論文

二材質分割ブラシの整流特性

松田敏彦, 鈴木好夫, 笹波直樹

(平成3年4月2日受理)

Commutating Capability of Dual-Grade Split Brush

Toshihiko Matsuda, Yoshio Suzuki and Naoki Sasanami

Department of Electrical and Electronic Engineering,
Muroran Institute of Technology,
27-1 Mizumoto-cho, Muroran, Hokkaido, 050, Japan

The dual-grade split brush is composed of a low-resistivity leading component and a high-resistivity trailing one. The commutating capability has been studied through the numerical analysis of sparkless zone and the running tests with a 3kW DC machine.

To do the numerical analysis, eight suppositive sample brushes which have the same contact resistance and the different ratio of R_{b1}/R_{b2} are used. Where R_{b1} is the contact resistance of the leading component and R_{b2} the one of the trailing component. For the running tests, ten sample brushes are used. These brushes are made up from the various combination of four kinds of electrographite grades and one copper-graphite grade. And the sparkless zone of these brushes have been measured.

The results are the following. The commutating capability of the dual-grade split brush, like the monoblock one, becomes better as the contact resistance grows higher. With almost the same contact resistance, the dual-grade split brush shows better capability than the monoblock one. And under the same conditions, the abrasion of the former brush is about 1/2 of the latter one.

KEYWORDS: Carbon brush, Dual-grade split brush, Commutation, Abrasion, Contact resistance

1. 緒 言

直流機および交流整流子機に用いられるカーボン・ブラシの整流性能向上の研究は、古くから行なわれ、主として材料の物理的および機械的性質について多くの成果を得てきている¹⁾。さらに、これら材料物性面の研究開発

に加えて、材質の複合構成あるいは分割ブラシのような形状構成等についての考案が行なわれ、実用もされてきている²⁾。これに対し回転方向前部素片に低抵抗材、後部素片に高抵抗材を用いる二材質分割ブラシは、整流特性が良いと考えられているにもかかわらず、実用例は筆者の知る範囲では見られないようである^{3), 4)}。

本報告は、この二材質分割ブラシの整流特性について、特性の予測計算および3kW直流機による実用試験を行なったものである。その結果、二材質二分割および三分割

ブラシの適用の考え方を示し、実験結果からその有効な構成が可能であることを示すものである。

2. 数値解析による特性考察

一材質分割ブラシは、素片が自由に動作しうることから優れた坐乗性を示す外に、素片間接触抵抗により整流の改善結果があると考えられ⁵⁾、大容量機、車両用電動機等に使用されてきている。一方、二つ以上の材質によりブラシ後端部に高抵抗材質を配置する成層ブラシは、整流周期後半における短絡電流変化率を低く抑えるという整流特性の考察から考案されたものと考えられる。しかし、製法が難しく、接着面の“はがれ”や接着層による接触面荒損の恐れがあることなどから、実際に使用されたという例は少ないようである²⁾。以上により、分割ブラシと成層ブラシの特長を組み合わせた二材質分割ブラシは良い整流特性を示すであろうと推測される。しかし、この二材質分割ブラシの特性を実用の見地から具体的に計算解析したり、実験により評価した報告は筆者らの知る限りでは見あたらないようである。

以下、実験に用いた3kW直流機とそのブラシを想定した基本的な整流回路モデル、すなわち、簡単のためブラシ厚さが整流子片幅に等しく整流コイルが1個のみのFig. 1の整流回路について、ブラシ短絡電流およびブラシ後端接触電圧を求めて考察する^{6), 7)}。

2.1 供試ブラシと整流回路

整流回路定数として、整流時間(T)と整流コイル実効インダクタンス(L)の比を

$$T/L = 50 [S] \quad (1)$$

に仮定し、これを全計算に対し一定とした。計算に使用した9個のブラシの構成をTable 1に示す。これら仮想供試ブラシの考え方は、各ブラシ素片の厚さは等しく全厚さの1/2あるいは1/3とし、

1) 定格電流に対する全面接触抵抗(R_b)が $R_b = 0.02 [\Omega]$ 一定、すなわち、正規化平均リアクタンス電圧(r)が

$$r = \frac{2 I_F L / T}{2 I_F R_b} = \frac{L}{R_b T} = 1.0 \quad (2)$$

で、ブラシ素片の接触面導電率($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, Fig. 1参照)の比を変えたもの7個。ただし、 $2 I_F$:定格電機子電流、 R_b :二分割ブラシの場合について

$$R_b = \frac{1}{\sigma_1 a A + \sigma_2 (1-a) A} = \frac{1}{a / R_{b1} + (1-a) / R_{b2}} [\Omega] \quad (3)$$

ここに、 $a = 1/2$, R_{b1}, R_{b2} :それぞれ σ_1, σ_2 の単体ブラシとしての接触抵抗、 A :ブラシ全接触面積。

2) ブラシ素片の接触面導電率の比が $\sigma_1/\sigma_2 = 3$ (二分割ブラシ) および $\sigma_2/\sigma_1 = \sigma_2/\sigma_3 = 3$ (三分割ブラシ)

Fig. 1 Commutating circuit and split brushes.

Table 1 Sample brushes for numerical analysis.

Brush No.	Brush type	Contact resistance R_b (Ω)	Ratio of R_{bj} $R_{b1}:R_{b2}:R_{b3}$
1	monoblock brush	0.02	—
2	dual-grade double-split brush	0.02	1 : 2
3		0.02	1 : 3
4		0.02	1 : 6
5		0.04	1 : 3
6	dual-grade triple-split brush	0.02	2 : 1 : 2
7		0.02	3 : 1 : 3
8		0.02	6 : 1 : 6
9		0.036	3 : 1 : 3

で、 r が異なるもの4個、である。

2.2 計算結果と考察

計算結果の一例として、 $r = 1.0$, $\sigma_1/\sigma_2 = 3.0$ の二分割ブラシのブラシ短絡電流曲線およびブラシ後端接触電圧曲線をFig. 2に示す。図において、

$$c = e_c / 2 I_F R_b, \quad e_c: \text{整流起電力} \quad (4)$$

である。ブラシ整流特性の良否判定は、電気的特性に限って見ると、整流終期のブラシ後端接触電圧の大小でなされる。すなわち、 v_2 を整流子片2とブラシとの接触電圧とすると、整流の終わり $t \rightarrow T$ の v_2 の値は

$$v_{2T} = [v_2]_{t \rightarrow T} = -R_b I_F [di/dt]_{t \rightarrow T} [V] \quad (5)$$

が小さいほど整流が良く、 $|v_{2T}|$ が約3[V]を超えるとブラシに火花を生ずると判断することができる。

計算結果の考察から、二材質分割ブラシの整流特性について次のことが知られる。ただし、実際の運転条件、すり接触の機械的条件等を考慮しない考察結果であることを特に付記する。

1) 二材質分割ブラシにおいても、単体ブラシの場合と同様に、すり接触通電作用など使用条件の許容範囲内でブラシ全面接触抵抗が大きいほど整流特性が良い。

2) 全面接触抵抗が等しい場合、二材質分割ブラシは単体ブラシよりも良い整流特性を持つ。別の見方をする

Fig. 2 Calculated commutation curve and brush contact voltage drop of dual-grade double-split brush.

Table 2 Trailing edge contact voltage of sample brushes at the end of commutation by numerical analysis.

Brush No.	Brush type	Values of r	Values of $ v_{2T} $	Ranking of commutation
1	monoblock brush	1.0	23.5	7
2	dual-grade double-split brush	1.0	11.6	5
3		1.0	8.0	3
4		1.0	5.6	1
5		2.0	25.5	7
6	dual-grade triple-split brush	1.0	13.9	6
7		1.0	8.9	4
8		1.0	6.0	2
9		1.8	22.5	7

Table 3 Physical constants of the sample brushes on experiment.

Symbol	Grade	Resistivity ($\mu\Omega\text{-cm}$)	Shore hardness	Coef. of friction
E1	Electro-graphite	6400	48	0.20
E2	Electro-graphite	1100	46	0.24
E3	Electro-graphite	900	25	0.22
E4	Electro-graphite	3500	56	0.23
M1	Metallic carbon	8	11	0.15

と、二材質分割ブラシの後部ブラシ素片の材質と単体ブラシの材質が同じならば、分割ブラシの全面接触抵抗 R_b は単体ブラシよりも低い、整流特性は単体ブラシと同等あるいはそれ以上の特性を得る可能性がある。

3) 計算に用いた全ブラシの整流性能を、整流終期のブラシ後端接触電圧の絶対値 $|v_{2T}|$ の大小により比較するとTable 2のようになる。すなわち、 $|v_{2T}|$ が小さく整流が良い順位は表示の通りで、上記の1), 2)の特性を示している。ただし、整流終期の $|v_{2T}|$ の値は、 $t/T = 0.999$ における値である。

3. 二材質分割ブラシの整流特性実験

二材質分割ブラシの整流性能と実用可能性を検討するため、13個の供試ブラシについて無火花帯測定試験を行ない考察した結果を示す。

3.1 実験方法

供試ブラシの物理定数および構成をTable 3 およびTable 4に示す。使用直流機は、3kW他励発電機、2極、100V、30A、1500rpm、ブラシ寸法 $12.5 \times 20 \times 32 \text{ mm}^3$ で、補極添加励磁導線およびブラシ短絡コイル電流測定回路を持っている。測定方法は、各ブラシごとに、まず5Aの小電流で約20時間の予備運転を行ない、次に各測定点（電機子電流設定）につき1時間の安定化運転を行ない、目測により3号火花発生限界補極添加電流を測定した。各ブラシについて、測定日を変えて4～5回の測定を行ない、その平均の無火花帯を測定結果とした。

3.2 実験結果

測定結果の例として、以下負ブラシの測定結果のみを

Table 4 Samples of dual-grade split brush for experiment.

Brush type	Symbol	Grade of pieces of a brush	Remark
monoblock brush	S1	E1	
	S2	E2	
	S3	E3	
dual-grade double-split brush	D1	E4/E4	round top
	D2	E4/E4	flat top
	D3	E2/E2	flat top
	D4	E3/E1	flat top
	D5	E2/E1	flat top
	D6	M1/E1	flat top
	D7	M1/E2	flat top
dual-grade triple-split brush	T1	E1/E2/E1	flat top
	T2	E1/E3/E1	flat top
	T3	E1/M1/E1	flat top

Fig. 3 Width of sparkless zone at rated current density of sample monoblock brushes.

Fig. 4 Comparison of sparkless zone of dual-grade double-split brush by normal and backward rotation.

示し、正ブラシ測定結果の表示は省略する。一般に、正ブラシの無火花帯は負ブラシより若干狭く測定されるが、各ブラシを比較した整流特性の良否関係は負ブラシと同一で、ブラシ極性により変わらない。

1) Fig. 3に3個の供試単体ブラシの無火花帯幅を比較して示した。縦軸は正と負の無火花帯限界線間の幅をとってプロットしたものである。図から、 R_b の大きい順に無火花帯が広いことが分かる。

2) 二材質二分割ブラシの材質効果を確認するため、二分割ブラシD7について回転方向を変えて無火花帯を測定した。その結果をFig. 4に示す。図中実線の無火花帯が回転方向後部に高抵抗材質素片を置いたもので、二材質を用いた効果が明確に現われている。

以下、二材質分割ブラシの測定結果はすべて後部素片高抵抗材質ブラシによるものである。

3) 二分割ブラシの無火花帯 Fig. 5に全供試二分割ブラシの無火花帯幅測定結果を示す。図から、二材質二分割ブラシの無火花帯について次のことが知られる。

a) R_b の値が同じ程度ならば、二材質二分割ブラシは単体ブラシおよび同一材質二分割ブラシより広い無火花帯を示す。

b) 電機子電流の増加による無火花帯狭まりが小さい。

c) 前部ブラシ素片に銅黒鉛質を用いた二分割ブラシは、 σ_1 と σ_2 の比を大きく取ることができるが、 R_b の減少効果が大きく整流特性は良くない。

4) 二材質三分割ブラシの無火花帯 正転、逆転両用機に対しては、前部および後部のブラシ素片に高抵抗材質を用いた二材質三分割ブラシの使用が考えられる。この二材質三分割ブラシの無火花帯測定結果をFig. 6に示す。特性を要約すると次の通りである。

Fig. 5 Comparison of sparkless zone of dual-grade double-split brushes.

a) 単体ブラシおよび二材質二分割に比べ、最も広い無火花帯を与える。

b) 無火花帯の狭まりが少ない。

5) 接触電圧降下静特性の測定 参考のため、二分割ブラシの接触電圧降下曲線の測定を行なった。その結果を一括してFig. 7に示す。ほぼ、各ブラシ材質の抵抗率の大小の順序の電圧降下値を与えている。なお、単体ブラシS1および三分割ブラシT1, T2の電圧降下曲線は二分割ブラシD2, D3の曲線とほぼ同等に得られた。また、三分割ブラシT3の曲線はD6, D7の曲線とほぼ同じに得られた。

3.3 考察

従来、二材質分割ブラシは、後部高抵抗素片の短絡電

流抑制効果の推測から、無条件に単体ブラシより良い整流特性を持つと考えられていたようである。しかし、上記の数値解析および実験により、

1) 二材質分割ブラシは全ての単体ブラシより良い整流特性を持つものではなく、ブラシ全面接触抵抗が同等ならば、二材質分割ブラシの方がよい整流特性を示す。

2) 二材質分割ブラシにおいても、その進み整流特性を有効に活かすために、補極強度調整は必要である。

3) 二材質分割ブラシはその進み整流特性から、補極を持たない小型電動機で、整流インダクタンスが大きく、遅れ整流運転になる電動機に用いると有効であると考えられる。

4. 二材質二分割ブラシの摩耗試験

二材質分割ブラシの実用に対して、最も危惧される点はブラシの異常摩耗、整流子すり面の荒損およびブラシ素片の欠損の問題であろう。これらは二分割ブラシに適する材質の選定とその組合せに対する技術蓄積により克服しうることであると考えられる。以下、実負荷運転および摩耗について若干の試験を行なった結果を示す。

4.1 実験方法

供試ブラシとして、Table 4の二分割ブラシD2, D4, D5, および比較のために単体ブラシS1, S2, S3の6個をとりあげた。実験用直流機は整流特性試験に用いたものと同じ発電機で、整流子直径110mm, ブラシ加圧力200g/cm²である。試験環境は、室温15~25℃, 整流子表面温度46~61℃であった。整流子すり面の準備は小電流で約40時間のすり合わせ運転により行なった。

摩耗量の測定は、電流密度6A/cm², 無火花状態で10時間の運転毎に、ブラシ重量を精密天秤で測定し、

$$(\text{摩耗長さ}) = \frac{(\text{摩耗重量})}{(\text{見かけ比重}) \times (\text{すり接触面積})}$$

により算出した。この測定方法には大気中ガスの吸着、ブラシ保持器からの着脱時の欠損等による誤差が考えられるが、特にその補正は行っていない。

4.2 実験結果と考察

摩耗試験の供試ブラシ6種の100時間運転の摩耗長さ(正負ブラシの平均値)をTable 5に示す。ブラシ素片間の摩耗長さの差を

$$(\text{素片間摩耗差}) = (\text{前部素片摩耗長さ}) - (\text{後部素片摩耗長さ})$$

で表し、その測定結果をFig. 8に示した。実験結果を要約すると次の通りである。

1) 二分割ブラシの摩耗量は単体ブラシの約1/2である。

2) 二分割ブラシの「素片間摩耗差」は100時間運転

Fig. 6 Comparison of sparkless zone of dual-grade triple-split brushes.

Fig. 7 Contact V-I characteristics of dual-grade double-split brushes.

Table 5 Abrasion length of sample brushes by 100h running.

Brush type	Symbol	Abrasion length (mm/100h)		Relations of abrasion length and running time
		Positive brush	Negative brush	
monoblock brush	S1	0.250	0.275	linear
	S2	0.335	0.245	linear, fluctuation on posit. brush
	S3	0.215	0.240	slight saturate
dual-grade double-split brush	D2	*0.135	*0.130	saturate
	D4	*0.120	*0.140	linear, fluctuation at 80-100h
	D5	*0.110	*0.105	linear

* Mean value of abrasion length of leading and trailing brush.

Fig. 8 Abrasion difference of two pieces of a split brush.

により前部素片の摩耗が0.005~0.01mm程度大きく生じた。ただし、D4ブラシはFig. 8に見られるように80~100時間に大きな素片間摩耗差を示した。この前部素片の摩耗量が大きい点とその長時間運転の推移については、更に詳細な試験が必要と考えられる。

3) 各ブラシの実験終了時整流子すり面の状態は、ブラシD2, D4, D5については目視観察の結果で異常は認められなかった。ただし、実験結果は示していないが、銅黒鉛質素片を用いたD6, D7ブラシは、後部電気黒鉛質素片すり面に金属摩耗粉が付着し、整流子すり面にも著しい皮膜損傷が観察された。この金属黒鉛質と電気黒鉛質を組み合わせる二材質分割ブラシは、本試験では整流特性も良くなく、その適用には十分な検討が必要である。

5. 結 言

二材質分割ブラシの整流特性と実用の可能性を検討するため、基本的整流回路モデルによる整流特性数値解析、3kW直流発電機による無火花帯法整流試験および摩耗試

験を行ない、次のような結論を得た。

1) 二材質分割ブラシにおいても、他の条件から許容される範囲で、ブラシ全面接触抵抗を高くするほど整流特性が良い。前部素片と後部素片接触抵抗の比の選定は、この特性との関連を考慮して決める必要がある。

2) 単体ブラシおよび単一材質分割ブラシと比較し、ブラシ全面接触抵抗が同じ程度ならば二材質分割ブラシの方が良い整流性能を持つ。

3) 二材質分割ブラシは、低い接触抵抗で比較的に良い整流を得たい場合、補極を持たない小型機で、ブラシの進み整流特性を活用することが望ましい場合などに有効である。

4) 材質の組合せが適切な二材質分割ブラシの摩耗は、単体ブラシの約1/2という実験結果を得た。後部素片に比べ前部素片の摩耗量が若干大きい。また本実験例では、銅黒鉛と電気黒鉛の組合せによる分割ブラシは整流子すり面の荒損を発生した。この二材質分割ブラシの摩耗については、各ブラシ構成ごとに確認試験が必要と考えられる。

文 献

- 1) 炭素材料学会編、電機用ブラシとその使い方、日刊工業新聞社 (1977)。
- 2) 高橋広治、炭素 1956 [No. 18] 16。
- 3) 林邦雄、畠山一馬、電学誌 68 [12] 329 (1948)。
- 4) 松田敏彦、室工大研報 4 [2] 329 (1963)。
- 5) W.B. Belt, Practical Aspect of Brush Contact Stability, A.I.E.E. Trans. 73 [2] (1954)。
- 6) 松田敏彦、鈴木好夫、電学回転機研究会資料 RM-83-69 (1983)。
- 7) 松田敏彦、松島由太郎、内藤正本、藤原一、電学論 B 97 [6] 337 (1977)。