

# チョッパ式電車の誘導障害に関する理論的考察

## Theoretical Analysis of Inductive Interference Caused by DC Chopper Controlled Car

立花 恭三\*      坪井 孝\*      刈谷 志津郎\*\*  
 Kyozo Tachibana      Takashi Tsuboi      Shizuo Kariya

### 要 旨

チョッパ式電車は多くの長所を有し、直流電車の新方式として実用化の研究が進められているが、電車線に高調波電流を流し、ほかの機器に誘導障害を及ぼす心配がある。そこで、まずチョッパ式電車が発生する電車線電流高調波成分について検討し、回路定数やチョッパの動作と高調波電流の関係を理論的に解明した。試作電車の誘導障害試験結果はこの理論解析とほぼ一致した。そこで、チョッパ式電車が全面的に採用され、標準運転曲線に従って運行するという実際的な条件を模擬して電車線電流高調波成分を電子計算機で求めるプログラムを開発して検討したところ、その場合の等価妨害電流は最悪時でも1編成電車の最大等価妨害電流の1.2倍以内にとどまることが知られた。

### 1. 緒 言

サイリスタチョッパ式電車は主電動機を無接点で連続的に、しかも少ない損失で制御することができ、回生ブレーキも低速度まで可能であるなど多くの長所を有しているが、実用化に当たって解決すべき問題も少なくない。その一つとしてチョッパの発生する高調波電流により、鉄道沿線の通信線に及ぼす誘導障害、軌道回路継電器の誤動作、変電所機器に対する温度上昇の増大、異常電圧・電流の発生などの悪い影響が生ずることが懸念されている。日立製作所ではこれまで、このような点にも検討を加えてチョッパ式電車の開発を進めてきた<sup>(2)</sup>。その結果、チョッパ式電車によって発生する高調波電流をほぼ予測することが可能となった。また、帝都高速度交通営団で行なわれた試作電車の誘導障害試験においてもほぼ予想どおりの結果が得られ、本試作車の範囲においては高調波電流による支障のないことが確認された。しかし、将来、多数のチョッパ式電車が運転する場合には高調波電流が増加し、新たに問題となることも予想される。そこで、チョッパ式電車が全面的に採用され、標準運転曲線に従って運行するという実際的な条件を模擬して電車線電流高調波成分を電子計算機で求めるプログラムを開発して検討した。ここに、これまでの検討結果をとりまとめて報告する。

### 2. 高調波電流の解析

#### 2.1 高調波電流発生のおくみ

チョッパ式電車は図1で示すように、変電所より電車線を通して給電された電圧を高速でオンオフするチョッパによって裁断して主電動機回路に加え、チョッパの通流率（動作周期 $T$ に対するオン時間 $T_1$ の割合）を変化して主電動機電圧を制御するものである。フィルタはチョッパの動作によって発生する過電圧の抑制と、チョッパによって発生する高調波電流を吸収するためのもので、コンデンサ $C_s$ はその端子電圧がじゅうぶんに平滑されるに足る容量を有している。

チョッパが理想的なオンオフ動作を行ない、また、平滑リアクトルのインダクタンスがじゅうぶん大きく主電動機電流が純直流であると仮定すれば、チョッパに流れる電流は同図中に示すような断続的な脈流となる。これをフーリエ展開すれば、それに含まれる高調波成分は次式で表わされる。

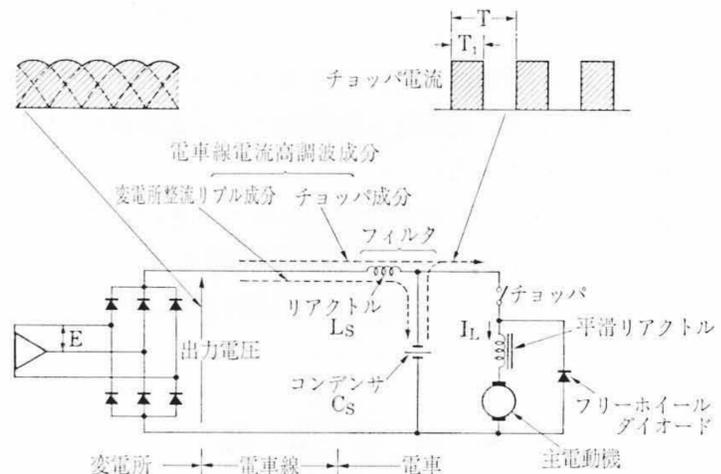


図1 チョッパ式電車によって発生される電車線電流高調波成分

$$I_{CH,n} = \frac{\sqrt{2}I_L}{n\pi} \left| \sin n\pi \frac{T_1}{T} \right| \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $I_{CH,n}$ : チョッパの動作周波数成分を基本波とする第 $n$ 次高調波電流の実効値  
 $I_L$ : 平滑リアクトル電流で、この場合は主電動機電流に等しい  
 $T_1$ : チョッパのオン時間  
 $T$ : チョッパの動作周期

この高調波電流はフィルタの $L_s, C_s$ に分流するので、電車線に流れる第 $n$ 次高調波成分の実効値 $I_{1CH,n}$ は次のように求められる。

$$I_{1CH,n} = \left| \frac{1}{j\omega C_s} \right| I_{CH,n} \\
= \left| \frac{1}{j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s}} \right| I_{CH,n} \\
= \left| \frac{1}{1 - \omega^2 L_s C_s} \right| I_{CH,n} \\
= \left| \frac{1}{1 - \left(\frac{nf_{CH}}{f_s}\right)^2} \right| I_{CH,n} \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 $f_{CH}$ : チョッパの動作周波数  
 $f_s$ :  $L_s$ と $C_s$ の共振周波数

すなわち  $f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}}$

普通、フィルタは $f_s \ll nf_{CH}$ なる条件で使用されるので、上式は近似的に次式のようになる。

$$I_{1CH,n} \approx \left(\frac{f_s}{nf_{CH}}\right)^2 I_{CH,n} \dots \dots \dots (3)$$

ところで、変電所は一般に三相全波整流回路として使用されてい

\* 日立製作所日立研究所  
 \*\* 日立製作所水戸工場

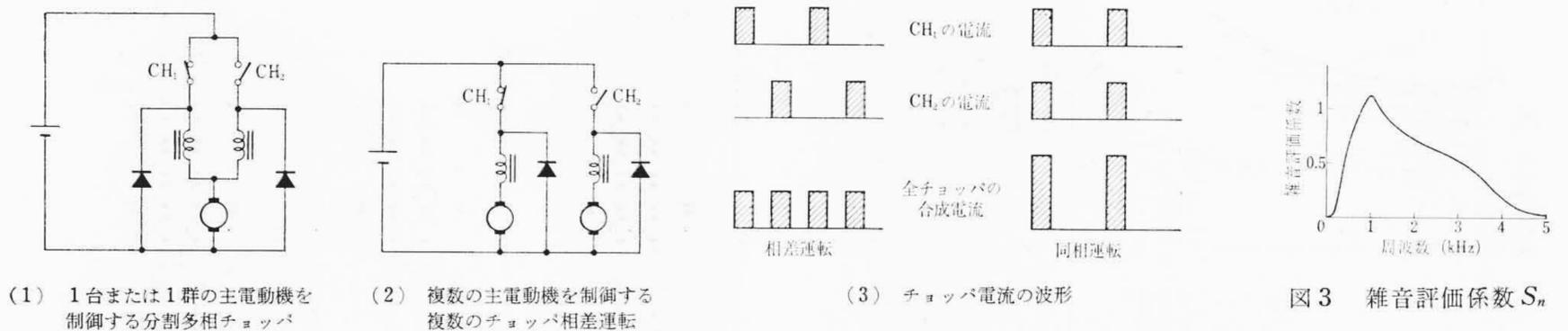


図2 複数のチョップの相差運転

るので、その出力電圧は図中のような脈動波形である。これを理想的な整流波形としてフーリエ展開すれば、その第  $m$  次高調波成分実効値  $E_m$  は次のように表わされる。

$$E_m = \frac{6\sqrt{2} |\cos m\pi|}{\pi(36m^2 - 1)} E \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $E$ ：交流線間電圧実効値

したがって、電車にフィルタを用いれば、フィルタを通して変電所側から高調波電流が流れ込む。コンデンサ  $C_s$  には普通じゅうぶんだい静電容量のものが使用され、高調波電流に対するインピーダンスは非常に小さいので、変電所側から流れ込む高調波成分はほとんどリアクトル  $L_s$  によって制限され次の近似式で表わされる。

$$I_{L_{Rn}} \doteq \frac{E_m}{2\pi f_m L_s} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $f$ ：交流電源の周波数

電車線には一般にインダクタンスが存在し、 $L_s$  とともに高調波電流の抑制効果を持っている。したがって、正確には(2)、(3)、(5)式の  $L_s$  はフィルタのインダクタンスに電車線のインダクタンスを加えるべきである。

以上のように、チョップ式電車が走行する場合はチョップに起因する成分と変電所出力電圧リップルに起因する成分が電車線電流に含まれる。ここで、後者は従来の抵抗制御式電車が走行する場合にも生じており、その場合には主として主電動機内部インダクタンスが高調波抑制効果を持っていた。この点より、高調波電流を抵抗制御式電車と同程度にするには、リアクトル  $L_s$  のインダクタンスを少なくとも主電動機内部インダクタンスより大きくする必要があるが、チョップ式電車では  $L_s$  によって高調波電流を抑制する自由度があると言える。

2.2 高調波電流低減の方法

電車線電流高調波成分(チョップ成分)の低減のためには(3)式より、フィルタ共振周波数  $f_s$  を低く、チョップ周波数  $f_{CH}$  を高くとるほうが好ましいが、重量・寸法上の不利とサイリスタのターンオフタイムの点から制限がある。そこで、チョップ成分を減少させるために、チョップの動作周波数を等価的に高め、チョップ電流の脈動分を等価的に減少させる方法として、図2のような複数のチョップを相差運転する方法がとられる。その中で、主電動機の数とは無関係にチョップを分割する分割多相チョップの方法と、電車のように複数の主電動機を用いる場合には各主電動機ごとにチョップを分けて相差運転する方法の2種類が考えられる。このうち前者だけが主電動機電流の脈率低減の効果を有するが、高調波電流の点ではこの両方式は全く同じ効果を持っている。

このように複数のチョップを相差運転すると全チョップの合成電流は相差運転しない場合に比較して脈動分が相数分の1、また基本周波数は相数倍になり、結果的に高調波電流が少なくなるという効果を伴っている。一般に相数を  $p$ 、全主電動機電流の和を  $I_{SM}$  とすれば

$$I_L = \frac{I_{SM}}{p} \dots\dots\dots (6)$$

$$I_{CH_{np}} = \frac{\sqrt{2} I_{SM}}{np\pi} \left| \sin np\pi \frac{T_1}{T} \right| \dots\dots\dots (7)$$

$$I_{L_{CH_{np}}} = \frac{1}{\left| 1 - \left( \frac{np f_{CH}}{f_s} \right)^2 \right|} I_{CH_{np}} \dots\dots\dots (8)$$

$$\doteq \left( \frac{f_s}{np f_{CH}} \right)^2 I_{CH_{np}} \dots\dots\dots (9)$$

これらの式は各相の回路定数も動作も完全にバランスした場合に成り立つが、実際には多少のアンバランスを伴うので、ユニットチョップの周波数  $f_{CH}$  の成分を基本波とする高調波なども多少生ずるのであろう。

2.3 等価妨害電流

高調波電流による影響に関して考えると、軌道回路に対する影響は障害となる周波数が明らかであるので、この周波数の高調波を発生させなければ障害を防止できる。また、変電所機器に対する影響も対象機器容量の大きさから影響は少ないものと考えられる。他方、通信誘導障害に関しては通信線の伝送レベルの低さ、電車線と通信線の位置関係によって誘起雑音電圧が違ふこと、また誘起雑音電圧にあらゆる高調波電流が関係し、かつ誘導の周波数特性が一定でないことなどの点で、高調波電流の影響のうちでは最も取り扱いにくいものと考えられる。

通信誘導障害の評価には電気鉄道においては普通、次のような等価妨害電流  $J_p$  が用いられている。

$$J_p = \sqrt{\sum (S_n I_n)^2} \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 $I_n$ ：高調波電流の値

$S_n$ ：雑音評価係数。現在は図3のような値を用いる。

一例として、平滑リアクトル電流 100A、フィルタ共振周波数 35.6 Hz の場合につき、(1)、(3)式より各高調波成分を求め、これを(10)式に代入してチョップ成分による等価妨害電流を計算すると図4のような結果となる。等価妨害電流はチョップの周波数(多相チョップの場合も含めて言えば合成周波数)が 300 Hz で最大となるので、通信誘導障害上からはチョップの合成周波数は 300 Hz よりできる限り低いか、または高いほうが好ましいといえる。またチョ

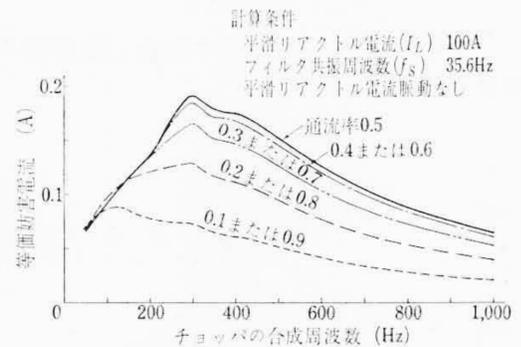


図4 チョップ成分による電車線の等価妨害電流

図3 雑音評価係数  $S_n$

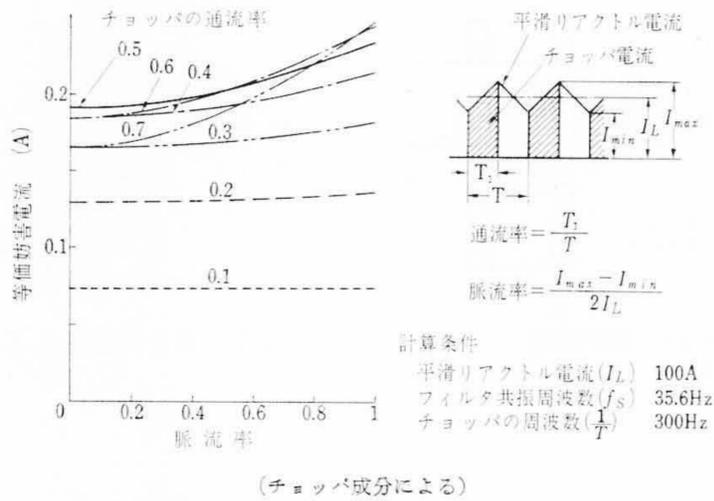


図5 平滑リアクトル電流の脈動と電車線の等価妨害電流

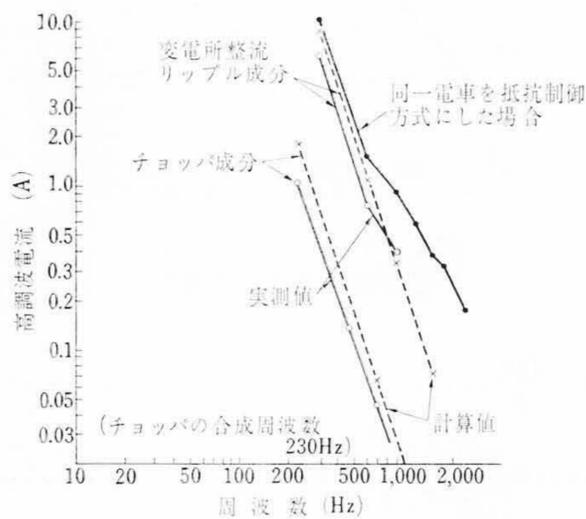


図6 チョップ式試作電車の高調波電流

ップは通流率を変化するが、通流率（多相チョップの場合も含めると合成通流率、つまり通流率の相数倍の値の小数部）が0.5の場合を考慮して対策を講ずべきことがわかる。なお、(6)、(7)および(9)式によれば、電車線電流高調波成分は平滑リアクトル電流に比例し、フィルタ共振周波数の2乗に比例する関係にあるので、図4の値を  $J_p(100, 35.6)$  とすれば、一般に平滑リアクトル電流  $I_L$ 、フィルタ共振周波数  $f_s$  なる場合の等価妨害電流は  $f_s < \frac{1}{2} p f_{ch}$  なる条件で次の近似式で表わされる。

$$J_p(I_L, f_s) = J_p(100, 35.6) \times \frac{I_L}{100} \times \left(\frac{f_s}{35.6}\right)^2 \dots\dots\dots (11)$$

以上は平滑リアクトル電流が脈動しないとして述べたが、平滑リアクトル電流はチョップの動作に伴っていくぶんかは脈動する。この脈動が増大すれば高調波電流も増加すると考えられる。その場合、平滑リアクトル電流はほぼ三角波状の波形であるので、三角波と仮定して等価妨害電流を求めると図5のようになる。この結果、等価妨害電流に及ぼす脈流率の影響は少ないことが明らかである。

3. 試作電車による誘導障害試験

昭和43年5月より帝都高速度交通営団東西線において、国内最初のチョップ式試作電車による誘導障害試験が行なわれた。この電車は2M1T編成で、4台直列2回路並列の合計8台の主電動機を分割2相チョップで制御するもので、力行と回生ブレーキ運転が可能である。

図6は測定結果の一例である。測定結果によると、理論計算と実測値はほぼ一致し、高調波電流の値はいずれもほぼ予想した範囲内にとどまった。この測定結果より等価妨害電流を計算してみると、その70%以上が変電所整流リップル成分によって占められ、チョップによる影響が少ないことを示した。また、この変電所整流リップル成分は抵抗制御式よりむしろ小さいという結果も得られた。軌道回路

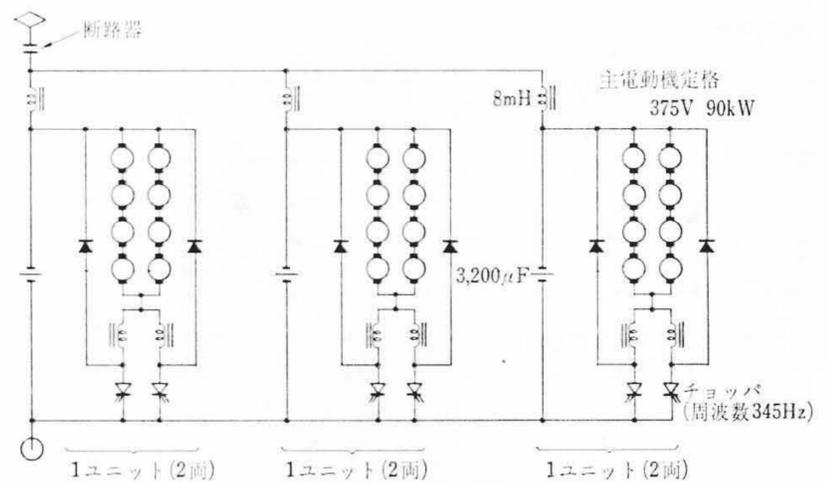


図7 チョップ式営業用電車として予想される主回路(6M4T)

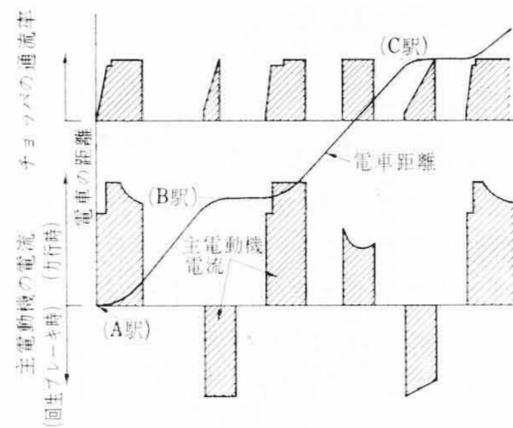


図8 標準運転曲線モデル

については、50 Hz 軌道回路、AF 軌通回路などについて各種の条件で試験されたが、その許容雑音電流の値に対してじゅうぶん余裕を残し、実際にもなら支障のないことが確認された。さらに、変電所において実測した結果でも高調波電流の値はほぼ予想どおりで、支障が生じないことが確認された。

4. チョップ式電車が全面的に採用された場合の高調波電流の予測計算

以上のように、少数のチョップを用いる場合についてはほぼ予測が可能となり、試作電車によって理論値と実際の値がほぼ一致することが確認されたが、多数のチョップ式電車が競合運転する場合は高調波電流が増大し、新たに障害を発生するおそれがある。そこで、チョップ式電車が標準運転曲線に従って多数運転するという実際的な条件のもとで、電車線に流れるチョップ成分の高調波電流を電子計算機で計算するプログラムを開発して検討した。

今回の計算で仮定した主回路は図7のようなもので6M4T編成のうちM車は2両ずつのユニットに分かれている。各ユニットは分割2相チョップで制御されるが、各ユニット間では相差運転は行なわれない。き電系統は上り線下り線に分離され、変電所の地点でのみ接続されているものとする。変電所のインピーダンスは直流フィルタがないものとして、交流測のインピーダンスを直流側に換算した値とした。電車は図8のような標準運転曲線に従って運転間隔  $T$  で等間隔に運転し、ノッチオフ中の電車はき電線より電氣的に分離されているものとした。

以上のような仮定によると、上りと下りの電車が始発駅を発車する時差を  $JT$  とすれば、上りのある電車が始発駅を発車した時間から次の電車が発車するまでの間の時刻  $t$  における始発駅より第  $n$  番目の電車の経過時間  $t_n$  は次式で与えられる。

上り線  

$$t_n = t + (n-1)T \dots\dots\dots (12)$$
 下り線

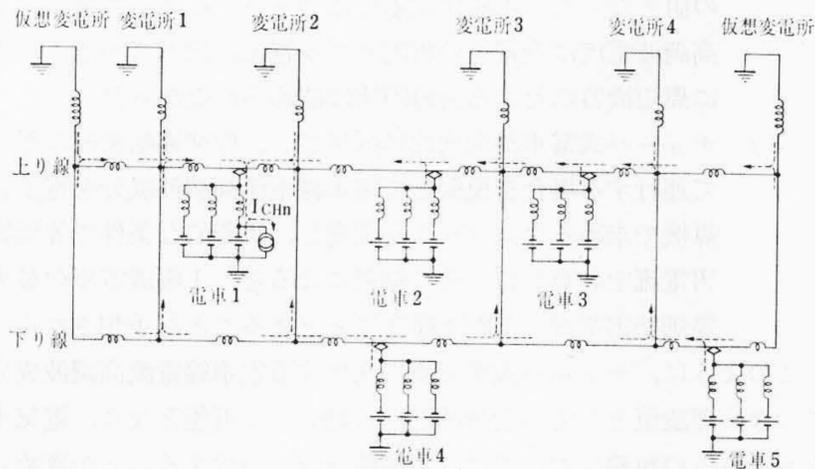


図9 チョッパ電流高調波成分に関するき電システムの等価回路

$$t_1 = \begin{cases} t+T-\Delta T & (t < \Delta T \text{ のとき}) \dots\dots\dots (13) \\ t-\Delta T & (t \geq \Delta T \text{ のとき}) \dots\dots\dots (14) \end{cases}$$

$$t_n = t_1 + (n-1)T \dots\dots\dots (15)$$

これを入力データに読み込ませて置いた図8の曲線に照合すれば、時刻  $t$  における各電車の位置、主電動機電流、通流率が定まる。

電車の分布と運転状態が定まると、き電システム全体を一回路とし、図9の等価回路によって電車線電流高調波成分を計算することができる。ここで、システムの末端に変電所がない場合はインピーダンスの大きい変電所を仮定し、計算の簡単化をはかった。このような回路で電車1の1ユニットのチョッパを高調波電流  $I_{CHn}$  の電流源と仮定し、順次近い方から遠方に向けて分岐点の分流を求める。その際、その電車から流出する電流を計算するにはその電車をはさむ2変電所の間を1単位区間にとり、パンタグラフの点を電流源として図10のような等価回路に置きかえる。ここで、 $Z_n$  は変電所以遠および電車のインピーダンス、 $Z'_n$  はそれらの間の電車線内部インピーダンスである。ここで、

$$[A] = \begin{bmatrix} Z_1 & 0 & \dots & 0 & Z'_{n+1} & -Z_1 & 0 & \dots & 0 & Z_n \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & Z_1 & \dots & \dots & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & Z'_n & 0 & 0 & \dots & 0 & Z_{n-1} & -Z_n \\ 1 & -1 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & \dots & \dots & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & \dots & \dots & 0 & \dots \\ -1 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 & \dots \end{bmatrix} \dots\dots\dots (16)$$

$$[I] = \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I'_{n+1} \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \dots\dots\dots (17)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (18)$$

と置けば次の方程式が成り立つ。

$$[A] \cdot [I] = [B] \dots\dots\dots (19)$$

これを解けば、その区間の電流分布が求められる。なお、この場合、電車から流出する高調波電流を求めるためには電車のパンタグラフの点より電車線を見たインピーダンスを知る必要があるが、

$$Z = \frac{1}{I} (Z_1 I_1 - Z'_1 I'_1) \dots\dots\dots (20)$$

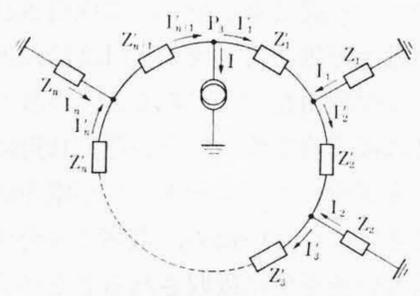


図10 相隣る2変電所間の一般的等価回路

(運転間隔 150秒)

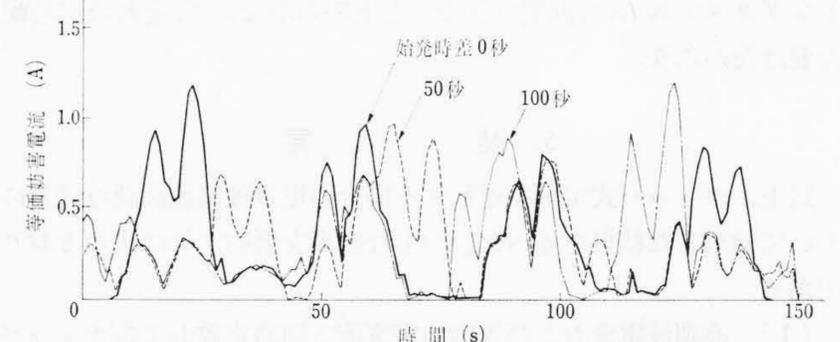


図11 起点より10km地点の電車線等価妨害電流の推移

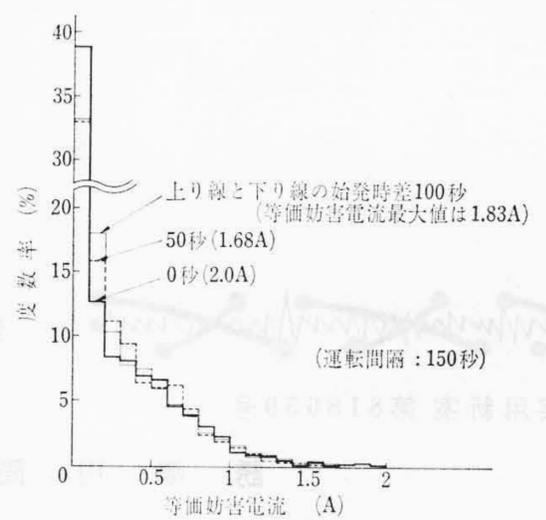


図12 等価妨害電流度数率

により、 $I$ を単位電流にとって電流分布の計算前に求める。  
以上の計算により変電所1および2より遠方への波及電流が求められるので、それぞれの電流を  $I$  とおいて変電所1より左の区間、変電所2より3までの区間について(19)式を用いれば、その区間の電流分布が求まる。以下、相隣る2変電所の間を単位に順次同様な計算を行なうことにより、き電システム全体の分布が定まる。このような計算を全電車のチョッパについて行ない順次加算して、その時刻における全地点の高調波電流を求める。そして、その値を(10)式に代入し、等価妨害電流を求める。

図11はある地点の等価妨害電流で、このような方法によりあらゆる時間の高調波電流したがってまた等価妨害電流が計算できる。

この方法により電車線の1km間隔で1秒ごとに等価妨害電流を計算し、度数分布に表わすと図12のような結果が得られる。すなわち、等価妨害電流はほとんど1A以下で、最大でも2Aである。この場合、主電動機電流は最大656A、1ユニットのフィルタの共振周波数は31.44Hzであるが、電車線のインピーダンスを無視し、チョッパの合成通流率を0.5として図4および(11)式により、1電車の最大等価妨害電流を計算すれば次のようになる。

$$0.107 \times \left( \frac{31.44}{35.6} \right)^2 \times \frac{656}{100} \times 3 = 1.65 \text{ (A)} \dots\dots\dots (21)$$

したがって、チョップ式電車が全面的に採用されても等価妨害電流は1編成電車の最大等価妨害電流の約1.2倍以内という低い値にとどまっている。この理由を調べてみると、多数の電車が存在しても、それらが同時に高調波電流の大きい運転状態になる確率が小さいことほかに、変電所のインピーダンスが電車線などのインピーダンスに比較して非常に小さいため、電車より発生する高調波電流のほとんどが最も近い変電所に吸収されることが大きい原因であることが知られた。

なお、図12はチョップ成分の高調波電流のみによる値で、この上に変電所整流リップ成分による値が加わるが、変電所整流リップ成分自体が誘導障害試験で抵抗制御式の場合より小さく、フィルタのインダクタンス $L_s$ で抑制できることも明らかなので、それほど心配の要はなからう。

5. 結 言

以上、チョップ式電車を運転する場合の電車線電流高調波成分について検討した結果を述べた。おもな結果を要約すれば次のとおりである。

- (1) 高調波電流および等価妨害電流と回路定数およびチョップの動作の関係を理論的に明らかにした。
- (2) 試作電車の誘導障害試験では高調波電流はほぼ予想どおりの

の値となった。本試作電車ではチョップによって発生する高調波電流は変電所の整流リップ電流に比べて小さく、特に周辺機器に対する誘導障害は認められなかった。

- (3) チョップ式電車が全面的に採用され、標準運転曲線に従って運行する場合を模擬して電車線電流高調波成分を電子計算機で求めるプログラムを開発し、実際的な条件で等価妨害電流を計算した。その結果によると、1編成電車の最大等価妨害電流の1.2倍程度にとどまることが予想される。

このように、チョップ式電車の発生する電車線電流高調波成分につき、理論値としての定量的把握(はあく)が可能となり、電気車1ユニットの規模においては、実測値とほぼ一致することが確かめられた。今後、複数の車両が走行する場合についても、実測により予測値をたしかめていく必要があると考える。

終わりに、本研究は、帝都高速度交通営団の主催するサイリスタチョップの誘導障害度調査委員会の研究の一環としてなされたものであることを付記し、特に適切なご指導とご援助を賜った帝都高速度交通営団および日本国有鉄道技術研究所信号研究室の関係各位に対し厚く御礼申し上げる。

参 考 文 献

- (1) 坪井, 木村: 昭和41年電学会東京支部大会 330
- (2) 立花ほか2名: 昭和42年電四学会連大 806



新 案 の 紹 介



登録実用新案 第818659号

渡 井 三 夫・秋 沢 安 郎

誘 導 円 筒 形 選 択 地 絡 継 電 器

この考案は電圧端子が開放になった場合、すなわち電流入力のみになったときに発生する電流クリープによる誤動作を防止するために、電圧コイルの巻かれている鉄心に補償コイルを巻き、この補償コイルには電流入力によって電圧コイルに流れる電流を打ち消すための電流を流し、抑制コイル内の起電力に起因する電流クリープによる誤動作を防止するようにしたものである。

通常は電圧端子 $P_1, P_2$ 間に電圧が印加され、電圧コイル2、抑制コイル3および補償コイル5に所望の電流が流れる。この電流のうち抑制コイル3に流れる電流は電流コイル1に流れる電流に対して抑制の作用をなす。補償コイル5に流れる電流は抵抗4および6を通して流れるため、電圧コイル2に流れる電流に比べ、きわめて小さいので、電圧コイル2と同一鉄心に巻かれているにもかかわらず、この補償コイル5によって電圧コイル2によるアンペーターを打ち消すことはできない。したがって通常の動作状態では補償コイル5は格別の作用は及ぼさないことになる。一方電圧端子 $P_1, P_2$ が開放のとき電流入力がある電流コイル1にある値以上の電流が流れるとこの電流コイル1と同一鉄心に巻かれた抑制コイル3に誘起電圧が生じ、その結果抵抗4を通して電圧コイル2に電流が流れ、ここに不正トルクとしての電流クリープが発生するものであるが、同時に抵抗6を介して補償コイル5には前記電圧コイル2に流れた電流を打ち消すような電流が流れ電流クリープの発生を防止するもの

である。このとき調整抵抗6を適宜選択すれば補償コイル5に流れる補償電流を電流クリープの大きさに応じて調整でき、広範囲の電流クリープの補償ができる。

以上のように、この考案は電圧端子開放時における電流入力により起因する電流クリープを広範囲にわたり補償し、もって継電器の誤動作を防止するものである。(西宮)

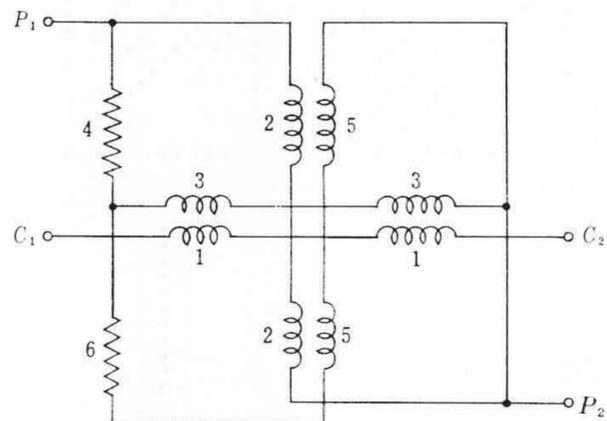


図 1