U.D.C. 621.337.4:〔621.314.572:681.325-181.48〕:〔621.382.333.34::621.318.57〕

DC1,500V電車駆動用VVVFインバータ制御装置の開発

Development of VVVF Inverter Controllers for DC 1,500V Electric Cars

岡松茂俊* *Shigetoshi Okamatsu*
堀江　哲* *Akira Horie*
浅井康夫* *Yasuo Asai*
木村　彰** *Akira Kimura*
加藤憲司*** *Kenji Katô*

電車駆動用誘導電動機の制御装置として，このたび4,500V，2,000A GTOサイリスタを適用し，かつ16ビットマイクロプロセッサによる高精度・高機能の制御方式を備えたVVVFインバータ制御装置を開発した。

耐圧4,500Vの素子を使用したため，主回路が簡略化され，装置を小形・軽量化することができた。

また，16ビットマイクロプロセッサによる全ディジタル制御方式の採用により，定速制御・空転再粘着制御・こう配起動制御などを容易に実現することができた。

更に，信号機器に対する誘導障害試験の結果，帰線電流に含まれるノイズ及び直達ノイズは共に低いレベルであり，問題のないことが確認された。

1 緒　　言

電車駆動用VVVFインバータ制御装置(Variable Voltage Variable Frequency：可変電圧可変周波数インバータ制御装置)に使用する半導体スイッチング素子として，転流回路の不要なGTOサイリスタ(ゲートターンオフサイリスタ)を応用する例が増加している[1)~3)]。

DC1,500V電車用としては，従来2,500V耐圧のGTOサイリスタを1アームに2個直列で使用していたが[4)]，主回路が複雑化し，装置も大形になるため耐圧4,500VのGTOサイリスタを使用し，1アームに1個とすることによって簡単化・小形化を図った。

また，制御方式としてはVVVFインバータ制御装置の高精度・複雑な制御に対応するため，従来から8ビットマイクロプロセッサを使用してきたが，最近のマイクロプロセッサ技術の目覚ましい発展による16ビットマイクロプロセッサを導入することによって，従来機能の高精度化を実現するとともに定速制御などの機能を付加することができた。

本論文では，今回開発したVVVFインバータ制御装置の概要及び現車試験結果について紹介する。

2 主回路の構成

主スイッチング素子として4,500V，2,000AのGTOを使用した結果，1アーム当たり1個という最も簡単な構成になっている。

制御容量は170kW級3相誘導電動機4台である。

図1にVVVFインバータ制御装置の主回路構成を示す。

3 制御方式

3.1 16ビットマイクロプロセッサの応用

3.1.1 ハードウェア

今回開発したマイクロコンピュータ制御システムのハードウェア構成を**図2**に示す。CPU(中央処理装置)は16ビットマイクロプロセッサ68000を用い2枚構成とし，マルチバス方式とした。

CPUは，高速演算を必要とする機能と演算速度が多少遅くてもよい機能とに分類し，演算速度の能力と演算精度の能力とを使い分けることによって効率良く処理するようにした。

メモリ回路は64kバイトRAM(Random Access Memory)を収納し，モニタデータ保存のためバッテリーバックアップ

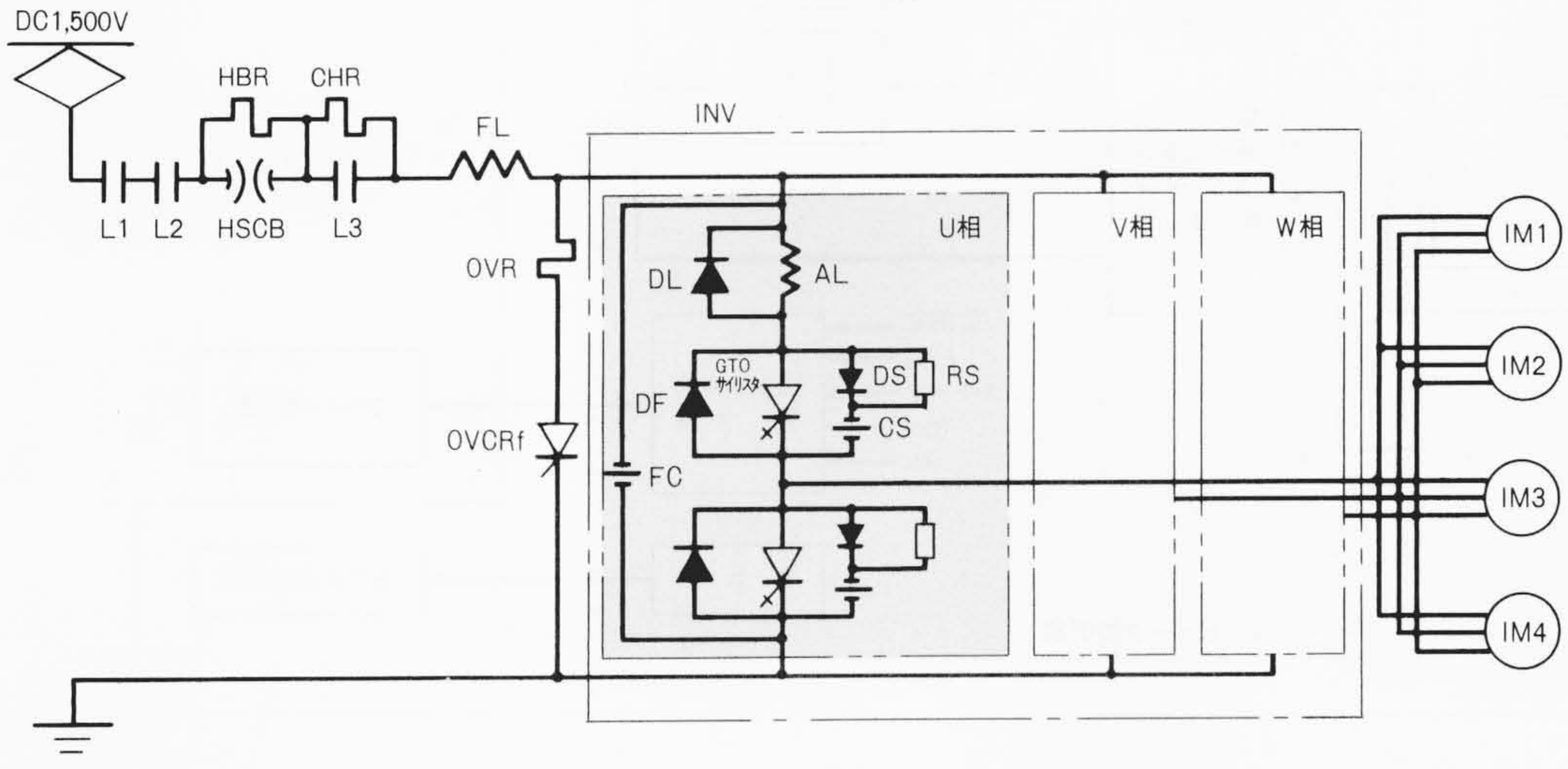
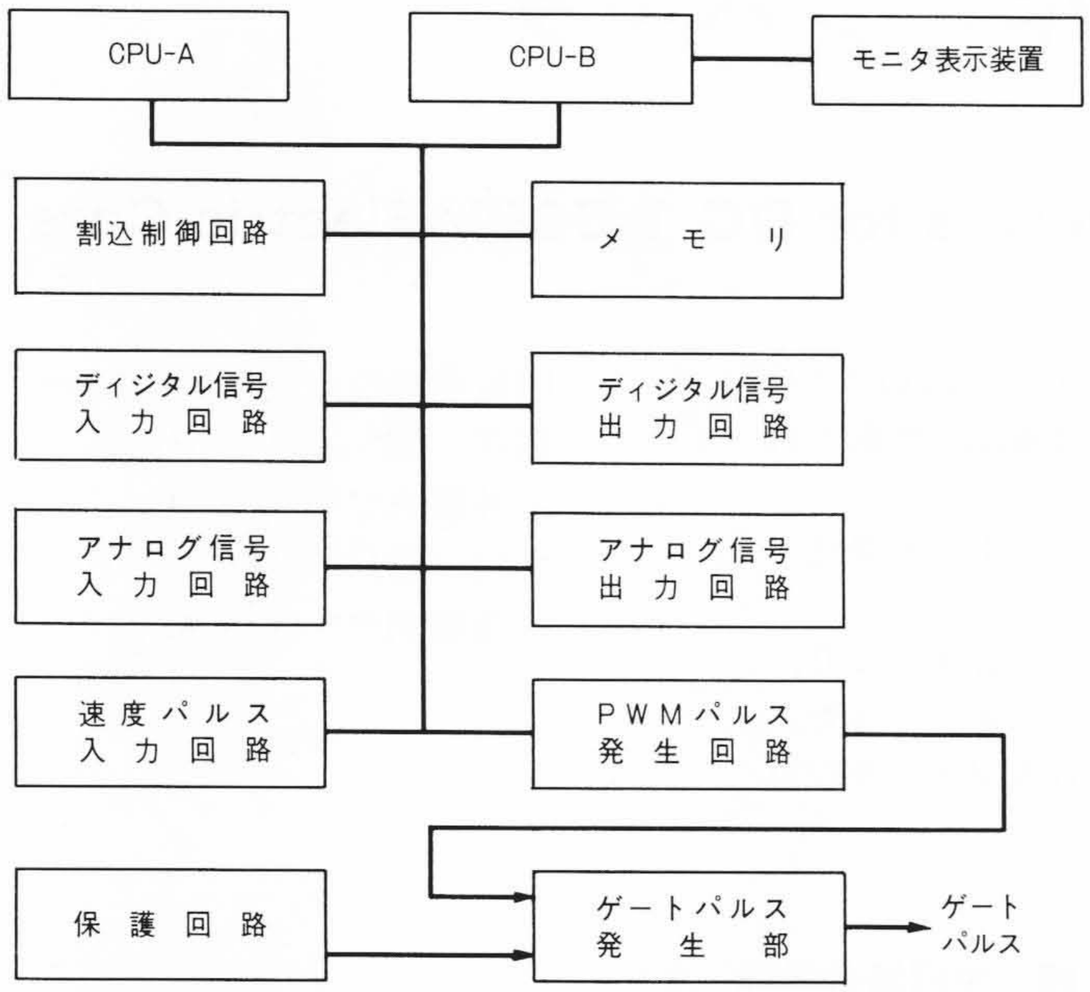


図1　VVVFインバータ制御電車の主回路　4,500V，2,000A GTOサイリスタを使用し，1アーム当たり1直列1並列接続とした。

* 日立製作所水戸工場　** 日立製作所日立研究所　*** 日立製作所機電事業本部



注：略語説明 CPU-A, CPU-B(マイクロプロセッサ)
PWM(Pulse Width Modulation)

図2 マイクロコンピュータ制御システムのハードウェア構成
CPUとして16ビットマイクロプロセッサ68000を用いたマルチバス方式とした。

付きとした。

入力インタフェース回路としては外部接点信号入力用としてのディジタル入力回路，電動機電流・フィルタコンデンサ電圧などのアナログ信号入力用としてアナログ信号入力回路，及び誘導電動機の回転速度検出用のパルスセンサ入力回路で構成されている。

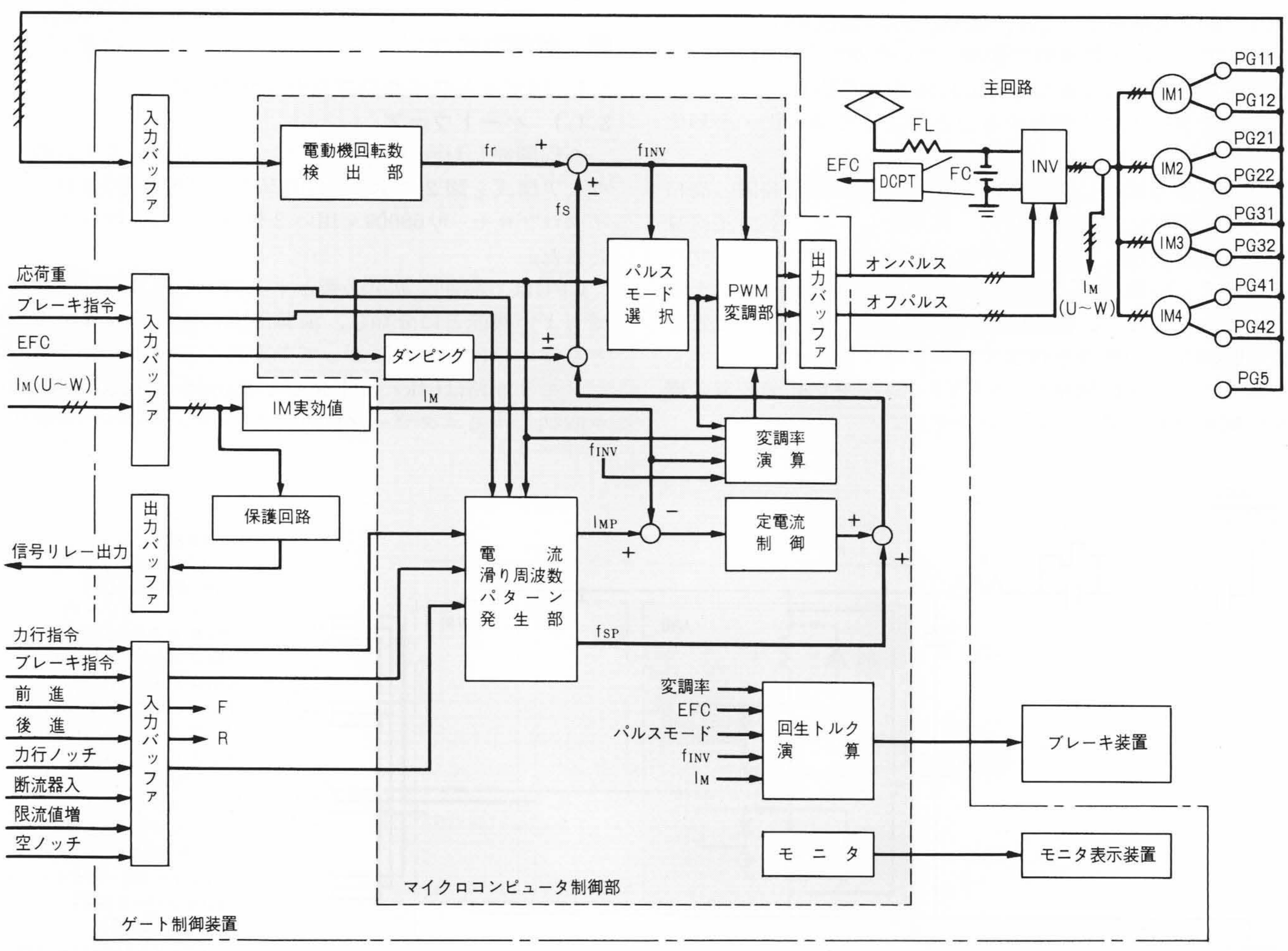
出力インタフェース回路としては，ブレーキトルクフィードバックなどのためのアナログ出力回路，継電器などの駆動回路であるディジタル出力回路，及びPWM変調パルス出力回路から構成されている。

特徴は，メモリの内容を目視確認することが可能なモニタ表示ユニットを備えていることである。本装置は空ノッチ時のリアルタイム表示及びモニタリングデータの表示を行なうことができるので，マイクロコンピュータの動作状態を容易に確認することが可能となった。

3.1.2 基本的な制御機能

図3に制御ブロック図を示す。内側の破線内がソフトウェアで処理する機能である。

入力信号としては，各電動機の回転周波数，電動機電流・フィルタコンデンサ電圧などのアナログ信号，運転指令信号などから成る。今回は，電動機の付いていない付随車の車輪の回転数も入力し，電動機駆動軸の空転・滑走の検出を容易



注：略語説明
F(前進信号)，f_{INV}(インバータ周波数)，FL(フィルタリアクトル)，R(後進信号)，f_S(滑り周波数)，EFC(フィルタコンデンサ電圧)
f_{SP}(滑り周波数パターン)，INV(インバータ装置)，I_M(U～W)〔電動機電流(U～W相)〕，I_{MP}(電動機電流パターン)，IM1～IM4(誘導電動機)，I_M(電動機電流実効値)
PWM(パルス幅変調)，PG11～PG42(パルスゼネレータ)，fr(ロータ回転周波数)，DCPT(直流変成器)，PG5〔T車(付随車)車輪回転数検出用PG〕

図3 制御ブロック図 T車(付随車)の車輪回転数をPG5で検出している。

にしているのが特徴である。

電動機回転数の検出方式としては，高速応答性を得るために，速度センサのパルス周期Tと所定時間内のパルス数Nの両者によって演算する$N \cdot T$検出方式を用いた。

制御系の基本的な構成としては，制御目標とする電流パターンを発生し，これを電動機電流検出値と比較し，両者が一致するように滑り周波数を制御するフィードバック制御系を構成している。なお，ダンピング制御は，主回路のフィルタリアクトルとフィルタコンデンサの共振を抑制するため，フィルタコンデンサ電圧をフィードバックして，滑り周波数制御を行なっている。

変調率は起動時だけ定電流制御に使用し，他領域ではインバータ周波数に対応したV/f一定制御としている。また，パルスモード切換制御もインバータ周波数とフィルタコンデンサ電圧の関数としてパルスモードの選択を行なっている。

3.2　制御方式の特徴

3.2.1　定速制御

VVVFインバータによる誘導電動機制御方式の場合，電動機の回転数を検出していることから車両速度の検出が容易である。この速度情報を応用し，車上装置だけによって電車速度一定制御を行なうことは従来から考えられてきた。

今回，力行ノッチ指令の中の2ノッチを「定速ノッチ」として，2ノッチが指令される直前の速度を目標速度とし，これより速度が低下したら自動的に力行し，速度が上昇したら自動的に回生ブレーキとなる定速制御方式を採用した。

この定速制御機能は，長い速度制限区間やラッシュ時の追従運転などの場合の運転操作を容易にするもので，同時に乗り心地を改善することができる。

図4に定速制御特性図を示す。

3.2.2　空転再粘着制御

従来，M車※1)駆動輪の加速度が過大となったことで空転検出していたが，この場合，連結器の遊びなどにより通常発生する瞬間的な加速度の増大で空転の誤検出をしないように，ある程度検出感度を鈍くする必要がある。このため，検出レベルに達しない低い加速度で空転が発生すると大空転に発展し，車輪やレールに悪影響を与えるおそれがあった。

今回，空転しないT車※2)の車輪の速度を基準に空転を検出することによって，M車車輪の空転速度を最小に抑える空転再粘着制御方式を開発した。

試験の結果，空転検出の不感帯は約1 km/hに抑えられ，空転が発生してもただちに検出して絶対に大空転に至ることがなく，良好な再粘着特性が得られた。

図5に空転・再粘着制御ブロック図を示す。

3.2.3　こう配起動制御

VVVFインバータによる誘導電動機駆動方式の電車の場合，上りこう配上などで起動するとき，ブレーキを緩めると多少電車が後退した後に前進起動することがあるが，その場合，電動機のロータ回転数がマイナスになっているために，適正な滑り周波数を保つためにはインバータの出力周波数もマイナスにする必要がある。このようにすると，電車が後退から前進に移行する間に必ず周波数がゼロ(すなわち直流)となるポイントを通過しなければならないが，従来は周波数をゼロとする技術が実用化されていなかったため，後退速度が上昇

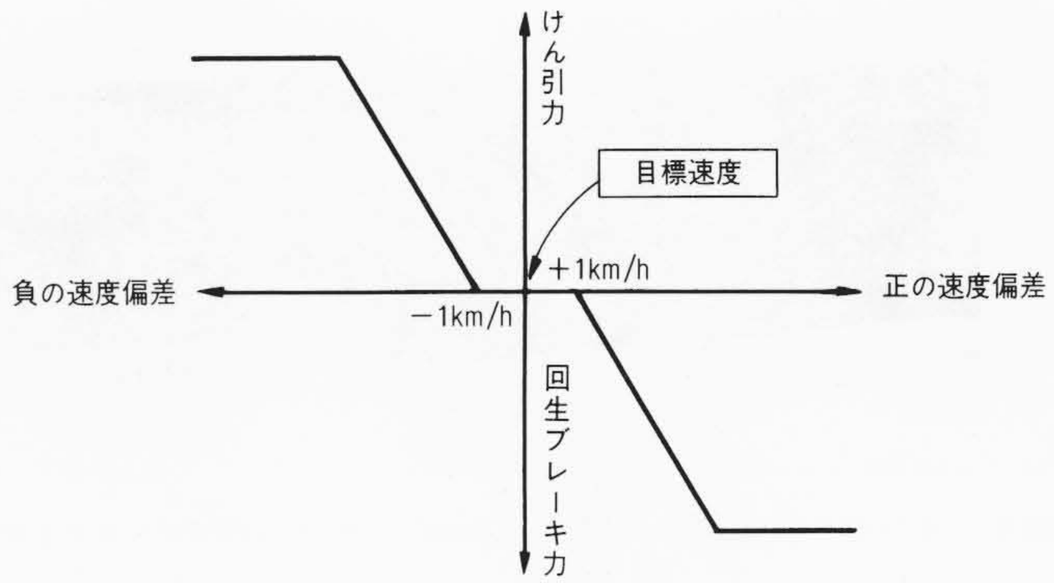


図4　定速制御特性　力行2ノッチ投入時の速度を目標速度として，速度偏差に応じ，力行又は回生のバランス運転を行なう。

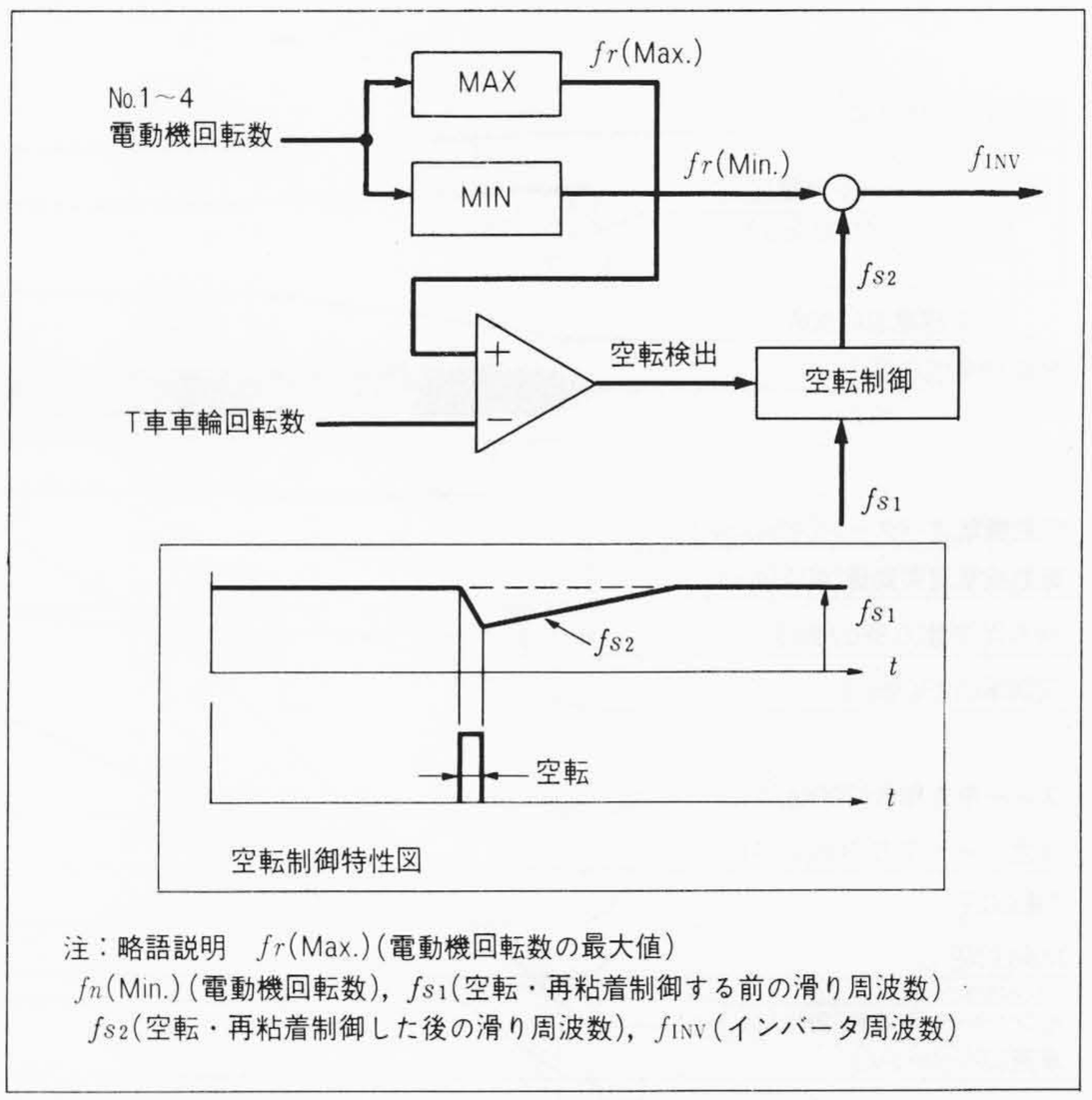


図5　空転・再粘着制御ブロック図　T車の車輪回転数と電動機回転数を比較することによって，空転速度を約1 km/h以下に抑えることができる。

すると十分なけん引力が得られなくなるという問題があった。今回，周波数ゼロの制御を行なうために必要な課題である，

(1)　直流・交流両方を検出できる電流検出器

(2)　ゼロ周波数時に電流リプルを抑制できるPWM変調制御方式

について，前者に対しては従来の巻線形交流変流器をホール変流器に変更することによって後者に対しては，変調パルス周波数一定制御方式を採用することにより解決し，スムーズなこう配起動制御特性を実現することができた。

4　機器の概要

4.1　インバータ装置

インバータ装置には，電力用半導体を冷却する冷却ユニット，GTOサイリスタのゲートパルスを発生するゲートドライブ装置，フィルタコンデンサ，主回路電圧電流検出用センサなどが収納されている。**図6**にインバータ装置の外観を示す。

4.2　ゲート制御装置

ゲート制御装置は，制御用の電子回路部，断流器などの投入・開放を制御する継電器類などから構成されている。

※1)　電動機の付いている電動車

※2)　電動機の付いていない付随車

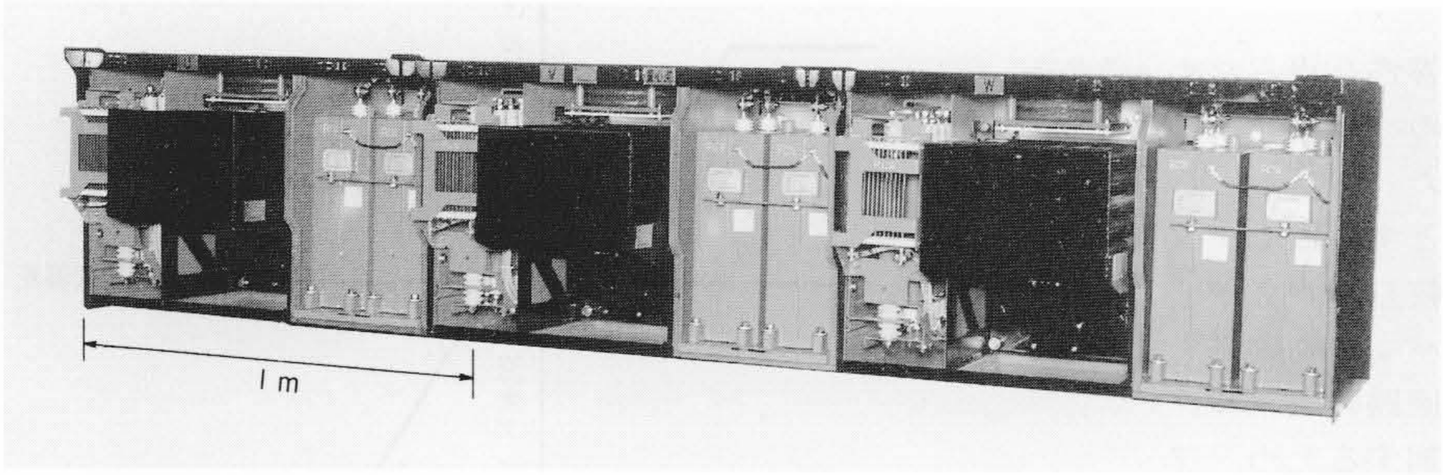


図6　インバータ装置の外観　4,500V，2,000A GTOサイリスタを使用し，小形・軽量化を図った。

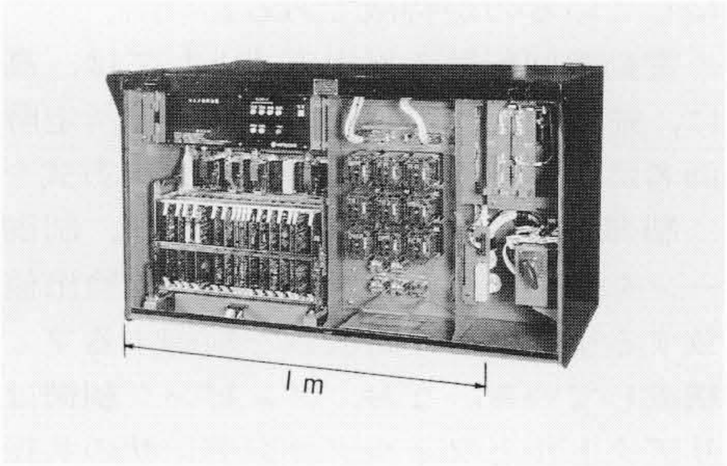
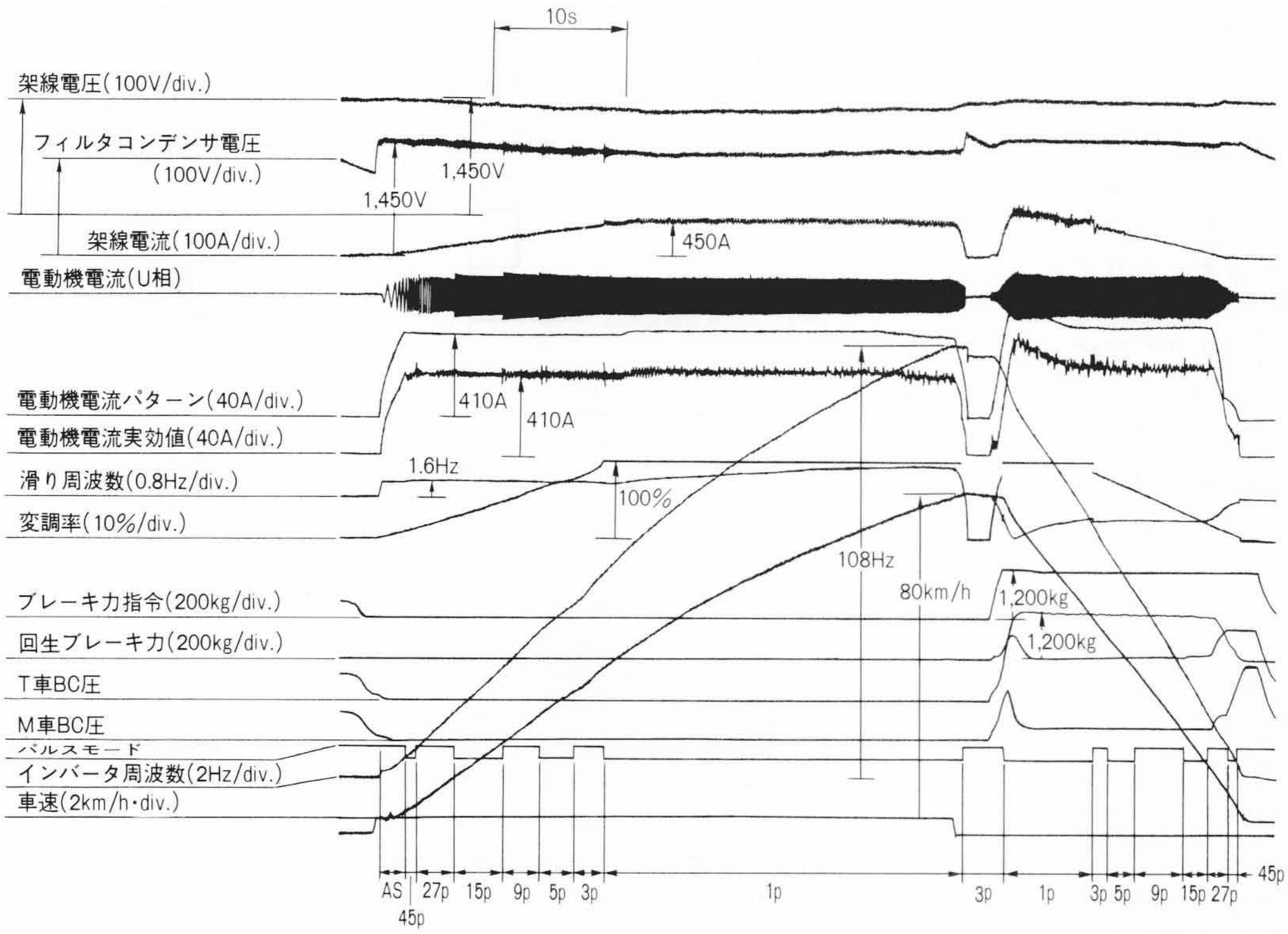


図7　ゲート制御装置の外観　左上部のパネルがモニタ表示ユニットである。押しボタンスイッチの操作により，制御状態とモニタデータの参照を行なうことができる。



注：略語説明
BC圧(ブレーキシリンダ圧力)
AS(非同期モード)

図8　加減速試験オシログラム　加速・減速共に良好な制御特性が得られた。

特徴は，電子回路部上部のモニタ表示ユニットが備わっていることである。これにより，マイクロコンピュータの動作状態及びモニタリングデータを確認することができる。**図7**にゲート制御装置の外観を示す。

5　現車試験結果

図8に加減速試験のオシログラムを示す。

全速度域にわたって円滑な制御が行なわれており，所期の性能を満足していることを確認した。

また，誘導障害試験の結果，有害なレベルのノイズが発生しないことも確認された。

6　結　　言

4,500V GTOサイリスタ及び16ビットマイクロプロセッサを応用し，小形・軽量かつ高精度・高機能のVVVFインバータ制御装置を開発し，実用化した。本制御装置は各々必要な制御機能を盛り込み，東京急行電鉄株式会社の9000系電車，近畿日本鉄道株式会社の6400系電車に搭載され営業運転を開始しており，共に順調に稼動している。

今後，これらの開発成果をもとに，本VVVFインバータ制御装置の実用化がDC1,500V電車用VVVFインバータの普及に大いに寄与するものと考えられる。

終わりに，本制御装置の開発に当たり，御指導いただいた東京急行電鉄株式会社，近畿日本鉄道株式会社の関係各位に対し心から御礼申し上げる。

参考文献

1)　横山：大阪市交通局VVVFインバータ電車20系，電気車の科学，Vol.37，No.8，19～27(昭59-8)
2)　赤土，外：東大阪生駒電鉄7000系インバータ電車，電気車の科学，Vol.38，No.2，15～24(昭60-2)
3)　西武鉄道車両部技術課：西武鉄道8500系，電気車の科学，Vol.38，No.7，31～34(昭60-7)
4)　S. Okamatsu：GTO INVERTER CONTROLLED AC TRACTION DRIVES FOR DC 1500V ELECTRIC CARS, Proceedings of TRANSPAC 84，368～373(Mar. 1984)
5)　小澤：東京急行電鉄9000系の概要，電気車の科学，Vol.39，No.4，20～31(昭61-4)
6)　平瀬：近鉄6400系インバータ電車の概要，電気車の科学，Vol.39，No.7，26～31(昭61-7)