

電気車用チョッパ制御装置

Chopper Control Equipment for Electric Car

日立製作所は省エネルギー時代の要請に応ずるため、車両用チョッパ制御装置の開発にいち早く着手し、開発・改良を重ね過去多くの装置を製作、納入してきた。チョッパ制御方式としては、逆導通形サイリスタを使用した直列消弧形反発パルス方式を開発し、直流1,500 V又は750 V電車線電車の標準形としている。この方式は、回路構成が簡単で装置の小形・軽量化に大きく寄与している。更に、このチョッパ制御装置は単に主電動機制御にとどまらず、その特長を生かして自動運転用機能、運転監視機能などを付加するようになっており、最新形電車に不可欠の制御装置にまで発展している。

このように、チョッパ制御装置、主電動機などの各装置は個々の性能はもちろん、システム全体として優れた性能を発揮させることが必要となってきた。

木村貴一* *Kimura Kiichi*

今野信義* *Konno Nobuyoshi*

高橋 宏** *Takahashi Hiroshi*

1 緒 言

日本で車両用チョッパ制御装置が実用化されたのは昭和40年代の前半であり、現在まで10年余を経過した。この間、チョッパ制御装置は従来のカム軸制御装置に代わり、電車全体の制御システムの中で重要な位置を占めるほどにまで発展してきた。殊にこのチョッパ制御装置を搭載した車両は、高度の自動運転が可能であることや、乗心地の良いことなどの特長が高く評価されている。これはチョッパ制御のもつ、速応性、連続性、精度の良さなどの諸特長を生かしているからである。

日立製作所は、車両用チョッパ制御装置として、直巻電動機を制御する電機子チョッパ、複巻電動機他励界磁を制御する界磁チョッパ、また発電ブレーキをステップレスに制御する抵抗チョッパを製作し、国内外に多数納入している。

ここでは、国内の地下鉄車両用として製作納入した直流1,500 V用電機子チョッパに関して、その開発経過と特長について紹介する。

2 開発経過

昭和40年代の初めには、電力用の高耐圧・大容量のサイリスタダイオードが実用化されつつあった。日立製作所では、これを背景に昭和41年に帝都高速度交通営団日比谷線で75kW主電動機4台を制御するチョッパ制御装置の現車試験に成功した。引き続いて、帝都高速度交通営団千代田線用として二次にわたる試作車用制御装置を納入し、電力回生ブレーキ付チョッパ制御技術を世界に先駆けて確立した。

これらの技術を基にして、本格的な営業運転用チョッパ制御装置の製作を開始した。

2.1 帝都高速度交通営団千代田線納めチョッパ制御装置

昭和45年に製作納入した量産車用チョッパ制御装置は、従来の逆阻止形サイリスタのほかに、新開発の逆導通形サイリスタ(形式CH04V)を採用したことが最大の特長であった。

すなわち、チョッパ制御用サイリスタは大容量化のために、スタッド形からユニットセル形へと移行してきたが、これらはいずれも逆阻止形のものであった。しかし、装置の小形・軽量化のためにサイリスタのターンオフタイムを短縮するこ

とが更に要求されたが、逆阻止形では限界があった。このために、サイリスタ部に逆並列にダイオードを内蔵した複合形サイリスタとしてターンオフタイムを25 μ sと高速度化した、逆導通形サイリスタ(1,200 V, 400 A)を開発した。これを採用することにより、逆阻止形サイリスタを使用した並列消弧形回路で必要であったダイオードを省略して、回路も簡略化した独特の直列消弧形反発パルス方式を開発した。図1にその原理図を示す。

このようにして、チョッパ制御装置の小形・軽量化を図り、量産タイプの基礎を確立した。

2.2 東京都交通局納め試作車用チョッパ制御装置

昭和46年に、東京都交通局に納入した試作車用のチョッパ制御装置は、高速からの回生ブレーキ方式の一標準となったものである。直巻電動機制御でチョッパ回生ブレーキを安定に動作させるためには、主電動機電圧が電車線電圧より低く制御されなければならない。このため、高速域では回生ブレーキ力が不足する。回生ブレーキ領域の拡大を図るため種々の方式を検討し、弱界磁方式を採用した。回路の簡素化のために、分路装置と接触器とを用いて界磁を弱めることとし、制御を容易にするため界磁率は変化させず、全速度領域一定とすることにした。この一定弱界磁方式は、回生ブレーキ制御方式の一つの標準となるものである。

2.3 帝都高速度交通営団有楽町線納めチョッパ制御装置

昭和49年に製作、納入されたチョッパ制御装置には、新開発の2,500 Vの高耐圧逆導通形サイリスタと、主回路方式として可変界磁方式とを採用した。

2.3.1 高耐圧サイリスタの実用化

サイリスタの素子数を低減し、装置の小形・軽量化と信頼性の向上を図るため、高耐圧化への努力を続けてきたが、形式CF01V, 2,500 V, 400 A, 40 μ sの開発に成功し、これを実用化した。

1,500 V路線では、従来は耐圧1,200 Vサイリスタを4個直列に接続していたが、この高耐圧サイリスタの採用により、直列数は2個となり、使用サイリスタ数を半減することができるとともに、装置の小形化にも大きく寄与することができた。

* 日立製作所水戸工場 ** 日立製作所日立工場

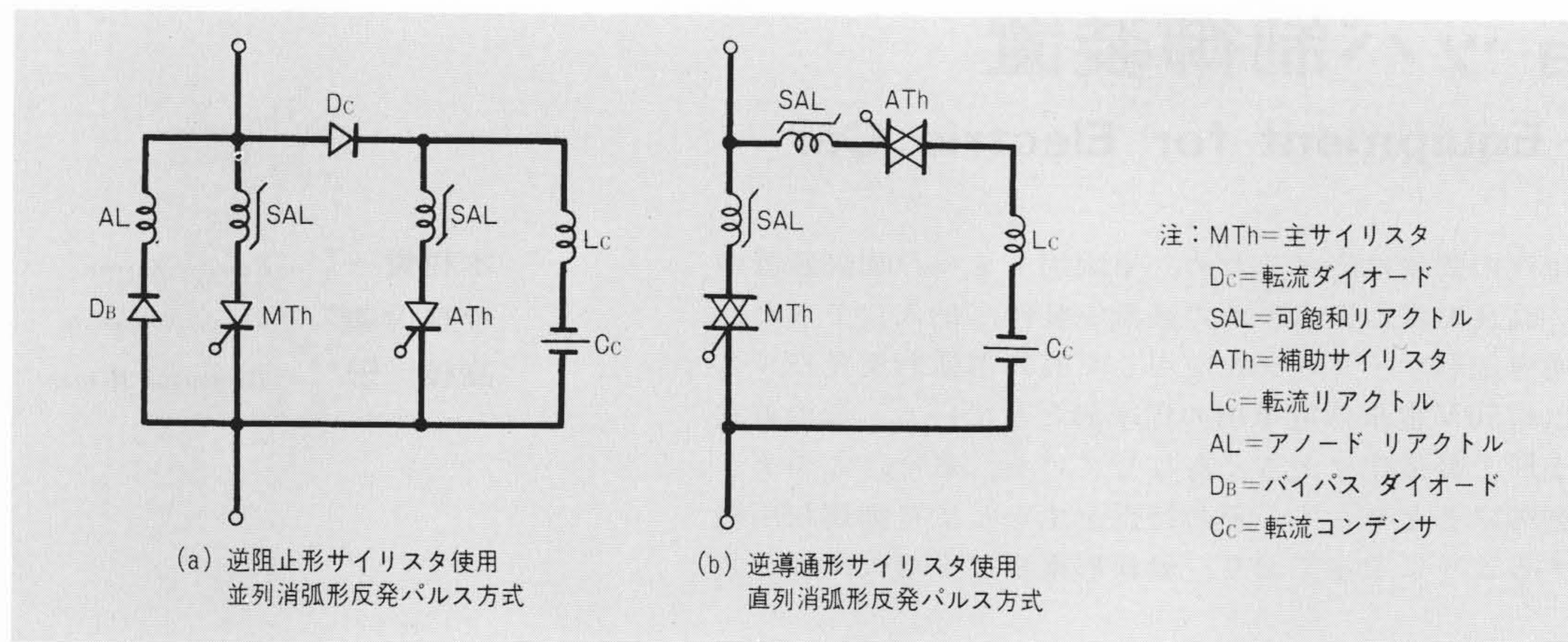


図1 チョップ部基本回路
逆導通形サイリスタの機能集積効果により、チョップ部回路を簡略化できる。

この耐圧2,500 Vサイリスタは、その後のチョップ制御用の標準素子として使用している。

2.3.2 可変界磁方式の採用

弱界磁方式の新しい方式として界磁率を連続して変化させる可変界磁方式が採用された。

この方式は、主電動機の直巻界磁を2分割し、一方を電機子に直列に、他方をチョップ部の電流断続回路(力行時にはフリーホイーリングダイオードに直列、回生ブレーキ時にはチョップ部に直列)に挿入して、チョップ部の通流率の変化により自動的に界磁率を変化させるものである。

一定弱界磁方式に比較して、分路用の界磁接触器が不要になる点、その代わりに可変界磁にダイオードを逆並列に接続する点で異なっているが、最弱界磁での性能は力行、回生ともに両者は同一である。

2.4 札幌市交通局東西線納めチョップ制御装置

ゲート制御回路用論理素子としては、従来トランジスタ又はTMC (Thinfilm Micromodule Circuit: 薄膜集積回路) を使用してきたが、モデルチェンジを行なうとともに、IC (集積回路) TTL (Transistor Transistor Logic) を全面的に採用してデジタル化を図り、制御精度の向上と小形化を実現した。昭和51年に製作納入したチョップ装置には、このIC化ゲート制御装置を採用している。

また、過電流保護の面では高速度しゃ断器の改良を行ない、従来形の動作時間に対し約 $\frac{1}{2}$ の8～9 msに動作時間を短縮し、ブレーキ時のチョップ部の導通故障に対する保護速度領域の拡大を図った。

更に、この制御装置は後述する自動運転システムのチョップ制御装置として最初のものである。

その後も、一定弱界磁方式、可変界磁方式を2本の柱に、耐圧2,500 Vサイリスタを標準素子とし、神戸市交通局西神線及び名古屋市交通局鶴舞線向けのものを製作、納入した。更に現在、東京都交通局10号線、日本国有鉄道及び大阪市交通局御堂筋線向けに、チョップ制御装置を製作中である。

3 最新形チョップ制御システム

3.1 チョップ制御システムの性能及び機能

帝都高速度交通営団有楽町線、札幌市交通局東西線、神戸市交通局西神線及び名古屋市交通局鶴舞線に納入し、1年以上の実績をもつ最新の地下鉄車両用チョップ制御システムの性能及び機能の一覧を表1に示す。

各チョップ制御システム主回路つなぎのうち、図2に一定弱界磁制御方式を、図3に可変界磁方式を示す。

3.2 チョップ制御システムの機能の拡張

チョップ制御装置は、単に主電動機を制御するばかりではなく、最近の電車ではチョップの特長を生かして電車の中核となる次のような機能を併せもつまでに発展している。

3.2.1 自動運転のための機能

自動運転に適した制御としては、ノッチ戻し制御ができることと、ジャーク制御ができることである。チョップ制御はこれに最適なものといえる。

すなわち、チョップ制御では連続的な電流、電圧制御が可能であるため、自動運転システムからの任意のノッチ指令に対して追従するよう、力行とブレーキ制御中はチョップを停止することなく連続的に制御し、ノッチ戻し制御を実現している。一般の手動運転だけの場合は、フリーランニングに入ると主平滑リアクトルとチョップ部を電氣的に短絡し、電力損失を低減する方式としているが、自動運転のチョップ連続制御方式では、主平滑リアクトルとチョップ部の熱容量を検討し、主回路の電力損失の増加が極小になるように設計し、短絡しない方式を採っている。

また、急激なノッチ指令の変化に対して有害なジャークを発生させることなく、かつ速いノッチ追従を得るための配慮として、ジャーク制御機能をチョップ制御論理部に設けている。この結果、神戸市交通局での自動運転時のジャークの実測結果では、最大値0.18g/sであり乗心地の良い制御が行なわれているといっている。

3.2.2 運転操作の容易性

札幌市交通局向けチョップ制御システムでは、故障が発生した場合、乗務員に対して「運転扱い」を指示するモニタ機能をもたせている。具体的には、主電動機の過電圧、過電流、制御用交流電源電圧の低下、空転などを検出し、かつ事故の度数をカウントして電車が運転継続できるかどうかをモニタ回路が自動的に判断し、乗務員に次に採るべき操作を指示する。

一例を挙げると、主電動機過電流が続けて2回発生した場合は、自動的に主電動機が開放される。健全主電動機数が所定値以下になったら「重故障」で「回送」を表示する方式となっている。また、故障発生と同時に電車線電圧、主電動機電流、制御電圧、荷重、速度などを記録しておき、故障原因の究明を容易にしている。

3.2.3 抑速回生ブレーキ制御

神戸市交通局は、30%のこう配が4 kmも続く路線をもっているため、回生ブレーキを用いて長いこう配区間を安定に走行するため、回生電力を吸収するインバータ装置が変電所に設置されている。しかし、インバータは全電車のピーク回生

表1 チョップパ制御装置の性能及び機能一覧表 一つのチョップパ制御装置で、150kWの駆動電動機を8台制御が可能である。

性能・機能	帝都高速度交通営団有楽町線	札幌市交通局東西線	神戸市交通局西神線	名古屋市交通局鶴舞線
1. 電車線電圧	1,500V DC	1,500V DC	1,500V DC	1,500V DC
2. 列車編成	4MIT 6M4T	2M2T	4M	4M 6M2T
3. 加速度	3.3km/h/s	3.5km/h/s	3.3km/h/s	3.0km/h/s
4. 減速度(常用最大)	3.5km/h/s	4.0km/h/s	3.5km/h/s	3.5km/h/s
5. 主電動機制御方式	チョップパによる電機子電圧連続制御と可変界磁制御方式	チョップパによる電機子電圧連続制御と一定弱界磁制御方式	チョップパによる電機子電圧連続制御と可変界磁制御方式	同 左
6. チョップパ方式	回生ブレーキ付電機子チョップパ直列消弧形反発パルス方式	同 左	同 左	同 左
7. チョップパ制御容量	DC375V, 150kW主電動機 8台制御	DC187V, 70kW主電動機 16台制御	DC375V, 130kW主電動機 8台制御	DC375V, 135kW主電動機 8台制御
8. チョップパ相数	2	2	2	2
9. チョップパ周波数	330Hz×2=660Hz	200Hz×2=400Hz	175Hz×2=350Hz	243Hz×2=486Hz
10. チョップパ制御電流(最大加速電流)	725A/相	650A/相	695A/相	565A/相
11. チョップパ制御電流(最大減速電流)	640A/相	590A/相	500A/相	560A/相
12. 回生ブレーキ用途	停止ブレーキ	同 左	抑速ブレーキ 停止ブレーキ	停止ブレーキ
13. 回生電力吸収装置	力行車	力行車と 変電所インバータ	力行車と 変電所インバータ	力行車
14. 列車運転方式	ATCバックアップによる 手動運転	ATCバックアップによる 自動運転	同 左	ATCバックアップによる 手動運転
15. 試験機能	コンピュータによる自動試験	同 左	同 左	同 左

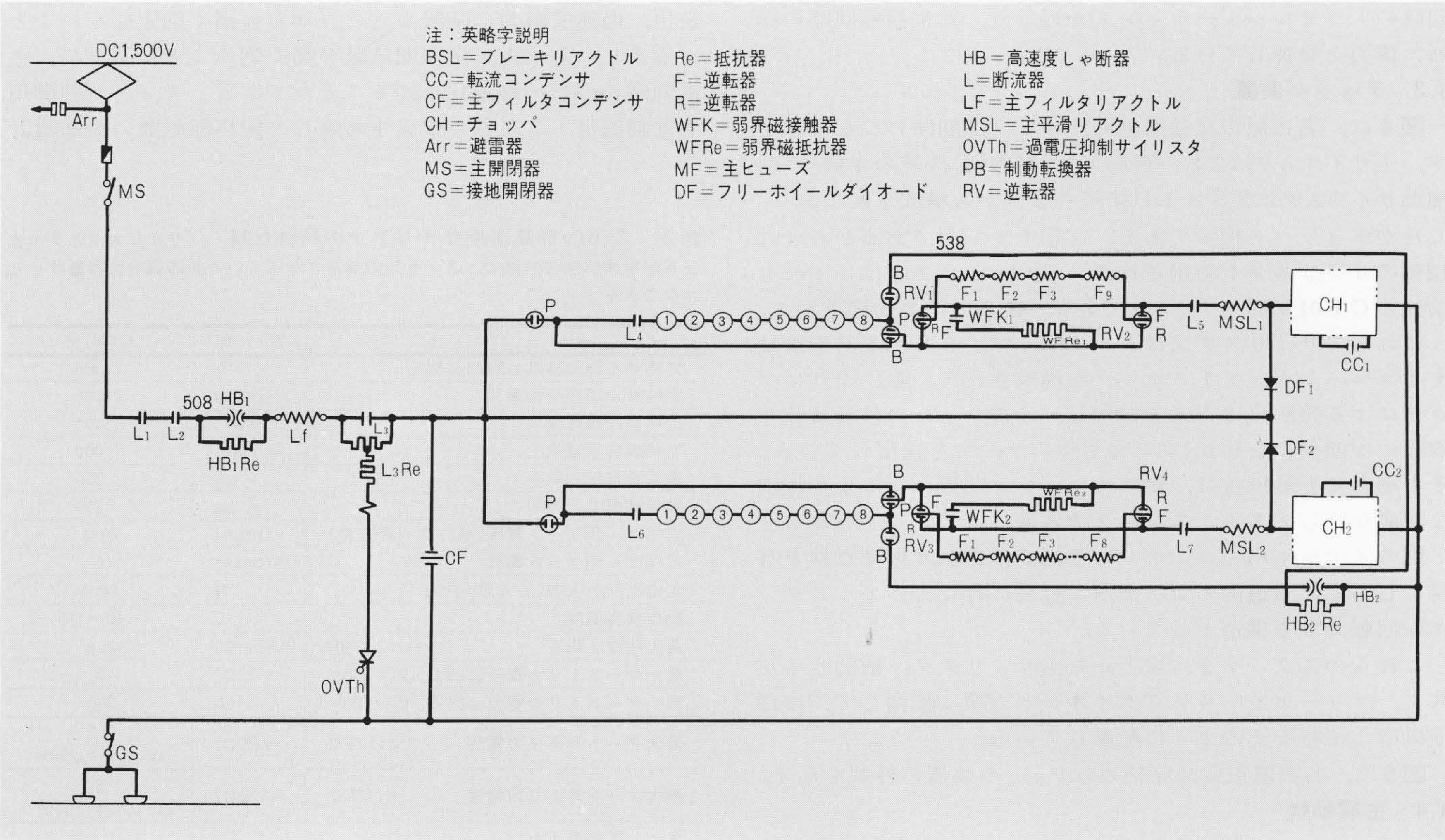
注：ATC＝自動列車制御装置

電力を吸収する容量とすることは不経済である。このため、チョップパ制御システムとしては異なる電車群で停止ブレーキと抑速ブレーキとを同時にかけようとする場合には、抑速回生ブレーキが停止回生ブレーキより優先する制御方式としてゐる。すなわち、停止回生ブレーキ列車は電車線電圧が規定値より上昇するに従い、回生ブレーキの分担を少なくする制

御を行ない、抑速回生ブレーキ列車は常に100%有効に抑速回生するような制御を行なっている。

3.2.4 自動試験のための機能

チョップパ制御システムは、車両基地に設置されているコンピュータ付試験機により、自動的に検査が行なわれる。チョップパ制御システムには、主回路、制御回路及びゲート制御論



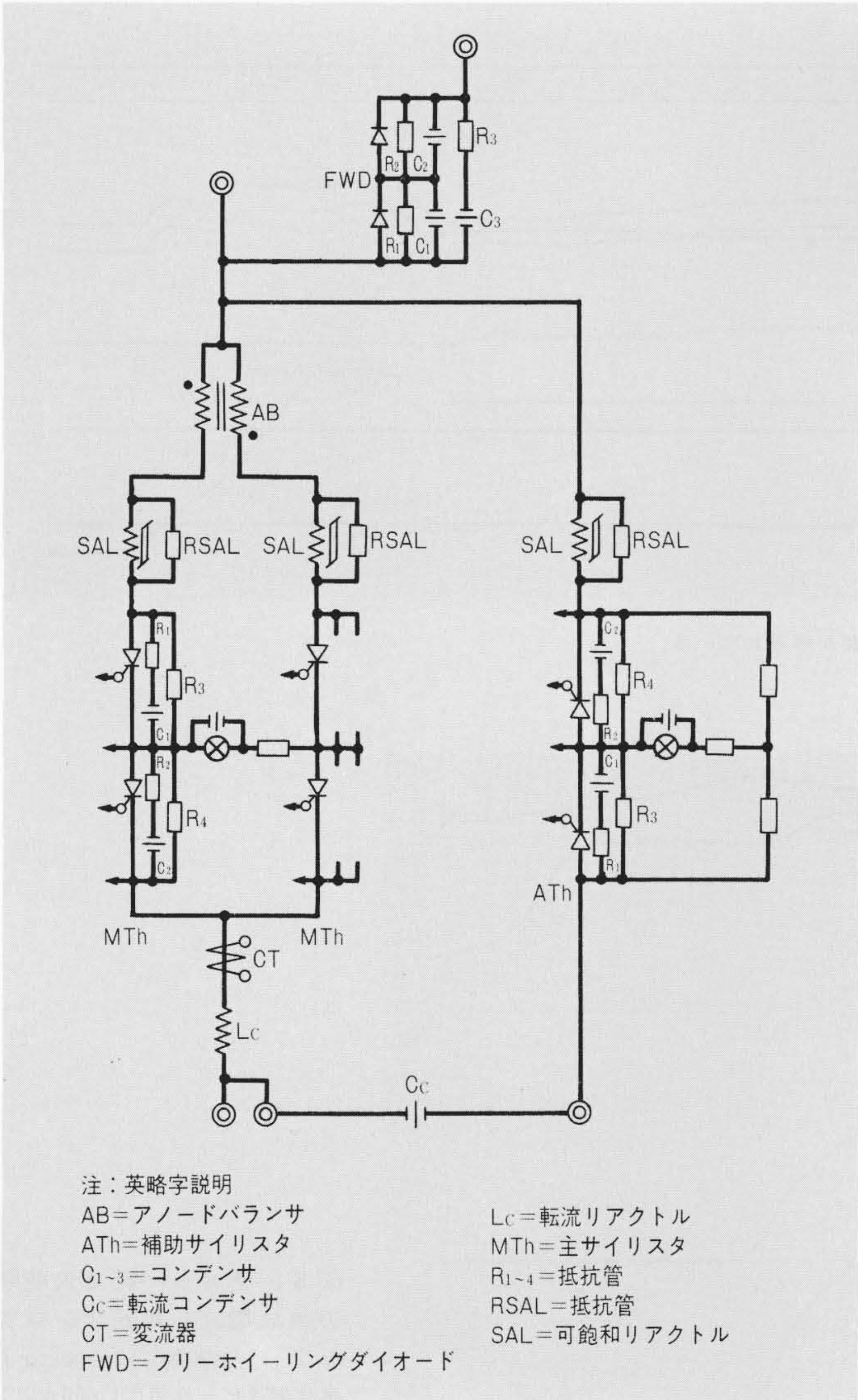


図4 チョップ部回路つなぎ図 チョッパー相当りのサイリスタ素子数は6個である。

が行なわれる。

また、保護協調の面ではチョッパ転流失敗などの異常状態での主電動機のフラッシュオーバー耐量を把握し、チョッパ制御装置との十分な協調を図ることが必要である。

更に、チョッパ制御をされる主電動機は、200Hz以上の高い周波数を含む脈流で運転されるので、次に述べるような整流上の配慮が必要である。

(1) 主磁束の脈動によって、ブラシで短絡される電機子コイルに誘起される変圧器起電力を0.3V以下に抑えるため、定格

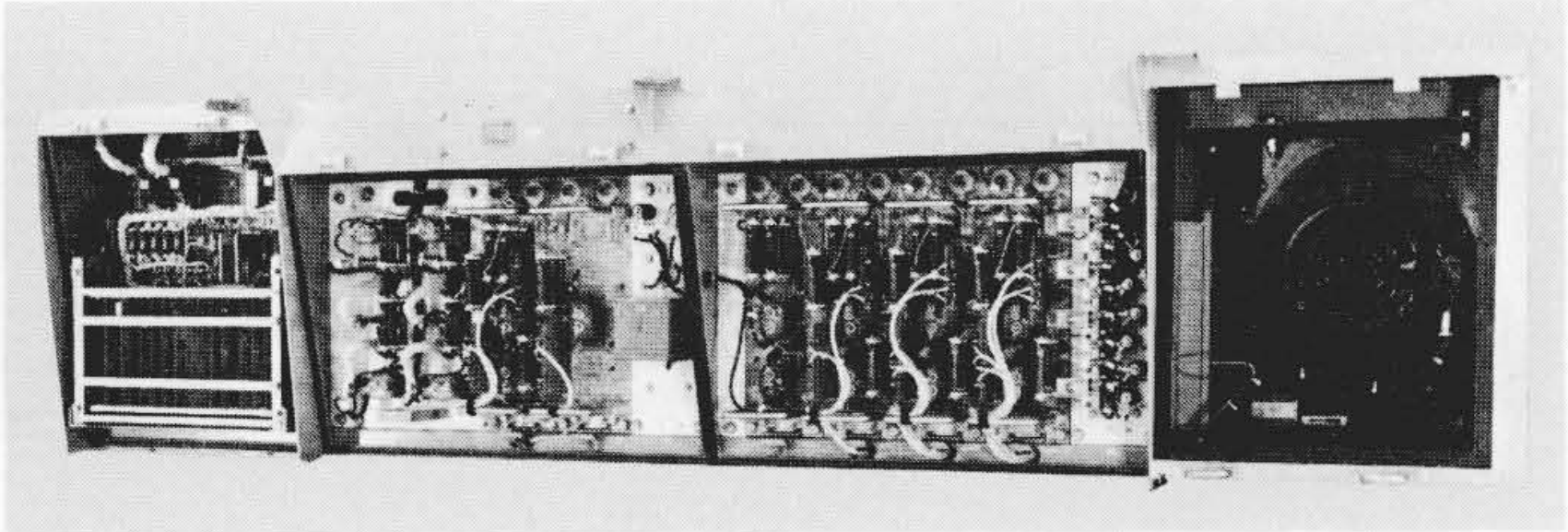


図5 チョッパ装置の外観 主電動機8台を制御する容量をもち、重量は約900kgである。

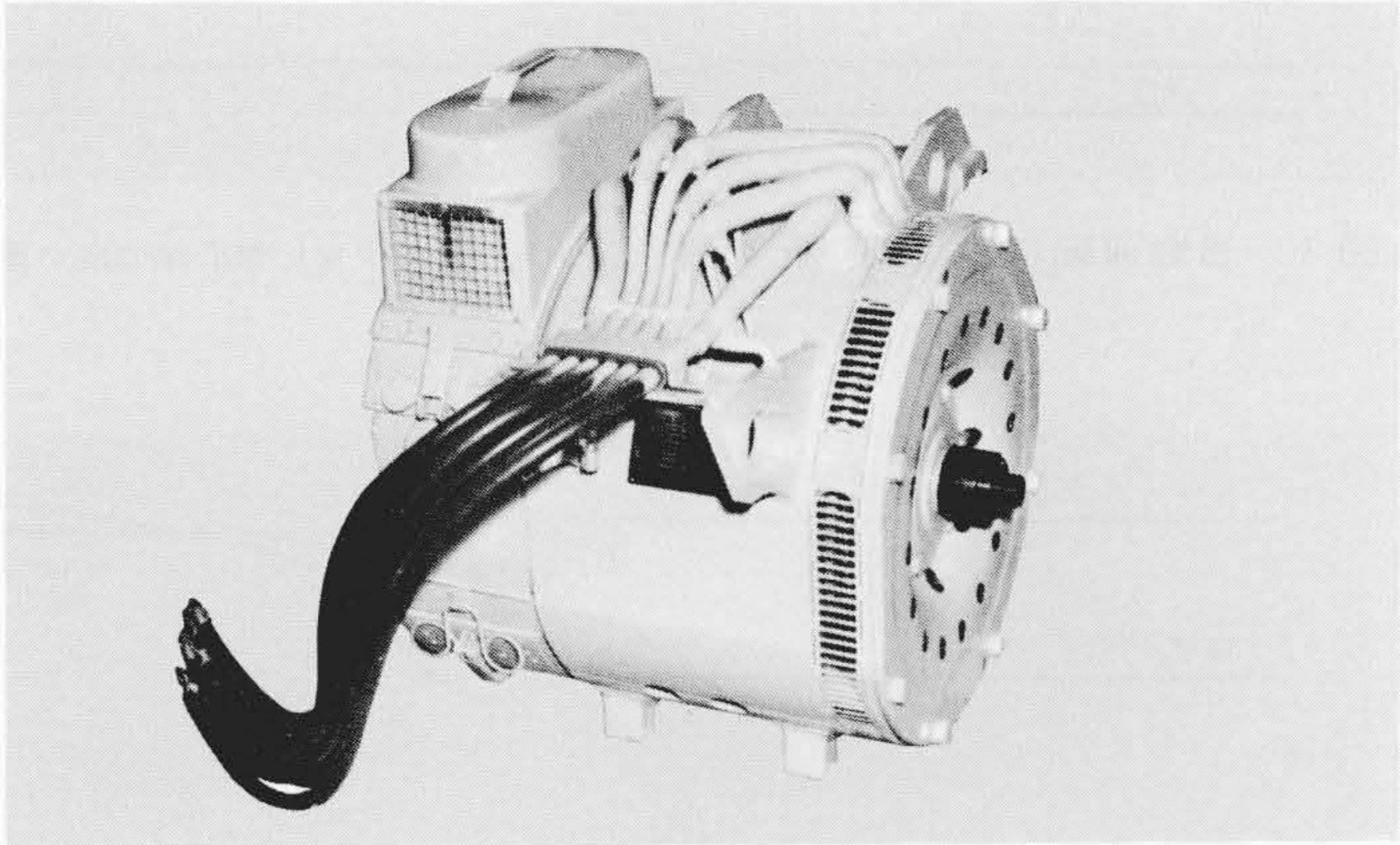


図6 名古屋市交通局納め135kW主電動機 主極界磁は可変界磁と直巻界磁とから成る分割界磁構造である。

脈流率を5%以下とし、安定な脈流整流を得ている。
(2) 過渡時の整流改善としては、補極に積層鉄心を使用して渦流による補極整流磁束の飽和をなくし、整流磁束変化の遅れを少なくする。また、界磁アンペアターンを電機子アンペアターンの2倍以上に大きく取って、整流安定度の向上を図る。
(3) 回生可能な速度範囲の拡大を図るために、最弱界磁での主電動機の整流安定度の向上を図る。

表3に、代表的なチョッパ制御用主電動機の仕様を、図6に名古屋市交通局納め135kW主電動機の外観を示す。

3.5 チョッパ制御システムの試験結果

試験結果の代表例を示すと、次に述べるとおりである。

3.5.1 自動運転時の力行・ブレーキ制御

図7に、上りこう配区間で定速運転を行なっている例を示す。ジャークは、起動時、ブレーキ開始時及び停止時に認められるが、その値は小さく乗心地の良い制御が行なわれている。

3.5.2 チョッパ転流失敗時の保護

図8に、回生ブレーキ時、速度80km/hでチョッパを強制的に転流失敗させた場合の例を示す。この場合でも、高速度しゃ

表3 最近のチョッパ制御用主電動機 これらの主電動機はいずれも直流1,500V用である。

仕 様	納入先	帝都高速度交通営団有楽町線	札幌市交通局東西線	日 本 国 有 鉄 道	名古屋市交通局鶴舞線
1. 主 電 動 機 方 式		分割界磁式	直巻界磁式	直巻界磁式	分割界磁式
2. 定 格		1時間 150kW 375V 440A 2,100rpm 80%F	1時間 70kW 187V 430A 1,900rpm 80%F	1時間 150kW 375V 445A 1,850rpm 85%F	1時間 135kW 375V 395A 1,960rpm 80%F
3. 重 量		750kg	425kg	830kg	690kg
4. 定 格 脈 流 率		2.3% at 660Hz	3.5% at 200Hz	5% at 300Hz	3.1% at 486Hz
5. 最 弱 界 磁 率		38%F	40%F	45%F	39%F
6. 定 格 速 度		50km/h	35km/h	51km/h	49km/h
7. 最 高 速 度		100km/h	75km/h	110km/h	100km/h
8. フル回生ブレーキ初速度(定員乗車時)		73km/h	60km/h	82km/h	68km/h

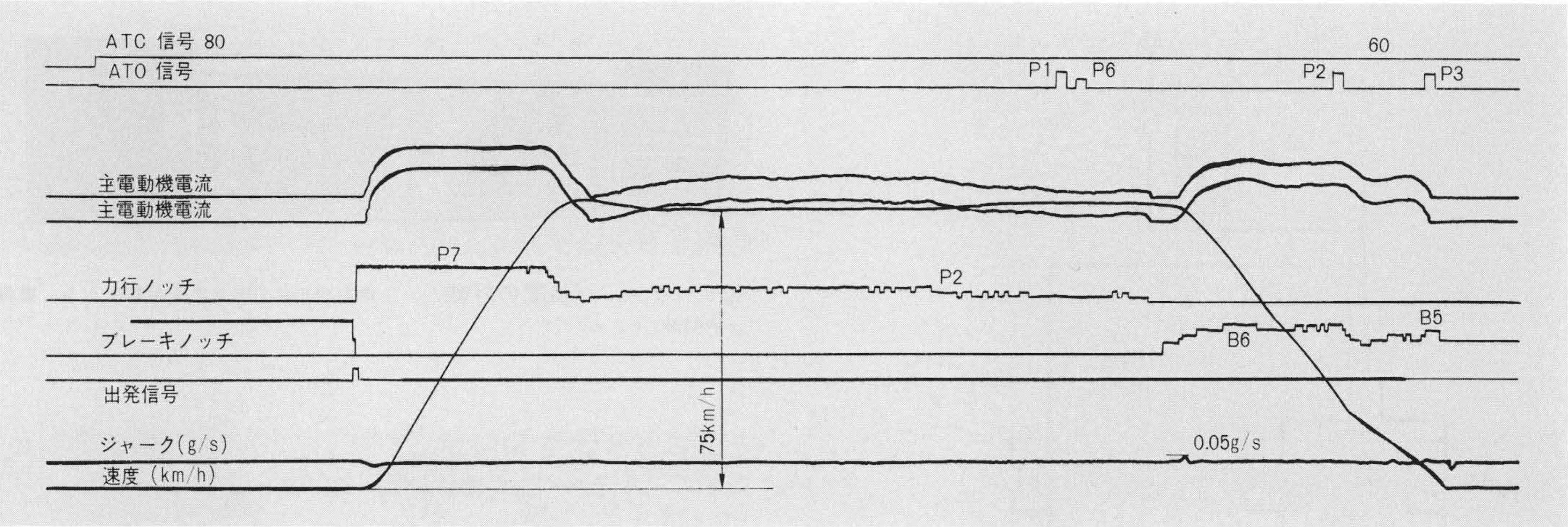


図7 自動運転における走行特性 ジャークの少ない乗心地の良い運転性能が得られている。

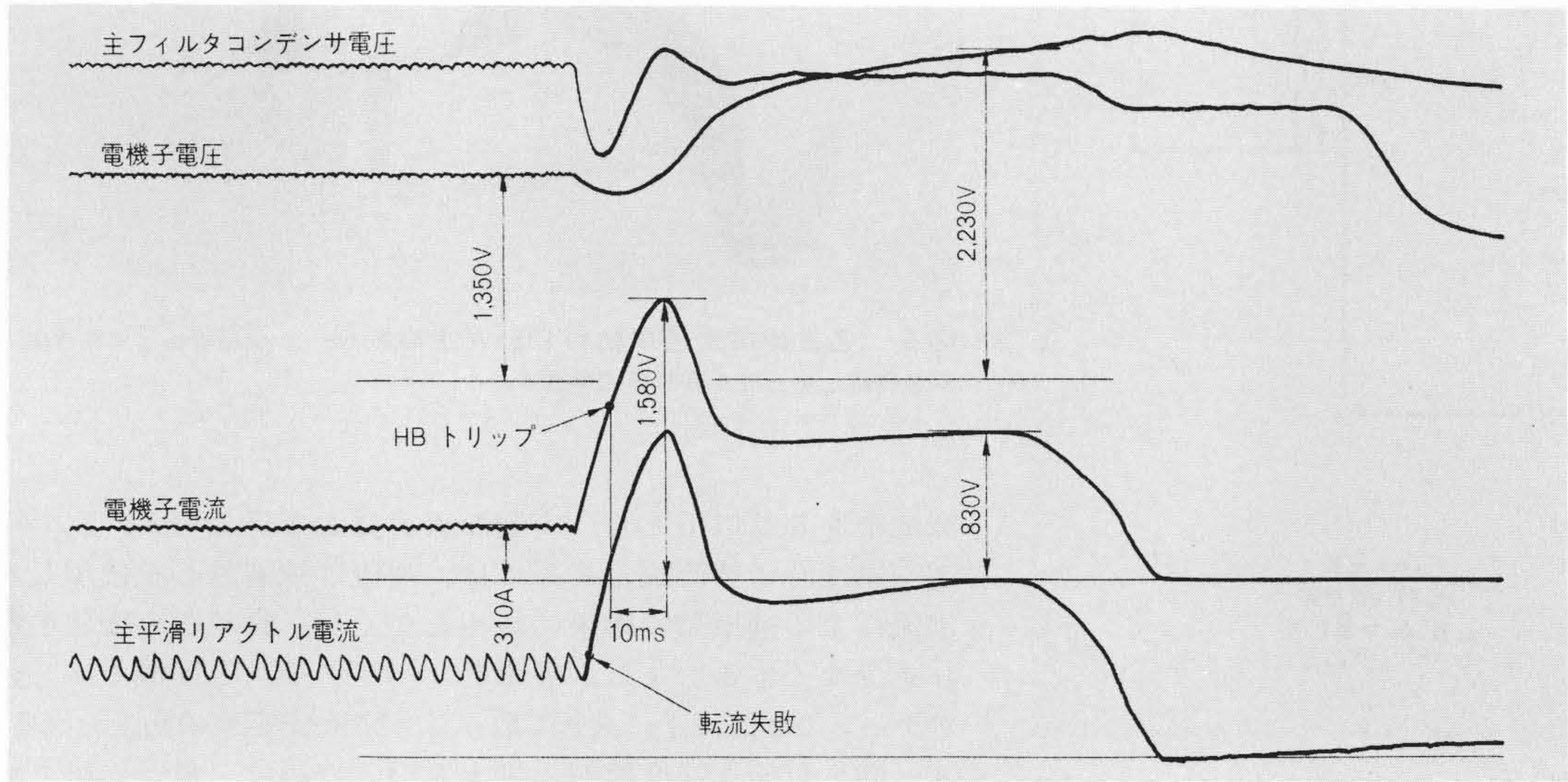


図8 チョップパ転流失敗時の事故電流しゃ断オシログラフ 高速度しゃ断器により事故電流ピーク値は1,600A以下である。

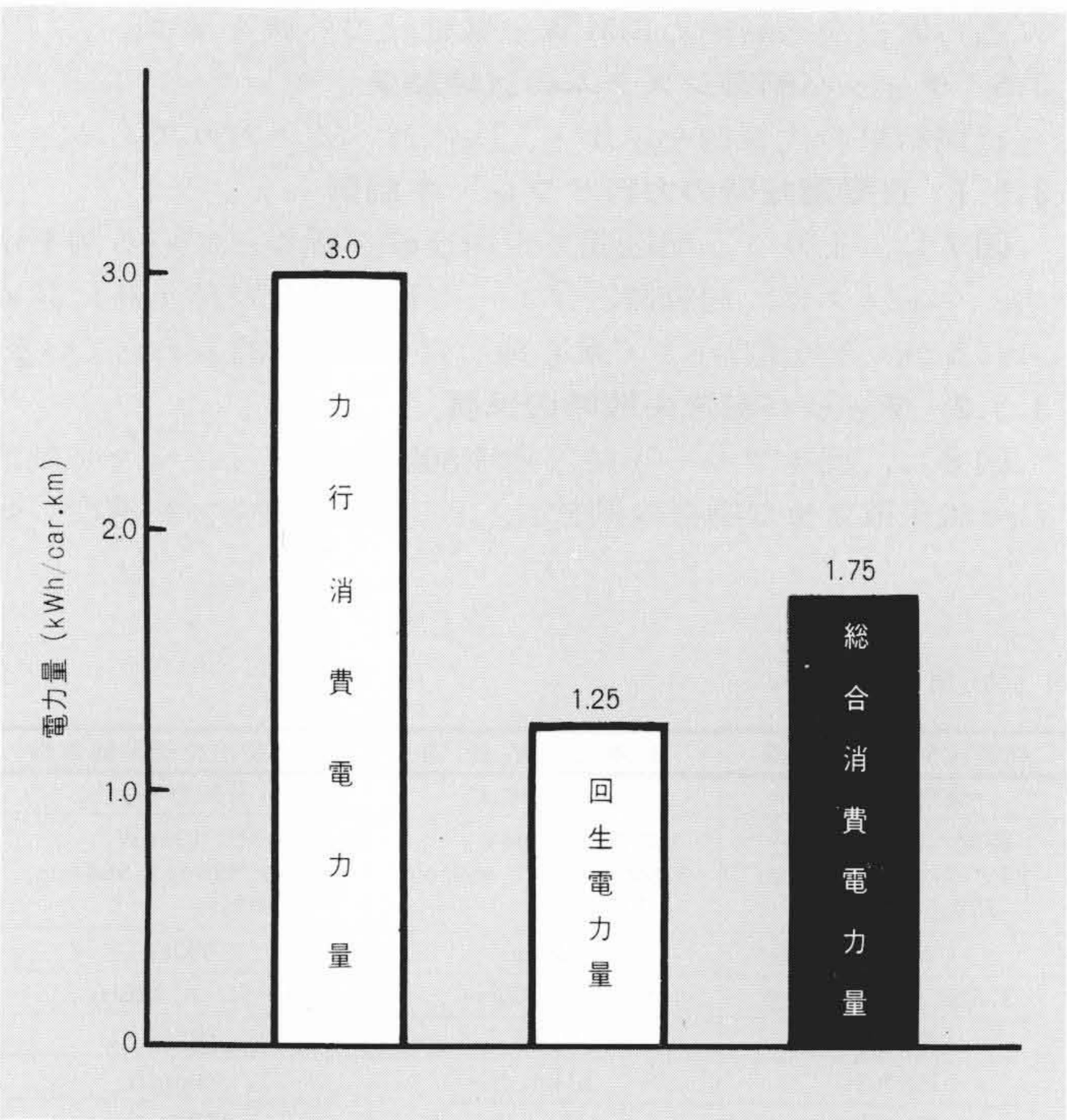


図9 電力消費量実測値 力行で消費する電力の42%が回生される。

断器の動作時間は10msで事故電流のピーク値は主電動機定格電流の4倍程度に抑えられ、主電動機の整流に悪影響を及ぼすことがない。

3.5.3 抑速回生ブレーキを併用した運転時の電力消費量

神戸市交通局の路線では、約30%×4kmのこう配×長があり、下りこう配区間では抑速回生ブレーキが用いられているが、1往復での電力消費量の実測値を図9に示す。回生電力量と力行時の消費電力量の比を回生率と定義すると、回生率は約40%となり、チョップパ制御がいかに省エネルギー化に即しているかが分かる好例といえよう。

4 結 言

以上、日立製作所でのチョップパ制御装置の開発経過と最近のチョップパ制御装置について紹介した。チョップパ制御装置は、電気車の省エネルギー化に好適な制御装置であり、乗心地の向上、省力化のための保守面でのメンテナンスフリー及び運転面での自動運転にも適しており、今後、需要はますます増大されると期待している。

終わりに、一連のチョップパ制御装置の開発に当たって、御指導をいただいた帝都高速度交通営団、日本国有鉄道をはじめ各都市交通局の関係各位に対し深謝の意を表わす次第である。