産業プラントを支える可変速駆動システム

特集

安藤　俊明（あんどう　としあき）　　木谷　剛士（きだに　つよし）

1　まえがき

鉄鋼・製紙・石油化学などの産業プラントは電動機が最も多く使われる分野であり，電動機駆動制御がそのプラントの能力を決める最も大きな要因の一つである。

電動機の可変速駆動システムとして，古くは直流電動機と発電機の組合せ（M-G）や直流電動機とサイリスタを適用した直流電源との組合せ（定電圧電源，サイリスタレオナード）が適用されたが，インバータの登場により交流電動機とインバータの組合せへ移行した。交流電動機は直流電動機と比べ保守が容易であることに加え，パワーエレクトロニクス技術の発展によりインバータの高機能化と低価格化が進んだことにより急速に普及した。

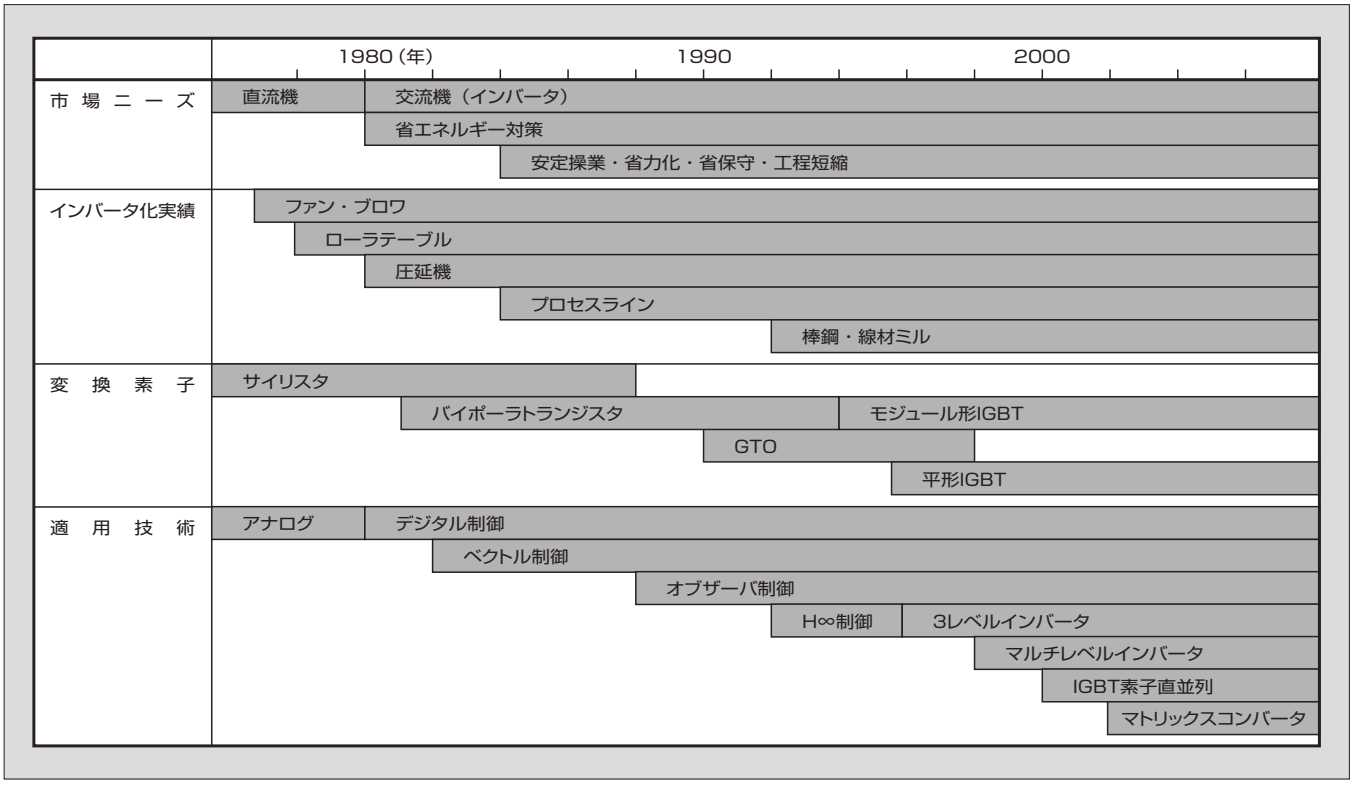
また，可変速駆動システムにはファン・ポンプや単体機器に単独で用いられる汎用インバータと，製鉄や製紙といった産業プラントにおいて多数の組合せで用いられるプラント用可変速駆動システムがある。

本稿では，可変速駆動システムの推移と富士電機の産業プラント用可変速駆動システムの代表機種について紹介する。

2　可変速駆動システムの推移

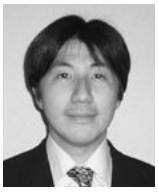
可変速駆動システムは製造プロセスの高速化，製品の高品質化，安定操業の要求から高度な速度制御精度，トルク制御精度，応答性が要求され，コストパフォーマンスの向

図1　可変速駆動システム技術の推移



安藤　俊明

電動力応用プラントのエンジニアリング業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社産業プラント本部第一統括部ドライブシステム技術部主任。



木谷　剛士

産業用インバータの開発設計に従事。現在，富士電機システムズ株式会社技術開発本部パワエレ開発センター開発設計部。

上を追求しながらさまざまな駆動制御方式が開発されてきた。また，設備の大規模化・複雑化に伴い省力化・省保守化が進められてきた。近年，地球環境の改善のために省エネルギー化が進められている。

変換素子は，サイリスタ，バイポーラトランジスタからGTO（Gate Turn-Off thyristor），IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）へと進化し，高耐圧化，大電流化，制御精度の向上を支えてきた。

IGBTの適用においては，素子単体の高耐圧化と大電流化，素子直列とインバータセルの直列化による高耐圧化，電動機の多巻線化とインバータセルの並列化による大容量化，変換器のマルチレベル化が行われている。

富士電機では圧延主機をはじめ，棒鋼・線材ミル，プロセスライン，抄紙機，フィルムラインなど各種プラントでの交流可変速化を進めてきた。

可変速駆動システム技術の推移を**図1**に示す。

3　富士電機の可変速駆動装置のラインアップ

産業プラントに適用される可変速駆動装置は，それぞれのプラントにより出力容量が数kVAから十数MVAまで多岐にわたっており，制御方法，揃速（せんそく）性，速度やトルクの制御精度などの要求もさまざまである。

富士電機では，10kVAから最大5,400kVAまでには400V級2レベルIGBTインバータを，1,200kVAから16,000kVAまでには800V級3レベルIGBTインバータを，それ以上は3.3kV級3レベルインバータを適用している。また，ファン・ポンプ用としては，7,500kVAまで3/6kV級マルチレベルIGBTインバータを適用している。**図2**に富士電機の交流可変速駆動装置の適用マップを示す。

富士電機では，可変速駆動装置として**表1**に示す製品をラインアップしている。代表的な適用例を以下に示す。

コイル状の鋼板を巻き戻し，酸洗，焼鈍，めっきなどの表面処理を連続的に行い，再びコイル状に巻き取るプロセスラインは数kWのヘルパから数百kWのリール，ブライドル，ミルなどで構成されており，各ロールが鋼板でつながっていることから揃速性が重要である。また，鋼板を引っ張るロールと鋼板に引っ張られるロールがあり，エネルギーを授受できるため，コンバータを共通として容量を小さくできる直流配電形インバータが適しており，ベクトル制御400V級2レベルIGBTインバータ「FRENIC4000VM5」を適用している。

可逆圧延ミル用としては，ベクトル制御3.3kV級3レベルインバータ「SIMOVERT ML2」を，棒鋼・線材ミル主機用としてはベクトル制御800V級3レベルIGBTインバータ「FRENIC4400VM5」を，補機用としてはベクトル制御400V級2レベルIGBTインバータ「FRENIC4000VM5」を適用している。

3/6kVのファン・ポンプ駆動用としては3/6kV級マルチレベルIGBTインバータ「FRENIC4600FM5」を適用している。

このほか，汎用インバータとして2レベルインバータ「FRENIC5000シリーズ」も各種ラインアップしている。

図2　交流可変速駆動装置の適用マップ

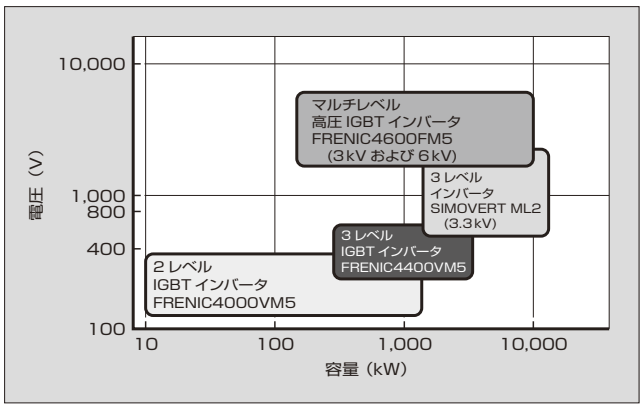


表1　可変速駆動装置の製品群

製品名	制御方式	容　量	主な用途
SIMOVERT ML2	大容量PWMインバータ 3レベル　3.3kV	10,000kVA 28,000kVA（3多重）	ミル主機ドライブ
FRENIC4000VM5 FRENIC4000FM5	直流配電PWMインバータ IGBT　2レベル　400V	10，15，25，38，50，75，100，150，225，300，450，600，900～5,400（kVA）（6多重）	ミル補機ドライブ 棒線ミル プロセスライン 抄紙機 押出機 セメントミル ファン，ポンプ
FRENIC4400VM5	直流配電式インバータ IGBT　3レベル　800V	1,200，2,000，7,200，16,000（kVA）（8多重）	
FRENIC5000G11S FRENIC5000VG7	個別給電PWMインバータ IGBT　2レベル　200/400V	～110kW（200V） ～710kW（400V）	
LEONIC-M600 LEONIC-M Compact	直流ドライブ	～数千kW 27.5～150kW	
FRENIC4600FM5	高圧IGBTインバータ マルチレベル　3.3kV，6.6kV	～3,750kVA（3.3kV） ～7,500kVA（6.6kV）	省エネルギー ブロワ ポンプ コンプレッサ 冷凍機
FRENIC5000P11S	個別給電PWMインバータ IGBT　2レベル　200/400V	～110kW（200V） ～710kW（400V）	
FESPAC FRENIC5000VG7	PMモータ（高速モータ）	～300kW	

特集

4　2レベルインバータ「FRENIC4000VM5/FM5」

2レベルIGBTインバータ「FRENIC4000シリーズ」は，AC400V級出力の直流配電方式インバータであり，制御方式によりベクトル制御，センサレスベクトル制御のVM5，V/f制御のFM5から成る。制御方式によらず主回路および制御装置，ソフトウェアは同一で，容易に切換が可能である。

盤写真を**図3**，標準仕様を**表2**，単線結線図例を**図4**に示す。

FRENIC4000シリーズは300kVA以下をプラグインタイプのユニット構造，450kVA以上を盤構造としており，次の特徴がある。

(1)　省スペース，自由なユニット配置

幅800mmの盤1面に最大12ユニット（25kVA以下時）を収納可能で，大幅な省スペース化を実現できる。ユニットの盤への収納は，10～300kVAの容量の違い，VM5/FM5機種の違いにかかわらず混在可能，挿入位置は任意に指定可能なので，要求に合わせた自由度の高いユニット配置が可能である。また，幅800mm盤1面での最大容量は900kVA/AC400Vで定格電流1,299Aまでの電動機が駆動可能である。盤の外形を**図5**に示す。

(2)　プラント制御に最適

上位との制御伝送はフィールドバスとして世界的に普及しているPROFIBUS-DP伝送に加え，富士電機オリジナルのDライン，Tリンク，SXバスに対応している[(1)]。

また，制御機能として，ドループ制御，各種トルク制御，トルク制限機能，インパクトドロップ補償オブザーバ，軸ねじれ抑制オブザーバ，加減速フォーシング補償，バックラッシュ補償，電動機ロック機能，速度拾い込み運転，保護レベルの4分化などプラント制御に有用な制御機能を標

図3　FRENIC4000VM5/FM5

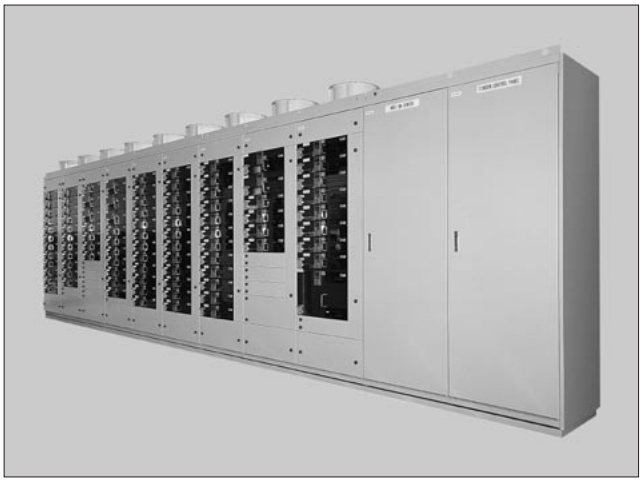


図4　単線結線図の例

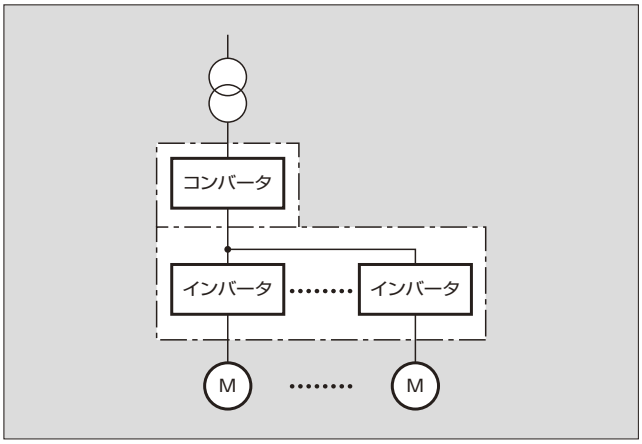


表2　プラント用可変速駆動装置の標準仕様

項目＼形式		FRENIC4000VM5	FRENIC4000VMT5	FRENIC4000FM5	FRENIC4400VM5	FRENIC4400FM5
入力電圧		DC600V			DC1,200V	
出力	電圧	三相　AC400V			三相　AC800V	
	周波数	200Hz（最大）			120Hz（最大）	
容量系列		10，15，25，38，50，75，100，150，225，300，450，600，900（kVA）			1,200，2,000（kVA）	
インバータ多重化		二重化　1,200，1,800（kVA）（最大六重化5,400kVA）			二重化　2,400kVA（最大八重化　9,600kVA）	
定格		100%連続，過負荷耐量150%1分間			100%連続，過負荷耐量150%1分間	
運転モード		4象限			4象限	
上位伝送		Dライン，Tリンク，PROFIBUS-DP，SXバス			Dライン，Tリンク，PROFIBUS，SXバス	
制御	方式	ベクトル制御+正弦波PWM速度制御	ベクトル制御+正弦波PWM速度制御+高精度トルク制御	正弦波PWM V/f一定制御	ベクトル制御+正弦波PWM速度制御	正弦波PWM V/f一定制御
	範囲	1：1,000	1：1,000	1：80	1：1,000	1：80
	界磁範囲	1：4	1：4	1：4	1：4	1：4
	精度	速度±0.01%	速度±0.01% トルク±3%	デジタル設定時 周波数±0.01%	速度±0.01%	周波数±0.01%

図 5　FRENIC4000VM5/FM5 盤外形

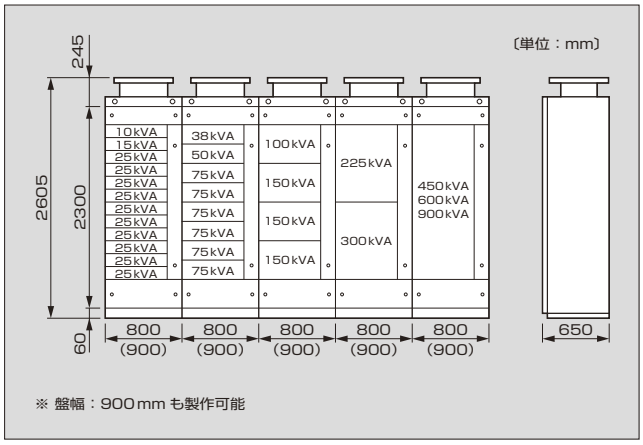
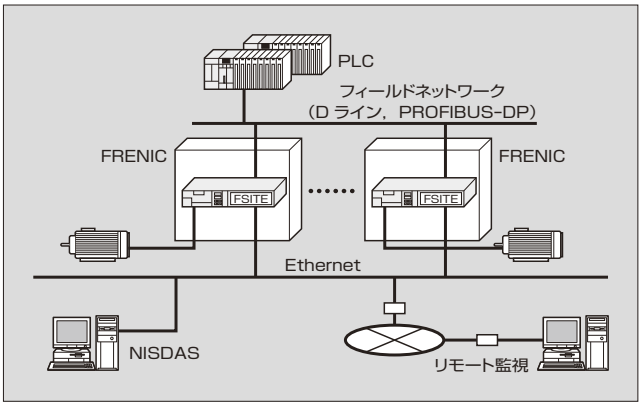


図 6　監視システムの構成例



準機能としてインバータに搭載している。

なお，各容量共通で瞬時電圧低下 100％，500 ms の耐量があり，復電時に自動再起動が可能である。

(3)　メンテナンス性の向上

300 kVA 以下のユニットタイプは制御回路，主回路も含めて完全プラグイン構造で主電源投入状態でのユニット交換作業が可能である。450 kVA 以上についてもすべて盤前面のみでの保守が可能である。

また，インバータ出力ブレーカをユニットに内蔵可能（50 kVA 以下），出力コンタクタを内蔵可能（150 kVA 以下）で，手動または電動でインバータ－電動機間を断路可能である。

さらにユニット個別の冷却ファンをなくし，盤天井ファンのみとすることで保守費用の削減を図っている。

(4)　容量系列の拡大

従来機種の容量系列は 10 ～ 450 kVA であったが，VM5 シリーズでは 450 kVA と同一設置サイズで 600 kVA，900 kVA をラインアップに追加し，従来比最大 50％減の小型化を図った。

また，VM5 シリーズはインバータ複数台で 1 台の多巻線電動機を駆動する多重駆動が可能である。多重駆動時に従来必要であった出力 AC リアクトルは不要で，最大 6 多重 5,400 kVA まで大容量化が可能である。

(5)　豊富なメンテナンスツール

パソコンローダ（FLOAD for Windows〈注 1〉）は，日常の制御パラメータの管理，運転状態の管理が可能で，故障発生時にはトレースバック機能〈注 2〉により故障時のインバータの各部の波形・状況が分かるので，原因究明・早急復旧に役立つ。

Web アダプタ（plusFSITE[2]）は，インバータ間を Ethernet〈注 3〉で接続し，パソコンのブラウザからインバータの監視が可能である。また，故障発生時にはトレースバックデータを添付したメールが発信できる。

高速集中監視システム（NISDAS[3][4]）は，インバータ装置を高速で集中監視することができ，併せて富士電機の汎用プログラマブルコントローラ（PLC）「MICREX-SX」の内部データも収集可能である。システム構成例を**図 6** に示す。

5　「FRENIC4000 シリーズ」のコンバータ

FRENIC4000 シリーズは出力電圧 DC600 V 系のコンバータ 1 台に対し，インバータ複数台を接続する直流配電方式を採用している。この方式は電動機間の駆動/回生エネルギーが直流母線を介して授受されるためプラントの高効率運転が可能である。

コンバータの回路方式は，低高調波・力率 1 制御には PWM コンバータ，大電流駆動/回生を省スペースで実現するサイリスタコンバータ，大電流が可能なダイオードコンバータ，回生量が駆動に比べて少ない場合にダイオードコンバータと合わせて使用する回生コンバータ，発電制動ユニットなどがあり，目的・用途に合わせて選択可能である。

6　3 レベルインバータ「FRENIC4400VM5/FM5」

3 レベル IGBT インバータ「FRENIC4400 シリーズ」は，FRENIC4000 シリーズと同じく直流配電方式のインバータであるが，出力が AC800 V，出力波形が 3 レベルという点が 2 レベルインバータとの違いである。3 レベルの PWM パルスパターンは専用のゲートアレイで実現している。

3 レベルインバータは出力高調波，トルク脈動の低減ができるとともに，電動機巻線へのサージ電圧を低減できるため，電動機や機械側へ与える影響を低減できる。3 レベルインバータの出力波形例を**図 7** に示す。

〈注 1〉Windows：米国 Microsoft Corp. の米国およびその他の国における登録商標

〈注 2〉トレースバック機能：故障発生前後のインバータ各部の波形，ビットの動きをインバータ本体に記録しておき，後にパソコンローダ，Web アダプタなどから参照可能な機能

〈注 3〉Ethernet：米国 Xerox Corp. の登録商標

単機容量は1,200 kVA，2,000 kVA であるが，ベクトル制御の VM5 では 2 レベル同様多重化が可能で，8 多重16,000 kVA まで大容量化が可能である。

7　大容量インバータ「SIMOVERT ML2」

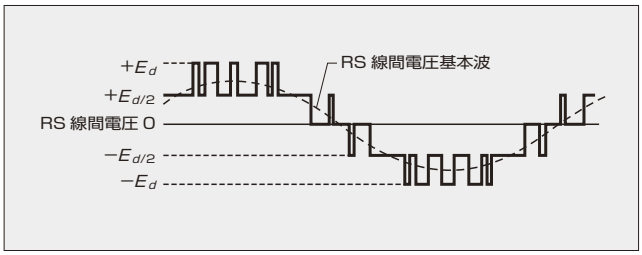
鉄鋼・非鉄設備の大型圧延主機駆動用として，10 MVA 3.3 kV 3 レベルインバータを適用している。これはドイツのシーメンス社が製作し，日本国内で富士電機が販売するものである。

このインバータの特長は，電源力率≒1，高調波電圧ひずみ率小，同期電動機の高機能トランスベクトル制御，電動機力率＝1，高速過渡応答である。水冷変換器を採用することにより盤設置床面積の縮小化を図っている。電動機は円筒形同期電動機を採用しており，きわめて堅牢（けんろう）な構造で圧延機のような過激な外力にも耐える最適設計，巻線はスロットに接着され，すきまなしという特徴を持つ。また，誘導電動機に比べ高効率であり，慣性モーメントが小さく，かみ止まり時も大トルクを出力可能である。

8　高速永久磁石電動機

永久磁石を用いた出力 100 kW 級，回転数 20,000 r/min 級の高速同期電動機を食品関連工場の機械設備用として製品化した。工場の省エネルギー化に貢献するものと期待される。

図 7　3 レベルインバータの出力波形



効率に優れコンパクト化できる永久磁石の採用により，電動機の高速化，機械へのビルトイン化を実現している。渦電流による回転子の発熱を材質，構造の改良により低減した。また，省スペース，初期投資費用削減，保守性向上のために，水冷方式も開発した。インバータは誘導電動機駆動用として多くの納入実績のある「FRENIC5000VG7 シリーズ」を適用する。

9　サイリスタレオナード「LEONIC シリーズ」

可変速駆動システムの主流は交流電動機＋インバータの組合せに移ったが，現在もなお数多くの直流電動機が産業プラントで使用されている。堅牢でオーバホールにより延命化を図ることができる直流電動機に対し，アナログ制御サイリスタレオナード（DSR シリーズ，LEONIC-U など）はアナログ回路構成部品の入手が困難であることからその多くは保守が困難な状況にある。

図 8　LEONIC-M Compact の外観

表 3　LEONIC-M Compactの標準仕様

形式RGFM7CMS-□□□□		2702	4502	7502	5504	9004	1514
標準適用電動機容量	(kW)	27.5*1	45*1	75*1	55*2	90*2	150*2
電　源	電機子主回路	三相AC200～240 V，50/60 Hz			三相AC400～460 V，50/60 Hz		
	界磁主回路	単相AC200～240 V，50/60 Hz					
	制御/同期電源	単相AC200～220 V，50/60 Hz					
	許容変動	±10%，−3～+2 Hz					
出　力	電機子主回路出力電流（連続）(A)	150	240	400	150	240	400
	電機子主回路出力電流（1分）(A)	225	360	600	225	360	600
	界磁主回路出力電流（連続）(A)	15	24	40	15	24	40
	電機子主回路出力電圧 (V)	220*3			440*4		
	界磁主回路出力電圧 (V)	160*5					

＊1：主回路出力電圧がDC220 V時，＊2：主回路出力電圧がDC440 V時，＊3：入力電圧が220 Vの場合，＊4：入力電圧が440 Vの場合，
＊5：入力電圧が240 Vの場合

富士電機は主要構成部品をインバータと共通化し，小容量（DC220 V 75 kW 以下，DC440 V 150 kW 以下）に特化した「LEONIC-M Compact」を製品化している。この装置は各種制御伝送のほかにアナログ指令やタコジェネレータへも対応しており，既設ドライブ装置からの置換えを考慮している。また，FRENIC4000 シリーズと共通のメンテナンスツールが使用可能で保守作業が容易である。

LEONIC-M Compact の外観を**図 8**，標準仕様を**表 3** に示す。

なお，中大容量直流電動機には「LEONIC-M600」を適用する。

10　あとがき

富士電機の産業プラント用可変速駆動システムの推移と代表機種について紹介した。可変速駆動システムの発展はすなわち産業プラントの発展でもある。富士電機は今後も可変速駆動システムの提供を通じて産業プラントの発展に寄与していく所存である。

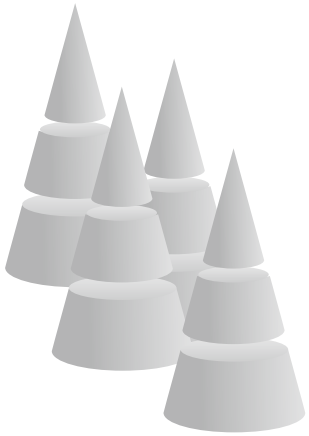
参考文献

(1)　西村英二ほか．ドライブ制御システムのオープン化・インテリジェント化．電気学会金属産業研究会．MID-00-40, 2000.

(2)　西村英二ほか．オープン指向のプラント用制御機器監視システム．圧延理論部会．圧理 122-11, 2005.

(3)　伊藤伸一ほか．IT の導入によるプラントシステムの保全効率向上と延命化．電気学会金属産業研究会．MID-03-21, 2003.

(4)　簗嶋賢次ほか．プラントシステム監視・解析支援パッケージの f（s）NISDAS の開発．電気学会金属産業研究会．MID-02-3, 2002.



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。