環境対応・省保守・小型化を追求した最新の直流変電設備

粟飯原 一雄（あいばら　かずお）　小林　正明（こばやし　まさあき）　野尻　尚（のじり　ひさし）

1　まえがき

電気鉄道はエネルギー効率がきわめて高く，最も地球環境に優しい大量輸送機関である。

鉄道用電力設備に関連した環境関連の動きとしては，半導体冷却媒体であるフロン系物質に関しては1987年のモントリオール会議（オゾン層破壊防止）におけるクロロフルオロカーボン（CFC）と，1997年の京都会議（温暖化防止）におけるパーフルオロカーボン（PFC）の規制あるいは削減，また絶縁消弧媒体である六フッ化硫黄（SF_6）ガスについては京都会議において削減がうたわれている。

富士電機では，以上の地球環境保護に加えて鉄道用電力設備として必須要件である「ライフサイクルコストの低減」「環境調和・省エネルギー」「安全性・信頼性の向上」「小型軽量」の実現を目指して各種製品を開発し，ラインアップしている。本稿では，直流き電変電設備で採用されている最新鋭製品である24 kVドライエア絶縁スイッチギヤ（C-GIS），純水沸騰冷却式シリコン整流器・電力回生インバータ，100 kA直流高速度真空遮断器（HSVCB）ならびに回線単位形主制御用配電盤を紹介する。

図1　ドライエア絶縁C-GISの外観

2　24 kV ドライエア絶縁 C-GIS

特別高圧用スイッチギヤは，信頼性・安全性・小型軽量・省保守とともに耐環境性が求められ，従来，主としてSF_6ガス絶縁C-GISが適用されてきたが，脱SF_6ガス化を実現したドライエア絶縁C-GISを開発・製品化し，2003年から納入している。装置の外観を**図1**に示す。

大気圧近傍でのドライエアの絶縁耐力はSF_6ガスの1/3程度である。装置をSF_6ガスと同等の小型軽量で実現するために，最適圧力の選定，絶縁構造の最適化ならびに複合絶縁化を行っている。仕様を**表1**に示す。

この装置の主な技術的特長は以下のとおりである。

(1)　主回路絶縁は，合理的な電界緩和や絶縁距離，被覆絶縁などにより確保している。

(2)　ドライエアはアークによる圧力上昇がSF_6ガスより大きいため，万が一の内部事故時の拡大防止を目的として放圧装置を具備している。

表1　ドライエア絶縁C-GISの仕様

項　目			内　容
定格ドライエア圧力			0.09MPa（G）
定格電圧			24 kV
定格電流（JEM/IEC）			600/630 A，1,200/1,250 A
定格遮断電流			25 kA
定格短時間電流			25 kA，1秒
定格周波数			50/60 Hz
耐 電 圧	商用周波		50 kV
	雷インパルス		125 kV
	零気圧（ゲージ圧）		運転電圧に耐える
母線構造			固体絶縁
標準寸法	幅		600 mm
	奥行	正面保守	1,315 mm
		正背面保守	1,750 mm
	高さ		2,300 mm
準拠規格			JEM1425，IEC60298

粟飯原 一雄

電気鉄道用変電・制御システムの技術企画業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社産業・交通システム本部交通・特機統括部交通技術部グループマネージャー。電気学会会員。

小林　正明

電気鉄道用変電・制御システムの技術企画業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社産業・交通システム本部交通・特機統括部交通技術部。

野尻　尚

高圧遮断器の開発設計に従事。現在，富士電機機器制御株式会社器具事業部技術開発・生産センター開発部。

(3)　ドライエア中の酸素成分は期待寿命以上にわたって絶縁物に悪影響を及ぼさないことを確認している。

(4)　拡張性

切離しが容易な絶縁母線の採用により，増設の拡張性に富んでいる。

構造を**図 2** に示す。

3　純水沸騰冷却式シリコン整流器・電力回生インバータ

半導体変換装置においては，地球環境保護の観点から冷媒を CFC や PFC から純水に切り替え，これをシリコン整流器はもとより電力回生インバータにも適用し，2001 年以降数多く納入し，特徴的な製品として好評を博している。装置の外観を**図 3**，**図 4**，特長とコンセプトを**図 5** に示す。

(1)　地球環境対応

図 2　ドライエア絶縁 C–GIS の構造（正面保守形）

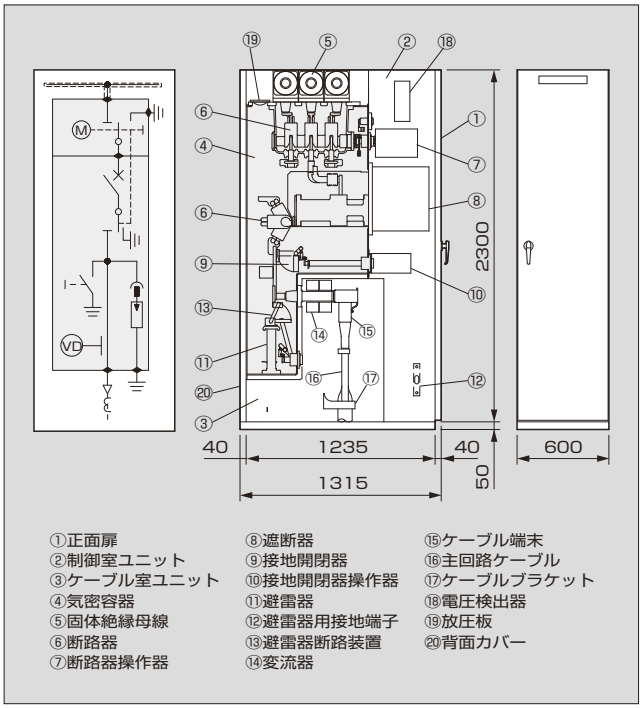
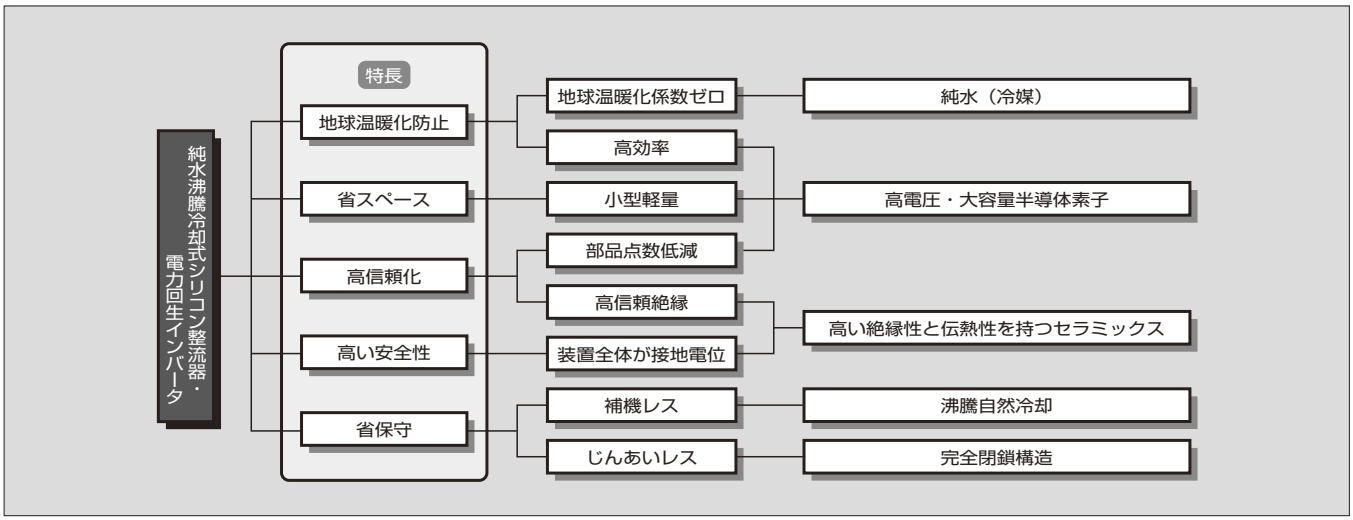


図 3　純水沸騰冷却式シリコン整流器の外観

図 4　純水沸騰冷却式電力回生インバータの外観

図 5　純水沸騰冷却式シリコン整流器・電力回生インバータの特長とコンセプト



純水冷媒・小型軽量・高効率の3点から地球環境に優しい製品である。ダイオード素子は自社生産品で国内最大容量（5,000 V/3,200 A）であり1,500 V/3,000 kW 6パルス整流器を1直列1並列で構成できる。これに伴い付帯部品も大幅に低減する結果，発生損失は40％減（当社従来比）となる。

(2)　省スペース

部品点数の大幅な低減は小型軽量化につながり，容積40％減，据付け面積30％減（当社従来比）となる。

(3)　高い安全性

水は導電性のため，充電部と冷却体間を強度・伝熱性・絶縁性すべてに優れたセラミックス板によって絶縁し，装置全体を大地電位として高い安全性を実現している。

(4)　高信頼・省保守

半導体素子に加えてスナバ抵抗器類も沸騰冷却するという斬新な設計思想により，主回路部の温度上昇を低減して完全閉鎖構造を実現している。また，絶縁設計はJR基準である沿面50 mm以上，空間30 mm以上を適用している。上記により直流高電圧に起因する集じん作用や建屋換気などに伴う内部汚損がなく，かつ十分な絶縁余裕により長期信頼性の実現とともに内部清掃を不要化している。

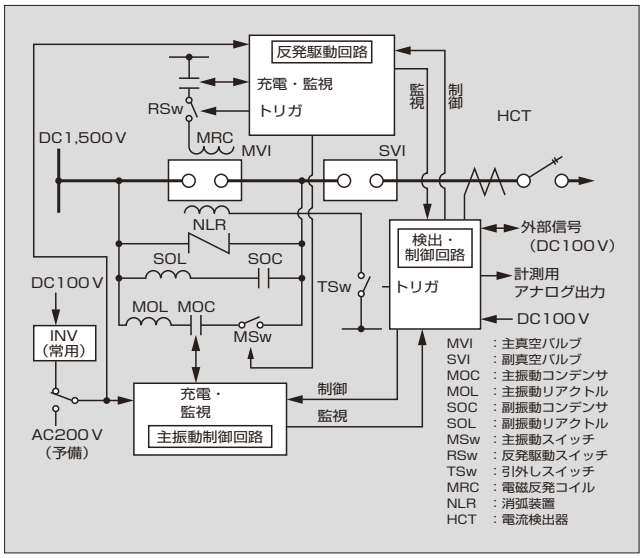
4　100 kA 直流高速度真空遮断器

き電回路の開閉・保護機能を担う直流高速度遮断器は旧来気中遮断器（HSACB）が使われてきたが，アークによる各部の損耗に起因して頻繁な保守点検を要し，かつ小型軽量化が困難であった。

これらの課題を解決するために，省保守・小型軽量の50 kA 遮断形直流高速度真空遮断器（HSVCB）を製品化し，1998年以降数多く納入しきわめて安定した運転実績を有している。

以下にHSVCBの基本事項や設計思想，ならびに近年の変電所容量の増大と保安性向上のニーズに応えて製品化した100 kA 遮断形について紹介する。基本構成を**図6**に示す。

図6　HSVCBの基本構成



4.1　省保守・小型軽量を実現する原理

HSACBとHSVCBの遮断エネルギー処理の原理を**図7**に示す。HSVCBは高速動作ゆえに処理エネルギーが小さいことに加え，HSACBがエネルギーを爆発的なアークで処理するのに対し，HSVCBはそのほとんどを消弧装置（NLR）で熱エネルギーとして処理する。この結果，真空バルブ接点の消耗がきわめて小さく，保守点検が不要であることやアークスペースが必要ないことから省保守・小型軽量が実現できるものである。

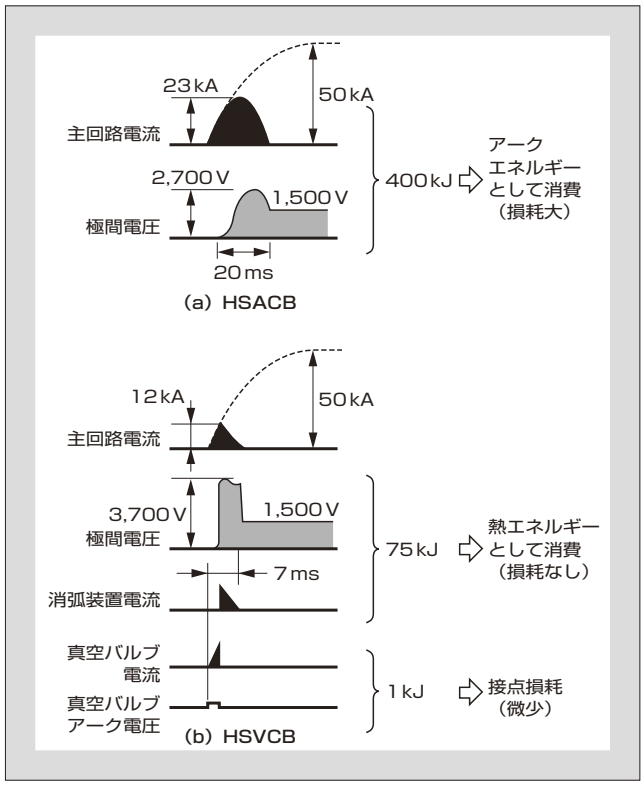
4.2　全領域遮断性能

遮断器は規格値とともに実用上必要なすべての電流領域を確実に遮断できることが求められる。HSVCBの挙動面から遮断電流領域をモード別に区分してみる。これらのモードの挙動を**表2**，その範囲を**図8**に示し，各領域の考え方について以下に述べる。

(1)　モード1：副振動領域

鉄道では毎日開閉される運用が多いため，そこで頻繁に遭遇する小電流遮断は非常に重要であり，HSACBでは空気吹付け機構などにより実現している。HSVCBでの小電流遮断は，主振動コンデンサ（MOC）の放電が非常に少ないため，大半の電圧が電源と加極性に残存することや回路エネルギーが小さいためにNLRが動作しないという点から，電源電圧を上回る逆電圧を発生し得ないために電流の減衰に長時間を要したり遮断できない領域が存在する。

図7　限流値とエネルギーの比較



富士電機ではこの対策として，シンプルな副振動回路を付加することで電流を確実に素早く減衰させる方式を採用している。

小電流遮断は電気鉄道用直流遮断器の規格（JEC7152）で「5～500 A，回路インダクタンス 15 mH 以上」と規定されているが，インダクタンスの最大値は規定されていない。富士電機では負荷となる列車の補機特性などからその最大値を考察し，さらに十分な余裕をとって 100 A 未満では 150 mH，500 A 未満では 100 mH と規定している。

(2)　モード 2：自然転流領域

列車の負荷電流領域である。

(3)　モード 3：強制転流領域

列車の負荷電流やその重畳による過電流および変電所直下短絡領域である。過電流領域は JEC7152 により最大目盛電流値 8,000 A 以下の場合 8 mH，8,000 A を超える場合 5 mH と規定され，短絡領域は推定短絡電流 100 kA および電流突進率 10×10^6 A/s，すなわち 0.15 mH と規定されている。

4.3　100 kA 形の適用技術と製品仕様

JEC7152 では推定短絡電流 100 kA の場合，電流突進率は 10×10^6 A/s である。50 kA 器に対し推定短絡電流 2 倍，電流突進率 3.3 倍と大幅に増大するが，これを以下の技術により実現している。この装置の外観を**図 9**，仕様を**表 3** に示す。

(1)　高電流突進率に対応するため電磁反発機構を高速化し，真空バルブを 1 ms 以下で開極している。これは電力用交流遮断器の数十倍の速度である。

(2)　真空バルブの電極構造の改良により遮断性能を大幅に向上させている。

(3)　VCB 本体は操作器の小型化，自動連結機構などの改良により大幅に小型化し，投入操作器は高速巻上げ（約 2 秒）とし低操作エネルギー・低騒音化している。

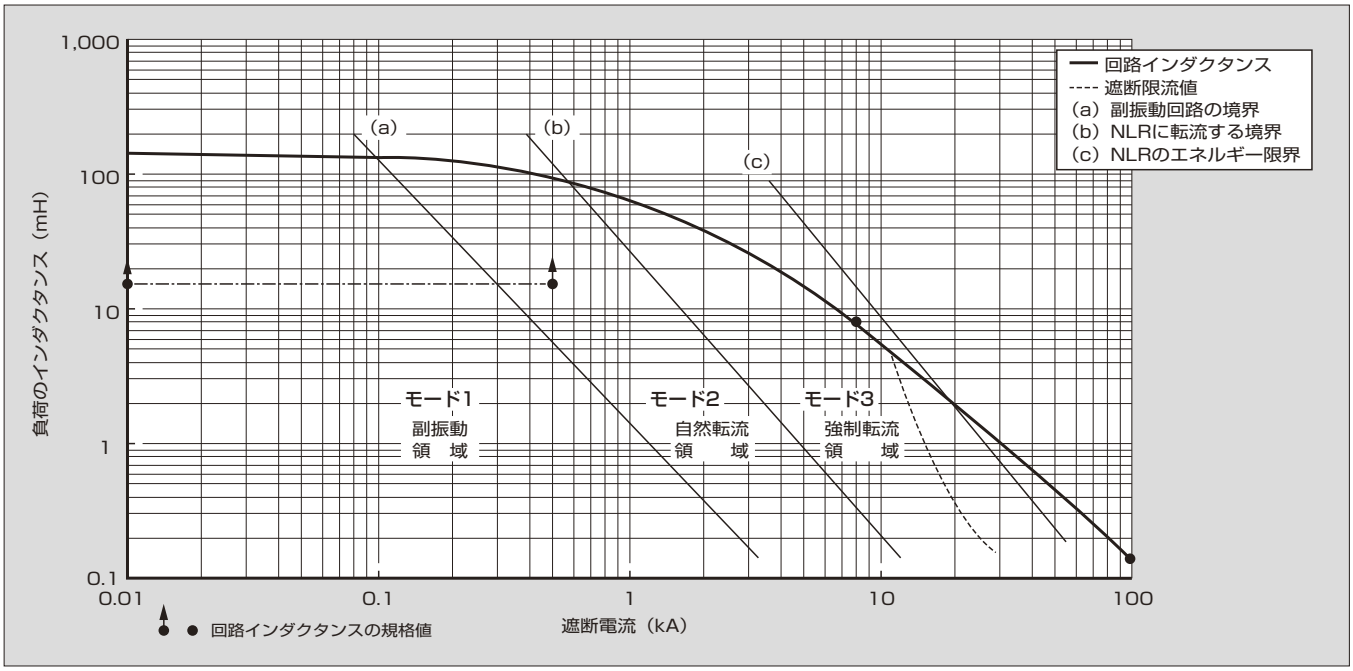
(4)　装置の容積は VCB 本体，MOC，NLR などを含む全体の最適化により 50 kA 器の約 90 % に縮小化した。ま

表 2　各モードの挙動

モード		説　明
1	副振動領域	小電流領域での動作モードである。主真空バルブ遮断後，主振動回路から副振動回路に転流させることによって確実に遮断性能を確保する。
2	自然転流領域	負荷電流領域での動作モードであり，MOCと負荷の抵抗 R，インダクタンス L の間に $2\sqrt{L/C}>R$ が成立する場合である。負荷電流は自然にゼロ点を迎えて遮断する。
3	強制転流領域	大電流領域での動作モードである。回路エネルギーが大きいため，MOCは十分に充電され，NLRが動作して遮断する。

図 9　100 kA HSVCB の外観

図 8　各モードの範囲



た，引出し・放電接地機構を大幅に改良し，保守点検時においてきわめて高い安全性を確保している。

4.4　性能検証結果

大電流遮断試験と小電流遮断試験の結果について述べる。

(1)　大電流遮断試験

性能検証結果の例を**図10**に示す。

推定短絡電流 100 kA，電流突進率 10.3 × 10^6 A/s の回路条件で限流値約 30 kA で遮断している。

(2)　小電流遮断試験

性能検証結果の例を**図11**に示す。

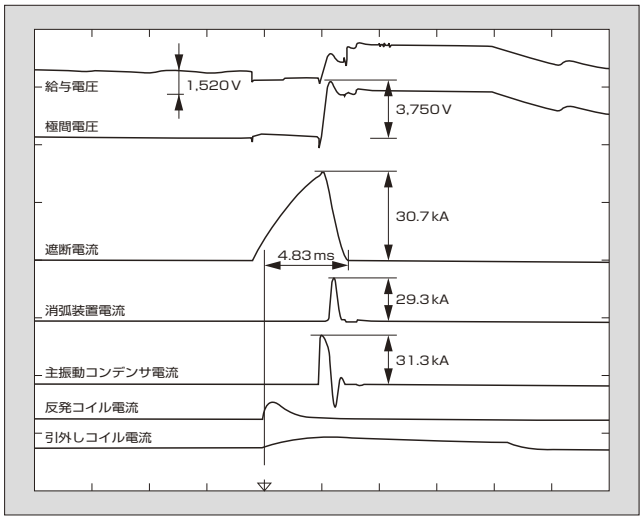
副振動回路の効果により，すべての回路条件において 100 ms 以下で遮断している。

以上の性能検証結果から，この装置は小電流領域から大電流領域までの全領域遮断性能を有しているといえる。

表 3　HSVCBの仕様

項　目		内　容	
定格電圧		DC1,500 V	DC750 V
定格電流		2,000 A/3,000 A/4,000 A	
定格遮断容量		100 kA（突進率10×10^6A/s）	
定格遮断電流		36 kA以下	
動作責務		0-10秒-CO	
電流目盛		4～12 kA，2～6 kA，1～3 kA	
定格制限電圧		4,000 V以下	2,500 V以下
動作方式	投入操作方式	電動・スプリング	
	開極方式	電磁反発	
	転流方式	コンデンサ転流	
	消弧方式	酸化亜鉛素子	
雷インパルス耐電圧		20 kV	
交流耐電圧		AC5,500 V　1分間	
電流検出方式		正方向または両方向	
選択率		50％（使用/除外設定可能）	
保証動作回数	機械的開閉	1万回	
	短絡電流遮断	100回	
定格操作・制御電圧		DC100 V/DC110 V	
定格補助電源電圧		AC200 V	

図 10　短絡試験オシログラム



5　回線単位形主制御用配電盤

監視・制御・保護の要である主制御用配電盤として，従来の 1/2 幅の 350 mm 回線単位形主制御用配電盤（回線単位制御盤）をラインアップしている。

電磁リレーに代わり，デジタル形保護継電器や汎用プログラマブルコントローラ（PLC）を採用したマイクロエレクトロニクス（ME）形配電盤が実用化されて十数年が経過した。この間の数多くの実績と経験，電力会社向け回線単位制御盤の実績，ならびに PLC やリレーの小型・高性

図 11　小電流遮断試験結果

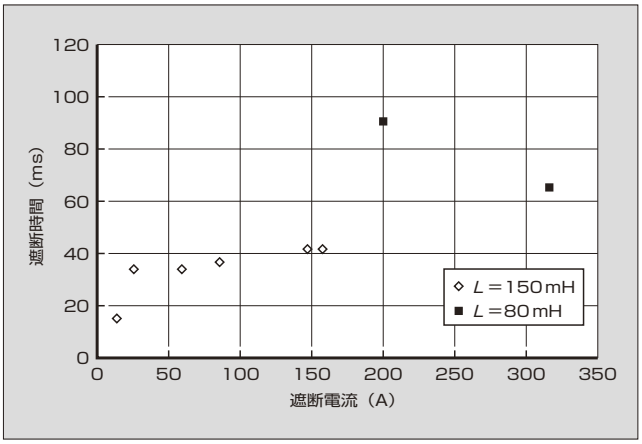
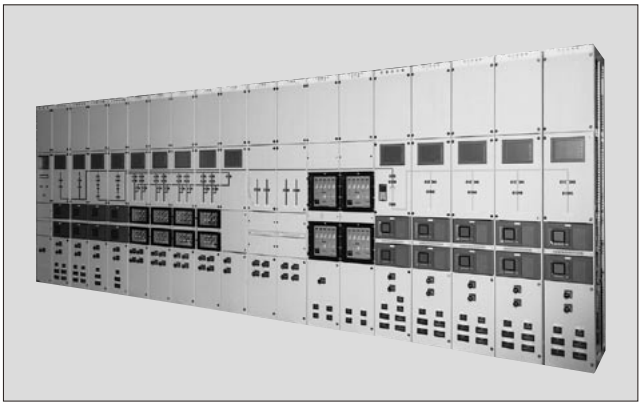


図 12　回線単位制御盤の外観

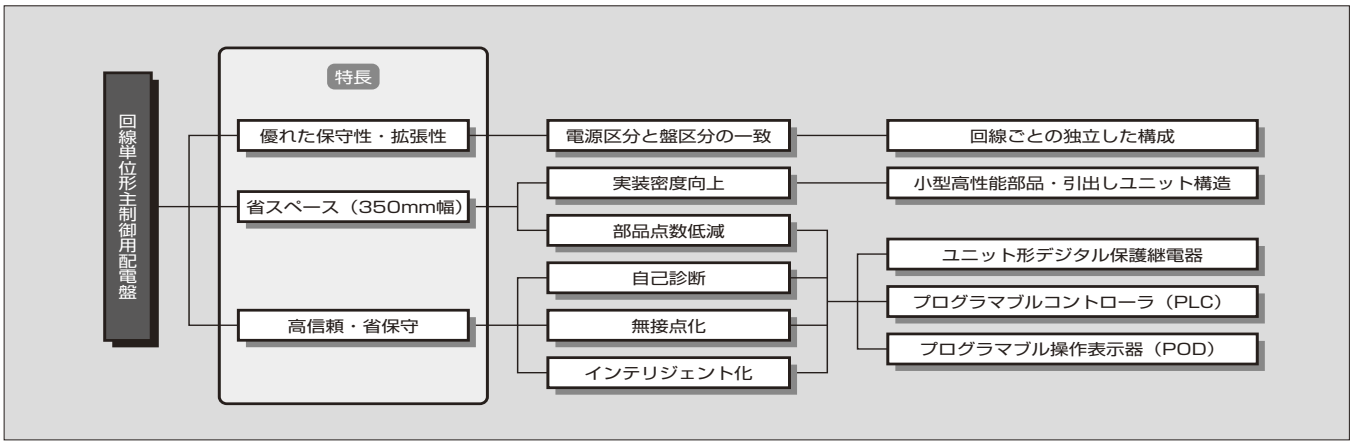


N99-2583-2

表 4　回線単位制御盤の仕様

項　目		内　容
制御電圧		DC100 V/DC110 V
耐 電 圧	商用周波	1,500 V
	雷インパルス	4,500 V
標準寸法	幅	350 mm
	奥行	600 mm
	高さ	2,300 mm

図 13　回線単位制御盤の特長とコンセプト



能化を背景に電気鉄道用回線単位制御盤を 2003 年に製品化し，急速に普及しつつある。これは ME 形のみならず電磁リレー形配電盤にも適用できる。外観を**図12**に，仕様を**表 4** に示す。

特長とコンセプトを**図13**に示す。

(1)　高い保守性・拡張性

回線ごとの独立構成であるために制御電源と盤区分が一致し，盤単位で確実に停電させることが可能となり，点検作業が安全かつ容易に行える。また，設備の部分更新や増設を効率的に行うことができる。

(2)　省スペース

小型・高性能部品の採用とユニット構造による高密度実装により幅 350 mm を実現し，設置スペースを大幅に縮小できる。

(3)　高信頼・省保守・インテリジェント化

デジタル保護継電器は，内部回路の冗長化と自己診断機能によりきわめて信頼性が高く，かつ設備の重要性から一重系・二重系を選定できる。さらに ME 形では PLC やプログラマブル操作表示器（POD）によりさらなる高信頼化や操作性向上，あるいは計測・履歴記憶機能の充実や汎用 LAN による遠方監視制御装置との結合により，システム全体としてインテリジェント化が図れる。

6　あとがき

地球環境対応・省保守・小型軽量を三本柱とした最新の直流変電機器のラインアップについて紹介した。これらの機器の基本設計思想には富士電機の長年の経験に基づく知見が包含されているが，例えば省保守という観点からはフィールドでの実運転状況下での部品特性の定期的確認による劣化状況の把握とそれに基づく交換周期の合理的な延長なども重要な課題と認識し積極的に取り組んでおり，部品によっては設定した交換周期を大幅に延長することが可能であるという知見も得られつつある。

今後とも富士電機は時代のニーズにマッチした製品開発に積極的に取り組むとともに，フィールド実績に基づいた最適化などを加味した真にユーザー本位の製品を提供していく所存である。

参考文献

(1)　小薗秀明ほか．24 kV 脱 SF_6 形ガス絶縁スイッチギヤ「C-GIS2100」．富士時報．vol.75, no.8, 2002, p.485-490.

(2)　津田信吾ほか．電気鉄道変電所用純水沸騰冷却式シリコン整流器．富士時報．vol.74, no.5, 2001, p.316-321.

(3)　粟飯原一雄ほか．電気鉄道変電所用新形直流高速度遮断器．富士時報．vol.72, no.2, 1999, p.111-117.

(4)　昆野康二ほか．直流遮断器の小電流遮断に関する検討．平成 9 年電気学会全国大会．no.1599, 1997.

(5)　昆野康二ほか．電鉄変電所用のアークレス形直流高速度真空遮断器．OHM. vol.1096, no.10, 2000.

(6)　藤城智ほか．100 kA 直流高速度真空遮断器の開発．平成 18 年電気学会全国大会．no.6-201, 2006.

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。