直流成分電流による CV ケーブル劣化診断法の 現場適用性検討

正 員 伊 賀 淳 (四国総研)
正 員 岡 本 達 希 (電力中研)
正 員 穂 積 直 裕 (電力中研)
非会員 佐々木 成 司 (四電技術コンサルタント)

The Application of On-Line Diagnoses for XLPE Cables by DC Component Method to On-Site Installed Cables

Atsushi Iga, Member (Shikoku Research Institute), Tatsuki Okamoto, Member,
Naohiro Hozumi, Member (CRIEPI), Seiji Sasaki, Non-member (Yonden Consultant)

This paper describes the water tree diagnoses of 6.6 kV class XLPE cables by DC component method. This method measures the DC current component by energizing the cable with AC high voltage, therefore, it would be suitable for on-line diagnoses. The DC component is considered to appear due to the rectifying effect of water trees inside the insulation.

In the laboratory test, the DC component showed a good correlation with the degradation. However, almost no correlation was seen in the on-site measurement. The authors found that the cause of this bad correlation is galvanic effect inside the jacket. This generates the noise current through the grounding circuit when the jacket resistivity is low. Based on this finding, the equivalent circuit of on-site measurement was proposed.

Considering the equivalent circuit, two methods were proposed to discriminate the true DC component out of noise current. One is to by-pass the noise current from the measurement apparatus, and the other is to statistically estimate the true DC component by using the transition in the jacket resistivity. The on-site test were carried out to confirm the applicability of these methods.

キーワード：直流成分，絶縁診断，水トリー，CV ケーブル

1. ま え が き

近年電力供給の信頼度向上に対する要望から，CV ケーブルの絶縁破壊事故を未然に防止するための絶縁劣化診断の必要性が高まっている。特に，コンピュータ，電子機器といった停電を嫌う装置の普及に伴い，停電を伴わず活線の状態で診断を行う方法が強く望まれている。配電線に多用されている 6 kV 級 CV ケーブルの劣化診断においては，浸水条件下で絶縁層に生じやすい水トリーによる絶縁性能の低下を診断することが最も重要と考えられる。

本論文で検討する直流成分法は，水トリーの発生し

たケーブルの心線と遮へい層との間に運転電圧程度の交流電圧を印加し，絶縁層に流れる微小な直流成分電流を検出して診断を行うものである⁽¹⁾。直流成分電流の発生メカニズムとしては，水トリーの整流作用が考えられており，実験室内の実験では，直流成分電流と劣化との相関が確認されている。この方法は原理的には活線状態でも実施でき，測定方法も簡単であるため，各所で装置が研究開発されてきた⁽²⁾。

しかし，この方法による診断装置を実際に布設されている CV ケーブルに適用した場合，正常なケーブルであっても大きな直流成分電流を検出し，その結果劣化ケーブルと判定するといった問題が指摘されるよう

になり、実布設の CV ケーブルを的確に診断する方法が必要となった。

そこで著者らは、この原因を究明する研究を行った。その結果、実布設のケーブルでは、遮へい層と大地との間に発生する起電力によって接地線回路に迷走電流が流れ、この迷走電流が絶縁層の水トリー劣化に起因する直流成分電流(以下、水トリー電流と略記)に重畳して測定されることを明らかにした。更に、実験室および実布設現場で実施した実験結果から、測定系における迷走電流発生等の等価回路を提案した。この等価回路に基づき、診断装置で測定した信号から迷走電流成分を分離する方法を検討した。本論文は、これらの結果についてとりまとめたものである。

2. 直流成分法による CV ケーブル劣化診断の問題点

CV ケーブルの劣化診断方法として、停電して実施する直流漏れ電流法、 $\tan \delta$ 法などがある。これに対して、活線で劣化診断する方法として直流成分法、活線 $\tan \delta$ 法、直流重畳法などがある。なかでも直流成分法は原理的に簡単に実施できることから、各所で装置が研究開発されてきた。しかし、この方法による診断装置を実際に布設されている CV ケーブルに適用した場合、前述のように正常なケーブルであっても大きな直流成分電流を検出し、その結果劣化ケーブルと判定するといった問題が指摘されるようになった。この問題点を明らかにするため、実験室および現場において、直流成分法で測定される信号と絶縁劣化の関係を調べる実験を行った。

絶縁劣化の評価方法としては、交流破壊電圧や水トリーの発生状況を調べるのが直接的であるが、ケーブルを破壊する試験であるため、実際に使用されてい

るケーブルでは適用できない。そこで、非破壊試験である直流漏れ電流法を絶縁劣化の評価指標とした。直流漏れ電流法は、ケーブルの運転を停止して、心線に直流高電圧を印加し、絶縁体中を流れる電流を測定する方法であり、現場での測定実施例が多く、絶縁劣化の評価方法として信頼性が高い。

図 1 に実験室内における直流成分電流測定回路を示す。ケーブルの接地線に接続された検出抵抗によって測定された接地線電流から、フィルタを用いて直流成分電流のみを抽出する。ケーブルは絶縁物によって大地より支持されているため、シース中には電流は流れず、測定される直流成分電流はケーブルの絶縁体を介して流れる水トリー電流のみである。

図 2 および図 3 は、このようにして測定した 6 kV 級 CV ケーブルの直流漏れ電流と直流成分電流の相関である。図 2 は 4~15 kV で 5,000~12,000 時間の条件で加速劣化されたケーブル、図 3 は変電所から劣化ケーブルとして撤去されたケーブルに関する測定結果を示している。図 2 では直流漏れ電流の増加、すなわちケーブル劣化と共に直流成分電流が増加しており、

図 1 実験室内における直流成分電流測定回路
Fig. 1. DC component measurement circuit for the laboratory test.

図 2 直流成分電流と直流漏れ電流の相関 (加速劣化ケーブルを実験室で測定したもの)
Fig. 2. Correlation between DC component and DC leakage current (acceleration-aged cable, measured in laboratory).

図3 直流成分電流と直流漏れ電流の相関
(撤去ケーブルを実験室で測定したもの)

Fig.3. Correlation between DC component and DC leakage current (removed cable, measured in laboratory).

また図3においても同様の結果となっている。すなわち、実験室での試験では直流成分電流と絶縁劣化の間にかなり強い相関が見られる。

なお、水トリー電流と絶縁劣化の相関については他の研究機関でも確認されている⁽³⁾⁽⁴⁾。また水トリー電流の方向は、水トリーが心線側、遮へい層側のいずれから発生しているかなどに依存して変化すると考えられる。著者らが実施した試験結果では、電流の方向と絶縁劣化には相関が見いだせず、その絶対値の大きさのみが絶縁劣化と良い相関を示した。そこで、本論文においては、直流成分電流の絶対値のみを採取うこととした。

次に、実布設したCVケーブルの測定回路を図4に示す。診断装置はCVケーブル接地線に接続し、接地線他端は開放した。一般に配電系統では、電源変圧器の二次側は非接地であるが、接地用変圧器（以下、GPTと略記）の一次側中性点が接地されているので、水トリー電流は破線のようにGPTを介したループを流れる。図5はこの測定系で測定された直流成分電流と直流漏れ電流の相関を調べたものである。実験室における結果と異なり、両者の間には明りような相関は見られない。

図6は研究所構内に新品ケーブルを布設し、直流成分電流の連続測定を実施した結果である。同図より、直流成分電流は時間と共に大きく変動していることがわかる。実験室では新品ケーブルの水トリー電流はほとんど観測されないが、現場布設ケーブルでは、何らかの要因により劣化に伴う信号成分以外の信号が重畳されており、図4のような従来の測定方法では正確な水トリー電流の測定が困難となっていることがわかる。

図4 現場における直流成分電流測定回路
Fig.4. On-site DC component measurement circuit.

図5 直流成分電流と直流漏れ電流の相関
(実布設ケーブルを現場で測定したもの)

Fig.5. Correlation between DC component and DC leakage current (on-site installed cable).

図6 実布設ケーブルの直流成分電流の時間変化

Fig.6. Transient in the DC component of an on-site installed cable.

3. 現場における測定誤差の要因

実験室内の測定では、ケーブルは絶縁物で支持されていたが、実布設ケーブルではシース表面は電氣的に

大地と直接接触していることが多い。従って、現場測定においては、直流成分測定時に測定装置と並列に有限のシース抵抗が入ることを考慮する必要がある。そこで多数の現場布設ケーブルについて、シース抵抗と直流成分電流の関係を調べた結果を図7に示す。同図から、シース抵抗と直流成分電流の大きさの間には良い相関があることがわかる。

このように直流成分電流がシース抵抗に依存する原因として、シース部分の起電力が考えられる。すなわち、実布設ケーブルのシース材料中には土壤中から侵入した不純物が多量に含まれていると考えられるが、このような不純物は水分の多い環境下において電気化学反応を生じ、シース両面の間に起電力を発生させる

図7 直流成分電流とシース抵抗の相関
Fig. 7. Correlation between DC component and jacket resistivity.

図8 シース起電力の測定回路
Fig. 8. Measurement circuit for the jacket electromotive force.

表1 シース起電力と接地電流の測定結果
Table 1. Measured value of the jacket electromotive force and the grounding current.

試験 ケース	水温 (°C)	シース起電力 (mV)	シース抵抗 (MΩ)	測定電流 予測値 (nA)	測定電流 実測値 (nA)
1	74	322	15.0	21.5	21
2	80	300	7.0	42.9	38
3	35	330	144	2.3	2

可能性がある。

そこで、現場からケーブルを撤去し、図8のように水中に浸けて、遮へい層に発生する開放電圧を高インピーダンス電圧計で測定した。その結果、表1に示すように、このケースでは300 mV程度の起電力が発生していることがわかった。更に、水温を変化させたときのシース抵抗をメガで測定した。図において、遮へい層の接地線に直流成分電流測定装置を挿入した場合に予想される測定電流は、シース起電力をシース抵抗で除して求められる。この予測値と、実際に測定された電流値はよく一致した。

以上の実験結果より、シース起電力が存在すること、およびシース抵抗が小さい場合には、このシース起電力による電流が現場測定における誤差要因として重要であることが明らかになった。

4. 現場測定系の等価回路

現場における測定で生じている現象を明確にするため、前章までの結果に基づいて、測定系の等価回路について検討した。前章の結果より、シースには起電力が存在し、シース抵抗と直列に接続されていると考えてよい。一方、絶縁体中を流れる水トリー電流は、印加交流電圧一定の条件の下では、迷走電流と同様に水トリー電流の起電力とその起電力と直列な絶縁抵抗より構成されていると考えられる。従って、現場測定時の等価回路はおおむね図9で表せると考えられる。なお、シース回路の起電力は、シース-大地間だけでなく、接地線-大地間にも存在することが考えられるが、等価回路においては簡単のため、シース-大地間の起電力で一括させることとする。

この等価回路を実布設のCVケーブルで確認するた

- (注)
(1) E_t , E_s の正負方向はいろいろな場合がある。
(2) 上図において通常 $R_i \gg R_s$ である。

図9 現場測定時の等価回路
Fig. 9. Equivalent circuit for on-site measurement.

表 2 実布設ケーブルの直流成分電流
測定結果

Table 2. Result of DC component measurement for an on-site installed cable.

		実 測 値	
		活線状態	停電状態
直 流 成 分 電 流	水トリ－電流 (I_t)	—	—
	迷 走 電 流 (I_{s0})	—	1.0
	合 成 電 流 (I_d)	4.5	—
絶 縁 抵 抗 (M Ω)	ケーブル絶縁抵抗 (R_t)	—	350
	シース抵抗 (R_s)	—	417
	合 成 抵 抗 (R_d)	188	—
起 電 力 (V)	水トリ－起電力 (E_t)	—	—
	シース起電力 (E_s)	—	0.5
	合成起電力 (E_d)	0.95	—

め、活線状態および停電状態で直流成分電流値、ケーブル絶縁抵抗値、シース抵抗値、シース起電力の値を測定した結果を表2に示す。

以下、添字に1が付いている場合は活線状態の、0が付いている場合は停電状態の測定値を表すものとする。まず、試験測定時間が数分以内であれば、迷走電流 I_{s0} は活線、停電状態にかかわらず同じ測定値が得られることがわかったため、真の水トリ－電流 I_{t1} は活線状態の直流成分電流測定値 I_{d1} から停電状態の迷走電流 I_{s0} を減じた値として求めることができ、表2のケースは3.5 nAとなる。

一方、ケーブル絶縁抵抗 R_t 、シース抵抗 R_s 、水トリ－部の起電力 E_t 、およびシース起電力 E_s を用いると、活線時に遮へい層に生じる合成起電力 E_d は

$$E_d = \frac{E_t R_s + E_s R_t}{R_t + R_s} \dots\dots\dots (1)$$

で表される。 R_{t0} 、 R_{s0} 、 E_{s0} および E_{d1} の実測値を上式に代入すると、活線状態の水トリ－起電力 $E_{t1} = 1.32$ Vとなる。この値をケーブル絶縁抵抗 R_t の停電状態における実測値で除して、水トリ－電流 $I_t = 3.8$ nAが得られる。この値は、上述の I_{d1} と I_{s0} から直接求めた値3.5 nAとよく一致する。

以上より、第3章で提案した等価回路の妥当性が確認された。

5. 水トリ－電流の分離検出法

以上のように、現場測定においては水トリ－電流にシースの起電力に起因する迷走電流が重畳されて測定されることが明らかになった。現場布設ケーブルの正確な劣化診断のためには、測定信号から水トリ－電流のみを分離する必要がある。そこで、前章で提案した等価

図 10 迷走電流バイパス法とその等価回路
Fig. 10. Noise current by-pass method and its equivalent circuit.

回路をもとに水トリ－電流を検出する方法を検討した。

〈5・1〉 迷走電流をバイパスする方法 ハードウェア的に迷走電流を分離する方法として効果が大きかった迷走電流をバイパスする法について述べる。

図10に測定回路の概略図を示す。遮へい層は直接接地する。GPTの接地端子は、直接接地せず、コンデンサを介して接地する。測定装置は、このコンデンサと並列に挿入され、直流成分のみを測定する。測定装置への交流分の流入を抑制するため、測定装置と直列に交流電流制限抵抗を接続する。

ここで、コンデンサとしては直流で高抵抗(200 M Ω 程度)、商用周波交流で低抵抗(50 M Ω 程度)の特性をもつフィルムコンデンサを適用した。

この方法では、大地と遮へい層間に発生するシース起電力は短絡されるため、迷走電流が測定装置に流入することはない。従って、水トリ－電流のみを精度良く測定できるものと考えられる。

従来による測定で10～30 μ Aの直流成分電流が得られたケーブル(シース抵抗0.5～2 k Ω)をこの方法で測定したところ、40 nA以下の直流成分電流が得られた。このことは、迷走電流のバイパスにより、正しい測定値が求められていることを示唆している。また表3は、この方法を直流漏れ電流法などに基づいて「要注意」と判定された実布設ケーブルに対して適用した結果である。迷走電流バイパス法で測定し

表 3 迷走電流バイパス法の現場適用結果
Table 3. Result of the applicability test for the noise current by-pass method to an on-site installed cable.

活線状態での直 流成分電流測定 値	停電状態での直 流成分電流測定 値	水トリ－電流計 算値	迷走電流バイパ ス法による水トリ －電流測定値 (nA)
I_{d1} (nA)	I_{s0} (nA)	$I_{d1}-I_{s0}$ (nA)	
15	8	7	7

た値と、「活線状態と停電状態の直流成分電流の差から求めた値」(第4章における $I_{d1}-I_{s0}$)を比較した結果はよく一致し、迷走電流バイパス法の妥当性を示している。

〈5・2〉 シース抵抗の経時変化を利用した方法

前節の方法では、GPTの接地側にコンデンサを挿入する必要がある。現場の事情によっては系統保護および保安上の懸念から、コンデンサの挿入が難しい場合が考えられる。そこで、そのような場合にも対応できる方法として、シース抵抗の経時変化を利用した方法を検討した。

図9の等価回路によれば、検出される直流成分電流は、シース抵抗に直列の起電力 E_s と水トリ－劣化部分の起電力 E_t によって生じる。検出器で検出される直流成分電流 I_d は、次式で表すことができる。

$$I_d = \frac{R_s}{R_s + R_m} \frac{E_t}{R_t + \frac{R_s R_m}{R_s + R_m} + R_g} + \frac{R_t + R_g}{R_t + R_m + R_g} \frac{E_s}{R_s + \frac{(R_t + R_g) R_m}{R_t + R_g + R_m}}$$

$$R_g \ll R_s, R_t \text{ より,}$$

$$= \frac{R_s}{R_s + R_m} \frac{E_t}{R_t + \frac{R_s R_m}{R_s + R_m}} + \frac{R_t}{R_t + R_m} \frac{E_s}{R_s + \frac{R_t R_m}{R_t + R_m}}$$

.....(2)

$$R_t \gg R_m \text{ また } R_m > \frac{R_s R_m}{R_s + R_m} \text{ のため}$$

$$R_t \gg \frac{R_s R_m}{R_s + R_m}$$

$$\text{と考えてよいから}$$

$$= \frac{R_s}{R_s + R_m} \frac{E_t}{R_t} + \frac{E_s}{R_s + R_m}$$

$$= \frac{1}{R_s + R_m} \left(\frac{R_s}{R_t} E_t + E_s \right)$$

ここで、 $E_t/R_t = I_t$ (水トリ－電流) とおくと

図 11 シース抵抗の経時変化を利用した水トリ－電流の推定方法

Fig. 11. Estimation method for the true DC component using the transition in jacket resistivity.

図 12 推定結果と実測値の比較

Fig. 12. Comparison between the DC component estimation and the measured value.

$$= \frac{1}{R_s + R_m} (R_s I_t + E_s)$$

$$= \frac{1}{R_s + R_m} (E_s - R_m I_t + R_m I_t + R_s I_t)$$

$$= \frac{1}{R_s + R_m} (E_s - R_m I_t) + I_t \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 R_m : 検出器 (CV ケーブル活線劣化診断装置) の検出抵抗、 R_g : GPT などの抵抗値、その他の記号は表2による。従って、シース起電力 E_s 一定の条件のもとでシース抵抗 R_s が時間的に変動した場合には、検出器に流れる直流成分電流 I_d は、 $1/(R_s + R_m)$ に比例して変化する電流と水トリ－電流 I_t の合計である。 R_m は既知の抵抗値であり、 R_s は直流成分電流測定のために合せて測定可能である。そこで、図11に示すように、 $1/(R_s + R_m)$ を横軸に、 I_d を縦軸にとって経時変化をプロットし、得られた直線を外捜して、 $1/(R_s + R_m) \rightarrow 0$ のときの I_d を求めると、水トリ－電流 I_t を知ることができる。また、シース起電力 E_s が時間的に変化するなどの理由により、プロットが完全に直線に乗らない場合には、各プロット

の回帰直線から I_t を推定することができる。

図 12 はこの方法で求めた I_t の値と、停電時に迷走電流を測定して、ほぼ同時刻の活線時の直流成分電流から減じて求めた I_t の値を比較したものである。両者はよく一致し、本方法の妥当性を示している。

6. あとがき

(1) 直流成分電流法を従来の測定回路のまま実布設ケーブルに適用した場合、劣化との良い相関が見られない場合があることを明らかにした。

(2) このとき測定される直流成分電流は、シース抵抗の影響を大きく受けることを明らかにした。

(3) 実験によってシース起電力の存在を明らかにし、これによって接地回路に流れる迷走電流が直流成分電流法における測定誤差の要因となっていることを解明した。

(4) 現場測定における測定系の等価回路を提案した。

(5) 等価回路に基づいて、迷走電流を除去する方法、すなわち迷走電流をバイパスする方法と、シース抵抗の経時変化を利用して統計的に迷走電流を除去する方法を検討し、両者の有効性を確認した。ケーブル布設現場の状況に応じて、これらの方法を適宜使い分けることにより、直流成分電流法の測定精度の向上を図ることができると考えられる。

今後、本論文で検討した迷走電流分離方法について、理論的検討と、実験室および現場における実績を重ねながら実用化を進める予定である。

本論文をとりまとめるにあたり、御指導、御協力を賜った(株)四国総合研究所 武智 啓氏をはじめ研究所各位、ならびに(財)電力中央研究所 深川裕正氏、今城尚久氏をはじめ研究所各位、および現場試験などで御協力いただいた、四国電力(株)本店配電部、送变电部、同営業所、電力所、電力区の各位に深く感謝の意を表します。

(平成 3 年 1 月 16 日受付, 同 3 年 5 月 27 日再受付)

文 献

- (1) 岡本・鈴木・池田・吉本・願化・北川:「架橋ポリエチレン電力ケーブルの直流分検出による活線劣化診断」, 電中研依頼報告, 184515 (昭 60)
- (2) 伊賀:「直流成分電流検出方法による活線ケーブル劣化診断の適用」, OHM, p. 47 (昭 63-2)
- (3) 大西・浦野・望月・小谷・柚・神野:「CV ケーブルの活線劣化診断装置」, 電気学会絶縁劣化研究, EIM-86-35 (昭 61)
- (4) 勝山・阿部・武・丸山・石原・小泉:「高圧 CV ケーブル用活線絶縁劣化診断測定器の開発」, 古河電工時報, No. 82 (昭 63)

伊賀 淳 (正員)

昭和 43 年岡山大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月四国電力(株)入社。四国電力(株)で配電, システム関係の業務に従事。52 年から四国電力(株), (株)四国総合研究所でビル空調システム, 太陽光発電システム, CV ケーブル劣化診断装置の研究開発に従事。

岡本 達希 (正員)

昭和 26 年 9 月 21 日生。51 年 3 月名古屋大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月(財)電力中央研究所入所。現在横須賀研究所電力部新地中化研究室専門役。工学博士。58 年電気学会論文賞。主として, 高分子絶縁材料に関する研究に従事。IEEE 会員。

穂積 直裕 (正員)

昭和 32 年 4 月 2 日生。58 年 3 月早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻博士前期過程修了。同年 4 月(財)電力中央研究所入所。現在, 横須賀研究所電力部新地中化研究室勤務。工学博士。平成元年電気学会論文賞。主として, 有機絶縁材料に関する研究に従事。

佐々木 成司 (非会員)

昭和 57 年徳島県立徳島東工業高校電気科卒業。同年 4 月(株)四電技術コンサルタント入社。配電関係機器, CV ケーブル劣化診断装置の開発業務に従事。