直 流 機 の 過 渡 時 の 整 流 (第3報)

石 川 博 章* 一 木 利 信**

Transient Commutation of Direct Current Machines (3)

H. Ishikawa and T. Ichiki

Commutation condition is determined by load current and interpole flux density. Then authors framed a equipment for observing black band of d.c. machine by cathode ray oscillograph. The oscillograph draw a black band and commutation condition under the transient state, and the intensity of the beam spot is modulated by the brush sparks. Then we are able to observe the sphere of spark on commutation condition under the transient state.

The results show that the brush sparks occur when the commutation condition under the transient state is off the black band under the steady state. And the time constant of eddy current is smaller than the calculated result of Rudenberg's equation.

1. 緒 言

負荷急変時において、直流機の整流が悪化する原因は、補極磁路鉄心中にうず電流が流れることにより、負荷電流に対して補極磁束の追従特性に遅れを生ずるためと考えられる。補極磁束の追従特性と無火花帯の関係については第1報¹⁾および第2報²⁾で解析を進めてきた。その後、無火花帯を、ブラウン管上で観測することのできる無火花帯直視装置³⁾を試作したので、この装置を用いて過渡時の整流状態と火花の発生位置について、定常状態における無火花帯との関係を調べてみた。

無火花帯直視装置は、ブラウン管上に無火花帯を負荷電流と補極磁束密度の関数として描き出すことができるので、この装置を用いて過渡時の整流経路の曲線を実測し、実測曲線と第2報に示した解析曲線とを比較検討した結果、塊状鉄心を等価二次巻線として考えた場合のうず電流時定数は Rudenberg の計算式⁴⁾で求めた結果よりもいちじるしく小さくなることがわかった。

2. 実験の方法

実験には 5 kW および 2 台の 100 kW の直流機を使用した。その仕様を Table 1 に示す。5 kW 機および

100 kW 機の 1 台は継鉄および補極が塊状鉄心で作られており、100 kW 機の他の 1 台の補極磁路はすべて積層鉄心で作られている。測定は供試機をすべて発電機とし

Table 1 Specification of the testing machines

Machine	1	2	3
Output (kW)	5	100	100
Volts	50	200	200
Amperes	100	500	500
R. P. M.	2,400	1,500	1,500
No. of pole pair	2	2	2
I. P. core	Solid	Solid	Laminate
Yoke core	Solid	Solid	Laminate

Fig. 1 Measuring method of black band.

* 日立製作所日立研究所第16研究室

** 日立製作所日立研究所第16研究室々長 工博

て運転し、負荷としてはグリッド抵抗器を使用した。

Fig. 1 に無火花帯直視装置の測定原理を示す。負荷電流は負荷抵抗の電圧降下として測定し、補極磁束密度はホール発電器により補極磁極片表面の空隙磁束密度を検出した。また、ブラシ火花は各供試機について最も火花発生のかい大きいブラシアームを2つ選び、その出口火花を二次電子増倍光電管により検出した。

ブラウン管は横軸を負荷電流、縦軸を補極磁束密度で振らせ、スポットの輝度をブラシ火花を検出した光電管の出力信号で変調した。スポットの輝度変調を行なわない場合には負荷急変時の整流経路がブラウン管上に描かれ、輝度変調を行なうことによって、整流経路のうちブラシ火花が発生する部分のみを観測することができるように調整した。

3. 測定結果と検討

3.1 無火花帯

各供試機について測定した補極飽和特性と無火花帯の

オシログラムを **Fig. 2** に示す。補極飽和特性は、スポットの輝度変調を行なわないで、負荷を段階的に増加して求めたもので、各機とも補極磁束密度は負荷電流に比例しており、補極磁路の飽和は認められない。100 kW の塊状鉄心機の無火花帯は補極飽和特性に対してほぼ対称に存在しているが、5 kW 機はやや強め整流の傾向にあり、100 kW の積層鉄心機はかなり強め整流で、定格負荷時の整流状態は無火花帯を大中に外れた位置となっている。なお、従来の方法と同様、ブラシ火花を肉眼によっても観測したが、観測結果はオシログラムと完全に一致していた。

3.2 過渡整流経路

各供試機について測定した負荷投入時における過渡整流経路のオシログラムを **Fig. 3** に示す。過渡整流経路は第2報で解析した計算曲線と対応させるため、1目盛10%の百分率表示で求めた。したがって **Fig. 2** に示した無火花帯のオシログラムとは、縦軸の利得が多少異なっている。(A)はスポットの輝度変調を行なわずに求めた負荷投入時の過渡整流経路で、各機とも無負荷から定

Fig. 2 Oscillograms of I. P. saturation curve and black band of testing machines

Fig. 3 Commutation condition and sphere of brush spark under the transient state of load on

格負荷までの負荷急変によって求めたものである。オシログラムには Fig. 2 で求めた無火花帯を換算して鎖線で記入した。

ホール発電器が検出する補極先端表面の磁束密度は、電機子の歯および溝の影響によって脈動を生ずる。この脈動対策として、取付け位置をずらせた数枚のホール発電器の出力電圧を加え合せたが、完全に排除することが困難であったため、オシログラムの過渡整流経路に多少脈動を生じている。

測定結果よりわかるように、5 kW および 100 kW の塊状鉄心機では補極磁束密度の追従特性の遅れによって、過渡整流経路が途中で無火花帯をはずれて火花領域を通過しているが、100 kW の積層鉄心機では過渡整流経路のずれが少ないため、途中では無火花帯内を通過している。したがって、積層鉄心機は塊状鉄心機とくらべて過渡時の整流状態は良好である。しかしながら、100 kW の積層鉄心機は補極が強めに調整されているため、負荷投入後の定常状態における整流状態は無火花帯をは

ずれている。

Fig. 3 (B) は (A) の過渡整流経路をブラシ火花を検出した光電管の出力電圧で輝度変調して、過渡整流経路のうちでブラシ火花が発生している範囲を求めたものである。オシログラムよりわかるように、ブラシ火花は過渡整流経路が火花領域を通過すると発生している。5 kW 機は、最初無火花帯より火花領域に整流状態が移動するが、ブラシ火花はその発生に遅れがあり、火花領域に入ってからしばらく進行してから発生している。また、その後定常状態に達する途中で無火花帯を横切っているにもかかわらず火花は消滅していない。したがって、火花領域から無火花領域に整流状態が移動する際の火花の消滅にも遅れがあることがわかる。

100 kW の塊状鉄心機の火花消滅点はほぼ無火花帯の限界線と一致しているが、火花の発生点は 5 kW 機と同様に遅れを生じている。100 kW の積層鉄心機は過渡整流経路の途中では無火花帯内を通過しているため、ブラシ火花は発生せず、定常状態に近づくとも補極が強めに

調整されているため無火花帯から火花領域に出るが、火花の発生は同様に遅れを生じている。

以上の測定結果より、過渡時の整流状態が実常状態で測定される無火花帯を外れるとだいたいブラシに火花が発生することがわかるが、ブラシ火花の発生および消滅には遅れ現象があり、過渡時のブラシ火花の発生範囲と無火花帯の限界線とは必ずしも一致しない。この火花の遅れ現象は整流経路の状態、移動速度によっても異なることが観測結果よりわかった。

ブラシ火花の発生点と消滅点が無火花限界点と一致しない現象は、従来の肉眼によって無火花帯を観測した際にも経験されていることで、ブラシ火花は一度発生すると消滅し難い性質を有している。この現象はおそらくブラシ周辺の空気のイオン化に関連するものと推定される⁵⁾⁶⁾。

なお、各供試機の負荷電流の時定数をオシログラムより求め、Table 2 に示した。

3.3 うず電流時定数

実測によって得られた過渡整流経路について、鉄心中に発生するうず電流を第価二次巻線として解析した第2報の計算結果と比較して、鉄心のうず電流時定数を求めてみる。

Table 2 Time constant of the currents

Testing machine	Time const. (T)
5 kW	2.0 m sec
100 kW (Solid)	1.5 m sec
100 kW (Lami.)	2.2 m sec

Fig. 4 Comparison of the transient commutation condition with test and calculated result of 5 kW d.c. machine.

Fig. 4 に 5 kW 機で実測された負荷投入時の整流経路を実線で、またうず電流を等価二次巻線として算定した曲線の中から実測曲線と比較的よく一致するものを求めた結果、 $T_e/T=2$, $k=1$ の曲線が最もよく近似することがわかったので、この計算曲線を鎖線で示した。また同時にオシログラムにより求めた 5 kW 機の無火花帯を太線で示してある。5 kW 機の負荷電流の時定数 T は 2 m sec であるので、うず電流の等価二次巻線としての時定数 T_e は 4 m sec となる。

うず電流時定数の計算式として、第1報の解析では、Rudenberg の計算式⁴⁾を用いた。Rudenberg によれば、基本波のうず電流時定数は次式で与えられている。

$$T_e = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{\delta} \sum \frac{D}{S} \cdot \frac{a \cdot b}{\frac{a}{b} + \frac{b}{a}}$$

ここで

- δ : 補極有効空隙長
- D : 塊状鉄心部磁路長
- S : 塊状鉄心定数

a, b : 塊状鉄心部断面の縦、横の長さ

上式を用いて 5 kW 機の時定数を計算すると、

補極鉄心	5.9 m sec
継鉄鉄心	13.5 m sec

となり、うず電流の時定数を両者の和として考えると、19.4 m sec となり、オシログラムによる実測結果とかなり異った値となる。なお、二次巻線の時定数を 19.4 m sec として結合係数 k の値を種々変えて計算したが、実測曲線を近似できる結果は得られなかった。

Fig. 5 および Fig. 6 は 100 kW の塊状鉄心機、お

Fig. 5 Comparison of the transient commutation condition with test and calculated result of 100 kW d.c. machine (solid).

Fig. 6 Comparison of the transient commutation condition with test and calculated result of 100 kW d.c. machine (laminated).

よび積層鉄心機について実測曲線を実線で、また計算曲線のうちで比較的よく一致するものを鎖線で示してある。塊状鉄心機では $T_e/T=2$, $k=1$ の計算曲線と、また積層鉄心機では $T_e/T=0.5$, $k=1$ の計算曲線と実測曲線がよく一致している。なお、両機の無火花帯を太線で示してある。

100 kW の塊状鉄心機のうず電流時定数をRudenbergの計算式で計算すると、

補極鉄心 18.1 m sec

継鉄鉄心 57.5 m sec

となり、一方、実測曲線の近似曲線では $T=1.5$ m sec より $T_e=3$ m sec となり、両者の間に相当大きな開きがあり疑問が残る。以上の結果よりわかるように、鉄心のうず電流を1つの二次巻線として算定する場合には、その時定数は Rudenberg の計算式とはかなり異なり、相当小さな値となることは注目すべきであろう。

100 kW の積層鉄心機の整流経路は塊状鉄心機とくらべて非常に良好であるが、近似計算曲線よりうず電流時定数を求めてみると、 $T_e=1.1$ m sec となり、塊状鉄心

Commutation condition

$R_s=500 \Omega$

$R_s=25 \Omega$

Sphere of brush spark

Fig. 7 Effect of short circuit resistance of interpole coil on the commutation condition under the transient state (100 kW, Laminated)

機の3分の1程度である。しかし、積層鉄心機について Rudenberg の計算式でうず電流時定数を求めると、

補極鉄心	0.025 m sec
継鉄鉄心	0.95 m sec

となり、比較の実測値とよく一致している。しかし、積層鉄板は一般に層間抵抗が比較的小さく、鈴木氏らの報告⁷⁾では $0.1 \Omega/\text{cm}^2$ という値が求められている。時定数の計算においては層間抵抗を無限大と仮定しているので、計算値と実測値の一致は偶然と見るべきで、積層板間が完全に絶縁され得るならば、うず電流時定数はさらに小さくなるものと推定される。

なお、積層鉄心機を設計する場合には継鉄および補極鉄板のカシメ鉋などによる短絡回路が作られないように考慮しなければならない。本試験機の鉄板カシメ鉋は、すべて磁路の中央部のみとし、または主極の取付けボルトにはマイカワッシャを用い、主極鉄心と継鉄の接合部はワニス処理を行ない絶縁してある。また、補極鉄心のくずれ止め溶接は継鉄側の磁極中心部1ヶ所のみとし、補極コイル受けは樹脂絶縁板を用いて補極磁路の短絡回路を防止している。

3.4 短絡回路の影響

本試験機の補極には直列巻線とは別に測定用の他励磁補極巻線が巻かれているので、この巻線を短絡して補極磁束密度の追従特性を種々変化させ、整流経路の変化とその火花発生位置の関係について測定を行なった。ここでは 100 kW の積層鉄心機の結果について示し、塊状鉄心機の結果は省略する。

Fig. 7 に他励磁補極巻線を 500Ω の抵抗を通して短絡した場合と 25Ω の抵抗で短絡した場合の 100 kW 積層鉄心機の整流経路と火花で輝度変調したオシログラムを示す。本機の直列補極と補償巻線の毎極巻数 $15 T$ に対して、他励磁補極巻線の毎極巻数は $700 T$ である。Fig. 3 のオシログラムと比較すればわかるように、 500Ω の短絡抵抗で短絡した場合の積層鉄心機の過渡整流経路はほぼ塊状鉄心機の整流経路と一致している。すなわち、塊状鉄心機の補極磁束密度の追従特性は積層鉄心機他励磁補極巻線を 500Ω の抵抗で短絡した場合と等価である。

短絡抵抗を 25Ω にした場合には、補極磁束の遅れが大きくなり、過渡整流経路は無火花帯から大きくはずれるようになる。短絡抵抗 500Ω と 25Ω とでは過渡整流経路は異なるが、両者とも負荷投入直後の整流状態は無

Current and flux decay (5 ms/div)

100 kW (Solid)

100 kW (Laminate)

Commutation Condition

Fig. 8 Current and flux decay and commutation condition under the transient state of load off ($500 \rightarrow 0 \text{ A}$)

火花帯より不足整流の火花領域に出て、その後、補極が強めに調整されているため、無火花帯を横切って過整流の火花領域に達している。その結果、ブラシ火花は不足整流の火花領域で発生した後一度消滅し、ふたたび過整流の火花領域に入って発生している。この測定結果では火花の発生には遅れ現象が認められるが、火花の消滅点はほぼ無火花帯の限界点と一致している。

3.5 負荷しゃ断時の整流経路

いままでの考察はすべて負荷投入時について行ってきたが、ここで負荷しゃ断時の影響について検討してみよう。負荷投入時においては補極磁束の遅れによって過渡整流経路は不足整流領域を通過したが、負荷しゃ断時には補極磁束の遅れによって逆に過整流領域を通過する。

Fig. 8 は 100 kW の塊状鉄心機および積層鉄心機について測定した負荷しゃ断時のオシログラムである。負荷しゃ断時のアーク条件は両機ともほぼ同一であるが、塊状鉄心機にくらべて積層鉄心機は磁束の追従特性が早く、したがって負荷投入時と同様過渡整流経路の無火花帯からのずれは少なく、整流状態が良好であることを示している。なお、積層鉄心機は負荷しゃ断前の整流状態が無火花帯をはずれているため、しゃ断前の定常状態で火花を発生しているが、負荷電流がしゃ断された後は、火花が消滅している。それに対して塊状鉄心機では負荷電流がしゃ断された後に火花が発生しており、過渡整流経路のオシログラムの結果とよく一致している。

4. 要 約

- (1) 直流機の過渡時の整流状態を無火花帯直視装置を用いて観測を行なった。
- (2) 補極磁路に発生するうず電流の時定数は、鉄心を 1 つの二次巻線として考えた場合には、Ruden-

berg の計算式で求められる結果よりいちじるしく小さくなる。

- (3) 過渡時の整流状態が定常状態で測定される無火花帯をはずれるとだいたいブラシより火花が発生するものと考えられる。
- (4) しかし、ブラシ火花の発生および消滅には遅れ現象があり、過渡時の火花の発生範囲と無火花帯の限界線とは必ずしも一致しない。
- (5) 過渡整流を改善するために磁路鉄心を積層することは非常に有効である。

5. 緒 言

直流機の負荷急変時の整流状態と無火花帯の関係について、無火花帯直視装置を使用して測定し、過渡整流経路とブラシ火花の発生位置について明らかにすることができた。なお、うず電流時定数の計算式については今後検討を進める予定である。

終りに終始ご指導ご激励を賜っている日立製作所日立研究所田口所長、小林部長、ならびに御討議を賜った学振第117委員会の関係者の方々に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 一木、石川：炭素 No. 33, 23 (昭 37)
- (2) 石川、一木：炭素 No. 42, 25 (昭 40)
- (3) 石川：昭40 電気四学会連合大会予稿 757.
- (4) R. Rudenberg: Transient Performance of Electric Power Systems, McGraw-Hill, Book (1950)
- (5) R.E. Hellmund: AIEE Trans. Pt. III, 54, 1178 (1953)
- (6) A. T. McClinton, J. P. O'connor: AIEE Trans. Pt. III, 72, 1 (1953)
- (7) 鈴木、谷：昭38電気学会東京支部大会予稿 138

炭素 42 号 直流機の過渡時の特性の整流 (第 2 報) 正誤表

頁	誤	正
28, 右欄10行	一例として $T_e/T=Z$ について	一例として $T_e/T=2$ について
29, (23) 式	$\frac{i_1}{I_{00}} = 1 - \frac{T_e}{T} e^{-\frac{T_e}{T_e - T}}$	$\frac{i_1}{I_{00}} = 1 - \left(\frac{T_e}{T} \right) e^{-\frac{T_e}{T_e - T}}$
29, (24) 式	$\frac{B - B_t}{B_{00}} = k \frac{T_e}{T_e - T} \cdot \frac{T_e}{T} e^{-\frac{T}{T_e - T}} - \frac{T_e}{T} e^{-\frac{T}{T_e - T}}$	$\frac{B - B_t}{B_{00}} = k \frac{T_e}{T_e - T} \left\{ \left(\frac{T_e}{T} \right)^{-\frac{T}{T_e - T}} - \left(\frac{T_e}{T} \right)^{-\frac{T_e}{T_e - T}} \right\}$