

# GTOサイリスタ界磁チョッパ装置の開発

## Development of Field Chopper Equipment Provided with GTO Thyristor

日立製作所は、昭和45年に逆阻止形サイリスタを用いた界磁チョッパ制御装置を開発し、電車で用制御装置としての新しい分野を開いたが、回生ブレーキ付きで、省エネルギー効果が大きい特長により、現在もなお盛んに採用されている<sup>1)</sup>。

一方、半導体技術の急速な進展により、自己消弧可能な大容量GTOサイリスタ<sup>2)</sup>が開発されるに至り、これを電車線電圧DC1,500V回路の界磁チョッパ制御装置に適用し開発・製品化した。GTOサイリスタ直列接続技術の確立と、フィルタ装置の小形化を主眼として開発した結果、界磁チョッパ装置の体積と重量を従来車に比べ75%とすることができた。新しい界磁チョッパ制御装置は、既に各所で営業運転に供されている。

山崎 総一郎\* Sôichirô Yamasaki

松本 邦夫\* Kunio Matsumoto

板鼻 博\* Hiroshi Itahana

成田 博\*\* Hiroshi Narita

### 1 緒言

省エネルギーを目的とした回生ブレーキが可能な直流電車で用制御装置のひとつに、界磁チョッパ制御装置がある。

界磁チョッパ制御装置は、複巻電動機他励界磁電流をサイリスタチョッパで制御するもので、コストパフォーマンスが優れていることから、民間鉄道各社で多数使用されている。

従来、界磁チョッパには、逆阻止サイリスタを用いていたが、今回、GTO(ゲートターンオフ)サイリスタを用いることにより、チョッパ装置の小形・軽量化を図った。

GTOサイリスタは従来のサイリスタと異なり、自己消弧機能をもっているため、GTOサイリスタを用いることにより、ターンオフ用補助サイリスタ、転流リアクトル、転流コンデンサなどの部品が省略できる。また、GTOサイリスタは高速スイッチング特性をもっているため、チョッパ周波数を高くすることができる。その結果、フィルタリアクトル、フィルタコンデンサ容量の低減及び制御応答性の改善ができる。

以下、DC1,500V電車で用として開発した新形GTOサイリスタ界磁チョッパ装置について紹介する。

### 2 GTOサイリスタ界磁チョッパ制御装置の主回路

図1に界磁チョッパ車の主回路図を示す。

制御する主電動機は、130~160kW級複巻電動機4台又は8台で、それぞれを直並列切換えしている。

電機子電流は、電機子回路に接続された起動抵抗をカム軸制御器により順次短絡することにより制御され、他励界磁電流はチョッパで制御される。

ここで回生ブレーキ時は、他励界磁電流をチョッパで強め、主電動機の発生電圧を電車線よりも高くして電力を回生する。

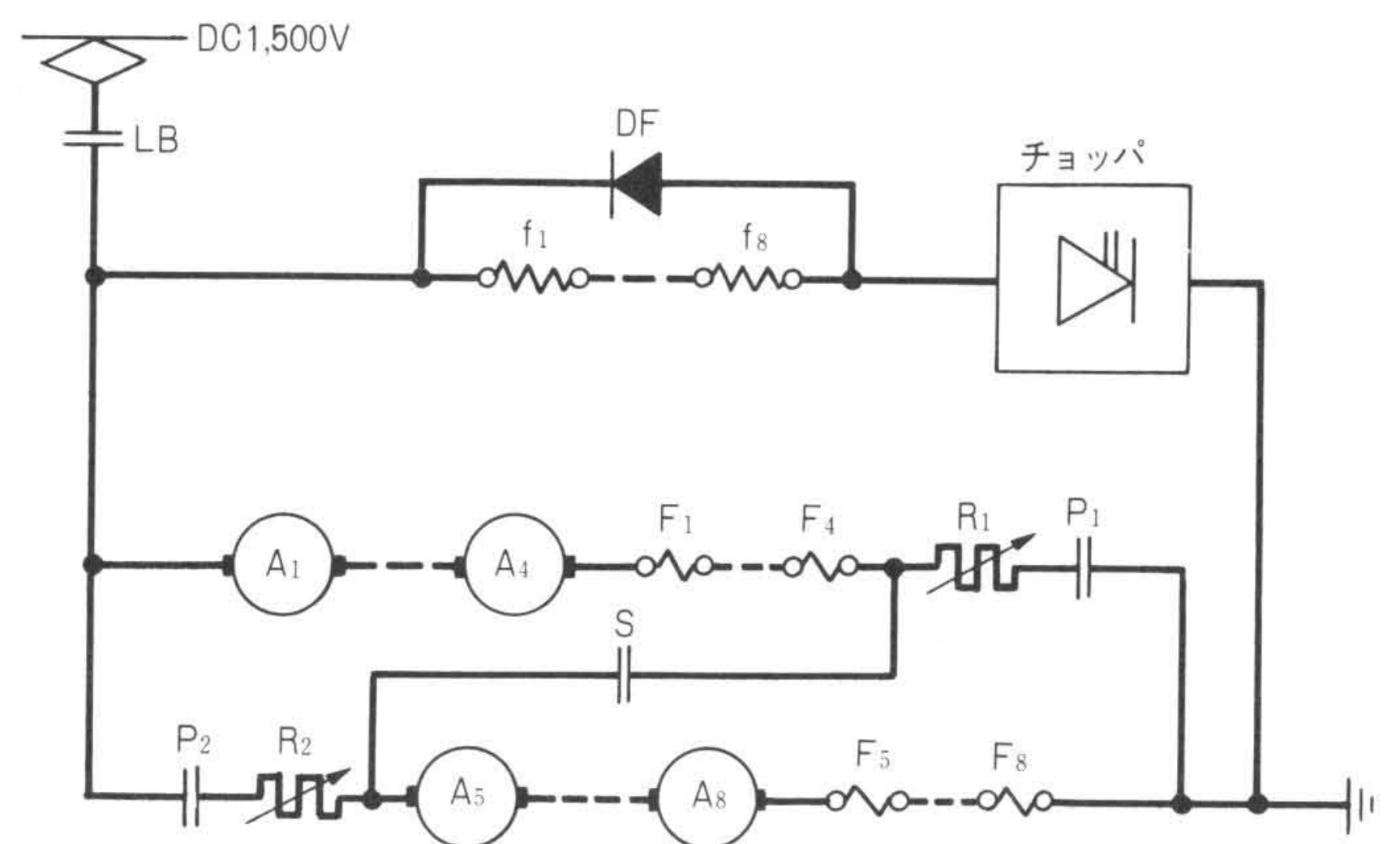
電車線電圧DC1,500V回路へGTOサイリスタを適用するには、現時点で最も耐圧の高いGTOサイリスタ<sup>2),3)</sup>を用いても2個直列接続とする必要がある。ここで直列接続の方法として、

#### (1) コンデンサ分圧方式

電車線電圧を2直列接続したフィルタコンデンサで分圧し、GTOサイリスタにかかる電圧を電車線電圧の $\frac{1}{2}$ とする方式

#### (2) GTOサイリスタ直接接続方式

GTOサイリスタを直接2個直列接続し、電圧を分担させる方式が挙げられる。



注：略語説明  
 LB(断流器) R1, R2(起動抵抗器)  
 A1~A8(電動機電機子) S(直列接続用切換器)  
 F1~F8(電動機直巻界磁) P1, P2(並列接続用切換器)  
 f1~f8(電動機他励界磁) DF(フリーホイールダイオード)

図1 界磁チョッパ制御装置の主回路簡略図 速度に応じ、電機子回路を直並列切換え接続する。他励界磁電流は、チョッパの通流率により制御される。

図2に両者の回路構成を示す。両者を比較すると、コンデンサ分圧方式は、フィルタコンデンサ及びこの分圧抵抗が大きくなるため、小形化に有利なGTOサイリスタ直接接続方式を採用することとした。

### 3 GTOサイリスタチョッパ回路の構成

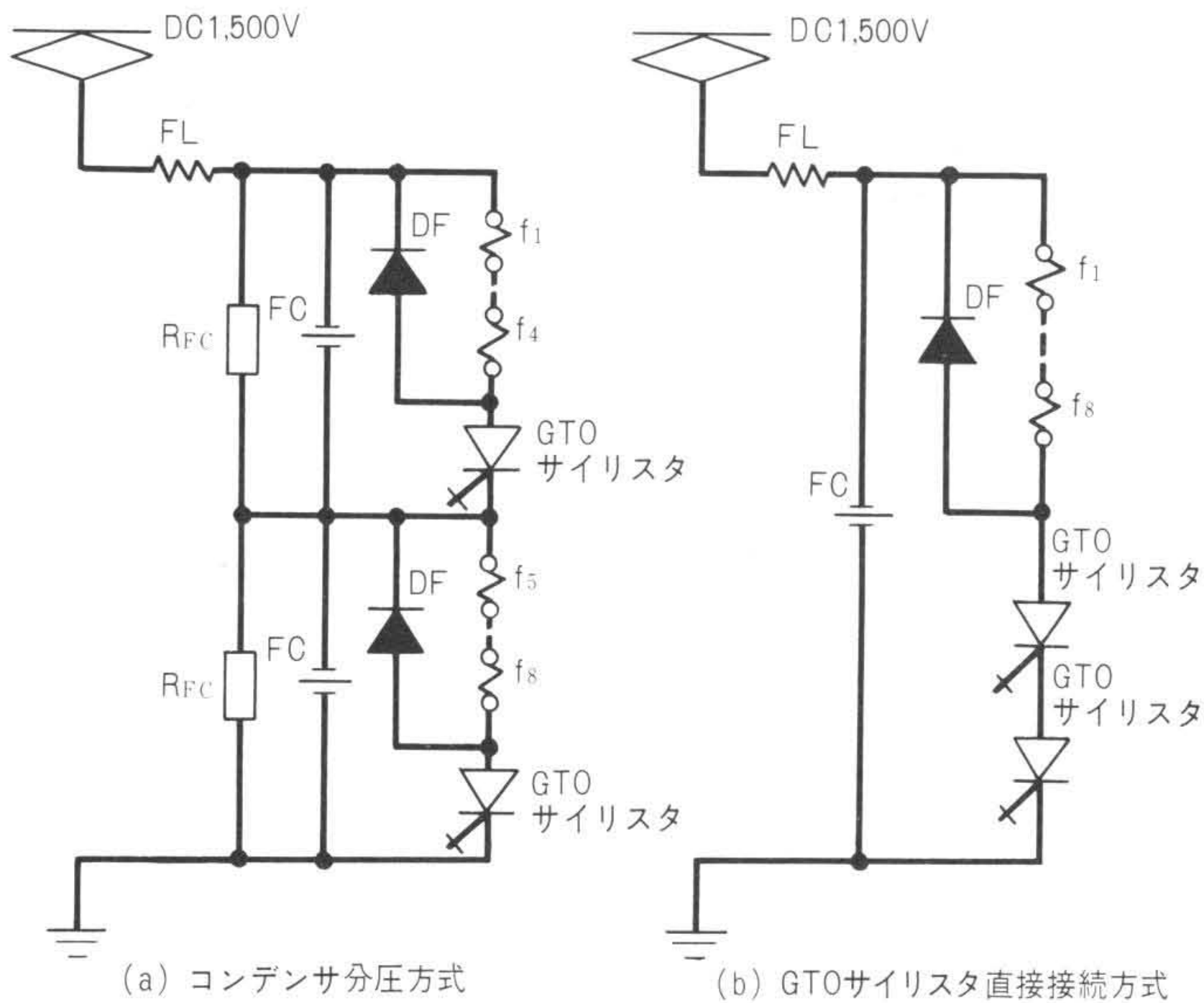
GTOサイリスタを界磁チョッパに用いる場合の問題点と対策を図3に示す。大きく分けて3種の問題点があり、これらの解決策を次に述べる。

#### 3.1 ターンオン時のスイッチングパワーの抑制

図4に、GTOサイリスタチョッパ回路のブロック図を示す。2個直列接続されたGTOサイリスタのゲートに、ゲート制御装置、ゲートドライブ回路で作られたゲートパルスと同時に与え、GTOサイリスタをターンオン、ターンオフさせる。こ

\* 日立製作所水戸工場 \*\* 日立製作所日立研究所





注：略語説明  
FL(フィルタリアクトル), DF(フリーホイールダイオード), R<sub>FC</sub>(分圧抵抗)

図2 直列接続方法の比較 GTOサイリスタ直接接続方式の回路構成が簡単である。

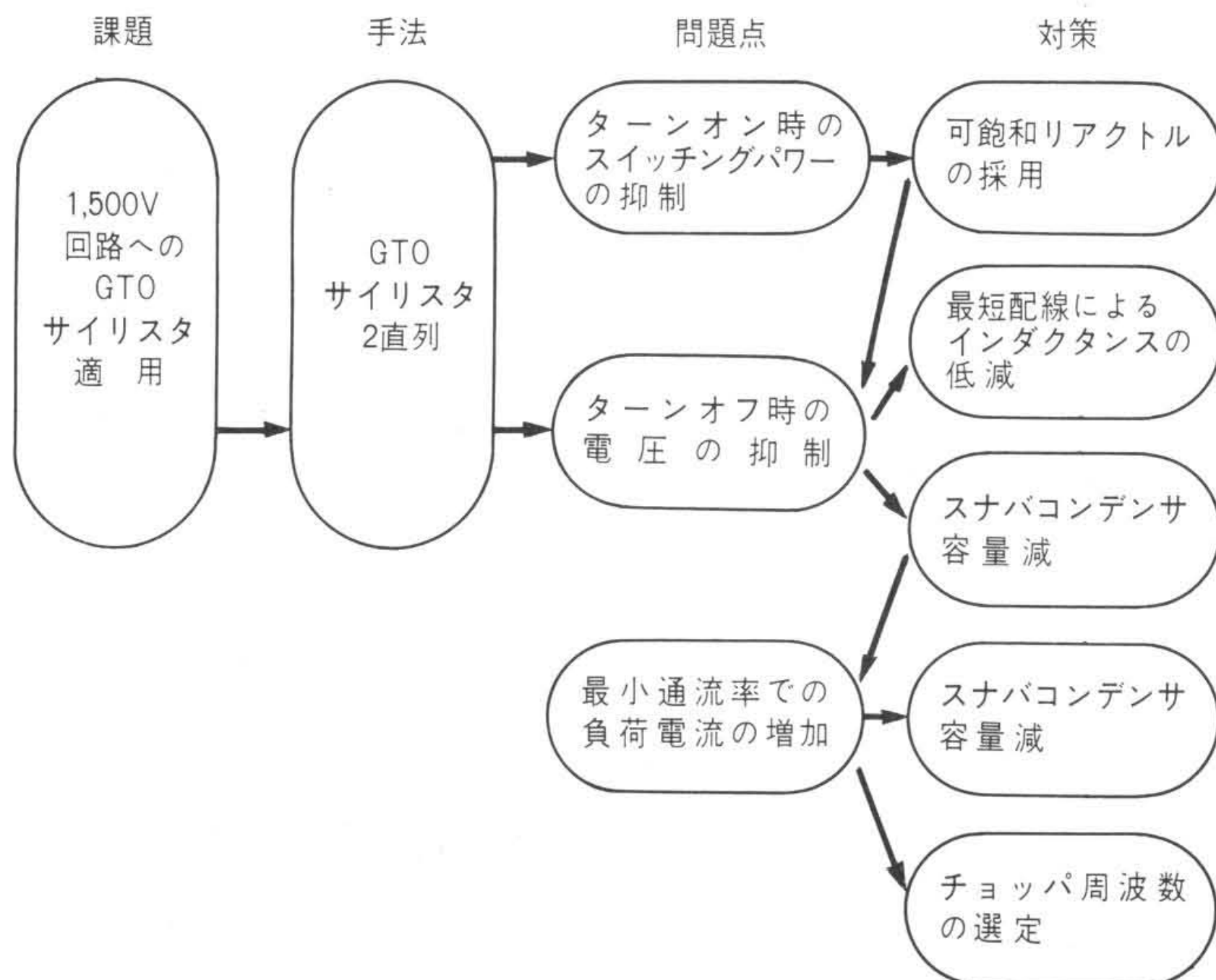


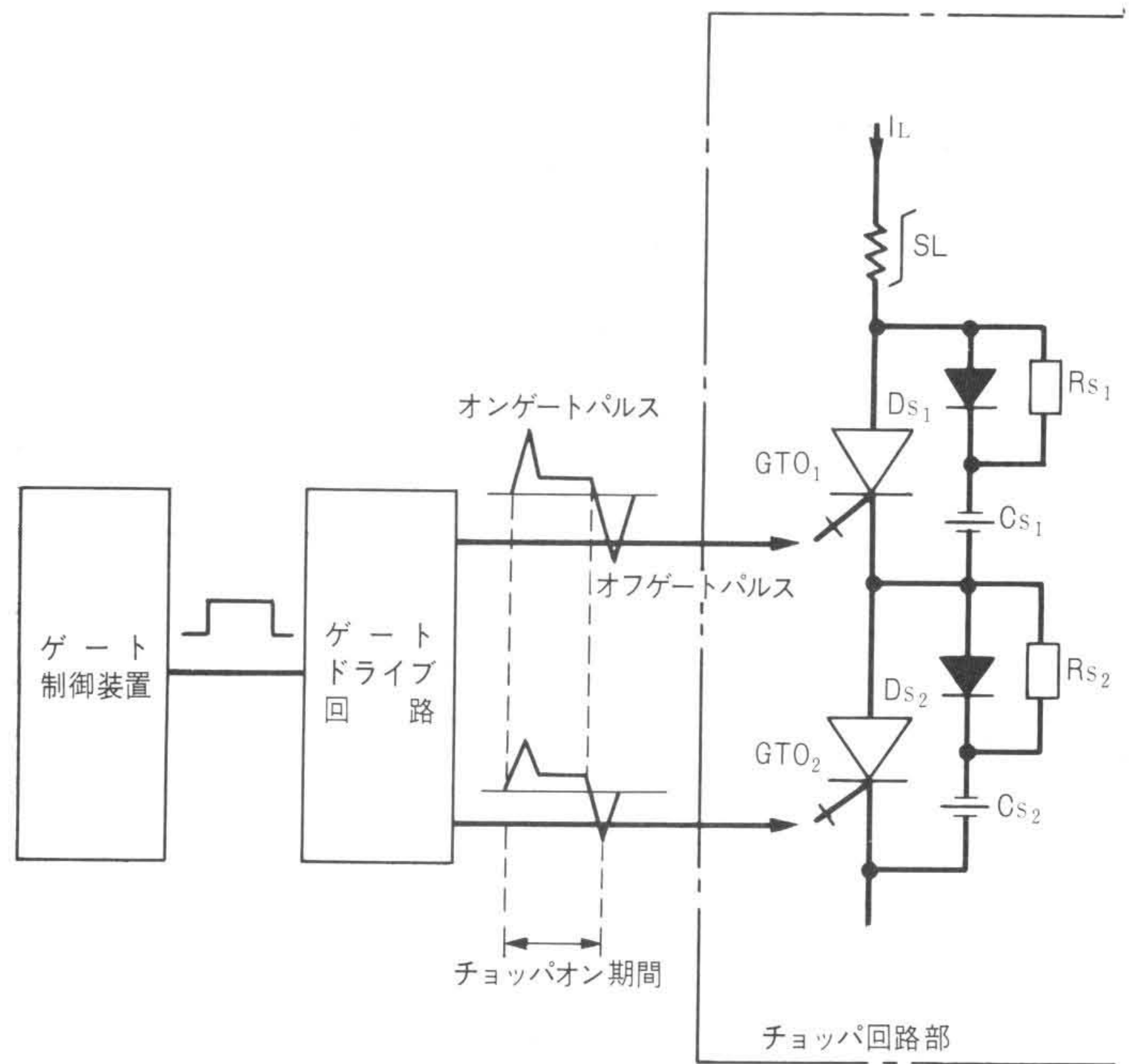
図3 GTOサイリスタの適用に当たっての問題点と対策 スナバコンデンサの容量は、最小通流率での負荷電流の値も考慮する必要がある。

ここで2個のGTOサイリスタのゲートに与えられるパルスの立上り時間差、あるいはGTOサイリスタ素子自身のターンオン遅れ時間差があると、遅れてターンオンするGTOサイリスタのスイッチングパワーが過大となり、GTOサイリスタ素子を破壊する虞がある。

図5に、GTO<sub>2</sub>のゲートパルスをGTO<sub>1</sub>のゲートパルスより約1μs時間遅れをもたせ、ターンオンさせた場合の実測波形を示す。

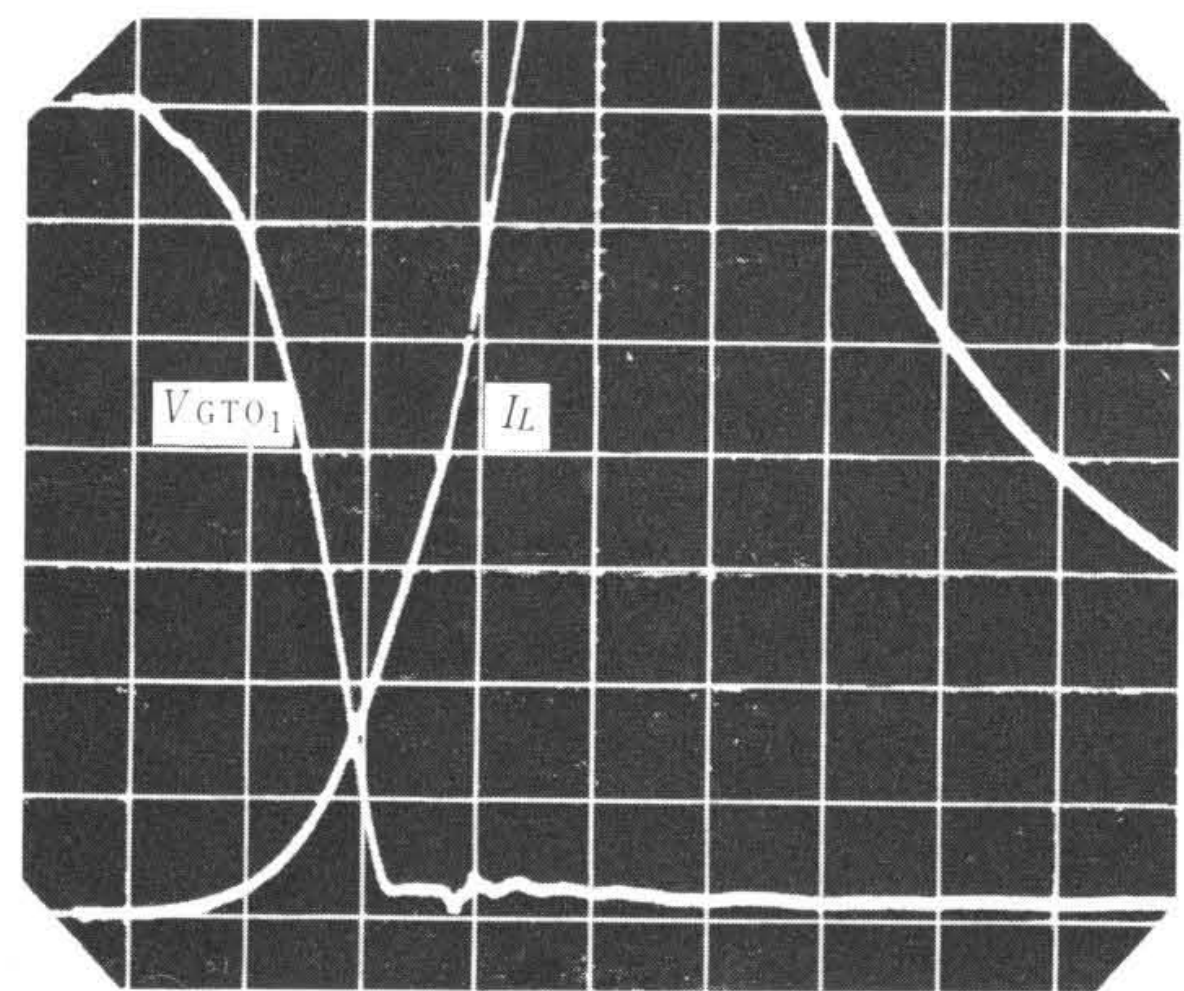
遅れてターンオンするGTO<sub>2</sub>は、電圧と電流の積であるスイッチングパワーが増大する。スイッチングパワーを抑制するため図4のブロック図に示すようにGTOサイリスタに直列に可飽和リアクトルSLを接続し、GTOサイリスタに流れる電流を抑制した。

図6は、GTOサイリスタに直列に可飽和リアクトルSLを接続した場合のGTO<sub>1</sub>、GTO<sub>2</sub>の電圧、電流波形及び可飽和リ

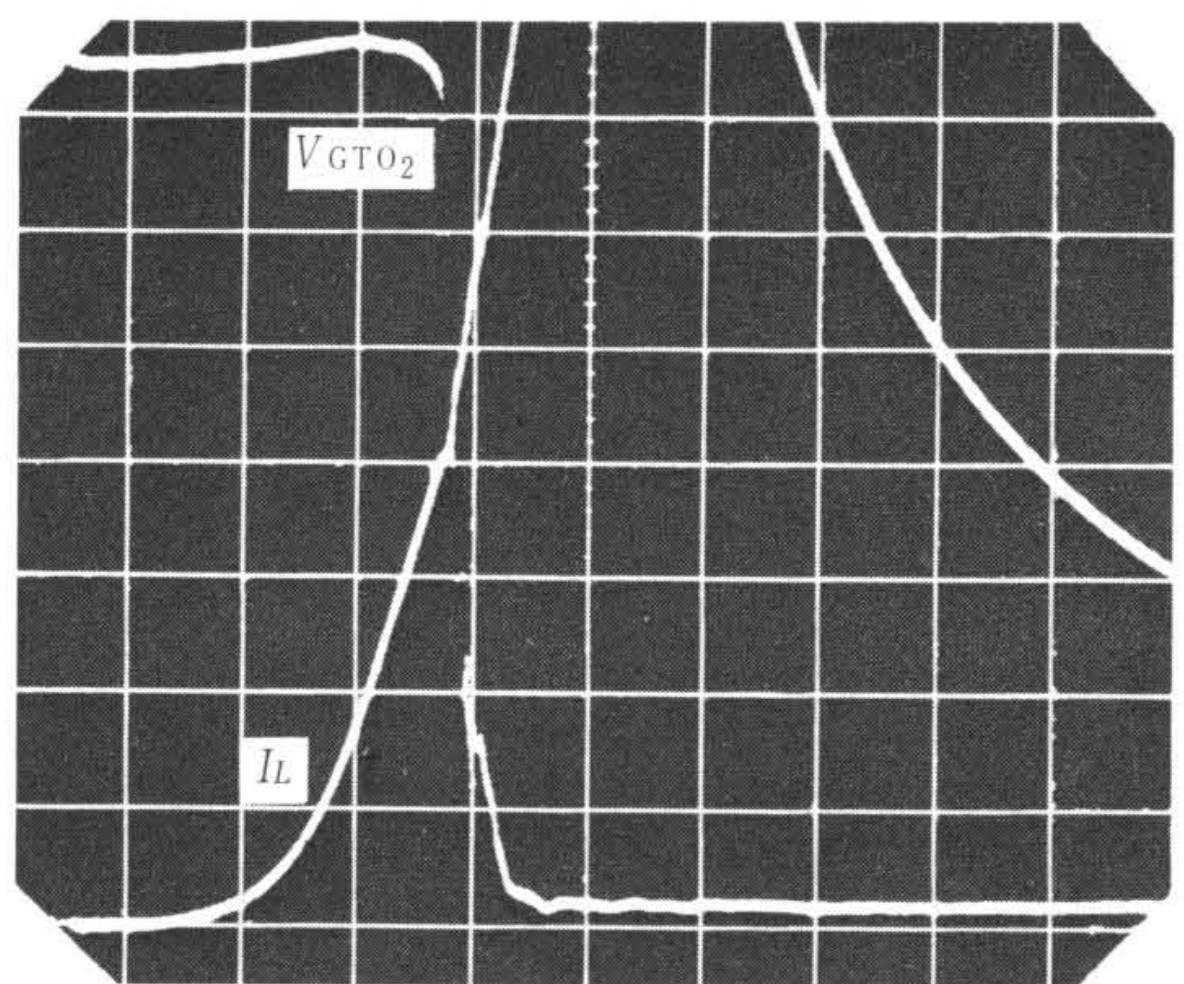


注：略語説明  
GTO<sub>1</sub>, GTO<sub>2</sub> (GTOサイリスタ) D<sub>S1</sub>, D<sub>S2</sub> (スナバダイオード) I<sub>L</sub> (負荷電流)  
SL (可飽和リアクトル) C<sub>S1</sub>, C<sub>S2</sub> (スナバコンデンサ)  
R<sub>S1</sub>, R<sub>S2</sub> (スナバ抵抗)

図4 GTOサイリスタチョッパ回路ブロック図 与えられるゲートパルス及びGTOサイリスタ自身の特性の差により、GTO<sub>1</sub>及びGTO<sub>2</sub>のターンオン、ターンオフ特性に違いが生じる。



(a) GTO<sub>1</sub>波形



(b) GTO<sub>2</sub>波形(遅れあり)

電源電圧：700V 電流：10A/div  
電圧：50V/div 時間：1μs/div

図5 実測波形(可飽和リアクトルなし) 遅れてターンオンしたGTO<sub>2</sub>は、ターンオンするときの負荷電流I<sub>L</sub>が大きい。



アクトルが分担する電圧波形を示す。この結果から、電流の立上りが遅れてスイッチングパワーのピーク値及び損失が低減されることが分かる。

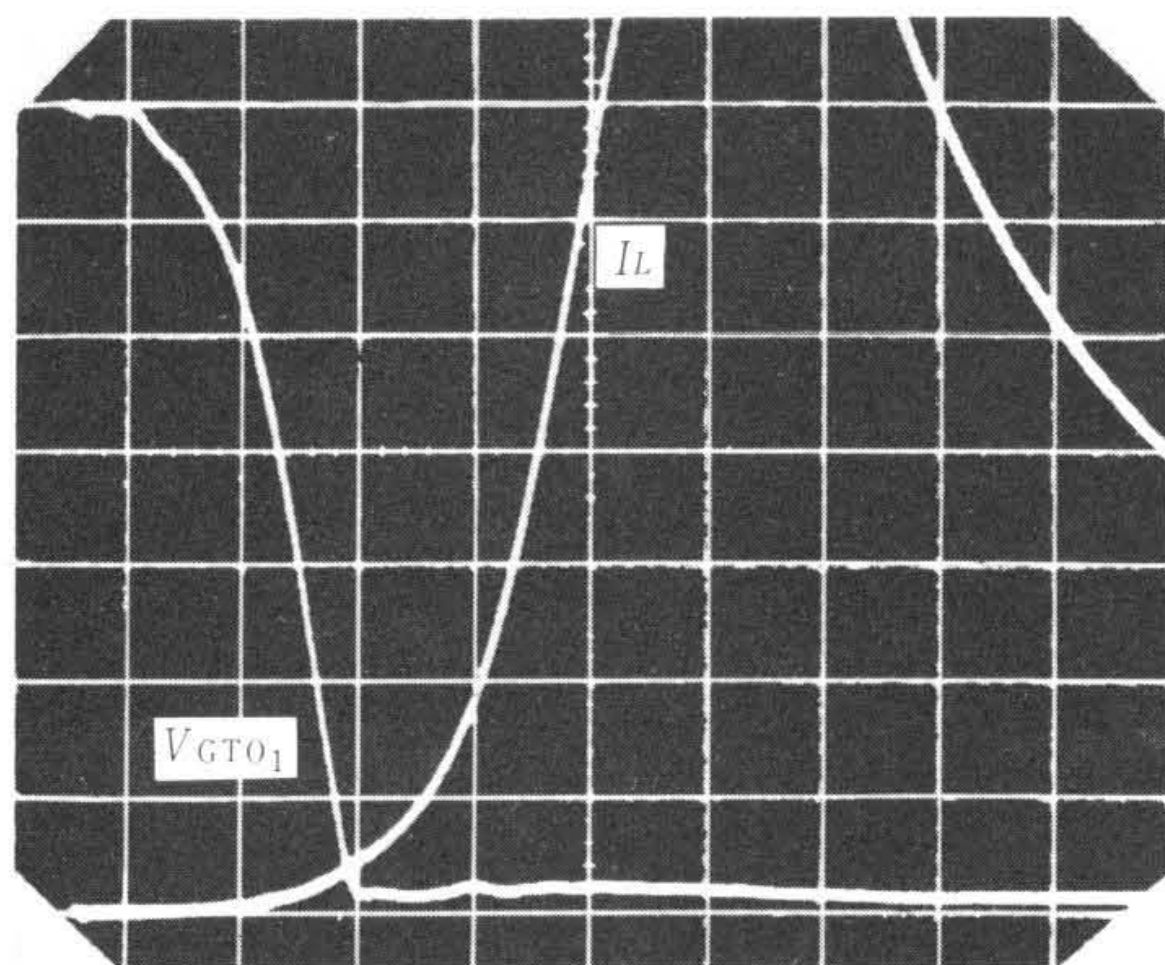
### 3.2 GTOサイリスタターンオフ時の過大電圧の抑制

GTOサイリスタがターンオフするとき、GTOサイリスタのA-K(アノード~カソード)間に印加される電圧は、GTOサイリスタの許容過電圧耐量以下に抑えることが必要である。

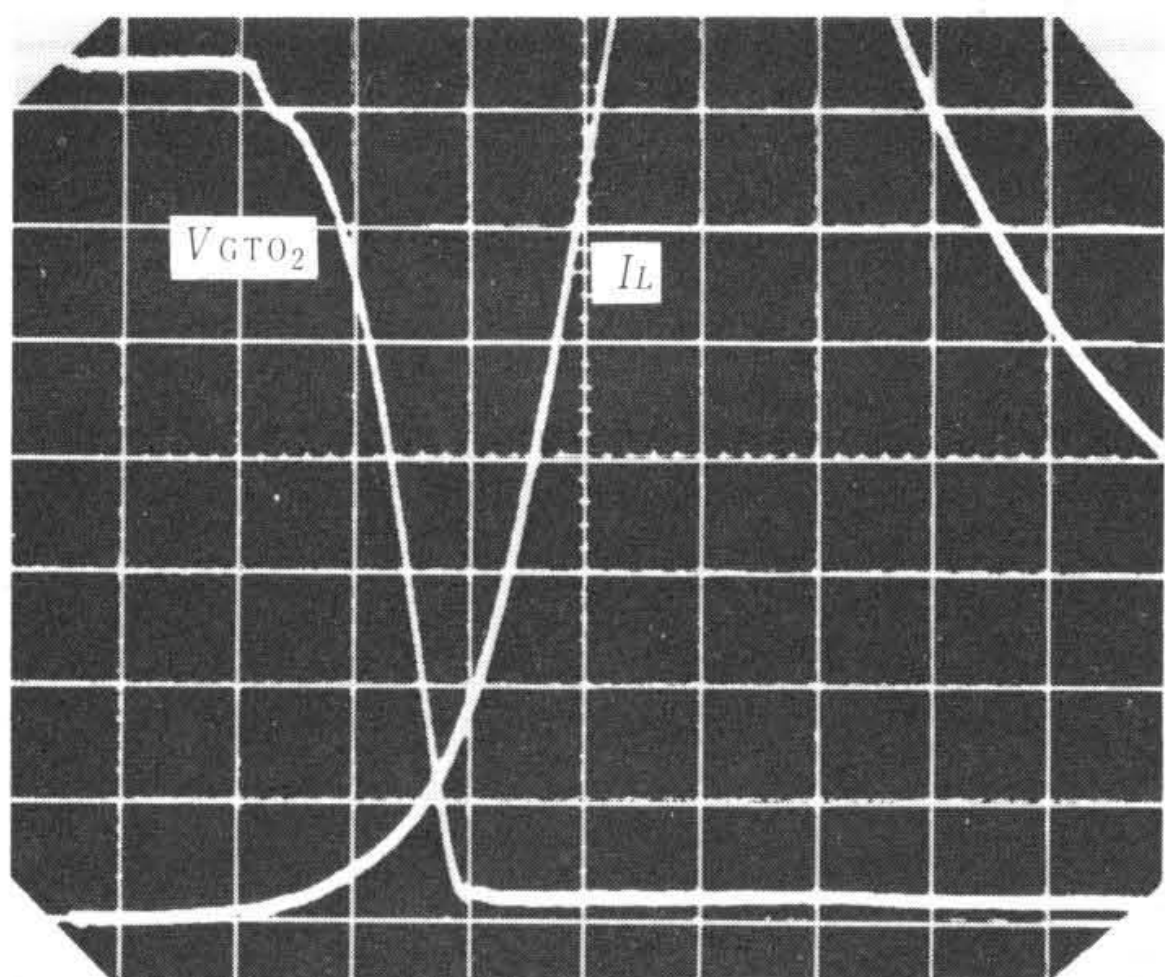
ターンオフ時と同様ゲートパルスの時間差、GTOサイリスタ素子自身のターンオフ時間差による電圧分担の不均衡のほか、図7に示すように、電車線電圧以上にGTOサイリスタの電圧が上昇する現象がみられる。これは主回路の配線のインダクタンスと、可飽和リアクトルSLのインダクタンスによって、スナバコンデンサが過充電される現象である。

ここで不平衡電圧 $\Delta V_t$ は、

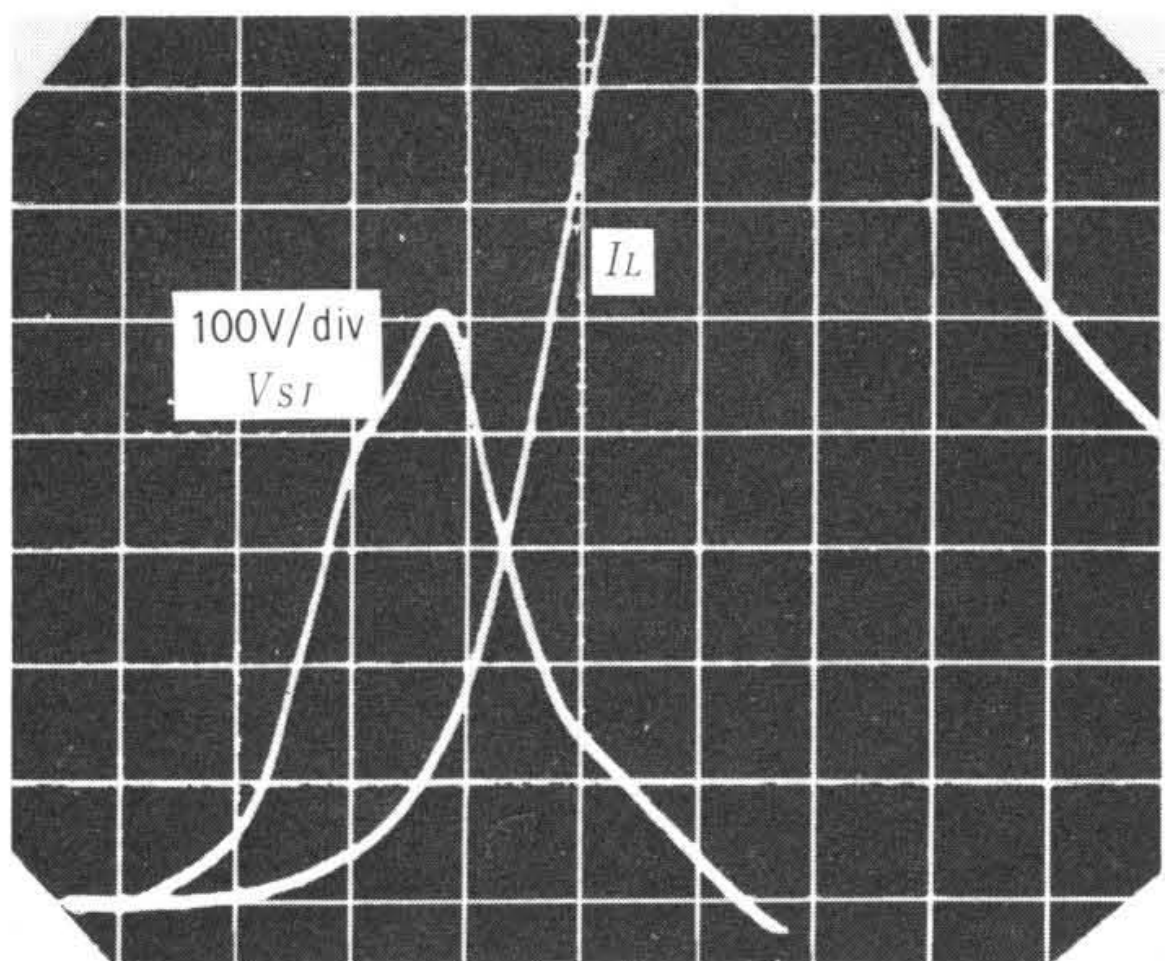
$$\Delta V_t \propto \frac{\Delta t_{off}}{C_s} \dots\dots\dots(1)$$



(a) GTO<sub>1</sub>波形



(b) GTO<sub>2</sub>波形(遅れあり)



(c) 可飽和リアクトル波形

図6 実測波形(可飽和リアクトル挿入) GTO<sub>1</sub>の電圧を可飽和リアクトルが分担する。また、可飽和リアクトルの飽和まで、 $I_L$ が抑制されている。

過充電電圧 $\Delta V_p$ は、

$$\Delta V_t \propto \sqrt{\frac{l}{C_s}} \dots\dots\dots(2)$$

ここに  $\Delta t_{off}$ : ターンオフ時間の差  
 $C_s$ : スナバコンデンサ容量

$l$ : GTOサイリスタからフィルタコンデンサ両端を見たインダクタンス

という関係がある。したがって、ターンオフ時の過電圧を小さくするには、インダクタンス $l$ を小さく、ターンオフの時間差 $\Delta t_{off}$ を小さく、スナバコンデンサ容量 $C_s$ を大きくすることにより解決できる。

### 3.3 小電流制御の条件

電車的高速特性を確保するため、界磁チョップ装置は、最大電流の1%程度まで界磁電流を絞り込む必要がある。このような小電流領域では、GTOサイリスタがターンオフしたあと、負荷を介してスナバコンデンサに流れる電流が無視できなくなる。そこでスナバコンデンサの容量は、この最小制御電流も合わせて検討する必要がある。

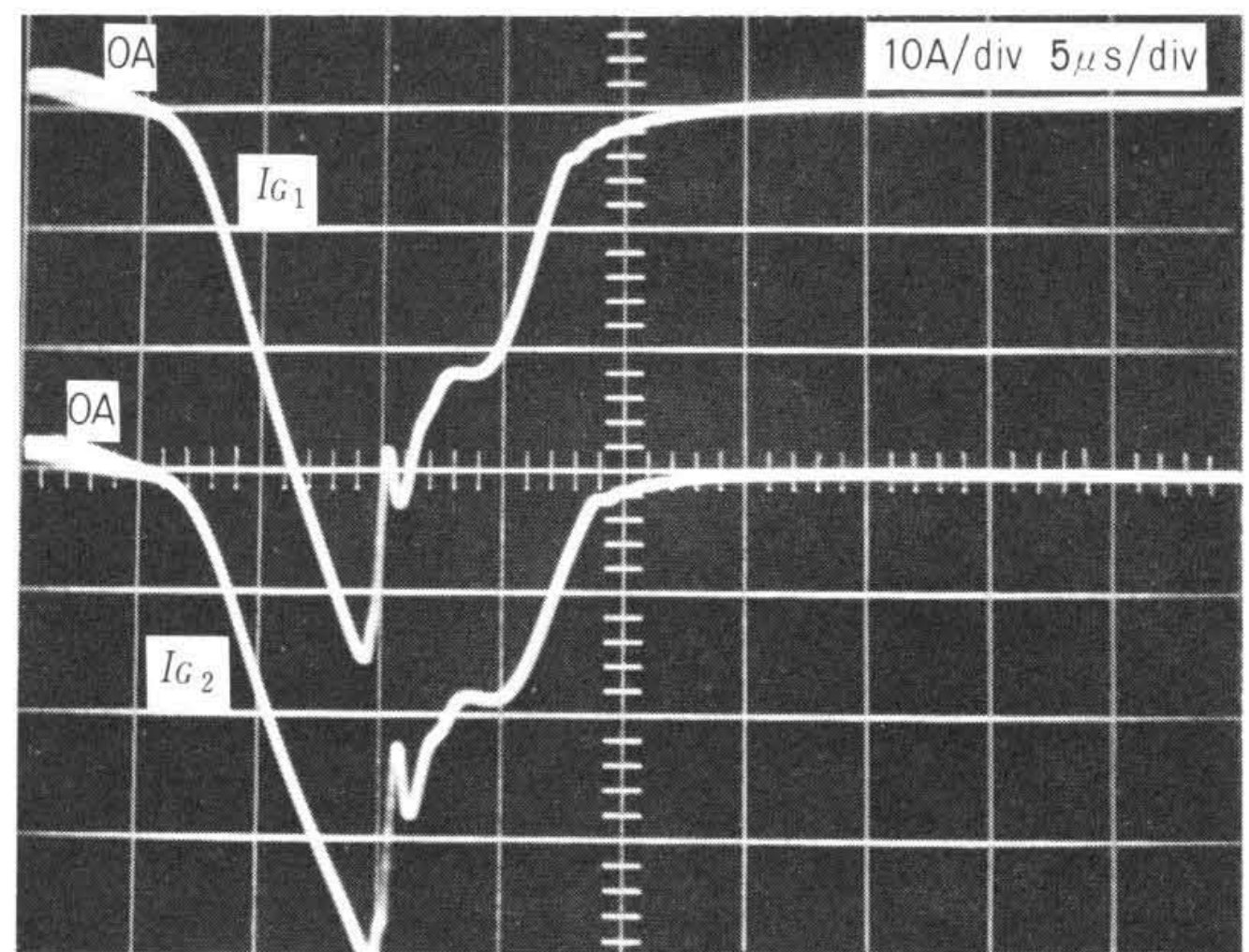
最小制御電流 $I_{Fmin}$ は、

$$I_{Fmin} \propto \sqrt{f_{CH} \cdot C_s} \dots\dots\dots(3)$$

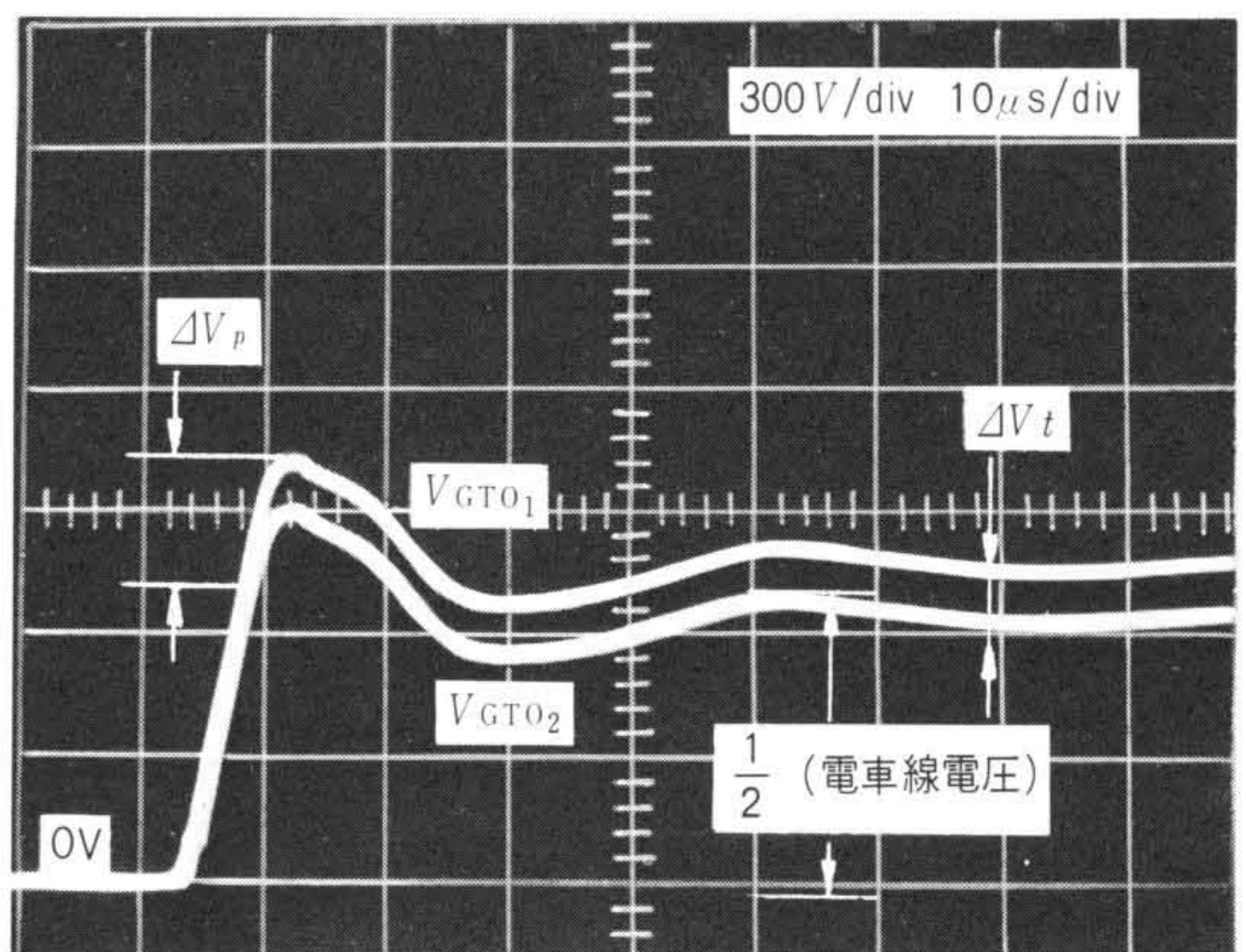
ここに  $f_{CH}$ : チョップ周波数

という関係がある。

したがって、ターンオフ時の過電圧を抑制する条件でスナバコンデンサを選び、更に最小制御電流 $I_{Fmin}$ の条件を満足する範囲で、できるだけ高いチョップ周波数 $f_{CH}$ を選定すればよい。



(a) ターンオフ時ゲート電流( $I_{G1}, I_{G2}$ )

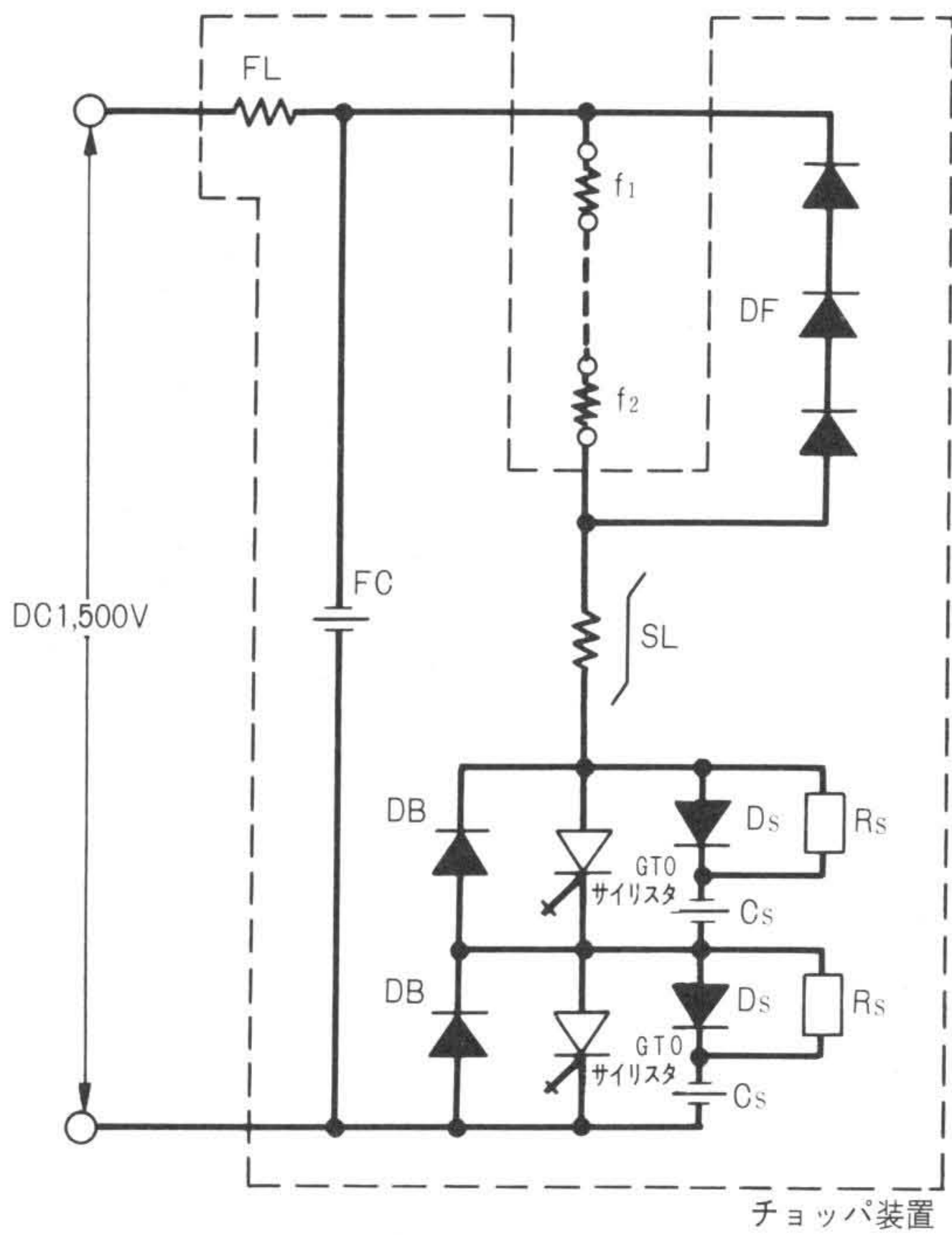


(b) GTOサイリスタA~K(アノード~カソード)間電圧( $V_{GTO1}, V_{GTO2}$ )

注: 略語説明  $\Delta V_p$ (過充電電圧)  $\Delta V_t$ (不平衡電圧)

図7 GTOサイリスタターンオフ時のゲートパルスとA~K間電圧波形 過充電電圧及び電圧不平衡を小さくするため、配線及び可飽和リアクトルのインダクタンス、スナバコンデンサ容量を最適なものとする。





注：略語説明  
 FL(フィルタリアクトル) DB(バイパスダイオード)  
 FC(フィルタコンデンサ) 他は図1, 図4に同じ

図8 チョップ装置回路図 GTOサイリスタの適用により、チョップ回路が簡略化された。

今回開発したチョップでは、チョップ周波数を従来の80~90Hzから160~180Hzとしている。

以上の検討結果をもとに構成されたチョップ回路を、図8に示す。

#### 4 フィルタ部の小形化

チョップ周波数を従来車の2倍としたことから、フィルタ回路の定数を適切に選定し、フィルタ部の小形化を実現した。

以下、主に考慮した条件について説明する。

##### (1) フィルタコンデンサリップル電圧

フィルタコンデンサのリップル電圧は、従来車と同等とし、チョップ周波数を2倍としたので、フィルタコンデンサ容量は、従来車の1/2とした。

##### (2) フィルタ共振周波数及びフィルタリアクトル定数

フィルタ共振周波数は、商用周波軌道継電器などへの影響を避けるため、図9に示すように、 $n \times [\text{商用周波数}] \pm 10\text{Hz}$ を避けて選定することとし、電車線のインダクタンスの変動、フィルタリアクトルのインダクタンス及びフィルタコンデンサ容量の変化も考慮した。その結果、共振周波数は、従来車のほぼ2倍とすることができた。

フィルタコンデンサ容量及びフィルタリアクトルのインダ



図9 フィルタ共振周波数設定領域 商用周波数よりも高い領域に、共振周波数を設定した。

クタンスは、共に従来の1/2とし、それぞれ30%、55%の重量低減が可能となった。

#### 5 新形GTOサイリスタ界磁チョップ装置

今回試作開発した新形界磁チョップ装置は、GTOサイリスタの採用により、体積及び重量を25%低減することができた。

GTOサイリスタは、2,500V、1,000Aであり、2個直列接続とした。この素子の主な電気的特性を表1に、外観を図10に示す。

図11にGTOサイリスタを採用した界磁チョップ装置の車側及び車体中央側からの外観を示す。

2個直列のGTOサイリスタ素子は、それぞれを片面冷却として、これらを1スタックにまとめ、他のダイオードなどとともに一つのユニット構成とした。これらの冷却片及びスナバ抵抗器は、ユニットの裏面に集約し、自然対流により冷却する構造とした。

また、この装置では、保守面でも次の改善を行なっている。

##### (1) チョップ部

通気冷却部を1箇所を集約し、塵埃による汚損箇所を限定、縮小(従来装置に比べ30%)して、清掃作業時間の短縮を図った。

なお、積雪の多い地域で使われる場合は、密閉構造とし、箱上面の放熱面積を拡大して冷却できる構造としている。

##### (2) DCPT(Direct Current Potential Transformer)用直列抵抗器

アルミニウム冷却片の中に、抵抗体を絶縁して収納したメ

表1 GTOサイリスタ(GFPI000B25)の電気的特性 種々の運転条件で印加される電圧を想定し、ピーク繰返しオフ電圧が2,500VのGTOサイリスタとした。

項目	記号	性能
ピーク繰返しオフ電圧	$V_{DRXM}$	2,500V
繰返し可制御電流	$I_{TCM}$	1,000A
非繰返しサージ電流	$I_{TSM}$	7,000A
ピークオン電圧	$V_{TM}$	Max.2.0V
ゲートトリガ電流	$I_{GT}$	TYP600mA
ターンオン時間	$t_{gt}$	10 $\mu$ s
ターンオフ時間	$t_{gq}$	25 $\mu$ s
最大動作接合温度	$T_j$	125 $^{\circ}$ C

注：略語説明 TYP(Typical Value)

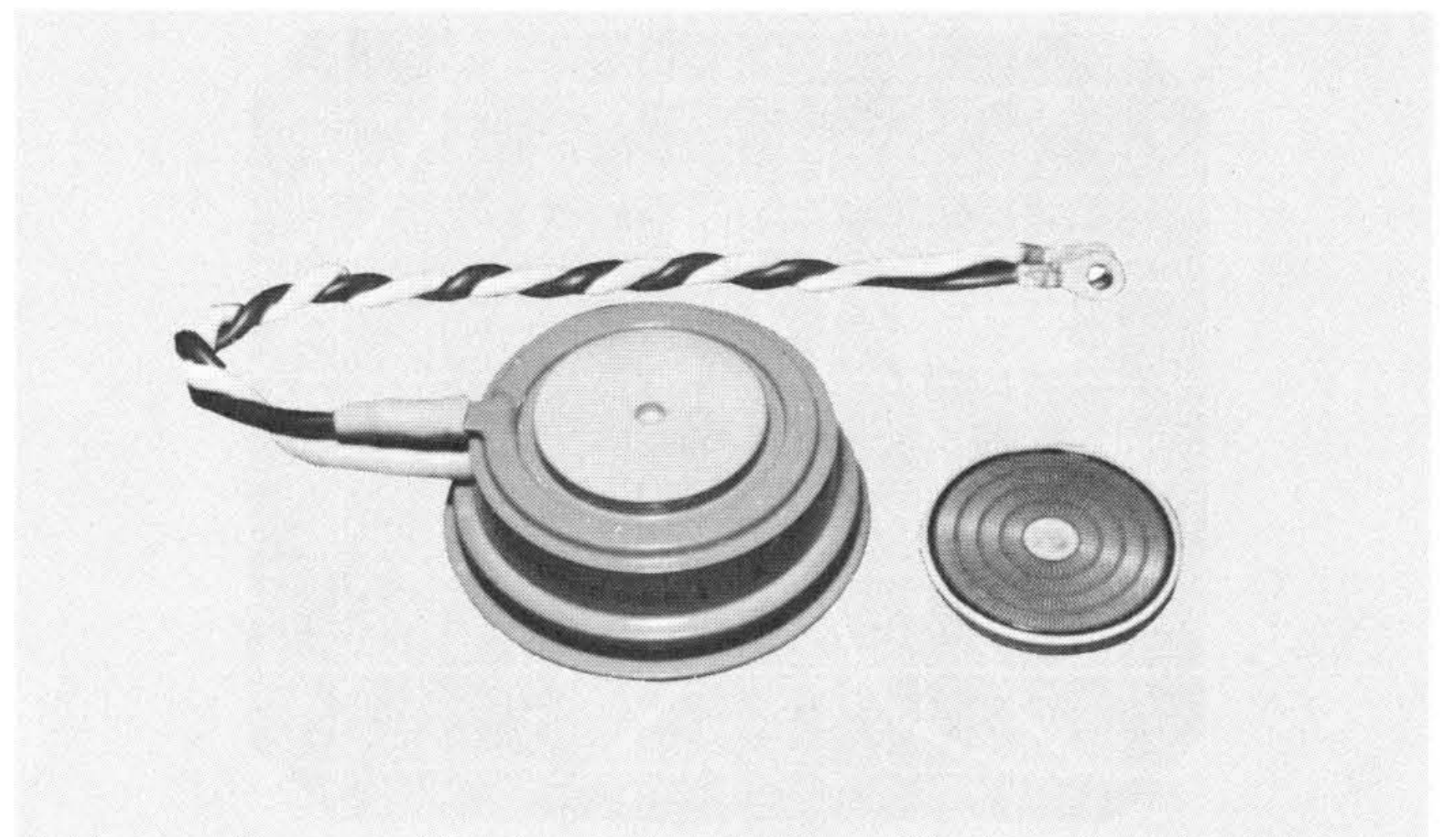
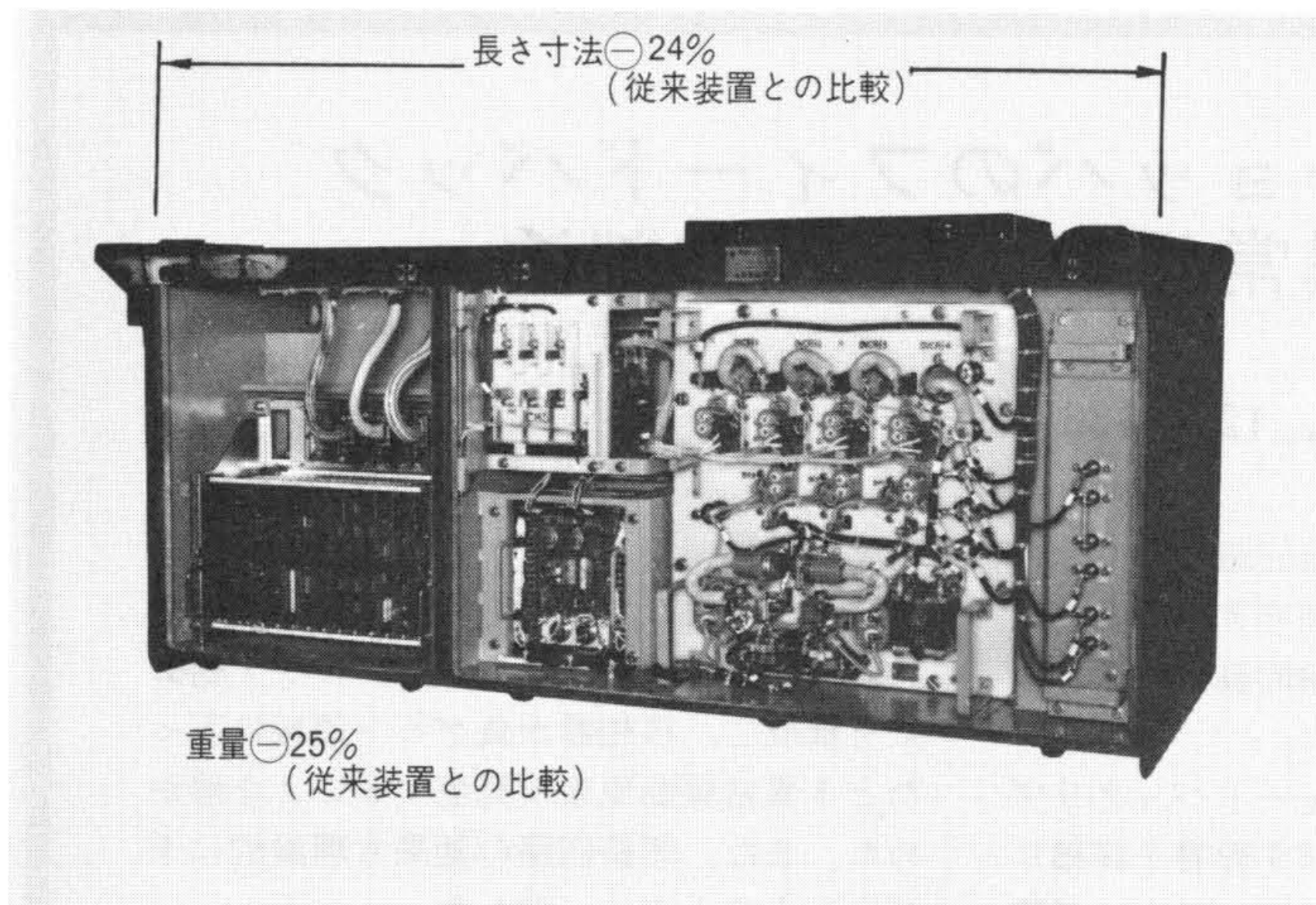
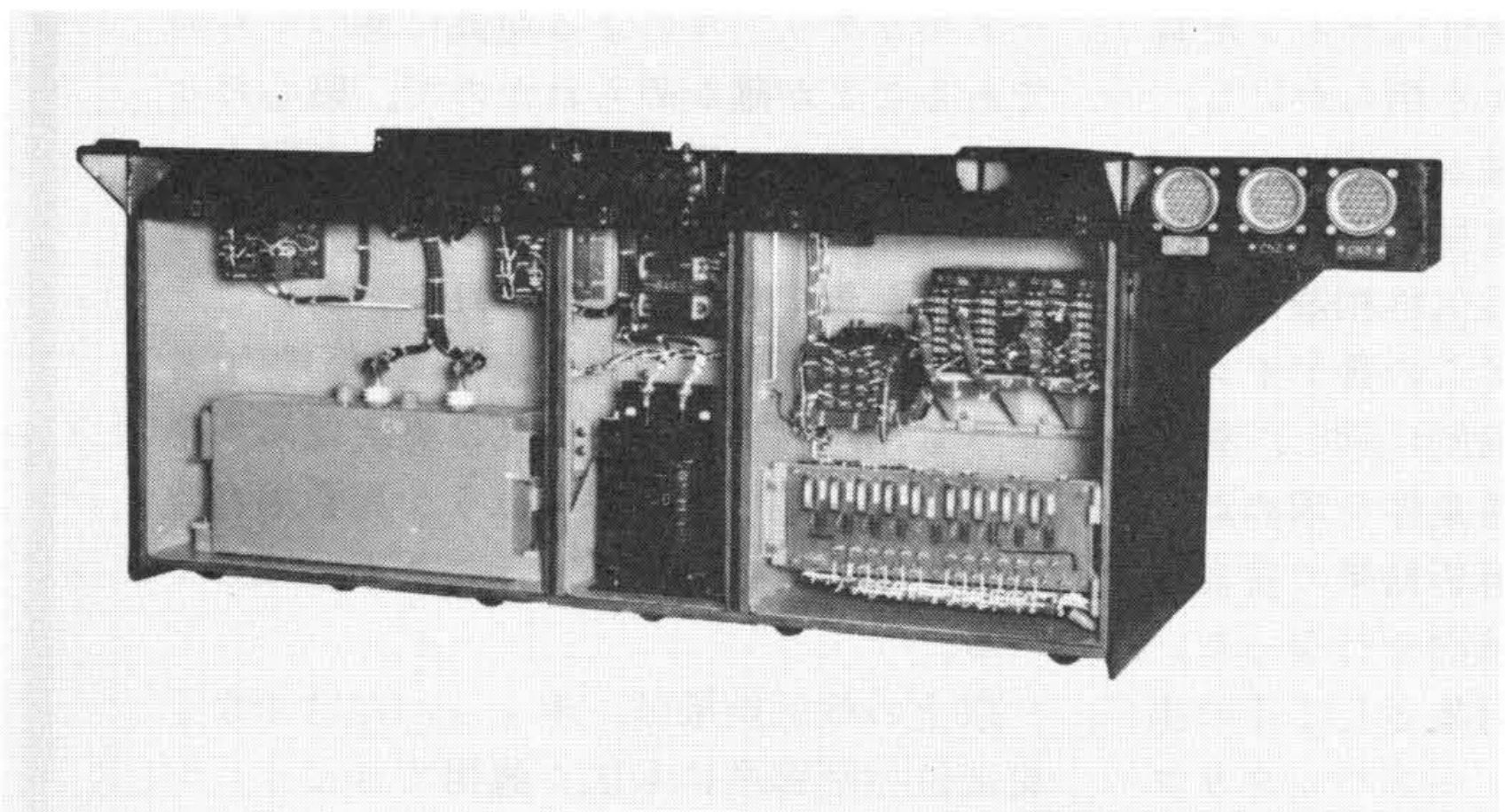


図10 GTOサイリスタ(GFPI000B25)の外観 GTOサイリスタのパッケージ(左)とその中に封じ込められるGTOサイリスタペレット(右)の外観である。





(a) 車側



(b) 車体中央側

図11 GTOサイリスタ界磁チョップ装置(試作装置)外観 制御回路用コネクタ部の突起は、従来形と接続位置を合わせるためのもので、この寸法だけ従来形よりも小さくなった。

タルクラッド形の抵抗器を採用した。この抵抗器の表面は接地電位で使用できるため、汚損に強く、保守周期の大幅な延長が可能である。

(3) フィルタ部

フィルタ部は発熱量の低減により、他機器とともに密閉室内に収納し、汚損防止を図っている。

6 試験結果

開発したGTOサイリスタ界磁チョップ装置は、工場内及び現車で各種の試験を行ない、その性能を確認した。

6.1 走行試験

図12に現車で測定したオシログラムの一例を示す。このほか、惰行・回生試験でも良好な制御性能が得られた。

6.2 特殊試験

下記のような特殊試験を行ない、問題のないことを確認した。

- (1) ノイズ試験, (2) 温度環境試験, (3) ヒートラン試験, (4) 振動試験, (5) 電源電圧急変・中断試験, (6) 交流電源中断試験

6.3 誘導障害試験

下記2項目について、従来車とGTOサイリスタ界磁チョップ搭載車の比較試験を実施した。

(1) AFO (Audio-Frequency Over-lay) 軌道回路に対する誘導障害

従来形界磁チョップ装置から、AFO軌道回路へ誘導される雑音は、主として主サイリスタを消弧するための転流電流によるものであった。転流回路の省略によって、雑音の低減が図られる。

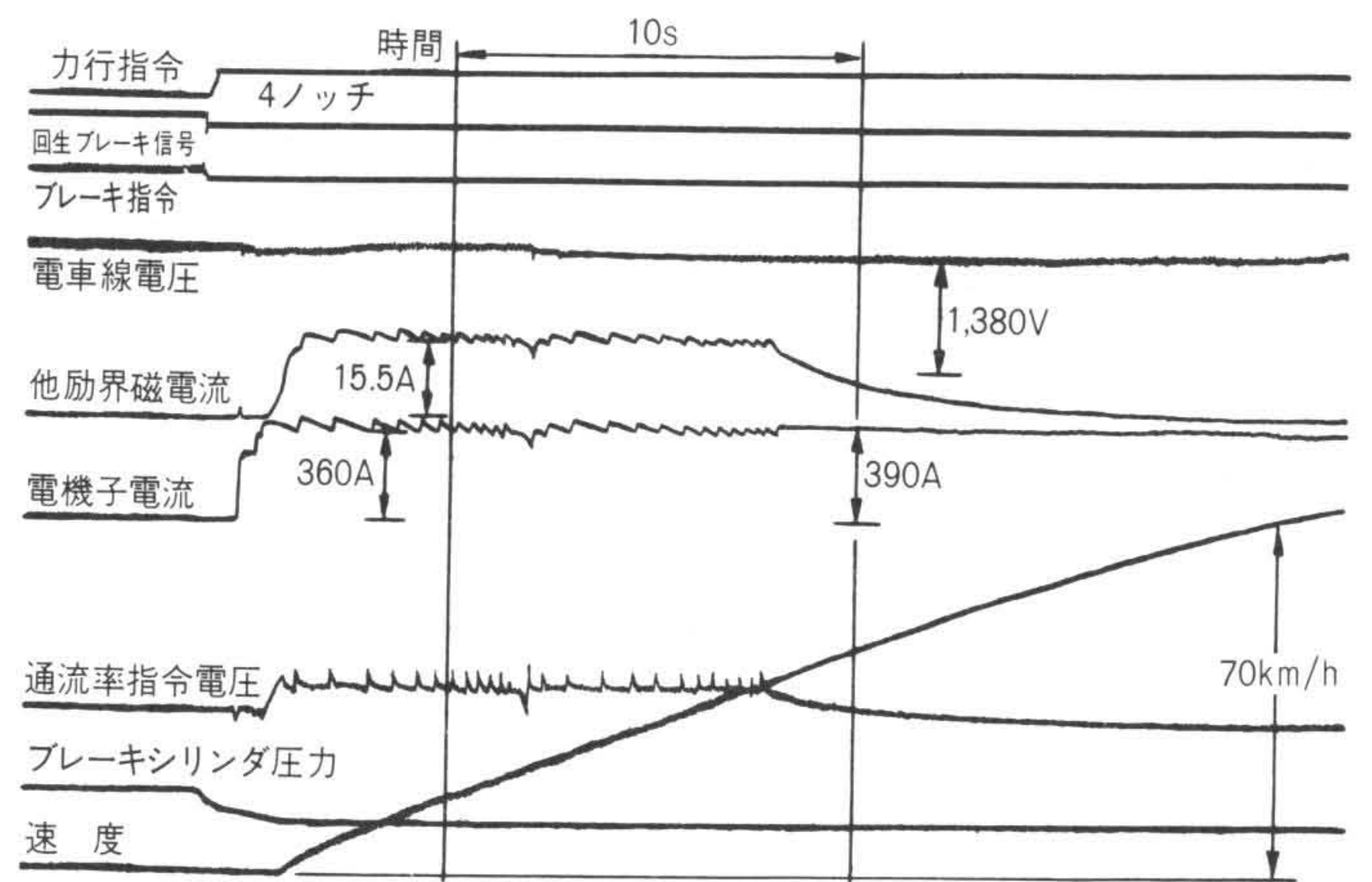


図12 現車試験(4ノッチ起動・力行)オシログラム 起動・力行全域にわたり円滑な制御が行なわれている。

表2 GTOサイリスタ界磁チョップ納入実績 18セットが稼動中である。

納入先	納入年(昭和)	台数	電車線電圧DC(V)	電動機容量(kW)
東京急行電鉄株式会社(試作装置)	58	1	1,500	130
近畿日本鉄道株式会社(奈良線)	58	4	1,500	160
近畿日本鉄道株式会社(南大阪線)	58	4	1,500	150
東武鉄道株式会社	58	9	1,500	140
東武鉄道株式会社	(製作中)	5	1,500	140
近畿日本鉄道株式会社(奈良線)	(製作中)	4	1,500	160

実測結果によれば、受信器ノイズ電圧は、従来の界磁チョップ装置に比べて約10dB低下した。

(2) 商用周波数軌道回路に対する帰線電流の影響

軌道回路が平衡及び不平衡の場合に対しても、軌道リレーのコイル電圧は従来車と同程度であった。

7 納入実績

表2に納入実績を示す。既に18セットが納入され、順調に稼動している。

8 結 言

以上、電車線電圧DC1,500V回路に、GTOサイリスタを直列接続して用い小形・軽量化を実現したGTOサイリスタ界磁チョップ装置について紹介した。本装置は、既に順調に営業稼動中である。

鉄道車両用制御装置については、省エネルギーや小形・軽量化、保守性の向上など種々の課題が与えられており、半導体技術の進歩による新技術の導入や制御方式の改良などにより、更に効率的で経済的な制御装置の確立に向けて努力を続けたい。

参考文献

- 1) 今野, 外: 最近の日立車両用界磁チョップ制御装置, 日立評論, 58, 9, 755~760(昭51-9)
- 2) 古賀, 外: GTOサイリスタとその周辺デバイス, 日立評論, 65, 4, 239~244(昭58-4)
- 3) 桜田, 外: 最近のGTOサイリスタ, 日立評論, 63, 6, 369~372(昭56-6)





## 磁気移相器制御チョップのフィードバック リップルに基づく異常振動とその抑制法

日立製作所 木脇久勝

電気学会論文誌(C) 103-6, 129-136 (昭58-6)

方形波交流電源で動作する磁気移相器は、パルス幅変調された波高値一定の出力が得られるうえ、簡単な構造で入力信号の比較増幅、位相遅れ補償の機能や、ノイズ電圧吸収機能などを兼ね備えており、また入力信号相互間、入出力信号間が容易に絶縁されることから、特に高信頼度の要求される新幹線電車や工事用バッテリー車両などのサイリスタチョップのゲート制御装置として実用化されている。

これらの応用では、一般にチョップの出力を磁気移相器に負帰還して閉ループを構成するが、チョップの通流率が0.5以下の範囲で、線形フィードバック制御系の理論では説明できない異常な振動の発生する場合があり、チョップ出力に含まれるリップルに基づくものではないかと推測されてはいたものの、そのメカニズムの詳細はまだ明らかにされていない。

また、もしリップルに基づくものならば、磁気移相器に短絡回路を設ければ抑制できるであろうことは、これまでに実験的に種

種明らかにされている短絡回路の作用から容易に推測され、事実抑制できることが経験されていたが、その理論的裏付けはまだなされていなかった。

そこで、筆者はまずフィードバックリップルの磁気移相器特性に及ぼす影響を詳細に解析し、フィードバックリップルによって磁心のリセット期間中に逆弧(Back Firing)が発生するために、移相特性にゲインが負となる領域が発生することを明らかにし、この場合の移相特性の理論式を導いた。ゲインが負になれば当然異常振動現象の直接原因となり得る。また、磁気移相器に短絡回路を設けることによってこの負ゲイン領域を縮小できることを理論的に示し、負ゲイン領域解消のための回路条件を求めた。

次に、これらの理論的解析結果の妥当性を検証するため、実験的検討を行なった。まず、磁気移相器単体を対象としてその出力通流率に同期した、フィードバックリップルと全く等価なリップルを別電源で発生させ、これを磁気移相器に加えることによって、

理論解析に一致する負ゲイン領域の発生を確認した。次に、この磁気移相器で制御されるチョップを用いてフィードバック制御系を構成し、移相器が負ゲイン領域に入ったとき異常振動現象が発生することを確認した。また、短絡回路の効果も理論的に予測したものとよく一致した。

これらの検討から、異常振動現象がフィードバックリップルによる逆弧に基づくものであることが確かめられたので、磁心のリセット期間中の電源電圧をゲート期間中よりも大にして、逆弧を減らす方法を試みたところ顕著な効果が認められた。このことは、磁気移相器は対称交流電源で励磁するよりも非対称交流電源、又は直流電源+半導体スイッチで励磁するほうが異常振動現象を生じにくく有利であることを意味している。

以上の検討結果は、チョップだけでなく交流位相制御系にも広く適用できよう。

## 片ロール法におけるアモルファスリボンの 形成条件と形状

日立製作所 富田貞美・鈴木秀夫

日本金属学会誌 48-2, 202-208 (昭59-2)

片ロール法によるアモルファスリボンの作製で、リボンの厚さ、表面粗さなどの形状を決める因子について未解明の事柄が残っている。すなわち、実験的にはロール周速、ノズル噴出圧力、ノズル先端形状、ノズル～ロール間距離などがリボンの寸法、形状を左右することが分かっているが、これら製造因子の物理的意味は明確にされていない。そこで、熔融金属がパドルとなってノズル～ロール間に保持される状況の詳細な観察や、更に、ロール表面温度などの測定を行なって、アモルファスリボンの形成因子を解明することにした。

アモルファス磁性合金として、代表的な組成である $\text{Fe}_{70}\text{Ni}_8\text{Si}_{10}\text{B}_{12}$ を取り上げ、鉄ロール及び銅ロールによる超急冷技術で幅5mm、厚さ10~36 $\mu\text{m}$ のアモルファスリボンを作製した。実験ではロール回転数と噴出圧力を変えて、リボンの作製条件を求め、そのときのパドル形状、ロール表面温度、リボン表面温度などを測定した。パドル形

状は高速度撮影機による連続撮影で、これを拡大映写して調べた。ロール表面及びリボン表面の温度測定は、赤外線放射温度計によった。

パドルの観察から、溶湯は回転するロールと固定したノズル先端との間にパドルとなって滞留し、そこからロール回転方向にリボンが引き抜かれ、遠心力で引っ張られてゆく様子が観察された。パドルの形は溶湯の表面張力、溶湯とノズルのぬれ性、溶湯の流動粘性が関係し、良好なりボンが得られる状態は、パドルは下流側にすそを引いた形をもち、かつパドルのすそに赤熱部分が存在するときである。このようなパドルの形状は、ロール回転数と噴出圧力が関係し、ロール回転数を上げるか、あるいは噴出圧力を下げるかすると、パドル長は小さくなる。この場合、得られるリボンは薄くなり、極端になると穴あきリボンとなる。銅ロールでは、鉄ロールに比べるとパドル長は小さいなどの事柄がある。一方、アモ

ルファスリボン作製時のロール表面温度は430~450Kであり、ロールから離れる直前のリボン表面は680~710Kである。

片ロール法によるアモルファスリボンの厚さは、ロール表面でロールの直接抜熱により凝固した層と、それが付随する遅れて凝固した粘性流動層から成ることが、実験及び理論的考察によって導かれる。直接凝固層の厚さは、溶湯とロール間の熱伝導率、パドルの接触長、接触時間及び合金のアモルファス化放出熱が関係する。また、アモルファスリボンの表面性状は、ロール材質、ロール回転数、噴出圧力などで変わるが、これは溶湯とロールとの接触で境界面に巻き込まれる気泡が主な原因である。1本のリボンでも噴出の初期、中期、後期で気泡の巻込みに差があり、片ロール法でのアモルファス磁性リボンの製造で、気泡の痕跡は材料の電磁氣的性質及び機械的性質を損なうので、材料の実用化で解決すべき課題と考えられる。