

高速度サイリスタとその応用

High Speed Thyristors and Their Applications

最近のパワーエレクトロニクス進展の一方向として、大容量・高速度サイリスタとその応用技術の分野がある。本論文では、大容量・高速度サイリスタの代表格である逆導通形サイリスタに焦点をあて、その応用例として電気車チョップ制御装置、交流安定化電源としての定電圧定周波電源装置、交流電動機駆動用電源としての可変電圧可変周波数インバータなどの応用技術について具体例とともに現状を紹介する。

和島幸一* Kōichi Wajima
地福順人* Yorito Zihuku
後藤隆雄** Takao Gotō
坪井 孝*** Takashi Tsuboi
山口晃一**** Kōichi Yamaguchi

1 緒 言

近年、電気鉄道や電子計算機電源を中心に大容量チョップやインバータの応用がサイリスタ応用の新技術として注目を浴びている。このような分野では、サイリスタは高速スイッチング性能をもつ、いわゆる高速度サイリスタが適用される。サイリスタ応用のシステム容量が年々増大し、サイリスタもその需要に合わせ高耐圧化、大電流化の変遷をたどってきた(図1)。

高速度サイリスタは、特にターンオフタイムが短いことが必須の特性条件であり、この点、位相制御用のサイリスタに比べ高耐圧化、大電流化の際に特別の配慮を必要とする。

日立製作所では、昭和45年に新構想に基づく逆導通形の高速度サイリスタの開発を行ない、高速度サイリスタの高耐圧化、大電流容量化への基本的なアプローチ技術を確立し、逆導通形サイリスタの実用化を図ってきた。

本稿では、この逆導通形の高速度サイリスタとその応用例を中心に、この分野の技術の現状を紹介する。

2 高耐圧・高速度サイリスタ

高速度サイリスタの基本的な特性は、ターンオフタイムで決まる。従来、サイリスタのターンオフタイムの制御・抑制にはサイリスタの製作過程で重金属をシリコンに拡散させる

方式が一般的である。この方式では、素子の順方向特性〔順電圧降下(FVD)〕の性能低下を招き、更に高耐圧サイリスタでは接合層が厚くなるためのFVDの増大と重なり、高速度サイリスタは位相制御サイリスタに比べ高耐圧の性能を得るのに問題が多い。図2はターンオフタイムとFVDの関連の試験した一例である。このような問題を緩和させるには、高耐圧にしても接合層厚を抑制できる接合構造と重金属の拡散量を抑制するのが基本的な課題となる。逆導通形接合構造は、上記の問題をカバーして高耐圧化へアプローチしたものである。400A 1,200V、400A 2,500V、1,000A 400Vなどの逆導通形高速度サイリスタのシリーズが開発、実用化された。その代表的応用例として、電子計算機電源や地下鉄電車チョップ、新幹線電車ブレーキチョップなどに使用されているCH04V形(400A 1,200V)及びCF01V形(400A 2,500V)サイリスタの定格表を表1に、CF01V形サイリスタの外観を図3に示す。

逆導通形サイリスタは、従来のバイパスダイオードをモノリシックに内蔵しているため、サイリスタダイオード間での浮遊インダクタンスがなく回路設計上サイリスタのターンオフタイムに余裕をとる必要がなくなる。装置構成上も小形軽量化へ寄与する場合が多い。

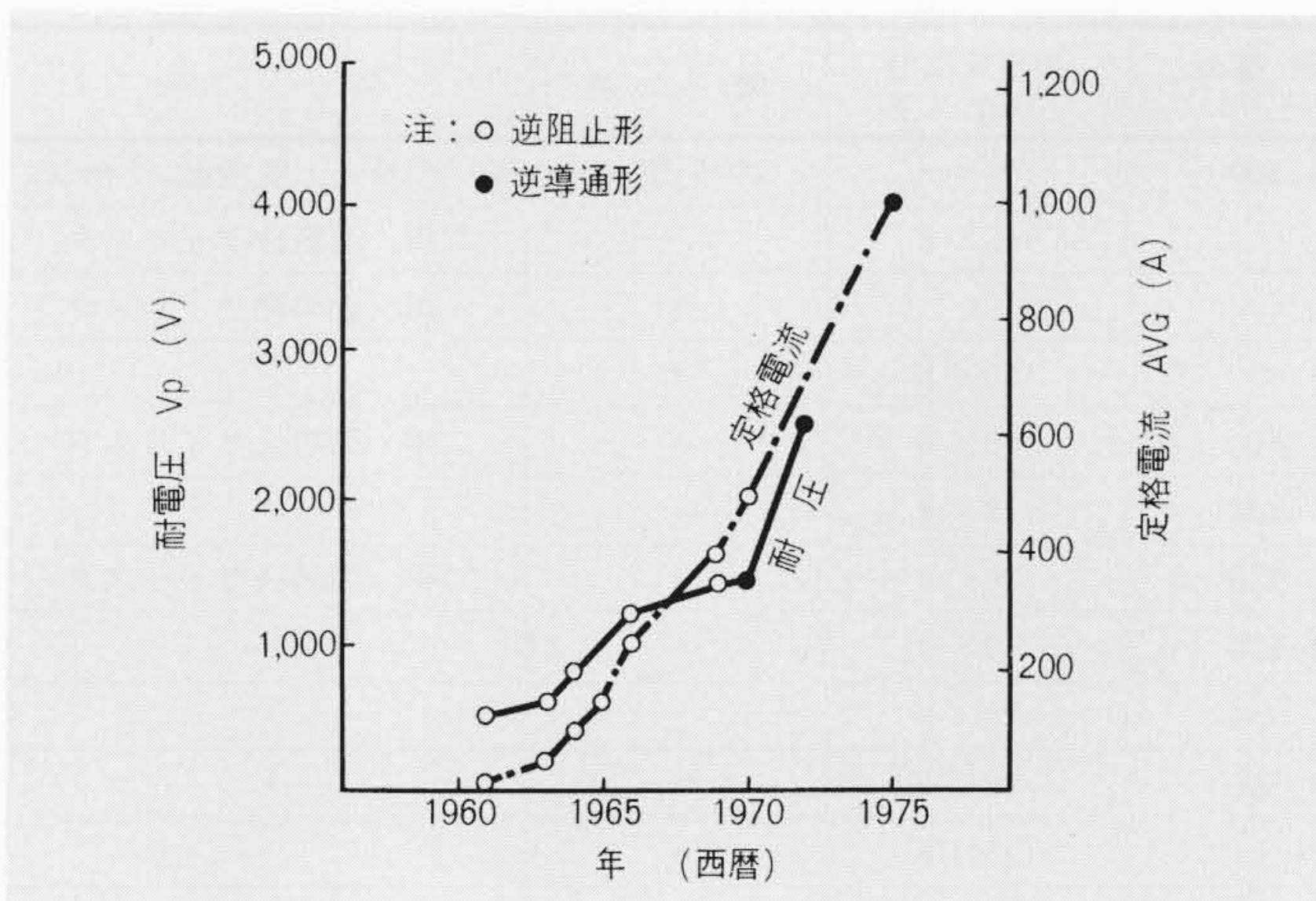


図1 高速度サイリスタの容量の推移 1,200V以上 500A以上のサイリスタは逆導通形となっている。

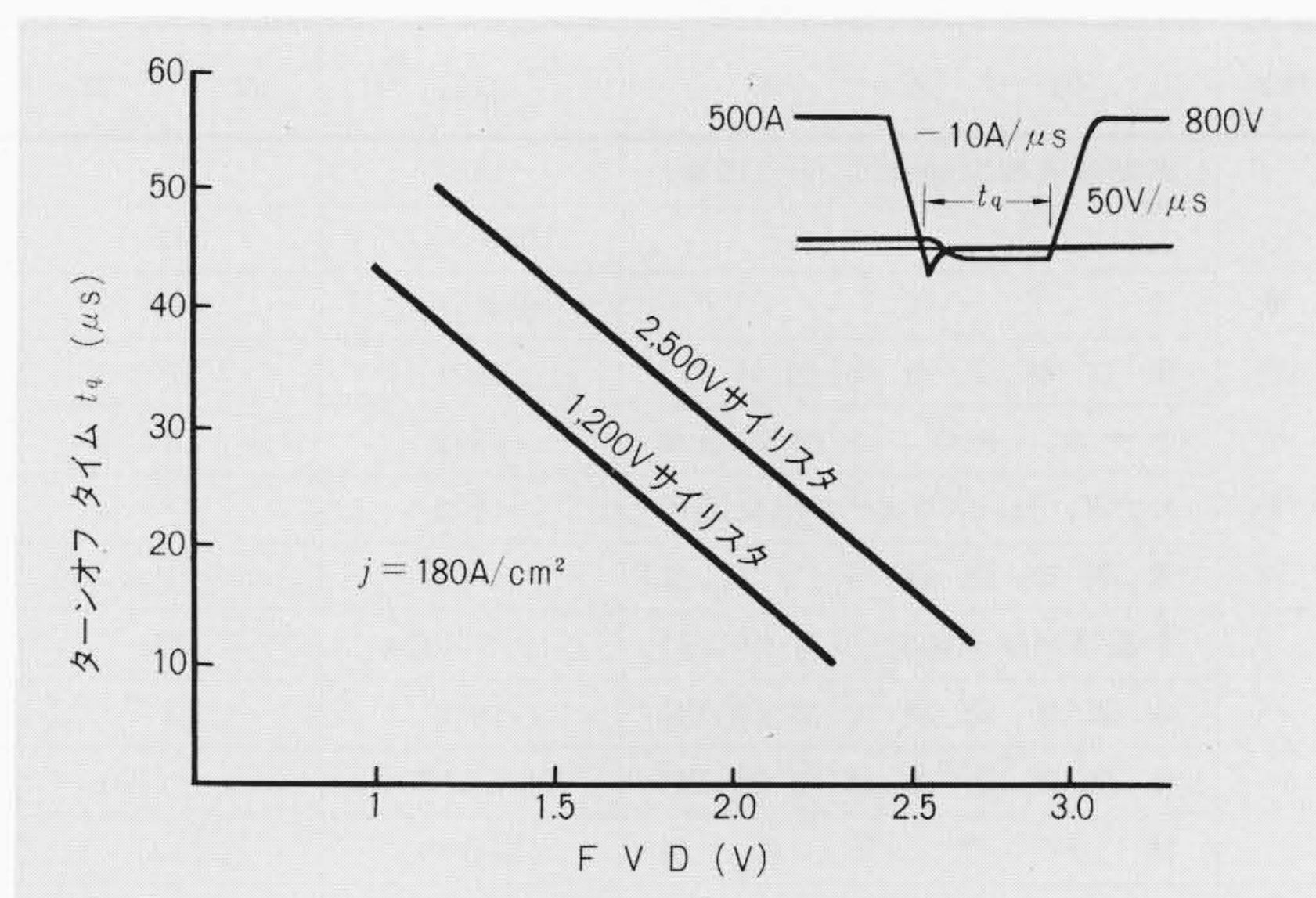


図2 ターンオフタイムとFVDの実験例 高耐圧では接合層が厚くなるので、FVD- t_q は協調しにくい傾向を示している。

* 日立製作所日立工場

** 日立製作所水戸工場

*** 日立製作所日立研究所

**** 日立製作所機電第一事業本部産業技術本部

逆導通形サイリスタは、電力用のモノリシック集積回路(IC)の性格をもっており、特にインプロセスにおける高精度の接合製作プロセス技術が必要であり、電力用サイリスタの新技术分野として、今後もその発展拡大が期待される。

3 電気車チョッパ制御への応用

高速鉄道車両の分野では、大容量・高速度サイリスタの開

表1 CH04V形及びCF01V形高速度サイリスタの特性仕様
サイリスタとダイオードが半導体接合内部で逆・並列の構造となっている逆導通形大容量サイリスタの代表例を示す。

仕 様	単 位	CH04V	CF01V
定格せん頭非繰返し順阻止電圧	V	1,200	2,500
定格せん頭順阻止電圧	V(peak)	1,200	2,500
定格平均順電流	A(ave)	400	400
定格瞬時過電流	A(peak)	5,000	7,000
最大順電圧上昇率	V/μs	200	350
最大順電流上昇率	A/μs	100	200
定格せん頭ゲート電圧(順方向or逆方向)	V(peak)	20/5	20/5
定格せん頭ゲート電流	A(peak)	4	6
定格ゲート入力(せん頭/平均)	W	20/4	30/4
動作接合温度	℃	-40~115	-40~115
最大順電圧降下 $i_F=1,250A$	V(peak)	2.5	2.5
最小ゲートトリガ電圧at 25℃, $V_F=100V$	V(DC)	3.5	3
最小ゲートトリガ電流at 25℃, $V_F=100V$	mA	300	350
最大ゲート非トリガ電圧 at 125℃	V(DC)	0.3 at $V_F=600V$	0.3 at $V_F=1,250V$
最大ゲート非トリガ電流 at 125℃	mA(DC)	3 at $V_F=600V$	5 at $V_F=1,250V$
ターンオンタイム $V_F=\frac{1}{2}$ off-state Voltage at 25℃	μs	5	6
熱 抵 抗	℃/W	0.045	0.027
ターンオフタイム	μs	25	30

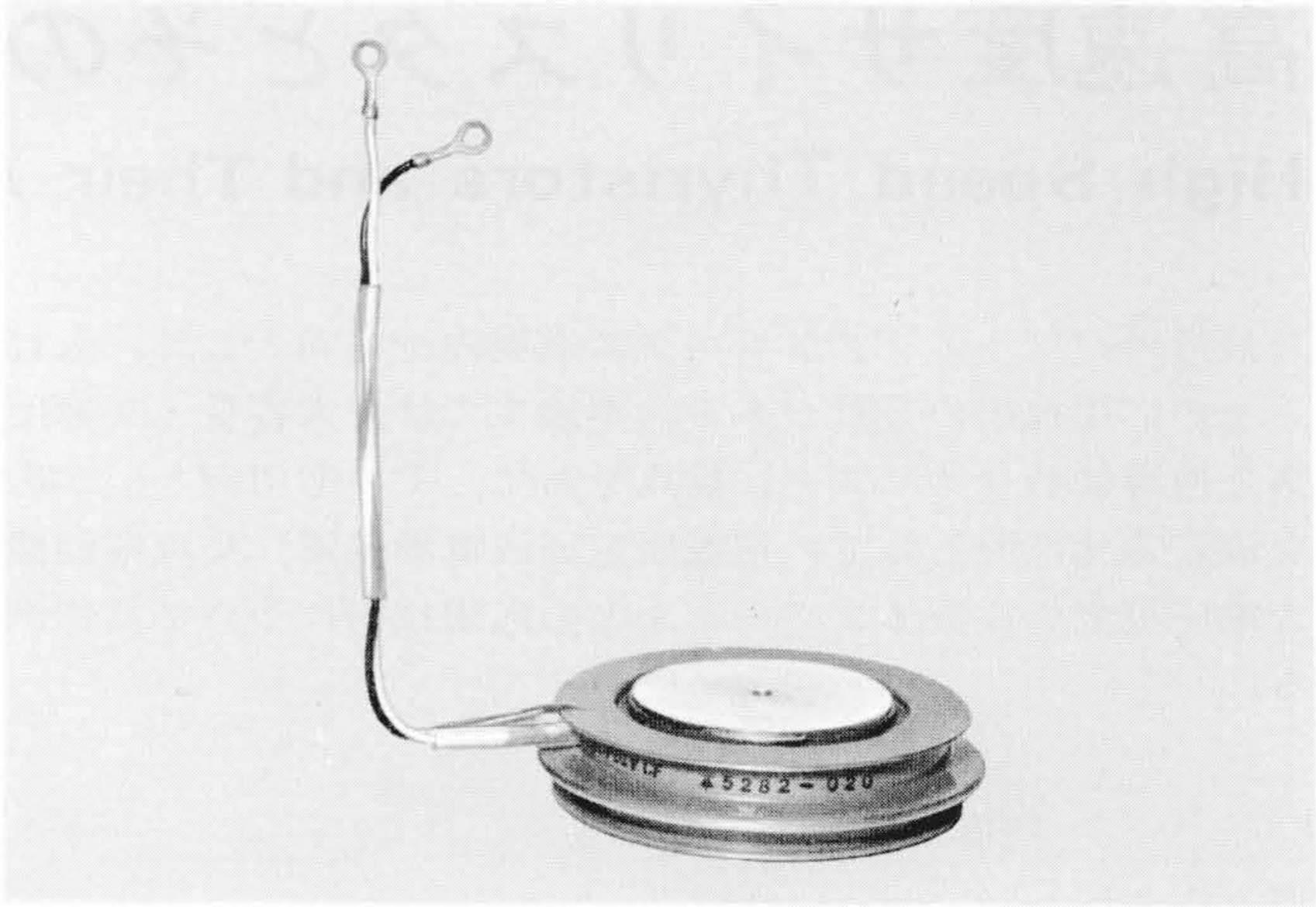


図3 CF01V形サイリスタの外観 400A 2,500V逆導通形高速度サイリスタを示す。

発と協調しつつ、これを応用した電気車チョッパ制御技術の開発に努め、これまで表2に示すように数多くのチョッパ制御装置を製作、納入してきた。

3.1 電機子チョッパ

チョッパを主電動機電機子と直列に接続して、電機子電流を直接オン・オフ制御する電機子チョッパ制御方式は、従来のカム接触器による抵抗制御方式に対して、次のような特長をもっている。

(1) 電力消費量の節減

起動抵抗の省略による力行時の電力節減に加えて、低速まで有効な回生ブレーキがかけられるので、大幅な電力節減が可能となる。特に起動・停止頻度の高い地下鉄電車などに適用するとその効果が顕著であり、この場合従来の抵抗制御方式に比べて30~40%の電力節減が期待できる⁽¹⁾。

(2) 電動車数の減少

電流制御の速応性が著しく向上されるので、車輪空転時の再粘着制御が容易となる。その結果、利用粘着係数(引張力

表2 チョッパ制御装置納入一覧 電機子チョッパは地下鉄を中心に、また界磁チョッパは近郊都市電車に採り入れられ、省電力の実効を挙げつつあり、今後この傾向はますます大きくなるものと思われる。

種別	納 入 先	納 入 年 (西暦)	台 数	架 線 電 圧 DC(V)	使用電動機 (kW)×台数	機 能	備 考
電 機 子 チョ ッ パ	帝都高速度交通営団(千代田線)	1967	1	1,500	95×8	力行-回生	第一次試作車 三相、逆阻止サイリスタ
	"	1969-1972	12	"	145×8	"	三相、逆阻止サイリスタ
	"	1970-1972	18	"	"	"	二相、逆導通サイリスタ
	東 京 都 交 通 局(10号線)	1971	2	"	150×8	"	"
	カナダ、トロント市交通局	1972	3	600	86×8	"	二相、逆阻止サイリスタ
	カナダ、モントリオール市交通局	1973	"	720	118×8	"	"
	大 阪 市 交 通 局(谷町線)	"	1	750	130×8	"	二相、逆導通サイリスタ
	帝都高速度交通営団(有楽町線)	1973-1974	18	1,500	150×8	"	"
	大 阪 市 交 通 局(御堂筋線)	1975	1	750	130×8	"	"
	札 幌 市 交 通 局(東西線)	1975-(製作中)	1+(10)	1,500	70×16	"	"
界 磁 チョ ッ パ	神 戸 市 交 通 局	(製作中)	(12)	"	135×8	"	"
	東京急行電鉄株式会社	1969-(製作中)	69+(21)	"	130×8	"	—
	日本国有鉄道(在来線)	1970	1	"	110×4	"	591形電車
抵 抗 チョ ッ パ	京王帝都電鉄株式会社	1973-1974	18	"	150×8	"	—
	日本国有鉄道(新幹線)	1968	1	—	250×8	発電ブレーキ	951形試験電車
	"	1972	"	—	"	"	951形試験電車(置換)
	"	1973	"	—	275×8	"	961形試作電車

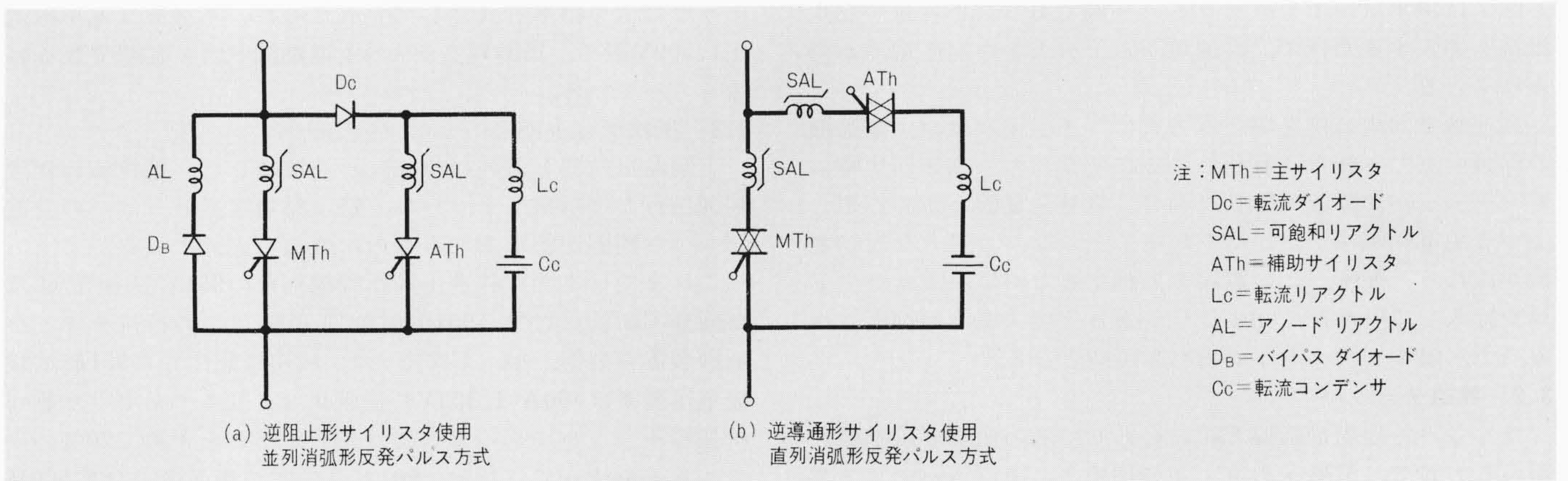
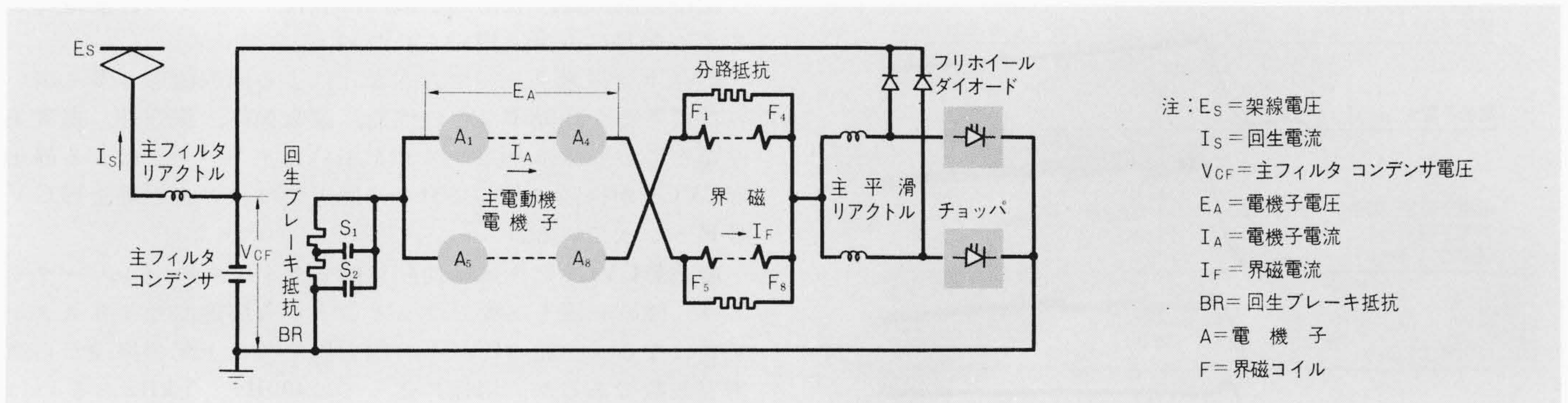
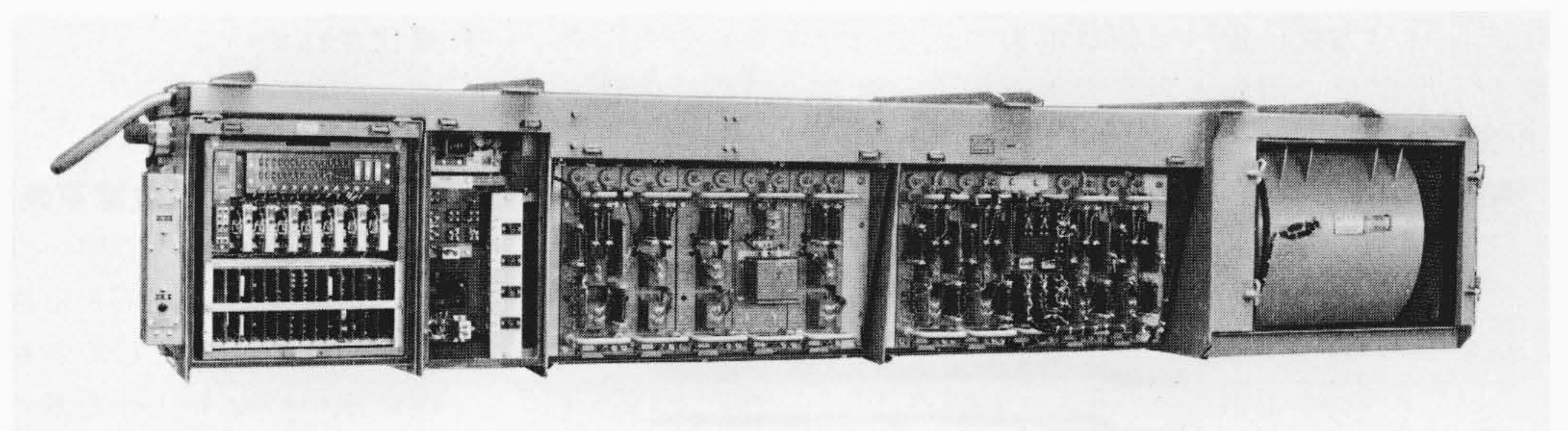


図4 チョップ部基本回路 逆導通形サイリスタの機能集積効果により、チョップ部回路を簡略化できる。

図5 帝都高速度交通営団(有楽町線)向けチョッパ
チョッパにはCF01V形高速度・高耐圧の逆導通形サイリスタを使用し、150kW主電動機8台を16個サイリスタで制御している。



／軸重)を高くとることができ、一編成中の電動車の割合(MT比)を小さくすることが可能となり経済的に有利である⁽²⁾。

(3) 無接点化による信頼性・保守性の向上、電流の連続制御による乗心地の改善がもたらされる。

車両床下に装置を取り付ける場合には、ぎ装スペースが制限されるため装置の小形軽量化が重要である。日立製作所では、図4(a)に示すような逆阻止サイリスタを用いた並列消弧形反発パルス方式を標準回路としているが、特に高圧・大容量装置の小形軽量化を図るために、世界で最初に逆導通形サイリスタを用いた直列消弧形チョッパ装置を開発し、その実用化に成功した⁽³⁾。図4(b)にその回路を示す。

図5は帝都高速度交通営団(有楽町線)向けチョッパ制御装置である。前述のCF01V形高耐圧・高速度の逆導通形サイリスタを使用し、わずか16個の素子で150kW主電動機8台を制御する能力をもっている。本装置は、逆導通形サイリスタ

のサイリスタ ダイオード機能集積効果、高耐圧性及び高速性といった特長を遺憾なく発揮させた装置と言えよう。

電機子チョッパ制御方式は、今後地下鉄と地上線との相互乗入れ用、あるいは地上線専用の都市近郊電車にも広く用いられるものと期待される。この場合、地下鉄線に比べて一般にブレーキ初速が高くなるので、高速からの回生ブレーキ性能が重要となってくる。

高速回生ブレーキ方式としては種々の方式があるが、日立製作所では図6に示すような比較的簡単に高速からブレーキがかけられる高速回生ブレーキ方式の実用化を図り現車試験を実施した⁽³⁾。すなわち、

- (1) 主電動機としては最もコンパクトにできる直巻電動機を使用し、弱界磁制御をフルに活用して高速性をもたす。
- (2) 基本的には今まで多数製作して実績のあるチョッパ制御方式をそのまま生かし、回生ブレーキの高速域のみ主電動機に直列抵抗(回生抵抗)を挿入することを特長としている。

図7は現車試験オシログラムの一例であり、小容量の回生抵抗を挿入するだけで、高速域から十分大きな回生電流が得られている。

高速域で回生抵抗を用いる方式は、チョップ及び主電動機の保護の点でも非常に有利となる。すなわち、高速回生時に万一チョップが転流失敗した場合、直巻発電機として作用している主電動機端子が短絡されることになり、過大な短絡電流が流れる。従来、この電流を抑制するために限流リアクトルを挿入していたが、回生抵抗があると突入電流が抑制されるので、限流リアクトルの省略も可能となる。

3.2 界磁チョップ

チョップを複巻電動機と組み合わせてその他励界磁制御に用いる方式で、電機子の直・並列切換えとチョップによる界磁制御を併用することによって、比較的小容量のチョップ装置で広範囲の回生ブレーキ制御が可能となる。

界磁チョップ方式は力行時に抵抗制御を用いるので、電機子チョップ方式に比べて消費電力の点でやや劣るものの、装置が小形軽量で済むという大きな利点があり、特に経済性を追求したものと言えよう。

昭和44年以来、多数の納入実績を有しているが図8に示す

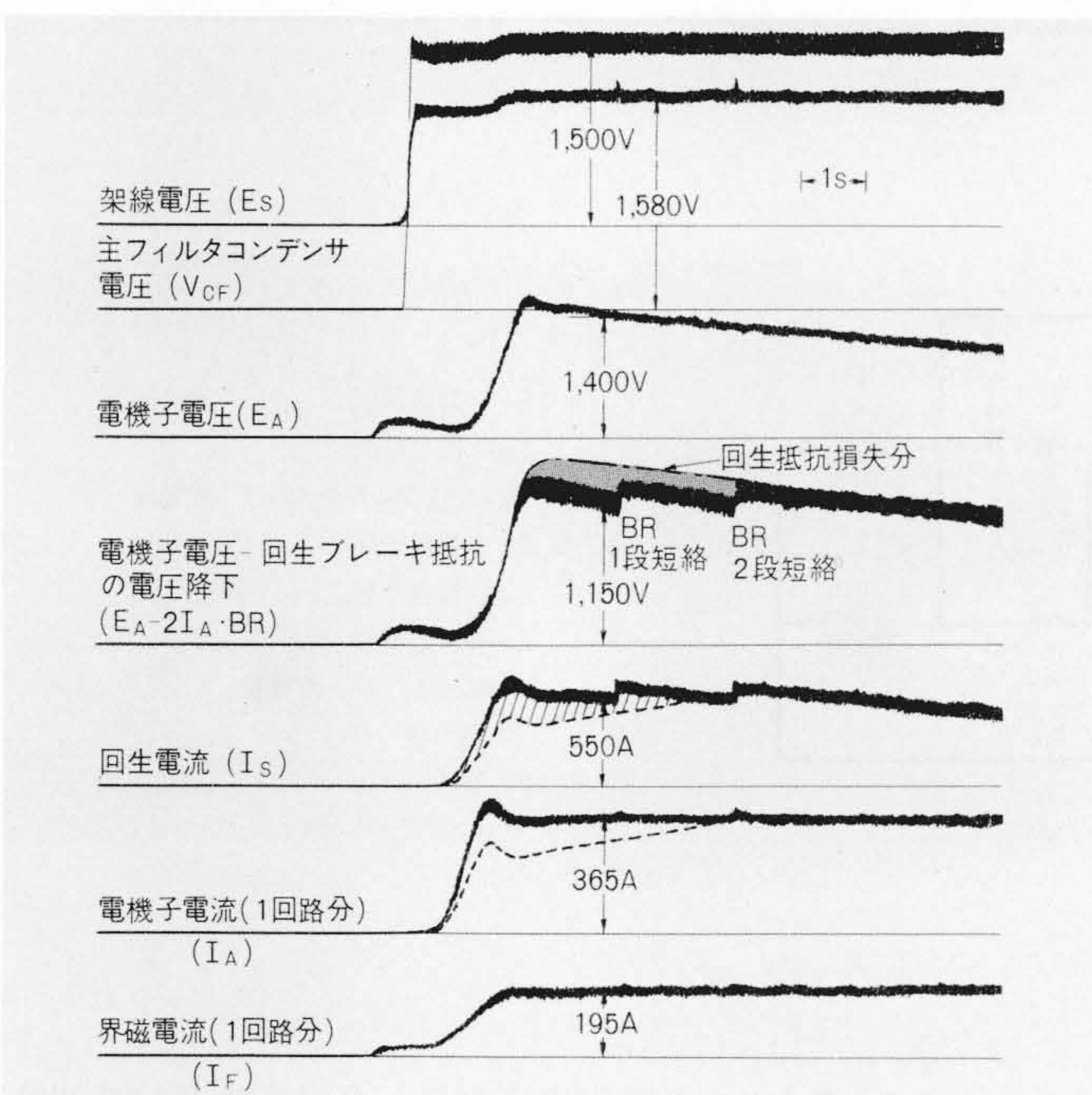


図7 回生ブレーキ オシログラム(高速域) 図中に点線で示したものは、回生抵抗を挿入しなかった場合の回生電流、及び主電動機電流を示すもので、斜線部に相当する部分だけ回生エネルギーが増大できることを示している。

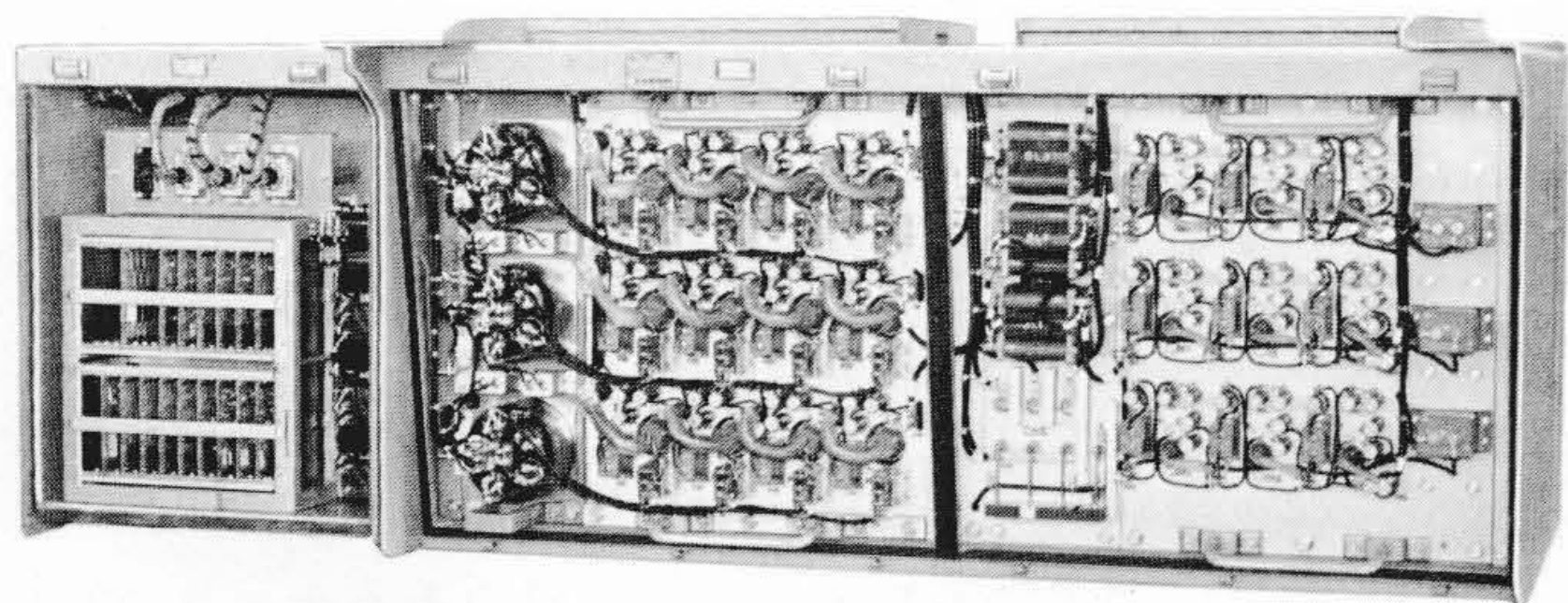


図8 車両用界磁チョップ制御装置 自冷式で最大60Aの界磁電流制御が可能であり、150kWクラスの主電動機8台が制御できる。

ような装置を標準形式として完成させた。本装置は電車線電圧1,500V用で、150kWクラスの主電動機8台を制御できる容量をもっている。

3.3 抵抗チョップ

主回路抵抗器と並列にチョップを接続して、抵抗値の無段階制御を行なう抵抗チョップは、特に粘着限界いっぱいの発電ブレーキ制御が要求されるものに適した方式である。

これまで日本国有鉄道山陽新幹線対象の951形試験電車及び同全国新幹線対象の961形試作電車用にこの抵抗チョップ制御装置を製作、納入してきた⁽⁴⁾。最初に製作した951形試験電車用装置は400A 1,300Vの逆阻止サイリスタを用いた並列消弧形チョップであったので、ダイオードを含めて20個の半導体素子を使っていたが、961形試作電車用装置では2,500V 400AのCF01V形逆導通形サイリスタの採用により素子数を一挙に6個に減少させ、しかも容量を2倍に増加できたので、抵抗の制御段数を半減させることができ、また重量も大幅に軽量化されている。

4 一般産業への応用

4.1 定電圧・定周波電源装置

電子計算機の普及に伴い良質の電源が要求されるようになり、ここ数年来定電圧・定周波電源装置(以下CVCFと略す)の需要が急激に増大してきた。特に銀行業務などのオンライン化に伴いバッテリーを備えた並列冗長系の無瞬断電源システムも多く用いられている。

CVCFの用途は、電子計算機電源に限らず表3に示すような空港管制機器、放送通信機器、各種プラントの計装電源システムなどにも多く用いられている。

CVCFは従来クレマ方式などによる回転機形も多く用いられてきたが、効率などの性能、運転操作、保守性、据置条件などにおいて、サイリスタを用いたインバータによる静止形CVCFが格段に優れており、最近ではほとんど静止形CVCFとなっている。

静止形CVCFの主体は他制自励式サイリスタインバータであり、強制転流を必要とするところから高速度サイリスタが必要になる。一般のCVCFの出力周波数は上記の用途から適用周波数であるが、用途によっては400Hz、1kHzあるいはそれ以上が要求され、インバータの周波数が高いほどターンオフタイムの短いサイリスタが必要になる。なお適用周波数であってもターンオフタイムの短いサイリスタを使えば転流回路が小形化される。

サイリスタインバータの転流回路方式には種々の回路があるが、図9にCVCFに採用される代表的回路方式を示す。

同図(a)のマクマレー並列インバータは最も基本的な回路であるが、電圧制御は入力直流電源、又は交流出力側で行なう必要があり、小容量器で定電圧変圧器と組み合わせた方式が用いられている。

同図(b)の旧マクマレー方式は、交流出力波形の幅制御が可能であり、電圧制御が容易に行なえるが帰還効率が悪く、転流損失が大きい。最近変流器(CT)帰還方式などの改良形が採用されているが、比較的小容量の大きい転流リアクトル、CTを必要とすることには変わりはない。

同図(c)の新マクマレー方式は、転流回路からリアクトル、変圧器類を取り除いて完全に電子化された方式であり、応答度が速く損失も少ない。この回路ではサイリスタの数は多くなるが、転流リアクトルがないために逆導通形サイリスタを使用することが可能になり、主回路素子数としては(b)の方式

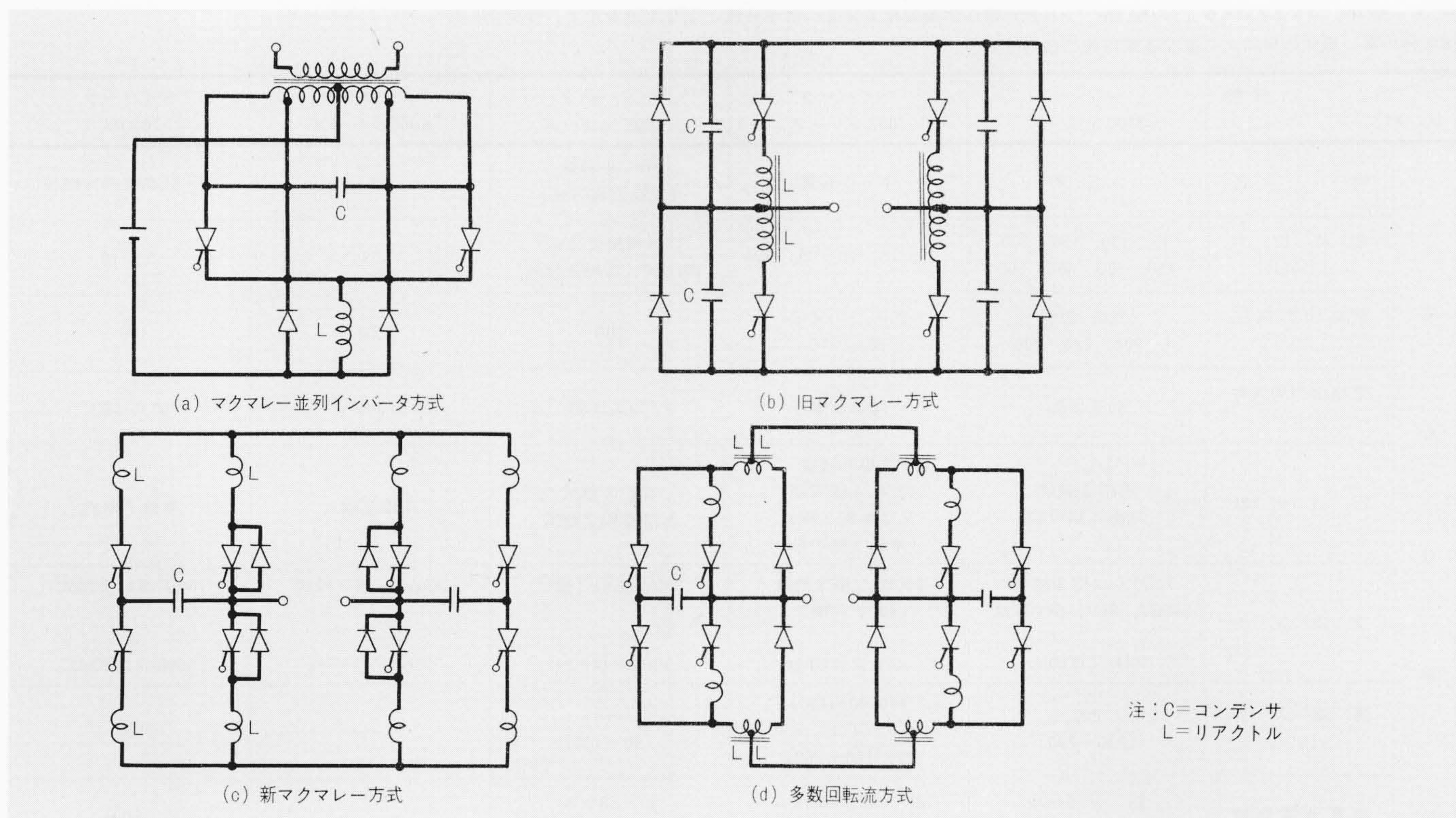


図9 インバータの転流回路方式例 サイリスタ式各種インバータの原理を示す。

と同じになる。

同図(d)の多数回転流方式は、1サイクルの間に何回も転流を行なわせパルス幅変調を行なう方式である。転流回数が多いため、応答性能に優れているが、逆に転流損失が増える。なお等価周波数が高いのでターンオフタイムの短いサイリスタが要求される。

表3に日立静止形無停電CVCF電源装置「ハイバータ」の標準系列を示す。

「ハイバータ」は、インバータ回路としては新マクマレー方式を採用しているため効率が良く、出力周波数精度 $\pm 0.01\%$ 、出力電圧整定精度 $\pm 2\%$ 、出力電圧過度変動 $\pm 10\%$ 、回復応答時間3サイクル以内の性能も満足することができる。

図10に「ハイバータ」の外観例を示す。

4.2 可変電圧可変周波数インバータ⁽¹⁾

電力用半導体及び回路技術の発達により、従来の直流電動機に代わる交流電動機駆動用電源として可変電圧可変周波数インバータ(Adjustable Voltage Adjustable Frequency Inverter: 以下、AVAFと略す)は既に不可欠のものとなっている。特に高精度($\pm 0.05\%$ 程度)の出力周波数が容易に得られることから同期電動機と組み合わせた場合、オープンループ制御により超精密回転数制御を行なうことができ、更に多数台電動機の揃速制御については同期電動機、誘導電動機を問わず他方式の追従を許さない制御性をもつ。

また、交流電動機の周波数制御により速度制御は極めて容易で、ブラシレスの利点を生かして本質的に省力化・高速化の要求及び防滴、防爆など特殊環境で使用される電動機の可変速手段としての要求に十分に応じ得るものである。

こうしたことから、AVAFは交流電動機の駆動源として各種工作機械、紡糸機、巻取機、化学工業の攪拌機、製鉄業のローラータブルコンベヤなどに単独、又はプラントの一部

として用いられている。日立製作所のAVAFは次の5種の形式のものがあり、多数の実績と豊富な使用例により、その性能が裏付けられている。

(1) SFC-T形インバータ(トランジスタ式)

トランジスタは、サイリスタに比べ高周波におけるスイッチング損失が少ないため、高周波インバータに適する。 $0.5 \sim 7.5\text{kVA}$ 、 $50 \sim 3,000\text{Hz}$ のものがある。

(2) SFC-M形インバータ(サイリスタ式)

直流電圧の可変手段としてチョッパを用いたもので、比較的高周波、且つ大容量の用途に適する。 $10 \sim 100\text{kVA}$ 、 $50 \sim 550\text{Hz}$ のものがある。

(3) SFC-S形インバータ(サイリスタ式)

新転流方式を採用した低コストのインバータであり、 $1.3 \sim$

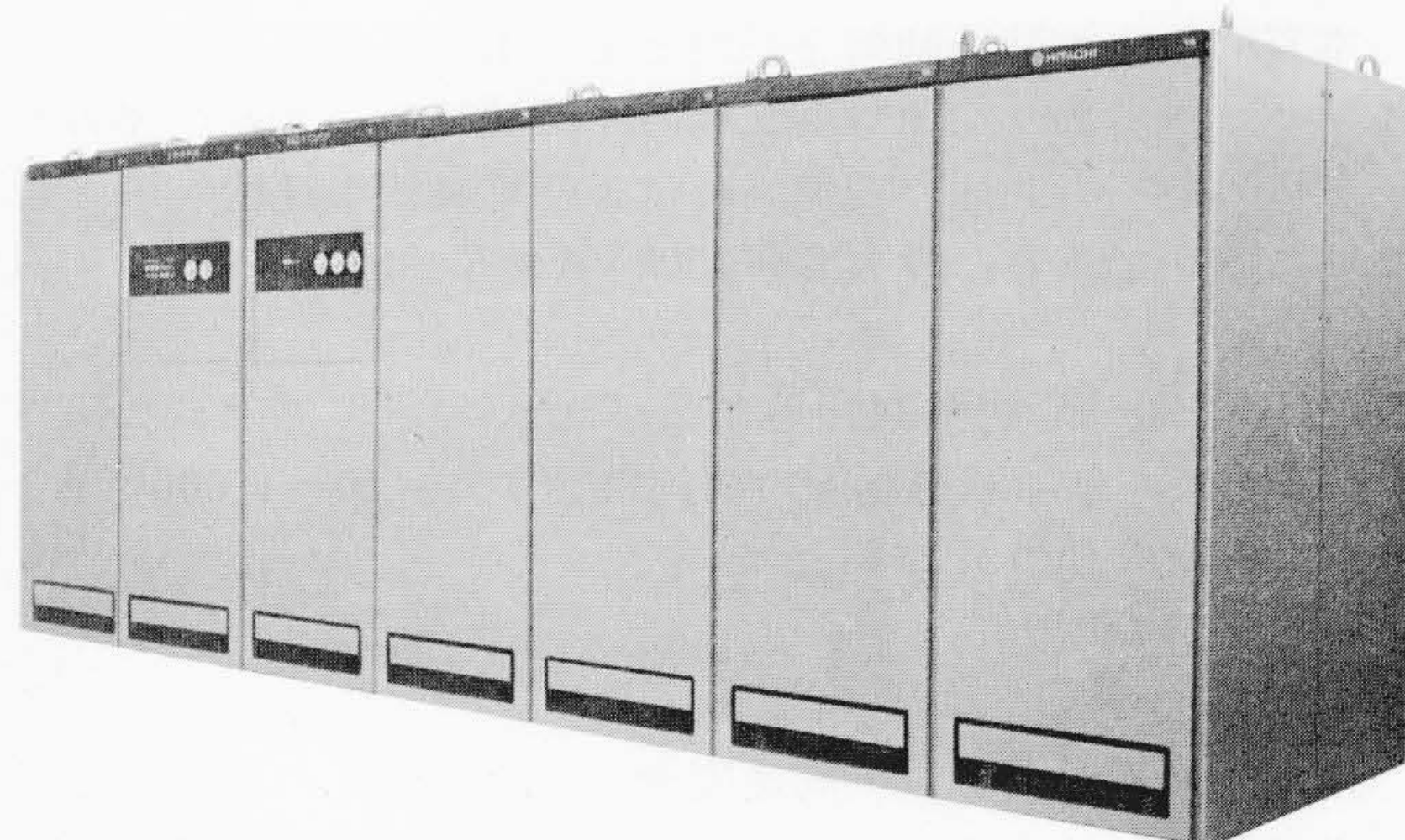


図10 「ハイバータ」3300シリーズ 空港管制機器、放送通信機器、各種プラント計装システム用安定化電源として使用されるサイリスタ式定電圧定周波電源装置を示す。

表 3 標準「ハイパータ」の種類 日立定電圧定周波電源装置の標準仕様と主な用途を示す。安定化した信頼性の高い電気の供給が必要な各種用途に使用される。

仕 様 \ 種 類		「ハイパータ」 3300シリーズ	「ハイパータ」 1000シリーズ	「ハイパータ」 1000Fシリーズ	「ハイパータ」 4000シリーズ	「ハイパータ」 1000M
主 な 仕 様	特 長	大 形	中・小容量	中・小容量 (浮動充電方式)	400Hz	電子計算機端末機用
	定 格 出 力 (kVA)	75, 100, 150, 200 250, 300, 400, 500	10, 15, 20, 30, 50	15 (単相 2 線式) 20, 50 (三相 3 線式)	75	5, 10
	定 格 出 力 電 圧 (V)	200, 210 208, 220, 230	200, 210又は 105, 110	200	208	100
	定 格 出 力 周 波 数 (Hz)	50又は60	50又は60	50又は60	400	50又は60
	出 力 相 数	三相 3 線式 (三相 4 線可能)	三相 3 線式 (三相 4 線可能) 又は単相 2 線式 (単相 3 線可能)	三相 3 線式 又は単相 2 線式	三相 3 線式	単相 2 線式
	交 流 入 力	200V 三相 3 線式 (400V, 3kV, 6kV可能) 50Hz又は60Hz	200V 三相 3 線式 (400V 可能) 50Hz又は60Hz	200V 三相 3 線式 50Hz又は60Hz	200V 三相 3 線式 50Hz又は60Hz	100V 単相 2 線式 50Hz又は60Hz
	直 流 入 力 (V)	250 (230～290)	110(90～130) 又は 220(180～260)	110 (90～130)	——	100
	蓄電池直列数	鉛 136セル 焼結アルカリ 230セル	鉛 53／106セル アルカリ 90／180セル	鉛 53セル アルカリ 90セル	——	鉛 50セル
主 な 用 途	電 子 計 算 機 関 係	HITAC 8000シリーズ IBM-360, 370シリーズ FACOM-230, 270 NEAC-2200, 3200 TOSBAC-5100, 5600 UNIVAC-490, 418-III BURROUGHS-L4000 MELCOM-80, 7000他	電子計算機用電源は 「ハイパータ」1000F シリーズを使用	HIDIC 150, 350 HIDIC 500, 700 IBM-1080シリーズ FACOM-270シリーズ NEAC-3000シリーズ TOSBAC-7000シリーズ MELCOM-350シリーズ 他	IBM-370-168	電子計算機端末機
	通 信 ・ 計 装 ・ 照 明 関 係	空港管制機器 放送通信機器 各種プラント 計装電源システム	各種プラント 計装電源システム 水処理(上・下水道) 石油, 化学プラント 発電所 トンネル内照明 放送通信機器	「ハイパータ」1000F シリーズは主として上 記電子計算機用電源と して開発されたもので ある。	通信機器 航空機地上整備機器	各種プラント 計装電源システム

20kVA、10～120Hzのものがある。

以上はいずれも電圧形インバータであり、主として急加減速制御を必要としない用途に適する。急加減速を要する場合には、これに定電流加速装置や発電制動回路、又は電源への電力回生回路が付加される。

(4) SE-C形インバータ(サイリスタ式)

本質的に急加減速制御を必要とする用途に適する。電流形インバータであり加速時、定速時、減速時のいずれの運転モードにおいても共通の変換回路により電動機速度制御を行なうことができる。最大容量150kVAで5～120Hzのものがある。

(5) CIF-200形及び同400形インバータ(サイリスタ式)SE-C形と同様、急加減速制御の用途に適する。50～1,000kVA、5～120Hzのものがある。

5 結 言

以上、最近の大容量・高速度サイリスタとその応用例として逆導通形サイリスタと電気車チョップ制御、交流安定化電源としてのCVCF装置、交流電動機駆動用電源としてのAVAFインバータ技術について述べた。今後ともパワーエレクト

ロニクスの進展に伴いサイリスタ応用機器は多岐にわたり、サイリスタに求められる性能特性もますます多様なものとなる。半導体素子製造技術においても、インプロセス計測技術や不純物分析技術の進歩、新製造プロセスの開発などに支えられた一段の技術革新が進み、応用機器側との協調のとれた新機能素子の開発による新しいパワーエレクトロニクス時代の到来が待たれる。

参考文献

(1) 立花, 坪井ほか「直流電鉄のき電系統の計算」日立評論 50, 876 (昭43-10)

(2) 坪井, 油井ほか「チョップ制御車の粘着性能試験」昭和44年電気四学会連合大会No.852 (昭44-4)

(3) T.Tsuboi, S.Izawa, et al; Newly Developed Thyristor Chopper Equipment for Electric Railcar, IEEE Trans. on IGA, Vol. IA-9, No.3, May/June 1973

(4) 辻本, 鈴木ほか「全国新幹線網用961形試作電車の主回路方式と主要電気品」日立評論 55, 1221 (昭48-12)

(5) 樋口, 坪井ほか「高速回生ブレーキ方式(回生抵抗方式)の現車試験について」昭和49年電気学会関西支部大会G 3-57 (昭49-4)