

急峻波インパルス電圧に対する絶縁電線の沿面放電特性

小野 哲治*・藤島 友之**
山下 敬彦**・松尾 寿夫**Creeping Discharge Characteristics of Insulated Wire
under the Steep Front Impulse Voltage

by

Tetsuji ONO*, Tomoyuki FUJISHIMA**,
Takahiko YAMASHITA** and Hisao MATSUO**

The steep front surge voltage may occur in overhead distribution lines as a result of a direct lightning stroke or an indirect lightning stroke. Therefore, the steep front surge voltage has been taken into consideration, and the necessity of examining the discharge characteristics under the steep front impulse voltage came for protection of apparatus used overhead distribution lines. Moreover, in overhead distribution lines, outages due to contact with bird nests have become one of the serious problems in the recent years. Dielectric strength of the distribution line which bird nests exist is considered to be quite low compared with the distribution line which bird nests does not exist. Therefore, this research examined the creeping discharge characteristics on the surface of insulated wire when the steep front surge voltage occurs in distribution lines using the test line which imitated distribution lines which bird nests exist.

1. はじめに

一般に雷に対する研究, 対策は標準雷インパルス電圧 (1.2/50 μ s) をもとになされており, これらの結果より電力系統絶縁の耐雷設計がなされてきた¹⁾. しかし, 雷といっても自然界に発生する雷電圧の波形は多種多様で, 中には波頭長が 100ns 以下の物も観測されており, 特に, 直撃雷や線路近傍落雷時などに配電線に急峻波サージ電圧が発生することがある²⁾. そのため急峻波サージ電圧が考慮されるようになり, 機器保護の面から急峻波インパルス電圧に対する放電特性を検討する必要が生じてきた。

また, 近年配電線において停電事故の大部分を占めていた雷事故が避雷器などの耐雷設備の充実により減

少し, 停電事故中に占める鳥害事故の割合が増加している³⁾⁴⁾. 鳥害事故の主な理由として, 鳥が樹木の減少により巣作りの場所を電柱の上に選んでいる。そして, 巣の材料として針金などの導電線の材料も使用されているため, 停電事故の多発につながっている。

ところで, 鳥巣による事故は巣材の充電部への直接的な接触によって発生する場合もあるが, それ以外のプロセスで発生したと考えられる事故もある。

そこで, 本研究では絶縁電線にはピンホールなどの電氣的弱点部が存在することに着目し, 配電線に急峻波サージ電圧が発生したときに鳥巣などの接触物とピンホールなどの被覆の電氣的弱点部における心線との間の沿面でフラッシュオーバーが発生することによって,

平成15年10月24日受理

*生産科学研究科博士前期課程 (Graduate student, Graduate School of Science and Technology)

**電気電子工学科 (Department of Electrical and Electronic Engineering)

事故へと進展するプロセスについて検討した。

2. 鳥巣が存在する配電線の状況

鳥巣が存在する配電線の絶縁状態は、鳥巣が存在しない場合と比べると、かなり異なっていると考えられる。報告によると⁴⁾、カササギの巣はがいしの上またはアームの上に多く存在し、巣の直径は1m程度である。中には巣から巣材が長く突きだしているものもあり、巣材には針金なども含まれているようである。また、巣材が木の枝であっても、降雨時などには抵抗値が著しく低下すると考えられる。これらのことから、カササギの巣の存在によって配電線各相の対地間の絶縁距離はかなり短くなっていると考えられる。

ところで、絶縁電線はポリエチレンまたは架橋ポリエチレンの被覆が施されており、絶縁耐力は極めて高い。しかし、被覆には雷撃などによって生じたピンホールなどが存在し、その部分の絶縁耐力は極めて低い。ピンホールはバインド線の近傍に存在することが多いが、中にはバインド線から遠くはなれた所に存在する場合もあり、その位置は個々の電線によって異なる。また、絶縁電線には接続金具を取り付けるために、被覆を剥いだ部分や電線の継ぎ目などが存在する。これらの部分は絶縁テープや保護カバーなどで補強されているが、絶縁強度は低下している。このように、被覆には各所に電氣的弱点部が存在し、このために、耐雷設計上絶縁電線は雷サージに対して裸電線と同等であると考えられる⁵⁾。また、バインド線も硬アルミ線にポリエチレンの被覆を施してあるが、その被覆部分は損傷を受けやすく、導体と同等と見て差し支えない。

以上のことから、カササギの巣が存在する配電線の

各相の対地間および相間の絶縁強度は、カササギの巣が存在しない配電線と比べると、かなり低いと考えられる。特に、導電性の巣材がアームとバインド線の両方に接触してバインド線が接地されると、電線支持部全体に亘って絶縁性能が著しく低下する。そこで、本研究では導電性の巣材によってバインド線が接地された場合を想定して検討を行う。

3. 急峻波インパルス電圧発生装置

本研究では、配電線に発生する急峻波サージ電圧を模擬した急峻波インパルス電圧を図1のような装置で発生させた。急峻波インパルス電圧を発生させる方法として、インパルス電圧発生装置に並列に挿入したコンデンサ C_1 を多段式インパルス電圧発生器 IG で充電して、この電荷がギャップ G を放電して抵抗 R_2 の端子に急峻波インパルス電圧を発生させる方法を使用した⁶⁾。

図1のように点線で囲ったインパルス電圧発生装置の近くの分圧抵抗、高周波同軸ケーブル (3C-2V)、デジタルストレージスコープ (岩通 DS-8617) (以降 DS と示す) をシールドすることによって誘導からのノイズを除去した。DS は約9mの高周波同軸ケーブルを使用することによってインパルス電圧発生装置側の高圧側から離すことで誘導によるノイズの影響を受けにくくするとともに、DS の電源には静電シールド付絶縁変圧器 IT を使用し一般電源からのノイズの侵入を防止した。

急峻波インパルス電圧数十〜数百万 V を DS に直接印加できないため図1のように分圧回路を用いて取り込んだ。DS では R_9 と R_{10} の端子に生じる電圧の差を

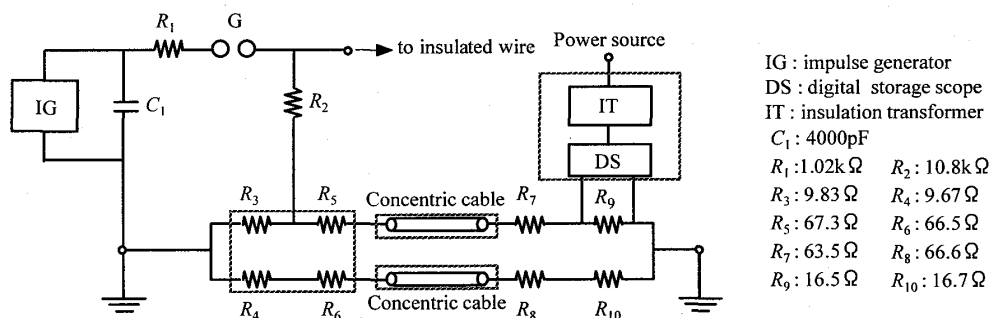
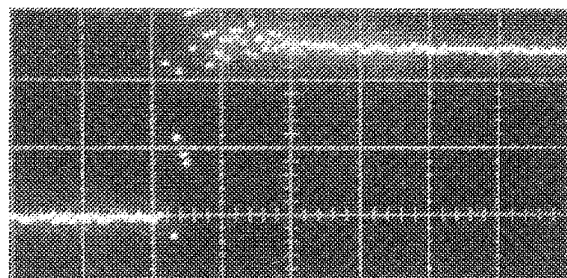


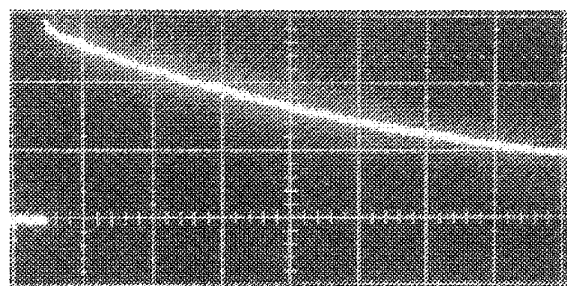
Fig. 1. Steep front impulse voltage generator.

観測することにより、信号波形からノイズを除去して印加電圧波形を観測した。

DS で実際に観測される波形を図 2 に示す。図 2 から、波頭長が $0.1\mu\text{s}$ 、波尾長が $48\mu\text{s}$ と求められた。



ordinate : 19.7 kV/div.
 abscissa : 200 ns/div.
 (a) wave front



ordinate : 19.7 kV/div.
 abscissa : $10\mu\text{ s/div.}$
 (b) wave tail

Fig. 2. Applied voltage waveform.

4. 実験装置と実験方法

鳥巣が存在する配電線を模擬した試験線を用いて、沿面フラッシュオーバー特性を測定し、避雷器の放電特性との比較を行った。なお、本研究では 6.6 kV 配電線で絶縁電線がバインド線でピンがいしに支持されている場合を対象としている。

試験線の電線支持部を図 3 に示す。試験線では 6.6 kV 配電線で実際に使用されている絶縁電線、ピンがいし、バインド線およびアームを用いてピンがいしに絶縁電線を支持した。絶縁電線は 6.6 kV 配電線で広く使用されている導体断面積 200 mm^2 の Al-OC 電線（屋外用架橋ポリエチレン被覆アルミニウム線）で、未使用の新品電線を長さ 5 m 程度に切断して用いた。

試験線は SP がいしの上に固定し、注水試験も行うことができるように周りにビニールシートを張り、試験線の上部には広い範囲で均一の注水ができるように

6 個の注水用ノズルを設けた。注水を行う場合は、ポンプを用いてノズルから水を霧状に噴出させた。注水条件は JEC の注水試験法に準じ、注水量 3 mm/min 以上、注水の抵抗率 $10\text{ k}\Omega \cdot \text{cm} \pm 20\%$ 、水温は大気温度に対して $\pm 15^\circ\text{C}$ とした。

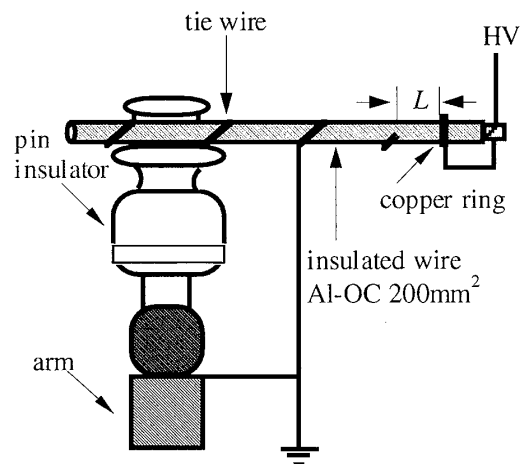


Fig. 3. Conductor supporting region.

本研究では、導電性の巣材が接触した配電線で急峻波サージが発生した状況を模擬するために、図 3 に示したようにバインド線を接地して絶縁電線の心線に急峻波インパルス電圧 ($0.1/48\mu\text{s}$) を印加できるようにした。また、実際の配電線の被覆に存在するピンホールなどの損傷を模擬して電線に銅リングを巻き、心線とつないだ。このようにして、絶縁電線の心線に急峻波インパルス電圧 ($0.1/48\mu\text{s}$) を印加してバインド線の先端と銅リングの間の電線表面の $V-t$ 特性を測定した。なお、実際の配電線ではいろいろな位置に損傷が存在するので、実験では電線支持部の周りで銅リングの位置を変化させて $V-t$ 特性の測定を行った。また、 $V-t$ 特性に対する注水の影響についても調べた。

ところで、絶縁電線を架設する際には電線表面を清浄にした。まず、水洗いを行い、水分を拭き取って乾燥させ、その後エチルアルコールを含ませた布で電線表面を拭き清浄にした後架設した。実験中は電線に電圧を印加する毎に電線表面に残る電荷の影響を除去するために、毎電圧印加後に電線表面に接地線を這わせて、電線表面から電荷を除去した。

$V-t$ 特性の測定は、最初にフラッシュオーバーしない低い電圧を印加し同じ電圧を 10 回印加した後、その後 1 kV 刻みで電圧を上昇させ同様のことを繰り返すフ

ラッシュオーバー率の確認をした。その後 100%フラッシュオーバーした電圧値からは 5kV 刻みで上昇して印加した。なお、フラッシュオーバーしたかどうかは肉眼と DS で観測される印加電圧波形の崩壊から確認した。

5. 実験結果と検討

5.1 電線表面の $V-t$ 特性

正極性とあるいは負極性の急峻波インパルス電圧を絶縁電線の心線に印加し、銅リングの位置を変えてバインド線の先端と銅リング間の距離 L を 20cm, 40cm, 60cm あるいは 80cm とした場合の電線表面の $V-t$ 特性を測定した。

まず、フラッシュオーバーしない程度の電圧を印加することによって、バインド線の先端からコロナが開始することが確認された。これから、放電がバインド線の先端から絶縁電線表面を進展し、銅リングに到達してフラッシュオーバーすることがわかった。このため、印加電圧の極性と放電の極性は逆になる。正極性インパルス電圧を印加した場合には負放電が、負極性インパルス電圧を印加した場合は正放電がバインド線から進展してフラッシュオーバーすることになる。図 4 に $V-t$ 曲線の測定結果を示す。

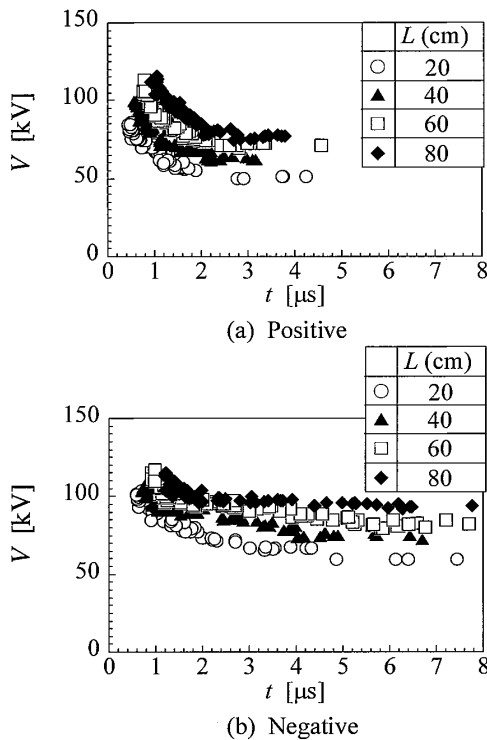


Fig. 4. $V-t$ characteristics under dry condition.

フラッシュオーバー電圧は正極性インパルス電圧を印加した場合の方が負極性インパルス電圧を印加した場合よりも低いことがわかる。これは、一般に言われている極性効果とは異なる。

この理由として、フラッシュオーバーはバインド線の先端から絶縁電線を沿面放電して銅リングに達して生じているため、絶縁電線の被覆に使用されている架橋ポリエチレンの材料独特の表面抵抗などの独特の影響を受けているのではないかと考えられる。

また、図 4 から正極性、負極性の各場合ともバインド線の先端と銅リングの間の距離が短くなるほどフラッシュオーバー電圧は低くなり、電圧印加からフラッシュオーバーまでの時間も短くなることがわかる。

したがって、ピンホールなどの劣化傷がバインド線に近い程、フラッシュオーバーしやすいことがわかる。

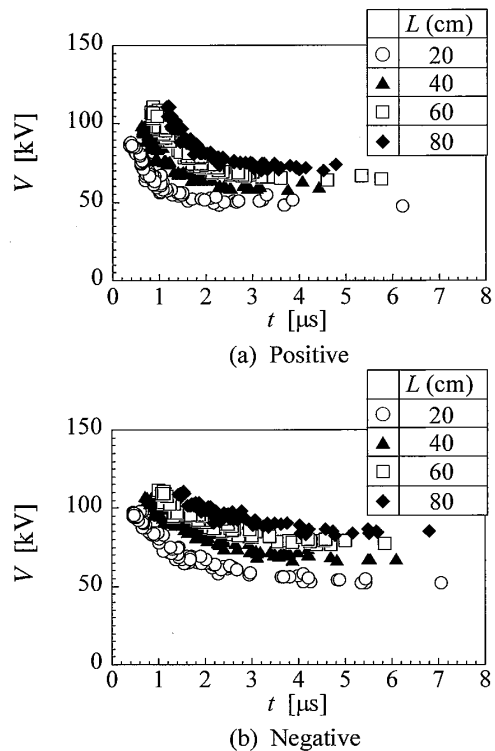


Fig. 5. $V-t$ characteristics under wet condition.

図 5 は、注水状態において図 4 の場合と同様に、急峻波インパルス電圧を印加した場合の $V-t$ 特性の測定結果である。注水状態では、いずれの極性のインパルス電圧を印加した場合でも乾燥状態よりもフラッシュオーバー電圧が下がることがわかる。とくに、負極性インパルス電圧を印加した場合に乾燥状態と比較して最小

フラッシュオーバー電圧の値が低くなった。

これらのことから、バインド線の先端と銅リングの距離が 20cm で注水状態のときに電線表面のフラッシュオーバー電圧が最も低くなることがわかった。

5. 2 電線表面と避雷器の $V-t$ 特性

配電線に急峻波サージ電圧が発生したとき、鳥巢などの接触物とピンホールなどの被覆の電氣的弱点部との間の沿面でフラッシュオーバーが発生する。これが、停電事故へと進展するプロセスの可能性について検討するために、電線表面の $V-t$ 特性と避雷器の $V-t$ 特性を比較する必要がある。そこで、最も絶縁耐力が低いバインド線の先端と銅リングの距離が 20cm で注水状態のときの電線表面の $V-t$ 特性と避雷器の $V-t$ 特性の比較を行った。その結果を図 6 に示す。

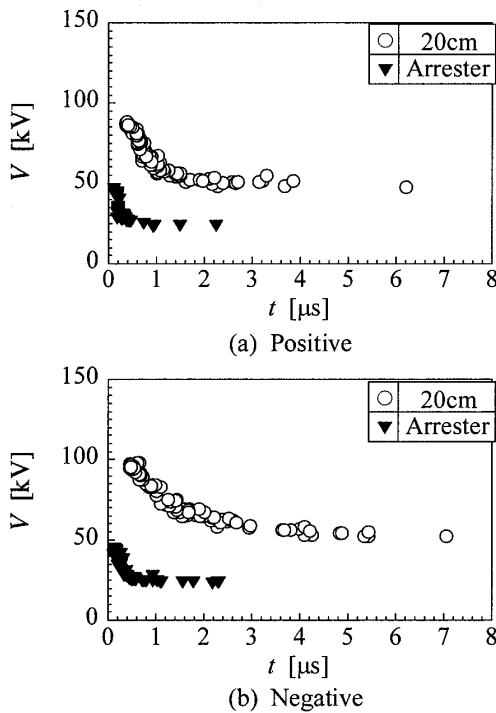


Fig. 6. $V-t$ characteristics of wire surface and arrester.

正極性の場合も負極性の場合も電線表面の $V-t$ 特性は避雷器の $V-t$ 特性よりも上にあることから、避雷器が動作することがわかる。つまり、ピンホールがバインド線から 20cm 以上離れた位置に存在する場合、急峻波サージが発生したとしても避雷器の保護作用が働くことがわかる。ただし、避雷器と電氣的弱点部間の

距離が短い場合である。

5. 3 避雷器の保護範囲

配電線に雷サージが侵入した場合、避雷器が動作し、その効果が現れるまでの時間は避雷器と配電線の電氣的弱点部との距離によって異なる。そこで、避雷器の効果が現れるのに最も時間を要する場合、すなわち雷サージが避雷器とは逆側の電氣的弱点部の方から侵入してくる場合を考える。配電線における進行波の伝搬速度を V 、避雷器と電氣的弱点部との距離を L とすると電氣的弱点部を雷サージが通過してから避雷器に到達するまで時間 L/V を要し、次に避雷器の効果が電氣的弱点部に達するまでに時間 L/V を要する。このことから、雷サージが電氣的弱点部の方から侵入する際には、避雷器の効果が電氣的弱点部に現れるには避雷器の放電の遅れを無視しても最低 $2L/V$ かかる。そのため、電氣的弱点部には最低 $2L/V$ の間電圧が加わることとなり、その間に弱点部と接地の間がフラッシュオーバーする可能性がある。そこで、避雷器の保護範囲について検討する必要がある。

筆者らのこれまでの研究により、配電線における進行波の伝搬速度 V は $V = 2.91 \times 10^8$ m/s と測定された。

電氣的弱点部でフラッシュオーバーを生じるような雷サージが侵入したとき、雷サージ波形の立ち上がり時間が $1\mu\text{s}$ の場合、電氣的弱点部に雷サージ電圧のピーク値が加わるまでの間、その進行波は 291m 伝搬することになる。つまり、電氣的弱点部から 145m 以内に避雷器が存在しないと停電事故へと進展する。また、立ち上がり時間が $10\mu\text{s}$ 、 $5\mu\text{s}$ 、 $0.5\mu\text{s}$ 、 $0.1\mu\text{s}$ および $0.05\mu\text{s}$ の場合の避雷器の保護範囲について検討した。その結果を表 1 に示す。

表 1 から、雷サージ波形の立ち上がり時間が短い程、避雷器の保護範囲が短くなることがわかる。また、避雷器の設置間隔は 100~300m が多く採用されている。そのため、避雷器と電氣的弱点部との距離が 50~150m の場合について考えると、立ち上がり時間が $1\mu\text{s}$ 程度の雷サージであれば保護できるが、立ち上がり時間が $0.1\mu\text{s}$ 以下の雷サージが発生すると電氣的弱点部でフラッシュオーバーを生じる恐れがある。このことから、避雷器と電氣的弱点部間の距離が長い場合、配電線に急

峻波サージが発生すると停電事故へと進展する場合があることがわかる。

電線に急峻波サージが発生すると停電事故へと進展することがある。

Table. 1. Protection span of arrester.

rise time of surge voltage (μ s)	protection span of arrester (m)
10	1450
5	725
1	145
0.5	72.5
0.1	14.5
0.05	7.25

6. まとめ

鳥巣が存在する配電線において、急峻波サージによる沿面放電特性の検討を行った。配電線に鳥巣が接触した状況を模擬してバインド線を接地し、損傷を与えた絶縁電線に急峻波インパルス電圧を印加して電線表面の $V-t$ 特性および避雷器の $V-t$ 特性を測定した。電線表面の $V-t$ 特性については、注水の影響についても検討した。得られた結果を以下に要約する。

- (1) 銅リングとバインド線の先端との間の距離が短い程、急峻波インパルス電圧に対する絶縁電線のフラッシュオーバー電圧は低く、破壊時間は短くなる。
- (2) 急峻波インパルス電圧を絶縁電線に印加した場合、電線表面の沿面放電のフラッシュオーバー電圧が負放電の方が正放電よりも低く、一般に言われている極性効果とは異なる。
- (3) 注水状態では、いずれの極性のインパルス電圧を印加した場合でも乾燥状態よりもフラッシュオーバー電圧が下がる。とくに、負極性インパルス電圧を印加した場合に乾燥状態と比較して最小フラッシュオーバー電圧の値が低くなった。
- (4) 避雷器と電氣的弱点部間の距離が短い場合、ピンホールがバインド線から 20cm 以上離れた位置に存在するとき、配電線に急峻波サージが発生したとしても避雷器の保護作用が働く。
- (5) 避雷器と電氣的弱点部間の距離が長い場合、配

参考文献

- 1) 電気学会：電気学会技術報告，I部，第97号 (1971)
- 2) S. Grzybowski, P. B. Jacob : IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 3, July , pp.1608-1616 (1990)
- 3) 村上明：送電線における鳥害対策への取り組み, ENERGY, p.48 (1990)
- 4) 増田義輝：続配電物語, pp.135-143 (1991)
- 5) 耐雷設計基準委員会 配電線分科会：配電線耐雷設計ガイドブック, p.50 (1976)
- 6) 中野義映：高電圧工学, オーム社 pp.143-144 (1991)