止IGBTは従来のIGBTと基本構造は同じ構造であるため、スイッチングスピードやオン電圧のトレードオフカーブは従来のIGBTと同様である。また、逆方向電圧を印加したときのリカバリー特性についても従来の還流ダイオードとほぼ同等の特性が得られている。図3にマトリックスコンバータを表1 aおよび表1 bで示す各交流スイッチで実現した場合の損失の比較を示す。逆阻止IGBTを適用すると直列ダイオードの導通損失がなくなるため、スイッチング損失はほぼそのまま、導通損失を約30%低減できる。

表1 交流スイッチの実現法

	(a)	(b)
交流スイッチ		
素子数	IGBT 2個, ダイオード 2個	逆阻止IGBT 2個
オン電圧	約4V	約2V

図3 マトリックスコンバータの損失比較

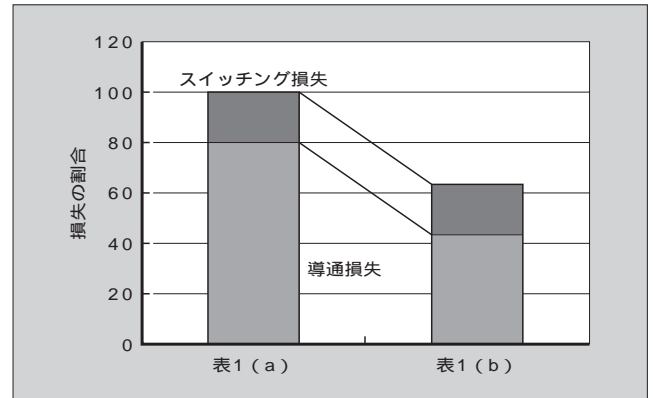
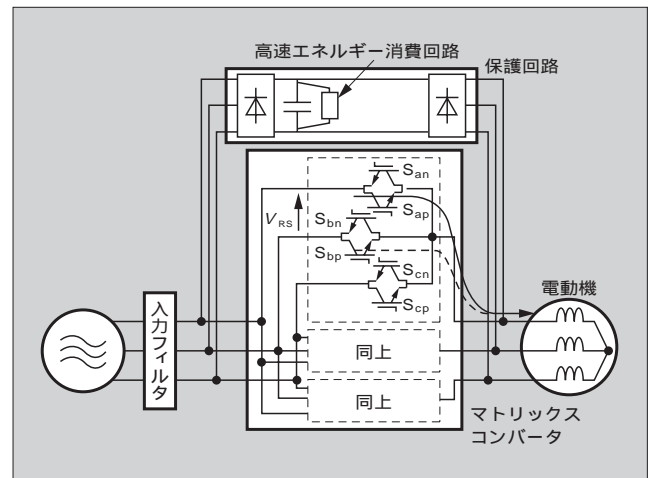


図4 転流動作と保護回路



3.2 保護技術

図4にマトリックスコンバータの転流動作について示す。転流とは、例えば、S_aに流れている電流を、S_bをオンしてS_aをオフすることにより、S_bに移すことである。このとき、スイッチの切換は電源短絡を防止しつつ、負荷電流の還流経路を確保しなくてはならず、S_a、S_bは同時オンも同時オフもできない。負荷の誘導性エネルギーの還流経路がなくなると、スイッチの両端に大きなサージ電圧が発生し、スイッチを破壊する。また、過電流、過電圧などにより保護動作が働いた場合、インバータではIGBTをすべて遮断しても還流ダイオードにより負荷電流の還流経路は確保され、誘導性エネルギーは自動的に電解コンデンサに吸

収されるが、マトリックスコンバータでは、負荷電流を保護回路に転流させなくてはならない。

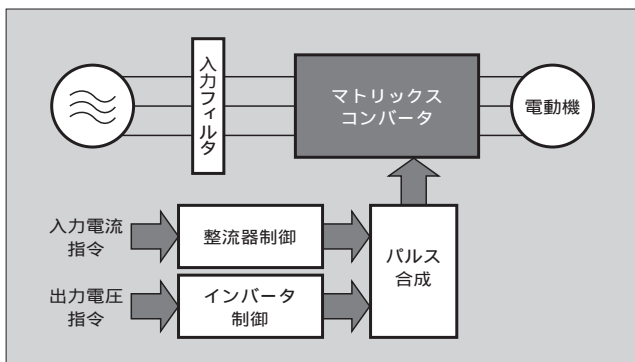
そこで、従来はインバータと同様に電源短絡を防止するデッドタイムを設け、同時オフの期間に発生するサージ電圧は保護回路により吸収する。このため、損失の増加や保護回路が大型化し、加えて保護回路にはエネルギーを吸収する大型の電解コンデンサが必要になるため、マトリックスコンバータの利点を損なう結果となる。

今回の開発では、交流スイッチを構成する二つの逆阻止IGBTを別々のタイミングでオンオフすることにより、転流の問題を解決した。すなわち、IGBTに逆電圧が印加されても逆方向（エミッタからコレクタ方向）へは電流が流れないことに着目し、逆電圧が印加されているスイッチを常にオンすることにより、従来のインバータの還流ダイオードの働きをさせ、負荷電流の還流経路を確保する。順方向に電圧が印加されているスイッチは従来のインバータと同じくデッドタイムを設けてスイッチングすることにより、電源短絡を防止する。例えば、図4において、 $v_{RS} > 0$ とすれば、 S_{an} と S_{bp} は逆電圧が印加されるので、常時オンとし、 S_{ap} と S_{bn} はデッドタイムを設けてスイッチングすることにより、負荷電流を S_{ap} と S_{bn} の間で転流する。過電流や過電圧時の保護についても、誘導性エネルギーを大型の電解コンデンサに蓄えることなく、抵抗やダイナミッククランプ動作により高速にエネルギーを消費することで、電解コンデンサレス化を実現する。

3.3 制御技術

マトリックスコンバータでは出力電圧を制御すると同時に入力電流を制御できるが、同時に独立して制御するのは容易ではない。その理由は、ある電圧を出力するために、交流スイッチを一つ切り換えると入力電流の状態も変わるため、制御が複雑になる。しかし、近年、制御装置の高速化と高性能化、低コスト化により、複雑な制御でも容易に実現できるようになっている。従来から用いられてきたマトリックスコンバータの制御法は電源電圧から所望の交流電圧を得る条件と、入力電流が正弦波状になるように負荷電流を分配する条件から、各交流スイッチのオンオフパターンを直接計算する方法である⁽²⁾。この方法はマトリックスコンバータ固有の制御法であり、変換器の違いを生かし

図5 マトリックスコンバータの制御方式



たさまざまなオンオフパターンを作り出すことができる。しかし、オンオフパターンを直接求めることから、入力電流の制御と出力電圧の制御を分離して考えることは難しい。

そこで今回は、図5のように、マトリックスコンバータを仮想的な整流器部と仮想的なインバータ部に分け、入力電流と出力電圧についてそれぞれ制御を行い、最後に仮想整流器と仮想インバータのオンオフパターンを合成して、マトリックスコンバータのオンオフパターンを得る方法（仮想AC-DC-AC方式⁽³⁾）を開発した。この方法は、従来のインバータの延長線上で制御を行えるので、これまでに培った技術がほぼそのまま適用できる。

仮想AC-DC-AC方式は図6に示す仮想的な整流器とインバータからなる仮想AC-DC-AC変換器を想定し、入力電流および出力電圧の制御を行う。

仮想AC-DC-AC方式は、「三相電力変換器において、電力変換器の最終的な入力と出力の接続関係が等しければ、入出力波形は電力変換器の回路方式に依存しない」⁽⁴⁾

という原理に基づいている。例えば、図6において仮想整流器側で S_{rp} 、 S_{tn} をオンし、仮想インバータ側で、 S_{up} 、 S_{vp} 、 S_{wn} をオンする期間があるとする。入出力の接続関係は、R相とU相、V相、およびT相とW相が接続されていることになる。そこでマトリックスコンバータでも同様に S_{ru} 、 S_{rv} 、 S_{tw} をオンすることによりR相とU相、V相、およびT相とW相をそれぞれ接続するスイッチをオンすることによって、従来のAC-DC-AC変換と同様な動作ができる。仮想インバータの制御は従来のインバータと同様に行う。

図7に仮想AC-DC-AC方式により制御を行った場合のマトリックスコンバータの動作波形を示す。負荷は誘導機であり、誘導機の制御にはベクトル制御を用いている。入力電流は電源電圧と同期しており、ほぼ力率1の正弦波状の電流になっている。また、出力電流も低次ひずみのない良好な正弦波状の電流が得られている。

図8に負荷を変化させたときの入力電流のひずみ率と入

図6 仮想AC-DC-AC方式の原理

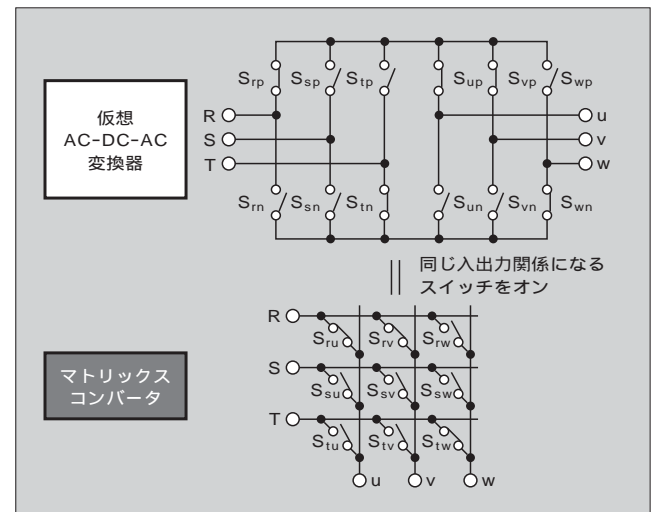


図7 マトリックスコンバータの入出力波形

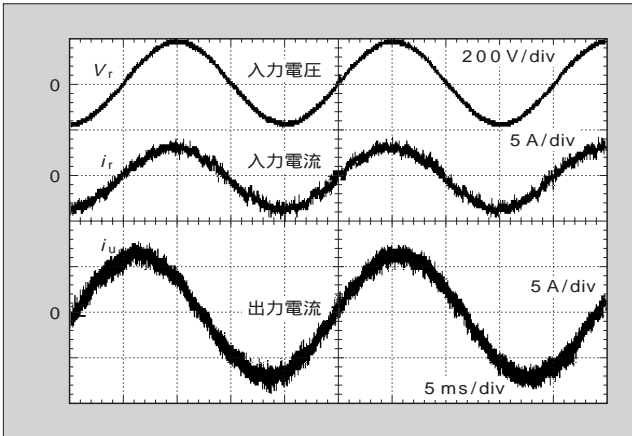
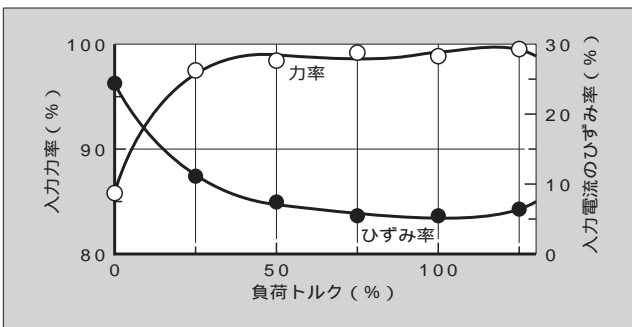


図8 入力力率と入力電流のひずみ率



入力力率を示す。入力力率は40%以上の負荷で99%以上が得られており、入力電流のひずみ率も定格時5.1%と低い値が得られている。マトリックスコンバータでは入力電流に低次高調波が含まれないため、高調波抑制対策ガイドラインを満足できる。

図9、図10にベクトル制御時における加減速運転波形と負荷インパクトの波形をそれぞれ示す。トルクがステップ的に変化し、トルク電流が変化しても磁化電流は一定を保っており、従来の電動機制御と同様にベクトル制御が良好に行えることが確認できる。また、減速時には入力電流が増加し、入力側に電力を回生していることが分かる。

4 あとがき

マトリックスコンバータを実用化する新技術について紹介してきた。本稿では割愛したが、マトリックスコンバータが持つ原理上の下記の制約を克服する技術についても開発している。

- 1) スwitchングに用いられる線間電圧の最小値は入力電圧の0.866倍であるため、出力電圧を正弦波状に出力できる最大電圧は入力電圧の0.866倍に限られる。
- 2) エネルギーバッファがないため、停電、ひずみなどの電源じょう乱に弱い。

マトリックスコンバータは電力回生ができることからエレベータやクレーンをはじめとする垂直搬送に適用できる。また入力電流高調波を大幅に低減できることから、高調波

図9 加減速運転 (100 r/min 1,200 r/min 100 r/min)

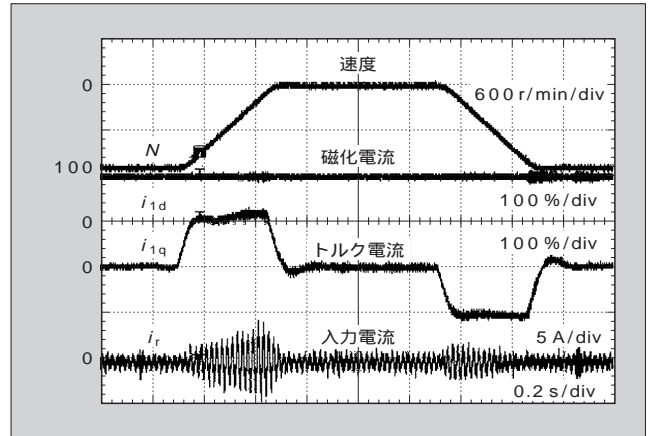
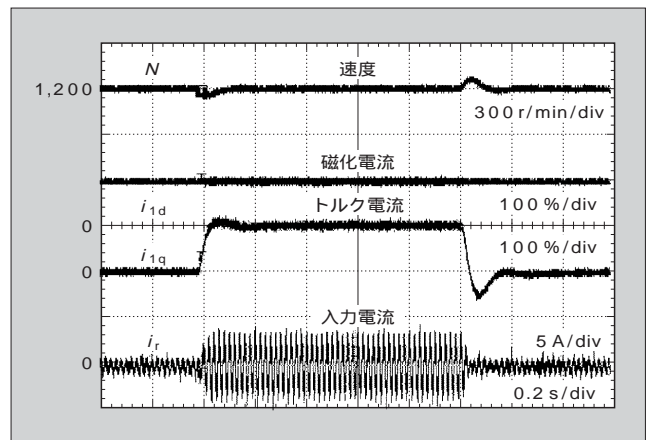


図10 負荷インパクト特性 (0% 100% 0%)



対策品としても期待される。

将来的にはフライホイールによるエネルギー貯蔵、マイクロスタービンなど、従来回生コンバータとインバータを用いてシステムを構築していた分野への適用が期待できる。逆阻止IGBTについても、今後さらに従来のIGBTと同様に高耐圧化、大電流化が進むと思われる。これらに伴いマトリックスコンバータの適用範囲も広がることが予想され、課題解決に向けて全力で取り組む所存である。

参考文献

- 1) Takei, M. et al. The Reverse Blocking IGBT for Matrix Converter With Ultra-Thin Wafer Technology. Proceedings of The 15th International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs (ISPSD) 2003, p. 156-159.
- 2) Oyama, J. et al. New Control Strategy for Matrix Converter. Proceedings of Power Electronics Society Conference. 1989, p.360-367.
- 3) 伊東淳一ほか．仮想 AC/DC/AC 変換方式によるマトリックスコンバータの入出力波形改善法．半導体電力変換研究会．SPC02-90/IEA-02-31, 2002.
- 4) 伊藤里恵，高橋勲．マトリクスコンバータにおける入出力無効電力の非干渉制御法．半導体電力変換研究会．SPC-01-121, 2002.

特集