No.1 を目指す汎用インバータ

山添　　勝（やまぞえ　まさる）

1　まえがき

1977 年に富士電機は業界に先駆け汎用トランジスタインバータを開発・発売し，安価な標準モータの可変速運転の道を開いた。以来 27 年，常に業界のトップグループとして汎用インバータの技術革新に努め，汎用インバータを産業用途において不可欠な装置として確立させた。汎用インバータの進歩は小型化・高性能化・低価格化の歴史でもある。

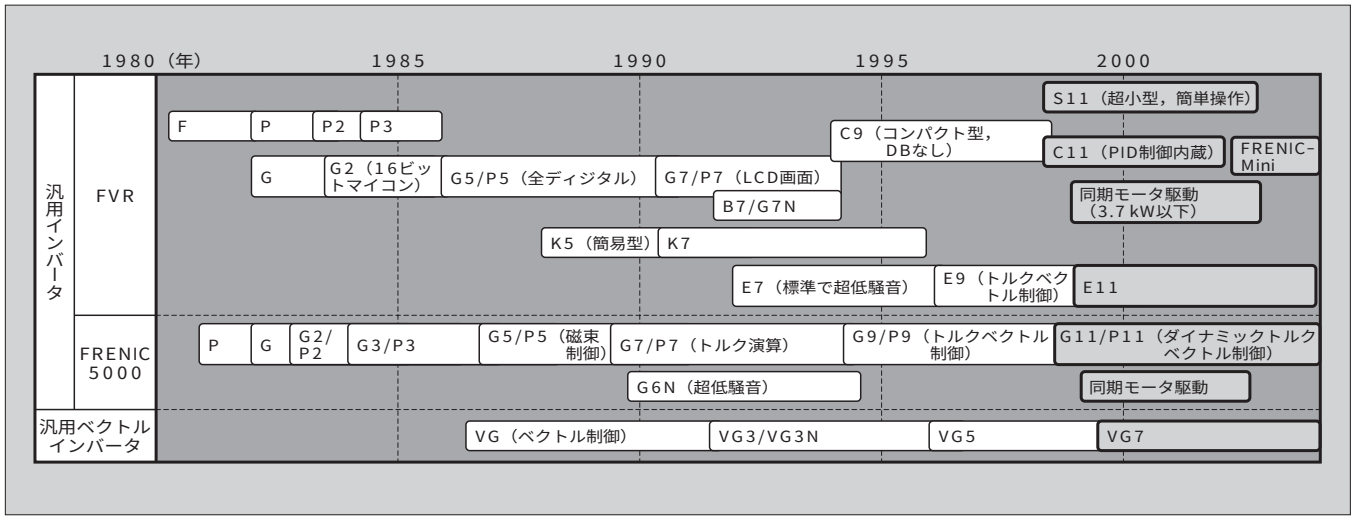
本稿では，富士汎用インバータの歩みを振り返るとともに今後汎用インバータに求められるであろう機能・性能，その要求に応える将来技術について述べ，今後の富士汎用インバータが目指すところについて紹介する。

2　富士汎用インバータの歩み

富士電機は 1977 年にバイポーラパワートランジスタ（BJT：Bipolar Junction Transistor）を使った汎用インバータを初めて世に送り出した。これはパワートランジスタの高耐圧化・大電流化の進展とともにその応用技術の進歩によるものである。以来，今日まで技術革新を行いながら汎用インバータは発展を続けてきた。

図 1 に富士汎用インバータの歩みを示す。1982 年には正弦波 PWM（Pulse Width Modulation）制御方式を採用した「FRENIC5000G シリーズ」「FVR-G シリーズ」を開発した。また，当初 200 V 電源系列だけであったが，1,000 V 耐圧のパワートランジスタが開発され，1982 年に 400 V 電源系列が商品化され基本的な機種系列がそろい，ここから現在の汎用インバータの歴史が始まったといえる。汎用インバータは簡単に標準モータを可変速運転できることから，各種木工機械，コンベヤおよび台車などの搬送機械，ファン・ポンプ，食品機械などの産業分野で急速に普及した。汎用インバータは特にファン・ポンプなどの二乗低減トルク負荷駆動において省エネルギー効果が高いことに着目し，ファン・ポンプ用に特化した「FRENIC5000P シリーズ」「FVR-P シリーズ」を相次いで開発・発売した。容量系列も初めは 70 kVA 程度であったが，1,200 V 耐圧 300 A のパワートランジスタが開発されたことで 280 kW モータを駆動できるところまで拡大した。1986 年には「FRENIC5000G5 シリーズ」「FVR-G5 シリーズ」を相次

図 1　富士汎用インバータの歩み



山添　　勝

汎用インバータの開発・設計に従事。現在，機器・制御カンパニーシステム機器事業部インバータ開発生産センター長。電気学会会員。

いで発売した。FRENIC5000G5 シリーズは磁束制御形 PWM 方式を採用してモータの回転トルク脈動を低減した。FVR-G5 シリーズではモータ制御だけでなく操作・設定もすべてディジタル化した全ディジタルインバータとして，7 セグメント LED（Light Emitting Diode）表示，キースイッチを持つタッチパネルを初めて採用し，インバータに必要な各種パラメータをディジタル値として表示・設定できるようになり多機能化と操作性の大幅な向上をもたらした。

1994 年に発売した「FRENIC5000G9 シリーズ」は汎用インバータに初めてベクトル制御の概念を取り入れ，大幅な性能向上を実現した。この後，「FVR-C9 シリーズ」といった業界最小インバータを発売し業界をリードするとともに，1998 年には現在の「FRENIC5000G11 シリーズ」を発売したが，その性能は初期のベクトルインバータをも凌駕（りょうが）するレベルに達している。2002 年には最新型の「FRENIC-Mini シリーズ」を発売し，高いコストパフォーマンスを実現している。

3　汎用インバータ技術の進歩

インバータ技術の進歩はパワーエレクトロニクス技術そのものの進歩である。インバータ技術は大きく分けて主回路技術，制御回路技術，モータ制御技術に分けることができる。

3.1　主回路技術

主回路技術はパワーデバイスの発達とともに進化してきた。BJT を使った三相ブリッジ構成のインバータを PWM 制御することで，小型で低価格な汎用インバータが実現した。BJT を適用していたときはパワーデバイスのスイッチング周波数であるキャリヤ周波数は数 kHz であり可聴領域のモータ音が発生し人間にとって耳障りであった。また，電流リプルも大きくモータでの損失も現在からみれば大きかった。これらの問題は，高速スイッチングが可能な IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）が開発され，1988 年ごろにこの IGBT を適用した汎用インバータが世の中に出始めて解決することができた。

富士電機では 1989 年に IGBT を適用した「FRENIC 5000G6N」を発売した。IGBT の適用によりキャリヤ周波数は 10 kHz 以上になり，耳障りなモータ音がなくなり，より人間に近い場所への設置も多くなり用途が広がった。以後，IGBT が汎用インバータのパワーデバイスとして使われ今日に至っている。一方，キャリヤ周波数が高くなったため BJT 適用時に比べて電磁ノイズが増え周辺機器に影響を与える，という新たな問題が発生し電磁ノイズ対策が汎用インバータの大きな課題の一つとなった。また，パワーデバイス損失も BJT のときに比べ増加し，結果としてプレス冷却フィンの開発などの冷却技術の進歩につながった。

図 2 に汎用インバータでの発生損失の傾向を示す。汎用インバータの発生損失の多くはパワーデバイスの損失であり，BJT から IGBT に代わったときに損失は大幅に増えた。これは IGBT の進化で次の世代ではほぼ BJT 相当まで減少した。また，第四世代 IGBT を適用した G11 では電磁ノイズの低減を行った結果，第三世代 IGBT を適用した G9 よりも発生損失が増えているが，第五世代 IGBT を適用する次世代インバータにおいては電磁ノイズ低減とともに発生損失の低減を両立させ大幅な改善を行う計画である。

富士電機では小容量インバータの小型化・低コスト化のために，インバータ専用パワーモジュールを独自に開発してきた。インバータの主回路端子台をパワーモジュールと一体化することで回路を簡素化し小型化・低コスト化を図ってきた。インバータ専用パワーモジュールには独自に開発した金属基板を適用することにより，小型化されたパワーモジュールの冷却を容易にした。

図２　汎用インバータでの発生損失

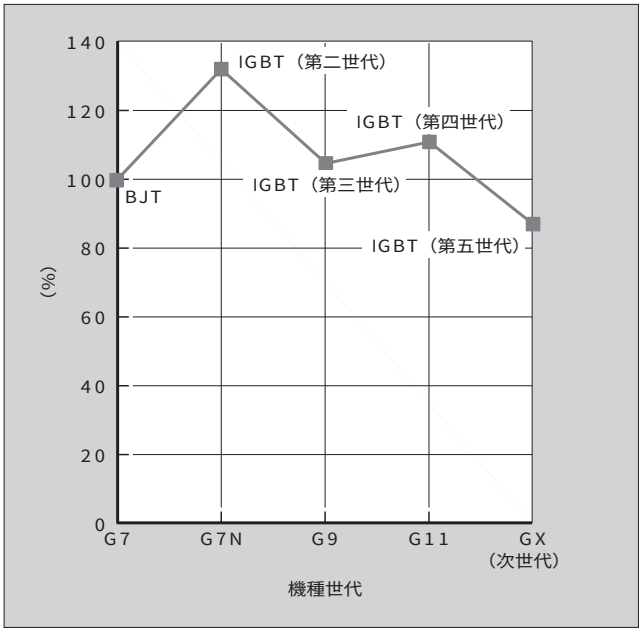


図３　CPU の能力の変遷

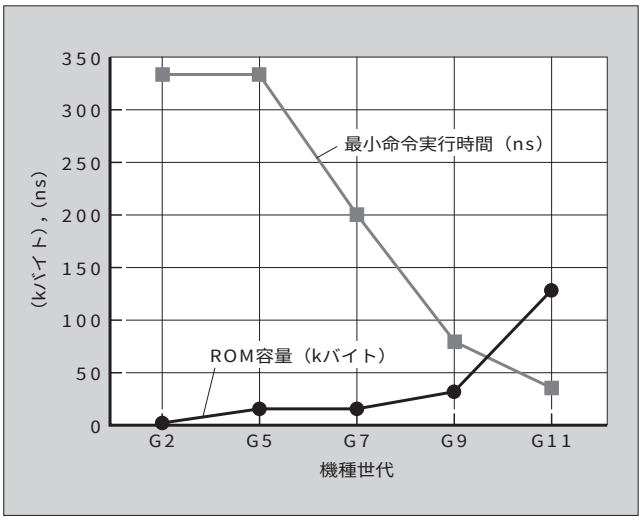
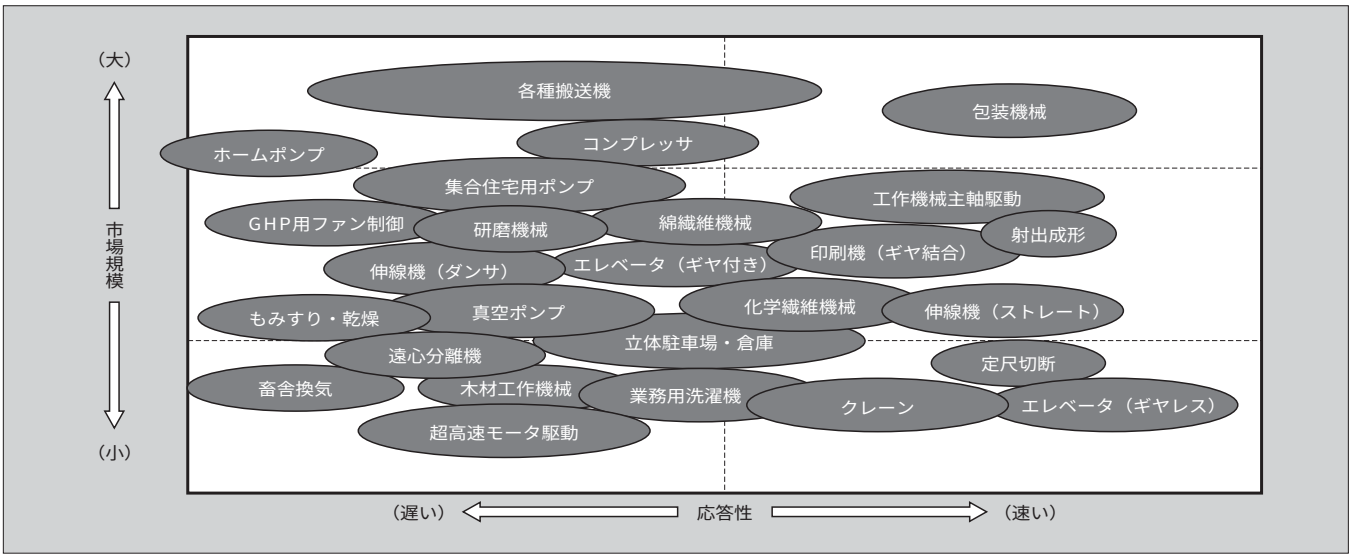


図４　汎用インバータのアプリケーション例



3.2　制御回路技術

制御回路技術での進歩はアナログ回路方式からディジタル回路方式に変わったことが最も大きな変革である。特に富士電機は 1986 年に業界に先駆けて 16 ビット CPU（Central Processing Unit）を使った全ディジタル制御方式を採用し，現在の汎用インバータの原型を作った。汎用インバータの高性能化・多機能化は，CPU の進歩なくしては実現できない。

図３に汎用インバータに使われてきた CPU の能力の変遷を示す。演算処理速度で約 10 倍，プログラム容量で約 30 倍の能力になりインバータの高性能化・多機能化が実現できている。また，大規模 LSI（Large Scale Integrated Circuit）を採用したハードウェアとソフトウェアの適切なバランスを考えた制御回路構成が特徴である。

3.3　モータ制御技術

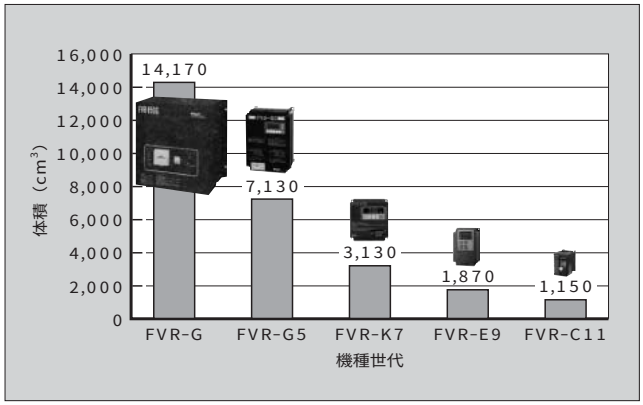
モータ制御技術は誘導電動機の V/f 制御がベースとなり標準モータの可変速運転を可能にした。1986 年に産業用高精度インバータとして発売した「FRENIC5000VG シリーズ」はベクトル制御方式を採用して直流機並みの性能を実現し，高速応答・高精度速度制御性能が要求されるクレーン，立体駐車場，巻取機，押出機などの新しい分野への適用が可能となった。これを基に，1990 年ごろから汎用インバータにもベクトル制御の考えが適用され始め，標準モータの高性能制御が可能となった。

制御技術の進歩に従って，汎用インバータの適用アプリケーションは拡大されてきた。**図４**にドライブ装置の適用市場を示す。最近では，汎用インバータはギヤ付きエレベータやクレーンなどにも適用されてきている。

4　インバータに今後求められること

インバータの歩みを振り返ると，小型化と高性能化・多機能化が求められ，それに応えてインバータは進化してきた。これから汎用インバータに求められるであろうことを以下に述べる。

図５　汎用インバータ（750 W）のサイズ推移



(1)　小型化は初期のころのインバータに比べると同等機能のインバータでみれば体積で約 1/10 になった。**図５**に汎用インバータの体積の推移を示す。小型化の要求は従来ほど強くないが，今後は周辺機器を含めた汎用インバータシステムとしての小型化が求められてくる。

(2)　高性能化・多機能化は機種世代とともに進んできたが，汎用インバータの適用アプリケーションが広がるにつれ，なお強い要求としてある。汎用インバータの多機能化は驚くものがあるが，ユーザーにとっては多機能が故に使い難くなっているともいえる。各アプリケーションに必要な機能があればよく，アプリケーション別機能選択やユーザーによるプログラムが可能なインバータがより強く求められてくるであろう。

(3)　汎用インバータは日本市場から始まったが，今や世界で約 30 億ドルの市場ともいわれている。国や地域によって要求が異なる部分もあり，それにどう対応していくかが今後の課題でもある。例えば，保護構造や端子構造，ノイズに対するフィルタの考え方やオープンバスに

対する考え方などである。また，各種規制も増えてきており，ヨーロッパにおける CE マーキング，RoHS（Restriction on Hazardous Substances）対応などに相当する動きが全世界に広がりつつある。これらは「環境」というキーワードでくくることができ，日本国内でもグリーン調達としてユーザーからの要求が増えつつあり，今後のインバータにとって重要なファクターとなるであろう。

5　将来技術の展望

5.1　主回路技術

インバータの最も基礎となるパワーデバイスとしては，ここしばらく IGBT が使われるであろう。主回路方式は PWM 制御による三相ブリッジインバータが主流を占め，一部で 3 レベルインバータの製品化の動きがあるが，コスト的に高いことから一部の用途に限定されている。技術的には逆阻止型 IGBT が出てきておりその特性を生かした回路方式も考案されつつあるが，価格的にみてまだ高く一部の用途への適用にとどまるであろう。

主回路技術で最も重要なのはノイズレスへの動きである。高キャリヤ周波数でのスイッチングで電磁ノイズが増えたことは前述したが，これを含め広義でのノイズ（電磁ノイズ，電源高調波，漏れ電流など）を解決する技術開発が重要であり，富士電機では鋭意ノイズレスインバータの実現に向けて技術開発を進めている。

5.2　制御回路技術

より高性能化・多機能化のための高速 CPU 適用と小型化からコア CPU を使った高集積 LSI 化も進むであろう。オープンバス接続の要求から，その機能を標準的に内蔵したインバータも出てきている。

5.3　制御方式

制御方式では，より高性能化が進みそのため駆動するモータ特性に応じた調整が必要になり，オートチューニング技術やロバスト化技術がより進化していくであろう。

制御では誘導機駆動から同期機駆動への動きが見えてきている。特に，省エネルギー・高速化・小型化を狙ったポンプ用途ではすでに適用が始まっており，さらに広がっていくと考えられる。

5.4　メンテナンス機能

汎用インバータは電解コンデンサや冷却ファンといった寿命部品を使っているので，メンテナンスは不可欠である。これら部品寿命を長くする改良やこれら寿命部品を使用しない技術開発が行われており，究極はメンテナンスフリーにすることであるが，当面はメンテナンスをより簡単に行うために，寿命情報の表示機能や寿命予報信号の出力機能が改善され，より信頼性の高いものになるであろう。

また，故障時などのメンテナンスとしてインターネットを使ったサービスも可能となり，より使いやすいものになっていくと考える。

6　富士汎用インバータの目指すところ

富士汎用インバータは FRENIC5000G シリーズの発売から 27 年が経過したが，その時代時代の先端技術を駆使して世の中に最先端の汎用インバータを提供してきた。汎用インバータに求められることや将来技術を展望し，富士汎用インバータが今後目指すところを以下に述べる。

(1)　豊富な機種ぞろえ

汎用インバータのトップグループとして，ローエンドインバータからハイエンドインバータまでをそろえ，今後とも種々のアプリケーションに対して最適なインバータを提供していきたい。グローバルな市場をみて，海外メーカー製インバータに見られるように小容量から大容量まで，各種電源系統に対応した機種ぞろえにも応えていく所存である。

(2)　環境に優しいインバータ

富士汎用インバータが目指すところはノイズフリーインバータである。従来はノイズ源としてみられていたが，周辺機器に優しいインバータを開発することが重要課題である。

これからはグリーン調達に代表されるように，特定有害物質を含まない製品づくりが求められている。鉛フリーはすでに家電製品に実現され始めているが，産業用機器である汎用インバータにおいても同様で鉛フリー化が求められている。富士汎用インバータはすでに特定有害物質を含まない製品開発に取り組んでおり，2005 年末までに新たに開発する製品で対応する計画である。2002 年に発売した FRENIC-Mini はすでに一部に鉛フリーはんだの適用を始めている。

このように「環境に優しいインバータ」が富士汎用インバータの目指すところである。

(3)　多様化するアプリケーションへの対応

従来，汎用インバータは上位のコントローラなどから指令を受けて制御されていた（集中制御型）。一方，近接するインバータの情報を取り込み，インバータがインバータ自身の動作を判断し自身を制御させる要求もある（分散制御型）。富士汎用インバータはこのような要求に対しても対応できることを目指している。

アプリケーションによる要求仕様は多様化してきている。汎用インバータは，組み込まれた機能群でパラメータの選択によりその動作・仕様をユーザーが決めていた。より多様化に対応するためには，ユーザーがプログラム可能な機能を持たせることも一つの方向である。すなわち，プログラマブルコントローラ（PLC）機能を内蔵した汎用インバータがその一つの形である。

(4)　コストパフォーマンスの追求

汎用インバータは単機能・低価格品と高性能・多機能品との二極化の傾向に進むといえる。しかし，アプリケー

ションからみるとそのアプリケーションに適した性能と機能があればそれ以上は必要がない。つまり，ユーザーからみてコストパフォーマンスのよいインバータを提供することが求められている。このため，二極化の間に位置する標準的なインバータが重要になってくる。このインバータはユーザー要求仕様に簡単に対応できることが求められ，富士電機ではこの標準的な汎用インバータの開発にも力を入れていきたい。また，従来専用モータを使っていたベクトルインバータも最近では標準モータの適用が可能になっており，汎用インバータとベクトルインバータの境があいまいになってきている。富士電機は積極的にこの境を取り除いていき，ユーザーにとってより低価格で高性能なインバータを提供していきたいと考えている。

7　あとがき

富士汎用インバータの歩みを振り返るとともに，これから汎用インバータに求められること，富士汎用インバータの目指すところについて述べてきた。

富士電機は常に汎用インバータを進化させ続け，世界に向けて最新の汎用インバータを提供していくつもりである。そのためには，絶え間ない技術開発と製品開発が不可欠である。富士電機はこれまで培ってきた技術をベースに新しい技術を付加し新しい汎用インバータを開発していき，ユーザーの要求に応えていく所存である。

参考文献

(1)　中嶋幸男ほか．汎用インバータ FVR-G5．富士時報．vol.59, no.10, 1986, p.638-644.

(2)　山添勝ほか．インバータ・サーボシステム特集．富士時報．vol.72, no.4, 1999.

e-Front runners

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。