配電系統の絶縁協調に関するニ、三の実験的考察

Some Experimental Study on Insulation Co-ordination in Distribution Systems

> 小 沢 淳* 奥 山 賢 一* 益 田 淳 一** Jun Ozawa Ken'ichi Okuyama Jun'ichi Masuda

要

配電系統に使用されている機器および装柱の絶縁協調を急峻(しゅん)波サージ領域まで検討し,避雷器当該 柱で連接接地とした場合,機器の協調はじゅうぶんとれていること,隣接柱機器の協調は過酷なサージ電圧侵 入時には問題のあることを明らかにした。

旨

1. 緒 言

配電系統の耐雷施設が整備されるにつれ雷害事故が減少し,この 効果が一般に認識されてきた。しかし避雷器が施設されている当該 柱機器または隣接柱機器の雷害事故が散見され⁽¹⁾,この原因の究明 と保護方式の確立が要望されてきた。

本報告は、この原因として急峻波サージ電圧の侵入を想定し、配 電用機器の急峻波せん絡特性(放電までの時間 0.1 µs まで)を明確 にするとともに、実際に使用されている装柱の絶縁の協調を定量的 に検討した。この結果、機器自体ならびに接地方式など、そのほか の点にも問題のあることを見出した。



図1 衝擊電圧測定回路

2. 急峻波サージに対する測定系

せん絡までの時間, 0.1 μs 付近のサージ電圧の測定は,従来の標 準波試験の場合と異なり高度の測定技術が必要となるので,測定系 の誤差についてもじゅうぶん検討した。

2.1 分 圧 器

急峻波サージ(以後急峻波と略す)に対する分圧器は種々研究されているが⁽²⁾⁽³⁾,たとえば財団法人電力中央研究所原田氏の研究により⁽⁴⁾,応答時間の短い測定精度の高いものが得られるようになった。ここではこれらにならって分圧器を製作した。この分圧器の応答は図1に示す測定系Iおよび測定系IIでは図2に示すように、振動形の応答で、応答時間Tはそれぞれ4ns、12nsとなっている。

2.2 測定系の誤差

直線上昇波を印加して放電電圧を求める場合,測定系への入力電 Eは直角三角波および三角波で近似される。 t_1 を電圧が印加されて から放電するまでの時間, t_2 を電圧がゼロになるまでの時間とすれ ば直角三角波が印加された場合の RLC 形の測定波形は(1)(2)式 であらわされる⁽⁵⁾。

$$\begin{aligned} v_2(t) &= \frac{1}{t_1} \left\{ t - \frac{\sin \omega t}{\omega} \varepsilon^{-\frac{a_0}{2}t} \right\} & 0 \le t \le t_1 \dots (1) \\ v_2(t) &= \frac{\omega_0}{\omega} \left(\frac{1}{\omega_0 t_1} \sin \omega (t - t_1) \right. \\ &\left. + \cos \left\{ \omega (t - t_1) - \varphi \right\} \right] \varepsilon^{-\frac{a_0}{2}(t - t_1)} - \frac{\sin \omega t}{\omega t_1} \varepsilon^{-\frac{a_0}{2}t} \end{aligned}$$



また三角波の場合は $0 \le t \le t_1$ までは(1)式で与えられるが、 t_1 以後については適用されない。そこで新しく(4)(5)式を導いた。

$$\begin{aligned} v_{2}(t) &= \frac{t_{2}}{t_{2}-t_{1}} - \frac{t}{t_{2}-t_{1}} - \frac{\sin \omega t}{\omega t} \varepsilon^{-\frac{a_{0}}{2}-t} \\ &+ \frac{t_{2} \sin a (t-t_{1})}{\omega t_{1} (t_{2}-t_{1})} \varepsilon^{-\frac{a_{0}}{2} (t-t_{1})} \quad t_{1} \leq t \leq t_{2} \dots \dots (4) \end{aligned}$$

$$v_{2}(t) &= -\frac{\sin \omega t}{2} \varepsilon^{-\frac{a_{0}}{2} t} + \frac{t_{2} \sin \omega (t-t_{1})}{2} \varepsilon^{-\frac{a_{0}}{2} (t-t_{1})} \end{aligned}$$

$$-\frac{\sin \omega (t-t_{2})}{\omega (t_{2}-t_{1})} \varepsilon^{-\frac{a_{0}}{2}(t-t_{2})} \qquad t_{2} \leq t \quad \dots \dots \quad (5)$$

 $\omega t_1 (t_2 - t_1)$

この場合の波高値相対誤差も(3)式で与えられる。

 ωt_1

(3)式から明らかなように RLC 形測定系の相対誤差は $a_0/2$ およ び ω を大きくすれば小さくなることを示しており,応答時間とは直 接関係していないのが RC 形との大きな相違である。しかし(3)式 は t_1 における相対誤差を示すもので, t_1 前後の振幅が t_1 におけるよ りも大きくなると,実測ではその大きな値を読みとるから,(2)ま たは(4)式を解いて求めるべきであろう。 図 3 は二つの測定系に対する直角三角波応答を計算によって求め た例である。これから測定系 I, IIの相対誤差は直角三角波に対し てはそれぞれ 0.5%,9%,立下り 20 ns の三角波に対してはそれぞれ 1.5%, -9% となり,測定系 I を使用すれば約 90 ns 以後の放電電 圧を約 ±2% の相対誤差で測定できることとなる。

 $z \in \mathcal{C},$ $\omega_0 = \sqrt{\omega^2 + \frac{a_0^2}{4}}$

ω=応答波形より得られる角振動周波数

* 日立製作所日立研究所** 日立製作所国分工場











図4は測定系I,Ⅱで測定した20¢球ギャップ間げき長9.4mm における放電電圧波形であるが、両者の波形はよく一致している。 また,測定系Ⅱについては図3の計算結果から放電電圧値および時 間に関し補正を必要とし、1/0.91を乗じなければならない。これに より補正すると両測定系の値はほぼ一致する。

3. 配電用機器単体の v-t 特性

3.1 試験方法

供試機器はがいし類,ケーブル,柱上変圧器,避雷器,油入開閉器 であり,試験は次の方法に従って行なわれた。

(1) せん絡までの時間がほぼ 0.1, 0.5, 1, 5 µs となるような直 線上昇波および標準波を印加し、測定回数は各目標時間について 5回とした。

(2) 衝撃電圧極性としては正極性を,また気象条件としては,

配電用機器 v-t 特性の衝撃電圧極性効果 (注水) 図 8

ある。

絶縁協調の観点から避雷器の v-t 曲線は測定値の最大値を結び, 被保護機器の v-t 曲線は最低値を結ぶのが普通である。たとえば高 ピンの v-t曲線は図5のA曲線で与えられる。このようにして整理 し,機器別 v-tの特性を示したのが図6である。なお,ケーブルヘッ ドは標準波で絶縁破壊したため急峻波領域では測定できなかった。 図6の各機器の v-t曲線, すなわち最低せん絡値とそれぞれの平 均値とのばらつきは、がいし類で10%以内,油入開閉器,柱上変圧 器で15~25%である。後者のばらつきが大きいのはメーカーおよ び製作年度が異なるからである。なおこの実験で高圧側よりサージ 電圧を一括印加したとき変圧器の両ブッシングが急峻波領域で同時 せん絡する現象がみられ、球ギャップで確認したところ 0.1 µs 付近 では二つのギャップがやはり同時せん絡するという興味ある現象が みられた。

3.3 極性および注水効果

図7,8は機器の代表例について求めた乾燥時および注水時のv-t 特性の極性効果を示すものである。図7,8に示すように0.1 µs付近 では極性効果はほとんどないが、0.5 µs 付近以後は負極性のせん絡 電圧は正極性のせん絡電圧より高くなることがわかる。また, 注水 状態の負極性では正極性と異なり5~10µsの波尾でせん絡するよう

清浄乾燥状態を主体としたが、代表例については、清浄乾燥および注水 (2.2 mm/min 45°) 状態で正負両極性のせん絡電圧を求め	になる。一方,避雷器の v-t 特性は極性,注水により影響がほとん どなく,被保護機器の v-t 特性を上まわることもない。
た。 (3) 変圧器は高圧端子を一括し,低圧端子と外箱は一括アース	4. 装 柱 実 験
として電圧を印加した。 - 3.2 機器別の v-t 特性 図 5 は 6 個の高圧ピンがいし(以下高ピンと略す)の v-t 特性で	 4.1 試験装置 4.1.1 試験配電線 図9は試験配電線の概略平面図であるが構成の基本は次のとお

— 18 —

配電系統の絶縁協調に関する二、三の実験的考察



表1 接地様式による当該柱避雷器の保護特性 (衝撃電圧発生器の全充電電圧は 100 kV)

	試 験	結 果
接 地 様 式	油 入 開 閉 器 (常開, 三相一括印加)	柱 上 変 圧 器 (高圧一括印加)
単独接地 A Arr d機器 4m 28Ω 20Ω	 ①外部ブッシングー相せん絡破 壊せん絡値 77 kV (5.6 µs) ②ほかのブッシングはほぼ同じ 電圧 (79.3 kV, 8 µs)を印加 してもせん絡せず 	外部ブッシングせん絡 せん絡値 79.3 kV(6 µs) 76.3 kV(8 µs) 75.5 kV(11 µs)
連接接地 B		異常なし VA'=28 kV (2 µs)
兼用接地 C	異常なし V ₄ =40 kV (0.05 us)	異常なし
28Ω	$V_A' = 31 \mathrm{kV} (0.5 \mu\mathrm{s})$	$V_A' = 26 \text{ kV} (2 \ \mu \text{s})$
特殊接地 D	異常なし	異常なし
▲34m►	$V_A + 40 \text{ kV} (0.05 \ \mu\text{s})$ $V_A = 21 \text{ kV} (0.5 \ \mu\text{s})$	$V_{A}' = 28 \text{kV} (2 \mu \text{s})$

815

図10 装柱状態における試験回路例



 充電電圧 200 kV 83.5 kV/div 0.2 µs/div
 立 上 り 173 kV/0.1 µs
 図 11 無負荷サージ電圧 オシログラム



図12 機器,分圧器などの 取り付け状況

りである。

(1) 配電線に商用周波電源は加えない。

(2) 架空地線はとりつけない。

(3) 配電線の径間は34mと36mである。

(4) 各柱周囲に施工した接地抵抗値は 20~51Ωの範囲で, 試験は約 30Ωの抵抗値を主体とした。

4.1.2 衝撃電圧発生器

図 10 は当該柱避雷器の保護特性を求める試験回路の一例を示 したものである。試験される機器の配置は東京電力株式会社標準 装柱工法に従った。試験に用いた衝撃電圧発生器の全充電電圧は 225 kV で,正極性を主体として試験した。また,急峻波発生用 250¢ ギャップおよび放電抵抗を1,2号柱から約6mの位置に設 けた。図 11 は無負荷電圧波形の一例であるが,立上り平均峻度の 最大値は約 173 kV/0.1 µs である。 4.1.3 測 定 装 置 数個所の電圧,電流を同時に測定するためサージシンクロスコ ープを2~4 台使用した。 機器の端子電圧を直接測定するため分 圧器を図 12 に示すように取り付け,測定用サージシンクロを絶縁



架台上にのせ、電源は絶縁ベルト結合の MG⁽⁴⁾から供給するよう にした。サージシンクロの掃引はサージ電流で生ずる磁場をピッ クアップコイルで検知し、遅延回路を通して外部同期回路に入れ る方法をとった。
4.2 当該柱避雷器の保護特性
4.2.1 接地方式の検討
同一柱の被保護機器と避雷器とのアース接続方法によって接地 方式は、(A)単独接地、(B)連接接地、(C)兼用接地、(D)
兼用接地線の長い場合(特殊接地)、などが考えられる。これらに ついての試験結果の概略は表1に、波形の代表例は図13に示す とおりである。表1、図13にみられるように(A)単独接地の場







従来,連接接地あるいは兼用接地にすれば被保護機器の端子 電圧は避雷器端子電圧と同じであると考えられやすいが,本実 験によって必ずしも同じにならないことが明らかとなった。こ のように機器端子電圧が避雷器の端子電圧より高くなるのは, 図16の等価回路に示すように機器と避雷器とを含む RLC 閉 回路および衝撃電圧発生器と接続線,機器,接地などを含む閉 回路の双方で異常振動の発生する条件が成立しているからであ る。このような振動現象については 270 kV 系統の新愛本変電 所における協調ギャップと変圧器との閉回路についてすでに指 摘されている⁽⁶⁾。

以上の検討により避雷器と被保護機器の接続は、できるだけ短 くする必要のあることが明らかとなったので、柱上変圧器につい て避雷器取り付け位置を現工法の高圧架線側(上)から変圧器台の トンボ腕金(下)に替えて避雷器の保護特性を求めた。この取り付 け替えにより高圧架線と変圧器を接続する PD線と避雷器アース 線の和は 8~9 m から 1.5~2 m に短くなる。このように(上)から (下)に取り付けを替えることにより、高調波振動はある程度抑制 でき、変圧器端子電圧は約 25% 低くできる。

ケーブルヘッド

図15 避雷器当該柱兼用接地におけるオシログラム

合,油入開閉器および柱上変圧器の外部ブッシングは避雷器が放 電したあとの時間領域でせん絡することがある。この理由は避雷 器の放電電流による二つの接地極の電位上昇の差分と避雷器の制 限電圧との和で,相対的に被保護機器の端子とケース間の電位差 が大きくなるためである。

4.2.2 兼用接地における異常電圧

兼用接地方式における被保護機器の端子電圧をそれぞれ油入開 閉器,柱上変圧器,ケーブルについて測定した。図14は結線の 概略寸法図,図15は被保護機器および避雷器の端子電圧波形を示 したものである。これらから次の結果が得られた。

(1) 油入開閉器の端子とケース間の電圧は避雷器の端子電圧 とほぼ同じである。

(2) 柱上変圧器の端子とケース間およびケーブル端子とシース間の電圧は避雷器放電後の領域で振動しており,避雷器制限 電圧の 1.4~1.5 倍に達するところがある。しかしその値はたと えば印加電圧 200 kV のとき,変圧器端子電圧は 0.62 μ s におい て 45.6 kV であり,変圧器せん絡 v-t 値の 40~50% 程度で,ブ ッシングなどのせん絡には至っていない。 (3) 被保護機器の端子電圧に現われる振動周波数は、その機 器のキャパシタンスが大きくなれば低くなる。 (4) 印加衝撃電圧の平均波頭峻度は約 90 kV/0.1 μ s であり、 被保護機器による違いはほとんどないが、被保護機端子電圧の 波頭峻度は機器のキャパシタンスが大きくなると低減する。

4.2.3 アース線および PD 線の電位差

急峻波が印加されるとアース線および PD 線の電位差が無視で きなくなるので,これらの接続線などに生じている電位差を測定 した。この結果アース線,PD 線の電位差の最大値は避雷器放電 付近にあらわれ,ここでは 10 cm 当たり約 220~280 V である。 したがって配電線に急峻波が侵入しても,その全電圧が避雷器や 変圧器にかかるのではなく,アース線や PD 線にも分担されるこ とになるので,避雷器のアース線は短いほうが良く,変圧器のPD 線は長いほうが良いことになる。

PD線の電位差,および電流は正負に振動しているのがみられ, このことから4.2.2 でのべた閉回路の振動が実証される。

4.2.4 衝撃電圧波形による避雷器保護特性

これまでの衝撃電圧発生器の回路定数は一定にしていた($R = 10\Omega$, $L=0 \mu$ H)が、ここでは図 17 の回路で抵抗 R、インダクタンスLを種々変え、印加電圧波形、回路条件などによる柱上変圧器および避雷器の端子電圧の変化を測定した。このときの波形を示したのが図 17 である。

図 17 から変圧器端子電圧が最も高くなるのは R=L=0の場合 である。また抵抗Rを0, 10, 1,000 Ω に変えると変圧器端子電圧 は低下し、高調波振動周波数も低くなる。このRの変化は接地抵 抗を加減していることと等価になる一方、衝撃電圧源の内部イン ビーダンスを変えているとも考えられる。したがって避雷器を当 該柱に設置し、かつ連接接地あるいは兼用接地とした場合、低圧 側の対地電位上昇による危険性を考えず高圧側の被保護機器のみ の保護を考えると、接地抵抗を高くするほうが良いことになる。 インダクタンスLを0, 40, 865 μ Hに変えると変圧器端子電圧 は低くなり、高調波振動周波数の低下率も大きい。このLによって 衝撃電圧波形を変えることになるほか、衝撃電圧発生器と変圧器 との距離を変えたともみなされる。すなわち逆せん絡地点と被保 配電系統の絶縁協調に関する二,三の実験的考察







図18 隣接柱避雷器の接地様式

護機器との距離が大きくなれば機器の保護は安全側となることを 示している。

4.3 隣接柱避雷器の保護特性

4.3.1 柱上変圧器に対する保護特性

柱上変圧器と隣接柱避雷器の接地方式は図18に示す3種類と なる。単独接地方式の好ましくないことはわかっているので、こ れは省略し、もっぱら連接、兼用の両接地方式について保護特性 を検討した。

図19は急峻波を印加した場合の各端子電圧および電流波形を, 図20は代表的オシログラムを示したものである。これらから得ら れた結果を要約すると,

(1) 大容量の急峻波を印加しても兼用接地では異状がなかったが,連接接地では柱上変圧器のブッシングがせん絡した。すなわち柱上変圧器側ではアースを取らないほうが良い。

(2) 兼用接地では異常は生じなかったが,変圧器端子電圧は 80.7 kV(0.7 µs)にも達し機器単体で求めた v-t 曲線を越えてお り,万全の接地方式とはいえない。このように過酷な衝撃電圧 が配電線に侵入した場合,隣接柱の避雷器で被保護機器を完全 に保護することは不可能なので,当該柱に避雷器を設置し,連 接あるいは兼用接地するのが望ましい。

(3) 連接および兼用接地における変圧器端子電圧の最大値は 避雷器放電後の領域で現われる。これは避雷器に大電流が流れ, 高圧配電線のインダクタンス降下が避雷器の制限電圧に重畳す





るからである。 (4) 衝撃電圧発生回路に865 µH のインダクタンスをそう入 し,標準波に近い衝撃電圧を印加したときの電圧,電流波形は 図21に示すとおりである。図21より波頭が長くなると変圧器 端子電圧は図19の場合ほど高くならず,避雷器で安全な値に抑 制されることがわかる。これは避雷器に流れる電流値および峻 度が小さくなるからである。

図21 避雷器隣接柱において変圧器にかかる端子電圧



4号柱がいし電圧	15.2 kV/div
	0.2 µs/div

図22 配電線2スパンのがいしにかかる電圧オシログラム

表2は隣接柱のがいしに対する避雷器保護特性を,図21はその 代表的なオシログラムを示したものである。これから得られた結 果を要約すると

(1) 共同地線のアースを避雷器のみでとれば,がいしにかかる電圧 V_pは多重接地方式における値の 80~90% になる。

(2) 衝撃電圧進行方向に対して避雷器の手前のがいしにかかる電圧は,後方の開放端のがいしにかかる電圧の2倍程度に高

	1 1 号柱のマーフカー	1 1 日社のマースため
	1,45任のノースなし	- 1,4 写柱のアーへのり
7	168 kV $(0.3 \ \mu s)$	161 kV (0.32 μ s)
V _{p1}	119 kV $(0.28 \ \mu s)$	$132 \text{ kV} (0.28 \ \mu\text{s})$
VA	28.8 kV $(0.05 \ \mu s)$	29 kV (0.05 μ s)
Vp4	58.5 kV $(0.65 \ \mu s)$	72 kV (0.65 μ s)
I	4.95 kV (13 μs)	6.42 kA (13 μ s)



(2) 波頭峻度が約90 kV/0.1 µs でかつ避雷器放電電流が約5 kAとなる過酷な急峻波に対して,当該柱避雷器の接地方式が単 独接地の場合,被保護機器がせん絡することもあるが,連接接地 あるいは兼用接地にすればじゅうぶんな余裕をもって絶縁協調が とれる。

(3) 上記した急峻波サージ侵入時には,接地方式に関係なく隣接柱機器の絶縁保護はじゅうぶんに期待することはできない。

(4) 急峻波進行方向に対して避雷器の手前の被保護機器にかかる電圧は,後方の開放端の機器にかかる電圧よりも高くなる。

くなっている。この原因は4.3.1と同様避雷器の放電電流が大きく,高圧配置線路のインダクタンス降下が加算されたからである。したがって避雷器の位置が2径間以上離れると,がいしのせん絡が起こり得るであろう。

5. 結 言

 (1) せん絡値の測定誤差が 0.1 µs において±5% 以下となる測 定系を使用して配電用機器の 0.1 µs 付近までの v-t 特性を求め た。測定範囲内では避雷器の放電電圧は,被保護機器のせん絡電 圧より高くならないことが明らかとなった。 終わりに,本研究にあたり,東京電力株式会社技術研究所の関係 各位,東京電力株式会社茨城支店,日立営業所および日立製作所の 関係各位の甚大なるご援助,ご協力をいただいたことをここに御礼 申し上げる次第である。

参考文献

- (1) 大和: 電四連大 No. 946 (昭43)
- (2) F.C.Creed: IEEE 86, No.11, p. 1408 (1967-11)
- (3) G. Newi: IEEE 87, No. 9, p. 1779 (1968-9)
- (4) 原田: 電力中研技術報告 電力-65061 (昭40)
- (5) 電気学会技術報告 56 号 p.44 (昭 38)
- (6) 原田: 電力中研技術報告 電力-61009 (昭36)



特許 第515170号 (特公昭42-20732号)



特許の紹介

この発明はコード式書状区分機に適用するもので,複数個の区分 ヘッドが,同心的に配置された多数の区分箱上を書状を吸着したま ま回転し,その書状の行先に応じて所定の区分箱上の投入口に到達 したとき,回転中のヘッドから書状を区分箱内に垂直に投入するよ うになっている。

区分ヘッドの吸気室を真空ポンプに通じ,回転腕を時計方向に回転させれば,搬送路から送られてきた書状は回転腕の先端に取りつけられた区分ヘッドの吸気室の上面に吸着され,書状とベルトとの摩擦力が大きくなって書状はベルトにより確実に移送される。

回転腕が回転を続け、ローラがカム C1に乗り上げるとカムレバ

ーはカム C1により反時計方向に回転させられるから, プーリ P1 を駆動し, Vベルトを介して区分ヘッドのベルトは矢印方向に移動 するので吸着されていた書状は吸気孔からの吸着力に抗してヘッド からはずれ, 所望の区分箱に投入される。

さらに回転腕が回転を続け、カム C1からはずれたローラは復帰 カム C2により書状を吸着する前の状態に復帰される。

この発明によれば、書状に損傷を与える危険がなく、処理速度も はやくすることができるうえ、書状の区分箱への投入が確実に行な われる。 (富田)

