

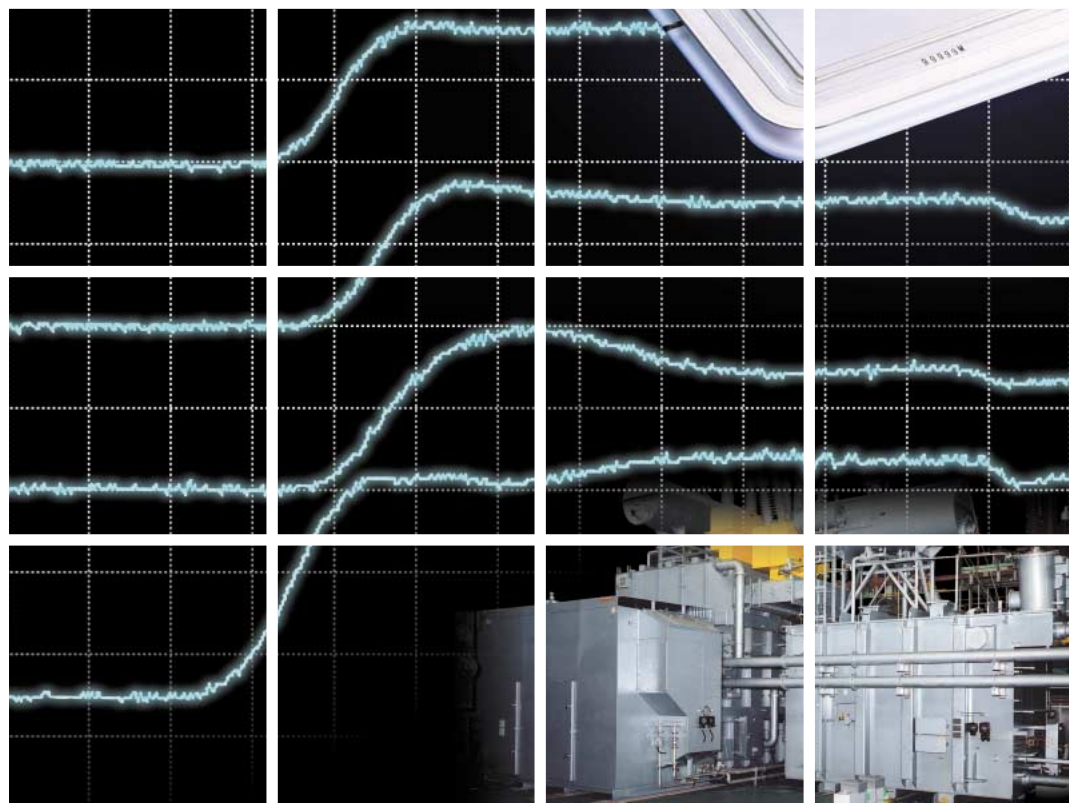
富士時報

FUJI ELECTRIC JOURNAL

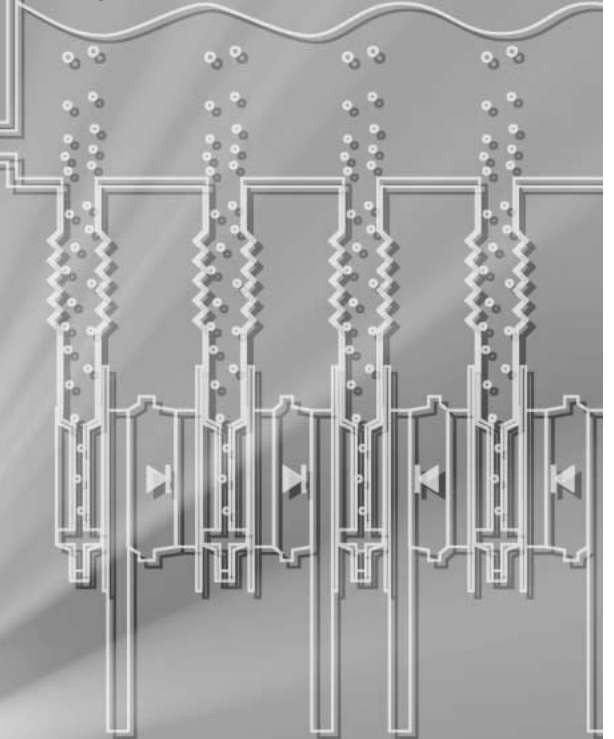


2001 VOL.74

電力・産業用
パワーエレクトロニクス技術特集



地球環境にベストフィット， 純水を使った高効率・コンパクトな シリコン整流器が誕生しました。



大容量シリコン整流素子
形式：ER3211FL-50
繰返し逆電圧：5,000V
平均順電流：3,200A
サージ電流：58,000A

地球環境に全く負担を与えません。
純水を冷媒とした画期的な沸騰冷却式整流器です。
小型軽量・高効率です。
最新のパワーデバイス技術を駆使して開発した大容量シリコン整流素子の採用により究極まで部品点数を低減し、容積・質量・損失とも60%を実現しました（6,000kWフロン冷却式に対する当社比）。
安全でメンテナンスフリー・全天候形です。
装置全体が接地された閉鎖構造です。安全でじんあいが侵入せず地下や屋外にも最適です。
もちろん補機はありません。

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

FUJI ELECTRIC JOURNAL

電力・産業用
パワーエレクトロニクス技術特集

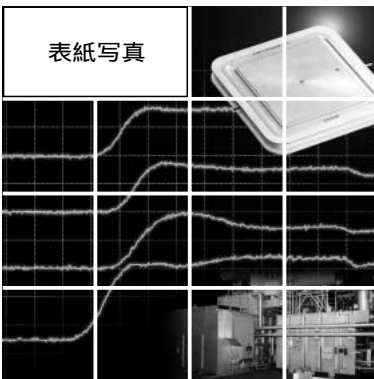
5

2001 VOL.74

目次

パワーエレクトロニクスから情報発信を 佐藤 之彦	260 (2)
大容量電力変換装置の現状と動向 矢内銀次郎	261 (3)
電力・産業用パワーエレクトロニクスを支える要素技術 江口 直也 ・ 高橋 清 ・ 丸山 宏二	265 (7)
灰溶融設備用チョッパ 宇都 克哉 ・ 日野 浩二 ・ 篠永 春彦	273 (15)
二次電池電力貯蔵用交直変換装置 小松木和成 ・ 藤倉 政信	278 (20)
揚水発電電動機用始動装置 大隈 謙二 ・ 森山 琴也 ・ 篠原 博	283 (25)
無効電力補償装置 小西 茂雄 ・ 馬場 謙二 ・ 大宮司 充	289 (31)
アルミ電解用整流装置 (S フォーマ) 古木 進一 ・ 石塚 銀治	296 (38)
金属表面処理用任意波形電源装置 丸尾 哲弘	302 (44)
誘導加熱用サイリスタインバータと最近の適用事例 倉田 巖 ・ 中村 清和	306 (48)
MOSFET インバータ型高周波電源 三浦 敏栄 ・ 中村 清和	311 (53)
電気鉄道変電所用純水沸騰冷却式シリコン整流器 津田 信吾 ・ 中村 豊忠 ・ 小滝 秀治	316 (58)
新幹線車両走行試験用周波数変換装置 馬場 謙二 ・ 梅沢 一喜 ・ 本木 泰	322 (64)

表紙写真



電力・産業用途の電力変換装置は、電力用半導体素子の進歩と制御装置の高速化に伴い大容量・高機能化し、電力・産業分野の生産性向上と品質向上に貢献している。大容量の電力変換装置は、プラントの操業や系統運用と密接にかかわり、きわめて高い信頼性を要求されている。最近はこれに加え、ランニングコスト低減のために、主機、制御装置、監視装置をインテリジェント化する要求が増えている。

富士電機ではこれらの要求を満たすため、パワーエレクトロニクス技術のノウハウを駆使し、製品の製作と開発に取り組んでいる。

表紙写真は、大容量電力変換装置の代表例であるアルミ電解用整流装置と富士電機製の電力用半導体素子を示し、さらに、それらの動作を電圧波形によりイメージ的に表現したものである。

大容量電力変換装置の現状と動向

矢内 銀次郎 (やない ぎんじろう)

1 まえがき

産業，電力，電気鉄道分野は，大容量の電気エネルギーを使用する分野である。これらの分野では，電気エネルギーを主として加熱，化学反応，動力に変換して利用しているが，それぞれの要求に合わせて電力を効率よくかつ精度よく変換するために，中間に大容量のパワーエレクトロニクス装置を使った電源が設置される。

今までこの分野の電源は，平均的に制御された電力を要求する場合がほとんどであったが，最近はどのような電力が製品品質を向上させるか，生産速度を上げるか，系統電圧安定・廃棄物焼却など生活環境の改善に適しているか，という観点からも検討されるようになった。このため電源は，単に電圧・電流・周波数を平均的に制御するのではなく，負荷要求に合わせて瞬時波形を任意に形成できることが必要になっている。この要求を満たすためには，電源システム構成の改善に加え，電力用半導体の性能改善，特にスイッチング速度の高速化を必要とする。

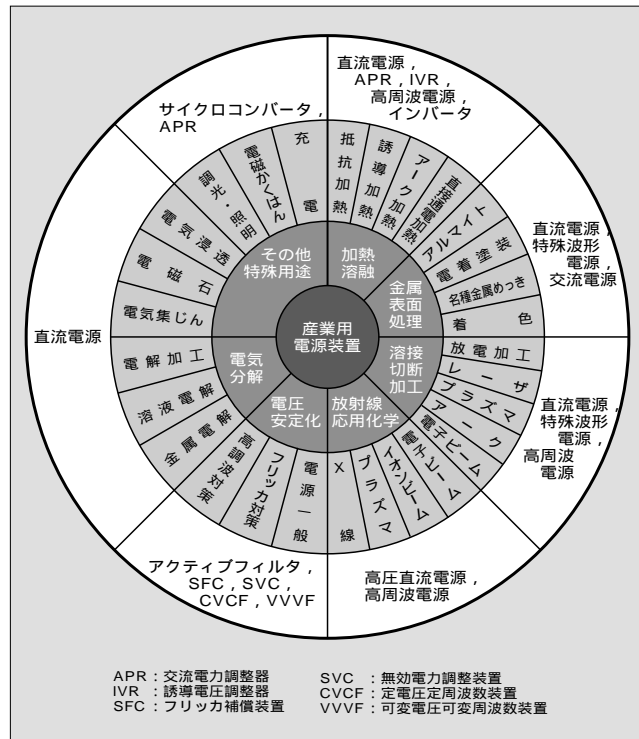
パワーエレクトロニクス装置に使用する電力用半導体は近年発展が目覚ましく，大容量で高速なものが次々と開発・実用化されている。また，制御装置もマイクロプロセッサが進歩し高速演算が可能となった。これらの要素技術の発展により，パワーエレクトロニクス装置は非常に高機能化しており，市場の要求を満足する電源を供給できるようになっている。

本稿では，産業，電力，電気鉄道分野における電源の現状と動向について記述する。

2 産業・電力用電源設備

産業用大容量電源の用途と機種の間を関係を図1に示す。産業用電源の用途は，加熱溶融，金属表面処理，溶接切断加工，放射線応用化学，電圧安定化，電気分解，その他特殊用途に大別でき，おのおのの用途に応じた電源が用いられている。電源としては，「停電がなく品質が良いこと」「設備コストが安いこと」「利用用途に応じて適用性が高いこ

図1 産業用大容量電源の用途と機種の間を関係



と」が要求される。このために電源提供者は，電力用半導体の改善，ユニットの改善，システムの改善に注力し，小型化と省スペース化を図り，システム構成と構成部品の適正化で信頼性と効率を向上させるとともに，コストの低減を図っている。

本章では，可変速駆動に代表される電動力応用の電源やUPS (Uninterruptible Power Supply) に代表される無停電電源については除き，電気分解，金属表面処理，加熱溶融，電源安定化の分野について述べる。

2.1 電気分解

電気分解はアルミニウム製錬，ソーダ電解に代表される分野で，最も大きな電流の直流電源を必要とする。電圧は1,500 V 以下である。



矢内 銀次郎

産業用電源装置・変電機などの産業用電気設備のシステムエンジニアリングに従事。現在，執行役員常務兼電機システムカンパニーバイスプレジデント。電気学会会員。

アルミニウムの製錬炉は低コスト化を目的に高電圧・大電流化が進み、現在稼動している最大の設備は 400 MW に達している。さらに 550 MW (DC1,550 V, 350 kA) の製錬炉が計画されており、今後大容量化はますます進むと想定される。図 2 にアルミニウム製錬炉の定格電圧と定格電流の推移を示す。したがって、この分野の電源は大容量化技術がキーとなる。詳細は本特集号の別稿「アルミ電解用整流装置 (S フォーム)」を参照いただきたい。

ソーダ電解用電槽には幾つかあるが、最近では生産効率の高さからパイポラ電槽が用いられることが多い。パイポラ電槽は複数の電槽を持ち、これに対して電源システム構成は図 3 に示す 3 種類を用意している。

3 種類の中から、設備コスト、設置スペース、信頼性を勘案して方式を決定する。現在最も多く採用されているのは設備コストと設置スペースで優位な b である。一方 c は、力率が高く高調波が少ないという特長を持っており、自己消弧型半導体が大容量化されれば優位となる。自己消弧型半導体の大容量化と適用技術が今後の課題である。

2.2 金属表面処理

金属表面処理分野は、めっき、アルミ材の表面処理が代

図 2 アルミニウム製錬炉の定格電圧と定格電流の推移

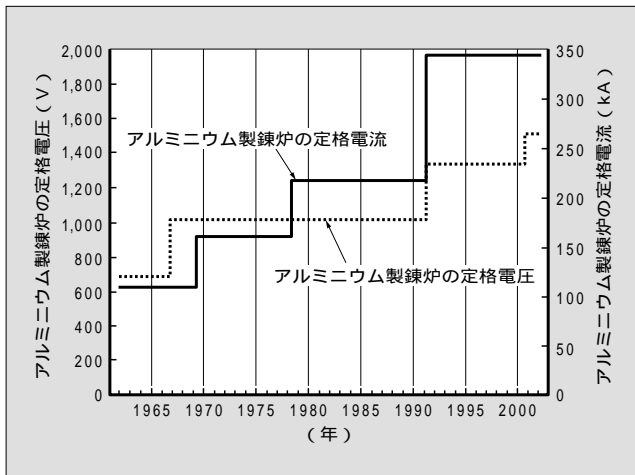
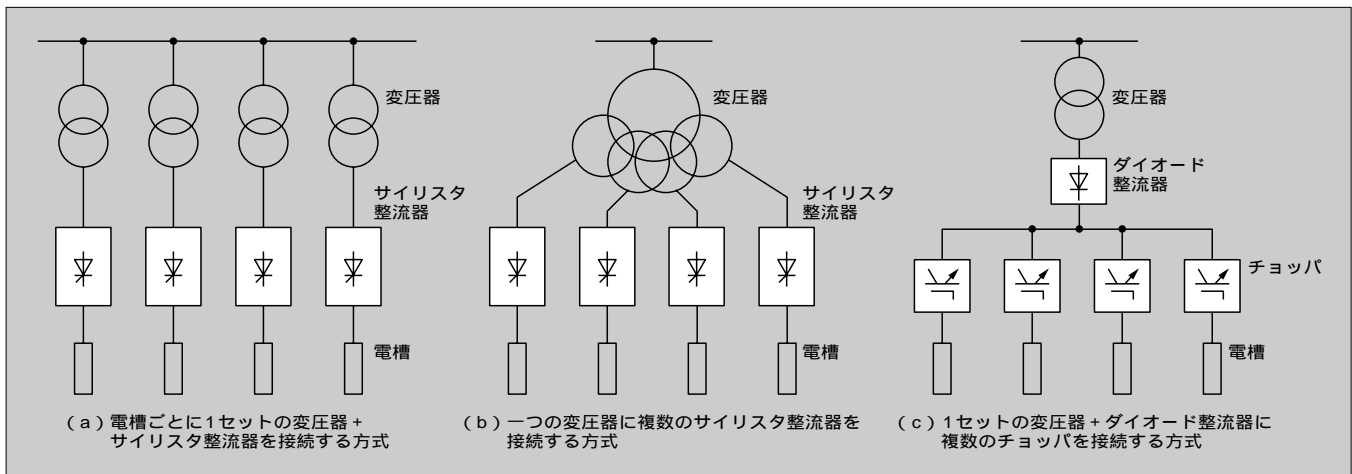


図 3 ソーダ電解用電源のシステム構成



表的である。電源容量は 1,000 kW 以下と小さい。金属表面処理の品質向上と生産性向上のために、各金属表面処理会社が独自の処理液と特殊な印加電圧・電流波形のノウハウを持っている。具体的には次の例がある。

1. アルミサッシの着色：アルミサッシの大小、電槽内での位置にかかわらず均一に着色ができるために、歩留りが非常に良い。
2. プリント基板のめっき：プリント基板のスルーホールにもプリント基板の表面と同質にめっきができる。

この分野の電源は、大容量で特殊な電圧・電流波形を出力することを要求される。これに対しては、大容量インバータ技術を適用したプログラマブル電源が適用できる。最近では自己消弧型素子の大容量化・高速化が進み、150 V, 10 kA クラスのプログラマブル電源が製作可能となった。すでにこの電源をアルミ着色工程に適用し、大きな成果を上げている金属表面処理会社も出てきている。詳細は本特集号の別稿「金属表面処理用任意波形電源装置」を参照いただきたい。

2.3 加熱溶融

加熱溶融は非常に適用分野が広い。本稿では環境改善で注目されている都市ごみ焼却灰の溶融分野について述べる。

都市ごみは毎年増大し、1997年には年間5,120万 t に達し、焼却灰の発生は年間600万 t を超過している。焼却灰埋立て場不足の問題から、焼却灰を溶融・固化して建材(砂利)として再利用するシステムが最近注目されている。

この再利用システムには電気式と燃焼式があるが、電気式は重金属の分離が容易で環境性に優れている。

電気式はアーク炉方式が主流で、電源容量は 70 ~ 100 kW/t である。アーク炉用電源は、アーク切れ防止を目的に、電源の定格電圧を通常運転より高くする。サイリスタ整流器を採用すると運転力率が極端に低下するので、力率のよい 10 kA 級大電流チョッパでシステム構成を行っている。詳細は本特集号の別稿「灰溶融設備用チョッパ」を参照いただきたい。

2.4 電圧安定化

近年、半導体の進歩に伴い多種多様の電気利用が行われ、生産活動、生活を便利にしている。電気利用は便利さの一方で、電気供給源に多くの障害を及ぼす。すなわち、電灯のちらつき、系統電圧の不安定、電力設備の破損、送配電設備利用率の低下、などである。これらの問題を解決し、電圧を安定させる装置の代表が、無効電力補償装置である。

無効電力補償装置には主に次の3方式がある。

- (1) サイリスタ位相制御リアクトル (TCR)
- (2) 自動式無効電力補償装置 (STATCOM)
- (3) サイリスタ開閉制御コンデンサ (TSC)

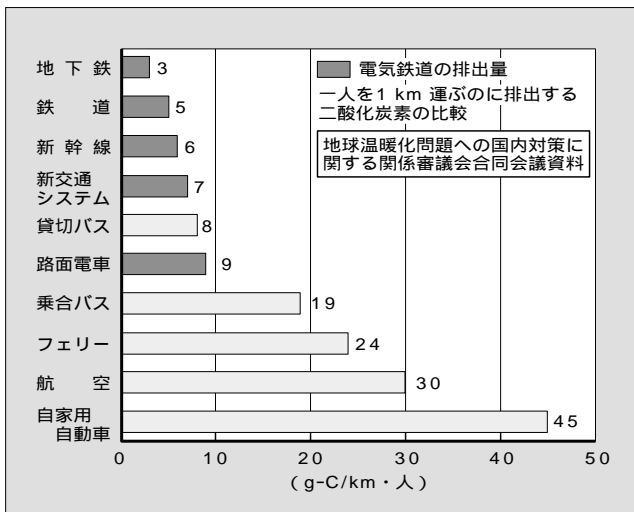
無効電力補償装置は、世界各国で年間4~5GVA 設置されている。設置容量の約2/3が電力系統用であり、TCRが最も多い。STATCOMは10年前ごろから導入が始まり、現在まだ全体の数%程度の設置実績であるが、三相不平衡補償、高速制御、コンパクト、高調波に留意する必要がないなどの特長を持つことから、今後設置件数は増加すると考えられる。特に自己消弧型素子を直列に接続したバルブを、リアクトルを介して系統に直接接続する方式が提案され、一部で実用化され始めている。今後、自己消弧型素子の大容量高耐圧化が達成されれば、無効電力補償装置の主流になる。詳細は本特集号の別稿「無効電力補償装置」を参照いただきたい。

③ 電気鉄道用電源設備

全国の電気鉄道の路線長は約15,000kmに達する。鉄道は図4に示す二酸化炭素排出原単位から分かるように、最もエネルギー効率がが高く、時代の要請である省エネルギー指向にマッチした大量高速輸送手段であるといえる。

電気鉄道は図5に示すように、都市圏に代表される直流電気鉄道と、新幹線に代表される交流電気鉄道に区分され、交流電気鉄道には現在の標準方式であるAT (Auto-Transformer) き電方式と、旧来からのBT (Booster)

図4 旅客輸送機関の二酸化炭素排出量



Transformer) き電方式の2種類がある。また、電気鉄道は図6に示すように、そのシステムの特長から他分野と異なるさまざまな技術課題が派生し、これらの多くがパワー

図5 各種き電方式

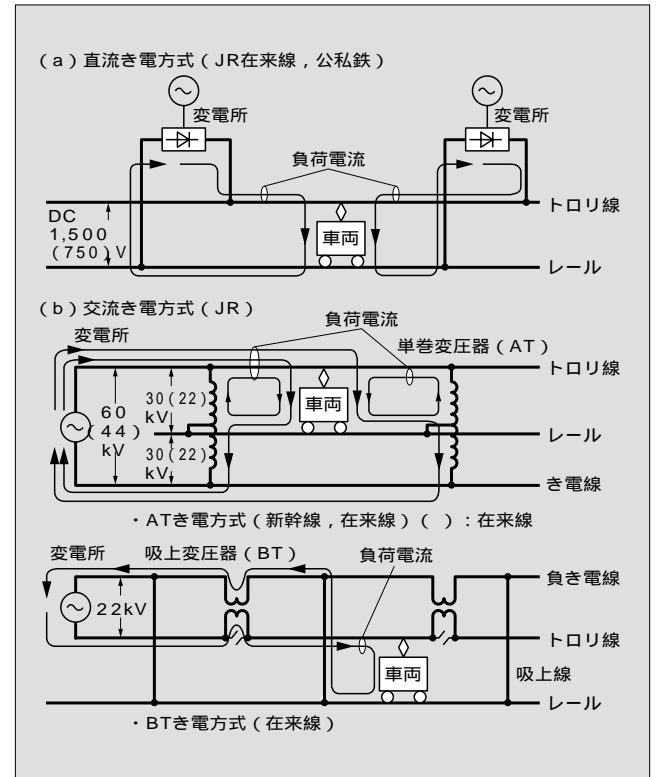
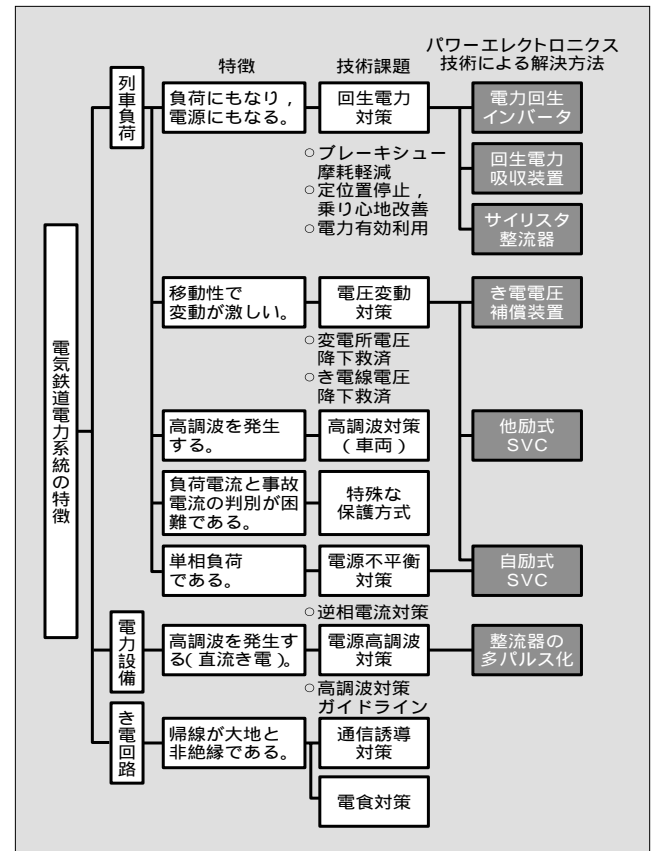


図6 電気鉄道電力システムの技術課題と解決方法



エレクトロニクス技術により解決されてきた。

3.1 直流電気鉄道

最近の直流電気鉄道電源設備における主な課題は、余剰電力の回生処理と環境対策である。

(1) 余剰回生電力対策

インバータ制御車に代表される回生機能を持った省エネルギー車両が一般的になってきているが、ランダムな移動性負荷であるために常に回生電力が力行車に有効利用されるとは限らず、ダイヤの疎な時間帯には回生失効することがある。回生失効は、回生エネルギーの有効利用や空気ブレーキシューの保守軽減、さらに最近では列車自動運転に伴う高精度な位置停止機能などを阻害する要因になることが指摘されており、地上側に回生電力吸収装置を設置して対策するケースが増えてきている。

(2) 環境適合性

直流変電所の主器であるシリコン整流器は、メンテナンスフリーや小型化のニーズにこたえるためにこの二十数年間沸騰冷却方式が採用されてきた。その冷媒としてはCFC（クロロフルオロカーボン）あるいはPFC（パーフルオロカーボン）を使用してきたが、いずれもモントリオール会議や京都会議においてオゾン層破壊や地球温暖化に寄与する物質と規定された。富士電機ではこれらの環境課題を根本的に解決し、さらに大幅な高効率化・小型化を実現するために、純水を冷媒とした画期的な新型沸騰冷却式シリコン整流器を製品化している。

3.2 交流電気鉄道

交流電気鉄道における代表的な課題は、き電回路の電圧降下対策、および列車が移動性単相負荷であることに起因する電源側の不平衡対策である。特に最も重負荷でかつ特有の電源事情を伴う東海道新幹線では、大容量パワーエレクトロニクス技術を適用した無効電力補償装置の導入により解決が図られている。

④ 今後の動向

電源システムは、主機・制御装置・監視装置の三つの構成要素から成り立っている。

主機は、自己消弧型素子での構成が主流となる。この素子では、使用者のニーズや負荷の特性に合った電圧・電流波形を容易に出力でき、生産効率の飛躍的な上昇が期待できるとともに、無効電力や高調波の発生を抑えられ電源利用率が向上することから、使用者にとって大きな利益が期待できる。

電力用半導体の改善も進む。SiC素子が実用化されれば飛躍的に高速化・低損失が進み、効率の改善や冷却装置の削減により装置が小型となり、劇的に使用範囲が拡大する。

制御装置も、ますます高速化・高性能化が進展する。

監視装置は、HMI（Human Machine Interface）を用い、運転監視やメンテナンス情報の収集が容易になっている。

今後は、機器の運転状態・メンテナンス情報や故障記録をインターネットなどを通してメーカー側で監視し、各種設定値の変更、予防保全の推奨、故障時の復旧時間の短縮が可能となろう。

今まで電源システムは、これら三つの構成要素を大容量化、高機能化、高信頼性の方向に発展させ、設備やプラントの生産性向上、省力化、低コスト化に貢献してきた。今後は、これらに加えて「優れた環境性」が求められる。例えば、電源の冷媒に使われていたCFCが、より環境性の良いPFCに替えられ、最近では環境に無害な純水が用いられようとしている。電力用半導体が高速となり、騒音を低減した装置が主流になっている。また、電力有効利用の面から無効電力や高調波が発生しない変換機器、送配電系統の無効電力を高速補償する装置が増加している。このように、今後の電源システムは、「大容量化」「高機能化」「高信頼性」に「優れた環境性」を加えた四つをキーワードとして発展していくものと考えられる。

さて、21世紀のエネルギーの動向に注目してみる。昨今は省エネルギーが叫ばれ、また経済情勢の沈滞から電力需要の伸びが停滞している。しかしクリーン性、自在性、安全性などから、電力が今後もエネルギー源の主流であることに変わりはない。エンジンなどの化石燃料によるエネルギー源はクリーン性などから限定された使用となり、核融合エネルギーはその制御がまだ確立されておらず、日常的なエネルギー源とするにはかなり時間がかかる。バイオエネルギーも開発段階である。太陽、風などの自然エネルギーの利用は増大するが、基本的に電力に変換されて用いられる。

近年、発電の分散化が進んでいるが、分散電源は比較的小規模ゆえに系統への影響を考慮する必要がある。特に、電力の品質面から、電力貯蔵装置の設置やネットワーク的な種々の系統面からの管理が必要になる。また、送電の無線化技術なども将来技術として挙げられるが、これに適合した電源の役割・形態などの論議も必要と感じる。

⑤ あとがき

電源装置は、長年多岐にわたる用途に有効に適用されてきたが、今後も電力は安全で便利なエネルギー源として活用されることは変わらない。しかし、クリーン性をはじめとした多くの制約を乗り越える必要がある。今後とも、築いてきた技術に新しい発想を加えて、要望に合った「より使いやすいクリーンな電源」の提供に努力したい。

参考文献

- 1) 川村逸生，梅本真鶴．焼却灰溶融固化再資源化システムの開発．第15回電熱大会エレクトロヒートシンポジウム．2000-11．
- 2) 電気協同研究会．電力品質に関する動向と将来展望．電気協同研究．vol.55，no.3，2000．
- 3) 電気鉄道技術特集．富士時報．vol.72，no.2，1999．

電力・産業用パワーエレクトロニクスを支える要素技術

江口 直也(えぐち なおや)

高橋 清(たかはし きよし)

丸山 宏二(まるやま こうじ)

1 まえがき

電力系統，産業プラント，電気鉄道などの分野に適用される変換装置は，高圧・大容量となることが多い。例えば，直流送電では数百 kV，数百 MW クラスが普通であり，無効電力補償装置が数十～100 MVA クラスなど，いわば，巨大パワーをエレクトロニクス技術で変換・制御する領域といえる。

この分野に適用する変換装置には，小型・低コストといった工業製品としての普遍的な要求とともに，装置が大規模であるため，より高い信頼性が要求される。また，大電力を扱うことから，わずかな効率の差がランニングコストに大きく響くことになるため，高効率であることが要件になる。高調波の発生など反作用も極力抑制され，その影響も事前の詳細検討が必要である。さらに，装置を有効に運用するための高機能化が要求され，装置自身のインテリジェント化も必要となっている。

以上のさまざまな要求にこたえる要素技術としては，まず電力用半導体デバイスとその適用技術が挙げられる。パワーエレクトロニクスとしてはいわば重厚長大のこの分野では，これまでデバイスとしてサイリスタが主流を占めてきた。これに対して最近では，高性能な IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) が広く用いられるようになり，その範囲は電力分野へと拡大されようとしている。デバイスの適用技術も高度化が進み，デバイス駆動回路，冷却やスタック配線構造に新しい技術が導入されている。また，

装置の高機能化を実現する制御装置技術も近年のプロセッサの進歩と相まって，かつてのアナログ制御装置から大きく変貌を遂げている。さらに，この大容量装置の実系統での性能予測・評価に不可欠な解析技術も目的に応じた計算手法が導き出され，その有効性を増している。

以下，これら大容量パワーエレクトロニクスを支える要素技術について，現状と今後の動向を述べる。

2 平型 IGBT と直列技術

本章では，高圧・大容量分野における最新デバイスとその適用技術について紹介する。

2.1 平型 IGBT

富士電機は，2.5kV/1.8kA 平型 IGBT(EMB1805RM-25) を量産化し，さらに 4.5 kV/2 kA デバイス (EMB2001)

表1 平型 IGBT の最大定格と主な特性

最大定格 ($T_j = 25$)

項目	記号	EMB1805 RM-25	EMB2001 RM-45	単位
コレクタ-エミッタ間電圧	V_{CES}	2,500	4,500	V
ゲート-エミッタ間電圧	V_{GES}	±20	±20	V
直流コレクタ電流	$\pm I_C$	1,800	2,000	A

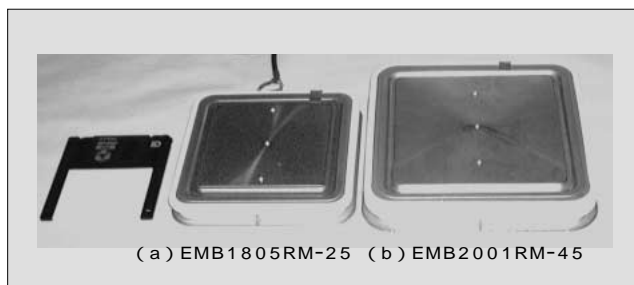
電気的特性 ($T_j = 125$)

項目	記号	EMB1805 RM-25	EMB2001 RM-45	単位
コレクタ-エミッタ間飽和電圧	$V_{CE(sat)}$	4.3 (標準)	5.7 (標準)	V
ダイオード順電圧	V_F	3.1 (標準)	4.3 (標準)	V

熱特性

項目	記号	EMB1805 RM-25	EMB2001 RM-45	単位
熱抵抗 (両面冷却)	IGBT	$R_{th(j-f)}$ 12.0 (最大)	10.0 (最大)	K/kW
	FWD	$R_{th(j-f)}$ 25.0 (最大)	17.0 (最大)	

図1 平型 IGBT の外観



江口 直也

パワーエレクトロニクス製品の開発に従事。現在，(株)富士電機総合研究所パワーエレクトロニクス研究所グループマネージャー。電気学会会員。



高橋 清

大容量半導体変換装置の設計・開発に従事。現在，変電システム製作所パワエレ課課長。



丸山 宏二

パワーデバイス周辺技術の開発に従事。現在，(株)富士電機総合研究所デバイス技術研究所。電気学会会員。

RM-45)を開発して、電気鉄道や産業、電力系統など各種の高圧・大容量変換装置への適用を推進している。平型IGBTの外観を図1、特性を表1に示す。従来、高圧・大容量の自励式電力変換装置には、GTO(Gate Turn-Off thyristor)が主に用いられてきた。GTOは、高耐圧・大容量化が比較的容易であり、高信頼性、低熱抵抗特性など大きな利点がある反面、スナバ回路やゲート駆動回路が大型化する欠点があった。前述の平型IGBTは、スナバ回路やゲート駆動回路が小さくてすむIGBTの使いやすさとともに、GTOと同様の圧接平型構造により、両面冷却が可能であることから半導体チップの電流密度を上げられ、また主電流部にワイヤボンディングを用いないため、デバイスの小型化および長期信頼性を特長としている。

2.2 直列接続の課題と回路方式

所定の電圧・電流定格の半導体デバイスを用いて、電力・産業用に要求される変換装置の高圧・大容量化を果たすには、半導体デバイスの直列・並列接続が必要となる。特に、半導体デバイスの直列接続には以下の問題がある。

1) 直列接続された各デバイス間の電圧分担不平衡

各デバイス間にスイッチングタイミング差が生じた場合、各デバイスの電圧分担が不平衡になり、特定のデバイスの電圧責務が過大となり、素子破壊に至る可能性がある。

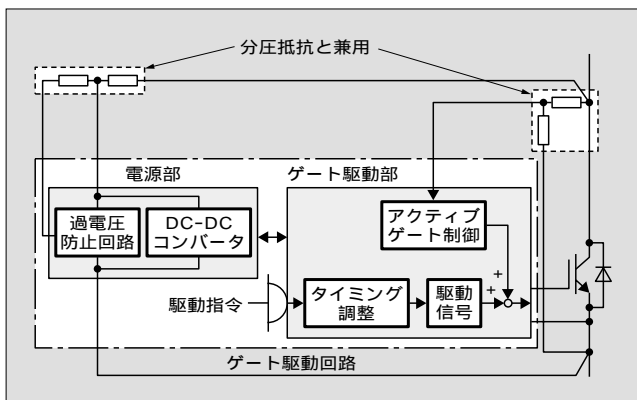
2) ゲート駆動電源の大型化

ゲート駆動回路の電源は、通常、絶縁トランスを用いて低圧側から供給される。しかし、半導体デバイスを直列接続し変換装置の高圧化を図ると、ゲート駆動回路と低圧側電源の間に高耐圧の絶縁が必要となり、電源供給回路が大型化する。

富士電機は、上記の問題を解決するために、直列接続された各デバイスの電圧分担をゲート駆動技術により均一化するアクティブゲート制御と、主回路から非絶縁でゲート駆動回路に電源を供給する自己給電方式を開発した。図2に、これらの機能を内蔵したゲート駆動回路の構成を示す。

アクティブゲート制御は、直列接続した各素子電圧を分圧抵抗によりゲート駆動回路にて検出し、設定した電圧値を超える電圧不平衡が発生した場合に、ゲート電圧制御により一時的にデバイスを活性領域でオン状態とし、電圧分

図2 平型IGBT直列接続用ゲート駆動回路の構成



担不平衡を均一化させるものである。

自己給電回路では、メインデバイスの両端電圧から分圧抵抗を介して電力を取り込み、これをDC-DCコンバータによってゲート駆動に必要な電圧に変換している。GTOの駆動電力が数百Wであるのに対し、IGBTの駆動電力は数W程度と非常に小さいため、自己給電方式が適用でき、低圧側から給電する場合に比べ電源回路が小型となる。また、自己給電入力部に過電圧防止回路を設けることにより、主回路電圧が広範囲に変動しても、ゲート駆動回路が過電圧破壊することなく、安定なゲート駆動電力を供給できる。

2.3 試作器試験結果

2.5kV/1.8kA平型IGBT(EMB1805RM-25)の4直列実規模水冷スタックを試作し、検証試験を行った。図3に

図3 試作器の回路構成と外観

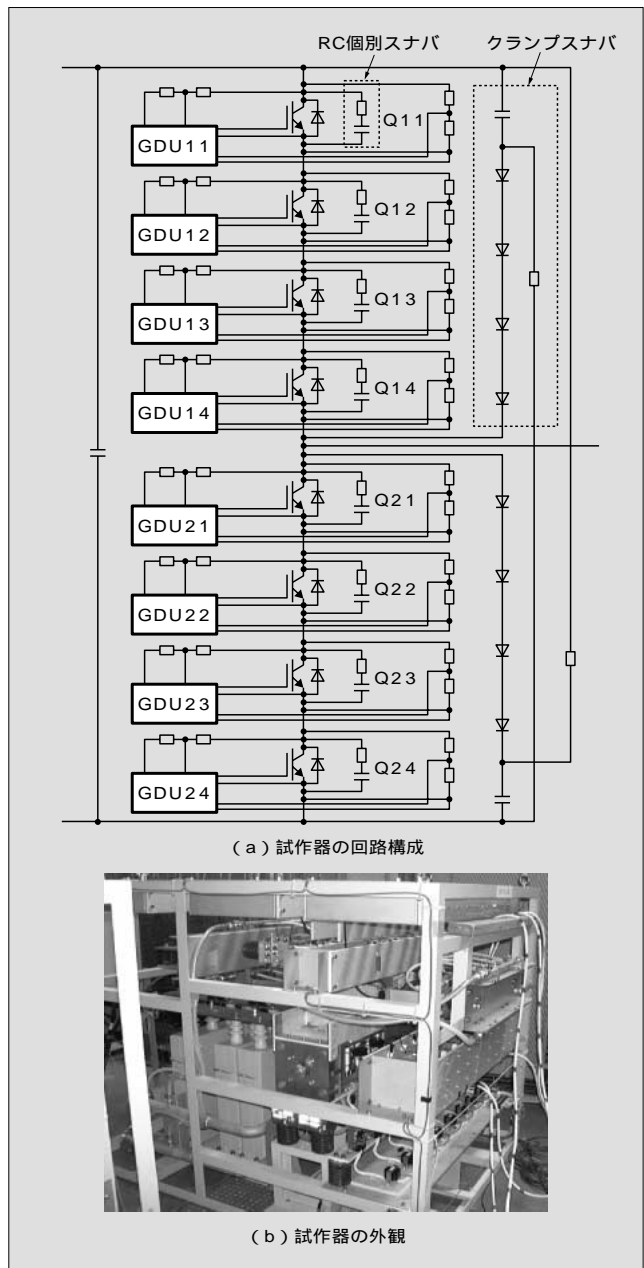
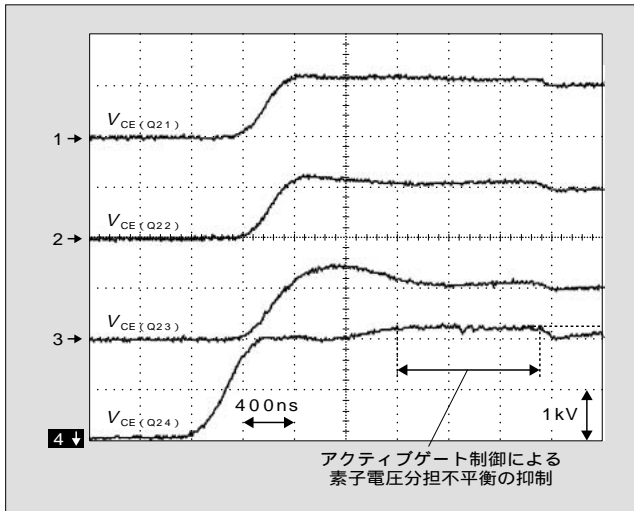


図4 ターンオフ時の素子電圧波形



試作器の回路構成と外観を示す。試作器は、2レベルインバータの1相分であり、上下アームはそれぞれ平型IGBT 4個を直列に接続している。図4に、直流電圧 $E_{dc}=5,200V$ 、素子電流 $I_c=1,800A$ でのターンオフ時の素子電圧波形を示す。Q24素子のみ他の3素子よりも400ns早くターンオフしているが、アクティブゲート制御により素子電圧不平衡が抑制されていることが分かる。

2.4 素子・回路技術における今後の展開

IGBTは、今後も高耐圧・大電流化が進み、現在サイリスタ系素子が使われている直流送電などの電力基幹システム装置へも本格的に適用されていくものと予想される。このため、スナバ回路なしに素子を多数個直列接続し、電力系統に直接連系するなど、高信頼でより小型化・低コスト化が図れる要素技術開発が重要になる。

③ 大容量スタック技術

電力・産業分野の変換装置を構成する大容量スタックでは、高圧・大電流に対する絶縁、冷却、配線などのスタック構造技術が装置の小型化・高信頼性のために特に重要となる。以下に富士電機の取組みの一端を紹介する。

3.1 冷却技術

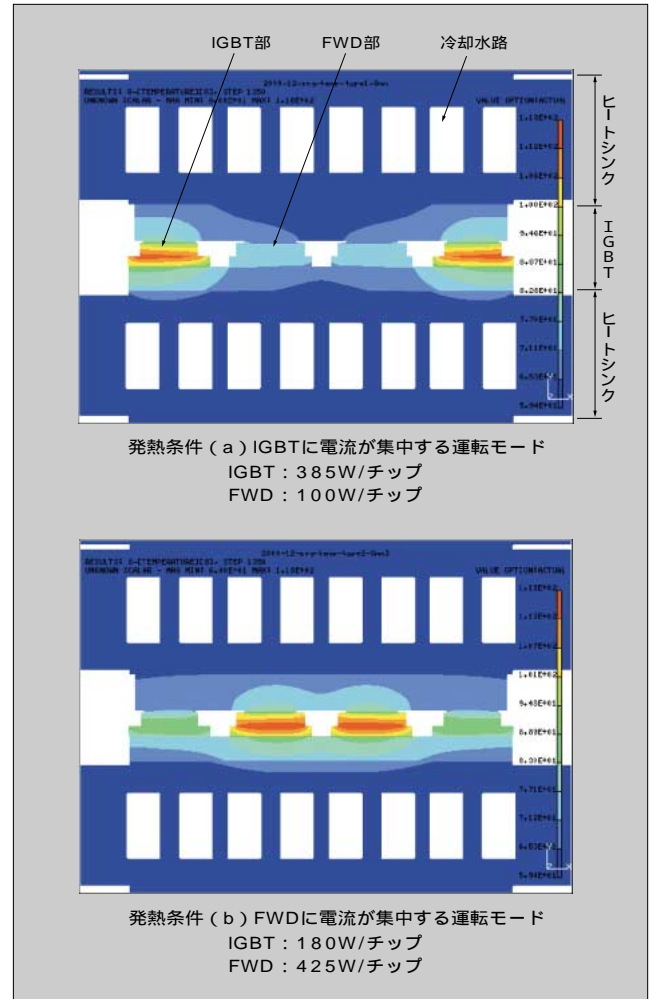
大容量変換装置では、大きな冷却性能を得るために、平型素子の両面を水冷ヒートシンクで冷却する場合が多い。冷媒としては、一般的に空気・油・水があるが、表2の熱伝導率の比較をみれば、圧倒的に水が有利であることが分かる。

実際には、純水を用いており、イオン交換樹脂を備えた閉鎖回路で冷却回路を構成し、純水の抵抗率を規定値以上に保っている。また、安定な熱抵抗を得るために素子とヒートシンクを一括して規定圧力で加圧している。この場合、低熱抵抗のヒートシンクを実現することはもちろんであるが、素子の発熱・冷却の繰返しにおいても安定した加

表2 熱伝導率(40 のとき)

冷媒	熱伝導率 [W/(m・K)]
空気	0.027
油(変圧器油)	0.12
水	0.63

図5 水冷ヒートシンクの熱解析例



圧力を維持することも重要である。特に、平型IGBTは、パッケージの中に運転モードにより発熱パターンが変わるIGBTチップとFWD(Free Wheeling Diode)チップの2種類のチップを内蔵するため、これらを一括して圧接することを考慮してスタックを設計する必要がある。

図5は平型IGBTスタックにおいて、一連の熱応力解析を行う際にまず実施するヒートシンク熱解析結果の一例である。この場合、IGBTに電流が集中する運転パターンとFWDに集中するパターンとの双方を解析している。このようなシミュレーションを通じて、過大な面圧や圧力抜けの有無をチェックするとともに、加圧の均一性を入念に評価し、スタック設計に反映している。

3.2 低インダクタンス配線技術

最近の高圧・大容量装置では、IGBTが広く用いられる

ようになってきたが、これはサイリスタに比べ、スイッチング動作が速いため、電流変化に伴って配線インダクタンス上に発生する電圧が素子自身に大きな責務を与える。一方で、急激な電流変化を抑える働きを配線インダクタンスに期待する場合もあり、単にインダクタンスを低減するだけでなく、最適化する必要がある。そこで、高圧回路においてもラミネートバーを採用し、配線のインダクタンスを低減させるとともに、シミュレーションにより、回路のインダクタンスを精度よく求められるようにしている。

図6にインバータ直流回路構成部の電流密度分布解析例を示す。この結果から、回路インダクタンスが求められるようになっている。

3.3 絶縁技術

低インダクタンスを実現するためには、配線をラミネート構造とし、正側・負側のバー間距離を小さくする必要がある。このため、高電圧の装置においては、絶縁、特にコロナ放電に対する配慮が必要である。電極間距離によって異なるが、概略 20 kV/cm の電界強度を超えるとコロナ放電が発生するため、特に電界強度の高くなるラミネートバー端部において注意が必要である。

これに対しては、図7に示すような電界強度のシミュレーションを行い、ラミネートバー端部の形状を設計している。また、シミュレーションだけでは判定が困難な場合には、実際にモデル形状によりコロナ開始電圧の測定を行い、設計指針としている。

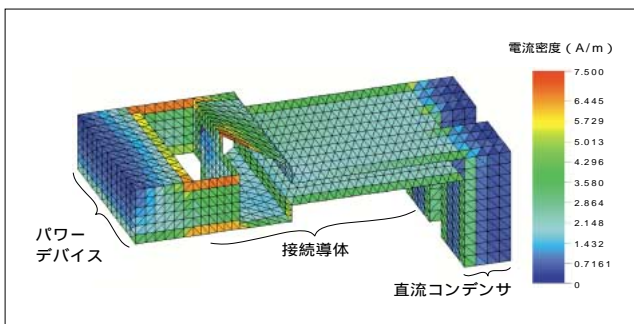
3.4 大電流技術

富士電機は、電解整流器の分野において、最大出力電流が 100 kA を超えるクラスまで、数多くの大電流変換装置の実績を有している。そのスタック技術としては、3.1 節に述べた冷却技術のほかに、以下の技術が必要となる。

3.4.1 素子並列技術

素子を多数並列接続したスタックでは、素子の特性のばらつきのほかに、そのスタックが構造的に持っているインダクタンスも、各並列素子間の電流バランスに大きな影響を与える。そこで、前述のとおり構造上のインダクタンスをシミュレーションで求め、電流バランスのシミュレーションに反映している。その際、定常状態での電流だけでなく、転流時の電流変化も考慮している。また、富士電機

図6 インバータ直流回路構成部の電流密度分布解析例



独自の技術である「同相逆並列接続」は、構造面からインダクタンスを減らす働きがあり、電流バランスの改善に大きく寄与している。この詳細は、本特集号の別稿「アルミ電解用整流装置 (S フォーマ)」を参照されたい。

3.4.2 ローカルヒートに対する技術

「同相逆並列接続」は、逆向きの電流を流すことにより電流がつくる磁界をキャンセルするため、ローカルヒートの低減にも多大な効果がある。ただし、構造をより簡略化するために、数十 kA 以下の装置においては採用しない場合もある。この場合には、構造各部のローカルヒート解析を詳細に行っている。「同相逆並列接続」を採用しない場合の変圧器と整流器との接続ダクト部 (変圧器のタンク壁を含む) におけるシミュレーションの例を図8に示す。このような解析によって各部位の発生損失を求め、問題となるローカルヒートの対策案を導いている。

3.4.3 電磁機械振動に対する技術

平行している二つの導体に電流が流れると、その電流による磁界のために、同方向の電流では吸引力が、逆方向の電流では反発力が働く。大容量のスタックにおいては、この電磁機械力が問題となるため振動解析を実施している。この詳細も、本特集号の別稿「アルミ電解用整流装置 (S フォーマ)」にて説明しているので参照願いたい。

図7 電界強度解析例

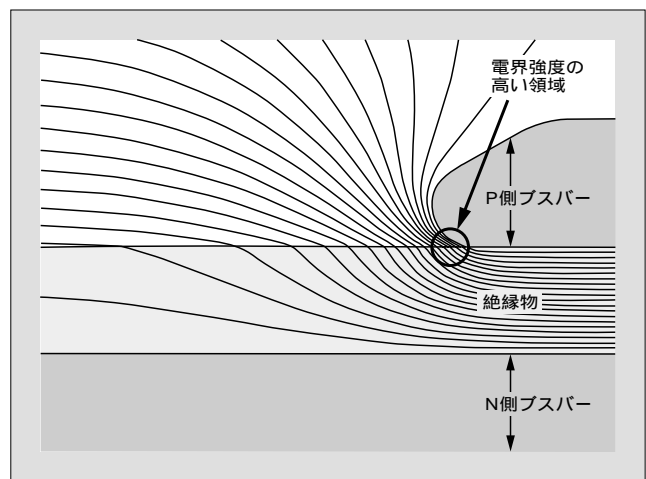
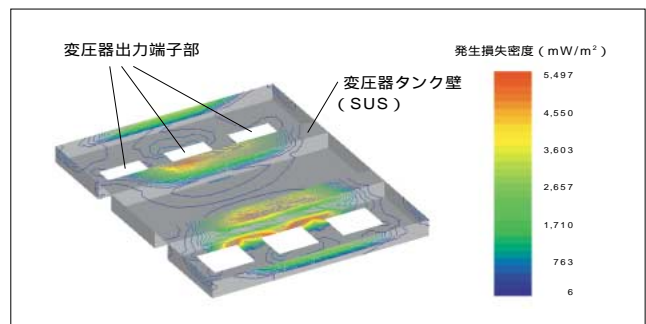


図8 変圧器タンクの発生損失分布解析例



4 制御技術

4.1 制御装置に望まれる機能・性能

電力・産業分野に適用されるパワーエレクトロニクス用制御装置に対しては、その制御対象である電力変換装置の特性と、それらが用いられる形態とから、以下のような機能・性能が要求される。

1) 演算の高速化

最新の制御理論や電力システム理論の応用を目的として制御演算が複雑になる一方、最近のパワーデバイス技術の進歩によりスイッチング周波数が高くなっている。このため、制御演算やPWM (Pulse Width Modulation) 演算を高速化してむだ時間を短縮する必要がある。

2) 多様なプラント仕様への対応

プラントごとに仕様が大きく異なる大容量変換装置では、仕様の多様性に容易に対応できなければならない。また、電源高調波や他の機器への電磁妨害を抑制するために、パワーデバイスのスイッチングを最適化するなど、細かな対策が必要になる。

3) ソフトウェア開発の効率向上

複雑で膨大なソフトウェアの製作・保守は困難であるのみならず、機能・性能の向上に支障をきたす。このため、生産性・保守性の高いソフトウェア開発環境が不可欠である。

4) 稼働率の向上

大容量電力変換器が使用されるプラントは社会システム・産業システムの基盤を構成することが多く、安定で高い稼働率が要求される。そのためには、信頼性が高く、故障率が低いだけでなく、万一の故障発生時にも速やかな事後保全ができるような診断・解析支援機能が必要である。

4.2 制御装置開発のコンセプト

前記のような要求事項を実現するための制御装置の開発コンセプトと特長を以下に述べる。基本的なシステム構成を図9に、プログラミングツールの表示画面の例を図10にそれぞれ示す。

1) 最新のマイクロエレクトロニクス技術の導入

全体制御用の64ビットRISC (Reduced Instruction Set Computer) プロセッサと、主として変換器制御用の32ビットDSP (Digital Signal Processor) との2種類の浮動小数点演算プロセッサを採用した。これらのプロセッサは並列動作し、入出力モジュールの共有化や相互バックアップも可能である。プロセッサや論理デバイスの進歩に即応した部分的なグレードアップを容易にするため、プロセッサとその周辺回路をモジュール構造とした。

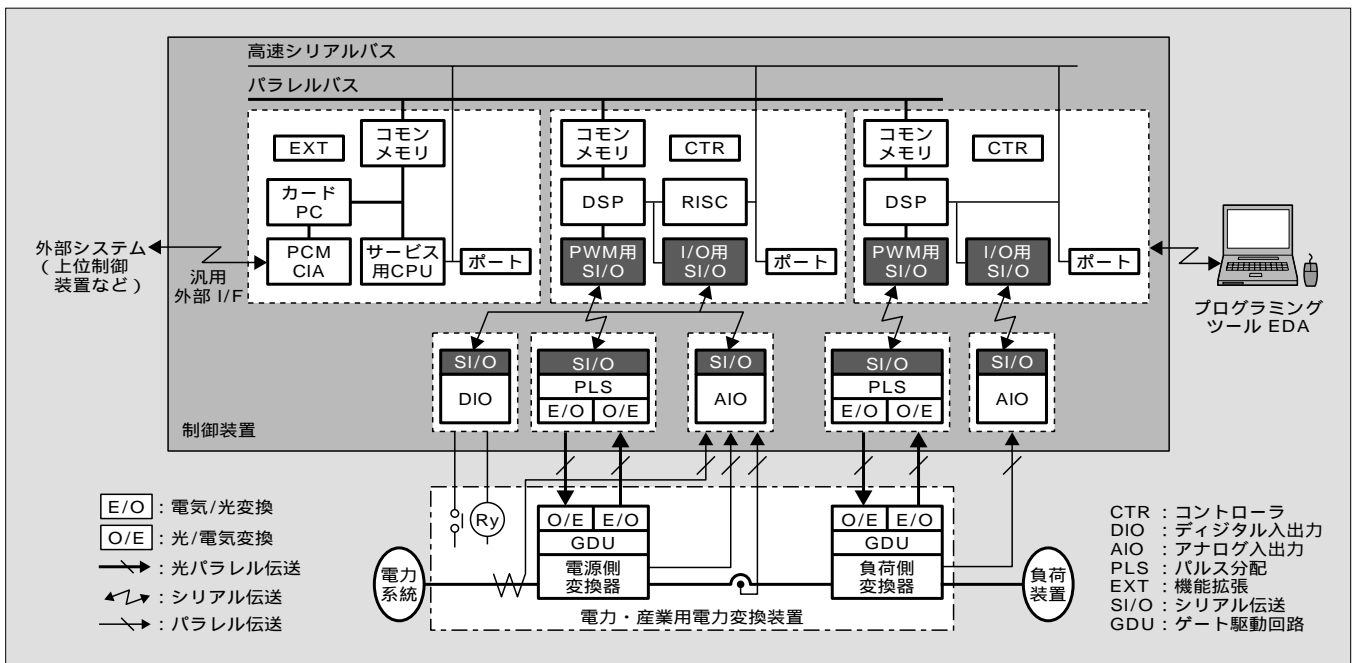
2) 機能の集約とフレキシビリティの共存

アナログ入出力、デジタル入出力、パルス分配、などの各機能モジュールごとにハードウェアを完結し、モジュール内の結合度を高めている。モジュール相互間は高速シリアル伝送によって結合し、物理的にも論理的にも自由に配置可能にしている。また、変換器制御の要(かなめ)であるパルス分配部分は、多様なゲートパルス生成の要求にこたえられるように、専用プロセッサとFPGA (Field Programmable Gate Array) で構成している。さらに、外部インタフェース用にPCMCIA (Personal Computer Memory Card International Association) 標準スロットを準備し、市販の汎用インタフェースも利用できる。

3) ソフトウェア開発の自動化

制御系CADツールとして広く使用されているMATLAB/Simulink^{注1}で設計・シミュレーション検証を行ったプログラムから、制御装置内プロセッサ用の実行コードを自

図9 制御システムの基本構成



動生成する EDA (Electronic Design Automation) 環境を構築した。この EDA 環境により、シミュレーションから実行コードまでの首尾一貫性を保ち、ソフトウェアの信頼性・視認性を高めるとともに、機能の追加・削減などの仕様変更に対応できるようにしている。

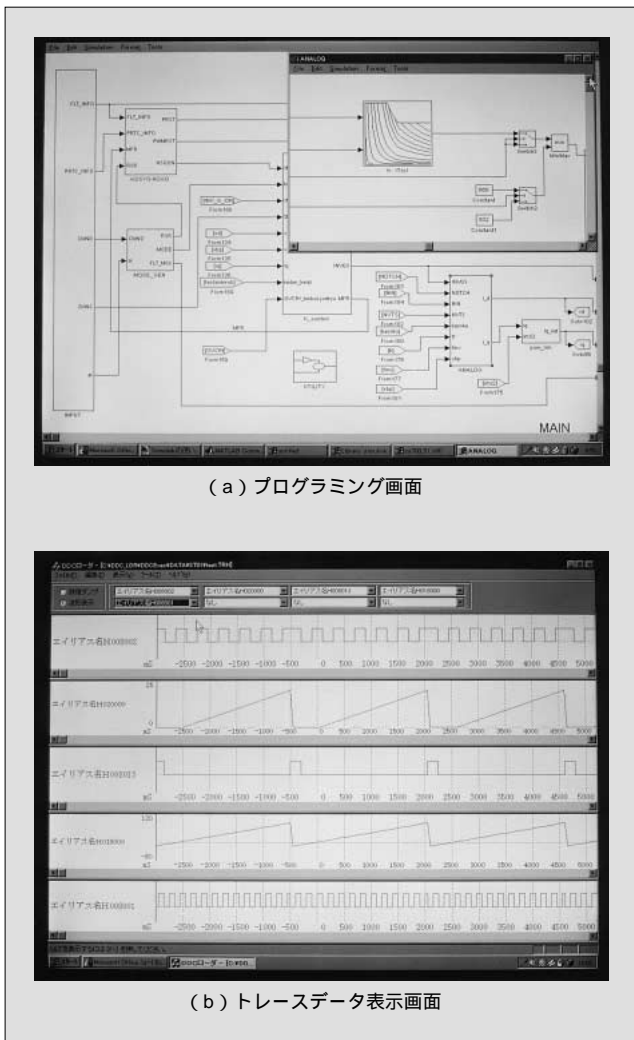
4) RAS 機能の充実

RAS (Reliability , Availability , Serviceability) 機能とは信頼性・稼働率・保守性を高めるために組み入れる機能である。この制御装置では、システムソフトウェアを用いたハードウェアの自己診断機能を用いて、電源投入時および運転中の診断ができる。また、プロセッサ間の相互監視機能や入出力モジュールの共有化により、故障の発生したプロセッサに代わって、システムを安全に停止したり、一部機能を停止したうえで縮退運転を行うこともできる。さらに、アナログ信号、デジタル信号、ゲートパルス (指令と返送) 信号の変化を 1 μs の分解能で記録でき、トリガ事象発生前後の詳細な情報を用いた動作解析を容易にしている。

注1 MATLAB : 米国 The MathWorks, Inc.の登録商標

注2 Simulink : 米国 The MathWorks, Inc.の登録商標

図 10 プログラミングツール画面



A7414-18-482/A7414-18-485

4.3 適用事例

この制御システムを適用した揚水発電所向けサイリスタ始動装置用制御装置の外観を図11に示す。この詳細については、本特集号の別稿「揚水発電電動機用始動装置」を参照されたい。

また図12は、自励式無効電力補償装置に適用した場合の構成を示している。従来の制御システムに比べて、プリント基板枚数で 1/3、シェルフ幅で 1/2 に小型化されている。

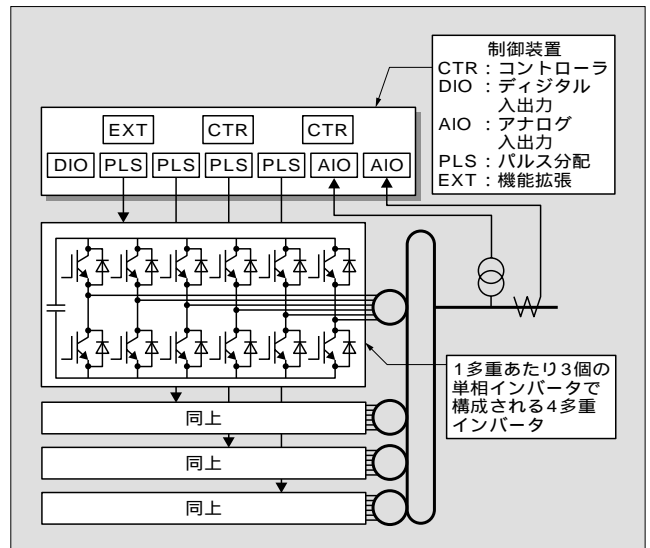
4.4 制御技術における今後の展開

この制御システムは、前記のとおり揚水発電所向けサイリスタ始動装置に適用されるほか、静止形周波数変換器や無効電力補償装置など電力・産業分野で広く適用が予定されている。ここで用いられている要素技術 (入出力信号やゲートパルス信号のシリアル伝送、ソフトウェア開発のための EDA 環境利用、ヒューマンインタフェース機能、RAS 機能など) は、他のパワーエレクトロニクス制御装置に取り入れられて、製品の機能・性能・操作性の向上に資すると期待される。

図 11 揚水発電所向けサイリスタ始動装置用制御装置の外観



図 12 自励式無効電力補償装置用制御構成



さらに、ドッグイヤーといわれるプロセッサの急速な高性能化を迅速に取り込んでいくことはもちろん、入出力、パルス分配、ゲート駆動といった各モジュールのインテリジェント化（自律化）や、故障診断技術・冗長システム構成技術の導入による高信頼度化、プラントインタフェースの拡充、などにより制御装置を継続的に発展させていく計画である。

5 変換器・系統解析技術

5.1 変換器・系統解析の特徴

電力系統の制御に適用されている変換装置はもちろんのこと、需要家負荷機器に適用されている電力変換装置に対しても、それらが電力系統において適切に動作することを

確認し、系統および負荷機器へ及ぼす系統現象を検討する必要がある。富士電機では、従来から変換装置を含む系統解析に、ハイブリッドシミュレータと、独自開発プログラムや汎用プログラムなどの系統解析プログラムを利用している。通常の系統解析プログラムでは、送配電線上での事故に対する故障計算や、発電機などの制御動特性を考慮した安定度計算などが主流であり、これらの解析では、実効値電圧・電流や電力潮流などの電気量を実効値ベースで扱っている。しかしながら、スイッチングにより生成される電圧や電流が大きく影響する変換装置を含む系統解析では、むしろ波形瞬時値を扱うことを要求されるため、小さな演算刻みによる膨大な計算時間が必要となり、多くの計算コストを要することになる。このため、変換装置や変換装置周辺の系統などを適切にモデル化し、問題に則した系

表3 自動式変換装置解析におけるモデル化手法

インバータ主回路、PWM制御部の実現方法	原理図
<p>(1) スwitchingモデル Switchingモデルは、インバータ主回路をSwitch素子の組合せで模擬する方法である。このモデルは、回路を忠実に模擬できる利点があるものの、演算刻みの最大値は、精度にもよるが搬送波周波数の数百倍になるため、搬送波周波数によっては膨大な計算時間を必要とする。系統への高調波の影響や変換装置の瞬時制御動作が影響する解析の場合、このような詳細モデルが必要となる。</p>	
<p>(2) 方形波テーブルモデル 方形波テーブルモデルは、各Switch状態により決まる直流側電圧と交流側電圧の関係式を定義し、空間ベクトルによりインバータ出力電圧を得る。このモデルは、インバータ主回路を簡略化するため、Switchingモデルに比べ計算時間が短縮できるが、それでも、演算刻みの最大値は、搬送波周波数により決まるため、搬送波周波数によっては大きな計算時間を必要とする。</p>	
<p>(3) 基本波モデル インバータ方形波出力電圧の基本波成分近傍の現象を解析する場合、PWM部分は無視でき、信号波を端子電圧として模擬できる。これが基本波モデルであり、装置の制御動作の結果が正弦波の振幅・位相と周波数のみが影響する系統現象に適用できる。</p>	

統解析が求められる。

5.2 解析の現状と今後の課題

表3に、富士電機で用いられている系統解析用の3種類のモデル化手法を示す。送配電線を分布定数で模擬するサージ解析とは異なり、電力系統や他の機器を考慮した系統解析では、スイッチングデバイスの動作を理想スイッチとして扱うことにより達成している〔表3(1)スイッチングモデル〕。また、そのスイッチング状態を自在に制御できる自励式変換装置では、そのスイッチング結果を系統の電流にかかわらず定義し、計算時間を短縮することで、負荷制御などの解析を実施している〔表3(2)方形波テーブルモデル〕。さらに、高調波フィルタなどによりスイッチングや高調波現象が吸収されたものとして、単独運転検出機能検証などの長時間の解析を行っている〔表3(3)基本波モデル〕。

今後は、設計段階ではもちろんのこと、顧客へのシステム提案の場面で系統・変換器解析技術の重要度が増し、一層の効率的な系統解析が必要となっていくものと考え。

⑥ あとがき

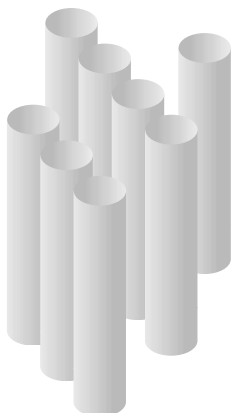
電力・産業分野に適用される変換装置の代表的な要素技

術について、富士電機の現状と今後の展開について述べた。この分野では、実負荷等価試験や長期信頼性試験などの試験評価技術をはじめ、製造技術、輸送技術など、実際にはほかにも多くの技術に支えられていることを付け加えておく。

パワーエレクトロニクスは、環境、エネルギーといった21世紀にわれわれが解決すべき課題にこたえる技術である。今回紹介した要素技術は、その根幹となるものであり、今後も積極的に開発を推進していく所存である。

参考文献

- 1) Fujii, T. et al. 4.5kV-2000A Power Pack IGBT (Ultra High Power Flat-Packaged PT Type RC-IGBT). Proceedings of ISPSD 2000. IEEE Catalog No.00CH37094 C, May 2000.
- 2) 阿部康 ほか. 平形 IGBT 直列接続時のスイッチング試験. 平成 11 年電学産業応用部門大会 34.
- 3) 丸山宏二 ほか. IGBT 直列接続時の電圧クランプ回路の検討. 平成 11 年電学全国大会 1008.
- 4) 中森昭, 江口直也. 系統連系インバータのシミュレーション解析. 富士時報. vol.69, no.3, 1996, p.170-174.



灰溶融設備用チョッパ

宇都 克哉(うと かつや)

日野 浩二(ひの こうじ)

篠永 春彦(しのなが はるひこ)

1 まえがき

ごみ焼却施設から発生する焼却灰および飛灰の溶融・固形化設備である灰溶融設備は、一般廃棄物の最終処分場の延命化対策設備として、生活環境保全上の重要性をさらに増してきている。

溶融方式には、燃焼方式、直流プラズマアーク方式、抵抗加熱方式などさまざまな方式が採用されており、各方式とも独自の長を持っている。これらの方式のうち、直流プラズマアーク方式の電源としては従来、サイリスタ整流器を使用した直流電源装置が採用されていたが、今回ダイオード整流器と IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)を使用したチョッパ回路の組合せから成る灰溶融炉用直流電源装置を開発した。

本稿では、灰溶融直流プラズマアーク炉電源用としてのチョッパ方式の全体システム、IGBT チョッパ回路について記述する。

2 全体システム

2.1 プラズマアーク式灰溶融設備の特徴

設備の特徴としては以下が挙げられる。

1) 連続運転が可能である。

設備不具合による長期操業停止が社会に及ぼす影響は大きく、産業用設備以上の高信頼性が要求される。

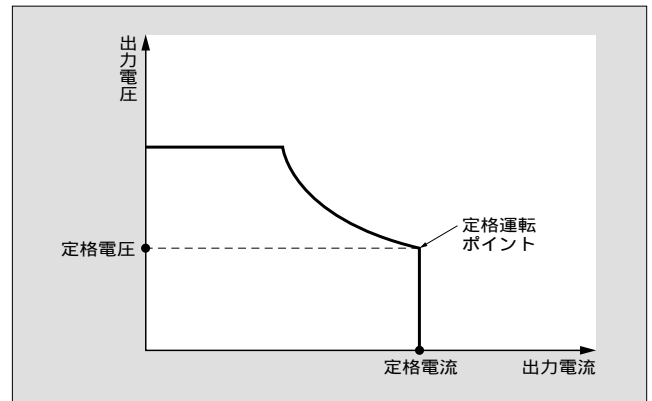
2) 風冷式冷却方式が好まれる。

大電流電源の冷却方式として、産業分野においては冷却水を使用した方式が主流であるが、公共設備の場合、冷却水を使用した電気設備の経験が少なかったことから風冷式が好まれる傾向にある。

3) 最大出力電圧は定格電圧の約2倍が必要となる。

溶融熱源として使用しているアーク電流は炉内状況の変化によりランダムに変化する。操業効率を高めるためにはアーク電流を一定に制御することが必要であり、高速応答制御が求められる。また、図1に示すとおり、定格運転ポイント(低電圧・大電流)に対しアーク切れ寸前には高電

図1 負荷から要求される電源出力特性



圧・小電流の特性が要求されるため、電源装置の最大出力電圧は定格電圧の約2倍が必要となる。

2.2 チョッパ方式の選定理由

従来、灰溶融設備に用いられる整流器はサイリスタ式であった。しかし2.1節で述べた特徴ゆえに大きな力率改善設備を必要とし、設置スペースの増大、コストの増加、効率の低下を招いていた。チョッパシステムを採用することにより、これらの点を大きく改善することができた。

表1に従来方式であるサイリスタ式との比較を示す。チョッパ方式の特長は次のとおりである。

1) 操業力率が高い

サイリスタ方式は整流機能と電流制御機能を同一サイリスタで行っているため、負荷変動に対する制御余裕を考慮した出力とする必要があり、定常時の操業力率が65~75%程度となる。このためプラント設備の要求する力率とするには力率改善コンデンサを設置する必要がある。これに対し、チョッパ方式は40~100%の出力電圧範囲で高力率運転(95%以上)が可能であり、力率改善コンデンサが不要となる。これによって設置スペース縮小が図れる。

2) 高調波発生量が少ない

チョッパ方式の場合、整流器用変圧器を適切に選定すれ



宇都 克哉

製鋼用アーク炉電気設備のエンジニアリング業務に従事。現在、電機システムカンパニー産業・サービス本部産業・計測事業部産業技術部主任。



日野 浩二

パワーエレクトロニクス製品の開発・設計に従事。現在、変電システム製作所パワエレ部。



篠永 春彦

製鋼用アーク炉電気設備のエンジニアリング業務に従事。現在、電機システムカンパニー産業・サービス本部産業・計測事業部産業技術部。

ば7次以上の高調波発生量はサイリスタ整流器に比べ小さくすることができる。また整流器を多重化することにより、低次高調波はキャンセルされ極小とすることができる。

さらにサイリスタ方式では位相制御を行っているため、相間点弧角誤差により非理論高調波が発生するが、ダイオード整流器は理論高調波のみの発生となる。このため、プラント内の電源系統に接続されるコンデンサの過負荷解

表1 電源方式の比較

	サイリスタ整流器+ 力率改善コンデンサ	ダイオード整流器+ チョッパ
結線図		
電力用半導体素子	サイリスタ	ダイオード, IGBTモジュール, 高速ダイオード
力率	65~75%	95%
高調波	多相整流化で対応 (非理論高調波が系統に流出する)	多相整流化で対応
効率	高い	やや低い
制御性能	360 Hz	高速制御(2 kHz以上)
出力電流のリップル	大きい	小さい
大きさ&質量	大きい	小さい

析は理論高調波のみを対象とすればよく、正確な予測ができる。

3) 高速制御が可能である

サイリスタ方式の場合、制御周波数は360 Hz(60 Hz 地区)であるが、チョッパ方式ではIGBTを使用しているため2 kHz以上の高速制御が可能であり、より高精度のアーク電流制御ができる。

2.3 主回路構成

図2に主回路システム構成を示す。

整流回路は位相巻線付き整流器用変圧器とダイオード整流器から構成し、総合24相整流としている。チョッパ回路にはIGBTを採用した。さらにアークの安定化のため直流出力側に直流リアクトルを設置している。また、上位6.6 kV回路には負荷開閉用回路と並列に初期充電回路を設け、変圧器の励磁突入電流とコンデンサへの突入電流の軽減を図っている。整流器用変圧器から直流リアクトルまでの機器はすべて同一のキュービクル内に収納しており、コンパクト化を追求した電源装置となっている。

本装置の外観を図3に示す。

2.4 システム検討の要点

チョッパ方式の回路構成・機器仕様を決定するにあたり、特に重要な事項は以下である。

1) 直流リアクトル定数の決定

プラズマアーク炉では、炉内状況の変化により短絡現象が発生する。サイリスタ方式の場合、短絡過電流時はパル

図2 主回路システム構成

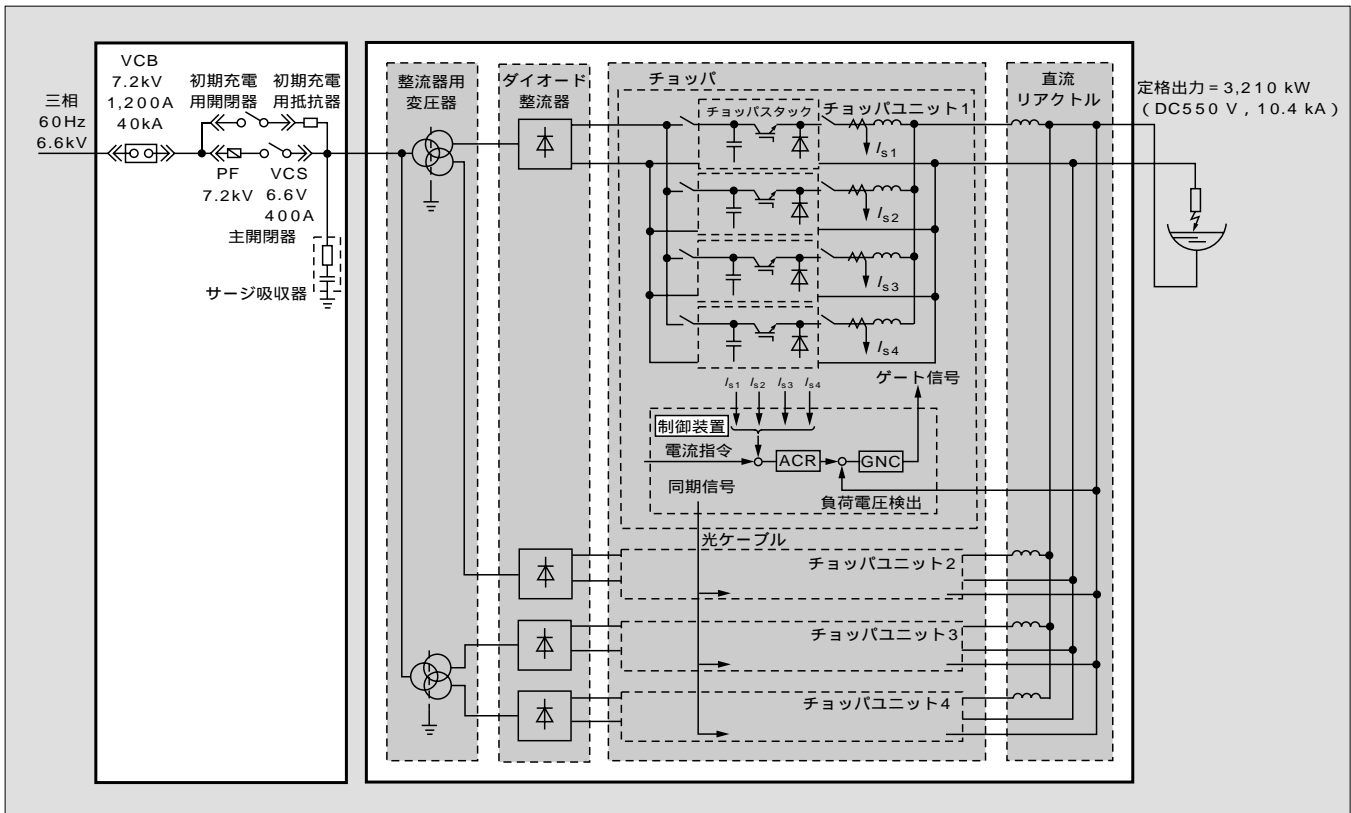
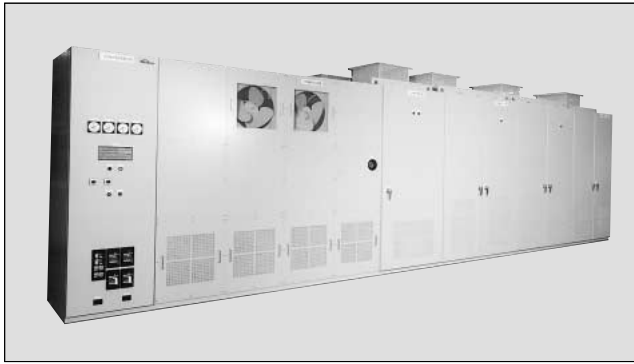
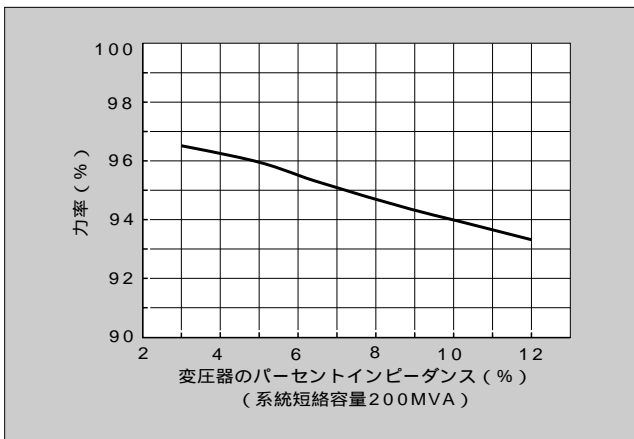


図3 電源装置の外観



N99-2544-1

図4 力率とインピーダンスの関係



スシフトし、逆電圧印加によって減流させることが可能である。しかしチョッパ方式の場合は、負荷回路の定数から決まる減衰特性で電流が減少するだけで抑制機能がない。直流リアクトルの定数決定にあたってはアークの安定化と短絡時の電流減衰特性がフリーホイーリングダイオードに与える責務を考慮した値とする必要がある。

(2) 整流器用変圧器のインピーダンス決定

操業力率は出力状態により若干変化するが、基本的には系統側電源容量と整流器用変圧器の漏れインピーダンスに依存する。図4に12相チョッパシステムの力率特性を示す。整流器用変圧器インピーダンスを決定するにあたっては、力率、短絡耐量、高調波発生量を勘案する必要がある。通常6～7%を選定する。

(3) 初期充電回路

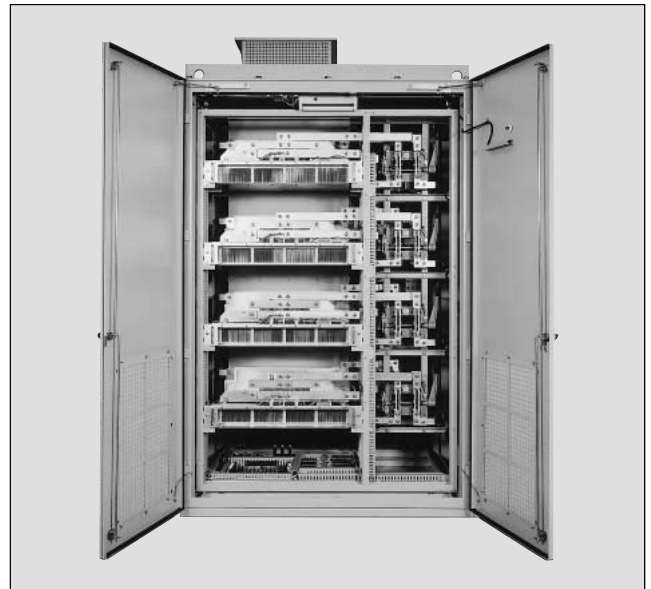
コンデンサインプット形整流器の場合、上位の遮断器を投入すると整流器用変圧器の励磁突入電流にコンデンサへの突入電流が重畳して流れ、整流器用変圧器巻線の機械的損傷とダイオード素子破損の恐れがある。この防止のため、初期充電回路を設ける。

③ IGBT チョッパ

灰溶融用電源システムのハードウェア技術の中心が10kA 超級の大容量チョッパ部である。

本章ではこのチョッパの構成について記述する。

図5 チョッパユニットの外観



N99-2544-3

3.1 ユニットの構成

図2で示した灰溶融設備用電源に使用するチョッパユニットの外観を図5に示す。

チョッパユニットの定格出力電流は2,600 Aで、650 A 定格のIGBT スタックを4並列で構成している。IGBT モジュールを8並列接続して一つのスタックを構成しており、合計128個のIGBT モジュールが並列に接続される。このため、素子間の電流分担の均一化、スタック-ユニット間の横流電流抑制に配慮した設計をする必要がある。

これには以下で対応をしている。

- スタック内8並列モジュール間の V_{CE} 、 V_F の均一化 (スタック内の電流分担の均一化)
- スタック間ブスバーの対称構造 (スタック間の電流分担の均一化)
- ユニット ACR (Automatic Current Regulator) 間の同期運転 (スタック間の電流分担の均一化)
- ユニット間直流リアクトルの設置 (スタック間の横流電流抑制)

また灰溶融炉は連続操業のため、故障時復旧の容易性が要求される。

このため、万一の素子故障時にはスタック前後の断路器で故障部位を切り離し、短時間での運転再開を可能としている。

3.2 IGBT スタック

チョッパ回路に用いる IGBT スタックの外観を図6、諸元を表2に示す。

灰溶融炉はアーク炉電流・電圧特性により、定格運転時には通流率が50%程度となり、電流リップルが最大になる。このため、直流中間コンデンサは高リップル耐量を持つフィルムコンデンサとし、高信頼性・長寿命化を実現した。さ

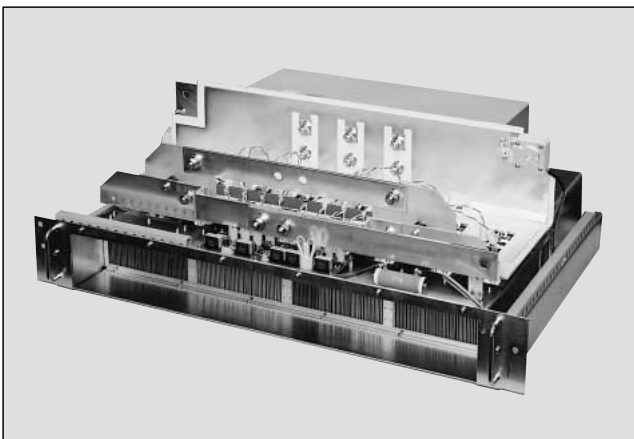
らに、高耐圧モジュール（1,400 V，300 A）の適用および回路インダクタンスの低減を図り、スナバレス化を行った。以下に詳細を述べる。

1) 直流回路インダクタンス低減

従来、半導体素子がターンオフする際に回路中のインダクタンスに蓄積されたエネルギーにより誘起される跳上り電圧（V）を、スナバ回路で吸収していた。

今回、このスナバ回路をなくして回路の簡素化を図るため、チョッパ用途に合わせた構造のラミネートバーを新開発した。これは、P、N ブスバーをきわめて近接配置させ

図6 IGBT スタックの外観

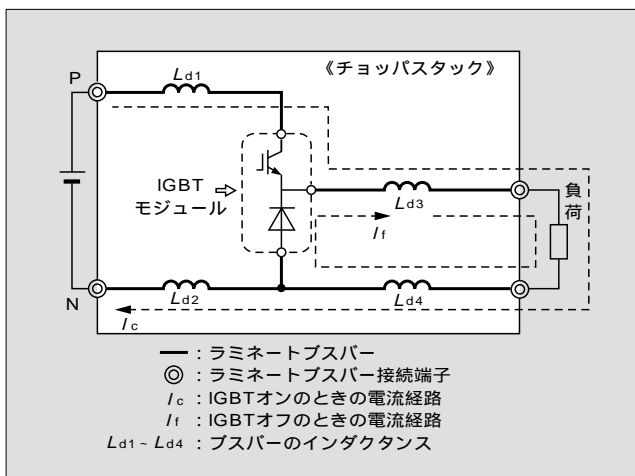


N99-2544-4

表2 IGBTスタックの諸元

電 圧	DC 695 V (最大DC 810 V)
電 流	DC 650 A (連続)
スイッチング周波数	2 kHz
寸 法	970×630×320 (mm)
質 量	93 kg
冷 却	風冷
素 子	2MBi300P-140 (1,400 V, 300 A)
素 子 構 成	1S8P
備 考	スナバレス

図7 回路動作図



ることでインダクタンスを極小化するとともに、大電流によるブスバー近傍筐体（きょうたい）のローカルヒートを抑制できる。

回路動作図を図7、実態図を図8に示す。互いに逆向きの電流（ I_c ）を流すバーを近接配置とし、磁氣的結合を良くするとインダクタンスは低減される。ここで、負荷側のN端子は電源側のN端子と共用させることもできるが、N端子を負荷側にも設けることで、P、Nバー全体を近接配置させることができる。これによりブスバーからの漏れ磁束を低減することができ、この結果スタックを構成する筐体のローカルヒートを防止している。

3.3 冷却技術

冷却方式としては、スタックごとに小型ファンで冷却する方法（個別ファン方式）と、複数のスタックを風洞により並列にし1台の大型ファンで冷却する方法（一括ファン方式）がある。

先に述べたように灰溶融炉は連続運転を行うため、ファンの信頼性、メンテナンス性の観点から管理の容易な一括ファン方式を適用した。本方式の場合、並列スタック間の圧力損失を等しくし、風洞部の圧力損失を低くする必要が

図8 ラミネートブスバー実態図

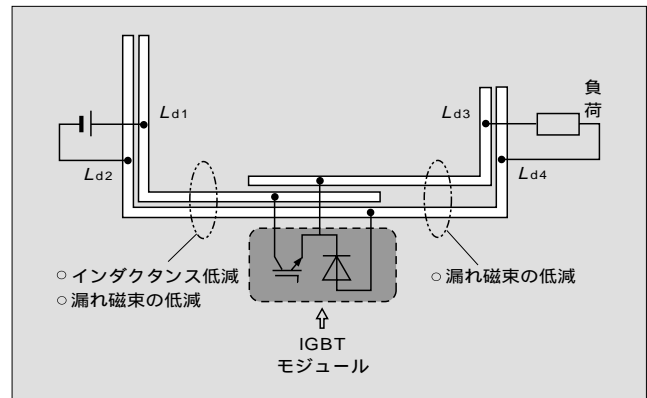
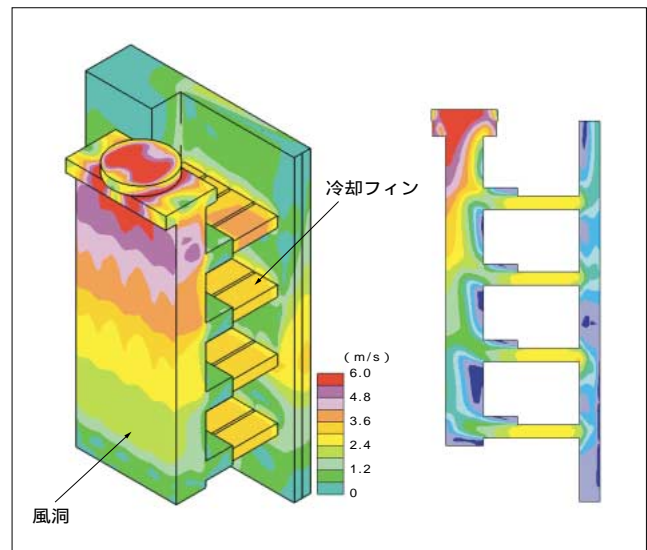


図9 風洞解析結果



ある。しかし、小型化の要求から風洞部を物理的に大きくすることはできない。このため熱流体解析を使い詳細な冷却回路の設計を行い、最適な形状を決定した。

さらに、冷却フィンの前後に風洞を取り付けることで流れる風を整流させ、スタック間の風量の均一化を実現した。

図9に解析結果を示す。この解析結果は風速を色で表しており、冷却フィン部の風速がスタック内、スタック間とも同じ色となることから、均一な風速であることが分かる。

3.4 制御

プラズマアーク炉は、電流が減少（アークが切れよう）すると負荷電圧が上昇する特性を持つ。このとき、負荷電圧以上の電圧を極間に印加しアーク切れが生じないように制御を行う。本制御では、ACR出力に負荷電圧を加える電圧帰還高速制御を行う。また先に述べたように並列ユニッ

ト間の横流を防ぐため、並列チョッパユニット間は光絶縁された同期信号によりIGBTの点弧パルスの同期を行う。

なお、故障復旧時、故障スタックの断路器動作信号を受け、ACRは自動で減流運転を行う方式としている。

④ あとがき

灰溶融用直流プラズマアーク炉にチョッパを適用した電源システムについて紹介した。

今回のチョッパ方式はダイオード整流器との組合せであるが、力率・高調波の問題をさらに追求すると自励式コンバータとの組合せも考えられる。今後とも個別プラントの事情に合わせた、最適なシステムを提案・提供できるよう、一層の努力をしていく所存である。

解説 理論高調波

半導体素子が開閉動作を行うことにより不可避免的に生じる高調波で、利用される状況から正しく発生が予想されるものを指す。

これに対して、素子ごとに点弧のタイミングに狂いがあったり、モータ回転子の偏心により負荷インピー

ダンスが動揺したりすることによる、予期せぬ高調波を非理論高調波という。一般に原因の特定が難しいうえ、特定できたとしても元を断つ形での解決は不可能に近い。

二次電池電力貯蔵用交直変換装置

小松木 和成 (こまつぎ かずなり)

藤倉 政信 (ふじくら まさのぶ)

1 まえがき

ナトリウム-硫黄電池 (以下, NAS 電池と略す) やレドックスフロー電池 (以下, RF 電池と略す) など, 二次電池を用いた電力貯蔵装置の本格的な実用展開が始まるようとしている。

富士電機では, 1995年に 100 kW NAS 電池電力貯蔵用交直変換装置 (以下, PCS (Power Conversion System) と略す) を電力会社の技術研究所に納入して以来, 10セット, 約 2,500 kW の PCS を製作・納入し, 二次電池と PCS の適用評価・改良に貢献してきている。

PCS は電力の負荷平準化を主目的とするが, 二次電池の特長である高サイクル耐量や高速充放電特性などを利用した電力システムの瞬時電圧低下や瞬時停電の補償機能を有するなど, 多目的化が不可欠である。このため, PCS としても二次電池の特性を十分に把握した構成・機能・性能を持つ必要がある。

本稿では PCS の基本構成と基本動作ならびにシステム構成について述べるとともに, 製作事例とシステムの事前

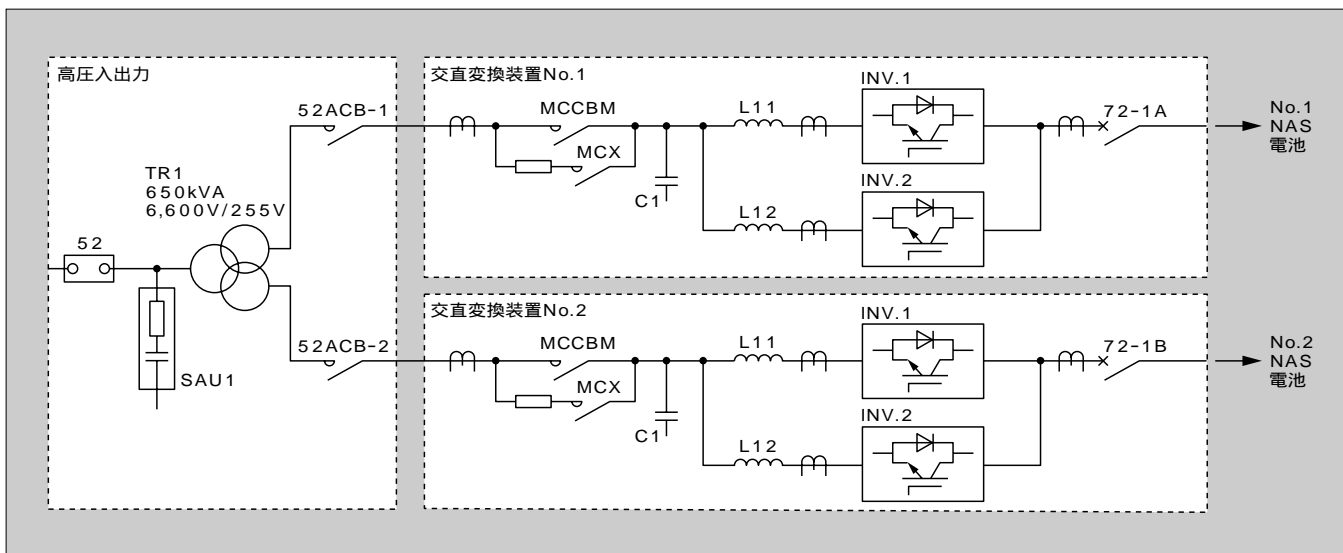
検討に必要な PCS シミュレーション技術および今後の展開について述べる。

2 PCS の基本構成

2.1 主回路構成

500 kW PCS の主回路構成例を図 1 に示す。これは 125 kW パワーユニット 2 並列からなる 250 kW システムを入力変圧器で並列配置させたものであり, 250 kW 単位での充放電動作が可能である。125 kW パワーユニットは三相フルブリッジの PWM (Pulse Width Modulation) コンバータで, その外観を図 2 に示す。使用した IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 素子は 1,400 V/300 A であり, 800 V クラスの直流高電圧に対応し, 約 10 kHz の高周波動作が可能である。このパワーユニットは, パワーデバイスとその駆動回路, 冷却体, 素子保護用のスナバ回路, ヒューズ, 電解コンデンサなどを高密度に集積した小型のものである。また, プラグインタイプでの主回路接続とするなど, メンテナンスが容易な構造にしてある。

図 1 500 kW PCS の主回路構成例



小松木 和成

パワーエレクトロニクス機器の技術企画に従事。現在, 電機システムカンパニー電力システム本部電力流通システム事業部電力ソリューション部。電気学会会員。



藤倉 政信

UPS・パワーエレクトロニクス製品の開発設計に従事。現在, 東京システム製作所開発設計部主任。電気学会会員。

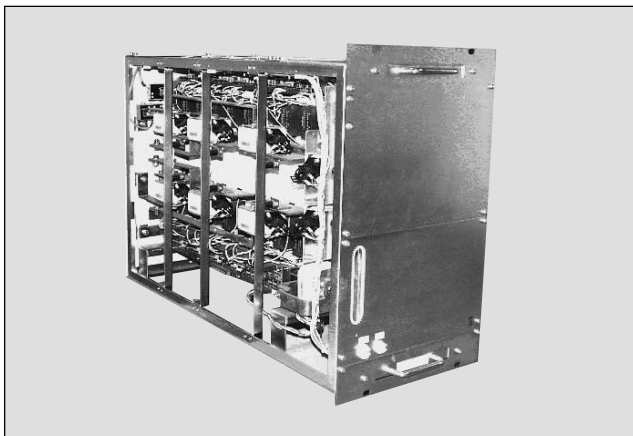
2.2 制御装置（制御方式）

充放電制御を行う基本的な制御回路ブロックを図3に示す。これは、電力貯蔵システムを統括する監視制御装置からの制御信号を受け、PCSとして要求される充放電制御を行う制御回路の基本回路例である。PCSの入出力電流は、充放電電力量に応じたほぼ力率1の正弦波電流となる。充放電動作は、PCSの出力電圧の位相を系統入力電圧位相より遅らせることで充電動作を、進み位相とすることで放電動作を実行させている。この制御回路の特徴は、無停電電源装置（UPS：Uninterruptible Power System）の技術である直流電圧調節系を有し、二次電池の充電電圧を制限できることである。

③ PCSのシステム構成

PWMコンバータで構成するPCSは、その主要機能から次の三つのシステム形態に大別される。これらの概略システム構成と特徴を表1に示す。

図2 125 kW パワーユニットの外観



3.1 電力貯蔵の基本形

PCSの基本構成であり、次項を主目的とする。

① 電力の負荷平準化：昼夜間電力料金差を利用した使用電力料金の低減

② 電力ピークカット：契約電力の低減

一方、二次電池の高サイクル耐量や高速応答性を生かすべくPCSの高速充放電化を図ることで、太陽光発電や風力発電などの自然エネルギーを利用した発電設備の商用連系時の変動発電電力の平準化や商用電力の高品位化にも有効なシステム構成となる。

また、PCSに自立運転機能を持たせることで、商用系停電時には瞬断を許容する非常用電源装置として機能させることができる。

3.2 常時商用給電UPS形（SPS形）

PCSの基本的な電力制御に加え、特定負荷に対して4ms程度の瞬断は許容する無瞬断電源を構成する。

商用系が瞬時電圧低下など異常となった場合、高速にACスイッチを開放し、特定負荷に二次電池からの電力を無瞬断で交流電力に変換し供給できる。

これは、富士電機が早くから商品化している常時商用給電方式無停電電源装置（SPS：Stand by Power System）と同一方式であり、二次電池の持つ特長を最大限に展開するシステムである。

3.3 常時インバータ給電UPS形（UPS形）

商用入力側のコンバータを用いて二次電池への充放電動作を行いつつ、負荷出力側のインバータを用いて重要負荷に対し無瞬断かつ安定化した交流電源を供給するシステム構成である。これは富士電機が長年にわたり培ってきたUPS技術の応用事例である。通常のUPSに比べ、このシステムではコンバータ側の装置容量が大きくなる。

図3 制御回路ブロック

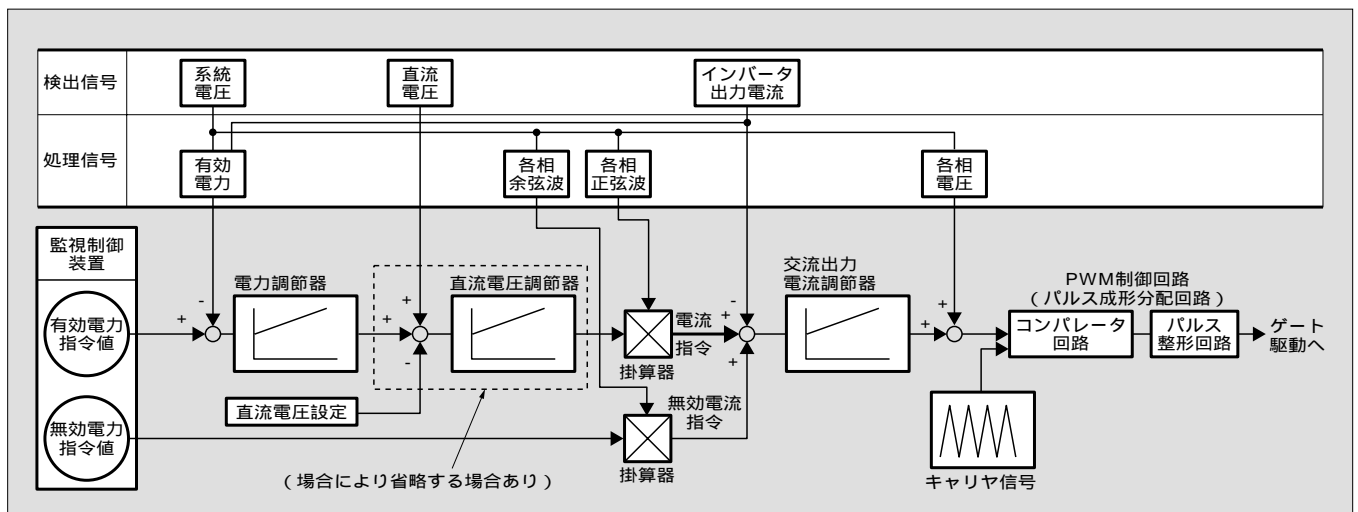


表1 概略システム構成と特徴

	電力貯蔵の基本形	SPS形	UPS形
システム構成			
特徴など		特定負荷への無瞬断電源（2～4msの瞬断）の構築	特定負荷への無瞬断・安定化電源（電圧、周波数）の構築
	基本機能：放電・充電機能（ピークカット、負荷追従制御）、無効電力制御機能 自立運転機能：並列負荷に対する有瞬断による電源供給 並列分散電源をシステムにて連系系統への発電電力量の平準化や電力制御		

表2 PCS 納入事例の仕様概要

	装置名 (屋内または屋外, 納入年月)	連系 系統電圧	変換器 入力電圧	放電時/充電時 直流電圧動作範囲	制御方式	放電時/充電時 変換効率
1	100kW 電力貯蔵用交直変換装置 (屋内, 1995-11)	440V	84V	140～200V /140～250V	直流側定電力制御または 直流側定電流制御	93/93%
2	50kW 電池評価用 PCS 装置 (屋内, 1997-3)	210V	72V	119～149V /136～164V	交流側定電力制御または 直流側定電力制御	93/93%
3	30kW 鉛蓄電池電力貯蔵用 PCS (屋内, 1997-11)	440V	170V	330～403V /330～506V	放電：AC 定電力または DC 定電流制御 充電：DC 定電流または DC 定電圧制御	90/88%
4	200kW 交直変換装置 (屋外, 1997-12)	6,600V	130V	256～332V /369～431V	交流側定電力制御	93/93%
5	50kW 交直変換装置 (屋外, 1998-4)	6,600V	60V	128～166V /184～216V	交流側定電力制御	93/93%
6	多目的 DC 電源 (PCS) (屋内, 1998-3)	210V	59V	充放電共通 98～220V	直流側定電力制御または 直流側定電流制御	90/90%
7	500kW 交直変換装置 (屋外, 1998-6)	6,600V	255V	490～660V /580～755V	交流側定電力制御	93/93%
8	250kW 交直変換装置 (屋外, 1998-12)	6,600V	255V	490～660V /580～755V	交流側定電力制御	93/93%
9	500kW 交直変換装置 × 2 (屋外, 1999-11)	6,600V	255V	490～660V /580～755V	交流側定電力制御	93/93%

4 製作事例

4.1 納入仕様

PCS 納入事例にみる仕様概要を表 2 に示す。この表から、電池電圧や制御方式が当初は二次電池や PCS の評価のためさまざまであるが、実用化が開始されたここ 2, 3 年では次第に固まりつつある様子が分かる。これは、本格的な実用化展開に向けた二次電池のモジュール電池の大容量化と標準化や PCS の制御機能と制御点の標準化の現れである。

4.2 外観

500 kW NAS 電池電力貯蔵システムの屋外盤の外観を図 4 に示す。このシステムは日本ガイシ(株)に1998年6月に設置されたもので、ビル設備実運用の最初のシステムであ

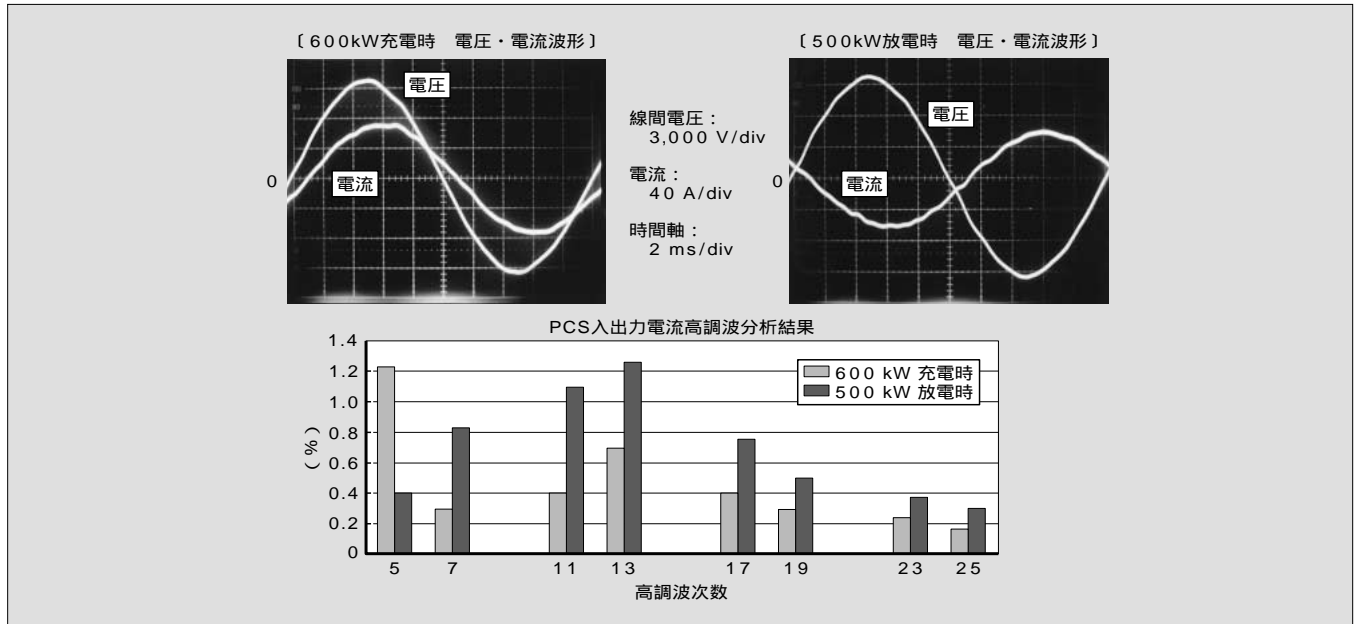
図4 500 kW NAS 電池電力貯蔵システムの外観



る。

この PCS は 250 kW PCS の前背面配置の構成であり、

図5 充電時電圧・電流動作波形と電流波形の周波数分析結果



写真にある交直変換装置の大きさは監視制御装置関係を含めて、幅1,900×奥行2,400×高さ2,400 (mm)である。

4.3 動作波形式例

工場試験時での500kW PCSの充電時電圧・電流動作波形と電流波形の周波数分析結果を図5に示す。

これらから、PCSの充電時入出力電流はほぼ正弦波波形に制御されており、高調波電流抑制技術指針を満足している。

5 シミュレーション技術

PCSをはじめパワーエレクトロニクス装置において装置単体や系統連系時の動作を事前に把握することは重要かつ不可欠であり、そのためのシミュレーション技術は必要な技術の一つである。

ここでは「富士アクティブフィルタ」のシミュレーション技術を応用展開したPCS動作解析用のPWMコンバータのシミュレーション技術について概説する。なお、これらのシミュレーションプログラムはBasic言語にて自作したものである。

5.1 適用回路構成

シミュレーション解析する制御回路は図3に示した制御ブロックの各調節器などを状態方程式で表現した。また、PWM制御回路は実機で採用した正弦波三角波比較方式にならない、キャリア周波数7.8kHzのスイッチングで主回路である三相フルブリッジコンバータの各アームの点弧と消弧を決定している。このとき、上下アーム間の短絡防止時間や適用デバイスによる点消弧時間を考慮している。

主回路系の解析では、交直変換動作で推移する直流側電解コンデンサ電圧値を基準に、制御系で決定されるスイ

図6 シミュレーション時定数入力画面例



チング関数に基づいて表現される相電圧源で三相フルブリッジ回路を表現している。この相電圧源ならびに交流リアクトルとコンデンサおよび変圧器漏れインダクタンスからなるキャリア周波数除去フィルタ系の三相主回路を状態方程式を用い解析している。

これらのシミュレーション手法にて、比較的短時間の計算時間でPCSの制御系を含めた主回路動作解析ならびに三相フルブリッジコンバータの素子通過電流責務、電解コンデンサのリプル電流責務などの解析を可能とさせている。

5.2 シミュレーション事例

500kW PCSのシミュレーション解析例について述べる。定数入力画面例を図6に、600kW充電時と500kW放電時それぞれの入出力電流波形とその周波数解析結果を図7に示す。これらの結果は図5の実動作波形と類似している。

図8は解析中の動作波形表示例と、三相フルブリッジコンバータのUアームおよびXアームの上下アームに着目し

図7 シミュレーション入出力電流波形とその周波数解析結果

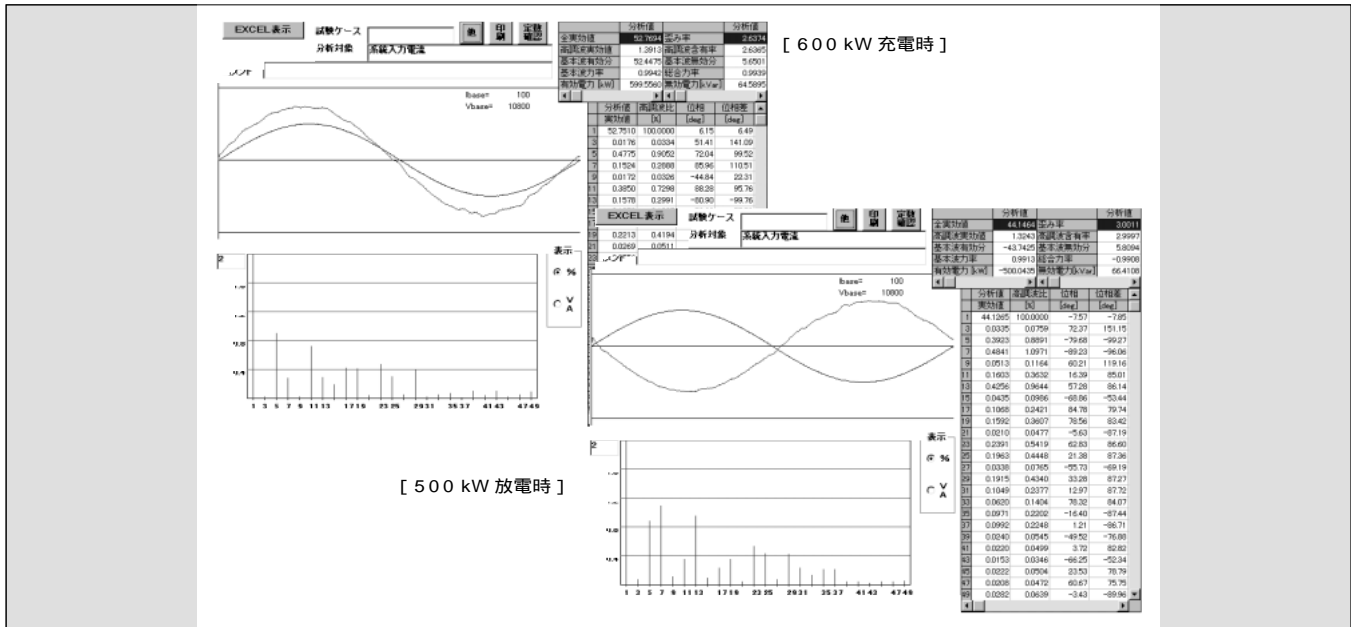
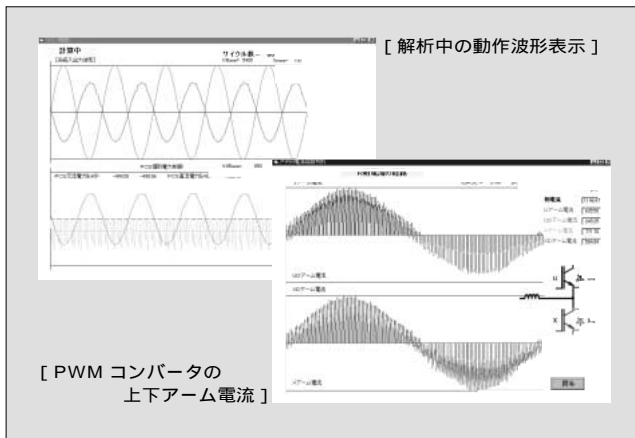


図8 シミュレーション上下アーム通過電流波形



た通過電流波形を示しており、電解コンデンサ電流や二次電池側への電流波形、想定条件でのトランジスタと逆並列ダイオードのアーム電流分担などが予測できる。

このシミュレーションでは PCS の位相制御も考慮可能であり、自然エネルギー発電の変動発電電力による周波数

変動に対する PCS の効果なども予測可能である。

⑥ あとがき

システム構成で述べた機能のうち、新エネルギー発電などによる変動発電電力を平準化する瞬時電力制御機能や瞬時電圧低下・瞬時停電補償などの電力高品位化機能は今後の本格的実用化に際しての切り札の一つになると考えている。その際、本来の負荷平準化機能との蓄電エネルギーの利用分担などシステム運用上の工夫が必要となる。

今後はこれらシステム運用上の課題整理とその解決、電池電力貯蔵装置の低コスト化に向けた二次電池と PCS の仕様整合など、本格的実用化が進むべく PCS メーカーとして努力していく所存である。

参考文献

- 1) 藤倉政信, 松永和喜・双方向インバータの電力貯蔵システムへの適用技術・富士時報・vol.71, no.7, 1998, p.421-423.

揚水発電電動機用始動装置

大隈 謙二(おおくま けんじ)

森山 琴也(もりやま きんや)

篠原 博(しのはら ひろし)

1 まえがき

インド・マハラシュトラ州灌漑(かんがい)局(GOMID)向けガトガール(Ghatghar)発電所は、139 MWフランシス形ポンプ水車・発電電動機2台が設置される地下式揚水発電所である。揚水発電所においてはポンプ運転時、系統にじょう乱を与えないようスムーズな始動を行うために始動装置が設けられている。

揚水発電電動機の始動には幾つかの方式があるが、近年次に記す利点により、国内・海外を問わずサイリスタ始動方式が採用されている。

- 1) 1台の装置で複数の主機を切り換えて始動することができ、経済的である。
- 2) 直結電動機始動方式に比べて軸長が短く、軸系の臨界速度が高くなるため、軸振れ・振動の面からの制約が少なくなり、特に高速機において発電電動機の経済設計を図ることができる。
- 3) 主機運転中は直結電動機と異なり、主機から切り離されているため損失が少ない。
- 4) 装置が静止形であり、保守が容易になる。
- 5) 主機停止過程時に回生制動が行えるため、始動・停止の頻度が高い揚水発電所において機械ブレーキの寿命が長くなる。

しかしながらこのサイリスタ始動装置は構成機器が多く、かつ各機器の寸法も大きいため、地下式発電所の土木工事費を増大させる要因となることから、装置の小型化が望まれている。富士電機では過去に揚水発電電動機用としてサイリスタ始動装置を南アフリカ・パルミエット発電所に納入しているが、本稿にて紹介する揚水発電電動機用始動装置は、最新の技術を採用し、据付け面積を従来装置と比較し76%に縮小することができ、土木費の削減に寄与している。本装置の製作にあたっては、設計・製作段階での品質確保に努め、最終性能確認のために各構成機器を組み合わせ、工場での総合性能試験を実施している。

富士電機製始動装置の主な特徴は次のとおりである。

- 1) 7kVサイリスタ素子を使用している。

- 2) 光間接点弧方式の採用により、素子ごとの故障判別およびBOD(Break Over Diode)による過電圧保護が可能である。
- 3) シリーズ化されたサイリスタ素子で構成されているため、素子選択に自由度があり、より小型、経済的に設計可能である。
- 4) 64ビットRISC(Reduced Instruction Set Computer)とDSP(Digital Signal Processor)により高速制御システムを実現している。
- 5) ソフトウェアの設計にEDA(Electronic Design Automation)ツールを採用し、設計、机上シミュレーション、実制御装置試験まで人を介在させず、高信頼性、経済性を追求している。
- 6) RAS(Reliability, Availability, Serviceability)機能を充実させている。

2 定格と仕様

発電電動機およびサイリスタ始動装置それぞれの定格と仕様を表1、表2に示す。

3 構成機器

主回路構成を図1に示す。構成は始動装置1台で2台の発電電動機に対して切り換えて使用できる方式としている。

表1 発電電動機の定格と仕様

型 式	立軸三相同期発電電動機
台 数	2台
最大出力	発電機：147 MVA，電動機：150 MW
電 圧	13.8 kV
力 率	発電機：0.9，電動機：1.0
周 波 数	50 Hz
回 転 速 度	500 r/min
はずみ車効果	1,600 t·m ²



大隈 謙二

水力発電プラントのエンジニアリングに従事。現在、富士・フォイトハイドロ(株)技術部マネージャー。



森山 琴也

パワーエレクトロニクス製品の開発・設計に従事。現在、変電システム製作所パワエレ部。



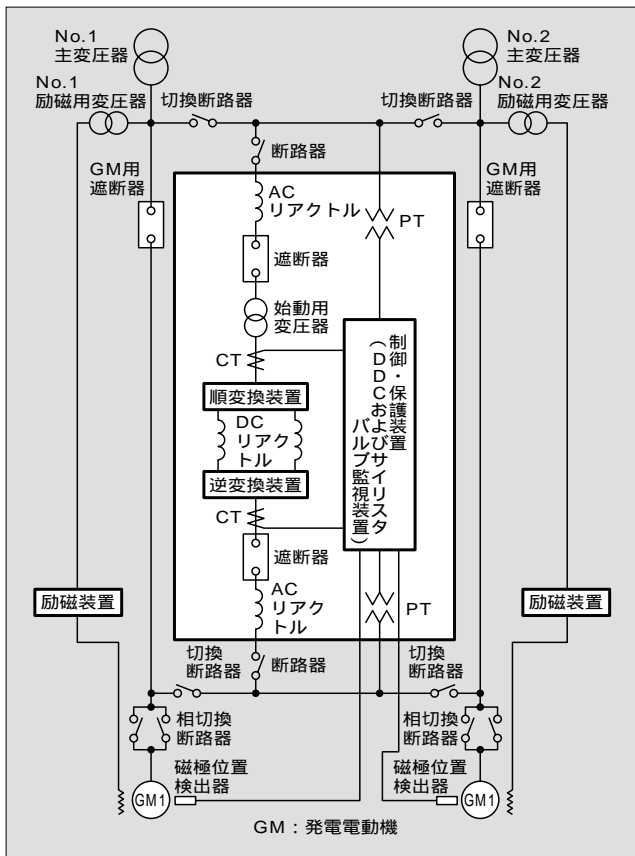
篠原 博

パワーエレクトロニクス、大容量電力変換装置の開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所パワーエレクトロニクス研究所。電気学会会員。

表 2 サイリスタ始動装置の定格と仕様

出力	8.5 MW
直流電圧	14.08 kV
直流電流	605 A
周波数	50 Hz
交流電圧	13.8 kV
交流電流	494 A
時間定格	30分
加速/減速時間	240/150秒
冷却方式	純水水冷却
変換装置構成	三相純ブリッジ 9S1P6A
素子仕様	7 kV 1.3 kA 光間接点弧方式

図 1 主回路構成



3.1 変換装置

順変換装置と逆変換装置は、それぞれ7kVサイリスタ素子で9S1P6Aからなる三相純ブリッジで構成される(外観を図2に示す)。揚水発電所向け用途としては設置スペースを最小化することが命題となるが、今回は高耐圧サイリスタの採用により装置の小型化を達成している。また、信頼性の確保と故障発生時の迅速な対応も要求されるため、サイリスタの点弧方式には保護および監視機能に優れた光間接方式を採用した。

3.1.1 サイリスタ

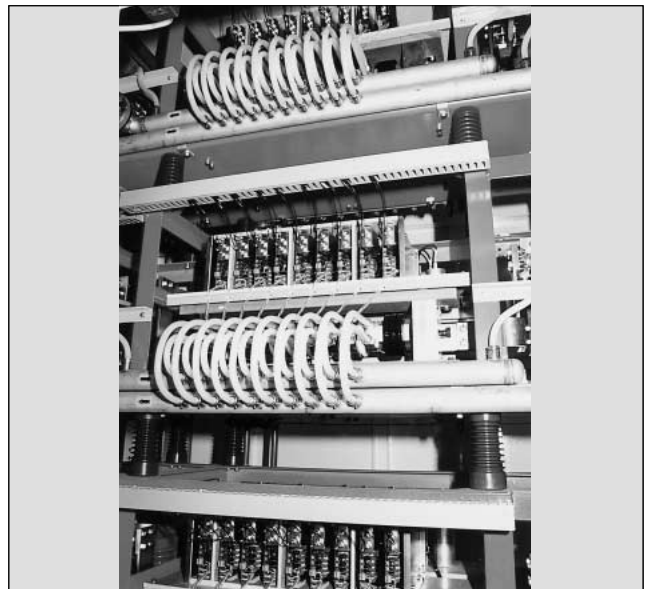
サイリスタには7kV、1.3kAの高耐圧サイリスタを採用し、1アームあたり9直列とした。さらに9直列のサイ

図 2 変換装置の外観



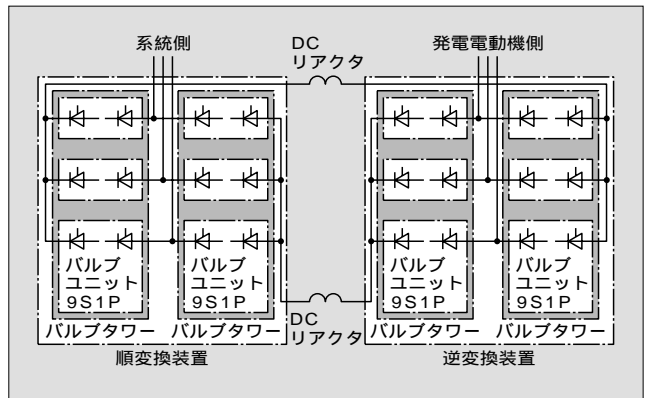
AM189412

図 3 バルブユニットの外観



AM189409

図 4 変換装置の内部構成



リスタを一つのバルブユニット(図3)とし、図4のように変換装置内を二つのバルブタワーの構成とすることが可能となった。このことにより、当社従来型と比べて設置面積で76%、体積で60%の小型化を達成した。

高耐圧サイリスタの点弧方式には、光間接方式と光直接方式があるが、次の特徴により光間接方式を採用した。

- ① 点弧・保護装置をサイリスタごとにその直近に置いているため、サイリスタの保護・監視性能に優れる。
- ② 制御装置からの光信号を低エネルギーとすることで、経済性・信頼性に優れる。

3) 揚水発電用途に適した 1.5 kA 級のシリーズ化された高耐圧サイリスタが選定可能である。

3.1.2 点弧・保護装置

点弧・保護装置の外観を図 5 に示す。この回路の主機能は、低圧側制御装置からの光信号を受けてパルスを整形・発生するものであるが、サイリスタ直近に置かれることで、以下の優れた保護・監視機能を持つことが可能となっている(図 6 参照)。

1) 過電圧保護回路

サイリスタの過電圧を検出して、BOD による自己点弧パルスを発生し、自らサイリスタを点弧させることで過電圧から保護する。

2) 返送信号による状態監視

サイリスタへの点弧パルスから直接光信号を発生させ、低圧側の故障監視装置に返送する。返送される信号は正規点弧パルスと自己点弧パルスの 2 種類となる。これを故障

図 5 点弧・保護装置の外観

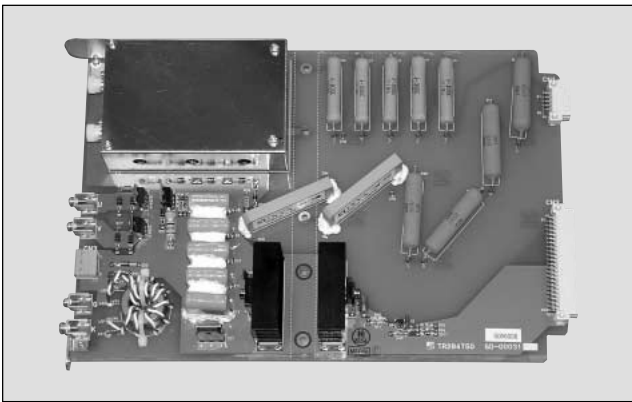


図 6 点弧・保護装置の機能ブロック図

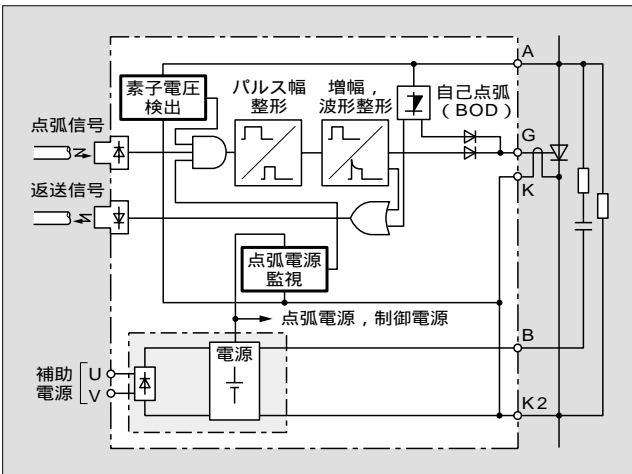


表 3 返送信号の種類とバルブの状態

返送信号	自己点弧パルス	
	有	無
正規点弧パルス	有	正常
	無	点弧系故障

監視装置で判別することにより、バルブを表 3 に示す四つの状態に分類して監視することが可能である。この情報により、万一の故障発生時には故障箇所の特定が容易になるため、迅速な対応が可能である。

3) 逆電圧期間中のパルス発生抑制

逆電圧期間中のサイリスタに点弧パルスが加わると、サイリスタの漏れ電流が増加し、直列素子間の電圧分担が不平衡となる。本点弧・保護装置では、サイリスタへの印加電圧を監視し、逆電圧期間中はパルスを発生させない機能を持つため、電圧分担が不平衡となることがない。

3.1.3 自己点弧時の回路動作

前項で述べた本変換装置の特徴である自己点弧について、回路解析による設計手法を試験結果と合わせて述べる。

自己点弧時の動作で最も厳しい条件として、アーム内の 1 素子だけ点弧できず、他のサイリスタがすべて点弧した場合を考える。そのときの回路は図 7 a となる。設計条件としては、非点弧サイリスタの電圧上昇率がサイリスタの許容値を超えないこと、自己点弧時のサイリスタ電圧が許容値を超えないよう、自己点弧パルス発生までの遅れ時間を考慮して過電圧検出レベルを設定すること、の 2 点となる。

この過電圧検出レベル (V_{BOD}) については、サイリスタの許容電圧上昇率 (dV_{Thp}/dt) とパルス発生遅れ時間 (t_d) により、

$$V_{BOD} = dV_{Thp}/dt \times t_d + V_p$$

から容易に求めることができる(ここで、 V_p は定常時のサイリスタ最高電圧)。

この電圧上昇率については、さらに詳細な解析が必要となる。

一般的に高圧の変換装置の過渡現象では、寄生容量 (C_{it}) が無視できない存在であるが、この場合においても C_{it} からの突入電流がサイリスタの電圧上昇率を決める主要因となる。この突入電流の抑制はアノードリアクトルによってなされる。よって電圧上昇率を許容値以下とするためには、最適なアノードリアクトルのインダクタンスを選定することが重要となる。以下にこの解析手法を述べる。

図 7 a の回路を近似的に図 7 b のように置き換えると、次の回路方程式となる。

図 7 自己点弧時の回路モデル

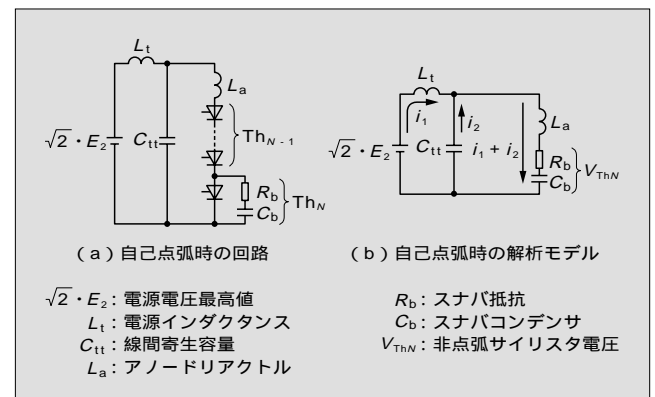
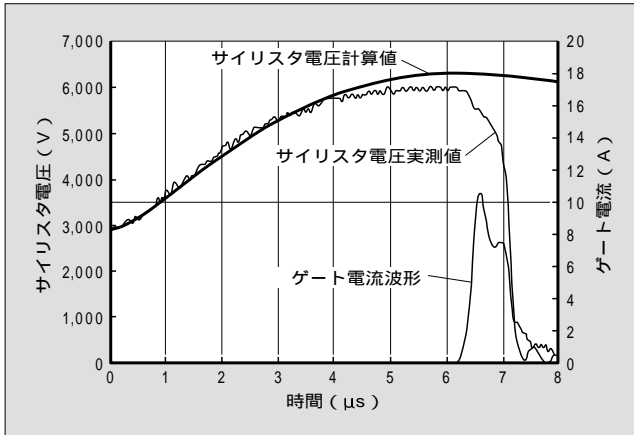


図8 自己点弧時の解析結果と実測波形



$$(L_t + L_a) \frac{di_1}{dt} + L_a \frac{di_2}{dt} + R_t(i_1 + i_2) + \frac{1}{C_b} \int (i_1 + i_2) dt = \sqrt{2} E_2$$

$$L_t \frac{di_1}{dt} - \frac{1}{C_{tt}} \int i_2 dt = \sqrt{2} E_2$$

このとき、非点弧サイリスタ (Th_N) の電圧上昇率は次式で求められる。

$$\frac{dV_{ThN}}{dt} = \frac{d}{dt} \left(R_t(i_1 + i_2) \right) + \frac{1}{C_s} (i_1 + i_2)$$

これらを数値解析することにより、最適なアノードリアクトルの定数選定を行った。

特に解析の有効性を保つためには、寄生容量を正確に把握することが必要である。また、解析結果からアノードリアクトルを選定するときには、その周波数特性を考慮したうえで選定しなければならない。

図8に解析結果を試験時の実際の波形と合わせて示す。解析条件であるサイリスタの点弧以前(ゲート電流発生以前)までは両者のよい一致が見られ、解析の有効性が確認された。

3.2 付属装置

変換装置側での短絡事故時の短絡電流抑制のためにACリアクトルを設置する。本始動装置においては保守面で優れた空心乾式タイプのリアクトルを採用した。リアクトルはアルミニウムの巻線をコンクリート状の樹脂で強固に固め、上下に張った放射状のアルミニウム製スパイダで強度を確保する構造をとっている。

リアクトルは三相分をがいしで3段積みにしてキュービクルに収納するため、設計段階で特に温度上昇について留意するとともに、工場で温度試験を実施し性能を確認した。

始動用変圧器は電源と変換器との間を絶縁するために設ける。始動変圧器のインピーダンスも短絡電流抑制に寄与するため、電源側のリアクトルの値は変圧器のインピーダンスも考慮して決定する。

順変換器、逆変換器の間にはP側、N側に直流リアクトルを設置している。これは変換器出力電流リップルの平滑および変換器の転流失敗時においても過電流継電器が動作しないよう過電流を抑制する効果を持つ。ACリアクトルと

同様に空心乾式タイプを採用した。

3.3 制御装置

3.3.1 制御装置の特徴

制御装置としては、演算の高速化、多様なプラント仕様への対応、ソフトウェア開発の効率向上、RAS機能の充実などの理由により、主に電力や一般産業向け大容量変換装置用に適用することを目的とした自社製の標準制御装置を使用している。この制御装置は次に記す特徴を持っている。

1) 最新のマイクロエレクトロニクス技術の導入

統括制御用64ビットRISCプロセッサと変換器制御用32ビットDSPの2種類の浮動小数点演算プロセッサを使用している。これらのプロセッサは並列動作し、入出力モジュールの共有化やバックアップも可能である。

2) 機能の集約とフレキシビリティの共存

アナログ入出力(AIO)、デジタル入出力(DIO)、パルス分配など各モジュールごとにハードウェアを完結し、モジュール内の結合度を高めている。モジュール相互間は高速シリアル伝送によって結合し、物理的にも論理的にも自由に配置可能としている。また、変換器制御の要(かなめ)であるパルス分配部分は、多様なゲートパルス生成に対応できるように、専用プロセッサとFPGA(Field Programmable Gate Array)で構成している。

3) ソフトウェア開発の自動化

制御CADとして広く使用されているMATLAB^{注1}/Simulink^{注2}で設計・シミュレーション検証を行ったプログラムから、制御装置内プロセッサ用の実行コードを自動作成するEDA環境を整備した。このEDA環境により、シミュレーションから実行コードまで首尾一貫性を保ち、ソフトウェアの信頼性・視認性を高めるとともに、制御機能の追加・削減などの仕様変更に対応できるようにしている。

4) RAS機能の充実

システムの稼働率を高める機能を一般にRAS機能と称する。この制御装置ではハードウェアの自己診断機能により電源投入時および運転中の診断が可能である。またプロセッサ間の相互監視を行っているため、故障したプロセッサに代わり、システムの安全停止や一部機能を停止させたうえでの縮退運転も可能である。またアナログ信号・デジタル信号・ゲートパルス信号の変化を1μsの分解能で記録でき、異常現象発生前後の情報を用いた故障解析を容易にしている。

3.3.2 ハードウェア構成

始動装置用制御装置は、順変換装置と逆変換装置の制御を極力分離独立させるために図9に示す構成とした。各ボードは次の役割を分担する。

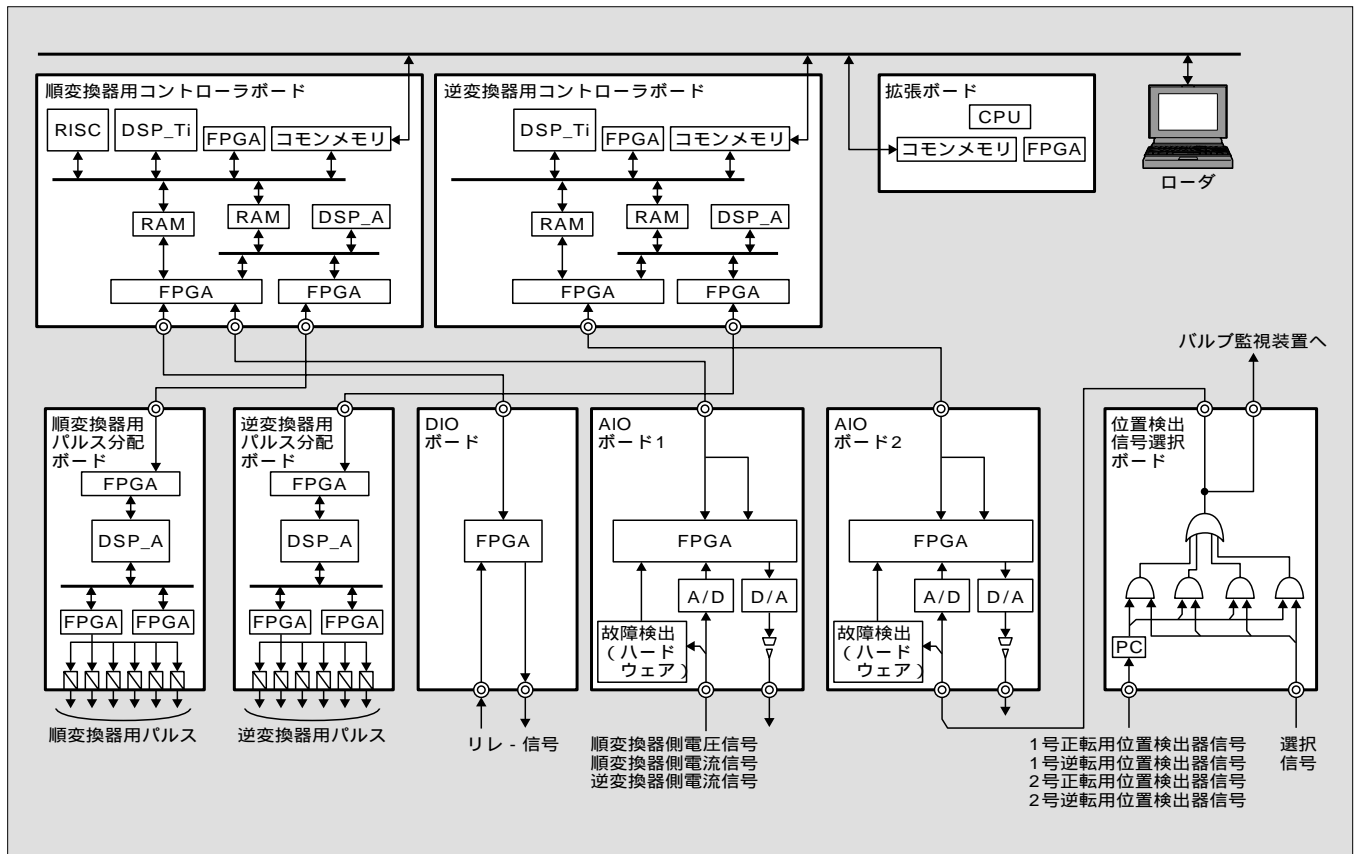
1) 順変換装置用コントローラボード

RISCプロセッサとDSPで構成される。RISCプロセッ

注1 MATLAB: 米国 The MathWorks Inc.の登録商標

注2 Simulink: 米国 The MathWorks Inc.の登録商標

図9 ハードウェアの構成



サは全体シーケンスを、DSPは順変換装置の制御・保護を担当して、電流制御、揃速(せんそく)運転時の速度制御などを実行する。

(2) 逆変換装置用コントローラボード

DSPで構成され、逆変換装置のパルス分配制御と保護を担当する。

(3) AIOボード

順変換装置と逆変換装置の制御・保護のためのアナログ信号インタフェースとして機能し、各部の電圧・電流信号や位置検出信号を入力する。

(4) DIOボード

起動・停止信号や運転モード選択信号などのシーケンス信号を入力する。また過電流、過負荷、転流失敗など内部で演算検出する故障信号を出力する。

(5) パルス分配ボード

順変換装置と逆変換装置のゲートパルスを演算し、光信号として出力する。

(6) 位置検出器選択ユニット

発電電動機は水車回転方向とポンプ回転方向用の回転子磁極位置検出器を備えている。本ユニットは選択される号機とその回転方向に適した位置検出信号を選択する。

4 制御方式

4.1 制御の概要

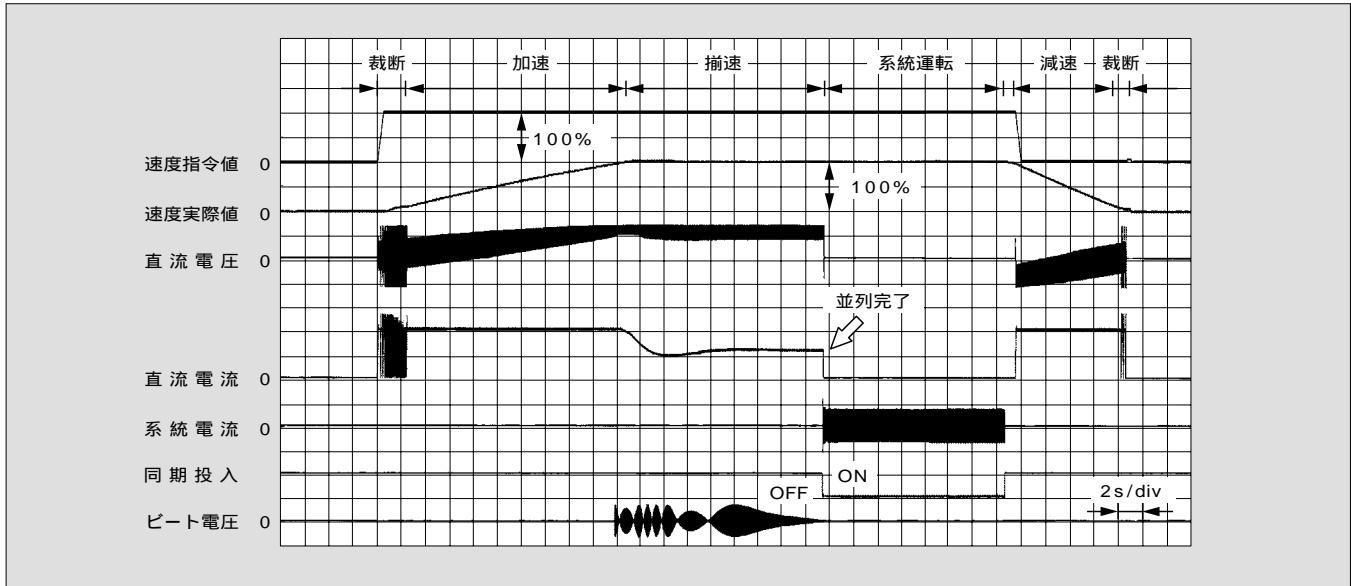
4.1.1 始動(裁断制御)

- 1) 始動装置に対し始動指令が与えられると、発電電動機の界磁巻線に一定の励磁電流が供給される。
- 2) 始動装置のDDC(制御装置)から順変換装置のサイリスタにゲート信号が与えられ直流電流が供給される。
- 3) 回転子磁極位置検出器の信号により、逆変換装置サイリスタの通電相を決定し、三相交流電流を供給することにより始動トルクが発生する。
- 4) 始動初期は発電電動機の誘起電圧が低いため、サイリスタが転流できない。そこで順変換装置側で強制的に電流を絞り、逆変換装置のサイリスタをオフさせる。その後再び逆変換装置のサイリスタの通電相を切り換えた後、直流電流を立ち上げ、裁断制御を行う。この裁断制御はサイリスタの転流に必要な誘起電圧が得られる回転速度(10%程度)まで行われる。

4.1.2 加速(回転機転流制御)

- 1) 裁断制御により回転速度が上昇し、発電電動機の誘起電圧がサイリスタの転流に必要な値に達すると逆変換装置は回転子磁極位置検出器の信号により順次転流し、発電電動機を加速させていく。
- 2) この期間は逆変換装置の制御角を、ほぼ一定に制御

図 10 モデル試験結果



する。また順変換装置の制御角を加速に伴い小さくすることにより直流電流値を一定に保つ。

4.1.3 揃速制御，並列

- (1) 発電電動機の回転速度がほぼ同期速度に達すると，揃速制御に移行する。系統周波数と発電電動機周波数との偏差に応じて，順変換装置により発電電動機の回転速度を制御し，また自動電圧調整装置により系統電圧と発電電動機電圧との偏差に応じて界磁電流を制御し，周波数，電圧を一致させる。
- (2) 周波数，電圧が一致し，同期投入条件が成立すると，順変換器のゲートシフトを行い，直流電流をゼロにするとともに順変換装置，逆変換装置のゲートをブロックする。
- (3) 同時に発電機遮断器を閉路し，始動装置の電源側，駆動機側遮断器を開路する。

4.1.4 回生制動制御

加速時と同様に順変換装置の制御角を制御することにより電力回生制御ができるため発電電動機停止時の制動装置として使用できる。

始動装置に減速指令が与えられると発電電動機の回転工

ネルギーは電力として電源側に回生されるため回転速度は低下し，数%の速度に降下すると機械ブレーキが動作する。

4.2 モデル試験結果

工場でのモデル試験時のオシログラムを図10に示す。

5 あとがき

本稿では，ガトガール揚水発電所向け始動装置の概要を紹介した。ここで紹介した技術は今後の揚水発電技術に大いに寄与するものと確信する。

終わりに，本発電所向け機器の計画・製作にあたり，関係各位から有益なご指導とご協力を賜ったことに対し深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 奥野貴之ほか，大容量発電電動機及びサイリスタ始動装置（パルミエット揚水発電所向け）．富士時報．vol.60，no.5，1987，p.378-383．

無効電力補償装置

小西 茂雄(こにし しげお)

馬場 謙二(ばば けんじ)

大宮司 充(だいぐうじ みつる)

1 まえがき

近年、パワーエレクトロニクスを駆使した静止形無効電力補償装置（SVC）は、電力系統において電圧変動抑制、系統安定化、調相、電圧フリッカ抑制、不平衡補償などの目的で電力、産業、電気鉄道の各分野で幅広く適用されている。

本稿では、このSVCの最近の技術動向、変換装置技術および適用例について述べる。

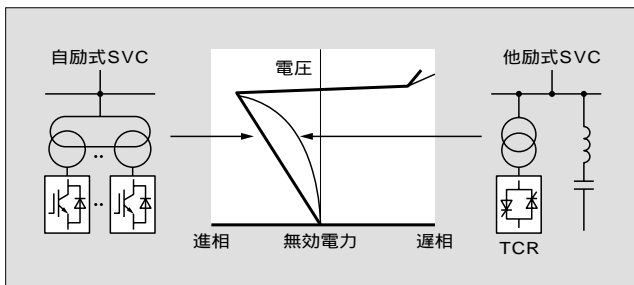
2 SVCの技術動向

SVCには、サイリスタを用いた他励式SVCおよびGTO（Gate Turn-Off thyristor）やIGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）などの自己消弧デバイスを用いた自励式SVCがある。

代表的な他励式SVCは、サイリスタ制御リアクトル（TCR）方式のSVCであるが、富士電機は1970年代にいち早くTCR方式のフリッカ補償装置を製品化して以来、数多くの製作実績がある。このSVCは比較的廉価なことから現在も多用されているが、制御速度の制約や低次高調波発生などの問題があり、また図1に示すように電圧低下領域でSVCの発生無効電力が電圧の二乗に比例して低下する特性を持つ。

これに対して自励式SVCは、定電流特性を持つため他励式SVCに比べ電圧低下領域での電圧維持能力が高い。

図1 SVCの電圧制御特性



また自励式SVCは、図2に示すように系統電圧に対するインバータ電圧の振幅と位相を制御することにより、進相・遅相無効電力だけでなく逆相電力も自由に出力することができ、また高調波補償も可能である。

自励式SVCは、大容量GTOの開発を背景に実用化され、電気鉄道用SVCやフリッカ補償装置などに適用されている。しかしGTOは、図3に示すように di/dt 、 dV/dt 耐量の制約からアノードリアクトルや素子ごとの個別スナバが必要であり、またそれらに起因して大きな損失を発生するため効率低下を防止するスナバ電力回収回路が必要となり、きわめて複雑なインバータ構成となる。これに対して最近富士電機が開発した大容量電圧駆動型自己消弧素子である平型IGBTを適用することにより、周辺回路を大幅

図2 自励式SVCの無効電力・逆相電力出力時の動作

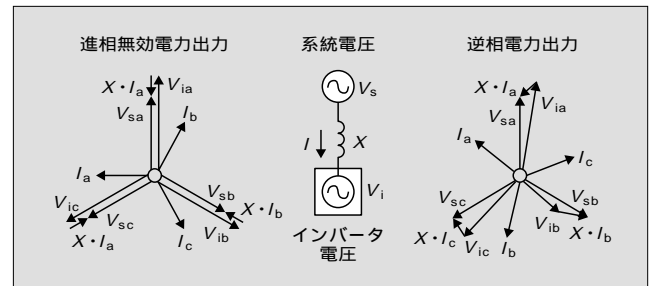
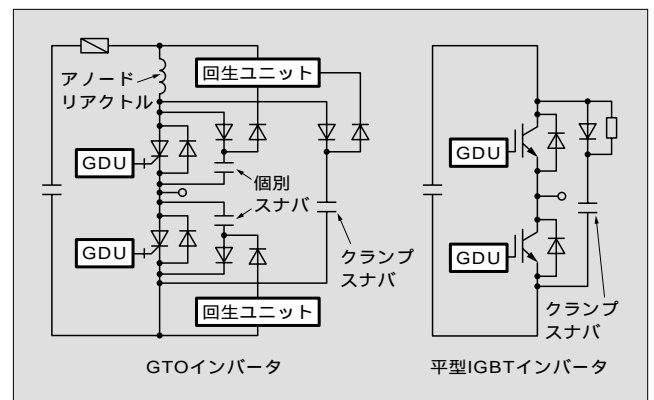


図3 GTOインバータと平型IGBTインバータの構成比較



小西 茂雄

パワーエレクトロニクス製品の開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所パワーエレクトロニクス研究所 主席研究員。電気学会会員。



馬場 謙二

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、電機システムカンパニー電機・交通システム事業部交通技術第一部主任。電気学会会員。



大宮司 充

パワーエレクトロニクス製品の開発、設計に従事。現在、変電システム製作所パワエレ部。

に簡素化することができ、部品点数、変換装置体積を 1/2 以下にすることが可能となる。

平型 IGBT を適用した小型、高効率、高信頼度、かつ低価格の SVC の実用化により、今後ますます高性能な自励式 SVC の電力系統への適用が進むと考えられる。

③ 変換装置技術

ここでは、無効電力補償装置の変換装置技術について最近の技術動向である IGBT 式変換装置を例にとり、その最新技術、必要技術について述べる。

3.1 ゲート駆動・保護技術

3.1.1 ゲート駆動回路

IGBT は、オンオフの一義的な制御だけではなく、ゲート電圧を制御することによりスイッチングスピードなどきめ細かな制御が可能である。したがって、ゲート駆動回路をいかに構成するかが変換装置の機能・信頼性に大きく影響する。

IGBT 用ゲート駆動回路の代表的な機能ブロック図を図 4 に示す。ゲート駆動回路は、制御装置からの素子点消弧指令を光信号により受信して素子に適合した信号に成形する基本機能のほかに、高信頼性を要求されるシステムの安定した運転や系統事故の波及防止を実現するために以下の機能を持つ。

① 状態監視機能

素子の異常は、素子のコレクタ-エミッタ間電圧により素子状態を監視し、素子状態と点消弧指令との比較により検出している。素子の異常や駆動回路内部の制御電源電圧

図 4 IGBT 用ゲート駆動回路の機能ブロック図

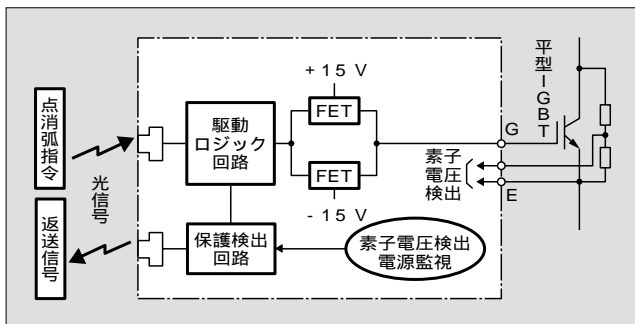
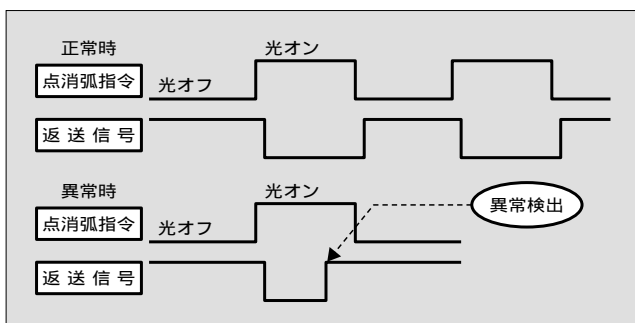


図 5 状態監視信号処理方法



に異常が発生した場合には、図 5 に示すように制御装置への返送信号を反転して伝送する。この監視機能により、システムの高速度保護を可能としている。

② 短絡保護機能

素子を直列接続していない通常の装置においては、短絡故障が発生した場合に素子に短絡電流が流れたことで生じる電圧上昇を素子電圧監視により検知し、素子にダメージを与えないようにゆっくりとゲート電圧を逆バイアスしてソフト遮断する短絡保護技術を確立した。

素子を直列接続した場合の短絡保護は、現状ヒューズにより行っており、ヒューズレスでの保護方式の確立が技術課題となっている。

③ 素子直列接続時の駆動回路技術

素子を直列接続した高電圧変換装置では、素子間の電圧分担の均等化が問題となるが、素子スイッチングタイミングのばらつきを補正する調整機能や、スイッチングの過渡状態におけるアクティブゲートコントロール機能をゲート駆動回路に持たせることによりこの問題を解決した。また、主回路からゲート駆動回路電源を供給する自己給電方式の採用により、高電圧化に伴う絶縁性能を確保する技術を確立している。

3.1.2 平型 IGBT ケースラプチャ耐量

平型素子は、モジュール型素子に比べ格段に高いケースラプチャ耐量を持つ。しかし、IGBT 適用要件である主回路の低インダクタンス配線化に伴い短絡故障発生時の短絡電流が増大することになり、素子のケースラプチャが懸念された。そこで、実際の短絡故障を模擬した平型 IGBT 素子のケースラプチャ耐量確認試験を実施し、他の構成部品との協調および安全性を確認した。

3.2 スタック構造技術・冷却技術

① スタック構造

平型 IGBT の素子性能を最大限に引き出すためには、素子電極面の均一加圧が必要不可欠である。そして、無効電力補償装置の補償性能向上のため素子を高周波スイッチングする必要があり、このことによる跳上り電圧、発生損失低減のための低インダクタンス配線が要求される。また、装置の運転状態によって素子の発熱状態が変化しスタックは伸縮するが、この場合にも素子内部の圧接力を一定

図 6 平型 IGBT スタック

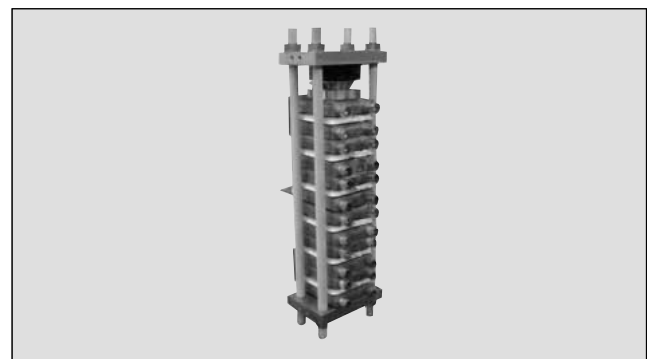


図7 直流共振シミュレーション回路と解析例

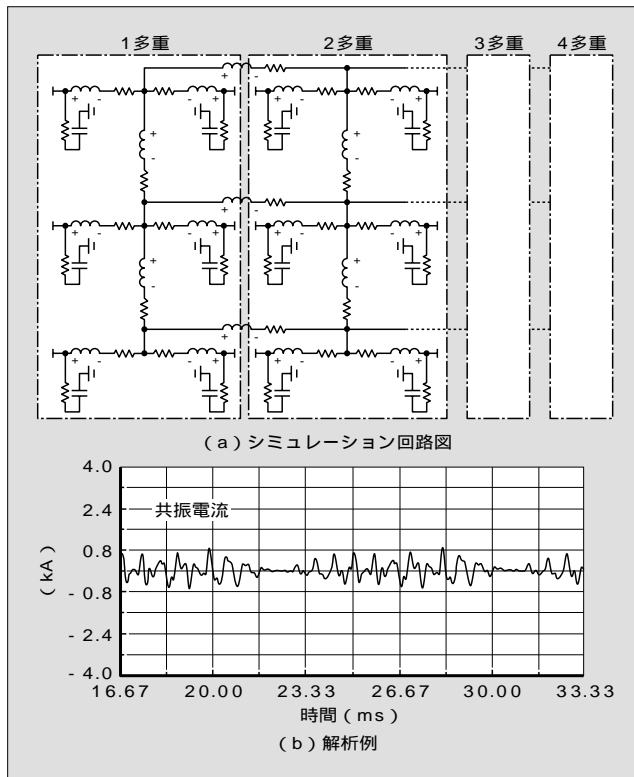
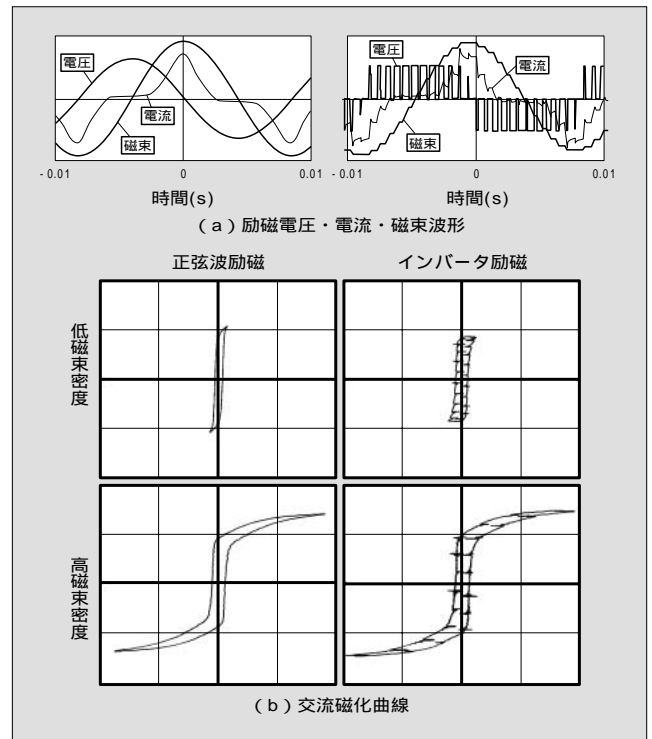


図8 正弦波励磁とインバータ励磁の比較



とし、この圧力変化に対する耐久性を具備したスタック構造とする必要がある。さらには、高い絶縁性能を有するスタック構造であることが必要である。図6に示す平型IGBTスタックは、これらの要件を満足する構造を採用した一例である。

2) 水冷冷却システム

素子の利用率向上、装置のコンパクト化などのために、発生損失の処理を水冷冷却システムにより行っている。このシステムでは、一次冷却水を純水の閉鎖循環とすることにより高信頼性を確保している。また、高周波スイッチングによる素子の発生損失増大に対処すべく、素子の新型冷却体を開発し、0.005 K/W という高い熱処理能力を実現した。

3) 直流共振防止

変換装置は、系統電圧に対抗する電圧発生のために電圧源となる直流コンデンサを持つ。このコンデンサは、構造上分散配置を余儀なくされ、コンデンサ電圧差や回路定数によっては直流共振現象を引き起こす。この現象解析のために、分布する直流コンデンサや銅バー配線などをモデル化して直流共振シミュレーションを実施した。解析結果を構造に反映させることで直流共振を防止している。図7にシミュレーション回路図と解析例を示す。

3.3 多重変圧器技術

1) 鉄心設計

SVC用多重変圧器は、系統励磁の際の多重間電圧分担の平衡化のためにギャップ付き鉄心構造を採用している。このため、振動と騒音を抑制するために連結ボルトを用い

通常の変圧器に比べより強固な締付け構造としている。

また、インバータによって励磁される変圧器は、方形波状のPWM (Pulse Width Modulation) 電圧波形が印加されるため、正弦波励磁に比べ鉄心責務が過酷になる。この検証のため、正弦波励磁とインバータ励磁の場合の損失特性、飽和特性、直流偏磁特性などの基礎データを取得している。図8は、この比較検証結果の一例である。これらの実験データに基づき、SVCの進相運転時の過励磁条件や偏磁制御精度などを考慮して最適な磁束密度の決定を行い、装置の信頼性と小型化の両立を図っている。

2) 冷却設計

インバータで励磁される多重変圧器は、通常の変圧器に比べ励磁損失が20~30%増加すること、またギャップ付き鉄心構造に起因して鉄損や励磁電流が大きくなることなど、鉄損・銅損の増加要因が幾つかある。

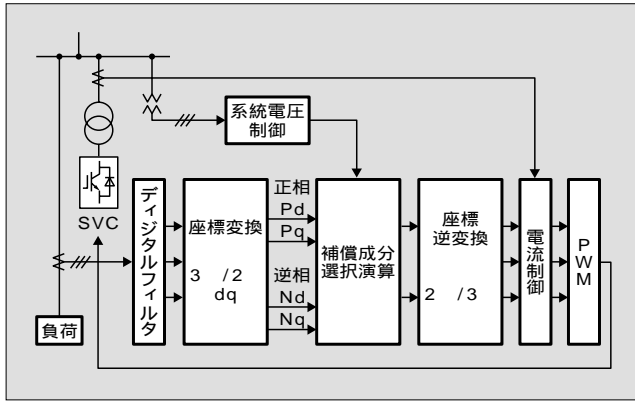
このため、これらの損失増加を考慮し、また構造上熱集中が起こる部位には冷却ダクトを適正配置することなどにより冷却構造の最適化を行っている。

3.4 制御技術

自励式SVCの制御装置には、最新のCPU、DSPを適用した全デジタル制御システムを採用しており、高速・高精度制御だけでなく、自己診断やトレースバック機能など信頼性・保守性に優れたシステムを実現している。

図9に自励式SVCの制御ブロック図を示す。系統電圧制御、変動負荷補償、フリッカ補償など目的に応じてより効果的な補償を実現するため無効電流、過渡有効電流、逆相電流、高調波電流などの補償成分を選択演算し、これを指令値としてフィードフォワード制御を併用した高速電流

図9 自動式 SVC の制御ブロック図



制御回路によって出力電流制御を行い、補償性能の高性能化を実現している。

4 SVC の適用例

4.1 産業用 SVC

産業用の電気設備では、大容量の機器が多く使用されており、かつ頻繁な負荷の変化に応じて運転されるため、それらが接続される電源系統に対して無効電力変動障害（電圧変動）を引き起こすことがある。このような特性を持つ負荷の代表例としては、製鋼用アーク炉、圧延機、溶接機などがあげられる。

電圧変動によって照明、テレビのちらつきを起こす障害は特に「フリッカ障害」と称し、一般的な電圧の変動と区別されている。産業用電気設備のうち、製鋼用アーク炉は容量の大きさ、無効電力変動周波数、三相不平衡ともにフリッカが発生しやすい条件に合致しており、大半の炉が何らかの対策装置を具備している。

従来、フリッカ補償装置としてはサイリスタを使用した他励式装置が一般的に適用されてきたが、パワーエレクトロニクス分野でのデバイス技術と応用技術の急速な進歩により GTO、IGBT といった自己消弧形素子を使用した自動式補償装置が主流を占めるようになってきている。

以下、他励式装置と自動式装置の概要と適用例について紹介する。

4.1.1 他励式フリッカ補償装置

図10に TCR 方式のフリッカ補償装置（SFC）の原理図を示す。この SFC は、負荷と並列に接続されたリアクトルの遅相無効電力（ Q_L ）を、負荷の遅相無効電力（ Q_F ）との合成値が一定になるようにサイリスタによって制御し、この遅相無効電力をコンデンサの進相無効電力（ Q_C ）で補償することにより、系統から供給される無効電力（ Q_S ）を最小かつ安定した値とすることで電圧変動の抑制を行うものである。一般にコンデンサには、サイリスタなどの発生する高調波電流を吸収するフィルタ機能を持たせるのが普通であり、コンデンサとリアクトルの相対量の選定によって進相・遅相の調整範囲が決められる。

本装置は、大容量器として経済性に優れており百数十

図10 TCR 方式フリッカ補償装置の原理

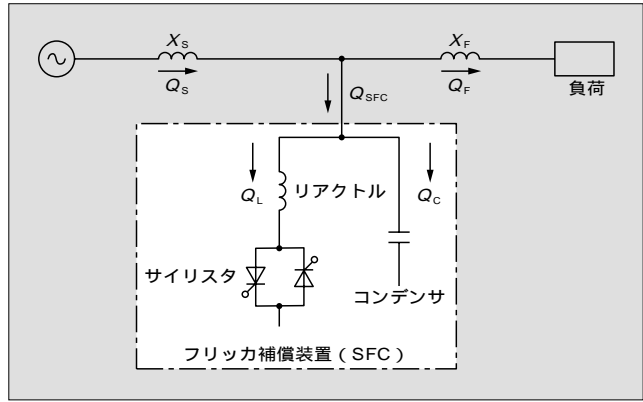
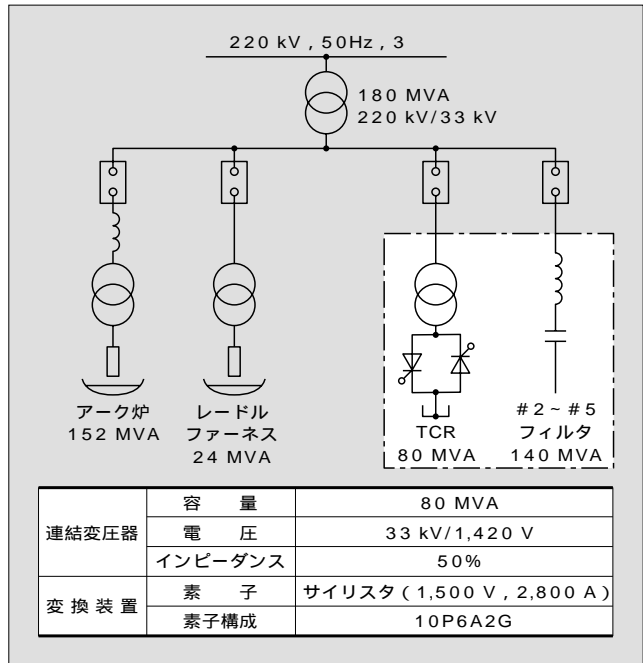


図11 TCR 方式フリッカ補償装置の設置系統例と仕様



MVA の容量まで実用化されている。また、自動式装置や同期調相機を並列設置してハイブリッドシステムとして使用されることも多い。

図11は、製鋼アーク炉のフリッカ対策用に設置された TCR 方式のフリッカ補償装置適用例である。低圧大電流サイリスタを使用した 80 MVA の TCR と合計 140 MVA の補償コンデンサで構成されており、アーク炉とレードルファーンエスの発生するフリッカを 53% 以下に抑制し、受電力率を 0.95 以上としているとともに、コンデンサを第 2 調波から第 5 調波のフィルタ構成とすることによって各炉および TCR から発生する高調波を規制値以内に抑制している。

4.1.2 自動式フリッカ補償装置

自動式フリッカ補償装置は、自己消弧形素子（GTO、IGBT）を使用して PWM 制御による高速な瞬時電流制御を採用しており、基本波無効電力補償だけでなく逆相電力補償・高調波補償（アクティブフィルタ）機能を有するため、他励式装置に比べ高いフリッカ補償性能が得られる。

また、遅相・進相両極性の出力が可能であるため補償容量に対し装置容量が1/2以下で済み、必要進相コンデンサ（高調波フィルタ）容量を低減できるので、補償システム全体として省スペース化を図ることができる。

1. GTO式フリッカ補償装置の適用例

図12にGTO素子を使用した自励式フリッカ補償装置の設置系統例を示す。

本システムは、154 kV から 20 kV に降圧する降圧変圧器と、この 20 kV ラインに接続された 13 MVA の補償装置 2 セット、およびそれに付属する 2 MVA 高周波フィルタで構成されている。

補償装置は、大容量逆導通 GTO (4.5 kV, 3 kA) を適用した単相インバータ 3 台で三相 1 多重インバータを構成し、さらにその三相インバータ 6 台を変圧器により直列多重接続して構成されている。この多重変圧器には移相巻線を設けておらず、PWM 変調の三角波キャリア信号の移相によって多重化を行っている。

また、高調波フィルタはインバータのスイッチングに起因する高次高調波電流を吸収するハイパスフィルタであり、20 kV ラインのケーブルやアブソーバなどの焼損を防止する目的で設置している。

インバータの直流コンデンサ容量は、通常無効電力や逆相電力出力時の直流リプル電流に対して直流電圧変動が規定値以下となるように決めているが、本装置では通常的设计より直流コンデンサ容量を増強して過渡的な有効電力変動も補償できるようにすることでフリッカ補償性能の大幅な向上を図っている。本装置のフリッカ改善効果を図13に示す。フリッカ改善目標である改善率50%以上の性能を達成し、フリッカを規制値以下に抑制している。

2. 平型 IGBT 式フリッカ補償装置の適用例

図14に平型 IGBT 素子を使用した自励式フリッカ補償装置の設置系統例を示す。

本システムの場合、既存設備として 2 台の TCR (15

MVA + 25 MVA) があり、これに 12 MVA の自励式補償装置を増設してハイブリッドシステムを構成している。

補償装置は、平型 IGBT (2.5 kV, 1.8 kA) を適用した単相インバータ 3 台で三相 1 多重インバータを構成し、4 台の三相インバータを変圧器により直列多重接続して構成されている。

図15にフリッカ補償装置用平型 IGBT モジュールの外観を示す。このモジュールは、単相インバータの 4 個の平型 IGBT、駆動回路、クランプスナバ、および直流コンデンサを組み込み、コンパクトな構成を実現している。

なお、本装置は現在製品製作中であり2001年8月に運転開始予定である。

4.2 電気鉄道用 SVC

電気鉄道用の無効電力補償装置としては、新幹線変電所において電系統側に設置され電圧変動補償を行う他励式単相 SVC と三相系統側に設置され無効電力・不平衡電力の補償を行う自励式 SVC が適用されている。これまで東海道新幹線の電源増強の一つとしてこれらの装置が複数箇所に設置されてきた。富士電機はすでに GTO を適用した単器容量 ± 17 MVA の自励式 SVC を東海道新幹線新米原

図 13 フリッカ改善効果

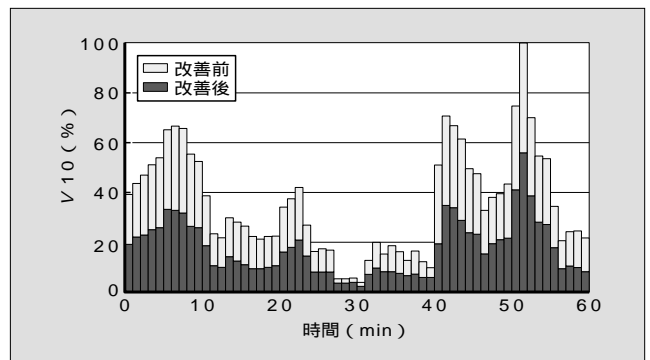


図 12 GTO 式フリッカ補償装置の設置系統例と仕様

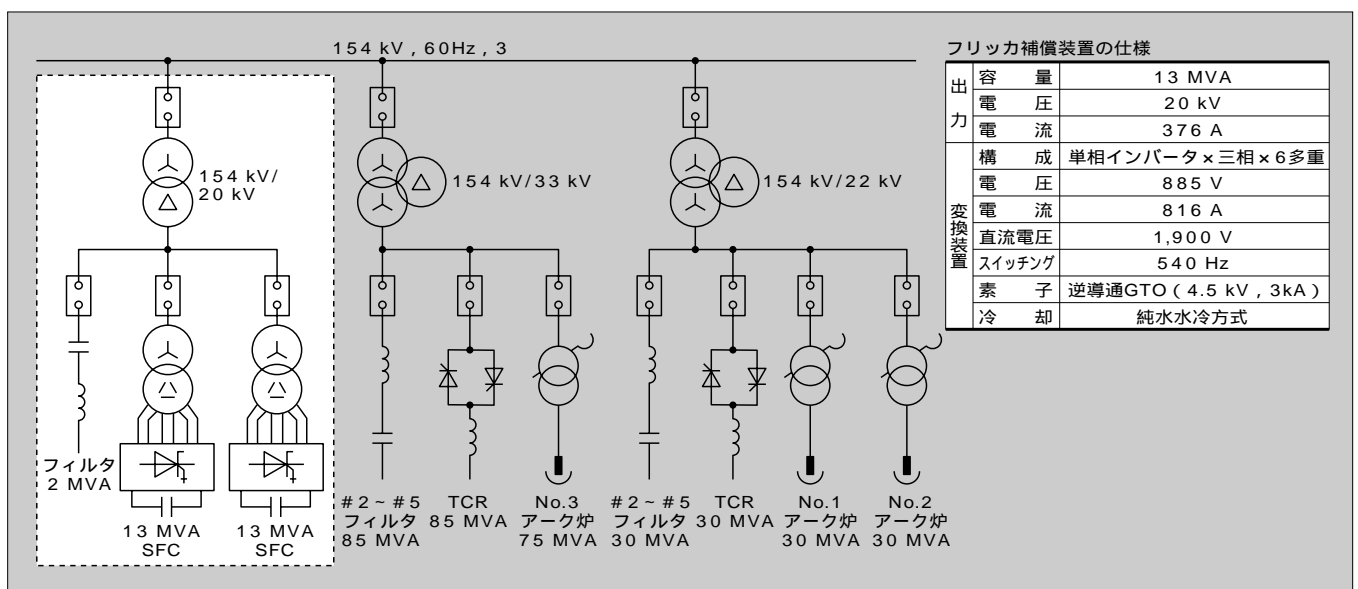


図 14 平型 IGBT 式フリッカ補償装置の設置系統例と仕様

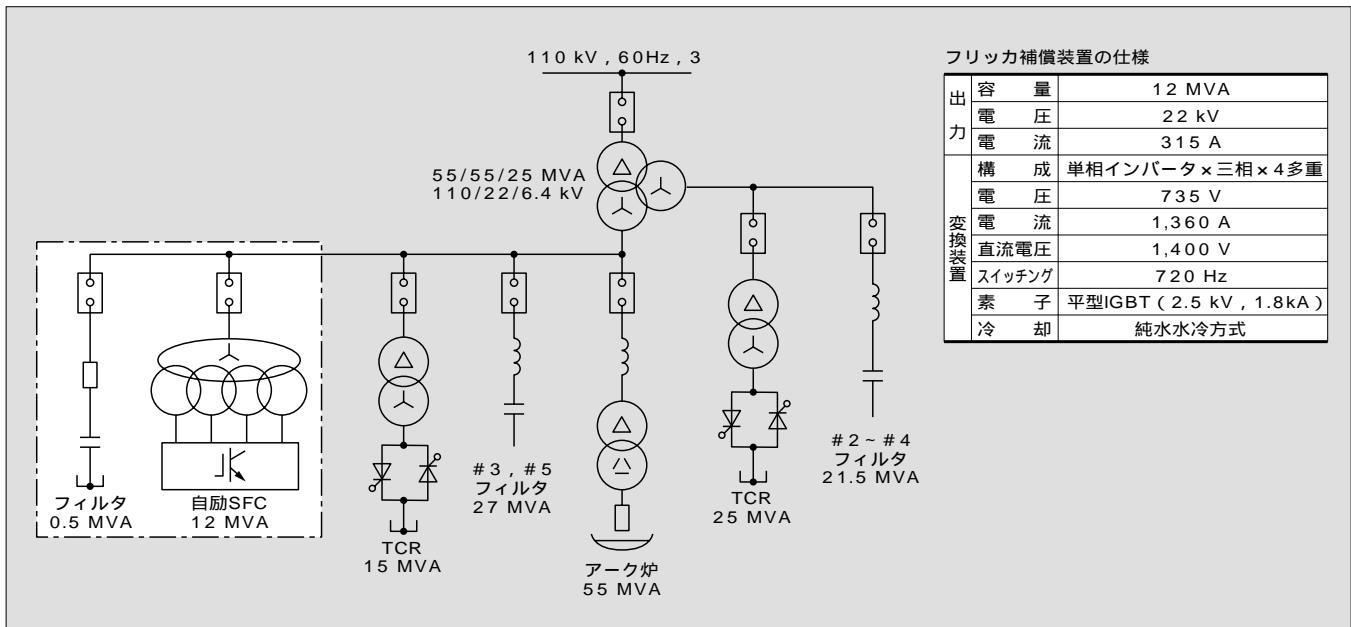


図 15 フリッカ補償装置用平型 IGBT モジュールの外観

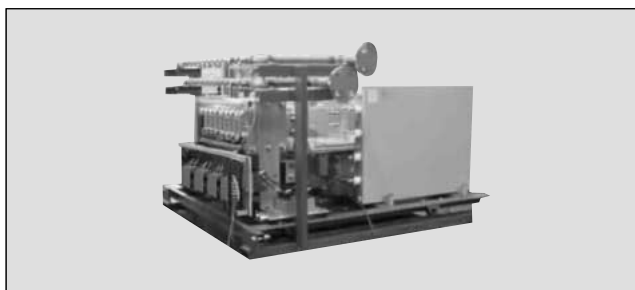
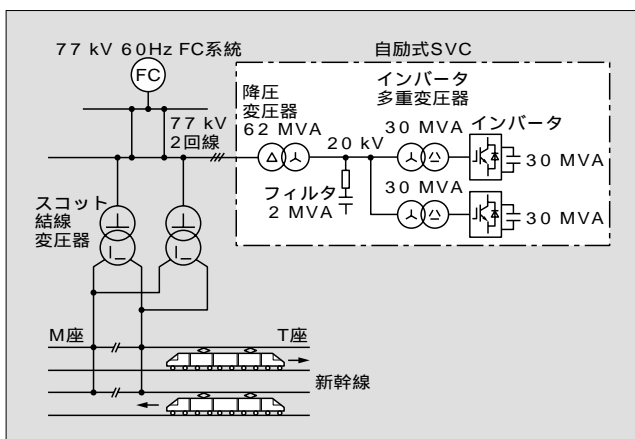


図 16 自励式 SVC の全体システム構成



変電所に納入しており運転実績を有している。今後、小型・高効率・簡素化を指向する自励式 SVC を提供することを前提に平型 IGBT を適用した単器容量 ±30 MVA クラスの大容量自励式 SVC の開発および適用検討を進めている。以下にそのシステム概要について紹介する。

図 16 に三相自励式 SVC の全体システムを、表 1 に概略

表 1 自励式 SVC の概略仕様

項目	仕様	
系統電圧	三相, 60 Hz, 77 kV	
システム容量	進相 62 MVA ~ 遅相 58 MVA	
インバータ	変換器形式	電圧形多重インバータ 単相インバータ × 三相 × 4 多重 (48相)
	変換器容量	30 MVA/バンク × 2
	素子	平型 IGBT 2.5 kV, 1.8 kA
	冷却方式	送水風冷 (純水冷却)
	制御方式	12パルス PWM 無効電力, 逆相電力補償制御
多重変圧器	30 MVA, 三相 20 kV/1.95 kV 人/オープン△ × 4 多重, 送油風冷	
降圧変圧器	62 MVA, 三相 77 kV/20 kV △/人, 送油風冷	
高調波フィルタ	95, 97 次除去用 CR フィルタ	

仕様を示す。この SVC システムは、77 kV の三相系統側に設置され新幹線の発生する無効電力と不平衡電力を補償することにより電圧変動抑制を行うものであり、調整容量は進相 62 MVA から遅相 58 MVA である。自励式 SVC は、進相/遅相 30 MVA の変換装置 2 バンクからなり、適用デバイスとして 2.5 kV, 1.8 kA 平型 IGBT を採用した 4 多重構成の装置である。

図 17 に上記平型 IGBT を 3 個直列接続した上下アーム 1 相分を組み込んで構成された試作モジュールの回路構成を示す。また、図 18 に外観、表 2 に仕様を示す。

今後、この試作装置のブラシアップを図り、高性能、高機能、かつ品質の優れたシステムの実現に向けて製品設計を行う予定である。

図 17 平型 IGBT 3 直列モジュールの構成

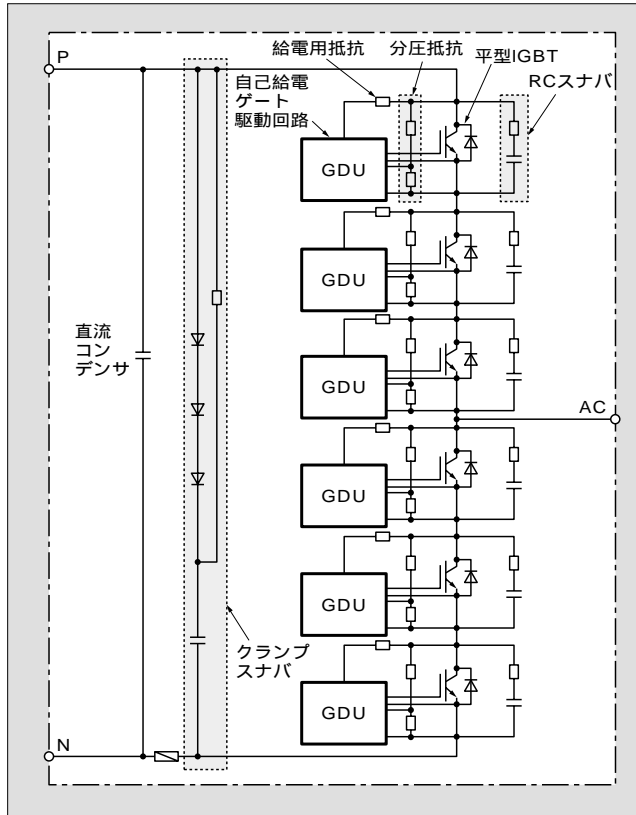


図 18 試作モジュールの外観

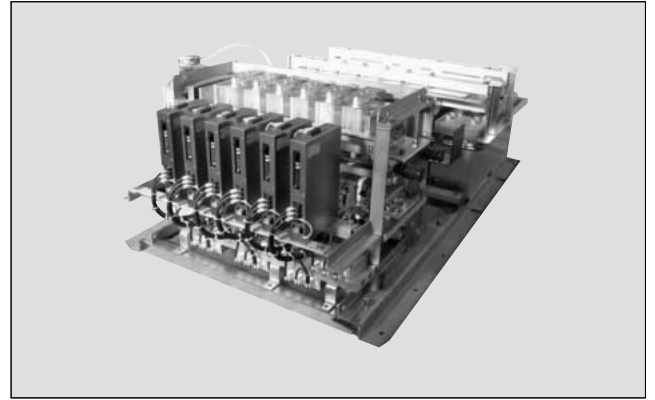


表 2 試作モジュールの仕様

項目	仕様
直 流 電 圧	3,600 V \pm 10%
出 力 電 圧	1,950 V
適 用 素 子	平型 IGBT 2.5 kV, 1.8 kA
素 子 構 成	3S1P2A
ゲート駆動回路電源給電方式	自己給電
冷 却 方 式	送水風冷 (純水冷却)

5 あとがき

SVC は、多様化が進む電力系統において電力品質の維持・向上のために今後ますます重要な役割を果たすものと考えられる。富士電機は、今後も豊富な経験と最新技術を駆使してニーズに適合した高性能な SVC を提供していく所存である。

最後に、SVC の適用にあたりご指導・ご協力をいただいた関係各位に対し深く感謝する次第である。

参考文献

- 1) 高坂憲司，高橋良和．平型 IGBT とその応用．OHM．vol.85，no.11，1998，p.90-94．
- 2) 真野紳一ほか．フリック補償装置用自励式無効電力補償装置の開発．平成 7 年電気学会産業応用部門大会．no.190，1995．
- 3) 江口直也ほか．不平衡補償機能付き自励式 SVC 制御方式の開発．電気学会論文誌 D．vol.114，no.4，1994．
- 4) 牧野喜郎ほか．電気鉄道用地上設備におけるパワーエレクトロニクス応用システム．富士時報．vol.72，no.2，1999，p.104-110．

アルミ電解用整流装置（S フォーマ）

古木 進一（ふるき しんいち）

石塚 銀治（いしづか ぎんじ）

① まえがき

アルミニウムは、1807年に発見された当時から、電気分解法（電解法）によって分離することが可能であると予想されていたが、安く強力な電気エネルギーを得ることが困難であった。しかし、1860年代のドイツのシーメンス、ベルギーのグラムらの功績により安価で安定した直流電力の供給が可能になり、電気化学法による金属製錬の道が開かれた。

アルミ電解とは、ボーキサイトをかせいソーダで溶解してアルミナを抽出し、このアルミナを氷晶石を溶媒として直流電源を用いて電気分解しアルミニウムを製錬する方法であり、それまでの金属還元法に取って代わるものである。この方法での工業化は1888年にヨーロッパおよび北米での工場建設に始まり、日本国内では1894年から生産を開始した。

アルミ電解は直流の大電流を必要とするが、一般的には適当な変換装置を介して交流電源から直流を得る整流装置によっている。この整流装置は、技術の進歩に伴い回転変流機、水銀整流器、接触変流機を経て、1960年代に入りセレン、シリコンなどの半導体整流器へと置き換わり、半導体素子の高電圧化、大電流化を背景に現在に至っている。

図1 アルミ電解工場の全景



図1に富士電機が整流装置を納入した最近のアルミ電解工場の全景を示す。

富士電機は1959年以来、74件の整流装置をアルミ電解用に納入しており、現在では世界トップクラスのシェアを有している。2000年に営業運転を開始したモザール（モザンビーク）向け整流装置は、単器世界最大容量（DC 1,330 V、100 kA、133 MW）である。

本稿では、アルミ電解用整流装置に対する最近の要求の特徴と整流装置における最近の技術を報告する。

② アルミ電解用整流装置の特徴

アルミ電解工業は電気エネルギー多消費産業の一つであることから、電力原単位低減が最大の改善目標である。そこで電解工程における技術開発は主として電解炉の大型化に重点が置かれ、電極構造の改良、電極位置のコンピュータによる自動制御や電解炉内の通電電流均一化対策などが行われている。

それら電解設備側の技術進歩に合わせて、電源装置に対しての要求仕様は表1のように推移してきた。また、アルミ電解の特徴として次の仕様が要求される。

1. 停電しない電源

溶融塩電解であるため、電源の喪失はいったん溶けたアルミニウムの再凝固を招き工場設備に多大な損害を与えるので、高信頼性が要求される。

2. 0 ~ 100 %の広い電圧調整機能

電解炉（通常 4.3V/1 炉）は操業当初に1 ~ 2 炉から通電し、以後3 ~ 4 炉ずつ増やして最終の定格炉数までに至ることから、全電圧領域での出力調整機能が要求される。

表1 アルミ電解炉としての要求電気仕様

年代	1960年代	1995年以降
直流電圧	500 V	1,200 ~ 1,500 V
直流電流	50 ~ 120 kA	340 kA前後 ~
直流出力容量	25 ~ 60 MW	400 ~ 510 MW



古木 進一

産業用電力変換装置応用プラントのエンジニアリング業務に従事。現在、電機システムカンパニー電機・交通システム事業部産業技術部担当課長。電気学会会員。



石塚 銀治

S フォーマなど大型変換装置の設計に従事。現在、変電システム製作所パワエレ部課長。

(3) 自動定電流制御機能

溶融塩電解の現象として、陽極効果（AE：Anode Effect）がある。電解の過程において、炉内の原料アルミナが減少したり電極（陽極）が消耗して短くなると、電極表面とアルミナ面のすきまにガスが発生し、炉電圧が30～60Vほど上昇する。これは電源に対しては負荷抵抗が増加したことと同じであり、整流装置出力電圧が一定であれば、出力電流が低下してしまいアルミ生産量の減少となる。そこで常に出力電流を一定に保つ制御が要求される。

(4) 単器大容量装置

通常、前記の電解設備要求定格を複数台（4～5台）の整流装置でまかない、設備の無停電化を図る目的で常に1台を予備として設ける。そこで次の理由から単器大容量化が要求される。

- 装置総合損失の低減
- 交流側受配電設備も含めた省スペース
- 保守対象装置の低減

(5) デジタル制御

整流装置の定電流制御をPLC/MMIで行い、オンラインでの制御変数の変更による容易な最適化制御を可能とする。

③ モザール向けアルミ電解用整流装置

この設備の電解炉は1,330V、340kAの定格で、5台の整流装置によって総合60相整流で給電される。このうち1台は予備であり、単器定格としては4台で給電することを前提としている。さらに2台が停止状態でも炉の操業が維持できることを考慮して単器仕様は表2とした。

アルミ電解用整流装置は、変換効率、操業の安定性、広い電圧調整範囲における力率、系統ひずみの補償などを考慮するとダイオード式が優位であり、整流装置としては電圧調整用変圧器部と整流器用変圧器部とで構成される変圧器とダイオード整流器から成る。さらに変圧器の二次側には、直流出力を一定に制御するための電圧調整用リアクトル（VCR）が内蔵されている。単器の単線結線図を図2に示す。

本整流装置は、工場にて変圧器と整流器を組み合わせた

表2 モザール向け整流装置の仕様

変圧器一次電圧	AC132 kV, 三相, 50 Hz
変圧器二次電圧	0～1,280 V (98タップ)
変圧器容量	136.3 MVA/2 × 2 × 35.28 MVA
直流出力電圧	DC 0～1,330 V
直流出力電流	DC 0～85 kA (全素子健全にて100 kA連続)
定格の種類	110%連続, 150% 1分
電力変換方式	三相ブリッジ接続 × 2群 (単器12相)
使用整流素子	4.5 kV, 3 kA, ダイオード
アーム構成	1S8P6A4G (1P冗長)
整流器冷却方式	送水風冷, 純水閉鎖循環方式

総合試験にて100kAの通電試験を行い、また現地据付け後にも同様な試験を繰り返し現在順調に営業運転を行っている。図3に工場での通電試験状況を示す。

④ 変圧器

整流装置の大容量化に伴い、変圧器としても種々の課題が出てきているが、以下にその課題と解決事例の一部を説明する。

4.1 全範囲負荷時タップ切換方式

アルミ電解用整流装置は大容量化に伴い、変圧器1台あたりの容量は100～160MVAとなる。また、前述したように0～100%の電圧調整範囲が要求されるため、この変圧器は電圧調整用変圧器と整流器用変圧器で構成される。この電圧調整用変圧器は、一般的には3～4タップの無電圧タップ切換器（NVTC）と三十数タップの負荷時タップ切換器（OLTC）を併用して、100タップ前後の切換を行う方式が採用される。したがって、遮断器投入時の励磁突入電流には電圧調整用変圧器の負荷である整流器用変圧器の励磁突入電流が重畳し、同一容量の通常の変圧器に比較して過大となり、これによる電源じょう乱が問題となる。

この対策として、全電圧をOLTCで切り換える100タップ前後の多点タイプの負荷時タップ切換器を採用した。これによりNVTCを用いず全範囲を負荷時切換可能とし、遮断器投入時には必ずタップを最低位置とすることができ、

図2 整流装置の単線結線図

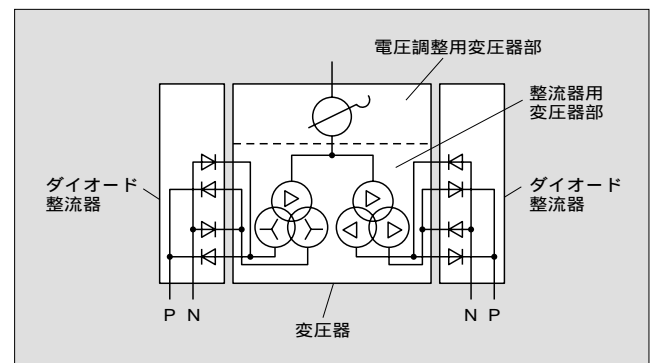


図3 工場での通電試験状況



励磁突入電流を軽減できた。

4.2 完全 12 相整流

整流装置が大容量化する場合、電源系統への高調波電流出を最小限とするため、整流器を単器12相整流、1電解炉あたり総合48~60相整流とするシステムが一般的である。このとき、12相整流を構成する各6相整流グループの間に不平衡(直流側無負荷電圧の差異および短絡インピーダンスの差異)があると、完全な12相整流とならず、第5次・第7次高調波が電源側へ流出することになる。このため、この対策として中間ヨーク付き二階建て鉄心構造を採用した。

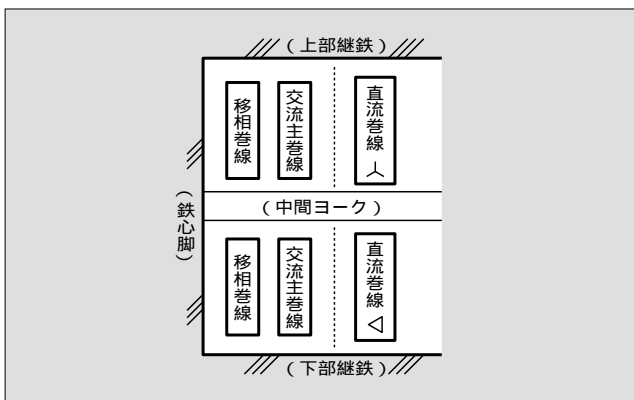
図4はその適用例で、鉄心と巻線構成を示すものである。上段は直流側巻線を星形結線、下段は三角結線にし、30度の位相差とすることにより単一鉄心単器12相整流としている。ところで、巻線のターン数は必然的に整数しか選択できず、さらに大電流整流設備用のように二次電流が大きな整流器用変圧器においては、選択できる二次巻線のターン数は大きな数を選択できない。このため、もし中間ヨークを設けないと上下段の無負荷電圧を一致させることはできず(三角巻線の巻数を星形巻線の3倍とすれば理想的であるが、巻線の関係からそれができない)、例えば、星形巻線を5ターンとすると三角巻線は9ターンが最適値であるが、両者の無負荷電圧の間には、

$$\left(\frac{9}{3 \times 5} - 1 \right) \times 100 = 3.9 \%$$

の差が生じる。しかし負荷は同一であるから、直流出力電圧は同一となるようにこの差はVCRの制御によって吸収され、この吸収量に差が発生することにより理想的な12相整流からずれる。これにより、本来キャンセルされるべき第5次・第7次高調波が、前述のケースでは基本波のおよそ1%残存し、電源側へ流出する。同様に、上下段の短絡インピーダンスの差異も、第5次・第7次高調波残存の要因となりうる。

ここで中間ヨークを設けると上下段の磁束の差をバイパスさせることができるので、上下段の磁束密度をそれぞれ任意に設定することができる。これは交流側巻線の巻数をそれぞれの直流側巻線に最適な巻数に選ぶことが可能であ

図4 整流器用変圧器の巻線断面図



ることを意味し、両者の無負荷電圧を0.2%以下に小さくすることが可能となる。また、上下段の巻線の断面寸法はそれぞれ個別に設定することができるので、両者の短絡インピーダンスもまた同一とすることができる。これらにより、1鉄心構造で省スペースな構造ながら、理想的な12相整流に限りなく近い機能を提供し、複数台による多相整流の効果を最大限活用できる。

4.3 変圧器の内部構成

既述した高調波対策などの面から、大容量のアルミ電解用変圧器の主回路構成は、電圧調整用変圧器(単巻:全範囲負荷時タップ切換)+12相整流器用変圧器(中間ヨーク付き二階建て:VCR内蔵)が最近の一般的な構成となる。このとき、電圧調整用変圧器二次定格電圧は内部回路となるので、製造者の判断と責任において決定される。これを高くすると負荷時タップ切換器の通過電流が小さくなるが、反面、整流器用変圧器の絶縁設計レベルが高くなる。この両者の条件を満足する最適な中間回路電圧の選定が、計画上の鍵(かぎ)の一つである。そこで、タップ切換過程における中間回路の最高電圧がIEC規格の72.5kVを超えず、かつ負荷時タップ切換器の信頼性を十分満足しうる通過電流を考慮し、このような大容量の場合、この電圧を66kVに設定している。

また、このような大容量器になると輸送上の制約が発生する。この場合、電圧調整用変圧器と整流器用変圧器をおのおの専用のタンクに収納して、個別輸送を可能にする構成としながら、しかし両変圧器は現地において隣接して設置し、油中ダクトにより接続される構造が適用される。この油中ダクトは両変圧器の絶縁油とは完全に遮断され、専用の付属品(コンサベータ、放圧装置、油面計など)を備えることにより保守性の向上を図っている。

5 ダイオード整流器

整流器が大容量化すると以下のような課題が出てくる。

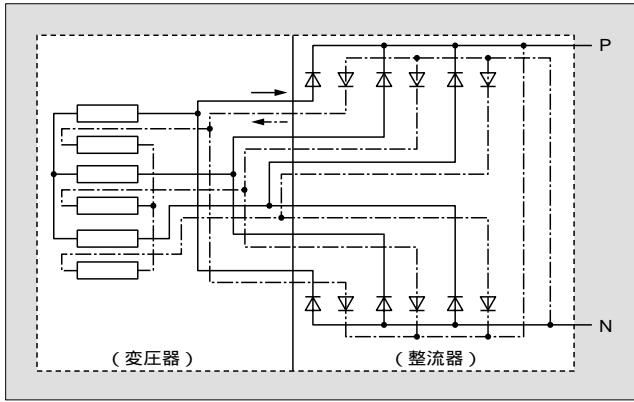
- 1) 大電流による局部過熱対策
- 2) 並列素子間の電流アンバランスの把握
- 3) 大容量素子、ヒューズの適用技術
- 4) 大容量ヒューズに対する振動劣化に対する対策

このような課題に対して、最近の大容量整流装置においては下記の検討を加え解決している。

5.1 大電流による局部過熱に対する対策

直流大電流整流器では、整流回路の交番大電流に伴う磁束の発生により、リードや端子周辺の局部過熱の増大を招く。この対策として、富士電機は長く同相逆並列接続を適用してこの障害の発生を防いでおり、整流装置の大容量化においてはますますその効果が威力を発揮している。同相逆並列接続とは、図5に示すように二つの整流器群を完全に相似形に配置し、ただしすべての部位に流れる電流が逆向きになるように構成する技術である。これによりおのお

図5 同相逆並列接続の原理回路図



この整流器群が発生する磁束は完全に打ち消し合い、整流器を収納するケースを鉄材にて構成しても局部過熱を発生させる心配がない。この接続方式を適用することにより、さらに次の効果も得られる。

- 1) 変圧器—整流器間接続リードおよび整流器内部のインダクタンス低減により、整流器運転時の電圧降下の低減、力率改善が図れる。
- 2) 素子並列間の電流アンバランスの原因である整流器内部インダクタンスの低減により、電流アンバランスを低減できる。

5.2 並列素子間の電流アンバランス

素子を並列にて使用する場合、素子の特性差および素子並列回路の導体のインダクタンスによって、並列間の電流は均一には流れない。その電流アンバランスを把握し、その値を考慮して並列素子数を決定することは、信頼性・経済性の観点で重要な事項である。ここで、素子の並列数は下記によって決まる（1 並列冗長の場合）。

$$P = \frac{I_d \cdot}{K \cdot G \cdot I_s} + 1$$

- ここで、 I_d : 装置定格出力
- : 並列素子間の電流アンバランス率
- G : 整流器群の群数
- I_s : 1 素子の最大取得電流
- K : 3 (ブリッジ結線の場合)

したがって、素子並列数は電流アンバランス率に比例し、電流アンバランスの量により素子並列数が決定される。またこの電流アンバランスは、前述したようにインダクタンスの影響を受けるため、素子を通流する電流波形が変化すると電流アンバランスも変化する。ところが、この電流アンバランスは工場試験では規格に基づき短絡法にて測定するが、短絡法では素子を通流する電流波形は定格運転時とは異なるため、実際の定格時の電流アンバランスとは異なる。この定格運転時の電流分担を把握することは、装置の長期にわたる信頼性維持の面で重要である。この電流アンバランスは下記のようにシミュレーションにて確認でき、工場試験結果との突き合わせ、さらに定格運転状態の把握が可能となる。

図6 電流アンバランスのシミュレーション回路

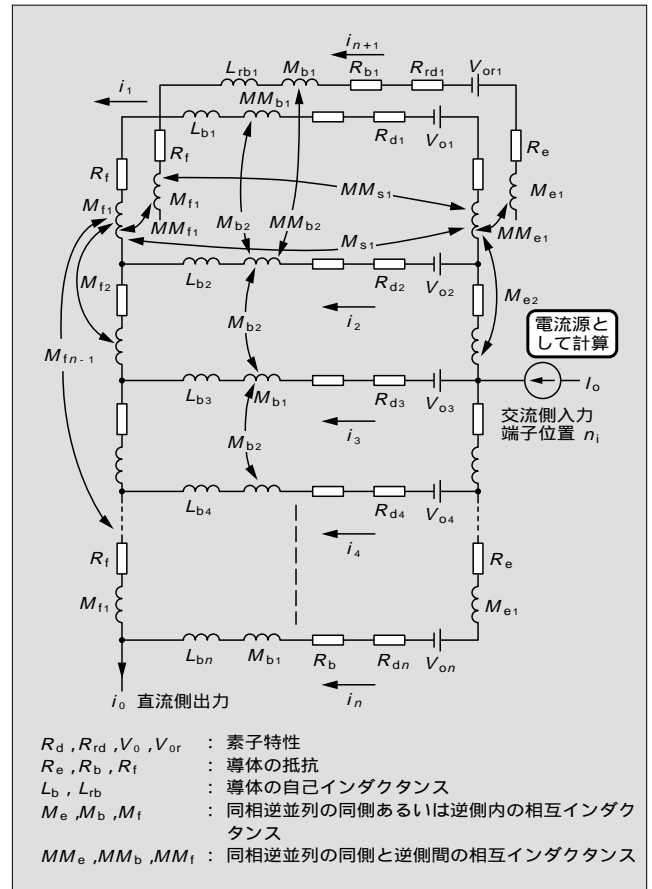
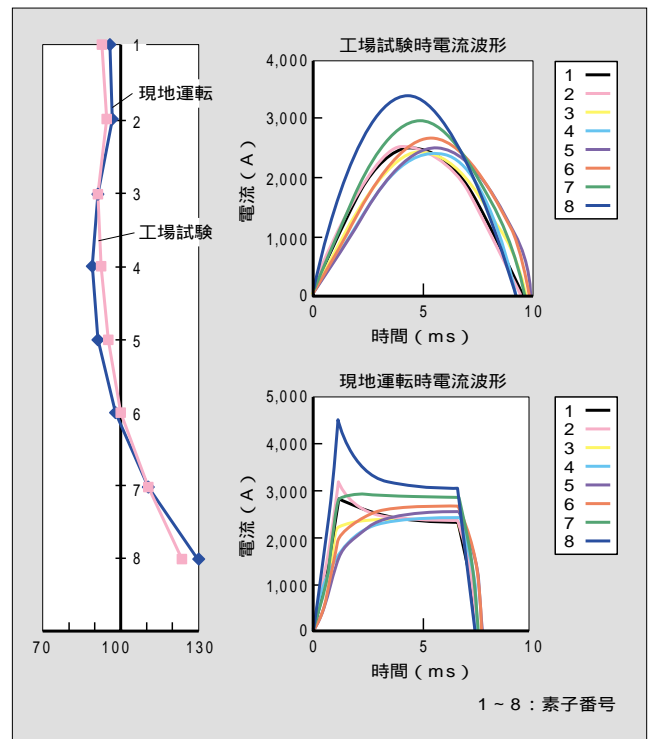


図7 電流アンバランスのシミュレーション例



並列素子周辺回路は図6のような等価回路で示される。同相逆並列を適用しているため、2 回路分を含めてシミュレーションを行う。この回路インダクタンスは互いに相互

インダクタンスが存在する。それらを忠実に算出して汎用ソフトウェアによる回路解析を行うことにより、おのこのの電流パスの電流をシミュレーションできる。図7に工場試験および定格運転した場合の各電流パスの電流波形、およびその際の電流アンバランスのシミュレーション結果の一例を示す。このシミュレーションは並列素子数が8の場合であり、平均電流を100とした場合のおのこのの素子に流れる電流値を平均値に対する比率として示している。工場試験においては短絡法にて試験を行うので、おのこのの素子に流れる電流波形はこの図に示すように正弦波に近い波形となるが、現地での定格運転時にはその波形は方形波に近い波形となる。電流アンバランスはインダクタンスの影響を受けることから、素子に流れる電流波形の変化により電流アンバランスも変化するが、このシミュレーションによりその変化の差を定量的に把握できる。

5.3 大容量素子，ヒューズ適用技術

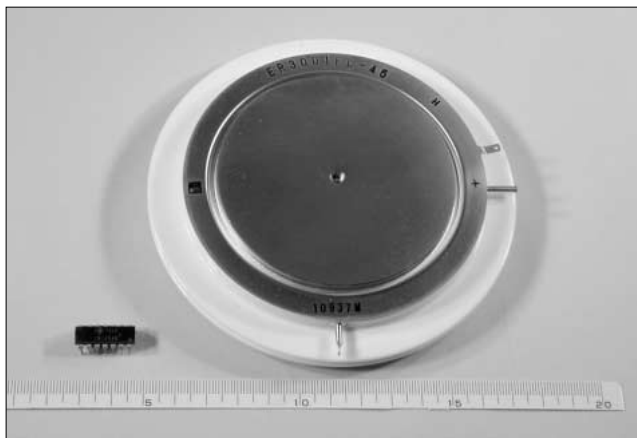
整流装置の大容量化対応のために、高耐圧・大電流の平型ダイオードの開発も行った。その型式名，概略特性を表3に，外観を図8に示す。

電極径 80 mm，半導体ペレット径 89 mm，定格電圧 4,500 V，定格電流 3,000 A の素子である。このほかにも 5,000 V の素子もメニューとしてそろえた。素子開発に際しては最近の技術を種々注入したが，以下にその一部を紹介する。

表3 高耐圧・大電流平型ダイオードの概略特性

項目	記号	型式名	単位
		ER3001FL-45	
繰返し逆電圧	V_{RRM}	4,500	V
非繰返し逆電圧	V_{RSM}	4,700	V
平均順電流	$I_{F(AV)}$	3,000 ($T_f = 80$)	A
サージ順電流 (逆電圧あり)	I_{FSM}	58,000	A
接合温度	T_j	-40 ~ +160	
順電圧	V_{FM}	1.65	V
逆電流	I_{RRM}	300	mA
熱抵抗	$R_{th(j-c)}$	0.013	K/W

図8 新型平型ダイオード素子 (ER3001FL-45)



介する。

1) 均一拡散技術の確立

大口径のシリコン板に対して，均一な拡散層および表面濃度を確保するため，シリコンウェーハメーカーと共同で専用のシリコンウェーハを開発した。この方法の専用シリコンウェーハ採用により，素子特性ばらつきを従来の約50%に低減できた。

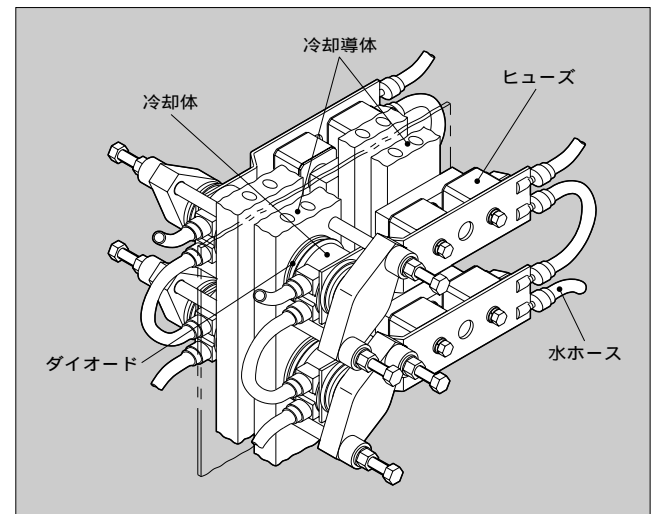
2) 高耐圧化の検証

素子の高耐圧化においては，その内部の電位分布を把握することが，内部構造決定，絶縁物の選定において重要な要素となる。そこで，素子内部の電位分布シミュレーションを行い，内部部品形状の変化により，電位がどのように分布してどの部分の責務が厳しくなるかの確認・検証を行った。これにより，高電圧においても十分な耐量を有するパッケージ内部設計を行い高い信頼性を確保することができた。さらにこの技術によりパッケージ内部で使用する絶縁物についても，従来の型成形ができない四ふっ化エチレン系樹脂の切削加工品から，型成形が可能なポリイミド系樹脂成型品に変更することができ，経済的な設計を達成した。

また，装置保護および半導体保護用ヒューズの選定のために，サージ順電流定格値を正確に把握する必要があり，当社所有の短絡発電機 (2,000 MVA) により実際に通電し，逆電圧ありの条件で，所要の耐量があることを確認した。

ダイオード素子の大容量化に伴い，半導体保護用ヒューズも大容量品を適用するようになってきている。モザール向けで適用したヒューズは 1,350 V，4,000 A 定格品である。このヒューズは外形105角が2並列で1個のヒューズを形成しており，質量約 9 kg と重量物である。これら大容量の素子・ヒューズを適用する場合は，最近は素子とヒューズを一体で加圧するプレスパック方式が一部で採用されているが，この場合仮にヒューズ溶断が発生したときすべて分解が必要なため，メンテナンス性で大きな難点となっていた。富士電機では，素子とヒューズを個別に取り付ける従来の方式を踏襲してメンテナンス性を維持している。その

図9 スタック部分図



ために、次の課題を解決した。

素子とヒューズを個別に取り付けると、その間を接続する導体が必要となる。ところが、ヒューズに与える機械力を抑えるためには、その導体の厚みには制限がある。しかし、この導体の厚みが制限されると通流できる電流も制限され、大容量素子・ヒューズの能力が十分引き出せない。

そのため、厚み 5mm の薄板の銅バー内部に水路を形成して水冷化することにより、機械的には弱かつ電流容量の大きい銅バーを開発した。これにより、ヒューズは両面水冷とすることもでき、素子、ヒューズの能力を十分に引き出すことができた。このスタックの概念図を図 9 に示す。

5.4 大容量ヒューズの振動対策

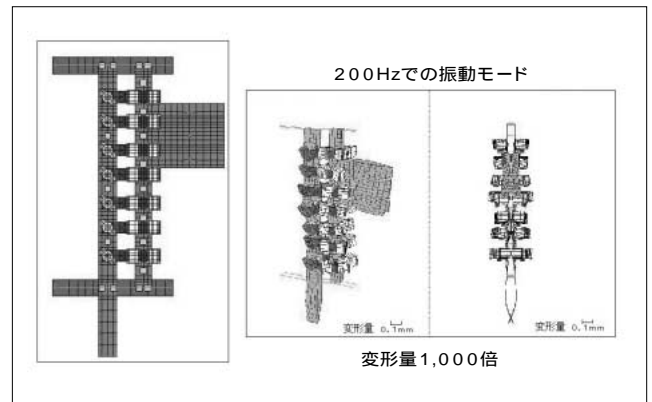
さらに、このように大容量のヒューズを適用する場合の問題としてヒューズの振動対策が挙げられる。ヒューズ内部は薄い銀板数枚で構成され、おのおのには数列狭隘(きょうあい)部が設けられていて構造的には弱い。すなわち、ヒューズの機能としては、大電流が流せてかつ定格を超える大電流には速やかに限流遮断する能力が要求される。つまり、過電流に対して切れやすいヒューズが要求され、したがっておのおのずと振動にも弱くなる。本装置においては、ヒューズに及ぼす振動の影響をシミュレーションで確認し、その振動をヒューズの許容値まで低減するための構造上の対策を行った。

シミュレーションは SDRC 社 (米国) の I-DEAS を用いて行った。振動レベルを評価するためには、スタック全体の固有振動数の計算を実施し、この固有振動数をもとにモーダル応答法による振動応答の計算を行った。ヒューズを取り付けている冷却導体は同相逆並列接続を適用しているので、同側と逆側が互いに対向して逆向きの電流が流れているので、この間には反発力が働き、冷却導体間の距離を d (mm)、力の作用する長さを L (mm)、電磁単位に換算した電流 ($1_{e.m.u.}=10 A$) を I_1, I_2 とすれば、概略の電磁力 f (N) は、下記により算出され、冷却導体の各高さごとに入力した。

$$f = 2 \times 10^{-5} \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot L/d$$

この電磁力をヒューズに流れる電流波形で計算して、周波数分析を行った。一方、応答計算では、上記の電磁力が 0 ~ 500 Hz まで、同一の値が作用するとして計算を実施した。これをもとに、電磁力一定の振動応答結果に、この周波数分析結果のスペクトルの係数を掛けることで、実動

図 10 振動シミュレーション例



時の振動レベルの予測を行った。このシミュレーション結果の一例を図 10 に示す。この例は並列素子数が 7 の場合の 200 Hz での振動応答計算結果である。このようにスタック全体をアニメーション的にシミュレーションすることにより、応答倍率の大きい部分の把握あるいは最適な補強箇所の推定を容易に行うことができる。この計算結果にあらかじめ計算した電磁力の周波数分析結果の 200 Hz 成分を掛けることにより、200 Hz でのおのおのヒューズの振動のレベルを把握することができ、同様な計算を各周波数成分にて実施し、それらの値がヒューズの許容値を超える場合はスタックに適切な補強を加えて再度計算を繰り返す。このようなシミュレーションを行ったことにより、ヒューズを取り付ける冷却導体の締付け箇所を最適とし、ヒューズに与える振動劣化を抑えることができ、長期の信頼性を確保した。

⑥ あとがき

アルミニウムの需要は年々増加しており、アルミ電解設備への投資は継続して堅調である。富士電機も現在の製作中も含めここ 5 年の間に 34 台、7 プラントの製作を手がけ、関連する技術を向上させている。この技術をさらに洗練させ、より経済的で信頼性の高い整流装置へと改良を進めていくことが、アルミ業界への貢献と考えている。

参考文献

- [1] 佐藤眞住, 藤井清隆. アルミニウム工業. 東洋経済新報社. 1968.

解説 アーム構成

パワーエレクトロニクス装置の仕様の一つを示す、例えば「1S8P6A4G」などという記号は装置の要素構成を表している。その中のアルファベットは、それぞれ Series, Parallel, Arm, Group を意味している。ま

た、記号全体としては、1 直列 8 並列とした素子から成るアームを、三相に準拠して 6 基備えた単位インバータまたは単位整流器を、直列ないし並列に 4 グループ併置したものを意味している。

金属表面処理用任意波形電源装置

丸尾 哲弘 (まるお てつひろ)

1 まえがき

従来、アルミサッシの着色や各種金属への電気めっきに代表される金属の表面処理にはサイリスタ整流器を使用するのが一般的であった。しかしながら、サイリスタ整流器による直流電流だけでは歩留り、色調、付きまわり性などを向上させるには限界があった。近年のパワーエレクトロニクスの技術進歩により、サイリスタ整流器では得られなかった特殊波形を作り出すことができるようになり、各プロセスにおける最適条件を電源の波形の点からも追求できるようになってきた。

本稿ではアルミサッシの着色原理および最近のアルミサッシ着色用電源装置の納入例について紹介する。さらに、今後の適用範囲の拡大例として、プリント基板の銅めっきプロセスに適用した例について紹介する。

2 任意波形電源装置の一般仕様

任意波形電源装置はプロセスに適した特殊な波形を出力できる電源装置であり、現在、アルミサッシ着色用を中心として納入実績がある。一般仕様を表1、主回路単線図を

表1 任意波形電源の一般仕様

項目	内容
入力	三相, 50/60 Hz, 200 V, 440 V, 3.3 kV, 6.6 kV (要求により各種対応可能)
出力製作範囲	電流: ~10 kA (ピーク) 電圧: ~300 V (ピーク)
制御方式	定電流制御, 定電圧制御, 定電力制御
制御精度	標準: ±2% (標準以外でも製作可能)
インバータ仕様	使用素子: IGBT
冷却方式	変圧器: 油入自冷または乾式自冷 ダイオード整流器: 直接水冷または風冷 インバータ: 直接水冷または風冷
概略外形寸法例	80 V 300 A器: 幅800×奥行1,000×高さ1,950 (mm) 50 V 4.5 kA器: 幅5,200×奥行2,000×高さ2,350 (mm)

図1, 波形例を図2に示す。本装置は単相PWM (Pulse Width Modulation) 方式のインバータ装置であり, IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) を使用することにより, 内部回路の高周波化と大電流化を両立している。出力波形種類は任意設定可能であるが, 生産ライン用では波形をある程度固定し, 使用するケースが多い。

3 アルミサッシ着色用電源

3.1 アルミ材表面への着色の原理および工程

アルミ材の表面処理は図3に示す工程のように, まず, 表面に酸化皮膜を作る陽極酸化処理を行い, 次に電解着色処理を行う。

最初の工程である陽極酸化処理では, アルミ材を+極にした直流通電を行い, 表面に酸化皮膜を形成させる。化学反応は次の式となる。

図1 任意波形電源の主回路単線図

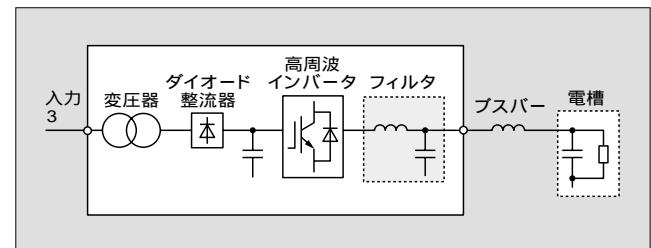
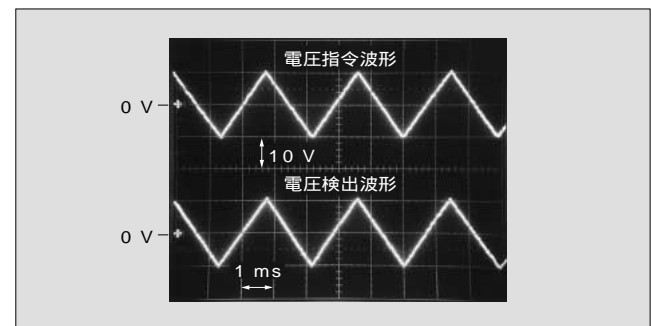
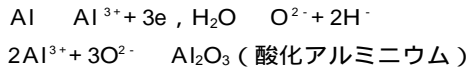


図2 出力電圧波形例



丸尾 哲弘

産業用電源装置の設計に従事。現在, 変電システム製作所パワエレ部担当課長。



酸化皮膜は図4のようにバリア層と呼ばれる無孔質の皮膜とポーラス層と呼ばれる多孔質の皮膜で構成されている。このポーラス層中の電解孔（ポアー）の形状は、電解液と電解条件（電源波形など）により変化させることができる。最近ではこのポーラス層を利用した付加価値の高い機能的な用途（光学的、光電的、磁氣的など）の開発が行われている。

電解着色工程ではアルミ材を - 極とし、通電を行い、ポーラス層中のポアー内に金属を析出させる。



析出の様子を図3に示す。

このポアー内への金属の析出度合いにより、アルミ材の着色の色調が変化する。絶縁体であるバリア層を通して、金属が析出される機構は完全には解明されていないが、直流や交流あるいは特殊波形での通電により、歩留り、色調、均一性をコントロールできることが知られており、その方法はメーカーのノウハウとなっている。

析出させる金属はニッケルが主流であり、黒・茶色系の色が多いが、最近では三次電解と呼ばれる方法で青・灰色

系の色出しもできるようになってきている。三次電解では発色させるための電解条件の許容幅が小さいために、電源装置としての役割も重要となり、波形設定機能や出力波形精度に対する要求が厳しくなる。

3.2 任意波形電源装置

アルミサッシの着色においては電解液の種類・温度、電極の形状・配置などが着色の品質に影響するが、電源装置から出力する電流・電圧も大きな要因となる。電流・電圧の波形を高精度に制御することにより、着色の歩留りの向上や特殊色への対応が可能となる。

ここでは一例として、最近、富山軽金属工業(株)へ納入した電源装置について述べる。仕様を表2、外観を図5、単線図を図6に示す。

出力電圧波形は直流と方形波（ソフトスタート付き、正負非対称波形）である。直流出力（ソフトスタート付き）では茶色系の着色、方形波交流（ソフトスタート付き）で

図3 アルミニウム表面処理の代表的工程

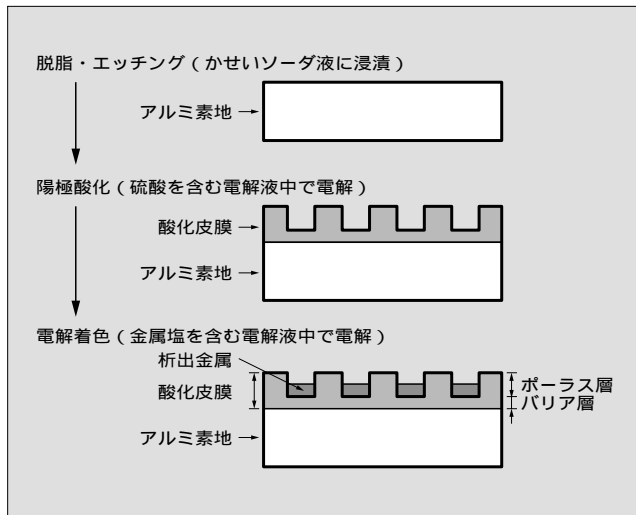


図4 アルミニウムの表面状態

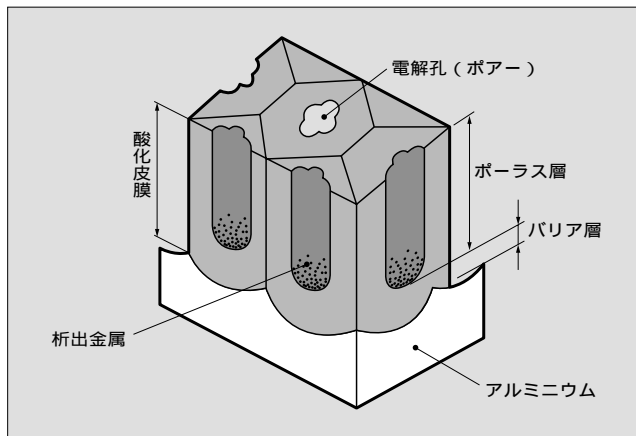


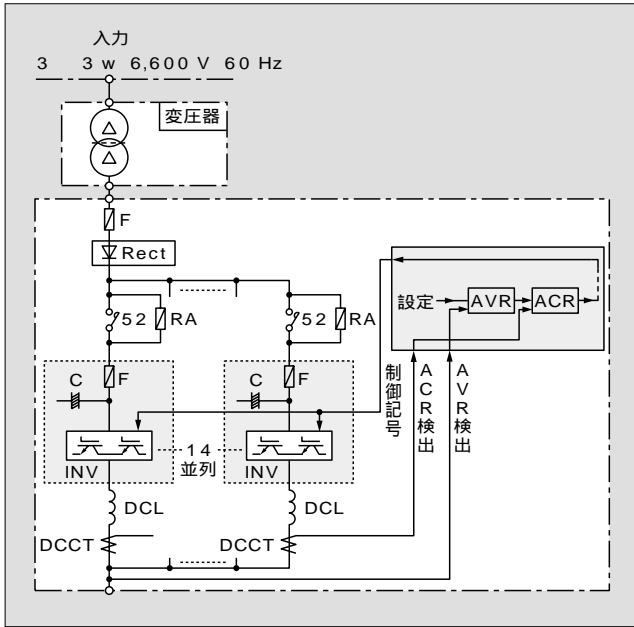
表2 富山軽金属工業(株)納入±50V 10kA 器の仕様

項目	内容
入力	三相, 60 Hz, 6.6 kV
出力	直流: 50 V, 10 kA
	交流: 50 V (ピーク), 10 kA (ピーク)
出力電圧波形	直流および方形波 方形波仕様: 周波数10~100 Hz 正負時間比率0.1~10
制御方式	定電圧制御
制御精度	±0.2%
主要主回路構成機器	ステップダウン変圧器 ダイオード整流器 インバータ
インバータ仕様	IGBT 6並列/スタック×28スタック構成 IGBT型式: 2MBI400N-060 キャリア周波数: 7.5 kHz
冷却方式	変圧器: 油入自冷 ダイオード整流器: 直接水冷 インバータ: 直接水冷
外形寸法	幅5,500×奥行1,960×高さ3,200 (mm)
質量	9,400 kg

図5 富山軽金属工業(株)納入±50V 10kA 器の外観



図6 富山軽金属工業(株)納入±50V 10kA器の単線図



は黒色系の着色を行っている。さらにパイロットセンターへ導入した同様の電源ではこれらの色のほかに方形波交流での三次電解による青・灰色系の着色を行っている。

茶色系の直流電解着色では出力電圧のソフトスタート時の電圧誤差が色のばらつきに大きく影響する。また、方形波交流電圧をアルミ材に印加して、緑・灰色系を発色させる三次電解着色プロセスにおいても、低電圧から定格電圧までの全領域にわたり、高精度の方形波交流電流のピーク値が要求される。

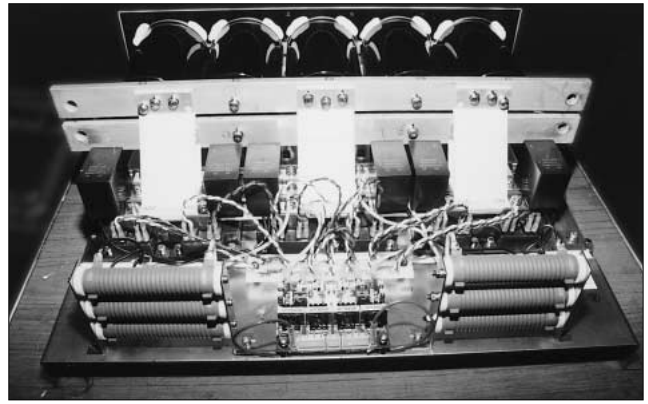
制御の高精度化に対応するために、次の事項について配慮し、0.2%の高精度制御機能を持たせた。

- 1) 制御装置内に使用する部品の低温度ドリフト化
- 2) 出力電圧検出器の高精度化
- 3) 設定信号用絶縁変換の高精度化
- 4) 制御線へのノイズ侵入の排除

一方、出力方形波電圧波形の立ち上がり時間については、高速応答が要求される。これは方形波交流での黒色系電解着色においては方形波の立ち上がり時間の遅れが着色時間のデッドタイムとなるためであり、立ち上りを速くすることにより、電解時間を短くすることができ、生産性の向上が狙える。

アルミサッシでの着色用途では負荷であるアルミサッシ表面の酸化皮膜の状態(バリア層厚さ、ポーラス層構造)、電解液、電極配置に起因するキャパシタンス分が多く存在する。また、電源装置から負荷までは大電流を流すためのブスバーで接続されているため、ブスバーのインダクタンス分が存在する。等価回路は図1に示すように、負荷側に、キャパシタンス分、インダクタンス分を含む回路になっているため、高速制御と安定な制御を両立させることが難しくなっている。さらに、キャパシタンス分は一定ではなく、アルミ材の量、通電の初期と終期、直流運転時と交流方形波運転時とで大きく変化するため、変化量を考慮した制御とする必要がある。

図7 IGBTインバータスタックの外観



この問題を解決するために、出力の電圧余裕を大きくとる設計とし、高速応答性能を向上させている。安定性向上のために、制御方式は定電流制御マイナーループ付き定電圧制御とし、波形の立ち上がり時の電流オーバershoot抑制のための電流リミッタ制御も併用する方式を採用している。なお、直流運転時と交流運転時ではキャパシタンス分の値および変化率が大きく違うために、制御定数を直流運転時と交流運転時とで、切替可能としている。

10kAという大電流出力に対応するため、インバータ部は600V,400A定格の上下2アーム入りのIGBTモジュールを6並列接続した水冷スタックを14台並列接続し、合計28スタックにて構成された単相インバータとなっている。1スタックの写真を図7に示す。この多並列接続されているスタック間の電流分担の均一化手段として、1インバータユニットごとに定電流制御を行っている。さらに、インバータユニット間の循環電流抑制用に各インバータユニット出力にDCリアクトルを付加している。また、ブスバー・インバータユニットの配置は磁束をキャンセルするような配置とし、装置内部のローカルヒートの抑制を図っている。

現場での操作性・監視性を最適なものにするため、制御・ソフトウェア・ハードウェアに負荷側(アルミサッシ)のノウハウを組み込み、生産性の向上に直結した電源装置としている。本装置の適用により、従来のサイリスタ・誘導電圧調整器方式に比べ、色調不良率が従来比1/3になっている。

4 プリント基板銅めっき用任意波形電源装置

アルミニウムの表面処理以外に、特殊波形を負荷に加えることにより、効果が出る用途としては各種の電気めっきがあげられる。ここではプリント基板の銅めっき工程へ任意波形電源を適用した例について述べる。

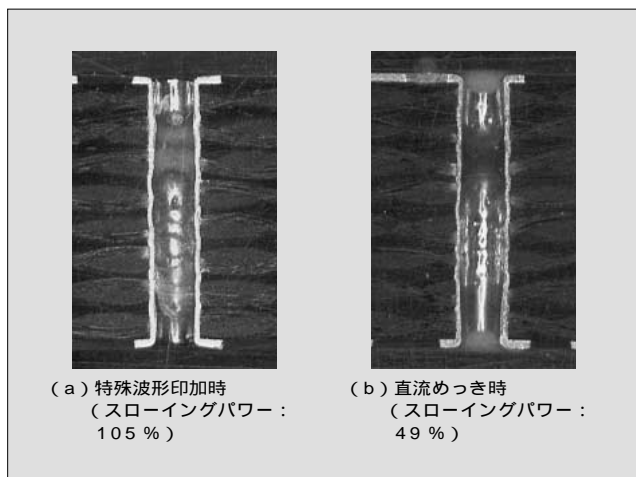
4.1 プリント基板銅めっきの工程および最近の動向

プリント基板の銅めっき工程では無電解めっきを施した後に電気めっきを行う。電気めっきの工程では従来から直流電源が使用されている。最近ではプリント基板の高密度

表3 実験条件

めっき面積	673.3 cm ²
めっき時間	60 min
パルス波形 電流値は、 100 cm ² あたり	

図8 スルーホールの断面写真



化が進み、スルーホールの微細化、ミニバイア化、微小バンプ、ビルドアップ基板の製造技術など、微細な部分でのめっき技術が重要なものとなってきている。しかしながら直流による電気めっきではめっきの付きまわり性の問題、すなわち角部や突起部は電界が集中してめっきが厚くなり、スルーホール中心部などの電界の弱い部分ではめっきが薄くなる現象を生じる。これは今後さらに進む微細化加工上、解決しなければならない課題である。

4.2 任意波形電源の適用による効果

ここでは任意波形電源により、特殊波形電流を与えた場合の効果について事例を述べる。出力電流は方形波を基本とした波形を設定し、スルーホール内のめっき厚分布について直流法との比較を行った。

実験条件を表3に示す。出力電流波形は表3のように正負非対称方形波としている。正側波形は通常の直流電気めっきの場合と同様に、めっきを付けるためのものである。一方、負側の幅の短いパルス波形は、スルーホール角部などの通常ではめっきが多く付いてしまう部分のめっきを電解液中へ再溶解させるためと、材料の表面近傍の添加材イオンの濃度を均一化させるためのものである。このように、正と負の電流波形を組み合わせることにより、膜厚の均一化を図っている。

表4 スルーホールの物理特性比較

項目	分類	パルス波形でのめっき	直流めっき
		延び率 (%)	サンプル1
	サンプル2	27.0	21.4
	平均	27.2	21.7
抗張力 (kN/cm ²)	サンプル1	38	35.9
	サンプル2	37.8	36.2
	平均	37.9	36.1
スローイングパワー (%)	サンプル1	105	49
	サンプル2	104	50
	平均	104.5	49.5
熱衝撃 (回)		20	20

延び率：柔軟性の評価（大きいほうがよい）
 抗張力：パターンのはがれにくさの評価（大きいほうがよい）
 スローイングパワー：スルーホール入口のめっき厚に対する孔中央のめっき厚の比（100%に近いほうがよい）
 熱衝撃：異常のない熱衝撃回数（回数が多いほどよい）

電流波形指令としては正負非対称方形波に若干補正を加えている。これにより出力電流のオーバシュート量の制御と高速の立上りを実現する。制御は定電流制御とし、所定の時間で通流を行っている。

スルーホール内のめっき厚の分布写真は図8のようになっている。直流めっきとの比較結果を表4に示す。通流後のプリント基板スルーホール内のめっき分布（スローイングパワー）は通常の直流めっきに比べ、格段に向上している。

他の物理的特性についても、直流めっきと同等以上の性能を有している。

5 あとがき

本稿では金属表面処理用任意波形電源の適用例としてアルミサッシ電解着色、プリント基板銅めっきについて紹介したが、その他の金属表面処理用途においても多くの利点が得られる。アルミニウムについては付加価値の高い機能性アルマイト、特殊色対応などへの応用が考えられる。さらに、マグネシウムなどこれからの応用範囲の拡大が見込まれる材料の表面処理にも効果が期待できる。今後、他の表面処理用途へも幅広く適用していくため、それらの用途の利点に直結した電源として、用途開発を推進していく所存である。

最後に、本稿執筆に際し、多くのご助言をいただいた富山軽金属工業(株)取締役政誠一殿に謝意を表す。

参考文献

- 1) 政誠一．アルミニウムの着色技術の現状と動向．アルミニウム．vol.5, no.23, 1998, p.61-67．
- 2) 坂口雅章．アルミニウム陽極酸化皮膜の黒染め処理．表面技術．vol.50, no.4, 1999, p.9-15．
- 3) 最新表面処理技術総覧編集委員会編．表面処理技術総覧．1989．

誘導加熱用サイリスタインバータと最近の適用事例

倉田 巖 (くらた いわお)

中村 清和 (なかむら きよかず)

1 まえがき

導電体に交番磁界を与えると、導電体内部には印加された交番磁界とは反対向きの磁界を発生させようとして渦電流が誘起される。誘起された渦電流と導電体中の電気抵抗によって発生したジュール熱による導電体の自己発熱を誘導加熱と呼ぶ。誘導加熱は、

- 加熱効率が炎などによる加熱に比べ高い。
- 被加熱物に対する温度制御が容易である。
- 被加熱物のみが発熱するので、炎などによる加熱に比べ作業環境が良い。

といった特長を持ち、産業界および一般家庭において広く利用されている。

交番磁界を発生させる手段としては被加熱物の近傍にコイルを設置し、交流電源によりコイルに交流電流を流す方法が一般的である。交流電源として過去には交流発電機、真空管発振器などが用いられていたが、現在ではこれらの電源よりも高効率でメンテナンスが容易な半導体式インバータに置き換わっている。

半導体式インバータには、要求される出力電力、周波数に応じてサイリスタ、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)、MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor) などさまざまな半導体デバイスが用いられている。一般には周波数が 10 kHz 程度まではサイリスタインバータ、10~50 kHz 程度までは IGBT インバータ、50~500 kHz 程度までは MOSFET インバータが用いられている。

富士電機では誘導加熱用サイリスタインバータを約30年前に製品化し、現在に至っている。当初は金属溶解を目的とした誘導炉にのみ適用されていたが、誘導加熱の適用分野が拡大するにつれてさまざまな加熱・溶解装置と組み合わせ使用されるようになった。また出力電力も 60 kW からスタートしたが、現在では 13,000 kW のインバータを製品化するまでになっている。

本稿では、加熱用サイリスタインバータの特長、仕様、適用事例および新しく開発した制御装置について、そ

の概要を紹介する。

2 誘導加熱用サイリスタインバータの仕様・特長

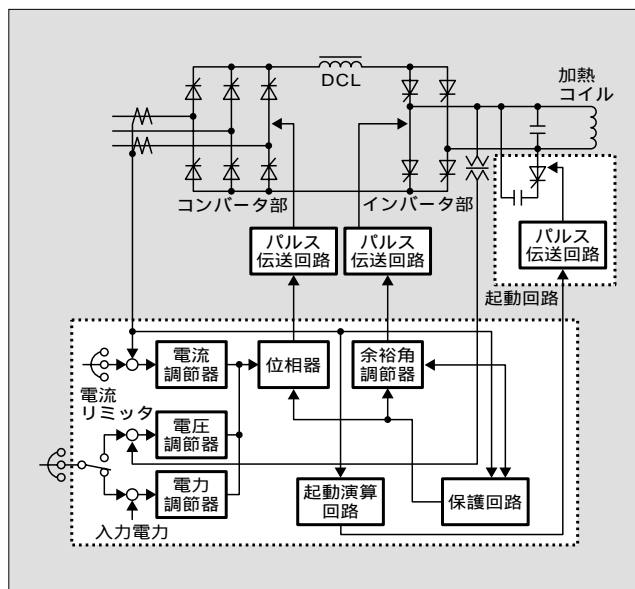
2.1 標準系列と仕様

表 1 にサイリスタインバータの標準系列と仕様を示す。

2.2 回路構成と制御方式

主回路の基本構成と制御ブロック図を図 1 に示す。コンバータは小容量機では 6 相サイリスタ整流器を使用しているが、大容量機では 12 相整流器または 24 相整流器を採用して入力側の高調波の低減を図っている。インバータは高周波サイリスタを用いたフルブリッジ接続で構成されている。制御対象は入力電流制限付きの出力電圧制御が標準であるが、設定の切換により入力電力制御も可能である。また、目的に応じて加熱温度制御、プログラム運転なども可能である。

図 1 サイリスタインバータの構成例



倉田 巖

誘導加熱用インバータの開発に従事。現在、電機システムカンパニーエネルギーソリューション室、電気学会会員。



中村 清和

誘導加熱用高周波インバータの開発、設計に従事。現在、富士エフケーイー(株)電熱事業部技術部マネージャー。電気学会会員。

表1 サイリスタインバータの標準系列と仕様

項目	仕様							
交流入力	3, 50/60 Hz, 電圧変動±10% (入力電圧は出力容量によって異なる。)							
出力周波数	~ 500 Hz		1 kHz		3 kHz		10 kHz	
出力	出力電力	出力電圧	出力電力	出力電圧	出力電力	出力電圧	出力電力	出力電圧
	350 kW	600 V	300 kW	600 V	250 kW	500 V	50 kW	400 V
	700 kW	1,200 V	600 kW	1,200 V	500 kW	1,000 V	100 kW	400 V
	1,000 kW	1,800 V	900 kW	1,800 V	1,000 kW	1,000 V	200 kW	800 V
	2,000 kW	2,400 V	1,500 kW	1,800 V	1,500 kW	1,500 V	300 kW	1,200 V
	4,000 kW	3,000 V	2,000 kW	1,800 V	2,000 kW	1,500 V	500 kW	1,200 V
	6,500 kW	3,000 V	4,000 kW	2,400 V	3,000 kW	2,000 V	1,000 kW	1,600 V
	上記仕様を超えるものは個別対応とする。							
出力調整範囲	5 ~ 100%							
制御対象	出力電圧, 入力電力 (入力電流制限付き)							
主回路方式	コンバータ部: 6相整流, 12相整流, 24相整流のいずれか1方式, インバータ部: フルブリッジ方式							
冷却方式	水冷式 (純水循環方式), 水温: 5 ~ 35							
種別	電流型インバータ							

表2 平滑回路別高調波発生量

(単位: %)

回路種別	高調波次数	高調波発生量 (%)							
		5	7	11	13	17	19	23	25
L 平滑	6相整流器	17.5	11.0	4.50	3.00	1.50	1.25	0.75	0.75
	12相整流器	2.00	1.50	4.50	3.00	0.20	0.15	0.75	0.75
	24相整流器	2.00	1.50	1.00	0.75	0.20	0.15	0.75	0.75
C 平滑	リアクトルなし	65.0	41.0	8.50	7.70	4.30	3.10	2.60	1.80
	交流リアクトルあり	38.0	14.5	7.40	3.40	3.20	1.90	1.70	1.30
	直流リアクトルあり	30.0	13.0	8.40	5.00	4.70	3.20	3.00	2.20
	交流・直流リアクトルあり	28.0	9.10	7.20	4.10	3.20	2.40	1.60	1.40

C (コンデンサ) 平滑... 直流リアクトル: 蓄積エネルギーが0.08 ~ 0.15 ms 相当 (100%負荷換算)
 交流リアクトル: 3%
 平滑コンデンサ: 蓄積エネルギーが15 ~ 30 ms 相当 (100%負荷換算)
 負荷: 100%

2.3 特長

(1) 大容量・高効率

高電圧・大容量の高周波サイリスタ素子を直並列に接続することにより、高電圧化と大電流化を実現している。現在までに、300 Hz では 13,000 kW 誘導炉用電源を、10 kHz では単機容量 1,000 kW の加熱用インバータを納入した。また、周波数変換効率は定格時で 97 % と高い。

(2) 負荷インピーダンスの変動に対応した制御

負荷回路の共振周波数に同期して動作する自製式インバータであり、被加熱物の温度や形状の変化による負荷インピーダンスの変動に対して安定な動作が可能である。

(3) 低高調波

直流中間部をリアクトルにより平滑している電流型インバータは、コンデンサ平滑方式の電圧型インバータと比較して表2に示すように高調波が少ない。このため高調波対策設備の容量を小さくでき、電源設備の設置面積を低減できる。

③ サイリスタインバータの適用事例

最近のサイリスタインバータの適用事例を以下に記す。

3.1 誘導炉用 13,000 kW, 300 Hz サイリスタインバータ

当初は60 kW からスタートした誘導炉用サイリスタインバータも、年を経るごとに大容量化が要求され、13,000 kW, 300 Hz という世界最大級のインバータを製品化するに至った。図2にその構成を示す。

特長は次のとおりである。

- [1] 13,000 kW を二組の 6,500 kW インバータで構成し、6,500 kW インバータの単独運転も可能とすることにより、低出力運転時の効率を改善している。
- [2] 13,000 kW 運転時は24相整流、6,500 kW 運転時は12相整流とすることにより高調波を低減した。これにより高調波対策設備の容量を小さくすることができ、設置面

図2 13,000 kW, 300 Hz サイリスタインバータの構成例

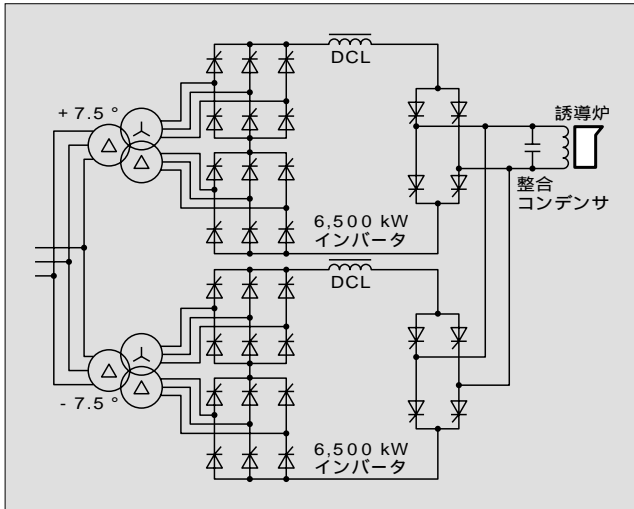


図4 13,000 kW, 300 Hz サイリスタインバータの外観

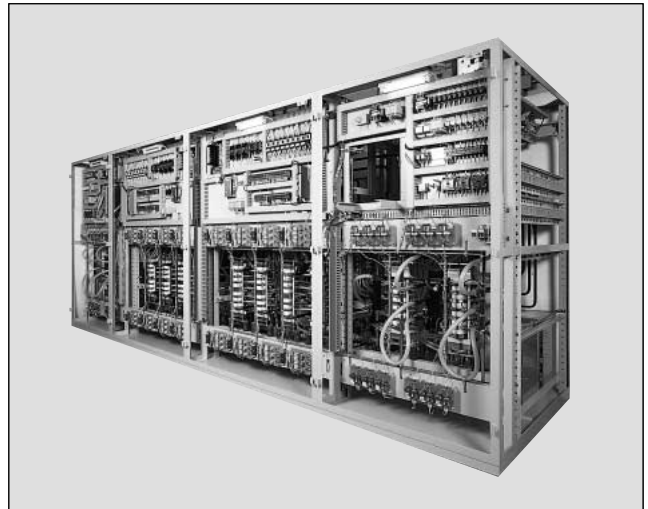


図3 13,000 kW, 300 Hz 誘導炉のインピーダンス変化

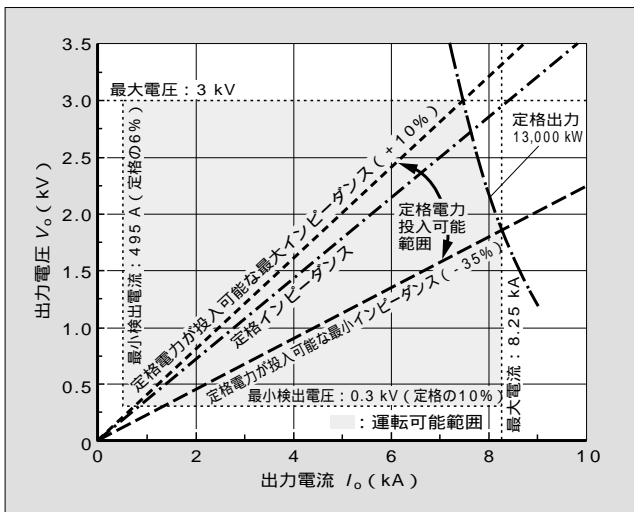


図5 1,000 kW, 10 kHz サイリスタインバータのスタック構成例

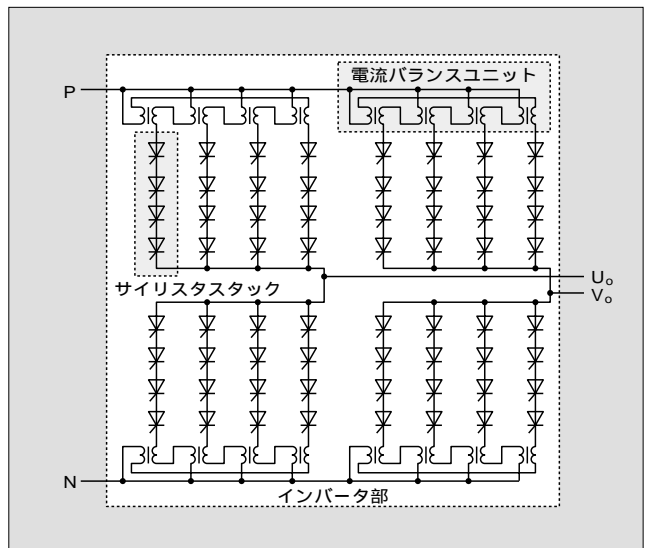


表3 13,000 kW, 300 Hz 誘導炉用インバータの仕様

項目	仕様
入力	3 , AC 6,600 V, 50 Hz, 16,300 kVA
インバータの形式	水冷式サイリスタインバータ
出力電圧	3,000 V
出力電流	8,250 A
出力周波数	300 Hz
出力電力	13,000 kW
溶解容量	25 t (鑄鉄)
電源盤外形寸法	W 6,000 × H 2,350 × D 1,570 (mm)

積の低減を図った。

- 3) 高電圧・大容量サイリスタ素子を3直列にすることで、インバータ出力電圧を高電圧化(最大で3,000 V)した。これにより整合変圧器や整合コンデンサの切換なしに負荷との整合が行え、かつ出力電流減により電流損が低減したため、効率が向上している。
- 4) 広範囲な負荷インピーダンス変化に対応した新型の制

御装置(後述)を搭載することで、低インピーダンス負荷(主に溶解初期状態)運転から、高インピーダンス負荷(主に溶解途中状態)運転まで整合コンデンサの切換なしに定格出力運転が可能である(図3参照)。

- 5) 出力電圧や入力電流など各種運転データの検出方法を見直し、連続運転における入力電力調整範囲を従来の5~100%から1~100%へと拡大した。
- インバータの仕様を表3に、外観を図4にそれぞれ示す。

3.2 熱処理用高周波電源装置用サイリスタインバータ

薄板加熱用に納入した単機1,000 kW, 10 kHz 高周波電源のサイリスタインバータのスタック構成例を図5に、スタック外形図を図6にそれぞれ示す。

大容量高速サイリスタを使用し、1アームあたり4直列4並列の構成としている。製作例では、出力電圧を1,600 Vとすることにより出力電流を低減させ、かつ負荷と直接接続することで装置のコンパクト化、省エネルギー化を

図6 1,000 kW, 10 kHz サイリスタインバータのスタック外形図

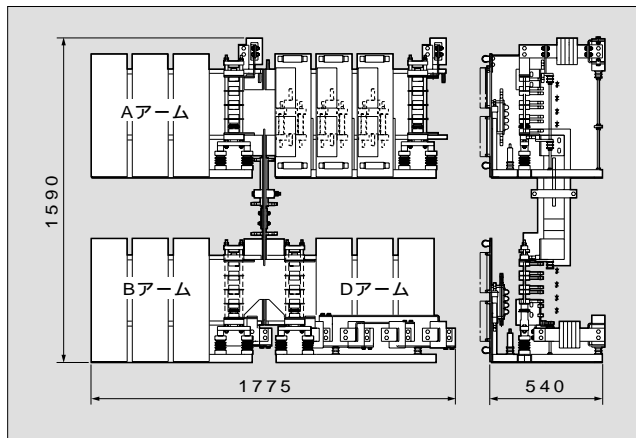
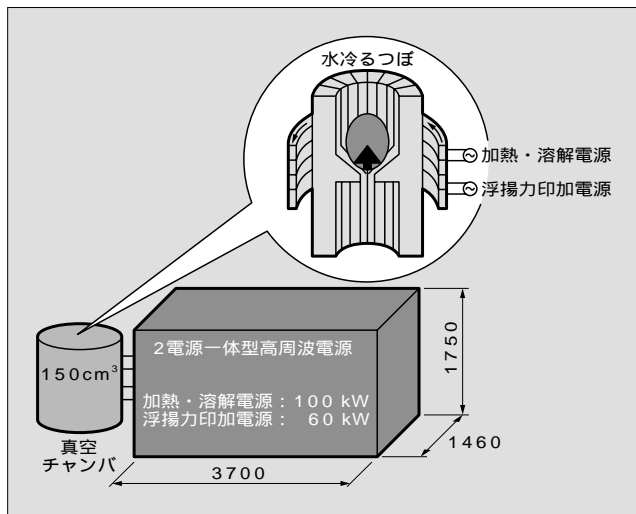


図7 浮揚溶解装置の構成例



図っている。

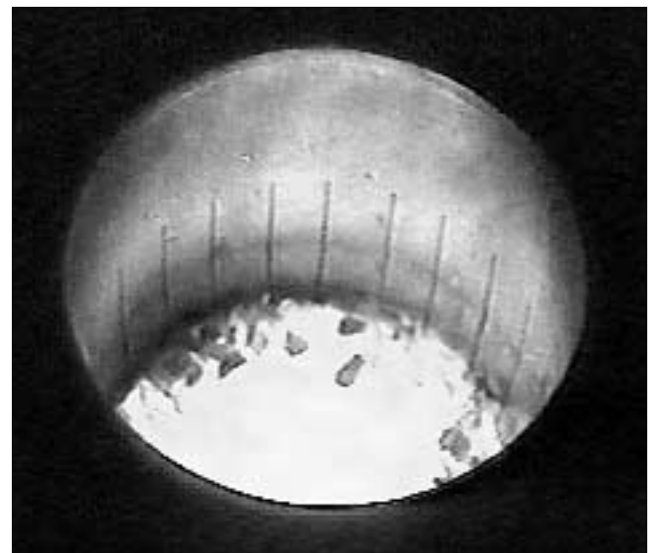
高周波領域でサイリスタ素子を4直列にするにあたり、素子の電圧分担が均等になるよう高速信号分配増幅回路により各サイリスタ素子のゲート信号の同時性を保ち、かつ素子の特性管理を厳密に行い、同一直列回路内のサイリスタ素子の特性が極力均一になるようにしている。また、高周波回路では並列回路の配置が不適切であると各直列回路の電流が均等に流れず、1直列回路への電流集中が発生しやすくなるが、この4並列回路では、各直列回路の電流が隣り合う直列回路の電流と等しくなるように磁気結合させたバランス回路を装備することで、各サイリスタ素子の電流を均等にしている。このような回路構成を採用することで、今までに5並列までの製作例がある。

上記技術を用いた高周波電源は、薄板加熱ばかりでなく、パイプの熱処理、鋼線の熱処理、厚板鋼鉄の端部加熱(エッジヒータ)、複合ロール製造CPC(Continuous Pouring Casting: 連続注湯鋳造)装置、シリコン溶解装置などにも適用されている。

表4 浮揚溶解装置の仕様

項目	浮揚力印加電源	加熱・溶解電源
入力	3 , AC 440 V , 60 Hz , 300 kVA	
インバータの形式	水冷式サイリスタインバータ	水冷式 MOSFET インバータ
出力電力	60 kW	100 kW
溶解容量	150 cm ³	
溶解雰囲気	真空 (10 ⁻³ Pa) , ガス置換 , 大気	
溶解金属	Ti 合金 , Nb , Pt , Pd などの高融点合金	
電源盤外形寸法	W 3,700 × H 1,750 × D 1,460 (mm) (純水循環装置, 整合部を含む)	

図8 浮揚溶解によるニオブの溶解 (2,520)



3.3 2電源同時印加高周波電源

水冷るつぼを使用した浮揚溶解などの特殊なケースでは、同時に異なる周波数の電流を互いに密着したコイルに供給する必要がある。浮揚溶解装置の構成例を図7に示す。

図7において、下部電源は浮揚力印加用として数kHzのサイリスタ電源を用い、密着巻きされた上部コイルには加熱溶解用として数十kHzのMOSFET電源を用いている。研究用として納入した浮揚溶解装置について、その仕様を表4に示す。この浮揚溶解装置の特長は次のとおりである。

- 1) 2電源同時制御方式により、二つのコイルを独立して制御できる。そのため安定した浮揚力と、効率よい加熱エネルギーを同時に供給可能となり、材料の種類や溶解量が異なっても安定した溶解ができる。さらには、高融点合金の創成も可能である。
- 2) 2電源を同時にコントロールできることを利用した底部出湯機能を有しており、水冷るつぼを傾動させずに溶解金属を取り出すことが可能である。
- 3) 0.001 Paにおいても絶縁物の放電破壊現象がなく、高真空対応溶解が可能である。
実運転において1kgの鉄を5分、650gのニオブを15分

で溶解することができた。溶解したニオブの様子を図8に示す。

4 新型の制御装置

従来の制御装置は誘導炉の整合部に、整合変圧器のタップ切換や整合コンデンサ切換があることを前提に設計されていた。しかしながら、このような切換機構は高コストかつメンテナンスが必要であり、時代のすう勢に適合しなくなっている。また元々は誘導炉用に開発された制御装置をさまざまな負荷に対応させる必要があり、制御装置に対して以下に記すいろいろな要求が出てきている。

- (1) 調整箇所の削減
- (2) より広範囲な負荷インピーダンスへの対応
- (3) 制御特性の容易な変更
- (4) 周波数、電圧リミッタ、電流リミッタや故障検出レベルなどの各種設定の容易な変更

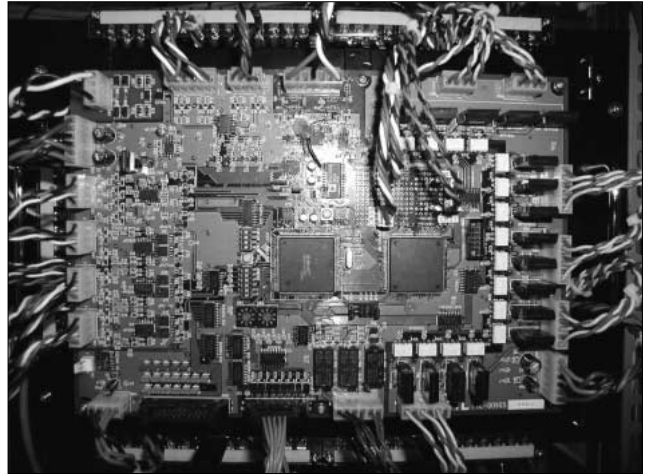
そこでこれらの要求を満たすために、図9に示す新しい制御装置を開発した。

特長は次のとおりである。

- (1) ワンチップCPUと書換え可能なロジックIC(CPLD)を採用したことにより、各種の設定や制御特性などがすべてソフトウェアにより変更可能である。このためさまざまな仕様のサイリスタインバータに対して柔軟に対応できる。
- (2) 現行の制御装置に比べ、故障データをより詳細に出力可能なため、故障発生時の解析が容易である。
- (3) 誘導加熱用MOSFETインバータに採用している、出力位相角(角)制御を適用することで、より広範囲な負荷インピーダンスの変化に対応した。
- (4) 従来の制御装置と同一な取付け寸法かつ入出力信号の仕様を同一としているため、従来の制御装置からの置換えが容易にできる。

この新型制御装置は、先に述べた13,000kW、300Hz誘導炉用サイリスタインバータに搭載されており、良好に運

図9 新型制御装置



転中である。

5 あとがき

サイリスタインバータは大容量・低周波の分野ではコストの点で最も有利な電源といえる。今後はさらなる大容量化とともに、リモートメンテナンスなどの新しい機能を搭載した電源を開発し、お客様のニーズにこたえていく所存である。

参考文献

- 1) 加納利行, 古城靖彦. 省エネルギー形誘導溶解炉. 富士時報. vol.71, no.5, 1998, p.280-284.
- 2) 久本正昭ほか. 高周波誘導加熱電源. 富士時報. vol.71, no.5, 1998, p.268-273.
- 3) Tadano, H. et al. Vacuum Melting with Cold Crucible Levitation Melting Furnace. The 3rd International Symposium on EPM. 2000, p.277-282.
- 4) 日本電気協会. 高調波抑制対策技術指針. JEAG 9702-1995.

MOSFET インバータ型高周波電源

三浦 敏栄 (みうら としえ)

中村 清和 (なかむら きよかず)

1 まえがき

100 kHz から数百kHz の高周波電源の用途として、一般的なものに誘導加熱分野がある。誘導加熱とは、コイルに流れる電流によって作られた交番磁界を導電性の被加熱物に印加し、それにより誘起される渦電流と被加熱物の抵抗で発生するジュール損で、被加熱物を加熱するものである。産業応用例には、薄鋼板加熱、焼入れ、電縫管溶接などがあり、それらに使用する高周波電源は、現在も多くの需要がある。

100 kHz から数百kHz の高周波電源には、以前は真空管式の発振器を用いていた。近年、高速スイッチングに適している MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor) 素子を使用したインバータの登場により、電源の体積は約 1/4 となって省スペース化が達成され、効率も約 75 % から 96 % (定格時) に大きく向上し、省エネルギー化、生産性向上が図られている。

富士電機では、早くから平型 500 V, 240 A MOSFET とそれを組み込んだ 20 ~ 100 kW スタックを使用した高周波電源を製品展開している。

本稿では、新たに開発した大容量平型 500 V, 500 A MOSFET とそれを組み込んだ 125 kW スタックを、鉄鋼生産ラインの薄鋼板加熱電源用 1,000 kW, 150 kHz 高周波電源に適用し、製品化したので報告する。

また、最近の電縫管溶接用電源、プラズマ加熱への高周波電源応用および高周波放電を使った金属蒸着用フィルムの表面処理への応用についても併せて紹介する。

2 1,000 kW, 150 kHz 高周波電源

2.1 大容量平型 500 V, 500 A MOSFET ⁽¹⁾

図 1 に現行 500 V, 240 A MOSFET と大容量 500 V, 500 A MOSFET の外観を、表 1 に仕様を示す。大容量 MOSFET は、現行 MOSFET と同様に富士電機独自の高周波に適した低インダクタンスな薄型形状で、両者の外形寸法は同じであるが、現行 MOSFET と比較して性能は大

幅に向上している。

大容量平型 MOSFET の特長を以下に記す。

1) 定格電流倍増

MOSFET チップを変更して、オン抵抗を 1/2 に、チップのチャンネル-ケース間の熱抵抗を 1/3 にすることで、通流時の発生損失を小さくし、かつ冷却性能を向上させている。この結果、同一寸法で、定格電流は 240 A から 500 A へ 2 倍以上に増えている。

図 1 現行 MOSFET と大容量 MOSFET の外観



表 1 現行 MOSFET と大容量 MOSFET の仕様

項目 \ 分類	現行 MOSFET	大容量 MOSFET
定格電流	240 A	500 A
定格電圧	500 V	
オン抵抗比	1	1/2
熱抵抗比 (チャンネル-ケース間)	1	1/3
外形寸法	厚さ 13 × 縦 71 × 横 52 (mm)	



三浦 敏栄

誘導加熱用高周波インバータの開発に従事。現在、電機システムカンパニーエネルギーソリューション室。電気学会会員。



中村 清和

誘導加熱用高周波インバータの開発、設計に従事。現在、富士エフケー(株)電熱事業部技術マネージャー。電気学会会員。

2) 低インダクタンス化

MOSFET 素子の構造を変更し、高周波で使用する場合に重要な要素の一つである配線の低インダクタンス化を行っている。これは、現行 MOSFET と同様の 500 kHz までの適用も考慮に入れて行われている。

3) 現行部品との互換性確保

現行 MOSFET と同じ寸法であるため、125 kW スタックには現行スタック部品を転用することができ、125 kW スタック全体として製作納期の短縮かつ低コストを可能にしている。

2.2 125 kW スタック

図 2 に単器容量 125 kW スタックの外観を、表 2 に現行 100 kW スタックと 125 kW スタックの仕様を示す。125 kW スタックは、現行 100 kW スタックの形状を受け継いでいるが、MOSFET 素子の冷却構造やゲートドライブユニット (GDU)、中間コンデンサ、冷却用水ホース接続継手などを大幅に変更している。

図 2 125 kW スタックの外観

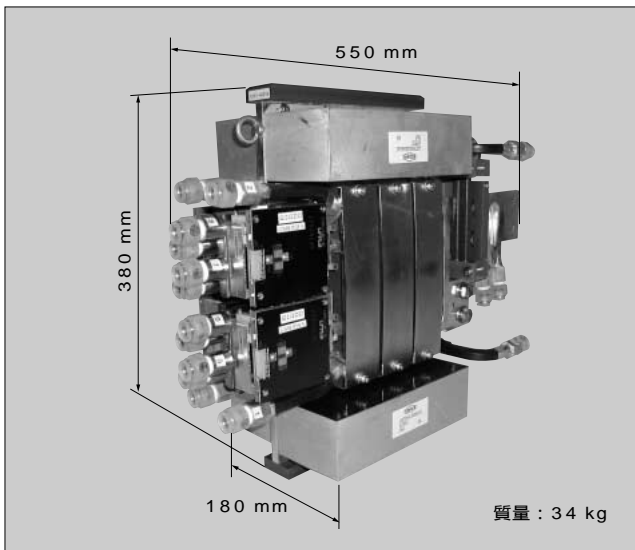


表 2 現行 100 kW スタックと 125 kW スタックの仕様

項目	分類	現行 100 kW スタック	125 kW スタック
	入力 (三相)		220 V, 50/60 Hz
定格出力 (単相)	電力	100 kW	125 kW
	電圧	± 300 V _{p-p} (方形波)	
	周波数	~ 500 kHz	~ 150 kHz
冷却	方式	水冷 (純水循環方式)	
	1 素子あたりの熱抵抗比 (チャンネル-冷却水間)	1	1/3
寸法 [幅×高さ×奥行] (mm) (容量比)		190×380×650 (100%)	180×380×550 (80%)
質量 (比率)		56 kg (100%)	34 kg (60%)

本スタックの特長を以下に記す。

1) 出力電力 25 % アップ

MOSFET 素子だけでなく、スタックでも MOSFET 素子冷却箇所の熱抵抗低減設計を行った結果、現行 100 kW スタックと比較して、MOSFET 素子 1 個あたりのチャンネル-冷却水間の熱抵抗を 1/3 にしている。これにより、1 アームの並列素子数を減らしているにもかかわらず、出力電流を増やし、出力電力 25 % アップを実現した。

2) 小型・軽量化

GDU 取付箇所およびホース接続継手の変更、ならびに中間コンデンサの高密度実装などスタック内を見直すことにより、現行 100 kW スタックと比較して、寸法は幅が 10 mm、奥行が 100 mm 短くなって容量比 80 % に小さくなり、質量は 56 kg から 34 kg へ 60% に軽くなり、小型・軽量化を実現した。

3) 信頼性向上

スタック構造も低インダクタンスにした結果、MOSFET 素子とあわせて、スイッチング時の振動を抑えることによりノイズレベルを下げ、また跳上り電圧を低くし素子特性を向上させることができています。

2.3 1,000 kW, 150 kHz インバータ

図 3 に 1,000 kW, 150 kHz インバータ盤の外観を示す。今回開発した 125 kW スタックを 8 並列接続し、1,000 kW 出力を可能としている。これは、薄鋼板加熱用高周波電源として使用される。

図 4 に 1,000 kW, 150 kHz 高周波電源の主回路構成概略図を示す。整流器には、ダイオードブリッジを使用し、高周波出力部の 125 kW スタックは、単相出力電圧型フルブリッジ構成で、電圧型インバータの逆並列ダイオードに MOSFET 素子の寄生ダイオードを用いている。また、各スタックの出力には、電流検出器と各スタックの電流バランスを兼ねる高周波 CT (HFCT: High Frequency Current Transformer) が接続されている。

図 3 1,000 kW, 150 kHz インバータ盤の外観



負荷回路には、高出力周波数の大電流を流すため、負荷を低インピーダンスにし、かつ負荷力率を改善する目的で、

図4 1,000 kW, 150 kHz 高周波電源の主回路構成概略図

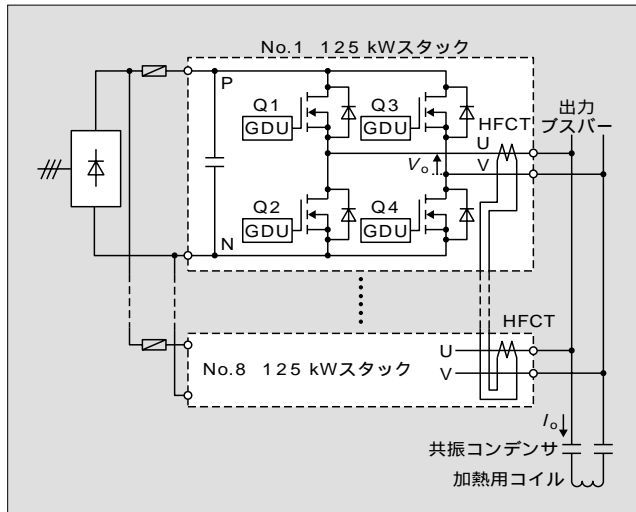


図5 各スタックの運転中および停止時の電流波形例

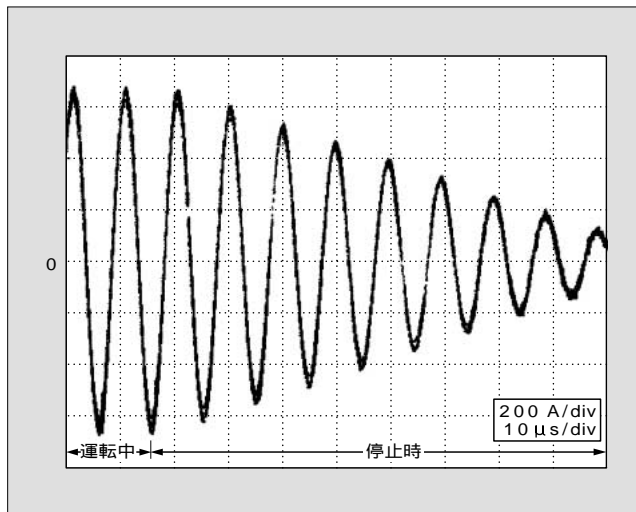
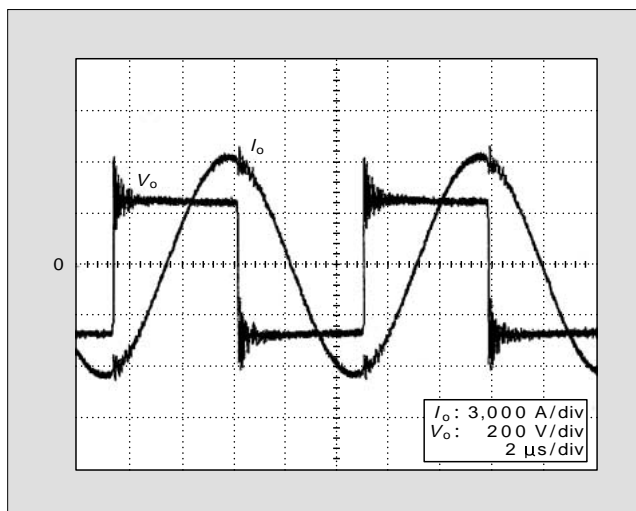


図6 1,000 kW, 150 kHz インバータの出力電圧・電流波形例



直列または並列共振回路が用いられる。富士電機では、MOSFET インバータ型高周波電源には、直列共振回路を用いており、負荷回路の共振コンデンサと加熱用コイルを直列に接続している。

図5に各スタックの運転中および停止時の電流波形例を示す。各スタックの電流は一つの波形のように重なり合っており、HFCTの電流バランス機能によって各スタックの電流がバランスしていることが確認できる。

図6に1,000 kW, 150 kHz インバータの出力電圧・電流波形例を示す。MOSFET 素子およびスタックの低インダクタンス化により、電圧波形は跳上り電圧が低くかつ振動減衰が速い、電流波形はひずみが少ない、両者ともに良好な波形が得られている。

さらに、より大容量化の検討も進めており、上述した主回路構成の複数台組合せなどにより、2,000 kW, 200 kHz までのインバータ構成が可能である。

③ 最近の MOSFET インバータ型高周波電源 および応用例

表3に現行の MOSFET インバータの標準系列と仕様を示す。

3.1 電縫管溶接用 CT レス電源

図7 a に示すように、電縫管溶接用の従来電源では、溶接用コイルに大電流が必要などの理由から、共振コンデンサの後段に電流変成器 (CT) が接続されていた。最近では、図7 b に示すような CT を省略した CT レス電源が一般的になっている。図8にそのコンパクトな外観を示す。

CT レス電源の特長は以下のとおりである。

1) 低い耐圧設計、容易なメンテナンス

CT 一次側の最大十数 kV の高電圧部がないため、高耐圧の絶縁が必要ない。また、絶縁破壊も少なく、メンテナ

表3 MOSFETインバータの標準系列と仕様

項目		仕様		
入力 (三相)		220 V ± 5% (非接地電源)		
出力 (単相)	インバータ方式	電圧型インバータ		
	負荷回路	直列共振回路		
	電力	20 kW	100 kW	500 kW
		30 kW	200 kW	600 kW
		50 kW	300 kW	800 kW
		75 kW	400 kW	1,000 kW
	電圧	± 150 V _{p-p} (方形波)	± 300 V _{p-p} (方形波)	
周波数	10 ~ 500 kHz			
制御方式	電力制御			
調整範囲	10 ~ 100%			
冷却	方式	水冷 (純水循環方式)		
	冷却水温	5 ~ 35		

図7 電縫管溶接用の従来電源とCTレス電源

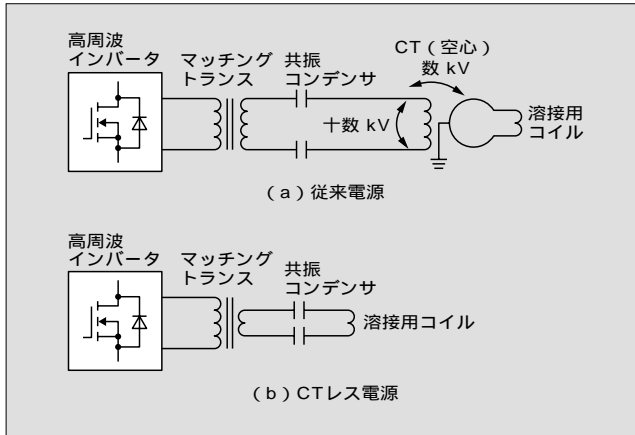
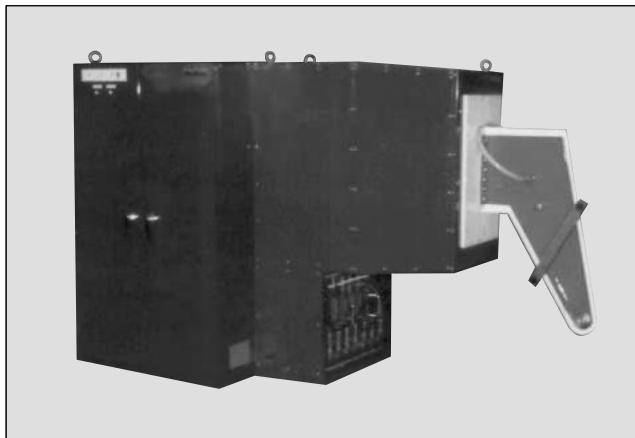


図8 電縫管溶接用CTレス電源の外観



ンスが容易で、絶縁破壊時のサージ電圧による機器への悪影響がない。

2) 効率向上、小型化

電力損失の大きい(約30%)空心のCTがないため、効率を20%程度向上し、また小型にすることができる。

3.2 ICP 廃樹脂高減容システム⁽²⁾

図9にICP(Inductively Coupled Plasma)廃樹脂高減容システムのプラズマ発生原理を示す。高周波電源には、出力周波数450kHzのインバータを用いており、コイルに流れる電流によって発生した磁界と鎖交して電界が生じ、それによってプラズマが発生する。図10にプラズマ発生部の外観(プラズマ発生中)を示す。

本システムは、原子力発電所の水浄化系で使用された放射性イオン交換樹脂を、プラズマで高温・活性化された酸素により酸化分解し、減容処理するものである。本システムでは、1/20の高減容が可能で、廃棄物として加工された後埋設される(現在、確認試験実施中)。

3.3 金属蒸着用フィルムの表面処理

金属を蒸着するフィルムは、無声放電により表面を粗く

図9 ICP 廃樹脂高減容システムのプラズマ発生原理

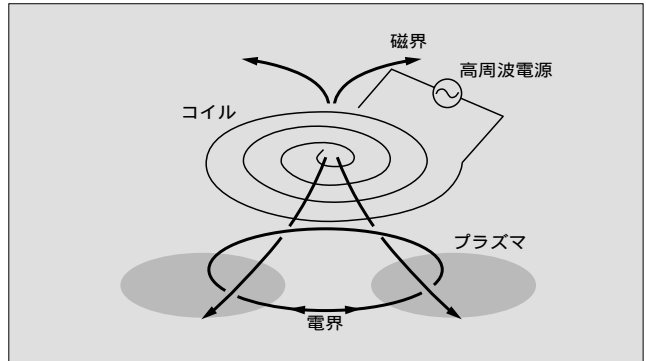


図10 プラズマ発生部の外観(プラズマ発生中)

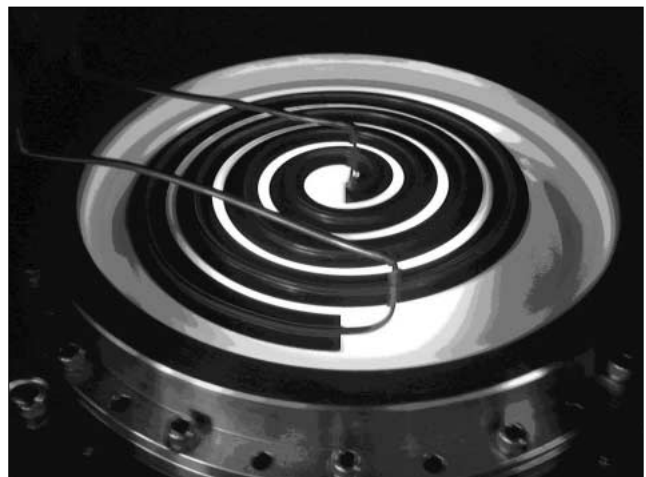
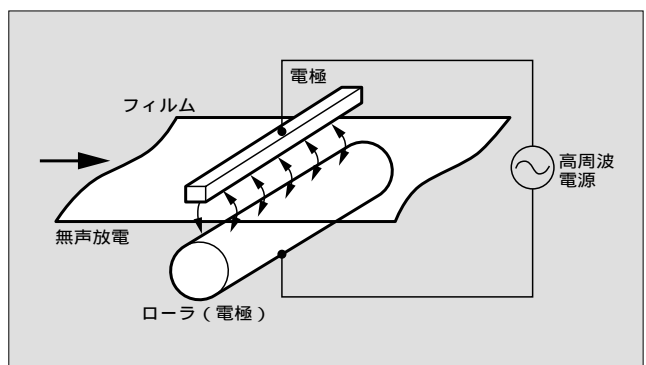


図11 金属蒸着用フィルムの表面処理の原理図



して凹凸を持たせ、蒸着しやすくする必要があります。図11にフィルムの表面処理の原理図を示す。このシステムにも富士電機の高周波電源が用いられており、ローラによって移動するフィルムの表裏に電極を配置し、無声放電させるものである。

表面を処理したプラスチックフィルムに、亜鉛、アルミニウムなどを蒸着したものは、コンデンサの電極(蒸着膜巻回形コンデンサ)やアルミはくの気密性とプラスチックの強度を併せ持った高性能フィルムとして、スナック菓子

などの食品包装用材料などに用いられている。

また、このようなフィルムの表面処理は、印刷インクの濡れ性を良くするためにも利用されている。

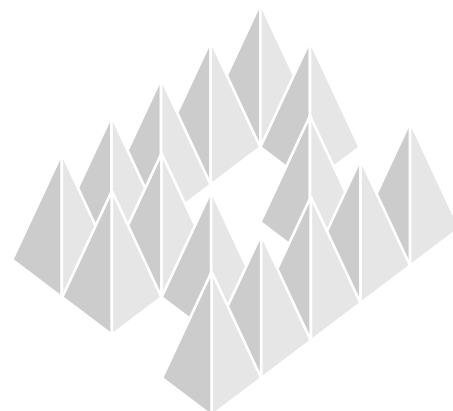
④ あとがき

富士電機では、以前から MOSFET 素子を使用した数十 kHz ~ 500 kHz の高周波電源の開発を行い、さまざまな分野向けの製品化を行ってきた。現在、大容量平型 500 V , 500 A MOSFET とそれを組み込んだ 125 kW スタックの開発、製品化、新しい高周波電源システムの適用および環境用途を含む高周波電源の応用範囲拡大を進めている。

今後、125 kW スタックの高出力周波数化を行い、より広範囲な負荷に対応させ、高性能で、信頼性の高い製品の供給を進めていく所存である。また、さらなる大容量、高出力周波数電源の開発を通じて、高周波回路およびその応用分野の発展に貢献したい。

参考文献

- [1] Miura, T. et al .Prototype of 500 kHz, 250 kW MOSFET Stack for High Frequency Power Supply . IPEC-Tokyo 2000 . vol.2 , 2000 , p.899-904 .
- [2] IC プラズマ廃樹脂高減容システム . 富士時報 . vol.74 , no.1 , 2001 , p.54 .



電気鉄道変電所用純水沸騰冷却式シリコン整流器

津田 信吾(つだ しんご)

中村 豊忠(なかむら とよただ)

小滝 秀治(おたき しゅうじ)

① まえがき

21世紀はエコロジーの時代であり、地球環境保護はわれわれの日常生活にも密接に関連した重要なテーマである。

電気鉄道は、旅客・貨物輸送部門の中でもエネルギー効率がきわめて高く、地球温暖化に直結する二酸化炭素排出原単位が最小の輸送機関である。都市圏を中心とした直流電気鉄道の電力供給の要(かなめ)である変電所用シリコン整流器は、全国で総数約2,500台、総容量約8,000 MWが稼動しており、その冷却方式はこの20年以上にわたってフロン沸騰冷却式が標準的に採用されてきた。フロン沸騰冷却式は多くの長所を持つ反面、初期に採用された冷媒であるクロロフルオロカーボン(CFC)は、1987年のモントリオール会議において、その塩素成分がオゾン層を破壊するため特定フロンとして生産が規制され、代わって採用された塩素を含まないパーフルオロカーボン(PFC)は1997年の京都会議において、SF₆ガスとともに地球温暖化物質の対象となり規制されていく方向にある。

図1 純水沸騰冷却式シリコン整流器の外観



この時代の要請であるシリコン整流器の冷媒の変革という新たな課題に対し、富士電機はこのたび本質的に地球環境に負担とならない純水を冷媒とした沸騰冷却式シリコン整流器の製品化を完了し納入を開始した。以下に新型シリコン整流器について紹介する。外観を図1に示す。

② 電気鉄道変電所用シリコン整流器の変遷

電気鉄道は公共性がきわめて高いためにその変電機器に求められる要件は、高信頼、長寿命、省保守、高効率、不燃、小型軽量、環境適合など数多い。富士電機はこれらの要件を満たしつつ、1960年の強制風冷式シリコン整流器1号器から現在に至るまで累計800台、2,500 MW以上(海外向けを含む)のシリコン整流器をフィールドに送り出してきた。この間、整流素子の大容量化とともに冷却技術も大幅に進歩し、性能、品質、保守性が大幅に向上してきた。図2に冷却方式と冷媒およびシリコン整流素子容量の変遷を示す。

2.1 冷却方式と冷媒

周囲環境の影響を受けやすい初期の強制風冷式から、整流素子の信頼性向上をベースとして構成部品すべてを油中に浸漬して省保守化を図った油冷式に、さらに整流素子の大容量化に伴い、空気や油の対流熱伝達による冷却方式から、より効率的に冷却でき、不燃、省保守、小型軽量などの長所を持つ沸騰・凝縮冷却(沸騰冷却)方式に発展してきた。

冷媒も空気から鉱油、さらに沸騰・凝縮の熱伝達特性が高く電気絶縁性に優れた化学合成物質であるCFCが採用され、その後PFCに代わり、今回自然界の物質である水に回帰した。

2.2 シリコン整流素子

初期の1,000 V 200 A級スタッド型素子から3,000 V 3,200 A平型素子を経て、本装置で採用している国内最大級の5,000 V 3,200 A平型素子まで高電圧大容量化してき



津田 信吾

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、電機システムカンパニー交通・特機事業部変電技術部グループマネージャー。電気学会会員。



中村 豊忠

半導体変換装置の構造設計に従事。現在、変電システム製作所パワエレ部課長補佐。



小滝 秀治

パワーエレクトロニクス応用製品の試験、品質保証に従事。現在、変電システム製作所品質保証部課長補佐。

図2 冷却方式と冷媒およびシリコン整流素子容量の変遷

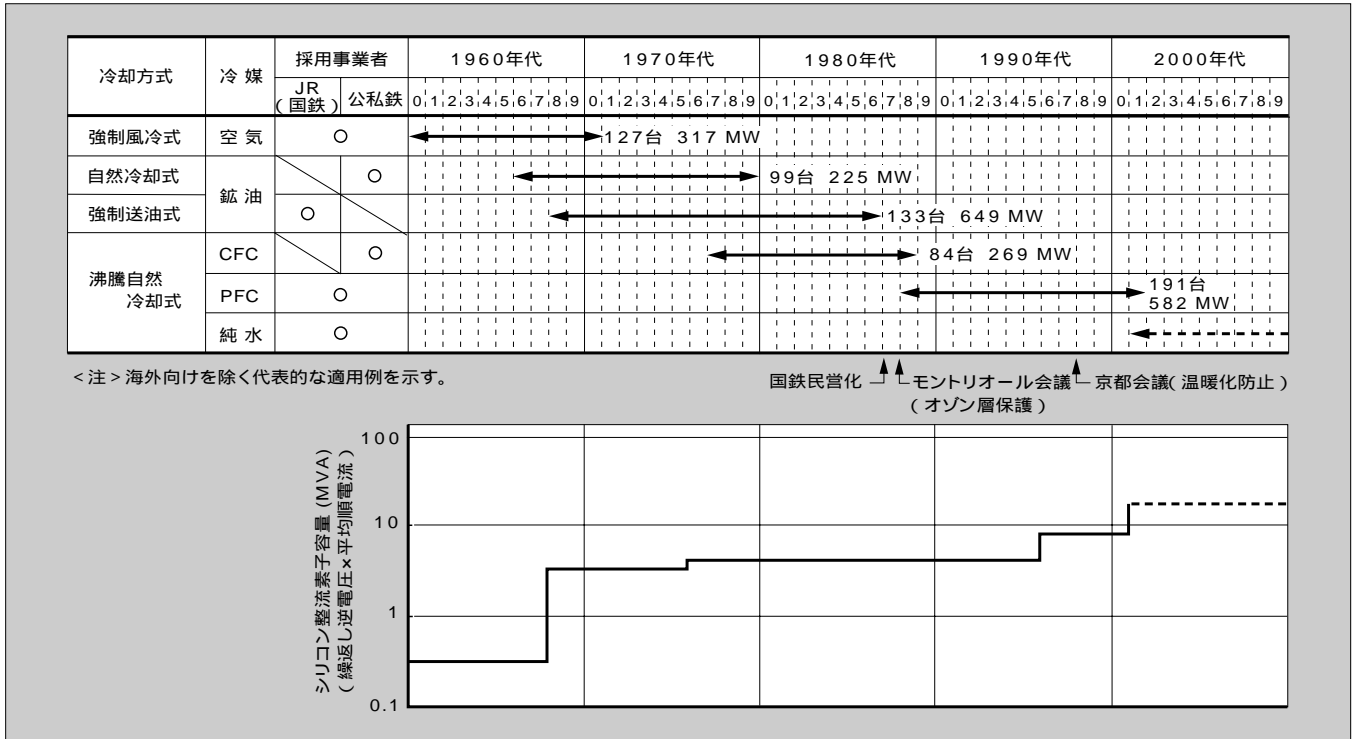
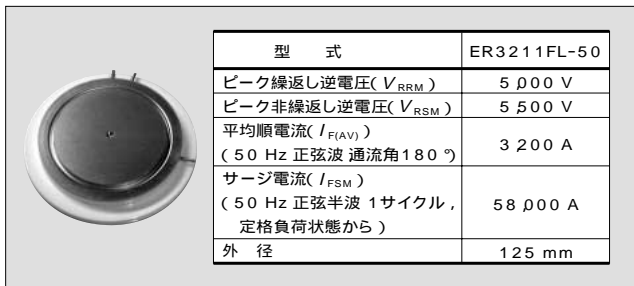


図3 シリコン整流素子の外観と仕様



た。本素子は電力用半導体の長年の実績と技術をベースに新型整流器用として開発したものである。その外観と仕様を図3に示す。

③ 新型シリコン整流器

3.1 製品コンセプトと特長

図4は新型シリコン整流器の特長と製品コンセプトである。特長およびその実現手段について以下に述べる。

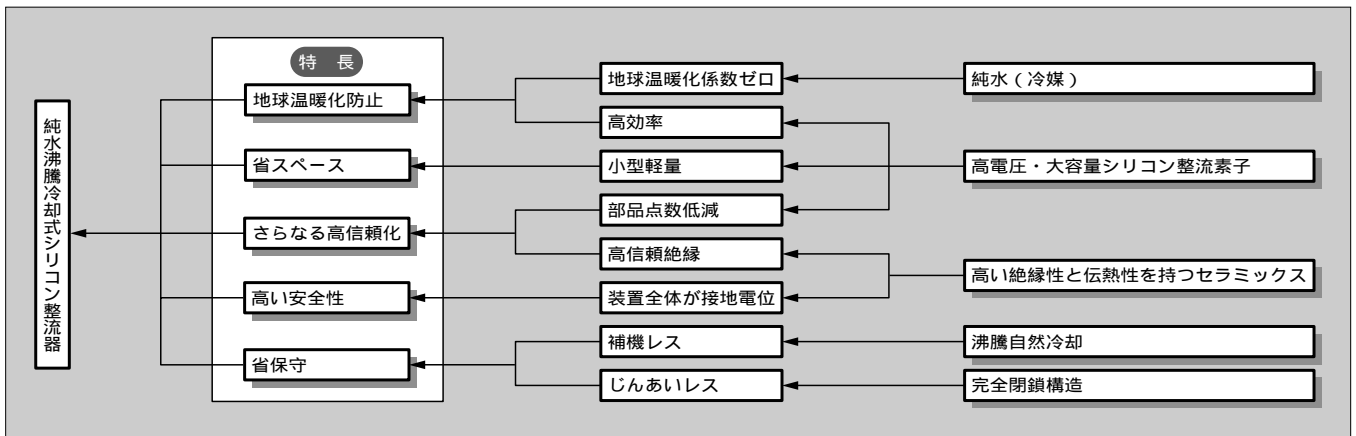
1) 地球温暖化防止

自然界の水を冷媒としており、地球温暖化とは無縁である。また5,000V素子の適用により、直流1,500V用シリコン整流器を1直列で構成でき、大幅な部品点数と損失の低減を実現している。これによって従来の沸騰冷却式に対して、発生損失40%減(6,000kW, 当社比)の効率化も実現し、損失低減の面からも温暖化防止に寄与している。

2) 省スペース

部品点数の大幅低減は小型軽量化にもつながり、従来型

図4 新型シリコン整流器の特長と製品コンセプト



に対し、容積 40 % 減、据付け面積 30 % 減を実現している。

3) 高安全性

CFC や PFC は絶縁性であるため、シリコン整流素子、電極および冷却体からなる整流スタックを冷媒に浸漬することにより容器を大地電位とすることができる。しかし水は導電性であるため、何らかの絶縁が必要となる。これを実現するために、機械的強度が高く、熱伝導性に優れ、かつ絶縁性に優れたセラミックス板をシリコン整流素子や主回路導体と冷却体との間に設けて絶縁している。これにより凝縮器を含む装置全体を大地電位とすることができ、高い安全性を実現している。セラミックス絶縁板の性能を表 1 に示す。

4) 高信頼性・省保守

部品点数の削減とセラミックス絶縁板などによる十分な絶縁性能の確保により、きわめて高い信頼性を実現している。

また、スナバとサージアブソーバ用抵抗器をシリコン整流素子と同様に沸騰冷却させるといって新しい方式を採用している。この目的は、主回路収納部の温度上昇を抑制することにより、コンパクト化とじんあいの侵入しにくい完全閉鎖構造を実現することにある。これにより集じん作用による汚損などを防止し、長期信頼性を確保するとともに点検清掃を最小化している。もちろん、従来同様補機はない。

表 1 セラミックス絶縁板の性能

物 性		セラミックス絶縁板	
一 般	密 度	g/cm ³	3.3
	硬 度 (Hv)	kg/mm ²	1,100
	曲げ強度	kg/mm ²	30 ~ 40
熱 的	熱伝導率 (at100)	W/mK	160
	熱膨張係数	/	4.4 × 10 ⁻⁶
	最高使用温度		1,000
電氣的	体積抵抗	・ cm	> 10 ¹⁴
	絶縁破壊電圧	kV/mm	15

表 2 各種冷媒の特性

冷媒の種類		純水	PFC	CFC	HFE
商 品 名			FX-3300	R-113	7200
化学式		H ₂ O	C ₈ F ₁₆ O	C ₂ Cl ₃ F ₃	C ₄ F ₉ OC ₂ H ₅
沸 点 (at1気圧)		100	101	47.6	78.5
凝固点 (at1気圧)		0	- 65	- 35	- 138
比 熱		kJ/kgK	4.19	1.05	0.92
蒸発潜熱		kJ/kg	2,260	92	147
絶縁耐力 (2.54mm gap)		kV	-	41	30
オゾン層破壊係数 ODP			0	0	0.8
地球温暖化係数 GWP			0	5,000 ~ 6,000	5,000

ODP : Ozone Depletion Potential : CFC-11 の値を 1.0 とした相対値
 GWP : Global Warming Potential : CO₂ の値を 1.0 とした相対値

3.2 冷媒の選定

従来の沸騰冷却式が持つ多くの長所を維持継承させることを前提とし、新冷媒の選定にあたっては以下の必要条件を中心に種々の研究および評価を行った。

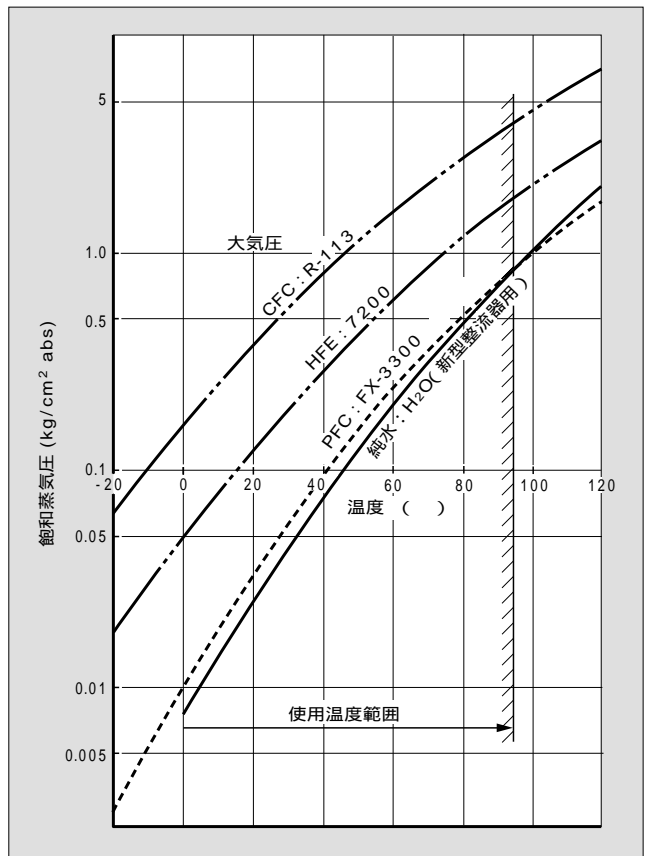
1) 環境への影響がないこと

オゾン層を破壊せず、かつ地球温暖化や環境ホルモンなどは本質的に無縁で、将来にわたって安心して使用できる物質であること。

2) 適切な温度範囲で運転でき冷却特性が優れていること

シリコン整流素子を効率よく冷却するためには、沸騰・凝縮が適切な温度範囲 (95 以下) で行われ、かつ蒸発

図 5 各種冷媒の飽和蒸気圧特性



潜熱が大きく、沸騰・凝縮熱伝達特性の高い冷媒が望ましい。各種冷媒の特性を表2に、飽和蒸気圧特性を図5に示す。

3) 長期信頼性に優れていること

冷媒と容器材料の組合せには、腐食せずかつ化学反応によって水素などの非凝縮性ガスが発生しない優れた安定性が必要である。腐食は気密漏れにつながり、非凝縮性ガスは凝縮器の有効放熱面積を狭め、冷却性能を低下させる。期待寿命まで安定した信頼性を維持するために、これらは重要なポイントである。

以上の検討の結果、「純水+銅の組合せが最適であり、添加剤（凍結防止剤など）は使用すべきでない」との結論に至った。これに伴い、凍結対策としては冷却体と凝縮器を自動運転式電熱ヒータにより加熱する方法を採用している。

なお、加速試験により容器内の純水は長期間変質しないことを確認済みである。もちろん、純水の交換や補充は不

要である。

3.3 冷却原理と構造

従来の沸騰冷却式シリコン整流器と同様に、蒸発潜熱によりシリコン整流素子を冷却する方式である。

3.3.1 冷却原理

冷却原理図を図6に示す。

1) 構成

セラミックス絶縁板で絶縁された個別冷却体を連結管で共通の凝縮器に接続し、凝縮器放熱フィンを自然冷却する。

2) 冷却

シリコン整流素子の発生熱は、冷却体へ熱伝導し、低温で沸騰が行われるよう減圧封入してある純水を沸騰させて蒸気圧を高める。蒸気は相対的に温度が低く、圧力の低い上部へ移動し、冷却されて凝縮し冷却体へ帰還する。このサイクルが繰り返されて、発生熱を低熱抵抗で効率よく空气中に放散する。スナバおよびサージアブソーバ用抵抗器も同様である。

3.3.2 構造

図7は内部構造図である。

整流器は整流スタック、凝縮器および主回路収納部から構成されている。冷却体はフレキシブルパイプを介して凝縮器下部と接続され、同パイプから下側部分およびリザーバを主回路収納部に格納している。リザーバは沸騰冷却循環をスムーズに行わせることを目的としている。

3.4 仕様・外形

新型シリコン整流器の標準仕様を表3に、外形寸法と素子構成を表4に示す。

3.5 多パルス化への対応

高調波抑制対策として、並列12パルス方式と直列12パルス方式の2種類があるが、シリコン整流素子の高電圧化に伴い寸法、質量、効率のすべてにおいて並列12パルスが有

図6 冷却原理

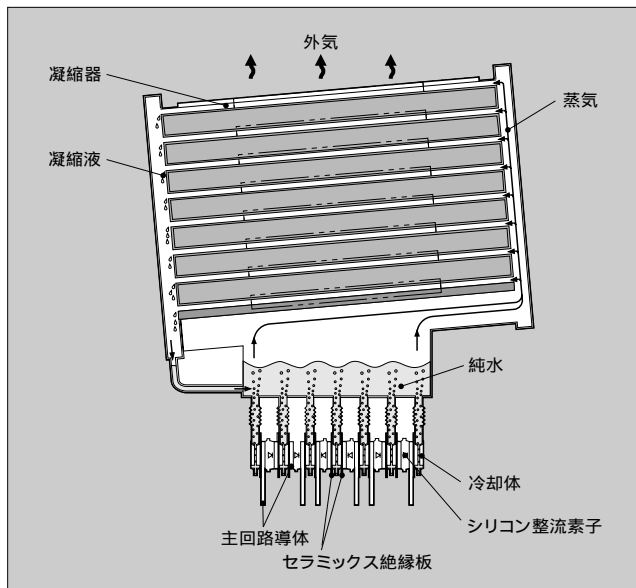
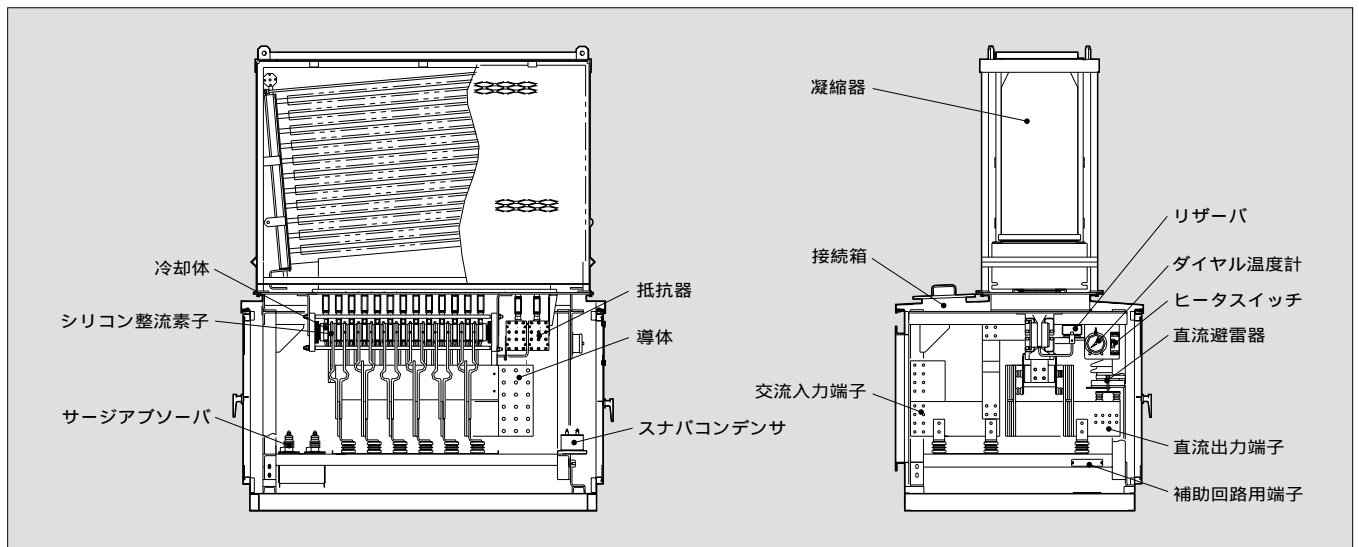


図7 内部構造図



利となるためこれを標準方式としている。

1) 高調波抑制効果の比較

図8に並列12パルスと直列12パルスの高調波実測データを示す。高調波抑制効果は同等である。

2) 相間リアクトルの省略

並列12パルスの場合、30°の位相差を持つ二組の三相ブリッジ間に流れる循環電流を抑制するために相間リアクトル

表3 標準仕様

名称	純水沸騰冷却式シリコン整流器			
設置場所	屋内または屋外			
周囲温度	屋内：0～+40，屋外：-5～+40， 屋外（寒冷地）：-10～+40			
冷却方式	沸騰自然冷却式			
適用規格	JEC-2410（1998）			
周波数	50 Hzまたは60 Hz			
定格のクラス	DまたはE			
接続の種類	三相ブリッジ（6パルス）または 二重三相ブリッジ（並列12パルス）			
直流電圧	1,500 V，750 V，600 V			
標準出力	定格出力（kW）	直流電圧（V）		
		1,500	750	600
	1,500			
	2,000			
	3,000			
	4,000			
	6,000			
直流電圧変動率	6%または8%			
補助電源	制御用：DC 100/110 V スペースヒータ用：単相AC 200 V			
塗装色	マンセル5Y7/1			

図8 高調波実測データ

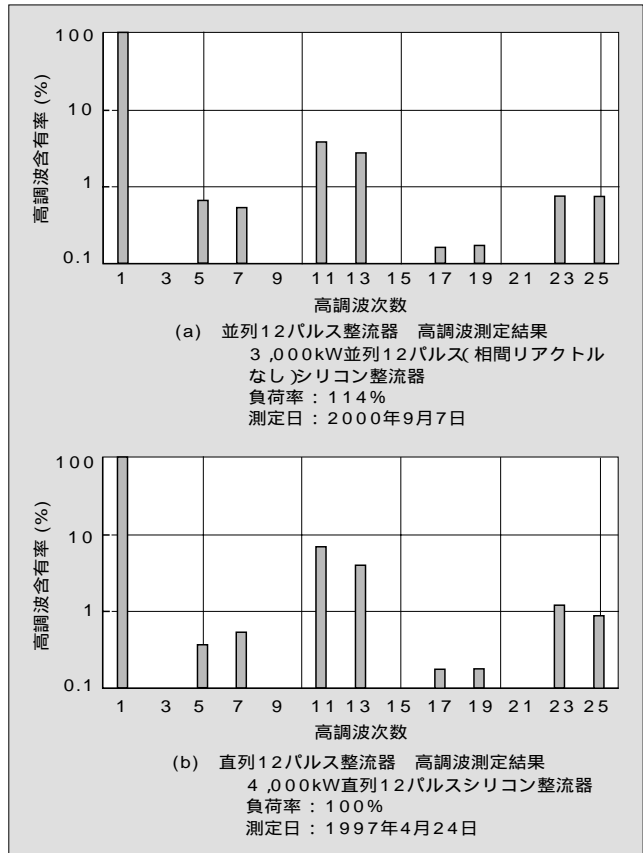


表4 外形寸法と素子構成

定格電圧 (V)	相数 (パルス)	定格出力 (kW)	定格のクラス	素子構成 (S・P・A・G)	外形寸法 (mm)			質量 (kg)
					W	D	H	
1,500	6	3,000	D	1・1・6	1,430	2,100	2,680	1,500
			E	1・1・6	1,430	2,100	2,340	1,400
		4,000	D	1・2・6	1,430	2,100	2,680	2,200
			E	1・2・6	1,430	2,100	2,340	2,000
	12	3,000	D	1・1・6・2	1,430	2,100	2,340	1,900
			E	1・1・6・2	1,430	2,100	2,340	1,900
		4,000	D	1・1・6・2	1,430	2,100	2,680	2,200
			E	1・1・6・2	1,430	2,100	2,340	2,000
750	6	1,500	D	1・1・6	1,430	2,100	2,680	1,500
		2,000	D	1・2・6	1,430	2,100	2,680	2,200
	12	1,500	D	1・1・6・2	1,430	2,100	2,340	1,900
		2,000	D	1・1・6・2	1,430	2,100	2,680	2,200
600	6	1,500	D	1・2・6	1,430	2,100	2,680	2,200
		2,000	D	1・2・6	1,430	2,100	2,680	2,300
	12	1,500	D	1・1・6・2	1,430	2,100	2,680	2,200
		2,000	D	1・1・6・2	1,430	2,100	2,680	2,300

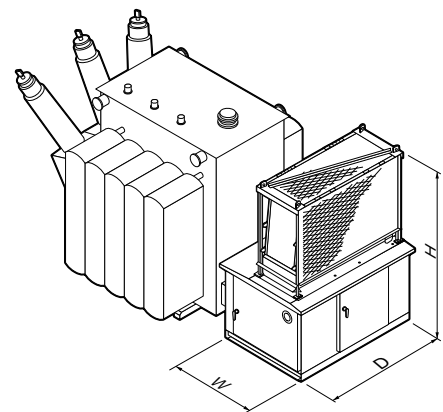
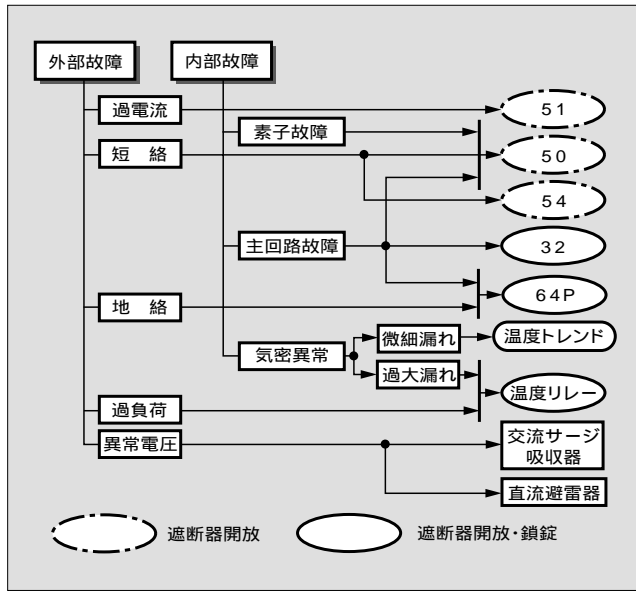


図9 保護システム



ルが必要となることがある。しかし、電気鉄道用では整流器用変圧器の巻線構造の工夫によりインピーダンスを直流側巻線に集中配置することで循環電流をまったく影響のないレベルに抑制することが可能であり、このことはフィールドでも検証している。なお、相間リアクトルを具備しない並列12パルス整流器はすでに数多くの納入実績がある。

3.6 保護システム

過電流，短絡，地絡などの外部事故と万一の内部事故に対する保護システムを図9に示す。従来の沸騰冷却式と異なる点は，密閉容器内に充電部がないため内圧上昇保護が不要となる点である。万一の微細な気密漏れは，巡視点検時に温度トレンドで発見することができる。

4 あとがき

本装置はJEC-2410（半導体電力変換装置）はもとより，旧日本国有鉄道（国鉄）規格で規定されている短絡電流耐量試験などすべての検証項目をクリアし，2000年の秋，JR各社ならびに日本鉄道建設公団の形式試験も完了した。地球環境に本質的に影響を及ぼさず，随所に独自のアイデアを結集して電気鉄道用主器として求められる要件をすべて満たした製品である。

今後とも富士電機は，地球環境保護を意識した製品開発に積極的に取り組み，ユーザー各位に提供していく所存である。

参考文献

- 1) 気候変動に関する国際連合枠組条約京都議定書（和文）. 環境庁地球温暖化対策研究会暫定訳 .
- 2) 田中滋夫ほか . 電気鉄道変電所用沸騰冷却シリコン整流器 . 富士時報 . vol.62 , no.8 , 1989 , p.567-570 .
- 3) 清水一彬ほか . 最近の電鉄変電所用整流器とその選択 . 富士時報 . vol.49 , no.5 , 1976 , p.237-243 .

解説 スナバ

スナバ（Snubber）とは元々「ショック止め具」を意味する。半導体整流素子などにおいて，素子に与えられるサージ電圧や振動性の過渡電圧を吸収するために，素子に並列に接続されたRC直列分岐回路を指す。ことに，素子内に蓄積したキャリアがスイッチング

とに逆流して生じるサージ性の電圧を回避するためのスナバは常時通電となり，この部分で生じる損失は，効率低下や過熱の原因となるので，設計者はさまざまな工夫を凝らして除去しようとする。

新幹線車両走行試験用周波数変換装置

馬場 謙二(はば けんじ)

梅沢 一喜(うめざわ かずよし)

本木 泰(もとき やすし)

1 まえがき

新幹線車両の駆動技術は、最新のパワーエレクトロニクス技術により飛躍的に進歩している。

車両メーカーにおいては、交流電車用として 50/60 Hz が出力可能な車両試験用電源設備を必要とするはもとより、最近の技術進歩に応じた設備仕様とすることが求められる。

川崎重工業(株)兵庫工場の新幹線電車用試験電源は、サイリスタを用いた強制転流形変換装置により、納入後20年間運用され数多くの新幹線電車の試験に活用されてきたが、電車に応じた設備容量の増大と機能面の向上を図る必要性が顕著となってきていた。

このような背景のもと、新造新幹線車両などの試験用電源として、自励サイリスタ式に代わる IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 素子を適用した自励式周波数変換装置を開発し製品を納入した。

本稿では、納入した自励式周波数変換装置のシステム構成や実運転での性能評価結果について紹介する。

2 システムの概要

2.1 システムの仕様

表 1 に周波数変換装置の仕様を示す。

本周波数変換装置は主に 60 Hz を 50 Hz に変換し電力を供給するとともに、車両のブレーキ制動時の回生電力を電源系統へ回生すること、および入出力系統の高調波を抑制することを目的としている。また、出力変圧器の多重接続は、出力インピーダンスが比較的高くなり高調波による共振が問題となるため、新抑制制御方式を採用している。

2.2 システムの構成

図 1 に新幹線車両走行試験用周波数変換装置の主回路システム構成を示す。

本システムは、3.3 kV 高圧配電盤、2 × 1,100 kVA 入力変圧器、PWM (Pulse Width Modulation) 整流器、PWM

インバータ、4 × 500 kVA 出力変圧器、電源保安装置および特別高圧断路器盤から構成されている。

変換装置入力部は、装置の故障時に故障箇所を切り離して容量の低減を図り運転を継続できるように 2 系統入力の構成としている。整流器は PWM 整流器方式を採用し、高力率、低高調波特性を有したものとしている。インバータは、4 多重として出力変圧器 4 台のカスケード接続によって特別高圧出力 20/25 kV に対応している。

2.3 システムの特長

このシステムの特長は次のとおりである。

1) 高力率

PWM 整流器の採用により入力力率をほぼ 1 としており、省エネルギー化を図っている。

表 1 周波数変換装置の仕様

項目		仕様
方式	主回路方式	自励式電圧形
	主回路素子	IGBT (1,400 V 300 A)
	制御方式	多重PWM (DDC)
	冷却	強制風冷 (ヒートレーン)
入力	定格電圧	3,300 V ± 10 %
	定格周波数	60 Hz ± 5 %
	相数および線数	三相3線
	入力容量	2,200 kVA
	入力高調波電流	5 %以下
	入力力率	95 %以上
出力	相数および線数	単相2線
	電圧	20 kV/22.5 kV/25 kV
	周波数	50/60 Hz
	負荷力率	0.4 (遅れ) ~ 1.0
	定格容量	2,000 kVA連続, 過負荷耐量 150 % 1分間
	波形ひずみ率	3 %以下 (直線性負荷) 5 %以下 (100 %整流負荷)
特殊機能	負荷側からの電力回生機能付き 車両発生高調波 (n=40) 共振防止機能付き	



馬場 謙二

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、電機システムカンパニー交通・特機事業部変電技術部主任。電気学会会員。



梅沢 一喜

UPS および応用電源装置の開発、設計に従事。現在、東京システム製作所開発設計部主任。電気学会会員。



本木 泰

UPS および応用電源装置の開発、設計に従事。現在、東京システム製作所開発設計部主任。電気学会会員。

図1 新幹線車両走行試験用周波数変換装置の主回路システム構成

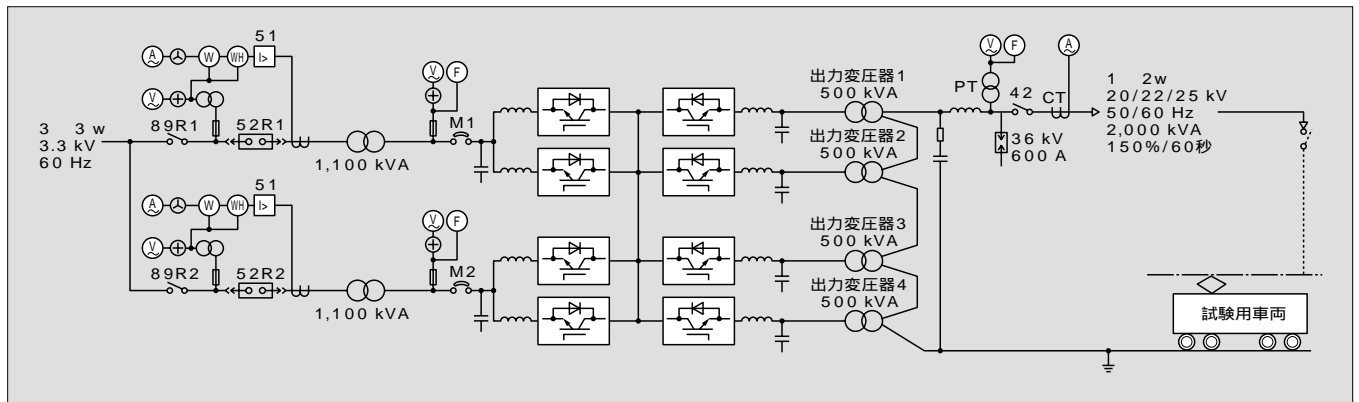


図2 変換装置の外観



図3 IGBT インバータモジュールの実装状態



(2) 低高調波

適切なスイッチング周波数により、低高調波を実現している。

(3) 負荷側高調波抑制機能

車両から発生する高調波を制御により抑制し不要な共振を防止しており、高調波フィルタを必要としない装置となっている。

(4) 新冷却 IGBT インバータモジュールの採用

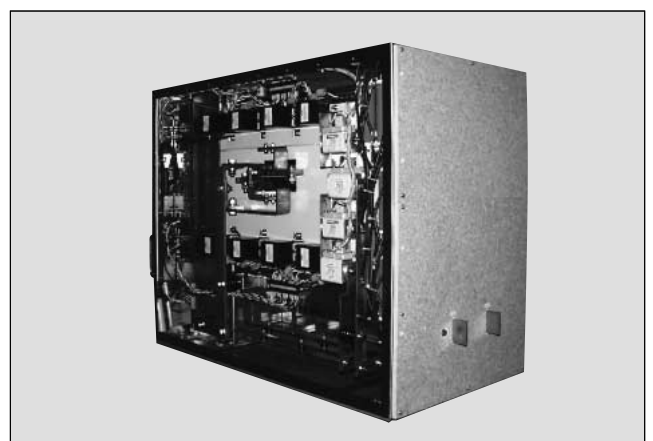
新型ヒートパイプを適用した強制風冷式モジュールを採用して、PWM 整流器部とPWM インバータ部を共用とした標準モジュール化を図っている。

③ 変換装置

3.1 変換装置の構成

図2は変換装置の外観である。盤形態は設置スペースの制約を満足するために前面保守が行えることを目的に背面合せの盤構造を採用している。図3に IGBT インバータモジュールの実装状態を示す。本モジュールは標準化を志向してPWM コンバータ部とPWM インバータ部は共用ユ

図4 IGBT インバータモジュールの外観



ニット化している。また、トレイ構造を採用して保守しやすいものとしている。インバータモジュールは合計20台使用している。

3.2 IGBT インバータモジュール

図4に IGBT インバータモジュールの外観を、表2に

IGBT インバータモジュールの仕様を示す。インバータモジュールは、IGBT 素子、ゲート駆動回路、スナバ、直流中間コンデンサ、ヒューズおよび冷却フィンから構成されている。主回路配線には低インダクタンス大電流基板を採用している。このインバータモジュールは、主回路への接続をプラグイン式のトレイ構造とすることで収納盤前面から取付け、取外しを容易にし、保守性を向上させている。

図 5 に IGBT インバータモジュールの回路構成を示す。IGBT 素子は富士電機の NPT (Non-Punch Through) IGBT モジュール「Pシリーズ」1,400 V 300 A を採用して、直流

表 2 IGBT インバータモジュールの仕様

項目	仕様
直流電圧	DC 760 V
交流電圧	AC 380 V
出力電流	1,316 A
適用素子	IGBT 1,400 V 300 A
素子構成	16並列
冷却方式	強制風冷

図 5 IGBT インバータモジュールの回路構成

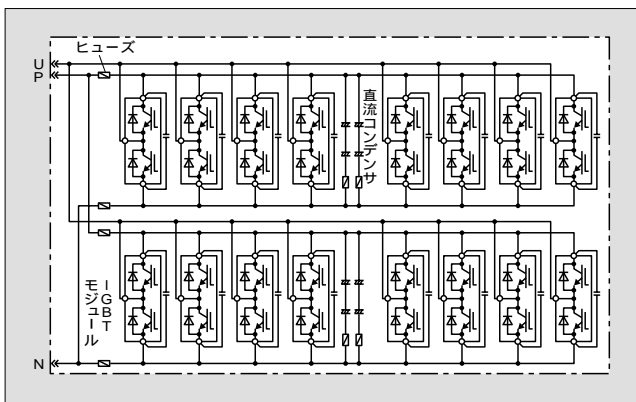
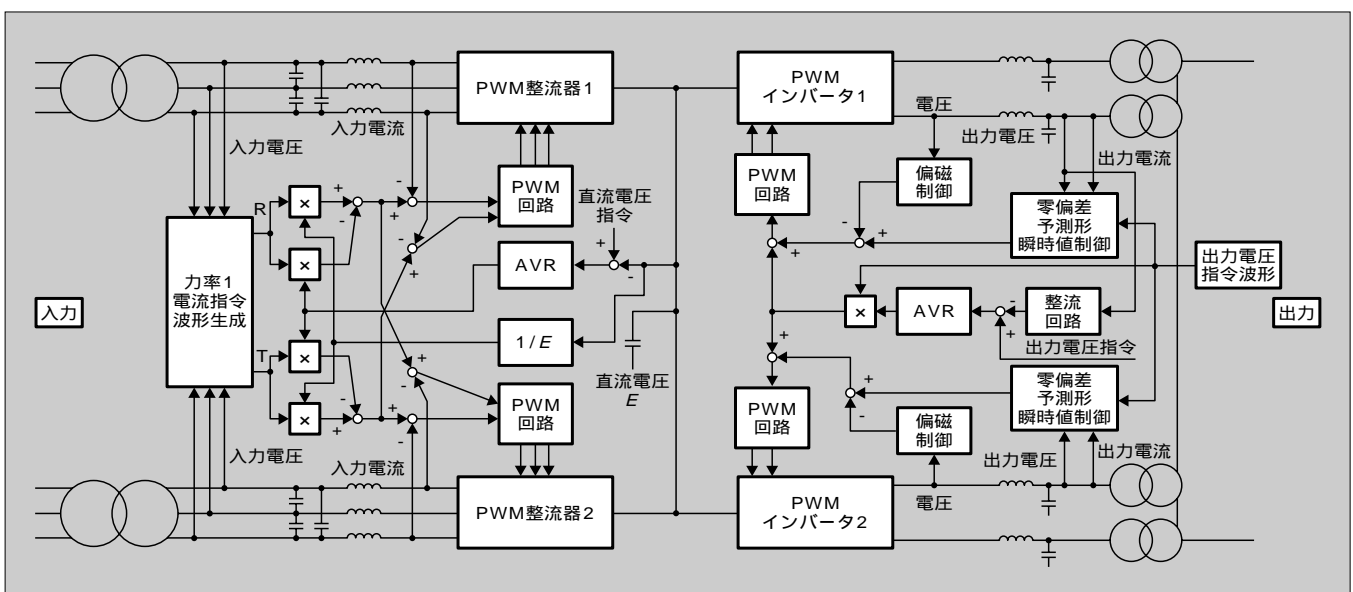


図 6 システム全体の制御ブロック図



の高圧化と優れた並列特性により16並列接続化を図っている。

冷却体にはヒートパイプの一種である冷却効率の高いヒートレーン式冷却体を採用して、小型・軽量化を図った。ヒートレーン式冷却体はヒートパイプ式に比べ次の特徴を有する。

- (1) 冷却体の受熱部と放熱部間の熱輸送効率が高いため、熱抵抗が小さい。
- (2) 圧損が小さい。
- (3) 小型・軽量である。
- (4) 受熱部・放熱部の上下位置を考慮しなくてよいため、部品配置の自由度が高い設計が可能である。

4 制御方式

4.1 制御システム構成

図 6 にシステム全体の制御ブロック図を示す。制御は、DDC (Direct Digital Control) を採用し、入力力率 1 の電流制御、直流電圧一定制御および特別高圧出力電圧一定制御を行っている。また、DDC により、シーケンス制御、故障監視、診断機能を充実して試験および保守点検の効率化・高信頼化を実現している。

4.2 負荷側高調波抑制機能

新幹線車両に搭載されている静止形変換装置は高調波を発生する。今回のシステムにおいても負荷である新幹線車両からの高調波電流が周波数変換装置の出力端に流れ、出力電圧に大きなひずみを生じる課題がある。この対策として、従来のパッシブな高調波フィルタにより高調波を減衰させる方式に代わり、3 kHz 帯までの高調波を制御にて抑える方式として車両から発生する高調波電流に影響されないシステムを実現した。

インバータの出力電圧の波形制御を制御対象となる電圧

図7 零偏差予測形瞬時値制御方式のブロック図

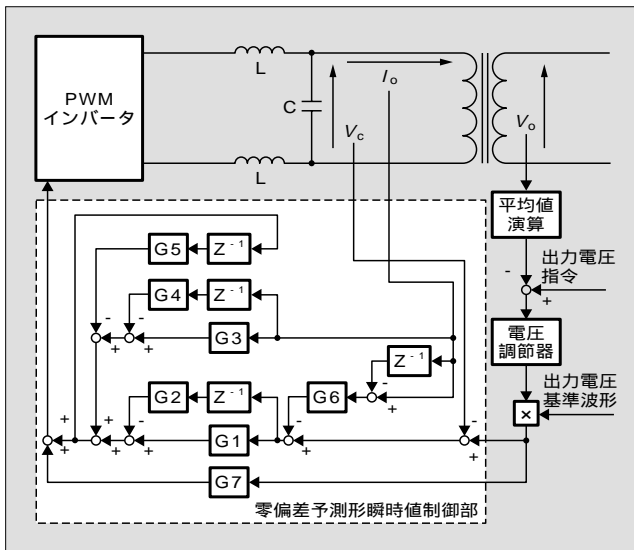
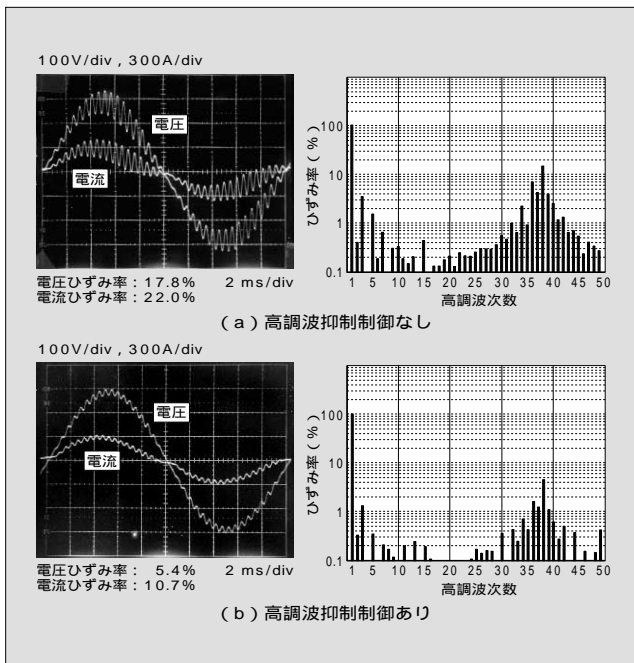


図8 ミニモデル検証結果



だけでなく、負荷に流れる電流も検出し、負荷が発生している高調波電流による電圧変動状態を組み込んだ零偏差予測形瞬時値制御方式のブロック図を図7に示す。これにより高調波電流の変化による出力電圧のひずみを抑え、さらに急しゅんな電流変動に対する電圧制御のオーバーシュートによる振動を抑制するために、電流差分を補償する電圧指令補正により高調波電流に対して振動しない安定した出力電圧を実現した。

5 性能検証試験結果

5.1 ミニモデル試験結果

静止形変換装置としての諸特性についての性能検証試験はもとより、高調波抑制効果を事前に検証することを目的

図9 模擬負荷容量に対する出力電圧総合ひずみ率

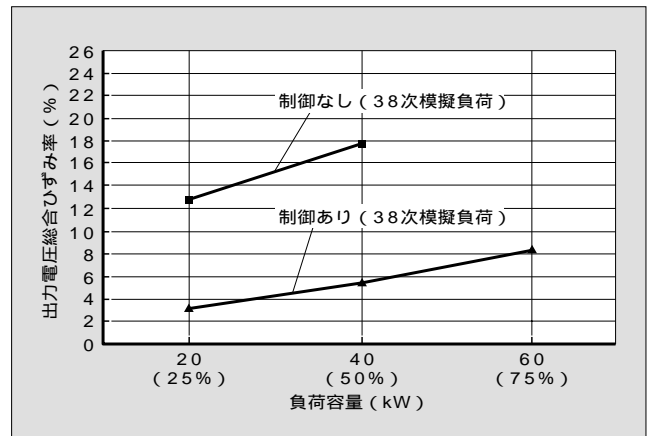
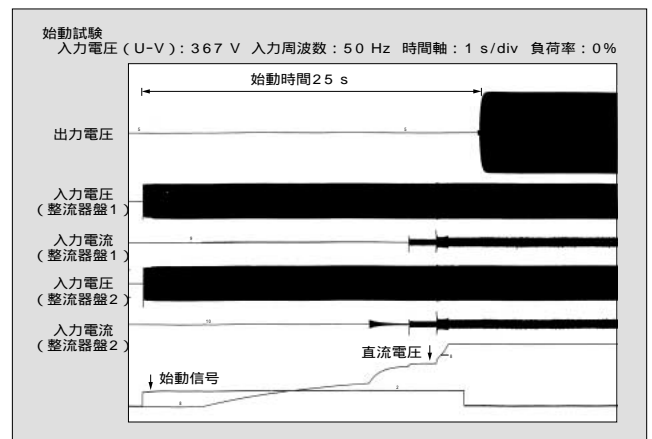


図10 始動時の各部波形



として、80 kVA ミニモデル機による高調波抑制効果確認試験を実施した。このミニモデル機は実機構成をスケールダウンしてインピーダンスなどの特性が同一になるよう構成した。負荷モデルに用いた単相PWMコンバータは、入力電流指令値に高調波成分の指令波形を加算して車両負荷と類似の高調波を発生できる。その高調波指令は実機の高調波電流データに近い38次近傍とした。

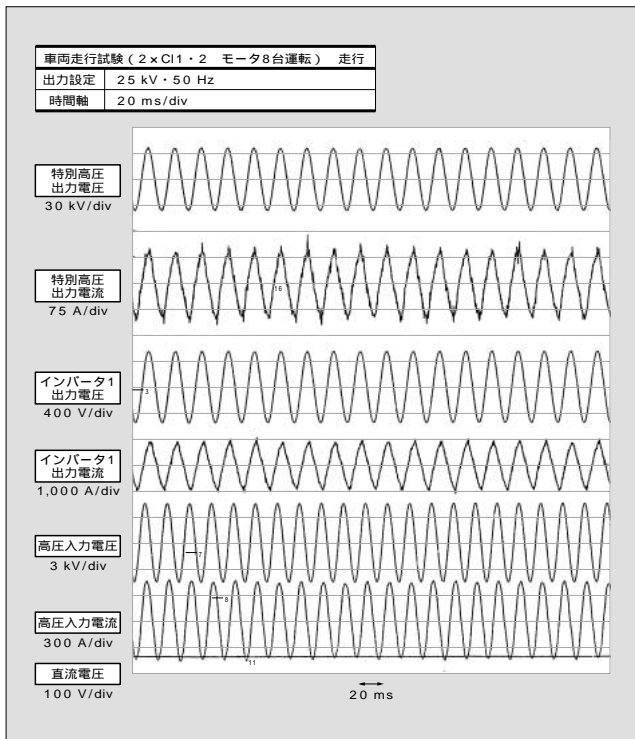
ミニモデルによる検証結果の波形データの一例を図8に示す。高調波抑制制御を行った場合、制御しないときと比較して大幅な高調波抑制効果が得られていることが分かる。図9は、模擬負荷容量に対する出力電圧総合ひずみ率である。これは、負荷率を変化させた場合の特性を示したもので、制御によって総合ひずみ率が1/3以下に低減されることが分かる。

5.2 納入時の試験結果

周波数変換装置の始動時の各部電圧・電流の推移を図10に示す。本装置の始動方式は、抵抗により直流電圧を充電し一定電圧に達するとPMW整流器運転、インバータ運転を行う方式である。抵抗始動ではあるが、特別高圧出力電圧が始動操作後25秒後に確立するスムーズな立上げとなっている。

図11は、製品納入時に行われた新幹線車両の負荷試験お

図 11 走行試験時の各部波形例



よび走行試験時における力行運転中の動作波形例である。このときの高調波電流 11 % を含む負荷電流 65 A に対し、特別高圧出力電圧のひずみ率は 1.5 % 以下に抑制されており、良好な結果であることが分かる。

⑥ あとがき

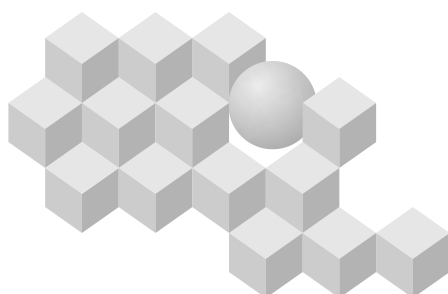
新幹線車両などの走行試験に対応する試験電源の設備更新にあたって、設備容量のアップと車両の高調波に起因した共振現象を制御によって抑制することを目的に最新のパワーエレクトロニクス技術を結集した自励式周波数変換装置を開発・納入した。

この周波数変換装置は従来装置と比較して飛躍的な性能向上を実現しており、広範な採用が期待される。工場設備などの計画に際してこのような事例が参考になれば幸いである。

最後に、本システムの開発・設計・製作にあたり多大なご指導・ご協力をいただいたユーザー関係各位に深く感謝する次第である。

参考文献

1. 山田修ほか．川崎重工業・兵庫工場納入車両試験用静止形周波数変換装置．富士時報．vol.52，no.3，1979，p.174-179．
2. 井上亮二ほか．新幹線車両用主回路システム．富士時報．vol.72，no.2，1999，p.127-132．
3. 馬場謙二ほか．新幹線車両走行試験用周波数変換装置の高調波抑制方式．鉄道サイバネティクス国内シンポジウム．vol.37，2000，p.476-478．
4. 馬場謙二ほか．新幹線車両走行試験用周波数変換装置の高調波抑制方式．電気関係学会関西支部連合大会シンポジウム．セッション 1-6．2000．



豊かな地球社会のために 富士電機は、今、—

電機システム カンパニー

主な営業品目

情報・通信・制御システム、水処理・計測システム、電力システム、放射線管理システム、FA・物流システム、環境システム、電動力応用システム、産業用電源、車両用電機品、クリーンルーム設備、レーザー機器、ビジョン機器、電力量計、変電システム、火力機器、水力機器、原子力機器、省エネルギーシステム、新エネルギーシステム

機器・制御 カンパニー

主な営業品目

電磁開閉器、操作表示機器、制御リレー、タイマ、ガス関連機器、配線用遮断器、漏電遮断器、限流ヒューズ、高圧受配電機器、汎用モールド変圧器、電力制御機器、電力監視機器、交流電力調整器、検出用スイッチ、プログラマブルコントローラ、プログラマブル操作表示器、多重伝送機器、インダクションモータ、同期モータ、ギヤードモータ、ブレーキモータ、ファン、ポンプ、ブロワ、汎用インバータ、サーボシステム、加熱用インバータ、UPS、ミニUPS

電子 カンパニー

主な営業品目

磁気記録媒体、パワートランジスタ、パワーモジュール、スマートパワーデバイス、整流ダイオード、モノリシックIC、ハイブリッドIC、半導体センサ、サーミアブソーバ、感光体およびその周辺装置

流通機器システム カンパニー

主な営業品目

自動販売機、コインメカニズム、紙幣識別装置、貨幣処理システム、飲料ディスペンサ、自動給茶機、冷凍冷蔵ショーケース、ホテルベンダシステム、カードシステム

環境・情報・サービス・コンポーネントを
キーワードとして、
新しい技術の時代を
拓こうとしています。

カンパニー別営業品目

電機システムカンパニー

情報・通信・制御システム，水処理・計測システム，電力システム，放射線管理システム，FA・物流システム，環境システム，電動力応用システム，産業用電源，車両用電機品，クリーンルーム設備，レーザ機器，ビジョン機器，電力量計，変電システム，火力機器，水力機器，原子力機器，省エネルギーシステム，新エネルギーシステム

機器・制御カンパニー

電磁開閉器，操作表示機器，制御リレー，タイマ，ガス関連機器，配線用遮断器，漏電遮断器，限流ヒューズ，高圧受配電機器，汎用モールド変圧器，電力制御機器，電力監視機器，交流電力調整器，検出用スイッチ，プログラマブルコントローラ，プログラマブル操作表示器，多重伝送機器，インダクションモータ，同期モータ，ギヤードモータ，ブレーキモータ，ファン，ポンプ，ブロワ，汎用インバータ，サーボシステム，加熱用インバータ，UPS，ミニUPS，

電子カンパニー

磁気記録媒体，パワートランジスタ，パワーモジュール，スマートパワーデバイス，整流ダイオード，モノリシックIC，ハイブリッドIC，半導体センサ，サージアブソーバ，感光体およびその周辺装置

流通機器システムカンパニー

自動販売機，コインメカニズム，紙幣識別装置，貨幣処理システム，飲料ディスペンサ，自動給茶機，冷凍冷蔵ショーケース，ホテルペンダシステム，カードシステム

富士時報	第 74 巻	第 5 号	平成 13 年 4 月 30 日 印刷 平成 13 年 5 月 10 日 発行 定価 525 円（本体 500 円・送料別）
------	--------	-------	--

編集兼発行人	谷 恭 夫
--------	-------

発行所	富士電機株式会社 技術企画室	〒141-0032 東京都品川区大崎一丁目 11 番 2 号 (ゲートシティ大崎イーストタワー)
-----	-------------------	---

編集室	富士電機情報サービス株式会社内 「富士時報」編集室	〒151-0053 東京都渋谷区代々木四丁目 30 番 3 号 (新宿コヤマビル) 電話 (03) 5388 - 7826 FAX (03) 5388 - 7369
-----	------------------------------	---

印刷所	富士電機情報サービス株式会社	〒151-0053 東京都渋谷区代々木四丁目 30 番 3 号 (新宿コヤマビル) 電話 (03) 5388 - 8241
-----	----------------	---

発売元	株式会社 オーム社	〒101-8460 東京都千代田区神田錦町三丁目 1 番地 電話 (03) 3233 - 0641 振替口座 東京 6 - 20018
-----	-----------	---

富士時報論文抄録

大容量電力変換装置の現状と動向

矢内 銀次郎
富士時報 Vol.74 No.5 p.261-264 (2001)

大容量電力変換装置における最近の技術進歩と将来動向について述べる。電力用半導体の進歩と制御装置の高機能化によって、大容量電力変換装置は、産業分野や電気鉄道分野の生産性向上、品質向上に大きく貢献するとともに、系統電源の品質向上や騒音の低減など「優れた環境性」に対しても対応が可能となった。今後は電力のクリーン性から、電力がエネルギー源の主流を占め続けると推測され、大容量電力変換装置のフレキシブル性がますます求められる。

電力・産業用パワーエレクトロニクスを支える要素技術

江口 直也 高橋 清 丸山 宏二
富士時報 Vol.74 No.5 p.265-272 (2001)

電力、産業、電気鉄道などの分野に適用される変換装置は、巨大パワーをエレクトロニクスで変換・制御する領域といえる。本稿ではこの分野で適用される変換装置の課題を述べる。そして、大容量パワーエレクトロニクスを支える要素技術として、素子・回路技術、大容量スタック技術、制御技術、変換器・系統解析技術における現状と今後の展開について概要を紹介する。

灰溶融設備用チョッパ

宇都 克哉 日野 浩二 篠永 春彦
富士時報 Vol.74 No.5 p.273-277 (2001)

ごみ焼却施設から発生する焼却灰および飛灰の溶融・固形化設備である灰溶融設備は、一般廃棄物の最終処分場の延命化対策として生活環境保全上の重要性をさらに増してきている。従来、直流プラズマアーク方式灰溶融電源としてサイリスタ整流器が採用されてきたが、今回 IGBT を使用したチョッパ方式電源を開発した。本稿ではチョッパ方式電源の特長、システム設計時の要点、チョッパ回路について紹介する。

二次電池電力貯蔵用交直変換装置

小松木 和成 藤倉 政信
富士時報 Vol.74 No.5 p.278-282 (2001)

二次電池を用いた電力貯蔵装置は電力の負荷平準化に役立つ。これは直流電力であり、交直変換装置を用いて商用交流系と連系させる必要がある。交直変換装置は単に負荷平準化を目的とする電力貯蔵だけでなく、力率改善をはじめ、瞬時電圧低下や停電の保証も可能など電力の高品位化に寄与することができる。本稿では、交直変換装置の基本構成と実現機能ごとのシステム構成と特徴、納入実績・動作波形例ならびに充放電動作シミュレーション技術について概説する。

揚水発電電動機用始動装置

大隈 謙二 森山 琴也 篠原 博
富士時報 Vol.74 No.5 p.283-288 (2001)

揚水発電所においてはパワーエレクトロニクスの技術を応用した発電電動機の始動装置が設置される。揚水発電所は一般的に地下式であり、土木費削減のために装置の小型化が要求されている。このニーズに対応するために、始動装置に対しては高電圧の開発が進められてきた。また、揚水発電設備は大容量であり、電力系統における重要度が高いため、高い信頼性が求められる。本稿ではインド向けに製作した始動装置およびその制御装置で採用した新技術を紹介する。

無効電力補償装置

小西 茂雄 馬場 謙二 大宮司 充
富士時報 Vol.74 No.5 p.289-295 (2001)

近年、パワーエレクトロニクスを駆使した静止形無効電力補償装置 (SVC) は、電力系統において電圧変動抑制、電圧フリッカ抑制などの目的で幅広く使用されている。さらに最近、GTO や IGBT などの大容量自己消弧素子の進歩により、自励式 SVC の適用が進められている。本稿では、GTO 式に比べ装置の高性能化と大幅な小型化が可能な平型 IGBT を適用した自励式 SVC の技術動向、変換装置技術および最近の SVC 適用例について紹介する。

アルミ電解用整流装置 (S フォーマ)

古木 進一 石塚 銀治
富士時報 Vol.74 No.5 p.296-301 (2001)

富士電機は、1959年以來、74件のアルミ電解用整流装置の納入実績を有し、現在世界トップクラスのシェアを有する。アルミ電解業界は生産コスト低減を図り、電解炉直列数の拡大や単位炉あたりの通電面積の拡大を通じ、設置の高電圧化・大電流化を進めてきた。このニーズに対し、富士電機は技術開発・改良をもって装置の定格アップを行い、2000年には単器世界最大容量器を納入した。整流装置は変圧器と整流器から成るが、この複合機器に施した回路システム上の工夫、整流素子開発、大型素子・ヒューズの適用技術などを紹介する。

金属表面処理用任意波形電源装置

丸尾 哲弘
富士時報 Vol.74 No.5 p.302-305 (2001)

アルミサッシの着色や各種金属への電気めっきに代表される金属の表面処理には、特殊波形での電解処理が皮膜の均一化、歩留り、多色化対応および高機能皮膜対応で有効である。金属表面処理用任意波形電源の応用例として、本稿ではアルミサッシの着色用途での大容量器〔富山軽金属工業(株)向け 50V, 10kA 器〕とプリント基板銅めっき用途での実験結果について報告する。

Abstracts (Fuji Electric Journal)

Core Technologies of Power Electronics for Industrial Applications

Naoya Eguchi Kiyoshi Takahashi Kouji Maruyama
Fuji Electric Journal Vol.74 No.5 p.265-272 (2001)

The conversion system used in power systems, industrial equipment, and electric railways is the technology of converting and controlling vast power using electronics. This paper describes the requirements of power conversion systems applied in these fields. Further, it outlines the present status and future prospects for basic technologies that support high-power electronics: (1) devices and circuitry technology (2) high power stacking technology (3) control technology (4) converter and system analysis technology.

An Overview of Recent High-Power Conversion Systems

Ginjiro Yanai
Fuji Electric Journal Vol.74 No.5 p.261-264 (2001)

This paper describes recent technology and trends in future of high-power conversion systems. With the development of power semiconductor devices and the advance in functions of controllers, high-power conversion systems have greatly contributed to the improvement of productivity in the fields of industry and the electric railway, as well as to better environments such as improvement in power line quality and reduction in acoustic noise. Electric power has been and will be the mainstream of energy sources because of its cleanness, and the flexibility of high-power conversion systems will be required more and more.

Power Conversion System for Electric Power Storage with Secondary Batteries

Kazunari Komatsugi Masanobu Fujikura
Fuji Electric Journal Vol.74 No.5 p.278-282 (2001)

The electric power storage system with secondary batteries is useful for load leveling of a power system. This system, using DC power, requires a power conversion system to connect with the commercial AC line. The power conversion system can be used not only for electric power storage for load leveling but also for raising power quality such as improvement in power factor and compensation for supply voltage dip or interruption of supply voltage. This paper outlines the basic configuration of the power conversion system, the system construction and features of effective functions, examples of supplied units and operating waveforms, and charging/discharging simulation technology.

Chopper System for Ash Melting Equipment

Katsuya Uto Koji Hino Haruhiko Shinonaga
Fuji Electric Journal Vol.74 No.5 p.273-277 (2001)

The ash melting equipment melts and solidifies burned and fly ashes from incinerators. It is a measure for prolonging the life of final disposal lands for general waste. It is becoming of still more importance to living environment preservation. Formerly, the thyristor rectifier was used for the power supply of plasma-arc ash melting. Recently, Fuji Electric has developed a chopper type power supply using the IGBT. This paper describes the merits of the chopper type power supply, key points in system design, and the chopper circuit.

Var Compensators

Shigeo Konishi Kenji Baba Mitsuru Daiguji
Fuji Electric Journal Vol.74 No.5 p.289-295 (2001)

The static var compensator (SVC) utilizing power electronics has widely been used in power systems to suppress voltage fluctuation and flickering. Further, the progress of large capacity self-extinguished devices such as the GTO and IGBT has advanced the application of the self-commutated SVC. This paper describes the technical trend and converter technology of the self-commutated SVC using a flat IGBT, which can give higher performance and smaller size than the GTO type, and recent examples of SVC applications.

Static Frequency Converters for Generator/Motor Starters

Kenji Okuma Kinya Moriyama Hiroshi Shinohara
Fuji Electric Journal Vol.74 No.5 p.283-288 (2001)

Generator/Motor starters utilizing power electronics are equipped in pumped storage power stations. The pumped storage power station is generally under the ground and the equipment has to be small to reduce civil cost. To meet this requirement, the application of high voltage to starters has been developed. Besides, the pumped storage power station, large in capacity and important in the power system, requires high reliability. This paper introduces new technologies adopted in the starters and control systems manufactured for the pumped storage power station for export to India.

Custom-Waveform Power Supply for Metal Surface Treatment

Tetsuhiro Maruo
Fuji Electric Journal Vol.74 No.5 p.302-305 (2001)

In the specific treatment of metal surfaces such as color anodizing on aluminum sashes and electroplating on substrates, electrolytic treatment with a special waveform is effective for foil uniformity, the yield rate, and compatibility with multiple colors and advanced-function foils. This paper describes the following application examples of custom-waveform power supply for metal surface treatment: the large capacity unit for color anodizing on aluminum sashes (50 V, 10 kA, delivered to Toyama Light Metal Industry Co., Ltd.) and the result of experiment with the unit for copper plating on substrates.

Transformer-Rectifier Package (S-Former) for Aluminum Smelting

Shinichi Furuki Ginji Ishizuka
Fuji Electric Journal Vol.74 No.5 p.296-301 (2001)

Fuji Electric has supplied 74 rectifiers for aluminum smelting and now keeps a top-class share in the world. To reduce production cost, the aluminum smelting industry raised equipment voltage and current by increasing the number of smelter cells in series and current carrying area per unit cell. To meet these needs, we raised the S-former rating by technical development, and in 2000, supplied S-formers with the largest unit capacity in the world. This paper describes ingenious designs for the circuitry of this compound unit consisting of a transformer and a rectifier, the development of the rectifying semiconductor device, and application technology for the high-power device and fuse.

誘導加熱用サイリスタインバータと最近の適用事例

倉田 巖 中村 清和
富士時報 Vol.74 No.5 p.306-310 (2001)

サイリスタインバータは大容量・低周波の分野ではコストの面で最も有利な電源といえる。本稿では誘導加熱用サイリスタインバータの特長、仕様、および最近の適用事例として、誘導炉用 13,000 kW 300 Hz 電源、熱処理用 1,000 kW 10 kHz 電源についてその概要を述べる。また、新たに開発したサイリスタインバータ用の制御装置に関しても、その概要と特長を紹介する。

MOSFET インバータ型高周波電源

三浦 敏栄 中村 清和
富士時報 Vol.74 No.5 p.311-315 (2001)

新たに開発した大容量平型 500 V 500 A MOSFET とそれを組み込んだ 125 kW スタックを、1,000 kW 150 kHz 高周波電源に適用し、製品化した。現行品と比較して、新素子は同一寸法であるが定格電流が 2 倍以上になり、新スタックは容量比 80%、質量比 60% であるにもかかわらず、出力電力が 25% アップしている。本稿では、これらの特長、試験結果などを述べる。また、最近の電縫管溶接用電源やプラズマ加熱などへの高周波電源応用についても紹介する。

電気鉄道変電所用純水沸騰冷却式シリコン整流器

津田 信吾 中村 豊忠 小滝 秀治
富士時報 Vol.74 No.5 p.316-321 (2001)

電気鉄道用直流変電所の主器であるシリコン整流器の冷却方式は、これまでパーフルオロカーボン (PFC) を冷媒とする沸騰冷却式が採用されてきた。しかし、PFC は 1997 年の地球温暖化防止京都会議において地球温暖化物質の対象となり規制されていく方向にある。富士電機はこのたび本質的に地球環境に負担とならない純水を冷媒とし、また多くの特長をもつ画期的な沸騰冷却式シリコン整流器の製品化を完了、納入を開始した。本稿では、シリコン整流器の変遷と新型シリコン整流器について紹介する。

新幹線車両走行試験用周波数変換装置

馬場 謙二 梅沢 一喜 本木 泰
富士時報 Vol.74 No.5 p.322-326 (2001)

車両メーカーにおいては、交流電車用として 50/60 Hz が出力可能な車両試験用電源設備を必要とする。川崎重工業(株)兵庫工場の新幹線電車用試験電源は、サイリスタを用いた強制転流形変換装置により、納入後 20 年間運用され数多くの新幹線の試験に活用されてきたが、電車に応じた設備容量の増大や機能面の向上を図る必要性が顕著となってきていた。このような背景のもと、自励サイリスタ式に代わる IGBT 素子を適用した自励式周波数変換装置を開発し製品を納入した。本稿では、納入したシステムの構成や実運転での性能評価結果について紹介する。

MOSFET Inverter Type High-Frequency Power Supply

Toshie Miura Kiyokazu Nakamura
Fuji Electric Journal Vol.74 No.5 p.311-315 (2001)

Fuji Electric has newly developed a large-power, flat-package, 500 V, 500 A MOSFET and a 125 kW stack with the MOSFET. These have been applied to 1,000 kW, 150 kHz high-frequency power supply. The new device has the same dimensions as conventional one, but its rated current has doubled or more. Though the volume and mass of the new stack become to 80% and 60% respectively, its output power has increased by 25% as compared with conventional one. This paper describes the features and test results of these products, and so on. Also it introduces recent power supply for seam welding and application of high-frequency power supply, for example plasma heating.

Thyristor Inverters for Induction Heating and Recent Applications

Iwao Kurata Kiyokazu Nakamura
Fuji Electric Journal Vol.74 No.5 p.306-310 (2001)

Thyristor inverters are most advantageous power supply for large capacity and low frequency applications. This paper describes the features and specifications of thyristor inverters for induction heating and their recent application examples, including a 13,000 kW, 300 Hz inverter for an induction furnace and a 1,000 kW, 10 kHz inverter for thin plate annealing. In addition, a newly developed controller for thyristor inverters is referred to.

New Frequency Changer for the Running Test of the Shinkansen Cars

Kenji Baba Kazuyoshi Umezawa Yasushi Motoki
Fuji Electric Journal Vol.74 No.5 p.322-326 (2001)

A car manufacturer requires a car testing power supply system capable of outputting 50/60 Hz for AC trains. The power supply for testing the Shinkansen cars in the Hyogo Factory of Kawasaki Heavy Industries, Ltd. had been used for 20 years since delivered and became necessity for improvement from the viewpoint of capacity and functions. Under the circumstances, Fuji Electric developed and delivered a self-commutated frequency changer using IGBT devices instead of the self-commutated thyristor system. This paper describes the configuration of the supplied system and the result of evaluation on the actual running performance.

Vaporization-Cooling Silicon Rectifiers for Railway Substations

Shingo Tsuda Toyotada Nakamura Shuji Odaki
Fuji Electric Journal Vol.74 No.5 p.316-321 (2001)

The silicon rectifier, a main piece of equipment in electric railway substations, has so far used a vaporization cooling system using perfluorocarbon (PFC) for the refrigerant. However, PFC was designated as a global warming substance in the Kyoto Conference on Global Warming (COP3) in 1997 and its use will be controlled in the future. Fuji Electric developed an epoch-making vaporization-cooling silicon rectifier that uses pure water intrinsically harmless to the environment for the refrigerant and has still more merits, and started sale. This paper describes the history of silicon rectifiers and the new silicon rectifier.

富士電機株式会社

本社事務所	☎03)5435-7111	〒141-0032 東京都品川区大崎一丁目11番2号(ゲートシティ大崎イーストタワー)
北海道支社	☎011)261-7231	〒060-0042 札幌市中央区大通西四丁目1番地(道銀ビル)
東北支社	☎022)225-5351	〒980-0811 仙台市青葉区一番町一丁目2番25号(仙台NSビル)
北陸支社	☎076)441-1231	〒930-0004 富山市桜橋通り3番1号(富山電気ビル)
中部支社	☎052)204-0290	〒460-0003 名古屋市中区錦一丁目19番24号(名古屋第一ビル)
関西支社	☎06)6455-3800	〒553-0002 大阪市福島区鷺洲一丁目11番19号(富士電機大阪ビル)
中国支社	☎082)247-4231	〒730-0021 広島市中区胡町4番21号(朝日生命広島胡町ビル)
四国支社	☎087)851-9101	〒760-0017 高松市番町一丁目6番8号(高松興銀ビル)
九州支社	☎092)731-7111	〒810-0001 福岡市中央区天神二丁目12番1号(天神ビル)
北関東支店	☎048)526-2200	〒360-0037 熊谷市筑波一丁目195番地(能見ビル)
首都圏北部支店	☎048)657-1231	〒330-0802 大宮市宮町一丁目38番1号(野村不動産大宮共同ビル)
首都圏東部支店	☎043)223-0701	〒260-0015 千葉市中央区富士見二丁目15番11号(日本生命千葉富士見ビル)
神奈川支店	☎045)325-5611	〒220-0004 横浜市西区北幸二丁目8番4号(横浜西口KNビル)
新潟支店	☎025)284-5314	〒950-0965 新潟市新光町16番地4(荏原新潟ビル)
長野システム支店	☎026)228-6731	〒380-0836 長野市南県町1002番地(陽光エースビル)
長野支店	☎0263)36-6740	〒390-0811 松本市中央四丁目5番35号(長野県铸物会館)
東愛知支店	☎0566)24-4031	〒448-0857 刈谷市大手町二丁目15番地(センタービルOTE21)
兵庫支店	☎078)325-8185	〒650-0033 神戸市中央区江戸町95番地(井門神戸ビル)
岡山支店	☎086)227-7500	〒700-0826 岡山市磨屋町3番10号(住友生命岡山ニューシティビル)
山口支店	☎0836)21-3177	〒755-8577 宇部市相生町8番1号(宇部興産ビル)
松山支店	☎089)933-9100	〒790-0878 松山市勝山町一丁目19番地3(青木第一ビル)
沖縄支店	☎098)862-8625	〒900-0005 那覇市天久1131番地11(ダイオキビル)
道北営業所	☎0166)68-2166	〒078-8801 旭川市緑が丘東一条四丁目1番19号(旭川リサーチパーク内)
北見営業所	☎0157)22-5225	〒090-0831 北見市西富町163番地30
釧路営業所	☎0154)22-4295	〒085-0032 釧路市新栄町8番13号
道東営業所	☎0155)24-2416	〒080-0803 帯広市東三条南十丁目15番地
道南営業所	☎0138)26-2366	〒040-0061 函館市海岸町5番18号
青森営業所	☎0177)77-7802	〒030-0861 青森市長島二丁目25番3号(ニッセイ青森センタービル)
盛岡営業所	☎019)654-1741	〒020-0034 盛岡市盛岡駅前通16番21号(住友生命盛岡駅前ビル)
秋田営業所	☎018)824-3401	〒010-0962 秋田市八橋大畑一丁目5番16号
山形営業所	☎023)641-2371	〒990-0057 山形市宮町一丁目10番12号
新庄営業所	☎0233)23-1710	〒996-0001 新庄市五日町1324番地の6
福島営業所	☎024)932-0879	〒963-8033 郡山市亀田一丁目2番5号
いわき営業所	☎0246)27-9595	〒973-8402 いわき市内郷御殿町二丁目29番地
水戸営業所	☎029)231-3571	〒310-0805 水戸市中央二丁目8番8号(櫻井第2ビル)
茨城営業所	☎029)266-2945	〒311-1307 茨城県東茨城郡大洗町桜道304番地(茨交大洗駅前ビル)
金沢営業所	☎076)221-9228	〒920-0031 金沢市広岡一丁目1番18号(伊藤忠金沢ビル)
福井営業所	☎0776)21-0605	〒910-0005 福井市大手二丁目7番15号(安田生命福井ビル)
山梨営業所	☎055)222-4421	〒400-0858 甲府市相生一丁目1番21号(清田ビル)
松本営業所	☎0263)33-9141	〒390-0811 松本市中央四丁目5番35号(長野県铸物会館)
岐阜営業所	☎058)251-7110	〒500-8868 岐阜市光明町三丁目1番地(太陽ビル)
静岡営業所	☎054)251-9532	〒420-0053 静岡市弥勒二丁目5番28号(静岡荏原ビル)
浜松営業所	☎053)458-0380	〒430-0945 浜松市池町116番地13(山崎電機ビル)
和歌山営業所	☎073)432-5433	〒640-8052 和歌山市鷺ノ森堂前丁17番地
鳥取営業所	☎0857)23-4219	〒680-0862 鳥取市雲山153番地36〔鳥電商事(株)内〕
倉吉営業所	☎0858)23-5300	〒682-0802 倉吉市東巖城町181番地(平成ビル)
山陰営業所	☎0852)21-9666	〒690-0007 松江市御手船場町549番地1号(安田火災松江ビル)
徳島営業所	☎088)655-3533	〒770-0832 徳島市寺島本町東二丁目5番地1(元木ビル)
高知営業所	☎088)824-8122	〒780-0870 高知市本町四丁目1番16号(高知電気ビル別館)
小倉営業所	☎093)521-8084	〒802-0014 北九州市小倉北区砂津二丁目1番40号(富士電機小倉ビル)
長崎営業所	☎095)827-4657	〒850-0037 長崎市金屋町7番12号
熊本営業所	☎096)387-7351	〒862-0950 熊本市水前寺六丁目27番20号(神水恵比須ビル)
大分営業所	☎097)537-3434	〒870-0036 大分市寿町5番20号
宮崎営業所	☎0985)20-8178	〒880-0805 宮崎市橘通東三丁目1番47号(宮崎プレジデントビル)
南九州営業所	☎099)224-8522	〒892-0846 鹿児島市加治屋町12番7号(日本生命鹿児島加治屋町ビル)
エネルギー製作所	☎044)333-7111	〒210-9530 川崎市川崎区田辺新田1番1号
変電システム製作所	☎0436)42-8111	〒290-8511 市原市八幡海岸通7番地
東京システム製作所	☎042)583-6111	〒191-8502 日野市富士町1番地
神戸工場	☎078)991-2111	〒651-2271 神戸市西区高塚台四丁目1番地の1
鈴鹿工場	☎0593)83-8100	〒513-8633 鈴鹿市南玉垣町5520番地
回転機工場	☎0593)83-8100	〒513-8633 鈴鹿市南玉垣町5520番地
松本工場	☎0263)25-7111	〒390-0821 松本市筑摩四丁目18番1号
山梨工場	☎055)285-6111	〒400-0222 山梨県中巨摩郡白根町飯野221番地の1
吹上工場	☎048)548-1111	〒369-0192 埼玉県北足立郡吹上町南一丁目5番45号
大田原工場	☎0287)22-7111	〒324-8510 大田原市中田原1043番地
三重工場	☎0593)30-1511	〒510-8631 四日市市富士町1番27号
(株)富士電機総合研究所	☎0468)56-1191	〒240-0194 横須賀市長坂二丁目2番1号
(株)F F C	☎03)5351-0200	〒151-0053 東京都渋谷区代々木四丁目30番3号(新宿コヤマビル)

