

高性能ベクトル制御形インバータ「FRENIC-VG」

FRENIC-VG, a High-Performance Vector-Control Inverter

田中 正男 TANAKA Masao

山本 健 YAMAMOTO Takeshi

木内 忠昭 KIUCHI Tadaaki

一般産業用途の交流機の可変速制御を行うインバータは、主に、V/f一定制御、ベクトル制御のいずれかを採用している。富士電機は、新たに高性能ベクトル制御形インバータ「FRENIC-VG」を開発し、高精度化と高機能化を実現するとともに機能安全規格にも対応した。検出回路の最適化、速度制御精度の改善、速度センサレスベクトル制御、多重化システムの採用、「E-SXバス」への接続などさまざまな特徴を持っている。また、適用事例として、伸線機では最適な張力制御や巻取機の制御回路の小型化ができ、クレーンでは大容量対応や高起動トルク、応荷重制御などができる。

Inverters for variable speed control of AC machines used in general industry applications mainly use either V/f constant control or vector control. Fuji Electric has developed the FRENIC-VG, a new high-performance vector control model, which realizes high precision and high functionality while complying with functional safety standards. It has various outstanding features, including optimized detection circuits, improved speed control precision, speed sensorless vector control, use of multiplex systems, and connection to E-SX buses. Application examples include optimal tension control and miniaturization of winder control circuits in wire drawing machines, and high-capacity support, high starting torque, and load adaptive control for cranes.

1 まえがき

一般産業用途の交流機に対して可変速制御を行うインバータは、主に、V/f一定制御、ベクトル制御のいずれかを採用している。単純な可変速制御や、低速でのトルク精度を重視しない用途では、V/f一定制御が主流となって発展してきた。一方、ベクトル制御形インバータは、交流電動機を直流電動機と同等に、トルクを容易に制御したいというニーズを受けて発展し続けている。

富士電機は、ベクトル制御形インバータを商品系列の一つとして提供している。その新シリーズである高性能ベクトル制御形インバータ「FRENIC-VG」を、2011年度に発売した。

本稿では、FRENIC-VGに盛り込んだ新技術・新機能および適用事例を紹介する。

2 コンセプトと特徴

2.1 コンセプト

富士電機は、機械メーカーや中小プラント用途を中心に、汎用ベクトル制御形インバータを商品として提供してきた。近年、機械設備の高機能化や高精度化、工場設備の生産性向上などの要求が高まっており、高精度できめ細かな制御が行えるベクトル制御形インバータのニーズが増加している。

その中でサーボプレス機や射出成型機といった機械設備は、駆動装置の大容量化が進んでおり、現行のサーボシステムでは容量的に対応が難しくなっている。一方、機械類が関わる人身事故などを防止するため、機能安全規格におけるリスクアセスメントの考え方が注目されており、インバータにも機能安全規格への対応の要求が高まってき

た。

このような市場のニーズに応えるため、FRENIC-VGは、高精度化と高機能化を実現し、630kWまで容量をそろえ、さらには機能安全規格にも対応した。図1にFRENIC-VGの外観を示す。

2.2 特徴

(1) 速度応答の向上

FRENIC-VGは、検出回路の最適化と高速かつ高分解能AD変換技術の採用によるモータ電流および電圧の検出や、高速演算が可能なマイクロプロセッサを搭載したハードウェアシステムの構築により、ベクトル制御の演算周期をさらに高速化した。



図1 「FRENIC-VG」

速度センサ付きベクトル制御における速度応答は600 Hz を実現し、応答性が要求される伸線機や巻取機、印刷機などに加え、前述のサーボシステムへの対応が可能となり、適用分野がさらに拡大した（表1）。

(2) 速度制御精度の改善（回転むらの抑制）

速度センサ付きベクトル制御では、モータに取り付けた速度センサ（PG：Pulse Generator）からのパルス信号を受信し、このパルスの変化分から実際のモータ速度を演算する。このパルスは、低速になるほど周波数は低く、制御周期内のパルスの変化が少ないため、正確な速度演算が行えない。その結果、速度制御精度が悪化し回転むらが生じる。

FRENIC-VG では、新たなパルス変化の検出機能を専用LSIに搭載し、速度の演算アルゴリズムを改良することで低速域での速度演算精度を高めた。

制御周期内にパルスの変化が減少する速度域では、パルスの変化点から次の変化点までに要する時間とその測定値から速度演算を行う。制御周期内にパルスの変化が全くない状態が継続する極低速域では、前回の速度演算値から速度を推定する。この方式により、高分解能のPGを使用しなくても、低速域の速度制御性能が改善し、従来機種に対して回転むらを約1/3に抑制している（図2）。

(3) 速度センサレスベクトル制御

速度センサ付きベクトル制御は、高応答、高精度といった優れた性能を持っている反面、モータへのPGの取付けや配線などが必要である。

速度センサレスベクトル制御方式は、PGを使用せず、モータ端子電圧や電流、モータ電気定数からモータ速度を演算して制御する方式である。

FRENIC-VG では演算周期の高速化に加え、モータ電圧の検出回路を改良して3相分を検出できるようにし、さらに検出分解能を改善し、速度制御範囲の拡大と低速域のトルク特性の向上を図った（図3）。

(4) 多重化システム

表1 速度応答の比較

製品名称	速度応答
FRENIC-VG	600 Hz
FRENIC5000-VG7 (前モデル)	105 Hz
FRENIC5000-VG5 (2世代前モデル)	54 Hz

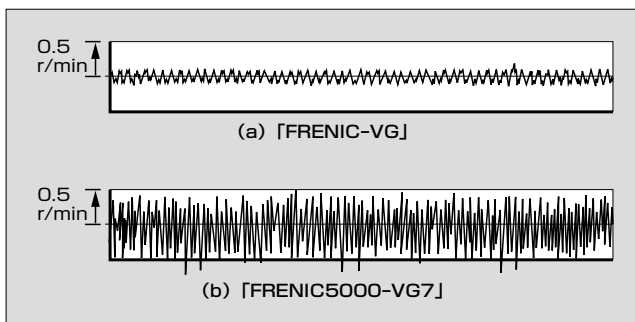


図2 回転むらの抑制

大容量化するには、従来は、複数のインバータを使って巻線分割を行った多巻線モータを駆動するか、インバータの出力をリアクトルで結合する方式が採用されていた。FRENIC-VG では、インバータの出力をモータ端子部でじかに並列接続を行うダイレクトバラ接続方式の実現により、リアクトルや特殊巻線モータの使用を不要とした。この方式では、IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）のスイッチングタイミングのばらつきが引き起こす出力電圧のアンバランスにより、インバータ間で横流が発生する問題を、高速の横流抑制制御により解決した。また、複数台のインバータのうち1台が故障した場合でも、残りのインバータにて減機運転ができ、プラント設備など冗長性が必要な重要設備での適用が期待できる（図4）。

(5) 「E-SX バス」

FRENIC-VG は通信オプションを搭載することで、統合コントローラ「MICREX-SX SPH3000MM」で採用している「E-SX バス」への接続を可能にした。

E-SX バスは、バス通信の高速化（最速 250 μs の I/O リフレッシュ）と、バスに接続する機器のタスク周期の同期を合わせる新バス制御方式を実現したことで、MICREX-SX SPH3000MM の統括制御性能を向上できる。この新バス通信仕様は、データ入出力タイミングを ± 1 μs の精度で同期を合わせるものである。

FRENIC-VG では、この E-SX バスに対応するために、通信ソフトウェアの高速演算化と通信 LSI の改良を行った。モータのトルク・速度制御などのフィードバック制御の一部を MICREX-SX SPH3000MM で行うことができ、制御の応用性が広がった。さらに、MICREX-SX SPH3000MM が、複数の FRENIC-VG を介して複数台のモータを同期した制御が可能となり、多軸制御を行う印刷

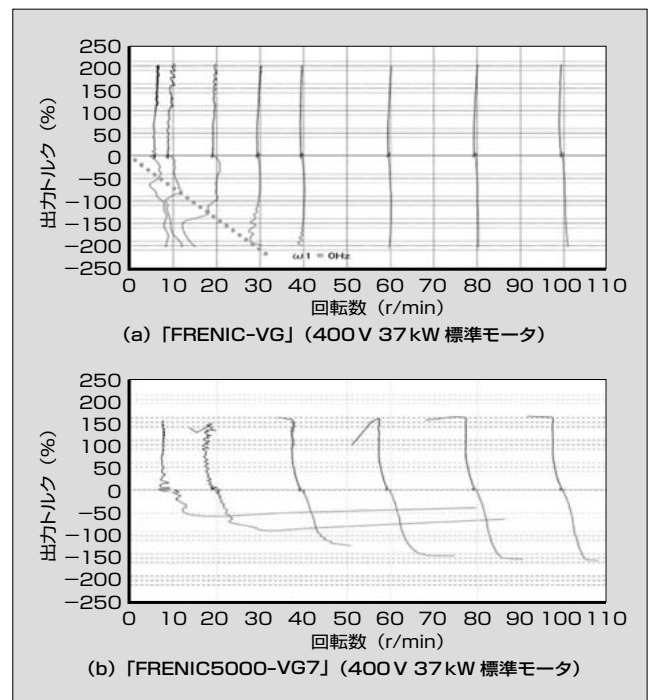


図3 低速域のトルク特性

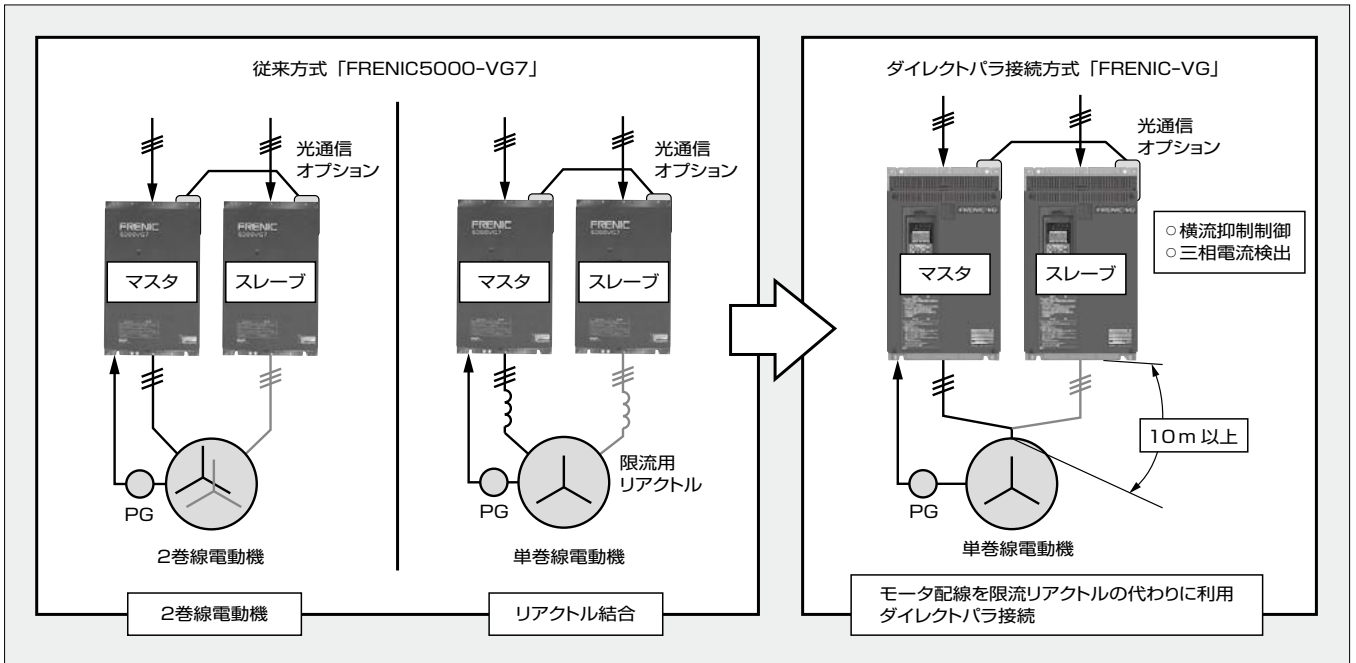


図4 インバータの直接バラ接続方式

表2 安全機能（機能安全規格：IEC61800-5-2）

レベル	機能
STO : Safe Torque Off	出力遮断し、モータをフリーラン状態にする
SS1 : Safe Stop 1	モータを減速させ、指定した条件で出力遮断する
SLS : Safely Limited Speed	モータ速度が指定速度を超えないようにする
SBC : Safe Brake Control	モータブレーキを制御するための信号を出力する

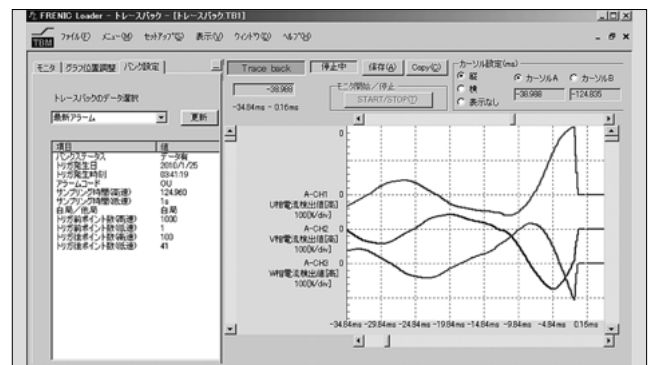


図6 トレースバック

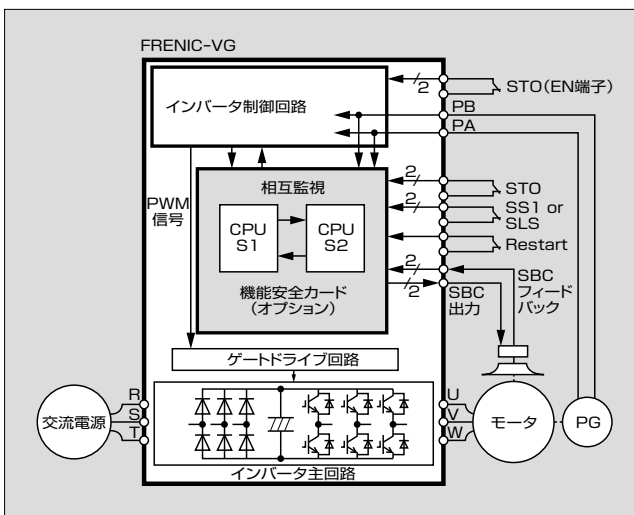


図5 機能安全システムの構成

機などでは、従来必要とされた複雑なメカ機構の簡略化もできるようになった。

(6) 機能安全対応

FRENIC-VGは、機能安全規格 IEC 61800-5-2 に適合した STO 機能（EN 端子）を標準装備し、オプションの

機能安全カードを搭載することで、表2に示す安全機能を付加できる。

図5に機能安全システムの構成を示す。機能安全システムに共通することは、端子がそれぞれ2系統あり、片方の系統に故障が発生したときでも確実な動作をすることである。また、機能安全カードには二つのCPUを搭載し、互いのCPUの正常動作を監視する冗長化を行っている。異常を検出した場合は、モータへの出力を遮断する。

(7) パソコンローダ、トレースバック

FRENIC-VGはパソコンローダと時計機能を備えており、FRENIC-VGの前面のUSBコネクタを経由して接続したパソコンから、機能コードの設定や参照、運転時の各種データのモニタおよびトレースができる。

トレースバックにより、発生日時や、アラーム発生の直前・直後の各種運転データを内部メモリに保持する。これらのデータはパソコンローダで波形表示が可能であり、アラームの要因解析を容易に行うことができる（図6）。

3 適用事例

FRENIC-VGの伸線機およびクレーンへの適用事例を紹介する。

3.1 伸線機への適用

金属加工機械の一つである伸線機は、鉄線などの線材を巻取釜で引っ張り、ダイスを通すことにより線径を細く加工する。加工を終えた線材は巻取機にて巻き取ることができ、伸線機では速度制御と巻取機の張力制御が重要である。

(1) 伸線機の概要

線材で線径の加工量が多い場合には、一度の加工では線材が破断するため、複数の伸線機を介し徐々に線材を細く加工する。10台程度の伸線機を用いて連続的に加工することもある。また、各伸線機間で線材の張力が干渉しないように、ダンサロールを設けている。ダンサロールは上下（機械の構成によっては左右）に移動することができ、適度な張力で各伸線機間の線材の弛（たる）みを設けている。しかし、太物線材などは容易に伸線機へセットすることができないため、各伸線機間にはダンサロールを用いないストレート伸線機が必要となる。

(2) システム構成

図7にストレート伸線機のシステム構成例を示す。伸線機の主な構成は、線材を加工するダイスと線材を引っ張る巻取釜からなる。線材の加工量に応じて複数台の伸線機で加工し、最終段は巻取機にて線材を巻き取る。巻取機にトラバース^(注)が付けられている場合、トラバースの動作による外乱から巻取機に張力変動が発生する。マスタ伸線機と巻取機間にダンサロールを設けて、マスタ伸線機と巻取機間の干渉を防いでいる。

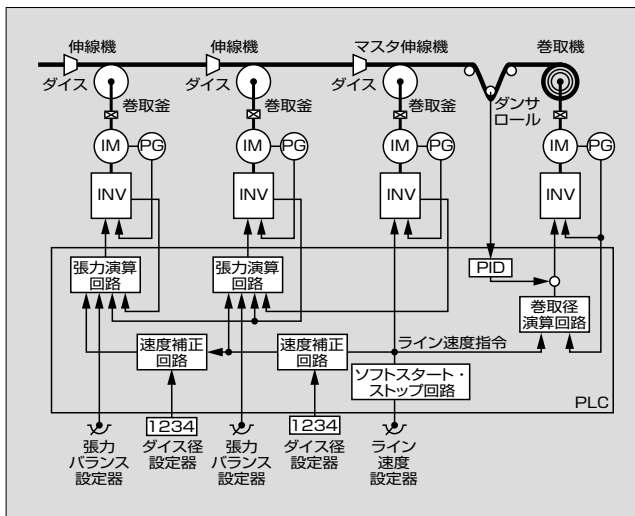


図7 ストレート伸線機のシステム構成例

〈注〉トラバース：巻取機の1か所に線材が片寄って巻き取らないように線材を振り分ける装置である。

(a) 伸線機の制御

マスタ伸線機は、ライン速度設定器からの速度指令にソフトスタート・ストップ回路から出力されたライン速度指令で速度制御を行う。ソフトスタート・ストップ回路は、加減速に時間勾配を持たせるものである。

張力演算回路は、各インバータからのトルク信号より張力を検出し、各伸線機間の張力バランスが安定するように制御を行って、線材に適正な張力を掛けるものである。速度補正回路は、線材がダイスを通過して線径が細くなった線速度変化分の補正を行うものである。その他の伸線機は、この張力演算回路と速度補正回路で張力制御を行う。

(b) 巻取機の制御

巻取機とマスタ伸線機の間にあるダンサロールによって張力制御を行う。なお、巻取径変化分による速度変化は巻取径演算回路により速度補正を行う。また、巻取径演算は、ライン速度指令と巻取機モータの実速度（PGにて検出）により、現在の巻取径の演算を行っている。

(3) FRENIC-VG 適用の利点

FRENIC-VGをストレート伸線機に使用した場合の利点を述べる。

(a) 最適な張力の実現

張力制御に必要なトルク精度とトルクリップルを従来機に比べて向上させ、PLCからの制御をE-SXバスにより通信の高速化を図った。これにより、線材に適した張力制御が可能となり、線材の断線・弛みなどを低減し、さらにライン速度を高速化しても安定した運転ができるようになった。また、低速度域の回転むらも改善できるため、線材が細く巻取径の比率（最小巻径：最大巻径）が大きい場合にも対応できるようになった。

(b) 巻取機の制動回路の小型化

巻取機にトラバースを付けた場合には外乱が発生し、周期的に制動モードとなり回生電力が発生する。FRENIC-VGでは、標準で装備している直流共通バス接続端子で、巻取機用と伸線機用インバータの直流段回路を接続し、巻取機の回生電力を伸線機で処理できる。そのため、制動回路なしで巻取機を小型化できる。さらに、断線時などの緊急停止時の制動回路（制動抵抗器の駆動回路）も標準で装備している（200V用：55kW以下、400V160kW以下）。

3.2 クレーンへの適用⁽²⁾

製造工場および港湾などで使用されているクレーンの大型化に伴い、搭載される駆動装置も大容量化している。また、インバータは故障した場合でも、早期の復旧が求められている。

(1) クレーンの概要

クレーンは、つり荷重を昇降させる主巻装置、主巻装置を左右に移動させる横行装置、クレーン本体を前後に移動させる走行装置、ブームを上下させる起伏装置からなる。

(2) クレーンのシステム構成

コンテナ船から積み荷であるコンテナを荷役する港湾用キーサイドクレーンの機械構成を次に述べる。主巻装置は、運転パターンの約半分が制動モードである。また、高調波電流対応のため電源部にはPWM（Pulse Width Modulation）コンバータを設けている。

(a) 主巻用インバータ

コンテナなどの荷物を昇降させる主巻では、主巻と走行の同時運転がないため、主巻モータと走行モータを切り替えて制御する。主巻モータを駆動しているときは、コンテナを昇降するために保持トルクや起動トルクが必要なので、速度センサ付きベクトル制御にて運転を行う。主巻装置は定格容量での運転は少なく、定格荷重より軽い荷重での運転が多い。そこで荷重に応じた速度域で使用する応荷重制御を行い、操業の効率化を図る。

(b) 横行用インバータ

横方向に水平移動をする横行では、主巻と横行の同時運転があるので、横行も速度の応答性が求められることから速度センサ付きベクトル制御にて運転を行う。

(c) 起伏用インバータ

カンチレバーなどの取付部を中心に上下させる起伏では、起伏と走行の同時運転はないので、主巻用と同じくモータ切替制御を行う。また、起伏速度が低いため、速度センサレスベクトル制御を使用する場合もある。

(d) 走行用インバータ

複数台の小容量モータを同時に駆動するため、V/f制御で運転を行う。

(3) FRENIC-VG 適用の利点

(a) 通常駆動インバータとバックアップインバータの併用化、電気設備の低コスト化の実現

主巻装置は、FRENIC-VGのダイレクトパラ接続を採用したので単巻モータを使用でき、電気設備の低コスト化が実現できている。また、2台のインバータでモータを駆動しているので、1台のインバータが故障しても容易に残りのインバータがバックアップとして使用できる減機運転を行える利点がある。

図8は、FRENIC-VGを使用した適用事例である。この事例では、INV2は主巻/起伏/走行ならびに横行のバックアップ、INV3は横行ならびに主巻/走行/起伏のバックアップが行うことができ、インバータ1台が故障しても復旧交換することなく、故障箇所によっては、クレーンの通常操業に支障のない運用が可能である。

(b) 大容量対応が可能

複数のインバータをダイレクトパラ接続方式により接続することで大容量モータの駆動も可能である。

(c) 高起動トルク

インバータは、200%-3sの過負荷耐量を持っているので、起動頻度が多いクレーンの起動時に要求される高トルクに対応できる。

(d) 応荷重制御

主巻では、定格荷重より軽い荷重の場合、定格荷重時よりも許容昇降速度制限値を自動的に高くする応荷重制

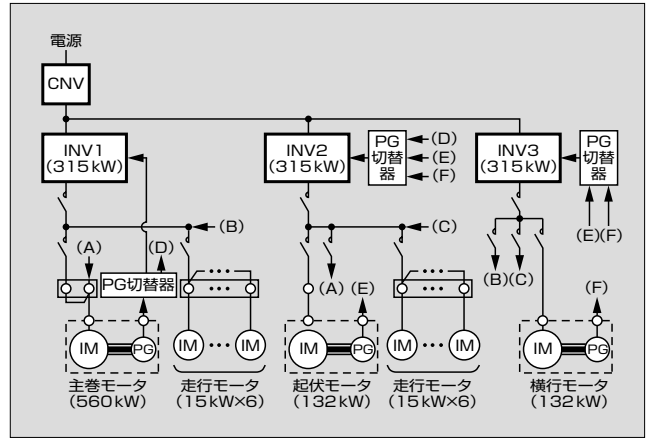


図8 キーサイドクレーンへの適用事例

御を行っている。荷重の検出は、始動時のトルク電流から荷重推定演算を行う。FRENIC-VGではこれまでの機種に対しトルクリプルと応答性が改善したため、荷重推定演算の精度が向上し、許容昇降速度制限値が高くなって操業の効率アップを図ることができる。

(e) ブレーキ積放・投入シーケンス演算の機能改善

ブレーキ積放・投入時のシーケンス処理では、積放側や投入側を個別調整できる機能を付加した。その結果、ブレーキの調整時間が短縮でき、荷物の振れをさらに抑えることができる。

4 あとがき

このたび商品化した高性能ベクトル制御形インバータ「FRENIC-VG」の主な特徴と応用例について紹介した。FRENIC-VGは、さらなる分野拡大として、主に大規模プラントにて必要とされる直流配電方式のスタックタイプインバータのラインアップを計画している。大規模プラントに必要な高容量モータ駆動や冗長性などの技術課題は、ダイレクトパラ接続方式によって解決する。

今後も、FRENIC-VGの機能拡充を進め、サーボシステムや大規模プラントなど、適用分野を拡大させていく所存である。

参考文献

(1) 廣瀬順ほか. エネルギー・環境を支えるパワーエレクトロニクス機器. 富士時報. 2012, vol.85, no.1, p.32-37.
 (2) 辻原弘ほか. 「FRENIC5000 VG7S/MG5」の運搬機械への適用例. 富士時報. 2001, vol.74, no.7, p.400-404.



田中 正男

汎用インバータの企画、エンジニアリングに従事。現在、富士電機株式会社パワエレ機器事業本部ドライブ事業部駆動技術部主査。



山本 健

汎用インバータの企画，エンジニアリングに従事。
現在，富士電機株式会社パワーエレクトロニクス機器事業本部ドライブ事業部駆動技術部主任。



木内 忠昭

モータ駆動用低圧インバータの製品開発に従事。
現在，富士電機株式会社パワーエレクトロニクス機器事業本部ドライブ事業部製品開発部主任。





*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。