UDC 621.313.3.045.5:621.3.043/.044.06

論文

60-B18

交流機波巻線線の極間接続線についての考察

正員 安芸文 武 (日立製作所)

1. ま え が き

交流回転電機の電機子巻線の巻線方式には、通常重ね巻と波巻とがある。波巻は適用に制限条件があるとか⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾、二層分数スロットの短節巻の波巻の結線手順が余り明確でないようだ⁽⁴⁾とかいわれており、一般には結線手順が簡単である重ね巻が広く採用されている。しかし、波巻は重ね巻に比べて極間接続線が少ないことや、並列回路の電圧を均等化できることなどが広く知られており⁽⁵⁾、最近は大容量水車発電機などに適用が拡大されてきた。しかし、三相交流の二層分数スロットの短節巻の波巻はその結線手法として公開されているものは⁽²⁾⁽⁶⁾必ずしも解り易くないようであるし、最近でも二層分数みぞ巻の波巻の統一的な結線法について考察した結果が報告されたが⁽⁵⁾、結論には「統一的な波巻結線方法を導くためには、更に極間接続線の結線方法、電機子巻線の並列回路の数と結線方法とみぞの相配分などの考察が必要である」とあり、まだ未解決事項が残っていると考えられる。

このような状況において、ある統一した考え方で二層分数みぞ巻の波巻結線ができるようになると大容量水車発電機の如く、その長所のゆえに波巻が望まれているものに対して、制限条件無しに自由に機械を設計製作できることになり、電気設計の上で大幅な利があることになるものと考えられる。

本論文は、二層分数みぞ巻の波巻の統一的な結線法についての考察結果を述べる。みぞの相配分、並列回路の数を考慮した極間接続線の結線方法、極間接続線の数と長さの一般式化がある統一した考え方で説明できれば、統一的な結線法が確立するものと考えて、これらの事項についての検討結果について述べる。

2. 前提条件

結線法はバラエティに富むので仮定条件を明確に定めておかなければ混乱するから、本報では次の条件に

Some Considerations on Pole to Pole Connections for Wave Windings of Alternating Current Rotating Machines. By Fumitake Aki, Member (Hitachi Works, Hitachi Ltd.,)
安芸文武：正員，日立製作所日立工場

従がうものとする。但し、各項の末尾に※印のあるものは今回特に限定的においた事項で、無印のものは通常の波巻結線のときに実務上用いられる事項である。

(1) 三相交流の二層巻の波巻の分数みぞ巻の結線を取扱う。

(2) 結線は星形結線とする。

(3) 巻線中の電流の流れは発電機の場合を想定して、ある瞬時に巻線から流れ出る端を線路側とし、流れ入る端を中性点側とする。矢印もこの考えで付す。なおコイルシリーズの単位でもこの原則を適用する。

(4) 左上りコイル（接続側より見て左側が上コイルのものをいう）とする。※

(5) スロット番号1を基準としてV相の底コイルとする。※

(6) 分数みぞ巻のときのコイルの形状は接続部分を除いてコイル端部の角度、長さなどは上コイル、底コイルともに同じとする。

(7) コイルのスロットへの相配列は重ね巻に対して用いられるものと同一とする。※

(8) 本論文では各毎極毎相スロット数に対しては表1に示す基準配列を用いる。これは毎極毎相スロット数 $N_{sp} = A + C/B$ (A, B, C は正の整数で、 C/B は既約分数) において A に無関係に C/B に対して基準化して示したものであり、正規の数より A を差引いて1と0だけで表示したものである。使用するときは逆に A を足して用いる。※

(9) 一つの結線を検討しているときは後ピッチ、前ピッチは各一種のみとする。※

表1 スロットの基本配列の代表例
Table 1. Example of basic distribution of slot.

C/B	基 本 配 列
1/4	1 0 0 0
1/5	1 0 0 0 0
2/5	1 0 1 0 0
3/7	1 0 1 0 1 0 0
1/10	1 0 0 0 0 0 0 0 0 0
3/11	1 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0

(10) 短節率が 0.833⁽⁷⁾ 近辺の短節巻を扱う。

(11) 極間接続線は、配置が対称で、長さが一番短くなる波巻結線を扱う。※

(12) 本論文で用いるコイルシリーズとは、主として巻線ピッチ W_p で素直に直列につながる一連のコイル群を称するものとする。通常は底コイルのみで表示することにする。但し上コイルをも取入れて全ての後ピッチと前ピッチで素直につながるものを称する場合もある。※

(13) 分数みぞ巻のうち毎極毎相スロット数の分母が 3 の倍数以外の全てのスロット数と極数の組合せに対して適用できる。※

(14) 記号類は次のように定義する。

N_s : スロット数, P : 極数, N_{sp} : 毎極毎相スロット数 ($=N_s/(3 \times P)=A+C/B$), M : 最大可能並列回路数 ($=P/B$ ※), m : 可能並列回路数 (M の公約数), W_p : 巻線ピッチ ($=N_{sp} \times 6$ の四捨五入した整数 $=B_p+F_p$), B_p : 後ピッチ, F_p : 前ピッチ
 $N_{s \min}$: 最小巻線可能スロット数 ($= (A \times B + C) \times 3$ for $B=$ 偶数, $(A \times B + C) \times 6$ for $B=$ 奇数)

α : 1 スロット当りの起電力ベクトルの位相角 ($=360^\circ \times (p/2)/N_s$) (度)

極間接続線の長さは (スロットピッチ/相) で示す。その数は (個/相) で示す。※

3. 波巻の統一的結線法について

波巻の統一的結線法について考えるときは、次の諸点を明らかにする必要があると考えられる。

- (1) スロットの各相配分, (2) 並列回路数
- (3) 極間接続線の適正な結線法
- (4) 極間接続線の数と長さの一般式

スロットの相配分については、重ね巻用には種々の方法が報告⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾ されており、波巻用には別に報告⁽²⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾ されている。もし重ね巻用の相配列で波巻が可能であれば波巻を検討するときに理解が非常にし易くなる。別途重ね巻用の相配列でも波巻ができることを報告⁽¹¹⁾ したので本論文でも重ね巻用に用いている表 1 に示した相配列で検討を進める。

並列回路数については、従来では波巻の可能性と別個に考えられていることが多く、重ね巻に対していわれている条件、すなわち、 P/B の公約数ということが波巻にも常に成立するかどうかは明言されていなかったようである。本論文では初めからこの条件が常に成立すると仮定して検討を進めることにする。

極間接続線の適正な結線方法については、新しいス

ロットの相配列表と簡易結線図の手法⁽¹¹⁾ により、数多くの理論上可能な結線のうちから、極間接続線の長さが最も短い結線を可視的に適正に選び出せるので一応の確立が得られたと考えている。本論文では簡単にその手法を紹介し、極間接続線の数と長さの一般式を得るための一手法として有効であることを説明する。

極間接続線の数と長さについて、正式の結線図を画かずにあらかじめ簡単な一般式で表わすことができれば、波巻結線についての情報が一層明らかとなり電気設計の上で大変有効である。極間接続線の数は並列回路数の関数として、長さは並列回路数、巻線ピッチと毎極毎相スロット数の関数として一般式化できることを以下に実例で説明する。

(1)~(4) についての諸点について、ある共通した基準によって全てが説明できれば、統一的な考え方ができたことになると考える。

4. 極間接続線の適正な結線法

統一的な波巻の結線法を行なうために、スロットの相配分は従来の重ね巻に對するものを用い、並列回路数に対してはこれも重ね巻に對すると同じ P/B を最大可能並列回路数として、その公約数の並列回路数が完全平衡分数みぞ巻の波巻結線として常に得られるということを宣言して以下の説明を進める。極間接続線の適正な結線法⁽¹¹⁾ によって個別に最適のコイルシリーズと、極間接続線を決定してこれらを集約化して全体の傾向をつかむことにする。

従来の波巻の結線は後ピッチ、前ピッチ、広前ピッチ、狭前ピッチ、最後ピッチなどという数多くのピッチを算出しておき、順次これらを用いて底コイル、上

表 2 $N_{sp}=1\frac{1}{4}$, 4Y のスロット配列表

Table 2. Slot distribution, with $N_{sp}=1\frac{1}{4}$, 4Y.

		奇数No極				偶数No極			
		V	-U	W	-V	U	-W		
I群 1Y	1	①	2	3	4	⑤	6	7	8
	9	⑨	10	11	12	⑬	14	15	
II群 2Y, 1Y	16	⑬	17	18	19	⑮	21	22	23
	24	⑮	25	26	27	⑰	29	30	
III群 3Y, 1Y	31	⑰	32	33	34	⑲	36	37	38
	39	⑲	40	41	42	⑳	44	45	
IV群 4Y, 2Y 1Y	46	㉑	47	48	49	㉓	51	52	53
	54	㉓	55	56	57	㉕	59	60	

コイルをつないで行き表化していた⁽²⁾⁽⁶⁾。これではスロット数が 1,000~2,000 にもなると膨大な手順がかかり、かつ、もし途中でどこかで間違ってもなかなかその誤りに気がつかない欠点があった。これに対して新しいスロットの相配列表と、簡易結線図を用いると規則性が可視的に明らかであり非常に解り易い長所がある。次の具体例で極間接続線の適正な結線法を説明する。

$$N_s=60, P=16, N_{spp}=1-1/4$$

まず、スロットの相配列表を作成するのに必要なものを算出する。 $M=P/B=4$, $N_{s\min}=(A+B+C)\times 3=15$, $W_p=N_{spp}\times 6=7.5\approx 8$, $B_p/7.5/2=0.85$ より $B_p=3$ とし, $F_p=W_p-B_p=5$, $\alpha=48^\circ$

表 2 の如く横方向は大きく奇数番号極と偶数番号極とに分け, W_p 個のスロットを配列する。行を変えて $N_{s\min}$ まで順次並べる。これを I 群とする。次に左端へ戻して $2\times N_{s\min}$ まで並べて, これを II 群とする。以下同じようにして N_s まで並べて, これらを III, IV 群とする。次に N_{spp} の C/B に対して表 1 より 1000 を得るのでこれらに $A=1$ を足して 2111 を得る。相配列はこの繰返しとなるのでこれで表を頭から区切って行くと表 2 の如く太線で区切られた表が得られる。これらは底コイル (または上コイル) のみを示している。 $N_{s\min}$ 単位の群内では同じ縦の列のものは丁度 W_p で素直につながるものとなっている。表 2 では解りやすくするために W_p でつながるシリーズを線で結んでおいた。他の群へ移るときは同じ縦列ではなく少しずれるのが普通である。

次に簡易結線図を書くために表 3 の如き簡易結線図作成用の表を作成する。 W_p で素直につながるコイル

シリーズの始と終を同表の A, B 欄に書き奇数番号極下のは実線で矢印を左へつけ, 偶数番号極下のものには点線で矢印を右へつける。スロット部分が A の位置にあるコイルのコイル端部の口出し位置は $F_p/2$ だけずれているので, それらの位置を $(A-F_p/2)$ で算出する。それらの固定子に対する幾何学的位置は No. 60 ($=N_s$) スロットを基準の 0 度として各角度を算出すると同表記載のようになる。180 度を越えるものは $180^\circ+\beta^\circ$ の形で示しておくときと図を書くときに便利である。シリーズ終の底コイル B は B_p だけ離れた上コイルにつながっている所以他们を算出する。更にそれらの上コイルの口出し位置を算出し, 更にそれらの幾何学的位置を算出する。別にシリーズ始 A の電圧ベクトルの電気角を算出しておくシリーズ間の相対関係がはっきりするのでこれらも算出しておく。これらも 180 度を越えるものは $180^\circ+\gamma^\circ$ の形で表示しておく。なお 360 度を越えるものは 360 度の倍数を差引いて 360 度より小さい値で表示する。 $180^\circ+\gamma^\circ$ のものは偶数番号極の下シリーズである。この電気角 0 度のものは線路側口出しとして用い得るもので分母 B が偶数のときは M 個, 分母 B が奇数のときは $M/2$ 個である。丁度 180 度のものは中性点側口出しに用い得るもので分母 B が偶数のときには無く, 分母 B が奇数のときには $M/2$ 個ある。さて, この表 3 を用いて簡易結線図を作成する。この例に対するものを図 1 の如く図示するものとする。まず, 二点鎖線の円が固定子を現わすとする。円の左端を 0 度とし, この例では時計方向回りに角度をとることにする。底コイル No. 5 の A は 15 度であるから図示の如くとして短かい実線を円とクロスさせて図示する。同じようにして全てのものを図示する。円の内側に示した数値は A または B を示す。短かい線に表でつけた矢印をつける。円の外側の数値は口出し位置をスロット番号で示したものであり, それらの前に底と上がついているのは底コイルか上コイルかを区別するためである。表の A, B に対応させて円内は直線でコイルシリーズを図示し簡素化する。実線は奇数番号の極の下のもの, 点線は偶数番号の下のを示すものとする。こうして作成した図 1 は W_p で素直につながるコイルシリーズの全ばうを示している。あとは必要な並列回路に従って円の外で極間接続線を用いて結線を行なう。

まず, 4Y 結線を考えることにする。表 3 の左端の電気角の欄を見ると 0 度のものが 4 個あり, これらが線路側口出しとなるのでそれぞれを V_1, V_2, V_3, V_4 と命名し図示する。残りの 4 個のシリーズも電気角が同一であるから対等であり, 先のすでに決定した線路側

表 3 簡易結線図作成用表 ($N_{spp}=1\frac{1}{4}$, V 相)

Table 3. Table for simple connection diagram.

シリーズ始 底コイル口出し位置 (度)	底コイル口出し位置 (度)	シリーズ終 上コイル	上コイル口出し位置 (度)	底コイル口出し位置 (度)
$(A-1)\times\alpha$	$\frac{360}{N_s}\times\left(A-\frac{F_p}{2}\right)$	$A\rightarrow B$	$B+B_p$	$\frac{360}{N_s}\times\left(B+\frac{F_p}{2}\right)$
0	180+171	14→17	20	22.5
0	81	16→32	35	37.5
0	171	31→47	50	52.5
0	180+81	46→2	5	7.5
180+12	15	5→13	16	18.5
180+12	105	20→28	31	33.5
180+12	180+15	35→43	46	48.5
180+12	180+105	50→58	1	3.5
				135
				180+45
				180+135
				45
				111
				180+21
				180+111
				21

※: 右まわりにとる。

称性がはっきりしていることと、極間接続線の数と長さがV相と同じであることより、以後の説明はV相についてのみ実施する。

また、以上は分母 B が偶数のものを説明したが奇数の場合にも同様の手法で説明できる。後で用いる $N_{sp}=2-1/5$ の場合の簡易結線図を図4に示した。この様にして極間接続線の適正な結線法が得られる。

5. 極間接続線の数と長さの一般式

前述のように極数、スロット数、並列回路数が決められるとそれらに対して極間接続線が最短になるようにして結線が決まる。これらの極間接続線の数と長さをどのようにして一般式化できるかを次に説明する。

簡易結線図2の(a)に示したシリーズ1-17と5-13は底コイル基準であり、実際には上コイルが B_p でつながり図5のようになっている。すなわち、便宜上図2(a)では底コイル17から13へ結ばれるように見えるが、実際には図5の如く上コイル20と上コイル16との間で極間接続線が結ばれているわけである。更に実際の展開図で示すと図6の如くなり、極間接続線の長さを Y とすれば底コイル番号で示した長さは同図に示した X に等しくなる。スロット配列表からその X を求めるには、表2にて・印の間の長さを A の関数として表わせばよく次式の如くなる。

$$X = A \times 2 + (A + 1) \times 1 = 3A + 1 \dots\dots(1)$$

表4 $N_{sp}=1\frac{1}{4}$ のときの極間接続線の数と長さの例

Table 4. Example of number and length of pole to pole connector, with $N_{sp}=1\frac{1}{4}$.

N_{sp}		条 件								極 間 接 続 線 の 数 と 長 さ			
$A + \frac{C}{B}$	MY	N_s	P	M $(=\frac{P}{B})$	W_p	B_p	F_p	$\frac{B_p}{6N_{sp}P/2}$		4 Y	3 Y	2 Y	1 Y
$1\frac{1}{4}$	1 Y	15	4	1						—	—	—	$4 \times 1 = (3A + 1) \times M$ 上—上 1=M
	2 Y	30	8	2						—	—	$4 \times 2 = (3A + 1) \times M$ 上—上 2=M	$4 \times 2 + 1 \times 1$ $= \{(3A + 1) \times 2 + (W_p - 5A - 2) \times 1\} \times m$ 上—上 1, 上—底 1, 底—底 1
	3 Y	45	12	3	8	3	5	0.80		—	$4 \times 3 = (3A + 1) \times M$ 上—上 3=M	—	$9 \times 1 + 4 \times 2 + 1 \times 2$ $= \{(A + W_p) \times 1 + (3A + 1) \times 2 + (W_p - 5A - 2) \times 2\} \times m$ 上—上 1, 上—底 3, 底—底 1
	4 Y	60	16	4						$4 \times 4 = (3A + 1) \times M$ 上—上 4=M	—	$(4 \times 2 + 1 \times 1) \times 2$ $= \{(3A + 1) \times 2 + (W_p - 5A - 2) \times 1\} \times m$ 上—上 2, 上—底 2 底—底 2	$6 \times 2 + 4 \times 2 + 1 \times 3$ $= \{(11A + 3 - W_p) \times 2 + (3A + 1) \times 2 + (W_p - 5A - 2) \times 3\} \times m$ 上—上 1, 上—底 5 底—底 1

これがこの場合の極間接続線の長さの一般式である。例では A が1であるので代入すると X は4となり図2(a)で得たものと同じであることがわかる。図2(c)の場合の長さが6のものの展開図と一般式を図7に示

図5 1分相のコイルシリーズ
Fig. 5. Coil series for a split phase.

図6 部分展開図 (図2a) に対応)
Fig. 6. A part of spread winding diagram (for a) of Fig. 2).

表 5 分母が偶数の N_{sp} のときの極間接続線の数と長さの代表例Table 5. Examples of length and number of pole to pole connectors for winding with N_{sp} , which has denominator of even number for fraction.

N_{sp}	A	極間接続線の長さ (スロットピッチ/相)	極間接続線の数 (個/相)				Aの値によって区分されるグループ名	該当する C/B
			合計	上上	上底	底底		
A=1/4	1, 2, 3, 4	$(3A+1) \times M$	M	M			D	左欄と下記を除く全て
A=1/10	1, 3	$\{3A \times 1 + (W_p - 5A - 1) \times 2\} \times M$	3M	M	2M		E	$\frac{9}{10} \quad \frac{3}{14} \quad \frac{11}{14}$
	2, 4	$\{(9A+1) \times 2 + 3A \times 1\} \times M$	3M	2M		M		
A=1/14	1, 2, 4	$\{3A \times 1 + (7A - W_p) \times 4\} \times M$	5M	M	4M		F	$\frac{1}{16} \quad \frac{7}{16} \quad \frac{1}{20} \quad \frac{9}{20}$
	3	$\{(19A+1 - W_p) \times 1 + (5A+1 + W_p) \times 1 + 3A \times 3\} \times M$	5M	2M	2M	M		
A=13/14	1, 3, 4	$\{(3A+3) \times 2 + (W_p - 5A - 5) \times 3\} \times M$	5M	M	3M	M	G	$\frac{9}{16} \quad \frac{15}{16} \quad \frac{19}{20}$
	2	$\{(7A+6 + W_p) \times 1 + (9A+8) \times 1 + (3A+3) \times 3\} \times M$	5M	2M	M	2M		
A=11/20	1, 4	$\{(9A+5) \times 3 + (13A+7 - W_p) \times 1 + (W_p - A) \times 1\} \times M$	5M	2M	2M	M	H	
	2	$\{(5A+3 + W_p) \times 1 + (9A+5) \times 3 + (W_p - A) \times 1\} \times M$	5M	2M	2M	M		
	3	$\{9(A+5) \times 3 + (13A+7 - W_p) \times 2\} \times M$	5M	2M	2M	M		

した。長さ6と1のものは表2の中で、○印と×印で示したコイル間の長さである。実際の接続が上コイル-上コイル間、または底コイル-底コイル間の場合には長さの一般式はAのみの関数となり、上コイル-底コイル間の場合にはAと W_p の関数となる。また、敗はMまたはmの関数となる。このようにして求めた N_{sp} が1-1/4に対する一般式を表4に示した。司表中で太わくで囲んだ部分は次式のように共通化できる。

$$(3A+1) \times M \dots\dots\dots (2)$$

同じようにして $C/B=1/4$ に対してAを2, 3, 4として一般式を求めるといずれもMに対しては(2)式と同じになるのでA=1/4に対して(2)式が共通化した式となる。同じようにして分母が偶数の他の N_{sp} に

対して求め、後述する表9のAの値によって区分されるグループの各々の代表的結果を表5に示した。同じC/Bに対してもAの値によっては一つの式にまとまらず二〜三組に分れる場合もある。表4で太わく以外のものは共通化が難しいので、本論文ではMに対するもののみを共通化して表5にまとめた。同表にて代表例の欄を見るとAの値によって長さの式が異なることがわかる。備考欄にこれらAの値によって区分されるグループ名をD~Hと命名する。代表例に示した以外のC/B(但しB=偶数)に対しても別途検討して命名したグループと同じようにAの値によって一般式が異なるものを備考欄に示した。

以上は分母Bが偶数のものに対してであったが、奇

表 6 $N_{sp}=2-1/5$ のスロット配列表Table 6. Slot distribution, with $N_{sp}=2-1/5$

	奇数 No. 極						偶数 No. 極					
	V			-U			W			-V		
I 群 2Y, 1Y	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
	61	62	63	64	65	66						
	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78
	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102
	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114
II 群 4Y, 2Y 1Y	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126
	127	128	129	130	131	132

Fig. 7. A Part of spread winding diagram (for c) of Fig. 2).

表 7 $N_{spp}=2\frac{1}{5}$ のときの極間接続線の数と長さの例Table 7. An example of number and length of pole to pole connector, with $N_{spp}=2\frac{1}{5}$.

N_{spp}	条 件								極 間 接 続 線 の 数 と 長 さ				
$A+\frac{C}{B}$	MY	N_s	P	$\left(\frac{M}{P}=\frac{B}{A}\right)$	W_p	B_p	F_p	$\frac{B_p}{6N_{spp}/2}$	6Y	4Y	3Y	2Y	1Y
$2\frac{1}{5}$	2Y	66	10	2					—	—	—	0	$33 \times 1 = (15A+3) \times m$ 上—上 1
	4Y	132	20	4	13	6	7	0.91	—	0	—	$33 \times 2 = (15A+3) \times m$ 上—上 2	$33 \times 3 = \{(15A+3) \times 3\} \times m$ 上—上 2, 底—底 1
	6Y	198	30	6					0	—	$33 \times 3 = (15A+3) \times m$ 上—上 3	$11 \times 2 \times 2 = \{(W_p-A) \times 2\} \times m$ 上—底 4	$33 \times 1 + 11 \times 4 = \{(15A+3) \times 1 + (W_p-A) \times 4\} \times m$ 上—上 1, 上—底 4

表 8 分母が奇数の N_{spp} のときの極間接続線の数と長さの代表例Table 8. Examples of length and number of pole to pole connectors for winding with N_{spp} , which has denominator of odd number for fraction.

代 表 例						備 考	
N_{spp}	A	極間接続線の長さ (スロットピッチ/相)	極間接続線の数 (個/相)				Aの値によって区分されるグループ名
			合計	上	上底	底底	該当する C/B
A-1/5	1, 2, 3, 4	0	0				I $\frac{4}{5}, \frac{1}{7}, \frac{6}{7}, \frac{2}{11}, \frac{9}{11}, \frac{2}{13}, \frac{11}{13}$ $\frac{3}{17}, \frac{14}{17}, \frac{3}{19}, \frac{16}{19}$
A-2/5	1, 2, 3, 4	$\{(3A+1) \times 1\} \times M$	M	M			J 左欄, 上記, 下記を除く全て
A-3/7	1, 2, 4	$\{(A+W_p) \times 1 + (3A+1) \times 1\} \times M$	2M	M	M		K $\frac{4}{7}, \frac{5}{11}, \frac{6}{13}, \frac{7}{13}, \frac{8}{17}, \frac{9}{19}$
	3	$\{(9A+4) \times 1 + (3A+1) \times 1\} \times M$	2M	M		M	
A-3/11	1, 3	$\{(A+W_p) \times 1 + (3A+1) \times 2\} \times M$	3M	M	M	M	L $\frac{8}{11}, \frac{5}{13}, \frac{8}{13}, \frac{5}{17}, \frac{12}{17}, \frac{7}{19}, \frac{12}{19}$
	2, 4	$\{(17A+5-W_p) \times 1 + (3A+1) \times 2\} \times M$	3M	M	M	M	
A-10/11	1, 2, 3	$\{(13A+11-W_p) \times 1 + (7A+6-W_p) \times 3\} \times M$	4M		4M		Q $\frac{10}{13}, \frac{15}{17}, \frac{15}{19}$
	4	$\{(5A+5+W_p) \times 1 + (9A+8) \times 1 + (3A+3) \times 2\} \times M$	4M	2M	M	M	
A-12/13	1, 3, 4	$\{(3A+3) \times 2 + (W_p-5A-5) \times 3\} \times M$	5M	M	3M	M	R $\frac{2}{19}, \frac{10}{19}$
	2	$\{(15A+14) \times 1 + (9A+8) \times 1 + (3A+3) \times 1 + (W_p-5A-5) \times 2\} \times M$	5M	2M	2M	M	
A-1/13	1	$\{(7A-W_p) \times 5\} \times M$	5M		5M		S $\frac{1}{17}, \frac{10}{17}, \frac{1}{19}, \frac{14}{19}$
	2, 4	$\{3A \times 1 + (7A-W_p) \times 4\} \times M$	5M	M	4M		
	3	$\{(5A+1+W_p) \times 1 + (9A+1) \times 1 + (7A-W_p) \times 3\} \times M$	5M	M	4M		
A-7/17	1, 3	$\{(W_p-A) \times 5 + (3A+1) \times 1 + (7A+2-W_p) \times 1\} \times M$	7M	M	6M		T $\frac{16}{17}, \frac{5}{19}, \frac{18}{19}$
	2	$\{(13A+5-W_p) \times 1 + (W_p-A) \times 3 + (3A+1) \times 2 + (7A+2-W_p) \times 1\} \times M$	7M	M	5M	M	
	4	$\{(15A+6) \times 1 + (9A+4) \times 1 + (13A+5-W_p) \times 1 + (3A+1) \times 4\} \times M$	7M	3M	M	3M	
A-8/19	1	$\{(9A+4) \times 1 + (A+W_p) \times 2 + (11A+5-W_p) \times 1 + (3A+1) \times 3 + (W_p-5A-3) \times 1\} \times M$	8M	2M	4M	2M	U $\frac{11}{19}$
	2	$\{(A+W_p) \times 3 + (3A+1) \times 4 + (W_p-5A-3) \times 1\} \times M$	8M	2M	4M	2M	
	3, 4	$\{(A+W_p) \times 2 + (3A+1) \times 5 + (W_p-5A-3) \times 1\} \times M$	8M	3M	3M	2M	

表 9 B, C の組合せと極間接続線のまとめTable 9 Master table of pole to pole connector for B and C .

$C \backslash B$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
4	D		D																
5	I	J	J	I															
7	I	J	K	K	J	I													
8	D		D		D		D												
10	E		D				D		E										
11	J	I	L	J	K	J	J	L	I	Q									
13	S	I	J	J	L	K	K	L	J	Q	I	R							
14	F		E		D				D		E		G						
16	F		D		D		F		G		D		D		G				
17	S	J	I	J	L	J	T	K	J	S	J	L	J	I	Q	T			
19	S	R	I	J	T	J	L	U	K	R	U	L	J	S	Q	I	J	T	
20	F		D				D		F		H		D				D		G

表中の英字は表 5, 表 8 に示した A の値によって区分されるグループの区分を示す。

数のものに対して同様に極間接続線の数と長さを求めて一般式化でき、更に M に対して共通化が計れる。 $N_{1p} = 2 - 1/5$ の例を表 6, 7 に、更に A の値によって区分されるグループの各々の代表的な結果を表 8 に示した。

以上のことを B, C の組合せに対してまとめてみると表 9 の如くなる。同表の中の $D \sim U$ は表 5, 8 中で示した A の値によって区分されるグループ名を示している。特に I は極間接続線が不要である結線を示し、 B が奇数であるとき、同じ B に対して二組存在していることがわかる。また、全ての欄がいずれかの英文字で埋められていることにも注目されたい。

交流機の電機子コイルの波巻について特に重ね巻に対する特長のひとつと考えられている極間接続線についての検討を行ない、その数と長さを割合に簡単な形で数式化できることを示した。一度数式化しておけば複雑な正規の結線図をいちいち作成しなくてもそれらの様子を容易に知ることができることを明らかにした。

6. む す び

新らしく得られた知見を下記にまとめる。

従来の重ね巻に対すると全く同じスロット配列を用いて分数みぞ巻の波巻の結線を検討した結果

(1) 波巻結線における極間接続線の数と長さは全ての条件に対して並列回路数を考慮に入れて、並列回路数 m (または M)、巻線ピッチ W_p 、毎極毎相スロット数の整数部分 A の関数として一般式で表わせる。

(2) 毎極毎相スロット数の分母 B が奇数のときは最大可能並列回路 M に対して極間接続線が不要の場合

と同じ B に対して各々二組存在する。

(3) 最大並列回路数 M に着目すると毎極毎相スロット数の整数部分 A に対して共通化が計れる。

(4) 共通化される一般式は、毎極毎相スロット数 A の値によっていくつかのグループに分れる。そして全てがわずかの数の式へはまとまらない。

以上のように、現在のところ「統一的な波巻結線方法についてまだ未解決事項が残っている」と思われていた分野について新しく提案した解析手法⁽¹¹⁾を元に、一歩進めて極間接続線の数と長さを算出する一般式を求めたことで、統一的な考え方で解り易く、かつ簡便な解明手法の一つが確立できたものと信じる。

終りに本論文をまとめるに当たり終始御指導御鞭撻をいただいた庄山 日立工場副工場長、古山電力設計部長、元日立研究所 奥田工学博士 (現、新明和工業) に対して厚くお礼申し上げる。

(昭和 58 年 10 月 18 日受付, 同 59 年 8 月 30 日再受付)

文 献

- (1) M. Walker: "Specification and design of dynamo" *electric machinery* (1918)
- (2) 清家: 増訂改版交流電機の捲線法 (昭 8-5)
- (3) 高橋: 電機機器設計 II (昭 31-11)
- (4) 仁田, 他: 「同期発電機の波巻結線について」電氣学会回転機研究会 RM-80-15 (1980-2)
- (5) 仁田, 他: 「同期発電機の波巻結線に関する考察」電学論 B 102, 701 (昭 57-11)
- (6) 佐々木: 電機子捲線法の原理と応用 (昭 7-10)
- (7) 広瀬, 他: 電機機器 (I) (昭 37-4)
- (8) 加賀, 他: 同期機 (昭 42-12)
- (9) 土師: 同期機 (昭 4-1)
- (10) 執行: 電機機械設計論 I (昭 25-12)
- (11) 安芸: 「交流機電機子線輪の波巻について理解を助けるための一提案」電氣学会回転機研究会資料 RM-83-61 (昭 58-9)