

日本国有鉄道納め

## 110kW 交流電车用サイリスタモータ

110kW Thyristor Motor for A.C. Electric Car  
Supplied to the Japanese National Railways

Hitachi, Ltd. has manufactured a cyclo-converter type 110 kW thyristor motor set for AC electric car for delivery to the Japanese National Railways.

Under a program of reducing the size and weight of a synchronous motor type thyristor motor for rolling stock, this motor set has been designed for use in researches on its basic performance characteristics, especially in actual application.

In bench tests as well as in a field test conducted last December on the Nippo main line, the motor set displayed satisfactory performance in both powering and regenerative braking operation offering a bright prospect for its application as a new propulsion system for rolling stock.

田所 富男\* Tomio Tadokoro

佐々木昭夫\* Akio Sasaki

高橋 宏\*\* Hiroshi Takahashi

斉藤 範義\*\* Noriyoshi Saitô

立花 恭三\*\*\* Kyôzô Tachibana

奥山 俊昭\*\*\* Toshiaki Okuyama

## 1 緒 言

従来の直流電動機に代わり、整流子がなく、速度制御が容易で、定格回転数を高くして小形軽量大出力化の図れる高性能高信頼度の車両用主電動機の開発が強く要望されている。

これに対し日立製作所では、昭和39年から同期電動機方式の無整流子電動機とサイリスタ変換装置とを組み合わせた、単相交流を電源とする車両用サイリスタモータの研究を進め、100kWサイリスタモータ<sup>(1)</sup>、200kWサイリスタモータ<sup>(2)</sup>などを試作した。また、昭和45年には日本国有鉄道鉄道技術研究所に200kVAサイリスタモータ/コンバータを納入した。

これらの実績を基に、今回、日本国有鉄道に交流電车用110kWサイリスタモータ装置<sup>(3)(4)</sup>を納入した。この装置は同期電動機方式の車両用サイリスタモータの小形軽量大出力化を図るために基本性能を究明し、さらに実際の電車を運転し諸性能を

確認することを目的として製作したものである<sup>(5)</sup>。このため、この装置は次の特長を有している。

- (1) 主サイリスタ変換装置は強制転流装置を必要とせず、重負荷起動が可能で、高速まで安定な運転のできるサイクロコンバータ方式を採用している。
- (2) 電動機は回転電機子形で、電気装荷を高くとり、かつダンパ巻線をなくす方式<sup>(6)</sup>を採用しており小形軽量である。
- (3) 電機子反作用を補償するために電気分配方式と直巻制御を採用している<sup>(2)</sup>。
- (4) 電車の運転制御装置は、力行制御、電力回生ブレーキ制御（停止および抑速）の機能を備えている。

この装置は試験台試験において、所期の性能を持つことが確認された。さらに、昭和47年12月には日豊本線において現車試験が行なわれ、わが国で最初のサイリスタモータ駆動方式電車の本線走行に成功した<sup>(3)</sup>。この結果、サイクロコンバータ式サイリスタモータが、今後の車両用新動力方式として有望であることが明らかにされた。

ここではこの装置の概要と試験結果について述べる。

表1 110kWサイリスタモータ装置のおもな仕様 MT970形電動機1台分を示す。

Table 1 Specification of 110kW Thyristor Motor

項 目	仕 様
電 気 方 式	AC 1 φ, 60Hz, 20kV
運 転 速 度	定格 63km/h, 最高 95km/h
サイリスタモータ	
主 電 動 機 (MT970形)	同期電動機方式 110kW, 320V 280A, 2,280rpm, 回転電機子形
サイクロコンバータ	入力: AC 1 φ, 60Hz, 420V 出力: AC 3 φ, 0~120Hz, 320V
転 流 方 式	起動時: 電源転流, 中速以上: 負荷転流
分 配 方 式	低速時: 機械分配, 中高速時: 電気分配
主平滑リアクトル	オープンコア形, 7mH×2, DC360A
力行制御方式	定電流, 定電圧位相制御
ブレーキ制御方式	停止用および抑速用電力回生ブレーキ付

## 2 仕様および構成

## 2.1 仕 様

サイリスタモータ装置のおもな仕様は表1に示すとおりである。また、図1は主回路方式を示すものである。

## 2.2 構 成

今回製作納入したサイリスタモータ装置は図2に示すとおり、主電動機、サイクロコンバータ、主平滑リアクトル、制御装置および接触器箱で構成されている。

## 2.2.1 主電動機

本機は車両用サイリスタモータの設計上の要因を把(は)握し、小形軽量化、出力の増大を図るための試作要素を含んでおり、種々構造上の特長を有している。

- (1) 一般産業用で用いられているつめ形磁極付電動機では寸法重量が増大するので、本機は巻線形の構造としてある。ま

\*日立製作所水戸工場

\*\*日立製作所日立工場

\*\*\*日立製作所日立研究所

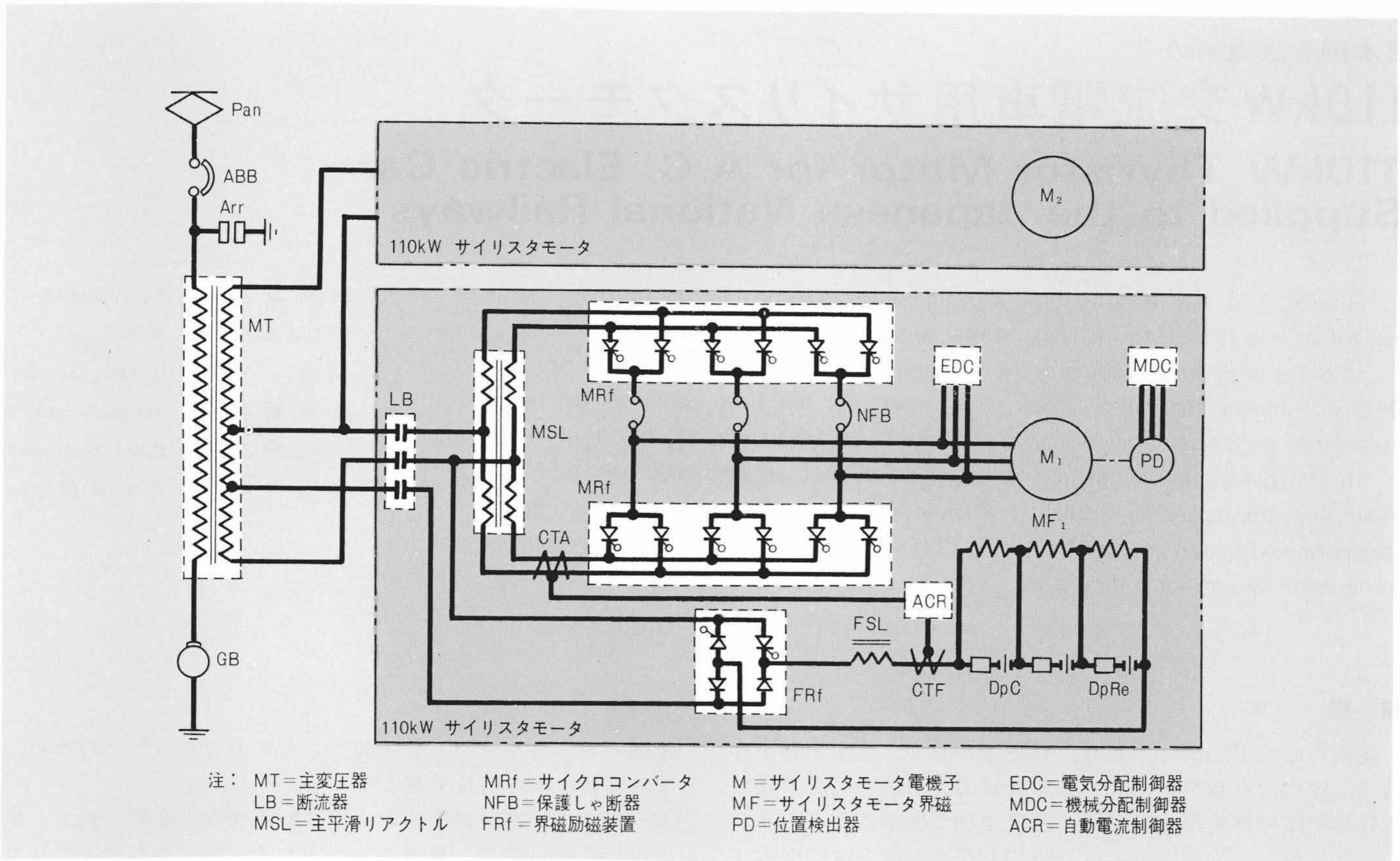


図1 主回路つなぎ 電車に搭載した場合の主回路つなぎである。主電動機回路は2グループに分離され、単独および並列運転が可能である。

Fig. 1 Main Circuit Diagram

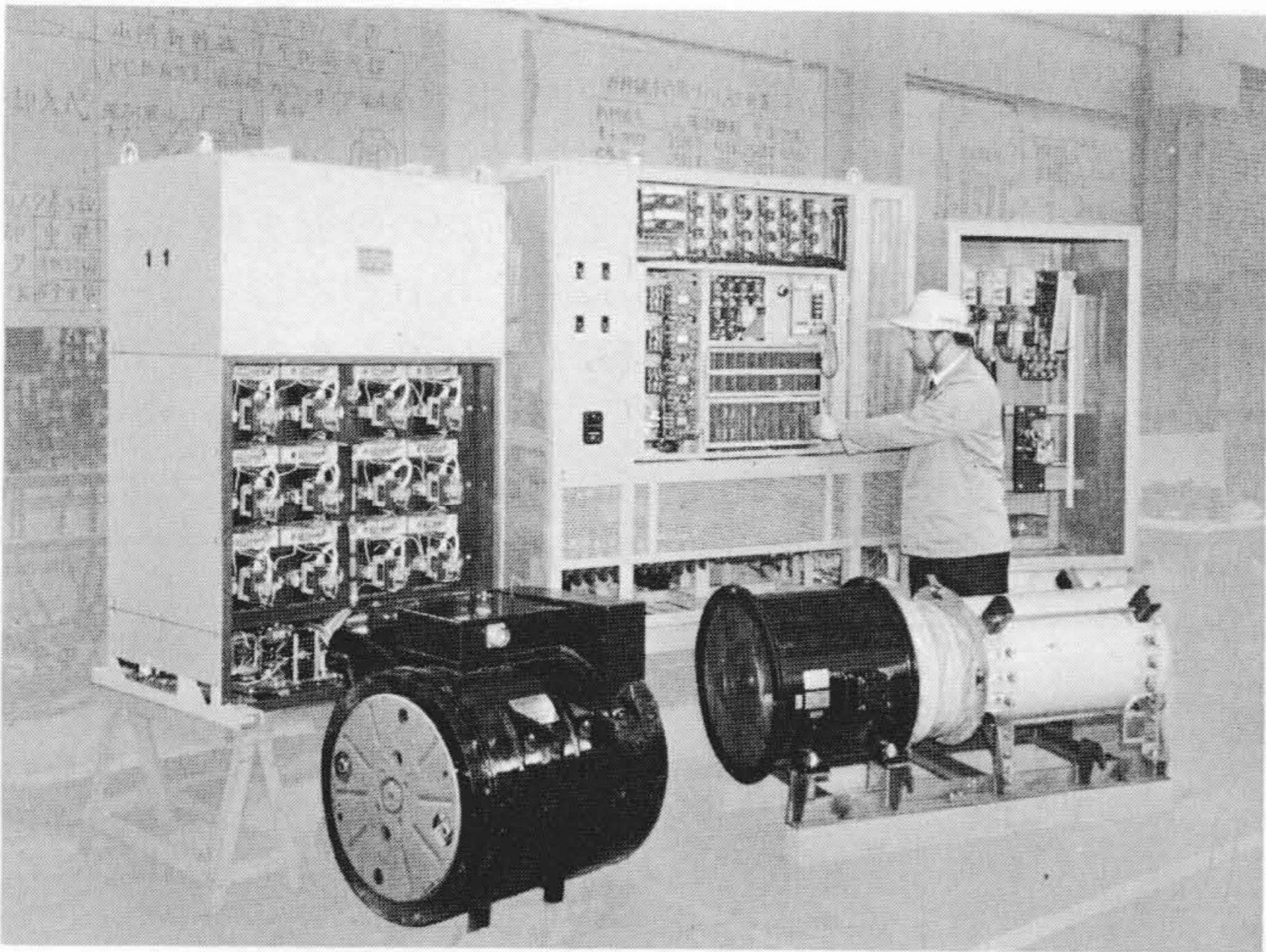


図2 110kWサイリスタモータ装置 主電動機を除く各機器は、各種特性測定を便利とするため、客室内設置構造とした。

Fig. 2 110kW Thyristor Motor Set

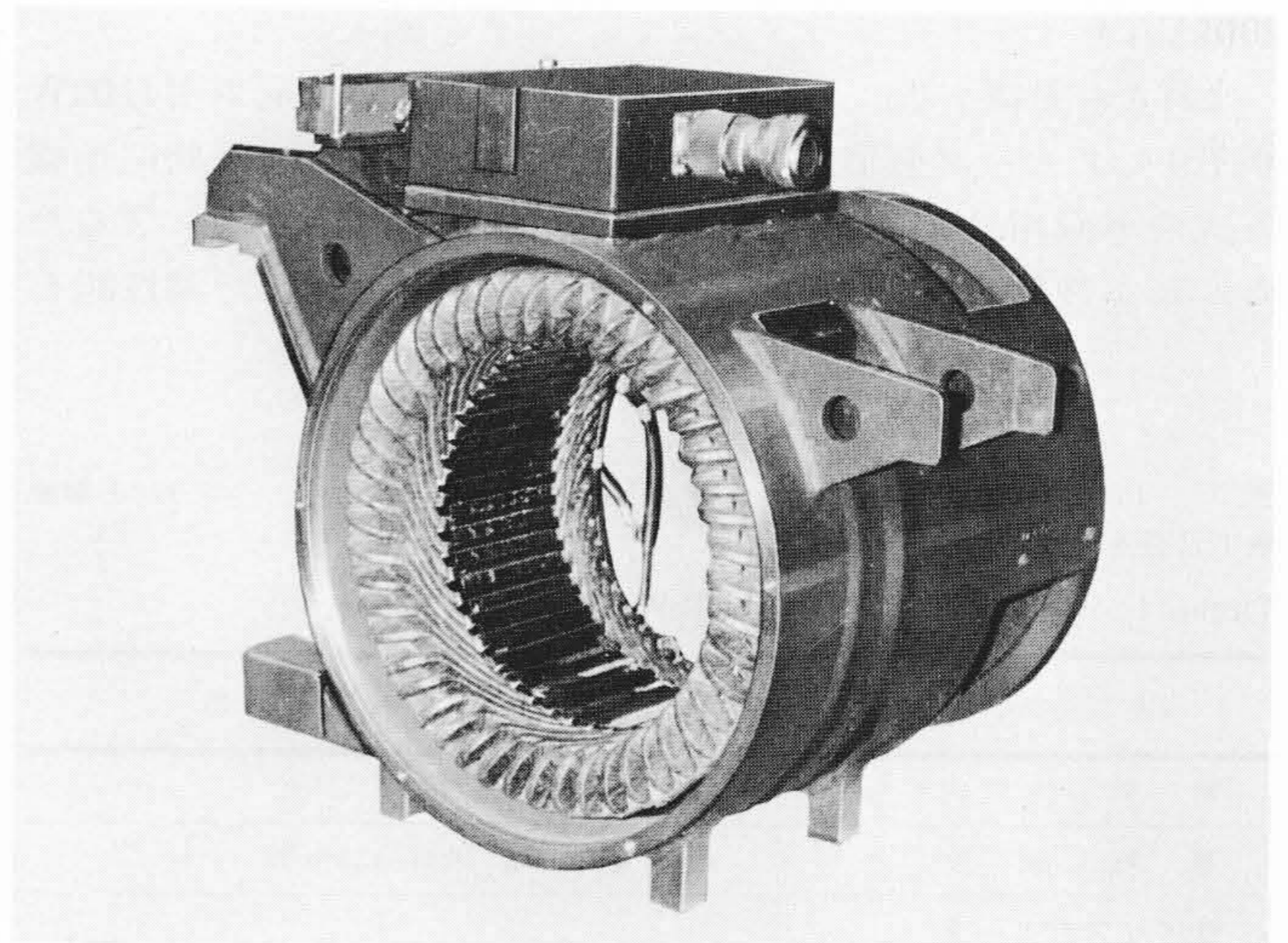


図3 110kW主電動機固定子 2層3分割された分布巻界磁を示す。固定子わくは磁気通路を兼用する。

Fig. 3 Stator of 110kW Traction Motor

た製作実績のある回転界磁形<sup>(4)</sup>のものに比較するためと、界磁巻線の構成に後述の点を考慮して自由度をもたせること、さらにアンペア回数の小さい電機子を回転子側にして外径を小さくし、主電動機の高速度回転を可能とするため回転電機子形を採用している。

(2) 電機子の電気装荷を転流リアクタンスの許容範囲内で従来の車両用直流機と同程度以上に高くとり、回転機の小形軽量化を図った。

(3) 固定子側の界磁巻線は図3に示すように2層3分割分布巻きにして電気ダンパ方式<sup>(6)</sup>を採用し、ダンパ巻線なしでもダンパ巻線付の電動機と同程度以上に転流リアクタンスの小さい電動機とした。

(4) 界磁巻線は、電機子電流に比例して通流する他励直巻巻線として使用できるほかに、3分割巻線の中の一巻線を用いて主界磁と直交する起磁力を生ずる補償巻線の効果も、比較試験できるようにした。

(5) 通常は起動時、低速時のみに用いている位置検出器<sup>(7)</sup>の信号を高速まで用いて、機械分配式だけの運転も可能とした。

これらのほかに、3年間の無給油無分解を図り封入板を用いる構造を一段と簡単化したバック式軸受、摺(しゅう)動特性のすぐれたタンデム形複式定圧ブラシ保持器(図4参照)および固定子回転子とも無溶剤エポキシ樹脂一体のフィルム絶縁などの無保守化技術を採用し、車両用回転機として高信頼度化を図っている。

無整流子電動機は定格回転数を高くとり、小形軽量、出力増大を図ることを特長とするが、今回は、既存の電車に取り付けるために定格回転数は特に高くはない。しかし従来の車両用直流機と比較して、出力あたりの重量は軽くなり、トルクあたりの重量でも同程度に軽量化することができた。

### 2.2.2 サイクロコンバータ

主サイリスタは、2,500V、400Aの素子12個の保守点検を容易にするためにユニットセル化し、強制風冷している。

素子数は、耐圧的には電源側しゃ断器のスイッチングサージと雷サージ用避雷器動作時を考慮し、電流的には定常負荷条件を満たし、かつサイリスタモータ側の事故電流に対しても十分耐えられるようにする必要がある。これに対し高耐圧標準素子を用い、ゲートシフト方式<sup>(4)</sup>としゃ断器の併用による過電流保護方式を採用し、1S1P12Aと最も簡単な素子構成とした。

### 2.2.3 制御装置<sup>(3)(4)(8)~(10)</sup>

本装置は、サイリスタモータの速度制御装置、力行運転一回生ブレーキ運転切換装置および保護装置など一式を収納したもので、制御ブロック図は図5に示すとおりで、以下はその

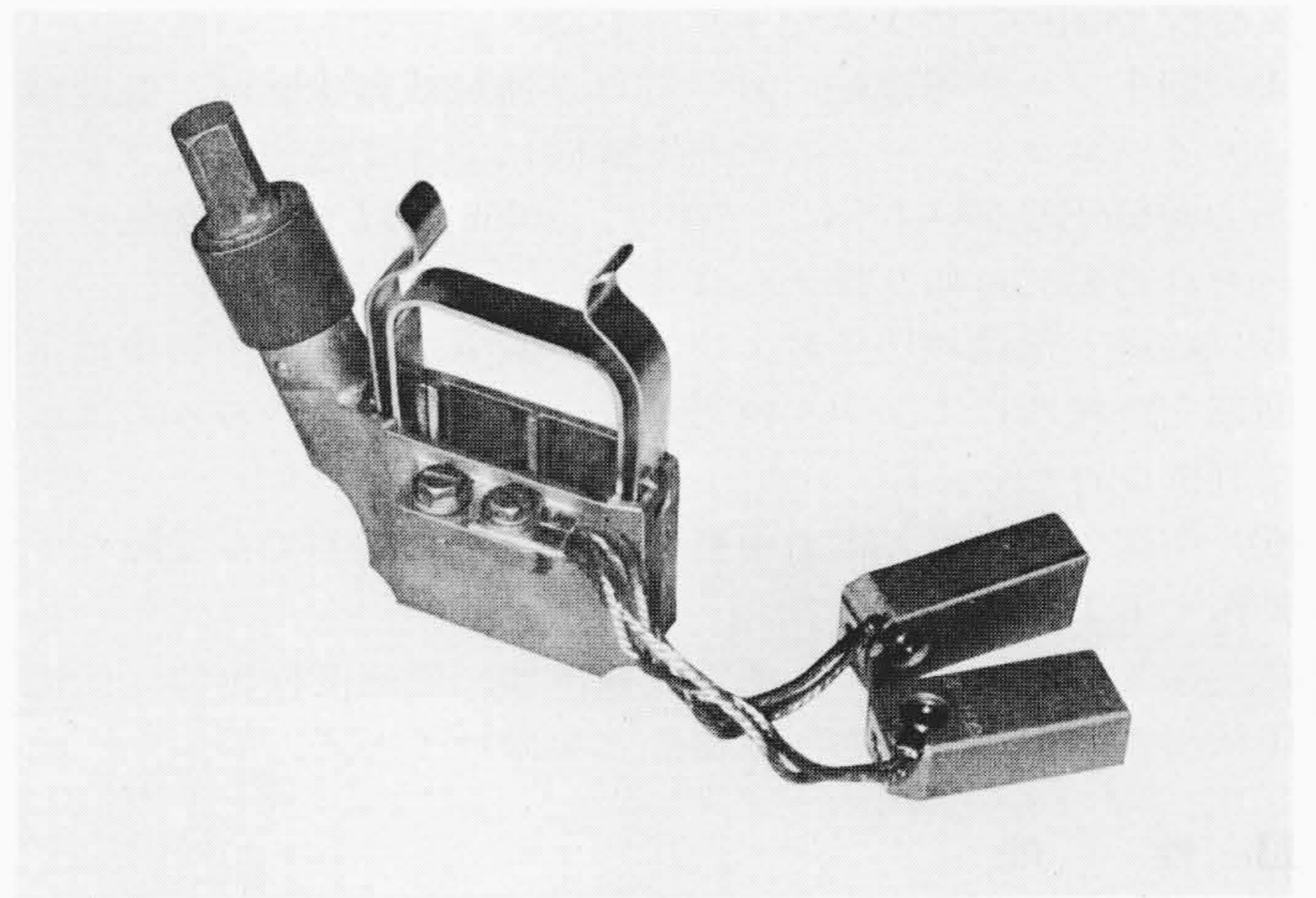


図4 タンデム形複式定圧ブラシ保持器 複式の定圧押えばねによりブラシの摺動特性を向上させタンデム形ブラシを用いて電流量の増大を図っている。

Fig. 4 Constant Pressure Brush Holder with Tandem Brush

の作用および機能を示すものである。

- (1) サイリスタモータの電機子側はサイクロコンバータで制御し、界磁側は界磁励磁装置で他励制御している。
- (2) 力行運転は電機子電流と界磁電流が比例する直巻特性となるように自動制御し、定電流制御および自動電圧制御装置付としている。
- (3) 起動時および低速域は機械分配で制御し、中高速域は電

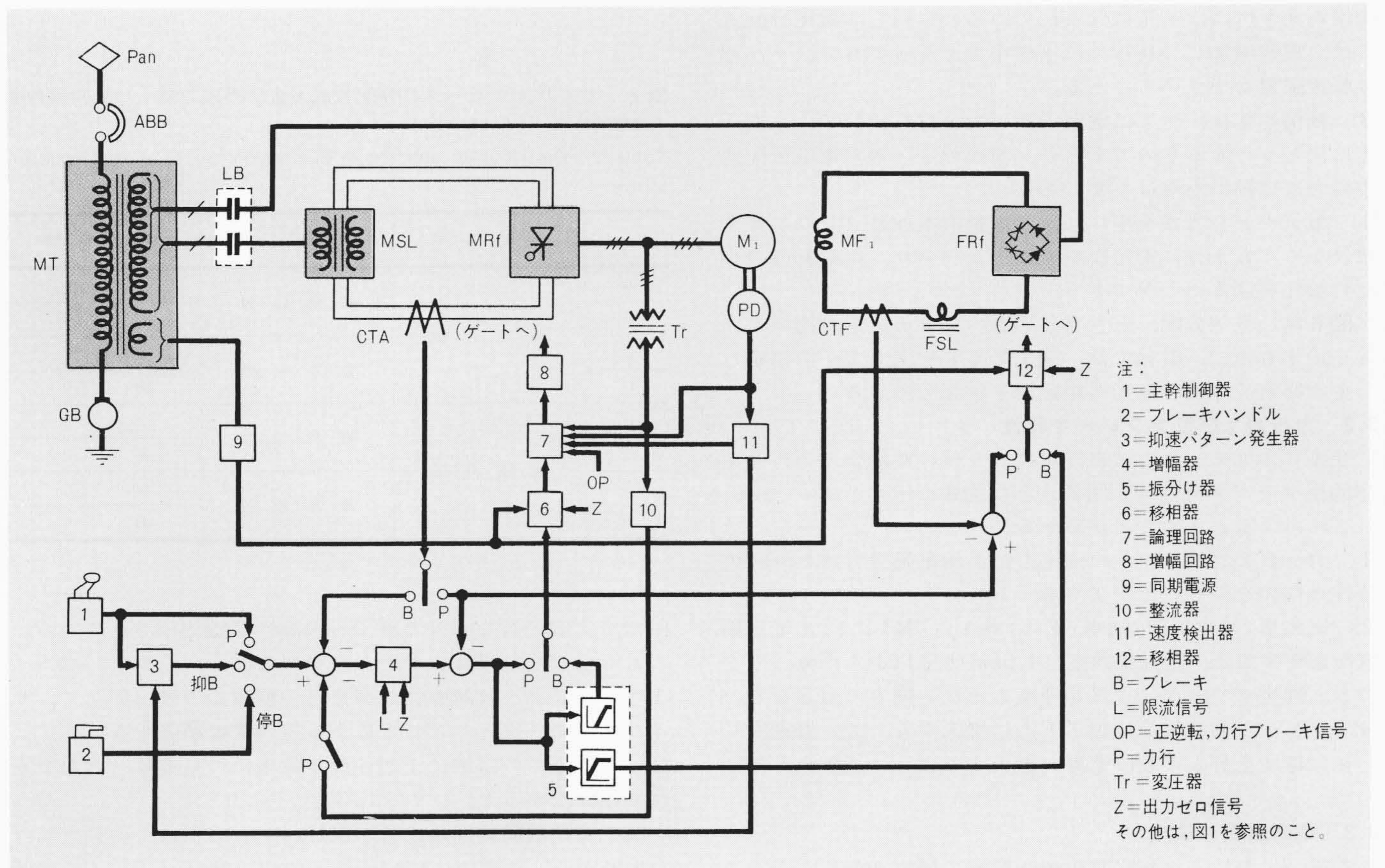


図5 制御ブロック図 試験電車を図1のM<sub>1</sub>で運転する場合の制御ブロック図である。

Fig. 5 Block Diagram of Control Circuit

気分配で制御して大きなトルクを得るようにしている。

(4) 回生ブレーキ運転においては高速域は界磁制御、低速域はサイクロコンバータのゲート制御によって低速までブレーキ力が低下しないようにしてあり、10km/h以下から空気ブレーキに自動的に切り換えられる。

(5) 前進と後進の切換および力行と回生ブレーキの切換は主回路を接触器により切り換えることなく制御信号のみによって制御されている。

(6) 架線電圧変動、電力中断および停電に対しても支障なく動作するようにしてある。

(7) 保護装置としては、過電流検出器、過速度検出器、低電圧検出器および保護しゃ断器などを設けている。

### 3 性能

#### 3.1 主電動機特性

サイクロコンバータ式サイリスタモータでは、電動機の誘起電圧によりサイリスタを転流させる。ところで、電機子電流を増加させると、電機子反作用によって界磁起磁力が偏磁を受け、誘起電圧が低下する。この電機子反作用を補償するには、分配方式と界磁制御の両面から行なう必要がある<sup>(4)</sup>

日立製作所は、車両用サイリスタモータとして、電気分配方式、直巻界磁方式を提案してきたが<sup>(2)</sup>本機を用いて表2に示すような分配方式、界磁方式について特性比較を行なった。

その結果、次のことが明らかとなった。

(1) 分巻界磁では電機子反作用の影響が大きく、過負荷耐量が小さいのに対し、直巻界磁ではその影響は小さく、定格電流の140%過負荷でも安定な転流動作が得られた。

(2) 直巻界磁特性の場合、分配方式によってそれほど特性の違いはないが、電気分配式では全電流域にわたって、実効制御進み角 $\gamma$ がほぼ一定に保たれているのに対し、機械分配式では、電流増加につれ徐々に $\gamma$ が小さくなっており、それだけ転流限界が小さいといえる。

(3) 補償巻線は、おもに電機子起磁力を打ち消して、 $\gamma$ を一定に保とうとするものであるが、前述のことから電気分配式の場合には補償巻線は不要である。

(4) 電気ダンパ方式を用いれば、電動機本体にダンパ巻線を設けなくても十分に安定な転流動作が得られ、主電動機の小型軽量化を図ることができる。

図6は、電気分配、直巻界磁制御の場合の主電動機特性曲線を示すもので、横軸には、図1のCTA(変流器)で測定した主回路直流電流と電動機相電流を併記している。

#### 3.2 力行および回生ブレーキ特性

サイリスタモータを試験電車に取り付けた場合の力行および回生ブレーキ特性は、図7および図8に示すとおりである。

これによると次のことがわかる。

(1) 力行および回生ブレーキともに直流電動機方式と同様の特性と性能を得ることができる。

(2) 電動車(M車)と付随車(T車)各1台(MT比1)の電車編成を想定すると、起動加速度は1.5km/h/s以上を得ることができ、回生ブレーキによる減速度もそれと同等の値となる。

(3) ブレーキ力は電流増加とともに増大するので、抑速ブレーキは速度上昇とともに電流が増大するように制御すればよい。

#### 3.3 電源高調波電流

本線上における試験電車の走行試験で障害が発生しないことを確認するため、納入前に電源高調波電流を測定した。この結果の一例を図9に示した。測定は電源周波数50Hz、主変

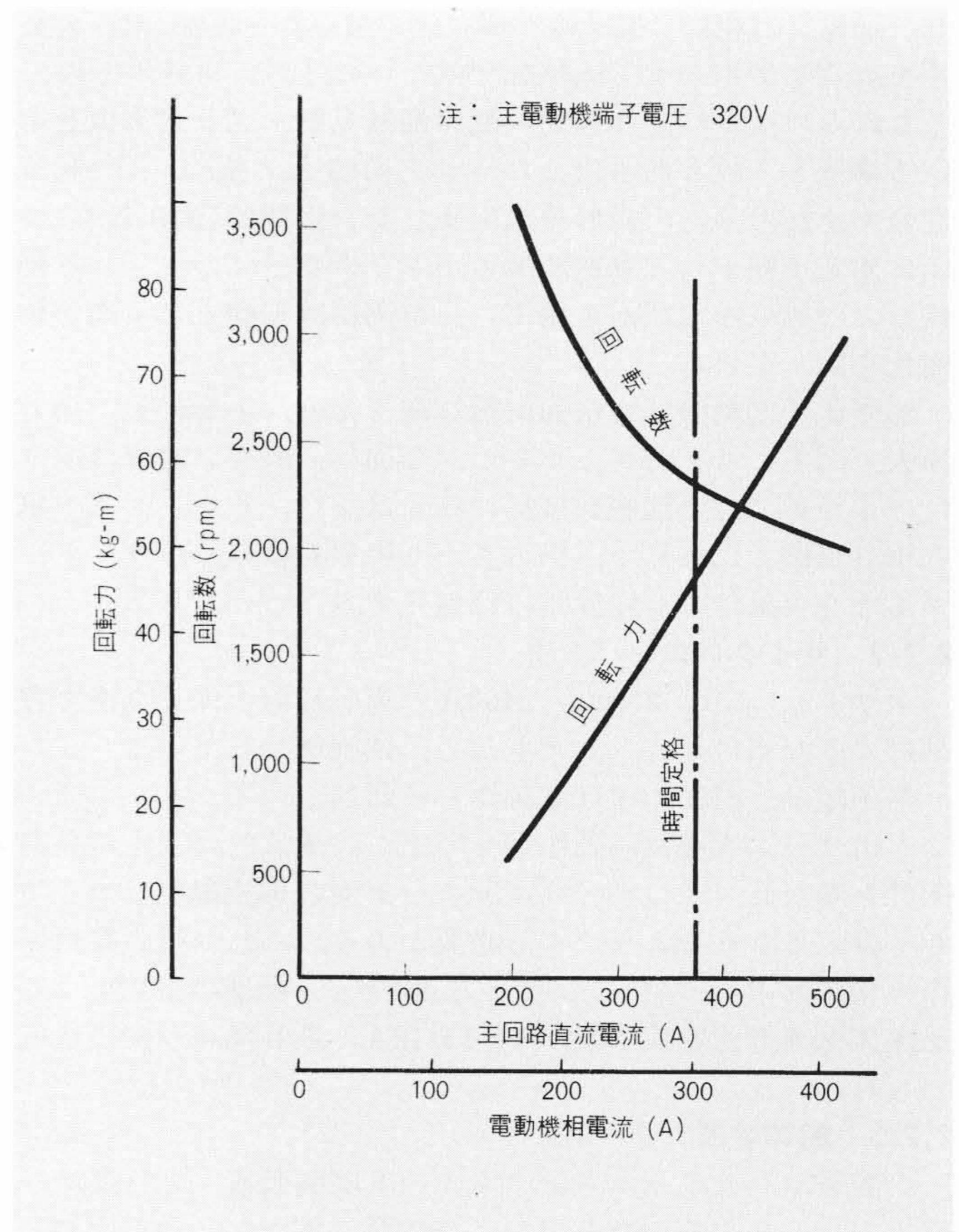


図6 110kWサイリスタモータ特性曲線 主電動機端子電圧320Vにおいて、電気分配、直巻界磁制御を行なったときの特性を示す。

Fig. 6 Characteristic Curves of 110kW Thyristor Motor

表2 サイリスタモータの分配方式および界磁方式 電機子反作用の補償効果について比較したものである。

Table 2 Distribution and Field Excitation System of Thyristor Motor

方式	分配方式	主界磁特性	補償巻線
A	電気分配	直巻特性	なし
B			あり
C		分巻特性	なし
D			あり
E	機械分配	直巻特性	なし
F			あり
G		分巻特性	なし
H			あり

圧器二次側で行なわれたが、一次側換算値で示されている。

おもな測定結果は次のとおりである。

(1) 電源高調波は誘導性負荷を持つ整流器とほぼ同じで、サイリスタモータとしたことによる特殊性は顕著でない。

(2) 本線上での試験に予想される障害については、次のように問題はなかった。

(a) 分倍周軌道回路成分(30Hz相当の25Hz)の最大値は0.25Aで、許容値(1.8A)より十分に低い。

(b) 等価妨害電流 $J_p$ の最大値は約0.5Aで、従来の車両より十分に低い。

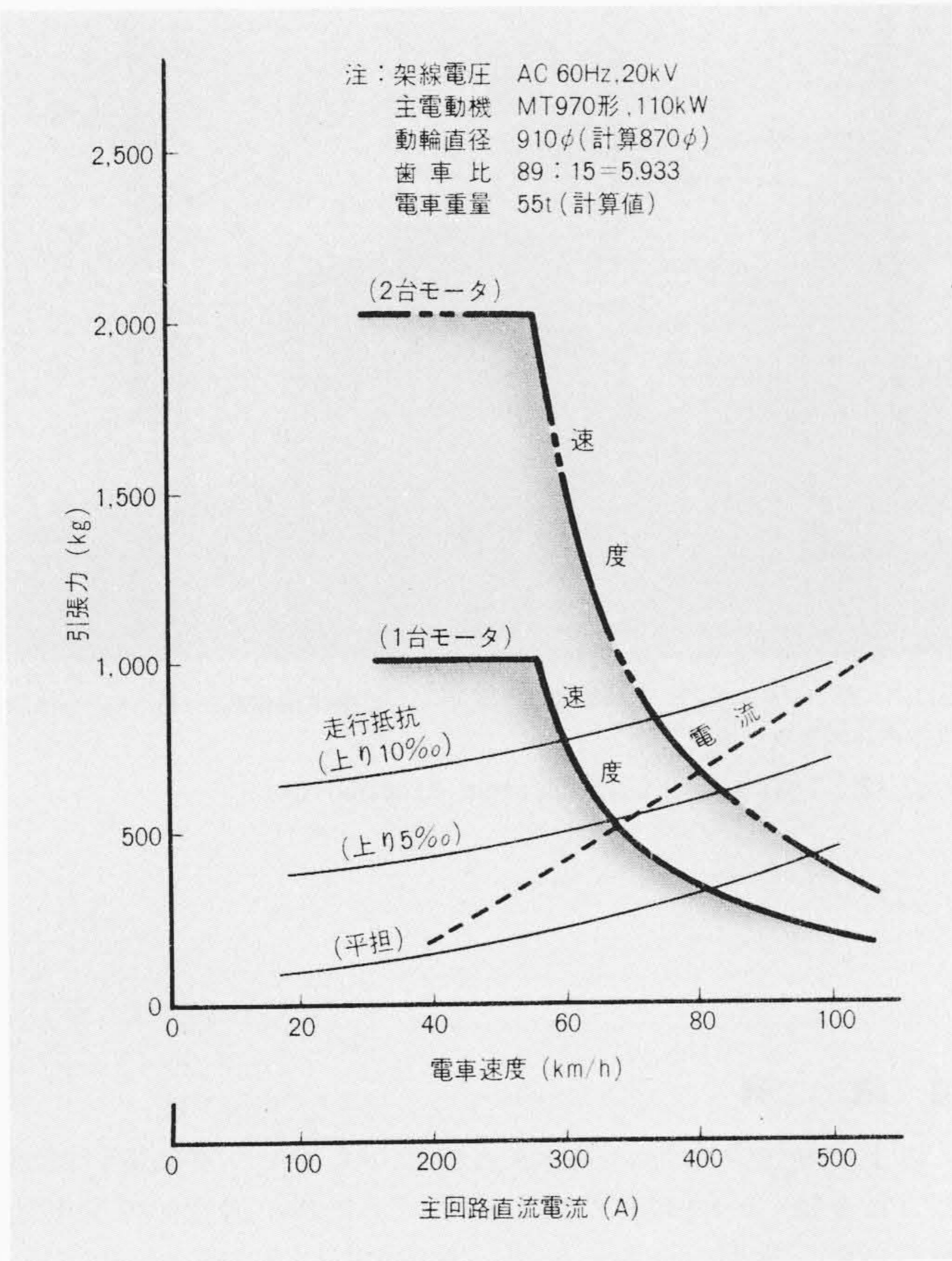


図7 力行特性曲線 試験電車を電動機1台で駆動する場合の特性を実線で、MT比1の電車編成を想定して電動機2台の場合を鎖線で併記した。  
 Fig. 7 Characteristics of Powering Operation

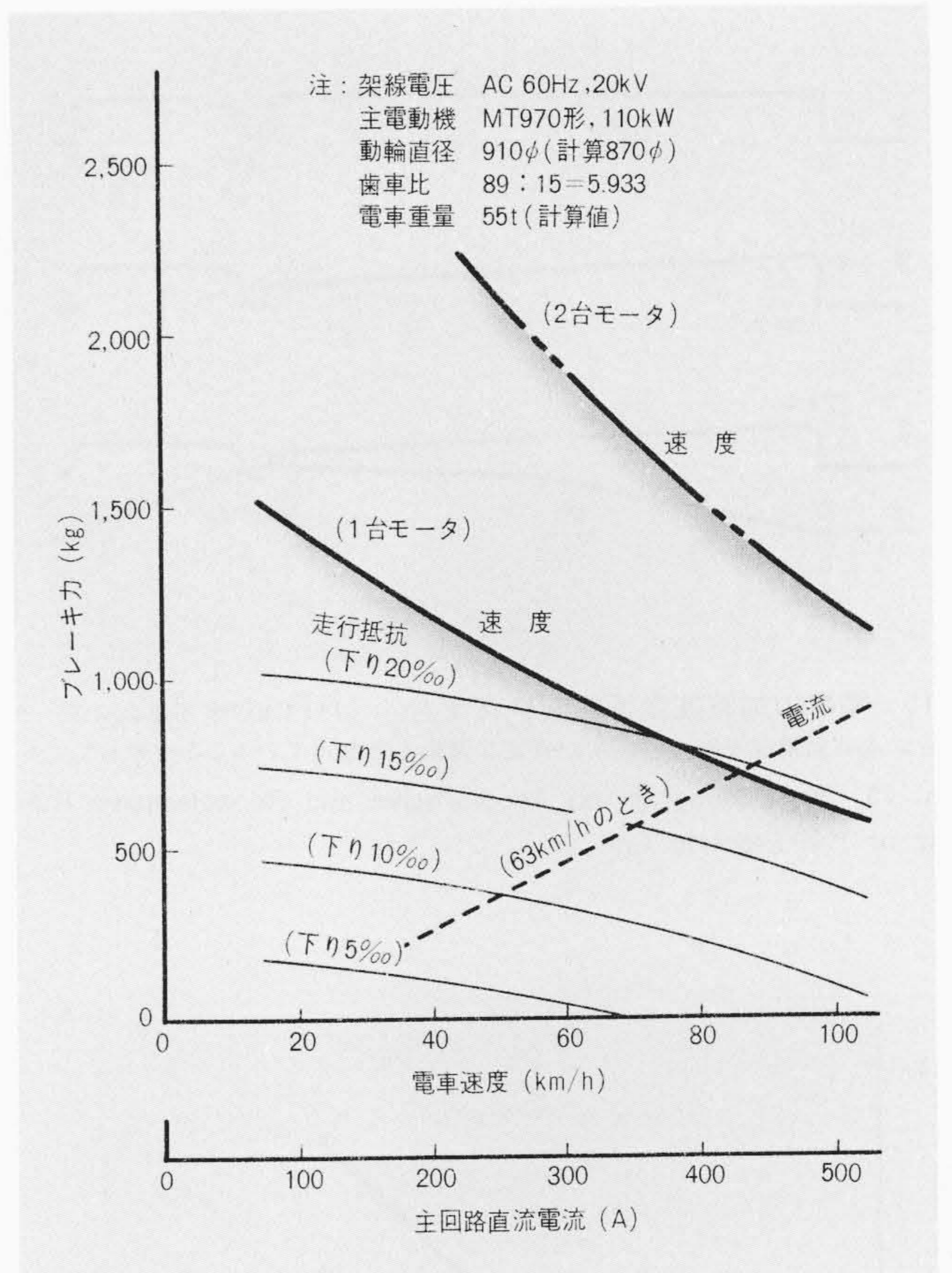


図8 回生ブレーキ特性曲線 試験電車を電動機1台で制動する場合の特性を実線で、MT比1の電車編成を想定して電動機2台の場合を鎖線で併記した。  
 Fig. 8 Characteristics of Regenerative Braking Operation

#### 4 試験電車の走行試験<sup>(3)(4)</sup>

試験の概略内容は次のとおりであった。

- (1) 試験の目的：サイリスタモータによって電車を駆動して問題ないことを確認するとともに力行および電力回生ブレーキ性能を確認し、将来の設計資料を得ること。
- (2) 試験期日：昭和47年12月12日～16日（5日間）

- (3) 試験線区：日豊本線 柳ヶ浦～杵築間（約30km，最大こう配上り15‰，下り25‰）
- (4) 装置のぎ装：クモヤ 791形交流試作電車の台車に日立製作所製のサイリスタモータを取り付け、その制御機器を客室内に仮設した。他社製は別の台車に取り付けられた。

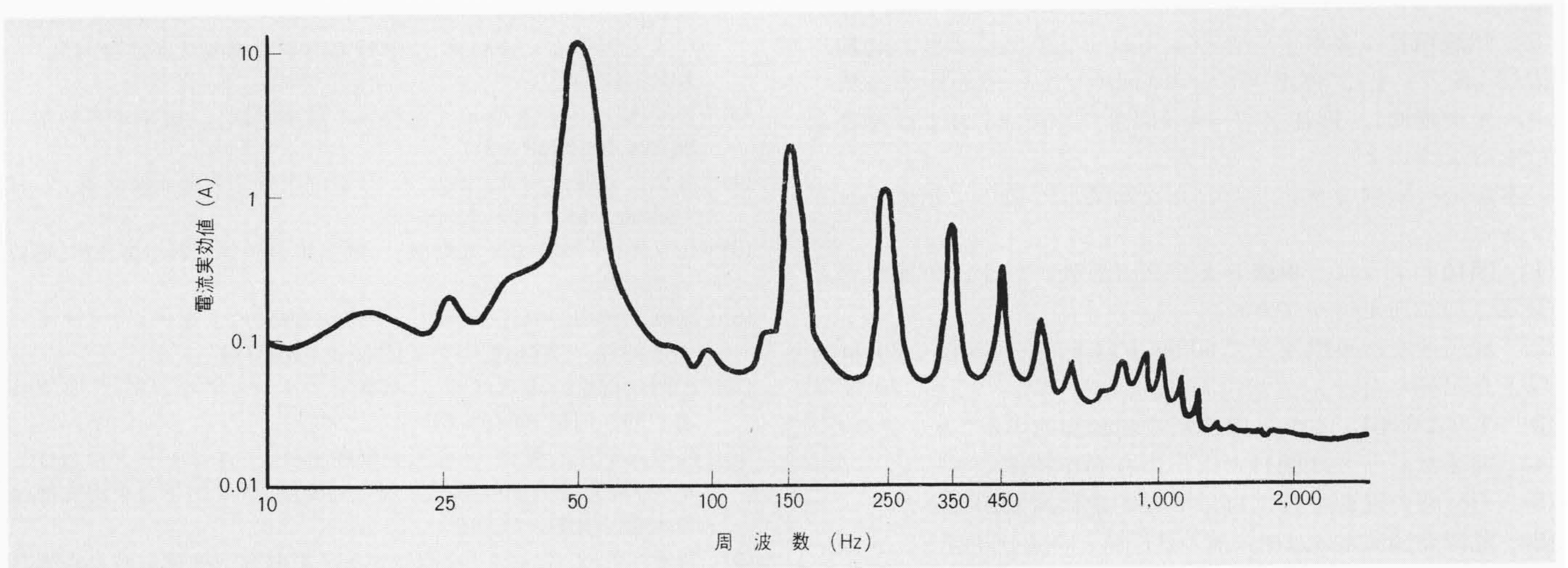


図9 電源電流の周波数分析結果 納入前に測定したもの。基本波(50Hz)とその奇数次調波成分が主体であるので、誘導性負荷を持つ整流器とほぼ同じ特性といえる。

Fig. 9 A Result of Frequency Analysis of Source Current

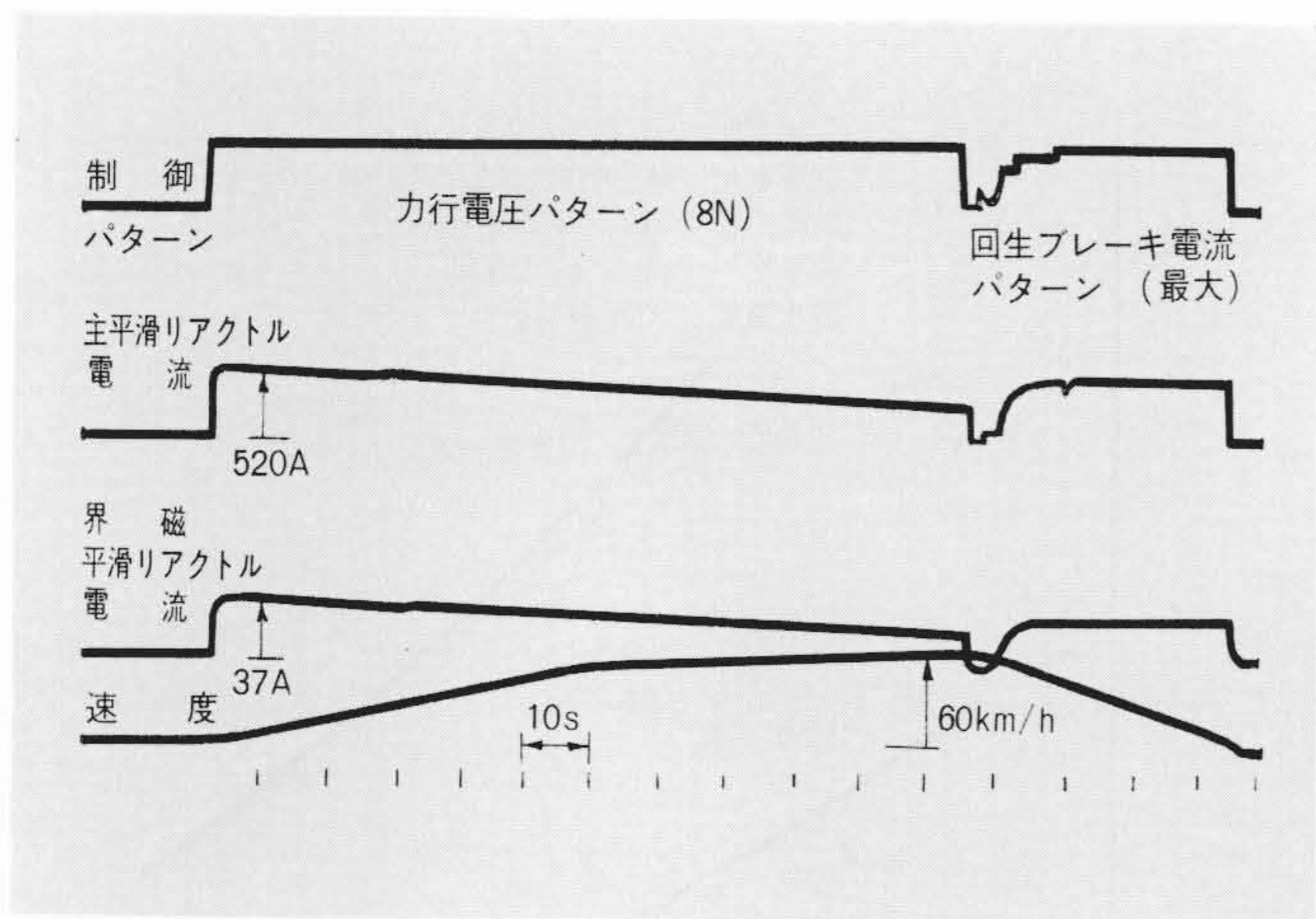


図10 電車の加減速走行オシログラム MT970形サイリスタモータ1台による加減速走行の一例で、安定な運転を行なっていることを示している。  
Fig. 10 An Oscillogram on Accelerative and Decelerative Running of the Electric Car

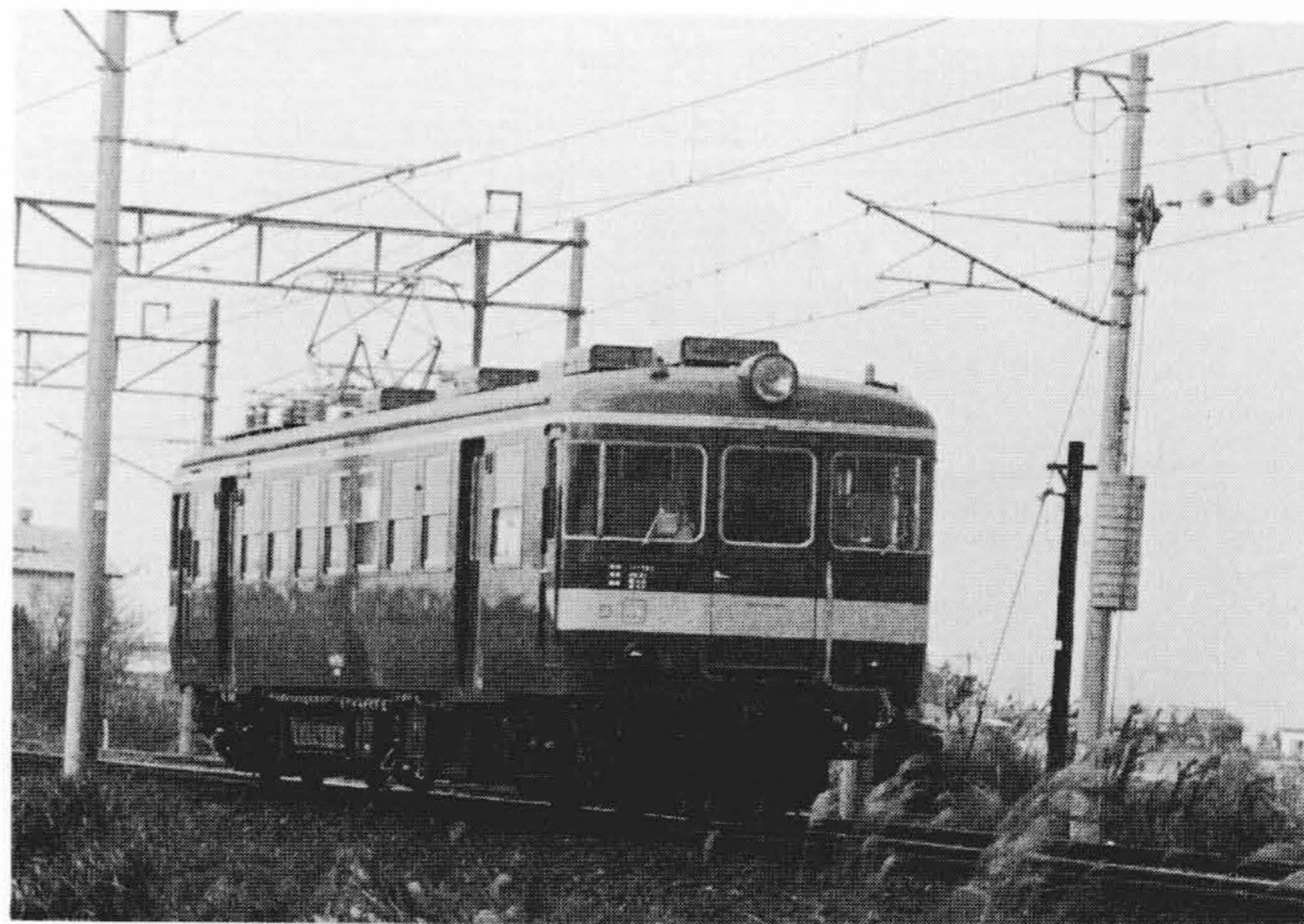


図12 サイリスタモータ式試験電車 日豊本線豊前長州駅付近を快調走行中の試験車を示す。

Fig. 12 Thyristor Motor System Electric Car

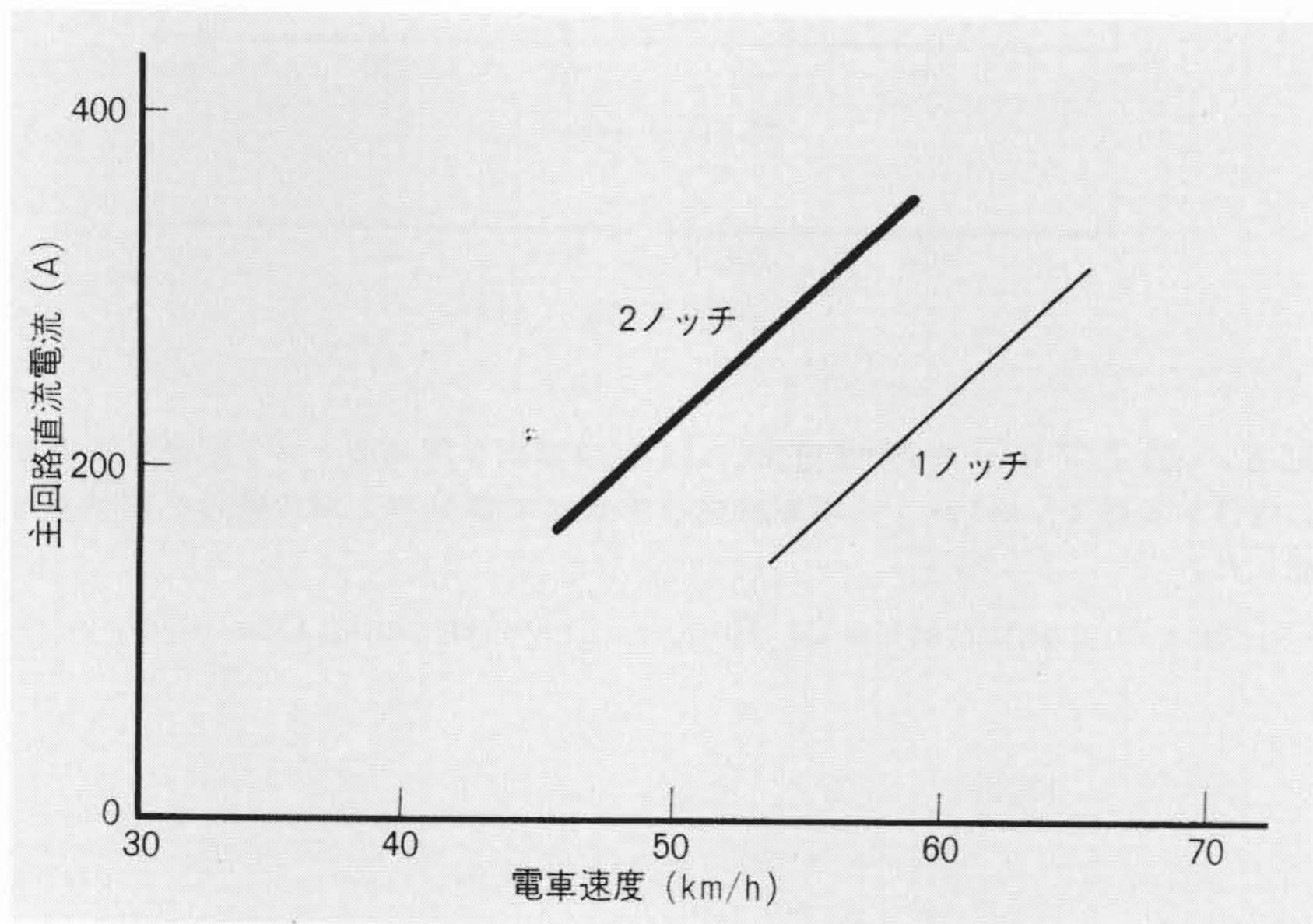


図11 抑速ブレーキ制御特性 現車試験時の測定結果の一例である。速度上昇とともに電流が増加し、図8の特性を考慮すると抑速効果が明らかである。

Fig. 11 Control Characteristics of Speed-Suppress Braking

(5) 試験項目：2台モータの並列および単機により、起動、力行(各ノッチ)、停止ブレーキ(回生ブレーキが主で空気ブレーキが補助)、抑速ブレーキ(回生ブレーキ)および連続走行を行なうこと。

本線走行試験で測定したおもな結果は、以下に示すとおりである。

- (1) 図10のように、単機および2台並列のいずれの運転でも安定に加減速走行ができた。
- (2) 最高速度は単機運転で60km/h以上、並列運転で80km/h以上を記録した。
- (3) 上りこう配15%を単機運転で起動加速することができた。
- (4) 抑速ブレーキは図11のように有効な特性であった。
- (5) 力行時の電源中断に対しても安定に運転ができた。
- (6) 電源高調波電流は納入前の試験時と同様で問題はなかった。

図12は試験電車の本線運転中の写真である。

このような試験により、サイリスタモータが車両駆動用として、十分に性能を発揮することが確認された。

## 5 結 言

以上、サイクロコンバータ式サイリスタモータ装置の概要とこれを搭(とう)載した交流電車によりわが国最初の現車試験の結果、所期の性能を発揮し成功を収めたことを述べた。今後は本格的実用化を目標にして、さらに小形軽量化、価格低減および大容量化などサイリスタモータの特徴を生かしつつ引き続き研究を進めて行く所存である。

サイクロコンバータ式サイリスタモータは、今後の車両用新動力方式として大いに期待され、また、その真価を発揮するものと信ずる。

終わりに臨み、本サイリスタモータ装置の製作にあたり終始ご指導いただいた日本国有鉄道車両設計事務所ならびに鉄道技術研究所の関係各位に対し、深く謝意を表する。

## 参考文献

- (1) 坪井, 黒滝: 「単相無整流子電動機の無効電力および脈流率の低減法」, 昭42電学会東京支部大会 No. 320
- (2) 立花, 黒滝, 奥村: 「車両用サイリスタモータの電機子反作用による影響とその対策」, 昭47電四学会東海支部連合大会 18P-C-4
- (3) 佐々木: 「試作無整流子電動機の現車試験」, 電気車の科学 26 No. 3 (昭48-3)
- (4) 高橋, 立花, 河井, 佐々木: 「車両用サイリスタモータ」, 日立評論 55, 625 (昭48-6)
- (5) 佐々木: 「無整流子電動機」, 電気車の科学 25 No. 12 (昭47-12)
- (6) 高橋, 奥山, 立花: 「新しいダンパ方式によるサイリスタモータの特性」, 昭48電学会全国大会 No. 714
- (7) 小西, 梓沢, 市川ほか: 「産業用サイリスタモータ」, 日立評論 55, 618 (昭48-6)
- (8) 江口, 立花, 奥村: 「電気車駆動用サイリスタモータにおけるサイリスタの分配制御進み角の制御法」, 電四学会東海支部連合大会 18P-C-10
- (9) 齊藤, 奥村, 立花: 「交流無整流子電動機低速運転時の点弧角制御」, 昭47電四学会東海支部連合大会 18P-C-6
- (10) 佐々木: 「車両用無整流子電動機」, 電気車の科学 25 No. 2 (昭47-2)