

カナダ・トロント地下鉄向け 回生ブレーキ付チョッパ制御装置

Chopper Control Equipments with Regenerative Brake Supplied to Toronto Transit Commission

The Toronto Transit Commission, Canada, noted for its unique subway adopting aluminum alloy cars first in the world, decided to adopt a chopper system for 6 cars to be added to its existing fleet which was completed in 1969.

Hitachi was awarded the order for these cars after competing in an international bid, reportedly because of its past experience in the manufacture of the chopper equipment delivered to the Teito Rapid Transit Authority and other customers. (The contract was signed in March 1971).

This 2-phase, DC 600V chopper control equipment has a capacity of controlling eight 86 kW traction motors and at the time of regenerative braking performs weakened field controlling. Its chopper part makes use of newly developed thyristors of high quality. All of its major components are designed to stand severe service conditions in temperatures as low as -30°C . Further, computer simulation indicates that the power consumption of electric cars using this control equipment is lower than resistor-controlled cars by about 30%. The electric cars equipped with this controller are presently undergoing various field tests, so far showing satisfactory performance.

今野信義* Nobuyoshi Konno
都築洋三* Yôzô Tsuzuki
成田 博** Hiroshi Narita

1 緒 言

最近、都市における交通事情の悪化に対処するため、各市において地下鉄の建設および拡充が行なわれ、かつ高密度の輸送がもくろまれる状況となってきた。車両運用面においては保守点検の容易な、電力消費量の少ない電車が、一方、サービス面においては、乗りごこちのよい、トンネル内温度を上げない電車が要求され、これらの諸条件を満足する電車としてチョッパ制御車が登場し、地下鉄用電車の標準形となりつつある。これは半導体素子の急速な性能向上とその応用技術の進歩による成果で、チョッパ制御車はその特長を遺憾なく発揮し、いまや実用の段階にはいったといえる。このたび日立製作所は、帝都高速度交通営団納め主回路チョッパ制御装置をはじめ、東京都交通局納め主回路チョッパ制御装置、東京急行電鉄株式会社納め界磁チョッパ制御装置および日本国有鉄道新幹線試験電车用発電ブレーキチョッパ制御装置の製作技術が認められ、カナダ・トロント市交通運輸委員会より試作車用3編成分の回生ブレーキ付主回路チョッパ制御装置を受注し、昭和47年4月納入した。現在、現地において各種試験を続行中である。このチョッパ装置は、国内での実績に加えてカナダでの使用条件も十分に考慮されている。

また本チョッパ制御装置には、特に新しく開発したゲートノイズ耐量の高いサイリスタが使用されている。

2 チョッパ制御車の特長

このチョッパ制御車6両はトロント市地下鉄が最近購入した76両の抵抗制御車の内6両を改造したもので、主電動機は抵抗制御車と同じものが使用されている。

このチョッパ制御車の特長は次のとおりである。



図1 トロント市地下鉄電車 8個の主電動機を制御するチョッパ制御装置がこれらの電車の床下に取り付けられている。

Fig. 1 Subway Cars of Toronto Transit Commission

- (1) 基本編成は2両より成りすべて電動車(M車)である。最大6M車の3編成重連で運転される。
- (2) チョッパ装置は2両分主電動機8個を制御する方式で、主回路機器は2両のM車に分散配置され、取付スペース、重量の平均化が図られている。
- (3) 床下機器の制限寸法および機器制限重量がともに小さく、機器の小形・軽量化が図られている。

* 日立製作所水戸工場 ** 日立製作所日立研究所

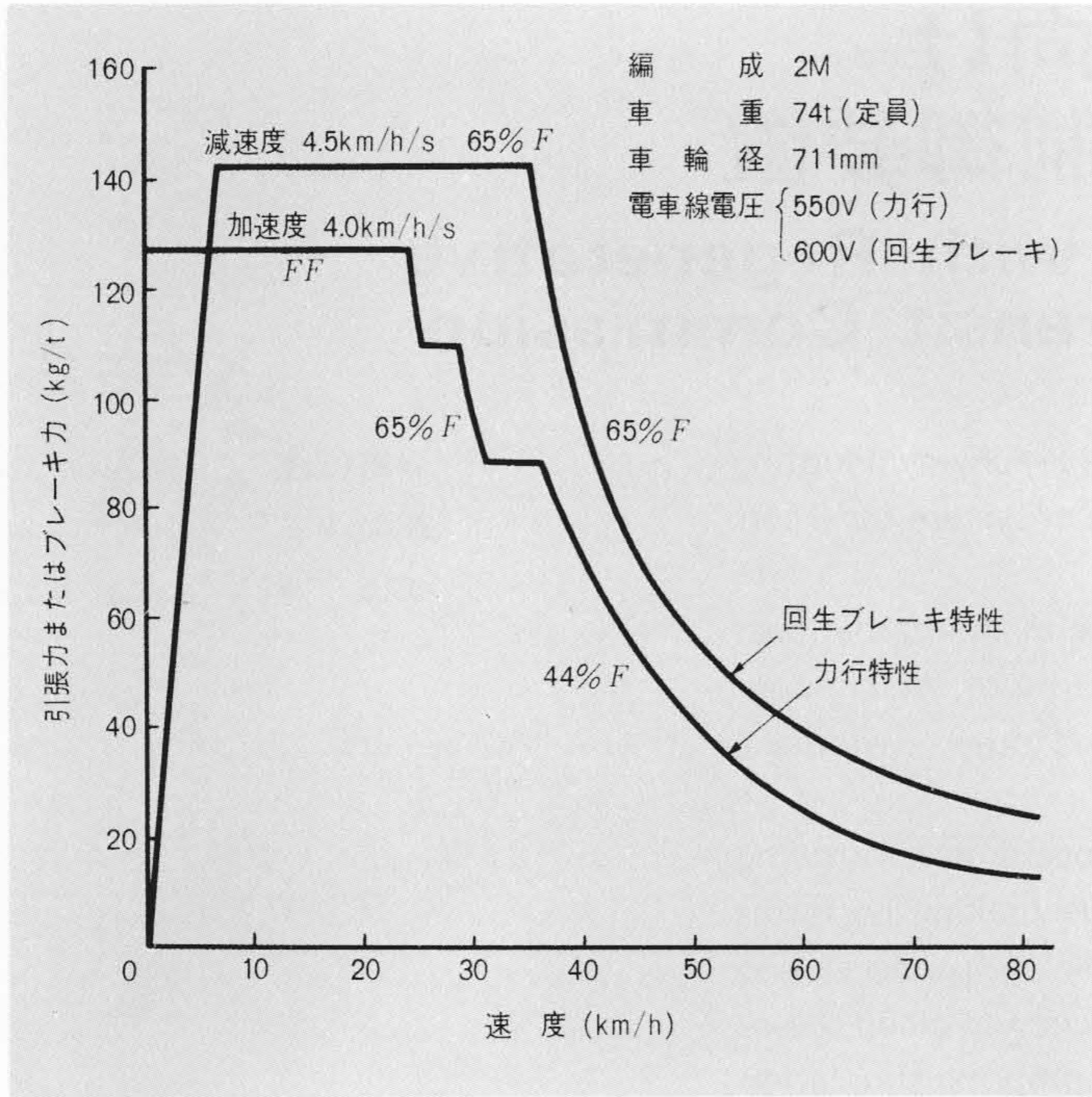


図2 力行・回生ブレーキ性能曲線 力行は23km/hまで4.0km/h/sの直線加速で、以後弱め界磁制御が行なわれる。回生ブレーキは65%弱め界磁で4.5km/h/sの減速制御を行なう。

Fig. 2 Performance Curve of Powering and Regenerative Braking

- (4) 集電は第3軌条方式で、特に変電所間のセクションギャップの通過には特別の考慮が払われている。
- (5) チョッパ用サイリスタは耐ゲートノイズの高い新形のもので、動作の安定化が図られている。
- (6) トロント市の気候条件を考慮し、
 - (a) サイリスタの冷却は、雪の浸入による絶縁劣化を避けるため、冬季は客室より給排気する、いわゆる循環形強制風冷式が採用されている。
 - (b) 冬季最低周囲温度 -30°C に耐える設計となっている。

3 車両性能

チョッパ車は従来車とも重連運転するため、車両走行性能を抵抗制御車と同一にする必要がある。このためにはチョッパ、主平滑リアクトル、主フィルタリアクトルなどをチョッパの通流率が最大になったあと、短絡する方法が最良であるが、軽量化の観点から接触器による短絡方式をとらず、主平滑リアクトル、主フィルタリアクトルの内部抵抗をできるだけ小さくし、かつチョッパの最大通流率を“1”に近づけるようにし、重連運転特性を合わせる設計とした。

(1) 電車要目

基本編成 2M車 (最大3編成の6M車)
 自重 55t/編成
 荷重 定員: 19.5t/編成
 満員(210%): 40.8t/編成

電車線電圧 DC600V
 車輪径 28in (711.2mm)
 最高運転速度 50mile/h (80.5km/h)

(2) 電車性能

出力 1時間定格 688kW (86kW主電動機×8)
 加速度 4 km/h/s (低加速: 3.05km/h/s)
 減速度 4.5km/h/s

回生ブレーキは、高速からの有効なブレーキ力を得るため

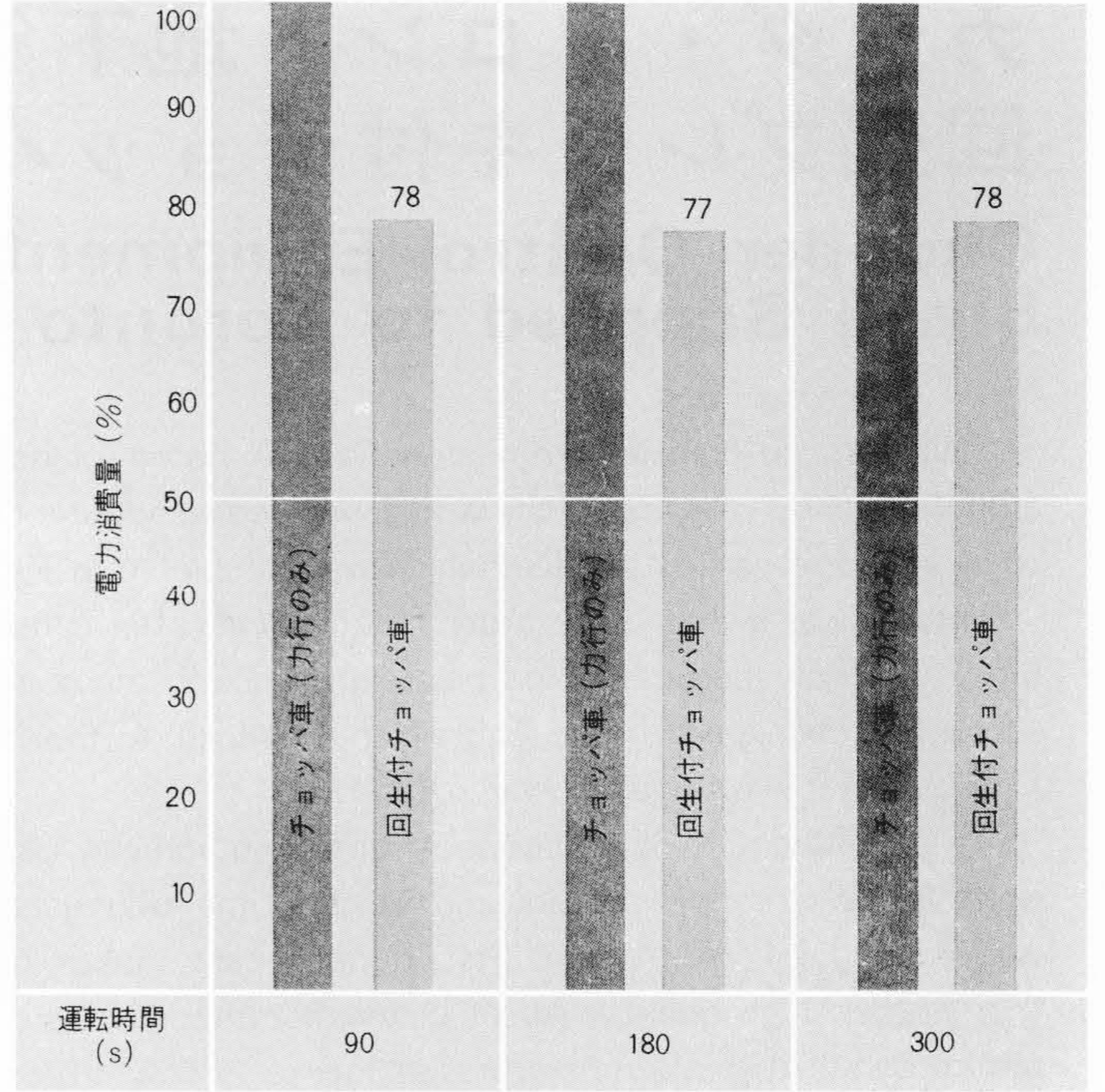


図3 チョッパ制御車の電力消費量のシミュレーション 変電所間のセクションギャップがあっても、列車運転間隔が5分程度ではほぼ22%の回生率が期待できる。

Fig. 3 Simulation of Power Consumption for Chopper Cars

に、65%の弱界磁制御が採用されている。力行、回生ブレーキ性能曲線は図2に示すとおりである。

4 回生ブレーキ付チョッパ車の電力消費量の計算

チョッパ制御車の特長の一つとしての電力消費量の低減が、このトロント市地下鉄のような第3軌条方式で変電所間のセクションギャップの多い線区では、どの程度期待できるかに注目して、電子計算機によるシミュレーションを行なった。

計算のおもな条件としては、

- (1) 駅数29に対し変電所数が12、セクションギャップが上下線とも18箇所ある実線区で走行させる。
- (2) 回生ブレーキ中にセクションギャップにさしかかると回生ブレーキを中止し、空気ブレーキに切り換え、再加圧区間に進入しても停車までそのまま空気ブレーキをかけるものとする。
- (3) 回生ブレーキ時の電車線電圧の許容最大値は定格電圧の20%アップの720Vとする。
- (4) 一列車はすべてM車の6両編成とし乗車率は170%とする。
- (5) 回生ブレーキ時の主電動機界磁率を100%とする (実際には65%の弱め界磁であり、この分回生率は上がるが余裕とする)。
- (6) 列車発車間隔は、90秒、180秒、300秒の3とおりにする。

これらの諸条件でのチョッパ制御車の力行に必要な電力量と回生ブレーキ付の場合の実質消費電力量の比率を示すと図3になる。この計算結果より22%程度の回生率が期待される。

また、第3軌条にセクションギャップがないと仮定した場合の回生率を計算すると、25%程度であり、セクションギャップによる回生率の低下はわずか3%であることが推定されている。

同一車両性能の抵抗制御車と回生付チョッパ制御車の電力消費量を比較する場合は、図3に示したブレーキ時の回生の

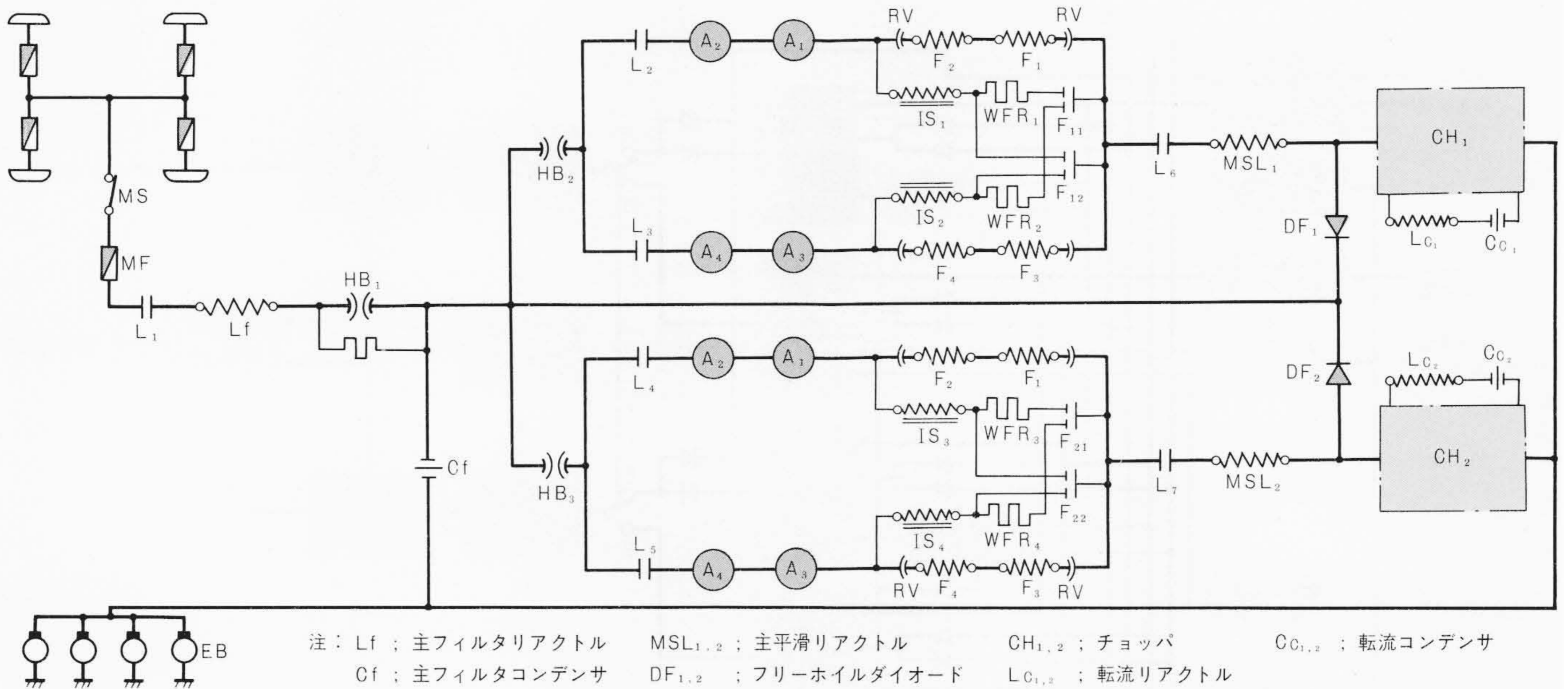


図4 力行主回路つなぎ 主電動機回路は2グループに分離され、グループごとに一相のチョップによって独立に制御される。

Fig. 4 Main Circuit Diagram on Powering

あり、なしのほかに力行時の電力消費量の差を考える必要がある。トロント市チョップ制御車では抵抗制御車に比較し、総合して30%程度の電力消費量の低減が見込まれている。

5 チョップ回路

5.1 主回路つなぎ

力行および回生ブレーキ時の主回路つなぎは図4、図5に

示すとおりである。

主回路方式の特長は次のとおりである。

- (1) 力行、回生ブレーキともに主電動機は2S・2P、2グループに永久接続され、チョップは二相式である。主電動機回路は2グループに分離され、1グループの主電動機群は一相分のチョップによって独立に制御される。したがって1グループ中の主電動機またはチョップが故障した場合でも

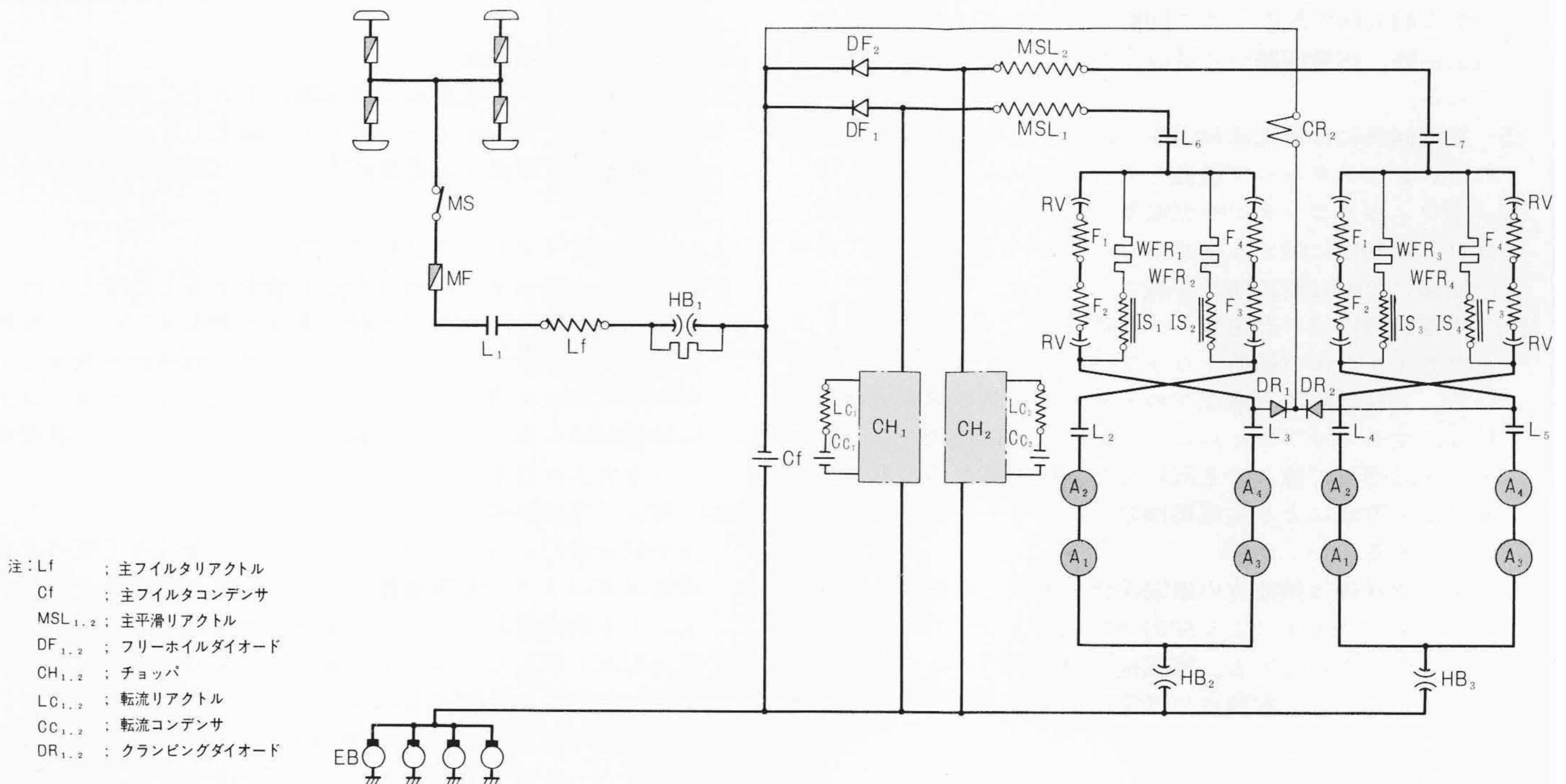


図5 回生ブレーキ主回路つなぎ 主電動機回路は2グループに分離され、グループごとに一相のチョップによって独立に制御される。ブレーキ時は主電動機は65%の弱め界磁制御が行なわれる。

Fig. 5 Main Circuit Diagram on Regenerative Braking

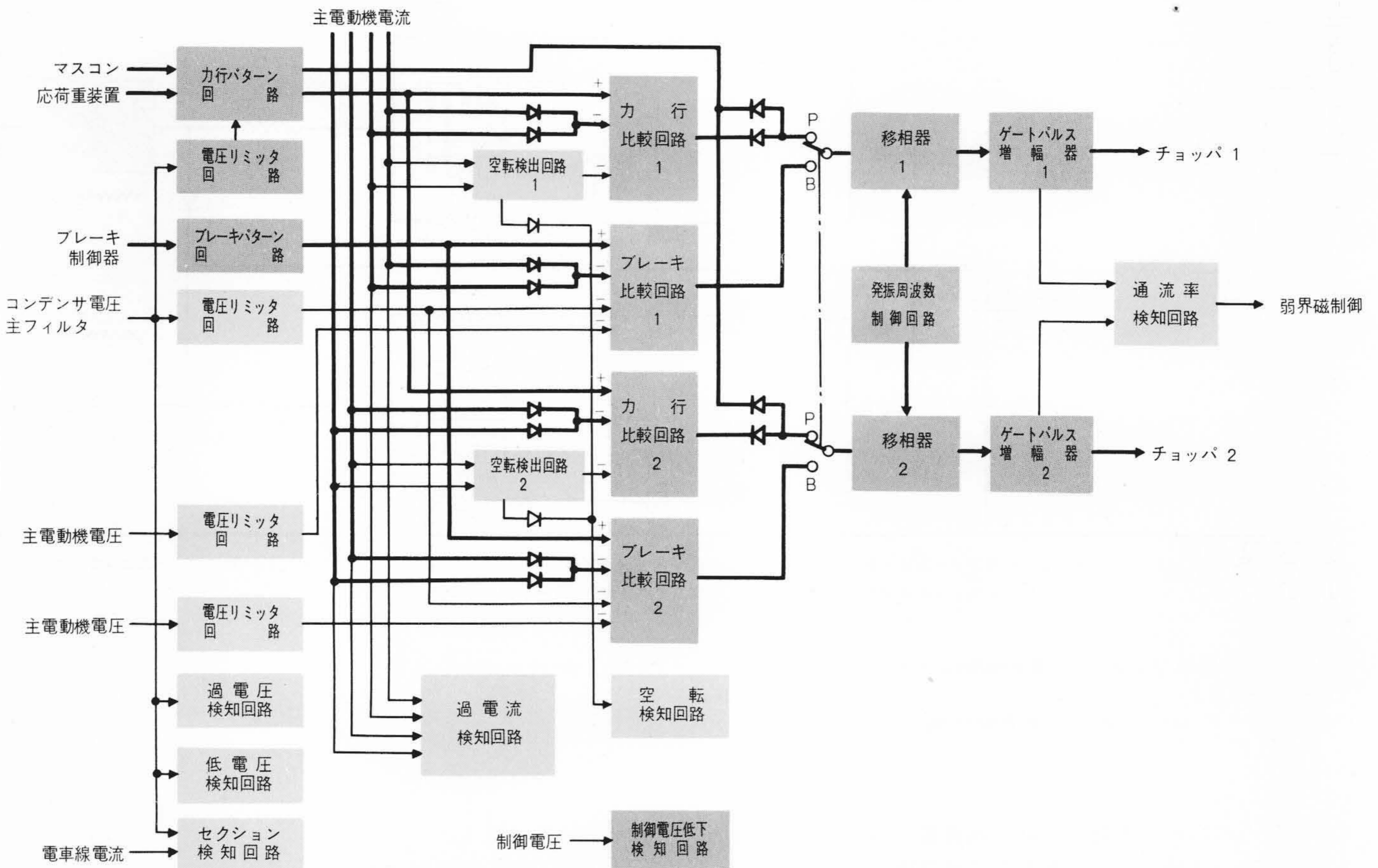


図6 制御ブロック図 チョップパ各相に対し専用の移相器および比較回路が設けられ、力行・回生ブレーキ電流パターンと主電動機電流との偏差によりチョップパゲート制御が行なわれる。なお、起動時はチョップパ周波数制御が行なわれる。

Fig. 6 Block Diagram of Chopper Control Circuit

1 M車開放運転が可能である。

チョップパは、二相間で位相差制御が行なわれ、その合成周波数は440Hzである。この制御周波数決定にあたっては、軌道回路、信号回路への誘導障害が起きないように考慮されている。

- (2) 集電回路には無電流検出器が設けられており、変電所間のセクションギャップ通過を検出している。
- (3) 主フィルタコンデンサ充電電流制限用抵抗器と並列に、高ひん度動作に耐える高速度しゃ断器(HB₁)を設け、従来の回路に比較し断流器数を減らしている。
- (4) 主電動機回路の高速度しゃ断器(HB₂, HB₃)に、主トリップコイルおよび補助トリップコイルの2コイルを設けている。これは転流失敗などのチョップパ回路の過電流事故時には、主トリップコイルによる動作以前に補助トリップコイルを励磁して直ちに主回路をしゃ断するためのものである。この方式により主電動機およびチョップパの保護が完全に行われる。
- (5) 過電流保護は無接点の過電流検出装置と高速度しゃ断器のトリップコイルによる検出の二重系となっており、他方過電圧保護に対しても、電圧検出用DCPTのほかに、バックアップ用として有接点の過電圧継電器を設け、保護には万全を期している。

5.2 制御方式

図6は制御方式のブロック図である。この制御方式の特長は次のとおりである。

(1) 起動時のチョップパ周波数制御

起動抵抗器による起動制御方式では機器の重量増大、収納

スペースの問題などで望ましくないので、起動時はチョップパ周波数を低い周波数で制御し、起動後は440Hzの制御とした。

(2) 保護回路の集約化

保護装置を集約し必要かつ最小限のものとした。

たとえば、二相のチョップパは互いに独立しているため相電流の不均衡を考慮する必要がなく、ただ過電流のチェックのみでよい。

(3) 空転リミッタおよび空転検出器

本チョップパ制御車は常時は空転が発生するとは考えられないが、冬季レール表面が氷結することがあるため、空転検出装置が設けられている。したがって空転検出は簡単な主電動機電流比較方式によるものとし、大きな空転時には主電動機回路を開き、微小空転時には限流値を下げて再粘着させる方式が採用されている。

(4) 電圧・電流制御

主幹制御器のノッチに対応してチョップパ通流率を定め、応荷重装置により一定加速度となるよう電流値指令が出される。主電動機電圧がノッチ指令値よりも低い場合には、定電流制御が優先し、指令値に等しくなった場合は自動的に定電圧制御に切り換えられる。

力行時電車線電圧が定格の75%以下に下がったときには、チョップパの転流余裕が少なくなるので限流値を下げる制御がなされている。

(5) 弱め界磁制御

チョップパの通流率が最大になったことを検出し、自動的に弱め界磁が行なわれる。弱め界磁率は65%および44%の2

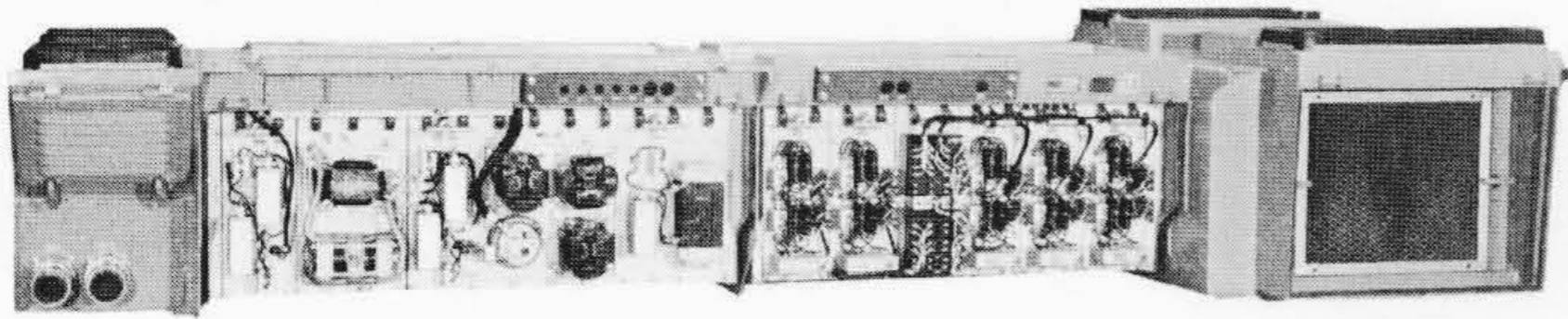


図7 チョップ装置 前面部分がチョッパー相分で、裏面にもう一相分が対称して配置されている。

Fig. 7 Chopper Controller

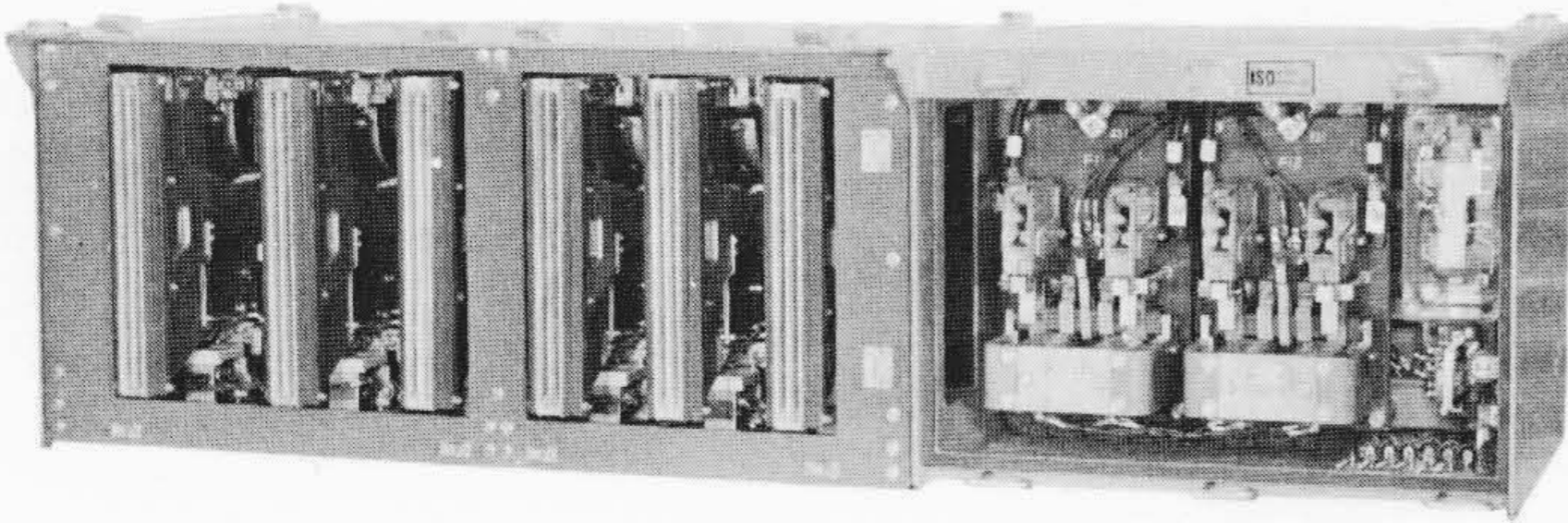


図8 断流器箱 写真左から、高速度しゃ断器、単位スイッチおよび弱界磁用電磁接触器が収納されている。

Fig. 8 Line Breaker Box

段制御である。

6 主要機器

6.1 チョップ装置

チョップ装置のおもな仕様は表1に示すとおりである。低電圧大電流制御のチョップ装置では転流コンデンサの容量を大きく、転流リアクトルのインダクタンスを小さくする必要がある。このためチョップ回路の配線によるインダクタンスはチョップ性能を検討するうえで無視できない。このチョップ回路の設計にあつては、理論解析および実体配線による先行確認試験で回路定数を決定した。その結果、転流能力は十分に保たれ、電車線電圧が定格の75%以下に下がってもチョップ最大電流を制御できる余裕のあるものとなっている。

サイリスタ・ダイオードはスタックにまとめられ、スタック本体は2本のボルトで簡単に取付け・取はずしができる構造になっており取扱いが容易である。

チョップ装置は図7に示されるとおり、低床形である。冷却は前述のように室内循環形強制通風方式であり、この送風機には小形ラジアルファンが使用され騒音はきわめて低い。

ゲート制御装置は薄膜集積回路(IC)および半導体などで構成され、これらの部品はすべて低温試験に合格したものである。

6.2 断流器箱

図8は断流器箱の外観を示したものである。この箱の中には動作ひん度の高い高速度しゃ断器および単位スイッチなどが収納されており、これらの機器は特に低床形用に設計・製作されたものである。

表1 チョップ装置仕様一覧 最低電圧450Vで最大電流1,100Aを制御する二相反発パルス形チョップ装置

Table 1 Particulars of Chopper Controller

項目	仕様
チョップ回路方式	並列消弧形反発パルスチョップ方式
定格電圧	DC600V
制御電流	1,100A(最大)/相
相数	2
素周波数	220Hz
サイリスタ定格	1,200V 400A 逆阻止形 ターンオフタイム50 μ s 高ノイズ耐圧素子
ダイオード定格	2,500V 800A
冷却方式	強制風冷式(冬季:室内循環式)
保護装置 および 故障検出装置	(1) 風速継電器による冷却風の検出 (2) 主サイリスタ冷却片の温度上昇検出 (3) 表示灯による素子故障検出

6.3 その他の機器

転流装置は転流コンデンサと転流リアクトルより構成され転流リアクトルはうず電流による箱の温度上昇を防ぐため非金属製の箱に収められている。

主フィルタコンデンサは、小形・軽量化するため金属化紙コンデンサ(MPコンデンサ)が使用されている。

主フィルタリアクトルは、空心形で、強制風冷されチョップ装置と同様冬季は室内循環方式により冷却される。

主平滑リアクトルは、チョップ二相分の空心コイル2個を有しているが、相互に影響を及ぼし合わぬよう磁気結合のないリアクトル構造となっている。

7 結 言

以上述べたチョップ制御装置に対しては、万全を期すため、トロント市交通運輸委員会より借用した主電動機との工場内組合せ試験を実施し、実車で遭遇すると予想されるあらゆる条件下での性能確認を十分に行なった。このようにして、わが国から初輸出されたチョップ制御装置は、昭和47年11月よりカナダ・トロント市地下鉄において走行試験が開始され、現在、各種性能試験のほか信号線、通信線への影響の調査などの総合的な試験が好評裏に続けられている。

なお、この実績が買われ、同国モンリオール市地下鉄からも3セット受注し、昭和47年末出荷した。現在、同地で装中であるが、間もなく現車試験が行なわれる運びとなっている。

最後に、本チョップ制御装置製作にあたり詳細な必要資料を提供いただいたトロント市交通運輸委員会のかたがたに、また国内にあつては適切なご指導および助言をいただいた帝都高速度交通営団関係者のかたがたに対し、深く謝意を表す。