

## 波巻直流機の整流特性の数値解析

安藤 詔生\*

### Numerical Analysis of Commutation Characteristics in DC Machine with Wave Winding

Tsuguo ANDO

#### ABSTRACT

The commutation characteristics in a dc machine with wave armature winding, which is widely used as a small-sized variable speed machine, were little investigated.

In this paper, commutating equations and a numerical solution are first presented to analyse the commutation characteristics. In commutating equations, where each armature coil is short-circuited by two brushes, the nonlinear contact voltage characteristics between brushes and a commutator, the fluctuations of brush currents caused by circulating currents in commutating circuits, the mica width for insulation among segments and so on are taken into consideration. In the numerical solution, the finite difference method is applied to solve time varying commutating equations. Next, through the numerical analysis concerning to an actual machine, it is made clear that the brush width much influences on commutation characteristics and the best choice of brush width may improves the commutation characteristics.

#### 1. まえがき

直流機を使用する場合には、ブラシと整流子による電機子電流の機械的整流を良好に保ち、整流火花の発生を防止することが重要な課題とされる。したがって、大形機用の重ね巻機に対しては整流特性の改善のための解析が数多くなされてきた<sup>1)~3)</sup>。しかし、中小形機用として広く普及している波巻機に対する解析はあまり行われていない<sup>4)</sup>。

まず、複数の同極性ブラシによる電機子コイルの短絡によって整流が行われる単重波巻直流機に対し、電機子の巻線条件、ブラシと整流子の接触電圧の非線形特性、ブラシ幅、整流帯の磁束密度分布、ブラシの分担電流などを考慮した整流方程式の導出について説明する。なお、整流方程式の数値解析法には、従来、状態変数の形に変

換する手法が主として使用されてきたが<sup>1)~4)</sup>、ここでは時間の経過とともに変化する整流方程式を直接的に扱える差分陰解法を使用する。つぎに、4極、3kWの小形波巻直流機に対する整流現象の数値解析結果について報告する。

#### 2. 整流回路

多重巻或は遊びコイルがある波巻巻線では、ブラシによるコイルの短絡回路、即ち整流回路が複雑になるので、電機子巻線の並列回路数が2で遊びコイルのない単重波巻直流機について考える。

##### 2.1 基礎方程式

図1は、多数の電機子コイルの中で単位コイルjがブラシ $A_{b1}$ 、 $A_{b3}$ によって短絡されている様子を示したも

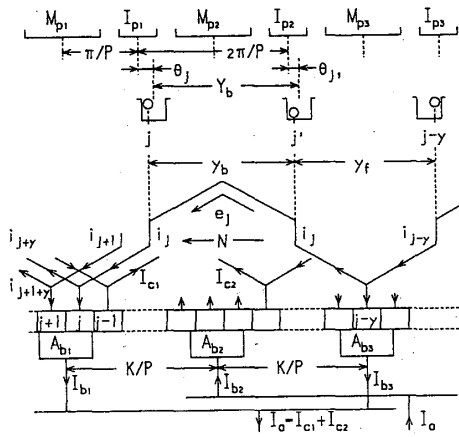


図1 2個のブラシによるコイルの短絡  
Fig.1 Short-circuit of coil by two brushes.

のである。図において、 $P$ は極数、 $K$ は整流子片数=単位コイルの総数、 $y_b$ 、 $y_f$ 、 $y$ 、 $Y_b$ は後ピッチ、前ピッチ、合成ピッチ、コイルピッチと称される整数で、次の条件が与えられる。

$$\left. \begin{aligned} K &= uN_s, & y_b &= uY_b \\ y &= \frac{2K}{P} \pm \frac{2}{P}, & y_f &= y - y_b \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ただし、 $u$ は電機子スロット内の上口或は下口一層当りのコイル辺数、 $N_s$ は電機子スロット数=スロットコイル数で、 $Y_b$ は $N_s/P$ にはほぼ等しい整数である。 $\pm 2/P$ は磁界変位と称され、 $+2/P$ の場合は進み巻、 $-2/P$ の場合は戻り巻になる。

なお、図1の $I_a$ は電機子電流、 $I_{c1}$ 、 $I_{c2}$ は非整流中のコイル電流=並列回路電流、 $\theta_j$ 、 $\theta_{j'}$ はコイル辺 $j$ 、 $j'$ に誘導される整流起電力 $e_j$ を求めるのに必要な $j$ 、 $j'$ のスロット中心と補極中心との角度である。各ブラシ電流 $I_{b1}$ 、 $I_{b2}$ 、 $I_{b3}$ は接触する整流子片電流の総和として与えられる。磁極やブラシの間隔は、角度 $(2\pi/P)$ 、整流子片数 $(K/P)$ 、スロット数 $(N_s/P)$ などで表わされる。

図1において、主極 $M_{P1}$ 、 $M_{P2}$ 、 $M_{P3}$ 、補極 $I_{P1}$ 、 $I_{P2}$ 、 $I_{P3}$ をそれぞれ $N$ 、 $S$ 、 $N$ 極とし、直流機は回転速度 $Nrpm$ の発電機として運転されているものとする、短絡されたコイル $j$ に対し、次式が得られる。

$$\begin{aligned} e_j &= \sum_m L_{j,m} \frac{di_m}{dt} + r_j i_j \\ &+ R_{b1} I_{b1} - R_{b3} I_{b3} + v_{sj} - v_{sj+y} \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、ライザー抵抗を無視できるものとする。(2)式において、 $i_m$ はコイル $m$ の電流、 $e_j$ は整流起電力、 $\sum L_{j,m} di_m/dt$ はリアクタンス電圧、 $r_j i_j$ はコイル抵抗

$r_j$ による電圧降下、 $R_{b1} I_{b1}$ 、 $R_{b3} I_{b3}$ はブラシ $A_{b1}$ 、 $A_{b3}$ の抵抗 $R_{b1}$ 、 $R_{b3}$ による電圧降下、 $v_{sj}$ 、 $v_{sj+y}$ は整流子片 $j$ 、 $j+y$ とブラシ $A_{b1}$ 、 $A_{b3}$ の各々の接触部における電圧降下、 $L_{j,m}$ はコイル $j$ の自己インダクタンスとコイル $j,m$ 間の相互インダクタンスである。

### 2.2 整流方程式

同極性の2ブラシによって短絡されたコイルに対する(2)式を整流中の全コイル( $n$ 個とする)に適用すると、整流方程式は次式のようにまとめられる。

$$\begin{aligned} [e] &= [L] \frac{d}{dt} [i] + [r][i] \\ &+ [R_b][I_b] + [v_{ss}] \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、 $[e]$ は整流起電力、 $[i]$ は整流中のコイル電流、 $[I_b]$ はブラシ電流、 $[v_{ss}]$ は整流子片とブラシの接触電圧を表す行列である。 $[L]$ は自己並びに相互インダクタンス、 $[r]$ はコイル抵抗、 $[R_b]$ はブラシ抵抗からなる係数行列である。

なお、ブラシと接触する整流子片、整流中の短絡コイルは、電機子の回転、電機子巻線条件、ブラシ数(=極数 $P$ とする)、ブラシ幅 $W_b$ などによって変化するが、次式を利用する作図法によって簡単に求められる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{K}{P} &= \frac{y}{2} + \frac{1}{P}, \\ \delta_b &= \frac{W_b}{W_s + W_m}, & \delta_m &= \frac{W_m}{W_s + W_m} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここで、 $\delta_b$ 、 $\delta_m$ は、 $W_b$ 、 $W_m$ を整流子片ピッチ単位で表したもので、 $W_s$ 、 $W_m$ は整流子片及びマイカの幅である。ただし、非整流中の並列回路電流は $I_{c1} = I_{c2} = I_c = I_a/2$ で与えられ、整流中のコイル電流との相互作用は無視できるものとする。また、ブラシは整流子片と滑らかな接触をしているものとし、各コイルの整流はブラシによる短絡の開始と同時に始まり、短絡の終了と同時に終るものとする。

### 3. 数値解析法

整流特性を解析するためには、電機子の回転による整流コイルの変化、即ち整流回路の状態変化を把握するとともに、整流回路の周期性を利用した整流方程式の数値解析が必要とされる。ここでは、表1に仕様を示した4極、戻り巻の単重波巻直流機の整流特性の解析を一例として、数値解析手順を示す。

#### 3.1 整流コイル

電機子コイル数 $K$ の中の整流コイルの求め方としては、作図法が広く知られている。ここでは、(1)、(4)式に示した整流子ピッチ単位で表わされた $K/P$ 、 $y$ 、 $\delta_b$ 、 $\delta_m$ を利用する計算によって求める。

表1 直流機の仕様

Table 1. Specifications of dc machine.

定格	電圧 : 220 V, 出力 : 3 kW 電流 : 16 A, 回転速度 : 1800 rpm 他励磁, 4極, 単重波巻
電機子	スロット数 : 25, コイルピッチ : 6 整流子片数 : 75, ブラシ数 : 4 電機子の外径, 長さ : 170, 90 mm 整流子片, マイカの幅 : 3.7, 0.86 mm ブラシの幅, 長さ : 12, 25 mm
主極	1極当りの巻数 : 1000, 極弧 : 67 % 幅, 高さ, 長さ : 50, 67, 90 mm
補極	1極当りの巻数 : 70 幅, 高さ, 長さ : 18, 65, 80 mm

いま, 表1に仕様を示した波巻直流機において, ブラシ  $A_{b1}$  の先端が整流子片1に接触したものとす。この瞬間での  $A_{b1}$  は,  $1 - \delta_b + K$  より, 整流子片1, 75, 74, 73に接触することになる。また, 他のブラシ  $A_{bk}$  ( $k=2,3,4$ ) は, 各々  $1 + (k-1)K/P$  を先端として  $\delta_b$  の幅の整流子片に接触する。表2には, 各ブラシ  $A_{bk}$  ( $k=1,2,3,4$ ) に接触する整流子片  $j$ , ならびに整流子片番号  $j$  に対応させたコイル  $j$  が  $A_{bk}$  と  $A_{bk+2}$  によって短絡されるか否かの判定に利用するための  $j+y$ ,  $j-y$  の計算結果を示す。  $S_j$  は, 整流子片  $j$  と  $A_{bk}$  との接触面積を整流子片ピッチで表わしたものである。  $q=1,2,3,\dots,13$  は, 整流が開始されるコイルを1とし, 各コイル電流の整流の進んだ度合によってコイルに付加した番号で, 各ブラシの先端に接触する整流子片の  $S_j$  より求められる。なお, 表2に示した  $j-y$ ,  $j+y$  の中で,  $j$  の中に含まれていないコイルは, 各々整流が終了したコイル, 整流が開始される前のコイルを示すことになる。

表2 ブラシと整流子片の接触

Table 2. Brush contact with segment.

$K=75, P=4, u=3, y=37, \delta_b=2.63, \delta_m=0.189$

	A b1	A b2	A b3	A b4
j	1 75 74 73	19 18 17	38 37 36 35	57 56 55 54
j+y	38 37 36 35	56 55 54	75 74 73 72	19 18 17 16
j-y	39 38 37 36	57 56 55	1 75 74 73	20 19 18 17
$S_j$	.0 1 1 .63	.75 1 .88	.5 1 1 .13	.25 1 1 .38
q	1 5 9 13	4 8 12	3 7 11 -	2 6 10 -

### 3. 2 直線整流と整流区間

表2のブラシの先端の接触面積  $S_j=0.75$  より, コイル1が整流を開始してから電機子が整流子片ピッチで  $1/P=0.25$  回転するとブラシ  $A_{b2}$  が新たな整流子片に接触する。このように, 新たなコイルの整流が始まるまでの期間は整流小区間と称されている。なお, この区間で, ブラシ後端に接触するコイル  $j$  は,  $S_j - \delta_m \leq 0$  となると整流が終了する。

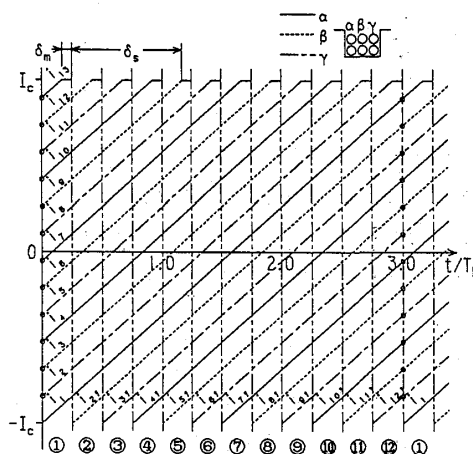


図2 直線整流時における整流過程

Fig.2 Commutation process under condition of straight line commutation.

図2は, 直線整流が行われると仮定した場合の各コイル  $i_q$  の電流の変化(整流曲線)で, ①, ②, ..., ⑬は整流小区間の推移,  $\alpha, \beta, \gamma$  はスロット内のコイル辺の位置によって決る  $u=3$  個の単位コイルを示すものである。なお, 電機子が  $u/K=1/N_s$  回転する毎に整流回路が同じ状態になるので, 小区間①のコイル電流の初期値と⑬の終期値とが一致する。ただし, 図は, 整流終了後のコイル電流  $i_j$  を  $i_j=I_c$  で表わし, 整流開始前の  $i_j$  を  $i_j=-I_c$  で表わしたものである。また,  $t/T_k, \delta_c$  は, 時間  $t$  の経過, コイルが整流を開始してから整流

が終了するまでに要する時間（整流周期）を整流子片ピッチ単位で表わしたものである。 $T_K$ ,  $\delta_c$ は、各々次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} T_K &= \frac{60}{N} \cdot \frac{1}{K} \\ \delta_c &= \delta_b + 1 - \delta_m - \frac{2}{P} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

### 3.3 整流起電力 $e_j$ ( $j=1,2,\dots,n$ )

各補極ギャップの磁束密度の分布は図3で与えられるものとする。図1のコイル辺  $j$  と  $j'$  とに誘導される  $e_j$  は次式で与えられる。

$$e_j = K_e l_a w_j (B_j + B_{j'}) \frac{\pi DN}{60} \quad (6)$$

ただし、 $D$ ,  $l_a$  は電機子の直径、長さ、 $w_j$  はコイル  $j$  の巻数、 $B_j$ ,  $B_{j'}$  は図1に示した変位  $\theta_j$ ,  $\theta_{j'}$  の計算と磁束密度分布より求められる磁束密度である。 $K_e$  は、 $e_j$  の計算に使用する係数で、電機子鉄心の長さ（9 cm）と補極鉄心の長さ（8 cm）の相違、鉄心の占積率（93%）、スロットの深さ（1.2 cm）などを考慮して  $K_e = 0.8$  とする。また同一スロット内の3個のコイル  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  には同一の整流起電力が誘導されるものとする。

なお、コイル1に対する  $\theta_1$ ,  $\theta_{1'}$  の時間変化は、次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \theta_1 &= \left( \delta_b + u + \frac{K}{P} - y_b - \frac{2}{P} \right) \frac{\pi}{K} \\ &\quad - \frac{2\pi N}{60} t \\ \theta_{1'} &= \theta_1 + 2\pi \left( \frac{y_b}{K} - \frac{1}{P} \right) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

上式で、 $\pm(\theta_1)_{t=0}$  の間が整流帯になる。

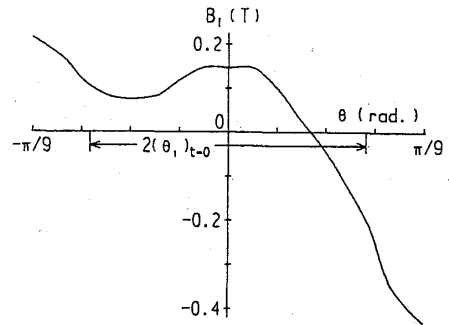


図3 補極ギャップにおける磁束密度分布  
Fig.3 Distribution of commutating magnetic flux density.

### 3.4 回路定数

コイル抵抗  $r_j$  ( $j=1,2,\dots,n$ ), ブラシ抵抗  $R_{bk}$  ( $k=1,2,3,4$ ) はコイルまたはブラシの固有抵抗、長さ、断面積より算出し、

$$\left. \begin{aligned} r &= r_j = 32.4 \text{ m}\Omega \\ R_b &= R_{bk} = 7.9 \text{ m}\Omega \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

とする。

インダクタンス  $L_{j,m}$  ( $j, m=1,2,\dots,n$ ) については、電機子回転による変化は無視する。表3は、スロット内インダクタンス、隣接の歯頭漏れインダクタンス、コイル端インダクタンスを考慮した阪部氏、Langsdorf氏等の計算法によって求めた表2のコイル  $j$  に対するインダクタンス行列である。

表3 インダクタンス行列  
Table 3. Inductance matrix.

j	1	75	74	73	19	18	17	38	37	36	57	56	55
1	14.5	0.6	0.6	0.6	3.0	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.3
75	0.6	14.5	11.8	10.2	0.3	3.0	3.0	0.0	0.0	0.0	3.0	3.0	3.0
74	0.6	11.8	14.3	11.8	0.3	3.0	3.0	0.0	0.0	0.0	3.0	3.0	3.0
73	0.6	10.2	11.8	14.5	0.3	3.0	3.0	0.0	0.0	0.0	3.0	3.0	3.0
19	3.0	0.3	0.3	0.3	14.5	0.6	0.6	3.0	3.0	0.3	0.0	0.0	0.0
18	0.3	3.0	3.0	3.0	0.6	14.5	11.8	0.3	0.3	3.0	0.0	0.0	0.0
17	0.3	3.0	3.0	3.0	0.6	11.8	14.3	0.3	0.3	3.0	0.0	0.0	0.0
38	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	0.3	0.3	14.3	11.8	0.6	3.0	3.0	3.0
37	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	0.3	0.3	11.8	14.5	0.6	3.0	3.0	3.0
36	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	3.0	3.0	0.6	0.6	14.5	0.3	0.3	0.3
57	0.3	3.0	3.0	3.0	0.0	0.0	0.0	3.0	3.0	0.3	14.5	11.8	10.2
56	0.3	3.0	3.0	3.0	0.0	0.0	0.0	3.0	3.0	0.3	11.8	14.3	11.8
55	0.3	3.0	3.0	3.0	0.0	0.0	0.0	3.0	3.0	0.3	10.2	11.8	14.3

( $\mu\text{H}$ )

### 3.5 ブラシ抵抗による電圧降下 $R_b I_{bk}$ ( $k=1, 2, 3, 4$ ), 整流子片との接触電圧 $v_{sj}$ ( $j=1, 2, \dots, n+2$ )

表2を参照して、各整流子片に流入する電流  $i_j - i_{j-y}$  を求めると、各ブラシ電流は、

$$\left. \begin{aligned} I_{b1} &= i_1 + I_c + i_{75} - i_{38} + i_{74} - i_{37} + i_{73} - i_{36}, \\ I_{b2} &= i_{19} - i_{57} + i_{18} - i_{56} + i_{17} - i_{55}, \\ I_{b3} &= i_{38} - i_1 + i_{37} - i_{75} + i_{36} - i_{74} + I_c - i_{73}, \\ I_{b4} &= i_{57} - I_c + i_{56} - i_{19} + i_{55} - i_{18} + I_c - i_{17} \end{aligned} \right\} (9)$$

で表わされ、 $R_b I_{bk}$  の計算ができる。

ブラシと整流子は滑らかな接触が行われ、 $v_{sj}$  は図4のように、ブラシと整流子片との接触面を通る電流の密度  $J$  の関数  $f(J)$  として与えられるものとする。ただし、電流がブラシから整流子片に流入する場合の  $J$ ,  $f(J)$  を正としている。図の特性に対し、整流子片  $j$  の電流密度  $J_j = (i_j - i_{j-y})/S_j$  の計算を行うことによって  $v_{sj}$  が求められる。なお、図4の特性の近似に、これまででは  $J$  に関する指数関数による近似法が主に使用されてきたが、特性曲線を次の Ffolich の式で近似する直接的な方法を使用する。

$$v_{sj} = \frac{J_j}{pJ_j + q} \quad (10)$$

ただし、 $p$ ,  $q$  の値は、 $J_j$  の近傍における図の曲線上の2点の  $J$ ,  $f(J)$  値を用いて算出する。

### 3.6 整流方程式の差分法

これまで、(2), (3)式で与えられた整流方程式の数値解析法として、Runge Kutta法の利用が考えられてきたが、状態変数の形に変換するための工夫が必要とされる。ここでは、整流方程式が直接的に解け、しかもかなりの精度が期待できる差分陰解法を使用する。

まず、(3)式の整流方程式に(9)式を代入して、次式のように書き改める。

$$[e] = [L] \frac{d}{dt} [i] + [r][i] + R_b [C_1][i] + R_b [C_2] I_c + [v_{ss}] \quad (11)$$

ただし、 $[C_1]$ ,  $[C_2]$  は  $[R_b][I_b]$  を  $[i]$ ,  $I_c$  で表わすための係数行列である。なお、差分陰解法では、時間導関数の無い方程式も扱えるので、整流が終了したコイルに対する方程式は、 $i_j = I_c$  に置き換える。

ここで、整流小区間内での時刻  $t$  における  $[i]_t$  が求められているものとする。(11)式の右辺第1項に対し、微小時間  $\Delta t$  後の時刻  $t = t + \Delta t$  における次の近似式が得られる。

$$[L][i]_{t+\Delta t} = [L][i]_t + \Delta t [L] \frac{d}{dt} [i]_{t+\Delta t} \quad (12)$$

(12)式に(11)式に示した関係式を代入、(6)式より  $[e]_{t+\Delta t}$  を求めることにより、 $[i]_{t+\Delta t}$  を求めるための次式が導かれる。

$$\begin{aligned} [i]_{t+\Delta t} &= \{ [L] + \Delta t [r] + \Delta t R_b [C_1] \}^{-1}_{t+\Delta t} \\ &\quad \times \{ [L][i]_t + \Delta t [e]_{t+\Delta t} \\ &\quad - \Delta t R_b [C_2]_{t+\Delta t} I_c \\ &\quad - \Delta t [v_{ss}]_{t+\Delta t} \} \end{aligned} \quad (13)$$

上式の右辺の逆行列はインダクタンスが無くても求められる。したがって、整流が終了して  $i_j = I_c$  となるコイルが含まれる場合の整流方程式も解ける。ただし、右辺には非線形接触電圧の差からなる行列  $[v_{ss}]_{t+\Delta t}$  が含まれるので、 $[i]_{t+\Delta t}$  を求めるには繰り返し計算が必要とされる。繰り返し計算では、 $[i]_{t+\Delta t}$  の近似値  $[i']_{t+\Delta t}$  を用いて  $[v_{ss}]_{t+\Delta t}$  の計算を行い、(13)式より  $[i]_{t+\Delta t}$  を求める。ただし、接触電圧は、各整流子片に対する流入電流、接触面積、電流密度を求め、各電流密度に(10)式を適用して図4の曲線を近似することによって求める。つぎに、次式より新たな近似値  $[i'']_{t+\Delta t}$  を計算する。

$$[i'']_{t+\Delta t} = \{ [i']_{t+\Delta t} + \omega \{ [i]_{t+\Delta t} - [i']_{t+\Delta t} \} \} \quad (14)$$

$[i']_{t+\Delta t} \doteq [i]_{t+\Delta t}$  が満たされると次の時刻に対する計算を始める。ただし、 $\omega$  は計算時間の短縮を計るための係数で、 $\omega = 0.1 \sim 0.7$  とする。差分陰解法では、 $\Delta t$  を逐次変化させてもかなりの解析精度が期待できるが、上記のように繰り返し計算が必要とされるので、(13)式の逆行列の計算回数を減らすため、可能な限り  $\Delta t$  は一定にする。

なお、1つの整流小区間での計算が終了すると、電流の連続性を考慮して次の小区間での計算を始める。このような小区間①から⑫までの計算は、①における  $[i]$

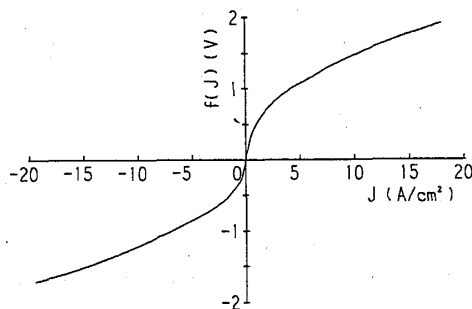


図4 ブラシの接触電圧特性

Fig.4 Characteristic of brush contact voltage.

の初期値と⑫における  $[i]$  の終期値が一致するまで繰り返す。ただし、 $[i]$  の初期値の決定にも(14)式と同様の緩和法を使用する。

4. 整流特性の計算結果

整流特性は、巻線条件、回路定数、回転速度、補極の磁束分布、ブラシと整流子片間の接触電圧などに影響されることが知られている。ここでは、表1に示した小形波巻直流機に対し、ブラシ幅を変化させた場合の整流特性の数値解析を行い、ブラシと整流子片間の接触状態、整流コイル数の変化が整流特性に与える影響について調べることとする。

図5は、表1に示した  $\delta_b=2.63$  の実用機に対し、整流方程式の数値解析により各整流コイル電流の時間変化を求め、整流特性の把握が容易な整流曲線として表わしたものである。ただし、 $T_k=0.44\text{ms}$  で、実線、破線、

一点鎖線で示した  $i_\alpha, i_\beta, i_\gamma$  は、スロット内  $\alpha, \beta, \gamma$  の位置のコイル電流である。また、整流曲線は、 $A_{b1}, A_{b3}$  の正極ブラシ、 $A_{b2}, A_{b4}$  の負極ブラシとによる整流に分けて示している。

図5より、各整流コイル電流はスロット内のコイルの位置によってかなり異なった整流を受けることが解る。すなわち、図3の  $(\theta_1)_{t=0}$  における磁束密度が負で整流起電力が負の状態では整流が開始される  $i_\alpha$  には整流初期に不足整流的な現象が現われる。しかし、 $t/T_k=1$  あるいは2の時間が経過して磁束密度が増加した後に整流が開始される  $i_\beta, i_\gamma$  は、直線或は過整流的な現象を示している。なお、整流終期では、主極磁束の影響によって磁束密度が増加した状態の下で整流が終了するので、いずれのコイルにも過整流的な現象が現われている。ただし、図に示されている程度の不足・過整流的な現象では、整流火花の発生は無いものと考えられる。

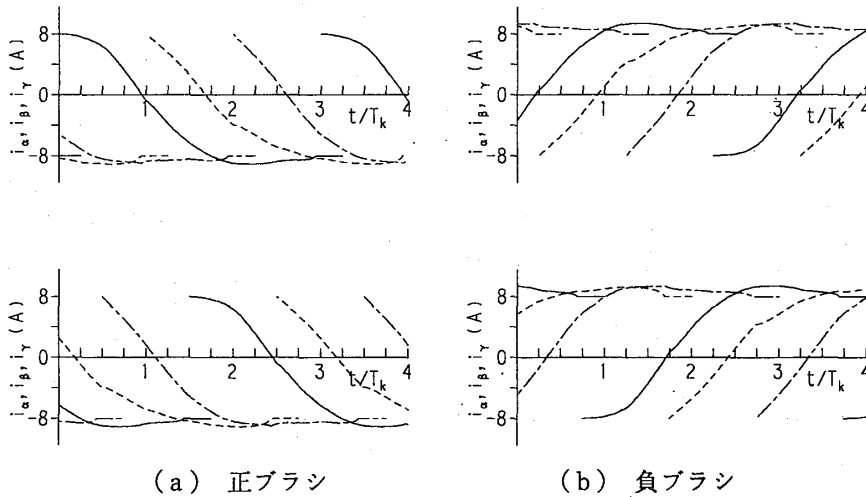


図5  $\delta_b=2.63$  の場合の整流曲線

Fig.5 Commutating curves for  $\delta_b=2.63$ .

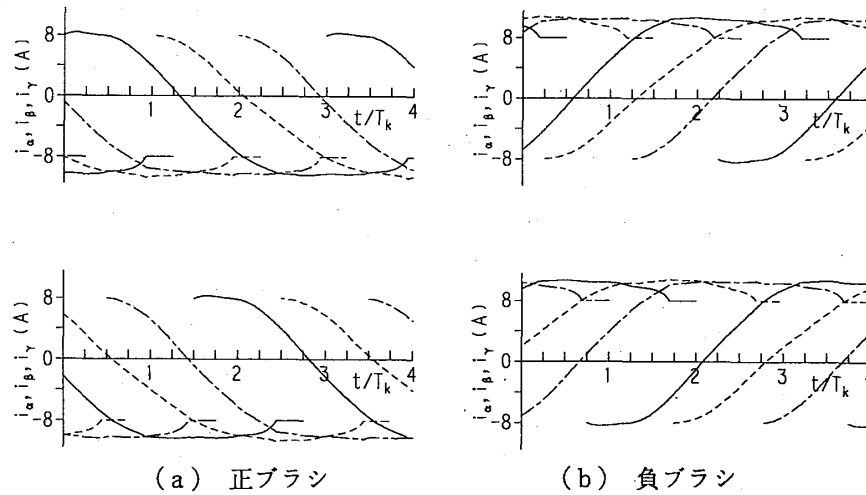


図6  $\delta_b=3.63$  の場合の整流曲線

Fig.6 Commutating curves for  $\delta_b=3.63$ .

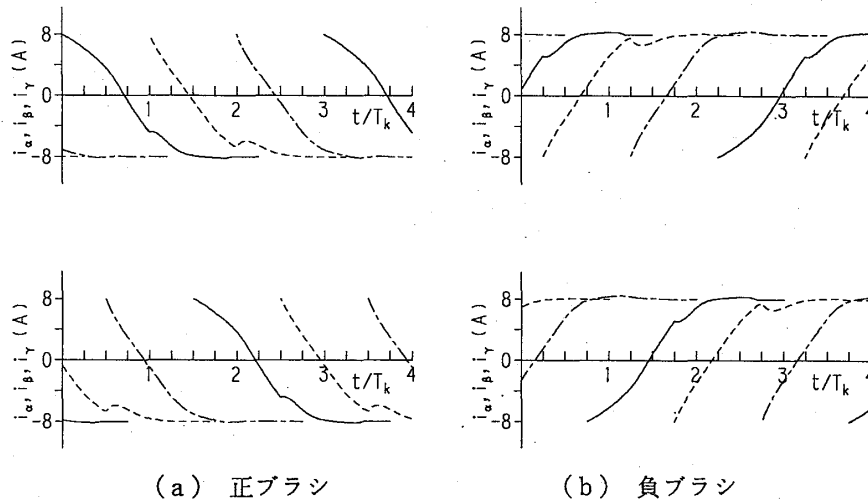


図7  $\delta_b=1.63$ の場合の整流曲線

Fig.7 Commutating curves for  $\delta_b=1.63$ .

図6は、ブラシ幅を増して $\delta_b=3.63$ とした場合の解析結果により、整流曲線を求めたものである。ただし、ブラシと整流子片との接触面積を一定に保つため、表1に示したブラシの長さに変更を加えている。図5に比して、整流周期、同時に整流されるコイル数が増大していることが解る。また、図3に示した $(\theta_1)_{t=0}$ の増加によって、いずれのコイルに対しても整流初期に僅かな不足整流現象が現われている。なお、整流終期では、整流周期の増大によるリアクタンス電圧の減少並びに磁束密度の増加によって過整流現象が顕著に現れており、整流火花の発生の恐れが生じる。

図7は、ブラシ幅を減少させて $\delta_b=1.63$ とした場合の整流曲線であり、図5に比して、整流周期、同時に整流されるコイル数が減少していることが解る。整流周期の減少によるリアクタンス電圧の増加によって不足整流となることが予測されたが、磁束密度が高くなってから整流が開始されることにより、かえって過整流的な整流現象を示している。また、スロット内 $\alpha$ 、 $\beta$ に位置するコイルに対する整流曲線には、それぞれ $\beta$ 、 $\gamma$ のコイルの整流開始時に乱れが生じている。この現象は、同一スロット内の他のコイルが短時間で整流されるため、スロット内相互インダクタンスによって高い電圧が誘導されることによると考えられる。

## 5. まとめ

直流機の整流特性の改善のための解析では、重ね巻直流機に対する解析が多く、波巻直流機に対する解析はあまり行われていない。

本論文では、まず、単重波巻直流機における整流現象を解析するため、整流方程式の導出について説明した。なお、時間の経過とともに変化する整流方程式の数値解析法には、方程式の変換が簡単でしかも十分な解析精度

が得られる差分陰解法を利用した。つぎに、4極、3kWの小形波巻直流機に対し、ブラシ幅を変化させた場合の整流特性の数値解析を行い、ブラシ幅が整流特性に与える影響を示し、ブラシ幅の選択が整流特性の改善に活用できることに理論的根拠を与えた。

今後は、数値解析法の改良により、無火花帯、整流特性向上のための補極ギャップにおける磁束密度分布等の解析を試みる予定である。

終りに、本論文の作成に当り、数値計算並びに図面作成には福山大学工学部情報工学科の大型計算機を利用したことを報告するとともに、利用に際して多大なご助力、ご助言を頂いた同学科の小林教授、河野助教授、川久保助教授、新谷助教授に感謝の意を表します。また、図面作成に関しては、NECのPC9801パソコン端末機にグラフィック機能を持たせるためのソフトウェアの提供を頂いた岐阜大学教育学部の吉田昌春助教授に対し深謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 松田「直流機整流作用の一解析法」, 電学論, Vol.94B-10, p.479 (1974)
- 2) 森田, 宮地「接触特性の定数化近似による整流方程式の一解析法」, 電学論, Vol.B-97-1, p.31 (1977)
- 3) 阪部, 野村, 岩本「直流機の整流現象」, 三菱電機技報, Vol.51-10, p.691 (1977)
- 4) 松田「単重波巻直流機の整流特性解析」, 電学論, Vol.109D-9, p.661 (1989)
- 5) 竹上「直流機」, 国民科学社, p.17, p.58 (1960)
- 6) A.S.Langsdorf "Principles of Direct Current Machines", McGraw-Hill, p.266 (1959)
- 7) 安藤, 卯本「小形直流機の補極磁束の二次元過渡解析」, 第72回PE研究会 (1987.5), Vol.12 (1988)