UDC 621.313.1.027.3.045:621.3.015.532
667.624.67:546.281.26

論文

55-A 46

炭化ケイ素 (SiC) ペイントを用いた高圧回転機コイル端の部分放電防止法の検討

正 員 谷 功 (三菱電機)
正 員 内 海 権 三 (三菱電機)
正 員 松 田 禎 夫 (三菱電機)
正 員 平 林 庄 司 (三菱電機)

1. ま え が き

発電機、誘導電動機などの高圧回転機の単機大容量化、高電圧化に伴い、固定子コイルの部分放電（コロナ）防止が重要な問題となってきた。

高圧回転機の固定子コイルにおける部分放電防止は対地絶縁層内部の空げきによる内部放電と、対地絶縁層表面の外部放電とがある。前者の内部放電に対しては集成マイカ、エポキシ樹脂などの新材料の開発と真空加圧含浸のコイル製作技術の進歩により、放電防止技術は著しく向上してきた。後者の外部放電は対地絶縁層表面に低抵抗塗料を塗布し、固定子鉄心スロットでの放電防止を行なっている。また、この低抵抗塗料端部の沿面放電防止法としては、線形抵抗特性の高抵抗塗料あるいは非線形抵抗特性の高抵抗塗料を低抵抗塗料端の対地絶縁層表面に塗布する方法および低抵抗塗料端の対地絶縁層に電極を埋め込むコンデンサ分圧方式などがあるが、最近是非線形抵抗特性の高抵抗塗料が一般に実用されている。

非線形抵抗材料としては炭化ケイ素 (SiC) を用いた SiC ペイントが主に使用されているが、この SiC ペ

イントは対地絶縁層の耐電圧試験、絶縁破壊試験など、コイルへの印加電圧が高くなったとき SiC ペイント中で発生するジュール熱で焼損したり、沿面フラッシュオーバーを発生することから、印加可能な電圧に制限があった。

筆者らは回転機の高電圧化に対処するために、SiC ペイントの電圧-電流特性の非線形性を半導体ダイオードの非線形性に模擬して解くアナログシミュレーション解析手法⁽¹⁾を考案し、SiC ペイントによる電界緩和の挙動解析を進めてきた。更に、SiC ペイントの抵抗率の大きさとジュール熱による温度上昇、および破壊電圧特性の関係から、最適な抵抗率について考察し^{(2)~(6)}、SiC ペイント中で発生する電力損失を最適化することにより適用可能な印加電圧を上昇できる新しい放電防止法の検討を行なってきた。

本論文は、これらの結果をまとめて報告する。

2. SiC ペイントの特性

炭化ケイ素の粒子集合体での電圧-電流特性、すなわち電圧非直線特性に関してはかなり考察されている⁽⁶⁾⁽⁷⁾が、炭化ケイ素の粉体と結合材を混合した塗料状態での検討された例は少ない。ここでは、高圧回転機の放電防止用という実用的な面から SiC ペイントの電圧-電流 ($E-J$) 特性の非線形性について調べた。

〈2.1〉測定方法 供試した SiC ペイントは、市販の黒色炭化ケイ素の粉体と熱硬化性のアルキッド系樹脂の結合材とを 6 : 1 の重量比で混合したもので、

Study on a Method of Partial Discharge Suppression Using SiC Paint for the Stator Coil Ends in High Voltage Rotating Machines. By Tsutomu Tani, Member, Gonzo Utsumi, Member, Sadao Matsuda, Member & Shoji Hirabayashi, Member (Mitsubishi Electric Corporation).

谷 功：正員、三菱電機（株）生産技術研究所

内海権三：正員、三菱電機（株）開発部

松田禎夫：正員、三菱電機（株）神戸製作所

平林庄司：正員、三菱電機（株）生産技術研究所

第 1 表 供試した炭化ケイ素

Table 1. Silicon carbides used for experiments.

記号	粒度 ⁽¹⁾	粒子径の平均径 (μm)	比重	体積抵抗率 ⁽²⁾ $\times 10^3 (\Omega \cdot \text{cm})$	比誘電率
S 1	No. 320	52.5~62	3.21~3.22	1.1~1.8	6~7
S 2	No. 600	26~31	3.20~3.21	2.3~3.0	
S 3	No. 1200	11.5~14.5	3.19~3.20	4.5~5.3	
S 4	No. 2000	7.1~8.9	3.18~3.19	8.9~11	

注 (1): JIS R 6001 (研磨材の粒度) による粒度規格。

(2): 炭化ケイ素を内径 2 mm の絶縁円筒に充てんし、100 kg/cm² の圧力で加圧した状態で、3.5 cm の電極間に 100 V の電圧を加えて測定した抵抗率。

第 1 図 電圧-電流特性測定用試料

Fig. 1. Specimen for measurement of voltage-current characteristics.

第 1 表のような 4 種類の炭化ケイ素について検討した。

E - J 特性は第 1 図に示すように、ガラス管の周囲に約 300 μm の厚さに SiC ペイントを塗布し、銀ペイントを塗布して設けた電極間に電圧を印加して電流を測定した。測定は微小電流領域を考慮して直流での測定を主体に行ない、実用的な電圧-電流領域では交流の 60~1,000 Hz の周波数特性の測定も行なった。また、20~240°C の温度特性についてはオープン中で測定した。

〈2・2〉 電圧-電流特性 第 2 図(a)に $10 \sim 10^4$ V/cm の電界範囲における直流の E - J 特性を示す。ここに、 E は SiC ペイント表面の沿面方向の平均電界強度、 J は SiC ペイントを流れる平均の電流密度である。SiC ペイントの E - J 特性は一般に

$$J = k E^n \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 k, n : 定数

で表わすことができる。定数 n は非線形性を表わす指数で、 $10 \sim 20$ V/cm 以下の低電界領域では $n=1$ の線形抵抗体となり、このときの表面抵抗率は $10^{12} \Omega$ 以上である。電界が高くなるに従って n の値は大きくなり、 $2 \sim 3 \times 10^3$ V/cm 以上の高電界領域で顕著な非線形性を示し、 n の値は約 8 である。

SiC ペイントの塗布厚さを 200~1,000 μm の範囲で変えて E - J 特性を測定した結果、厚さと電流の間にほぼ線形の比例関係が成立した。従って、 3×10^3

第 2 図 電圧-電流特性

Fig. 2. Voltage-current characteristics.

V/cm 以上の実用的な電界における非線形性は塗布厚さにあまり影響されないとみてさしつかえない。

結合材の材料については、アクリル系樹脂、エポキシ系樹脂、シリコン系樹脂などについても検討したが、 E - J 特性、接着強度、塗布作業性などの面からアルキッド系樹脂を用いた。

炭化ケイ素の粒子径に対する特性は、一定の電界で比較したとき粒子径が大きくなるに従って電流が増加する関係にある。これは、増山氏ら⁽⁷⁾の炭化ケイ素粒子集合体の電圧-電流特性の報告と同様の傾向を示すことから、この実験で扱った炭化ケイ素の粉体と結合材の配合範囲での非直線伝導機構は同様のものとして取り扱った。

〈2・3〉 温度特性 SiC ペイントに電流が流れるとジュール熱の発生により温度が上昇するが、この温度上昇を無視してふんい気の温度を変えて測定した E - J 特性の温度依存性を第 2 図(b)に示す。温度の上昇と共に電流が増加する特性を示し、特に低電界領域での増加が著しく、線形抵抗から非線形抵抗領域に移る電界が次第に高くなっている。これは炭化ケイ素の粒子間の接触抵抗の温度依存性が現われていると考えられる。200°C 以上の温度になると SiC ペイントの表面が酸化して変色したが、 E - J 特性には大きな変化は見られない。

この実験で扱った 120~240°C の温度範囲では、 6×10^3 V/cm 以上の高電界領域における電流値は 20°C の値より小さくなった。これは、ふんい気の温度が高くなると SiC ペイントの温度は発生するジュール熱の熱放散が悪くなるので、ふんい気に比べて高くなる。従って、SiC ペイントの熱膨張が大きくなるので炭化ケイ素の粒子間の接触が緩くなり、接触抵抗が高くなったためと考えられる。しかし、実用的な電界範囲ではほぼ同じような E - J 特性を示しているので、20°C の特性で近似しても大きな誤差はないと考えら

れる。

(2.4) 周波数特性 第2図(c)に 60~1,000 Hzでの周波数特性を示す。電界、電流とも実効値でプロットしたもので、周波数が高くなるに従って電流が増加する特性を示し、線形から非線形のインピーダンス領域に移る電界が高くなる。炭化ケイ素の比誘電率は 6~7 でかなり大きいことから、周波数が高くなるに従って充電電流の成分が影響してくるものと考えられる。

実用的な電界範囲における商用周波数での E - J 特性は直流とはほぼ同じような特性を示すことから、直流の特性で代用しても支障がないと言える。

3. SiC ペイントの電界緩和の挙動

E - J 特性の異なる 4 種類の SiC ペイントに対し、SiC ペイントでの電位分布、電界強度分布、電流分布および電力損失分布を解析し、電力損失分布から温度上昇分布を調べる、いわゆる電界緩和の挙動を解析した。

一般に、コイル端は対地絶縁層の単位長さあたりの静電容量 C と対地絶縁層表面の抵抗率 R とによる CR 分布定数回路で表示できるが、実用的な電界における SiC ペイントが顕著な非線形抵抗特性を示すため、電界依存性の抵抗素子が分布する等価回路となる。これに対しては、半導体ダイオードの電圧-電流 (V_d - I_d) 特性に着目し、SiC ペイントの抵抗率の非線形性を半導体ダイオードの非線形抵抗特性に模擬して解くダイオードキャパシタンス等価回路によるアナログシミュレーション解析手法を考案し、電界緩和の挙動を解析した。

(3.1) 解析方法 半導体ダイオードの順方向特性あるいはツェナー特性が SiC ペイントの E - J 特性と良く相似している例を第3図に示す。このときの半導体ダイオードは検波用ダイオード MD 134 (三菱電機製) を第4図(a)の順方向特性に模擬したもので、ツェナー特性を利用する場合は同図(b)の組合せを行なう。いずれの組合せも正負両方向に電流が流れるようにするためである。

第3図の半導体ダイオードの V_d - I_d 特性における非線形特性を表わす指数 n の値は約 11 で、SiC ペイントのそれより大きい。同図において、 E - J 特性と V_d - I_d 特性の両特性直線の交点を模擬点として、模擬点のそれぞれの値を E_s , J_s , V_s および I_s とすると、回転機コイルでの SiC ペイントと等価回路での半導体ダイオードとの間での換算係数は次のようになる。

第3図 E - J 特性と V_d - I_d 特性

Fig. 3. Characteristics of E - J and V_d - I_d .

第4図 半導体ダイオードの組合せ

Fig. 4. Mode of coupling for diodes.

$$K_v = E_s / (V_s / dx) \dots \dots \dots (2)$$

$$K_i = J_s / I_s \dots \dots \dots (3)$$

$$K_r = K_v / K_i \dots \dots \dots (4)$$

ただし、 K_v : 電圧の換算係数、 K_i : 電流の換算係数、 K_r : 抵抗の換算係数、 dx : 半導体ダイオードの一組合せが模擬するコイル沿面方向の単位長さ

対地絶縁層の dx あたりの静電容量を C_a とすると、等価回路における分布容量 C は

$$C = K_r C_a \dots \dots \dots (5)$$

として得られる。

高圧回転機コイルの対地絶縁層の厚さは一般に 0.1~1 cm の範囲にあるので、 C はかなり大きな容量となる。このことはシミュレーションする模擬回路に相当大容量の電源が必要となるので、模擬回路における電源周波数を変化させる方法を考えた。

実機における時間系を t 、模擬回路における時間系を τ とし、両者における時間の換算係数を K_τ として

$$\tau = K_\tau t \dots \dots \dots (6)$$

のような関係におけば、(5)式は

$$C = K_r C_a / K_\tau \dots \dots \dots (7)$$

となる。(7)式の関係から、模擬回路の C をあらかじめ決めておき、この C に基づいてシミュレーションの周波数を決める方法が実験を行なうのに簡便である。

また、電力損失の換算係数 K_p は(2)、(3)式より次式のようになる。

第5図 モデルコイルと実験回路の関係

Fig. 5. Relation between model coil and experimental circuit.

$$K_p = K_v K_i \dots\dots\dots (8)$$

〈3・2〉 アナログシミュレーション

アナログシミュレーションに用いたモデルコイルと実験の模擬回路網の例を第5図に示す。モデルコイルの対地絶縁層は集成マイカにエポキシ樹脂を真空加圧含浸したものである。S3のSiCペイントの半導体ダイオードへの模擬は第3図に示したものである。 dx の長さは0.5~1 cmにとれば十分な精度が得られるので⁽¹⁾、ここでは0.5 cmとした。

S1, S2およびS4のSiCペイントの半導体ダイオードへの模擬は、 V_a-I_a 特性での模擬点を変えたり、他の検波用ダイオード(MD 135, 136, 137)あるいはツェナーダイオード(MZ 1003, 1004, 1005, 1006, 三菱電機製)を用いてシミュレーションを行なった。

模擬回路における測定法と、測定結果のモデルコイルへの換算は次のように行なった。

(1) 電位 モ擬回路における格子点の電位の最大値をシンクロスコープで測定した。この値は電圧の位相を考慮しない絶対値である。測定した電圧値を K_v 倍して大地電位に対するSiCペイントでの電位とした。

(2) 電流 ダイオードに直列にそう入した10Ωの電流測定用抵抗の電圧降下分を差動増幅器で増幅し、電流の実効値を測定した。測定した電流値を K_i 倍して、その位置のSiCペイントに流れる電流とした。

(3) 電界強度 ダイオードの端子電圧を差動増幅器で増幅し、シンクロスコープで電圧の最大値を測定した。この値は電圧の位相を考慮しない絶対値で、測定した電圧を K_v 倍して、その位置の dx 間の電界強度とした。

(4) 電力損失 (2)項の電流と(3)項の電界強度のそれぞれの差動増幅器の出力電圧を乗算機能付きオシロ(Philips社製, PM 3265)あるいは電力計(横

河電機製, 2885-11)で電力として測定した。測定した値を K_p 倍し、その位置の dx 間の電力損失とした。

〈3・3〉 温度上昇分布の解析方法 〈3・2〉節の測定で得られた電力損失の値を用いて、温度分布計算汎用プログラムHEAT⁽⁸⁾で温度上昇の計算を行なった。温度上昇の計算では、SiCペイントと低抵抗塗料の塗布厚さは300 μm、熱伝導率は導体が60、対地絶縁層が0.18、SiCペイントが1.8、低抵抗塗料が2.5 kcal/m·h·°C、空気熱伝達係数は7.0 kcal/m²·h·°Cとして定常値を算出した。

また、アナログシミュレーションの解析結果と温度上昇の計算結果を検証するために、S3のSiCペイントを塗布したモデルコイルを用いて温度の実測を行なった。測定は赤外線放射温度計(日本電子製, JTG-IA)を用いた。

〈3・4〉 解析結果 印加電圧 V_0 は50 kV、周波数 f は60 Hzの場合の電界強度分布、電力損失密度分布および温度上昇分布の解析結果を第6図に示す。SiCペイントの抵抗率が高くなるに従って電圧透過距離 x_0 が短くなり、低抵抗塗料との継ぎ目($x=0$)と x_0 との間での沿面方向の電界強度が高くなる。電界強度の分布は電圧透過範囲全域で同じでなく、沿面距離 x が長くなるに従って低くなるような分布である。従って、SiCペイントの抵抗率は $x=0$ で最小値を示し、 x と共に高くなる。電力損失密度は $x=0$ で最大値となり、 x と共に減衰する分布特性である。

第6図 解析結果

Fig. 6. Result of analogue simulation.

SiC ペイントの抵抗率が異なれば電界強度、電流密度の値と分布は変わるが、 $x=0$ における電力損失密度は抵抗率の大きさに関係なく同じである。しかし、抵抗率が低いほど電圧透過範囲全体での全電力損失が大きくなり、ジュール発熱量が大きくなる。従って、抵抗率が低くなるほど温度上昇は高くなる。

SiC ペイントでの最大電力損失の発生位置と最大温度上昇を示す位置とは同じでない。この理由は、最大電力損失の発生位置である $x=0$ の付近で発生したジュール熱が低抵抗塗料側へ熱放散するため、 $x=0$ 付近の温度上昇が低くなることによる。なお、最大温度上昇を示す位置は抵抗率が低くなるに従って $x=0$ から離れる。

温度上昇は SiC ペイントの抵抗率、印加電圧、コイルの形状および周囲への熱放散に大きく影響されるが、この実験の範囲では S1 の SiC ペイントを用いると最大温度上昇が約 240°C になる。

温度の実測は、電圧を印加して約 30 分後の定常状態で行った。温度測定時の誤差 ($\pm 10^\circ\text{C}$) を考慮しても温度上昇の計算値と実測値とが良く一致しており、アナログシミュレーションと温度上昇の計算から得られた解析結果がほぼ妥当であると言える。

4. SiC ペイントの破壊電圧特性

対地絶縁層の耐電圧試験あるいは絶縁破壊試験における電圧昇圧法には連続昇圧法と段階昇圧法がある。ここでは、SiC ペイントへ加わる熱的なストレスからみて非常にかこくな電圧昇圧法の場合にも SiC ペイントが適用できるようにするため、電圧印加開始から 50 kV までは 1 kV/s の電圧上昇速度で連続昇圧したあと 1 分間保持し、その電圧以上では 2 kV ステップで 1 分間保持する段階昇圧法の場合について検討し、このときの SiC ペイントの破壊特性についてまとめた。

(4.1) SiC ペイントの破壊現象 コイルへの印加電圧が高くなったとき、SiC ペイントでは焼損あるいは沿面フラッシュオーバーを発生するが、ここでは前者を熱破壊、後者を電界破壊と定義した。これらの破壊現象は次のようなものである。

(1) 熱破壊 SiC ペイントの温度上昇の高い位置から煙が出て焼ける現象で、時間の経過と共にコイル端側へ進展していく。SiC ペイントが焼けたコン跡付近の対地絶縁層のエポキシ樹脂はかなり黒色に変化しているが焼損は見られないことから、SiC ペイントの結合材が焼けたものと考えられる。熱破壊は、温度が上昇すると SiC ペイントの抵抗率が低下し、更に温

る温度は 210~250°C の範囲にあり、特に 240°C 付近に集中していたので、最大温度上昇が 240°C になれば熱破壊すると定義した。

(2) 電界破壊 抵抗率の高い SiC ペイントでは、SiC ペイントの表面において導体と低抵抗塗料との間で沿面フラッシュオーバーを生ずる現象で、電界緩和が不十分な場合に起きる。第 1 図の試料形状で、直流電圧での沿面フラッシュオーバーを発生する平均電界を測定した結果、12~15 kV/cm の範囲にあり、50% フラッシュオーバー電圧は 14 kV/cm であったので、最大電界強度が 14 kV/cm になれば電界破壊すると定義した。

(4.2) SiC ペイントの破壊電圧 アナログシミュレーションと温度上昇の計算から求めた計算値と実測値とを対比して、SiC ペイントの破壊電圧（以下、実測値は平均値と標準偏差を示す）を第 7 図に示す。S1, S2 および S3 は熱破壊、S4 は電界破壊で、計算値と実測値とは良く対応している。SiC ペイントの抵抗率が低くなると全電力損失が増加し、ジュール発熱量が大きくなるので熱破壊する印加電圧が低くなる。また、抵抗率が高くなると全電力損失は減少する度が上昇する、いわゆる熱暴走による破壊である。

ここでの実験に用いた SiC ペイントの煙が出始めが、電界強度が高くなって沿面フラッシュオーバーを生ずる。これらから、4 種類の中で最適な抵抗特性の SiC ペイントは S3 であると言える。この関係は対地絶縁層の厚さが 0.1~1 cm の範囲では同じ傾向である。

(4.3) 破壊電圧の絶縁厚さ特性 S3 の SiC ペイントの破壊電圧と対地絶縁層の厚さ (D_1) の関係を第 8 図に示す。対地絶縁層が厚くなるに従って SiC ペイントでの全電力損失が小さくなるので破壊電圧は上昇する。高圧回転機コイルの対地絶縁層の実用的な厚さは 1 cm 以下であるので、かなり厚い絶縁設計のコイルにおいても SiC ペイントの適用可能な印加電圧の

第 7 図 SiC ペイントの破壊電圧

Fig. 7. Breakdown voltage of SiC paint.

第 8 図 破壊電圧の絶縁厚さ特性

Fig. 8. Relation between breakdown voltage and thickness of ground insulation.

範囲は 80 kV 以下であると言える。

5. 新しい放電防止法の検討

ここでは、回転機の高電圧化に対処するための部分放電防止法として、SiC ペイントで発生する電力損失の最適化によって温度上昇を抑制する方法について検討した。それには、

- (1) SiC ペイントの沿面方向の電力損失を最適化する方法
- (2) SiC ペイント層を 2 層設け、それぞれの SiC ペイントへの電力損失の配分を最適化する方法とについて検討した。

〈5・1〉沿面方向の電力損失分布の最適化 この方法は、低抵抗塗料端からコイル端にいくに従って抵抗率が次第に高くなるように、抵抗率の相異なる SiC ペイントを 2 種類以上用いるもので、S2 と S3 の 2 種類の SiC ペイントを用いた場合の構造と等価回路を第 9 図に示す。以下、抵抗率の低い SiC ペイントである S2 の塗布長さを L_1 として、電力損失密度分布と SiC ペイントの破壊電圧の関係について示す。

(1) 電力損失密度分布 第 10 図に電力損失密度分布の例を示すように、この方法は S2 または S3 の SiC ペイントを単層塗りした場合の $x=0$ の電力損失を小さくすることを目的としたものである。

S2 と S3 の SiC ペイントにおける最大の電力損失密度をそれぞれ $W_0(x=0)$, $W_L(x=L_1)$ として、この値と L_1 の関係を第 11 図に示す。 $W_0=W_L$ になる L_1 の長さがこの方法の最適点となるが、低抵抗塗料への熱放散を考慮して、 $W_0>W_L$ の場合が良く、最適点の L_1 の 1.1~1.2 倍の長さが最適長である。

(2) SiC ペイントの破壊電圧特性 第 12 図に破壊電圧と L_1 の関係を示す。S2 と S3 の SiC ペイントの組合せの最適な L_1 のとき、S3 の SiC ペイン

第 9 図 沿面方向の電力損失分布を最適化する方法の構造と等価回路

Fig. 9. Construction and equivalent circuit of double-band layer systems.

第 10 図 電力損失密度の分布

Fig. 10. Power density distributions.

第 11 図 電力損失密度と L_1 の関係

Fig. 11. Relation between power density and L_1 .

第 12 図 SiC ペイントの破壊電圧- L_1 特性

Fig. 12. Relation between breakdown voltage of SiC paint and L_1 .

第 13 図 SiC ペイント層を 2 層設ける方法の構造と等価回路

Fig. 13. Construction and equivalent circuit of double layer with SiC paint.

トを単層塗りする場合と比べて破壊電圧を約 20% 上昇させることができる。 L_1 の最適な長さは対地絶縁層が厚くなるに従って長くなる傾向である。なお、他の SiC ペイントの組合せの場合も同様の効果があるが、S2 と S3 との組合せが最も破壊電圧が上昇する。

また、S1, S2, S3 および S4 の 4 種類の SiC ペイントを用いた場合の破壊電圧は、S3 の SiC ペイントを単層塗りする場合と比べて約 25% 上昇した。

〈5・2〉 電力損失の配分の最適化 この方法は第 13 図に示すように、対地絶縁層の外周にシールド絶縁層（厚さ D_2 ）を介して SiC ペイント層を 2 層設けたもので、対地絶縁層の外周に塗布した低抵抗塗料と内層の SiC ペイントの継ぎ目から L_2 （この長さをシールド電極長とする）の長さだけ低抵抗塗料を伸ばして外層の SiC ペイントと接続したものである。以下、S3 の SiC ペイントを用いて対地絶縁層とシールド絶縁層の単位長さあたりの静電容量を C_1, C_2 とし、その比の $C_k (=C_1/C_2)$ と、 L_2 、電力損失密度分布および破壊電圧との関係を示す。

(1) 電力損失密度分布 C_k が 0.25 の場合の電力損失密度の分布を第 14 図に示す。電力損失密度は SiC ペイント単層塗りの場合と同じく内層、外層の SiC ペイントともに低抵抗塗料との継ぎ目で最大となる。この継ぎ目における電力損失密度と L_2 の関係を第 15 図に示す。内層と外層の SiC ペイントの電力損失密度が同じになる L_2 の長さがこの方法の最適点で、最適点での電力損失密度は C_k の大きさが変わっても SiC ペイント単層塗りの場合の継ぎ目の電力損失密度の約 60% である。

L_2 の最適な長さと C_k の関係を第 16 図に示す

第 14 図 電力損失密度の分布
 Fig. 14. Power density distributions.

第 15 図 電力損失密度と L_2 の関係
 Fig. 15. Relation between power density and L_2 .

第 16 図 最適なシールド電極長と C_k の関係
 Fig. 16. Relation between optimum shield length and C_k .

うに、 C_k が大きくなるに従って長くなり、対地絶縁層の厚さが薄くなるほど短くなる特性を示す。なお、このときの C_1 と C_2 の比誘電率は同じとした。

(2) SiC ペイントの破壊電圧特性 第 17 図に最適な L_2 の長さにおける破壊電圧と C_k の関係、第 18 図に破壊電圧と L_2 との関係を示す。

C_k が大きくなるに従って破壊電圧は高くなる特性

第 17 図 SiC ペイントの破壊電圧- C_k 特性

Fig. 17. Relation between breakdown voltage of SiC paint and C_k .

第 18 図 SiC ペイントの破壊電圧- L_2 特性

Fig. 18. Relation between breakdown voltage of SiC paint and L_2 .

を示し、特に C_k が 0.1~0.5 の範囲では C_k の増加に対する破壊電圧の増加率が著しい。第 18 図の実測値は、モデルコイルに集成マイカテープを巻きながらエポキシ樹脂をはけ塗りしてシールド絶縁層を構成した場合である。この方法では、シールド絶縁層の厚さを考慮して C_k は 0.1~0.5 の範囲にとるのが適当であろう。このとき、第 18 図の例では SiC ペイント単層塗りの場合の破壊電圧を約 40% 上昇させることができる。

なお、シールド絶縁層を対地絶縁層と同じ絶縁構成とし、シールド絶縁層の厚さ分だけ対地絶縁層の厚さを増加とした場合の SiC ペイント単層塗りの方法と比べると、 $C_k=0.5$ に相当する絶縁厚さの増加の場合においても破壊電圧は約 15% しか上昇しないので、非常に効果的な方法であると言える。

6. むすび

以上、炭化ケイ素 (SiC) ペイントの電圧-電流特性を調べ、高圧回転機コイル端の部分放電防止法に適用した場合の電界緩和の挙動解析、破壊電圧特性、更に SiC ペイントでの電力損失を最適化することにより適用可能な印加電圧を上昇できる新しい放電防止法を、ダイオードキャパシタンス等価回路によるアナログシミュレーションを中心に検討してきたが、主な結果は次のとおりである。

(1) 本実験で扱った炭化ケイ素の粉体と結合材を 6:1 の重量比で配合した SiC ペイントの電圧非直線伝導機構は、炭化ケイ素粒子集合体の場合と同じものとして取り扱える。

(2) SiC ペイントによる電界緩和の挙動を解析する方法として、ダイオードキャパシタンス等価回路によるアナログシミュレーション解析手法は、電子計算機による数値解析手法に比べて安価で簡便、かつ十分な精度があることから、商用周波数領域の実用的な範囲で有力な手段である。

(3) SiC ペイントは抵抗率が低くなると熱破壊、高くなると電界破壊するので、電圧-電流特性に最適な特性があることがわかった。

(4) SiC ペイントで発生する電力損失分布を最適化することにより、SiC ペイントの破壊電圧を上昇する方法として、コイル沿面方向の電力損失分布の最適化により 20%、SiC ペイント層を 2 層設けて電力損失配分の最適化により 40% それぞれ上昇できることが明らかとなった。

終りに、本研究の遂行にあたり、有益な御助言をいただいた当社北伊丹製作所 柴山恭一博士、中央研究所 草川英昭主任研究員、長崎製作所 川上 剛副課長、実験に御協力いただいた生産技術研究所 石川隆敏技師、並びに神戸製作所、生産技術研究所の関係者に感謝の意を表する。

(昭和 54 年 7 月 23 日受付)

文 献

- (1) 谷, 他: 昭 49 電気学会全大, 544.
- (2) 谷, 他: 昭 48 電気関係学会関西支部連大, G5-21
- (3) 川上, 他: 昭 49 電気学会全大, 252
- (4) 谷, 他: 昭 50 同上, 316
- (5) 谷, 他: 昭 51 同上, 315
- (6) F. A. Schwartz, et al.: *J. Appl. Phys.* 24, 1015 (1953)
- (7) 増山, 他: 電学誌, 88, 702 (昭 43-4)
- (8) 莊島, 他: 電気学会情報処理研究, IP-72-7