

車両用無整流子電動機

Commutatorless Motor for Rolling Stock

佐藤 洋* 沢 邦彦**
Hiroshi Sato Kunihiko Sawa

藤原 喜隆*** 岡本 和久***
Yoshitaka Fujiwara Kazuhisa Okamoto

I. ま え が き

車両駆動用主電動機として、わが国では制御が容易で特性のすぐれた直流直巻電動機が広く普及し、絶縁材料、溶接技術などの進歩とあいまって小形軽量の大容量高性能主電動機が実用に供されている。

しかし直流機は整流子とブラシで機械的に整流するため、運転条件、周囲条件によってはせん絡に至る危険性もあり、整流子面の荒損、ブラシの摩耗など保守の溢路になっている。また整流子は機械的強度の面から最高回転数に制約があり、現在、高速回転化による出力増大もほぼ限界に達しているのが実情であろう。

半導体装置の車両への適用は制御・粘着性能の向上、保守軽減など多くの効用をもたらしたが、最近では単に車両制御器の半導体化に止まらず駆動用主電動機の性能向上、出力増大、無保守化のために整流子のない主電動機の開発が大きな課題となっている。

無整流子電動機としては同期電動機、誘導電動機がある。速度制御は電動機の印加電圧、周波数を制御すれば良く、種々の方式が考えられる。以下、車両駆動用としての基本的事項ならびに昭和47年に日本国有鉄道に納入し、現車試験で良好な結果をえた電車で用 110kW 自製サイリスタモータの概要を述べる。

II. 車両駆動用主電動機の無整流子化

1. 主電動機に要求される性能

主電動機は直流機のもつ特性を満すとともに、無整流子電動機であるために生ずる新たな問題も解決されていなければならない。直流機のもつ性能として、

- (1) 始動時、上りこう配などで大きなトルクを発生でき、同時に入力電力があまり増大しない。
- (2) 容易に広範囲の速度制御が可能で、平坦線で高速性能を有し、かつ高効率で使用できる。
- (3) 並列運転時の負荷不平衡が少なく、電源電圧急変、負荷変動に対して安定である。

があり、さらに無整流子電動機として要求される事項と

して、

- (4) 保守、点検・整備が容易であること。
- (5) 高効率、高力率であること。
- (6) トルク脈動の影響が車体、駆動系へ及ばないこと。
- (7) 高調波電流が通信線などへ障害を及ぼさないこと。
- (8) 装置は小形軽量であること。
- (9) 低コストであること。

などがある。

2. 主回路方式

無整流子電動機の方式は種々考えられるが、ここでは代表的な方式について第1表に示す。

各方式ともそれぞれ長所短所があるが、回生制動まで考えると直流き電方式は小形軽量化の点で無整流子化の効果はやや薄い。また他制式の誘導電動機は反作用起磁力を補償し出力を確保するとともに、直流機並の制御特性をえるために制御系の構成を充分勘案する必要がある。

(1) 保守、点検

無保守、無点検の観点から、装置構成が簡単で、断流器、PB転換器など主回路の付加装置を最小限にとどめ得る、方式(7)、(8)(単独運転)、方式(10)、(12)(群運転)が有利である。

(2) 効率、力率

サイリスタ変換装置の採用は初期経費が増大するので保守費と合わせて電力費など運転経費を引下げる必要がある。効率、力率は重要な要素である。自然転流式の場合には、いわゆる制御角固定のサイリスタモータの力率は小電流域で悪い。高力率運転が要求される場合には制御進み角制御を行なえばよい。

(3) 制御性

直流機以上の性能を確保するためには多角的な検討が必要であるが、とくに、外乱に対する速応性と安定性、直巻特性制御、再粘着制御、制動時の安定性および限流値制御系の精度と安定性などが重要である。これらはいずれの方式でも達成可能であるが、誘導機の場合は前述のような配慮が必要で、制御系は複雑になる可能性がある。

* 輸送・特機技術部 ** 中央研究所 *** 神戸工場

(4) トルク脈動

出力トルクに脈動があると台車、車体と共振して不快な振動、振動音が生ずるばかりでなく機器の損傷に至る場合がある。一般に台車、車体の固有振動数付近の運転周波数でのトルク脈動を抑制する必要があるが、制御系の構成で比較的容易に抑制可能である。

(5) 高調波

高調波、分数調波成分は主回路、制御方式により異なるが基本的には従来のチョップ車、レオナード車と同様にフィルタ、多重化などが高調波抑制法として有効である。

(6) 適用車種

単独運転に適した同期電動機方式は機関車など動力集中列車に、群運転に適した誘導電動機方式は電車など動力分散列車に適すると考えられる。

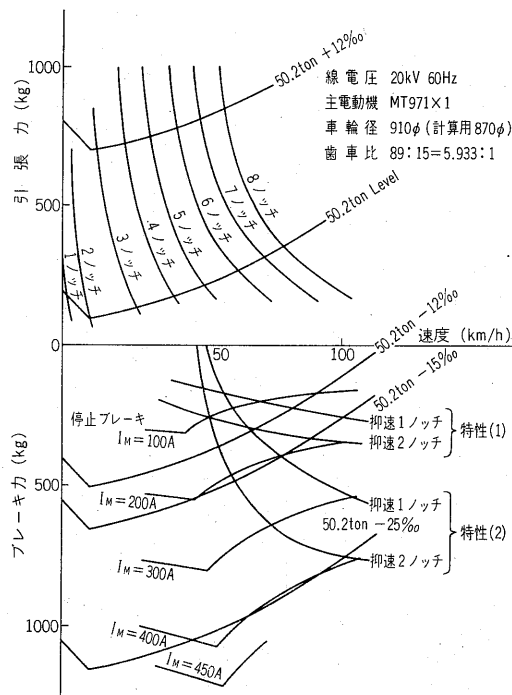
III. 交流サイリスタモータ

前述のように車両駆動用として無整流子電動機を適用するためには諸条件を満足する必要があるが、今回、日本国有鉄道に方式(8)の電動機(交流サイリスタモータと略称)を納入し、現車試験で良好な結果をえたので、以下その概要を述べる。

第2表 MT971 形交流サイリスタモータ仕様
Table 2. Specifications of MT 971 AC thyristor motor

項目	仕様	
線電圧	1φ AC 20kV 60Hz	
車両性能	出力	2×110kW (1時間)
	引張力	2×625kg (")
	速度	63 km/h (")
	最高運転速度	95 km/h
主電動機	形式	MT971
	方式	回転界磁形 自己通風式
	出力	110kW
	定格電圧	320V
主変圧器	定格電流	326A
	定格回転速度	2,280rpm
	方式	内鉄形送油風冷式
	容量	600/540/60kVA
主回路装置	形式	1φ-3φサイクロコンバータ式
	素子	CSI400-25 (富士形式EGP05-25)
	素子構成	1S1P12A
	定格出力	110kW
	定格出力電流	326A(連続) 140%(10分)
制御方式	周波数	76Hz(定格) 120Hz(最高)
	主電動機 永久並列接続 停止回生、抑速回生ブレーキ付 電流制限付サイリスタ電圧制御方式	

(注) 主変圧器は既設機器



第1図 力行・回生ブレーキ(停止・抑速)特性曲線
Fig. 1. Performance curve of powering and regenerative braking (stop-grade)

1. MT 971 形交流サイリスタモータの仕様と性能

第2表にクモヤ791形交流専用電車に搭載したMT971形交流サイリスタモータの仕様を示し、第1図に力行、回生ブレーキ(停止、抑速)特性曲線を示す。

基本の定格はクモヤ791形電車と同一である。

2. 主回路および制御

1) 主回路

第2図に主回路つなぎを示す。主回路は主変圧器、しゃ断器、主平滑リアクトル、主変換器、主電動機保護用NFBおよび主電動機からなり、また界磁制御用変換器は主変圧器に接続されている。

この方式の主回路は第3図(a)の等価回路で考えることができ電源側、整流子側サイリスタおのおのの位相角制御信号の動作領域を第3図(b)のように切換えるのみで前後進力行、ブレーキの制御が可能である。したがって交流しゃ断器はノッチオフ以外は閉じている。

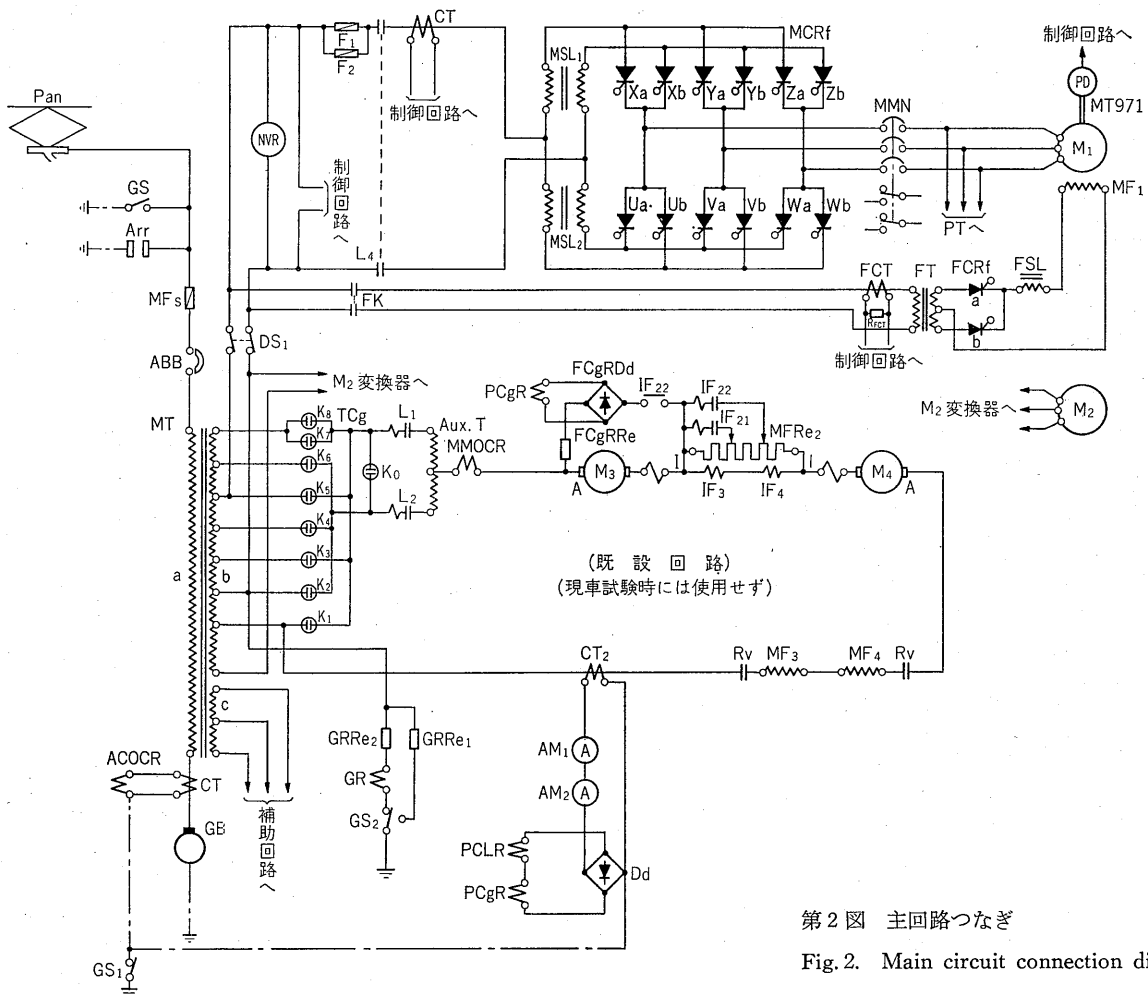
2) 制御

第3図で明らかなように主変換器部はサイリスタレオナードの電圧制御用変換器、直流機の整流子とまったく同一の機能なので速度制御法は同一思想で可能であり、その特性も直流直巻電動機の長所をそのまま実現可能である。なお本機では他励直巻界磁制御方式を採用し、主電動機特性に大きな自由度をもたせるとともに界磁を低電圧、小電流として耐地絶縁を軽減させている。

第4図に制御系のブロック図を示す。

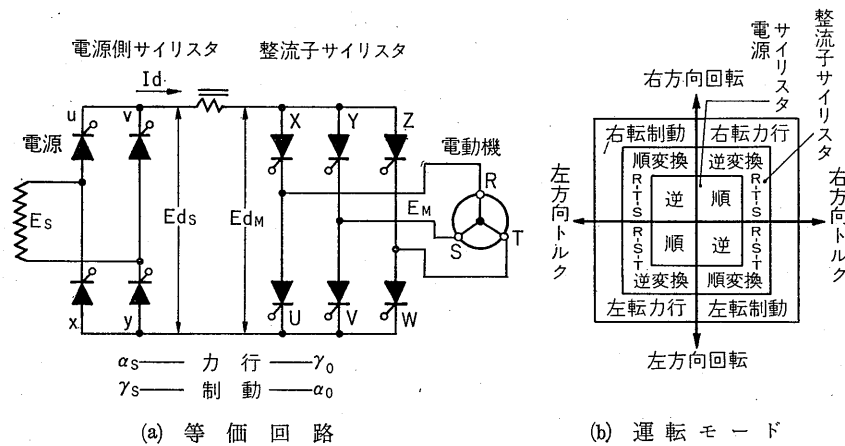
(1) 力行制御

主電動機回転速度を第3図(a)により回路電圧降下および転流重なり角を無視して表わすと下式のようなになる。



第 2 図 主回路つなぎ

Fig. 2. Main circuit connection diagram



第 3 図 等価回路と運転モード

Fig. 3. Equivalent circuit and driving modes

$$N = \frac{0.9 E_s}{k \phi \cos(\gamma_0 - \delta_M)} \cos \alpha_s$$

E_s : 電源電圧

α_s : 電源側サイリスタ制御角

γ_0 : 整流子サイリスタ制御角

ただし, k : 比例定数

ϕ : 界磁有効磁束

δ_M : 電動機内部相差角

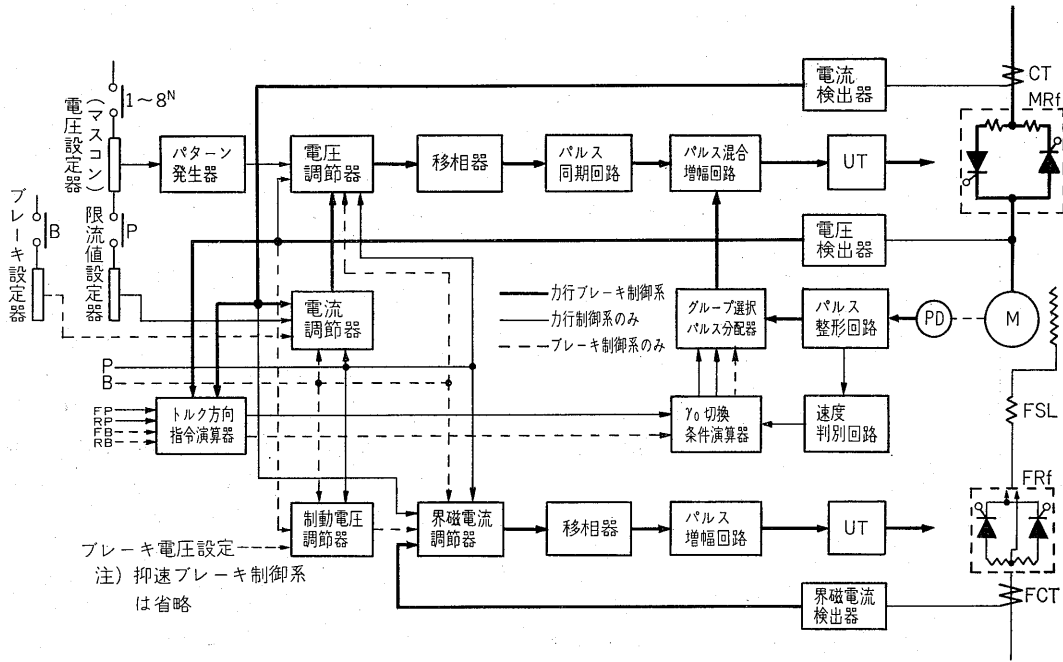
上式から力行時の速度制御は電源側サイリスタの制御角 α_s を制御することにより可能である。

力行制御系はマスコンおよびトルク方向指令演算器に

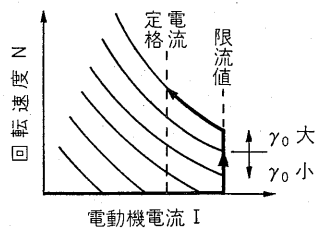
より構成される。主電動機が低速で逆起電力が低い領域では電流制御系が電圧制御系に優先し、一定限流値に制御される。マスコンノッチの指定電圧に等しい電動機電圧まで増速すると電圧制御系が優先し、電動機電圧は一定に制御される。この時界磁電流は常に電機子電流に比例し直巻特性となるよう制御されている。また整流子サイリスタの制御進み角は高速・低速により切換えている。出力トルク増大、トルク脈動低減、力率向上などのためである。

第 5 図に力行時の電動機電圧、電流波形を示す。

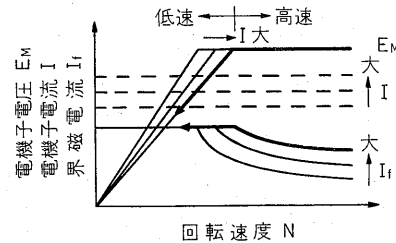
(2) 電動機内部相差角および転流重なり角



(a) 制御ブロック図



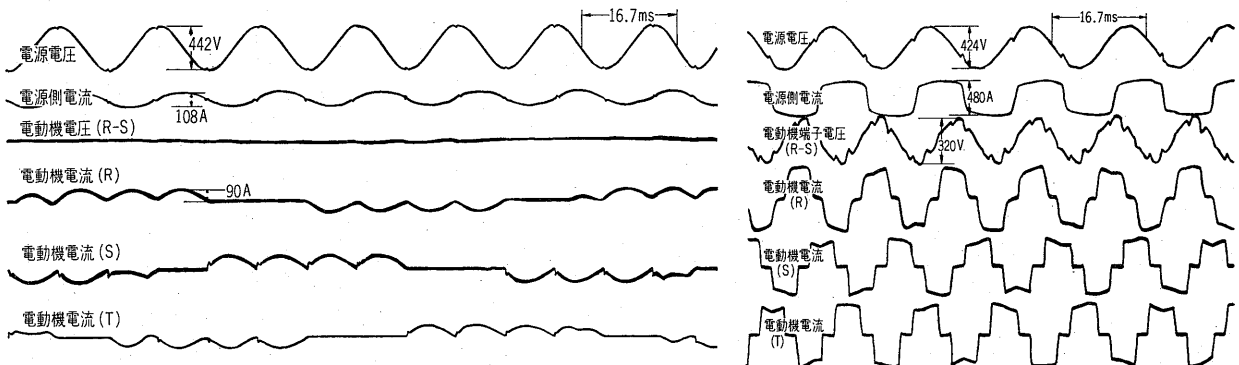
(b) 力行制御動作



(c) 回生停止ブレーキ制御動作

第4図 制御ブロック図

Fig. 4. Block diagram of automatic control



(a) 始動時 ($\gamma_0=30 \text{ deg}$)

(b) 高速時 ($\gamma_0=70 \text{ deg}$)

第5図 力行時の電動機電圧、電流波形

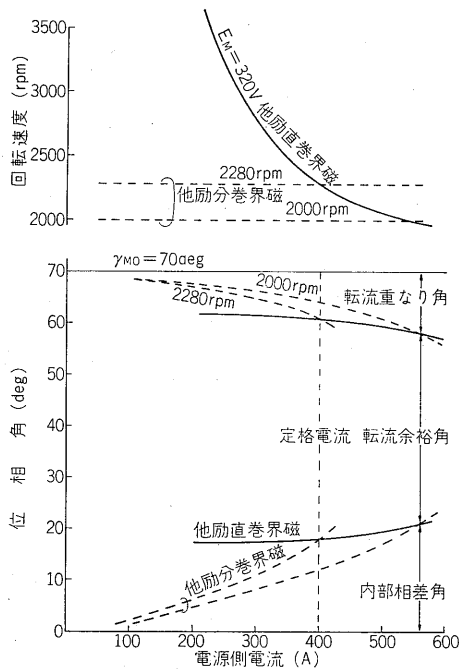
Fig. 5. Waveforms of motor terminal voltage and line current at powering

力行時の整流子サイリスタの転流限界は γ_0 により確保されているわけであるが、運転状態によって電機子電流が変化すると電動機の内部相差角 δ_M 、転流重なり角 u_M が変化して転流余裕角 δ_I も変化する。

$$\delta_I = \gamma_0 - (u_M + \delta_M) \quad (\gamma_0 \text{ は一定})$$

一般に電機子電流が増加すると u_M , δ_M は増加するのでサイリスタのターンオフ時間が確保できなくなり転流

失敗に至る。このときの u_M , δ_M の挙動は界磁方式により異なる。第6図によれば、他励分巻界磁の場合、高速大電流領域で δ_I が減少し、他励直巻界磁の場合はあまり変化していない。直巻界磁の場合は電機子電流に対応して界磁電流（磁束）も増加するため δ_M の変化は抑制される。また誘起電圧は磁束に対応して増加するので転流電圧も高くなり u_M の変化も少なくなるわけである。



第 6 図 内部相差角および転流重なり角
Fig. 6. Armature reaction angle δ_M and lap angle u_M

すなわち、サイリスタモータに直巻特性をもたせることは出力限界が拡大することを意味する。

(3) 停止回生ブレーキ制御

停止ブレーキはブレーキハンドル角度に比例した一定ブレーキ力特性が望ましい。ブレーキ時の特性式は回路電圧降下および転流重なり角を無視すると下式のとおりである。

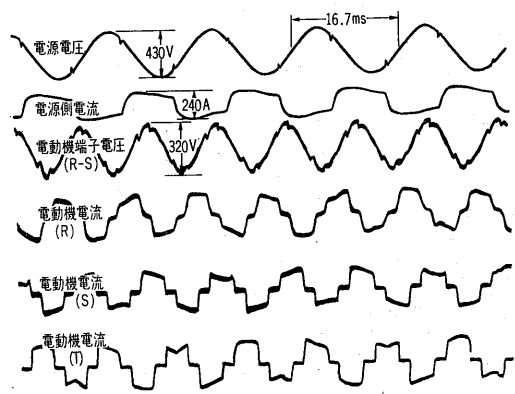
$$\begin{aligned} \text{電動機平均トルク} \quad \tau_{ave} &= k_1 \phi I \cos(\alpha_0 - \delta_M) \\ \text{仮想平均電機子電流} \quad I &= \frac{E_{dM} - E_{ds}}{|Z|} \\ \text{回生可能領域} \quad E_{ds} &\geq E_{dM} = k_2 N \phi \cos(\alpha_0 - \delta_M) \end{aligned}$$

ただし、 k_1, k_2 : 比例定数
 α_0 : 整流子サイリスタ制御角
 Z : 回路インピーダンス

上式より、連続的に速応性の良いトルク制御を行なうには電機子電流を制御すれば良い。すべての速度範囲を安定に制御するために、高速域において界磁磁束の弱い制御が必要になる。

停止ブレーキ制御系はブレーキハンドルおよびトルク方向指令演算器により構成される。回生ブレーキ制御は直巻特性のままでは安定な特性が得にくいので他励界磁とし、高速域では界磁制御系が電動機電圧を一定に制御し、電機子電流制御系がブレーキ設定値相当の電機子電流を制御する。低速域では界磁電流が最大になり一定に制御され、電機子電流制御系のみで電機子電流が一定に制御される。

(4) 抑速回生ブレーキ制御



第 7 図 回生ブレーキ時の電動機電圧、電流波形
Fig. 7. Waveform of motor terminal voltage and line current at regenerative braking

抑速ブレーキ制御系はマスコンおよびトルク方向指令演算器により構成される。抑速ブレーキも停止ブレーキと同様他励界磁とし、抑速ノッチにしたがい界磁電流を一定に制御すると同時に電動機電圧に比例した電機子電流に制御される。これは第 1 図の抑速特性 (1) に相当する。また界磁制御系はそのままだ電動機電圧を一定に制御すると抑速特性 (2) のようなさらに抑速効果の大きい特性がえられる。第 7 図に回生ブレーキ時の電動機電圧、電流波形を示す。

以上の力行、回生ブレーキ制御系の調整は当社ですでに手法が確立され、あらゆる自動制御の分野で適用されている制御系の最適調整法により制御定数を決定している。

3) 保 護

サイリスタモータの保護は従来の車両システムと同一思想で処置するものと、サイリスタモータ特有なものを考慮する必要がある。その代表例について述べると、

(1) 界磁無電流

本機は他励直巻界磁方式のため界磁回路の故障によっては無電流になることが考えられる。力行時には逆起電力が零になり電機子電流が急激に増大する。この場合の処置は電源側サイリスタ制御角 α_s を γ 領域へ急速に移相し、電機子電流を減衰させ、変換器そのほかの機器の損傷を防止する。ブレーキ時はブレーキ力の低下になるが機器から見て安全側となる。

(2) 離線およびセクション

パンタグラフの離線、セクション通過時の数 10 ms 程度数秒間の無電圧状態では、力行中には再印加時に突入電流が流れる。この場合は無電圧をじん速に検知し、マスコン信号オフ、整流子サイリスタ制御角 γ_0 を小にして電機子電流の減衰を早め、再印加時は始動パターンにしたがって再力行する。ブレーキ時は上記同様検知した後整流子サイリスタ制御角 α_s を γ 領域に変更し、電機子

電流の減衰を早めると同時に同一グループの素子を一括点弧して、サイリスタの電流責務が $\frac{1}{2}$ になるようにしている。再印加時には制動開始のパターンにしたがって再ブレーキとなる。

そのほか回生ブレーキ中の架線電圧低下に対する処置など各電気機器およびシステムについて、十分な保護方式を開発し採用している。

IV. 装置の構成

1. 主電動機

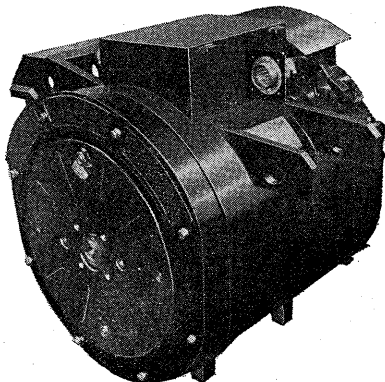
車両用主電動機は限られた寸法内で、所要性能を満足し、かつできる限り軽量であることが必要である。

電動機の方式は出力、体格、巻線方式、界磁方式、電機子反作用の補償、変換器とその制御方式などを総合的に考慮し決定しなければならない。

界磁方式には円筒形、突極形、クローポール形などがある。サイリスタモータでは転流リアクタンスが出力を決定する重要要素であり、転流リアクタンスを小さく、通電電流を小さくできる円筒回転界磁形他励直巻界磁方式が車両用として適している。

サイリスタ整流子の制御角はすべての特性に影響をおよぼすが、これを規制しているのが内部相差角 δ_M すなわち直軸ならびに横軸リアクタンス x_d, x_q 転流重なり角 u_M すなわち次過渡リアクタンス x_d'', x_q'' である。 x_d, x_q, x_d'', x_q'' が大きいと δ_M, u_M が増大し出力が減少するが、電気装荷を小として x_d を小さく、ダンパ巻線を設けて次過渡リアクタンスを小さくすることが効果がある。

また電機子反作用を直接打消し δ_M を小さくするため補償巻線を設ける方法がある。直軸反作用起磁力はブラシ軸を中心に変動するとともに転流重なり角の影響で分布も変化し補償が困難なので一般に横軸反作用のみを補償するが、回転界磁形では補償巻線用スリップリングが必要となり車両用としてはメリットが少ない。



第8図 MT 971 形主電動機外観
Fig. 8. Outoverview of MT 971 main motor

MT 971 形主電動機は前述の直巻界磁の転流限界拡大効果を勘案して電気装荷を大きくとり、全体としては小形軽量化を図っている。第8図にその外観を示す。

2. 主変換器

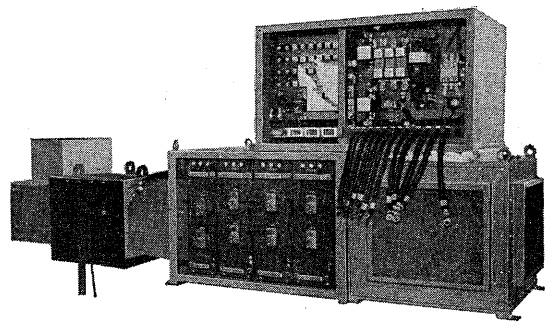
変換器部は自製式単相—三相サイクロコンバータで構成されている。各アームに常時印加される電圧は電源電圧と電動機線間電圧の和である。また電流責務は電源周波数と電動機周波数および相互の位相関係で変化する。とくに電動機と電源周波数の比が整数または整数分の1のときには通電するアームが固定するので冷却設計には注意を要する。第9図に主変換器の外観を示す。

3. ゲート制御装置

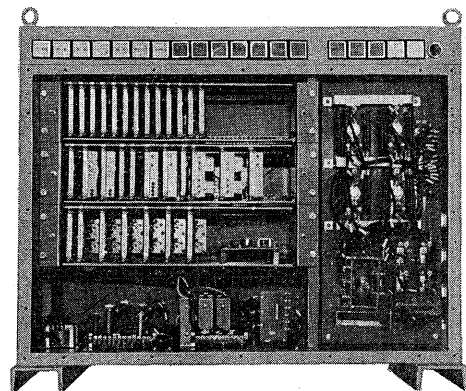
この装置は磁極位置検出信号と電動機電機子電圧制御信号を混合し変換器を制御する機能をもっている。第10図に装置の外観を示す。装置は調節器、移相器、デジタル回路など機能ブロックプリント板で構成されており、ICを使用しコンパクトで高信頼性なものとしている。ゲート点弧回路は高周波変調方式を採用しゲート周辺回路の小形・高性能化を図っている。

4. 主平滑リアクトル

主平滑リアクトルは主回路電流の脈動を抑制し確実な転流動作を行なう、電流断続を防止し制御系の安定をとるなどの目的でそう入されるが、電源転流時の重なり角



第9図 RS 910 形主変換器外観
Fig. 9. Outoverview of RS 910 main converter



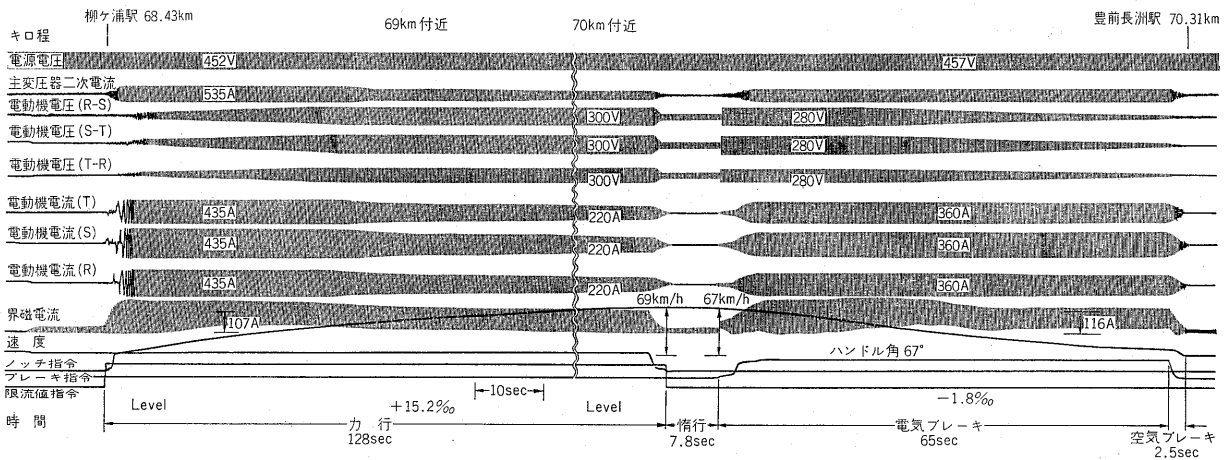
第10図 ゲート点弧制御装置外観
Fig. 10. Outoverview of gate control device

が小さくなるよう第2図のように巻線を二分割して転流時のみインダクタンスを打消すようにしている。

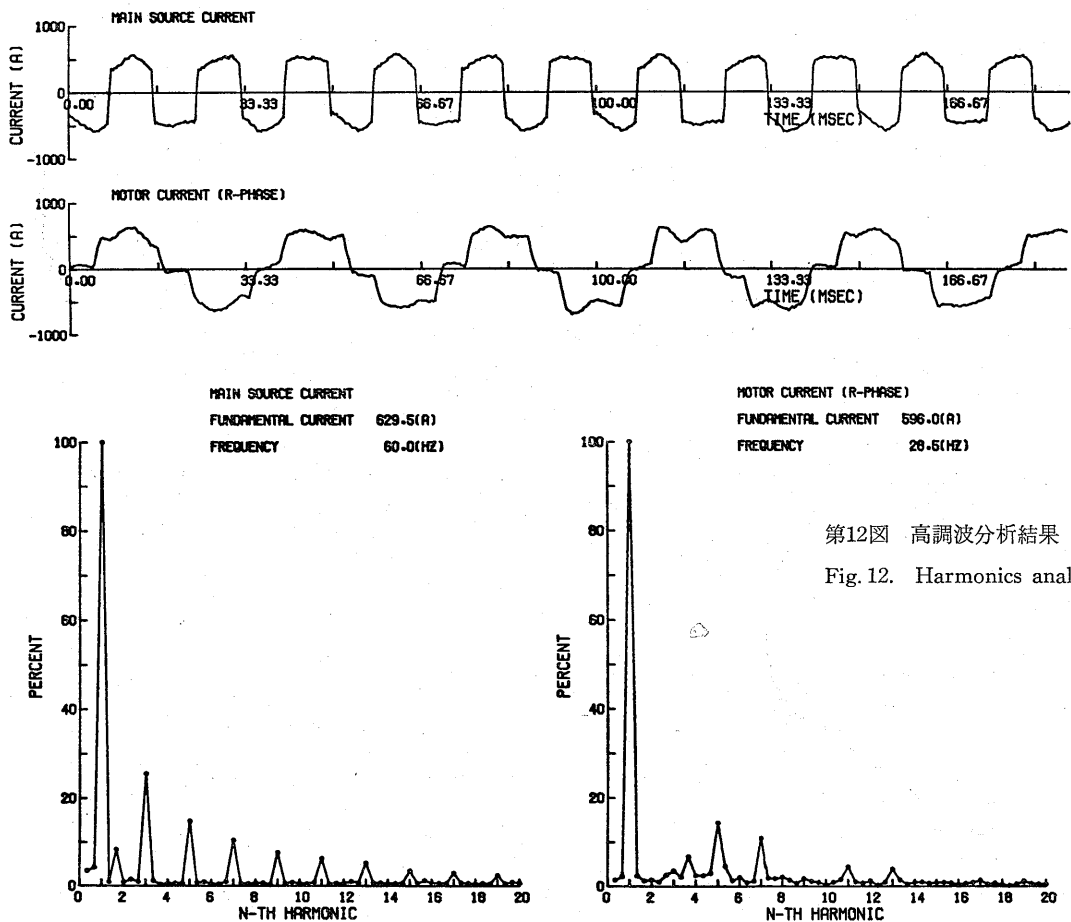
5. 磁極位置検出器

電動機の固定子と回転子の相対位置関係を検知する方法として機械式および電気式がある。 u_M, δ_M は電機子電流値によって増加する。したがって運転上考えられる最大電流における u_M, δ_M から所要 γ_0 は決められるが、小電流域では力率が悪化するので、理想的には電流に見合った γ_0 に補償する必要があるが、直巻界磁方式では u_M, δ_M の変動はたかだか数度(電気角)であるから、高

・低速域で γ_0 を切換える程度で充分実用可能である。機械式は γ_0 は固定のため γ_0 を切換えるにはそれに対応した組の検出器が必要であるが γ_0 は任意の角度に設定できる。電気式の γ_0 は端子電圧を基準に決まるので内部相差角 δ_M の変化に対しては補償されたものとなるが、簡単な方式では γ_0 は 30° ごとの設定以外不可能なので、場合によっては機械式の場合より低力率で運転することも考えられる。また低速で電動機電圧が低い期間は機械式の併用または特殊な位置検出法が必要となる。電気式においても γ_0 を任意に得ることも可能であるが



第11図 クモヤ 791 形電車搭載現車試験オシログラム
Fig. 11. Trial run oscillogram by KUMOYA 791 EC



第12図 高調波分析結果
Fig. 12. Harmonics analysis

この場合には装置がやや複雑になるという欠点がある。
本機では二段切換機械式位置検出器を使用している。

V. 現車試験

国鉄・日豊本線において昭和47年12月12～16日に実施した試験の概要はつぎのとおりである。

1) 試験の目的

交流サイリスタモータにより電車を駆動し、始動、力行および電力回生ブレーキ性能を確認し、モータの並列運転時の相互干渉、その他問題のないことを調査、確認すると共に、架線高調波分析を行ない、将来の設計資料を得る。

2) 試験線区

日豊本線 柳ヶ浦～杵築間（上りこう配最大15%、下りこう配最大25%、約30km）

3) ぎ 装

クモヤ791形交流電車の台車にMT971形交流サイリスタモータを装架し、変換装置、リアクトル、制御装置などは客室床の上に仮設した。他社製は他の台車に取り付けられた。

4) 試験項目

2台のモータの並列運転および単機運転時の始動、力行、停止回生ブレーキ、抑速回生ブレーキおよび連続走行を行ない、各性能、特性を測定する。

5) 試験結果

本線試験の主な測定結果はつぎのとおりである。

- (1) 単機および並列運転のいずれも安定に走行した。始動時の制御系の遅れによる電流ピーク、ハンチングもなく、また他励直巻特性の動的特性も安定しており、その有効性を確認した。
- (2) 車両性能は計画値をほぼ満足し、単機で65km/h以上で80km/h以上の最高速度を記録した。
- (3) 力行、回生時の電源中断に対しても制御動作、保護動作は確実で安定に運転した。
- (4) 電源側高調波は $n^{-1/2}$ 付近に分布しており、従来の

整流器式車両と基本的な差異がないことを確認した。

第11図および第12図に本線走行時の各部動作オシログラムおよび電源側、電動機側の高調波電流分析結果を示す。

VI. 今後の課題

現在までの開発研究および現車試験の結果、サイリスタモータに関する技術的問題については所期の目的を達したと考えられる。今後は電気機器と制御システムのバランスのとれた車両システムを開発するため、各電気機器の高性能化、小形軽量化、無保守化の検討はいうまでもないが、期待粘着係数向上の方策、高調波抑制対策と短周期内非周期性高調波評価法、主電動機出力限界拡大などソフト、ハード両面にわたりさらに検討する必要があるだろう。

VII. あとがき

以上車両用無整流子電動機についてMT971形交流サイリスタモータを中心に述べた。無整流子電動機の車両への適用は遊星歯車式、トルコン式など研究されてきたが、半導体応用技術を十分に活用した無整流子電動機の開発研究は試作試験結果からも明らかなように技術的、経済的に充分実用性があるものと期待できる。

終りに本機の設計、製作ならびに各種試験にあたり終始ご指導を賜わっ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をはじめ関係各位に対し深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- (1) 難波・山本・塚原：サイリスタ式無整流子電動機とその制御 富士時報 44 No.3 (昭46)
- (2) 佐々木：車両用無整流子電動機 電気車の科学 Vol. 26, No.2 (1972)
- (3) 高田・高橋・沢・永沼：110kW直巻サイリスタモータ 昭和48年電気学会全国大会
- (4) 佐々木：試作無整流子電動機の現車試験 電気車の科学 Vol. 26, No.3 (1973)



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。