

鉄道車両用小形・軽量制御システム

Compact and Light Weight Control Systems for Railway Vehicles

最近の鉄道車両用制御システムは、大容量化とともに小形・軽量化に対する要求が一段と高まっている。単に個々の電気品のハードウェアの開発だけではこれにこたえるのが困難になってきており、システム全体からこれらの要求にアプローチしてゆく必要がある。従来の4個電動機制御から8個電動機制御方式とすることにより、電車一編成で見ると小形・軽量化に大きく寄与し、また真空遮断器を採用することにより、さらに小形化が可能である。また、従来分散形の構成をとっていた電気品を一体化することによってシステムとしての小形・軽量化を実現した。さらに駆動用電動機も、インバータ装置によって最適な特性を持たせる制御を行うことにより、小形・軽量化を図った。

岩 滝 雅 人* Masato Iwataki
今 井 勇 人** Hayato Imai
中 武 良 二*** Ryôji Nakadake
長 谷 川 三 吉* Mitsuyoshi Hasegawa

1 緒 言

電気鉄道車両用の駆動システムは、最近のパワーエレクトロニクス技術、およびマイクロコンピュータ(以下、マイコンと略す。)をはじめとするマイクロエレクトロニクス技術の飛躍的進歩により、目覚ましい性能の向上が図られてきた。今後は、機器単体の改善にとどまることなく、車両システムとしての広い意味での性能の向上、小形化、軽量化、低騒音化を推し進め、ユーザーの要求にこたえてゆくことが必要である。

本稿では、直流電気車、交流電気車および駆動用交流電動機での最近の技術的進歩とその事例について述べる。

2 直流車両の制御システム

昭和40年代に初めてチョップ車が実用化されて以来、直流車両のエレクトロニクス化は急速な勢いで進められてきた。これらの発展は、もちろん対応する基礎技術の発展に支えられており、その顕著なものがGTO(Gate Turn Off)サイリスタをはじめとするパワー半導体の進歩と、マイコン、各種の集積回路などをベースとするマイクロエレクトロニクスの普及であろう。

現在、車両用制御装置の主流をなしている電圧形PWM(パルス幅変調)方式インバータ制御装置は、これらの技術的基盤の上に初めて実用化が可能になったものである。本章では、最近の直流車両での成果について述べる。

2.1 8個電動機インバータ制御装置

車両用インバータ装置にとって、その制御可能容量は、サイリスタ単体の容量に大きく依存している。1,500V架線の平均的な通勤電車で考えると、以前は素子の容量(4.5kV, 2kA)の制約からインバータ制御装置1台当たりの制御可能な主電動機数は4台(1C4M)が実用上の限界であった。しかし、素子の大容量化(4.5kV, 3kA)に伴い、インバータ装置1台当たりの制御容量の増大が可能になり、主電動機8台(1C8M)、すなわち電動車2両分を制御することができるようになった。8個電動機インバータの方式比較を表1に、インバータ本体の外観を図1に示す。8個電動機インバータによって制御装置全体で約20%の質量低減が可能になる。

8個電動機インバータはGTOサイリスタの大電流化とドライブ技術、冷却技術、実装技術などのハード技術や、大電流化に伴う誘導障害の増加対策などの課題を解決することによって実用化が可能になったものである。最近の冷却装置の一例を図2に示す。車両用半導体制御器で従来広く用いられてきた、素子を冷却器中に収納し直接冷媒に浸すいわゆる浸漬タイプと異なり、同図の方式は素子外置きタイプと称し、素子を気中に実装したものである。この方式は冷媒の使用量が少なく済み、また寸法、質量とも低減できる。

一方、装置の故障によって路線上で動けなくなることを避けるため冗長性を持った設計が必要になる。2両から4両程

* 日立製作所 水戸工場 ** 日立製作所 日立工場 *** 日立製作所 国分工場

表1 8個電動機インバータの比較(DC1.5 kV架線) 1台で電動機8個を制御することで小形・軽量化が図れる。

		1C4M制御×2	1C8M制御(2-INV)	1C8M制御(1-INV)
構成図				
G T O		2 kA級	2 kA級	4 kA級
車輪径差管理		1両ごと	2両ごと	2両ごと
再粘着制御時トルク低下		1両内	2両とも	2両とも
故障時開放	インバータ素子 ゲートドライブ フィルタL, C	4 MM開放	4 MM開放	8 MM開放
	断流器	同上	故障モードによる 8 MM開放	同上
	論理部	同上		同上
制御装置質量		100%	90%	80%*

注：略語説明など GTO (Gate Turn Off), GD (ゲートドライブ), INV (インバータ)

* インバータ直流短絡時の保護協調の考え方によって、フィルタリアクトルの大きさが異なる。

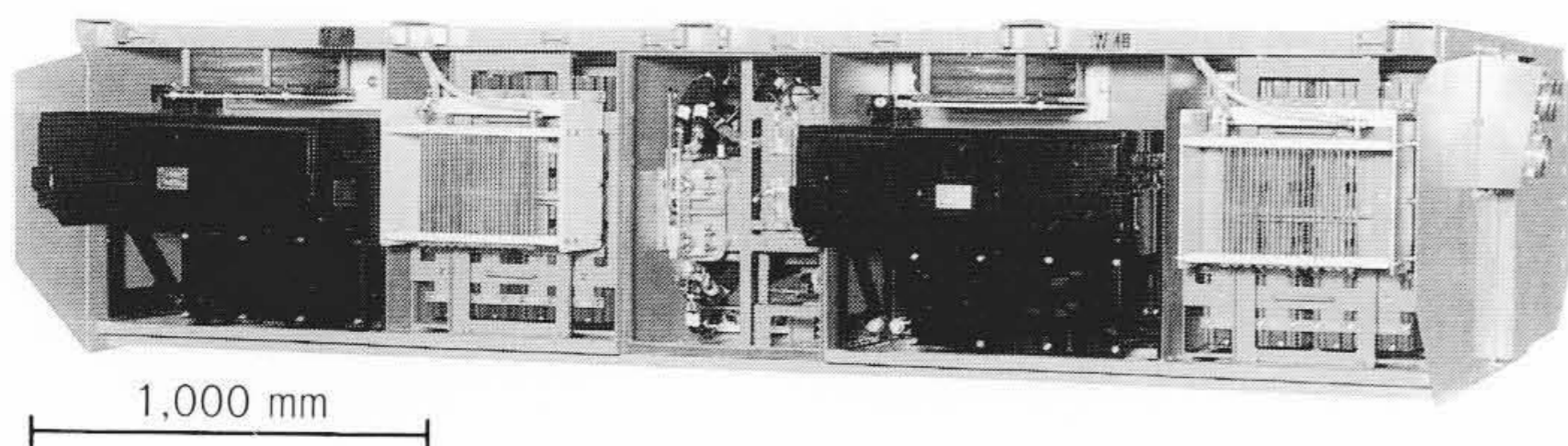


図1 インバータ装置本体の外観 1台で150 kWクラスの電動機を8台制御可能である。

度の短い編成では冗長性を持たせる場合、1C4M制御が主流になるが、10両程度の長編成の場合は1C8M方式を採用しても十分な冗長性が得られるため、経済性あるいは編成全体からの軽量化を考慮して8個電動機インバータが適している。

大容量化に際し考慮しておかなければならない課題の一つに、変電所との保護強調がある。例えば、インバータが直流短絡事故を起こした場合、事故電流によって変電所の遮断器を動作させずに車上で保護しようとする、大きなリアクトルを挿入し事故電流の立上りを抑える必要がある。しかし、フィルタリアクトルの質量は容量の二乗に比例するため、インバータ容量の増大に伴って大きなものとなり、車両の軽量化の妨げになっている。そこで、この解決策の一つとして、従来の車上の保護遮断器よりも動作を一けた高速化し、小さなフィルタリアクトルでも保護強調がとれる直流高速真空遮断器を開発した。

2.2 直流高速真空遮断器

現在、電気車保護用の直流高速真空遮断器には、もっぱら気

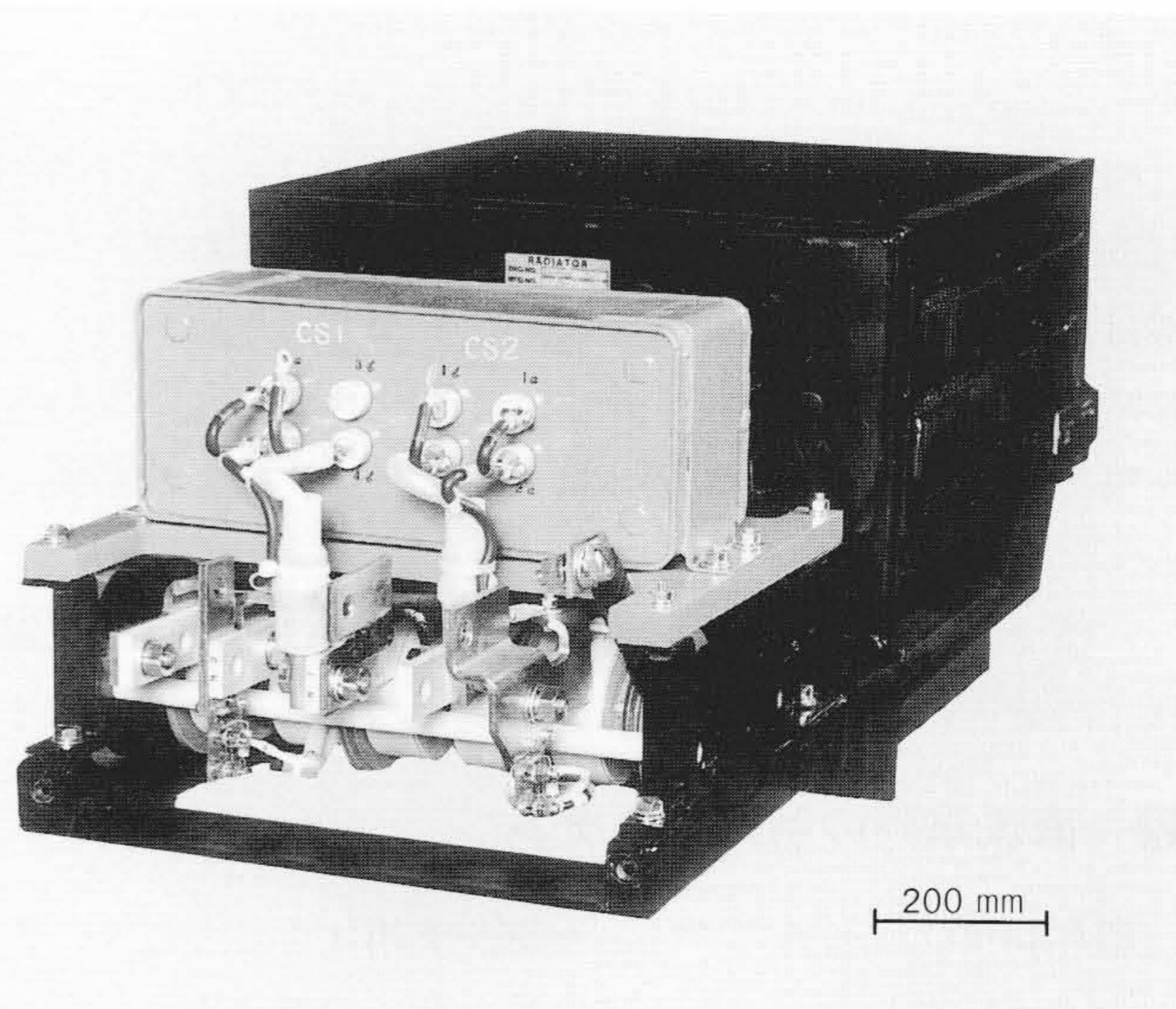


図2 素子外置きタイプ冷却装置の一例 電力用半導体素子を気中に設置し、冷媒量が少なく、装置の小形・軽量化が図れる。

中式遮断器が用いられている。しかし、気中式遮断器の場合は、保守性・遮断速度・遮断時の騒音の面で、長年改良が望まれてきた。

このたび、大容量化に適した直流高速真空遮断器として真空バルブを用いたコンデンサ転流方式による直流高速真空遮断器を開発した。その外観を図3に示す。従来の気中式遮断器に比べ、保守の軽減、遮断時間の短縮、アークレスで防災上からも有利になるなど多くの特長を持っている。直流高速

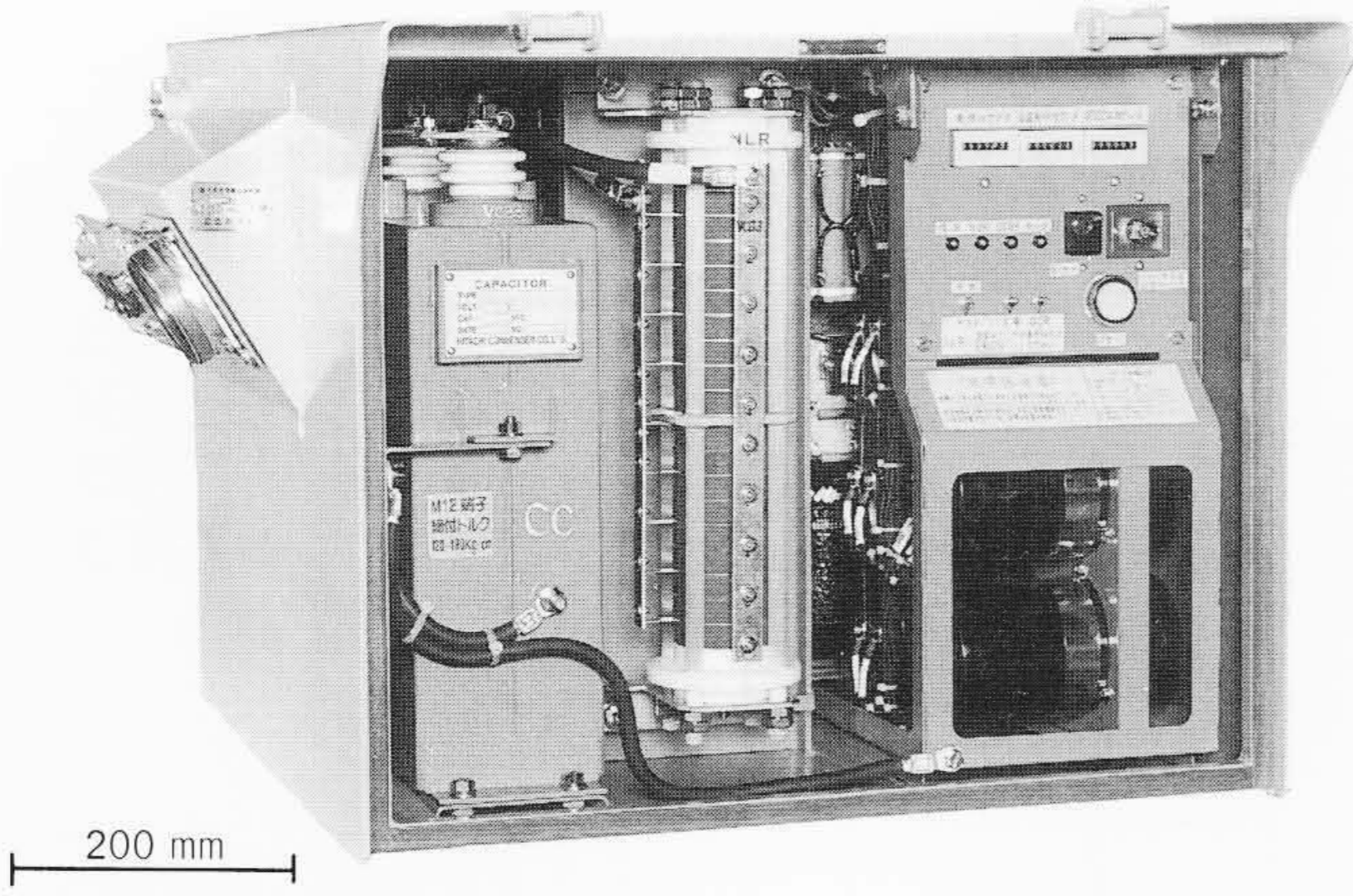


図3 高速度真空遮断器の外観 車上の事故電流を、高速でアークレスに遮断できる。

度真空遮断器と、半導体遮断器(GTO-遮断器)および気中遮断器の3種類の遮断器の比較結果を表2に示す。

直流高速度真空遮断器を採用することにより、システム全体としての小形・軽量化に大きく寄与できる。具体的な試算例を表3に示す。

大容量インバータ装置の実現に伴い、フィルタリアクトルの大形化は避けられない課題であり、これについての一つの

解決策となっている。

真空遮断器は長い気中遮断器の歴史を塗り変えると同時に、今後、幅広い需要にこたえることができるものと期待している。

3 交流車両の制御システム

直流車両でのPWMインバータによる誘導電動機駆動システムの急速な普及に呼応して、交流車両でも軽量化・高速化を目的としてPWMインバータの導入が始まっている。交流車両の場合は固定電圧・固定周波数の交流電源から、可変電圧・可変周波数の交流を作らねばならないため、交流電源電圧を一度直流定電圧に変換する必要がある、このためにコンバータが必要となる。一方、この直流定電圧を電源とするインバータについても、交流車両特有の制御が必要であり課題も多い。

3.1 PWMコンバータ・インバータシステム²⁾

本システムは図4に示すように、架線から取り込んだ交流電力を変圧器を介してPWMコンバータに加え、ここで直流定電圧を作り出し、インバータで誘導電動機を駆動する構成としている。

コンバータでは入力交流電流をほぼ正弦波状に、かつ電圧

表2 各種車載直流遮断器の比較 真空遮断器は、従来の遮断器にはない多くのメリットがある。

項番	項目	VHB	GTO-CB	HSCB
1	遮断原理	転流回路によるターンオフ	素子自体の消弧機能によるターンオフ	気中アークの冷却・拡散による消弧
2	原理図			
3	遮断エネルギー処理	NLR	同左またはCLR	アークシュートおよびCLRによる減流遮断
4	開極時間(ms)	1.0	—	8~10
5	通電損失	◎ 50 W以下(1,000 A時)	△ 2,000 W(600 A時)	◎ 100 W以下(900 A時)
6	通電容量(定格電流)	◎ 1,000 A(大容量化容易)	○ 600 A	◎ ~900 A(電車用)
7	動作寿命	◎ トリップ 20,000回目標	◎ 半永久的	◎ 20,000回
		○ 通常開閉 —	◎ 半永久的	◎ 200万回
8	双方向性	◎ 逆方向保護遮断も可能	△ 逆並列Dd必要(逆方向保護遮断時は2台必要)	◎ 逆方向保護遮断も可能
9	耐アーク性	◎ 真空バルブ内アーク	◎ 無アーク	△ 気中アーク(耐アーク空間および絶縁処理が必要)
10	保守性	○ 保守手入れ不要(バルブ交換だけ)	◎ 保守手入れ不要	△ 接触子の補修交換必要
11	遮断音	◎ 遮断音発生せず	◎ 遮断音発生せず	△ 遮断音発生

注：略語説明など VHB (Vacuum High Speed Circuit Breaker：真空遮断器)
 GTO-CB (Gate Turn Off TH-Circuit Breaker：半導体遮断器)
 HSCB (High Speed Circuit Breaker：気中遮断器)
 NLR (非線形抵抗器), CLR (線形抵抗器), Dd (ダイオード)
 ◎ (特に優れている。), ○ (優れている。), △ (普通)

表3 従来方式に対する各機器の比較 真空遮断器の採用により、駆動システム全体としての軽量化が図れる。

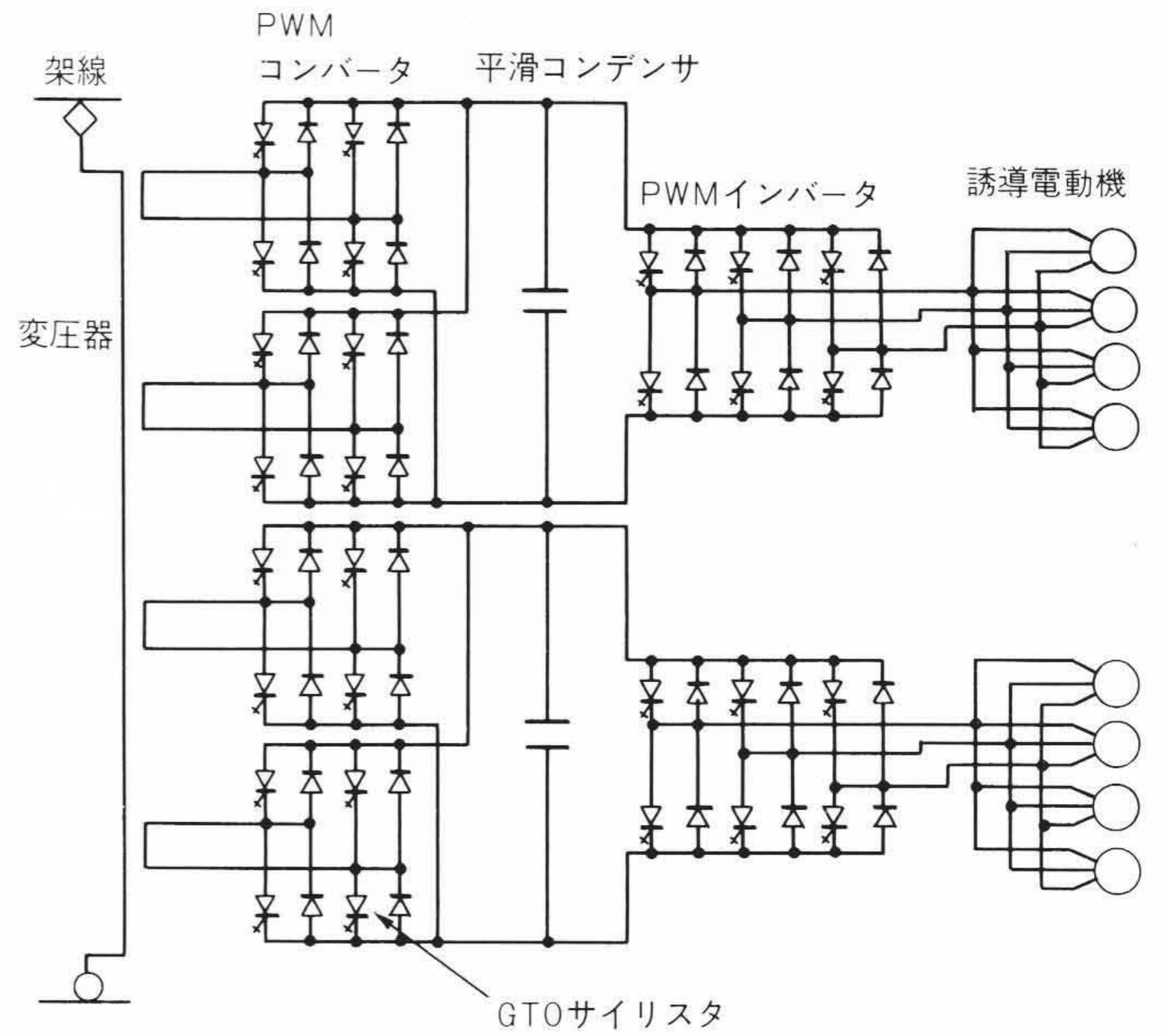
項番	項目	VHB	HSCB	
1	主回路方式			
2	フィルタリアクトルのインダクタンス	5~8 mH (本来の脈流電流制限に必要な値まで小さくすることが可能となる。)	10~12 mH (変電所の遮断器をトリップさせないようにするため、FLのインダクタンスの値を大きくして電流突進率を抑制し、保護協調を図っている。)	
3	*遮断器システム外形・質量比	遮断器箱		
		断流器箱		
		減流抵抗器	—	
		FL		
		総質量比	1,110 kg (60%)	1,850 kg (100%)

注：略語説明ほか FL (フィルタリアクトル), FC (フィルタコンデンサ)
* 8個電動機制御装置の試算例を示す。

と同相(すなわち、基本波力率は力行時1.0、回生時-1.0)に制御可能である。また、交流回生ブレーキが可能であり省エネルギー性に優れるばかりでなく、力行・回生、前進・後進の、いわゆる4象限運転が可能であり運転操作性にも利点がある。

ヨーロッパでは1970年代から鉄道車両への応用が始まり、わが国でも交流線区での高速化・省エネルギー化などの目的に合致するものとして、まず新幹線電車への適用が検討され、平成2年3月に東海旅客鉄道株式会社納め300系「スーパーひかり」(図5)の駆動システムとして実用化された。300系電車は東海道新幹線での最高運転速度を現行の220 km/hから270 km/hに向上させるため、大幅な軽量化が達成されており、このために本システムが採用されたものである。

PWMコンバータ・インバータは、主変換装置と呼ばれる一つの箱にまとめられ、小形・軽量化が図られている。主変換



注：略語説明 PWM (Pulse Width Modulation)

図4 300系「スーパーひかり」の主回路つなぎ 交流架線からPWMコンバータによって直流に変換し、さらにインバータによって交流を発生し誘導電動機を駆動する。

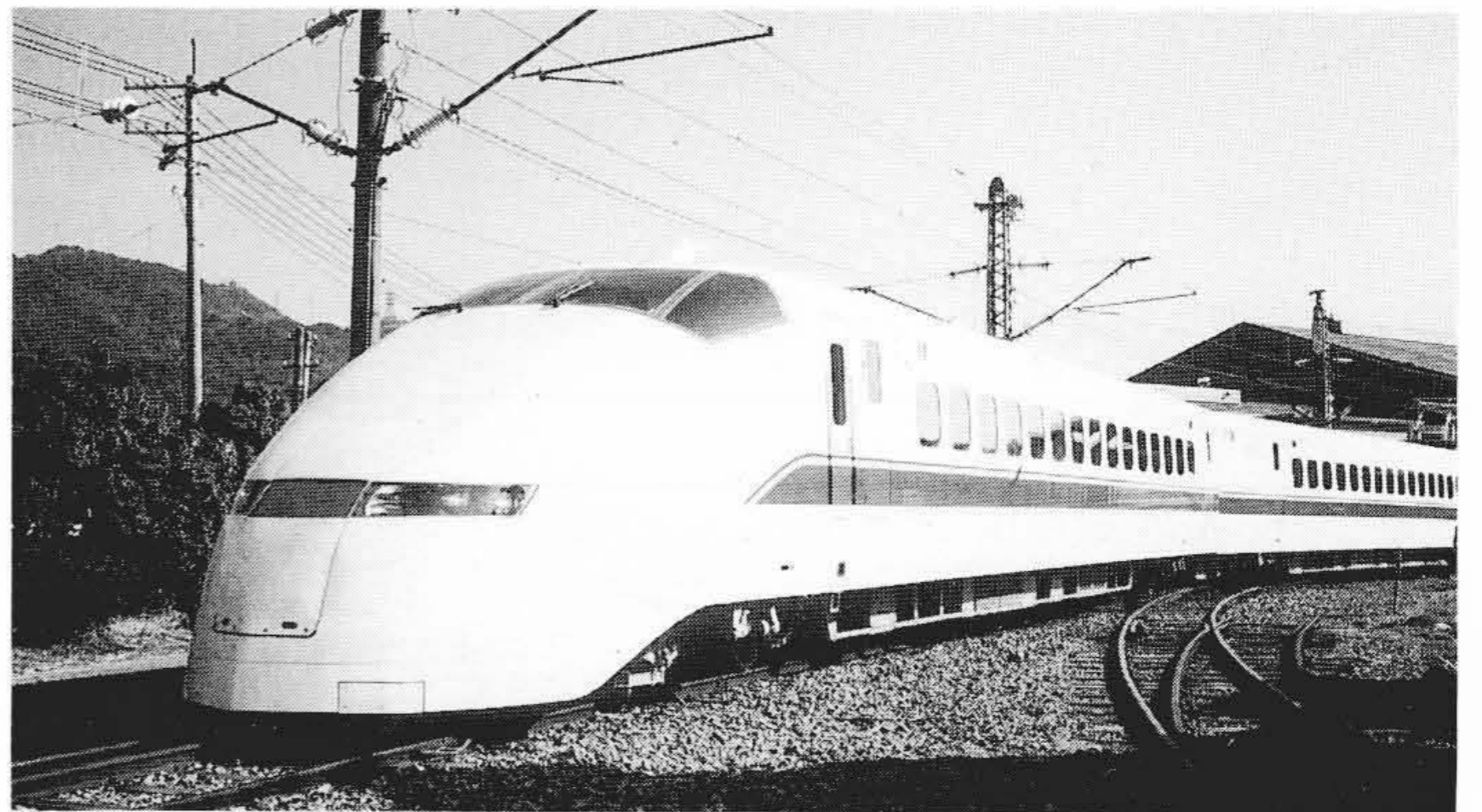


図5 東海旅客鉄道株式会社納め300系新幹線電車の外観 東海道新幹線での270 km/h営業運転のために開発されたPWMコンバータ・インバータ方式による最新の電車である。

装置の外観を図6に示す。

300系電車は順調に試運転が続けられており、量産車の登場・営業運転開始が期待される。

3.2 混合ブリッジコンバータ・インバータシステム³⁾

このシステムは図7に構成を示すように、交流電力をサイリスタによって位相制御して、直流定電圧を得るものである。

PWMコンバータシステムとは異なり、入力交流電流の基本波力率は力行時0.8程度であるが、初期投資の低減と実績のあるシステムという点が特徴である。ブレーキは車上に搭載した抵抗器をインバータで制御する発電ブレーキ方式とし、交流線区での高速化・省人化を目指している。在来線電車への適用が始まり、平成2年9月に北海道旅客鉄道株式会社納め

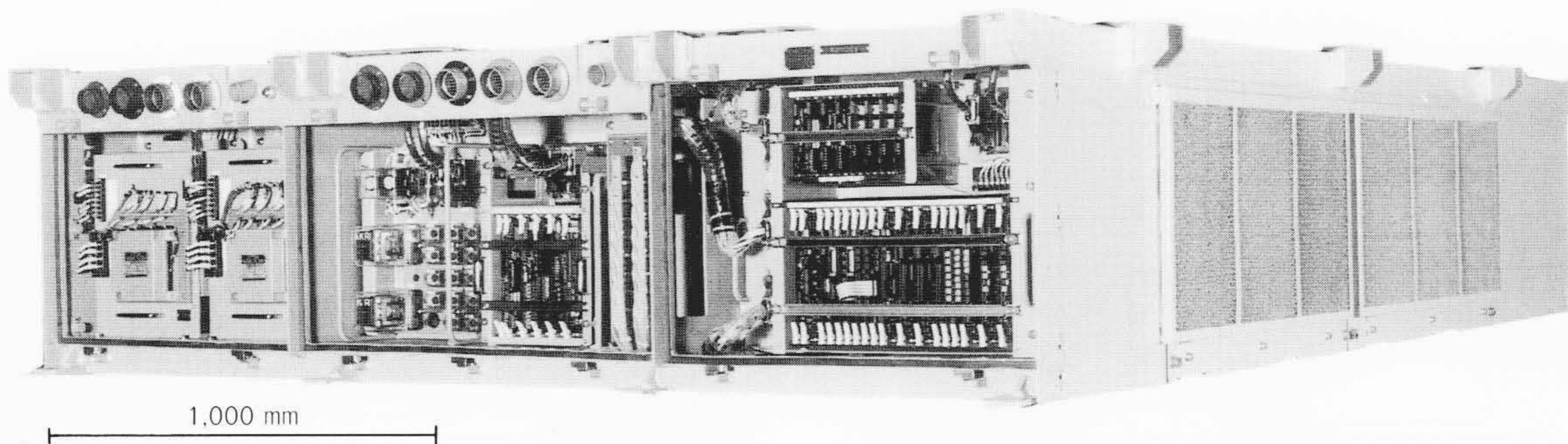


図6 300系用主変換装置の外観 PWMコンバータとインバータを一つの箱にまとめ、強制風冷方式として小形・軽量化を図っている。

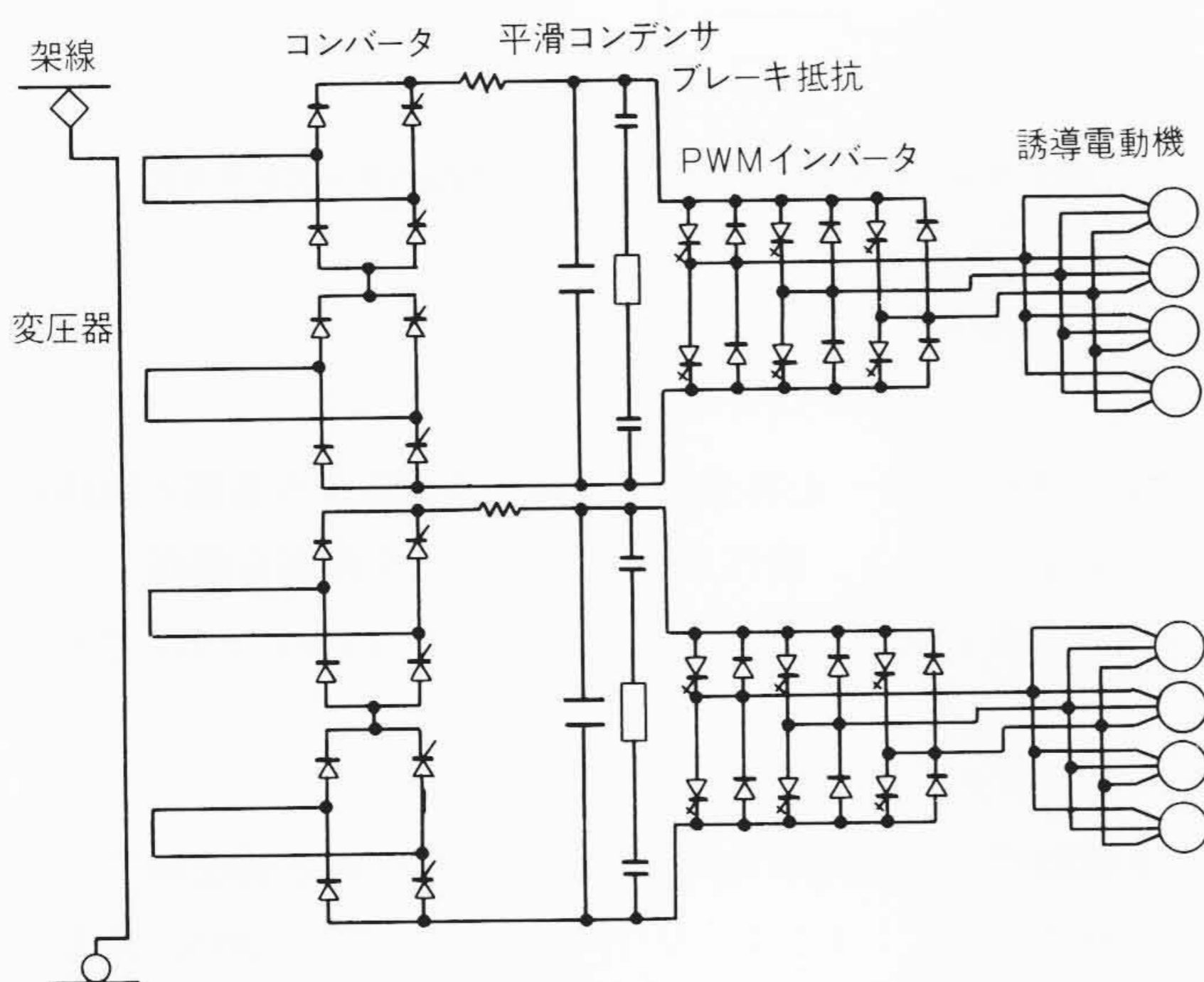


図7 混合ブリッジコンバータ・インバータの簡略つなぎ 実績のある他励式コンバータと最新のインバータとを組み合わせたシステムである。

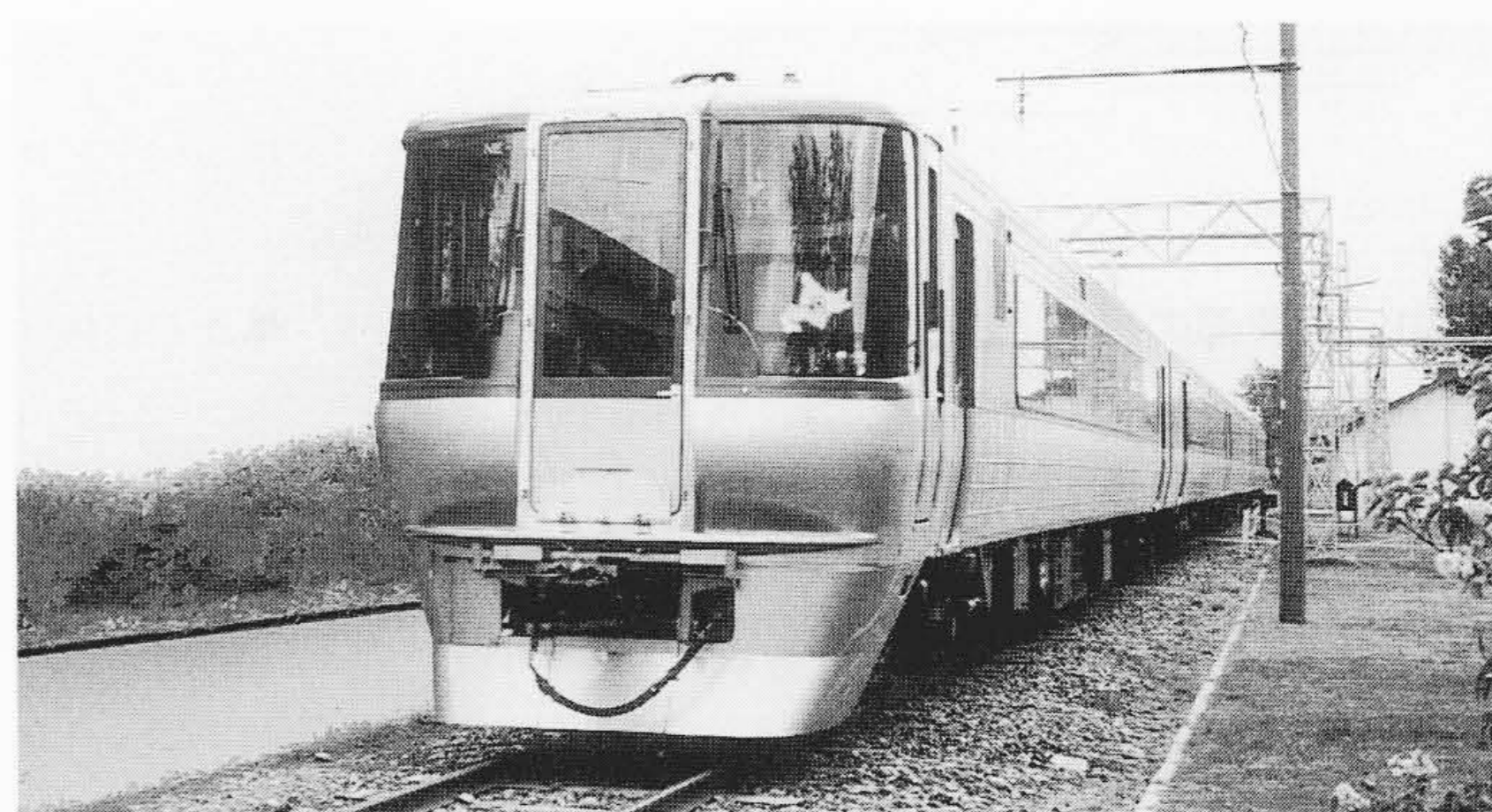


図8 北海道旅客鉄道株式会社納め785系特急電車の外観 在来線交流電車としてわが国で初めてVVVF(Variable Voltage and Variable Frequency)インバータ方式を採用し、最高速度130 km/hを誇る。

785系「スーパーホワイトアロー」(図8)の駆動システムとして実用化された。

混合ブリッジコンバータ・インバータは、やはり主変換装置と呼ばれる一つの箱にまとめられ、小形・軽量化が図られている。主変換装置の外観を図9に示す。

3.3 新形式車両用変圧器

交流電気車両に搭載する主変圧器についても、当然のことながら難燃化、小形・軽量化が重要である。

現用のシリコン油入りでの小形・軽量化は限界に近づきつつあり、新たに絶縁油の見直しから着手した。今回、新難燃性油を用い、窒素ガス封入方式の主変圧器を開発し、従来の標準方式に対し約5%の軽量化ができた。

新難燃性油はポリオールエステル、リン酸トリエステルおよび高引火点鉱油の3種の成分を混合精製したものである。新難燃性油の主な特徴は次のとおりである。

(1) 現用シリコン油と同様、難燃性を持っており、絶縁特

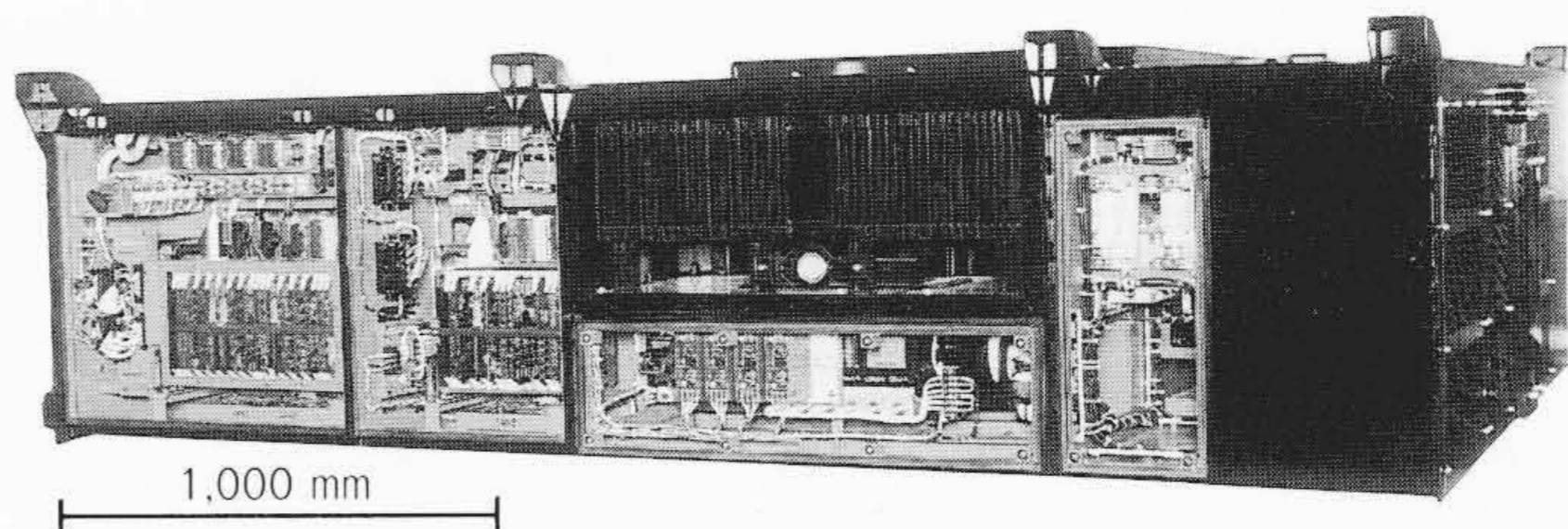


図9 785系用主変換装置 混合ブリッジコンバータ2ブリッジ分1タンクとインバータ用三相分1タンクを一つの箱に集約し、小形・軽量化を図っている。

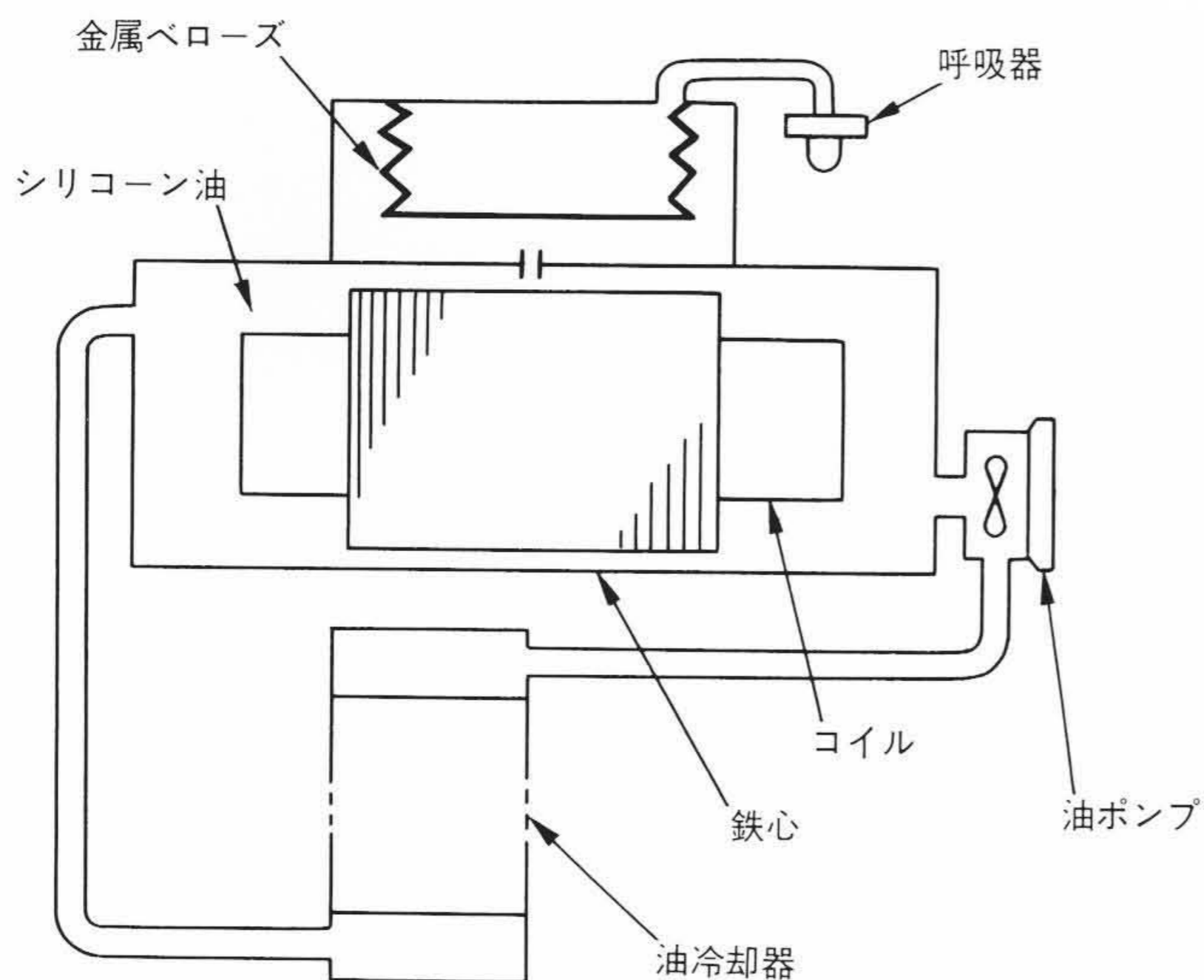
性もほぼ同じである。

(2) 窒素ガス溶解量は、シリコン油の50%であり、鉱油と同一レベルである。

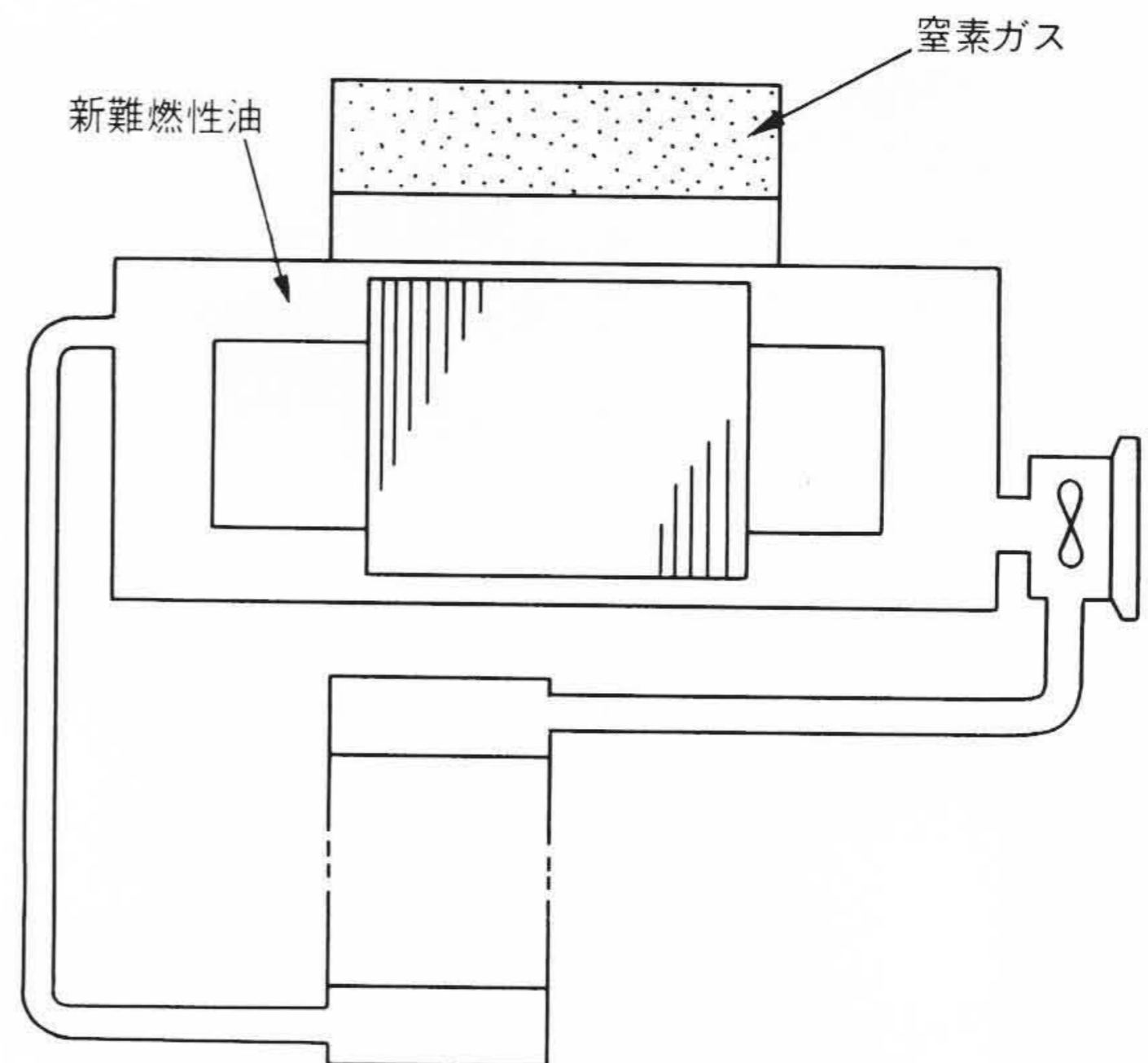
(3) 膨張係数は、シリコン油の61%であり、コンサベータの応動量を小さくすることができる。

現用シリコン油は窒素ガス溶解量が15%と高く、窒素ガス封入方式にすると油ポンプの運転によって油中で発泡し、絶縁特性が低下する。そのため従来は、金属ベローズを使用した無ガス、無圧密封方式としていた。

今回、窒素ガス溶解量がシリコン油の50%の新難燃性油を採用し、構成を単純化して軽量化を図った。主要部の構成



(a) 従来：シリコン油使用無圧密封式(ベローズ方式)



(b) 今回：新難燃性油採用窒素ガス密封式(ベローズレス方式)

図10 主要部の構成比較 窒素ガス封入方式により、構成を単純化した。

比較を図10に、外観を図11に示す。

4 軽量形誘導電動機

電気車の性能の向上に伴い、駆動用主電動機の高速度・大容量化が進んでいる。これに対して、電動機の軽量化や高周波電流による電磁騒音低減が必要である。これらの要求にこたえるためには、主電動機単品の改善にとどまらず、システム全体の中で小形・軽量化あるいは電磁騒音の低減という考え方が必要となってきた。

4.1 主電動機の軽量化

電気鉄道車両用主電動機に要求されている電車特性(速度-引張力)の一般的なパターンを図12に示す。一般に電車特性は定トルク域、定出力域および特性域に分かれる。誘導主電動機的设计にあたっては、特性域である一定のトルク余裕(停動トルクと電車特性上のトルクの比)を確保するよう漏れリアクタンスを決め、固定子コイルの巻数などを設定し、かつV/f比

(電圧/周波数比)一定終速で過励磁とならぬよう各部の磁路断面を決定している。特性域に必要なトルク余裕を確保し、かつ鉄心寸法を極力小さくする方法として以下の二つが考えられている。

(1) V/fパターンの設定

主電動機の軽量化のためには、定トルク域と特性域でのトルク余裕を等しくするようV/fパターンの設定を行い、定トルク域でフラックス Φ を必要以上に大きくしないことが必要で

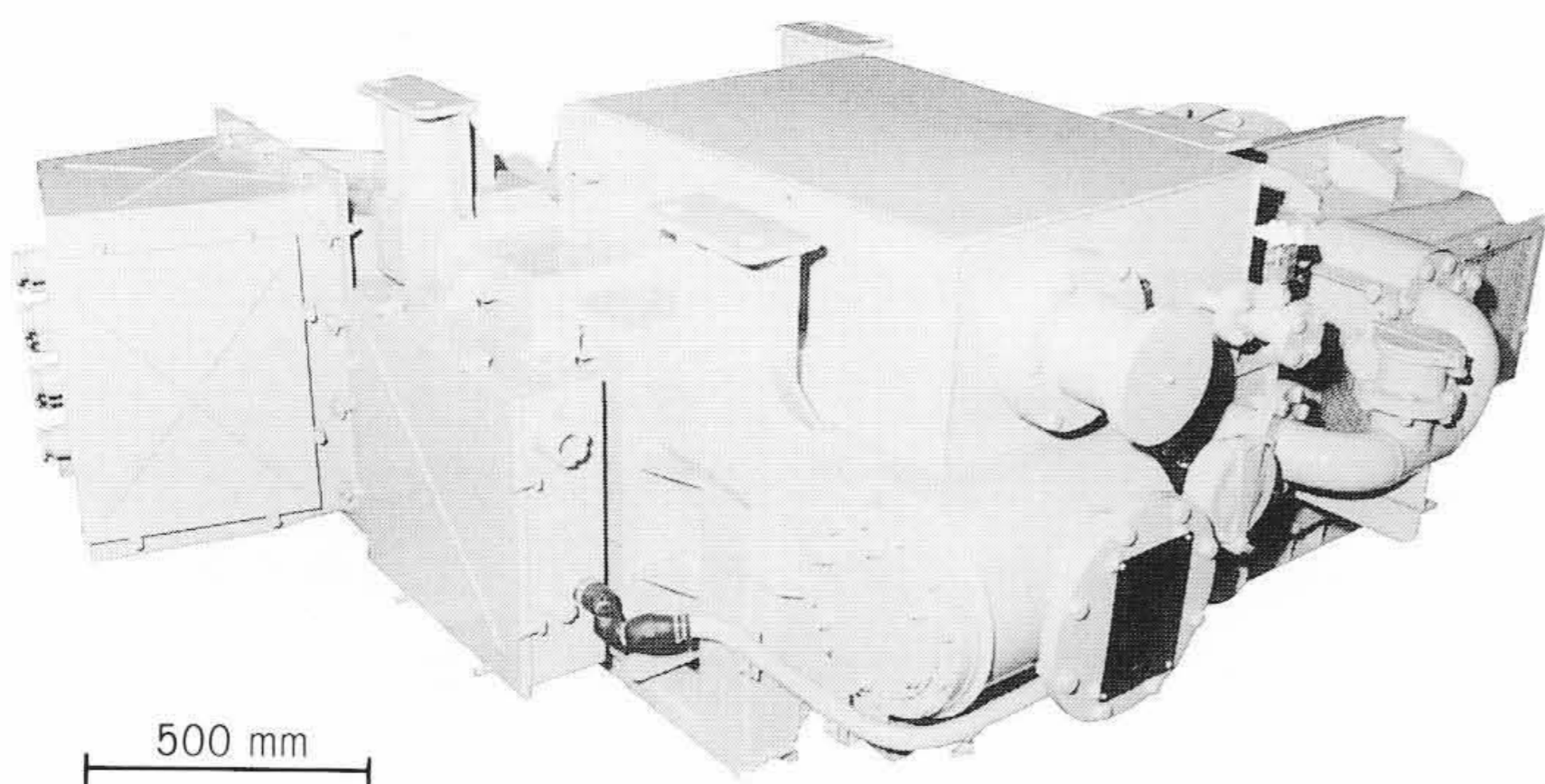


図11 主変圧器の外観 従来の変圧器に比べて、コンサベータ部分を角形として構造を単純化し、小形・軽量化を図った。

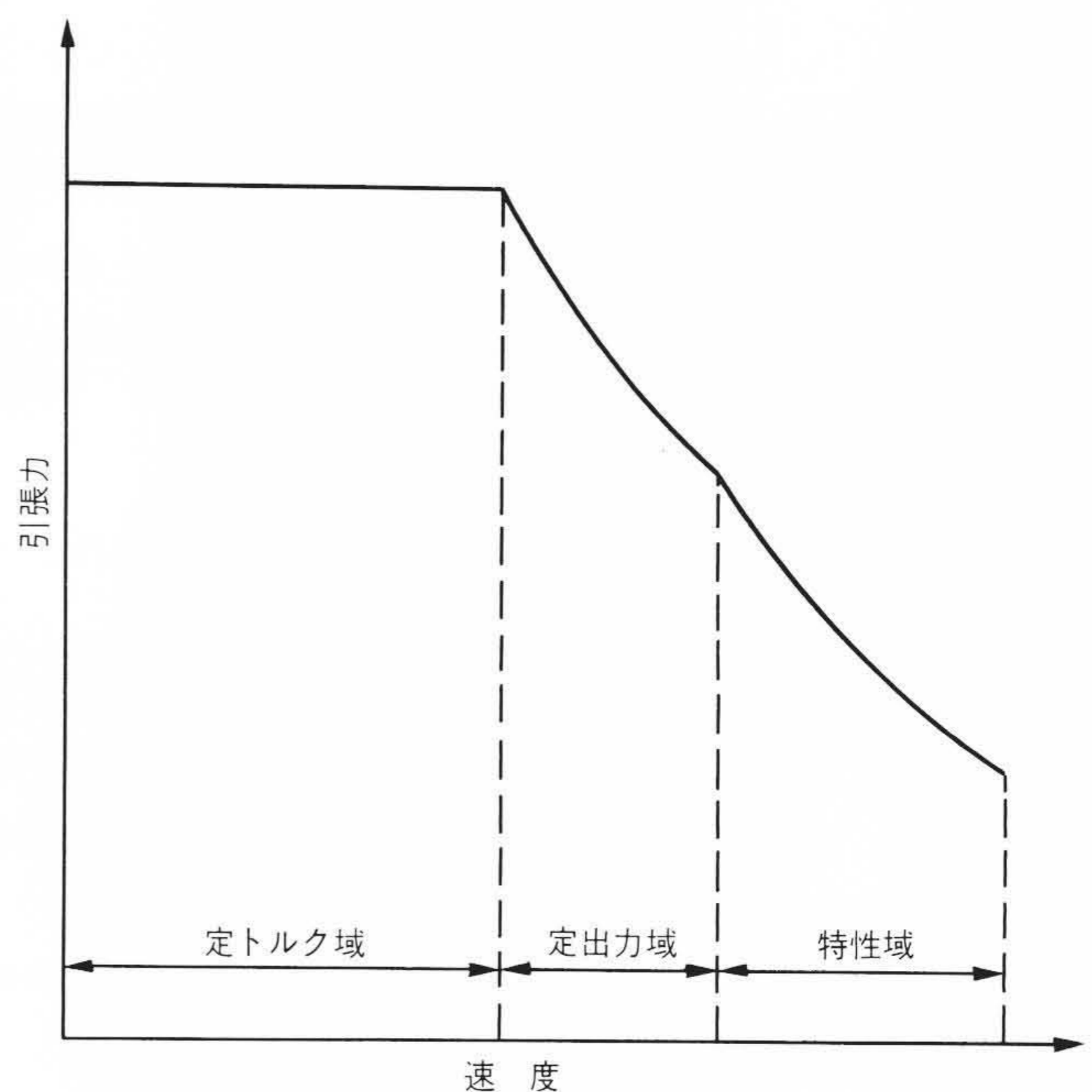


図12 電車特性 代表的な電車特性は、図示のように定トルク域、定出力域、特性域の三つに分かれる。

ある(図13)。ここでV/f一定終速 f_0 は、

$$f_0 = \sqrt{f_1 \times f_2} \dots\dots\dots(1)$$

で表されるとき最も軽量となる。140 kWクラス主電動機で f_0 と質量の関係を図14に示す。 f_0 を定トルク一定終速 f_1 よりも高く設定し、起動トルクを確保するためには起動電流を増す必要があり、GTOの遮断電流との関係を考慮して f_0 を決定する必要がある。

(2) 定出力域で電圧を上昇させる。

停動トルクと電圧・周波数には次式の関係がある。

$$T_{max} \propto (\text{電圧}/\text{周波数})^2 \dots\dots\dots(2)$$

上記の関係を利用し、定出力域で速度の0.5乗に比例させる電圧制御を行うことにより、図15に示すように定トルク域から特性域までトルク余裕を一定とすることができ、起動電流を増加することなく(1)項と同様の効果が得られる。例えば、定出力域の速度比(定出力域の終速と定トルク域の終速の比)が1.5倍程度の場合、本制御を行うことにより、14%程度の軽量化が図れる。この方式は、インバータ入力の直流電圧の制御が可能な交流電車に有効な制御方式であると言える。

4.2 電磁騒音の低減

VVVF(Variable Voltage and Variable Frequency)インバータ制御電車の車内騒音を測定してきた結果、車内の電磁

騒音は次の二つに分けられることがわかってきた。

(1) インバータの高調波周波数が、主電動機フレームの固有振動数と一致したときに生じる共振音

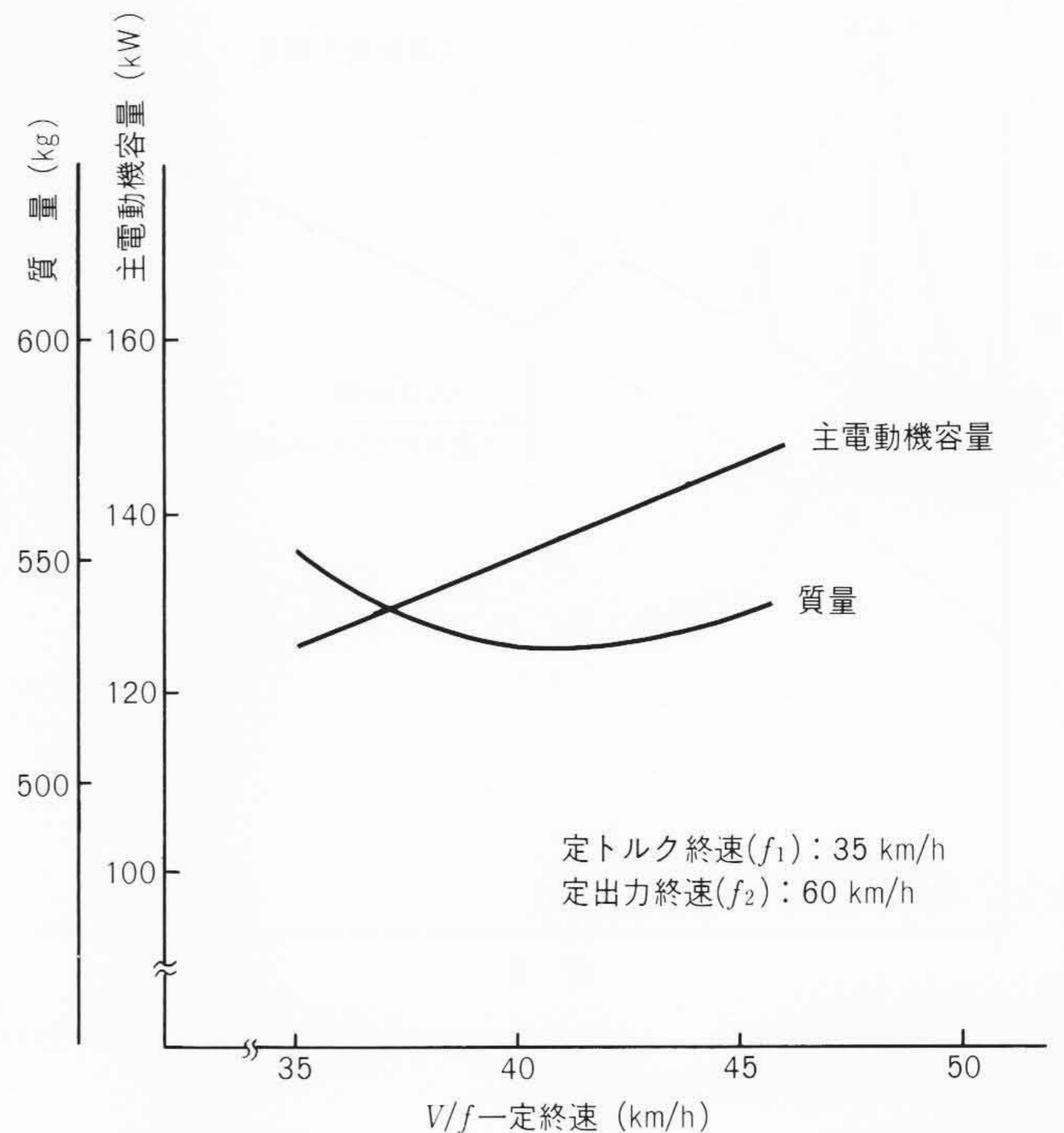


図14 V/f一定終速と主電動機質量の関係 V/f一定終速には、質量が最小となる最適値が存在する。

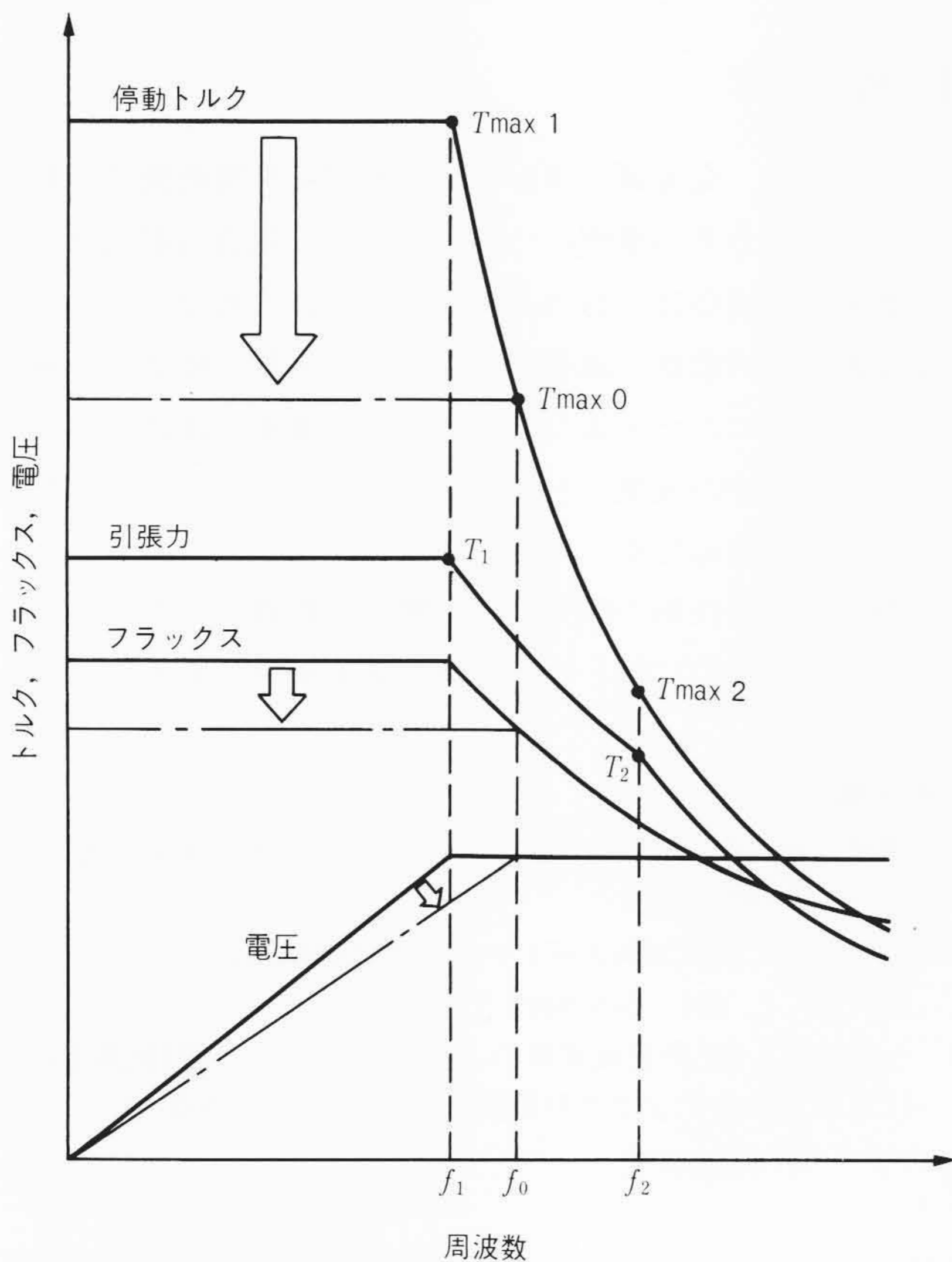


図13 V/fパターンの設定 主電動機の軽量化のため、V/fパターンを最適に選定する必要がある。

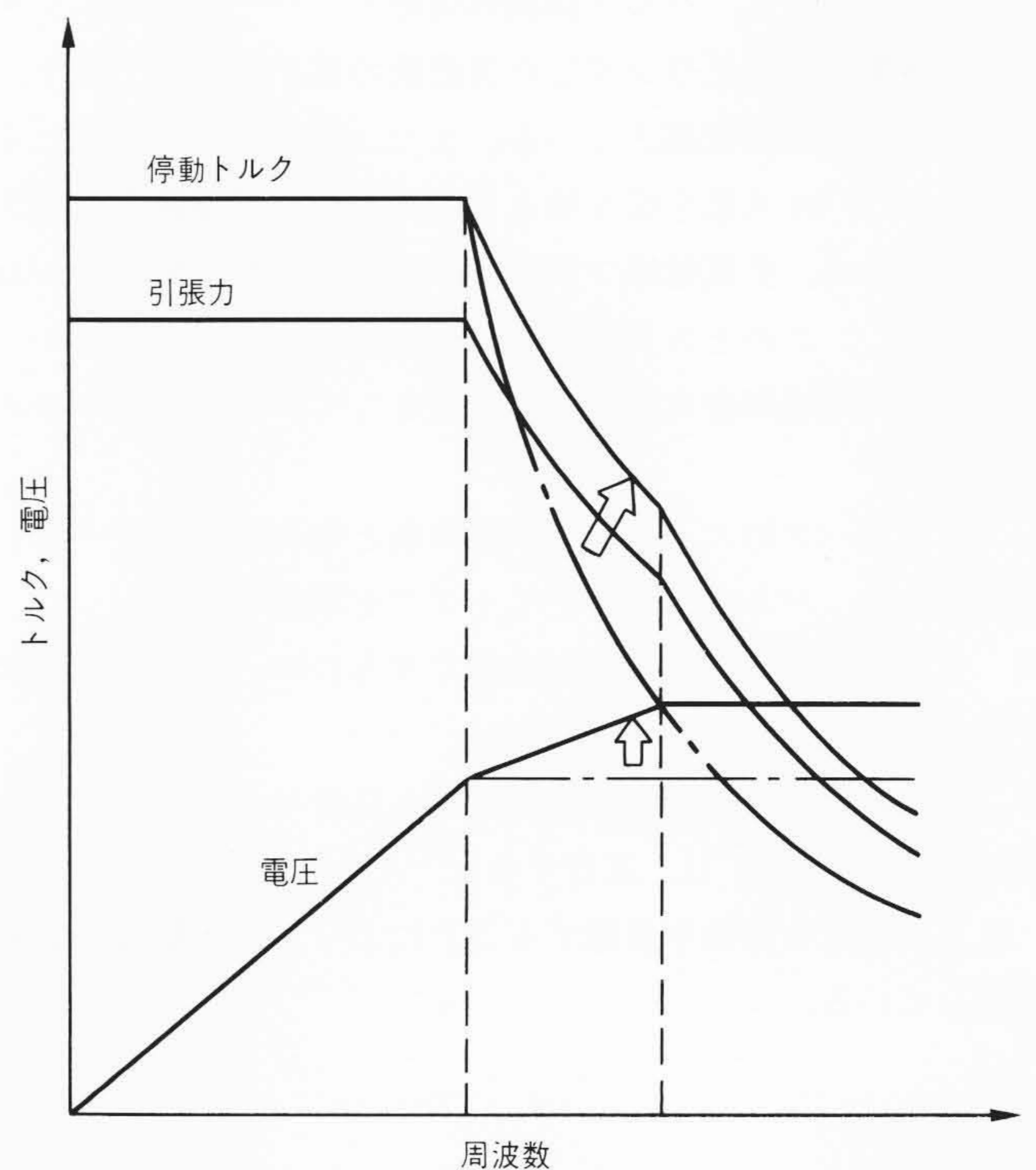


図15 定出力域での電圧制御 定出力域で速度の0.5乗に比例する電圧制御を行うことによって、主電動機の軽量化が図れる。

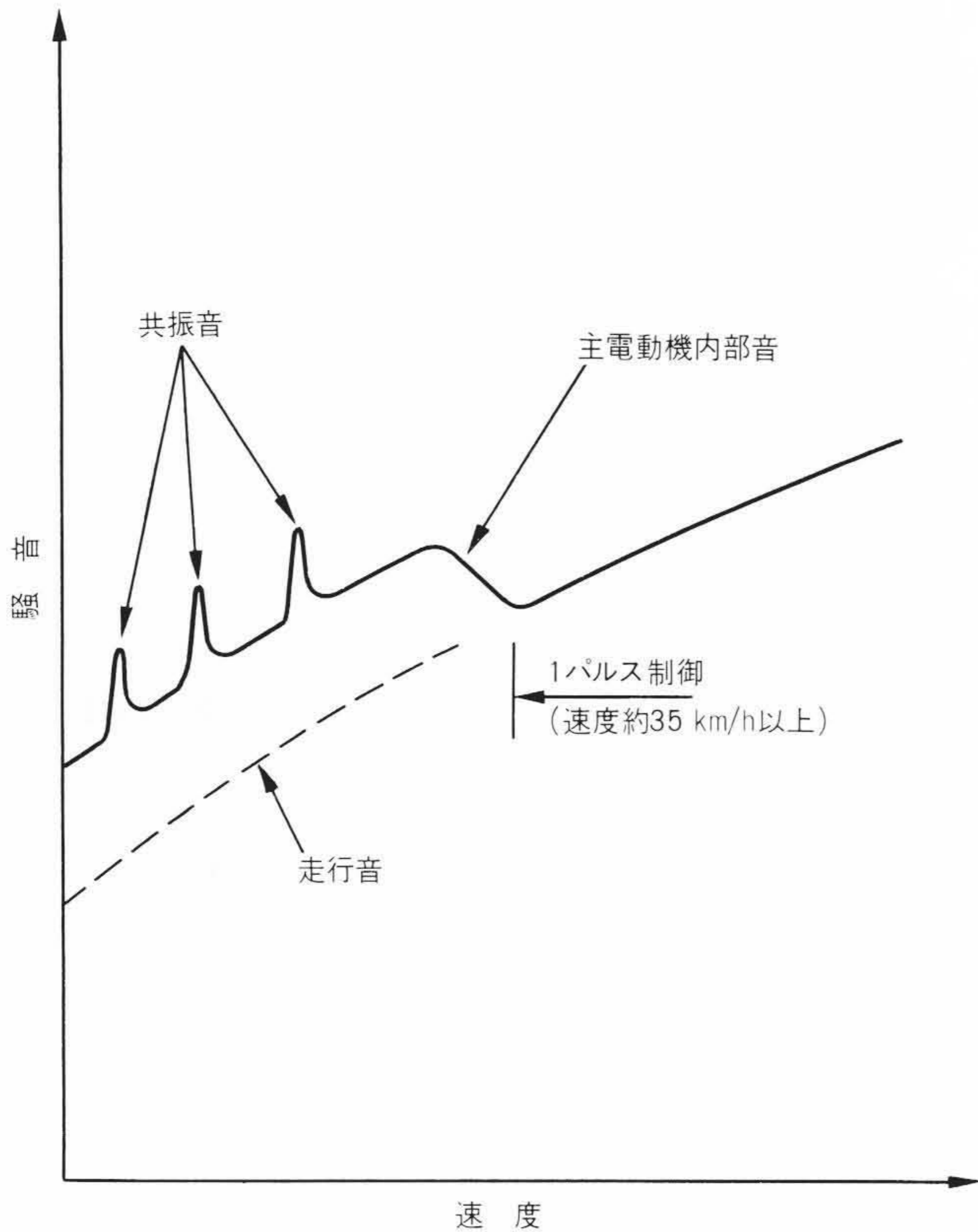


図16 車内の電磁騒音 主電動機内部で発生する電磁音は、インバータのスイッチング周波数に依存する。

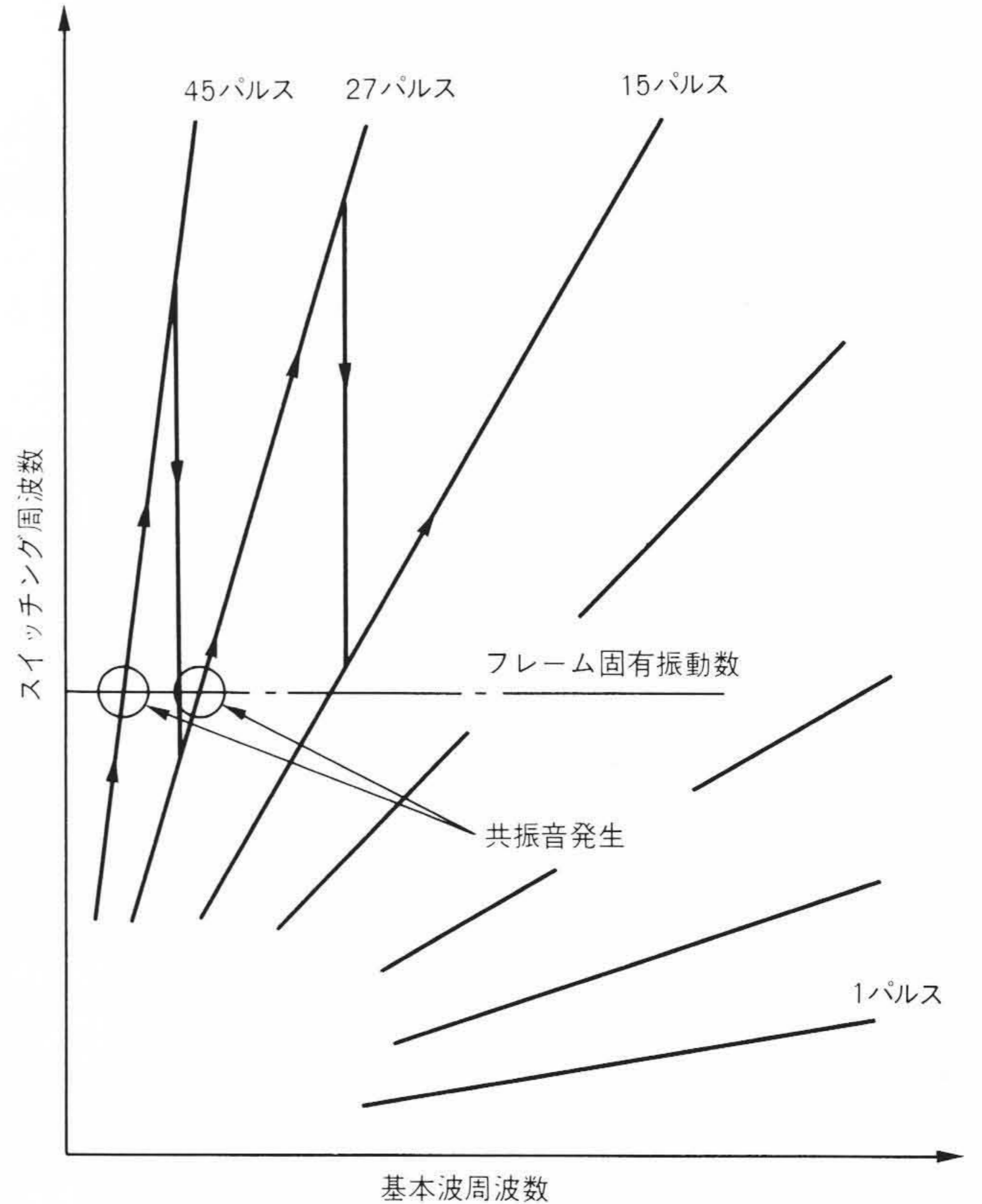


図17 共振音の発生 インバータのスイッチング周波数とフレームの固有振動数が一致したときに共振音が発生する。

(2) 上記高調波により、主電動機内部で発生する電磁音

このようすを概念的に図16に示す。同図で主電動機内部で発生する電磁音は、パルス切換制御時インバータのスイッチング周波数の2倍にリンクした周波数の音が発生しており、1パルス時にはほぼ消えている。また、図17に示すようにインバータはパルス数を切り換えながら基本波周波数を増加させていくため、主電動機フレームの固有振動数と数度にわたって一致し、このとき共振音が発生する。

これらの電磁騒音を低減する方法として、次のことが考えられる。

- (1) インバータのスイッチング周波数と固有振動数が一致しないように、パルス切換のタイミングを最適化する。
- (2) 主電動機内部の電磁音を小さくするため、固定子～回転子間のギャップを大きくする。
- (3) 主電動機内部の電磁音を外へ漏らさないように遮音する(透過損失を大きくし、遮音する)。

以上のような対策を実施することにより、電磁騒音の低減を図っている。

5 結 言

直流電気車、交流電気車および駆動用交流電動機での最近の技術的進歩とその事例について述べた。鉄道用電気車両での制御装置の進歩は、おのおののシステムの特質に応じて多彩な技術分野の最新の成果が応用され、小形・軽量・低騒音というニーズにこたえるため目覚ましい進歩を遂げている。今後も現在までの成果にとどまることなく、いっそうの発展を期し努力を重ねてゆく考えである。

終わりに、新技術の開発にご理解とご指導をいただいた鉄道会社の関係各位に対し感謝の意を表す次第である。

参考文献

- 1) 豊田, 外: 最近の直流電車制御システム, 日立評論, 70, 7, 690~693(昭63-7)
- 2) 中村, 外: 交流車両の新しい誘導電動機駆動システム, 日立評論, 70, 7, 681~686(昭63-7)
- 3) 玉置, 外: 785系交流電車の主回路システム, 第27回鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム(平2-11)