

# 電極端部表面コロナの防止について

## Prevention of Surface Corona at Electrode Edge

小川哲郎\*  
Tetsuo Ogawa

### 内 容 梗 概

高電圧発電機ステータコイルのスロット端における電位分布を緩和させ、スロット端部で発生する表面コロナを防止する目的で、比較的高抵抗の半導電性塗料を塗布することはよく知られている。このコロナ防止塗料の最適抵抗範囲を理論と実験より求めた結果について報告し、あわせて最近の改良されたコロナ防止塗料について述べる。

### 1. 緒 言

電極端部におけるコロナの発生は主として静電的に電界強度が電極端部に集中するために起るもので、これを防止するには限られた大きさのコイル表面に半導電性塗料を塗布して、この電界強度を緩和させる必要がある。半導電性塗料を塗布した場合には塗料自体の抵抗値が高いため、コイルの絶縁層がもつ静電容量を通して分布定数回路が構成され、コイル表面の電位が徐々に緩和するものであるが、これを理論的にとり上げた報告は数少ない。最近、百武氏<sup>(1)</sup>によりその理論的考察の一部が報告されたが、筆者もこの問題を取り上げ、二、三の検討を加えた結果、理論的にその抵抗範囲を求めることができた<sup>(2)</sup>。なお電位分布の測定値が理論値とよく一致することを明らかにすると同時に、板状試料に円形電極を置いたときの電位緩和についても検討を加えたので、その結果を報告するとともに最近改善されたコロナ防止塗料の特性についても触れる。

### 2. 理 論

発電機ステータコイルにコロナ防止の目的で、コロナ防止塗料を塗る場合、第1図に示すようにスロット内コロナ防止塗料をスロット外に少し出し<sup>(3)</sup>、それに続いてコイル表面にスロット外コロナ防止塗料（以下CS塗料と略記する）を約6~10cmの長さに塗布するのが普通である。鉄心はアースされ、コイル導体が高電位に保たれるのが発電機の使用状態である。このためCS塗料部分における電位分布は第2図①曲線のように変化する。しかし考え方を容易にするため、鉄心が高電位に保たれコイル導体がアースされていると考えた場合は②曲線に示すような電位分布をする。②曲線は①曲線を逆にただけで、電位分布の模様に変化はないはずである。このため、②曲線の場合、すなわち鉄心が高電位に保たれていると考えて以後の理論を進める。

#### (1) 最も基本的な場合

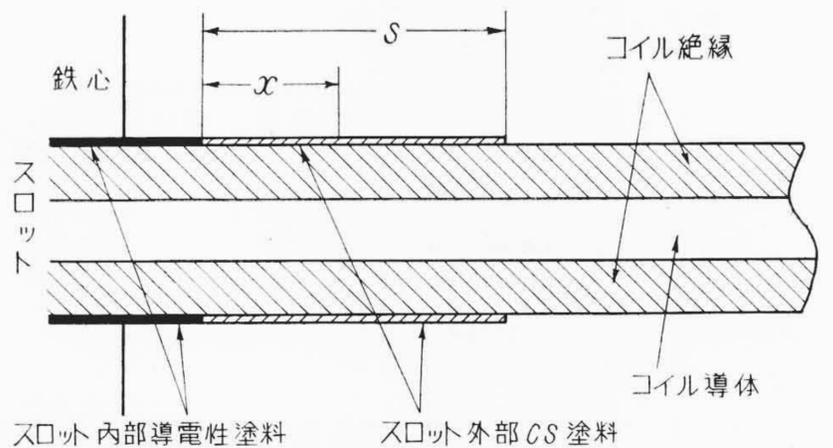
CS塗料が表面もれ抵抗を形成すると考えた場合、塗料塗布部における表面の電位分布は第3図に示すような分布定数回路で等価できる。

単位長さ当りの表面抵抗を $\rho_s$ 、アドミッタンスを $Y$ とすれば普通に分布定数回路で現われる、次の微分方程式が得られる。

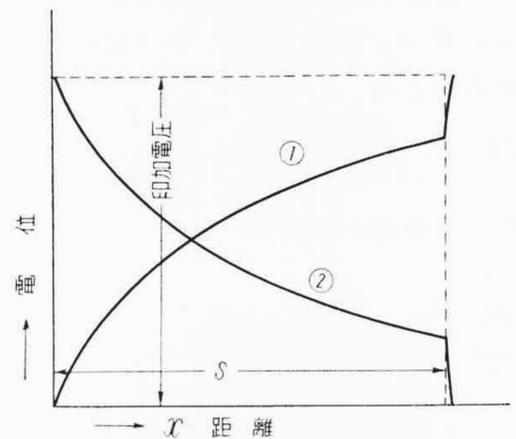
$$-\frac{d\dot{V}}{dx} = \rho_s \dot{I} \dots\dots\dots (1)$$

$$-\frac{d\dot{I}}{dx} = Y \dot{V} \dots\dots\dots (2)$$

上式中 $\dot{I}$ はコイル表面を流れる電流で、 $x$ は第1図に示すようにCS塗料継ぎ目からの距離である。このとき $x$ の点における電位は

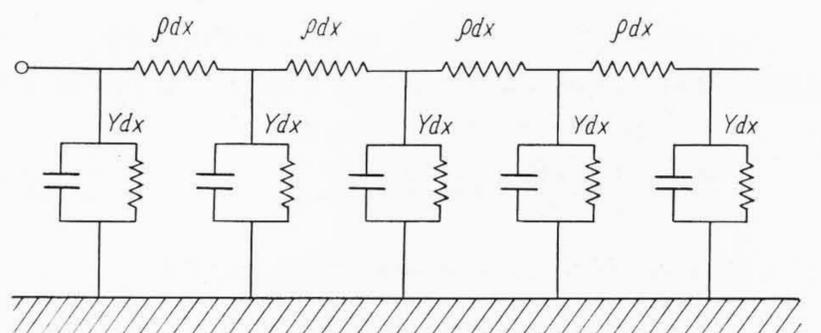


第1図 CS塗料の塗布状況



- ① コイル導体が高電位
- ② 鉄心が高電位

第2図 CS塗料塗布部の電位分布の概略



第3図 等価回路

$$\dot{V} = \dot{V}_s \frac{\dot{Z}_R \cosh \dot{r}(s-x) + \dot{Z}_k \sinh \dot{r}(s-x)}{\dot{Z}_R \cosh rs + \dot{Z}_k \sinh rs} \dots\dots\dots (3)$$

となる。(3)式中 $s$ : CS塗料の長さ、 $V_s$ : コイル印加電圧

$$\dot{r} = \alpha + j\beta = \sqrt{\rho_s \cdot Y} = \sqrt{\rho_s (g + j\omega c)} \doteq \sqrt{\rho_s \omega c} \epsilon^{j\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\delta}{2}\right)} \dots\dots\dots (4)$$

\* 日立製作所日立絶縁物工場

$$Z_k = \sqrt{\frac{\rho_s}{Y}} = \sqrt{\frac{\rho_s}{\omega c}} \epsilon^{-j\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\delta}{2}\right)} \dots\dots\dots(5)$$

$\delta$ : 損失角

$Z_k$ : 端部における負荷インピーダンス

一般の場合はCS塗料末端部は開放状態、すなわち  $Z_k \rightarrow \infty$  と考えられるゆえ(3)式は(6)式のようになる。

$$\dot{V} = \dot{V}_s \frac{\cosh \dot{r}(s-x)}{\cosh \dot{r}s} \dots\dots\dots(6)$$

またコイルの  $\tan \delta$  が小さい場合には  $\delta \approx 0$  と見なしてもさしつかえない。このため(4)式は(7)式のようになる。

$$\dot{r} = \alpha + j\alpha = \sqrt{\frac{\rho_s \omega c}{2}} + j \sqrt{\frac{\rho_s \omega c}{2}} \dots\dots\dots(7)$$

(6)式をさらに変形すれば

$$\dot{V}/\dot{V}_s = \left[ \frac{\sinh^2 \alpha l + \cos^2 \alpha l}{\sinh^2 \alpha s + \cos^2 \alpha s} \right]^{1/2} \epsilon^{j[\tan^{-1}(\tanh \alpha l \cdot \tan \alpha l) - \tan^{-1}(\tanh \alpha s \cdot \tan \alpha s)]} \dots\dots\dots(8)$$

となる。ここで  $l = s - x$  である。(8)式より

$$|\dot{V}/\dot{V}_s| = \left[ \frac{\sinh^2 \alpha l + \cos^2 \alpha l}{\sinh^2 \alpha s + \cos^2 \alpha s} \right]^{1/2} \dots\dots\dots(9)$$

となり、電位分布の絶対値を求めることができる。

(2) 円盤状の場合

上記(1)で述べたものはコイルに適用できる最も基本的な場合であるが、コロナ防止の効果を実験的に求めるには、円盤状のもので模擬したほうがはるかに便利である。

このときの基本方程式は表面抵抗率を  $\rho_s$ 、単位面積当りのアドミッタンスを  $\dot{Y}_i = g + j\omega c$  と置き、以下前記同様損失角を  $\delta$ 、表面総電流を  $\dot{I}_s$  として

$$-d\dot{V} = \rho_s \frac{\dot{I}_s}{2\pi r} dr \dots\dots\dots(10)$$

$$-d\dot{I}_s = 2\pi r(g + j\omega c)\dot{V} dr \dots\dots\dots(11)$$

(10)式から

$$\begin{aligned} -\frac{d^2 \dot{V}}{dr^2} &= \frac{\rho_s}{2\pi r} \cdot \frac{d\dot{I}_s}{dr} - \frac{\rho_s \dot{I}_s}{2\pi r^2} \\ &= \frac{\rho_s}{2\pi r} \left[ -(g + j\omega c) 2\pi r \dot{V} \right] - \frac{\rho_s}{2\pi r^2} \left[ -\frac{2\pi r}{\rho_s} \cdot \frac{d\dot{V}}{dr} \right] \end{aligned} \dots\dots\dots(10')$$

(10')式を整理すると

$$\frac{d^2 \dot{V}}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{d\dot{V}}{dr} - (g + j\omega c) \rho_s \dot{V} = 0 \dots\dots\dots(12)$$

上式中  $r$  は第4図に示すように、中心からの半径を示す。ここで絶縁板の  $\tan \delta$  が小さい場合には  $\delta \approx 0$  と見なしてもさしつかえない。このため(12)式は(13)式のようになる。

$$\frac{d^2 \dot{V}}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{d\dot{V}}{dr} - j\omega c \rho_s \dot{V} = 0 \dots\dots\dots(13)$$

いま  $\omega c \rho_s = k^2$  すなわち  $\sqrt{\omega c \rho_s} = k$  と仮定すると

$$\frac{d^2 \dot{V}}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{d\dot{V}}{dr} - jk^2 \dot{V} = 0 \dots\dots\dots(13')$$

となり、この微分方程式の解は(14)式のようになる。

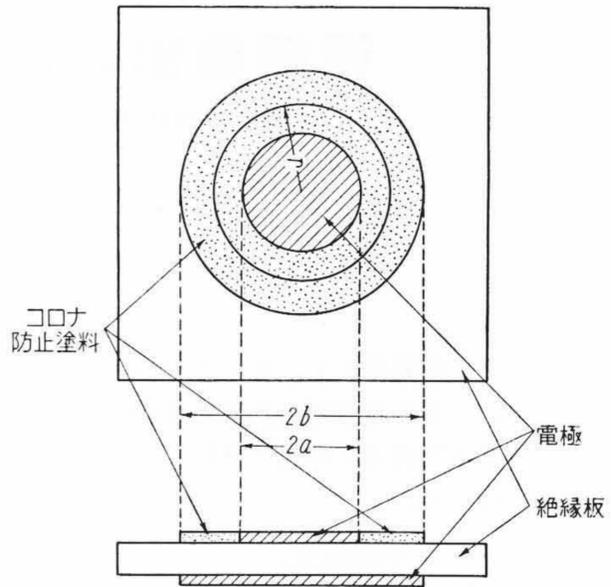
$$\dot{V} = A[\text{ber}(kr) + j\text{bei}(kr)] + B[\text{ker}(kr) + j\text{kei}(kr)] \dots\dots\dots(14)$$

$A, B$  は境界条件によりきまる定数である。

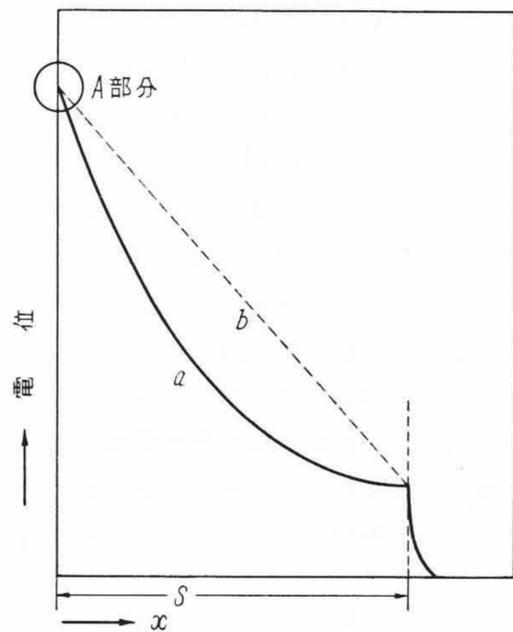
いまたとえば第4図で  $b = \infty$  の場合を考えると、 $r$  点の電位は

$$\dot{V} = \frac{\dot{E}_s [\text{ker}(kr) + j\text{kei}(kr)]}{\text{ker}(ka) + j\text{kei}(ka)} \dots\dots\dots(15)$$

として計算することができる。



第4図 円盤状試料



第5図 電位分布の例

(3) 一様でない線路 ( $\rho_s$  が連続的に変化する場合)

CS塗料の抵抗値が一定の場合は大体第5図 a 曲線のように電位が低下してゆくことは前に述べた。しかしこの場合は電極端部、すなわち第5図でA部分の電位傾度が最も大きい。このためこの部分でコロナを発生する危険性がある。理論的には第5図 b 曲線のように電位が低下したほうが良いわけである。このため、抵抗を連続的に変化させたほうが、すなわちCS塗料の抵抗値を末端にゆくにしたい大きくしたほうが b 曲線に近づくことは理解できる。

一方、実際的にはCS塗料に電流特性があって、電流値が大きいほうが抵抗値は小さくなる傾向がある。このため、電位分布は実質的に a 曲線から b 曲線のほうに、換言すれば理想的な方向に近づく傾向がある。

このように抵抗値が連続的に変化する場合の電位分布について考えてみる。ただし、数学的にはこれら抵抗変化がある種の条件を満足したとき以外は解をうることは困難である。

(a) 抵抗値が指数関数的に変化する場合

表面抵抗が  $\rho_s \epsilon^{ax}$  で変化する場合を考えると微分方程式は

$$-\frac{d\dot{V}}{dx} = \rho_s \epsilon^{ax} \dot{I} \dots\dots\dots(16)$$

$$-\frac{d\dot{I}}{dx} = Y_i \dot{V} \dots\dots\dots(17)$$

となり、この解は

$$V = \epsilon \frac{a}{2} x \left[ AJ_0 \left( j \frac{2r}{a} \epsilon \frac{a}{2} x \right) + BY_0 \left( j \frac{2r}{a} \epsilon \frac{a}{2} x \right) \right] \dots\dots\dots (18)$$

となる。

(b) 抵抗値が  $n$  乗的に変化する場合

表面抵抗が  $\rho_s x^n$  の形で変化するときも、その解は Bessel 関数となり

$$\begin{aligned} \dot{V} = Ax^{\frac{n+1}{2}} J_{\frac{n+1}{n+2}} \left[ j \frac{2r}{n+2} x^{\frac{n+2}{2}} \right] \\ + Bx^{\frac{n+1}{2}} J_{-\frac{n+1}{n+2}} \left[ j \frac{2r}{n+2} x^{\frac{n+2}{2}} \right] \dots\dots\dots (19) \end{aligned}$$

なる形で表わされるが、これらの式はきわめて複雑で数値計算も容易でない。ただ抵抗値を適当に変化すれば、第5図のb曲線に近づけることができることは明らかである。

3. CS塗料のコロナ防止可能抵抗範囲の検討

計算が容易なコイルの場合について検討する。まずCS塗料塗布部の電位分布は前節でも述べたが、第6図のようになる。理想的には同図③曲線となるようにCS抵抗値を選ばよ。

②曲線は③の場合よりも抵抗値が低い状態であるが、末端部電位  $V_c$  ではコロナを発生しない状態を示す。 $V_c$  という電位よりも大きくなると端部でコロナを発生するとすれば、①曲線で示す場合には抵抗値が低すぎて、使用電圧ではもちろん末端部でコロナを発生する。

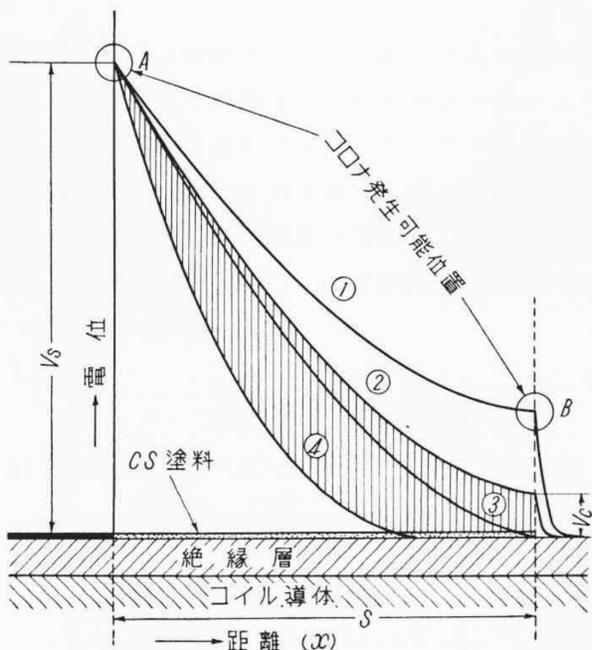
一方、④曲線の場合にはCS塗料抵抗値が高すぎて、電極端部(同図でA部)でコロナを発生する可能性がある。この値より抵抗値が低いときに、コロナを発生しないとすると、②と④曲線の間にはさまれた斜線部分で示す電位分布をするときに、コロナを発生しないことは明らかである。すなわち、②の抵抗値と④の抵抗値の間の抵抗値を選べば良いことになる。

3.1 抵抗下限値の決定

CS塗料末端部における電位の絶対値がそのコイルのコロナ発生電圧  $|V_c|$  よりも小さければ、コロナは発生しない。すなわち  $V_c$  の値を実験的に求めておけば、ある  $\alpha$  値に対して末端部でコロナを発生しないために必要な  $|V_s|$  (コイル電圧) は次式から求めることができる。

すなわち(9)式で  $\dot{V} = \dot{V}_c$  とおき、 $x=s$  とすると

$$|\dot{V}_s| = (\sinh^2 \alpha s + \cos^2 \alpha s)^{1/2} |\dot{V}_c| \dots\dots\dots (20)$$



第6図 CS塗布分の電位分布

3.2 抵抗上限値の決定

電極端部で発生するコロナは、この部分の電界強度が高いために発生するものである。コロナ防止塗料を塗布して、この部分の表面電位傾度を低下させることによってこの部分のコロナを防止することができる。この部分の電位傾度は(6)式を微分して、 $x \rightarrow 0$  の値を求めればよい。すなわち、

$$\left[ \frac{d\dot{V}}{dx} \right]_{x=0} = -\dot{V}_s \dot{r} \tanh \dot{r} s \dots\dots\dots (21)$$

この場合、 $\dot{r} s$  は1に比べかなり大きいので  $|\tanh \dot{r} s| \approx 1$  と仮定すれば

$$\left| \left[ \frac{d\dot{V}}{dx} \right]_{x=0} \right| = |\dot{V}_s \dot{r}| = V_s \sqrt{\rho_s \omega \epsilon} \dots\dots\dots (22)$$

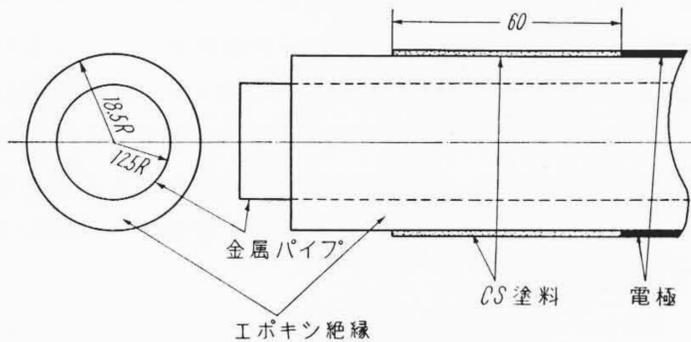
となる。 $[\frac{d\dot{V}}{dx}]_{x=0}$  の値が実験的にきまれば(22)式からコロナを防止できる抵抗範囲を計算で求めることができる。

3.3 実験結果

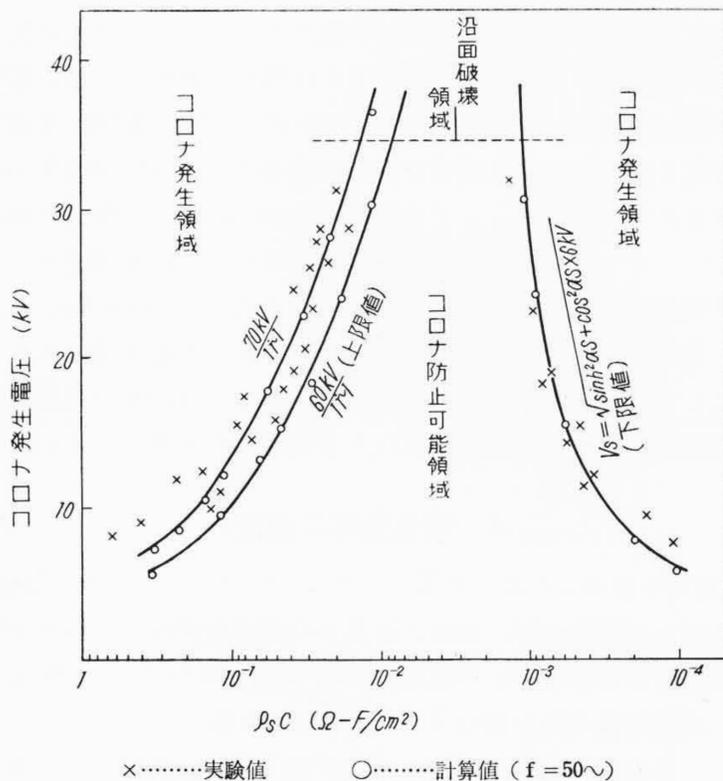
第7図に示すような円筒状のモデルコイルを作り、CS塗料の抵抗値を変化させてコロナの発生状態を検討した。コロナの発生状況は暗室で観測した。その結果を第8図に示す。第8図は横軸にCS塗料の単位長さの抵抗値  $\rho_s$  と、絶縁層の単位長さ当りの静電容量  $c$  との積をとったものである。

このコイルのコロナ発生電圧  $V_c$  は6kVであったので、この値を(20)式に入れて  $|V_s|$  値を求めたのが同図で抵抗下限値を示す曲線である。図中で×印が実験結果を示す。大体計算値とよく一致していることがわかる。

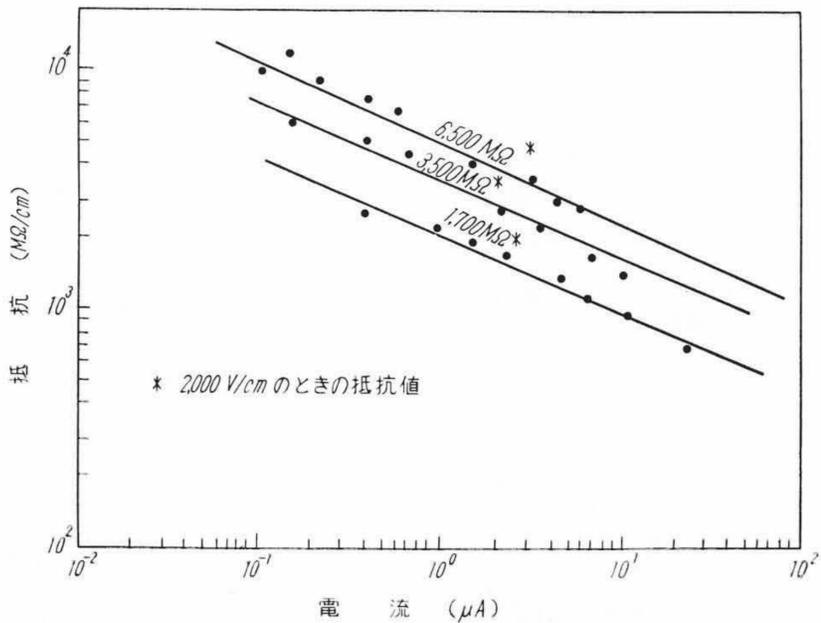
一方、抵抗上限値は(22)式の  $|d\dot{V}/dx|$  の値を60kV/cmおよび70kV/cmにした場合の曲線を同図に示しておいた。実測値はこの範囲内にはいっている。



第7図 円筒状モデルコイル



第8図 CS塗料を6cm塗ったときのコロナ発生電圧



第9図 CS塗料の電流—抵抗特性の一例

所定のコイル電圧に対して RC の値が第8図の下限值よりも小さければ CS 塗料塗布末端部でコロナを発生し、上限値よりも大きければ電極と CS 塗料の継ぎ目部分でコロナを発生する。上記二曲線の間には含まれた部分が無コロナ領域である。特に同図で RC の値が  $1.5 \times 10^{-3} \sim 10^{-2} (\Omega-F)$  の範囲にあるときには、理論的にコロナ発生電圧は 35 kV 以上になるはずである。ところが CS 塗料の全長 6 cm の間に 35 kV の全電圧がかかるため、このときには継ぎ目部分と塗布末端部との間で沿面放電を起す。もちろんこの場合沿面放電を起すまでコロナ放電は起らない。

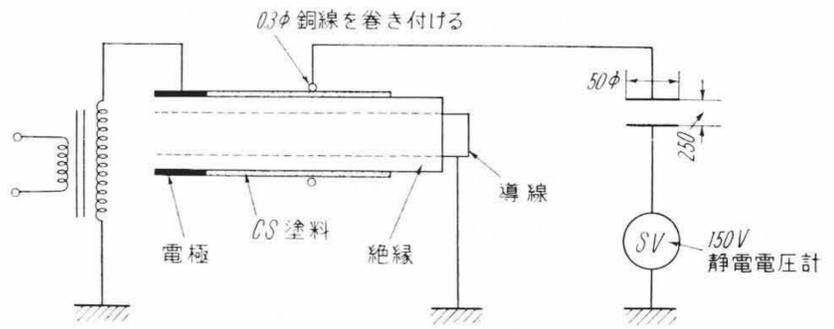
第8図で抵抗上限値の表面電位傾度 ( $dV/dx$ ) は 60~70 kV/cm であることがわかったが、この値は常識的に判断して大きすぎる。第8図の抵抗値は電位傾度 2,000 V/cm の抵抗値をとったものであるが、実際には前にも述べたように、この種コロナ防止塗料の抵抗は電流、または印加電圧によって変化するのが普通である。第9図はコロナ防止塗料の電流—抵抗特性の一例を示したものである。このコイルに関して単位長さ当りの抵抗  $\rho_s$  と、電流  $I$  との間には(23)式のような関係が成立する。

$$\log \rho_s = -0.35 \log I + b \dots\dots\dots (23)$$

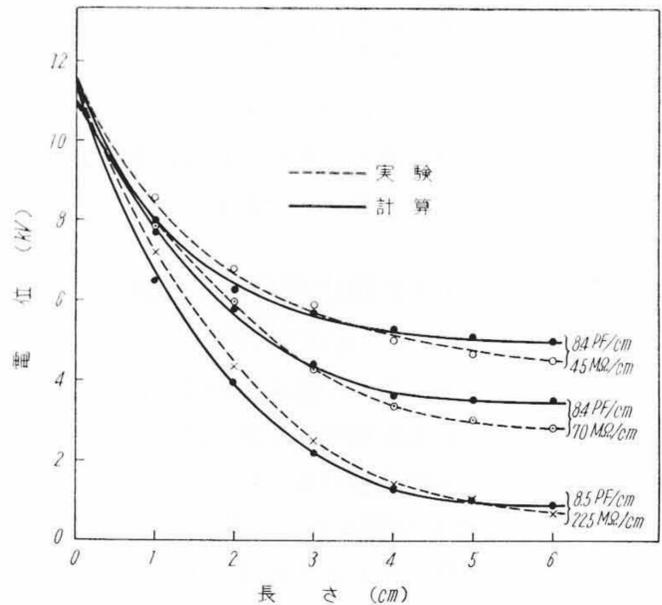
上式中、 $b$  は抵抗の種類によって変る定数である。このように抵抗値が電流の増大とともに減少する傾向にあることを考えに入れると、電極と CS 塗料継ぎ目部分の抵抗値は第8図の計算で用いた抵抗値よりもさらに低下することが予想される。このためこの部分の表面電位傾度はさらに緩和されることは容易に理解できる。電極と CS 塗料継ぎ目部分の電流値を求め (23) 式と (22) 式を用いて近似的に、再度この部分の電位傾度を求めた結果は大体 30~35 kV/cm の値となる。この値はギャップの長さ 1 mm における空気の破壊電圧に近い。ギャップの長さ 1 mm における空気の破壊強度近くの表面電位傾度になったときコロナを発生する理由は Paschen の法則からくるもので、この点は別報でくわしく報告する予定である。いずれにしても電極端部のコロナ放電は、その部分の表面電位傾度が空気の破壊値よりも大きくなったとき起るものと考えてよい。

#### 4. 電位分布の測定

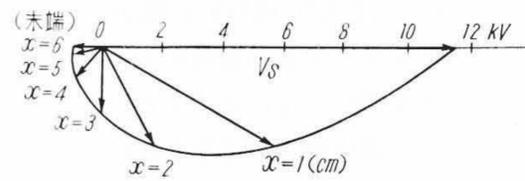
CS 塗料を塗布した部分の電位分布は (6) 式または (8) 式に従うことは明らかであるが、実験と計算との差異を検討する目的で電位分布の測定を行った。この種電位分布の測定はかなり困難であるが、一応絶対値のみを測定する目的で第10図に示すような方法を用いた。測定器に流れる電流を極力少なくして、電位分布に及ぼす影響を小さくするよう留意した。



第10図 電位分布の測定回路



第11図 電位分布の例 (絶対値)



第12図 電位分布の一例

結果を第11図に示す。実測値と計算値とを比較すると、一般に電極付近では実測値のほうが計算値よりも高く、末端部分では逆にになっている。この原因は測定電極に、直接電源からの静電誘導が考えられること、ならびにこの種塗料の電流特性によるものと考えられる。

第12図は位相変化も考えた電位分布の一例を示したものである。この図から明らかなように、CS 塗料の抵抗値が大きくなった場合は、末端部分における電位は印加電圧より 180 度位相がずれることがわかる。

いま第10図のような回路で電位を測定した場合、静電電圧計を接続したことによって生ずる誤差を検討してみよう。

電圧計のインピーダンスを  $Z_R$  とすると、電圧計を接続したときの電位分布は(3)式に従う。電圧計を接続したことによって起る電位分布の最大誤差は、末端部に電圧計を接続したときに起るはずである。いま(3)式から末端部 ( $x = s$ ) の電位を求めると(24)式のようになる。

$$\dot{V} = \frac{\dot{V}_s}{(Z_k/Z_R) \sinh rs + \cosh rs} \dots\dots\dots (24)$$

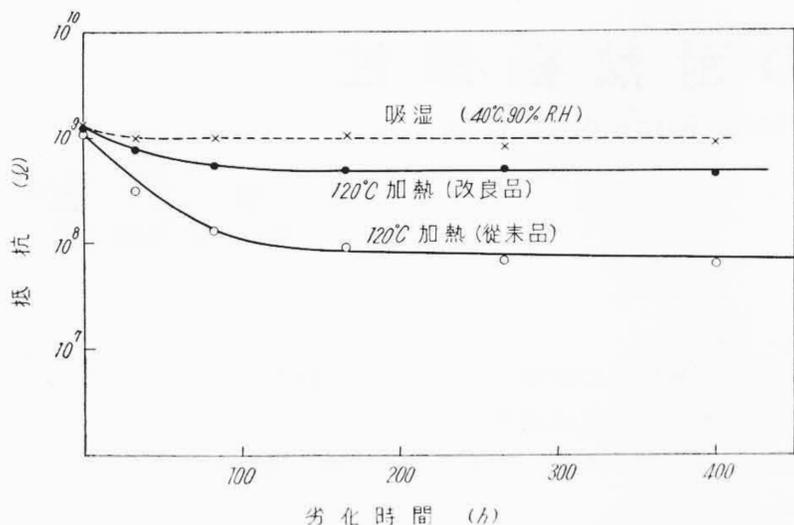
$Z_R = \infty$  すなわち電圧計を接続しないときの電位  $\dot{V}'$  は

$$\dot{V}' = \dot{V}_s / \cosh rs \dots\dots\dots (25)$$

(24), (25) 式から

$$\dot{V} / \dot{V}' = \frac{1}{(Z_k/Z_R) \tanh rs + 1} \doteq \frac{1}{1 + (Z_k/Z_R)} \dots\dots (26)$$

となる。(26)式から明らかなように  $(Z_k/Z_R) \doteq 0$  すなわち  $Z_R$  を  $Z_k$



第13図 CS塗料仕上り品の加熱、吸湿による抵抗変化の一例

に比し十分大きくとっておけば、電圧計を接続したことによって生ずる誤差は無視することができる。

5. CS塗料に要求される諸性能

CS塗料の抵抗値は上述のように第8図のような抵抗範囲に入っていないければ、コロナを完全に防止することが困難である。CS塗料の塗布長さを長くすれば、抵抗下限値はRCの小さいほうにずれが、上限値はほとんど変化しないことが(20)、(22)式からわかる。このため塗布長さを長くすればコロナ防止可能な最適抵抗値の範囲を増大することができる。ところが、CS塗料の抵抗値を低くして塗布長さを長くすると、CS塗料部分を流れる電流のためコイルのtanδ値を悪化させる。最近のようにtanδ性能の良くなってきた高圧発電機コイルに対してはできうる限り塗布する部分を短かくして、しかも抵抗値の高いCS塗料を選ぶ必要があろう。

一方、CS塗料のような半導電性塗料は、一般に加熱劣化によって抵抗値が低下するのが普通である。このため、発電機を製作した当初は完全に表面コロナを防止できたコイルでも、熱劣化および吸湿によって抵抗値が変化して、コロナを発生するおそれがある。すなわちCS塗料は熱、湿度に対して安定なものでなければならない。第13図は日立製作所で最近改良されたCS塗料の耐熱、耐湿性を

示したものである。加熱初期に少し抵抗値が低下するようであるが、その度合は従来のものに比べて少ない。また吸湿による抵抗値の変化はなくなった。

6. 結 言

発電機コイルのスロット出口の部分(電極端部)で発生するコロナを中心に、その防止対策について検討した結果、次のようなことが明らかになった。

- (1) 電極端部で発生するコロナは、CS塗料を塗布することにより防止できることは従来よりわかっていたが、その電位緩和の状態は分布定数回路の理論によく一致する。
- (2) 一方、電極端部におけるコロナは、その部分の表面電位傾度が空気の破壊値25~30kV/cm近くになったとき発生するものである。すなわち、表面コロナ破壊は空気の破壊となら異なるところはない。表面電位傾度をこの値よりも小さくすれば十分コロナは防止することができる。
- (3) 抵抗値を適当に選んでおけば、表面コロナは理論的にかなりの高電圧まで防止できるはずであるが、ある電圧値以上になると、コロナは発生しないが沿面放電を起す可能性がある。
- (4) CS塗料の塗布長さを長くすれば、コロナを防止できる抵抗範囲を拡大することは可能であるが、コイルのtanδを悪化させるとともにCS塗料の電流容量から限界値がある。
- (5) 最近のCS塗料は従来品と比較して耐流性耐湿性が改善された。

終りに本研究に際し御指導、御助言を賜った武蔵工業大学鳥山教授ならびに日立製作所絶縁物工場、日立工場、日立研究所の関係各位に深謝申しあげると同時に、実験を担当された小田島君に感謝する。

参 考 文 献

- (1) 百武、西村：昭34電気四学会連大372
- (2) 小川：電気学会放電専門委員会“電気絶縁物の耐コロナ性シンポジウム”予稿p.116(昭34-10)
- (3) 実用新案第380345号(昭25-10)  
実用新案第385596号(昭26-8)



特 許 の 紹 介



特許第239314号

農 沢 靖 夫・近 藤 務

不燃性絶縁油を使用した変圧器の安全装置

塩化ジフェニール系の不燃性絶縁油を使用した密封形変圧器では器内に短絡事故などが起った場合、絶縁油が熱により分解して塩素ガスを発生し、このガスをそのまま外部に放出することは非常に危険である。その対策としてガス放出路に吸着剤をおき塩素ガスを吸着させることが考えられるが、変圧器輸送中あるいは常時運転中に吸着剤が空気中の湿気や油蒸気に触れると吸着能力が低下して有事の際役に立たなくなる心配がある。

この発明は図示のように変圧器のガス放出路にバースチングプレートを外内2重に張りその間に吸着剤を気密に封入したもので、こうすれば常時吸着剤は空気中の湿気や油蒸気に触れないから吸着能力が低下することなく、事故発生時にはまず内側のバースチングプレートが破れ、続いて外側のバースチングプレートも破れて内部のガスを放出し、この際吸着剤は絶縁油から発生した塩素ガスを吸着してその効力を完全に発揮する。したがって有毒ガスの放出による危険が除かれ安全性を高めることができる。(坂本)

