

簡易絶縁劣化試験器

武藤三郎・*若山英太・津田一男・**広瀬久城

PORTABLE INSULATION TESTER

SABURO MUTO, *HIDETA WAKAYAMA, KAZUO TSUDA, **HISAKI HIROSE

The portable insulation tester is a device for measuring the degree of deterioration of insulation. The primary circuit of an iron-cored transformer provided intermittently with direct current induce continuous pulsive distorted waves in the secondary circuit. When these waves are applied to an insulator, the degree of deterioration can be measured by reading in a meter as the direct current component of electricity which passes through the insulator. When they are applied to pure resistance, inductance, or capacitance, the meter indicate nothing. At or just before the time when insulation is destroyed, the fact is indicated in the meter. This device will also serve as a grounded fault locator of the distribution circuit by combining it with a receiving set.

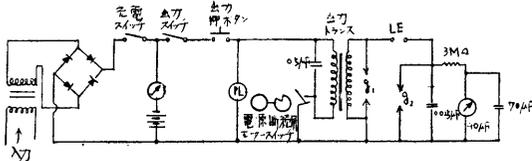
1. まえがき

鉄心入変圧器の1次側を直流電源で励磁しこの回路に挿入した接点開閉器を一定周期で断続したとき2次回路に誘起する間歇的な歪波パルス電圧を絶縁物の両端に電極を介して加えその直流分電流値の指示より絶縁劣化の程度を検出することが出来る。筆者等はこの原理にもとづき簡易絶縁劣化検出装置を試作し中部電力配電課との協同研究として配電用各種碍子、柱上変圧器、ブッシング、PT、CT、ケーブル等に対し本装置による試験を実施して或る程度の成果を得た。(1)(2)(3)(4)又近時配電線保守の近代化につれその接地故障点の簡単な探査装置の必要がきざれているが本装置を操返しパルス電源として故障配電系統に接続し別に可搬低周波受信機にて配電線の故障点を機動的に探査し得ることが判明した。以下これらの点につき大要を述べることにした。

2. 簡易絶縁劣化試験器の原理

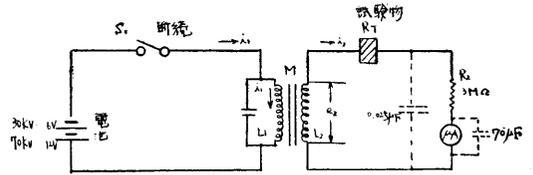
2-1 電圧、電流波形

本装置の原理図は第1図に示す回路であるがこの回路



第1図 簡易絶縁劣化試験器の原理図

の1次側を断続することにより2次回路に誘起する電



第2図 回路略図

圧、電流波形を知るために第2図のような回路に置き換えて考察を進めてみる。第2図の回路の開閉器S1を先づ閉じた場合を過渡現象的に計算すれば1次回路の電流*i*₁、及び2次回路の電圧*e*₂は次式のようなになる。

$$i_1 = \left[\frac{E}{r_1} \right] \times \left\{ 1 - \frac{1}{1 + r_1 M^2 / L_2^2} e^{-\{1/(L_1/r_1 + L_2/r_2)\}t} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

$$e_2 = - \left[\frac{EL_2}{M} \right] \times \left\{ \frac{1}{1 + r_1 / \frac{M^2}{L_2^2} r_2} e^{-\{1/(L_1/r_1 + L_2/r_2)\}t} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

次に2次回路のパルス1ケにより流れる電荷*Q*₂は

$$\begin{aligned} Q_2 &= \int_0^\infty e_2 / r_2 dt \\ &= - \left[\frac{EL_2}{r_2 M} \right] \times \left[\frac{L_1 r_2 / I_2 r_1 + L_1 r_2}{L_1 / r_1 + L_2 / r_2} \right] \times e^{-\frac{1}{L_1 / r_1 + L_2 / r_2} t} \Big|_0^\infty = -I_0 M / r_2 \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

* 東洋電機漁具製作所

** 中部電力株式会社

note: * Toyo Denki Seisakujo

** Chubu Denryoku Co.

次に1次側開閉器 S_1 を開いた場合につき上と同様に計算を進めてみれば1次電流 i_1' 及び2次電圧 e_2' は次式のようなになる。

$$i_1' = \frac{L_1/r_1'}{L_1/r_1' + L_2/r_2} \times I_0 \times e^{-\frac{1}{L_1/r_1' + L_2/r_2} t} \dots\dots (4)$$

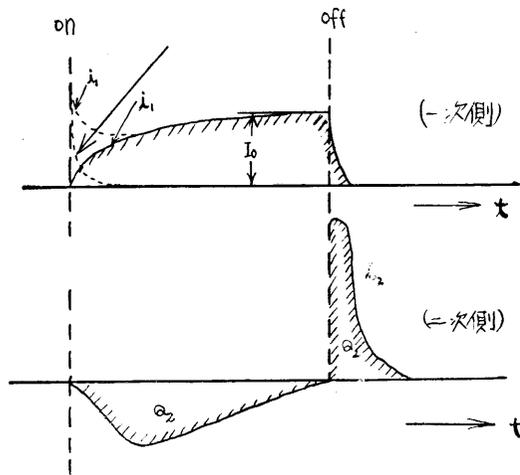
$$e_2' = \frac{1}{L_1/r_1' + L_2/r_2} \times M \times e^{-\frac{1}{L_1/r_1' + L_2/r_2} t} \dots\dots (5)$$

2次回路のパルス1ケによる電荷 Q_2' を前と同様に求めてみれば

$$Q_2' = \frac{I_0 M (L_1/r_1' + L_2/r_2)}{r_2 (L_1/r_1' + L_2/r_2)} \times \left[e^{-\frac{1}{L_1/r_1' + L_2/r_2} t} \right]_0^\infty = -I_0 M / r_2 \dots\dots (6)$$

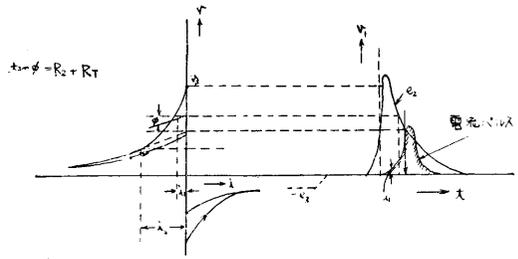
従って(3)式と(6)式とは一致して(7)式の関係となる。

$$Q_2 = Q_2' \dots\dots (7)$$



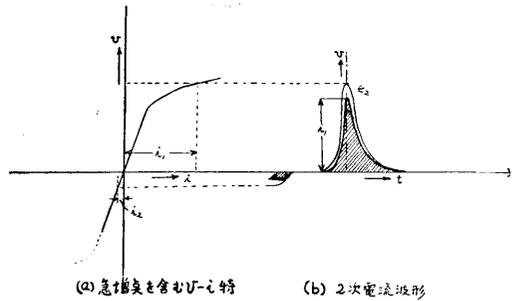
第3図 電圧電流波形

これらの関係より2次回路の波形は第3図のようなになる。この波形は(7)式の関係より正負の面積が等しいことより2次側に線形回路素子、たとえば純抵抗、インダクタンス、キャパシタンス等を接続した場合は電流の平均値は0となる。しかし上記の電圧パルス波を絶縁物等に加えて絶縁破壊した場合又は絶縁破壊に近い場合はその電圧-電流特性は直線から外れ所謂非線形回路素子となるからこのときの平均電流値は0とならずこの回路に挿入している直流マイクロアンメータには指示が現われてくる。今1例として第4図(a)に示すようなアークの閃絡 $v-i$ 特性を例にとり上記の歪波パルスを加えた場合に流れる電流パルス波形を図式的に求めてみれば第4図(b)の斜線で示す正方向のパルス電流のみが流れ負側はパルスの波高値が閃絡電圧に達しないため全く電流が流れない。かかる非線形回路素子の場合は指示は大きく現われてくるから計器を監視すれば絶縁劣化の有無がはっきり判ることになる。ここに v_s は閃絡開始電圧、 v_0 は閃絡停止電圧を示す。又絶縁物に印加した電圧が次第



第4図

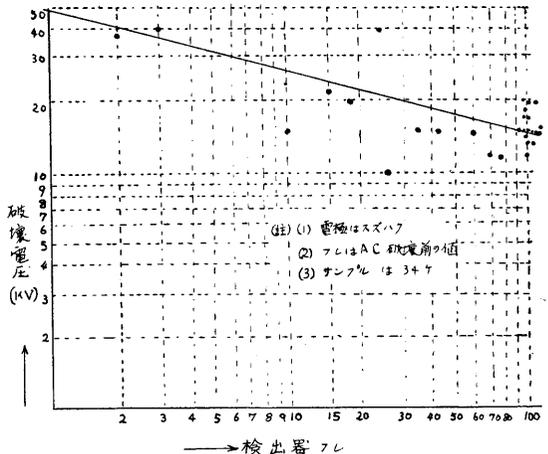
に破壊電圧値に近くなると所謂電流の急増点が認められこれ以上になると $v-i$ 特性には非直線性が現われてくる。



第5図

第5図(a)にこのような $v-i$ 特性の例を示したがかかる場合に本装置による歪波パルスを印加すると第5図(b)に示すようにやはり電流値の平均は0でなく直流分が認められることとなる。このことは絶縁物の劣化試験を非破壊的に行い得ることを示すものである。このような見地より非破壊試験装置として絶縁劣化の研究に応用の途を現在研究中である。

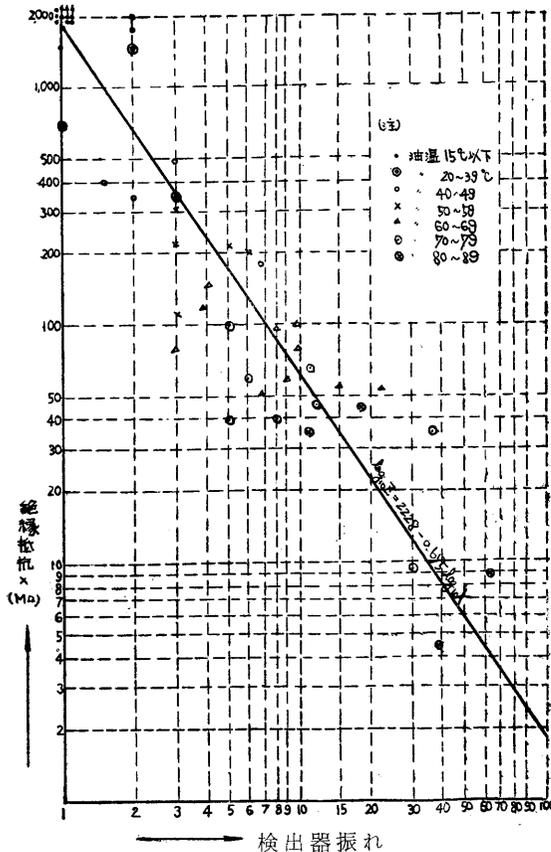
3. 配電碍子, 柱上変圧器等に対する絶縁劣化試験



第6図 冷熱試験で不良になった碍子の r.c 破壊電圧と検出器(フレ)の関係

上記原理にもとづき簡易劣化試験器を使用して先づ中部電力配電課にて撤去した高圧配電用碍子 400 個につき試験した。この供試品の内容は撤去後冷熱試験を数回施しクラックの入った不良碍子 34 ヶ、同じく冷熱試験により不良にならなかった碍子 59 ヶ、又製造の際外観上キズ等があり不良にした碍子 200 ヶ、及び 6KV 配電電圧昇圧のため撤去した良品碍子 110 個である。本試験は中電営業部試験所で行なったもので第 6 図にその結果の 1 例

第 7 図 絶縁抵抗(X)と検出器フレ(Z)との相関



を示した。同図では冷熱試験で不良になった碍子の交流による波壊電圧と検出器のフレとの関係であって両者には明かに相関性が認められる。

次に柱上変圧器の例について述べる。この場合は撤去柱上変圧器等を対照に 7KV 1 分間交流耐圧試験と本検出器のフレ、及びメガーによる絶縁抵抗値との相関性について調べてみた。この場合も本装置の振れが交流耐圧で不良となった変圧器検出に有効であることが判明した。

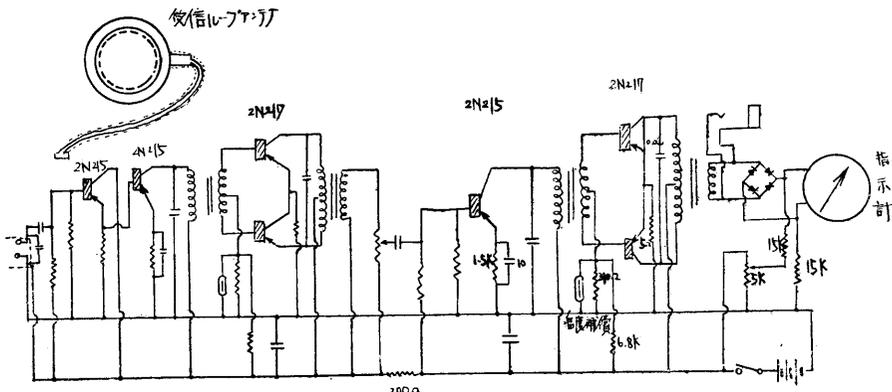
又比較的新らしい 16 台の柱上変圧器につき温度を上昇して各温度においてメガーによる絶縁抵抗値と本器の振れを求めたところ第 7 図に示すようにはほぼ直線関係が成立することが認められた。

以上の外にも PT, CT 等に対して同様の試験をここらみたがその結果は従来現場において絶縁劣化検出に使用したメガーに比較して本装置の指示ははるかに劣化検出に有効であることを実証することが出来た。

4. 配電線の故障点探査に対する応用

4-1 配電線の故障点探査

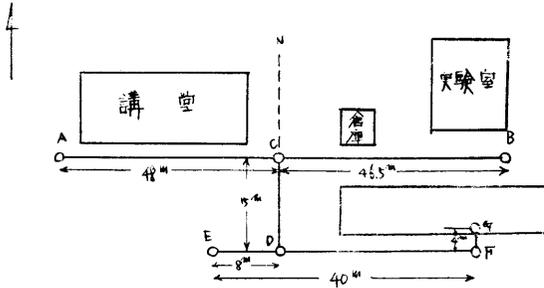
配電系統における故障点を出来る限り短時間に発見することは電力供給事業におけるサービス向上の面より重大な問題であるが現状では 2~3 の方法が試験的に採用された程度で専らメガー等による経験的手段に依存している。しかし配電線の保守も漸時近代化されその機動性を帯びるに従って故障点探査装置として手軽に使用出来るものが要求されるに至った。そこで上記の簡易劣化試験器を故障配電系統に接続し故障点を通じて連続的に繰返しパルスを送り別々に第 8 図に示すような携帯用トランジスタ受信機で線路沿いに探査していけば受信機のパルス電流による誘導起電力の消失する点が故障点であることになる。筆者等は上述の原理により或る程度故障点探査の目的に達し得たので以下これらの試験結果の例を述べる。



第 8 図 配電線故障探査用受信機

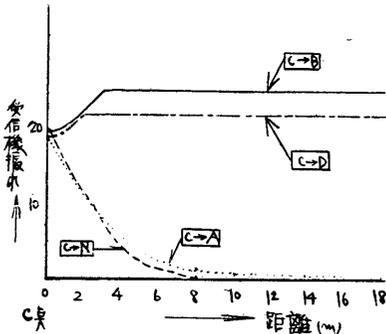
4-3 モデル配電線における故障点探査試験

第9図は本装置で人工故障点に対する探査の効果を試験するために名工大内に張ったモデル配電線の平面図で

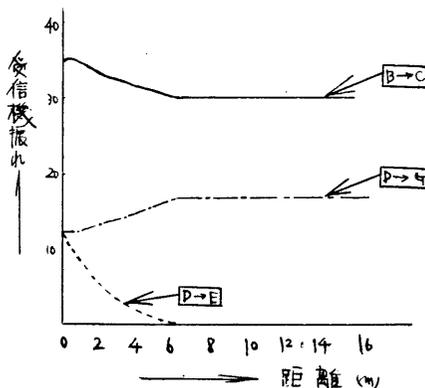


第9図 名工大におけるモデル配電線

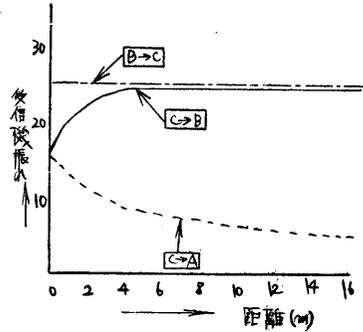
らる。图中 A, B, C, D は木柱, A—C, B—C, C—D 間は 0.2mmφ 地上高 3.5m エナメル線, E—F 間は既設の試験用送電線を配電線の一部に転用した。人工故障点は B としてこの点で直接接地又は 2KΩ の故障抵抗を経て接地する。又配電線の互長が相当大となった場合の探査を考慮して電柱 A 点に 0.01μF (約 1km 程度の配電線互長に相当) のコンデンサーを挿入して比較を行なっ



第10図 C点附近の故障点探査特性



第11図 D点, B点 附近の故障点探査特性 (第10図と同一条件)



第12図 A点に 0.01μF の容量を挿入した場合は B点, C点附近の故障探査特性

た。試験結果は第10図, 11図, 12図に示すように配電線に沿う距離と受信機の指示との関係は故障点が Bにあることを明確に現わしている。图中 C→B は分岐点 Cより B 方向に配電線に沿って探査したときの距離と指示との関係を示す。又 C→N は C点より配電線より離れて北方向に受信機を移動した場合の指示の減衰状態を調べたものである。これより受信機では主として電流パルスにより磁界をキャッチしていることが判る。又第10図, 第11図の両特性より分岐点においても故障点を含む線としからざる線路との区別は明瞭である。又第12図は A点に 0.01μF の容量を挿入した場合であるがこの程度の容量では分岐点 C においても故障方向を間違えることはない。配電系統が広範囲に及ぶ一般の場合に本法により故障点の探査を行う場合もそれを幾つかの小ブロックに分割すれば問題はない。

4-4 配線線実系統における試験成績

実際の配電系統において上記故障点探査の試験を引続き実施することとなり 昭和35年 6月16日, 岡崎市大西町, 大平町の大平変一丸山線71号柱より93号柱を使用した。参加者は当研究室, 中部電力営業部配電技術課及び蒼電舎京三製作所であって今回は簡易劣化試験器の外に1000サイクル電源を使用する S. D 式探査器を試用して両者の特性を比較してみることにした。この試験の詳細は省略するが故障点は92号柱に 5KΩ と 1KΩ の2種類の人工故障とし, 82号柱に発振器を置き3線一括して送った。実験結果より (i) 両装置とも発振器の故障点側と反対側とは発振器より 10m 位離れたところで故障点側を明確に探知出来た。(ii) 分岐線のある場合, その部分に 0.05μF, 0.1μF の容量を有する (これは配電線 2.5 km, 5km に相当) ときも故障点側を探知することが出来た。(iii)故障点の負荷側互長の長い場合も (i) の特性より発振器を停電区間の中心附近に設置すれば線路互長は2分されて探査は迅速になる。(iv) 静電容量による送信波の減衰は劣化試験器には殆ど認められないが上記

S.D 式においてはかなりの減衰がある。(v) 共同地線のあるブロックでは変圧器事故の場合、接地電流が共同地線を経て各接地極へ分流するので故障ブロックは探知出来るがどの電柱であるかを知るには手数がかかる。以上のようにして簡易劣化試験器と受信機との組合せにより配電系統の故障探査は相当有望のように考えられるので更に実施面につき研究して行く予定である。

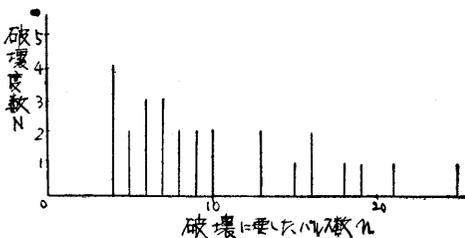
5. 絶縁材料に対し繰返しパルスによる劣化現象

5-1 コロナによる絶縁耐力の低下

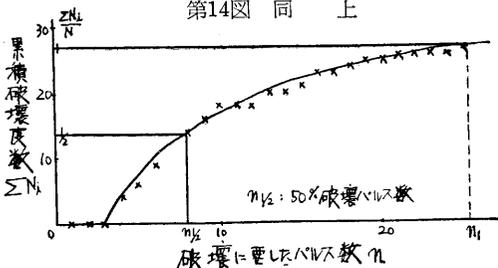
沿面コロナ放電及び絶縁物内部の空隙(ボイド)に発生するコロナ放電による絶縁物の劣化作用については近頃多くの研究が行なわれている。第4図に示したように本装置による歪波繰返しパルスを長時間絶縁物に印加した場合にもコロナによる絶縁物の劣化が当然予想されるのである。たとえば Polythene, Perpex 等の誘電体を電極間にはさみ高周波電圧を印加した場合 Mason 氏は内部放電による誘電体の劣化及び破壊について先づ最初に如何なる材質でも表面上の均一なる劣化より始まるとしている。これは各1個の放電によるエネルギーが誘電体表面で熱に変わりこの際酸素、X線、紫外線等も誘電体の劣化に寄与する。次に電極に接したボイド中の放電は或る時間後はボイドの周辺に集中してこの部分に深い孔がみられるに至りこのような多くの孔のうち或る深さに達したものは炭化したチャンネルを作るようになる。この状態は終に絶縁破壊にまで進展していくのである。

簡易劣化試験器の繰しパルス周期は高周波の場合程小さくはないが毎秒数個のパルスが有機絶縁材料に印加されるので耐コロナ性の問題も検討して置く必要があろう。

第13図 マイラー(0.05mm)の破壊パルス数特性



第14図 同上



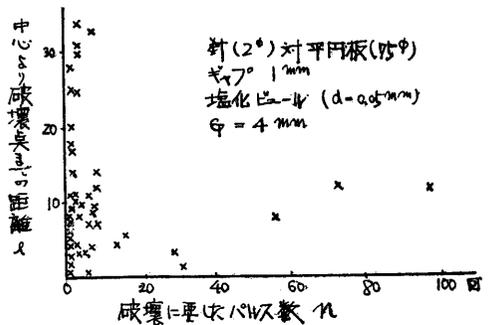
5-2 破壊に要するパルス数

塩化ビニール、マイラー等の絶縁材料に繰返しインパルスを加え放置すれば或る時間を経過して絶縁破壊をする。この場合絶縁破壊に至るまでに要したパルス数を計算して各種特性を調べてみた。第13図はマイラー(厚さ0.05mm)に対し簡易劣化試験器よりの繰返しパルスを加え絶縁破壊に至るまでに要したパルス数と破壊度数との関係を実験的に求めたものである。今回図の縦軸に累積破壊度数 $\sum_0^i N_i$ (破壊パルス数 n_i 回以内で破壊した全度数)をとると第14図のように比較的きれいな関係が得られた。ただしこれらの実験では放電路の乱れによるデータの混乱をさけるために資料(この場合はマイラー0.05mm板)の上にピンホールを有する塩化ビニール板(厚さ0.1mm)を重ねて試験した結果である。同図で傾斜の大きいところほど破壊度数が多く又曲線が右に移動するほど絶縁耐力が大きいことになる。なほ累積破壊 $N_T = \sum_0^T N_i$ で度数を全破壊度数除したものを縦軸にとればパルス数に対して破壊する確率を示すことになる。従って第14図において確率 1/2 に対するパルス数 $n_{1/2}$ は 50%破壊パルス数を示すことになる。

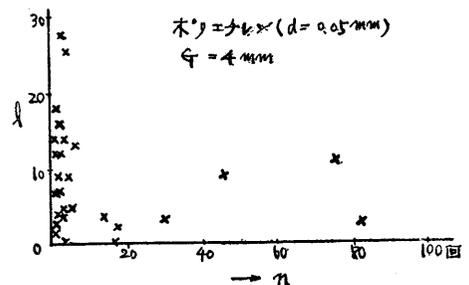
5-3 破壊点の乱れ

繰返しパルスを板状絶縁物に印加した場合、沿面放電は電圧上昇と共に広がり破壊は多くの場合電極直下に生ずることはまれで放電面域の中で最弱点において破壊するからその座標は相当の離散した値をとる。今塩化ビニ

第15図 破壊パルス数と破壊点のみだれ



第16図 同上

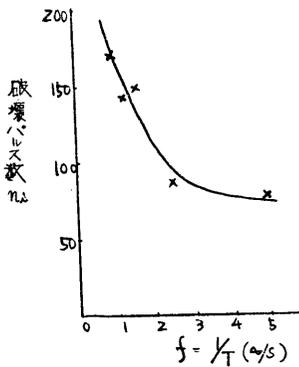


ール(厚さ0.05mm)につき破壊に要した繰返しパルス数 n_i に対し電極中心より破壊点までの距離の乱れをグラフに示したものが第15図である。同じくポリエチレン(厚さ $d=0.05\text{mm}$)につき上記特性を求めた結果を第16図に示した。しかしこのような乱れは既述のように絶縁物の上に更にピンホールを有する塩化ビニール板を重ねてやれば殆どなくなり90%以上ピンホールの直下で絶縁破壊をなす外、破壊に必要なパルス数 n_i は減少し又更に重要なことはピンホールのある絶縁物を資料の上に重ねると絶縁耐力が1/3程度も低下することが認められた。この原因としては1つには静電界的の見地よりこの部分の電界が強められてこともあるが他にコロナ劣化の機構より Mason, (5)(6)堀井氏等の云う穿孔過程が初めからあたえられていると考えられること。又凹部における熱の蓄積イオンの累積等の影によるものであろう。

5-4 パルス周期と破壊パルス数との関係

繰返しパルスの周期を0.2秒から1秒の間に变化して破壊パルス数とパルス周期との関係を実験してみるとマイラー(0.05mm)については第17図のように周期の短

第17図 パルス周期と破壊パルス数との関係



い場合の方が破壊し易いことが判った。これは多分熱放散に比し発熱量が大なることよりも表面電荷の蓄積と漏洩との平衡関係がパルス周期が短くなる程絶縁破壊を容易にする方向に移行するためと考えられる。

5-5 複合誘電体の破壊特性

最後に本装置により電力用機器の絶縁試験をする場合に絶縁物を2~3層重ね合せた複合誘電体に対する特性を述べる。ここでは塩化ビニール($d=0.05\text{mm}$, 0.075mm , 0.10mm), マイラー($d=0.05\text{mm}$), ポリエチレン($d=0.05\text{mm}$)等を各々2つずつ組合せて複合誘電体としてこれに上記繰返しパルスを印加した場合の平均破壊パルス数, その標準偏差等を記せば第1表のようである。この結果よりマイラーはその耐コロナ性が非常に優れているが複合誘電体として使用する場合はその組合

せ方法が悪いと折角の特性も発揮されず容易にコロナ劣化を生ずるようになることが知られるのである。

第 1 表

番号	絶縁物の組合せ方法		平均破壊パルス数	標準偏差	偏差率
	上 層	下 層			
1	ポリエチレン	ポリエチレン	40	16.7	41.8
2	塩化ビニール	塩化ビニール	44	7.4	16.8
3	塩化ビニール	ポリエチレン	37.2	10.9	29.4
4	ポリエチレン	塩化ビニール	11.3	4.4	38.5
5	ポリエチレン	マイラー	134.0	23.6	17.7
6	塩化ビニール	マイラー	80.5	11.9	14.7
7	マイラー	ポリエチレン	241.0	26.4	11.0
8	マイラー	塩化ビニール	83.7	8.3	9.9
9	8と同様なるも並列にC=0.001 μF を挿入		82.6	18.0	21.8
10	マイラー	マイラー	1517.0	328.2	21.6

6. 結 論

以上の諸結果をまとめて次のように結論した。

- (i) 絶縁劣化試験器によれば絶縁破壊又はその直前における $v-i$ 特性の非直線への移行を計器の指示に示し得るので各種電力用機器で70KV定格電圧以下のものについては絶縁劣化の程度を現場で簡易に試験することが出来る。
- (ii) 配電線の故障点探査に対しても本装置と受信機とを併用すれば速に目的を達することが出来る。特に本装置ではパルスの距離による減衰が殆どない点がある。但し連接々地の施されたブロック内に故障点がある場合は他の方式と同様の難点がある。
- (iii) 有機絶縁物に本装置によるパルスを長時間印加する場合は高周波におけると同様に絶縁物のコロナ劣化現象があるがその特性は相当複雑であって今後大いに検討を要する問題が含まれている。

尚本装置は当研究室と中部電力及び東洋電機漁具との協同研究によるものであるが特に柱上変圧器, 配電用碍子の試験は中電営業部試験所で担当して頂いた。ここに本装置の試作, 試験に御関係下された各位に対し深謝の意を表する次第である。

文 献

- (1) 武藤, 大野, 若山; 電気四学会東海支部連六 No. 17 (昭34.11)
- (2) 武藤, 大野, 若山; 電気四学会東海支部連六 No. 18 (昭34.11)
- (3) 武藤, 若山; 昭和35年電気四学会連六 No. 898 (昭35.7)
- (4) 大野, 平野; 電力 43巻 9号 (昭34.8)
- (5) 池田, 堀井; 電学誌 78 1213 (昭33.9)
- (6) 池田, 堀井; 電試集報 20 No.6 (昭30.6)