

産業・社会ソリューションにおけるドライブ・電源技術

特集

西郷 宏治 (さいごう こうじ)

山衛守 貴博 (やまゑもり たかひろ)

中川 雅之 (なかがわ まさゆき)

① まえがき

鉄鋼・製紙・石油化学などの製造業をはじめとする産業プラント分野や社会インフラ分野には、多数のドライブ装置や電源装置が使用されている。ドライブ装置と電源装置は、使用される変換素子の進展とマイクロプロセッサの高速化、高機能化により飛躍的に発展してきた。

本稿では、富士電機のドライブ装置と電源装置の代表機種における最新技術について、適用例とともに紹介する。

② 産業・社会分野の最新ニーズの動向と富士電機の対応

2008年7月の北海道洞爺湖サミットで気候変動への取り組みとして、2050年までに世界全体の排出量の少なくとも50%を削減するビジョンを共有することが合意された。

産業・社会分野では、温室効果ガスの排出量を削減するため、いっそうの省エネルギー（省エネ）化、高効率化、省スペース化が求められている。

産業プラント分野では製造プロセスの高速化、製品の高品質化、安定操業の要請から、ドライブ装置に対し、高精度な速度制御、高速な速度応答、速度の揃速（せんそく）性向上、高精度なトルク制御が求められている。

一方、ICT（Information and Communication Technology）の発展に伴いコンピュータシステムの高度な情報統合、ネットワーク化が進展している。これらを多数使用した産業・社会分野の大規模システムを安定的に稼働させるために電源設備に対し瞬時電圧低下（瞬低）・停電などを発生させない高品質な電源の要求が増大してきている。従来、低圧UPSなどさまざまな方法で個別に対策が実施されていた。対策に必要な設備費・維持費が高価、負荷設備の瞬低による影響などの見極めが困難などの課題があり、システム全体の電力をバックアップする大規模な対策が求められている。

富士電機では、これらの市場ニーズに応じて、高効率・高信頼性・省スペース化を実現した省エネ用ドライブ装置、

高性能なプラント用ドライブ装置、高効率な高圧大容量瞬低対策装置を製品化している。その技術内容を紹介する。

③ 省エネルギーソリューションに貢献するドライブ装置

「FRENIC4600シリーズ」は、インバータの出力側に変圧器を設けずにダイレクトに高圧電動機を駆動するドライブ装置である。主要用途は、可変速運転による省エネ化を目的としたファン・ポンプ・ブロワなどのドライブ装置である。従来の3kV、6kV系列に続き、製品系列拡大を行い10kV、11kV出力、IEC 61800-4対応機を製品化し、直接駆動可能な電動機範囲をさらに拡大した。表1に高圧インバータ「FRENIC4600FM5e」の仕様を示す。また、6kV出力機もIEC規格対応を行った。本インバータは中国で生産を行い、2009年から中国国内および世界中のユーザに提供する。

3.1 揚水ポンプへの適用例

国内農業用灌漑（かんがい）向け揚水ポンプに適用した例を図1に示す。揚水ポンプの設置地域は電源系統の弱いことが多いため、電動機起動時の電圧変動回避が課題であった。従来は巻線電動機の二次抵抗起動により電圧変動を回避していたが、スリップリング保守が必要であった。高圧インバータ（560kVA）を適用し、ソフトスタートとすることにより、電圧変動問題を解決し、省エネ運転も可能にした。

3.2 冷却ポンプへの適用例

海外化学メーカー向けプラントの冷却ポンプに適用した例を紹介する。従来は、高圧電動機を商用運転し、バルブで水量を制御していた。プラントの生産量に応じて高圧電動機（360kW）の駆動周波数を可変速化したことにより50Hzから44Hzに速度を下げたときで従来比29%、50Hzから40Hzに速度を下げたときで従来比50%の省エネ効果が出ている。



西郷 宏治

電動機応用プラントのエンジニアリングに従事。現在、富士電機システムズ株式会社ドライブ事業本部ドライブ統括部ドライブシステム技術第一部長。電気学会会員。



山衛守 貴博

交流可変速駆動設備のプラント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ドライブ事業本部ドライブ統括部ドライブシステム技術第三部。



中川 雅之

施設電機設備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事業本部第一統括部施設電機技術部主査。

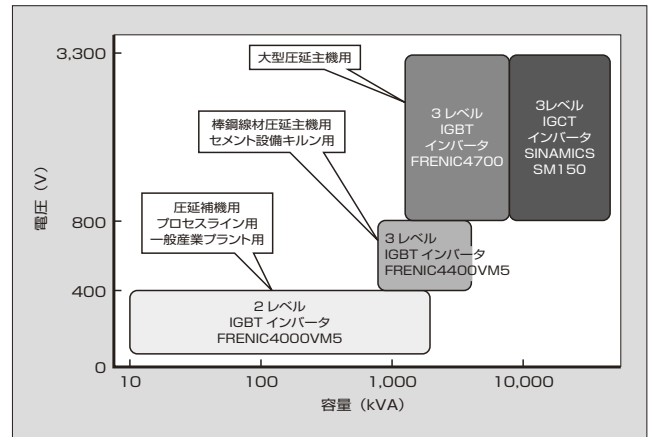
表1 高圧インバータ FRENIC4600FM5e の仕様

形式		FRENIC4600FM5e																												
電圧		3 kV									6 kV												10 kV							
出力定格	装置容量 (kVA)	350	500	700	1,050	1,350	1,600	2,350	3,200	4,750	420	500	600	700	860	1,000	1,200	1,400	1,600	1,800	2,100	2,360	2,700	3,200	4,700	6,400	9,500	1,200	1,700	2,300
	最大適用電動機 (kW)	285	400	560	840	1,100	1,280	1,930	2,570	3,850	340	410	490	570	700	800	960	1,120	1,280	1,450	1,680	1,900	2,200	2,560	3,860	5,140	7,700	960	1,350	1,820
	定格電流 (A)	68	98	134	202	262	306	459	612	918	41	50	59	68	84	98	115	134	153	173	202	227	262	306	459	612	918	68	98	134
	過負荷定格	定格電流の 105%, 1 min																												
	定格周波数 (Hz)	50/60 Hz																												
入力電源 (主電源)	電圧, 周波数	3,000/3,300 V, 50/60 Hz									6,000/6,600 V, 50/60 Hz												10,000 V, 50 Hz							
	許容電源範囲	電圧: ±10% (相間アンバランス 2% 以内) 周波数: ±5%																												
制御電源	相数, 電圧, 周波数	三相, 200/220 V, 50/60 Hz																												
	許容電源範囲	電圧: ±10%, 周波数: ±5%																												
制御・構造	制御方式	簡易センサレスベクトル制御付き V/F 一定制御																												
	出力周波数制御範囲	0.2 Hz ~ 50/60 Hz (オプション ~ 120 Hz)																												
	冷却方式	空冷 (天井ファンによる強制風冷)																												

図1 国内農業用灌漑向け揚水ポンプ



図2 プラントドライブ適用マップ



4 産業プラントの製造ソリューションに貢献するドライブ装置

産業プラントに適用されるドライブ装置は、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、速度制御、垂下特性付速度制御、トルク制御、複数ドライブの同期制御などの各種制御方法、揃速性、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、10 ~ 5,400 kVA を 400 V クラス 2 レ

ベル IGBT インバータ「FRENIC4000 シリーズ」、1,200 ~ 16,000 kVA を 800 V クラス 3 レベル IGBT インバータ「FRENIC4400 シリーズ」、2,500 ~ 7,500 kVA を 3.3 kV クラス 3 レベル IGBT インバータ「FRENIC4700 シリーズ」、それ以上は 10 MVA 3.3 kV クラス 3 レベル IGCT インバータ「SINAMICS SM150」をラインアップしている。

図2に富士電機のプラントドライブ適用マップ、表2にプラントドライブの標準仕様を示す。

4.1 プロセスライン用ドライブ装置

FRENIC4000 シリーズは AC400 V クラス出力の直流配

表2 プラントドライブの標準仕様

型 式		FRENIC4000VM5	FRENIC4400VM5	FRENIC4700VM5
項 目				
入力電圧		DC600V	DC1,200V	DC5,400V
出 力	電 圧	三相 AC400V	三相 AC800V	三相 AC3,300V
	周波数	最大 200Hz	最大 120Hz	最大 100Hz
容量系列		10, 15, 25, 38, 50, 75, 100, 150, 225, 300, 450, 600, 900kVA	1,200, 2,000kVA	2,500kVA
インバータ多重化		二重化 1,200, 1,800kVA 最大 6 多重 5,400kVA	二重化 2,400, 4,000kVA 最大 8 多重 16,000kVA	二重化 5,000kVA 最大 3 多重 7,500kVA
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	100% 連続, 過負荷耐量 150% 1 分間
運転モード		4 象限	4 象限	4 象限
上位伝送		PROFIBUS-DP, D ライン, T リンク, SX バス	PROFIBUS-DP, D ライン, T リンク, SX バス	PROFIBUS-DP, D ライン, T リンク, SX バス
制 御	範 囲	1 : 1,000	1 : 1,000	1 : 1,000
	界磁範囲	1 : 4	1 : 4	1 : 4
	精 度	速度 ± 0.01%	速度 ± 0.01%	速度 ± 0.01%

電方式のインバータで、ベクトル制御、センサレスベクトル制御、V/f制御が可能である。制御方式によらず主回路、制御装置は同一であり互換性を持っている。本シリーズは 10 ~ 300kVA がプラグインタイプのユニット構造、450 ~ 900kVA は盤構造としている。主な特徴は以下のとおりである。

- (a) 最大 1 面 12 段収納と省スペース、自由なユニット配置
- (b) 各種フィールドバスに対応
- (c) 高精度トルク制御、オブザーバ制御機能など各種プラント向け制御を標準搭載
- (d) 優れたメンテナンス性

コイル状の鋼板を巻き戻し、酸洗、焼鈍、メッキ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 のヘルパロールから数百 kW のリール、プライドルロール、ミルなどで構成されており、数百台のロールで鋼板を搬送することから揃速性と張力制御が重要である。ロールには鋼板を引っ張るロールと鋼板により引っ張られるロールがあり、直流配電方式とすることにより、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電源容量を小さくすることができる。数百台あるヘルパロールのうち 1 台が故障してもラインを停止させることなく、ライン運転中に故障したユニットを交換してショックレスで鋼板速度に合わせて運転を開始する途中起動の機能を備えている。中小プラントにも適用可能なように小容量コンバータも用意している。

4.2 棒鋼圧延主機用ドライブ装置

FRENIC4400 シリーズは AC800V クラス出力の直流配電方式の 3 レベルインバータで、ベクトル制御、V/f 制御が可能である。3 レベルインバータは、出力波形が階段状になるため、2 レベルインバータに比較して、出力高調波、トルク脈動、電動機巻線へのサージ電圧を低減できる。単

機容量は 1,200kVA と 2,000kVA があり、多重化することにより、最大 16,000kVA まで大容量化が可能である。

棒鋼・線材圧延設備は、数百 kW の電動機が十数台連続的に設置されていて、共通の大容量ダイオードコンバータに各スタンドのインバータを接続する直流配電方式にしている。回生容量は駆動容量に対して小さいので小容量の回生コンバータを装備し、減速時には電力を電源側に回生することで、省エネに貢献している。

FRENIC4000, FRENIC4400 とともにオブザーバ制御機能を標準で搭載しており、外乱応答の改善や軸ねじり振動抑制が可能である。また、オブザーバの応用として慣性モーメントなど制御対象のパラメータが異なっても速度調節器をチューニングすることなく一定の速度制御応答を維持するチューニングレス制御も可能である。オブザーバを使用したチューニングレス制御の構成を図 3、最近某社棒鋼圧延設備の圧延機速度制御に適用した結果を図 4 に示す。二つのチャートが示すように時定数がおよそ 6 倍異なる制御対象に対して材料かみ込み時の外乱応答がほぼ同一の結果(回復時間が 140ms)となっている⁽¹⁾。

4.3 大形圧延主機向けドライブ装置

FRENIC4700 シリーズは AC3.3kV クラス出力の 3 レベルインバータで、ベクトル制御が可能である。PWM (Pulse Width Modulation) コンバータとインバータが 1 対 1 のシステム構成で、コンバータとインバータを連携することにより、駆動から回生へ切替時の直流中間電圧の変動を抑制している。単機容量は 2,500kVA であり、多重化することにより、最大 7,500kVA まで大容量化が可能である。

上記を超える容量の範囲は、10MVA, 3.3kV 出力の IGCT3 レベルインバータ, SINAMICS-SM150 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インバータである。

図3 チューニングレス制御の構成

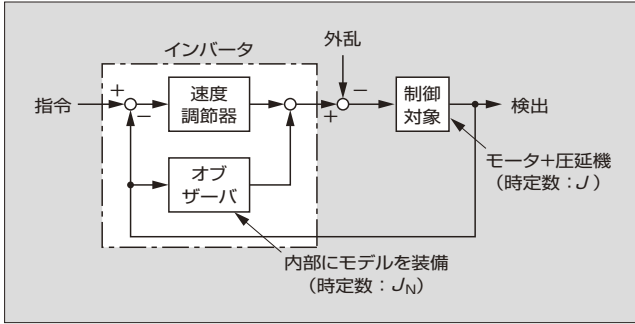
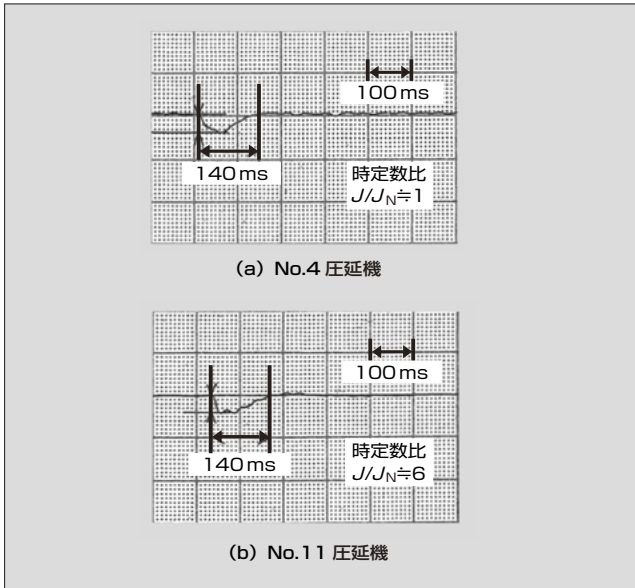


図4 チューニングレス制御の棒鋼圧延設備への適用結果



4.4 直流電動機向けドライブ装置

ドライブ装置の主流は交流電動機+インバータになってきているが、現在もなお数多くの直流電動機が使用されている。富士電機では、主要構成部品をインバータと共通化し、小容量 (DC220V 75kW 以下, DC440V 150kW 以下) の「LEONIC-M Compact」を製品化している。この製品は、既設のアナログ制御のサイリスタレオナード装置 (富士電機製 DSR シリーズ, LEONIC-U などおよび他社製サイリスタレオナード装置) からの置換えを考慮し、各種フィールドバスだけでなく、アナログ速度指令、タコ・ジュネレータによる速度フィードバックにも対応している。

中大容量の直流電動機駆動には、LEONIC-M Compact と主要制御装置を共通化した「LEONIC-M700」を開発中である。

「LEONIC-M シリーズ」は直流電動機駆動だけでなく、直流定電圧電源としても使用されている。

5 新しいソリューションを提供するドライブ装置

5.1 大容量サーボシステムの開発

富士電機は、ドライブ事業機種戦略の一環として、自

図5 大容量サーボシステム

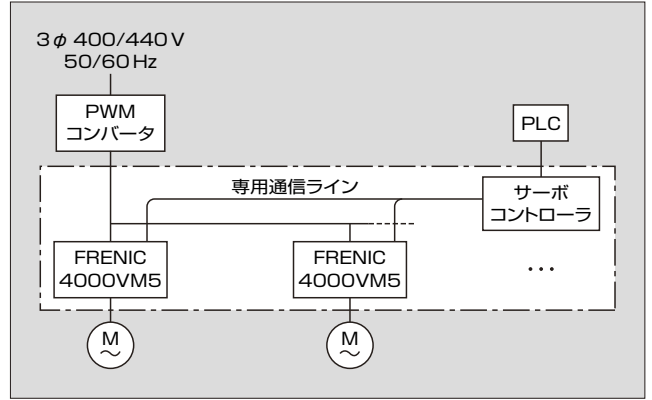
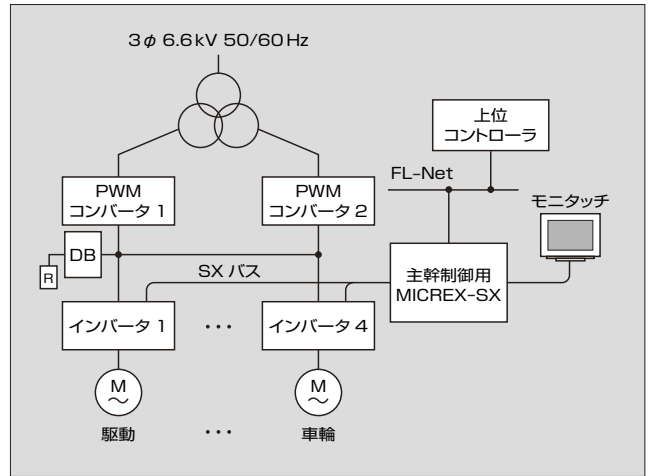


図6 駆動系試験設備用単線系統図



動車、建機などの生産・試験設備に適用可能な大容量サーボシステムを開発した。汎用サーボシステムで培ったサーボ技術を使用した大容量サーボドライブ専用のサーボコントローラを富士電機のプラントドライブ用インバータ「FRENIC4000VM5」に付加する構成で、多軸制御が可能なサーボシステムとした (図5)。一軸当たり FRENIC 4000VM5 の容量系列 (単機: 900kVA) が利用できる。

5.2 建機駆動系試験設備用ドライブシステムの開発

建機駆動系試験設備用ドライブシステムを開発した。建機駆動系試験設備は逆 T 形配置で、建機駆動側、車輪側で構成される。建機駆動側はタンデム電動機と減速/増速機、車輪側は電動機と増速機で構成され、それぞれに軸トルク検出器を設置している。図6に開発した建機駆動系試験装置の単線系統図を示す。

建機駆動系試験設備用ドライブシステムは、被試験機の性能を任意の条件で評価するものであり、以下に本システムの特徴を示す。

- (1) 電動機
 - (a) 840kW 800/2,800 r/min × 4 台の完全同一両軸仕様 (両軸端のハーフカップリングを含む)
 - (b) ストールから 2,800 r/min の試験運転に対応するための高強度軸材料の採用およびオイルバス方式転がり

- 軸受の採用
- (c) 両軸（軸径 115mm）使用を可能とした特殊回転センサの採用
- (d) 高速運転に耐え得る軸電圧抑制用アースデバイスの採用
- (e) 揺動式でない、剛性が高い普通かご形構造
- (2) ドライブ装置
 - (a) 高精度速度制御，高精度トルク制御 FRENIC 4400VM5 の採用
 - (b) 高精度トルク検出器（0.1%）による軸トルク制御の採用
 - (c) 高調波フリー・冗長化対応の電源系統
 - (d) PWM コンバータと DB チョップでの回生電力処理による多様な試験条件に対応

5.3 電気慣性システムの開発

自動車のシャシダイナモメータや変速機試験装置では、従来フライホイール（機械慣性）を機械的に組換え被試験体に応じた慣性質量を実現していたが、近年インバータ制御応用により電氣的に慣性を模擬すること（電気慣性）が行われるようになってきた。電気慣性式試験機は、慣性設定が無段階で行え、設置面積が小さく、装置のコストが安いなど数々の利点がある。このため社団法人自動車技術会が、電気慣性式シャシダイナモメータが機械慣性式シャシ

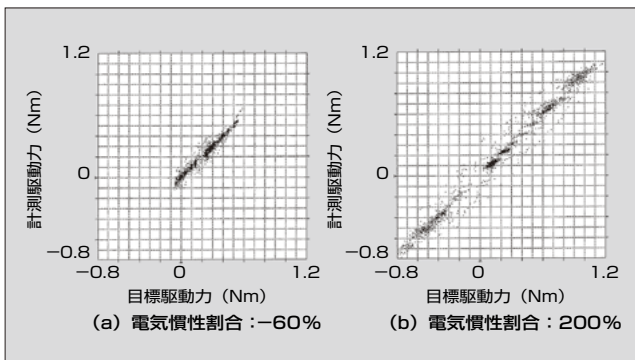
表3 電気慣性式シャシダイナモメータの要件

項目	仕様	備考
電気慣性割合	-60 ~ +200%	電気慣性割合% = (等価慣性 - 機械固定慣性) / 機械固定慣性 × 100
制御応答遅れ	0.1 s 以下	90% 応答時間

表4 電気慣性式シャシダイナモメータの評価項目と基準

項目	範囲
標準偏差	5%以内
相関係数	0.98 以上
回帰直線傾き	1 ± 0.02
回帰直線切片	± 20 N

図7 電気慣性検証結果（10・15モード運転）



ダイナモメータの代用となる性能要件を JASO テクニカルペーパーにまとめた。そこで富士電機が従来から納入してきた変速機試験機が持っている電気慣性機能を元に、社団法人自動車技術会がまとめた要件に従う電気慣性の開発に取り組んだ。

JASO テクニカルペーパーによると電気慣性式シャシダイナモメータの要件は表3のようにまとめられている。また 50 ms ごとの目標駆動力およびトルク検出値から求めた計測駆動力を XY プロットした結果が表4を満たすことを求めている。図7に、JIS D 1012 自動車の燃料消費率試験方法で定められている 10・15 モード運転を行ったときの富士電機製インバータを使った実験設備での実験結果を示す。電気慣性割合が -60%，200% 時の測定結果である。いずれも表4の基準を満足している。

6 電源品質ソリューションに貢献する電源装置

瞬低・停電などに対する電力の品質向上には、従来低圧 UPS などさまざまな方法で個別に対応していた。近年、コージェネレーションなどの電力多様化に伴い、製造工場などでは高圧回路で一括瞬低対策することが主流になってきている。

これらの市場ニーズに応えるため短時間瞬低対策および瞬低から長時間停電対策をカバーした、高効率・高信頼性・省スペース化を実現した高圧大容量瞬低対策装置

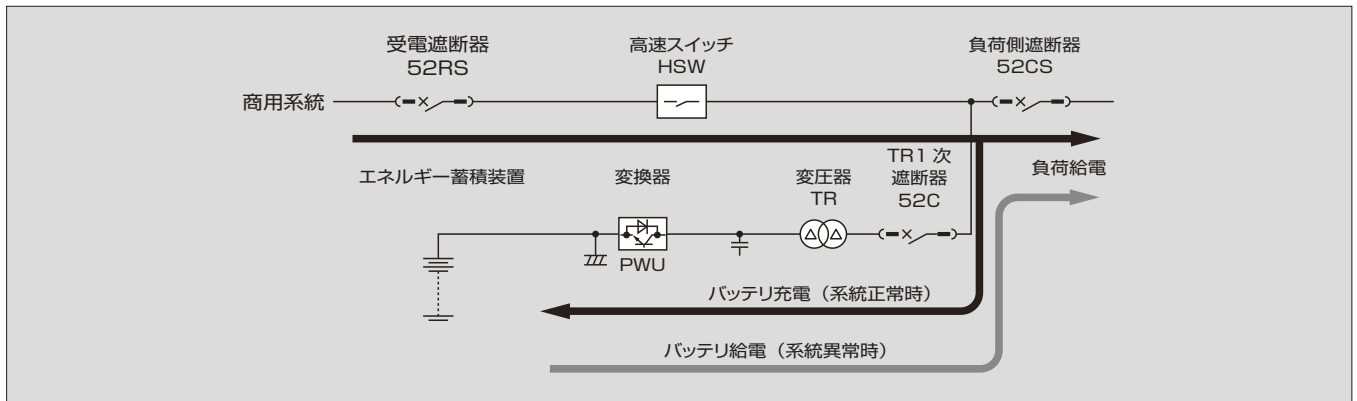
図8 高圧大容量瞬低対策装置の外観（本体）



表5 高圧大容量瞬低対策装置の基本仕様

項目	仕様
定格容量	2,000 kVA / 1,600 kW
冷却方式	強制空冷
切替時間	2 ms 以下
入力定格電圧	6,600 V / 3,300 V
周波数	50 / 60 Hz
出力電圧精度	± 3% (停電時)
定格負荷力率	0.8 (停電時)

図9 高圧大容量瞬低対策装置のシステム構成



「UPS8000H シリーズ」を製品化・納入したので、紹介する。

6.1 高圧大容量瞬低対策装置の概要

外観写真を図8，基本仕様を表5，システム構成を図9に示す。

本装置は定格電圧 6.6 kV，定格容量 2,000 kVA の高圧大容量瞬低対策装置であり，常時商用給電方式を採用しており，瞬低時には高速スイッチにより負荷と商用系統を瞬時に切り離すことで，蓄積装置によるバックアップ運転を行う。

6.2 特長

(1) 高速スイッチ

半導体スイッチは，無瞬断（2ms 以下）で高速切替を可能とし，JEC-2433 のクラスⅡを満足する性能を持っており，半導体製造装置の電源条件（SEMI-F47）を満足する。

機械式スイッチは，富士電機独自の共振回路を用いた開放時のアーク電流を消弧する方式を採用し導体発熱損失がほとんどなく，蓄電池との組合せでは変換器の高効率充電制御システムの採用により装置効率 99.6% 以上（定格時）を実現した。また，装置そのものが省電力であることにより装置の発生損失による発熱を処理する空調設備の消費電力費の削減効果も大きい。

(2) 停電時の無瞬断化

0.5ms 以内に系統の異常を検出し，かつ電圧ひずみによる誤検出を防止する高速ハイブリッド停電検出方式で高速，確実な停電検出を実行し，高速スイッチとの組合せで，出力過度電圧変動を大幅に低減させた。また，瞬低により発生する負荷の突入電流を瞬時抑制制御で安全・確実に制御し，電源の安定化を図った。

(3) 並列運転・高信頼性

単機容量 2,000 kVA とし，最大 6 台まで並列増設することで負荷設備容量に応じて対応できるようにした。また，冗長システムにすることできわめて高い信頼性が得られる。

(4) 幅広い停電補償時間への対応

エネルギー蓄積装置として，1～数秒程度の短時間補償には短時間充電・高出力・寿命が長いキャパシタを採用し，長時間補償にはハイレート対応の鉛蓄電池を採用して，瞬低のみならず，最大 5 分までの停電に対応できるようにした。また 100% 全電圧低下にも補償ができ，繰返し瞬低や電力会社の自動再送電などに対しても安心して使用できる。

高圧大容量瞬低対策装置に適用した制御システムは，各種エネルギー蓄電素子を使った分散電源や系統の安定化装置への応用が考えられる。

今後，低圧 UPS 「UPS8000D シリーズ」で製品化されている電圧補償や高調波吸収などの無効分電力補償の付加機能を追加した製品を開発していく。

7 あとがき

富士電機の産業プラント用ドライブ装置と電源装置の代表機種について紹介した。ドライブ装置や電源装置を通じてソリューションを提供し，社会貢献していく所存である。

参考文献

(1) 宮下勉ほか，圧延機 の速度制御応答の画一化と調整作業の省力化を実現する一手法，電気学会研究会資料，MID-08-3，p.11-16。
 (2) 社団法人自動車技術会テクニカルペーパー，電気慣性式シャシダイナモ性能基準の検討，JASO TP-06001，2006 年。
 (3) 市中良和ほか，高性能ベクトル制御インバータ「FRENIC 5000VG7S」の制御技術，富士時報，vol.76，no.8，2003，p.461-464。



*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。