

東京急行電鉄株式会社納 7000 形電車用 停車用電力回生ブレーキ付電気品

Electrical Equipment for Train Stopping Regenerative Braking for Type 7000
Electric Coaches Supplied to Tokyo Electric Express Railway, Ltd.

今 泉 藤 磨* 樋 口 徹* 神 谷 清**
Fujimaro Imaizumi Tôru Higuchi Kiyoshi Kamiya

内 容 梗 概

大都市周辺の人口が増加するに伴い、通勤客の円滑な輸送のために大量の電車が投入されているが、ますます大形化する主抵抗器のスペースと熱処理の問題、変電所容量の不足、動力費の増加などの問題が生じ、これらの解決が要望されている。

東京急行電鉄 7000 形電車は、これらの問題の解決のため、次の特色ある方式を用いて所期の性能をえた。

(1) 電動時には直巻電動機、回生ブレーキ時には複巻発電機として動作する特殊直巻複巻電動機を採用し、安定な特性をえている。

(2) 電動時には主電動機の直並列制御を、回生ブレーキ時には並直列連続制御を行なって最高速度 100 km/h より 18 km/h の低速まで回生ブレーキを可能にし、消費電力量と変電所のピーク負荷の軽減をはかり、従来、回生ブレーキの欠点とされたブレーキ最終速度の高い点を一挙に解決した。

(3) 回生および空気の併用ブレーキは、磁気増幅器を主体とした制御回路により、常に回生・空気両ブレーキの和が、運転士のハンドル角度と可変荷重機構によって指示される値となるように制御している。

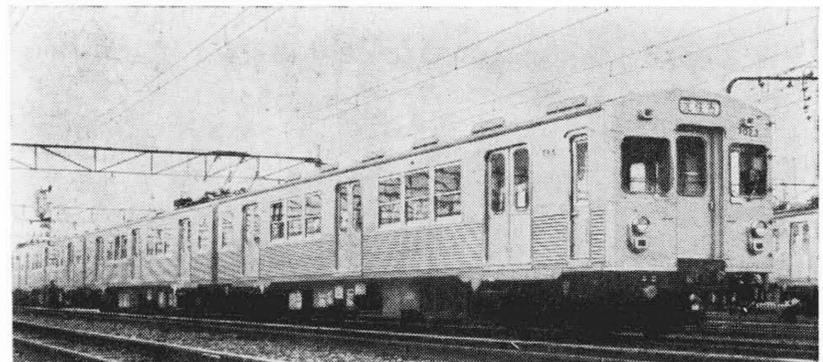
この電車は昭和 38 年 11 月より 7 回にわたって納入され、営業運転時における補機の消費電力をも含んだ回生率は 21~28.6%、比電力消費は 1.60~1.86 kWh/car・kW と画期的な値を示し、目下好調裡に営業運転中である。

1. 緒 言

電車は、1950 年代を境として、張殻構造の軽量車体と高速電動台車の出現、および小形軽量主電動機と発電ブレーキ常用の高性能制御装置の開発によって、その面目を一新した。また、列車編成も、高加減速度を得るため全軸駆動の MM 編成で、一応の定形化が行なわれてきた。

しかし、都市周辺の交通量の激増に対処するための MM 編成列車の大量投入は、車両建造費の割高、保守費の増大、ますます大形化する主抵抗器のスペースと熱処理の問題、変電所容量の不足、動力費の増加などの諸問題をもたらした。この問題を解決する一つの方策は、同一車長の MT 編成列車で直線加速度 3 km/h/s の高加減速度の高性能経済車の出現を可能にしたバーニアノッチ制御装置の開発であり、他の一つは、車両の運動エネルギーを電力にかえ、再び電車線に返還することによって、電車の電力消費量と、変電所のピーク負荷を軽減する停車用電力回生ブレーキ用電気品の開発である。

電力回生ブレーキは、従来その性能上、(1) 回生可能の速度範囲がせまく、電気ブレーキ最終速度が高い、(2) 全自動定ブレーキ力制御が困難である、(3) 他の電車の電動およびブレーキの影響を受ける、などの問題があった。しかし今回数年来続けてきた研究を基にして上記の電力回生ブレーキの問題点を解決し、回生率が 20% をはるかに上回り、1 車 1 km 当たりの電力消費量が区間車で 1.60~1.86 kWh の経済的性能をほこる回生ブレーキ用電気品を開発した。この電気品は東京急行電鉄東横線 7000 形電車用として、昭和 38 年 11 月より 7 回にわたって製作納入し、目下好評裡に営業運転中である。以下、電気品について、その概要と現車試験結果および発電ブレーキ式電車との経済比較について紹介する。



第 1 図 東京急行電鉄 7000 形電車

2. 東京急行電鉄 7000 形電車の仕様

7000 形電車は、東京急行電鉄東横線の急行および各駅停車に使用されるもので、第 1 図はその全景を、第 1 表は仕様の大要を、また第 2 図は走行特性を示したものである。

3. 主 電 動 機

主電動機の仕様の決定にあたってはつぎの諸点に留意した。

(1) 電動時には直巻電動機の有するすぐれたけん引力特性をそのまま利用し、回生ブレーキ時には特別な励磁機を設けずに安定した回生ブレーキがかけられる複巻電動機とすることで、これが性能的にも経済的にも有利であるので、主電動機を特殊直巻複巻電動機とした。

(2) 低速領域にて十分な加速性能をうるために、1 時間定格速度は 35 km/h としたが、一方回生ブレーキ時には、20 km/h 以下の低速まで回生ブレーキができるように並直列制御を行なうようにした。

(3) 東横線の区間車、急行車、いずれの性能も満足するように、速度制御範囲のきわめて広い、いわゆる広領域主電動機とした。

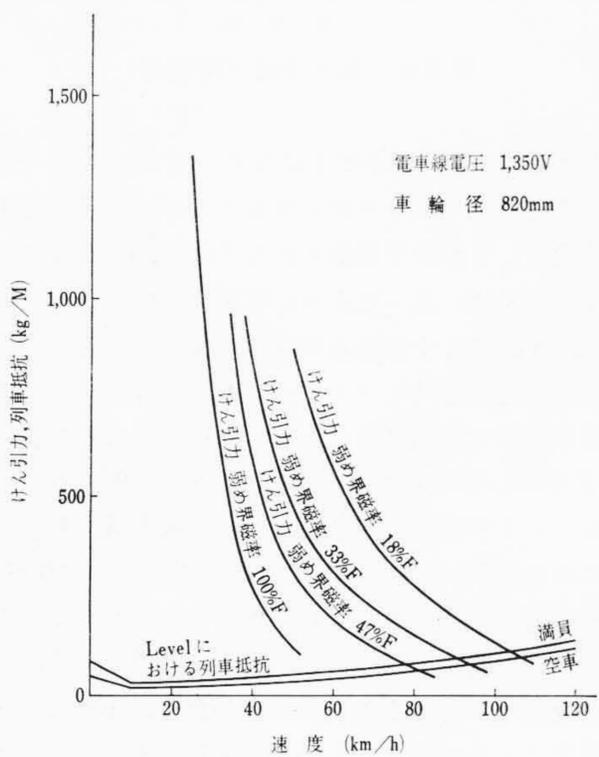
広領域主電動機とすることは電動性能を満たすばかりでなく回

* 日立製作所水戸工場

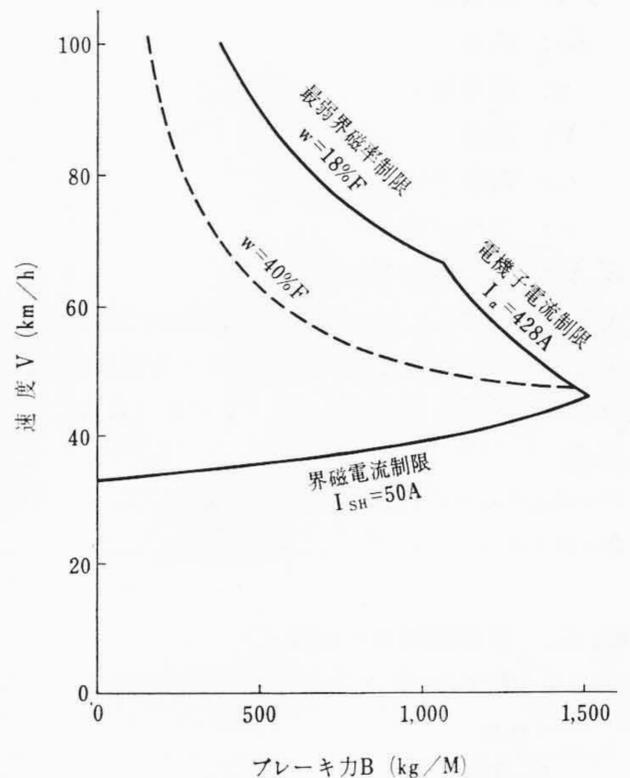
** 日立製作所日立工場

第1表 7000 形 電 車 の 仕 様

車 両 形 式	7000 形および 7100 形	ブ レ ー キ 方 式	回空併用ブレーキ(空気ブレーキ形式 HSC-R)
使 用 線 区	東 横 線	制 御 容 量	70 kW×8 台
車 長	17.5 m	制 御 段 数	電動 (主幹制御器操作) 24 ノッチ 限流起動ノッチ (1) 全界磁直列ノッチ (10) 全界磁並列ノッチ (8) 弱め界磁ノッチ (5) 回生ブレーキ (ブレーキ弁操作) 43 ノッチ 分巻界磁制御 並列ノッチ (21)+(1)(投入時限流投入) 直列ノッチ (21)
用 途	各駅停車および急行用通勤車	主 回 路 方 式	電 動 8 個の主電動機を直巻電動機として制御 4 個の永久直列の 2 群に分け直並列制御 回生ブレーキ 8 個の主電動機を差動複巻発電機として制御 分巻巻線は 8 個永久直列接続, 電機子および直巻巻線は 4 個永久直列の 2 群に分け並直列制御
車 種	ステンレス製 2 軸ボギー電動客車	主 回 路 遮 断 方 式	電 動 時 常時, 事故時とも限流遮断 1 段 回生ブレーキ時 常時, 分巻界磁弱めによる限流遮断 1 段 事故時, 分巻界磁弱めを併用した限流遮断 1 段
編 成	Mc ₁ , M ₂ , M ₁ , M ₂ , M ₁ , Mc ₂ 編成 (ただし 1 単位編成は M ₁ , M ₂ の 2 両より成り 3 単位編成で運行上の 1 基本編成を構成する)	制 御 電 源	交 流 200V 2 相 400 c/s 直 流 100V
軌 間	1,067 mm	制 御 空 気 圧	5 kg/cm ²
定 員	Mc 車 140 人 M 車 150 人	電 動 発 電 機 形 番 号	HG-533-Jrb
自 重	28.2 t	電 動 発 電 電 動 機 側	形式 EFO-SP 入力 10.5 kW 1,500V 7.0 A 2 極 2,400 rpm
電 気 方 式	直流 1,500 V	電 動 発 電 発 電 機 側	形式 EFO-R 出力 7.5 kVA 200V 400 c/s 2 相 18.75A 20 極 2,400 rpm
加 速 度	40 km/h までの平均加速度が 3.0 km/h/s	電 動 発 電 制 御 方 式	トランジスタ制御 自動周波数 電圧調整式
減 速 度	4.0 km/h/s	空 気 圧 縮 機	MH 80-C1000
比 電 力 消 費	各駅停車で回生ブレーキを使用して混雑時, 閑散時を平均して補機用電力も含み 2.0 kWh/car・km 以下	集 電 装 置	PT 43-B パネ上昇空気下降式パンタグラフ
台 車 形 式	TS-701 バイオニヤⅢ形	蓄 電 池	ECP 15-70F
駆 動 装 置	中空軸たわみ板接手式平行カルダン		
主電動機形番号(形式)	特殊直巻複巻電動機 HS-830-Arb (EFCO-K ₆₀ KK)		
主電動機形 1 時間定格	70 kW (375 V 電機子 214A 分巻界磁 12A 1,400 rpm (直巻界磁 60%F 分巻界磁 12A))		
主電動機形最弱界磁率	18%F		
歯 車 比	85 : 13 (モジュール 7)		
車 輪 径	860 mm (計算 820 mm)		
最 高 運 転 速 度	100 km/h (車輪径 780 mm において) (主電動機最高許容回転数 4,850 rpm)		
定 格 速 度	35.0 km/h		
定 格 け ん 引 力	713 kg (電動機 1 台当り)		
制 御 装 置 形 式	MMC HTR-10A		
制 御 方 式	電力回生ブレーキ付 総括制御自動加減速多段式 電動機操作カム軸式 磁気増幅器制御連続制御並直列切換式		



第2図 走行特性



第3図 回生可能範囲

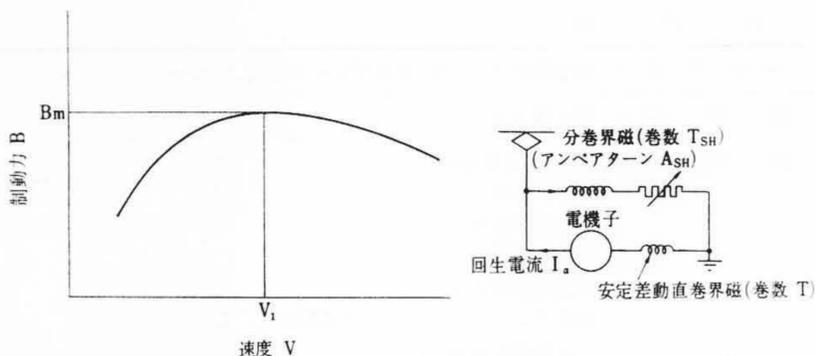
生ブレーキの回生可能範囲を広げるうえでも重要である。すなわち主電動機には、

- (a) 高速時の弱め界磁率の制限
- (b) 回生電流(電機子電流)の制限
- (c) 磁気飽和現象と界磁電流の制限

の三つの制限があり, これらの制限を図示すれば第3図となる。この曲線で囲まれる範囲内でのみ回生ブレーキは可能である。

第3図に点線で示した曲線は, 最弱界磁率 40% とした場合の制限で, この 2 曲線でわかるように, 従来の最弱界磁率 40% 程度の高速電動機では回生可能範囲が非常に狭く, 停車用ブレーキとしては, ほとんど使用不可能であった。回生可能範囲を広げることが最弱界磁率を大きくして広領域主電動機とすることである。

- (4) 回生ブレーキ時には, できるかぎり安定差動直巻アンペア



第4図 回生ブレーキの原理回路と特性略図

ターンを大きくとって、少ない制御段数で平滑な回生ブレーキがかけられるようにした。すなわちブレーキ力、速度、界磁アンペアターンの関係は次のとおりである。

第4図の回路で回生ブレーキをかけている場合(1)(2)(3)式が成立する。

$$B = K \frac{E_a I_a + L_M + L_C}{V \cdot \gamma} \dots\dots\dots (1)$$

$$E = E_a - (I_a r_a + v_b) \dots\dots\dots (2)$$

$$E_a = K_1 \Phi (A_{SH} - I_a T) V \dots\dots\dots (3)$$

ここに

- B: ブレーキ力
- I_a: 回生電流
- I_{SH}: 分巻界磁電流
- T: 安定差動直巻界磁巻数
- T_{SH}: 分巻界磁巻数
- A_{SH} = I_{SH} T_{SH}: 分巻界磁アンペアターン
- E: 電動機端子電圧
- E_a: 電動機発生電圧
- Φ: 界磁磁束
- L_M: 機械損
- L_C: 鉄損
- γ: 歯車効率
- V: 速度
- r_a: 電機子回路内部抵抗
- v_b: ブラシ降下
- K, K₁: 電動機固有の定数

ここで式を簡単にするため、無負荷飽和曲線は直線で歯車効率 γ も一定であるとし、また電機子回路抵抗による電圧降下、ブラシ降下、機械損および鉄損を無視すれば、(1)(2)(3)式より(4)(5)式が導かれる。

$$B = K_2 (A_{SH} - I_a T) I_a \dots\dots\dots (4)$$

$$E = K_3 (A_{SH} - I_a T) V \dots\dots\dots (5)$$

ここに

- K₂, K₃: 電動機固有の定数

(4)(5)式より dB/dV=0 となる速度 V₁ を求めると

$$V_1 = \frac{2E}{K_3 A_{SH}} \dots\dots\dots (6)$$

となる。すなわち速度 V₁ のときブレーキ力は最大値 B_m となる。ここで(6)式を(4)(5)式に代入すると B の最大値 B_m は

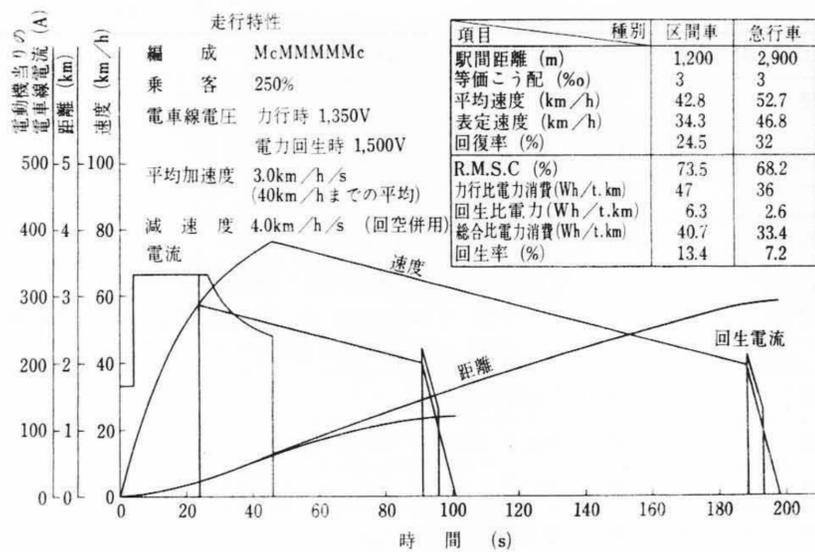
$$B_m = \frac{K_2 A_{SH}^2}{4T} \dots\dots\dots (7)$$

となる。(7)式から求めた A_{SH} を(6)式に代入すると

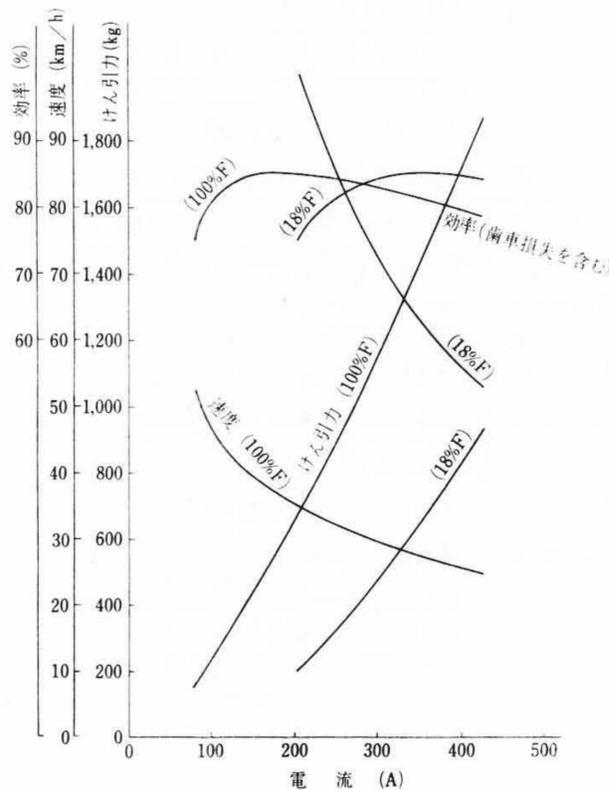
$$V_1 = \frac{E}{K_3} \sqrt{\frac{K_2}{B_m T}} \dots\dots\dots (8)$$

となる。

(8)式から明らかなように、必要な B_m を定めると差動直巻界磁



第5図 標準走行曲線



第6図 特性曲線 (電動時)

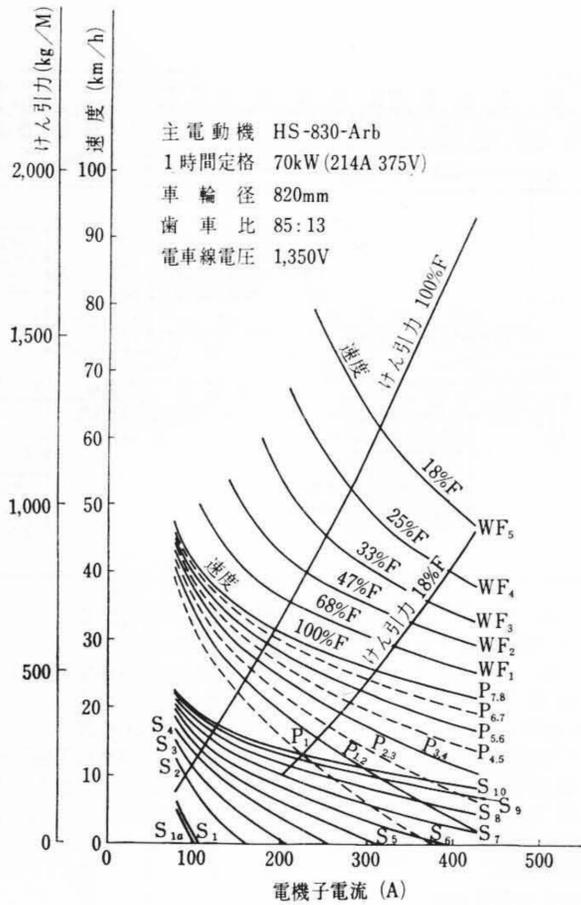
巻数 T を大きくするほど V₁ が小になる。すなわち同一ノッチで低速度まで比較的一定ブレーキ力を得ることができるようになり、制御段数を多段にして複雑な制御を行なう必要がなくなる。

本機の場合はすでに述べたように電動時には直巻電動機として使用するため、界磁には十分な直巻巻線を備えているゆえ、回生ブレーキ時の安定差動直巻アンペアターンの選択は、やはり力行時に使用する誘導分流器で分流することにより簡単に必要な値に調整できる。このようにして本機の差動直巻は界磁率 40% として使用することにした。ここで注目すべきことは、主電動機を特殊直巻複巻電動機としたため、回生ブレーキ時にのみ使用する分巻巻線、電動時、回生ブレーキ時とも使用する直巻巻線をそれぞれ必要とする電流量をうるよう合理的に計算したことである。その結果、直巻巻線のほうが分巻巻線よりもはるかに占積率が良く、小形にできるゆえ、電動時、回生ブレーキ時ともに複巻式としたものよりも電動機を小形にすることができ、かつ前述のように安定差動直巻アンペアターンを大きく選ぶことができる。

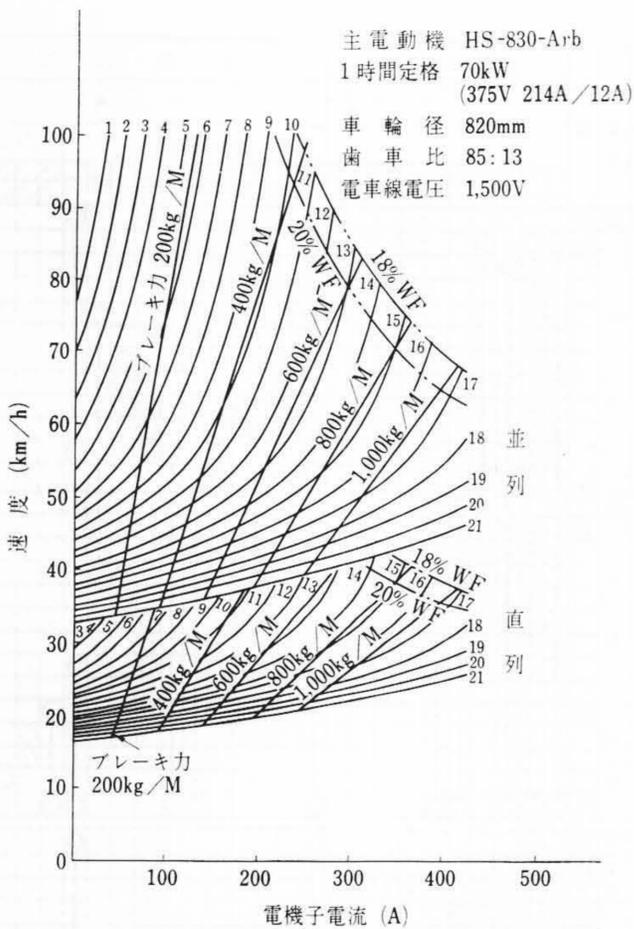
3.1 仕様および性能

主電動機仕様および車両性能を第1表に、標準走行曲線を第5図に、力行時特性曲線と回生ブレーキ時速度-ブレーキ力特性を第6図および第7図に示す。

RMS電流は将来ダイヤを改正して運行時間を短縮する際にも必要十分な余裕をもつように計画されており、本列車の主電動機として1時間定格 70 kW は最適な容量である。



第11図 電動ノッチ曲線



第12図 回生ブレーキノッチ曲線 (電機子電流—速度)

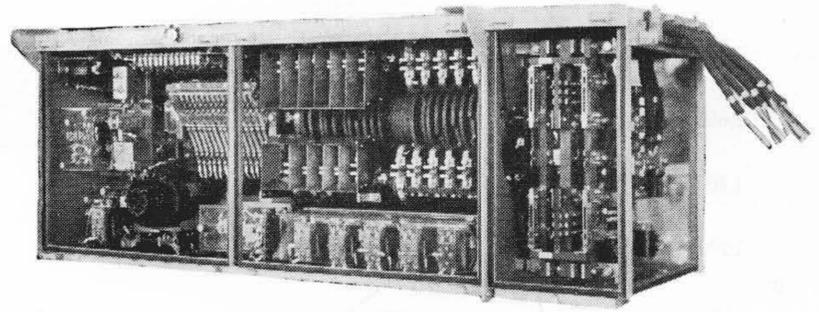
りである。

4.1 1回転式MMC制御器による電動制御

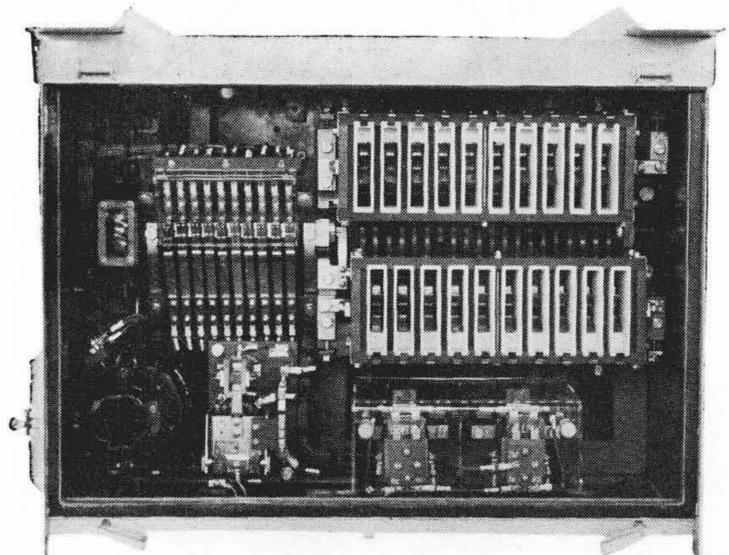
起動時主電動機の直並列制御を行なって電力消費量の節約と変電所ピーク負荷の低減をはかっている。

主電動機を直並列制御したために直並列しない他の制御方式と比較して電力消費量を5~10%節約することができた。特に広領域電動機を使用しているため、高加速度にもかかわらず起動電流が小さい。

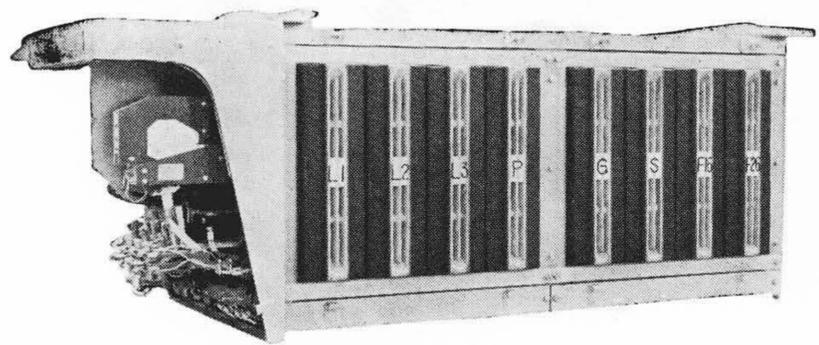
この電動時の直並列制御は、並直列連続制御で18 km/hの低速まで有効な回生ブレーキを行なうことと相まって、電力消費量の節約と変電所ピーク負荷の低減に大いに役だっている。この電動制御



第13図 MMC HTR-10A形主制御器



第14図 FC CH-5A形界磁制御器



第15図 URB PH-60-8A形断流器

はカム軸1回転のうち抵抗短絡、直並列切換え、界磁制御のすべての電動操作を終る日立標準の1回転式MMC形主制御器により全制御段24ノッチを得ている。

主制御器の中には電動に必要な各種接触器、継電器のほか、回生ブレーキを制御する各種の磁気増幅器を内蔵している。

4.2 回生ブレーキの制御

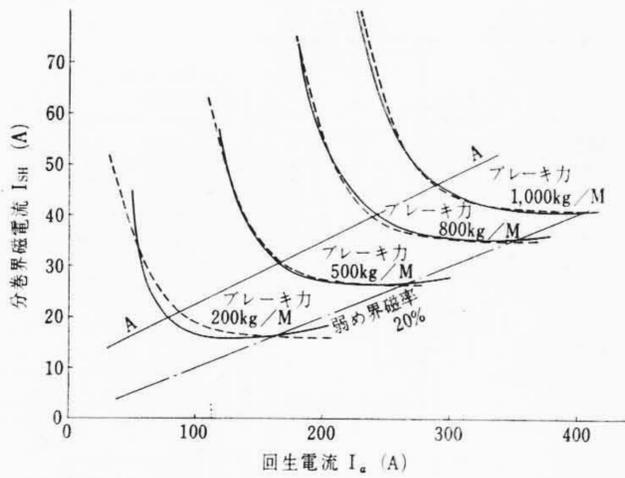
回生ブレーキ回路の投入は、回生電動機の発生電圧が電車線電圧よりやや高くなったときに行ない、その切り放しは回生電流が逆流するときに行なう必要がある。従来この検出のためには極性継電器という高感度の継電器を用いていたが、この制御装置においては、これを磁気増幅器にかえて無接点化し、安定な性能を得ている。

極性検出用磁気増幅器が動作すれば断流器L₁、L₂を閉じて限流抵抗をそう入して回生回路を投入し、続いてL₃を閉じて限流抵抗を短絡して回生ブレーキが行なわれるのである。

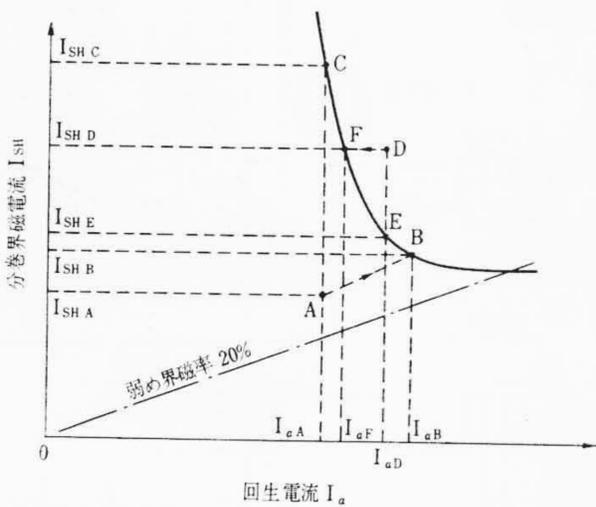
回生ブレーキをゆるめるときは界磁制御器カム軸を逆転させ、回生電流が50A以下になったことを確認して回路を開くのでショックのない遮断ができる。

万一、回生電力を消費すべき負荷がないときは回路が過電圧になる。過電圧による回転機の整流悪化を防止するために、回路電圧が1,800~1,900Vになれば過電圧継電器が働き回路を開くようになっている。

回生不能の場合、断流器のばたつきを防ぐために、いったん回生



第 16 図 定ブレーキ力を得る I_a-I_{SH} 特性



第 17 図 回生ブレーキ動作説明図

回路を形成後ブレーキ弁をゆるめることなく回路を開いたときに再び断流器が閉じないような記憶回路を設けている。

4.3 回生ブレーキと空気ブレーキの総合ブレーキ力制御

4.3.1 回生ブレーキの制御

回生ブレーキにおいては発電ブレーキと異なり速度の高低にかかわらず回生電動機の発生電圧をほぼ一定に保つ必要上一定ブレーキ力を保つためには速度によって界磁電流と回生電流を適当に制御する必要がある。

第 4 図に示す分巻界磁と直巻界磁を差動に動かした複巻電動機による回生ブレーキにおいてブレーキ力 B と回生電流 I_a 、分巻界磁電流 I_{SH} の関係は (1) (3) 式を使って (9) 式で表わされる。

$$B = K \frac{K_1 \Phi (I_{SH} T_{SH} - I_a T) V \cdot I_a + L_M + L_C}{V \cdot \eta} \dots (9)$$

ここで、実用上の電車線電圧変動範囲においては

$$\eta = g_1(I_a)$$

$$L_M = K_4 V$$

$$L_C = g_2(I_a, I_{SH}) V$$

ここに K_4 : 定数

が成立するとすれば (9) 式は (10) 式となる。

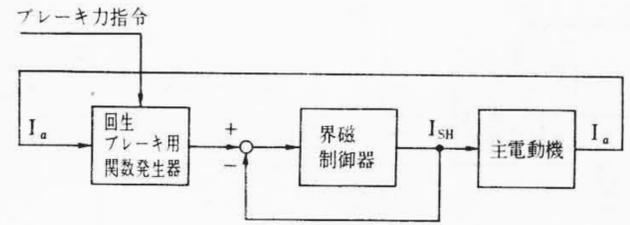
$$B = f_1(I_a, I_{SH}) \dots (10)$$

すなわちブレーキ力は電車線電圧および速度に関係なく、 I_a, I_{SH} だけの関数である。(10) 式を変形すると

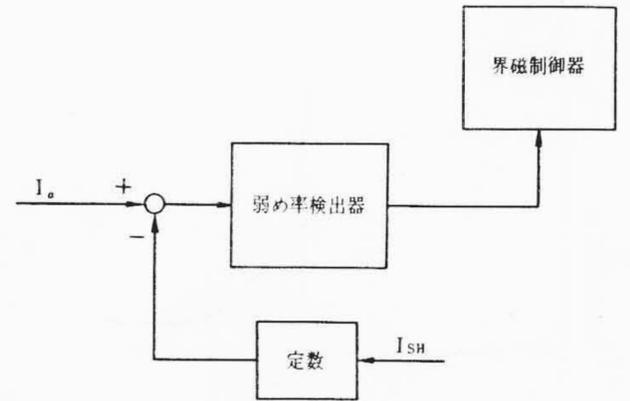
$$I_a = f_2(I_{SH}, B) \dots (11)$$

となる。(11) 式により実際の数値を入れて計算すると I_a と I_{SH} との間には B をパラメータとして第 16 図の実線のような曲線が得られる。

各曲線の形状はブレーキ力の大小にかかわらずほぼ一定で、第 16 図の点線で示す曲線は同一形状の曲線を AA 線に沿って実線の曲線まで平行移動させて得た曲線群で実線の曲線との差はブレーキ制御を行なううえで差支えない程度に十分小さいものである。



第 18 図 回生ブレーキ制御系ブロックダイアグラム



第 19 図 弱め率制御系ブロックダイアグラム

したがって標準の I_a-I_{SH} 曲線を関数発生器で発生させこれをブレーキ力の大きさの指令により上下左右に AA 線に沿って平行移動することでブレーキ力を制御することができる。

運転士のハンドル角度によってきまる直通管圧力と、荷重によってきまる可変荷重機構によって指示されたブレーキ力指令が第 17 図のとおりである場合について説明する。制御系は第 18 図に示すブロックダイアグラムのとおりである。もし回生電流 I_a 、分巻界磁電流 I_{SH} が点 A に示す I_{aA}, I_{SHA} であれば回生ブレーキ関数発生器の出力は I_{SHC} であるので

$$I_{SHC} - I_{SHA} > 0$$

となり界磁制御器は実際分巻界磁電流 I_{SH} を増す方向に動作する。 I_{SH} が増せば回生電流 I_a も増すので第 17 図の A 点は斜め上方の B 点に落ち着き回生電流は I_{aB} 分巻界磁電流 I_{SHB} で運転し、指令されたブレーキ力を発生する。もし回生電流 I_a 、分巻界磁電流 I_{SH} が点 D に示す I_{aD}, I_{SHD} であれば回生ブレーキ関数発生器の出力は I_{SHE} であるので

$$I_{SHE} - I_{SHD} < 0$$

となり界磁制御器は回転しない。したがって車速の減少とともに回生電流は減少し D 点は左方の F 点に移動し回生電流 I_{aF} 、界磁電流 I_{SHD} となって指令されたブレーキ力を発生する。

高速から回生ブレーキをかけると主電動機の整流上より弱め界磁率が制限される。界磁が弱まりすぎることを防ぐためには回生電流 I_a と分巻界磁電流 I_{SH} の比を弱め率検出器で検出して第 18 図の制御系とは別の第 19 図に示す制御系で界磁制御器を制御する。

すなわち

$$\frac{I_a}{I_{SH}} < K \quad K: \text{ 常数}$$

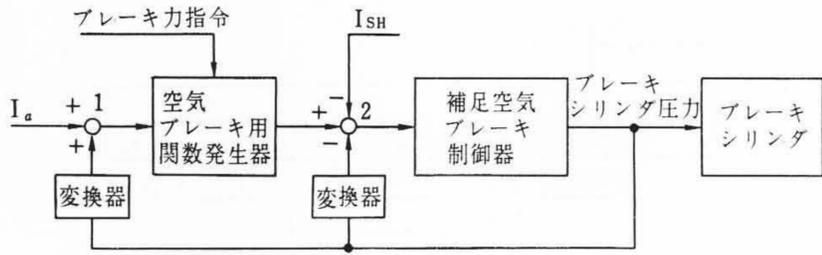
のときは界磁制御器は関数発生器の値と実際の界磁電流の差によって制御され

$$\frac{I_a}{I_{SH}} \geq K$$

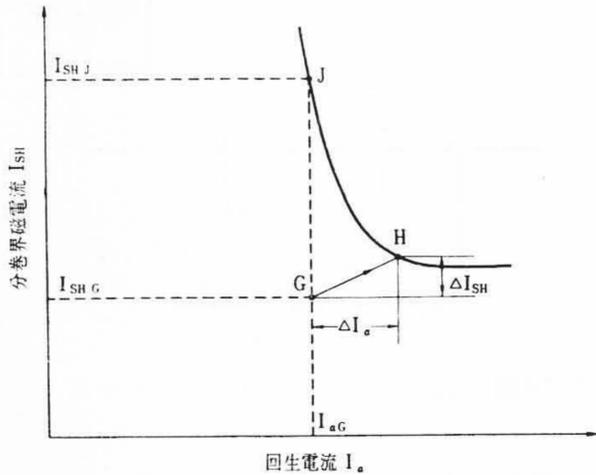
のときは関数発生器の値と界磁電流の差のいかんにかかわらず、界磁制御器は停止してノッチを進めない。

4.3.2 補足空気ブレーキの制御

弱め率の制限などにより運転士のハンドル角度と荷重に応じた所要回生ブレーキ力が得られない場合はブレーキ力の不足分だけ



第20図 補足空気ブレーキ制御系ブロックダイアグラム



第21図 補足空気ブレーキ動作説明図

補足空気ブレーキを追加する必要がある。この補足空気ブレーキは次のようにして制御される。

補足空気ブレーキ制御系のブロックダイアグラムは第20図に示すとおりである。ここで空気ブレーキ関数発生器は回生ブレーキ関数発生器とまったく同じ回生電流 I_a - 界磁電流 I_{SH} の関係を持つ関数を発生する。したがって、回生ブレーキによる回生電流 I_s と分巻界磁電流 I_{SH} が指令ブレーキ力に応じた電流値であれば補足空気ブレーキ系の加え合せ点2からの出力は0となり補足空気ブレーキ制御器は動作せず空気ブレーキは補足されない。しかし回生電流 I_a と、界磁電流 I_{SH} が第21図に示すG点の値であれば補足空気ブレーキ制御器には $(I_{SHj} - I_{SHg})$ の入力があり、補足空気ブレーキが追加される。ブレーキシリンダに空気が流し込まれると空気ブレーキ力に相当した変換信号が加え合せ点1では空気ブレーキ関数発生器の I_a と同方向に、また、加え合せ点2では I_{SH} と同方向に働き、 I_a と I_{SH} がそれぞれ ΔI_a , ΔI_{SH} だけ増加したと等価に働く。

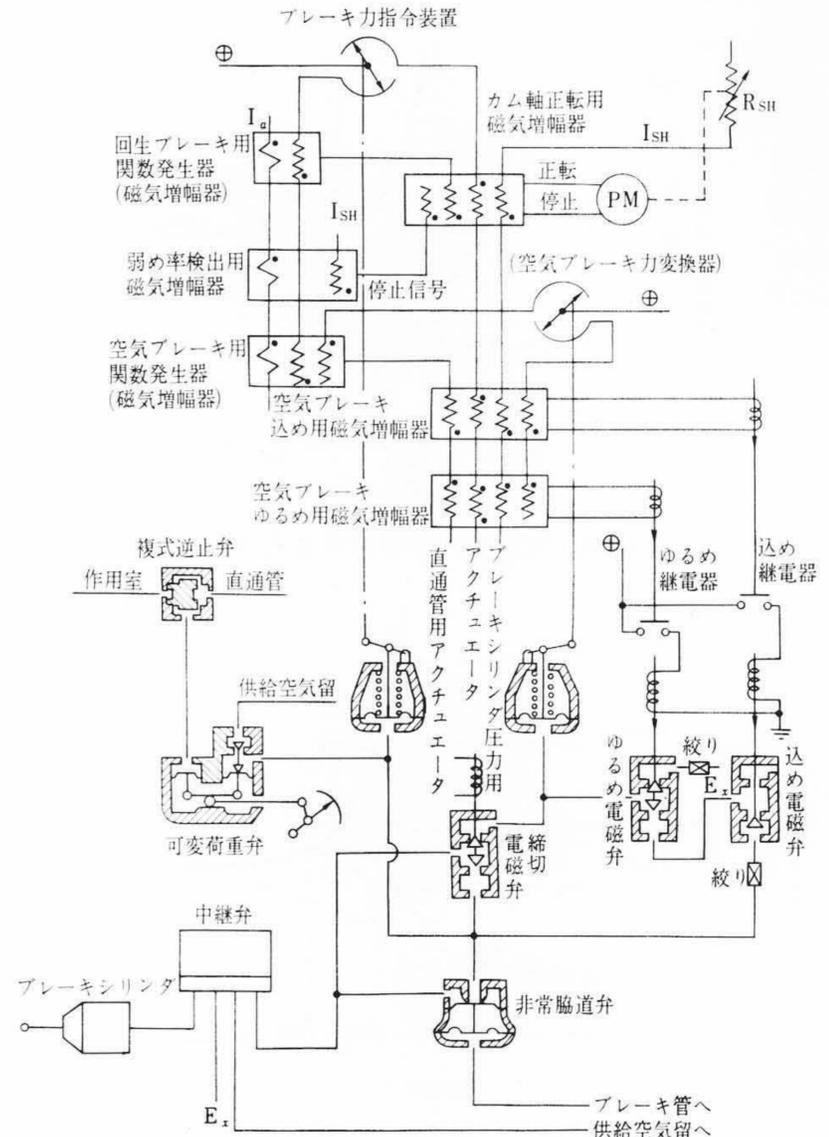
ΔI_a と ΔI_{SH} の増加による回生ブレーキ力の増加と上述のようにして働く空気ブレーキ力と同じにしておけば空気ブレーキと同様に制御でき、回生ブレーキ力が不足の場合は空気ブレーキが補足されて第21図のH点に相当する総合ブレーキ力で運転する。もし補足空気ブレーキが強まりすぎた場合は、上述とは逆の作用により総合ブレーキ力が指令値になるまで、補足空気ブレーキは弱まる。

以上の回生ブレーキおよび補足空気ブレーキの制御は第22図の簡略ツナギに示すように、磁気増幅器を主体とした制御回路によって制御される。

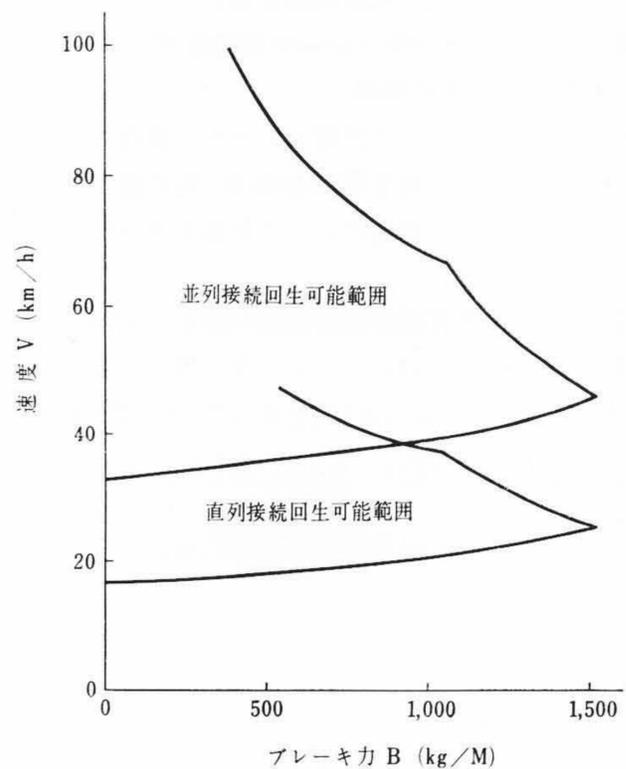
4.4 回生電動機の並直列制御

3で述べたように、回生可能範囲は広領域主電動機の開発により高速領域へ広げる努力がなされたが、この回生可能範囲をさらに低速領域へ広げるためには、回生ブレーキ中に主電動機の並直列制御を行なう必要がある。

電力回生ブレーキは回生電動機の発生電圧が電車線電圧以下になると失効するので、その最終速度はほぼ定格速度である。ゆえに回生ブレーキの最終速度をほぼ定格速度の $\frac{1}{2}$ までさげて飛躍的に回生

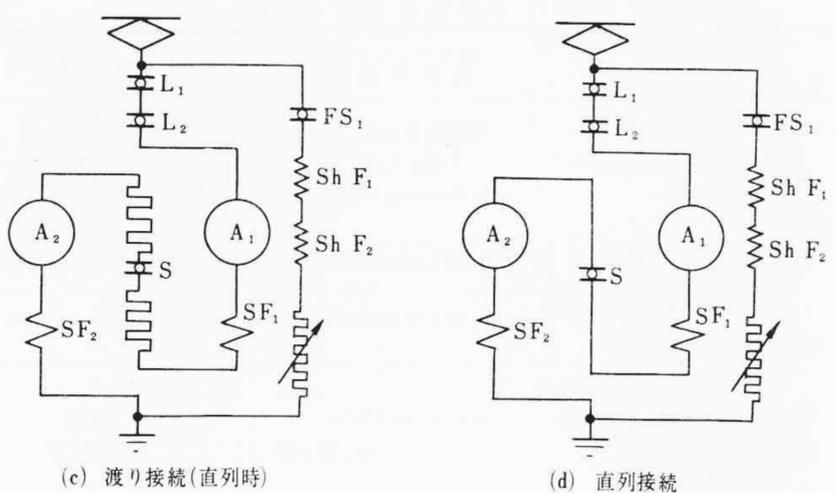
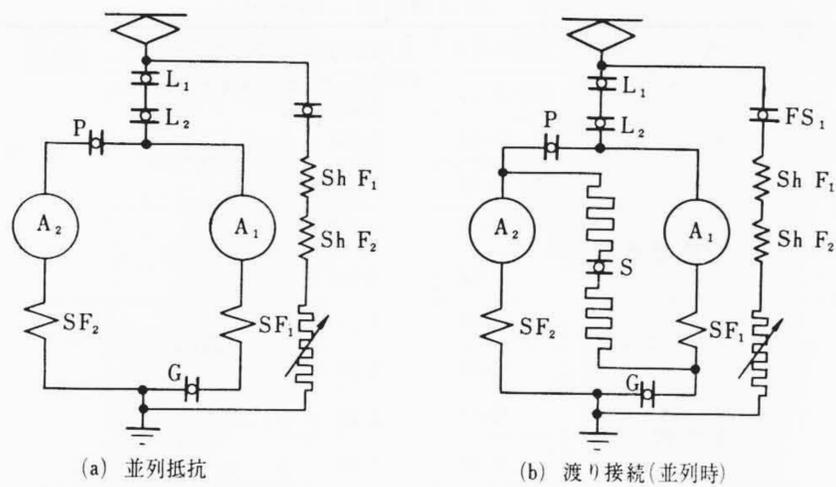


第22図 回生ブレーキおよび補足空気ブレーキ制御簡略ツナギ



第23図 並列接続と直列接続の回生可能範囲

電力量を増加させ、発電ブレーキと同等の低速まで回生ブレーキをかけるためには、並列接続で回生ブレーキがほぼ失効する速度において回生電動機電機子接続を直列に切りかえればよい。並直列接続をした場合の回生可能範囲は第23図に示すとおりで、東急7000形電車の場合多く使われる制動初速50~60 km/hから回生ブレーキをかけた場合に並直列制御をしたときの回生電力量と並列制御だけの場合の回生電力量の比は、ブレーキ力を800 kg/Mとした場合、大略1.95~1.47となる。回生ブレーキ中における回生電動機の並列より直列への切換は、第24図(a)~(d)に示すように電動時使用



第 24 図 回生ブレーキ時の主回路変化図

する起動抵抗と、その短絡用接触器、直並列切換用接触器および回生ブレーキ時のみ使用する分巻界磁制御器と抵抗器を用いて、途中で回路を切り離すことなく、渡り用抵抗器と分巻界磁抵抗器を同時に適当に制御することにより連続的にショックなく行なうことができる。

4.5 回生ブレーキと空気ブレーキの切換

運転士がブレーキ弁を直通ブレーキ位置に入れば、回生ブレーキ回路が構成されるとともに、空気ブレーキ(電磁直通ブレーキ)が作用する。回生電動機の発生電圧が電車線電圧以上になり、極性検出磁気増幅器の働きにより、断流器 L_1, L_2 が投入されれば、縮切電磁弁が励磁されて空気ブレーキは縮切られ、回生ブレーキ力の不足があったときのみ追加される補足ブレーキが働くようにしてある。

回生ブレーキ中過電圧継電器動作などの原因によって、回生ブレーキ回路を開いた時には縮切電磁弁は消磁されて、空気ブレーキ(直通ブレーキ)が自動的にかかるわけである。また回生ブレーキが直列の最終ノッチに達すると、縮切電磁弁を消磁して空気ブレーキをかけはじめ、回生ブレーキが失効する時には空気ブレーキが有効に働くようになっている。

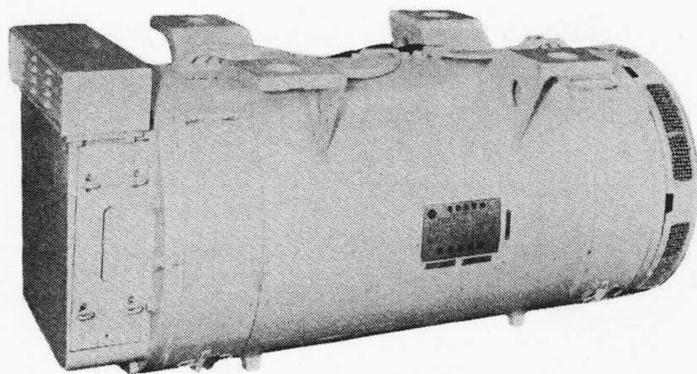
現車試験の結果においても回生ブレーキと空気ブレーキの切換はなめらかでいささかのショックも感じられなかった。

5. 電動発電機

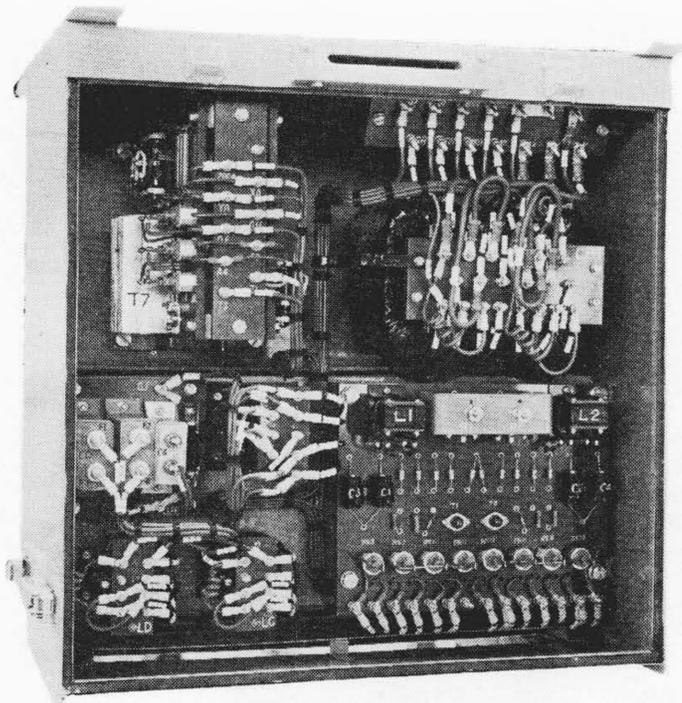
電動発電機の仕様を第 1 表に、外観写真を第 25 図に示す。

本機の負荷である制御装置には磁気増幅器を多数使用しているので応答速度を早くし、小形にするために、発電機を特殊回転界磁形とし、周波数を 400 c/s に選定した。

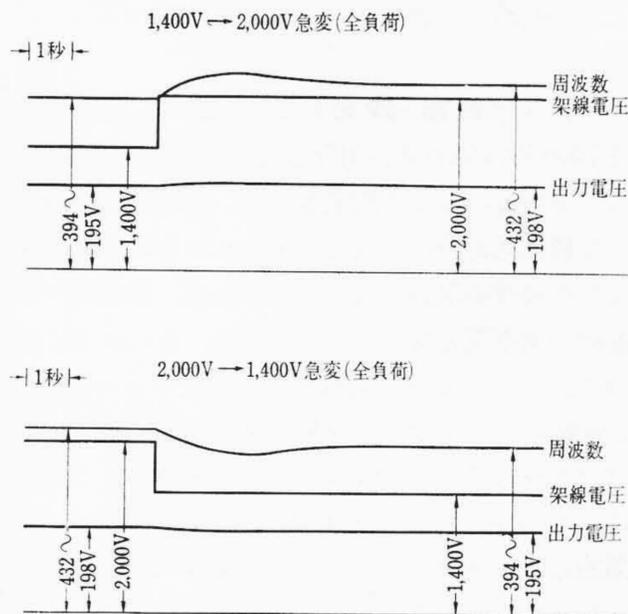
定常特性は電車線電圧 900V から 1,650V の範囲で発電機側が無負荷から全負荷状態を含めて、出力電圧、周波数の変動はともに定格の $\pm 5\%$ 以下ときわめて良好であり、過渡特性も通常の電車線電



第 25 図 電動発電機



第 26 図 自動電圧調整器



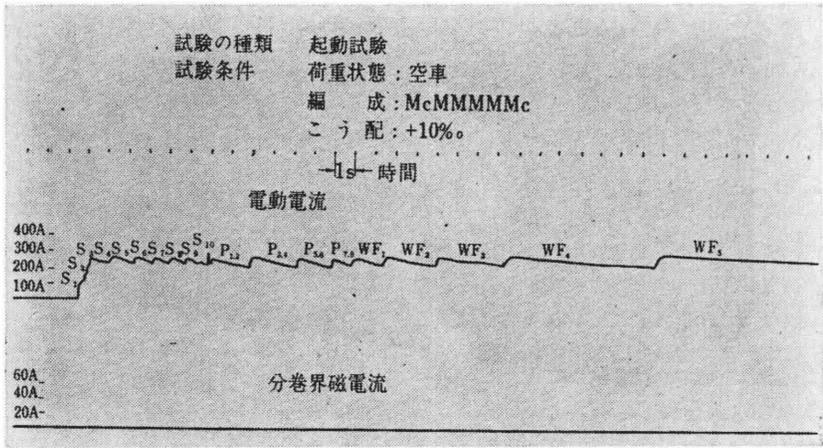
第 27 図 電動発電機電車線電圧急変試験
オシログラム

圧変動のほかに、特に電車線電圧 2,000V より 1,400V に至る急昇急降試験を行なったが、整流、出力特性のいずれもきわめて安定した成績を取めた。

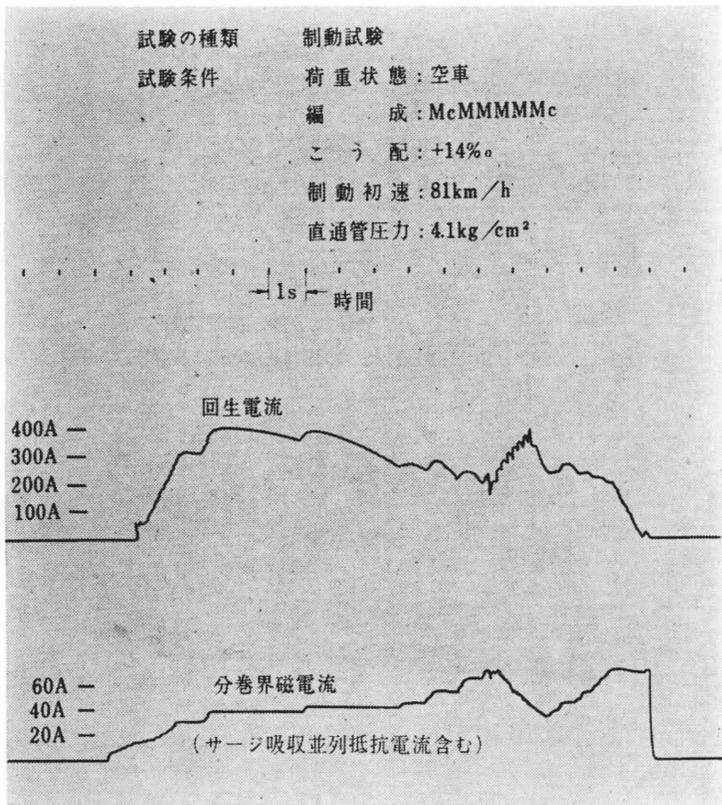
自動電圧調整器としては、出力電圧および周波数の変動が少なく過渡制御性がよく安定なトランジスタ調整器を使用した。第 26 図は調整器の外観を、第 27 図は電車線電圧急変試験のオシログラムを示したものである。

6. 実測結果

東横線における現車試験で測定した起動および回生ブレーキの代



第28図 起動オシログラム



第29図 回生ブレーキオシログラム

表的オシログラムを第28～29図に示す。また、東横線の営業運転時における7000形電車の電力消費量と回生率の実測結果は第2表に示すとおりである。ここに測定されている電力消費量は車両に取り付けられた積算電力計によって測定されたもので電動発電機、空気圧縮機などの補機の電力も含むものである。通常ほかで発表されるように補機の使用電力を含まない場合は、さらに5%程度回生率は上るものである。比電力消費は区間車でラッシュ時に1.86 kmh/carkm、閑散時に1.60 kmh/carkmと驚異的に小さい値を示している。また回生率も従来処々に停車用ブレーキとして営業線において使用され、報告されている約10%という値に対し、21～28.5%という画期的な回生率を記録することができた。これらは電動時および回生ブレーキ時に主電動機の直並列制御を行なった効果が如実に現われていると考えられる。

7. 電力回生ブレーキの経済性

東京急行電鉄東横線程度に列車密度の混んだ線区を対象とした場合、電力回生ブレーキが経済的にどのような価値があるかについて7000形電車の結果をもとにしての一計算例を示す。

経済比較をする基礎となるものに、Initial costとRunning costがあるが、まず、Running costについて考える。第3表は7000形電車の実測結果をもとにして回生ブレーキ付電車(直並列切換式)と発電ブレーキ付電車のRunning costを比較したものである。第3表から明らかなように発電ブレーキ付電車に比べ回生ブレーキ付電車は M_1M_2 単位編成あたり、年間483 k¥のRunning costの節約となる。この節約額は車両建造費の利率を8%の年複利と仮定すれ

第2表 電力消費量と回生率

回生の有無	運 行	測定年月日	比電力消費	平均比電力消費	平均回生率
回生使用	朝ラッシュ時	63-11-15	kWh/carkm 2.075	kWh/carkm 1.857	21 %
		11-16	1.635		
	11-18	1.86	28.5		
	昼間閑散時	11-15		1.606	
11-18	1.606				
回生カット	朝ラッシュ時	11-14	2.20	2.35	
		11-20	2.50		
	昼間閑散時	11-19	2.19	2.24	
		11-20	2.29		

(電力消費量には電動発電機、空気圧縮機などの補機の電力を含む)

第3表 回生ブレーキ付電車と発電ブレーキ付電車のRunning costの比較

項 目	種 別	回生ブレーキ付電車 直並列切換式	発電ブレーキ付電車
電車の種類の説明		電動時および回生ブレーキ時とも主電動機の直並列切換を行なう	電動時主電動機の直並列制御を行ない、発電ブレーキ時は主電動機を並列接続する
(i) 消費電力	比電力消費	1.73 kmh/carkm(注1)	2.30 kWh/carkm(注2)
	M_1M_2 単位編成あたりの比電力消費	3.46 kWh/ M_1M_2 km	4.60 kWh/ M_1M_2 km
	M_1M_2 単位編成あたりの年間消費電力量	4.15×10^5 kWh/ M_1M_2 年	5.52×10^5 kWh/ M_1M_2 年
	年間電力料金(4円/kWhと仮定)	1,660 k¥/ M_1M_2 年	2,208 k¥/ M_1M_2 年
	発電ブレーキ車を基準にした場合の年間電力料金の差額	-548 k¥/ M_1M_2 年	—
(ii) 制輪子費	M_1M_2 単位編成あたりの合成制輪子消耗個数(注3)	57個/ M_1M_2 年	32個/ M_1M_2 年
	年間の合成制輪子の費用(制輪子の取替費を含む 2.6k¥/個)	148.2 k¥/ M_1M_2 年	83.2 k¥/ M_1M_2 年
	発電ブレーキ車を基準にした場合の年間制輪子の差額	65 k¥/ M_1M_2 年	—
(iii) 保 守 費		回生ブレーキ車のほうが保守費が少ないと報告されているが等しいとして検討する。	
(iv) そ の 他 の 費 用		ブレーキ方式に関係ない部門の費用で、回生、発電両ブレーキで差はない。	
M_1M_2 基本編成あたりの発電ブレーキを基準とした総合費用		-483 k¥/ M_1M_2 年	

(注1) 朝ラッシュ時の比電力消費 1,857 kWh/carkm と昼間閑散時の比電力消費 1,606 kWh/carkm の平均値をとった。

(注2) 回生カットした場合の朝ラッシュ時の比電力消費 2.35 kWh/carkm と昼間閑散時の比電力消費 2.24 kWh/carkm の平均値をとった。

(注3) 発電ブレーキ付電車では合成制輪子の寿命は1年/1個であると仮定し、回生ブレーキ付電車においては回空切換速度より逆算した。

ば、電車の耐用年数を20年と見積った場合、現時点で4,780 k¥の節約となり、また耐用年数を30年と見積った場合は現時点で5,440 k¥の節約となる。したがって回生ブレーキ付電車と発電ブレーキ付電車のInitial costの差が現時点で考えた節約額より少ないのでこの7000形電車のように画期的な回生率が期待できる場合は、回生ブレーキ方式が発電ブレーキ方式にくらべ有利であるといえる。

以上の計算は車両についてのみ行なったものであるが、ある営業線に同一数の電車を投入する場合、回生ブレーキ付電車を投入するほうが発電ブレーキ付電車を投入する場合よりも変電所容量が小さ

くてすむと考えられるので、回生ブレーキを採用したほうがさらに有利になるであろう。

以上の計算例は7000形電車の回生ブレーキの実績を基にして年間走行距離、電力料金、合成制輪子の費用などに大胆な仮定をおいて計算したものであるが、ある営業線に回生車を投入すべきか否かは回生方式と列車密度によってきまる電力消費量の節約額と initial cost の差額の比較とともにすでに投入されている車両の性質とその線区の特事情を十分考慮のうえ決定すべきである。

8. 結 言

以上、停車用電力回生ブレーキ付制御装置について、電気品の概要と現車試験結果、経済比較について述べた。

最近のますます激増する都市交通量に対処するために増大する主

抵抗器のスペースと熱処理の問題の解決、動力費の節約、変電所容量の節約などの要求はさらに過酷なものとなると考えられる。

このとき、回生率が21~28.5%で比電力消費が1.60~1.86 kWh/car km と画期的な数字を記録し、従来から回生ブレーキの一つの欠点とされたブレーキ最終速度の高い点を一挙に解決した停車用電力回生ブレーキ付制御装置を開発したことは誠に意義深いと考える。

今後はこれを基礎にしてさらに電力回生ブレーキと列車密度、投入回生車の割合、および変電所の状態との関係を検討し、回生可能範囲の拡大について研究を進めていく予定である。

終わりに本電気品の完成については東京急行電鉄車両部白石部長始め関係各位のご指導に負うところが多く、ここに厚くお礼申し上げる次第である。



特許第428281号

特 許 の 紹 介



堀 辺 武・曾 根 康 夫

エポキシ樹脂硬化剤組成物

これまでエポキシ樹脂の硬化剤として用いられた有機多塩基酸無水物には常温で液体のものと固体のものがある。

常温で固体の酸無水物をエポキシ樹脂にとかすには、加熱しなければならないし、また一度とかしても室温まで冷却すると再び酸無水物が結晶となって再び析出してくる。

一方、常温で液体の酸無水物は比較的最近開発されたもので、固体の酸無水物よりも使いやすいが、現在では非常に高価であるので実用的でない。

数種の酸無水物を混融して得られる共融混合物の融点は、酸無水物が単独で示す融点よりも低いという事実が見出されてから、安価な固体酸無水物の共融混合物がエポキシ樹脂の硬化剤として用いられるようになった。

ところでこの共融混合物の一つの原料として無水マレイン酸が広く用いられるが、このものはエポキシ樹脂の安定性を悪くすると同時に、硬化した樹脂を着色させるという欠点がある。

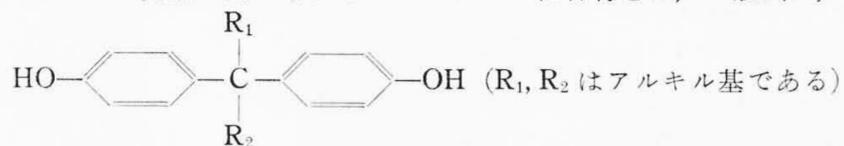
この発明は、酸無水物の共融法の原理を応用したものであるが、いままでの共融混合物をはるかにしのぐ特性をもつエポキシ樹脂の硬化剤を提供することができる。

この発明ではエポキシ樹脂の硬化剤として、有機多塩基酸無水物と、ジフェノール化合物との混合物を溶融して作った共融混合物を用いることに特長がある。

酸無水物としては、従来も用いられていた無水マレイン酸、無水コハク酸、無水フタル酸、無水テトラヒドロフタル酸などのきわめ

て一般的でしかも安価なものを用いることができる。

またこの発明で用いられるジフェノール化合物とは、一般式が、



で示されるもので、2,2'-ビス(4-ヒドロキシフェニル)プロパン、2,2'-ビス(4-ヒドロキシフェニル)ブタン、2,2'-ビス(4-ヒドロキシフェニル)イソペンタンなどを具体例としてあげることができる。

もちろん酸無水物およびジフェノール化合物は、それぞれ1種または2種以上の混合物で用いることができる。

この発明によれば、ジフェノール化合物のフェノール性水酸基を利用しているのに、酸無水物と反応せず、そしてまたカルボキシル基とも反応しないので、硬化剤組成物の安定性がよくなり、またフェノール性ヒドロキシル基は常温ではエポキシ樹脂とも反応しないので、硬化剤を混合したエポキシ樹脂を長期間保存することができるという利益が得られる。

また無水エンドメチレンテトラヒドロフタル酸と、無水メチレンテトラヒドロフタル酸との1:1共融混合物の融点は70°Cであるのにたいし、その共融混合物80部と、2,2'-ビス(4-ヒドロキシフェニル)プロパン20部とからなる共融混合物の融点は、10°Cであって室温で液体である。