ケーブル活線下絶縁測定手法と 絶縁抵抗測定誤差についての考察

正 員 中 山 忠 晴 (住電エンジニアリング)

On-Line Cable Monitoring, its Variation and Measuring Error
Tadaharu Nakayama, Member (Sumiden Engineering Corp.)

Six typical on-line cable monitoring methods were outlined first. In the field, it has become a problem that in some cases measured insulation resistance values contain much error than expected, especially when the outer sheath resistance is lower. This was recognized as a phenomenon due to intrusion of unpredictable and unstable noise voltage " e_n " to the measuring system.

The Author presented his extensive investigation results relating to the origins of e_n , their various aspects, invasion route to the measuring circuit and degrees of influence on the measured resistance values, with the aid of many illustrations and the newly derived numerical formulas which serve as the indexes to tell practicability of each method. Also suggested that all the methods shall be categorized into 3 groups, (A) to (C), according to their extent of measuring error.

Finally, the Author presented and recommended the use of new techniques to reduce e_n effects, with the adoption of (B) group methods because of their good practicability.

キーワード：CVケーブル、活線診断、直流重畳法、雑音電圧、地電流打消し、接点接触不良

1. まえがき

高压電力ケーブルの絶縁劣化の指標である絶縁層絶縁抵抗を、交流高压に重畳した直流の低信号電圧を用いて活線下で測定する、というアイデアが実用化されてからはや20年近くになる。⁽¹⁾⁽²⁾

本手法は一般に直流重畳法と称されているものであるが、この開発過程で現実に製品化または確定手法として実用化されたもの、実験的に試みられたもの、紙上検討の域にすぎぬもの等々をあらためて振り返ってみると、十指に余るバリエーションが存在する。本論文ではその中の代表的な6つの手法についてそのあらましをまず紹介して、諸氏の御参考にご供することとする。

つぎに、現実にフィールドで測定した時に直面したのは、測定系へ侵入する不定雑音電圧 e_n のために絶縁抵抗測定値に大きい誤差を生ずるという問題であった。これは防食層絶縁抵抗値が低くなると絶縁層絶縁抵抗値が低く測定されることがあると、一般に解釈されている現象である。

この不定雑音電圧 e_n について、それがどのような発生原因のもので、如何にして測定系に侵入し、どのような形で絶縁抵抗測定値に誤差を導入しているのかということを考察した結果を報告するのが本論文の目的とするところである。

る。

不定雑音電圧 e_n の大小が絶縁抵抗測定誤差におよぼす影響の程度は数式的に解析され、その結果として各手法は3つのグループに分けられることが判った。実用性のあるのはその内の1グループのみである。

最後に、このような絶縁抵抗測定誤差の導入をできるだけ回避するための、現実的な手段を紹介する。

2. 代表的6手法の紹介

〈2・1〉活線下絶縁抵抗測定の基本概念 測定対象とする項目は、次の3つである。

個々のケーブルごとの	絶縁層絶縁抵抗 R_i
〃	防食層絶縁抵抗 R_s
高压系統全体の	系統絶縁抵抗 R_0

上記を測定するために、直流信号電圧（通常+50V）を高压系統の接地機器の中性点を通じて高压導体と大地間に注入するのであるが、これが不必要な手法もある。系統絶縁抵抗 R_0 は注入電流を読むことで知ることができる。

直流信号電圧の印加前に、遮へい端と大地間に設けた測定装置（多くはAmp付きのDVM）の検出抵抗にあらわれる電圧 e_i は、測定に誤差を与えるものとして積極的に“地電流打消し手段”により零化をはかるか、微少な値に低下さ

せてその値を記録し、ついで直流信号電圧 E を印加して再び検出抵抗にあらわれる電圧 e_2 を測定し、直示または計算により絶縁層絶縁抵抗値を得ることができる。このような“地電流打消し手段”の具備は一応必須条件であるが、なかにはこれを持たない手法もある。

補助測定電源として遮へい端と大地間に別の直流電源を必要とする手法もある。その目的の多くは地電流打消しのため、または防食層絶縁抵抗測定のためである。図1に一般的な測定回路概念図を用語の定義と共に示す。

図1 ケーブル活線下絶縁測定概念図

Fig.1. Conceptual diagram of on-line cable insulation measuring

〈2・2〉代表的6手法一覧 表1に、本論文で紹介する手法一覧を示す。

表1 代表的6手法
Table 1. Typical 6 methods

名 称	測定項目	測定方式	信号電圧印加方式
Null電流法	R_i, R_b	零位法+偏位法	On時、Off時の2段階
Null電圧法	R_i, R_b	零位法	On時、Off時の2段階
2電圧法	R_i, R_b	偏位法	印加不必要またはOn継続
3電圧法	R_i, R_b, R_o	偏位法	On時、Off時の2段階
4電圧法	R_i, R_b	偏位法	On時、Off時の2段階(交流高圧も同じ)
6電圧法	R_i, R_b, R_o	偏位法	On時、Off時の2段階

〈2・3〉各手法の解説

(i) Null電流法 (図2) 信号電圧印加前に検出抵抗 R_c に流れる電流を、対向起電力 E_o を調整して打消す。または零に近く低減して R_c の両端の電圧 e_o (増幅後 E_o'')を読む。

この状態で E_o はそのままとして信号電圧 E を印加し、 R_c の両端の電圧 e_i (増幅後 E_i'')を読む。

R_{li} はこの場合、測定回路時定数調整用である。

E_o の挿入位置は増幅器の前段のみと限らず、中段または出力段の場合もある。それらの場合はいわゆる地電流 (R_c に流入する雑音電流) は実は打消されずに残留する。

(ii) Null電圧法 (図3) E 印加前に R_c に生ずる電圧を

図2 Null電流法

Fig.2. Null current method

零ならしめるよう、標準直流信号電圧発生装置の出力電圧 E_o を調整し、その値 E_{o1} を読む。ついで E を印加し、再び R_c に生ずる電圧を零ならしめるよう調整した結果の出力電圧 E_{o2} を読む。このように2回遮へい端対大地電圧の零化を行なうが、地電流は打消されることなく逆に最大値を保つ。

⑤はDigital volt meterであるが、その電圧分解能が零でないため、電圧零と認めた時も電圧 V_1 、 V_2 がそれぞれ残留する。

直列抵抗 R_o はおおきければ感度が増大するが、測定回路時定数の増加を招き、 E_o の所要値の増加も要求されることになる。地電流の大部分がこれを通るからである。

図3 Null電圧法

Fig.3. Null voltage method

(iii) 2電圧法 (図4) 直流信号電圧 E の準備を必要としない。したがって高圧部分に接近する必要もない。貫通水トリを発生したCVケーブルの絶縁層内部に発生する直流起電力 E_i を E の代わりに用いているのである。 E_i については後でふれる。

異なる抵抗値の R_1 と R_2 とを切替え、それぞれの場合の電圧降下 e_1 、 e_2 を読むだけで、 R_1 と R_2 とを求め得る理であるが、地電流打消しがないので防食層局部電池電圧 E_s の影響を強く受けて、 R_1 良好のケーブルを絶縁不良と誤認する危険性が高い。故にケーブル遮へい端から内部を見たときの見か

けの内部起電力を上記測定値から求め、データを棄却すべきかどうかを決める。⁽³⁾ (一例、 $R_l=30\text{M}\Omega$ の確定に $R_s=10\text{M}\Omega$ が必要)

図4で R_A は必須の存在ではなく、3電圧法測定装置流用の結果にすぎない。

本法はいわゆる直流成分法に似ているが、上記の如く内容は大いに異なる。

図4 2電圧法

Fig.4. 2 Voltage method

(iv) 3電圧法 (図5) 直流信号電圧 E 印加前に、抵抗 R_l の電圧降下 e_0 を読み、 E 印加後同じく R_l の電圧降下 e_1 を読む。 E は印加したままで抵抗を R_2 に切替え、その電圧降下 e_2 を読む。

この場合 E_A は模擬防食層局部電池電圧として働き、 R_A は模擬防食層絶縁抵抗となり、3電圧を測定する全段階で入り放しである。これは対象ケーブルに防食層絶縁不良がない場合でも、一連の測定操作で必ず R_s も測定できるようにするためである。 E_A 、 R_A 値は数式処理で打消されるので、その値を知る必要はない。

図5 3電圧法

Fig.5. 3 Voltage method

(v) 4電圧法 (図6) 直流信号電圧 E は高圧系統に注入する必要はないが、検出抵抗 R_c を通じて遮へい端と大地間に印加する。

交流高圧の短時間(数分間)停電が必要である。

測定段階は4つ、すなわち交流高圧切りの状態で、 E 印加無し時の R_c の電圧降下 e_1 、 E 印加時の R_c の電圧降下 e_2 を読む。

ついで交流高圧入りの状態で、 E 印加無し時の電圧降下 e_3 、 E 印加時の電圧降下 e_4 を読む。

以上の操作で、遮へい端と大地間からケーブル側を見た R_l と R_s の並列抵抗 R_s' を測定しているのであるが、交流高圧

切り時は R_s のみを測定しているから、その差で R_l を知ることができる。

図6 4電圧法

Fig.6. 4 Voltage method

(vi) 6電圧法 (図7) 交流高圧の停電を必要としないが、直流信号電圧 E の設置機器側での準備を必要とする、4電圧法の改案である。

切替えスイッチの切替えごとに E の入り切りが必要で、次の切替え構成で R_c の電圧降下 $e_1 \sim e_6$ を測定する。

$Ga + Cb \dots \dots R_b$ と R_l の並列抵抗 $\dots e_1, e_2$

$Ga + Ca \dots \dots R_b$ と R_s の並列抵抗 $\dots e_3, e_4$

$Gb + Ca \dots \dots R_l$ と R_s の並列抵抗 $\dots e_5, e_6$

以上の6電圧を得て連立方程式を解けば、 R_l 、 R_s 、 R_b の3つが求められる。

図7 6電圧法

Fig.7. 6 Voltage method

(2-4) 補足

(i) 絶縁層局部電池電圧 E_l について 2電圧法の場合のみでなく、本論文で扱ったシミュレーションでは、ケーブル絶縁層内部に必ず局部電池電圧 E_l が発生しているとしている。これは貫通水トリーを生ずるほどに劣化した(したがって直流絶縁抵抗が測定可能である)CVケーブルの絶縁層内に、あたかも E_l なる起電力を有する局部電池が存在しているかのように見える現象があり、現実には外部回路に電流を供給し得るものである。 E_l の値について次のような観測例を示す。

図8に示す如くGPTの中性点を通じてマイナス極性の任意の電圧を注入し得るようになる。対象ケーブルは別途活線

図8 絶縁層局部電池電圧 E_L の観測

Fig.8. An Observation of E_L generated in the faulty cable insulation

下測定で $R_L=2M\Omega$ 以下、 $R_S=0.18M\Omega$ と測定された水トリー劣化CVケーブルである。遮へい端と大地間に $40\mu F$ のコンデンサを挿入し、その充電電圧を内部抵抗 $2M\Omega$ の直流記録電圧計で測定した。その様相を図9に示す。

GPT側からの電圧印加無しでまず+6Vもの飽和充電電圧が得られた。これは後述の如く防食層局部電池電圧 E_S からは決して期待できない大きな電圧である。GPT側から-10Vを印加すると、記録計指示電圧は低下を開始し-0.8Vに達した。印加電圧を-5Vとすると再び+極性に転じた。零レベルの通過はどの方向でも極めてスムーズであった。これより絶縁層内部の起電力は10Vに近いがそれ以下であることが判る。

このような現象は空間電荷などで説明できるものではなく、導体から遮へいまで貫通した自由電子の通過を確保するパスが存在し、また自由電子の連続供給があるものと解釈しなければならない。

この他の観測例も総合して3KV CVケーブルの E 値は9V (6KVの場合10Vただし参考値) という値を筆者は採用しているが、10KV CVケーブルでは17~20Vを観測したことがある。電圧極性は遮へい側が+とは限らず-の場合もある。

図9 遮へい端電圧の推移 (図8の実験結果)

Fig.9. A transition of the sheath voltage in the experiment Fig.8

(ii) 防食層局部電池電圧 E_S について 測定系に雑音電流を流す起電流要因としては、 E 起因のものより圧倒的にこの E_S 起因の方が大きく、またその発生頻度も大であることが経験的に判っている。 E_S 値と極性の分布は図10に示す如くである。

どちらの極性にせよ0.5Vをこえるものはほとんど無い。

図10 防食層局部電池の極性および電圧値の発生分布

Fig.10. Polarity and voltage of local cell E_S , statistical investigation

この集計からは外しているが、まれに1Vをこえる(それもいきなり数Vを観測する)場合は E 起因のものである。

防食層局部電池を構成するケーブル側の電極材は、銅、カーボンであり、他方の電極構成材は状況により様々であるが、銅、鉄、アルミ、亜鉛等であろう。大半が銅に対してマイナスの電位を持ち、その電位差は最大で1Vと見られる。つまり1Vまでは E_S として有り得ると見ても、それをこえる電圧が遮へい端大地間で観測されたら、 E_L が発生している、すなわち水トリーによる絶縁不良ケーブルであると認識できることになる。

3. 絶縁抵抗測定誤差についての考察

〈3.1〉防食層絶縁抵抗 R_S の低下が絶縁層絶縁抵抗 R_L 測定値に影響する現象 極端な例として図11に、一端が屋外露出エレファント端末になっていて、その分岐銅管縁切り絶縁部に雨滴が侵入すると防食層絶縁抵抗が低下する、20KV CVケーブルの約1年間にわたる $[R_L]$ 、 R_S 測定結果を示す。

本測定は3電圧法で得られたもので、電圧計分解能は0.01mVのものを用いているので、理論的な $[R_L]:R_S$ のシミュレーション結果は図12に示す如きものでなければならぬ。すなわち例えば R_S が $0.1M\Omega$ であっても10万 $M\Omega$ の R_L は充分に測定されるべきものである。しかるに図11に示す如き状況となり、 $R_S=0.1M\Omega$ ではわずか1000 $M\Omega$ 程度の $[R_L]$ 値として測定されている。一方では R_S が低くても $[R_L]$ が10万 $M\Omega$ 以上と測定される場合もあることが示されている。どうしてこのようなことが起り得るのかを以下に検討する。

〈3.2〉上記現象が発生する原因 〈3.1〉に示したような現象が発生する原因は、結論的にいうと、地電流打消し手段では排除できない不定雑音電圧 e_n が測定系に侵入するからである。安定した雑音電圧であるならそれがたとえ1Vと

図11 $[R_I]:R_s$ 関係測定例
Fig.11. $[R_I]$ vs. R_s relationship investigated on a 22kV CVT cable

図12 3電圧法における理論的 $[R_I]:R_s$ 関係曲線
Fig.12. Theoretical relationship between $[R_I]$ and R_s , 3 voltage method

というような大きな値であっても、地電流打消し手段により物理的に、または計算の過程で数式的に減算処理されるので、別に問題とならない。問題となるのは信号電圧印加前に動作していた雑音電圧 E_{n1} と、信号電圧印加後に変化した雑音電圧 E_{n2} との差電圧 $e_n = E_{n2} - E_{n1}$ であり、 e_n は大概の場合その値を予測したり実測したりすることのできない性質のものである。

さらにこの現象を拡大する要因が K という比例定数であることが数式検討の結果判った。 K は絶縁層絶縁抵抗 R_I 、防食層絶縁抵抗 R_s に対する比である。 R_I 測定に誤差を与える実効的な要因は、 e_n 単体ではなく、 Ke_n として K 倍に増幅される。故に同じ R_I 同じ e_n に対して防食層絶縁抵抗 R_s が低下するほど R_I 測定値は大きく影響される。同じ R_s 同じ e_n

であれば R_I が高いほど影響度が大きくなる。

〈3.3〉不定雑音電圧 e_n の侵入するルート e_n はどのような場合にどこへ侵入するのかを検討すると、雑音電圧発生源の如何を問わず、次の如き2つの代表的ケースをあげられる。

(i) 防食層絶縁抵抗 R_s に直列に侵入する場合 (図13)

図13 雑音電圧 e_n の侵入経路、 R_s へ侵入する場合
Fig.13. e_n , Intruded into R_s branch, R_s falls outside S/S

高圧系統接地機器および直流信号電源の存在する変電所内で、ここから送り出されるケーブルを測定する場合で、防食層絶縁不良箇所は変電所外に存在するという最も普通のケースである。

e_n 発生源の主たるものは

変動する E_s

変動する変電所接地電位

P_0, P_I 間の変動電流

であって、 E_s や E_s そのものではない。またその発生期間が直流信号電圧 E の印加に同期するものもあれば、無関係のものもある。

R_s が変電所内に落ちている場合は、変動する E_s だけが問題となる。

(ii) 検出抵抗 R_c に直列に侵入する場合 (図14)

図14 雑音電圧 e_n の侵入経路、 R_c へ侵入する場合
Fig.14. e_n , Intruded into R_c branch, R_s falls inside S/S

高圧系統接地機器および直流信号電源の存在する変電所内に R_s が落ちているが、ケーブル端末は変電所外にあって、したがって測定は変電所外で行なっているケースで余り多くない。

e_n 発生源の主たるものは(i)の場合と同じく

変動する E_s

変動する変電所接地電位

P_0 、 P_1 間の変動電流

である。 R_s が変電所外で P_2 点に落ちていれば、変動する E_s と、 P_1 、 P_2 間の変動電流だけが問題となる。

〈3.4〉不定雑音電圧 e_n 発生の際の様相 発生源ごとにどのような様相の e_n が発生しているのかを調査した例を以下に示す。

(i) 大地を迷走する直流電流によるもの この場合の発生源は直流電鉄のレール漏洩電流、外部電源防食装置による大地電流等で、前者の例を図15に示す。

これは神戸市内のある変電所の接地母線と、変電所フェンスより20m離れた地点間の電位差を測ったもので、日中は30mVに達する e_n が、深夜は2mV程度に収まっており、この地帯に多数集中している直流電鉄起因のものである。

図15 大地迷走直流電流に起因する e_n

Fig.15. Noise voltage due to adjacent electric railroads

(ii) 防食層局部電池の電圧変動によるもの 図11に示したケーブルの例で、わざと変電所外接地を採用して、遮へい端末との間で3電圧法で測定中の電圧変動状況を示す。この時の R_s 値は0.11M Ω 、検出抵抗 R_c 値は100k Ω である。10mV程度の不安定な電圧変動が観測されているが、天候が回復すると平坦となる。

図16 遮へい端対大地電圧の E_s 変動を
起因とする不安定性

Fig.16. Fluctuation of sheath voltage observed
on the cable shown in Fig.11.

(iii) 変電所接地電位の変動によるもの 変電所内に存在し、変電所外の負荷に電力を供給している直流電源があって、その大地漏洩電流が変電所接地抵抗を通じて電源に戻るとき、その電流値が不安定であるのでそれに応じた変電所接地電位変動を生ずる。

その1例を某社3kV変電所での実測例として図17に示す。この場合 e_n は200mV以上にも達しているが、これは例外的に大きな値で、通常は数十mVである。

直流電源が無ければ一般には5mV以下の変動で、問題は緩和される。

図17 変電所接地電位の変動例

Fig.17. Fluctuation of S/S grounding potential

(iv) 直流信号電圧印加に同期して発生する変電所電位の偏位 これは変電所外のどこかに対大地直流絶縁処置の施していない接地機器が残存しているが、直流重畳法を強行するような場合に発生するが、系統絶縁抵抗 R_B が極端に低い場合も同じである。

変電所内に設置した直流信号電源から電圧 E を高圧系統に注入すると、 E/R_B なる漏洩電流と変電所接地抵抗の積から成る電圧値だけ、変電所電位が印加前の値から偏位する。 E を切ると元へもどる。図18にその1例を示す。

E/R_B が0.31Aも流れているのに偏位は30mV程度であるから、変電所接地抵抗は0.1 Ω と極めて低いのか、または変電所外にとった接地がまだ変電所接地電位変動の影響下にあるのであろう。

図18 直流信号電圧印加に同期した変電所電位の偏位

Fig.18. Synchronized displacement of S/S
grounding potential

〈3・5〉絶縁抵抗測定値におよぼす e_n の影響の数式的解析

各測定手法ごとに、 e_n が R_s に侵入した場合、 R_c に侵入した場合につき、真の R_i を求め得る新しい計算式の誘導をまず行った。今まで実用的に用いて来た R_i 計算式には e_n の項が無い。新計算式上で $e_n=0$ とおくと従来式と同じ形となり、實際上これしか使うことはできない。これを実用式と称し、実用式で計算した絶縁抵抗値を $[R_i]$ とし、真値 R_i に対する比を β とすると、 β 値は e_n 、 R_i 、 R_s を設定すれば $[R_i]$ を求めなくても直接計算で求めることができ、各手法の e_n の影響の程度の比較を行なうのに便利である。故に β の計算式も導出した。

結果として得られた計算式を表2に示す。ただし煩雑をさけるため、 R_i 計算式は e_n が R_s に侵入した場合のみを示した。実用式では e_n がどの程度の大きさでどこに侵入しているのかは、元より問うところではない。 β 計算式のみ e_n 侵入箇所に応じて2つを示した。

各式の誘導詳細については割愛した。

表2に示された β 計算式から、各手法は次の3つのグループに分けられることが判った。

- (A) e_n の影響をほとんど受けないグループ
4電圧法 6電圧法
 - (B) Ke_n の形で影響を受けるグループ
Null電流法 Null電圧法 3電圧法
 - (C) e_n のみならず KE_s や E_i の影響を受けるグループ
2電圧法
- (B)と(C)のグループにつき $[R_i]$ と R_s の関係をシミュレーションした結果を図19および図20に示す。曲線は β 計算式に

のつとったもの、黒丸点は $e_n=+10\text{mV}$ の場合の $[R_i]$ 計算結果を示す。

どちらも e_n は R_s に侵入した場合のみを扱っている。 e_n が R_c に侵入した場合は、異極性の e_n が R_s に侵入した場合とほとんど同じであるので省略した。

(B)のグループにくらべて(C)のグループは極めて成績が悪い。これはシミュレーション条件として $E_i=9\text{V}$ 、 $E_s=0.2\text{V}$ が設定されているけれども、(B)のグループではこれらは打消されて e_n の影響のみが残るのに対し、(C)のグループでは打消しが無いうに、 E_s まで K 倍されて影響するからである。

(A)のグループであるが、4電圧法は短時間の交流停電を要することが致命傷となって実用性が無い。

6電圧法について実際にフィールドで実験してみると、検出電圧の変動が激しくてこれも実用にならないことが判った。

したがって理想的に見える(A)のグループはアイデア倒れで実用価値が無く、(C)のグループは絶縁良好のケーブルを絶縁不良と誤認する危険性があり、結局(B)のグループのみが Ke_n の形で影響を受けはするが、後に述べる諸手段の助力を得て実用になる方式であることが明らかとなった。

4. 絶縁抵抗測定誤差の導入を避ける手段

前述の如く、不定雑音電圧 e_n が測定系に侵入し、絶縁抵抗測定に誤差を与える現象が説明されたが、さて影響をできるだけ排除するにはどうすれば良いのかという設問に対しては以下に示す如き諸手段を提供する。

表2 R_i 、 $[R_i]$ 、 β 計算式
Table 2 Calculation formulas for R_i , $[R_i]$ & R_s

手法	R_i 計算式(e_n 折込み)	$[R_i]$ 計算実用式	$\beta = [R_i]/R_i$ 計算式	
			e_n, R_s に侵入	e_n, R_c に侵入
Null電流法	$R_i = \frac{a R_c R_s' (E - e_n)}{(E_i''' - E_s''') (R_i' + r) - e_n a R_c}$	$[R_i] = \frac{a R_c R_s' E}{(E_i''' - E_s''') (R_i' + r)}$	$\beta = \frac{E}{E + Ke_n}$	$\beta = \frac{E}{E - e_n(1+K)}$
Null電圧法	$R_i = \frac{R_s' R_c (E - e_n)}{R_c (V_i - V_i') R_i' / R - R_s' (E_s - E_n) - e_n R_c}$	$[R_i] = \frac{R_c E}{-(E_s - E_n)}$	$\beta \approx \frac{E}{E + Ke_n}$	$\beta \approx \frac{E}{E - e_n(1+K)}$
2電圧法	$R_i = \frac{R_s R_i' r_i \{ (e_i - e_i') (E - E_s) + e_n (E - e_i') \}}{e_i R_s (r_i - r_i') + E_i \{ r_i r_i' (e_i - e_i') + R_s (e_i r_i' - e_i' r_i) \} + e_n e_i r_i' (r_i + R_s)}$	$[R_i] = \frac{r_i r_i' (e_i - e_i') E_i}{e_i r_i' (r_i - r_i')}$	$\beta \approx \frac{E_i}{E_i + K(E_s + e_n)}$	$\beta \approx \frac{E_i}{E_i - e_n + K(E_s - e_n)}$
3電圧法	$R_i = \frac{R_s R_i' r_i (e_i - e_i') (E - e_i)}{e_i R_s (r_i - r_i') (e_i - e_i) + e_n \{ R_s (e_i r_i' - e_i' r_i) + r_i r_i' (e_i - e_i') \}}$	$[R_i] = \frac{r_i r_i' (e_i - e_i') E}{e_i (e_i - e_i') (r_i - r_i')}$	$\beta = \frac{E}{E + Ke_n}$	$\beta = \frac{E}{E - e_n(1+K)}$
4電圧法	$R_i = \frac{r_i (-E + e_n - e_i + e_i') (e_i - e_i' + E)}{(-E + e_n) (e_i - e_i' - e_i + e_i')}$	$[R_i] = \frac{r_i (-E - e_i + e_i') (e_i - e_i' + E)}{-E (e_i - e_i' - e_i + e_i')}$	$\beta \approx 1$	$\beta \approx 1$
6電圧法	$R_i = \frac{R_c \{ e_i - e_i' - E + e_n \} \{ 2(e_i - e_i' - E) (e_i - e_i' - E) + e_n (e_i - e_i' + e_i - e_i' - 2E) \}}{(E - e_n) (e_i - e_i' + e_i - e_i') (e_i - e_i' - E + e_n) - (e_i - e_i' - E + e_n) (e_i - e_i' - E + e_n) (e_i - e_i')}$	$[R_i] = \frac{2R_c (e_i - e_i' - E) (e_i - e_i' - E) (e_i - e_i' - E)}{E (e_i - e_i' + e_i - e_i') (e_i - e_i' - E) - (e_i - e_i' - E) (e_i - e_i' - E) (e_i - e_i')}$	$\beta \approx 1$	$\beta \approx 1$

図19 Null電流法 $[R_i]$: R_s シミュレーション結果

Fig.19. Simulation result on $[R_i]$ vs. R_s relationship by Null current method

図20 2電圧法 $[R_i]$: R_s シミュレーション結果

Fig.20. Simulation result on $[R_i]$ vs. R_s relationship by 2 voltage method

〈4・1〉測定系の接地を変電所外より持込む これは最も簡単に実用化して実効をあげ得るものである。変電所フェンスより少くとも20m以上離れていて、地下埋設物が存在せず、いかにも中立の大地電位を拾えると思われる地点で接地工事を施し、それからの接地線を測定装置まで持込む。変電所フェンス下を通る地帯では引込み接地線に耐圧養生を施す。変電所接地との間にはアレスタを設置し、かつ測定時以外は測定系の接地は変電所接地に戻しておくのが良い。

本法の欠点は、防食層絶縁不良が変電所内で発生している場合には逆効果となりかねないことであるが、それでも現方式で、大部分の防食層絶縁不良は変電所外で発生していることと比較するならば、格段の改良といえる。⁽⁵⁾

〈4・2〉変電所外よりの引込み接地と変電所接地の両方を交互に使うて2回の測定を行ない、データを選別する

これは上記方式の改良案であり、実際には自動化された測定システムでないと実現が困難であるが、理想的な方式といえる。

接地を切替えての2回の測定で得られた結果のうち $[R_i]$ の高い値を採用するとか、低い値を採用するといった選別方法をとるのではなく、1点のデータを構成するもととなった多数のサンプリング測定値の標準偏差を求めて、その小なる方の接地方式で得られた測定値をもって、不定雑音電圧 e_n の少ない環境で得られた真に近い測定値であるとするのである。⁽⁵⁾

〈4・3〉フィルタ要素からチョークコイルを排し、抵抗に替える 測定系の入力部には交流分減衰の目的をもって低域濾波器の挿入が実用上不可欠である。その直列要素として従来はチョークコイル(30~100H)を使用して来た。チョークコイルはその内部抵抗が低い点を買って来たのであ

るが、直流変動入力に対して微分効果により雑音電圧の増幅効果を生じていることが経験的に明らかとなったので、今ではチョークコイルの使用を止め、10kΩ程度の抵抗を直列要素としている。その効果の1例を図21に示す。

図21 チョークコイルを抵抗に代えた雑音電圧低減効果

Fig.21. Noise reduction effect by changing filter element L to R

〈4・4〉接点フラッシングの採用 測定系回路内には、ケーブル切替えに用いる強電用電磁接触器や、その他の補助リレーのa接点の複数が不可避免的に直列に存在する。その接点を通じて μA 、 nA クラスの電流を通さなければならぬのであるが、これらの接点は環境条件により絶縁被膜を形成することがあり、その場合は測定値の激しい変動としてあらわれ、測定が不可能となるほどの重大な支障を生じる。

この現象に対しては各ケーブル切替えスイッチの動作ごとに、自動的に直列全接点に1~2秒間、100mA程度の直流電流を流した後に測定を開始することで、劇的な改善効果をあげ得ることが判った。今ではこの接点フラッシングは必須の手段となっている。効果の1例を図22に示す。⁽⁴⁾

図22 測定系接点フラッシングによる雑音電圧低減効果

Fig.22. Noise reduction effect by current flushing through faulty contacts

5. むすび

直流重畳法で知られるケーブル活線下絶縁抵抗測定の代表的な6手法について個々に簡単な解説をまず行なった。

ついで絶縁層絶縁抵抗の測定に影響を与える、不定雑音電圧 e_n の発生源、測定系への侵入経路について調査検討結果を示し、その影響状況につき数式的解析を行なって、各手法について e_n を折込んだ新計算式を提示した。

その結果各手法は e_n の影響する程度によって(A)～(C)の3つのグループに別けられることになった。

e_n の影響が極めて少ないとされた(A)のグループの4電圧法、6電圧法は現実のフィールドでの使用が不可能視され、アイデア倒れの感がある。

e_n のみならず E_i や E_s の影響まで受ける(C)グループの2電圧法は、直流信号電圧を高圧系統に仕掛ける必要が無い利点を生かして、スクリーニングテスト的に用いることが考えられるが、それでも絶縁良好のケーブルを不良であると誤認する危険性が高いので、実用性は疑問である。

残る(B)グループは前記2グループの中間的存在で、 e_n のみが R_i と R_s の比 K により増幅された形で R_i 測定値に影響を与える。しかしながら現実フィールドで実用性を持つのはこのグループのNull電流法、3電圧法である。Null電圧法は手動バラックセットで用いるのに適している。

最後に不定雑音電圧 e_n の影響をできるだけ排除する手段として、変電所外よりの接地の持込みと、両接地を交互に使ってデータの偏差値の小なる方の測定値を選ぶ方法を提案した。さらに測定系自体の雑音電圧発生源の排除策として、チョークコイルに代える抵抗の使用と、測定の都度の接点事前フラッシングの効果の大なることを提示した。

ケーブル活線下絶縁測定技術の向上に本論文が裨益するところがあれば、筆者の喜びこれに過ぎるはない。

本論文のかけに東 勇夫氏の御努力があったことを特筆して、ここに謝意を表する。

(平成7年9月22日受付, 同7年12月22日再受付)

- (1) 中山忠晴：「ケーブル活線下絶縁監視装置 (OLCM) の実用化について」、電気学会絶縁材料研究会資料、EIM-86-34, 1986
- (2) T. Nakayama: "ON-LINE CABLE MONITOR DEVELOPED IN JAPAN", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, NO. 4, October 1991
- (3) 中山忠晴：「活線下ケーブル絶縁監視方法」、公開特許公報 昭59-125075、特願昭57-234791、出願昭57(1982) 12月29日
- (4) 中山忠晴：「微小電流測定装置および方法」、公開特許公報 平6-94758、特願平3-305936、出願平3 (1991) 11月21日
- (5) 中山忠晴：「AOLCMによる高圧ケーブル監視技術の向上」、'91設備診断技術シンポジウム、日本プラントメンテナンス協会

中山 忠晴

(正員) 1926年2月22日生まれ。43年12月大阪市立都島工業学校電気科卒業。44年1月住友電気工業(株)入社。絶縁材料、低ガス圧ケーブル、パイプタイプケーブルの開発研究に従事。68年以降ケーブル保守関係機器開発に従事。79年住電エンジニアリング(株)出向。88年専務取締役。現在同社顧問。