

交流電圧による懸垂碍子の閃絡破壊

北村 岩雄, 沢田 慎一, 山崎登志成,
高橋 隆一, 池田 長康

1. まえがき

生活の向上と経済活動の拡大により、大消費地への送電容量はますます増加せざるを得ない状況になって来ている。このため、送電途中での損失を低減することが必要となり、より高電圧の送電が不可欠となって来ている。わが国における 500kV 送電は東京電力の房総変電所と新古河変電所間 85km を最初とし、45か所、4164km (1988年現在) で行われている。近い将来には 1000kV 送電も現実のものとなることが予想される。

この 500kV 用架空送電線の絶縁として、現在、280mm 径の懸垂碍子35個程度を連ねて使用し、その長さが7mから9mにもなっている¹⁾。ここで今後の懸垂碍子絶縁技術が現在のそのままの延長線上で良いのか、今一度根本から考え直す時期にさしかかっていると考えられる。懸垂碍子の形状も見直し、もう少しコンパクトに出来ないものであろうか。また、一般に、交流電圧による絶縁破壊は単極性インパルス電圧による破壊より低い電圧で起こっているのは、何故であろうか等問題もある。

今後の碍子の絶縁設計指針を得るため、一個の懸垂碍子の閃絡破壊電圧について調べてみた。まず、懸垂碍子の配置を種々に変え、1/30秒まで分解可能な一般民生用ビデオカメラを用いて観測した。更に、碍子沿面各部での閃絡破壊電圧を測定し、これら種々の閃絡破壊電圧を比較検討した。次に、この碍子について等価回路を作り、碍子表面に印加される電位差を考慮し、交流電圧による碍子全体の閃絡破壊について一つの考察を行った。

2. 交流高電圧発生装置と電圧測定法

交流高電圧発生には 500kV (実効値) 用の試験変圧器を使用している。この試験変圧器の仕様を表 1 に示す。供試懸垂碍子には図 1 に示すように、この試験変圧器 T の 2 次側ブッシングより、電流制

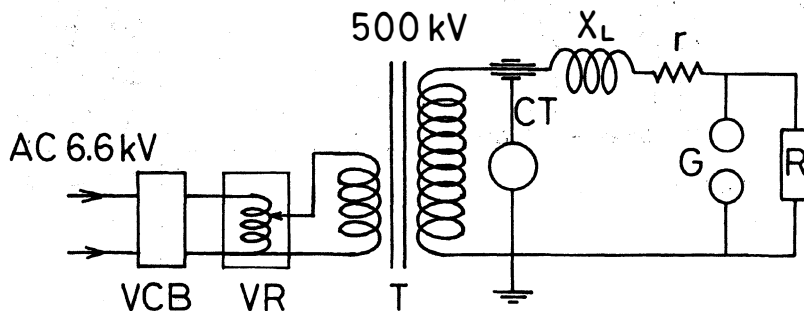


図 1 実験装置の概要

限用液体抵抗 r (実測値約 $360\text{k}\Omega$, 20°C) を介して交流高電圧が印加される。なお、この時 2 次側の一端が接地されている。また、この試験変圧器の 1 次側には真空遮断器 VCB や電圧調整器 VR などを経て $0 \sim 4800\text{V}$ が供給される。

高電圧の測定には 2 次側のブッシング部分に、静電容量型変成器 CT が接続されている。この静電容量に流れる電流は 2 次電圧に比例するので、この電流を測り、この値から直径 500mm の球ギャップで求めた電流-電圧校正曲線より電圧を求め、測定を行った。この実験に用いた値は $5.6\text{kV}/\text{mA}$ である。

3. 交流による懸垂碍子の閃絡破壊の観察とその電圧

3.1 一個の懸垂碍子全体の閃絡破壊

まず、一個の懸垂碍子全体の閃絡破壊を調べる。この閃絡破壊が碍子のどの部分のどのような状況から先駆的な破壊が起こるのかを調べるために、懸垂碍子の配置を、1) 正常懸垂 (下向き) 配置の場合、2) 逆さ懸垂 (上向き) 配置の場合、3) 正常懸垂配置で空気を下から吹き付けた場合、4) 逆さ懸垂配置で空気を下から吹き付けた場合の 4 通りについて行った。これを図 2 に示す。

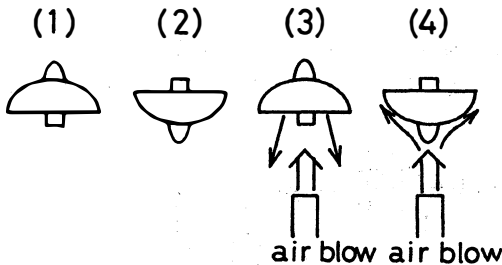


図 2 4 種類の閃絡破壊実験における懸垂碍子配置

表 1 500kV 試験変圧器の特性

| | | |
|--------|-------------|------------------------------|
| 容 量 | 4 時間定格 | 250 kVA |
| | 1 時間定格 | 500 kVA |
| | 30 分 定 格 | 600 kVA |
| | 15 分 定 格 | 700 kVA |
| 電 圧 | 1 次 電 圧 | 4800 V |
| | 2 次 電 圧 | 500 kV |
| 寸 法 | 全 高 | 7.75 m |
| | ケ ー ス 高 | 3.27 m |
| | ブッシング | 2.86 m |
| | チョーク コイル | 1.63 m |
| 全 重 量 | | 28.0 t |
| 絶縁油容積 | | 15,700 l |
| 製造メーカー | | ウエスチングハウス社 (1920年12月 製造) |
| 電圧調整器 | | 250 kVA |
| 電圧調整範囲 | | 0 ~ 4800 V |
| 自動遮断器 | | 2 台 |
| 電流制限抵抗 | | |
| 構 成 | | 磁器容器にグリセリン液 12.8 l |
| 抵 抗 値 | 冬 季 | $700\text{k}\Omega \times 4$ |
| | 夏 季 | $300\text{k}\Omega \times 4$ |

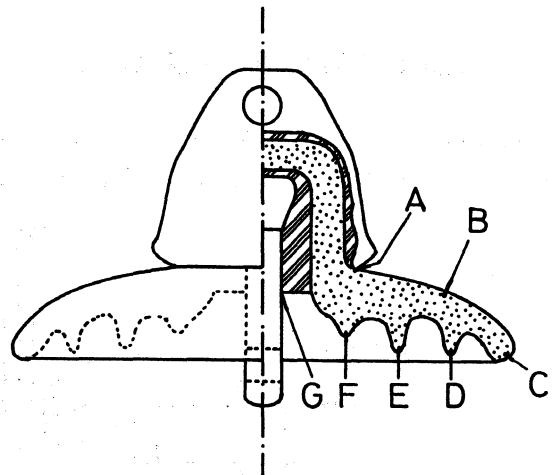


図 3 懸垂碍子の各部

1) 正常懸垂配置の場合

コロナが出て、グロー放電が始まる。次に、図3に示す懸垂碍子の上面A部分と下面中心Gより内側ひだ(E部分)までの間が赤紫に光る。更に、下面中央ひだ(D部分)の内側までの全面が赤紫に光ったところで碍子の縁(C部分)を越えて閃絡破壊が起こる。これを図4(a), (b), (c)の写真で連続的に示す。

この場合の閃絡破壊電圧は図5に○印で示すようにばらついているが、平均144.3kVである。

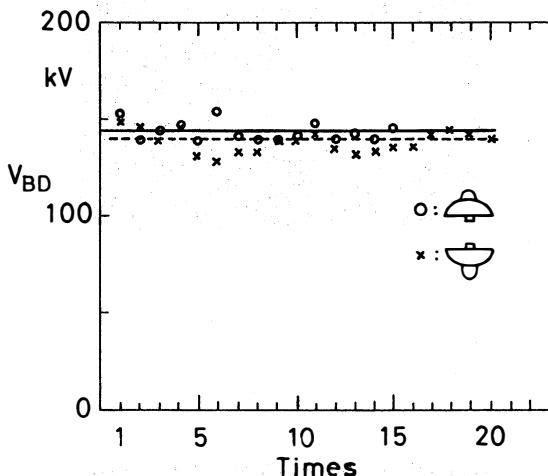


図5 正常および逆さ懸垂配置における閃絡破壊電圧

2) 逆さ懸垂配置の場合

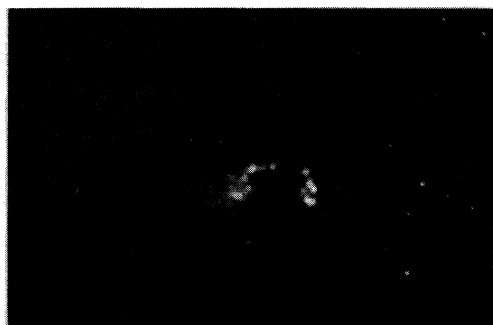
この場合もコロナが出て、グロー放電が始まり、図3に示す逆さ配置の懸垂碍子の下面A部分と上面中心Gより内側ひだ(E部分)までの間が赤紫に光る。更に、印加電圧を高くすると下面A部分のグロー放電が上に拡がり、碍子の縁(C部分)を越えて閃絡破壊が起こる。これを図6(a), (b), (c)の写真で連続的に示す。

この場合の閃絡破壊電圧は図5に×印で示すように、平均140.0kVであり、1)の実験と比較するとその値は97%となる。

3) 正常懸垂配置で空気を下から吹き付けた場合

これは正常に吊された懸垂碍子の下部中央に家庭用掃除器を用いて空気を吹き付けた場合である。まず、グロー放電が始まるが、図3に示す懸垂碍子の下面内側ひだ(F部分)では赤紫に光るプラズマが下方に吹きだし、下面外側ひだ(E部分)付近にはプラズマが少なくなる。その後、印加電圧を高くすると碍子の縁(C部分)を越えて閃絡破壊が起こる。これを図7(a), (b)の写真で連続的に示す。

この場合の閃絡破壊電圧は図8に○印で示すように平均151.5kVと高い耐電圧を示す。



(a)



(b)

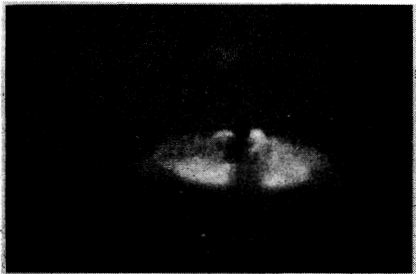


(c)

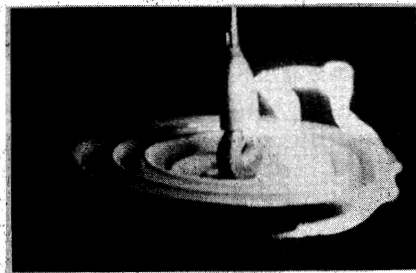
図4 正常懸垂配置における閃絡破壊過程の写真
時間は (a)<(b)<(c)



(a)



(b)



(c)

図6 逆さ懸垂配置における閃絡破壊過程の写真
時間は (a)<(b)<(c)

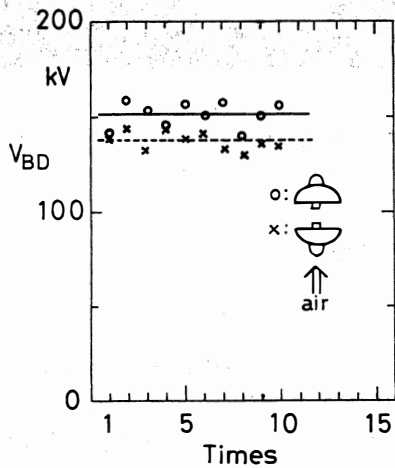
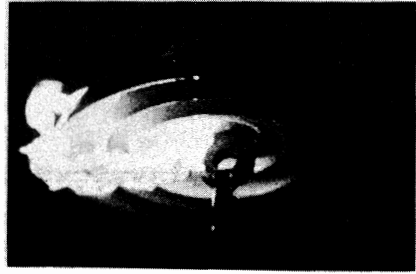


図8 正常および逆さ懸垂配置で下から空気を吹き付けた場合の閃絡破壊電圧



(a)

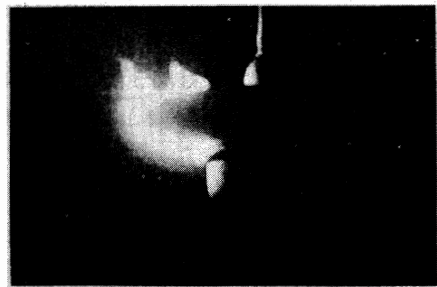


(b)

図7 正常懸垂配置で下から空気を吹き付けた場合の閃絡破壊過程の写真。時間は (a)<(b)



(a)



(b)

図9 逆さ懸垂配置で下から空気を吹き付けた場合の閃絡破壊過程の写真。時間は (a)<(b)

4) 逆さ懸垂配置で空気を下から吹き付けた場合

この場合もコロナが出て、グロー放電が始まる。図3に示す逆さ配置の懸垂碍子の下面A部分と上面中心より内側ひだ(E部分)までの間が赤紫に光る。この下面A部分のグロープラズマが吹き付けられた空気により、上に拡がり、碍子の縁(C部分)を越えて門絡破壊が起こる。これを図9(a), (b)の写真で連続的に示す。

この場合の門絡破壊電圧は図8に×印で示すように、平均138.6kVであり、3)の実験と比較するとその値は91.5%と低い値となる。

3.2 懸垂碍子各部の沿面門絡破壊

碍子各部の沿面門絡破壊を調べるために、碍子表面の一部を錫箔でおおい、残り部分の沿面門絡電圧を測定した。

錫箔でおおった部分は図2に示す碍子の断面に記入した記号を参照して、

- 1) 碍子下面3個のひだを含め全面(C-G)
- 2) 碍子上面全面(A-C)
- 3) 碍子下面中心より3個目のひだの内側までの部分(D-G)
- 4) 碍子上面中心よりの約1/2の部分(A-B)
- 5) 碍子下面中心より2個目のひだの内側までの部分(F-G)

の5通りの場合である。これらの場合それぞれについて、碍子の向きが正常懸垂配置の場合と逆さ懸垂配置の場合について沿面門絡破壊電圧を調べた。測定は各場合につき10回づつ行い、平均電圧(以下測定電圧と呼ぶ)を求めた。これらの結果をまとめると表2(a)および(b)ようになる。この表で<==>は錫箔でおおった部分を表し、()で示す値は3.1の1)および2)の場合の測定電圧値(表2(a), (b)では場合a-0およびb-0で示す)から各場合の測定電圧値を差し引いた錫箔の部分が担う電圧に相当する沿面破壊電圧(以下相当電圧と呼ぶ)を示す。

表2 碍子各部門絡破壊電圧

a) 正常懸垂配置の場合

| 碍子の部分 | A | B | C | D | E | F | G |
|-----------|-----------------------|---|-----------------------|------------------|---|--------------|---|
| 1) 場合 a-0 | ←----- 144.3kV -----> | | | | | | |
| 2) 場合 a-1 | ←----- 70kV -----> | | <==== (74.3kV) =====> | | | | |
| 3) 場合 a-2 | <== (62.8kV) ==> | | ←----- 81.5kV -----> | | | | |
| 4) 場合 a-3 | <----- 93.8kV -----> | | | <== (50.5kV) ==> | | | |
| 5) 場合 a-4 | <= (48.5kV) => | | ←----- 95.8kV -----> | | | | |
| 6) 場合 a-5 | ←----- 105.3kV -----> | | | | | <= (39kV) => | |

b) 逆さ懸垂配置の場合

| 碍子の部分 | A | B | C | D | E | F | G |
|-----------|-----------------------|---|-----------------------|------------------|---|--------------|---|
| 1) 場合 b-0 | ←----- 140.0kV -----> | | | | | | |
| 2) 場合 b-1 | <----- 70.6kV -----> | | <==== (69.4kV) =====> | | | | |
| 3) 場合 b-2 | <== (59.4kV) ==> | | ←----- 80.6kV -----> | | | | |
| 4) 場合 b-3 | <----- 93.0kV -----> | | | <== (47.0kV) ==> | | | |
| 5) 場合 b-4 | <= (41.7kV) => | | ←----- 98.3kV -----> | | | | |
| 6) 場合 b-5 | ←----- 107.0kV -----> | | | | | <= (33kV) => | |

ここで()は相当電圧を示す。

この表で同じ場合の a-1 と b-1, a-2 と b-2 の値をそれぞれ比較すると, 沿面閃絡破壊電圧は碍子の向きに依存しないことが分かる。すなわち, 沿面閃絡初期に生成されるグロープラズマの影響が少ないということ, 特に, 高温ガスとしての浮力の影響が少ないということが推測される。また, 碍子は沿面閃絡の耐電圧を上面と下面ではほぼ均等に, やや下面で大きく分担していることが分かる。

測定電圧と相当電圧を調べてみる。まず, 正常懸垂配置の a-1 と a-2 の場合, 碍子上面全面の値はそれぞれ 70kV と 62.8kV で比は 0.90 である。同様に碍子下面全面の値はそれぞれ 81.5kV と 74.3kV で, その比は 0.91 である。また, この差電圧は 7.2kV で, この値はグロープラズマの発生, 維持に関係する量であると考えられる。

次に, 碍子が逆さ懸垂配置の b-1 と b-2 の場合で同じように調べてみると, 碍子上面全面の値はそれぞれ 70.6kV と 59.4kV で比は 0.84 である。同様に碍子下面全面の値はそれぞれ 80.6kV と 69.4kV で, その比は 0.86 である。この場合は差電圧が 11.2kV で, この値もやはりグロープラズマに関係する量であると考えられる。

3.3 懸垂碍子の閃絡破壊と沿面閃絡破壊の比較

ここで表 2 をもとに碍子各部の閃絡破壊に対する電圧を求めてみると, 表 3 のようになる。同表において各値は 2 つの独立な実験の測定値から差し引いて求めたものである。また, *印は全体の閃絡破壊電圧から差し引いた値である。この表にもとずき懸垂碍子の閃絡破壊について, 沿面の部分閃絡破壊電圧と比較しながら検討する。

表 3 碍子各部分閃絡破壊電圧のまとめ

a) 正常懸垂配置の場合

| | | | | | | | |
|-------|----------|--------|--------|--------|--------|-------------|---------|
| 碍子の部分 | A | B | C | D | E | F | G |
| | (48.5kV) | 14.3kV | 23.8kV | 11.5kV | (39kV) | | |
| | | | | | | 合計 | 137.1kV |
| | | | | | | グロープラズマ維持電圧 | *7.2kV |
| | | | | | | 全体の閃絡破壊電圧 | 144.3kV |

b) 逆さ懸垂配置の場合

| | | | | | | | |
|-------|----------|--------|--------|--------|--------|-------------|---------|
| 碍子の部分 | A | B | C | D | E | F | G |
| | (41.7kV) | 17.7kV | 22.4kV | 14.0kV | (33kV) | | |
| | | | | | | 合計 | 128.8kV |
| | | | | | | グロープラズマ維持電圧 | *11.2kV |
| | | | | | | 全体の閃絡破壊電圧 | 140.0kV |

ここで () は相当電圧を示す。

正常懸垂配置および逆さ懸垂配置の両方の場合について, 部分閃絡破壊電圧の合計の値は全体の閃絡破壊電圧に比べてどうなるかを調べてみると, 表 3 に示すように, この値の合計はそれぞれ 137.1kV, 128.8kV となる。これに 3.2 で述べたグロープラズマの発生, 維持に関係する量であると考えた差電圧が加わり全体の閃絡破壊電圧となる。

1) 同じ懸垂配置での比較

a) 正常懸垂配置の場合

碍子上面全面の部分閃絡破壊電圧値は 62.8kV であり、ひだのある下面全面の値は 74.3kV である。下面は上面に対して1.18倍の耐電圧を持っている。

b) 逆さ懸垂配置の場合

ひだのある碍子上面の部分閃絡破壊電圧値は 69.4kV であり、下面全面の値は 59.4kV で、下面は上面に対して0.86倍の耐電圧にしかない。a) の場合に比べ、当然なことであるが、小さくなっている。これは上面では生成されたプラズマが浮き上がり、ひだの間を埋め、ひだの役目を無くしている。一方、下面では碍子表面に沿ってプラズマが流れ、これもまた、碍子表面の閃絡破壊に寄与しているためと考えられる。

2) 正常懸垂配置と逆さ懸垂配置間での比較

表3から見ると、碍子表面各区間の値は正常懸垂配置と逆さ懸垂配置とですべて異なっている。碍子A-B間では正常懸垂配置の方が逆さ懸垂配置に比べ耐電圧が高いのは表面のプラズマが剥離して、そのまま上昇するのと表面に沿って上がるのとの違いによるものと考えられる。これが 62.8kV と 59.4kV の違いになって現れたものと推測される。また、碍子ひだ部分のC-G間についても生成されたプラズマがひだの奥にくっついている場合とひだの底から浮き上がり、ひだを橋絡するようになった場合の違いと考えられ、これが 74.3kV と 69.4kV の違いになっている。

また、グロープラズマの維持に必要と考えられる電圧の違いは逆さ懸垂配置の方が生成されたプラズマが上昇し、これによりプラズマの体積が増加し、これを維持するのにより大きな電圧が必要となるためと考えられる。

4. 交流電圧による懸垂碍子の閃絡破壊の等価回路

種々な吊るし方による懸垂碍子の交流電圧の閃絡破壊を観察することにより、破壊以前のグロー放電による低電離プラズマが閃絡破壊に大きい役割を演じていることが分かる。ここでは図10に示すような碍子沿面の漏洩抵抗（以下これを単に漏洩抵抗と呼ぶ）と碍子の浮遊静電容量とで表す等価回路を用いて解析する。電圧が印加されると、懸垂碍子の両金具からグロー放電によって薄い低電離プラズマが碍子表面に生成され、停留したり、流れたりすることにより、この漏洩抵抗は大きく変化すると考えられる。

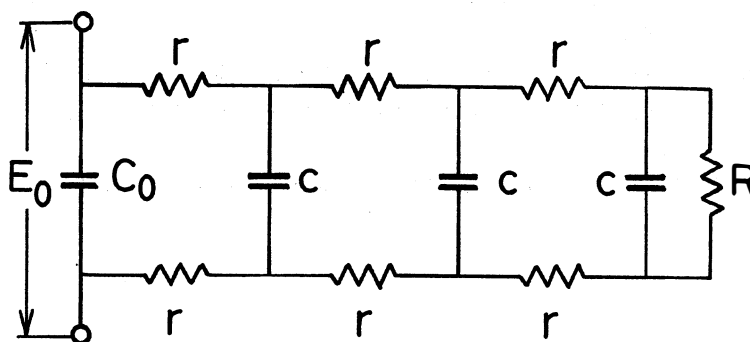


図10 懸垂碍子の等価回路

この場合、碍子下側のひだ数に合わせ、3段の等価回路を考える。この漏洩抵抗と浮遊静電容量は簡単にするため、各段で等しいとし、それぞれ r 、 c とする。ただし、碍子連結用金具間の静電容量

は C_0 , 沿面閃絡を起こす最後の漏洩抵抗は R とする。この場合, 印加される交流電圧 E_0 に対して漏洩抵抗 R に掛かる電圧 E_3 は,

$$E_3 = \frac{R}{2r[M + j\omega cN + j\omega c\{2r(M + j\omega cN) + N\}] + 2r(M + j\omega cN) + N} E_0 \quad (1)$$

となる。ここで, M , N はそれぞれ,

$$M = 1 + j\omega cR, \quad (2a)$$

$$N = 2rM + R \quad (2b)$$

となる。もし, $2r = R$ とすると上式は

$$E_3 = \frac{E_0}{\{4 - 5(\omega cR)^2\} + j\{10\omega cR - (\omega cR)^3\}} \quad (3)$$

となる。

碍子連結用金具からグロー放電による低電離プラズマが延びてくると, 等価回路の段数が少なくなるものと考えられる。この2段, 1段の場合についても, $2r = R$ とすれば, それぞれ

2段の場合;

$$E_2 = \frac{E_0}{(3 - \omega cR) + j4\omega cR} \quad (4)$$

1段の場合;

$$E_1 = \frac{E_0}{2 + j\omega cR} \quad (5)$$

となる。ここで, 交流周波数 f を 60Hz とし, 漏洩抵抗 $2r$ と浮遊静電容量 c の明確な値が分かり難いので, これをパラメータとして, 印加電圧 E_0 に対する漏洩抵抗 R に掛かる電圧の位相差 $\Delta\phi$ がどれだけになるか, 3段, 2段, 1段, の場合についてそれぞれ計算を行った。これらを図11の(a), (b)および(c)で示す。また, 図中の数字は横軸が漏洩抵抗 r の場合は浮遊静電容量の値 (pF) を, 横軸が浮遊静電容量 c の場合は漏洩抵抗の値 ($\text{M}\Omega$) をそれぞれ示す。

碍子表面の漏洩抵抗だけからなる等価回路では交流電圧 E_0 が 0V になる瞬間には, 碍子表面各部の漏洩抵抗のみによる分圧ではその各部の電圧も同時に 0V となるが, 碍子の浮遊静電容量 c をも考慮した等価回路では浮遊静電容量 c が 100pF 程度で漏洩抵抗 $2r$ が $100\text{M}\Omega$ 以上の値の場合, 印加された電圧 E_0 に対して, 各浮遊静電容量間の漏洩抵抗にかかる電圧は位相がほぼ 90 度づつ違っているため, 碍子表面のどれかの漏洩抵抗には常に電圧が印加されている。

また, 閃絡破壊の初期の段階では碍子の金具に近い漏洩抵抗 $2r$ に印加される電圧は, 浮遊静電容量 c を考慮に入れた方が, 漏洩抵抗のみの分圧による場合に比べ, 印加電圧の数分の一に近いより大きい電圧がかかるものと考えられる。

このように, 交流電圧による閃絡破壊には碍子の浮遊静電容量が大きな影響を与えているものと考えられる。

5. 結 論

この懸垂碍子の交流電圧による閃絡破壊の観察と破壊電圧の測定実験により, 次の事柄が分かった:

- 1) 懸垂碍子の種々な吊し方, 処置の仕方により, 閃絡破壊電圧値に 5% 程度の差異が生ずる。
- 2) インパルス電圧の場合に比べて, 交流電圧による場合の方がグロー放電で生成されたプラズマが, 閃絡破壊電圧を下げています。

- 3) 懸垂碍子の下側のひだの間にグロープラズマが十分に生成された後に、閃絡破壊が起こっている。
- 4) グロープラズマの生成、維持には碍子の配置にもよるが、10kV相当の電圧が費やされている。
- 5) 碍子の静電容量による影響のため、碍子表面の漏洩抵抗には常に電圧が印加されている。また、グロープラズマの先端の閃絡破壊場所の漏洩抵抗両端には大きな電位差が生じ、閃絡破壊を助長している。

これらにより、正常配置における懸垂碍子の交流電圧による閃絡破壊の機構を考えると次のようになる。

交流電圧による懸垂碍子の沿面閃絡破壊はインパルス電圧の破壊に比べ、まず、コロナ放電からグロー放電に移り、碍子の閃絡破壊へと進行する。すなわち、碍子の上面では連結用金具の周囲からグロー放電により、低電離プラズマが碍子表面に拡がる。しかしながら、低電離プラズマと言えども高温であるため、浮力により碍子表面だけに留まらず、上方に拡がる。このため、碍子上側表面の漏洩抵抗は比較的高く維持される。一方、碍子下面でも連結用金具の周囲からのグロー放電で生成された低電離プラズマが内側のひだより順次満たして行く。電界が印加されておれば、この低電離プラズマが維持され、次第に、外側のひだへと拡がって行く。碍子の上面と異なり、このプラズマは浮力により上にある碍子にくっついており、碍子の表面は導電性プラズマで覆われる。

このような状態になった時、碍子の浮遊静電容量両端の電圧は、印加電圧に対して位相がほぼ90度遅れる。このため閃絡場所の先端では沿面漏洩抵抗両端にほぼ印加電圧のすべてがかかることになり、この電圧が閃絡破壊を助長する。このような理由でインパルス電圧よりは低い電圧で閃絡破壊をするものと考えられる。

このような機構で交流電圧による懸垂碍子の沿面閃絡破壊が起こるならば、より高耐圧に懸垂碍子をするには

- 1) グロープラズマが出来るだけ生成されないようにする。
- 2) 生成されたグロープラズマは出来るだけ停留しないよう、あるいは、消去するようにする。
- 3) 浮遊静電容量の値を碍子の場所により違い、碍子表面上の電位傾度を出来るだけ一様になるように制御する。

ことが必要である。我々はこれらの解析をもとに懸垂碍子の改良を進めており、次報で結果を報告する。

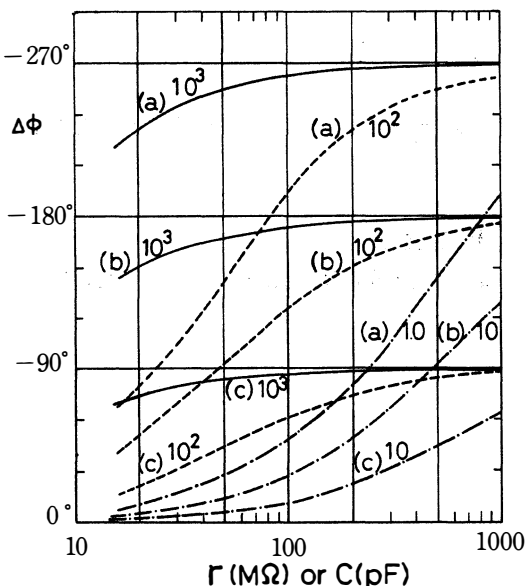


図11 漏洩抵抗にかかる電圧、位相差の回路定数依存性
 図中(a), (b), (c)はそれぞれ梯子型回路の3段, 2段, 1段の場合を示す。
 また、図中の数字は横軸が漏洩抵抗の場合は浮遊静電容量 (pF) を、横軸が浮遊静電容量の場合は漏洩抵抗 (MΩ) をそれぞれ示す。

謝 辞

この研究を行うに当たり、本学科の前教授中谷秀夫博士に対し、種々御援助を頂き心より感謝致します。

参 照 文 献

- 1) 電気学会通信教育会, “がいし”, 電気学会, 1983.

AC Voltage Flashover Characteristics of A Suspension Porcelain Insulator

Iwao Kitamura, Shin-ichi Sawada, Toshinari Yamazaki,
Takakazu Takahashi and Nagayasu Ikeda

Flashover characteristics of a suspension porcelain insulator by AC voltage are examined and the mechanisms of the flashover are also analysed. Evaluation of life level and enlargement of economical activities demand more and more electricity, especially, at large cities. High transmission capacity is therefore needed and it results in the power transmission line with ultra high voltage of 500kV at present. More high voltage system about 1000kV will also follow in it in the near future. It is indispensable to develop more compact suspension insulators. The characteristics of flashover voltage of a suspension porcelain insulator are examined by measuring the flashover voltages of the various parts of the insulator under various conditions. It is found from the observations and measurements that flashover occurs after filling the volume between the folds of the under part of the insulator with glow plasma.

It is also found from analysis of the equivalent circuit of the insulator that the potential difference caused by the stray capacitances of the insulator promotes the development of the flashover.

交流電圧による懸垂碍子の閃絡破壊

北村岩雄，沢田慎一，山崎登志成，高橋隆一，池田長康

交流電圧による懸垂碍子の閃絡破壊について調べ、閃絡破壊の機構についても解析する。生活の向上と経済活動の拡大により、電力需要は益々増えている。特に、大都会では。このため、大容量の送電が必要となっており、これは現在の500kV超高電圧送電となって来ており、近い将来にはより高い1000kVの送電システムも現実のものとなることが予想される。それ故、もう少しコンパクトな懸垂碍子の開発が不可欠である。種々の条件で、懸垂碍子各部における閃絡破壊電圧を測定し、閃絡破壊の特性について調べた。その結果、懸垂碍子の下側のひだの間にグロープラズマが十分に生成された後に、閃絡破壊が起こること、また、この碍子の等価回路の解析から、碍子の浮遊静電容量に基づく電位差が閃絡破壊を助長していることが分かった。