

車両用サイリスタモータ

Thyristor Motor for Rolling Stock

As a new drive for rolling stock a thyristor motor consisting of a commutatorless motor unit and a thyristor converter has been developed recently for immediate application. As compared to the conventional DC traction motors, the thyristor motor has an advantage that larger capacity, higher speed units can be realized without increasing size and weight.

At Hitachi, Ltd. researches have been carried on for many years in the field of synchronous motor type thyristor motors and several effective systems have been developed including armature reaction compensation system, improved commutation reactance reduction system, and a speed control system for a plurality of traction motors. 110 kW and 200 kW thyristor motors for rolling stock service have already been completed. In these maintenance-free, high reliability motors, frequency has been rated at large values to reduce size and weight.

高橋 宏* *Hiroshi Takahashi*
立花 恭三** *Kyôzô Tachibana*
河井 貞治* *Sadaharu Kawai*
佐々木 昭夫*** *Akio Sasaki*

1 緒 言

従来、車両用主電動機としては、制御性能および特性のすぐれた直流電動機が使用されてきている。しかしこの直流電動機は、整流子とブラシという気中に露出した機械的接触の整流機構を有している。このため、整流子とブラシの保守に手数がかかるばかりでなく、使用条件によってはせん絡を起こすことがあり、定格回転数が高くできないので、大容量化や高速化による小形軽量化に限界がある。

そこで車両用として、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化ができ、出力増大の図れる高性能、高信頼度、無保守の主電動機の開発が強く要望されている。

これに対する無整流子の電動機としては、同期電動機タイプと誘導電動機タイプとがあり、それぞれ特有の長所短所を有している。誘導電動機タイプの場合、コンバータ方式では車両用の高速運転ができないため、可変電圧、可変周波のインバータ方式とする必要がある。同期電動機タイプは、この方式に比較して次のような長所がある。

- (1) 直流電動機の特長と類似しており、制御性能がよい。
- (2) 主サイリスタ変換装置に強制転流回路を必要としないので経済的である。

そこで日立製作所では、昭和39年より同期電動機タイプ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、100 kWサイリスタモータ⁽¹⁾、200 kWサイリスタモータ⁽²⁾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200 kVAサイリスタモータ/コンバータを、昭和47年には日本国有鉄道に電車で用110 kWサイリスタモータを納入し、現車試験に成功した⁽³⁾。

これらのサイリスタモータは、直流電動機制御の場合よりも、電動機特性と主回路および制御の方式との相互の影響が大きいという特質を有し、この点の解明が本方式開発の重要な課題である。そこで、電動機に関する電機子反作用とサイリスタ変換器に関する転流の問題を関連づけながら検討し、

いくつかの有効な方式を開発している。

ここでは、車両用サイリスタモータとしての基本特性と装置の概要および応用例について述べる。

2 車両用サイリスタモータの基本特性と制御方式

2.1 主回路方式と基本動作

図1および図2は単相交流電源サイリスタモータの2種類の基本構成を示すものである。これらは、変換器方式を異にするが、サイリスタの転流が低速運転時を除き、基本的に電動機自身の誘起電圧による点では共通し、変換器の入出力間でみた概略の電圧電流変換機能も同等である。この理由で、後者は前者の等価回路とみなされる。

図示の電動機は三相二極回転界磁形のものである。回転子には、たとえば、金属片付回転板を直結し、固定子には電機子各相巻線との対応位置に金属検出器を設け、その検出器より点弧信号を送られるサイリスタの作用によって、磁極に近い電機子導体に電流を流してトルクを発生させる。図示状態ではU、V相にそれぞれ正、負電流を流す。

回転速度が厳密に一定であるとすれば、図3のように時間に対して動作が表示できる。サイリスタ U_P , V_N が導通している図2の状態では図3 $\theta_1 \sim \theta_2$ の期間のように、平滑リアクトルの電動機側の直流電圧 V_{acM} はU~V間電圧 e_{UV} に等しい。 θ_2 では位置検出器信号が V_N より W_N に変わり、V相 $\rightarrow V_N \rightarrow W_N \rightarrow W$ 相の短絡電流により転流する。このため転流時点で $e_{VW} < 0$ が必要であるのみならず、おもに電機子内部の漏れインダクタンスにより、転流重なり角期間が生ずるので、早めに転流信号を与えねばならない。ところで、以後 θ_5 , $\theta_6 \dots$ でも同様の転流が起こり、 V_{acM} , i_M は図3に示す形となる。この転流は一般に負荷転流と呼ばれる。

このように、電動機側の変換器 C_{onM} は電機子電流を分配する機能を有する。他方、電源側の変換器 C_{onS} は、その出力電圧 V_{acS} の平均値を V_{acM} の平均値に対応して制御し、所要の電機子電流にするという、電圧制御の機能を有する。

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所日立研究所 *** 日立製作所水戸工場

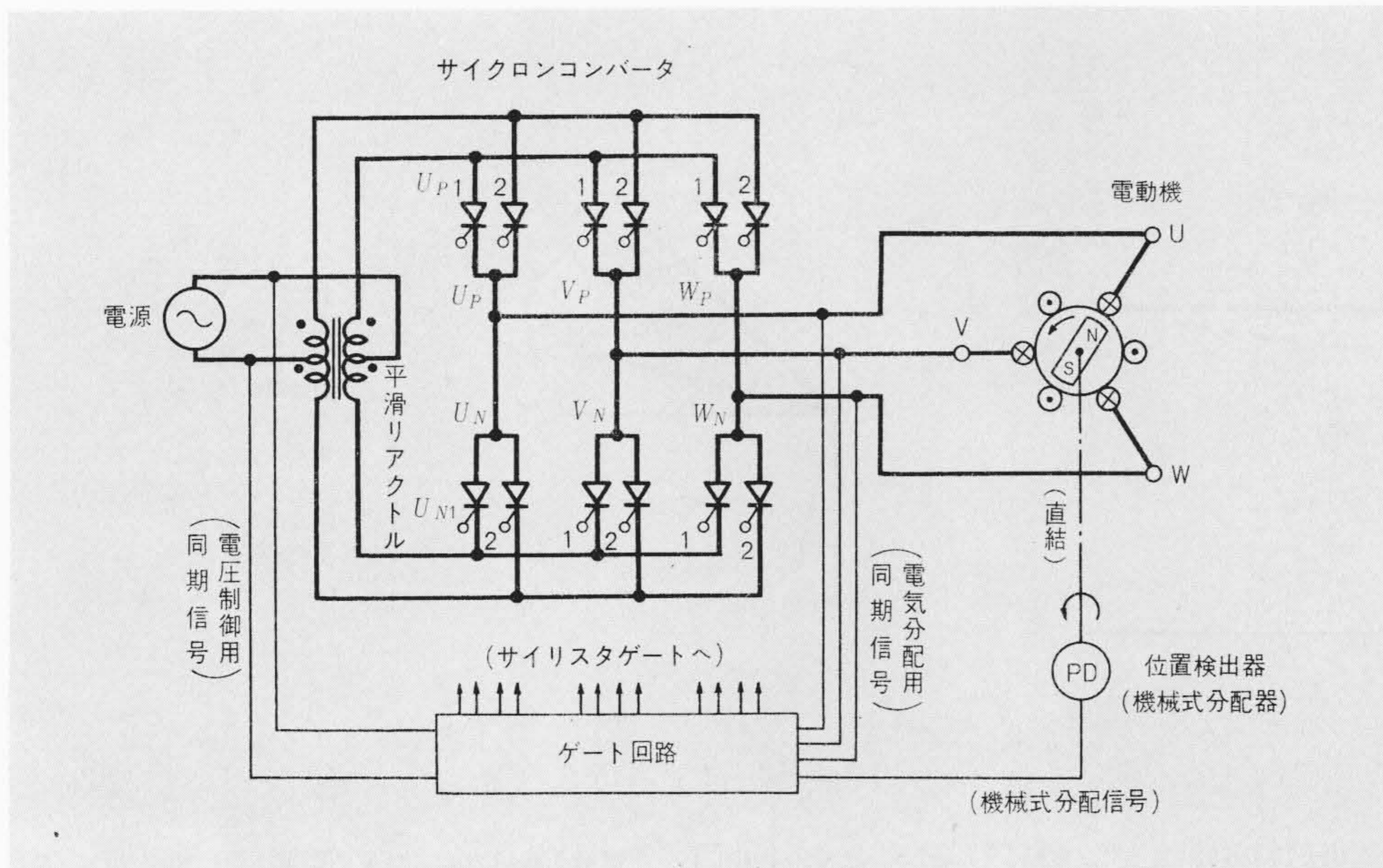


図1 サイクロコンバータ式(直接変換式)サイリスタモータの基本構成 電源、平滑リアクトル、サイクロコンバータおよび同期電動機タイプの電動機より構成される。また、サイリスタのゲート信号の同期入力のとおり方を示す。

Fig. 1 Constitution of Cyclo-converter Type Thyristor Motor

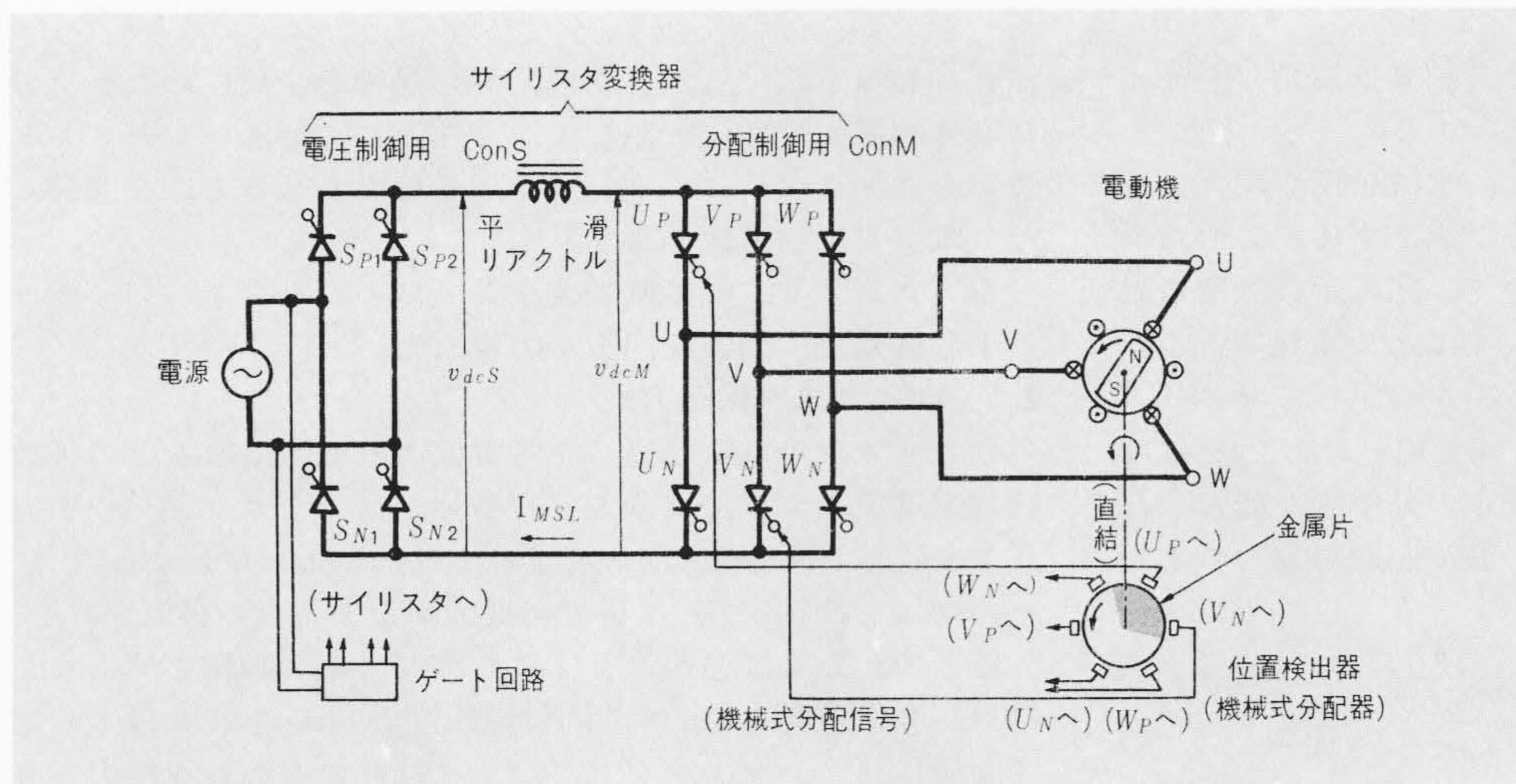


図2 直流式(間接変換式)サイリスタモータの基本構成および分配器の作用 この方式の変換器は整流器とインバータとから構成され、図1の方式の等価回路ともみなされる。また、機械式分配器の構成を示す。

Fig. 2 Constitution of Rectifier-Inverter Type Thyristor Motor and Action of Distributor

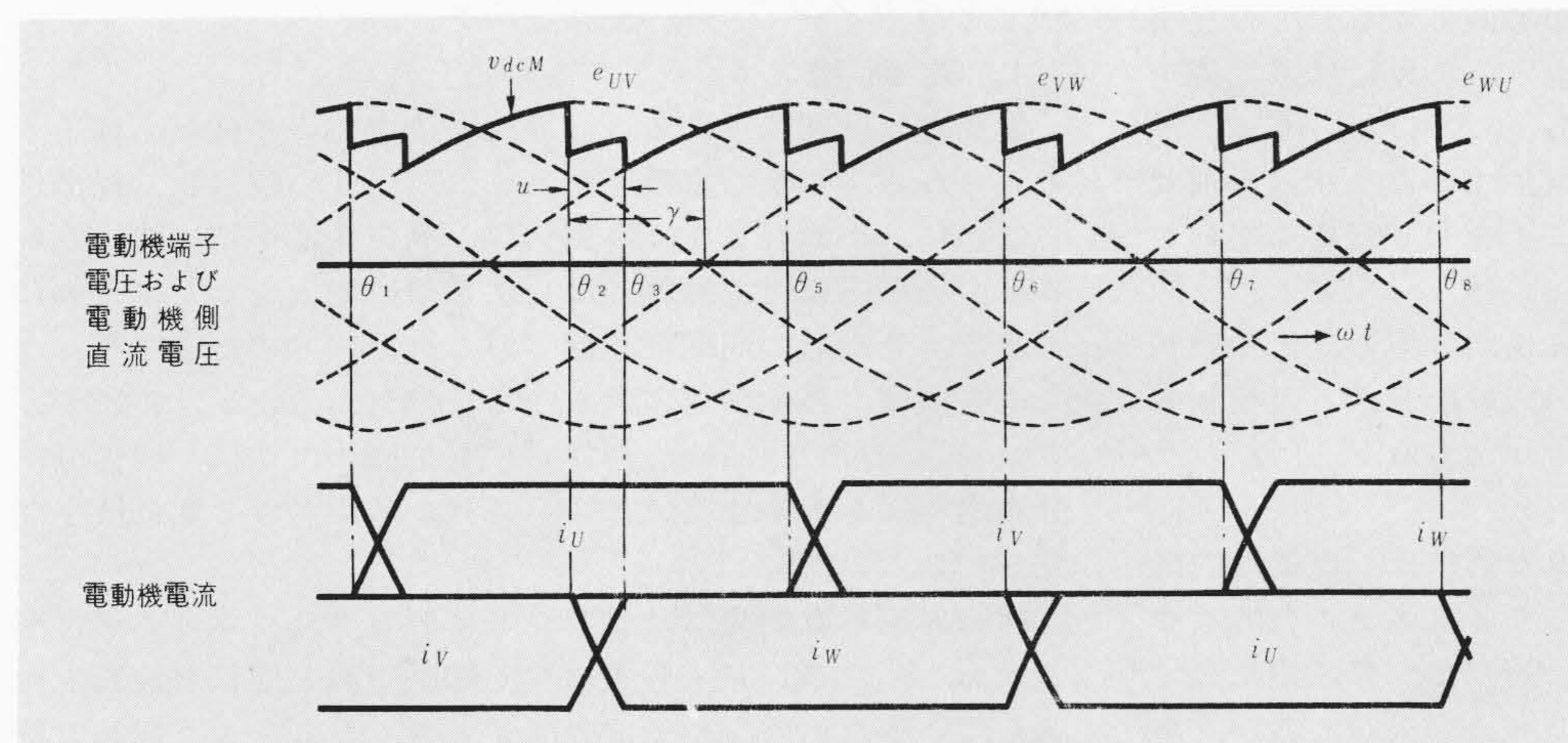


図3 サイリスタモータの原理的動作波形 電動機側に対する動作波形で、特に転流過程を示す。

Fig. 3 Principle Wave Shape of Thyristor Motor Operation

図1の変換器は、電動機の各相に対してサイリスタの対が電流の分配作用をし、電源に対しては、その対のうちのいずれを点弧するかにより電圧制御の作用をする。

2.2 低速時の転流動作と分配制御方式

図1および図2の方式が特に違うのは、電動機誘起電圧が低い低速時の転流作用の点である。

図2の方式で低速時の転流を行なうためには負荷側転流に合わせ、*ConS*を逆変換動作にし負荷電流を一時しゃ断したり、転流補助回路を用いるなどの方法によらねばならない。このため、制御が複雑になること、電源電流に低次調波成分を発生させること、事故時の保護がむずかしいこと、などの問題があり、車両用としては図1のサイクロコンバータ方式のほうが有利である。図1の方式は、負荷転流に失敗しても電源電圧による転流(電源転流)によって正常動作を回復する能力を有し、したがって負荷転流に比較して相対的に電源転流間隔の狭い低速時には、なんら特別の対策がなくても、大きい加速電流に対して運転が可能である。しかし、ある程度高速になると次のような影響が生ずる。

- (1) 前後2回の電源転流の間に2回以上の負荷転流が発生すると、負荷電流が急に増大するおそれがある。
- (2) 電源転流期間が相対的に長くなると、負荷転流回復が遅れ、トルクが所要値より低下する。

これらに関して詳細に検討した結果、図4のように、3種類の限界が明らかとなり、動作が安定で、かつトルクを有効に利用できる分配制御進み角 γ の最適制御法を確立した⁽⁴⁾。

2.3 電機子反作用と補償策

強制転流装置を持たない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

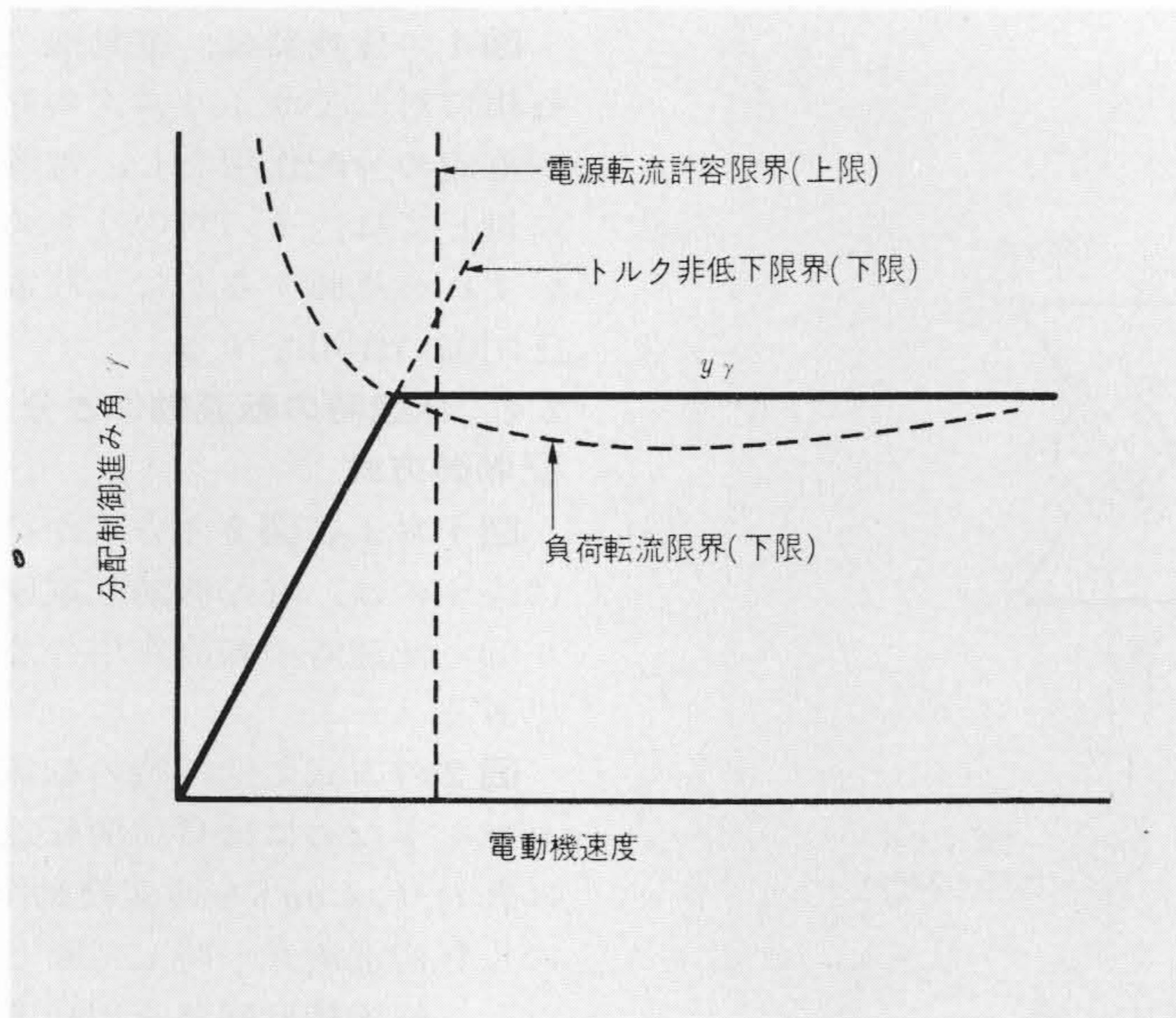


図4 分配制御進み角に関する限界曲線と最適制御特性 電動機速度に対する最適な分配制御進み方のあり方を示す。

Fig. 4 Critical Curves for Distribution Lead Angle and Suitable Controlling Characteristics for the Angle

させるために、進み力率にて運転して、制御進み角 γ をサイリスタの転流に合わせて確保する必要がある。

ところで、電機子電流を増加すると、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。このため図5のように誘起電圧の位相が進むので、回転子の位置に対応して分配信号を出す機械式分配方式では、 γ が変化することになる。これに対して電動機の誘起電圧を検出してサイリスタの点弧信号を分配する電気式分配方式を用いれば、 γ をほぼ一定にすることができるので、力率一定の効率的な運転が行なえる。また誘起電圧が低下すると、直流側逆起電力の平均値 E_d は、

$$E_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E_L \cdot \cos\left(\gamma - \frac{U}{2}\right) \cdot \cos \frac{U}{2}$$

$$\approx \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E_L \cdot \cos \gamma$$

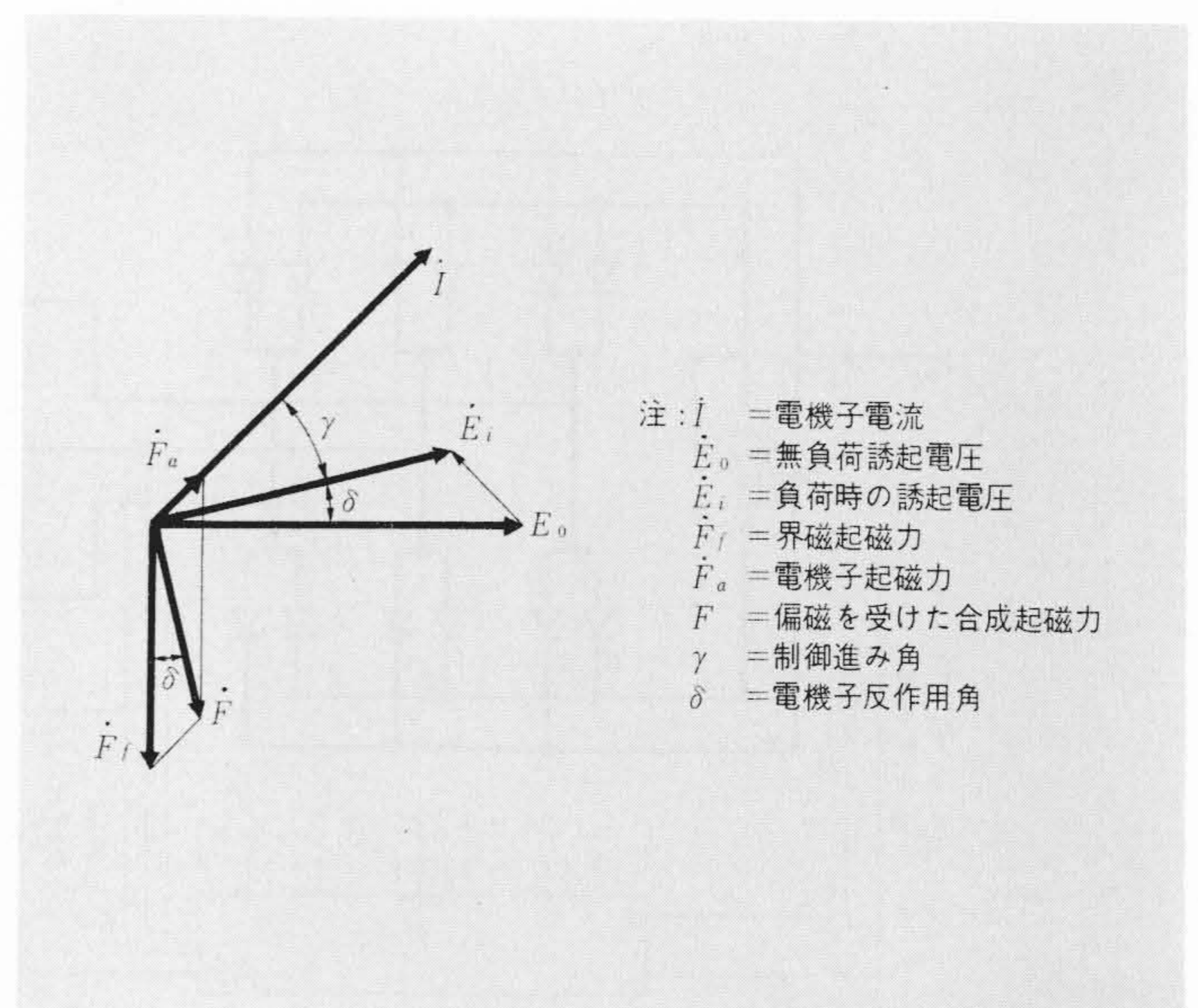
ここで、 E_L ：線間誘起電圧
 U ：重なり角

で表わされるので、分巻方式で一定励磁にて γ 一定の運転を行なうと、電流増加とともに直流電圧も低下する。この電圧低下が電源電圧の垂下こう配よりも大きいときには、電流が発散するという不安定現象が現われる。これに対しては、電機子電流の増加とともに界磁電流も増加するような直巻制御方式にすれば、誘起電圧も低下することなく、安定な運転が行なえる。

以上から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り、電気式分配方式と直巻制御方式との組合せが、最も効果的なことがわかる⁽²⁾。

2.4 転流インダクタンスの低減策

サイリスタモータの出力増加を図るためには、電動機内部の転流インダクタンスを小さくして、サイリスタの転流重なり角を小さくする必要がある。これに対して、界磁側に設けるダンパ巻線が転流インダクタンス低減に効果があるが、車両用主電動機としては、高速回転による周速の増大に伴いダンパ巻線が構造上、強度的に問題となることがある。そこで、



注： i = 電機子電流
 E_0 = 無負荷誘起電圧
 E_i = 負荷時の誘起電圧
 F_f = 界磁起磁力
 F_a = 電機子起磁力
 F = 偏磁を受けた合成起磁力
 γ = 制御進み角
 δ = 電機子反作用角

図5 ベクトル図 電機子起磁力によって誘起電圧の位相が進み、大きさが小さくなる模様を示す。

Fig. 5 Vector Diagram for Thyristor Motor

ダンパ巻線を設ける代わりに、界磁巻線を全周にわたって分布巻に配置し複数に分割して、それぞれに低インピーダンス要素を並列に接続してダンパ作用を行なわせる方式を開発した（電気ダンパ方式と称す）⁽⁵⁾。

本方式により、電動機の製作費低減のみならず、いっそうの小形軽量化、信頼度向上が実現した。

2.5 サイリスタ保護方式

サイリスタの電流容量は定常電流より転流失敗などの事故時の過電流により決まることが多い。サイクロコンバータ方式でも最悪条件では、定常電流の十数倍以上に増加するので、その増加を抑制して、素子の過電流耐量を下げる必要がある。

そこで、2.2で述べたように、詳細に転流動作を解析した結果、事故発生時は、瞬間的に電圧制御角 α_s を90度以上の適度な値に移し、サイクロコンバータ特有の電源転流能力を高めるとともに、電源に対して変換器を逆変換作用させることにより、事故電流を急速に減少させるという方式（ゲートシフト方式という）を開発した。

3 サイリスタモータ装置の構成

3.1 電動機

電動機は、回転子あるいは界磁の構造により種々の構造が考えられる。しかし車両用としては、保守の簡易化、経済性のほかに、小形軽量化、高出力化、高信頼度が特に要求される。つめ形磁極付電動機では寸法重量の増大をきたすために不適で、巻線形の同期電動機と似た構造のものが適する。

電動機は、界磁構造に大きな特長を有している。すなわち、ダンパ巻線付の円筒同心巻界磁の電動機のほかに、円筒分割分布巻界磁を用いて電気ダンパ方式が適用できる電動機を開発している。

回転界磁形電動機にはブラシレス形とスリップリング付形とがある。ブラシレス形では、回転励磁機と回転整流器を内蔵しているために、やや電動機が大きくなる。また回転電機子形にして車両用主電動機と同程度以上に電気装荷を高くとり、電動機の小形化、高出力化を図ったものも製作している。

このほか、小形、高信頼度の起動用磁極位置検出器をはじめ、3年以上の無給油無分解を図り、一段と構造を単純化したバック式軸受や、固定子回転子とも無溶剤エポキシ樹脂一体化のフィルム絶縁など、多くの無保守技術を採用している。

3.2 サイクロコンバータ部

電源は普通は単相、電動機は三相が多いので、この部分は、12アームのサイリスタより構成される。各アームに加わる最大電圧は、電源と電動機誘起電圧の最大値の和である。各アームの電流容量は、平滑リアクトル部に流れる直流電流を $\frac{1}{6}$ の期間だけ分担するとして、一般的には決められる。この分担率は、停止している場合あるいは電源と電動機の電氣的周波数が一致するような場合に高くなる点は配慮を要するが、このような特殊の速度で運転を持続しないようにすればよい。

3.3 ゲート制御装置⁽⁶⁾

この装置は、サイクロコンバータ部に、電動機電流の分配と電源側よりみた電圧制御の二つの作用を行なわせるものである。図1は主回路との関係を示し、図6は内部の構成を示すものである。この構成により電気分配方式、最適分配制御進み角制御、ゲートシフトの機能を持たせている。

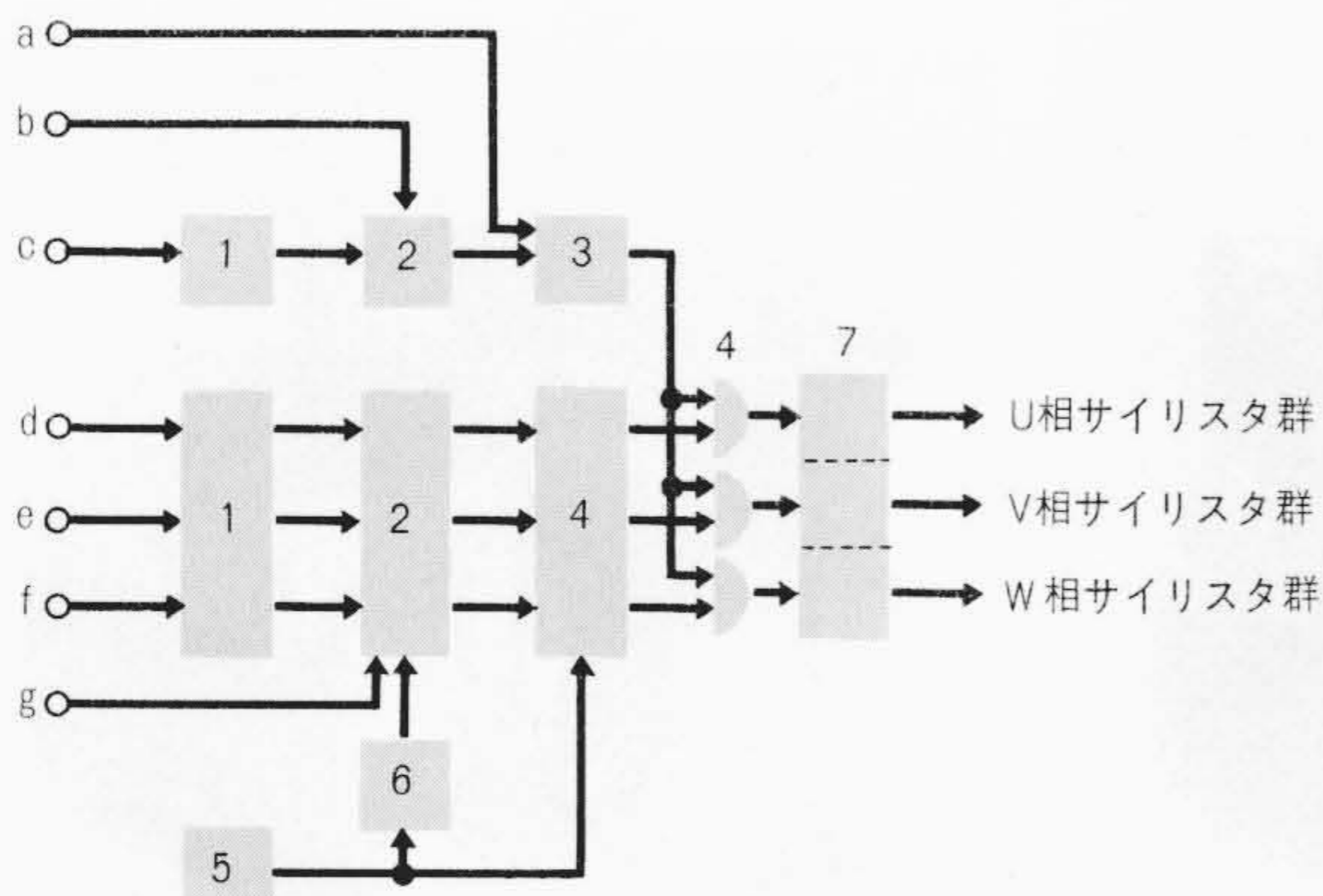
3.4 平滑リアクトル

平滑リアクトルは図1に示すように同一鉄心上に2分割した2巻線を設けたものである。通常運転時は平滑リアクトルとして動作するように十分なインダクタンスを有するが、サイリスタの転流期間中は転流回路中のインダクタンスがほとんどなくなるようになっている。また巻線を分割しているために過電流に対して正側、負側いずれのサイリスタにも電流制限要素として効果がある。

4 車両への応用

4.1 主電動機

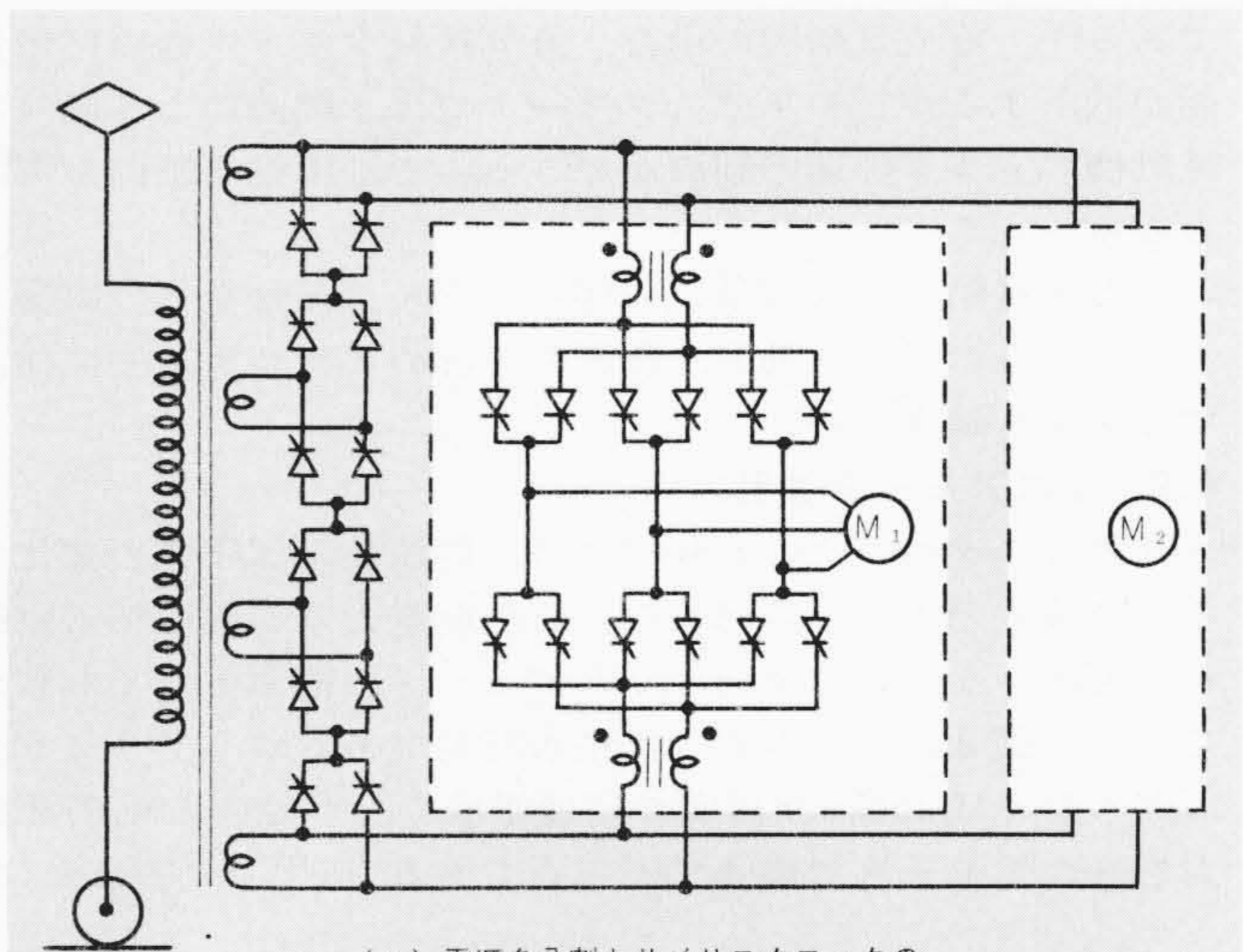
これまでの研究と電車による試験⁽³⁾の結果、一般電力用サイリスタで特別の転流装置がなくても、定格回転数の高い電動機が実現でき、高調波電流の増大などの問題も生じないことが明らかとなった。これにより、在来形車両の主電動機の



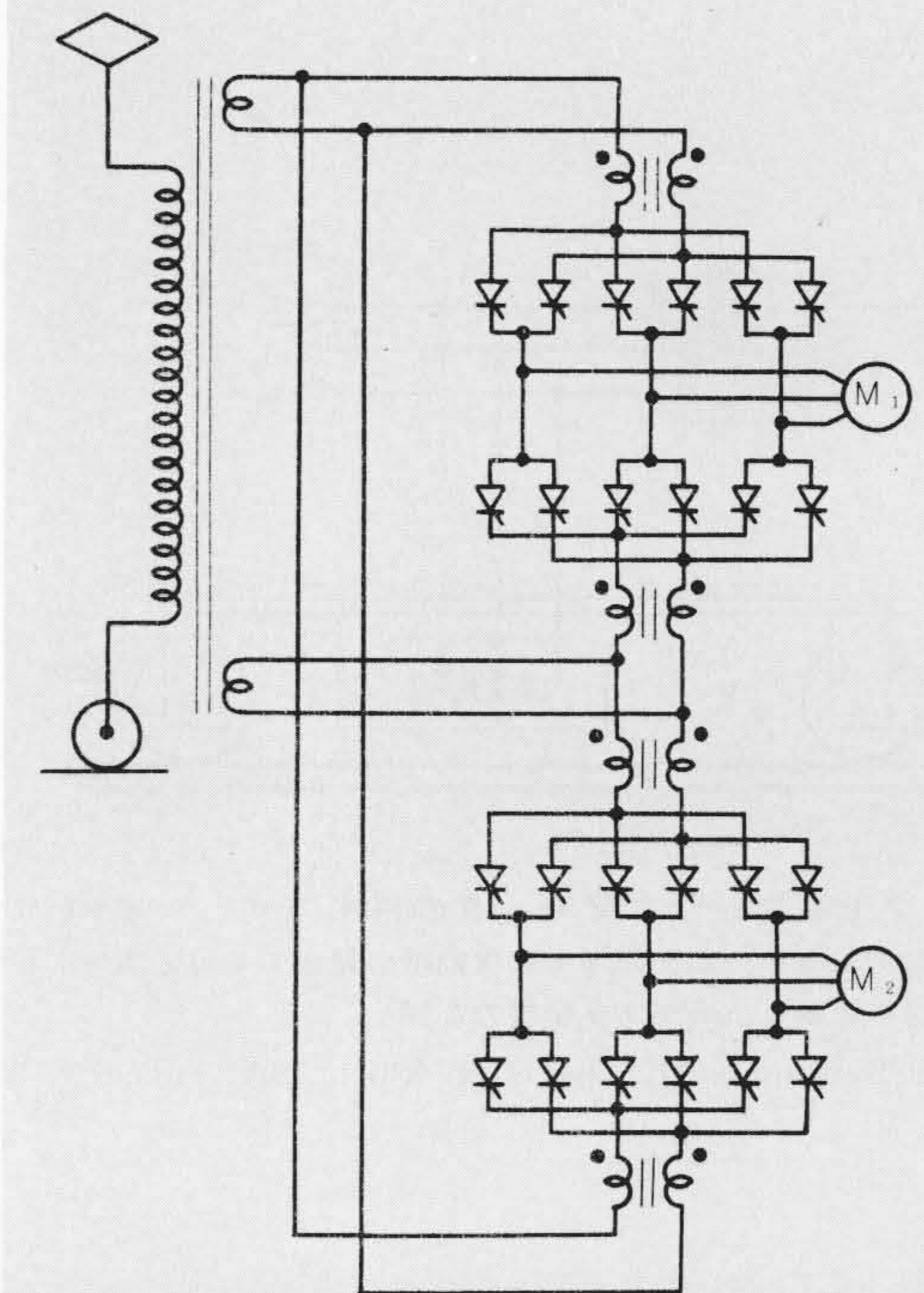
注：1=波形整形部 2=移相制御部 3=選択部 4=混合部 5=位置検出器 6=速度検出部 7=増幅部
a=ゲートシフト信号 b=制御信号 c=電源電圧 d= e=電動機電圧 f= g=γ設定信号

図6 ゲート回路の構成 おもに電圧制御部、分配制御部およびそれらの制御信号の混合部から成る。

Fig. 6 Construction of Gate Circuit



(1) 電源多分割とサイリスタモータの並列接続



(2) 電源多分割とサイリスタモータの直列接続

図7 複数のサイリスタモータの接続法 電源多分割は電源力率の向上に効果がある。サイリスタアーム数が少なく、利用率がよいのは、(2)の方式である。

Fig. 7 Connection Diagram for Plural Thyristor Motors

小形軽量化はもちろん、特に、鉄道車両の高速大容量化を実現できる見通しが得られた。しかし、今後の本格的な採用には、(1) 整流器負荷と同様の特性を有するため電源の力率低下と高調波成分の増加ならびに平滑リアクトル容量を必要最小限にすること⁽⁷⁾、(2) サイリスタ変換器が各電動機ごとに必要なので、この部分を必要最小限にすることなど、コスト低減の検討が重要である。

これに対し、図7は電源側を多分割した方式で、これに非対称制御を応用すれば、従来の整流式電気車と全く同様の特性となる⁽¹⁾。特に、同図(2)は前記2条件をとともに満たす方式

である⁽⁸⁾。直流電動機の場合、直列接続すると車輪の粘着性能が低下するが、サイリスタモータでは γ 制御により個々の電動機のトルクの速応制御ができるので、再粘着制御が可能となる。

また主電動機の大容量化に伴い、トルク脈動などの影響も大きくなるので、駆動系、制御系を含めて系統的に検討する手法を確立した。

4.2 リニアモータ併用方式

サイリスタモータの電動機には、周波数と電圧値の変化する正弦波状の電圧が誘起する。この起電力は車輪の粘着駆動が不可能となる高速車両のリニアモータの電源としても利用できる。図8は、基本的には粘着駆動であるが、上りこう配区間もしくは300km/h程度の高速領域で、不足する粘着駆動力をリニアモータで補強する方式である^{(9)~(11)}。このほかに、

完全な非粘着駆動への利用も試みられている⁽¹²⁾。

4.3 補機電源装置

車内冷房の増加などによる補機電源装置の容量増大に伴って、その小形軽量化と無保守化が要求される。この面で、サイリスタモータ方式は、図9のようなDC-AC変換装置もしくはAC-AC相周波数変換装置として応用すれば、波形の比較的良い交流が得られる⁽¹³⁾。

5 納入例

表1は車両用サイリスタモータの納入例を示すものである。これらには前述の開発技術が各部に折り込まれている。図10は200kVAサイリスタモータ/コンバータの外観を、図11は110kWサイリスタモータの外観を、図12はその固定子を、図13は制御装置の外観をそれぞれ示すものである。

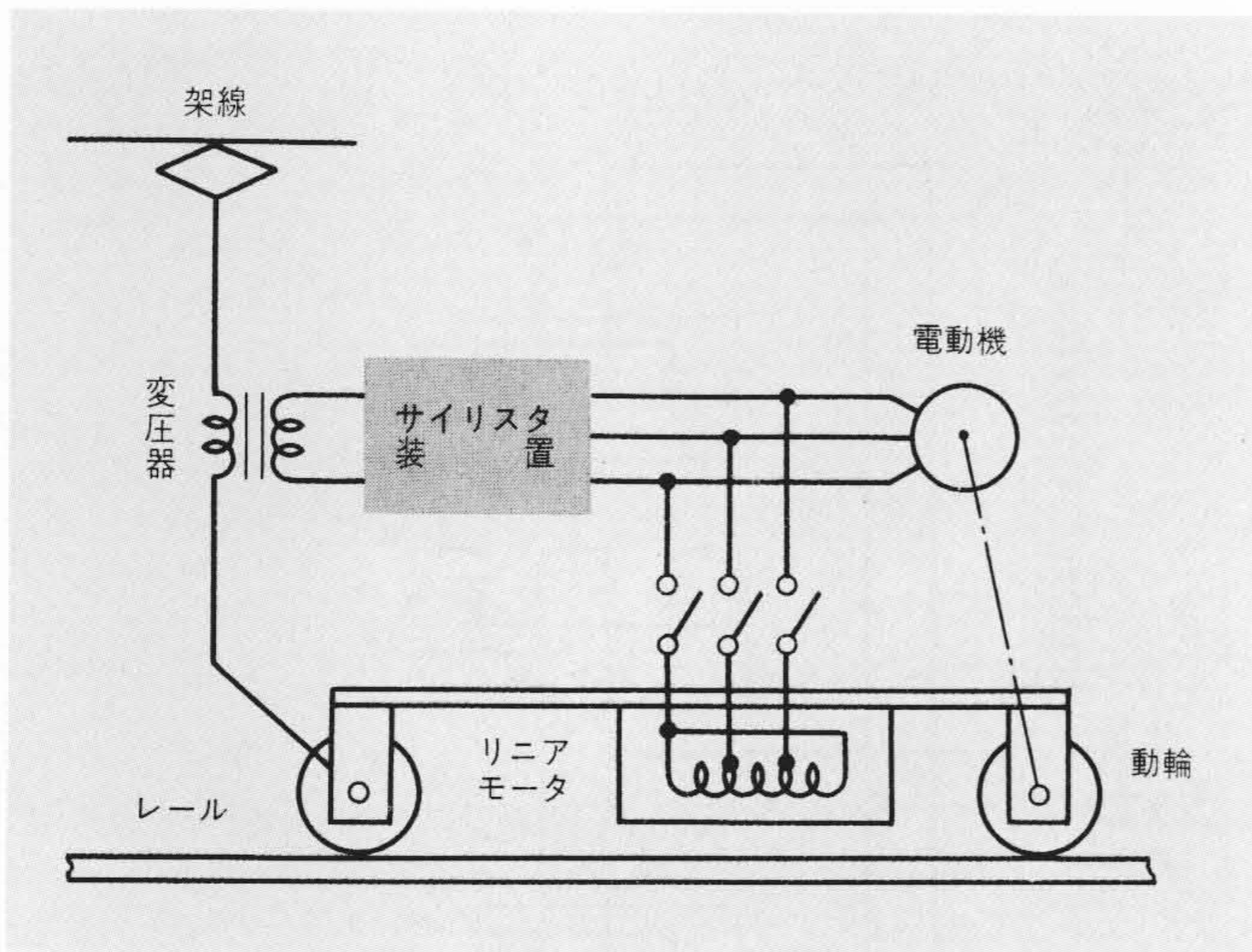


図8 サイリスタモータとリニアモータの併用方式 基本的には粘着による車輪駆動であるが、高速領域では電動機の発生する可変周波、可変電圧でリニアモータを駆動し、不足する粘着力を補う。

Fig. 8 Traction System with Thyristor Motor and Linear Motor

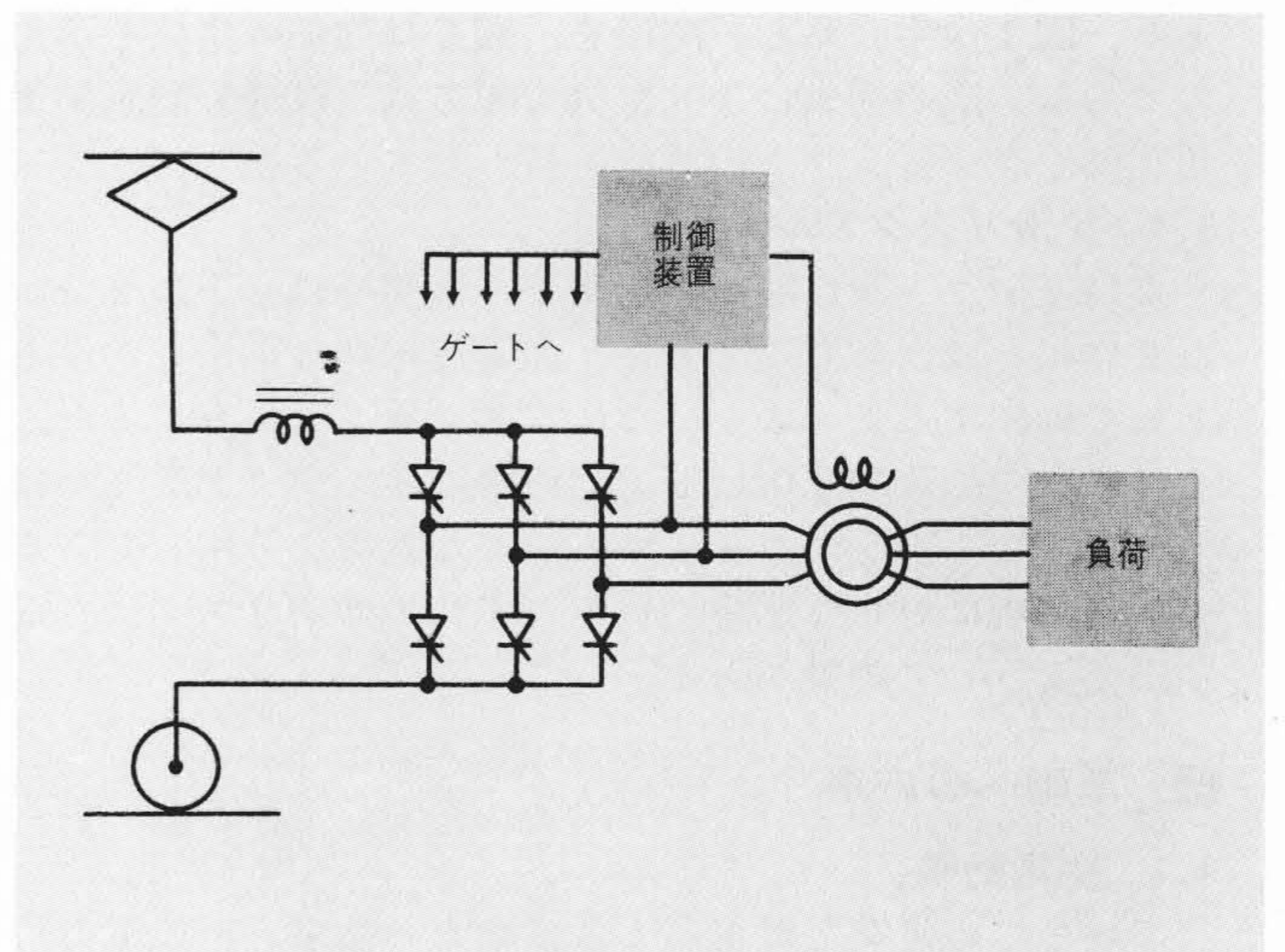


図9 DC-AC変換装置 サイリスタモータは正弦波電圧を発生するので、DC-AC変換装置あるいは相周波数変換装置に応用できる。

Fig. 9 DC-AC Converter

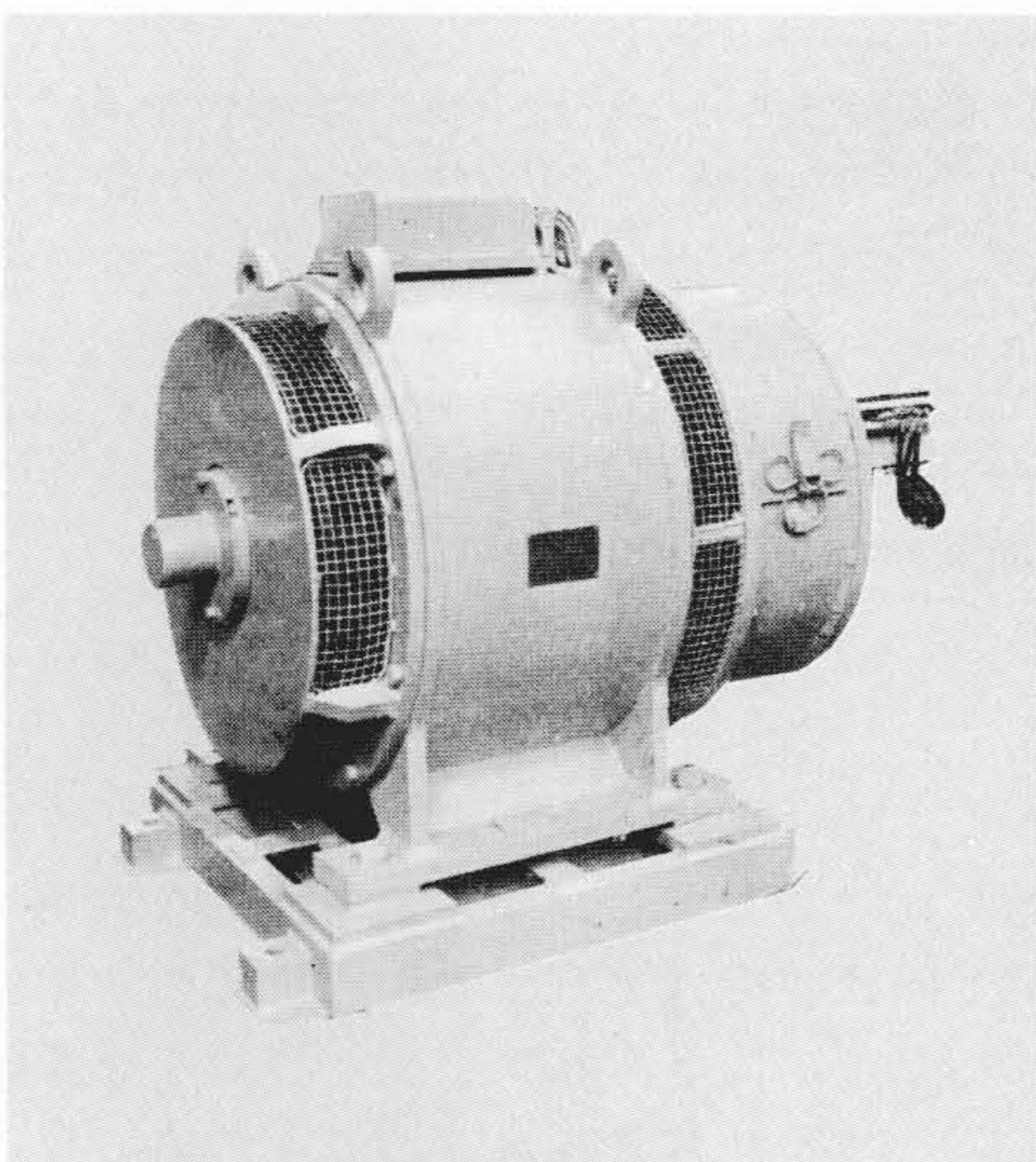


図10 200kVAサイリスタモータ/コンバータ リニアモータの相周波数変換用電源装置として納入した。

Fig. 10 200kVA Thyristor Motor/Converter

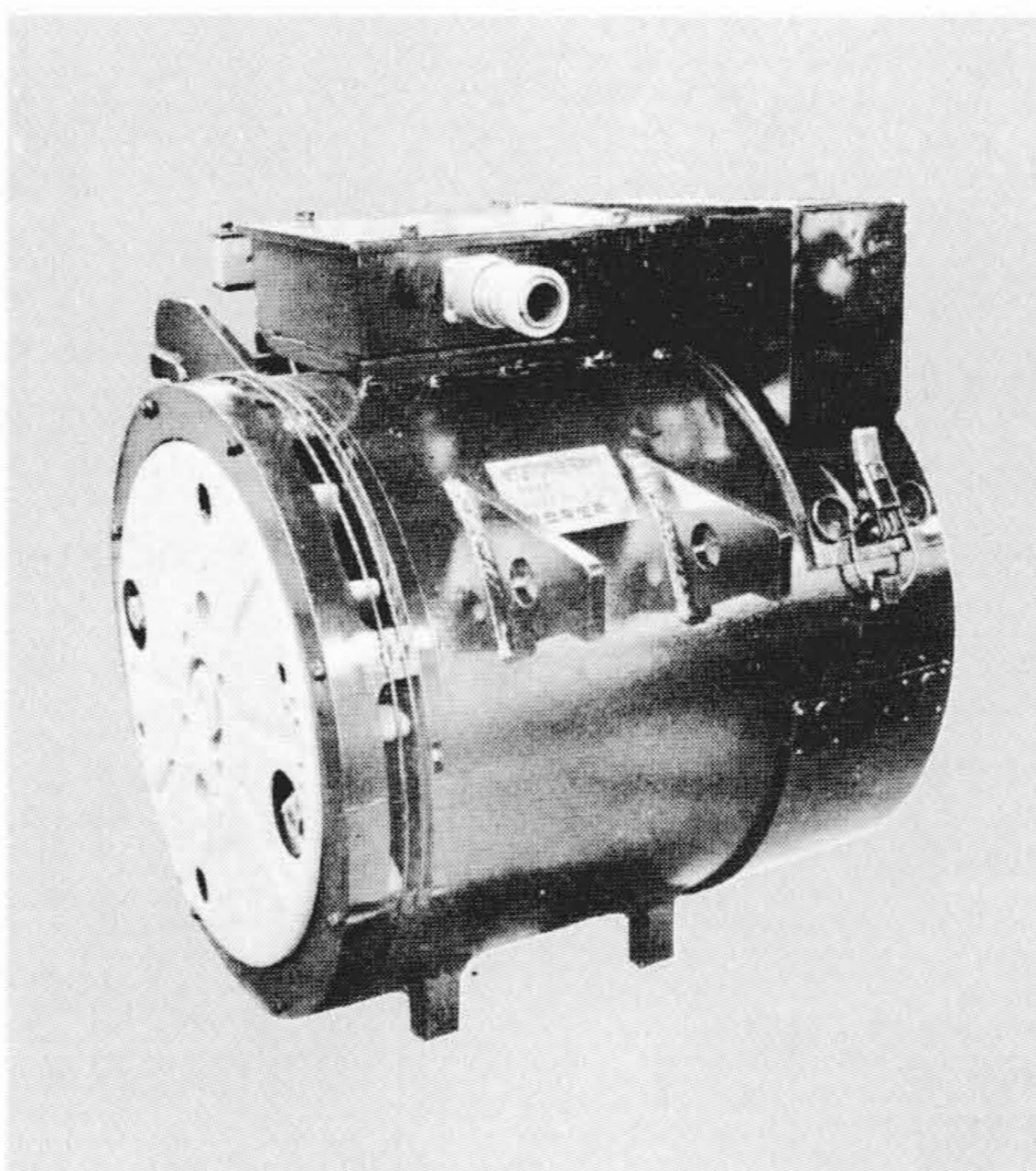


図11 110kWサイリスタモータ 試験電車で搭(とう)載し、国鉄・日豊本線における試運転に成功した。

Fig. 11 110kW Thyristor Motor

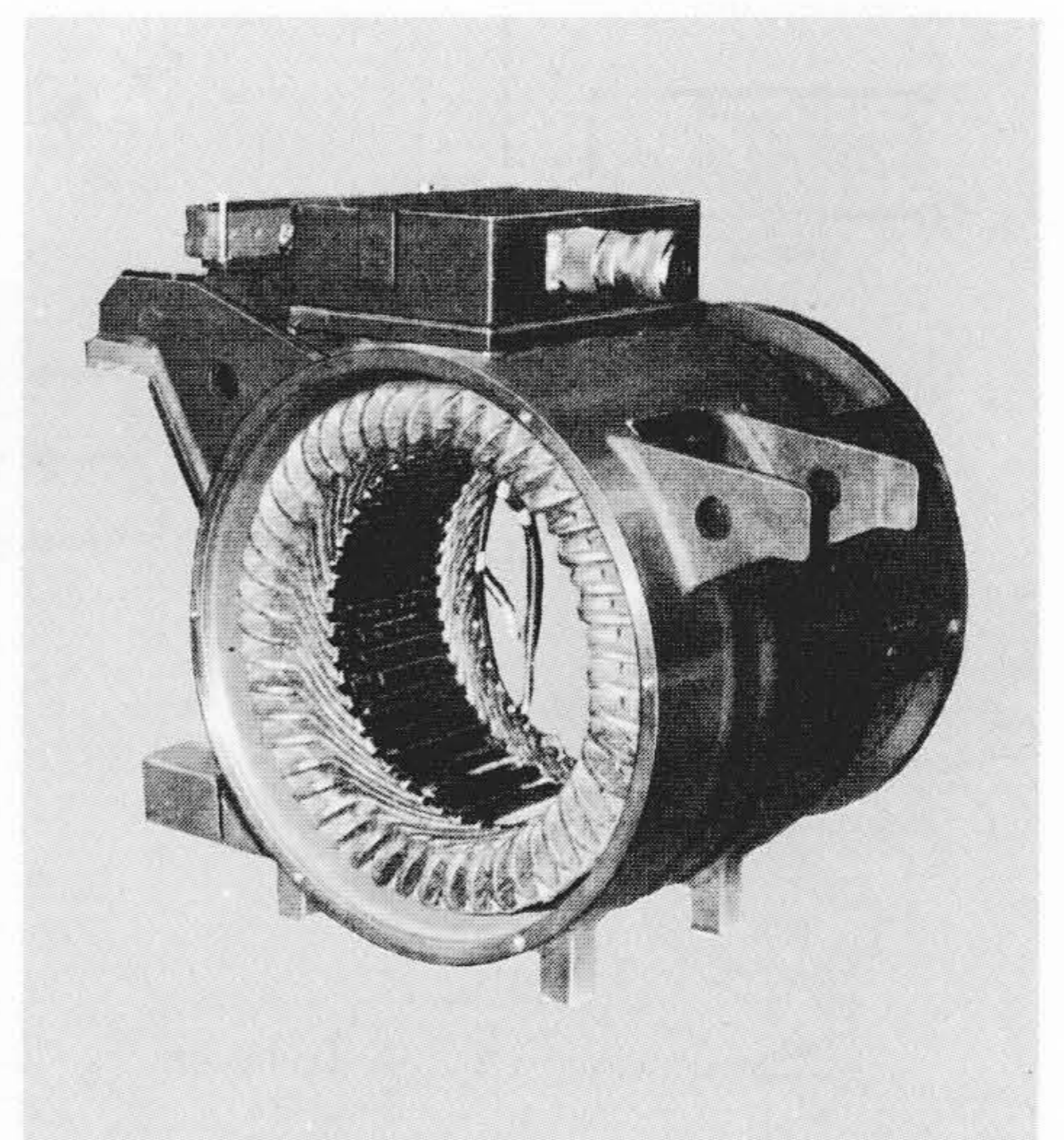


図12 110kWサイリスタモータ固定子 3分割された分布巻界磁を示す。固定子わくは磁気通路を兼用する。

Fig. 12 Stator of 110kW Thyristor Motor

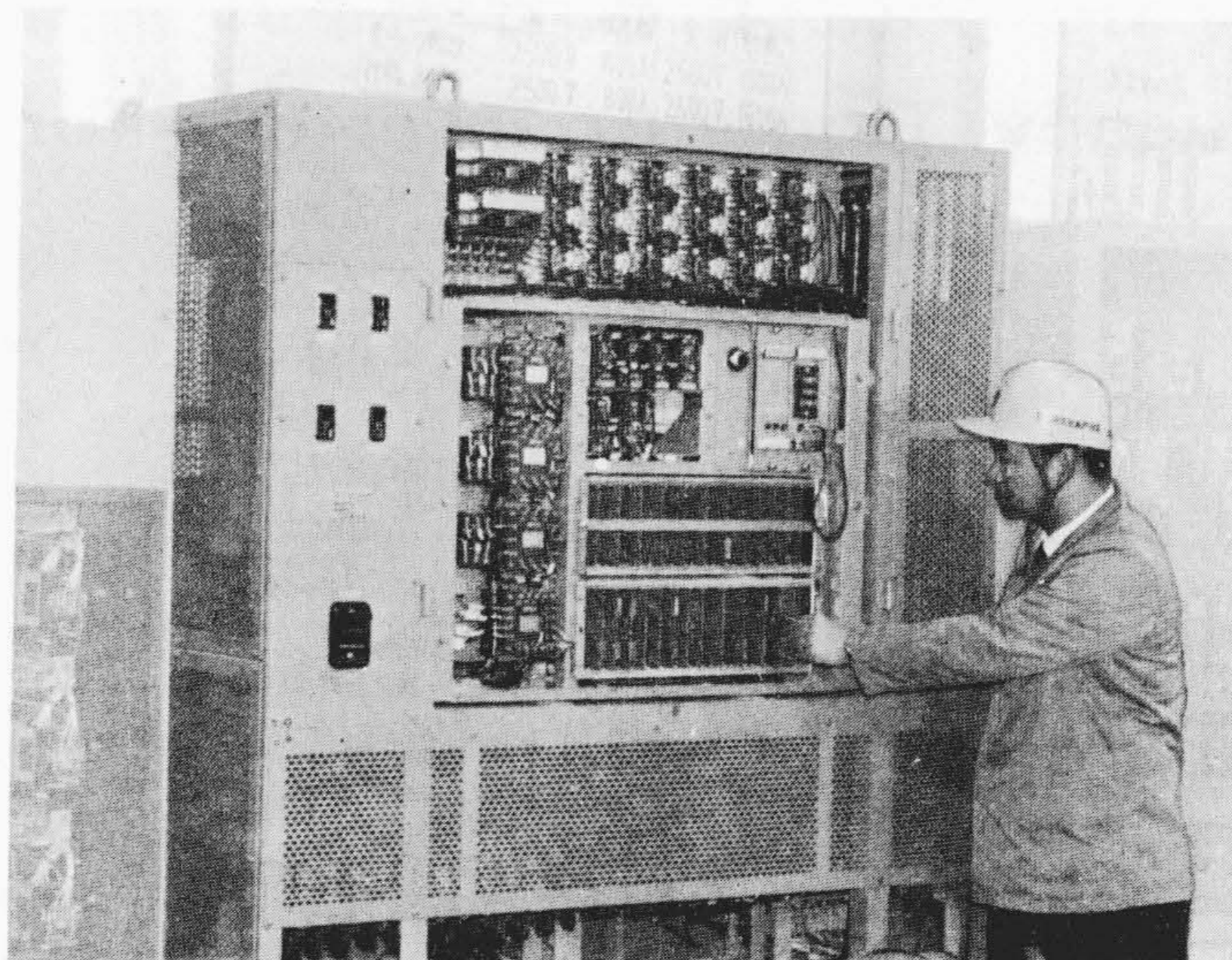


図13 110kWサイリスタモータ制御装置 サイリスタモータの各種特性測定に便利なように縦形とした。
Fig. 13 Controlling Device for 110kW Thyristor Motor

表1 車両用サイリスタモータ納入一覧 日本国有鉄道に納入した装置の概要とおもな仕様を示す。

Table 1 Supply List of Thyristor Motor for Rolling Stock

項目	(1)	(2)	(3)
納入先	日本国有鉄道	日本国有鉄道	日本国有鉄道
納入年月	昭和45年3月	昭和47年3月	昭和48年3月
用途	リニアモータの電源装置	モータ特性解析電車運転	サイリスタモータの各種応用研究
定格出力	200kVA	110kW	10kW
電源	1φ, 50Hz, 730V	1φ, 50/60Hz, 420V	1φ, 50Hz, 160V
サイリスタ変換器方式	サイクロコンバータ式	サイクロコンバータ式	サイクロコンバータ式
分配方式	機械式・電気式のリレーによる切換	機械式・電気式併用	機械式・電気式併用
定格回転数	3,000rpm	2,280rpm	1,800rpm
電動機界磁構造	回転界磁形分割分布巻	回転電機子形分割分布巻	回転界磁形分割分布巻
界磁制御方式	手動による分巻他励	他励直巻制御	手動による分巻他励
電流電圧制御装置	なし	定電流・定電圧制御	なし
回生ブレーキ装置	なし	あり	なし

6 結 言

以上、車両へのサイリスタモータの応用について、これまでの検討結果の概要を述べた。サイリスタモータに関する特性の把(は)握については、実際への応用の面で、十分に経験を積んだと考えるが、特にこれまでの直流電動機に比較して定格回転数を高くとり、電動機の小型化、軽量化、信頼度の向上、無保守化を可能とする技術を確立した。経済面でも、

大容量機では直流電動機方式に比べて保守費を含めた総費用で経済的なシステムとなりうる見通しを得ている。

終わりに臨み、これまで多大の指導、援助をいただいた、日本国有鉄道車両設計事務所、同鉄道技術研究所車両性能研究室および動力研究室をはじめ関係各位に対し、深く謝意を表わす次第である。

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) 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
- (5) 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
- (6) 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
- (7) 特許登録 第661357号: 「交流無整流子電動機」特公昭47-10574号
- (8) 立花, 奥村, 黒滝: 「複数サイリスタモータの制御法」, 昭48電学会全国大会 No. 715
- (9) 小野田, 木脇: 「サイリスタモータとリニアモータを併用した超高速駆動方式の検討」, 昭43電四学会連合大会 No. 766
- (10) 立花, 奥村, 安波: 「リニアモータ駆動用サイリスタモータ式電源装置」, 昭45電学会東京支部大会 No. 195
- (11) 特許登録 第636633号: 「電気車駆動装置」, 特公昭46-24487号
- (12) "Experimental linear motor vehicles for high speed transport": Electrical Review 27 761~762 (Nov. 1970)
- (13) 坪井, 立花, 奥村: 「サイリスタモータ式交流電源装置の検討」, 昭47電学会全国大会 No. 631