

車両用ブラシレスサイリスタ電動発電機

Brushless-thyristor Motor-Generator Set for Rolling Stock

最近の電車は冷房などサービス向上のため、電車に装備される交流電源装置の必要容量が飛躍的に増大してきた。従来の直流電動交流発電機方式は整流子、ブラシをもっているため、保守・点検に時間を要するほか、大容量化に限界がある。そこで、サイリスタモータの技術を応用して電動機と発電機を一体化し、重量、寸法の軽減と徹底した無保守化を図ったブラシレスサイリスタ電動発電機を開発した。この電動発電機には、電流パルス起動方式、位置検出器なしの電気分配方式など多くの新技術を採用して、負荷急変、架線電圧急変に対して安定な動作が得られ、無保守化はもとより、信頼度の高い車両用の補助電源システムを確立することができた。

坪井 孝* Takashi Tsuboi
棚町徳之助* Tokunosuke Tanamachi
石川 芳寿** Yoshihisa Ishikawa
近藤 正示*** Seiji Kondô
高橋 宏**** Hiroshi Takahashi

1 緒 言

最近の電車では夏季におけるサービス向上のため、冷房装置付き車両が飛躍的に増加してきている。それに伴い冷房装置の電源として、大容量の電動発電機の需要が増えてきている。直流電車用の電動発電機は、従来直流電動機と交流発電機とを組み合わせ一体わくに収めていた。しかし、直流機はブラシ交換、整流子面の削正などの保守を必要とする。この直流機の整流子部分をサイリスタ変換装置で置き換えたものに同期電動機方式のサイリスタモータがある。このサイリスタモータの回転界磁用のスリップリングを励磁機と回転整流装置で置換すると、集電装置の全くないブラシレス電動機が実現できる。車両用のサイリスタモータに関して日立製作所では、昭和39年より研究を進め、100kWサイリスタモータ⁽¹⁾、200kWサイリスタモータ⁽²⁾などを試作した。また昭和45年には、日本国有鉄道技術研究所に200kVAサイリスタモータ/コンバータを納入した。更に昭和48年には、日本国有鉄道に交流電車用110kWサイリスタモータ⁽³⁾⁻⁽⁵⁾を納入し、試験車による実走行試験が実施された。

今回、これらの実績をもとに直流電動機をサイリスタモータで置き換え、サイリスタモータと交流発電機の界磁及び電機子鉄心を共用し、更にブラシレス励磁機の採用により、保守の大幅な軽減、信頼性の向上及び、重量の軽減を図ったブ

ラシレスサイリスタ電動発電機(以下、サイリスタMGと称す)を開発した。今回開発したサイリスタMG装置は次の特長をもっている。

- (1) 電動発電機本体に完全ブラシレス方式を採用するとともに日立L-PACK軸受装置などを適用することにより、徹底した無保守化を図った。
- (2) 起動方法として、インダクタンスとコンデンサ共振による電流パルス非同期起動方式を開発し、更に電気分配方式の採用によって、磁極位置検出器を不要とし、信頼性の向上を図った。

この装置は定置試験において、所期の性能をもつことを確認のうえ、昭和49年11月に相模鉄道株式会社において現車試験を行ない、サイリスタMGが信号に及ぼす誘導障害などについて調査し、異常のないことを確認した。

以下この装置の概要と現車試験結果について述べる。

2 サイリスタMGの特質

サイリスタMGは、同期機とサイリスタとを組み合わせた電力変換装置で、これを電気車の交流補助電源装置として使用する場合、従来の直流電動交流発電機方式(以下、DCMGと略す)及びサイリスタ静止インバータと比較して表1に示す

表1 各種交流電源方式の特徴比較 サイリスタMGは、DCMGと静止インバータの長所を兼ね備え、特に電気車の交流補助電源装置に適している。

方 式		サイリスタMG	DCMG	静止インバータ
構 成	回 転 機	あり (MG共通磁路ゆえ軽い。)	あり (MG磁路が別個ゆえ重い。)	な し
	イ ン バ ー タ	あり (他励インバータゆえ構成簡単, 安価。)	な し	あり (自励インバータゆえ構成複雑, 高価。)
成	入 力 フ ィ ル タ	小 形	不 要	大 形
	出 力 フ ィ ル タ	不 要	"	"
特 性	出 力 波 形	正 弦 波	正 弦 波	方形波をフィルタで正弦波とする。
	架線電圧急変に対して	サイリスタ位相制御により直ちに補償可能。	入力電流急変し、モータの整流悪化。	サイリスタ位相制御により直ちに補償可能。
	短時間停電に対して	機械的慣性があるので、出力を持続できる。	機械的慣性があるので、出力を持続できる。	その都度出力電圧が消滅する。
保 守		ほとんどなし。	ブラシ交換、整流子面削正。	ほとんどなし。

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

ような特質を挙げることができる。

すなわち、サイリスタMGは、原理的に正弦波状出力電圧をもち、しかもパンタグラフ離線などによる短時間の停電に際しても出力電圧がほとんど低下しないというDCMGの長所と、メンテナンス部分がほとんどないという静止インバータの長所とを兼ね備えたものである。

3 サイリスタMGの動作原理

3.1 電力変換の仕組み

図1にサイリスタMGの原理図を示す。インバータ部は直流電源から電力を受けて、これを三相交流に変換する。この三相交流電流を同期機の固定子に巻かれている電機子巻線(以下、これをM巻線と呼ぶ)に流すと、回転子である界磁極との間にトルクを発生し、回転子(界磁極)が回転する。

固定子にはM巻線のほかにもう一組の電機子巻線(以下、これをG巻線と呼ぶ)が巻かれており、界磁極の回転によりこのG巻線にも速度起電力による三相交流を発生する。G巻線から負荷電流をとると、負荷電流と界磁極との間に反回転方向のトルクが発生するが、この反回転方向トルクとM巻線によって与えられるトルクとがバランスするように(厳密には同期機の損失だけ余分に)、直流電源側から電力が供給される。つまり、従来のDCMGの電動機と発電機を一体化し、且つサイリスタによって無整流子化したものといえる。

以上より、サイリスタMGは次のような特長をもっていることが理解される。

- (1) 出力波形が原理的に正弦波となるので、出力フィルタを設ける必要はない。
- (2) 入力側(高圧)と絶縁された任意の交流電圧が得られるので、出力変圧器が不要である。
- (3) パンタグラフの離線や、セクション通過などにより短時間の停電が生じても、回転子が慣性をもっているので出力電圧がほとんど低下しない。

3.2 インバータ部の動作

サイリスタはそれ自身、電流をしゃ断する機能をもっていないので、直流→交流への電力変換を行なわせるには、サイリスタに外部から逆電圧を印加する必要がある。サイリスタMGでは、この逆電圧をM巻線に誘起される電圧より得る他

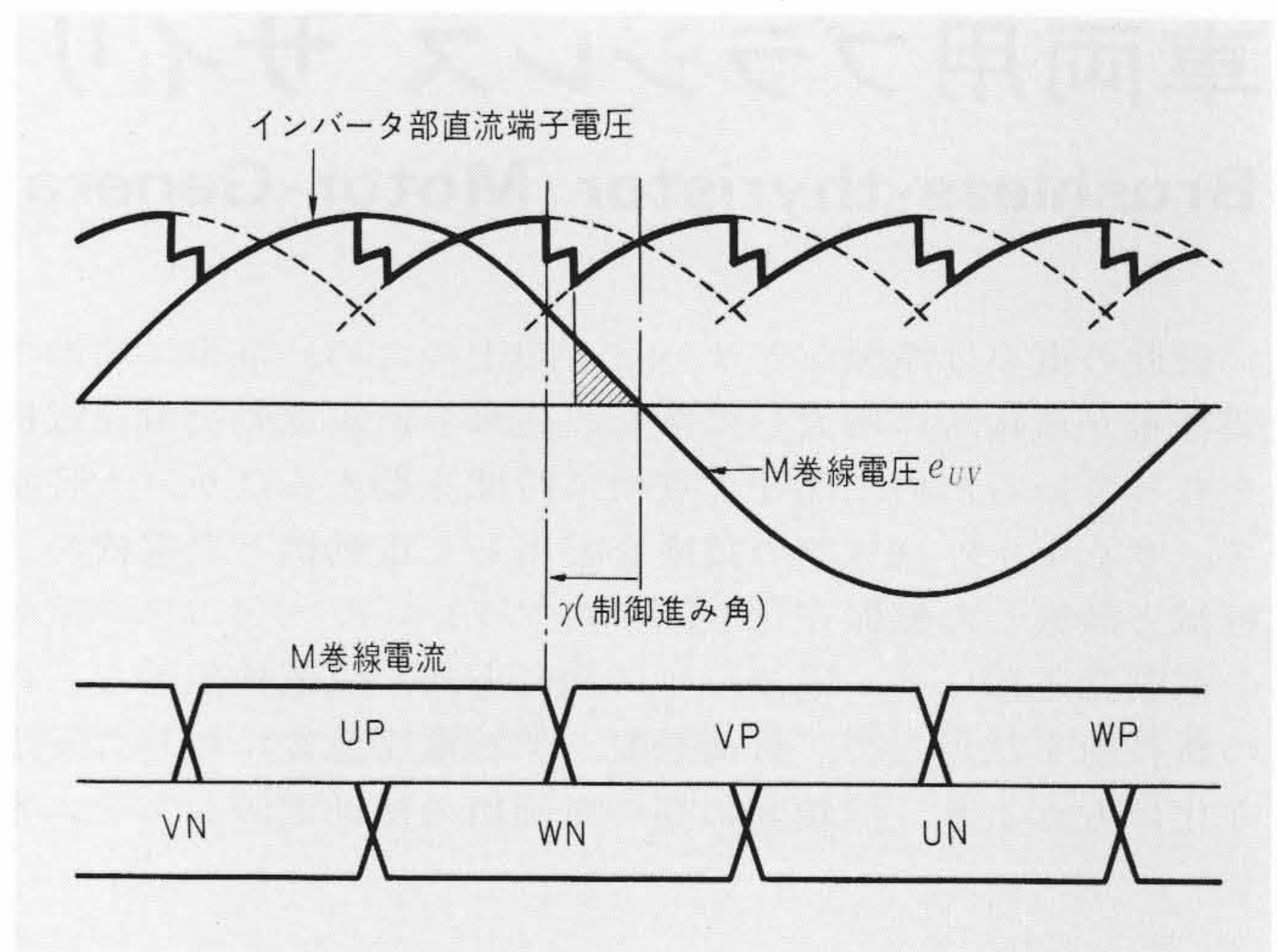


図2 インバータ部の動作波形 電機子電圧の斜線部分がサイリスタ(UP)に逆方向に加わり、ターンオフさせる。すなわち、他励インバータとして動作するので、複雑な強制転流手段を必要としない。

励インバータ方式をとっている。

図2はインバータ部の動作波形を示すものである。図1において、例えばサイリスタUPからVPへ電流を移す(転流させる)には、端子GUの電位がGVより高いうちに(線間電圧 $e_{uv} > 0$ なる期間に)サイリスタVPを点弧させると、 e_{uv} がUPの電流を打ち消す方向に作用して、UPからVPへの転流ができる。

このようにサイリスタMGは、インバータ部を他励インバータとして動作させる方式をとっている。静止形インバータのように複雑な強制転流手段を必要としないほか、サイリスタ素子に特にターンオフタイムの短いものを使用しなくてもよいという特長をもっている。

3.3 周波数及び電圧の制御

電源(架線)電圧変動と負荷変動という二つの外乱に対して、サイリスタMGの出力周波数及び電圧を所望の値に維持するための制御方法を図3に示す。発電機の界磁制御によって出力電圧を制御するのは、従来のDCMGの場合と変わりはないが、周波数制御をインバータ部の位相制御(以下、これを γ 制

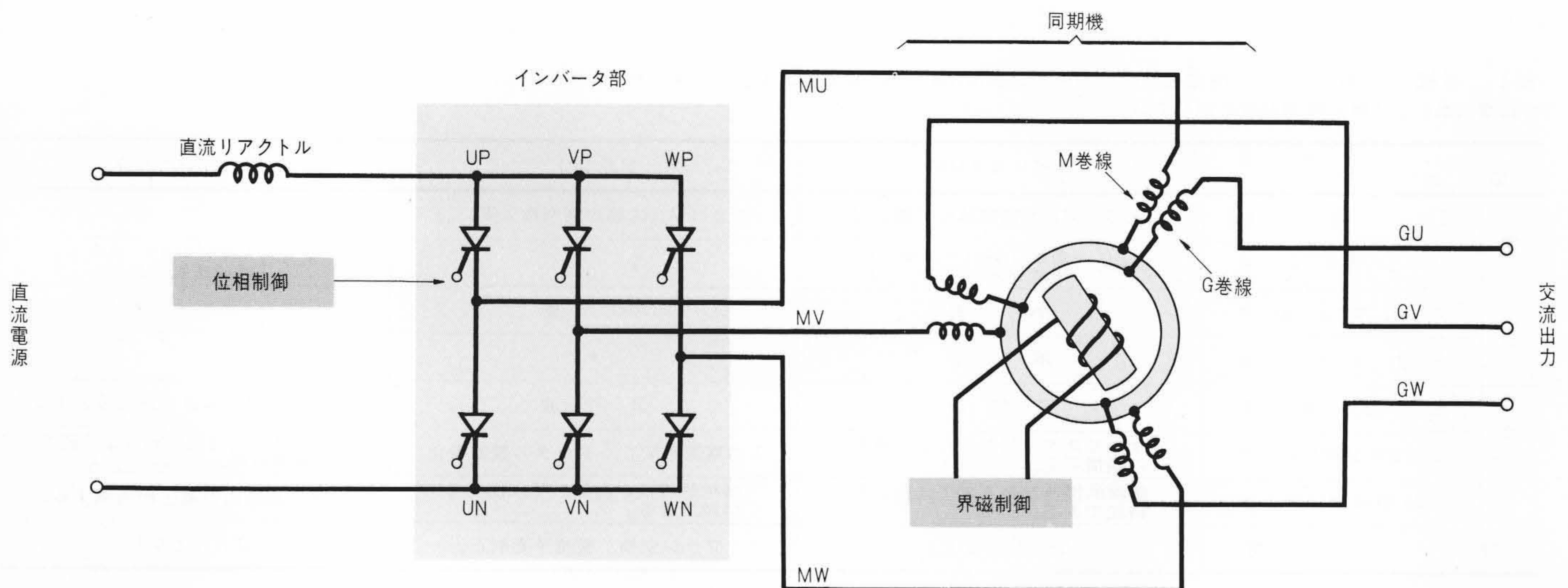


図1 サイリスタMGの基本構成 他励インバータと同期機とを組み合わせると、簡単な構成で直流→交流の電力変換ができる。

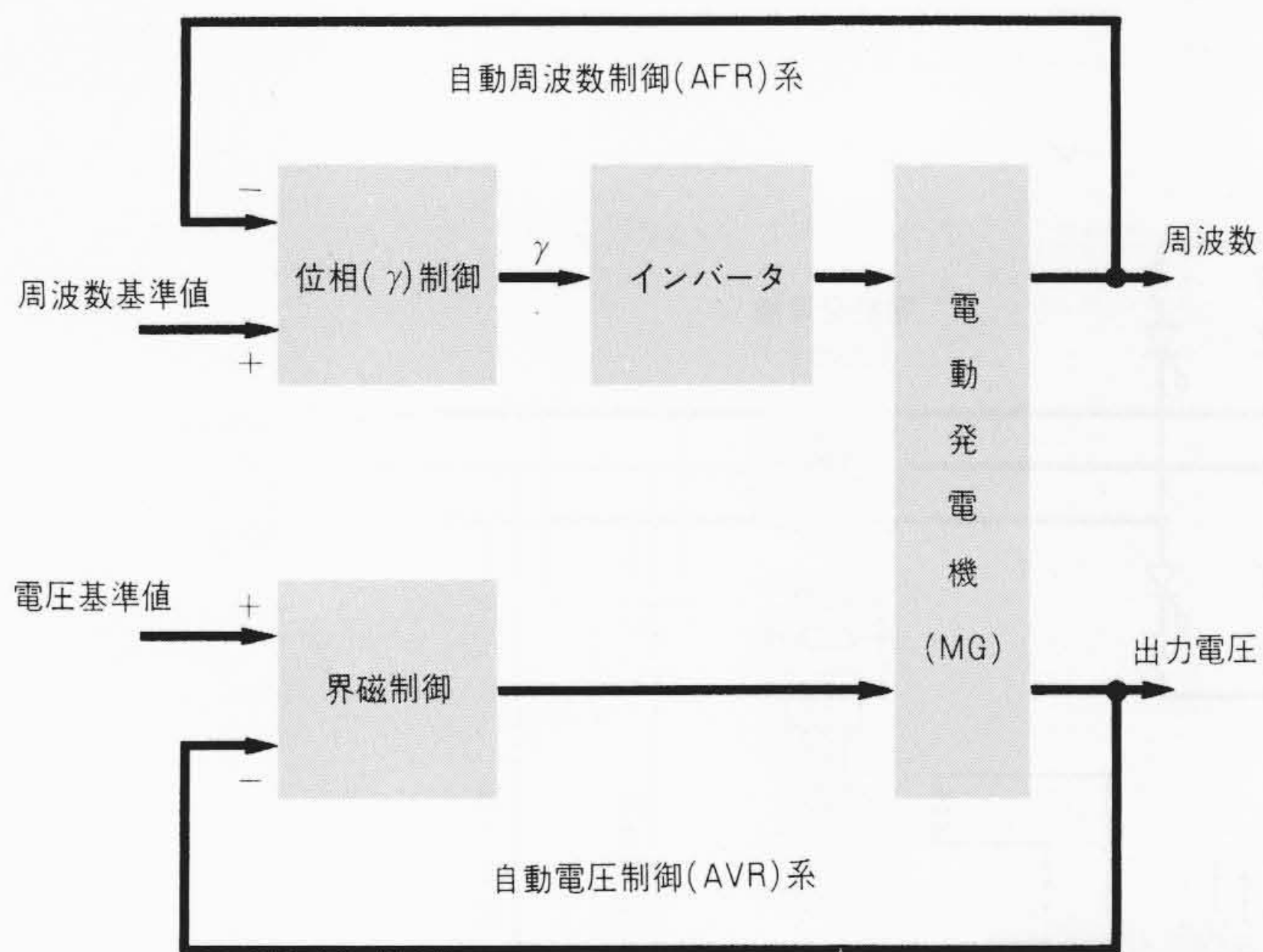


図3 制御ブロック図 電源(架線)電圧変動や負荷変動があっても出力電圧、周波数を所望の値に自動制御する。

御と呼ぶ)で行なうところがサイリスタMGの特徴である。

図2の動作波形から分かるように、制御進み角 γ を大きくするとインバータ部の直流端子電圧が低下する。この直流端子電圧はDCMGにおける直流電動機端子電圧に相当するもので、 γ を大きくすることは直流電動機の界磁を弱めることと等価である。このように考えれば、 γ 制御によってサイリスタMGの周波数制御が可能なが分かる。但し、 γ 制御は界磁制御に比較してはるかに速応性があり、高度な周波数制御が可能である。

3.4 起動制御⁽⁶⁾

今まで説明したサイリスタMGの動作及び優れた特長は、インバータ部の転流がM巻線の誘起電圧によって行なわれることを前提としている。しかし、これらの特長を生かした交流電源装置を実現するには、誘起電圧がまだ十分に確立していない起動時に、サイリスタをいかにして転流するかが重要な点である。

従来、起動時のサイリスタの転流方法として、転流補助用のサイリスタやダイオードを別設するのが普通であったが、これでは半導体アーム数が少ないという特長を殺してしまう。

日立製作所では図4(a)に示すように転流コンデンサ1個だけを用い、補助サイリスタやダイオードはいっさい使用しない極めて簡単な起動方式を開発し、実際の装置に適用した。

これはM巻線の内部インダクタンスを巧みに利用して、サイリスタを自然消弧させつつ巻線に繰返しパルス電流を与え、誘導電動機と同じ原理で電動発電機(MG)を起動させる方式である。

図4において転流コンデンサが図示極性に充電されている状態で、例えばサイリスタUPとVNを点弧すると、M巻線の内部インダクタンスと転流コンデンサのキャパシタンスとでL-C振動回路が形成され、M巻線に正弦半波のパルス電流が流れる。このとき、転流コンデンサの電圧極性が反転して、サイリスタに逆電圧を印加しターンオフさせる。その後は直流リアクトルを通じて、ほぼ一定電流でコンデンサをもとの極性に再充電する。

このようにして、サイリスタ群に一定の順序でゲートパルスを与えてやれば図4(b)に示すようなパルス電流を流すことができる。この電流により回転磁界が生じ、回転子に巻き込まれているダンパ巻線に電流が誘導され、回転子を回転させるのである。

この方式は、回路構成が極めて簡単にできるばかりでなく、機構的に複雑な回転子の位置検出器の省略を可能とした。

4 140kVAサイリスタMG装置

相模鉄道株式会社納め140kVAサイリスタMG装置について、以下その概要を紹介する。

4.1 仕様及び回路構成

装置の仕様を表2に、回路構成を図5に示す。本装置は前述したように多くの優れた特長をもっているが、このほかに直流電車の交流補助電源用として特に留意した事項を次に列記する。

- (1) 電動発電機は完全ブラシレス構造とするために、励磁機として回転電機子形の三相交流発電機を設けてある。
- (2) 起動時はパルス電流による非同期起動方式を、また定常運転時には交流出力電圧位相を基準にして、インバータ部の位相制御を行なう電気分配方式を採用することにより、磁極位置検出器を省略した。
- (3) 起動時の突入電流を抑制するために、従来形DCMGと同程度の起動抵抗を設けた。

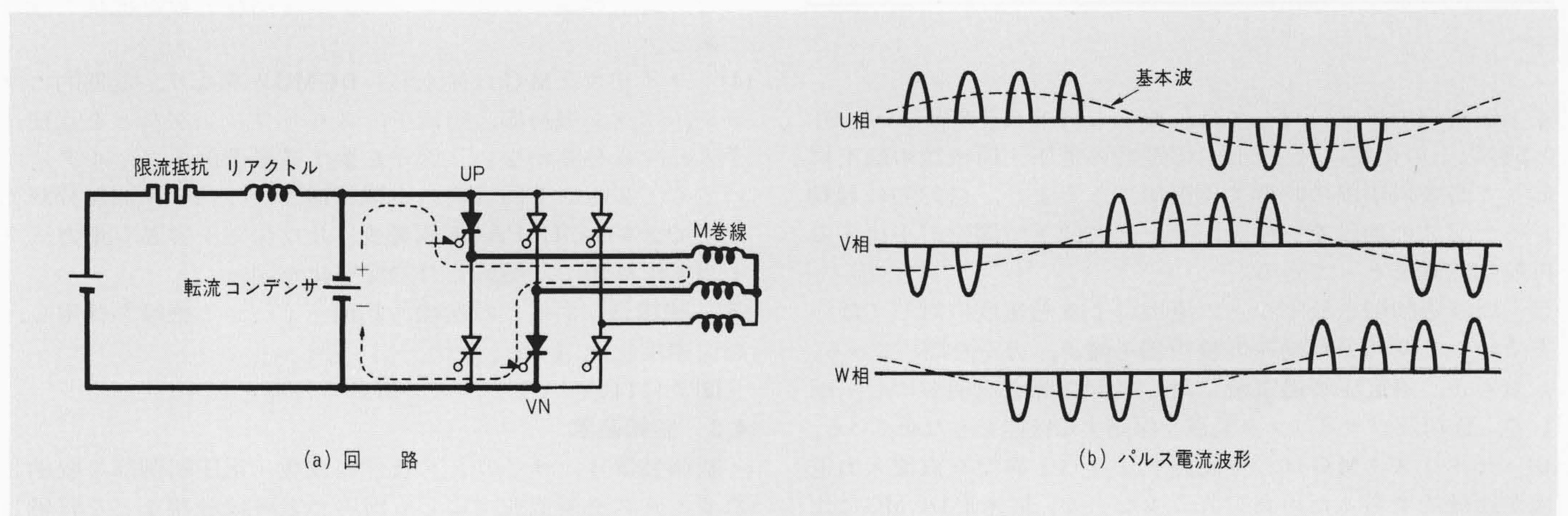


図4 パルス電流起動方式 M巻線に流れるパルス電流の周波数を低周波から徐々に増加させて、誘導電動機と同じ原理で起動させる。

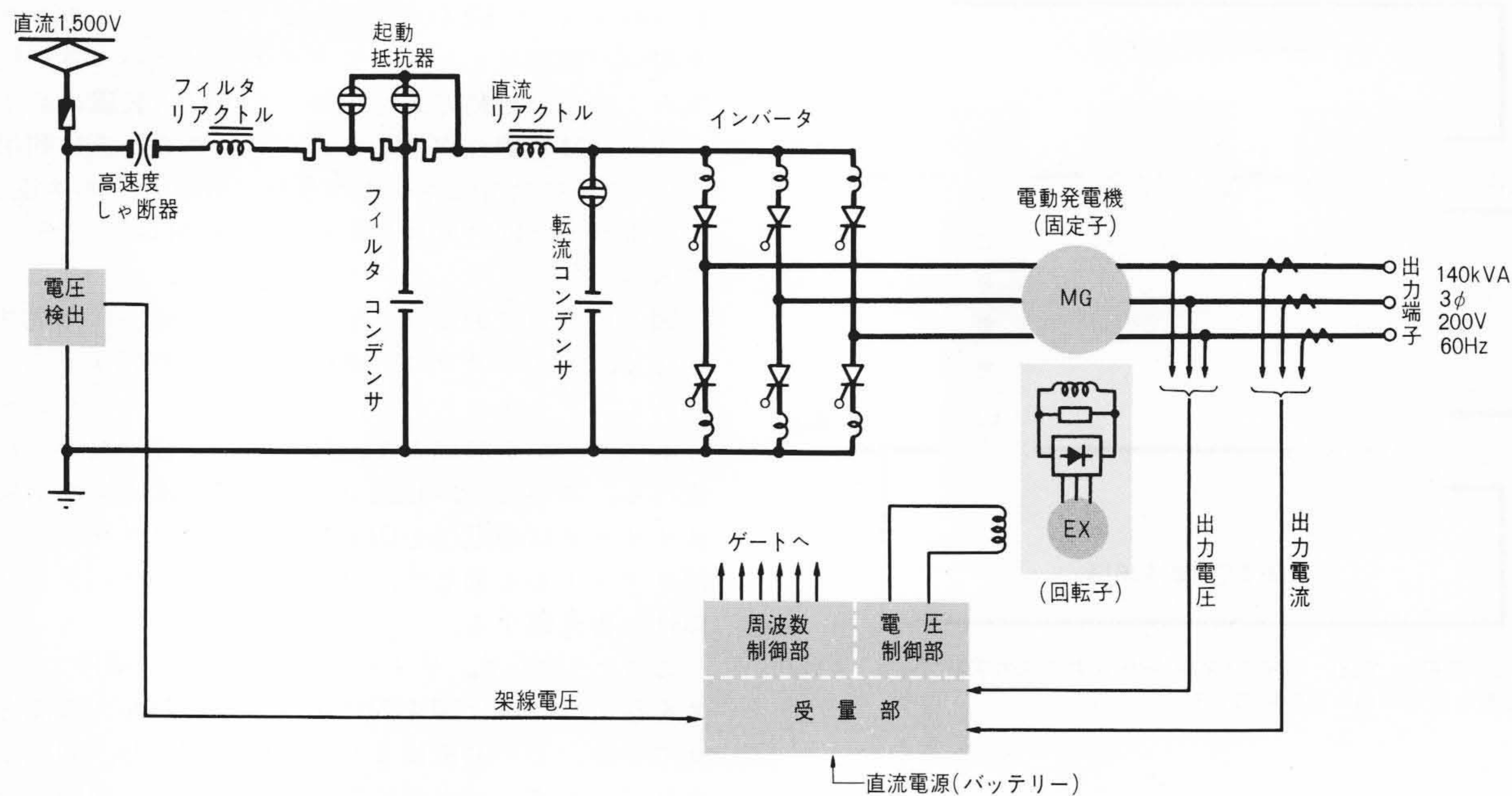


図5 140kVAサイリスタMG回路構成 MGは、励磁機を設け、完全ブラシレス化している。直流側にはフィルタを設けて、誘導障害防止に万全を図っている。

表2 サイリスタMG仕様 電車4両分の冷房装置他の補機類の電力をまかなえる容量をもっている。

項目		仕様
方式	電動発電機 (MG)	電機子巻線共通鉄心形 回転界磁共通形 ブラシレス励磁機付
	インバータ	三相ブリッジ形他励インバータ パルス電流非同期起動方式
定格	入力	DC 1,500V, 100A
	出力	AC 3φ, 140kVA, 力率0.9 線間電圧200V, 線電流404A
	回転数	1,800rpm
入力電圧許容範囲		熱的連続許容範囲 1,350~1,800V
		特性保証範囲 1,000~1,650V
		動作保証範囲 900~1,800V
出力変動範囲		電圧 +5~-10%
		周波数 +5~-10%

- (4) 短時間の停電に対しては、なんら対策を必要としないが、0.5秒以上の停電に対しては、停電時の電圧・周波数の低下に応じて必要最小限の時間で再復帰できるよう、自動的に起動シーケンスの前段を省略し、サービス低下時間を最小にする再起動方式をとっている。
- (5) 周波数制御系故障などの原因による過速度に対しては、実績のある遠心力形過速度検出器を備え、万全を期している。もちろん、過電圧や過電流に対しても電源を速やかにしゃ断して、負荷及びサイリスタ装置を保護する機能をもたせている。
- (6) サイリスタMGは、主回路チョップと異なり直流入力電流が連続的であるため高調波は少ないが、従来形DCMGに比べると高調波が多い。万全を期するため電源にL-Cフィルタを設けている。

4.2 ブラシレス サイリスタMG

- 図6にブラシレス サイリスタMGの概略構造を示す。
- 完全ブラシレスとするために、同一軸上に励磁機として回転電機子形の三相交流発電機を設けている。励磁機固定子側の界磁コイルを外部から励磁し、回転子側の電機子出力を軸端に設けた回転整流装置により直流に変換し、MG本体の回転界磁コイルに給電する。以下、各部の構造上の特長について述べる。
- (1) ダンパ巻線は、ダンパ巻線始動サイリスタ モータの転流リアクタンスを低減するために、通常の交流発電機のダンパ巻線より強化してある。
- (2) 固定子の電機子巻線は電圧比の関係と架線からサイリスタMGの負荷となる補機を絶縁するために、M巻線、G巻線をそれぞれ別々に設け、更に波形改善についても考慮している。
- (3) 回転整流装置は、励磁機の利用率を向上させるために三相全波整流式とした。整流装置は、軸端外部に覆いを設けて取り付け、塵埃の侵入を防いでいる。また、整流素子の保護のため、主界磁と並列にコンパクトな回転形放電抵抗を設けている。
- (4) サイリスタMGは従来形のDCMGと異なり、定期的にブラシ、ブラシ保持器、整流子、スリップリングなどを点検、手入れする必要がない。保守を要する軸受部とフィルタについても、2年に1回程度の間隔給油だけで約6年間無分解で利用できる日立L-PACK式軸受、及び保守が容易な重力式フィルタを採用し、徹底した無保守化を図った。
- (5) 絶縁は、すべての巻線にF種ハイパクト絶縁を採用し、高信頼度化を図った。

図7に140kVAサイリスタMGの外形を示す。

4.3 制御装置

制御装置は、サイリスタ及び周波数・電圧制御部を収納したサイリスタ装置並びにしゃ断器や電磁接触器などを収納した起動装置、抵抗器及びフィルタ装置より成る。

主要部であるサイリスタ装置は、一般電動力応用に多量に

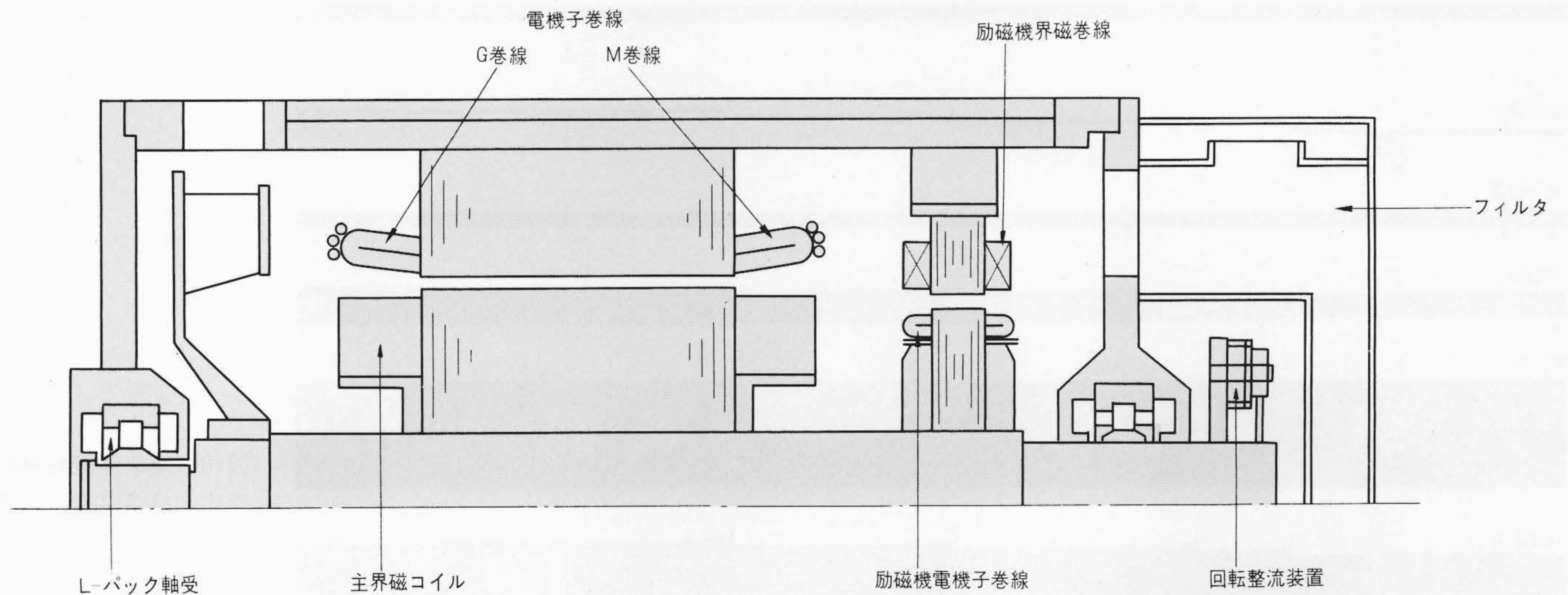


図6 サイリスタMG構造図 完全ブラシレスとするために、励磁機と回転整流装置を設けている。

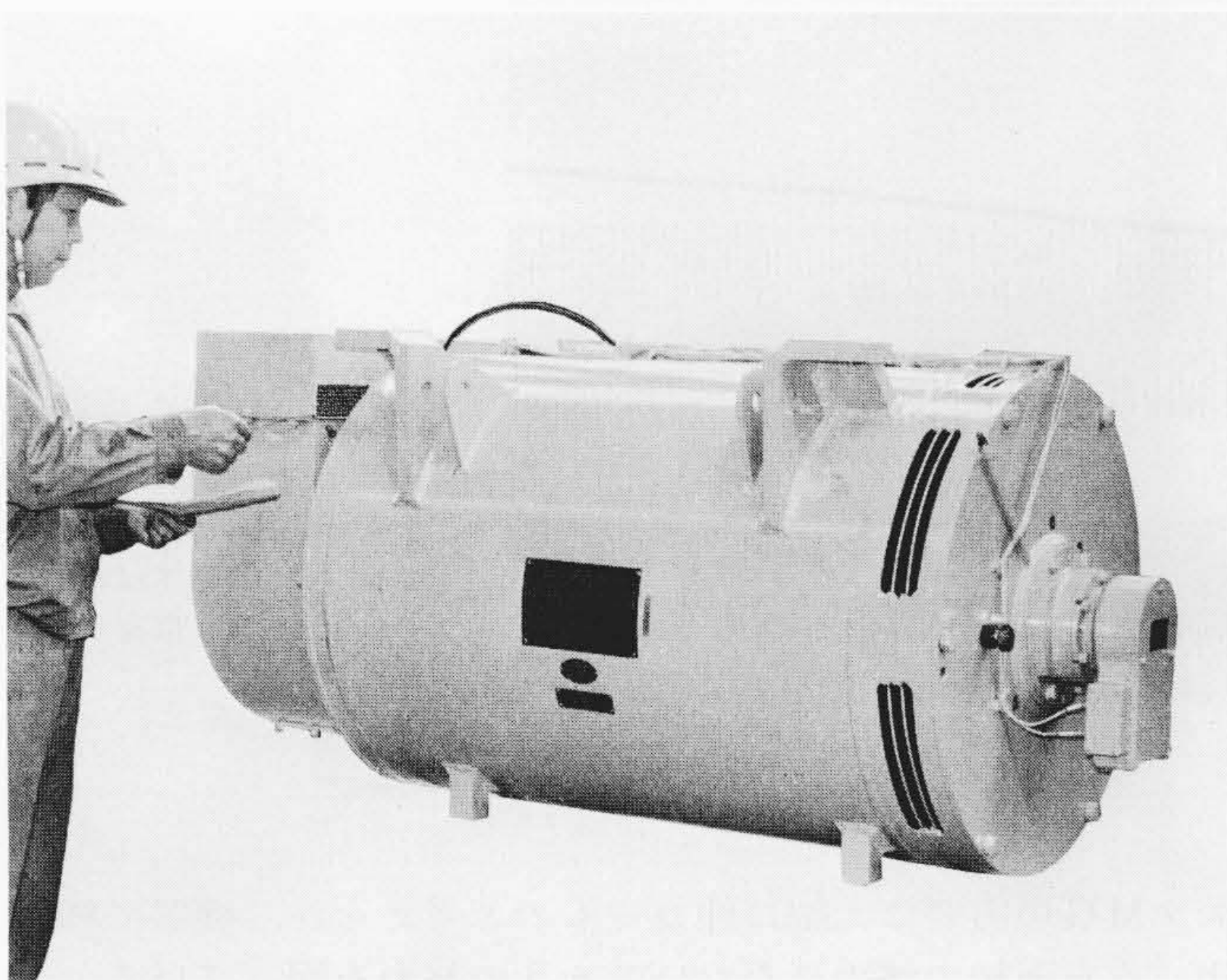


図7 電動発電機(MG) 従来形に比べて、軸方向長さ、重量とも大幅に小形化された。

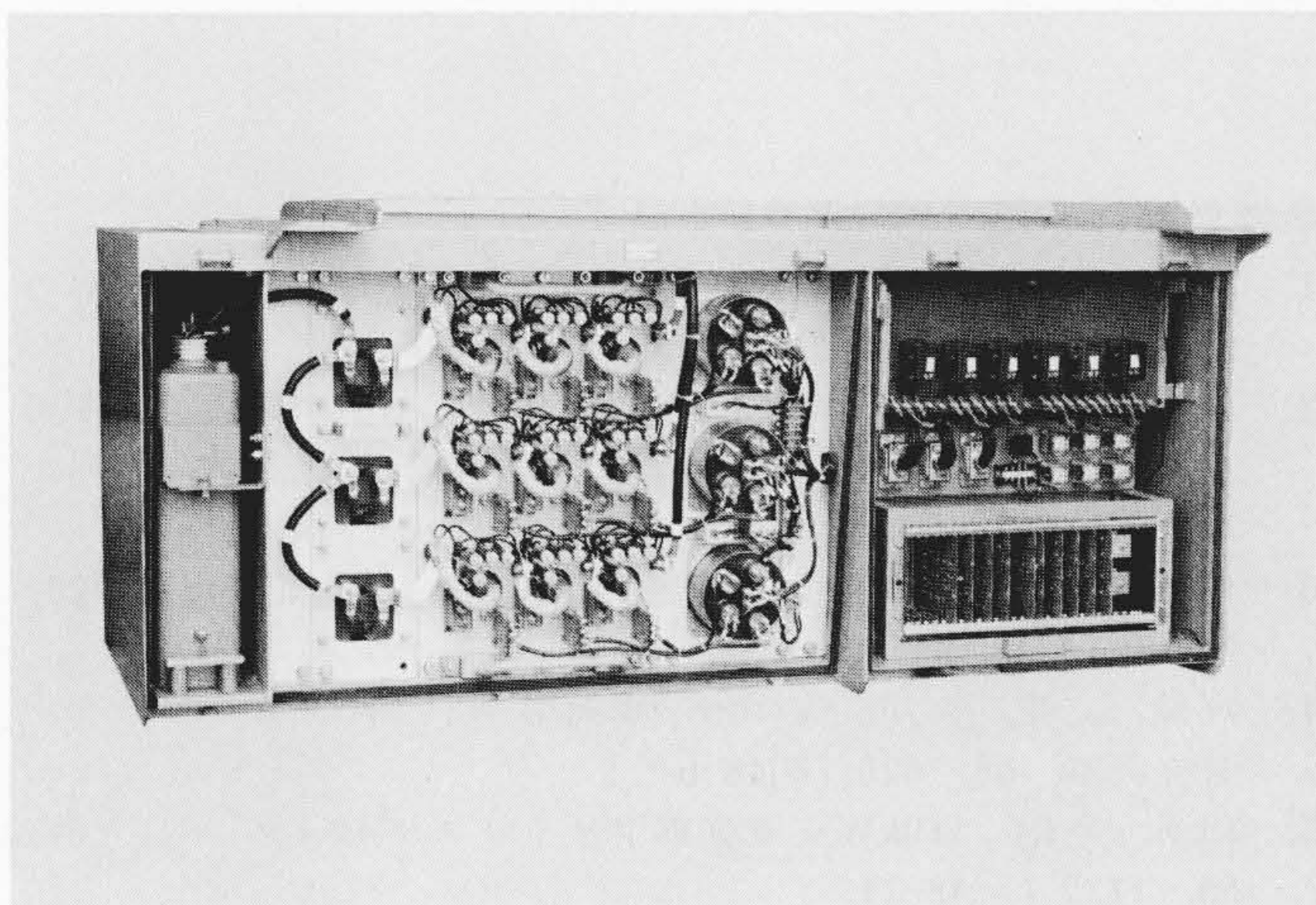


図8 サイリスタ装置 サイリスタは自然冷却ヒートシンクに、外側両面から取り付けられており、点検が容易な構造としている。

使用されて実績の多い日立形式CJ02Pのスタッド形サイリスタ素子を使用している。サイリスタは、自然冷却ヒートシンクに外側両面から取り付けられており、点検を容易にしている。図8にその外観を示す。

フィルタ箱に収納されている平滑リアクトル、フィルタリアクトルはいずれも外部に対するノイズ影響の少ないクローズドコアタイプとしている。

4.4 現車試験

相模鉄道株式会社の好意により、プロトタイプを現車に搭載して冷房装置や車内燈ほかの実負荷試験、及び信号・通信系に対する誘導障害試験を実施する機会を与えられた。

(1) 実負荷試験

起動、再起動、負荷投入しや断、停電再加圧など、あらゆる条件の試験を実施したが、サイリスタMG装置は極めて安定な運転特性を示した。図9に示すように、出力電圧波形は転流時に若干の電圧変化が見られるが、比較的きれいな正弦

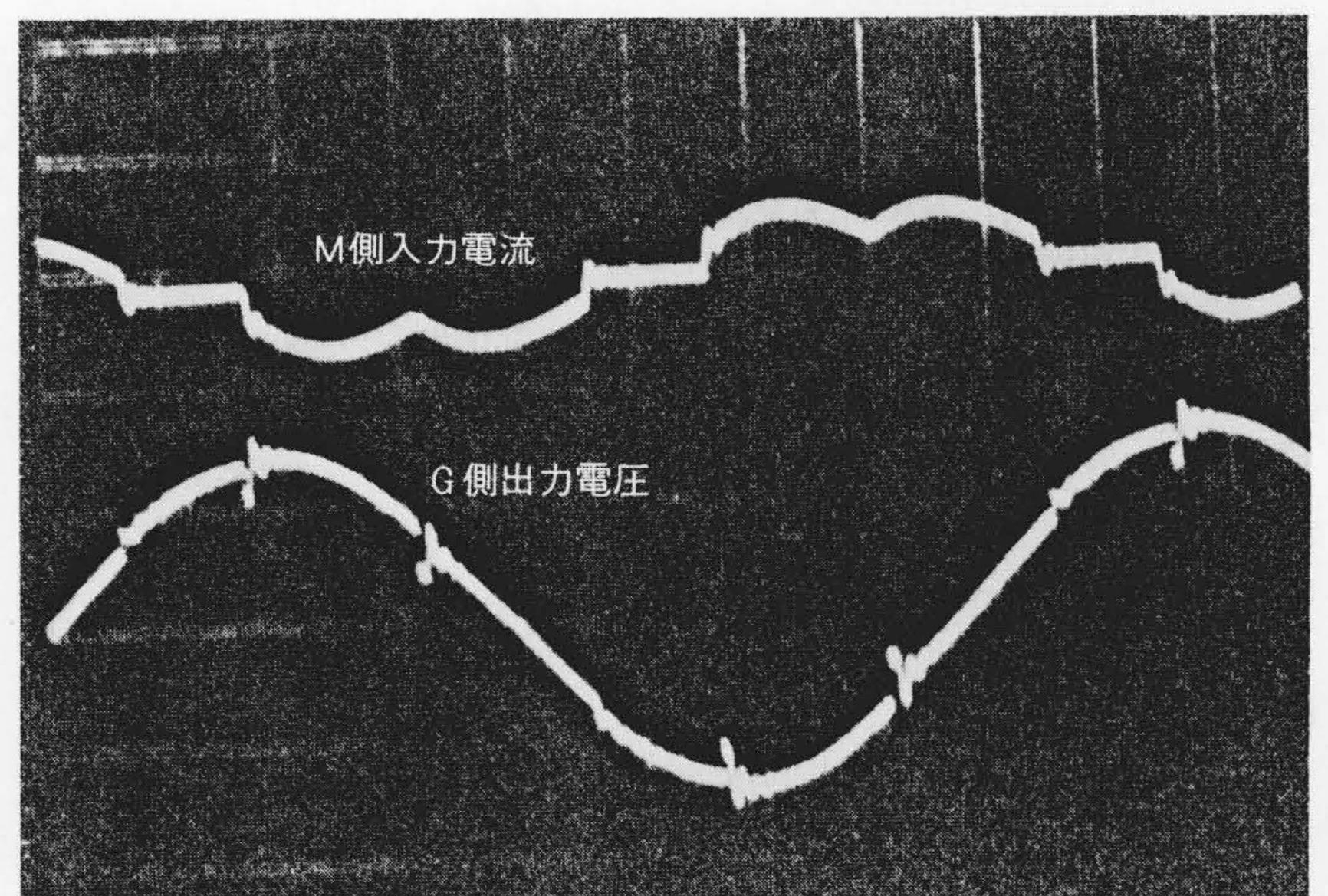


図9 出力電圧波形(全負荷時) 転流時に若干凹凸が生ずるが、比較的きれいな正弦波形となっている。

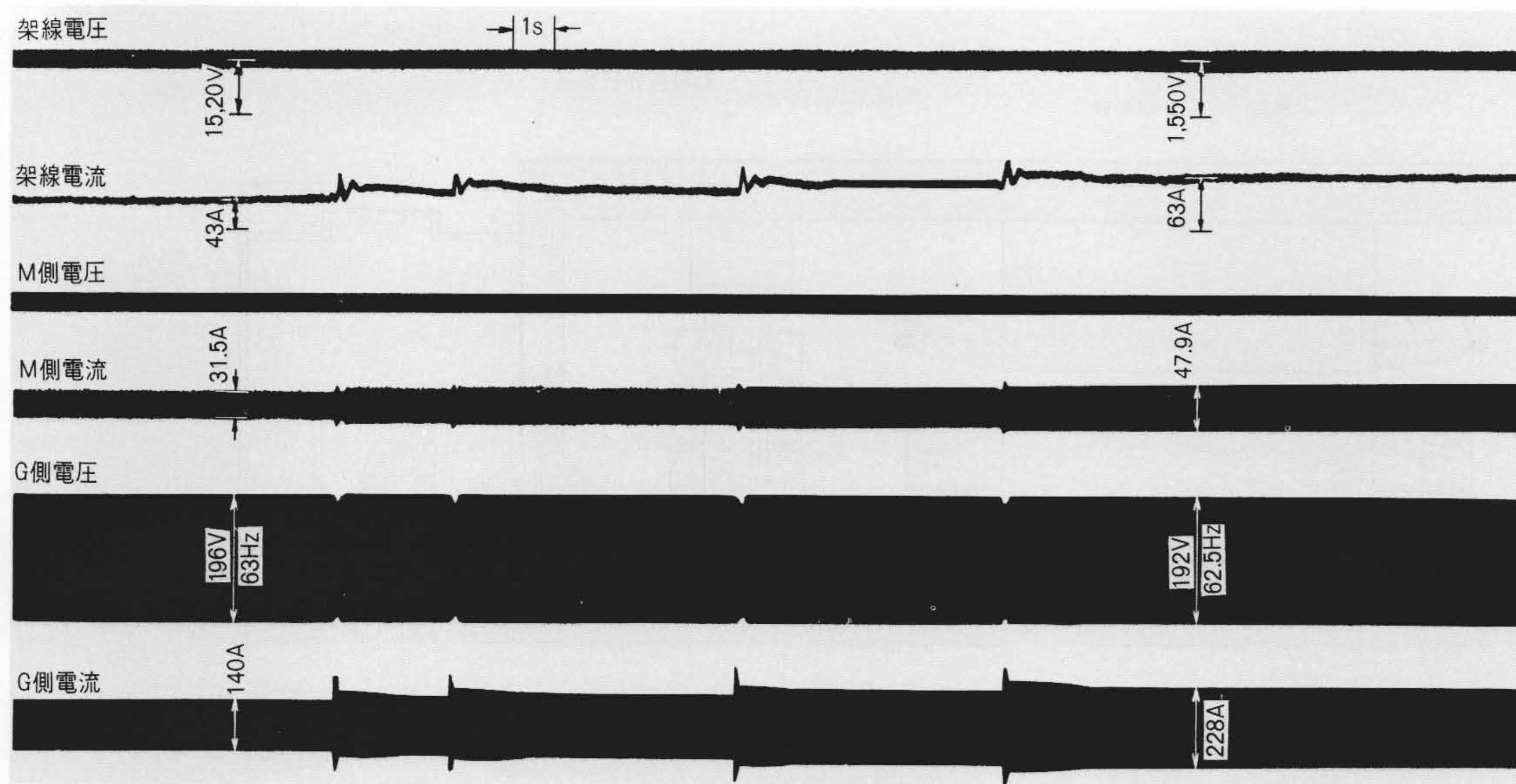


図10 冷房装置起動時のオシログラム G側出力電圧は非常に安定しており、けい光燈のちらつきなどの悪影響は生じなかった。

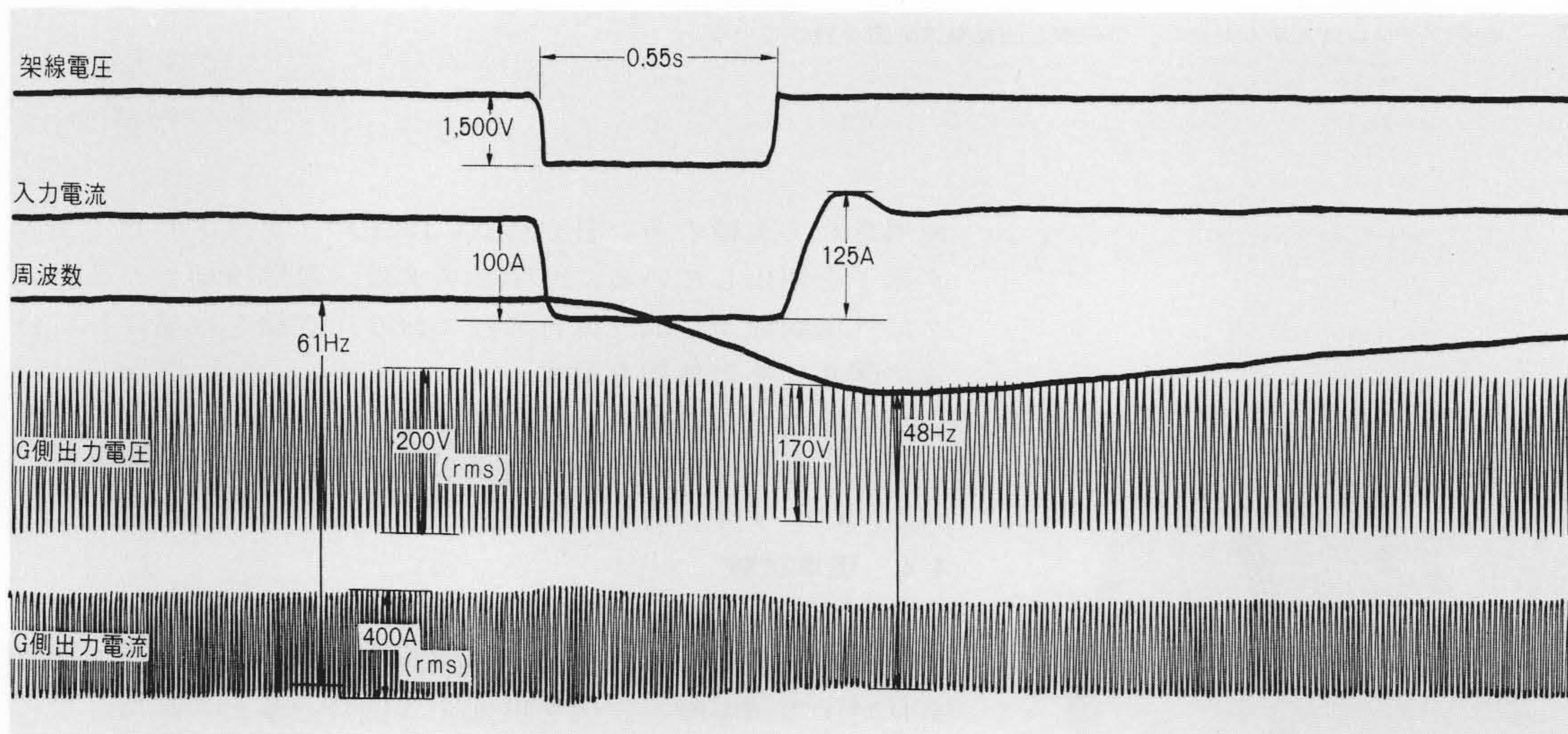


図11 停電再加圧時のオシログラム 全負荷状態で0.55秒の停電があっても、出力の低下はわずかで、安定に回復している。

波となっている。

図10は冷房装置投入時のオシログラムで、投入時の出力電圧は非常に安定しており、けい光燈のちらつきなどの悪影響は全くないことが分かる。図11は停電再加圧時のオシログラムで、出力電圧が中断することなく安定に動作していることが分かる。

(2) 誘導障害試験

信号保安装置、踏切保安装置などに使用される商用周波及び可聴周波軌道回路、列車自動停止装置(ATS)、ループ誘導線を使う列車選別装置、誘導無線装置などに対する誘導障害試験を実施した。

レール折損やインピーダンス ボンドの片側断線を想定した最悪条件の試験でも、いずれの保安装置も現用のDCMGと同程度のノイズ レベルであることが確かめられた。

5 結 言

以上、今回相模鉄道株式会社へ納入した、140kVA ブラシレス サイリスタMGの概要と、現車試験の結果について述べた。

今後、車両の冷房化は急速に進む傾向にあり、従来形のMGに比べて、大幅な保守の省力化を達成するブラシレス サイリ

スタMGの需要は大幅に伸びるものと考えられ、機器の軽量化、占有面積の減少になおいっそうの努力を図っている。

最後に、ブラシレス サイリスタMGの開発に際し、御指導及び現車試験に御援助をいただいた相模鉄道株式会社の関係各位に対し、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) 高橋、立花、河井、佐々木「車両用サイリスタモータ」 日立評論 55, 625 (昭48-6)
- (5) 田所、高橋「110kW交流電車で用サイリスタモータ」 日立評論 55, 1125 (昭48-11)
- (6) 棚町、坪井「直流電源サイリスタモータの起動方式」 昭49電学会全国大会No. 525