

最近の直流電車制御システム

Recent Control Systems for DC Electric Cars

最近注目されている直流電車制御方式として、分巻式チョップ制御、VVVFインバータ制御がある。どちらの方式も最近のパワーエレクトロニクス技術を背景に電子化されており、高性能、保守性向上を図っている。

これらシステムは大容量GTOサイリスタとその応用技術を中心に、GTOサイリスタ容量と車両性能の協調設計、更に高度高機能制御システムを実現するマイクロコンピュータ応用技術に支えられている。また制御技術の点でも、誘導電動機制御あるいは分巻電動機制御と車両制御技術を一体化した高度な内容となっている。

豊田瑛一* *Eiichi Toyota*
秋山弘之* *Hiroyuki Akiyama*
岡松茂俊* *Shigetoshi Okamatsu*
磯部栄介** *Eisuke Isobe*

1 緒言

近年のGTO(Gate Turn Off)サイリスタを中心とするパワーエレクトロニクス技術、及びマイクロコンピュータを中心とするマイクロエレクトロニクス技術の進展には目覚ましいものがある。

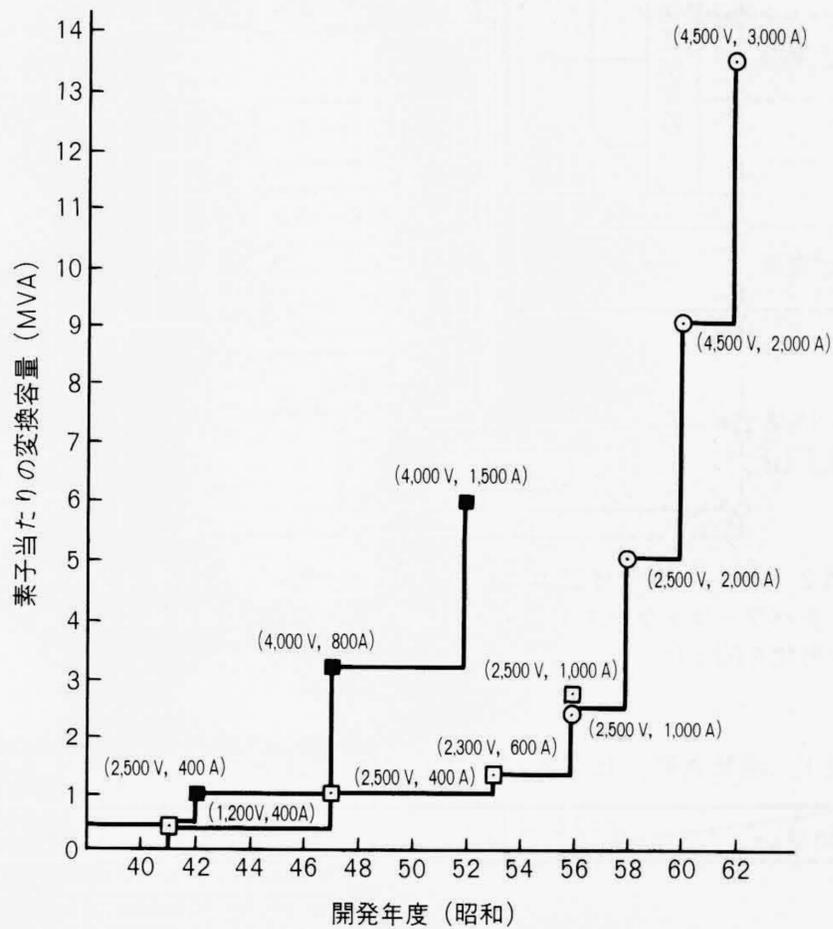
日立製作所では、これらの新技术を車両の駆動制御システムに積極的に採り入れ、省エネルギー化、メンテナンスフリー化のニーズにこたえる製品開発を進めてきた。その代表的なものに直流電車のチョップ制御装置及びVVVF(Variable Voltage and Variable Frequency)インバータ制御装置がある。本稿ではこれらを中心に、最近の技術動向について述べる。

2 主回路及び制御回路デバイス

2.1 GTOサイリスタの発達

GTOサイリスタはゲートパルスによってスイッチングできる素子であり、車両用VVVFインバータ制御装置及びチョップ制御装置のキーコンポーネントのひとつである。昭和50年前半に、耐圧600VクラスのGTOが開発されて以来急速に開発が進み、現在では耐圧4,500V可制御電流3,000Aクラスのものが開発されている。車両用GTOサイリスタの開発経緯を、従来の逆阻止サイリスタ、逆導通サイリスタとともに図1に示す。

4,500Vクラスの完成によって直流1,500Vの電車電圧に対し素子の直列接続が不要となり、更に3,000Aクラスの出現で、近郊形電車の電動車2両分を1台のインバータで制御することも可能となった。したがって、これらの各種のGTOサイリスタを使い分けることによっていろいろな電車編成、加速度などに対し柔軟に対応できるようになってきた。



注：記号説明
 ■ 逆阻止サイリスタ(変換容量=耐電圧×平均電流)
 □ 逆導通サイリスタ(変換容量=耐電圧×平均電流)
 ○ GTOサイリスタ(変換容量=耐電圧×可制御電流)

図1 車両用サイリスタ素子の開発経緯 従来の逆阻止サイリスタ、逆導通サイリスタからGTO(Gate Turn Off)サイリスタへと開発が推移している。特にGTOサイリスタの開発速度は目覚ましい。

* 日立製作所水戸工場 ** 日立製作所機電事業本部

2.2 ゲートドライブユニット

GTOサイリスタをオンオフ制御するゲートドライブユニットは、サイリスタの動特性と十分協調のとれた設計にする必要がある。また、高圧主回路部と低圧制御論理部とのインタフェース部分でもあり、ハード的には高圧部から低圧部への電磁誘導、静電誘導に対する十分な配慮を要する。

日立製作所では今までの経験を集大成して、直流電車線電圧600~3,000 V, GTOサイリスタ可制御電流1,000~3,000 Aの仕様に対応できる標準シリーズを完成させた。ブロック図を図2に、外観写真を図3に示す。主な特長は次のとおりで

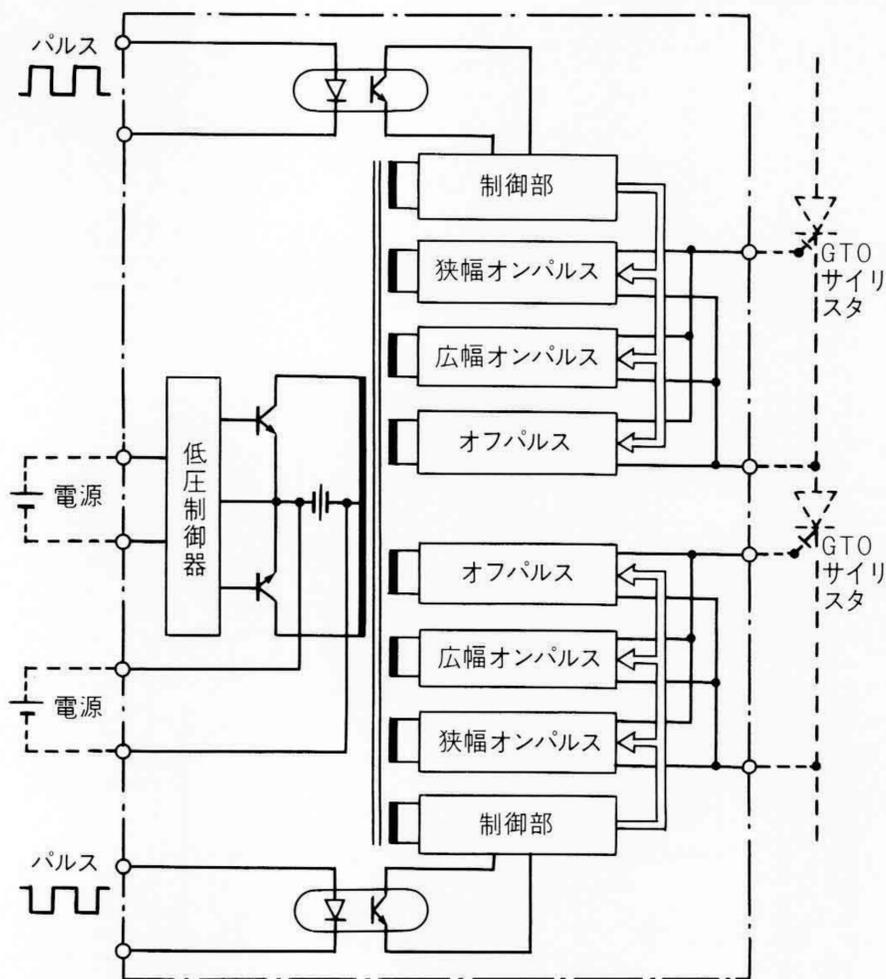


図2 ゲートドライブユニットブロック図 GTOサイリスタに与えるパワーはトランスで、タイミングは光素子で伝達することによって小形化を図った。

ある。

- (1) アモルファス鉄心を使用した高周波インバータによる高圧電源方式を採ることによって、小形化・高効率化を図った。
- (2) 低圧部から高圧部への信号伝達部は、光インタフェースとして電磁及び静電的に十分な絶縁をとった。
- (3) 一組みのオン・オフ信号を2本のペア線で伝送するシンプルインタフェースを採用することによって、制御論理部との接続線の最少化を図った。

2.3 冷却ユニット

沸騰冷却方式の実用化によって電力用半導体素子の冷却性能は飛躍的に向上し、車両用チョッパ装置やインバータ装置に沸騰冷却方式が多く用いられている。現在実用されている浸せき形とヒートパイプ形の特徴を表1に示す。浸せき形は熱抵抗が小さく冷却性能が良い反面、スナバ回路がブッシングを介して接続されるので、GTOサイリスタの遮断性能を発揮させるうえでは不利である。これに対しヒートパイプ形は、素子の近くにスナバ回路が配置できるため、遮断性能を高く

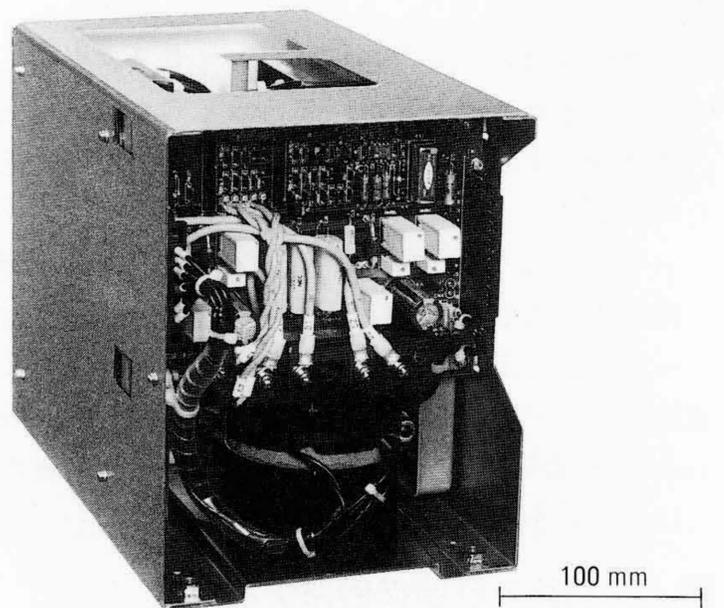


図3 ゲートドライブユニットの外観 これによりインバータの1相分上、下2アームのGTOサイリスタが駆動できる。

表1 浸せき形、ヒートパイプ形沸騰冷却方式の特徴 冷却方式は、用途により特徴を生かして使用する。

項目	冷却方式	浸 せ き 形	ヒ ー ト パ イ プ 形
構 成			
GTOの組み込み場所		容器内の冷媒中	容器外
GTO交換の作業性		気密溶接部の切開を伴う。	冷却片の左右移動により、交換可
回路のインダクタンス		ヒートパイプ形に比べ大	小
冷媒使用量		ヒートパイプ形に比べ大	小
冷却装置の寸法, 質量		ヒートパイプ形に比べ大	小
沸騰部冷却片の熱抵抗		小	GTO浸せき形に比べ大

できる利点はあるが、冷却性能の面ではやや不利である。このほか、構造、取扱い面も考慮し、用途に応じて特徴を生かした使い分けをしている。

2.4 モニタ機能と読出し装置

チョップ装置やインバータ装置の制御論理部は、高精度化及び高機能化を実現するために16ビットマイクロコンピュータによる全デジタル制御としている。

制御論理部は装置の運転状態を常時監視、記憶できるモニタ部が収納できるように構成している。

図4に示すようにモニタ機能の全体としては、車載の制御装置側にモニタリング用ハードウェア及びソフトウェアを組み込み、これと通常は車載しない可搬形はん(汎)用パーソナルコンピュータを讀出し装置として組み合わせてシステムを構成している。

主な機能は、(1)電動機過電流・転流失敗など障害発生時のデータ収集・表示、(2)空ノッチ試験時のリアルタイムデータ表示、(3)フロッピーディスクへのデータ記録、(4)CPU(中央処理装置)内時計セット、メモリクリアなどがある。

モニタリングソフトウェアを内蔵することによって、制御論理部内の演算状態を直接監視することを可能にし、また讀出し装置には汎用パーソナルコンピュータを用いることによって、操作性や表示方法をフレキシブルにし、かつコストパフォーマンスの良いモニタシステムを実現している。

モニタ機能の能力については、そのサンプリング速度によってモニタできる事象が定まる。サンプリング速度と観測できる事象の関係を図5に示す。同図に示すように近年のパワ

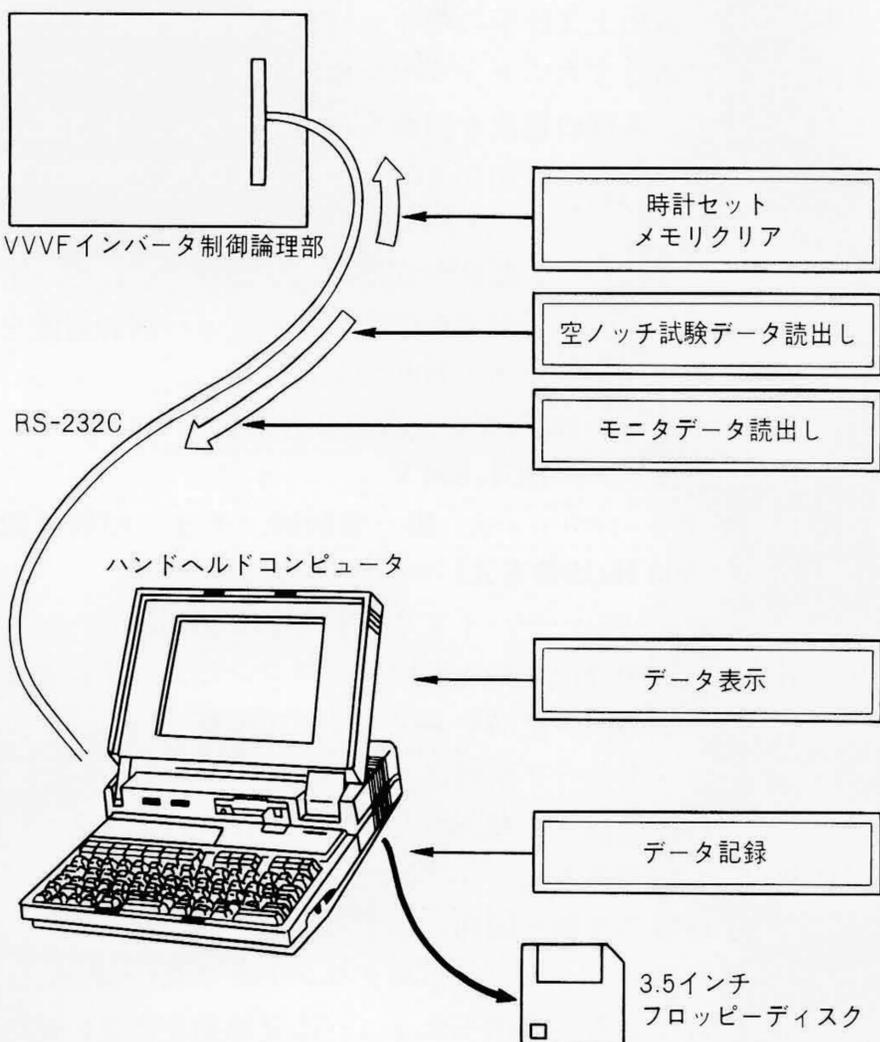


図4 モニタ読出し装置 はん(汎)用パーソナルコンピュータと接続し、モニタデータの讀出し可能としている。

制御システム	1 μs	10 μs	100 μs	1 ms	10 ms	100 ms	1 s
1 界磁 チョップ 制御 添加励磁 制御		オンオフ パルス				電動機 電流	シー ケンス
2 電機子 チョップ 制御		オンオフ パルス		電動機 電流	フィルタ 電圧	シー ケンス	
3 VVVF インバータ 制御		オンオフ パルス		電動機 電流	フィルタ 電圧	シー ケンス	

図5 サンプリング時間と被モニタ現象の速さ 各々の現象をモニタするために必要なサンプリング時間を示す。

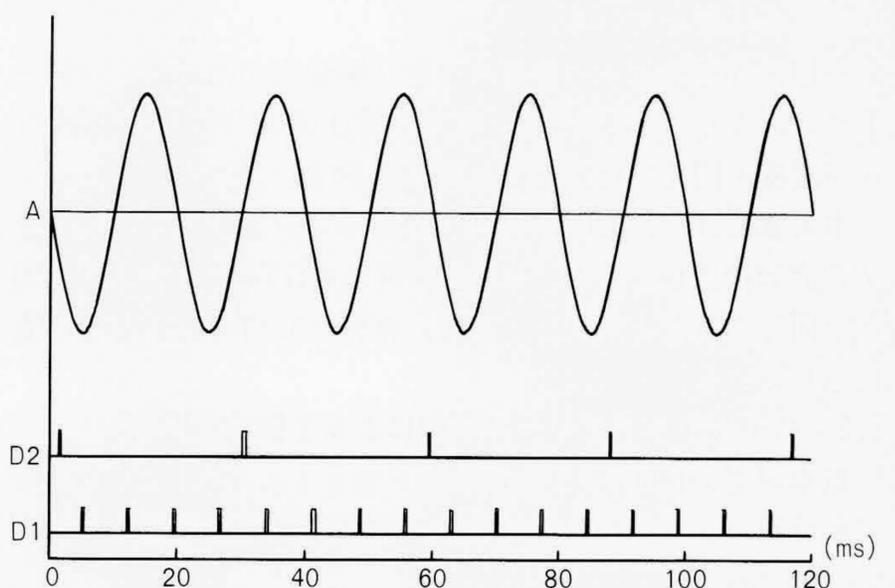


図6 モニタ例 交流(A)及びパルス列(D1, D2)を試験的にモニタし、モニタから読み出したものを示す。

ーエレクトロニクス化された装置では、より高速のモニタ機能が求められることが理解される。今回開発した高速モニタのモニタ例を図6に示す。サンプリング速度はGTOサイリスタの最小オンオフ期間程度まで高速化されている。

ハードウェアはサイズ225 mm×175 mmの1ボードのプリント板に収納されている。

3 最近のチョップ制御技術

3.1 分巻チョップ制御方式

分巻チョップ方式は図7に示すように分巻電動機を用い、電機子電流と分巻界磁電流とを各々別々のチョップで制御する方式である。この方式は制御の自由度が大きく、従来の直巻電動機のチョップ制御方式に比べて高粘着制御が行いやすい特長を持つ。また力行、回生、前進、後進の各モードも、界磁電流の方向をブリッジ状に接続したチョップによって完

全に無接点で切り替えることができるなど、従来のチョッパにない多くのメリットが得られる。

チョッパ装置は当然従来方式に比べ多く必要となるが、最近のGTOサイリスタ、マイクロコンピュータ制御などによって装置の体積、重量などを抑えながら、無接点化、高性能化を図ることが可能である。

チョッパ周波数もGTOサイリスタを用いることによって高周波化し、MSL(主平滑リアクトル)を省略することが可能となる。我が国では昭和58年に帝都高速度交通営団の銀座線01系電車に対し分巻チョッパ制御方式が導入されたのが最初である。このチョッパ制御装置は、電車線電圧600V、120kW主電動機4台の制御容量を持つ。電機子チョッパには2,500V、2,000AのGTOサイリスタを、また界磁チョッパには2,500V、1,000AのGTOサイリスタが使用された。

現在では、600V電車線用としては界磁チョッパへのパワートランジスタの導入、また電車線電圧1,500V用としては主電動機8台制御への容量アップが進められている。

3.2 パワートランジスタによる分巻界磁制御

近年、バイポーラトランジスタもGTOサイリスタ素子と同様に高耐圧、大電流化されており、一般産業分野でも広く応用されるに至っている。

今回、界磁チョッパ装置の小形・軽量化のために、パワートランジスタの導入を図り、電車線電圧600Vの分巻界磁チョッパ装置を開発した。外観を図8に示す。

本装置には、1,200V、300Aのトランジスタモジュールを2個直列接続している。本装置は従来のGTOサイリスタを用いた同等の装置と比較し、重量、体積とも約 $\frac{2}{3}$ に小形・軽量化されている。

3.3 ハイブリッドブリッジ制御による2群独立制御

電車線電圧1,500Vで主電動機8台を1ユニットとして制御する分巻チョッパ制御方式では、車両間の車輪径差を考慮す

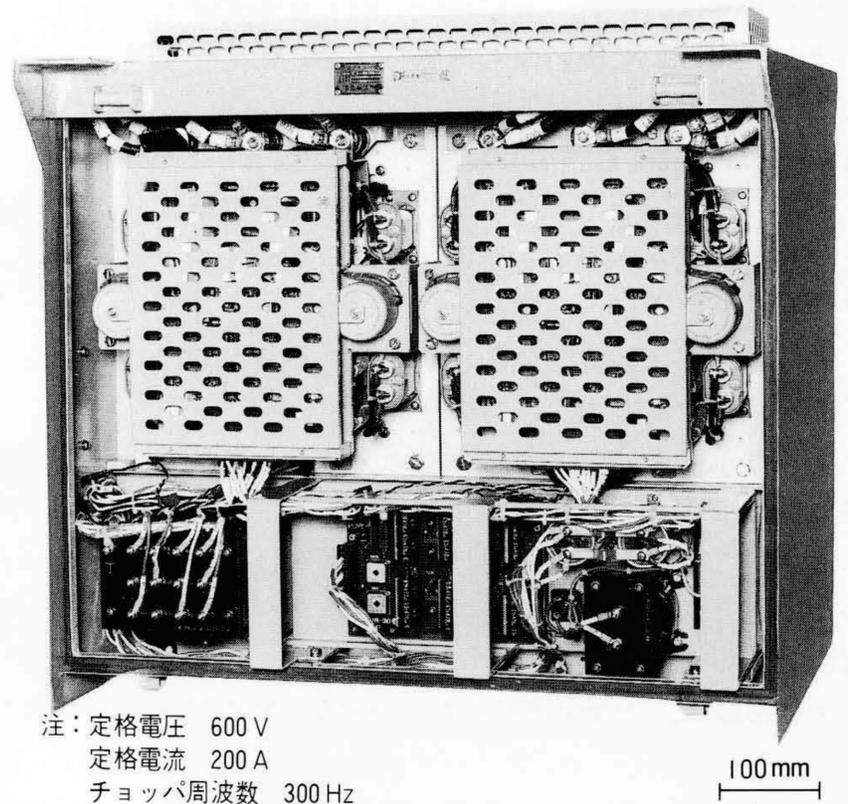


図8 パワートランジスタ式界磁チョッパ装置 1,200V、300Aトランジスタモジュールによって、小形・軽量化を図った。

る必要がある。すなわち、車両ごとに4台直列接続された主電動機群を2群並列制御するとき、車両間の車輪径差があってもトルクアンバランスが生じないようにするには2群の界磁制御を独立に行うことが望ましい。この制御を最小の構成で実現する方法が図9に示すハイブリッドブリッジ制御である。

中央のアームの上又は下のチョッパを、導通状態としたまま対称位置にある2台のチョッパを独立にチョッピングすることによって、各群の電流を制御するものである。本方式によりハードウェアのわずかな追加によって2群独立制御が可能になった。

ハイブリッドブリッジ制御方式の分巻チョッパとして、帝都高速度交通営団03系新形式車両用分巻チョッパ制御装置を製作した。主な仕様は次のとおりである。

- (1) 制御容量………160kW主電動機8台制御
- (2) 電車線電圧………DC1,500V
- (3) 電機子チョッパ………二相一重制御、チョッパ周波数(300・600・900Hz切換方式)
- (4) 界磁チョッパ………ハイブリッドブリッジ制御
- (5) 制御論理部………16ビットマイクロコンピュータによる全デジタル制御、アダプティブクリープ制御

アダプティブクリープ制御は、レール面の状態によって変動している粘着係数を、最大限に利用するように工夫された高粘着制御方式である²⁾。

チョッパ装置の外観を図10に示す。本装置の中に、電機子チョッパ、界磁チョッパ、フィルタコンデンサ及び制御論理部が収納されている。電機子チョッパは発熱量が大きいので浸せき形沸騰冷却方式とし、界磁チョッパは発熱量が小さいのでフィン付き自然空冷方式としている。

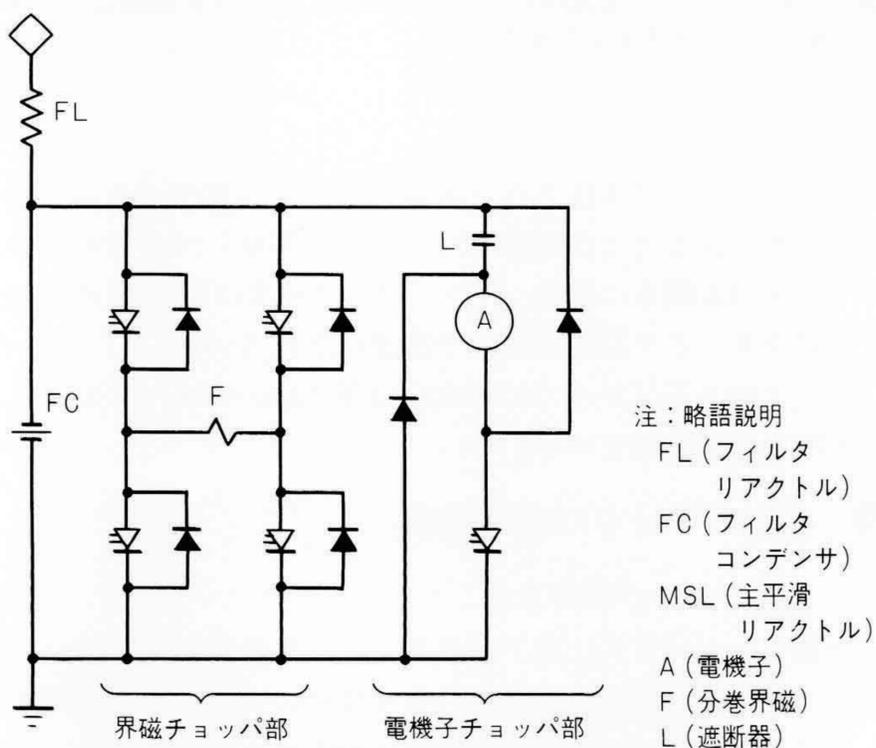


図7 分巻チョッパ方式基本回路 電機子及び界磁をそれぞれチョッパ制御することによって、いっそうの高性能化・無接点化を図ることができる。L(遮断器)を開くことによって力行回路から回生回路に切り換わる。

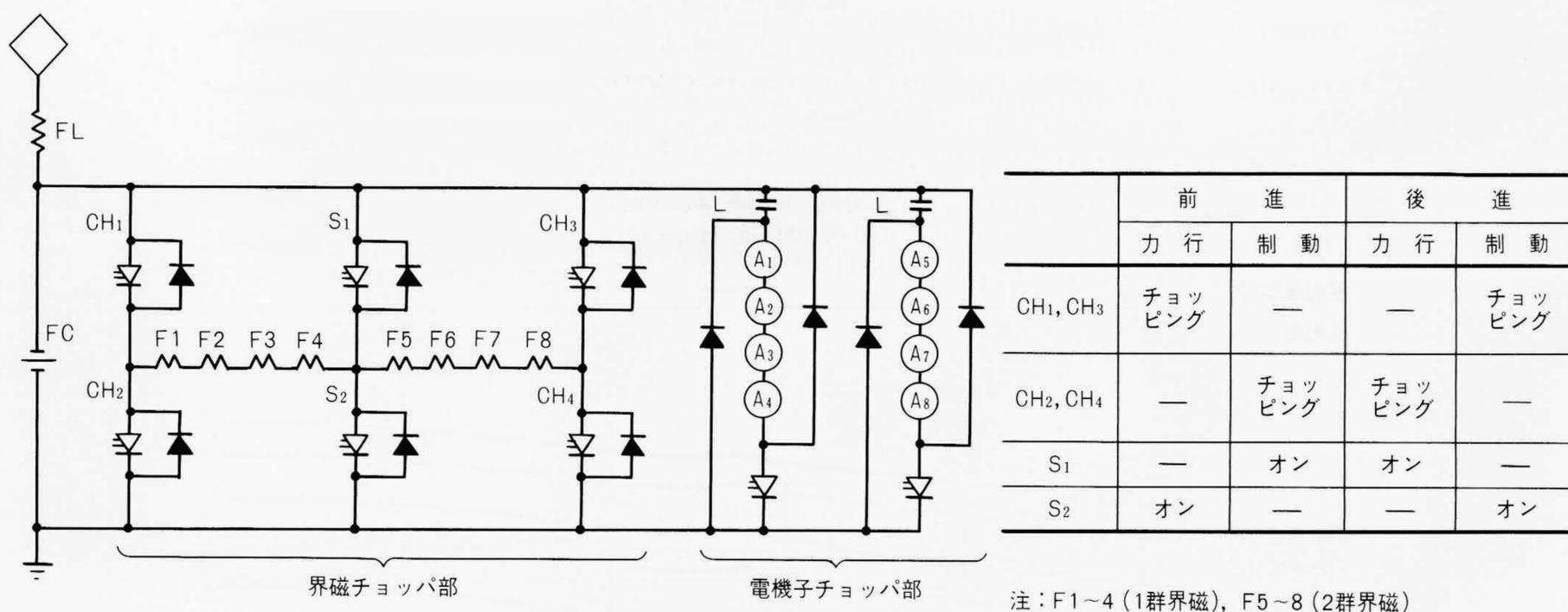


図9 ハイブリッドブリッジ方式 2群の界磁電流を6アーム構成のGTOサイリスタで独立に制御する。

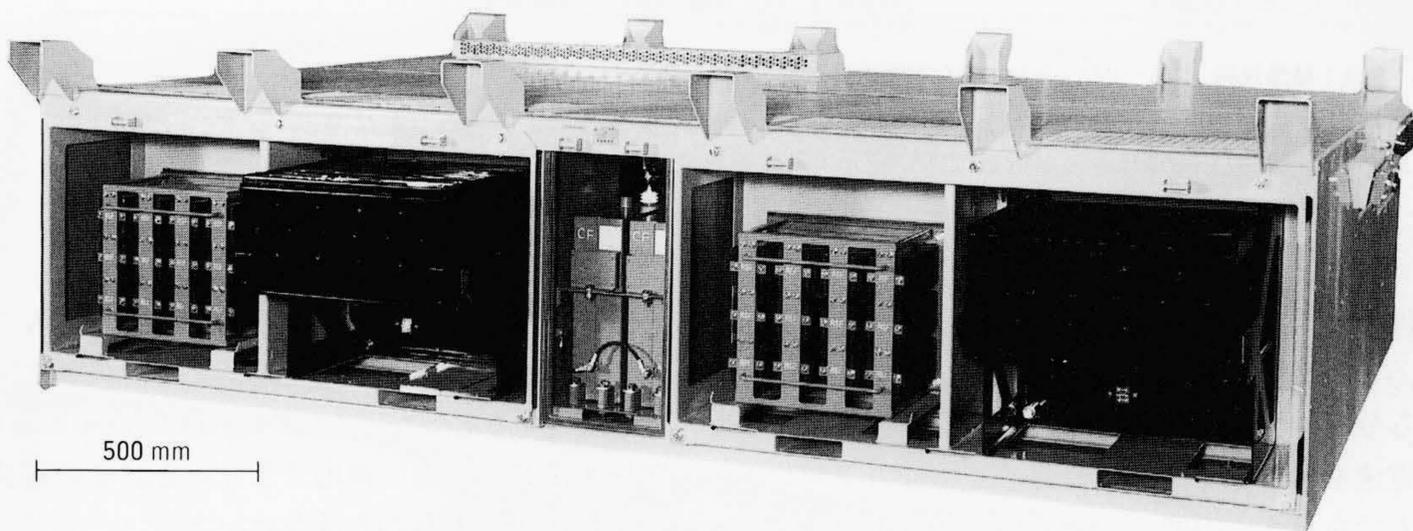


図10 分巻チョッパ装置 本装置で160 kW電動機8台を分巻チョッパ方式で制御する。

4 最近のVVVFインバータ制御技術

4.1 最近のPWM制御技術

誘導電動機は本質的に分巻特性を持っているので、電圧変化に対して電流ないしトルクはかなり鋭敏に変化する。特に電圧形インバータでは、電源電圧が電動機の巻線に直接パルス状に印加されるため、電動機電流に大きなリプルが含まれる。

したがって、高精度のトルク制御を行うには、全域にわたって電圧を連続的に制御することが望ましく、かつリプルを抑制するには高精度なパルス幅制御が要求される。

このような要求に沿うものとして、

- (1) 極低周波域での非同期PWM(パルス幅変調)制御
- (2) 数ヘルツ以上の周波数域での全デジタル高精度PWM制御
- (3) 3-1パルス連続移行が可能な広域3パルス制御を開発した³⁾。

非同期PWM制御はインバータ周波数とは無関係に、一定周波数で各アームをチョッピングさせながらインバータの出力電圧・周波数を制御する方式である。チョッピング周波数に対して十分低いインバータ周波数領域では、電動機の直流偏磁現象など非同期による悪影響は無視でき、後退起動時の「マ

イナス周波数」(逆回転)領域から0 Hzを通過して連続的かつ高精度な電流制御ができる特長がある⁴⁾。

広域3パルス制御は、特殊な3パルス制御モードを介在させることによって、GTOサイリスタのターンオフ時間の制約から生じていた3パルス制御から1パルス制御移行時の電圧不連続性をなくしたものである⁵⁾。

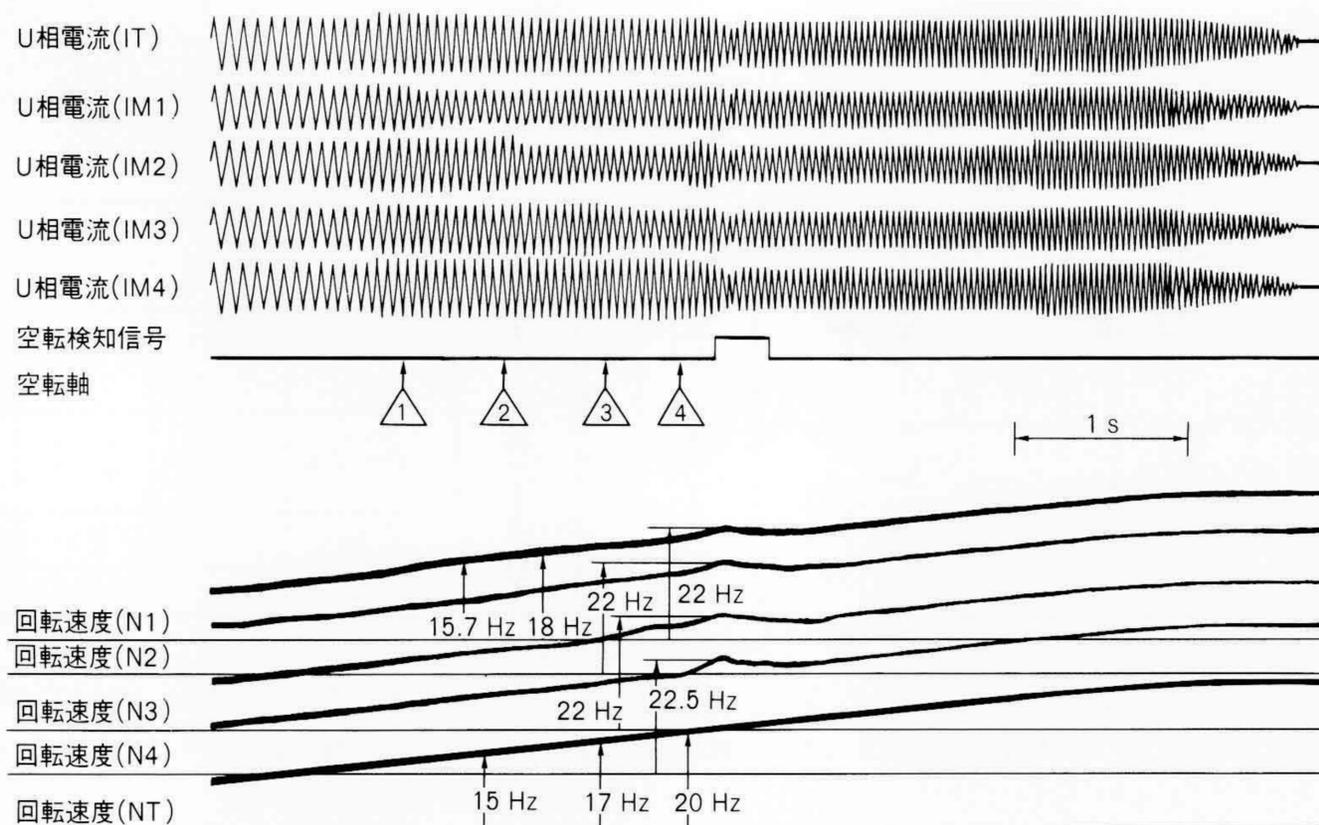
4.2 定速運転制御

インバータ電車は制御要素に電動機回転速度を持っているため、車両速度を自身の中で検出することが可能である。更に、電動機の滑り周波数を制御するだけで、主回路切換えなしに力行から回生ブレーキ領域まで円滑に制御できることから、定速運転機能を持たせることが比較的簡単にできる。

定速運転方式としては、運転士の扱う主幹制御器に定速運転ノッチを設けておき、運転士が定速運転に移行したいときに定速運転ノッチに入れると、そのときの速度を目標速度として定速運転を行う方式を開発した。この方式によれば、複数ユニットのインバータ装置を1編成中に持つ電車列車で各ユニット間に車輪径差があっても、駆動力のアンバランスが生じない特長がある。

4.3 粘着制御

VVVFインバータ方式は、その主回路特性によって高粘着特性が期待されている。すなわち、インバータ周波数が固定



注：略語説明 IM1～IM4 (各軸の電動機電流), N1～N4 (各軸の回転速度), NT (T軸の回転速度)

図11 空転時の各軸の動作 第1軸から第4軸まで順に空転が発生し、全軸空転に至っている。全軸空転に至るまでは、回転数からはほとんど空転は感じられず、電動機電流の減少により空転していることが推定される。

されている条件では、主回路的には空転滑走による電動機回転数の変化が、そのまま再粘着方向への急激なトルク減少となる、いわゆる分巻特性を示す。図11は誘導電動機4台を並列にして、全電流をフィードバック制御した場合の空転時でのオシログラムである。この例では、進行方向の1軸から順に空転が生じ、遂に全軸空転に至っている。全軸空転に至る途中は分巻特性によって微少空転にとどまっているが、全軸空転に至ると定トルク制御が作用して、分巻特性が殺され空転が一気に加速されている。このようにVVVF方式でも、分巻特性による自己再粘着容易性だけでは不十分であり、空転を検出して積極的に再粘着制御を行う必要がある。再粘着制御の最も重要なポイントは、いかに早期に空転又は滑走を誤動作なく検出するかにある。微少空転のうちに検出すれば、トルクの絞り量も少なく、電車として高い加速力を維持することができる。空転・滑走の検出方法は次の2種類に大別される。

- (1) 電動機の回転速度変化率又は電動機間の差速度変化率を監視する方法
- (2) 車両の絶対速度を基準にして各電動機を速度を監視する方法

(1)は制御部のソフトで容易にできる利点がある。しかし、レール継目通過時などに生ずる過渡的な回転軸の速度変化に対して誤動作しないように、検知感度に余裕を見込んでおく必要がある。このため、設定された基準速度変化率により小さい変化率の空転が検出できず、全軸大空転に発展することがある。

(2)の具体例を図12に示す。電動機の付いていないT車軸速度を検出し、惰行中に車輪径差の補正を行い、基準速度と各電動機の回転速度差により空転・滑走を検出する。T車の軸速度

センサはATCの速度センサと兼用することもできる。前後振動などによる車両間の速度差によって誤動作しないように感度を設定する必要があるが、実用例では1 km/h以内の精度で空転・滑走を確実に検出できている。この方式によれば全軸大空転が発生することはない。

T軸速度検出方式による空転再粘着制御オシログラムの例を図13に示す。レールに散水し人為的に粘着係数を下げて加速を行ったものであるが、高い粘着利用率が得られていることが分かる。

4.4 大容量化

現在実用化されているGTOサイリスタの最大容量は4,500 V, 2,000 A素子であるが、この容量の場合、1,500 V架線用インバータに適用した場合、一つの制御装置で170 kWクラスの電動機4台が制御可能な範囲である。

一方、最近開発された3,000 AクラスGTOサイリスタを使用すると、140 kWクラスの電動機8台が駆動可能である。これは長大編成車両の制御器台数の低減と高加速性能の確保につながるものと考えられ、更にインバータ車両の採用を促すものと考えられる。

なお装置の大形化に伴い考慮されねばならない点は、保護協調、ユニットカット時の駆動力である。例えば、インバータ直流短絡の場合、事故電流によって変電所の ΔI (負荷電流急増)保護が動作させないようにしようとすれば、フィルタリアクトルは制御容量の二乗に比例する大きさを必要とする。またユニットカット時は、大きな駆動力を失うため編成として加速性能、こう配起動能力が大幅に落ちることなど、システム的にバックアップを考える必要がある。

4.5 リニアモータ電車

リニアモータ電車は、車上リニアモータと地上のリアクシ

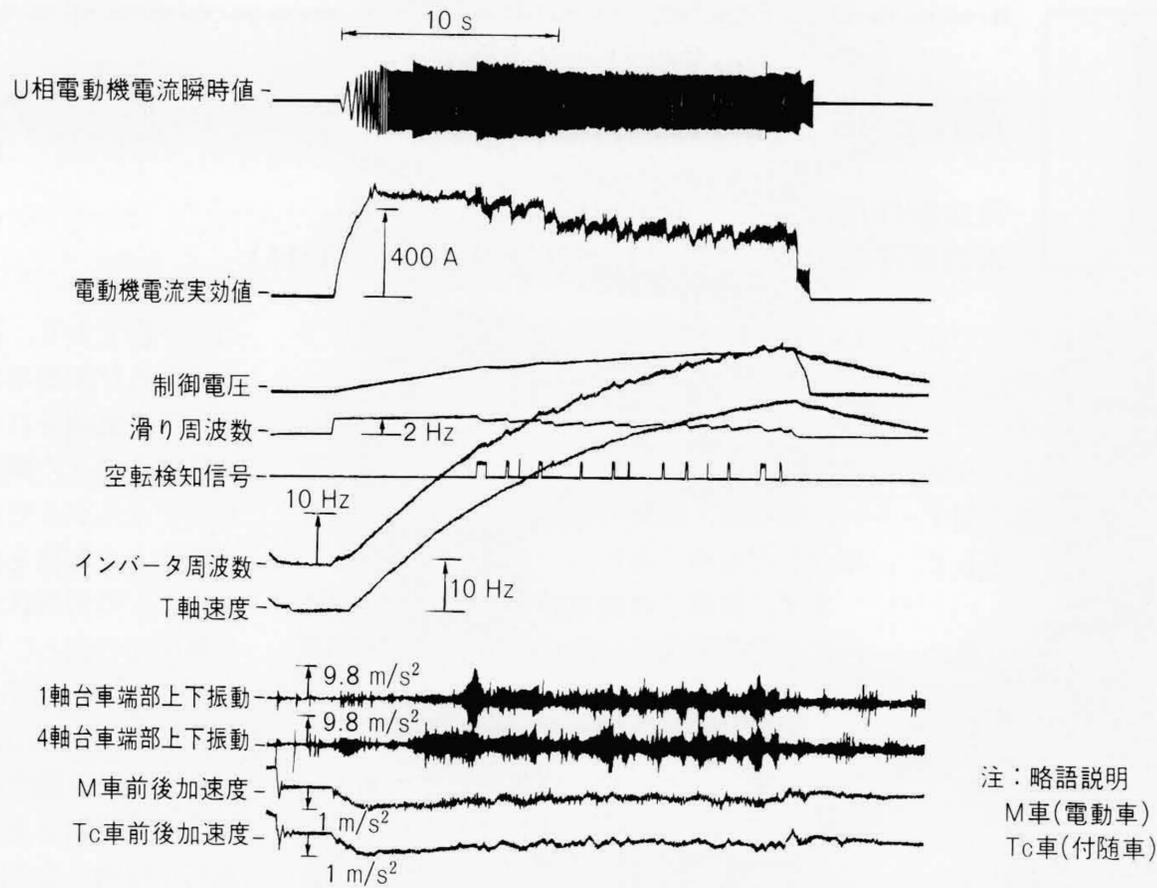
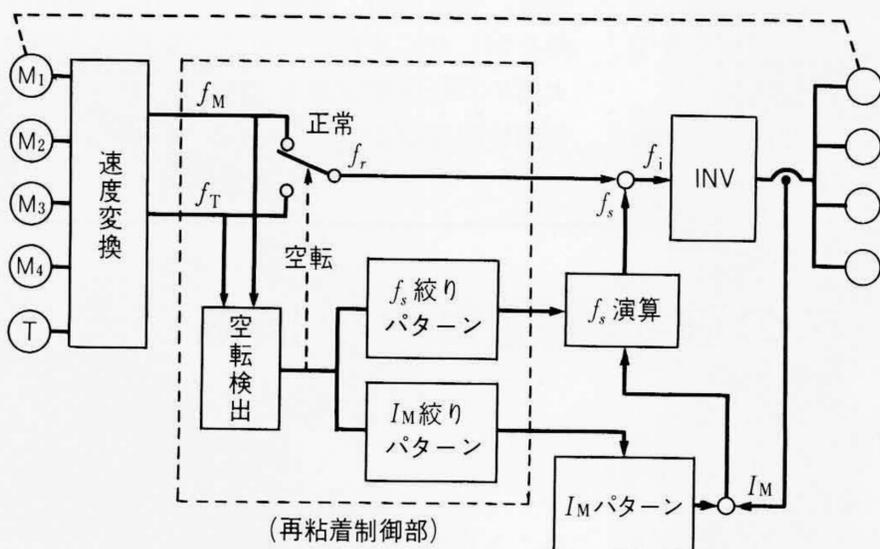


図12 空転再粘着制御データ T軸速度を使用して空転を検出し、再粘着制御を行ったもので、ほとんど1.5 Hz以上の空転はない。再粘着も0.5~0.1秒で行われている。



注：略語説明など

- M₁~M₄ (電動車軸速度センサ)
- T (付随車軸速度センサ)
- f_M (電動機回転速度)
- f_T (付随車車軸回転速度周波数)
- f_r (回転速度周波数)
- f_i (インバータ周波数)
- f_s (滑り周波数)
- I_M (電動機電流)
- INV (インバータ装置)

図13 T軸速度検出による再粘着制御 T軸とM軸の回転数を比べて監視し、空転を検出する。検出したら電流、滑り周波数を絞るなどによって再粘着を行わせる。

ョンプレートとの空げきが大きく、かつ変動することが回転形電動機の電車と本質的に異なる点で、このためインバータの制御方式も、リニアモータ特有の制御が必要となる。すなわち、

- (1) 空げきの変化に対し推力の変動を少なくするために、インバータ出力電圧制御により推力を制御する方式とした。
- (2) リニアモータとして効率の良い制御をするために、定格周波数以下の電圧制御域では、滑り周波数一定制御、高速域では滑り率一定制御を採用した。

(3) 空げき変動があっても精度の良い電空ブレンディングを行うため、力率検出による電気ブレーキ力演算方式を採用した。

5 結 言

最近のパワーエレクトロニクスを用いた電车用インバータ制御、分巻チョッパ制御について新技術を紹介した。

インバータ車両では大容量4,500 V, 3,000 AのGTOサイリスタ素子の実用化が現実のものとなってきており、これらの利用技術、車両性能計画が重要となってきている。

一方、分巻チョッパ制御でも、GTOサイリスタ、トランジスタなど多彩な電子化が行われており、これからもインバータ制御方式とともに高性能車両を形成してゆくと考えられる。

また今後、これら車両については高粘着性能を中心とした高性能化の追求とともに、安全性・信頼性・保守性の向上、環境保全、無騒音化などの要求も強まるものと考えられる。これらのニーズに対応すべく更に新技術の開発に注力する必要があると考える。

参考文献

- 1) 帝都高速度交通営団車両設計課：営団銀座線01系試作車について、電気車の科学, June, 1983, Vol.36, No.6
- 2) 河西, 外：電気車の新方式高粘着制御の開発, 昭和62年電気学会産業応用部門全国大会, No.9(昭62-8)
- 3) 豊田, 外：車両用VVVFインバータの16ビットマイコン制御システム, 鉄道におけるサイバネティクスシンポジウム寄稿集(1985)
- 4) 豊田, 外：全デジタル化による車両用VVVFインバータの非同期制御, 電気学会電気鉄道研究会(1986)
- 5) 棚町, 外：車両用インバータの3-1パルス切換方式の検討, 昭61電気学会全国大会, No.905(昭61-4)

高性能・高信頼性蒸気タービン長翼の開発

日立製作所 名村 清・山崎義昭・他3名
火力原子力発電 37-11, 1209~1220 (昭61-11)

蒸気タービンの最終段翼をはじめとする長翼は、タービンの出力、性能を決定づける最も重要な部材の一つであり、タービンのいっそうの大容量化、高性能化という時代の要請にこたえて、性能、信頼性に関する最新の技術を駆使して開発を行ってきている。

一方、長翼をめぐる運転環境は、(1) 翼の長大化に伴う遠心力の増大と、各種励振力の影響増大、(2) 中容量タービンの対ピークロード運用に伴う頻繁な負荷変動など、ますます過酷化する傾向にある。

このため、長翼の性能、信頼性に関して、従来に増して広範な技術分野にわたる高度な総合技術が必要となる。なかでも、長翼開発の最初の段階での熱性能設計、強度信頼性設計は、翼の基本的な性能、信頼性の良否を決定づける重要な部分である。これに対し、長翼開発での長年の経験と、最近のコンピュータ及びその利用技術の発展を背景として、各種の最新の解析法を組み入

れ、一貫した設計解析システムを構築してきている。

本論文は、解析技術を中心に、翼設計システムの概要と解析例の幾つかについて述べ、併せて、最近の長翼開発への適用例を紹介したものである。

まず、長翼の性能設計では、特に半径方向に3次元性の強い流れであること、動翼先端部では衝撃波を伴う遷音速流れとなることなどを考慮した最適な設計が行われる。これに関し、タービン段落としての基本設計、翼形・翼列設計は計算機との対話形式で行われ、続いて各種の解析ソフトにより性能解析が実施される。特に、従来の非粘性流解析に対し、粘性を考慮できる2次元、3次元の乱流解析の導入により、翼性能にかかわるタービン内部流れの詳細把握、及び翼性能の定量的評価が可能となってきている。

一方、翼性能設計に続く強度信頼性解析では、有限要素法による強度振動解析は常

用の手段であり、運転時の変形、応力状態の解析及び振動解析がデータベースをもとに迅速に実施される。また、連結部材で連結された種々の翼構造及び翼が取り付けられるディスクまで含めた全体系の振動解析が効率よく実施される。

これらの解析技術、システムを適用した長翼開発の例として、新23 in翼、26 in翼及び52 in翼の例を示した。

新23 in翼、26 in翼は、従来の23 in翼、26 in翼を大幅に高性能、高耐力化した翼であり、各種解析と実験に基づく高性能遷音速翼形の採用、及び信頼性検討結果を示した。また、52 in翼は、出力1,300~1,700 MW大容量原子力、火力プラントに対応するため開発したものであり、同様に、流れ解析と実験、強度解析と実験などの対比、検討結果を示した。また、これらの長翼は、実物大翼の回転振動試験などにより、最終的な信頼性の確認が行われている。

構造用セラミックスの破壊強度と微小損傷

日立製作所 宮田 寛・中門公明・他1名
日本材料強度学会誌 21-2, 45~59 (昭61-9)

構造用セラミックスは多くの優れた特性を示す有望な新素材であるが、ぜい(脆)性材料であるために高い欠陥敏感性を示し、強度信頼性が低く、主要構造部品への適用を阻害している。したがって、高強度セラミックス(炭化ケイ素、窒化ケイ素、サイアロン、アルミナなど)を活用していくには、この欠陥敏感性に依存した強度のばらつきの原因を究明し、これに基づいた材料設計への提言が重要課題となっている。

破壊の起点としては数十マイクロメートル以下の寸法の表面きず、気孔、介在物、粗大粒子などが観察されており、セラミックスの強度が金属材料では問題とならない微小な欠陥にも左右されることが認められている。

本論文では、強度のばらつきなどの定量化にはミクロな観点としてのセラミックスの多結晶性及び加工プロセス(加工に伴う微小な表面損傷)に着目したアプローチの必要性にかんがみ、代表的な構造用セラミッ

クスについて微小なものから大きな寸法まで広範囲の寸法の欠陥と強度の関係に検討を加えた。非晶質セラミックスであるガラスの挙動との相違に基づき、

- (1) 微小欠陥に支配される破壊強度の材料の多結晶性を考慮した評価
- (2) 平滑材の表面の微小損傷に基づいた破壊強度の評価
- (3) 上記知見に基づいた、セラミックスの重要な特性である破壊じん(靱)性値の高精度な評価試験法の提案について論じた。

まず、多結晶性の構造用セラミックスの破壊強度は、破壊力学により導かれる等価欠陥寸法により整理されることを明らかにした。しかし、比較的大きな欠陥に基づく破壊は、破壊じん性値 K_{Ic} 一定のクライテリアに基づき線形破壊力学により容易に説明されるが、欠陥が微小な領域ではこのクライテリアに従わず、微小な欠陥に対してはいわゆる K_{Ic} はもはや材料に固有な値ではな

いことを示した。

この結果を踏まえて、材料表面の加工損傷と破壊強度の関係を破壊力学的な観点から検討し、加工損傷の先に材料の多結晶性に基づく欠陥の存在を想定することによって、平滑材の破壊強度も統一的に一応の評価が可能であることを示した。

次いで、これらの評価の考え方を片側切欠き材の破壊強度の評価に適用した。すなわち、 K_{Ic} 評価法であるSENB(Single Edge Notched Beam)法で、切欠き(Notch)底に加工に基づく損傷層を評価し、切欠き底にミクロな欠陥を想定したモデルを考案することによって、 K_{Ic} 値の評価が高精度に行えることを確認した。

最後に、表面加工損傷層の修復熱処理法について言及し、適切な温度雰囲気と保持時間によれば、高温暴露により損傷の修復が可能であり、この結果として強度の改善が図れることを実験データにより示した。