

直流機の無火花帯直視装置

New Equipment for Observing Black Band of D.C. Machines

石川 博 章*
Hiroaki Ishikawa

内 容 梗 概

直流機の整流性能は、一般に無火花帯の測定結果によって評価されている。本研究は無火花帯の表示法および測定法について検討を加え、直流機の負荷電流、補極磁束密度および整流火花の三つの量を同時に検出してブラウン管上に直接無火花帯を描き出す測定方法を考案し、実機についての測定結果を示した。本測定装置を用いて、従来測定することが困難であった負荷電流変動時の整流状態について測定した結果、過渡時の無火花帯は定常時の無火花帯と変わらないことが明らかとなった。

1. 緒 言

直流機の性能上最も大きな問題の一つは整流をいかに良好にするかということにある。整流問題は昔から多くの人々によって研究されてきているにもかかわらず、その因子が非常に複雑であるために、現在でもなお多くの未解決の問題が残されている。

直流機の整流性能は補極の発明によって飛躍的に改善され、また補極の完成によって整流性能を無火花帯で表示するという方法が開発された結果、整流性能を定量的に測定し比較できるようになった。無火花帯の測定結果からは補極強度、ブラシ位置、ブラシのしゅう動状態などが適正であるかどうかを判定することができ、現在ではこの無火花帯測定法が世界各国で採用されており、最も一般的な整流性能を評価する基準となっている⁽¹⁾⁽²⁾。

無火花帯の測定結果が整流現象を解明するうえで非常に重要であるにもかかわらず、一般にはブラシより発生する整流火花を肉眼で観測するという原始的な方法がとられている。したがって無火花限界点の決定には観測者の判断を要する場合があり、測定にはある程度の熟練を必要とする。またこのような肉眼による測定法では負荷急変時のように短時間に発生する火花を測定することは不可能であった。

筆者は、この無火花帯の測定法について種々検討を加え、従来肉眼で観測されていた無火花帯をブラウン管上で直視する方法を考案し、実用化することに成功した。以下測定装置の概要と若干の実測結果について述べる。

2. 無火花帯表示法の検討

2.1 無火花条件

巨視的な視野で整流を考察するならば、ブラシより発生する整流火花は、整流コイルのリアクタンス電圧 e_r と整流電圧 e_c の差分の絶対値が火花電圧 e_s を越えると発生するものと考えられている。Hellmund あるいは稲垣氏らの研究結果⁽³⁾⁽⁴⁾より考え、この火花電圧は3V 付近の値であると推定される。

無火花条件は次式で示される。

$$|e_r - e_c| < e_s \dots\dots\dots(1)$$

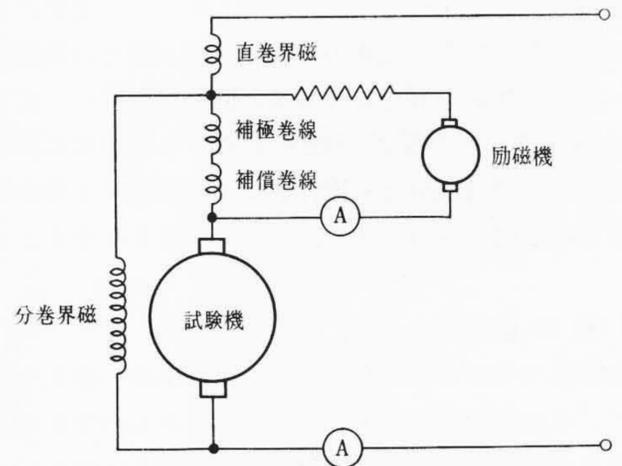
ここに

$$e_r = L \frac{di}{dt} \dots\dots\dots(2)$$

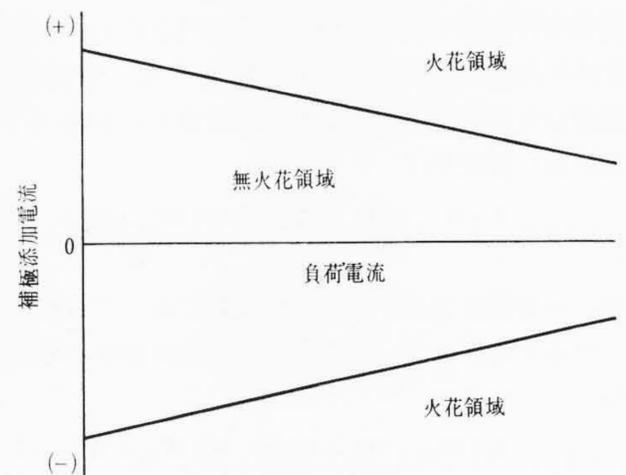
$$e_c = Blv \dots\dots\dots(3)$$

すなわち、リアクタンス電圧は整流コイルのインダクタンスと電流変化率の積で与えられ、インダクタンスおよび回転数が一定であれば負荷電流に比例する。また整流電圧は補極磁束による速度起電

* 日立製作所日立研究所



第1図 測定回路



第2図 無火花帯説明図

力として与えられ、回転数が一定であれば補極磁束密度に比例する。したがって、一定回転数における無火花条件は負荷電流と補極磁束密度によって与えられるはずである。

2.2 従来の表示法

従来、一般に行なわれている無火花帯の測定法は第1図に示すように、被試験機を種々の負荷電流で運転し、それぞれの負荷において補極巻線に外部電源より添加電流を流し、ブラシより火花が発生する限界点の補極添加電流量によって無火花帯の幅が求められている。このようにして測定された無火花帯は一般に第2図に示すように、横軸を負荷電流、たて軸を補極添加電流にとって電流値あるいは定格電流に対する百分率で表示されている。特殊な表示法として、たて軸をそれぞれの測定負荷電流値に対する百分率として表示する場合もある⁽²⁾⁽⁵⁾。

第2図の表示法では、無火花限界線は、一般に2本の直線で示され、整流状態がこの両直線で囲まれた範囲内であれば無火花整流が可能であることを示している。したがって直流機の整流性能はこの

帯域の幅が広いほどすぐれていると判定される。

無火花帯の広さを表わす補極添加電流と、補極磁束の間には次式が成立する。

$$\varphi + \Delta\varphi = \frac{I_L(W_p + W_c - W_a)}{R} + \frac{i(W_p + W_c)}{R} \dots\dots\dots(4)$$

- ここに、 I_L : 負荷電流
- i : 補極添加電流
- φ : I_L における補極磁束
- $\Delta\varphi$: i による補極磁束の変動分
- W_p : 補極巻線巻数
- W_c : 補償巻線巻数
- W_a : 電機子巻線等価巻数
- R : 補極磁路の磁気抵抗

(4)式よりわかるように、補極磁束は負荷電流および補極添加電流による補極起磁力と電機子反作用起磁力の三つの要素によって成立している。しかしながら従来の無火花帯表示法では補極添加電流のみによって整流性能を判定しており、同一機械についてブラシ材質、ブラシ保持器などの整流性能を比較する場合には問題はないが、構造の異なる他の機械と整流性能を比較検討する場合には、負荷電流による項が検討されていないので誤差を生ずることがわかった。

2.3 誤差の検討

補極添加電流のみによる従来の無火花帯表示法の誤差を最も端的に表わしているのが補極空げき長の違いによるものである。いま説明の簡単化のために補極磁路の磁気抵抗は空げきに集中し、鉄心の透磁率は無限大であると仮定する。

いま同一設計の2台の機械を補極空げき長を変えて製作したものとする。補極空げき長の狭い機械の補極空げきにおける磁気抵抗を R_1 、補極空げき長の広い機械のそれを R_2 とする。負荷電流 I_L における無火花帯の火花発生限界点に要する磁束を $\varphi + \Delta\varphi$ とすれば、補極空げき長の狭い機械では

$$\varphi + \Delta\varphi = \frac{I_L(W_{p1} + W_c - W_a)}{R_1} + \frac{i_1(W_{p1} + W_c)}{R_1} \dots\dots(5)$$

が成立する。一方補極空げき長の広い機械においても整流条件がまったく等しいとするならば、火花発生限界点に要する磁束量は同じであるから

$$\varphi + \Delta\varphi = \frac{I_L(W_{p2} + W_c - W_a)}{R_2} + \frac{i_2(W_{p2} + W_c)}{R_2} \dots\dots(6)$$

が成立する。

一般には補極添加電流を流さない状態における負荷時の整流状態は無火花帯の中心に調整されねばならないので、(5)式および(6)式の第一項より

$$\frac{W_{p2} + W_c - W_a}{W_{p1} + W_c - W_a} = \frac{R_2}{R_1} \dots\dots\dots(7)$$

が成立する。したがって両式の第2項より

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{W_{p1} + W_c}{W_{p2} + W_c} \cdot \frac{R_2}{R_1} \dots\dots\dots(8)$$

が成立する。

(7)式を考察すると、いま $R_2 < R_1$ であれば

$$\frac{W_{p2} + W_c}{W_{p1} + W_c} > \frac{R_2}{R_1} \dots\dots\dots(9)$$

となり、したがって(8)式より

$$i_2 < i_1 \dots\dots\dots(10)$$

となる。また同様にして $R_2 > R_1$ であれば

$$i_2 > i_1 \dots\dots\dots(11)$$

である。

以上の解析結果よりわかるように、従来行なわれている補極添加電流による無火花帯表示法では、同一整流条件の機械であっても補極空げき長の狭い機械ほど無火花帯は狭く、補極空げき長の広い機械ほど無火花帯は広く表示されるという不合理があった。同様に電機子反作用起磁力の差異によっても誤差が生じうるのである。

2.4 新表示法

整流現象の原理より考察して、無火花帯の幅は補極磁束密度により表示すべきものと考えられる。幸いにして最近の半導体の発達により磁束密度を簡単に検出することのできるホール発電機が開発されているので、補極の空げき磁束密度を測定することは比較的容易である。

無火花帯を補極磁束密度で表示すれば第3図のようになる。第3図において $00'$ 線は負荷電流により発生する補極磁束、すなわち補極の飽和特性を表わしている。この補極飽和特性は各負荷電流において補極添加電流を与えない場合の定常状態における整流状態を表わしており、一般に無火花帯の中心線と一致するように調整される。

従来の補極添加電流による無火花帯の表示法においては、補極磁束が飽和した場合、無火花帯に曲りを生じたが、新表示法においては無火花帯は変化せず、補極の飽和特性が $00''$ 線のように曲りを生じて表示される。また補極空げき長が適正でない場合、たとえば弱め整流の場合には無火花帯の中心線 $00'$ 線に対して補極飽和特性は $0P$ 線のように下側に位置する。このような場合には、補極の空げき長の修正を必要とするが、修正すべき空げき長を δ_K とすれば

$$\delta_K = \delta \frac{RS}{RT} \dots\dots\dots(12)$$

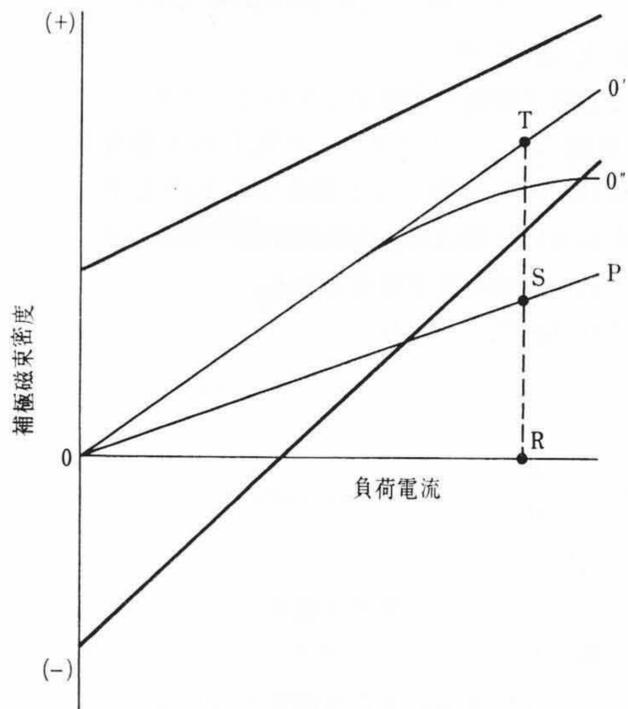
として、無火花帯の測定結果より直接求めることができる特長がある。また補極磁束密度で表示した場合には前述のような補極空げき長などによる誤差はまったく生ぜず、無火花帯の広さによって正しく整流性能を比較することができる。

3. 無火花帯直視装置

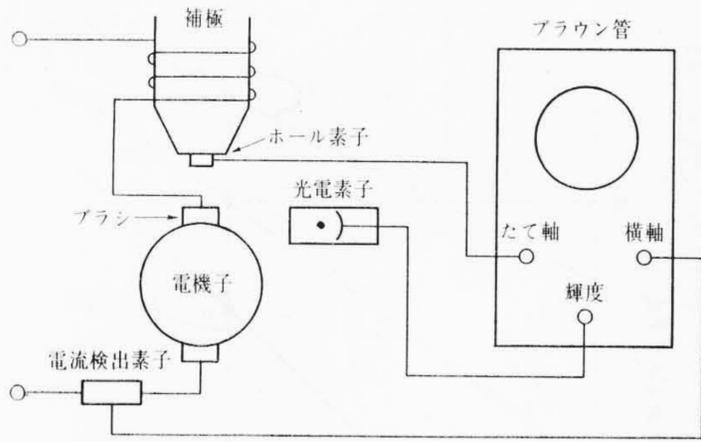
3.1 測定原理

直流機の無火花帯は負荷電流、補極磁束密度および整流火花の三つの量を同時に検出すれば求めることができる。この三つの量をブラウン管上に示すために筆者は次のような測定方法を考案し、この装置を無火花帯直視装置と名づけることにした。

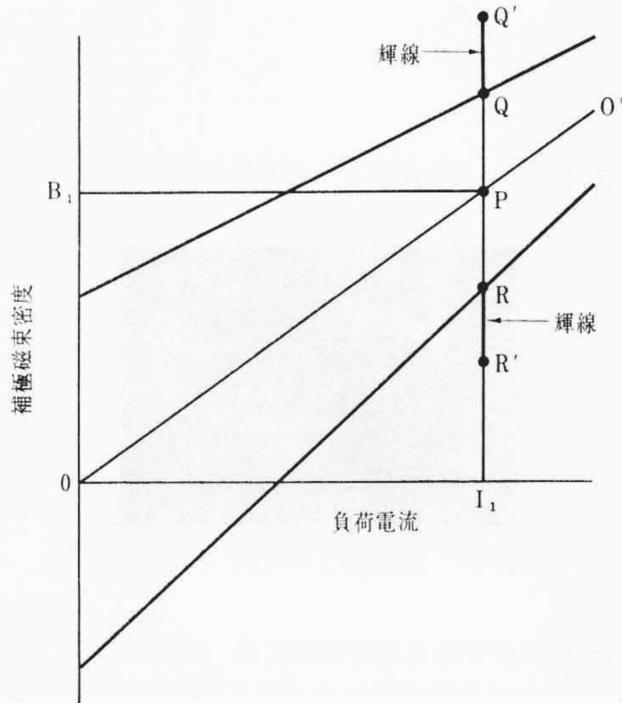
無火花帯直視装置の測定原理は第4図に示すように、ブラウン管



第3図 無火花帯の新表示法



第4図 無火花帯直視装置測定原理図



第5図 直流負荷電流による無火花帯オンシログラム

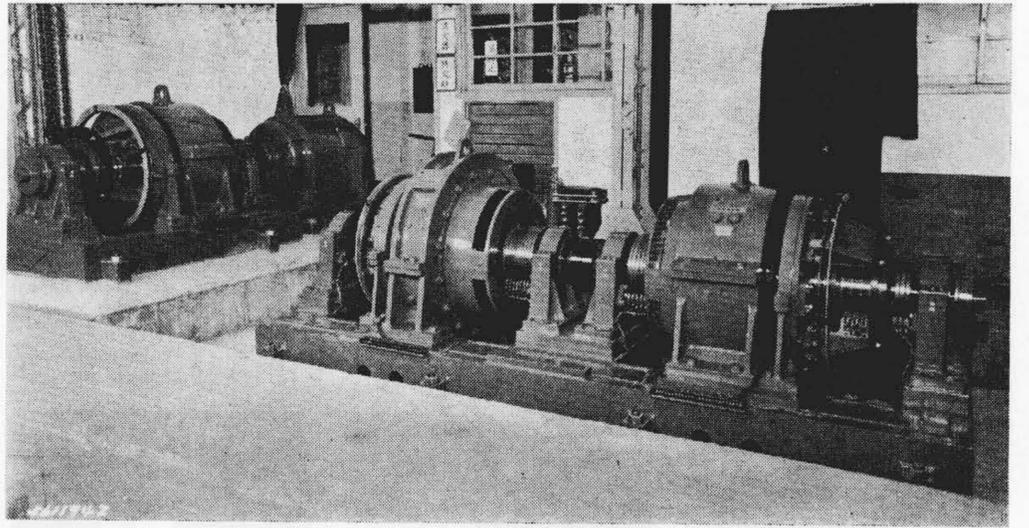
のスポットを補極磁束密度に比例したホール発電器の出力でたて軸に振らせ、負荷電流で横軸に振らせる。すなわち、スポットの位置がそれぞれの整流状態を示しており、そのスポットの輝度を光電素子によって検出した整流火花の信号で変調する。スポットの輝度は、無火花状態ではスポットが消え、火花が発生するとスポットの輝度が増加するように調整する。したがって、補極を励減磁して整流状態を変化させ、スポットの位置を移動させることにより、ブラウン管の表面はブラシより整流火花が発生するスポットの位置が明るく輝き、無火花領域は文字どおりの黒い帯 (Black Band) として描き出される。本測定法では整流火花を光電素子によって検出しているため、観測者による個人差はまったくなく、また熟練も必要としない。

3.2 測定方法

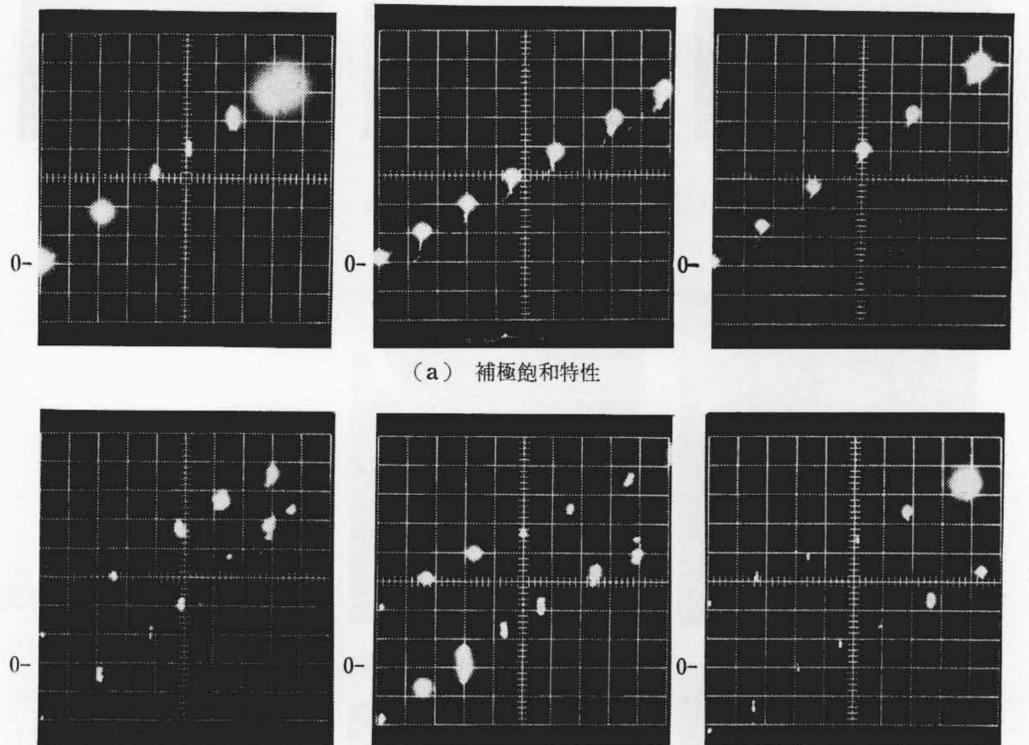
負荷電流と補極磁束密度を両軸とする平面上において、第5図に示すように無火花帯が存在しているものとする。直流負荷電流 I_1 における整流状態は I_1 に対応する補極磁束密度 B_1 で定まる補極飽和特性 OO' 上の点 P に位置し、この状態においては無火花帯内にある

第1表 供試機のおもなる仕様

	供試機 1	供試機 2	供試機 3
定格出力 (kW)	5	100	100
回転数 (rpm)	2,400	1,500~3,000	1,500~3,000
電圧 (V)	50~150	200	200
電流 (A)	100~33.3	500	500
極数	4	4	4
補極鉄心	塊状	塊状	積層
継鉄鉄心	塊状	塊状	積層



第6図 100 kW 試験機



供試機 1

供試機 2

供試機 3

(b) 無火花帯

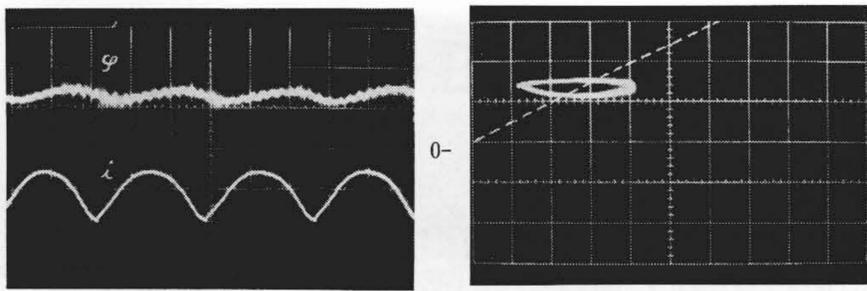
第7図 各供試機の補極飽和特性と無火花帯

ので整流火花は発生せず、したがってブラウン管上には何の映像も現われない。いま、外部電源により補極を励磁したとすれば、スポットは上方に移動し、無火花限界点 Q を通過すると整流火花が発生するためスポットの輝度が増加する。いまスポットを Q' の位置まで移動させたとすれば、 QQ' 間がおシログラム上に輝線となって現われる。同様にして、減磁側については RR' 間が輝線となって現われ、 QR 間の輝線の現われない範囲が無火花帯であることを知ることができる。このようにして種々の負荷電流に対して求めれば、オシログラム上に無火花帯を描き出すことができる。なお本測定法による結果を評価する場合、負荷電流および補極磁束密度を定格負荷時における値に対する百分率として表示するのが最も便利である。

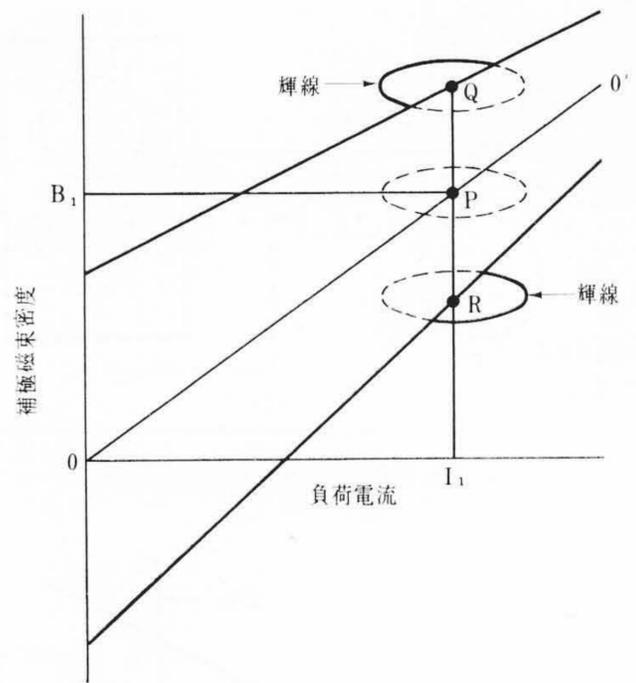
3.3 測定結果

供試機としては 5 kW および 2 台の 100 kW 試験機を使用した。第6図に 100 kW 試験機の外観写真を示す。また供試機のおもなる仕様を第1表に示す。100 kW 試験機中 1 台は固定子が塊状鉄心で作られ、他の 1 台はすべて積層鉄心で作られている。

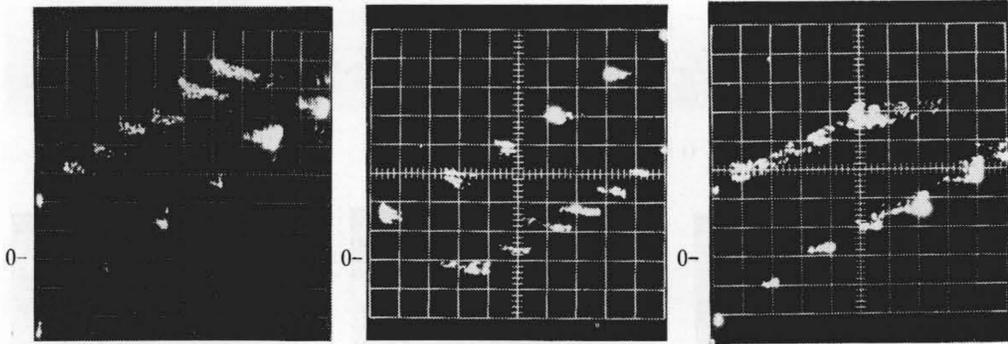
第7図に各供試機について求めたオシログラムを示す。(a)は輝度変調を行わずに求めた補極飽和特性のオシログラムであり、各機とも補極磁路の飽和は認められない。(b)は無火花帯のオシログラムで、各機とも負荷を7段階に変えて測定を行なった。供試機3は実験の都合上、補極がやや強めに調整されている。なお従来の方法と同様、整流火花を肉眼によっても観測したが、観測結果はオシログラムと完全に一致していた。



(a) 脈動波形 (b) リサージュ図形
第8図 負荷電流 i と補極磁束 ϕ の脈動波形とリサージュ図形

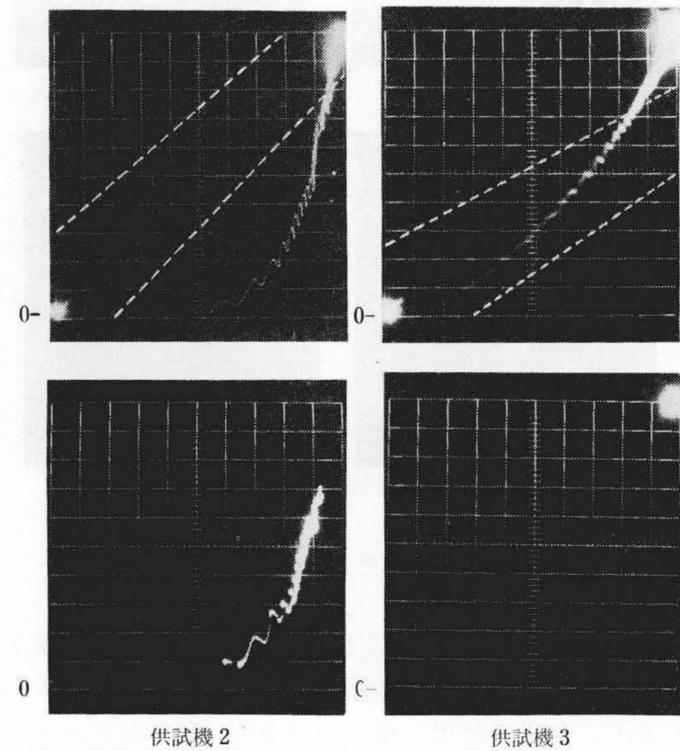


第9図 脈動負荷電流による無火花帯オシログラム



(a) 供試機1 (b) 供試機2 (c) 供試機3

第10図 脈動負荷電流による無火花帯



(a) 過渡整流径路 (b) 火花で輝度変調
第12図 負荷投入時の整流径路と火花の関係 (1)

4. 変動電流と無火花帯

4.1 脈動電流と無火花帯

従来、直流電源によって駆動されていた直流電動機は、整流器の発達とともに交流電源を整流した脈動電源で運転されるようになってきている。脈動電源で運転すると負荷電流が脈動し、その結果脈動率の増加とともに無火花帯の幅が減少し、強め整流となることがDunaiskiの実験で報告されている⁽⁶⁾。ここでは脈動電流による整流状態を瞬時値について考察してみることにする。

第8図(a)に100kWの供試機2について、脈動電源で運転した場合の負荷電流と補極磁束密度の脈動波形を示す。補極磁束は磁路鉄心中に発生するうず電流により抑制され、波形がかなり変化していることがわかる。(b)は横軸に負荷電流、たて軸に補極磁束密度をとって両者のリサージュ図形(Lissajou's figure)を描かせたもので、オシログラムには補極飽和特性を鎖線で記入した。リサージュ図形よりわかるように、負荷電流が脈動している場合の整流状態はだ円の軌跡を描いて常に変動している。

第9図に示すように脈動負荷電流で運転している場合の整流状態

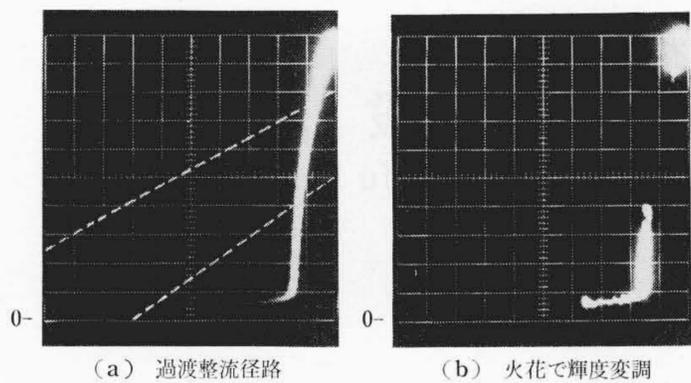
は平均負荷電流 I_1 、および平均補極磁束密度 B_1 で定まる補極飽和特性上の点 P を中心とした円軌道のリサージュ図形に沿って変動している。いま補極を励磁したとすれば、このリサージュ図形は上方に移動し、中心点が Q に達した状態においてはリサージュ図形の左側の一部が無火花帯よりはずれる。直流機の無火花帯は瞬時瞬時の整流状態によって決定されるので、無火花帯よりはずれた部分では整流火花を発生し、したがってはずれた部分だけがオシログラム上に輝線となって現われる。減磁側についても同様である。このようにして種々の負荷電流に対して求めれば、直流電流の場合と同様、無火花帯がブラウン管上に描きだされる。

シリコン制御整流素子を用いて50c/sの単相交流を全波整流した電源で駆動した場合の各供試機について求めた脈動負荷電流による無火花帯オシログラムを第10図に示す。負荷電流の脈動は各機とも定格負荷時の片振幅脈動率30~40%で行なわれた。第10図のオシログラムに描かれた無火花帯は第7図の直流電流による測定結果とよく一致しており、脈動電流によって運転しても無火花帯は変化しないことが証明された。

本測定法は、無火花帯を瞬時値として測定しているのに対し、肉眼で火花を観測する場合は平均値として測定されるため、見かけ上無火花帯が減少するのである⁽⁷⁾。脈動負荷電流による整流状態を改善するには補極磁路をすべて積層することが望ましい。第11図は供試機3について脈動電流によるリサージュ図形を求めたもので、本機は固定子が積層鉄心で作られているため磁束の追従特性がよく、整流状態は鎖線で記入した補極飽和特性の近くに保たれており、第8図に示した供試機2とくらべて整流状態が安定していることを示している。

4.2 急変電流と無火花帯

定常運転状態において良好な整流を保つ直流機であっても、負荷急変時には補極磁束のおくれのために整流状態が悪化して火花を発生する。過渡時の整流状態と無火花帯の関係についての解析



(a) 過渡整流径路 (b) 火花で輝度変調
第13図 負荷投入時の整流径路と火花の関係(2)
(供試機3の補極に短絡コイルを巻いた場合)

法はすでに明らかにされたが⁽⁸⁾、無火花帯直視装置を用いることにより、簡単に過渡整流径路を直視することができる。ここで過渡整流径路とは過渡時の整流状態の変化の軌跡のことである。

第12図(a)は供試機2および3について負荷投入時の整流状態を観測したオシログラムである。負荷電流は0→500Aまで急変させており、オシログラムには無火花帯を鎖線で記入してある。供試機2は固定子が塊状鉄心で作られているため、過渡整流径路は無火花帯を大きくはずれ、整流状態が悪化することを示している。供試機2に対して固定子が積層鉄心で作られている供試機3は磁束の追従特性がすぐれているため、過渡整流径路は無火花帯をはずれず整流状態は良好であるが、本機は補極がやや強め整流に調整されているため、負荷投入後の定常状態では少し無火花帯をはずれている。(b)は過渡整流径路を整流火花で輝度変調を行なったもので、両機とも無火花帯をはずれた位置でブラシから火花が発生していることがわかる。

第13図(a)のオシログラムは供試機3の補極鉄心上に短絡巻線を巻いて補極磁束の追従特性を人為的に悪化させた場合の過渡整流

径路を観測したもので、本機が強め整流に調整されているため、過渡整流径路は負荷急変直後に無火花帯よりはずれて火花領域に達し、その後無火花帯を横断してふたたび反対側の火花領域に達している。(b)はこの過渡整流径路をブラシ火花で輝度変調したもので、無火花領域を整流状態が横断する際にブラシ火花が消滅していることがはっきりと認められる。

以上の測定結果からわかるように負荷電流の脈動時あるいは急変時の負荷電流と補極磁束を瞬時値として考察すれば、無火花帯の広さから整流火花の発生状況を予想することが可能である。

5. 結 言

従来、一般に肉眼で観測されていた直流機の無火花帯をブラウン管上で直視する装置を製作し、定常および負荷電流変動時の整流状態と無火花帯の測定結果を示した。本装置が今後の整流問題解明に貢献することができるならば、筆者の最もよろこびとするところである。

終わりにのぞみ、終始ご指導、ご激励を賜わっている日立製作所日立研究所小林部長ならびに一木主任研究員に対し厚く感謝の意を表するとともに、熱心に実験に協力された田原君に対しお礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) T. W. Schroeder, J. C. Aydelott: A.I.E.E. Trans, 60, 446~451 (1941)
- (2) D. Mikeleitits, H. Klotzler: Elektrie 7, 257~261 (1961)
- (3) R. E. Hellmund, L. R. Ludwig: Elect. Eng 54, (1935)
- (4) 稲垣, 伊東: 東芝レビュー 16, 1131~1144 (1961)
- (5) M. Zorn: Siemens Zeitschrift 36, 407~413 (1962)
- (6) R. M. Dunaiski: Trans A.I.E.E. 79, Pt III 253~258 (1960)
- (7) 石川: 昭和39年電気学会東京支部大会予稿 115
- (8) 一木, 石川: 炭素 No. 33 23~27 (1962)



特許 第419921号

特 許 の 紹 介



渡 辺 信 一・平 川 洋 一 郎
笠 井 健 次 郎・岩 見 喜 代 治

感 熱 器

この発明は感熱媒体を充てんした感熱箱内に、適当な間隔を設けかつ感熱箱内壁に接触するように金属薄板を配設して、その動特性を向上させた感熱器に関するものである。

図示の実施例において1は膜板2を挟んで感熱箱3に固着されたケーシング、4は詰物5とともにケーシング1内にしゅう動自在にそう入されたプッシュロッド、6は格子状に組み合わされた金属薄板で縦向きに感熱箱3内にかん入され、その下端および外周を感熱箱3内壁に接触せしめる。感熱箱3内および金属薄板6間には感熱媒体としてワックスが充てんされている。

感熱箱3が加熱されると感熱箱3の外周温度は感熱箱3内壁に接触した金属薄板6に伝わり、感熱箱3内に充てんされたワックスが急速に加熱されて溶融膨張し、膜板2および詰物5を介してプッシュロッド4を押し出す。しかして感熱箱3内壁に接触し適当な間隔をもって配設された金属薄板6を介してワックスを加熱するようにしたものであるから、感熱箱3内の伝熱面積が増大されワックスは各部均等にかつ急速に加熱されるため、感熱器は常時安定した状態で小さな温度変化に対しても迅速に作動することができ、その動特性を著しく向上させることができる。

