

サイリスタチョッパを用いた電気車のパルス制御

Pulse Control of Electric Cars By Thyristor Chopper Circuits

刈谷 志津郎* 市川 紀明*
Shizuo Kariya Toshiaki Ichikawa

坪井 孝** 川上 直衛***
Takashi Tsuboi Naoe Kawakami

要 旨

サイリスタチョッパを用いた電気車のパルス制御方式は、直流車両を制御対象とした主回路無接点化方式の最も有力な手段である。特に大容量サイリスタの出現と、その制御技術の進歩はこれの実用化をさらに促進しつつある現状である。これらの研究開発の大きな成果として、本稿に示した1,500V回路における現車試験の成功をあげることができる。

1. 緒 言

ほぼ定形化され、完成された抵抗制御方式を前提として、直流車両に関する技術的努力は、最近、機器の小形軽量化、高信頼度化、保守の簡易化の面に注がれている。その具体的方法として半導体素子を多用する制御回路の無接点化がとりあげられ、その成果には大いに見るべきものがある⁽¹⁾。この傾向は単に直流車両にとどまらず、電気車両一般にいえることであるが、一方、半導体およびその関連技術の進歩、特にサイリスタの大容量化とその制御技術の発展は、無接点化の対象を主回路機器にまで広げようになり、さらに新動力方式の研究が真剣に行なわれるにいたった。

日立製作所は、かねてからその総力をあげて各種新動力方式の開発研究を進め、すでに交流車両としては位相制御方式による主回路無接点化方式を完成し、わが国最初の実用機である日本国有鉄道納ED93形交流電気機関車を製作納入したが⁽²⁾、直流車両を対象とした制御方式に関しても、各種の試験研究を進め、最も有力な方式としてサイリスタチョッパを用いるパルス制御方式を取りあげ、その実用化研究を進めるにいたった。その結果、多くの技術的問題点を解決して実車に適用可能な方式を確立し、帝都高速度交通営団日比谷線において1,500V回路における実車試験に成功した。

本現車試験の成功は、まさに電気車主回路無接点化の時期到来を示すものであり、電気車両発展史上重要な意味をもつものといえることができる。

2. 電気車のパルス制御

2.1 パルス制御の原理

電気車のパルス制御は単に力行制御に対してのみならず、発電ブレーキ、回生ブレーキなどにも適用可能であり、電流、電圧、等価抵抗いずれの制御も可能であるが、力行制御時を例にとって図1によりその原理を説明する。

図1においてSは理想的なスイッチとする。このスイッチが閉じれば主平滑リアクトルMSLを含む主電動機回路に電車線電圧がかかり、架線より電流が流入し主回路電流は回路の時定数によって増加していく。この電流がある値になったときSを開けば、主回路にかかる電圧は零となり、主回路電流は循環ダイオードDFを通して循環しつつ同様に回路の時定数によって減衰する。このようにSのon-offを繰り返せば主回路電流はそれに応じて図示のように増減を繰り返し、その動作時の時間関係を適当に制御すれば回路電流の平

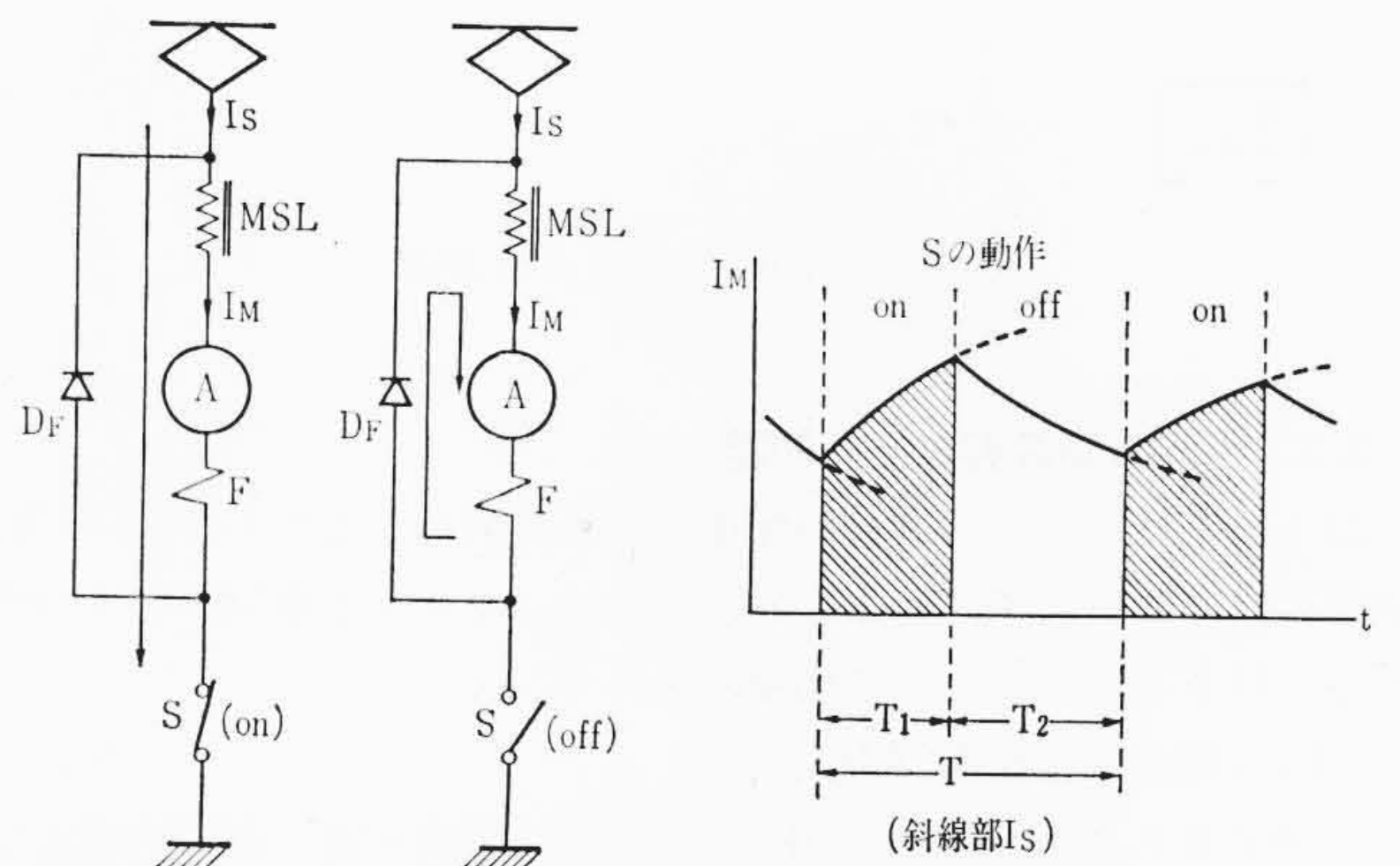


図1 パルス制御の原理(力行)

均値を所望の値に保つことができる。これは見方を変えるならば、負荷にかかる平均電圧を制御していることにもなる。一般の電車などにおいては、主電動機の発生する逆起電力に応じて主回路にかかる平均電圧を制御し、主回路電流の平均値が所望の値になるようにする。

このような方式の実際回路への適用は、当然のことながらスイッチSが、高速、高ひん度動作に耐え得ることが必須の条件であり、ここにサイリスタによる大容量チョッパ回路の出現により初めて実用化されるにいたった理由がある。

2.2 パルス制御方式の特長

パルス制御方式を電気車両に適用することによって、われわれが期待し得る効果として次のようなものをあげることができる。

- (1) 主回路のステップレス、連続制御、定電圧制御などが可能であり、電気車全体として制御の自由度が増す。
- (2) 電力消費量を減じ、変電所のせん頭負荷を減らすことができる。力行制御に採用すれば、直並列制御を行なう直流電車の直流加速部分において、従来の抵抗制御方式に比べ、チョッパ効率を100%とすれば33%の電力消費量低減となる。これは従来主抵抗器に消費された電力を零とすることより生ずるもので、当然、地下鉄トンネル内の温度上昇の抑制といった効果ももたらす。回生ブレーキを採用すれば、この傾向はさらに助長される。
- (3) サイリスタによる無接点開閉回路を用いるから、主回路の無電弧制御が可能となり保守の簡易化をはかることができる。
- (4) (1)項と同一の理由により、主電動機接続などの主回路構成上の自由度を増し、この面からの粘着特性向上など電気車性能の向上が期待できる。

* 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

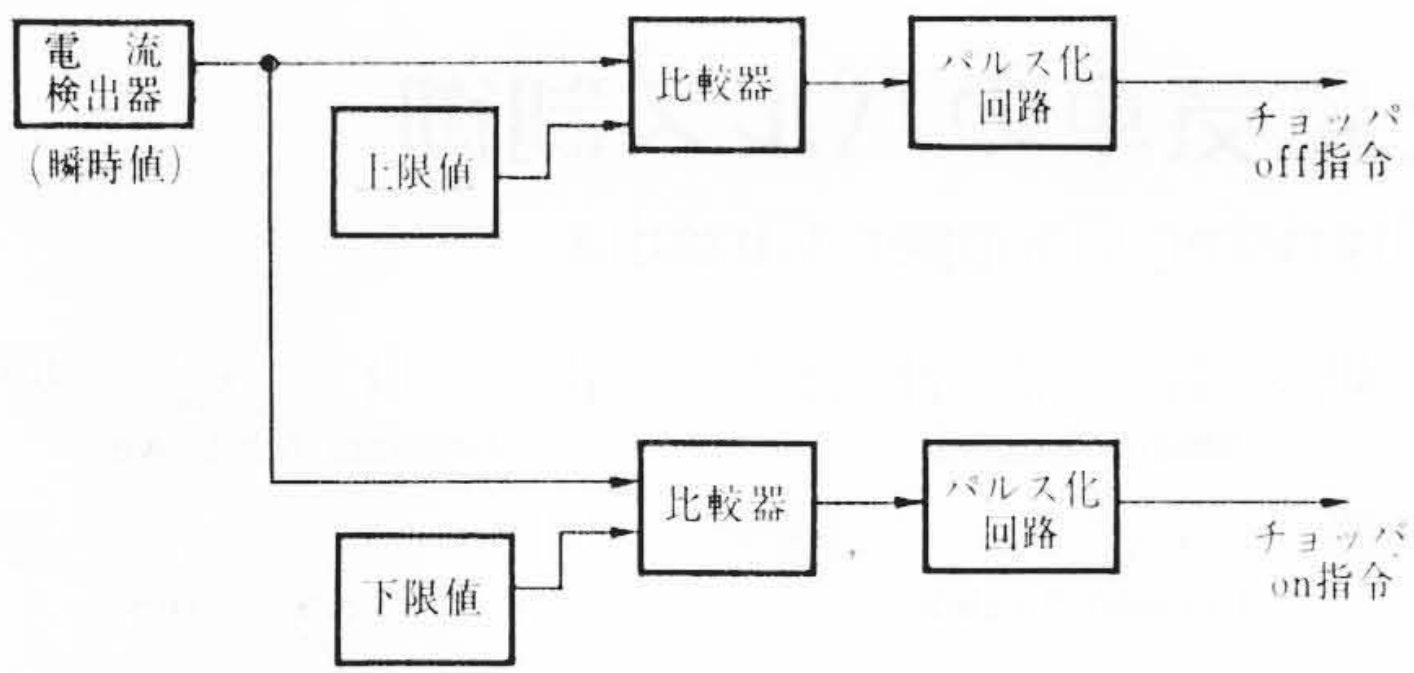


図2 瞬時値制御方式原理図

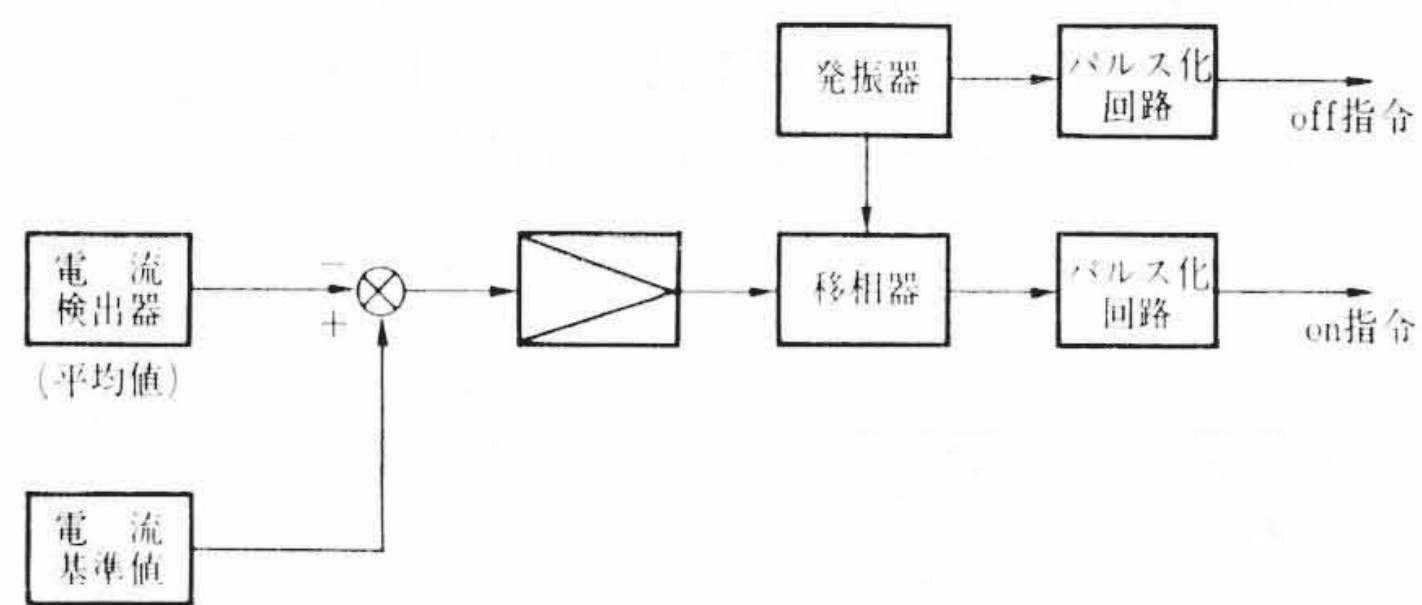


図3 平均値制御方式原理図

2.3 パルス制御実施上の問題点

以上のようにパルス制御の採用は多くの利点をもたらすが、一方、実際設計にあたっては従来と異なった検討を要する事項がいくつかある。以下それらについて簡単に触れてみよう。

(1) 電流—電圧制御方式

サイリスタチョップを用いた場合の電流—電圧制御方式として、瞬時値制御と呼ばれる一種の on-off 制御によって系を構成する方法と、平均値制御と呼ばれている、電流—電圧の平均値を検出して、それと基準値との偏差量によって動作周波数とか、一周期内の導通時間率を定めるように系を構成する方法が考えられている。

図2は瞬時値制御方式の動作原理を示すものである。このように主電流の上限値と下限値を定めておき、これと実際電流が一致したとき、サイリスタチョップへ on または off の指令を発するものであるから、主電流の脈流率は、列車速度、換言すれば主電動機逆起電圧、あるいは架線電圧などとは無関係に一定に保つことができる。一方、電流の瞬時値をとらえて制御指令を発するものであるから、機器の応答が早いことが必要であり、そのために一般的には雑音に弱い回路構成となりやすい。

平均値制御方式は一例として図3のように系を構成するものである。したがって通常のこの種の系のように、系の過渡応答、周波数特性などに十分注意する必要があるとともに、主電流脈流率が、主電動機特性に適合する範囲内で制御が行なわれるよう考慮する必要がある。しかし瞬時値制御方式に比べ電流検出端などに特に早い応答特性が要求されないから、車両用に適した安定な動作を期待することができる。

(2) 主電動機特性との関連

パルス制御方式を採用すれば、主電動機に流れる電流は従来と異なり、比較的高い周波数の脈流分を含んだものとなる。したがって主電動機の、整流を中心とする諸特性に対して悪い影響を与える方向にあるといえる。もちろん、主回路平滑リアクトルの値を大にすれば、主回路電流は純直流に近づくが経済的に問題であり、使用するチョップの特性と合わせて検討する必要がある。界磁回路に永久分路抵抗を設けることは整流上好ましいことであり、交流車両などに用いられている高脈流主電動機を使用するほうが全体として得策であろう。

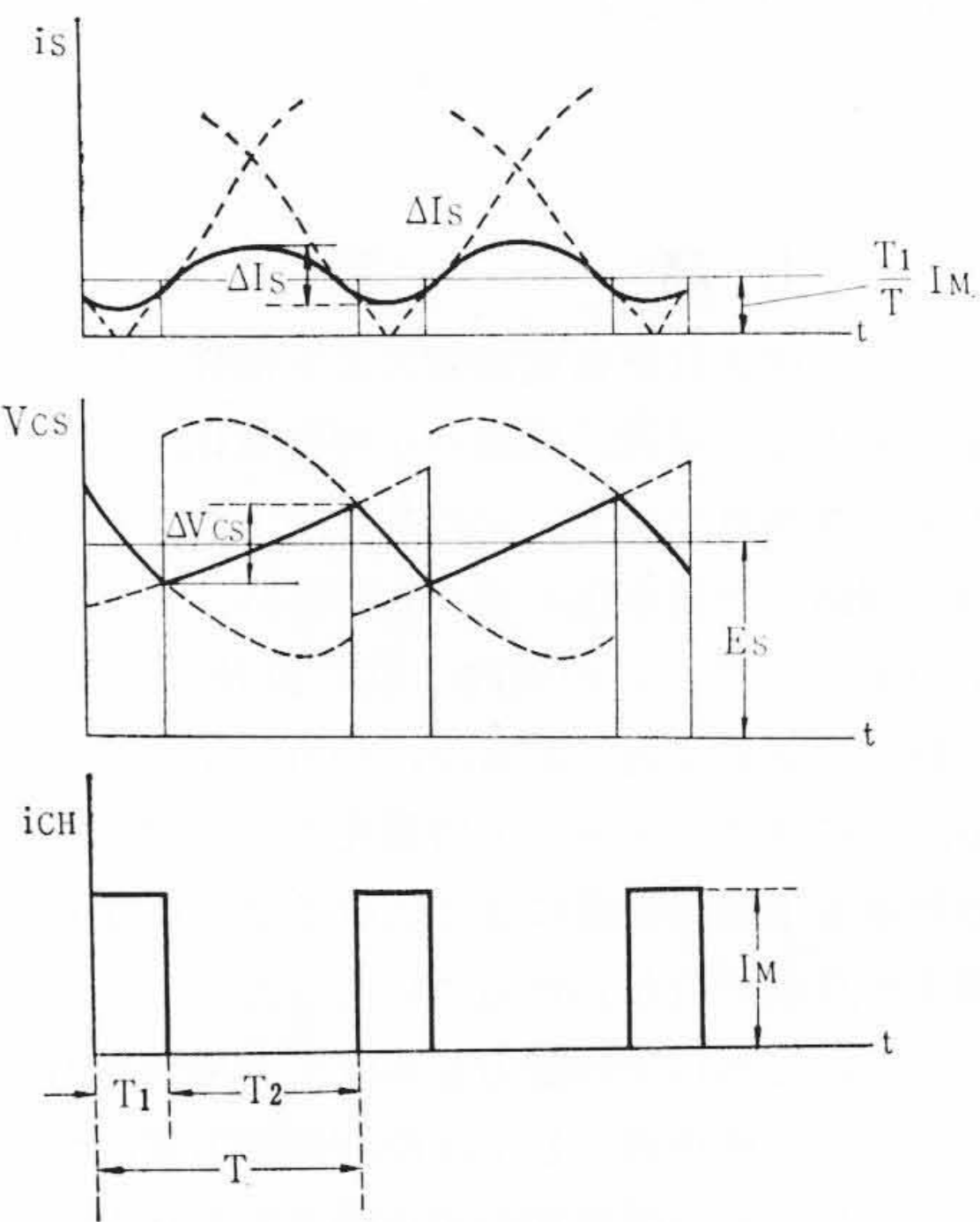
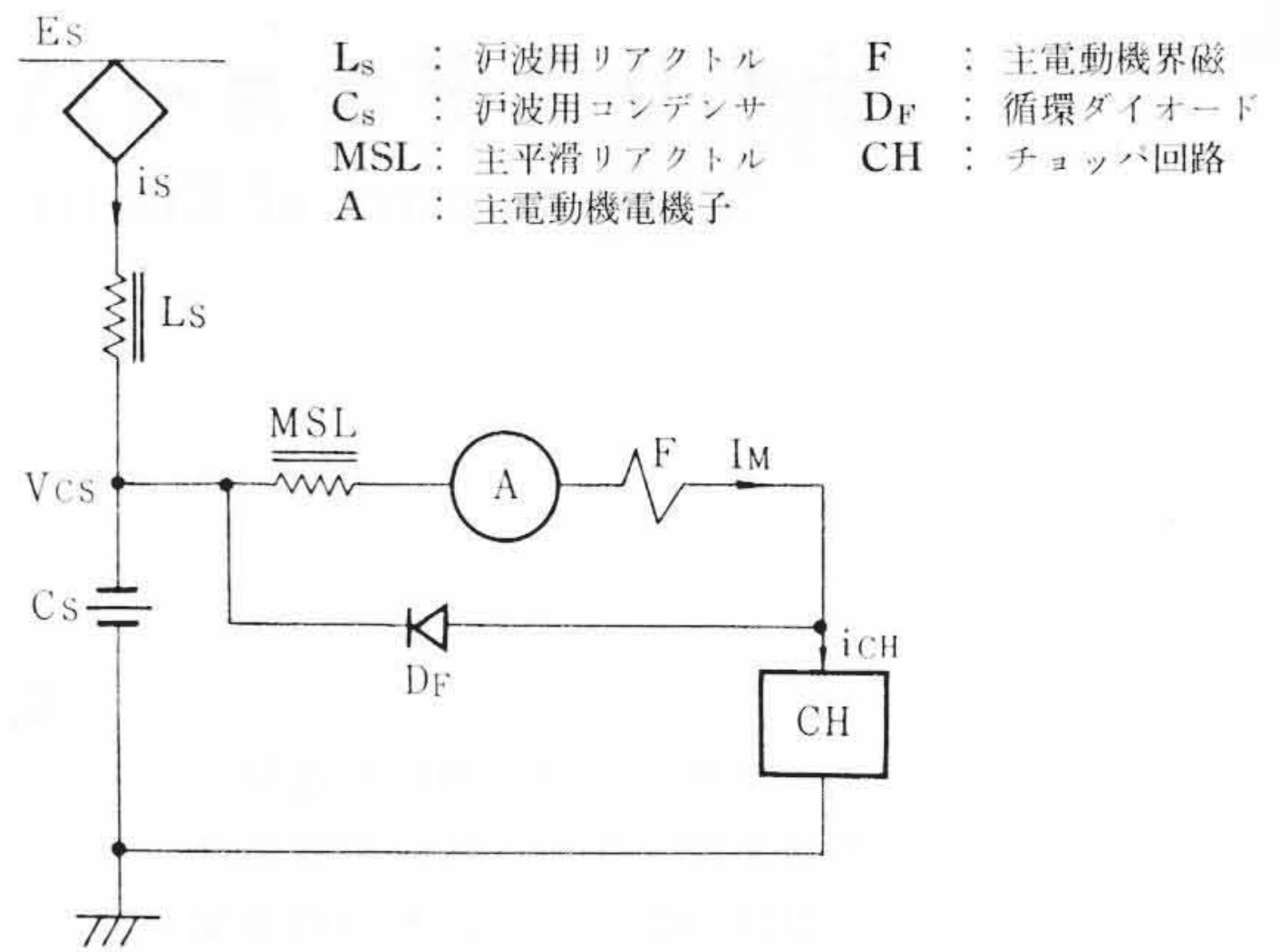


図4 主回路ろ波器の効果

(3) 誘導障害とその対策

たとえば図1のような力行制御回路においては、架線より流入する電流はチョップ回路を流れる電流と等しく、方形波的に断続する形となる。したがってきわめて多くの交流分を含むものとなり、誘導障害の発生が予想される。

これに対する一つの方策は図4のように電源側にろ波器をそう入することで、これにより架線電流は図示のように平滑化され、誘導障害度を軽減することができる。

この主回路ろ波器は誘導障害対策のほかにも次のような見地からも要求される。いまチョップによって主電流を遮断するときを考えると、電車線インダクタンスの効果によって高いサージ電圧が発生し、後述の転流コンデンサに過充電される状態が起きる。これを防止するためには主回路電源側にコンデンサを入れればよいが、これと電車線インダクタンスとの共振周波数がチョップ動作周波数より十分低い値でないと、振動によってやはり過電圧を生ずることになる。この電車線インダクタンスは変電所から電車までの距離によって変動するものであるから、一般には図4のようにインダクタンスを入れる必要が生じるわけである。以上のように主回路ろ波器は二つの異なる目的から設けられるが、これはパンタ点の電流、電圧、双方の脈動をおさえることに対応する。

さて誘導障害は周知のように電話機を含めた人間の聴覚感度と関連しているので、単に脈流分の振幅のみでなくその周波数、および、その各高調波に対する感度に注目する必要がある。したがってろ波器定数を一定としたとき、チョップ動作周波数を向上すれば当然電流脈動は減ずるが、誘導障害度は100~400 c/s 程度の

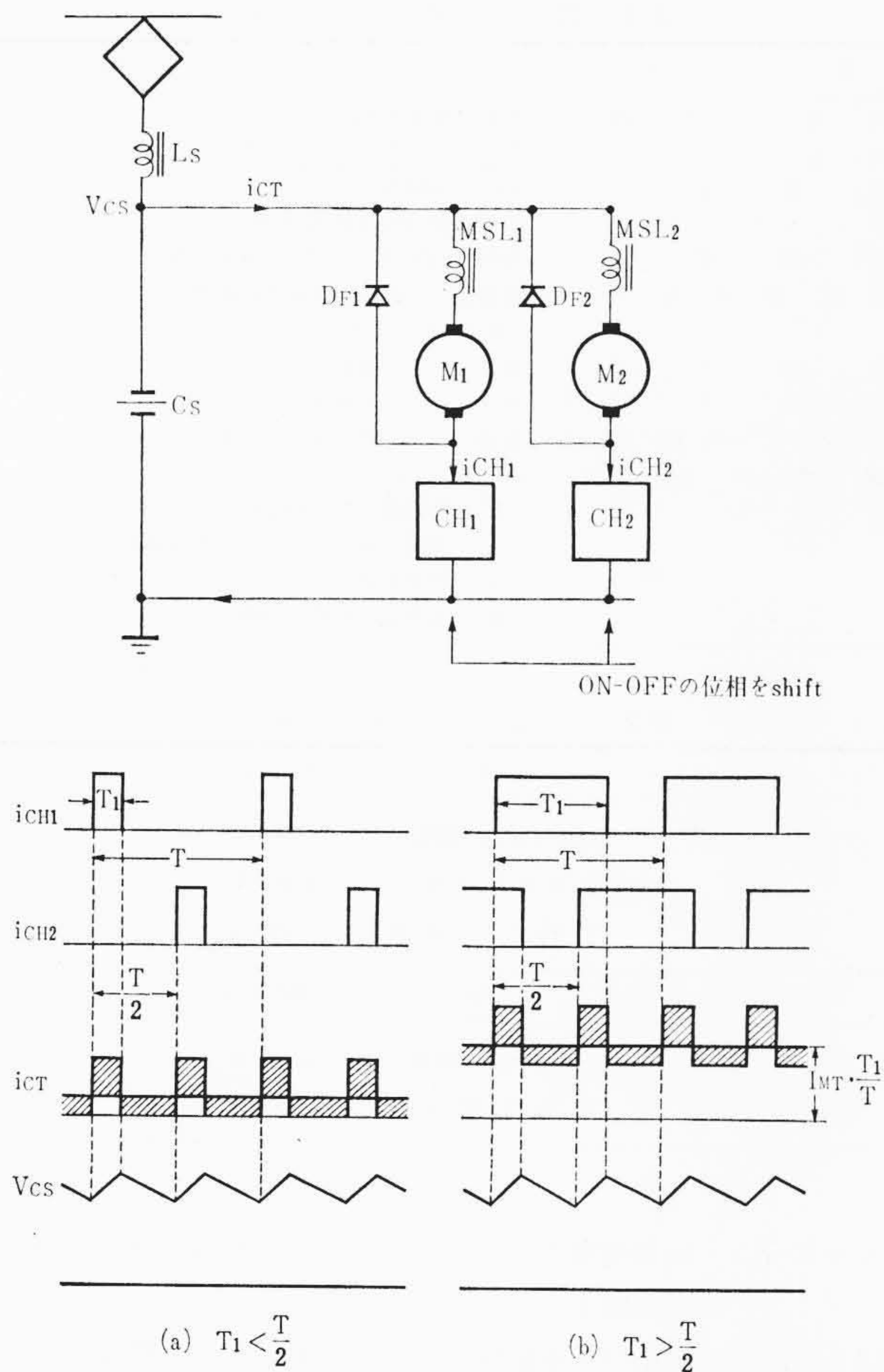


図5 相差運転の原理

範囲ではかえってやや悪化する。しかしその程度は、周波数に比例する値よりは小さいので、この点に着目して図5に示す相差運転が提案されている⁽³⁾。これは制御容量を増大する場合、単にチョップ容量を増大するだけでは脈動分がそれに比例して増大し、障害度も比例して悪化するが、動作位相の異なるグループに分割して、交流分の振幅を増大せずに周波数をあげた形で運転して単位制御容量あたりのろ波回路定数の低減をはかる方式である。

このほか将来多数の列車を運転する場合には、電車線など地上設備側における対策も十分考慮する必要がある。

3. チョップ回路

3.1 反発パルス方式チョップ回路の動作

本稿の対象とするチョップ回路とはサイリスタを用いた直流スイッチであり、転流機構の異なる各種の方式が提案されている⁽⁴⁾。それらは、サイリスタ群のみによって動作する自己転流方式と、消弧用のサイリスタ群をもち消弧時点の制御も可能な強制転流形とに大別される。前者は回路が簡単なために小容量の制御に賞用されているが、回路の自由度が小さいため、主回路制御用としては後者の方式が適当である。

日立製作所においては後述するいくつかの理由により、強制転流形のうち転流時の回路動作から反発パルス方式⁽⁵⁾と呼ばれる回路方式を採用し各種試験を実施している。

図6は力行制御時の反発パルス式チョップ回路の動作を、各モードに分けて示した原理図である。この各モードで回路は次のように動作する。

モード 1: 主サイリスタ MCR_f 、補助サイリスタ ACR_f とも消

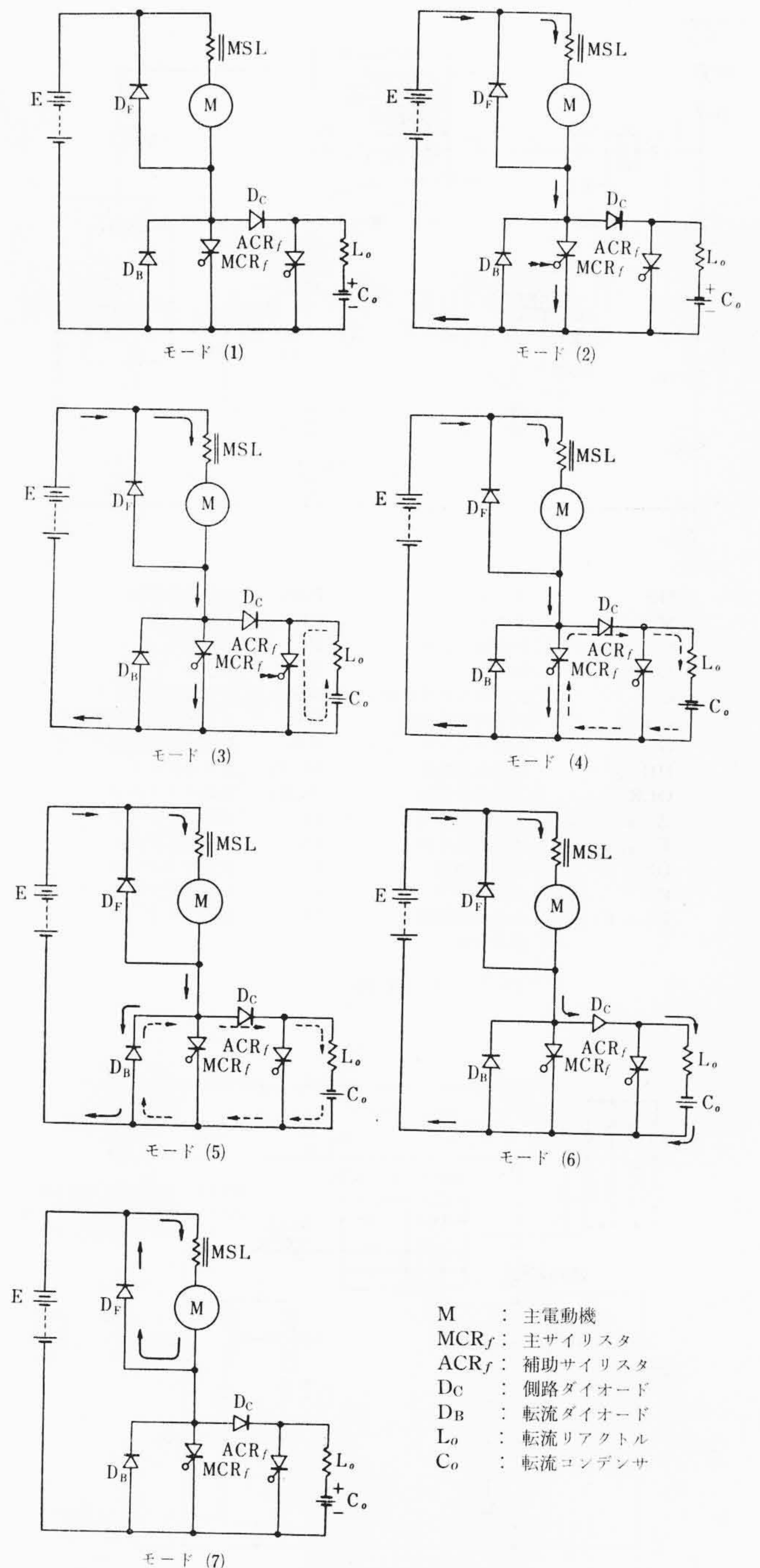


図6 反発パルス方式の動作モード

- M : 主電動機
- MCR_f : 主サイリスタ
- ACR_f : 補助サイリスタ
- D_c : 側路ダイオード
- D_B : 転流ダイオード
- L_o : 転流リアクトル
- C_o : 転流コンデンサ

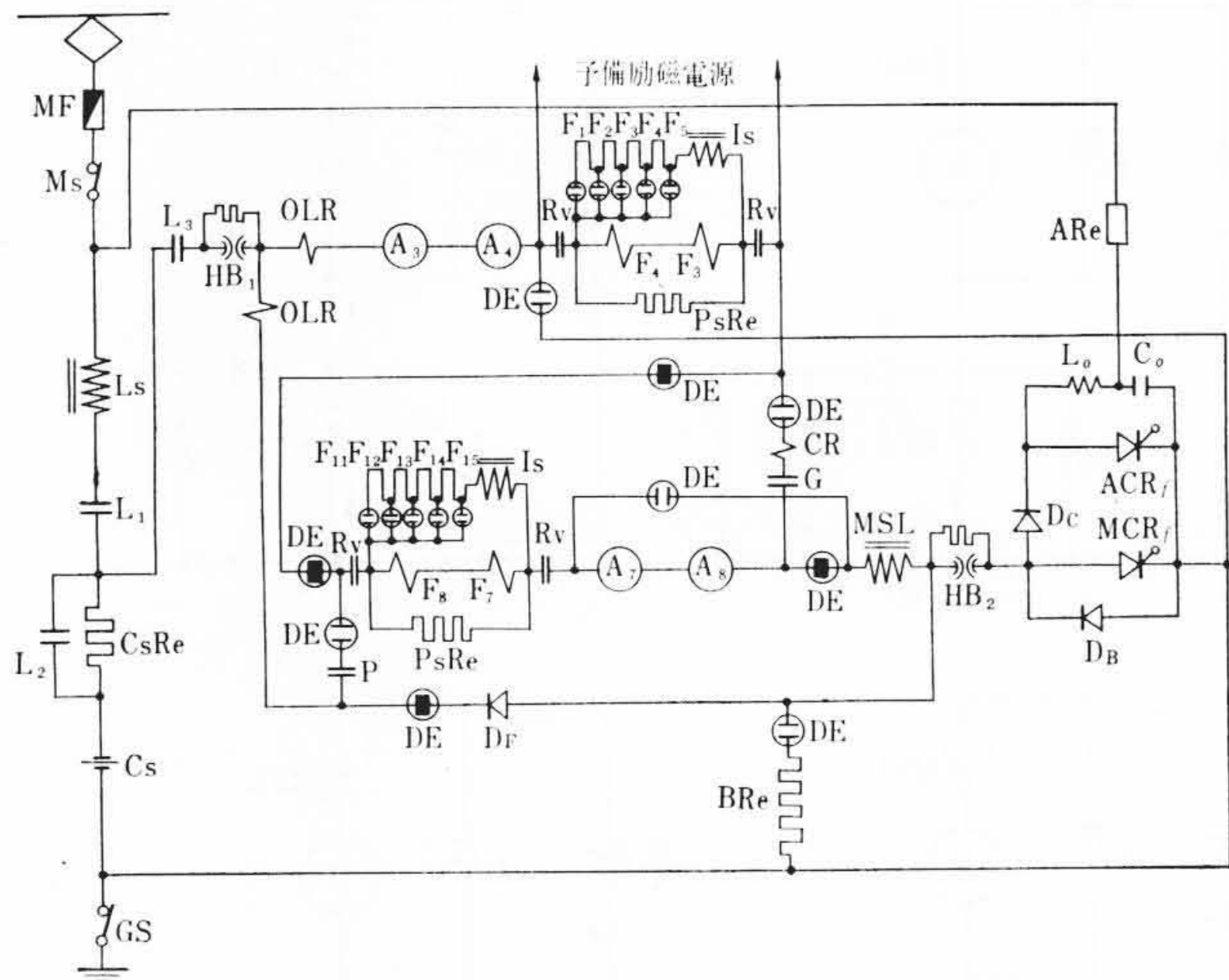
弧しており、転流コンデンサ C_o は図示極性に充電されている。

モード 2: MCR_f を点弧すると、主電流が、平滑リアクトル MSL 、主電動機、 MCR_f を通じて流れる。

モード 3: ACR_f を点弧すると、転流リアクトル L_o 、 C_o 、 ACR_f の回路に自由振動を生じ、半サイクル後 C_o はモード1と逆極性に充電される。振動電流が零になると、 ACR_f は消弧する。

モード 4: 振動電流は方向を逆転し MCR_f を流れる電流を打ち消していく。振動電流が十分大なら MCR_f を流れる電流はついに零となる。

モード 5: 振動電流は側路ダイオード D_B を流れ、主電流もこれを打ち消すように流れる。 MCR_f には、 D_B の順方向降下電圧によって逆電圧がかけられる。振動電



- MF : 主フェーズ
- Ms : 主スイッチ
- Ls : 浪波用リアクトル
- L1-3 : 断流器
- Cs : 浪波用コンデンサ
- CsRe : 同上用充電抵抗
- Gs : 接地スイッチ
- HB1-2 : 高速度遮断器
- OLR : 過電流継電器
- A3-4, A7-8 : 主電動機電機子
- F3-4, F7-8 : 主電動機界磁
- DE : 制動転換器
- Rv : 逆転器
- F1-5, F11-15 : 弱界磁接触器
- Is : 誘導分路
- PsRe : 永久分路抵抗
- CR : 電流継電器
- P : 断流器
- G : 断流器
- MSL : 主平滑リアクトル
- BRe : ブレーキ用主抵抗器
- ARe : 補充電用抵抗器
- MCRf : 主サイリスタ
- ACRf : 補助サイリスタ
- Dc : 補助ダイオード
- DB : 側路ダイオード
- Lo : 転流リアクトル
- Co : 転流コンデンサ
- DF : 循環ダイオード

図7 主回路ツナギ

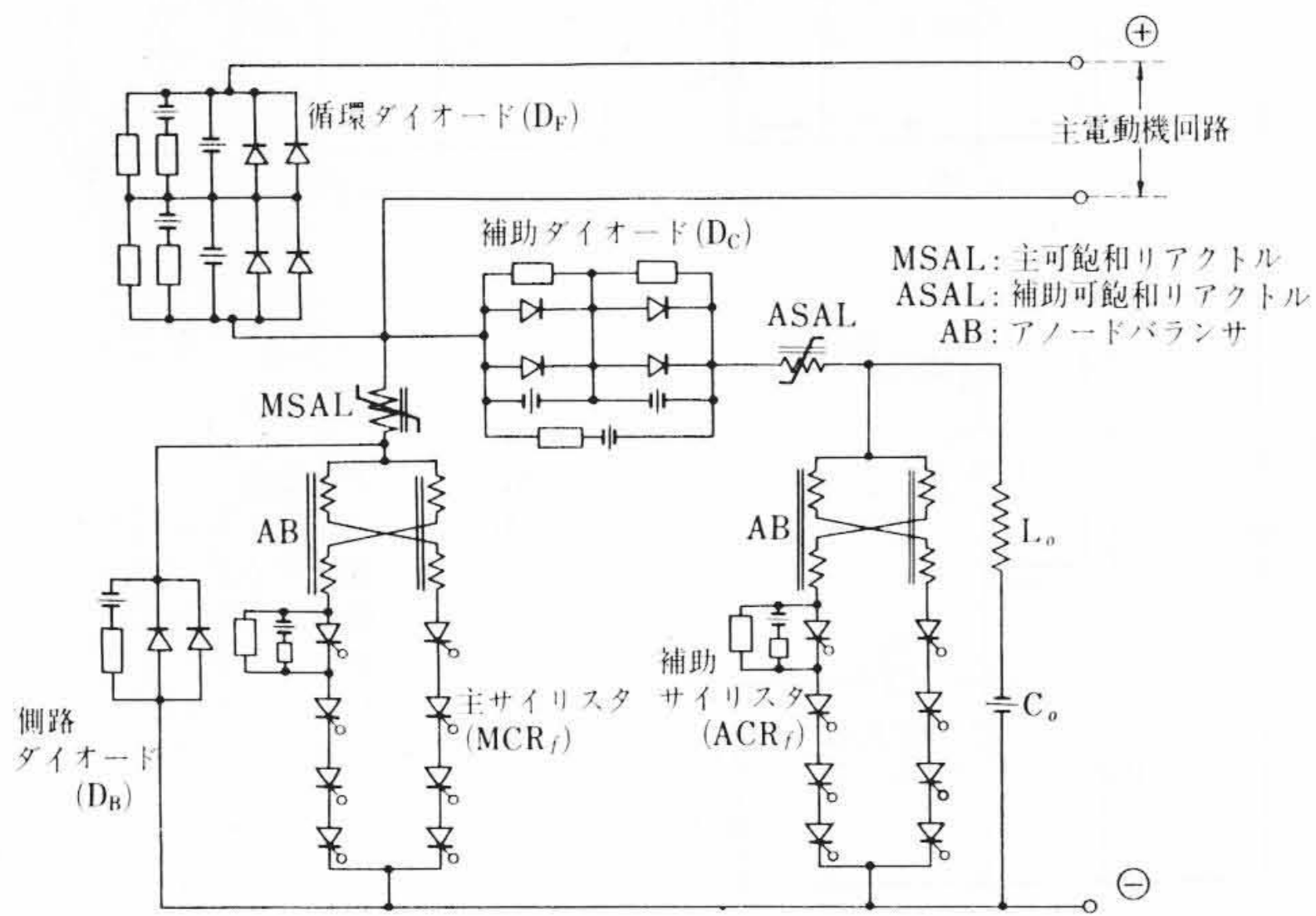


図8 チョップ装置ツナギ

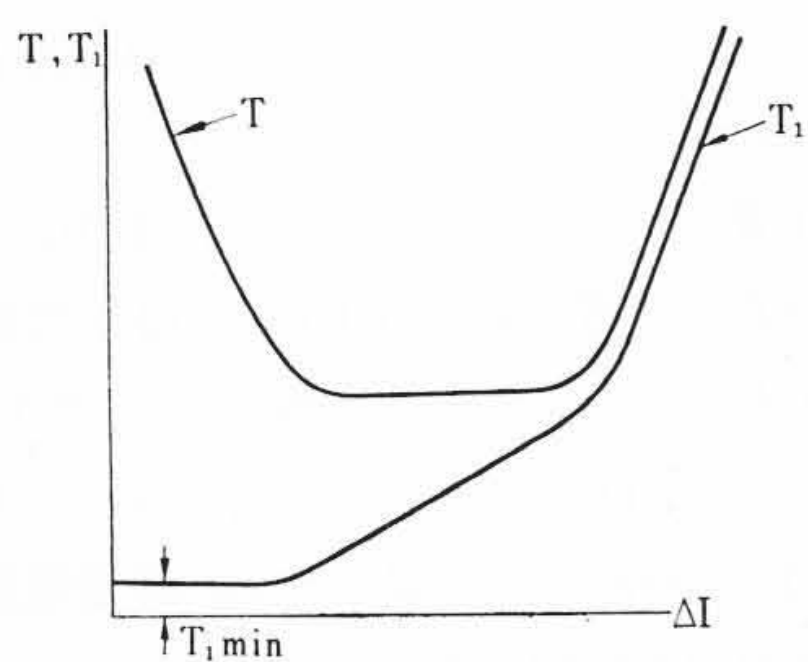


図9 制御回路の特性

流と主電流が再び等しくなれば D_B は遮断状態となり、 MCR_f には順方向電圧が印加される。

モード 6: C_0 の端子電圧が、電源電圧 E に等しくなるまで、 MSL 、主電動機を通じて充電される。

表1 現車試験仕様

| 項目 | 内容 |
|---------|--|
| 力行主回路 | 主電動機 4 S 接続 |
| 力行ノッチ | 4 ノッチ (1 ノッチ, 半電圧ノッチ, 全電圧ノッチ, 弱界磁) |
| 架線電圧 | 900~1,650 V |
| ブレーキ主回路 | 主電動機 2S-2P 交差界磁 |
| 制御電流 | 力行時 300 A ブレーキ時 150 A |
| 電流制御方式 | 周波数一位相同時制御平均値制御方式 (発電ブレーキスボッティング回路つき) |
| 起動方式 | 電流パターン制御 |
| 遮断方式 | チョップによる限流遮断 |
| チョップ回路 | 反発パルス方式 (補充電回路つき) |
| 制御周波数 | 30~125 c/s |
| その他 | (1) 停電時力行自動遮断方式 (2) 空転, 滑走時, 自動遮断回路付 (3) 予備励磁付 (4) 弱界磁自動投入回路付 |

表2 チョップ使用素子

| サイリスタ | 形式 | 仕様 |
|-------|-----------|---------|
| | CJ02L | |
| 仕様 | 定格せん頭逆耐電圧 | 1,000 V |
| | 定格順阻止電圧 | 1,000 V |
| | 定格平均電流 | 250 A |
| ダイオード | 形式 | H03DA |
| 仕様 | 定格せん頭逆耐電圧 | 3,000 V |
| | 定格平均電流 | 300 A |

モード 7: C_0 の充電が完了し、主電流は循環ダイオード D_F 側に循環する。

以上の説明で回路の基本動作は明らかであるが、実際設計に当たっては回路配線のインダクタンス、抵抗分などを考慮し、また前述の電源電圧の脈動などの影響を考慮しておく必要がある。

3.2 反発パルス方式の特長

前述の動作機構より、次のような回路方式上の特長を知ることができる。

- (1) 転流リアクトルと転流コンデンサが直列に接続され、同時に作用するので、振動電流の di/dt を小さくおさえることができ、サイリスタの動作条件を緩和している。
- (2) 振動電流が主サイリスタを順方向に流ることがないので、主サイリスタの電流容量が小さくてすむ。
- (3) 側路ダイオードの効果によりサイリスタの直並列接続が容易である。
- (4) 同様に側路ダイオードの効果により転流コンデンサの充電時間が早い。
- (5) 転流コンデンサの位置が、外部回路からの補充電⁽⁶⁾に適し、電気車両主回路適用上都合が良い。

4. 現車試験結果

パルス制御方式最初の本格的実車試験は、帝都高速度交通営団日比谷線において、さる41年5月14日から20日にわたって実施された。試験は順調に行なわれ、好結果を得るとともに、これまでの研究成果を実証し、かつ貴重な多くのデータを得ることができた。以下にその概要を説明する。

4.1 試験仕様

表1は本試験における仕様の概略を示すものである。本試験は3ユニット6両編成の列車で実施したが、そのうち、1ユニットのみパルス制御を実施し、他ユニットは従来の抵抗制御を実施して重連運転を行なった。図7は、チョップによって制御されたユニットの主回路概略ツナギを示すものである。

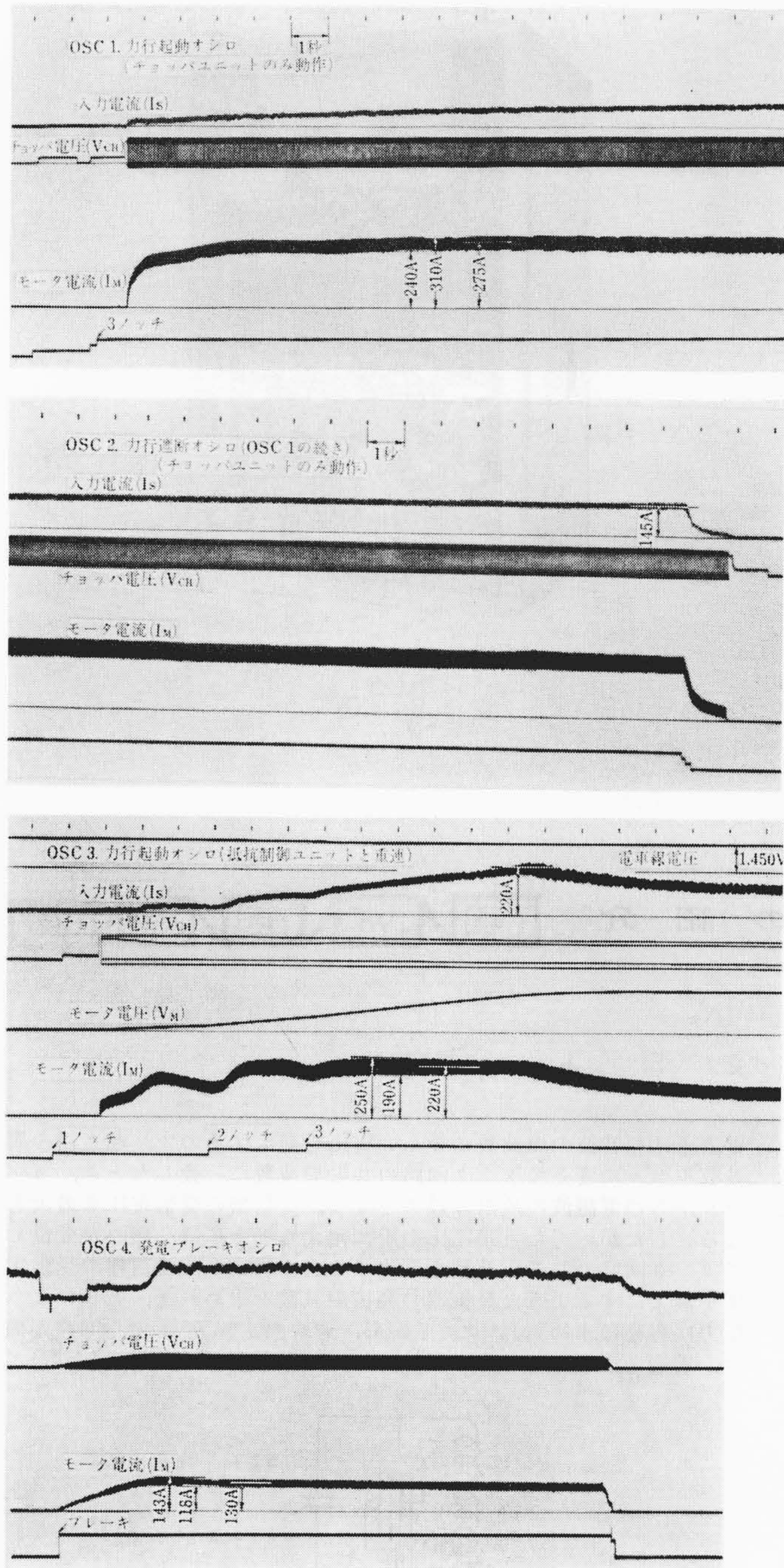


図10 現車試験のオシログラム

4.2 チョッパ回路と制御方式

図8は本試験に使用したチョッパ回路のツナギを示すものである。サイリスタおよびダイオードとしては表2に示すものを用いた。耐圧および電流容量の面から見て、現時点においては素子の直並列接続が必要であるが、反発パルス方式を採用したことによって図示のようにきわめて簡易な回路構成となり、電流分担、電圧分担とも良好な特性を得ることができた。

これをさらにくわしく見れば次のとおりである。

(1) 順方向定常電圧分担

並列 C, R および直流分圧用 R による

(2) 逆方向定常電圧分担

反発パルス方式であるため問題とならない

(3) 順方向点弧時電圧分担

バランス方式を採用し、さらにストリングが同時点弧した場合のバックアップとして可飽和リアクトル SAL を直列に接続する

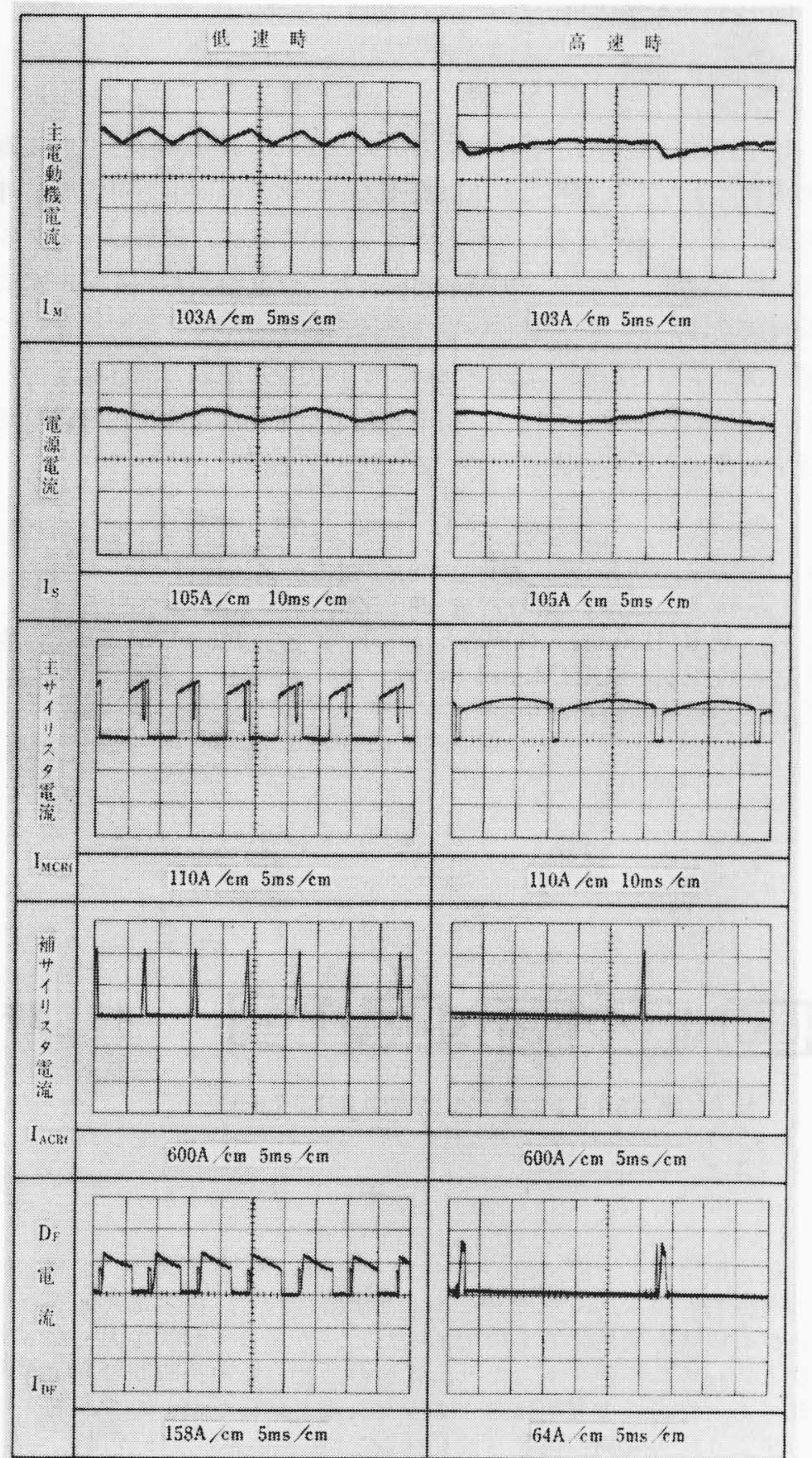


図11 各部波形

新方式⁽⁷⁾を採用した。

(4) 逆方向過渡電圧分担

(2)と同様の理由により問題とならない。

(5) 電流分担

バランスで兼用させる。

一方、本現車試験においては平均値制御方式でありながら、主電流脈流率をほぼ一定ならしめる、新しい制御方式⁽⁸⁾を採用した。図9は本制御方式の動作特性を示す図面で、電流基準値と実際電流との差 ΔI に対応して動作周波数、および導通時間率を連続的に変化させていく方式である。

4.3 試験結果

図10は本現車試験におけるオシログラムの例を示す。これらから各ノッチに対応して予期の電流—電圧制御特性が得られ、脈流一定の制御が良好に行なわれていることがわかる。また起動時、遮断時の電流パターン制御も予期の特性を示した。

図11は現車試験時の各部動作波形の詳細を示すものである。

さらに本現車試験において注目すべきは誘導障害度であり、今後の実用化の貴重な資料とするため、通信系、信号系など総合的に誘導障害度の測定を行なったが、主回路構成においてこの点に十分に留意したことにより、抵抗制御のみの場合に比べ、ほとんど有意差が認められなかった。

図12に本試験に用いたチョッパ装置を示す。

5. 結 言

以上述べたように、各種の基礎試験とこれを背景とした現車試験の成功により、基本的に実車に対するパルス制御適用の可能性が明らかになったと考えることができよう。現在はまだ価格面などに多くの問題を残しており、即時適用に対しては異論があろうが、本試験の成功は、まったく新しい電気車両の誕生を示唆するものとして意義深いものである。この意味において現車試験の機会を与えられ、試験前後を通じて種々ご指導賜わった帝都高速度交通営団の関係者各位に心からの謝意をのべる次第である。

参 考 文 献

- (1) 今泉, 刈谷: 日立評論 48, 532 (昭41-4)
- (2) 佐々木ほか: 日立評論 48, 520 (昭41-4)
- (3) V. K. Heintze, R. Wagner: ETZ 87, 165 (1966-5) その他
- (4) G. E.; SCR Manul その他
- (5)~(8) 特許出願中

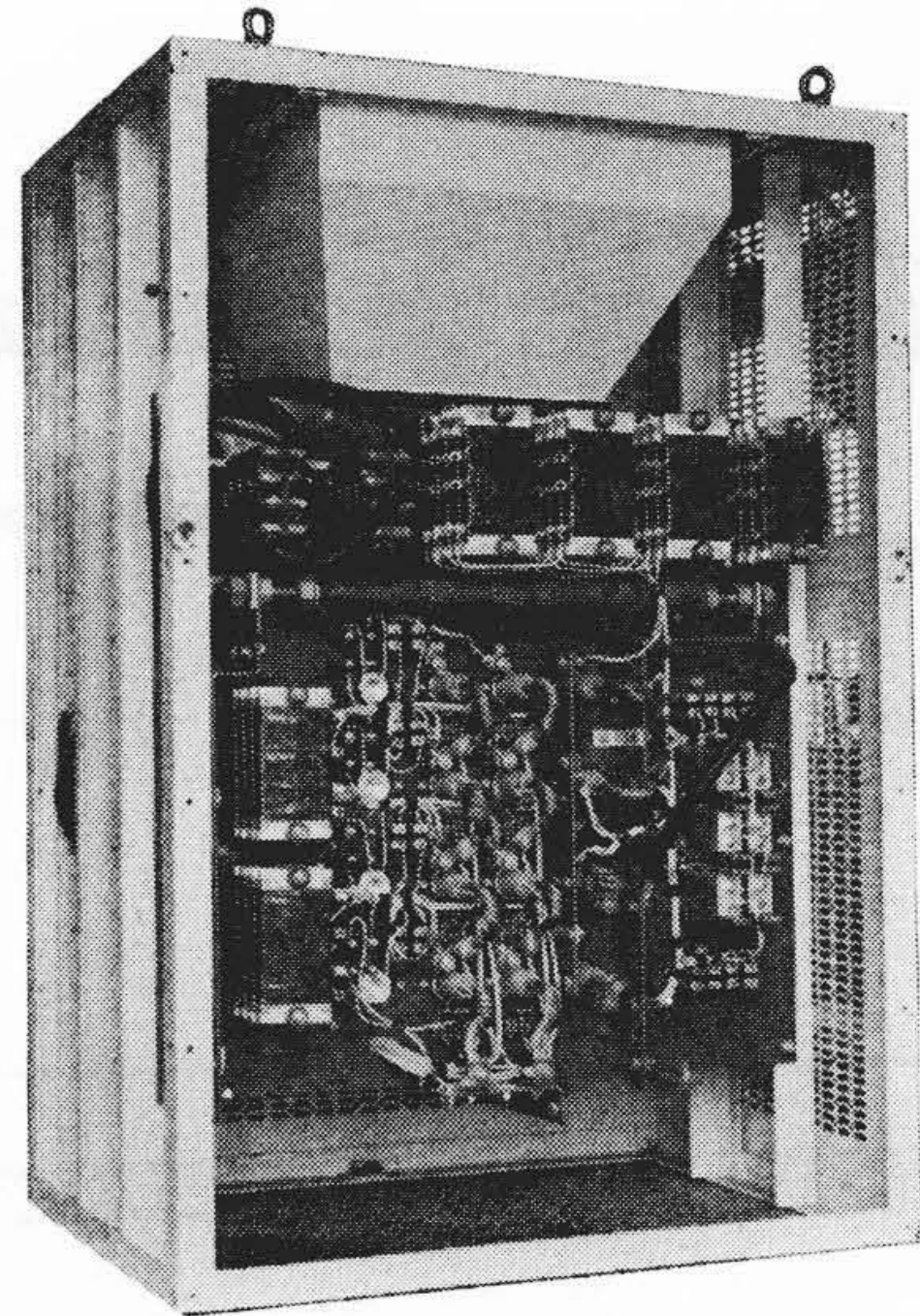
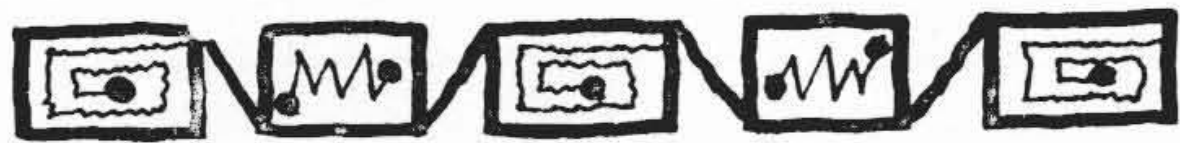
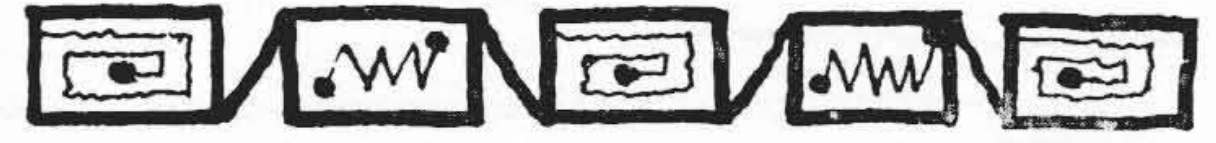


図12 チョッパ装置



特 許 の 紹 介



特許第457612号(特公昭40-10789)

高見勝己

エ コ - テ レ メ - タ 方 式

従来医用電子方面で用いられていたテレメータ方式は、電源と信号発振器を組み込んだカプセルより放射される、測定量に応じた周波数の電波を受信するものであるため、カプセル形状が大となって飲み込むのに不便であったり、電池の消耗のため長時間の測定が困難であった。この発明はこのような欠点を解決したもので、図1に示すように可変周波数超音波発振器と、信号を発信するカプセルと、アンテナを備えた受信器とを用いるもので、カプセル内に組み込まれる回路は図2に示すように圧電振動子と、タンク回路を構成するコイルとコンデンサとで構成されている。この発明のエコーテレメータ方式においては発振器より超音波エネルギーを放射すると、圧

電素子は超音波の周波数に等しい電圧を発生するので、超音波の周波数を徐々に変えてタンク回路の共振周波数に一致したとき、カプセルからの電磁波の放射は最大となり、受信器の受信電圧も最大となる。したがってたとえば圧力を測定する場合には、磁心が変位してタンク回路の共振周波数を変化するよう構成し、受信器の受信電圧を最大にするような発振器の発振周波数を求めれば、校正により圧力は容易に求められる。しかも、連続測定が可能で、回路が簡単、構造も小形となる。(玉沢)

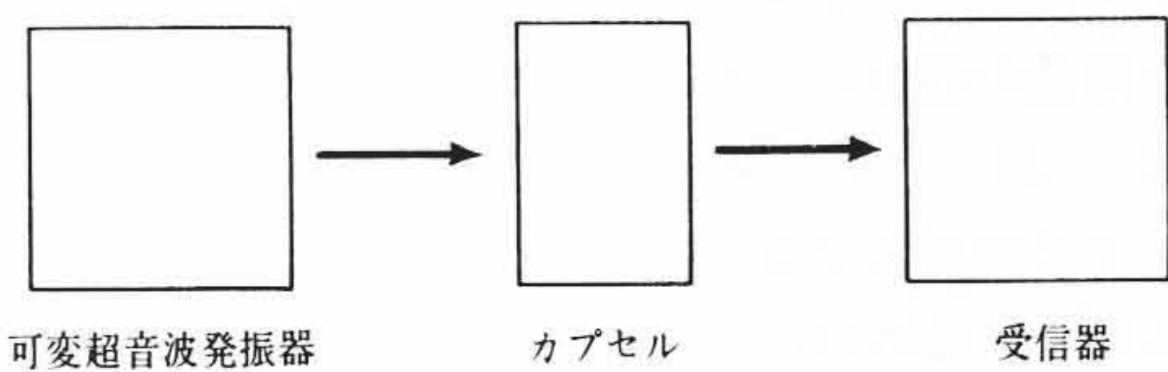


図 1

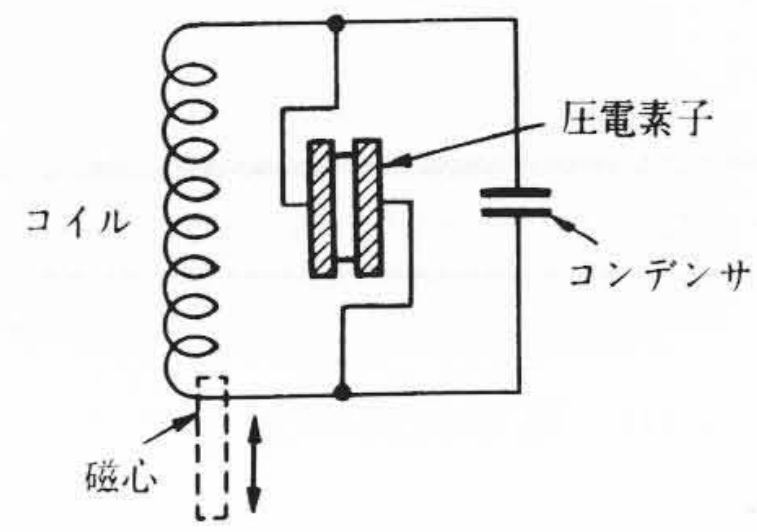


図 2