

# 713系交流回生ブレーキ付電車の位相制御方式

## Phase Control System of 713 Series AC Electric Cars with Regenerative Brake

日本国有鉄道は交流電化区間のローカル線輸送の合理化を図るため、1M2Tを基本編成とする713系近郊形交流電車を開発し、昭和58年7月九州の南福岡電車区へ投入した。この713系近郊形交流電車は、抑速及び停止用に交流回生ブレーキが採用された我が国で最初の電車である。日立製作所はこの電車の制御の中心となる主整流装置を設計し、製作、納入した。

電気品の小形・軽量化と経済性を図るため、他励制御を採用し、高調波電流の低減を図るため直流電圧波形を改善したサイリスタ位相制御のほか、架線電圧急昇時の電機子電流の増大を抑制するため、架線電圧対応形の位相制御方式を採用し、1M方式の電車を完成させることができた。この電車は、昨秋行なわれた車両性能試験でその基本性能が確認された。

野崎吉雄\*      Yoshio Nozaki  
川上哲也\*\*    Tetsuya Kawakami  
田村 薫\*\*\*    Kaoru Tamura

### 1 緒 言

今回投入された713系電車は1M1T<sup>\*1)</sup>が4編成の合計8両であるが、設計的には1M2Tを基本編成とし、25%こう配線区の運転が可能となっている。

国内での交流回生ブレーキ付車両としては、昭和43年に製作されたED78形<sup>1)</sup>、EF71形交流機関車があるが、下りこう配での抑速ブレーキ専用に使われており、回生電力も小さく、手動ノッチのものであった。今回、電車に交流回生ブレーキを適用するに際して、新たに停止ブレーキ機能の追加、電動機電圧の自動進段、回生ブレーキ速度領域の拡大、高調波電流の低減及び電気品の小形・軽量化、低廉化などの課題

があった。本稿では713系電車の制御面での計画設計全般、本線走行の現車試験結果などについて述べる。

### 2 電車の主要諸元及び特長

図1に電車の外観を、表1に電車の主要諸元を示す。この電車の特長は次に述べるとおりである。

- 25%こう配線区を1M2Tで運転可能である。
- 基本編成だけの走行時に走行不能の機会を減らすため、4電動機中2電動機開放が可能である。ただし、電動機開放とこう配起動の条件は次に述べるとおりとした。
  - 1M1Tで2電動機開放時、定員乗車で25%こう配起動が可能である。
  - 1M2Tで2電動機開放時、空車でも25%こう配起動はできなくても良しとする。
- 交流回生ブレーキによる抑速及び停止ブレーキを採用している(当初発電ブレーキ車についても検討を行なったが、ブレーキ抵抗器の容量が大きく1M電車としてぎ装的に成立

表1 713系電車の主要諸元      今回先行試作車として製作された1M1Tの主要諸元を示す。

| No. | 項 目       | 諸 元                |
|-----|-----------|--------------------|
| 1   | 用 途       | 通勤・近郊用             |
| 2   | 電 気 方 式   | AC20kV, 60Hz       |
| 3   | 適 用 線 区   | 九州(鹿児島, 日豊, 長崎本線)  |
| 4   | 基 本 編 成   | 1M2T(今回製作分は1M1T)   |
| 5   | 車 輪 径     | 860mm(計算820mm)     |
| 6   | 歯 数 比     | 6.07               |
| 7   | 定 格 出 力   | 600kW(150kW電動機×4台) |
| 8   | 定 格 引 張 力 | 3,800kg            |
| 9   | 定 格 速 度   | 55km/h             |
| 10  | 最 高 速 度   | 100km/h            |



図1 713系近郊形交流電車      鹿児島本線に投入された我が国で最初の交流回生ブレーキ付電車を示す。

※1) Mは電動車を、Tは付随車を示す。1M1Tとは、電動車1両と付随車1両が連結したものを運用単位とすることを意味する。

しないことが分かったため、回生ブレーキの採用となったものである。

(4) 主電動機は直流直巻電動機として設計された標準形のMT61を使用し、界磁は力行時、回生ブレーキ時とも、他励制御を行なっている。

(5) 停止ブレーキは電空演算方式である。抑速ブレーキは回生ブレーキだけで制御される(抑速条件は1M1T, 1M2Tとも定員荷重, -25%で65km/hが得られること)。

### 3 ノッチ曲線

図2に力行ノッチ曲線を、表2に力行ノッチと制御位相角を、図3に停止回生ブレーキノッチ曲線を、図4に1M1T時の抑速ブレーキノッチ曲線をそれぞれ示す。

### 4 主回路方式

図5に本電車の主回路簡略つなぎを示す。主な特長は次に述べるとおりである。

- (1) 主変圧器二次側は4等分割され位相制御による高調波電流の低減、力率の向上が図られている。
- (2) 4段直列のサイリスタブリッジは力行時順変換を行ない、回生ブレーキ時逆変換(インバータ運転)を行なう。
- (3) 力行時、ブレーキ時とも他励制御を採用し、主回路スイッチの省略及び力行弱界磁制御機器の省略を図った。他励制御は空転時の再粘着にも有利である。
- (4) 電機子回路は4台の電機子を永久直列接続にすることに

表2 主幹制御器の力行ノッチと制御位相角 止めノッチ運転(フリーラン)は、すべて所定の制御段の制御位相角を0度(全開)としている。

| ノッチ | 界磁率 (%) | 制御位相角 (度)  |            |            |            |
|-----|---------|------------|------------|------------|------------|
|     |         | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $\alpha_3$ | $\alpha_4$ |
| 1N  | 100     | 0          | 180        | 180        | 180        |
| 2N  | 100     | 0          | 0          | 180        | 180        |
| 3N  | 100     | 0          | 0          | 0          | 180        |
| 4N  | 100     | 0          | 0          | 0          | 0          |
| 5N  | 70      | 0          | 0          | 0          | 0          |

より、回生ブレーキ時の主電動機並列回路間の電流アンバランスの問題をなくしたほか、断流器が1台で済むなど主回路構成の簡素化を図った。

(5) 界磁電源回路については、経済性に優れていることから、混合ブリッジを採用した。

(6) 回生ブレーキ時、サイリスタ転流失敗時の過電流抑制、架線電圧急変時の電流増加の抑制を目的として、安定抵抗0.5Ωを挿入した。

(7) 2電動機開放の力行運転時、4段ブリッジのうち2段だけが直流出力電圧を出すようにした。

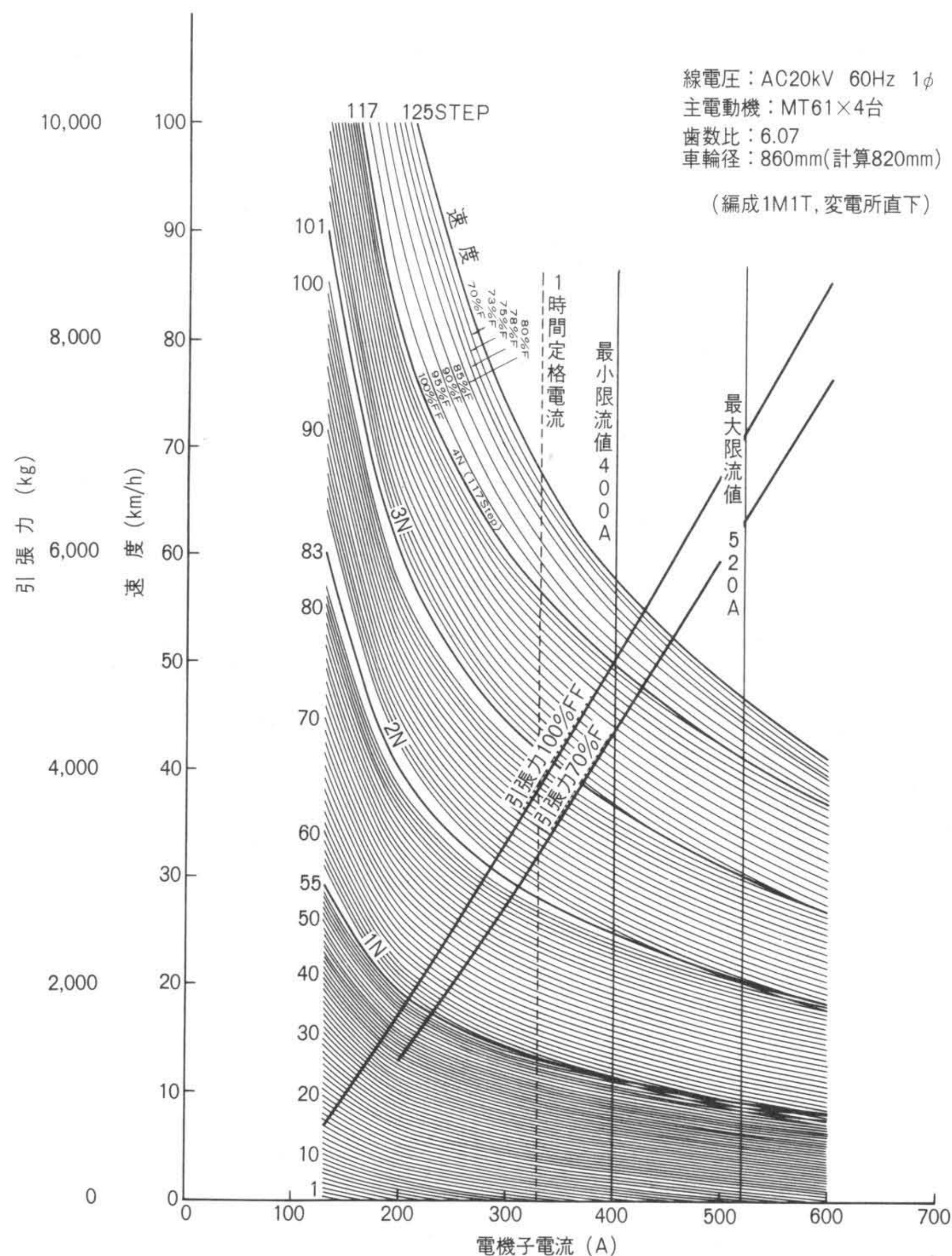


図2 713系電車力行ノッチ曲線 全界磁は117, 弱界磁は8合計125の位相ステップを設け、カウンタを使用してデジタル的に制御される。

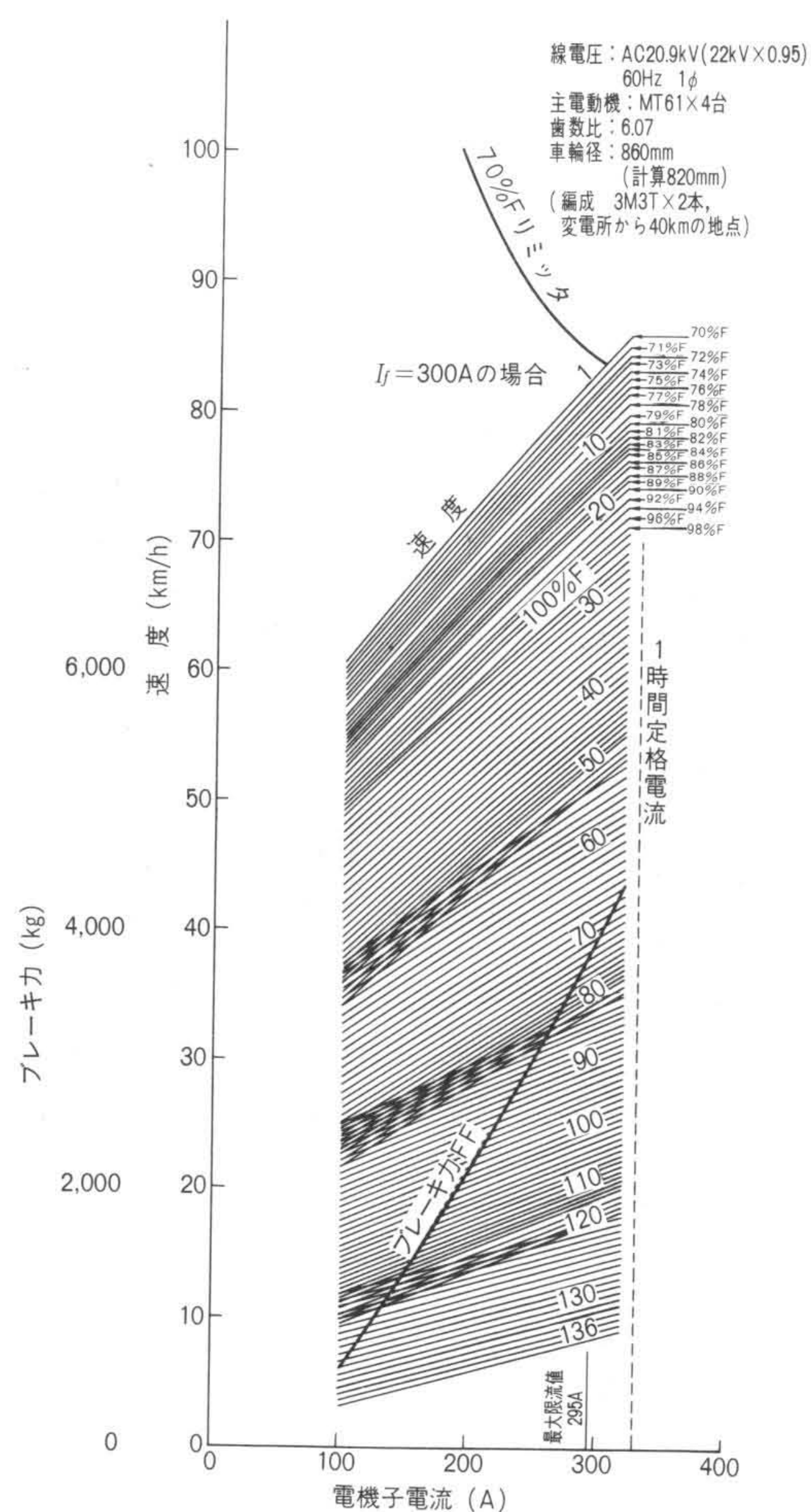


図3 停止ブレーキノッチ曲線 全界磁で111, 弱界磁で25合計136の位相ステップを設け、デジタル的に制御される。

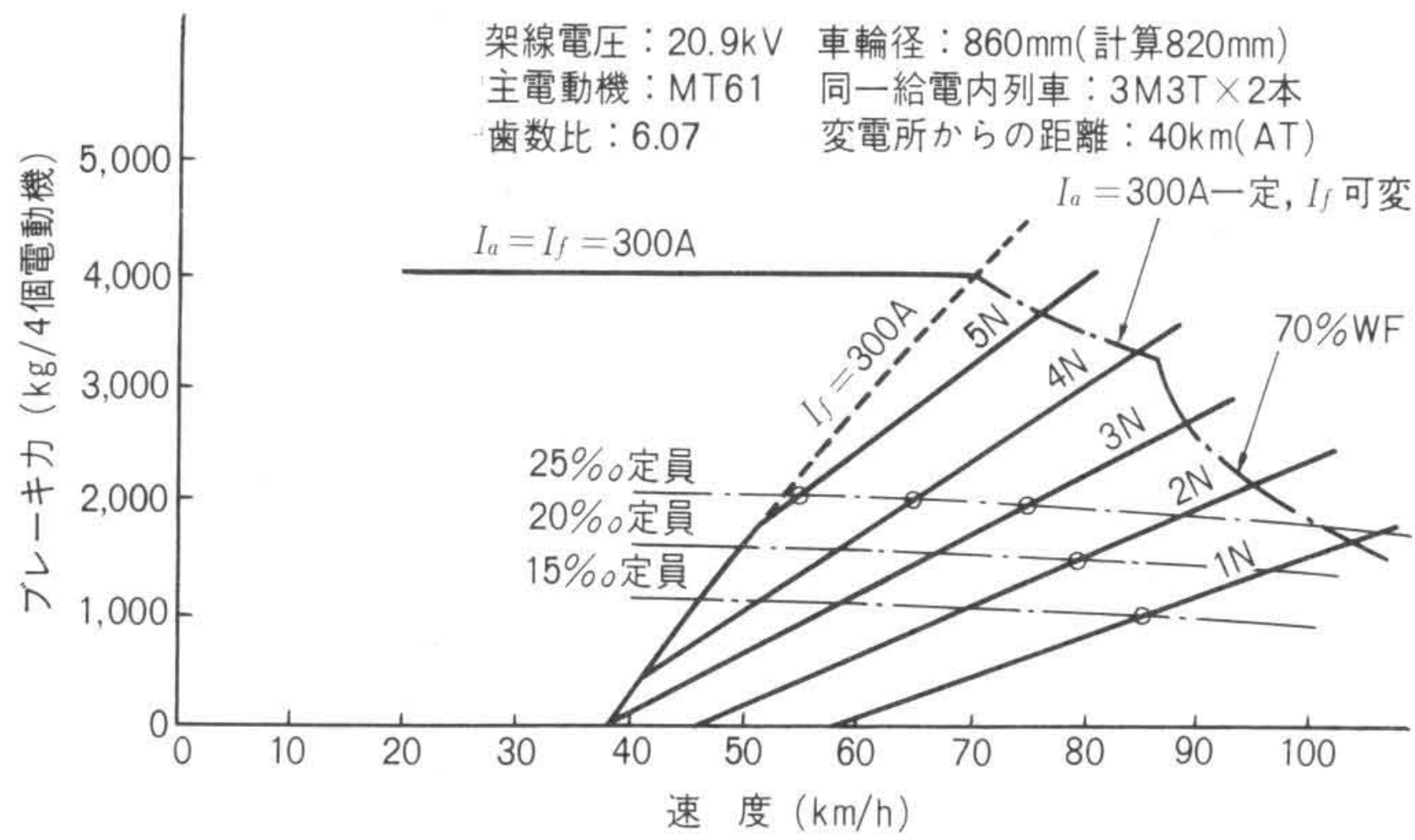


図4 抑速回生ブレーキノッチ曲線(IMIT時) 図中○印がこう配・荷重条件に対する目標速度を示す。ノッチ曲線のブレーキ-速度特性の傾きは、発電ブレーキ車の特性に近似させてある。

## 5 位相制御方式

交流回生ブレーキ付電車の実用化のため、この電車の位相制御には次に示すような新しい方式が採用されている。図6に位相制御ブロック図を示す。主な特長は次に述べる通りである<sup>2),3)</sup>。

### (1) サイリスタ純ブリッジの2アームダイオード的制御

ED78形では位相制御されないサイリスタブリッジ(直流出力電圧を出さなくてもよいサイリスタブリッジ)も最小制御進み角 $\beta_{min}$ で点弧されているために、交流電流波形ひずみが大き

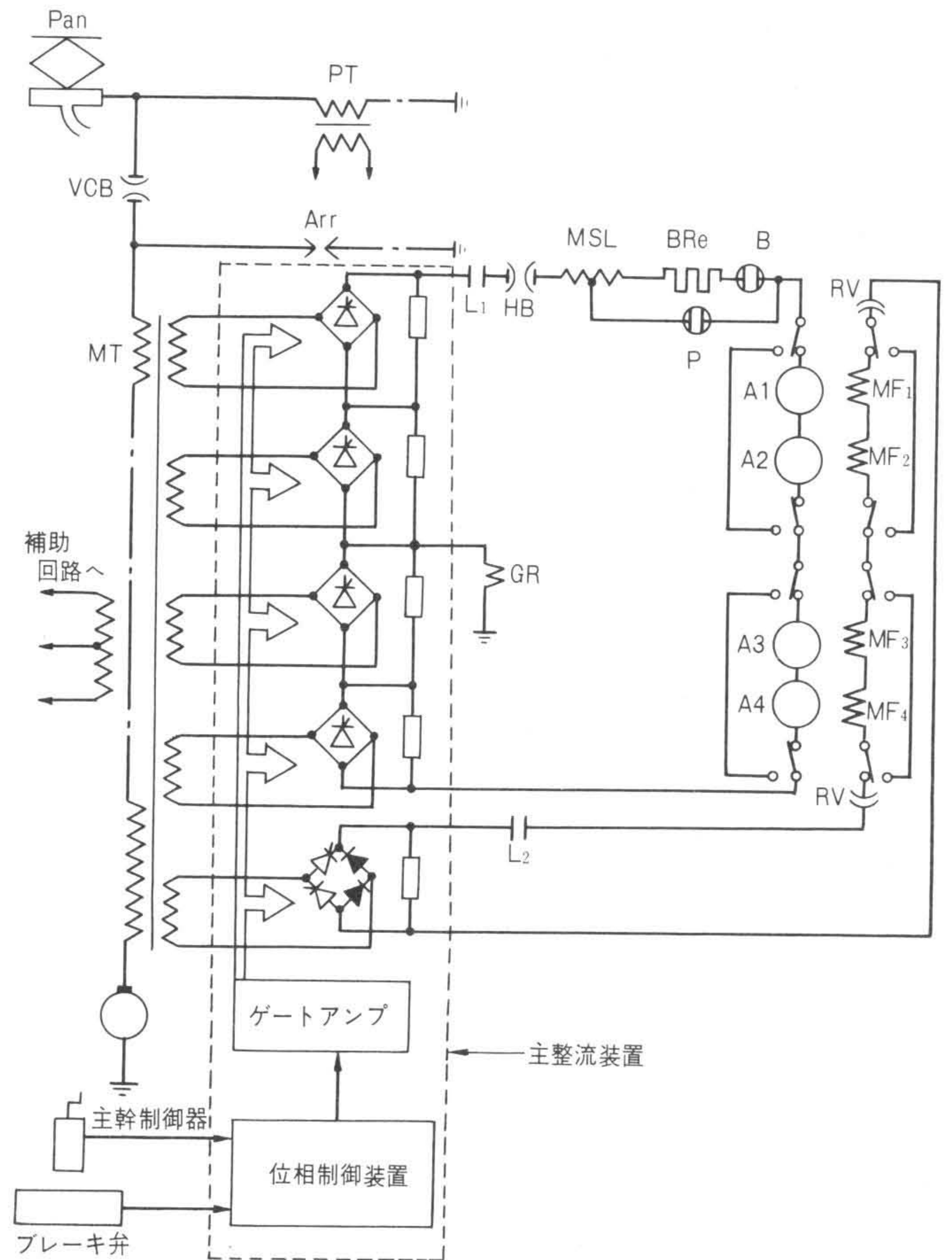


図5 713系電車主回路簡略つなぎ 主整流装置は力行時順変換作用を、回生ブレーキ時逆変換作用を行なう。また主電動機は力行、回生ブレーキ時とも他励で制御される。

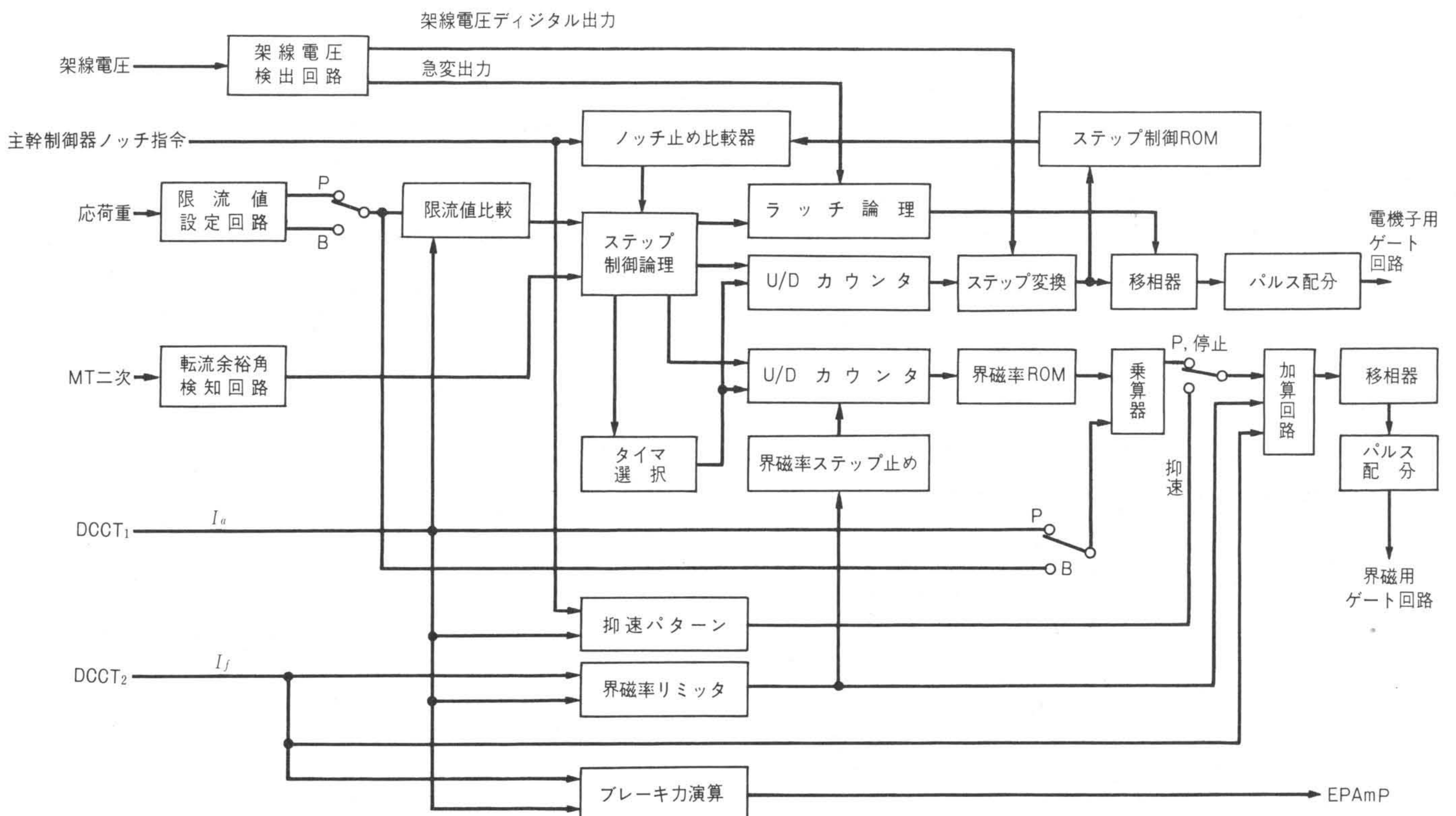


図6 位相制御ブロック図 ステップに対応した制御位相角があらかじめ定められ、カウンタを用いてそのステップを進めたり、戻したりして制御されるステップ位相制御方式が採用されている。限流値進段時は、ステップ進めだけが指令される。

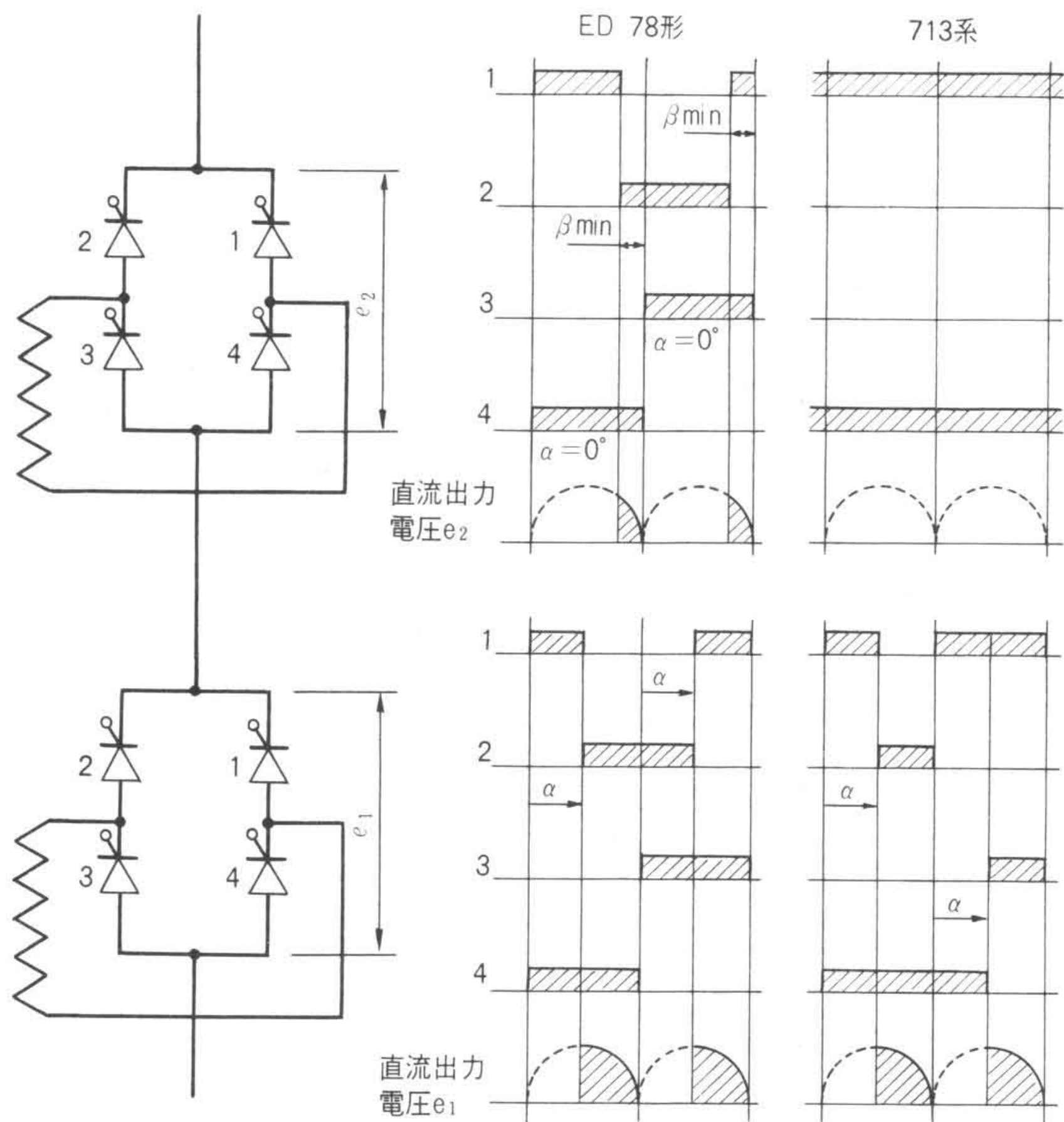


図7 サイリスタブリッジのダイオード的制御 ED78形の場合、ゲートパルス幅は180度であるが、713系電車の場合、直流出力電圧を出さないブリッジの直流側2アームは、360度通流のダイオード的制御を行なう。

く高調波電流を多く含む制御となっている。この電車では、位相制御しないサイリスタブリッジは直流側片側2アームをダイオード的に360度通流で使用するにより、交流電流の波形ひずみを抑制し、従来に比べて誘導障害軽減形の制御としている。図7にED78形と713系電車のゲートパルスと電圧波形を示し、図8に $J_p$ 計算値をED78形と比較して示す。

## (2) ステップ式位相制御と限流値比較による自動進段

電機子電流制御方式としては、従来多用されている連続位相制御(定電流制御)ではなく、あらかじめ位相角を決めたステップを設けておき、これを限流値に従ってデジタル的に制御するステップ式位相制御を採用した。この方式を採用した主な理由は、次項で述べる架線電圧急昇時の位相角絞りの制御にはフィードフォワード制御が比較的容易にでき、応答性の面で優れていると考えたためである。なお、界磁電流制御は、力行時の特性領域での電流制御、回生ブレーキ時の弱界磁制御をスムーズにするために連続位相制御方式を採用した。

## (3) 架線電圧に対応した位相ステップで制御

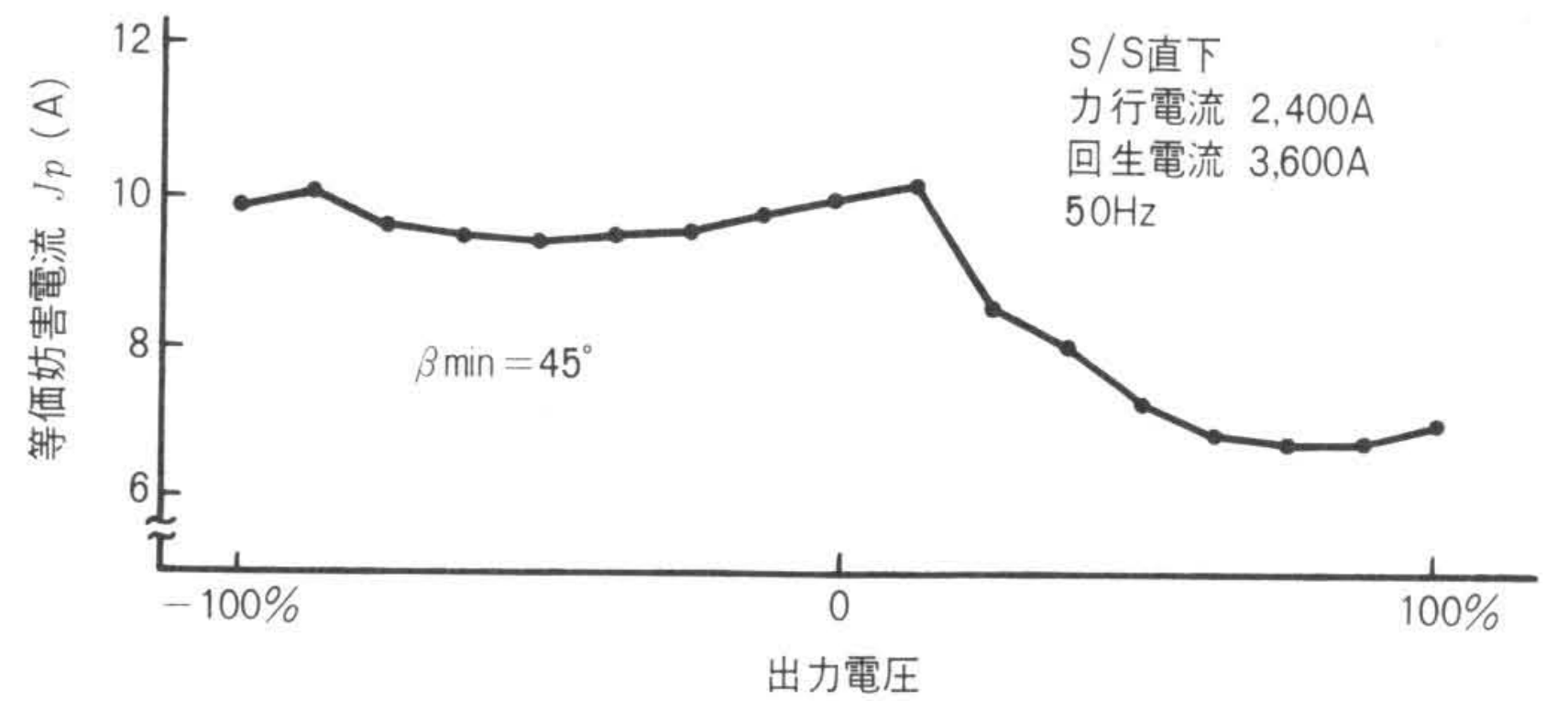
713系電車は前述のように、力行時も他励で制御しているため、架線電圧急変時(特に電圧急昇時)、電機子電流の飛び出しが直巻電動機として使用したときよりも大きくなり、整流の悪化が心配された。今回、架線電圧を検出しその大きさに対応した(要するに、直流電圧が極力変わらないような)位相ステップをとらせることにより、電圧急昇時には自動的に位相絞りが作用する方式<sup>2)</sup>とした。

## (4) 力行時は直巻電動機制御

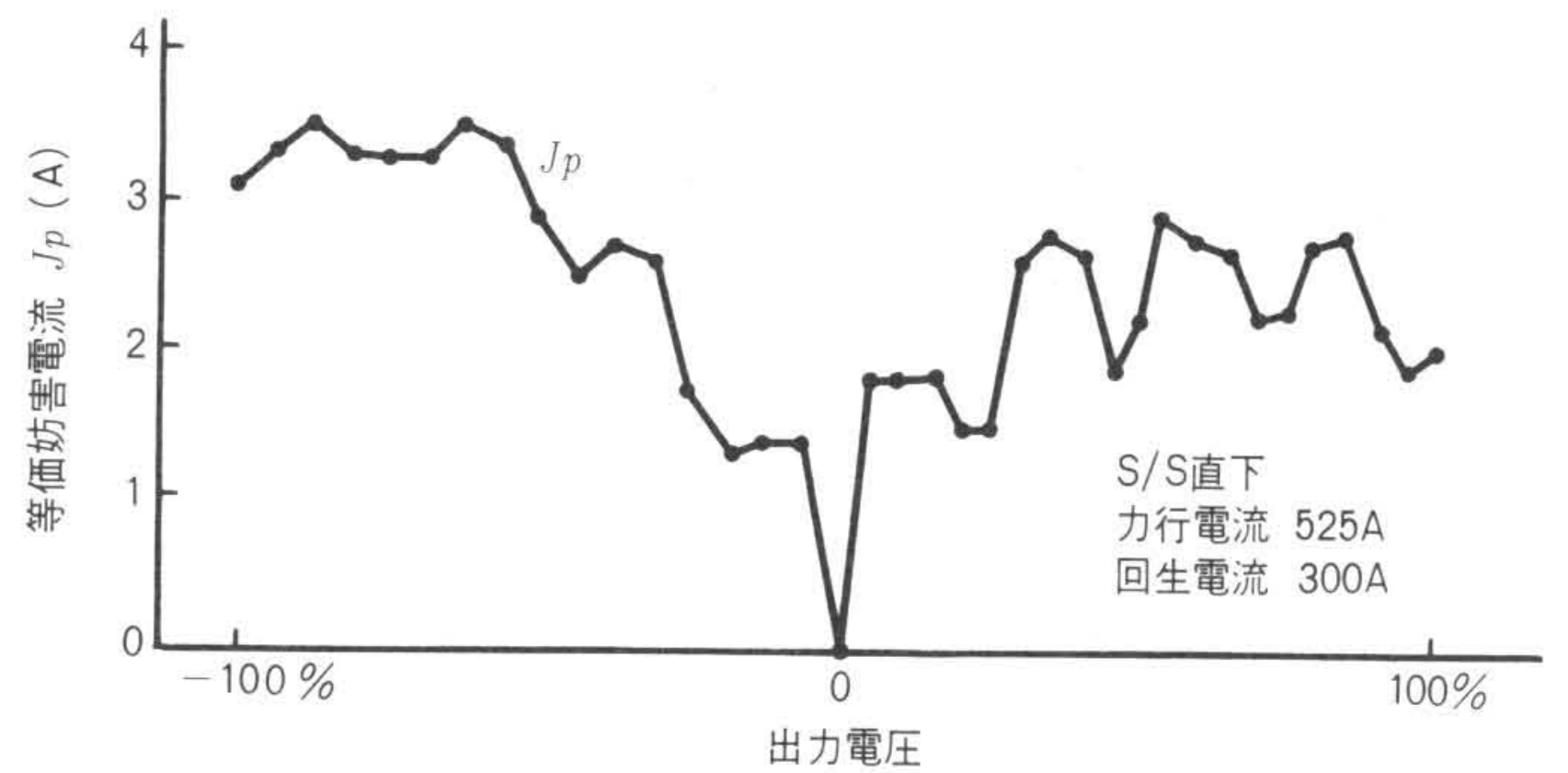
界磁電流は、実電機子電流に界磁率を掛けた値で制御されるようにした。全界磁領域のステップでは、界磁率は1を指令し、弱界磁ステップに進段するとそのステップに応じて界磁率を0.98, 0.96……最弱0.7を指令するようにした。

## (5) 停止用回生ブレーキ制御

ブレーキ弁ハンドル角度に対応した限流値(電機子電流)を



(a) ED78形の $J_p$ 計算値



(b) 713系電車の $J_p$ 計算値

図8 ED78形、713系電車の等価妨害電流 $J_p$ の計算値 ED78形に比べて713系電車は、出力電圧の0付近の $J_p$ が大幅に低減している。

指令値として、力行の場合と同様にステップ進段制御を行っている。ただし、高速では最弱界磁70%の制御を行ない、界磁率100%になるとその速度以下では100%Fで制御する全界磁制御とした。なお、電機子電流の断続限界は約120Aと計算されたので、ブレーキ時の最小電機子電流を130Aと設定し、130~295Aの限流値で停止回生ブレーキを制御するようにした。

## (6) 抑速回生ブレーキ制御

制御回路の簡素化を図るため、直流出力電圧(インバータ電圧)は常に最大とし、界磁電流の制御だけで抑速制御を行なうことにした。すなわち、抑速ノッチ指令(1~5N)と実電機子電流により界磁電流の制御パターンを発生し、抑速ノッチに対応して得られる単位速度当たりのブレーキ力変化分(ノッチ曲線の傾き)は在来発電ブレーキ車(カム車)の特性に近づけるようにし、運転扱い上の考慮を払った。

## (7) 転流余裕角検知とステップ戻し

停止回生ブレーキで転流余裕角が設定値(今回20度)よりも小さくなったとき、ステップ戻しと限流値絞りを行ない転流余裕角を回復し、転流失敗を防止するようにした。

## (8) 最小制御進み角 $\beta_{min}$ の設定

最小制御進み角 $\beta_{min}$ の設定は、変電所から40km(AT区間)<sup>※2)</sup>の地点で電動車3両を含む2編成が同時に回生ブレーキをかけたとき所定の回生ブレーキ力を得るという条件で計算し、今回は4段とも53度に設定した。従来走行線区内で最も線路

※2) 電車線路の一定間隔ごとに単巻変圧器(AT: Auto Transformer)をおき、レールに流れる電流を吸い上げて誘導を少なくしている電方式をAT方式といい、AT方式によって給電されている区間をAT区間という。AT方式のほかにBT方式があり、1km当たりのリアクタンスが異なる。

リアクタンスが大きくなる点で $\beta_{min}$ を設定するようにしていたのに対し、今回は抑速ブレーキを回生ブレーキ力だけで得ることに照準を合わせ、設定条件よりも厳しい線路条件での停止ブレーキは前(7)項の転流余裕角検知による電流絞りとし、ブレーキ力不足分は空気ブレーキで補足する方式とした。

#### (9) 空転検知、滑走検知

SIR(空転検知継電器)が動作すると、動作時間中ステップ戻しを行ない、強制的な再粘着制御を行なっている。再粘着すると限流値進段の回路で元の電流値まで回復させている。また、回生ブレーキ中にSIRが動作しても力行時と同じようにステップ戻しを行なっているが、これは強制再粘着制御のためではなく、滑走による電機子電流の減少→位相ステップの過進段→再粘着時の過電流→転流失敗となるのを防止するためである。

#### (10) 回生ブレーキ中の交-交セクション<sup>\*3)</sup>通過

回生ブレーキ中に交-交セクションを通過し架線電圧が消滅すると、逆変換器の転流電源がなくなるため転流失敗が生ずる。したがって、713系電車では、交-交セクションは従来のノッチオフ通過の運転扱いを延長した形で、回生ブレーキ中に交-交セクションに入る場合には、直前に運転台に新設した電気ブレーキ開放スイッチを操作してもらうことにし、空気ブレーキだけで通過するようにした。

#### (11) モニタ機能

電車区又は工場での制御動作確認の便を考慮して、ステップ表示(電機子用ブリッジの位相ステップを3桁の発光ダイオードで表示)、手動進段(任意の位相ステップで停止させることが可能)及びモード表示(制御指令に基づき力行、停止ブレーキ、抑速ブレーキ、電動機開放の4モードを表示)の機能を設けた。

#### (12) デジタル回路にCMOSICを採用

今回、デジタル回路に従来のTTL(Transistor Transistor Logic)ICに比較して消費電力が小さく、ノイズ的に強いCMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)ICを全面的に採用した。

## 6 主整流装置

### 6.1 仕様と特長

主整流装置の仕様を表3に、また、外観を図9に示す。主整流装置の特長は次に述べるとおりである<sup>4)</sup>。

- (1) バイパスアームのサイリスタは360度通流となるため、サイリスタ電流は従来の非対称制御の2倍となるが、図10に示すように360度通流するサイリスタをスタックの両サイドに配置し、冷却効果を挙げるとともに、主電動機を4S1P接続することにより、400Aサイリスタの1S1P接続を可能にしている。
- (2) 主電動機は力行、回生ともに他励制御方式で、励磁用サイリスタ装置も本装置に収納されている。
- (3) サイリスタの逆電圧期間中のゲートパルスを除去するために逆電圧検出装置を設けている。
- (4) ACフィルタに非直線性抵抗素子を採用し、ACフィルタを小形化するとともに、フィルタ回路の電力低減を図っている。また、サージ移行率は90%に抑制している。

※3) 異なる電系統を一緒にすると、位相差により変電所間に横流が流れるので、これを防止するため電系統区分に8m程度の無加圧区間が設けられている。これを交-交セクションという。

表3 主整流装置の仕様 RS48形主整流装置の主な仕様を示す。

| 形 式        | RS48形                                                                  |
|------------|------------------------------------------------------------------------|
| 方 式        | 主回路：サイリスタブリッジ4段直列非対称制御方式                                               |
| 素 子 定 格    | 主サイリスタ：400A, 2,500V<br>界磁サイリスタ：400A, 1,200V<br>界磁シリコン整流素子：800A, 1,200V |
| 素 子 構 成    | 主サイリスタ：1S×1P×4A×4B<br>界磁サイリスタ：1S×1P×2A<br>界磁シリコン整流素子：1S×1P×2A          |
| 周 囲 温 度    | -10～+40℃                                                               |
| 冷却風量及び風圧損失 | 風 量：45m <sup>3</sup> /min<br>風圧損失：110mmAq                              |
| 負 荷 条 件    | 100%連続, 160% 18分                                                       |
| 定 格        | 主 回 路<br>定格直流電流：330A<br>定格直流電圧：2,000V<br>定格出力：660kW                    |
|            | 界磁回路<br>定格直流電流：330A<br>定格直流電圧：37V<br>定格出力：12kW                         |

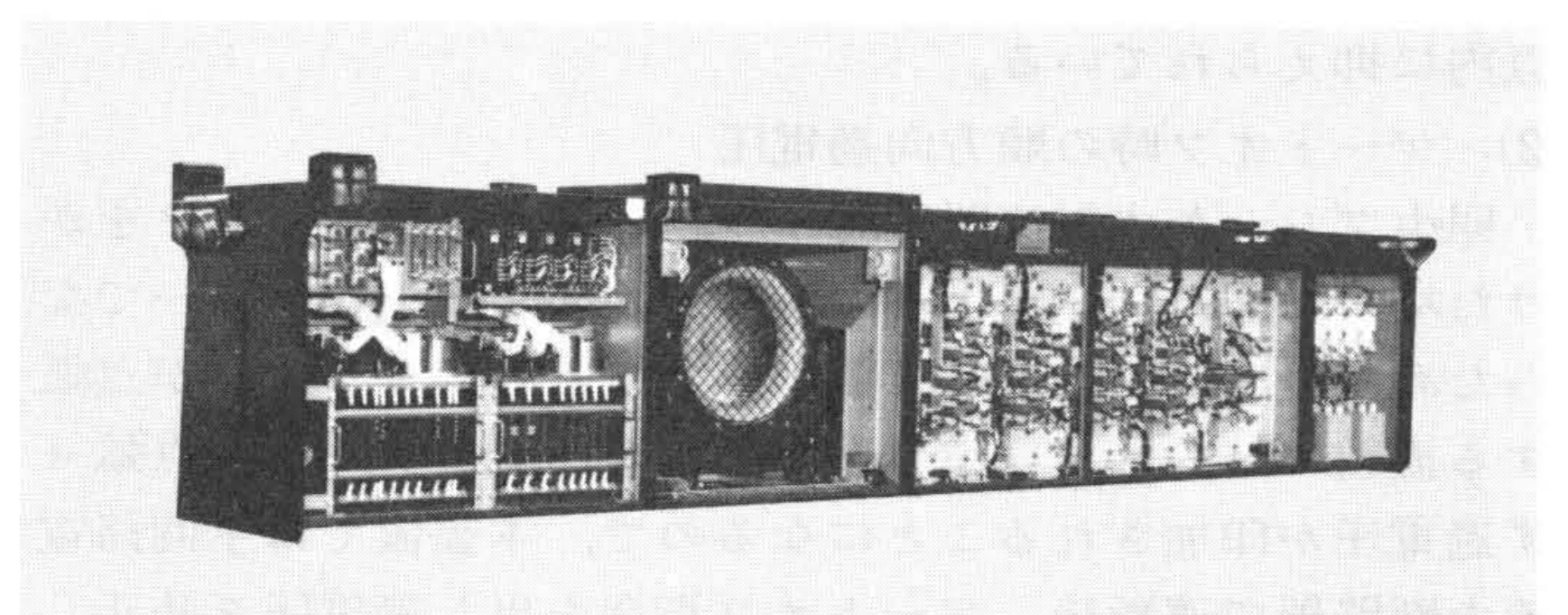


図9 RS48形主整流装置 向かって左から位相制御装置、ゲート制御装置、電動送風機、サイリスタスタックが4本、界磁用スタックが1本、右端にサージ吸収装置が配置されている。

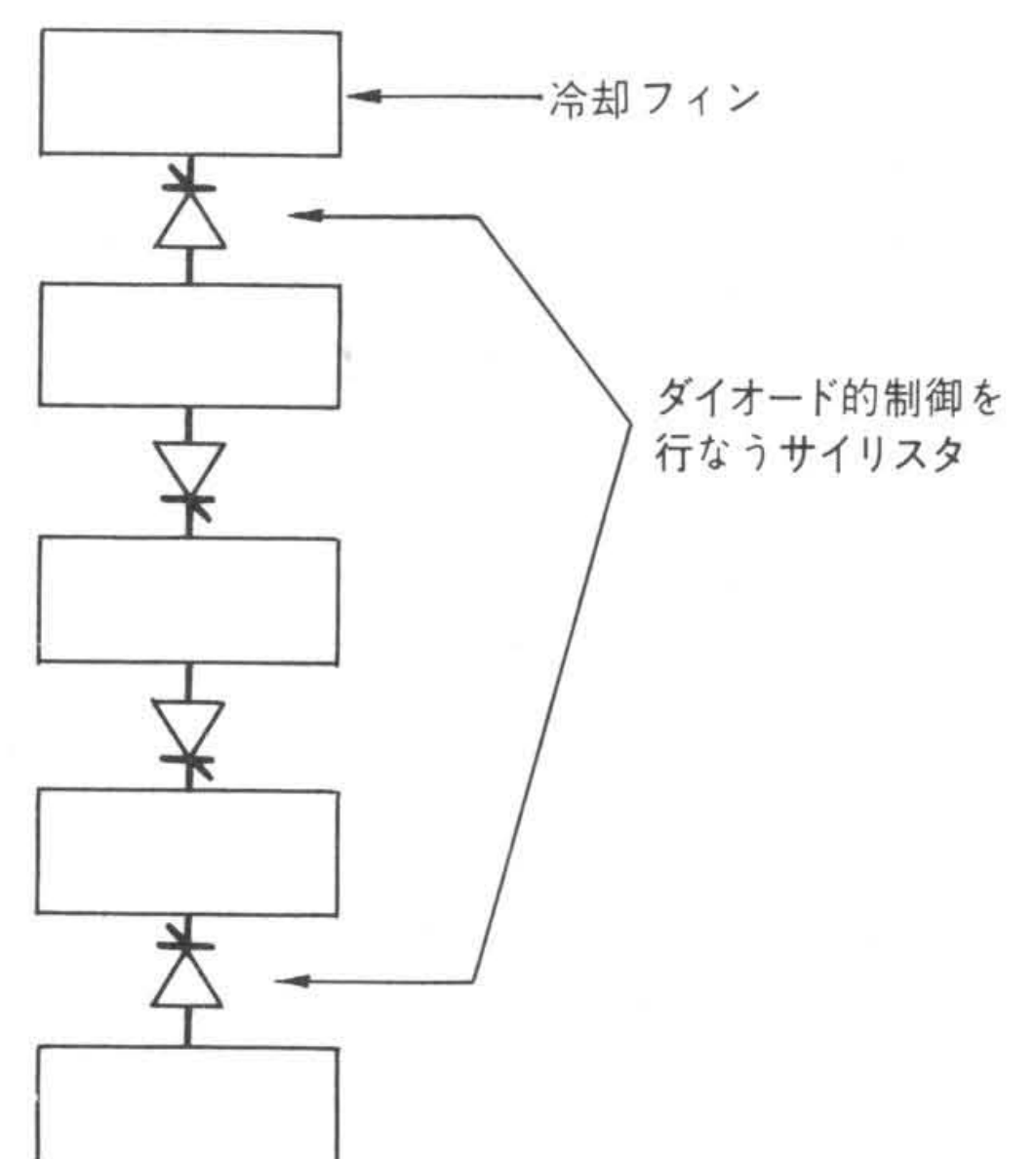


図10 サイリスタスタックの素子配置 ダイオード的制御を行なうサイリスタは、スタックの両サイドに配置され、冷却効果の向上が図られている。

- (5) 冷却方式は強制風冷方式であるが、南九州特有の火山灰からの耐塵化のため車側から冷却風を取り入れている。

### 6.2 サイリスタ適用上の問題と対策

サイリスタブリッジを多段直列にしてゲート制御をする場合、サイリスタ適用上の問題がある。本装置の設計時の考え方を以下に述べる。

(1)  $\beta_{\min}$ のばらつきによる過電圧

回生運転時、 $\beta_{\min}$ でゲートパルスが加わりすべてのサイリスタがONし電流が流れ始めるが、この $\beta_{\min}$ にばらつきがあり1アームのサイリスタだけ点弧が遅れた場合、図11に示す等価回路で表わされるように、そのサイリスタに過電圧が印加される。サイリスタTH1には次式の順方向電圧が印加される。

$$V = (E_M + 3.5Et) \times (1 - \exp(-\frac{R}{2L} \times t)) \times \cos \frac{t}{\sqrt{2C_1 \cdot L}} + \frac{Et}{2}$$

ここで  $R = \frac{R_1}{2} + R_d$

$E_M$ : 主電動機電圧

$L$ : 直流側インダクタンス

$R_d$ : 直流側抵抗

$C_1$ : スナバコンデンサ

$R_1$ : スナバ抵抗器

$Et = K \times \sqrt{2} \times E_2 \times \sin \beta_{\min}$

$K$ : 架線電圧変動

$E_2$ : 変圧器二次電圧

この式に所定の定数を代入し、サイリスタの耐圧2,500Vに達する時間を求めると140 $\mu$ s(3度)となる。本装置ではデジタル移相器を採用しており、ゲートパルスのばらつきは50 $\mu$ s以内に抑えられている。

## (2) ゲートオフ時の順方向過電圧

回生ブレーキ中電流断続時にサイリスタにゲートオフをかけた場合、図11に示すように各アームの点弧位相は同一でないため、いちばん遅れて点弧するアームのサイリスタが点弧する直前にゲートオフ信号が出た場合、そのアームは点弧せず過電圧が印加されることになるので、本装置では主回路電流を断路器で遮断後、ゲートオフ指令を出し過電圧を防止している。

## (3) 逆電圧期間中のゲートパルス除去

逆電圧期間中のゲートパルスを除去するための逆電圧検出器は従来アームごとに設けていたが、図12に示すTH1とTH3の逆電圧印加時間が同じであり、TH1の逆電圧を検出すればTH3の逆電圧を検出する必要がないことに着目し、本装置ではTH1とTH4のバイパスアームだけに検出器を設け、検出器の数を半減し装置の小形化に寄与している。

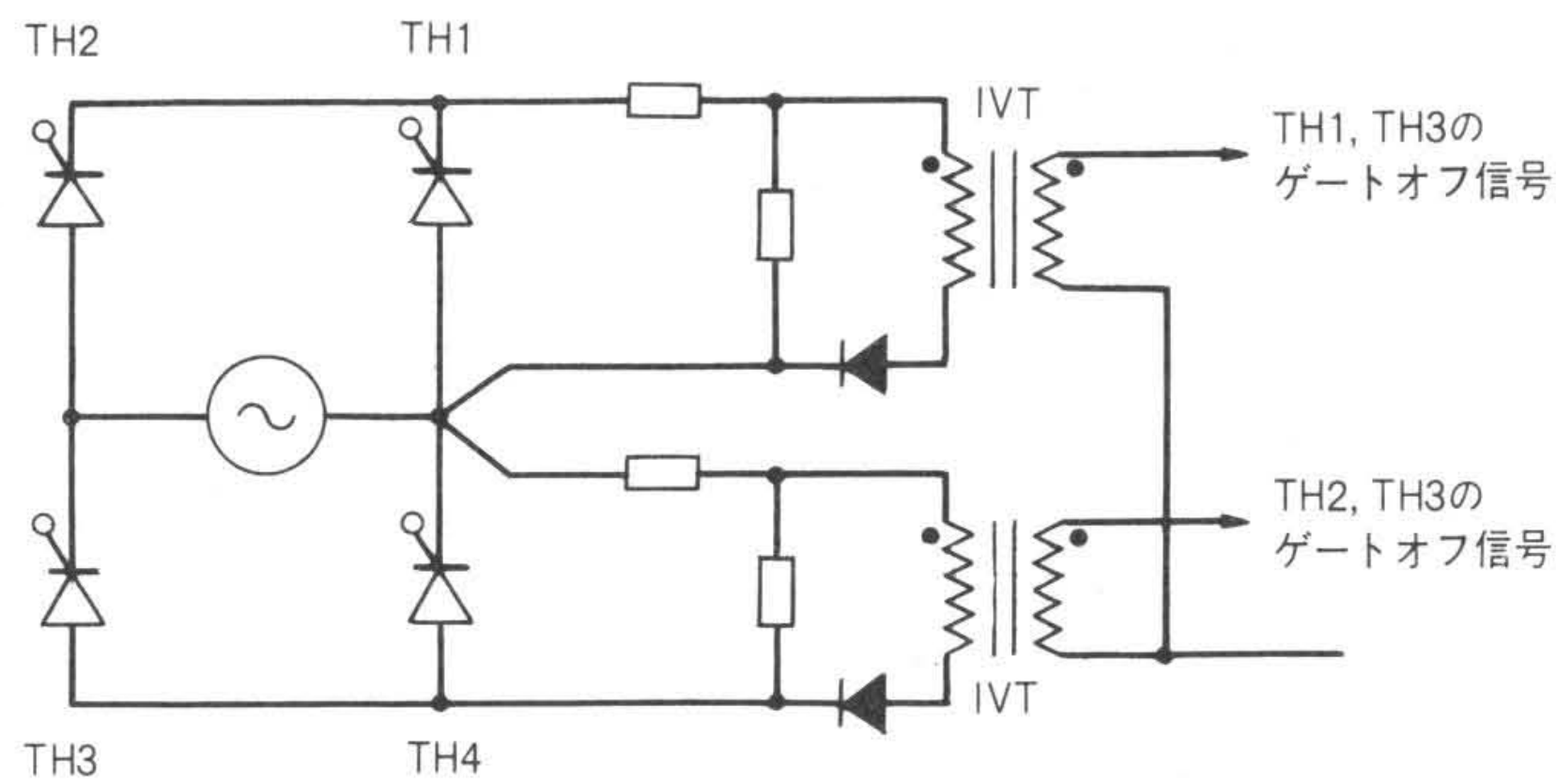


図12 逆電圧検出回路 逆電圧検出器はTH1, TH4にだけ設けている。

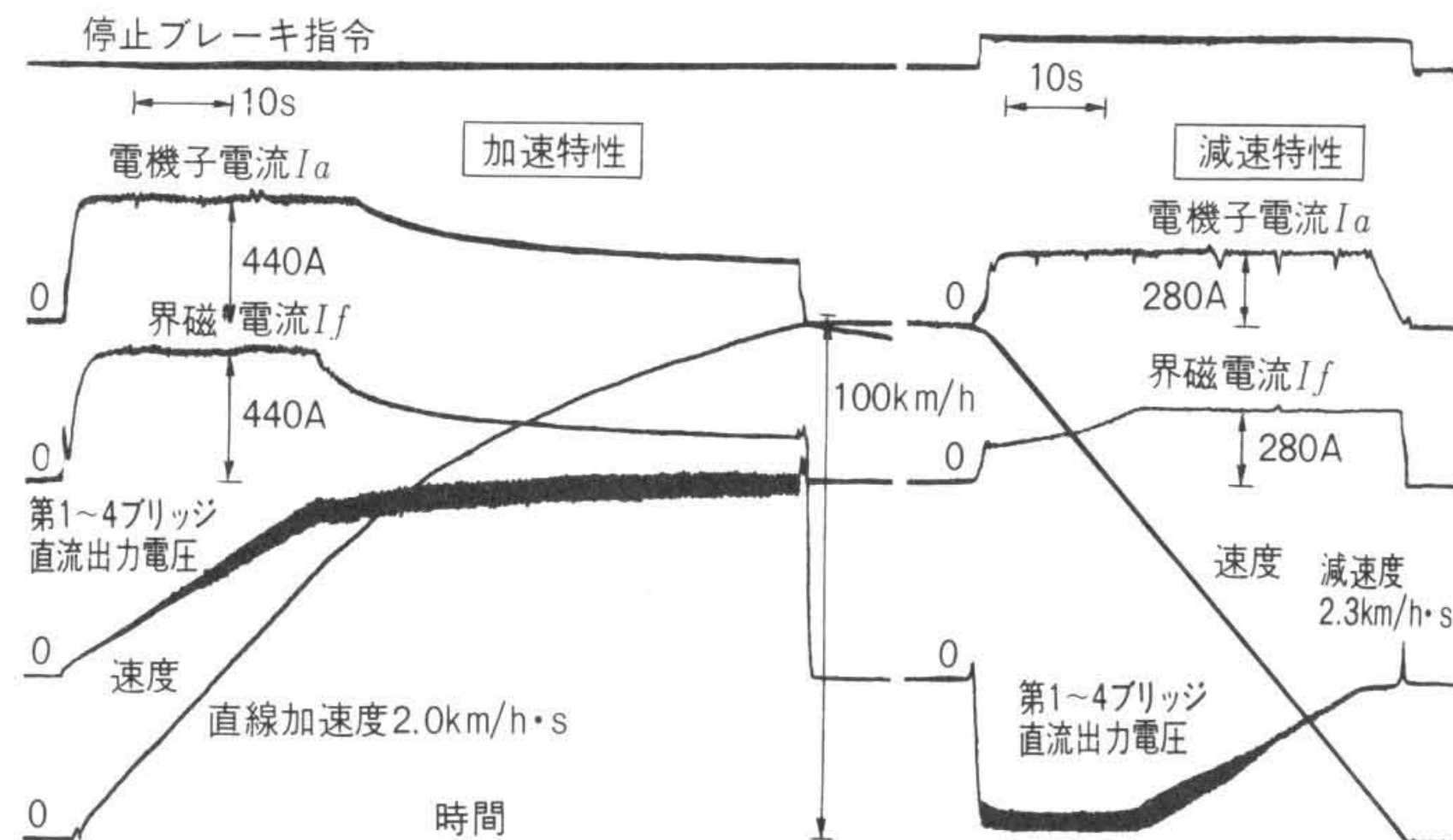


図13 現車試験のオシログラム 停止から100km/hまでの加速特性と、100km/hから停止までの減速特性の測定結果を示す。

## 7 現車試験結果

昭和58年10月に行なわれた鹿児島本線での現車走行試験時に測定した加速特性と減速特性のオシログラムを図13に示す。同図に示すように起動、加速、弱界磁運転、100km/hからの回生ブレーキ立上げ制御、弱界磁リミッタ及び転流限界に沿った弱界磁制御、その後の全界磁制御などが計画どおりに行なわれていることが確認された。

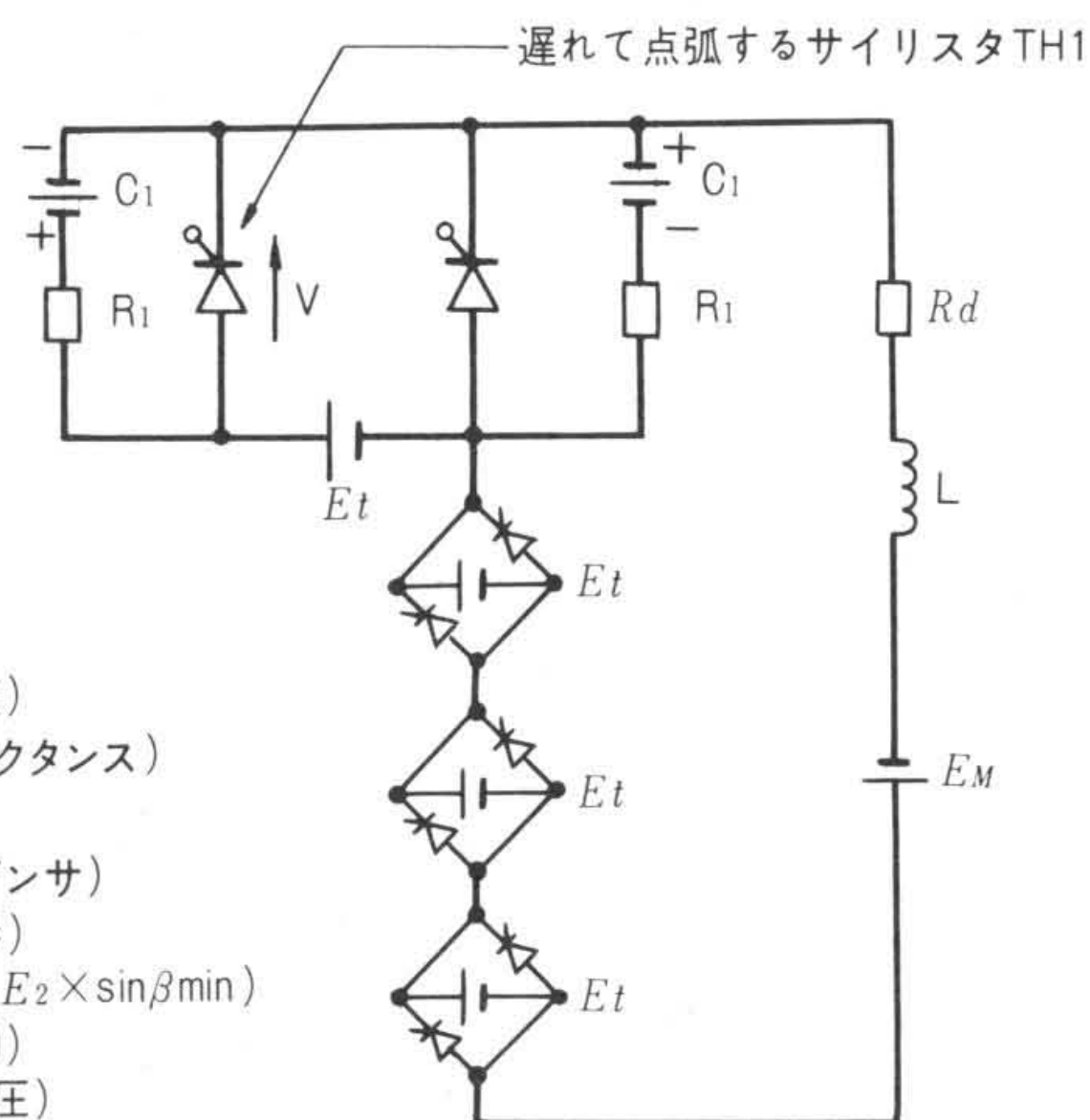
## 8 結 言

交流回生ブレーキの採用、他励制御の採用をはじめ新技術の適用により電気品の小形・軽量化が図られ、信頼性の高いシステムをもつ1電動車方式の交流電車が実現した。車両性能試験も実施され、基本的性能が確認された。今後の量産化と更に交流回生ブレーキ付電車が東北、北海道地区へ伸びてゆくことが期待される。

なお本開発に当たり日本国有鉄道車両設計事務所及び鉄道技術研究所ほか関係各位から御指導をいただいた。ここに厚く感謝の意を表わす次第である。

## 参考文献

- 1) 坪井, 外: サイリスタ式電力回生ブレーキ付交流電気機関車の制御, 日立評論, 51, 8, 763~767(昭44-8)
- 2) 加進, 外: 713系交流電車の他励制御と位相制御方式昭和58年電気学会東京支部大会, 245(昭58-11)
- 3) 加進, 外: 713系近郊形交流回生ブレーキ付電車の位相制御方式, 第20回鉄道サイバネ論文集, 421(昭58-10)
- 4) 加進, 外: 713系電管用主サイリスタ装置の開発, 第20回鉄道サイバネ論文集, 420(昭58-10)



注: 略語説明など

$E_M$  (主電動機電圧)

$L$  (直流側インダクタンス)

$R_d$  (直流側抵抗)

$C_1$  (スナバコンデンサ)

$R_1$  (スナバ抵抗器)

$Et = K \times \sqrt{2} \times E_2 \times \sin \beta_{\min}$

$K$  (架線電圧変動)

$E_2$  (変圧器二次電圧)

図11 過電圧が印加される動作説明図 遅れて点弧するサイリスタTH1に主電動機電圧 $E_M$ と交流電圧 $Et$ の和が印加される。