
最近の車両制御特集

新幹線試験電車の電気ブレーキ.....	59
チョッパ式電気車の誘導障害に関する理論的考察.....	64
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.....	69
電気車両補助電源用高圧インバータ.....	74
最近の自動運転装置.....	79
空気ブレーキを用いた再粘着促進装置 "HIRAD" の開発	84

新幹線試験電車の電気ブレーキ

Electric Brake System and Equipments of Proto-type Coaches for New Sanyō Line

織田 沢 信 昭* 坪 井 孝** 和 島 幸 一***
 Nobuaki Otazawa Takashi Tsuboi Kōichi Wajima

要 旨

最高運転速度 250 km/h を目標とした日本国有鉄道新幹線試験電車は昭和 44 年 3 月完成し、各種性能試験が行なわれている。この電車では高速運転の対策として種々の新しい試みがなされているが、特にブレーキ性能の向上、保守の簡素化などのためサイリスタチョップ装置による発電ブレーキ電流の連続制御、うず電流ブレーキ装置による非粘着ブレーキ制御など電気ブレーキとして全く新しい方式が開発された。本稿ではその回路方式および装置について述べている。

1. 緒 言

日本国有鉄道では東海道新幹線に引き続き、これを岡山～広島と逐次延長して昭和 50 年度には博多までの開通を目標に最高運転速度 250 km/h の山陽新幹線新設計画を進めている。このための電車と現新幹線電車のモデルチェンジを検討するため、新幹線試験電車 2 両（以下単に試験電車と称する）が去る 3 月末完成した。

この試験電車では高速化にともなう出力アップのほか制御性能の向上・保守の簡素化、信頼度の向上などのため現新幹線電車に比較して各部に飛躍的な改良が図られているが、最も重要な課題としてブレーキ性能の向上があげられる。すなわちブレーキ距離はブレーキ力を一定にしても速度の 2 乗に比例して増加する。また車輪とレールとの粘着力は速度とともに双曲線的に減少するためブレーキ力を速度とともに低下させないと滑走をおこすことになる。なお粘着力は天候、レール条件などによって変化するため余裕をもたせることが望ましい。これらの対策とブレーキの速応性をねらって、従来のカム軸制御器による発電ブレーキ階段制御⁽¹⁾にかわる新方式として

- (1) チョップ装置による発電ブレーキの連続制御（バーニア方式）
 - (2) うず電流ブレーキ装置による非粘着ブレーキが開発された。
- 以下制御方式を主体に制御・試験結果の一部について述べる。

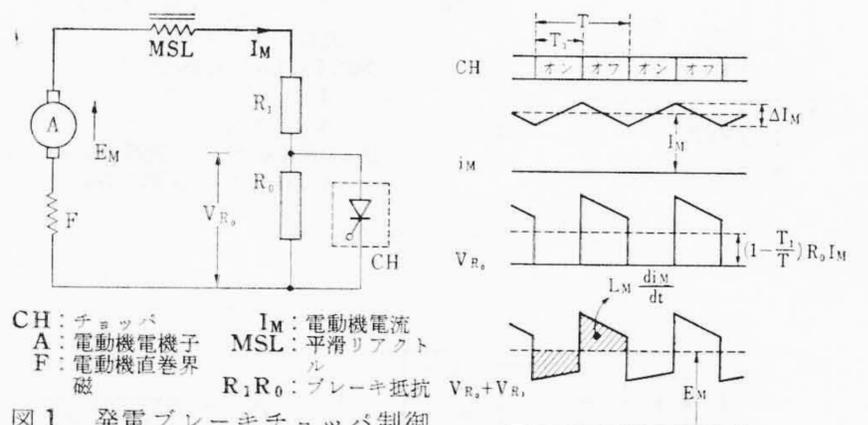
2. 発電ブレーキの連続制御方式

2.1 発電ブレーキのチョップ制御

図 1 に発電ブレーキチョップ制御の基本回路、図 2 にその原理的動作波形を示す。ブレーキ抵抗 R_0 に並列接続したチョップ CH をオンオフ制御し、その通流率 $\gamma = T_1/T$ を列車の減速に従って連続的に制御すれば、(1)式に示すように回路抵抗 R はブレーキ抵抗 R_0 とチョップ CH の合成抵抗 R_{0CH} として連続的に制御される。

$$R = R_1 + R_{0CH} = R_1 + R_0(1 - T_1/T) = R_1 + R_0(1 - \gamma) \dots (1)$$

R の連続制御によって、粘着限界に沿ってブレーキ電流を連続的に制御すれば、ブレーキ距離の短縮、滑走発生チャンスの低減、無接点制御による保守の簡素化などのほか滑走発生時チョップ通流率 γ の絞り込みによる再粘着制御やディスクブレーキとの協調制御なども容易になる。



CH: チョップ
 A: 電動機電機子
 F: 電動機直巻界磁
 I_M : 電動機電流
 MSL: 平滑リアクトル
 $R_1 R_0$: ブレーキ抵抗

図 1 発電ブレーキチョップ制御基本回路

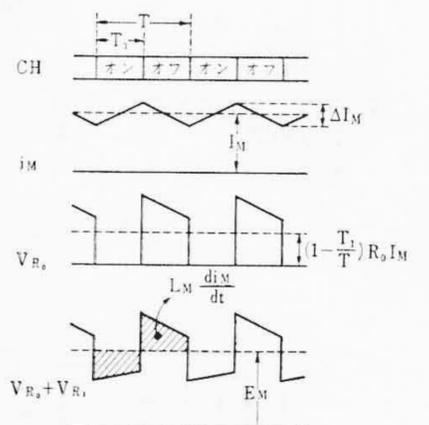


図 2 動作原理波形

2.2 チョップによる発電ブレーキのバーニア制御

2.2.1 チョップの制御容量

図 1 においてブレーキ抵抗を一括 (R_1 も R_0 にふくむ) して制御すれば、チョップの電流容量は最大ブレーキ力に相当する主電動機電流 I_{Mmax} 、電圧はチョップオフ時にブレーキ抵抗 R_0 にかかる (2) 式で示す電圧 E_{R_0max} で定まり、チョップの容量は両者の積となる。

$$E_{R_0max} = R_0 I_{Mmax} \dots (2)$$

またブレーキ抵抗 R_0 の値は最高速度において要求される最弱ブレーキ力で定まり、これに対応するブレーキ電流を I_{Mmin} 、最高速度において I_{Mmin} に対応する主電動機電圧を E_{Mmax} とすれば (3) 式で示される。

$$R_0 \geq E_{Mmax} / I_{Mmin} \dots (3)$$

試験電車では MT 916 形主電動機 (250 kW, 650 V, 420 A) 8 台をブレーキ時に 2 個直列、4 回路独立に接続して制御し、最弱ブレーキを粘着限界の約 1/2 とすれば、 $I_{Mmin} \approx 280$ A, $I_{Mmax} \approx 790$ A, $R_0 \approx 4 \Omega$, $E_{R_0max} \approx 3,160$ V となり、2 両 1 ユニット当たり 790 A \times $3,160$ V \times 4 群の大容量となり容積、重量などとも現状では車両へとう載の実現性がない。実際にはチョップ制御ではブレーキ電流が脈動するのでチョップの容量はさらにその分だけ大きくなる。

2.2.2 チョップ制御における脈流率

主電動機の脈流率は、整流火花の点から小さいことがよいことは当然であるが、チョップ制御では (2) 式で示すようにブレーキ抵抗 R_0 の電圧がそのままチョップに印加されるのでその容量の点からも小さくすることが望ましい。脈流率 P は (4) 式で示され、チョップ並列抵抗 R_0 に比例し、チョップ周波数 $1/T$ および回路のインダクタンス L_M に反比例する。

$$P = \frac{R_0 T}{2L_M} \cdot \gamma(1 - \gamma) \dots (4)$$

チョップ周波数を駆動装置との機械的共振をさけるため力行と同

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

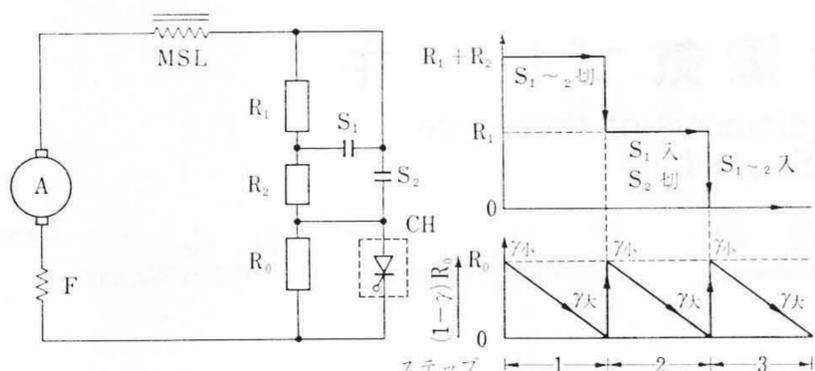


図3 チョップによる発電ブレーキバーニア制御
 R_0, R_2 : ブレーキ抵抗器 γ : チョップの通流率
 $S_1 \sim S_2$: 接触器 その他: 図1の記号に同じ

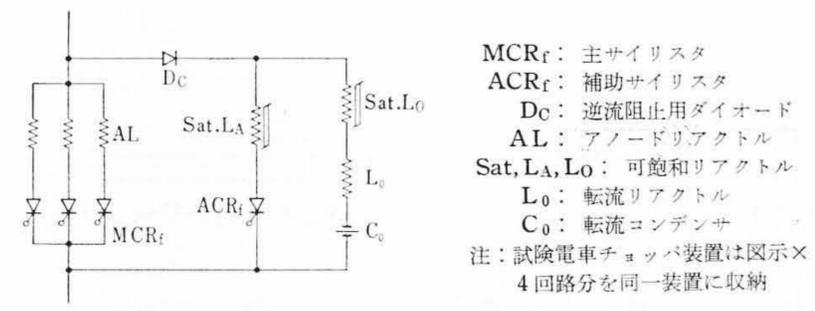


図4 チョップ装置主回路

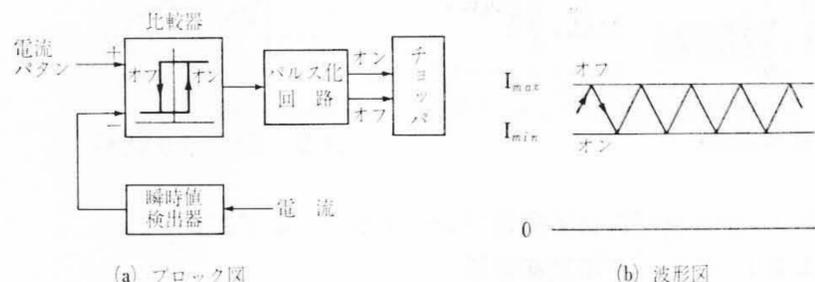


図5 瞬時値制御方式原理図

様 120 Hz とし、平滑リアクトルは力行用のそれを流用するものとすれば試験電車では $p \approx 75\%$ となり問題がある。

2.2.3 バーニア制御方式

以上のように非分割チョップ制御はチョップ装置の容量および主電動機の脈流率上問題がある。これを解決するため図3に示すようなチョップによる発電ブレーキのバーニア制御方式を開発した。

この方式はブレーキ抵抗を複数段に分割し、その一区分にチョップを並列接続し、ほかの抵抗区分は接触器（または別のスイッチング回路で） S_1, S_2, \dots 逐次短絡してゆく。制御方法は(b)に示すようにチョップによる抵抗 R_0 の連続制御と、接触器 S による抵抗区分 R_1, R_2, \dots の階段制御を交互に行なう。

このようなバーニア制御方式を採用することにより、チョップの並列抵抗 R_0 はほぼ分割数分の一に小さくできるので、チョップ容量および主電動機脈流率を大幅に低減できる。試験電車ではブレーキ抵抗を7分割し、チョップを $790A \times 650V \times 4$ 群とし、脈流率の最大を12%程度とした。

2.2.4 チョップ主回路構成

チョップ回路には種々の方式があるが、図4に示すような反発パルス形⁽²⁾を用いた。この方式の特長は補助サイリスタ ACR_f を点弧して転流コンデンサ C_0 の電荷を反転させる時、転流電流が主サイリスタ MCR_f を流れないことであり、 MCR_f は主回路電流のみ通電できる電流容量をもてばよい。可飽和リアクトル Sat, L はスイッチングパワー抑制のために設けた。

2.3 チョップ制御方式

バーニア式主回路を前提に考えると、制御装置は接触器によって

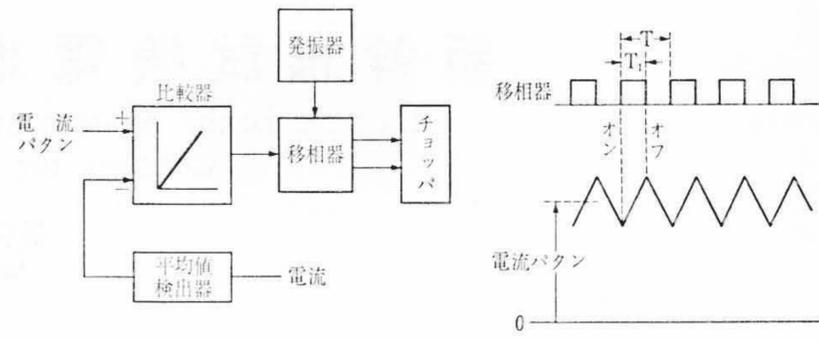


図6 平均値制御原理図

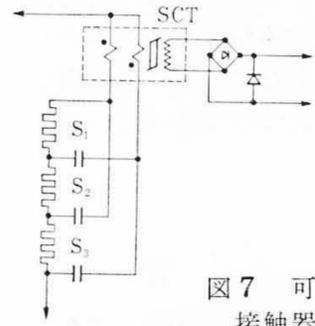


図7 可飽和変流器 SCT による接触器の閉路検出法

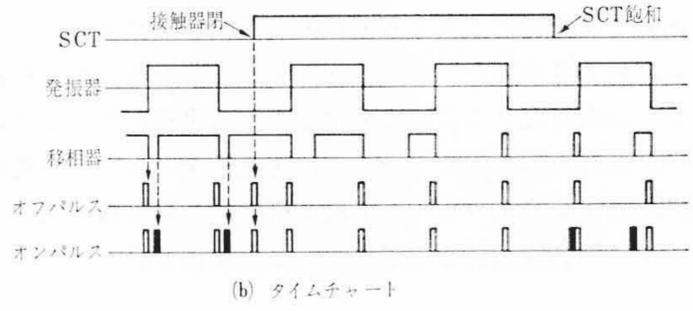
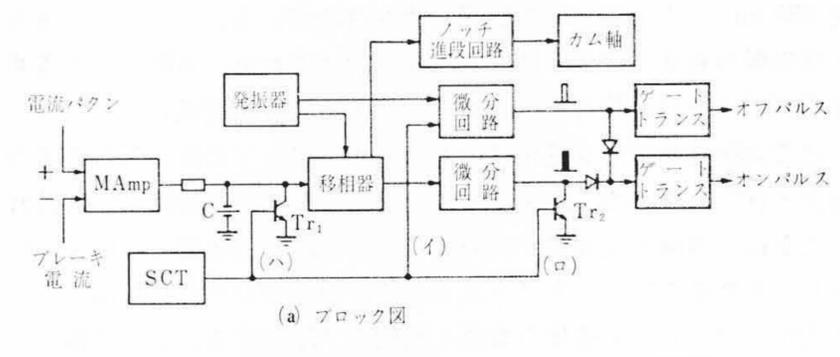


図8 制御ブロック図とノッチ進段タイムチャート

固定抵抗が短絡された際の電流制御が円滑に行なえるものでなければならない。チョップによる電流制御方式としては、定電流制御系の応答時間のきわめて短い瞬時値制御と、適当に遅れ時間をもつ平均値制御が代表的である。瞬時値制御方式⁽³⁾は図5に示すように、電流パタンとして上限 I_{max} 、下限 I_{min} を与えておき、この間でチョップをオンオフする方式である。この方式では制御系自体に瞬時応答性を有するので、接触器短絡によるノッチ進段時の電流制御は円滑に行なえるが、電流の脈流幅を一定とした制御のため、チョップ周波数が通流率 γ の変化に従って大幅に変化し、駆動系などに対して有害な周波数域を通過するおそれがある。

平均値制御方式は図6に示すように、チョップの動作周波数を与える発振器と通流率を制御する移相器とを設けておき、電流パタンとブレーキ電流(平均値)との偏差により移相器を制御する方式である。この方式では動作周波数は任意に固定できるが本質的に電流制御の速応性が劣るので、特にノッチ進段時の電流制御が問題となる。接触器投入のような急しゅんな外乱に対して電流のオーバーシュートを防止するため、図6の負帰還制御の基本系に抵抗短絡動作に即応する機能を付加する方式を開発した。すなわち図7に示すような可飽和変流器 SCT によって接触器の閉路を検知し、2次側に一定時間(約 50 ms) のパルス状の出力を得、図8のブロック図に示す各部

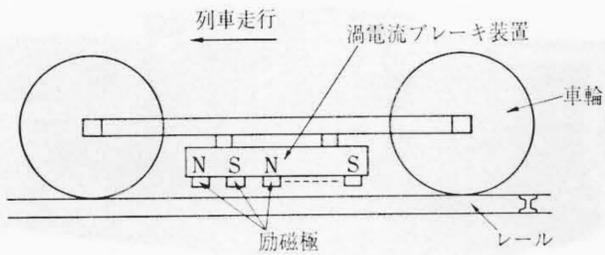


図9 うず電流式レールブレーキ原理図

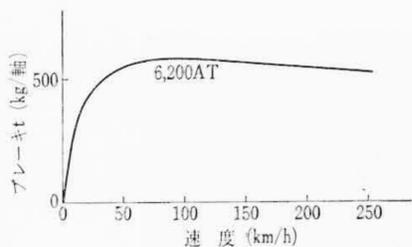


図10 うず電流ブレーキ速度-ブレーキ力特性

にその信号を入れて次の動作を行なわせる。

- (イ) オフパルスを一発出し、チョップをオフする。
- (ロ) Tr_2 によって移相器からのオン信号を遮断する。
- (ハ) Tr_1 によって制御系の安定化コンデンサCの電荷を放電して移相器をリセットする。

その結果図8(b)に示すようにSCTの出力がある間(約50ms)は、チョップは最低通流率で動作し、移相器入力電圧が Tr_1 によって完全にリセットされた後、SCTが飽和してその出力ゼロとなれば(ロ)(ハ)のロックが解かれ、再び比較器による定電流制御が開始される。以上のように、強制的にチョップを絞る機能を付加して平均値制御の応答性を補いノッチ進段時の円滑な電流制御を実現した。

3. うず電流式レールブレーキ

3.1 原理

図9はうず電流式レールブレーキの基本構成を示したものである。レールに対向して磁束を発生する励磁極を列車進行方向に直線状に複数個並べて取り付け、常時は無励磁にしておく。ブレーキ時にこの励磁極のコイルを発電ブレーキ電流によって付勢し、磁極の発生する磁束とレールとの相対速度によってレールに生ずるうず電流損によってブレーキ力を得る。レール面をしゅう動せず、レールと車輪踏面との粘着力に関係なく、前述の発電ブレーキ電流によって連続的にブレーキ力を制御できるなど多くの特長を有する全く新しい非粘着ブレーキ装置である。

3.2 基本特性および制御

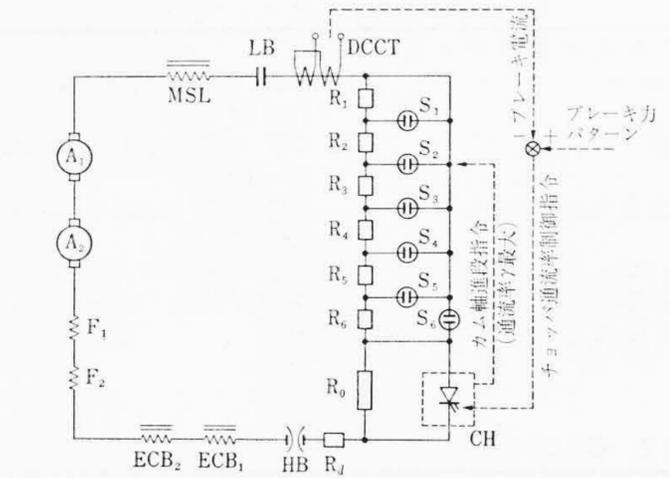
ブレーキ力の速度特性は図10にその一例が示されるように、励磁電流を一定とすれば速度50~250 km/hの実用広範囲ではほぼ一定である。またブレーキ力は励磁電流にほぼ比例して増大することが知られた。

したがって1台車あたり左右2個のうず電流ブレーキ装置の励磁コイルを直列に接続し、これと発電ブレーキ回路を直列にして、発電ブレーキ電流を所要パターンに応じて制御すれば同時にうず電流ブレーキのブレーキ力も制御される。

4. 試験電車のブレーキ力制御

4.1 試験電車の電気ブレーキ主回路

以上述べたことを総合して試験電車の電気ブレーキ主回路構成は図11に示すように決定された。図はブレーキ1回路あたりを示し2両1ユニットでは図の回路が4群独立に形成され万一の事故時には一群ごとに開放が可能で安全である。なおうず電流ブレーキは全く新しい方式であるので、レール温度上昇、信号への影響など現車



- A: 主電動機電機子
- F: 主電動機直巻界磁
- CH: チョップ装置
- DCCT: 直流変流器
- ECB: うず電流ブレーキ
- HB: 高速度しゃ断器
- LB: 断流器
- MSL: 平滑リアクトル
- R: ブレーキ抵抗
- S: カム接触器

図11 試験電車電気ブレーキ主回路

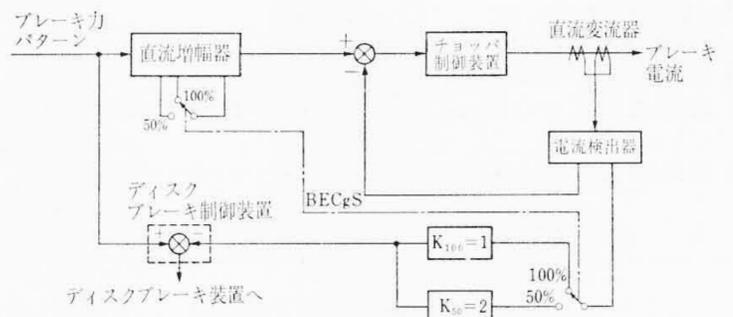
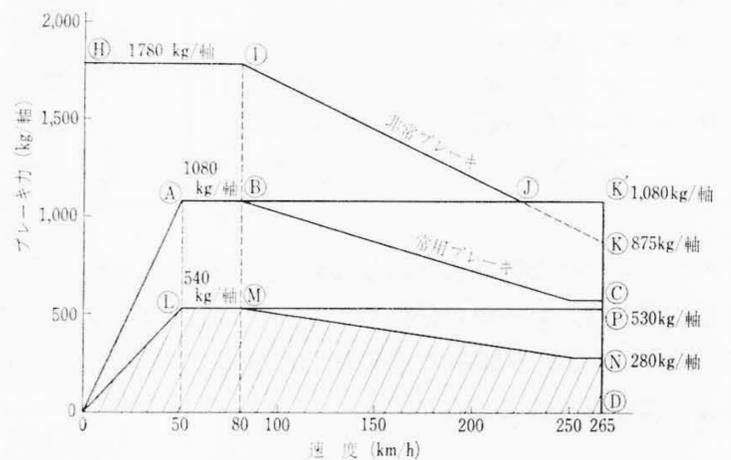


図12 ブレーキ力制御系ブロック図



1. 常用ブレーキ時の発電ブレーキ力 折線 O L M N P (斜線部)
2. 常用ブレーキ時の ECB ブレーキ力 折線 O L M N C B A O
3. 非常ブレーキ力 (全ブレーキ力) 折線 O H I J R D
4. 非常ブレーキ時の発電ブレーキ力 折線 O L M P Q
5. 非常ブレーキ時の ECB ブレーキ力 折線 O L M P R D B A O

(発電ブレーキ, うず電流ブレーキ各50%分担の場合)

図13 速度-ブレーキ力パターン

試験によって確認されるべき未知の分野があるので発電ブレーキのみでも全ブレーキ力が得られるように計画し、うず電流ブレーキも全ブレーキ力に対し50~70%分担に切換え制御できるよう計画されている。図の点線で示す部分は関連制御系統を参考までに併記したものである。

4.2 ブレーキ力の制御

図12はブレーキ力制御系のブロック図を、図13は発電ブレーキ・うず電流ブレーキそれぞれ50%のブレーキ力を分担する場合のブレーキ力パターンを示したものである。高速でブレーキ力パターンが低下しているのは粘着係数に従ったものである。また速度50 km/h以下および非常ブレーキでは一部ディスクブレーキでまかなうが50 km/h以上の常用ブレーキではすべて電気ブレーキでブレーキ力を得る。また図12に示すように電気ブレーキ力の不足分は自動的に

表1 RS907形式チョップ装置

素子形式および素子構成	
主ダイオード	CO1 (2,500 V, 800 A) 1S×1P×4U
主サイリスタ	CH 03 V (1,300 V, 400 A) 1S×3P×4U
消弧用サイリスタ	CH 03 V (1,300 V, 400 A) 1S×1P×4U
冷却方式	油浸, 外壁風冷式(油循環)
定格最大直流電源	780 A×4回各 (脈流平均値)
定格最大直流電圧	900 V (脈流平均値)
定格周波数	120 Hz

表2 CH03V形サイリスタのおもな定格および特性

定格せん頭逆耐電圧 (V) peak	1,300
定格せん頭過渡逆耐電圧 (V) peak	1,450
定格せん頭順阻止電圧 (V) peak	1,300
定格平均順電流 (A) ave	400 (単相半波180° 通流, T _B : -40~75°C 抵抗負荷)
定格瞬時過電流 (A) peak	8,000 (10ms 通流, 正弦半波1サイクル)
最大順電圧降下 (V) peak	1.8 (単相半波せん頭値 1,250A, 通流角 180°)
動作接合温度 (°C)	-40~+115
接合冷却体間熱抵抗 (°C/W)	0.04
ターンオフタイム (μs)	50
最大順電圧上昇率 (V/μs)	50 (T _j : +115°C, 順電圧波高値=0.5 × 定格順阻止電圧)
最大順電流上昇率 (A/μs)	100 (ターンオン直前の電圧=0.5 × 定格順阻止電圧)
加圧荷重 (kg)	1,000

表3 うず電流ブレーキ仕様

	50% 分 担 用	70% 分 担 用
連続電流 (A)	110	80
最大電流 (A)	460	315
ブレーキ力 (kg)	540	755
標準ギャップ (mm)	6.5	6.5
極数	6	8

ディスクブレーキで補うようにして安全を図っている。発電ブレーキとうず電流ブレーキの分担率の切換えは図12の切換スイッチ BE CgSにより電流制御系の帰還量を切換えることにより容易にできるように考慮されている。

5. 電気ブレーキ装置

5.1 チョップ装置

5.1.1 仕様および構造

おもな仕様を表1に、外観を図14に示す。サイリスタ(両面放熱式ユニットセル)はチョップ1回路ごとにスタックとし、2両4回路分を同一油タンク内に収納し、転流装置および制御装置をタンクの周囲に配し一体構造とした。

おもな特長は下記のとおりである。

- (1) バーニア制御方式を採用し、エレメント直列数は1である(図4参照)。
- (2) 大容量高速度サイリスタ素子を使用し、上記(1)とあいまって素子使用個数の低減および転流装置の小形化を図っている。
- (3) 油浸(タンク内油循環)、風冷方式を採用し、耐雪・防じん・冷却効果の増大とともに保守の簡素化を図っている。
- (4) 停電時冷却用の補機(油ポンプ, 送風機)が停止しても非常ブレーキ1回に耐えるように計画されている。

5.1.2 CH03V形サイリスタ

チョップに要求される高速度サイリスタはターンオフ時間の切りつめなどスイッチング特性に主眼をおくため大電流, 高耐圧化

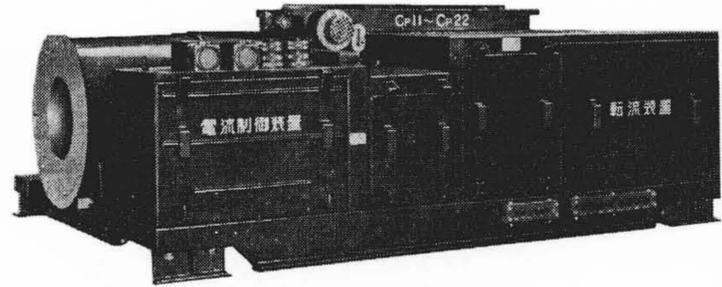


図14 サイリスタチョップ装置

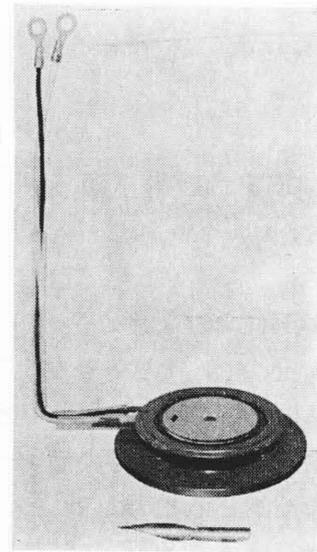


図15 CH03V形サイリスタ

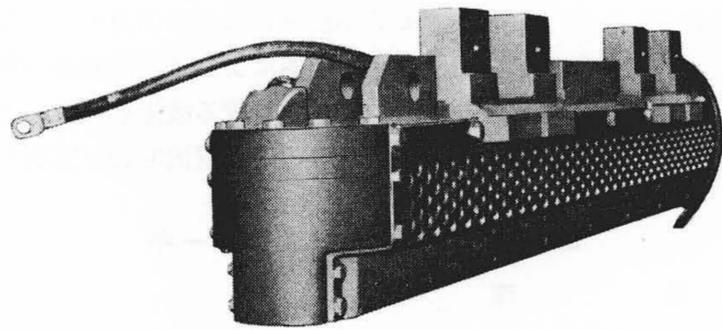


図16 うず電流ブレーキ

が一般サイリスタに比べ困難となる。

- (1) スwitching特性と素子の容量特性との協調
- (2) 高信頼度の確保

に開発の主眼をおき400A-1,300Vターンオフ時間50μsのCH03V形サイリスタを開発した。容量特性としての素子の耐圧, 順特性はスイッチング特性の一つであるターンオフ特性と協調させる必要がある。特にターンオフ特性を支配する接合ベース層の少数キャリアのライフタイムの制御に関係し、大容量素子では特に高度の制御が必要である。このライフタイムを制御する重金属の接合内における量とその濃度分布をアイソトープトレーサによる方法で確認し耐圧特性と濃度分布, 順特性と量の最適値を決定し特性の協調をとった。大電流化にともなう順損失の増大の処理はユニットセル構造による両面熱放散方式によった。信頼性についてはブレーキチョップのような間欠的な負荷条件に特に留意し、負荷変動にともなう接合温度変化による機械的なひずみなどに特に設計上の考慮を払い加速寿命試験によってじゅうぶんその信頼度を確保された。表2はこのエレメントのおもな仕様, 図15はその外観を示したものである。

5.2 うず電流ブレーキ装置

表3はうず電流ブレーキのおもな仕様を, 図16はその外観を示したものである。台車下にレールに対向して取り付けられるため, 約10g近くの振動を受け, 雨雪の浸入, 飛石の衝撃などを受けるため高い信頼度が要求される。おもな特長は下記のとおりである。

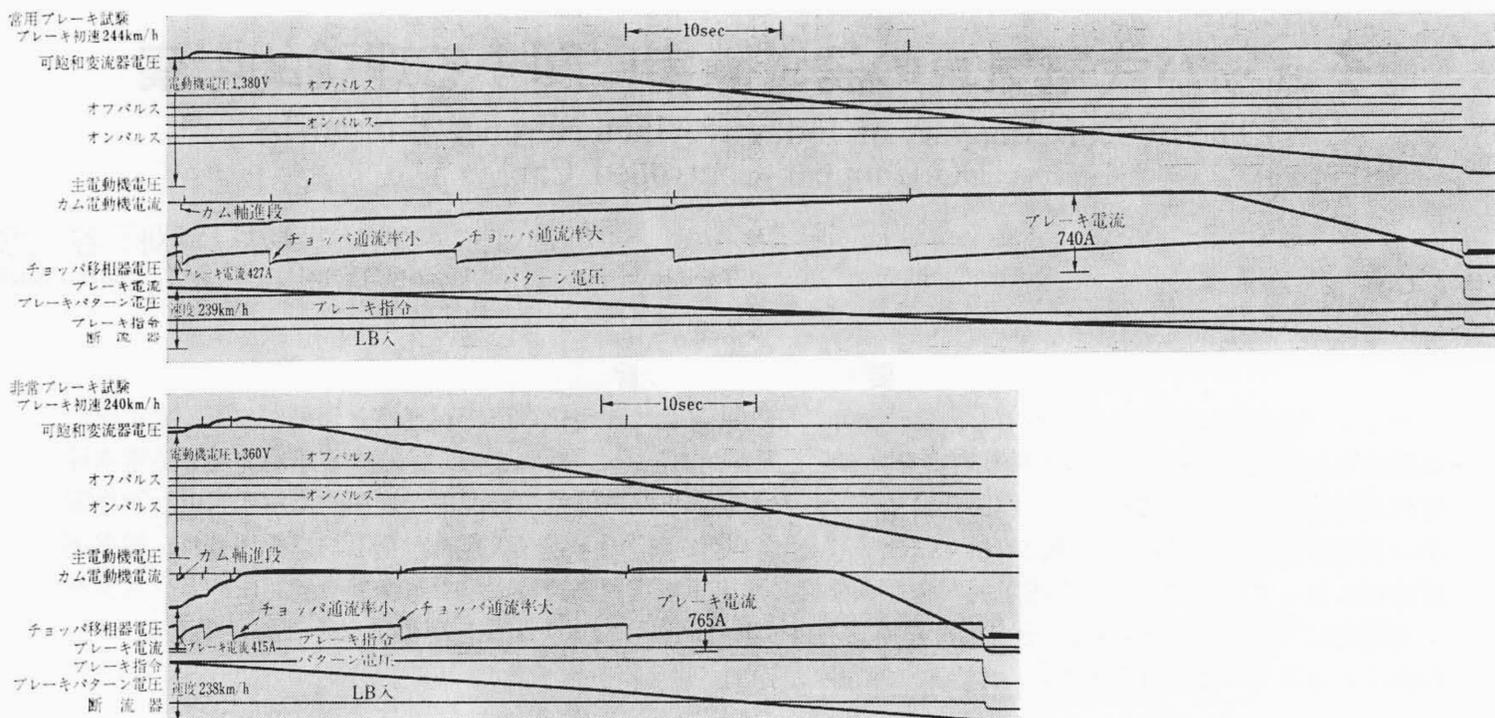


図17 発電ブレーキ制御オシログラム

- (1) きびしい制限寸法の中で大きなブレーキ力を得るため磁極はコイル素線、外装ともに耐熱フィルム絶縁(NOMEX)がほどこされている。
- (2) 保護カバー(両端)を設け、かつコイルとの間にはシリコンゴムを充てんした。また側面にも保護カバーを設けている。
- (3) レールとのギャップ調整のため約1.5mmピッチのセレーションを設けた。

6. 試験結果

現車試験は昭和44年7月以降行なわれるが、これに先行して日立製作所および日本国有鉄道技術研究所において地上組合せ試験が実施され良好な結果を得ている。図17は日本国有鉄道技術研究所における地上組合せ試験時の常用ブレーキおよび非常ブレーキのブレーキ電流制御状態を示すオシログラムの一例であり、バーニア式チョップ制御が円滑に行なわれていることがわかる。また主電動機脈

流率も最大13%程度で計算値とよく一致し、ディスクブレーキとの協調制御も良好であった。

7. 結 言

以上新幹線試験電車の高速化に対する新しい電気ブレーキの制御方式および装置について述べた。一部の試験結果は本文で若干ふれたように所期の性能を得ているが、現車による長期試験はこれからであり、新方式にとまなう未知の問題点があるかと考えられ、今後さらに検討を進めてゆく所存である。

終わりに本装置の開発にあたり終始ご指導をいただいた日本国有鉄道車両設計事務所、鉄道技術研究所、浜松工場および高速車両研究会第3分科会の関係各位に厚くお礼申しあげる。

参 考 文 献

- (1) 益富, 山田, 織田沢: 日立評語 46, 869 (昭39-5)
- (2) 刈谷, 坪井, 川上: 日立評論 48, 1239 (昭41-10)



特 許 の 紹 介



特許第429855号(特公昭39-4908号)

刈谷志津郎・高岡 征

速 度 照 査 装 置

この発明は、たとえば列車の速度が、ある規定速度以上になったことを検知する装置である。

車軸1に取り付けられたパルス発生器2により得られるパルスに基づき、フリップ、フロップ5および単安定マルチバイブレータ7を介して速度に応じた検出パルスを作成する。

また、フリップ、フロップ5の他方の出力により時限 t_2 を有する単安定マルチバイブレータ8を駆動する。そして、上記の検出パルスが、この単安定マルチバイブレータ8の動作中に存在するか否かをアンド回路11によって検出する。10はノット回路を示すものである。

すなわち、上記の検出パルスのパルス間隔と上記の時限 t_2 を比較することによって速度を比較するものである。

上記のパルス間隔が時限 t_2 より長ければ、検出パルスが単安定マルチバイブレータ8の不動作中に生じ、アンド回路11'を成立せしめ、フリップ、フロップ13を駆動する。それによって、スイッチング回路14を介してリレー15を作動し、列車の速度を規定速度まで高めるよう、制御装置(図示されていない)に働きかける。

また、速度が大きく検出パルスのパルス間隔が時限 t_2 より短いときは、アンド回路11が成立し、フリップ、フロップ13を反転動作せしめ、リレー15が釈放される。

このように、この発明では簡単な論理要素の構成によって列車の速度が規定速度を越えているか、否かを検出できる。規定速度の変

更も、フリップ、フロップ8の時定数を決めるRCの定数の変化によって簡単に行なうことができる。

従来のこの種の検知装置のような基準速度関数発生器、それを列車の速度と比較する比較器およびこれらに付随する種々の機器が不要となり全体の構成がきわめて簡単になる。(前川)

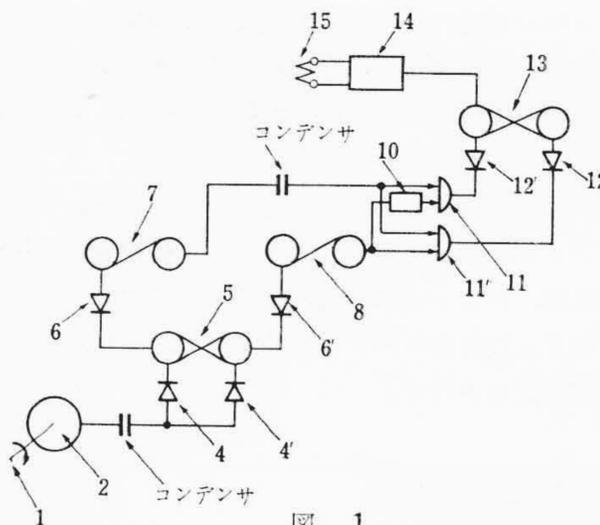


図 1