損失電流高調波成分によるCVケーブル劣化診断法の検討

正員 八木 幸弘 (古河電気工業)
 正員 田中 秀郎 (古河電気工業)
 正員 武藤 秀二 (古河電気工業)
 正員 木村 人司 (古河電気工業)

Study on Diagnostic Method for XLPE Cable by Harmonics in Loss Current

Yukihiro Yagi, Member, Hideo Tanaka, Member, Hideji Muto, Member, Hitoshi Kimura, Member (The Furukawa Electric Co., Ltd.)

Degradation of XLPE cable by water trees gives rise to harmonics in the loss current. The authors are engaged in development of diagnostic methods for water tree degradation utilizing these harmonic components. As a result of this development, the following was discovered. The harmonic components occurring in the loss current provide an extremely good indication of the state of degradation. Harmonic components arise as a result of the nonlinear voltage-current characteristic of water trees. An equivalent circuit which incorporates this nonlinearity of water trees faithfully reproduces the loss current waveforms obtained in experiments. When a voltage at a frequency differing from commercial frequencies is superposed, a degradation signal occurs at a characteristic frequency.

キーワード：CVケーブル、水トリー、劣化診断、損失電流、高調波、相互変調

1. まえがき

架橋ポリエチレン絶縁ケーブル（CVケーブル）は布設及び保守管理の容易さから、油浸紙絶縁ケーブル（OFケーブル）にかわり、現在では電力ケーブルの主流となっている。一方でCVケーブルには水トリー劣化という特有の劣化形態が存在する。遮水構造を持たないCVケーブルが水の存在する環境下において使用された場合、半導電層の突起や絶縁体中の異物もしくはボイドといった電界集中部に水が凝集して水トリーが発生する。この水トリーは時間と共に電界方向に進展し、それに伴ってケーブルの絶縁性能が低下していくことが各種の撤去ケーブル調査から明らかにされている。

劣化診断は経年劣化によるケーブルの絶縁破壊事故を未然に防止し、計画的な設備更新の指針を得るためにも必要不可欠な技術である。現在では、主として6kV級以下のCVケーブルを対象とした劣化診断方法がいくつか開発され、実際の現場で適用されるに至っている。しかしながら、22kV級以上のCVケーブルにはそれらをそのまま適用することはできない。これは、従来の診断方法では絶縁体を橋絡するほどまでに長く進展した水トリーからの信号を検出できれば十分であったのに対して、22kV級以上のケーブルではその運転ストレスの高さゆえに、絶縁体を橋絡する前から水トリーが有害性を示しはじめると考えられているためである⁽¹⁾。このため、22kV級以上のケーブルを対象とした劣化診断には、未橋絡水トリーの劣化程度を検出可能

とする、より精度の高い方法が必要とされる。

水トリーが絶縁体を橋絡していなくても、水トリー劣化と比較的相関の良い結果を与える劣化診断方法として誘電正接法（ $\tan\delta$ 法）がある⁽¹⁾。 $\tan\delta$ は絶縁体中を流れる電流中の印加電圧より90°進み位相の電流（容量性電流）に対する印加電圧と同位相の電流（損失電流）の比で表される。水トリーは交流電界下において損失因子として働き、損失電流の増加、すなわち $\tan\delta$ の増加を引き起こす。しかし、 $\tan\delta$ は前述の通り容量性電流に対する損失電流の比であるため、絶縁体の一様劣化に対しては非常に有効な指標となり得るが、水トリーのように絶縁体中に損失因子が散在する劣化形態の場合、 $\tan\delta$ の値は水トリーの発生数の影響を大きく受けるために劣化程度との相関が低くなることが懸念される。一方、絶縁体の交流損失に関する情報をより詳しく、かつ直接的に把握する方法として損失電流波形の観測が提案されている⁽²⁾。また、水トリー劣化した絶縁体の損失電流波形は高調波を含み、歪んだものとなることが報告されており、損失電流波形には $\tan\delta$ には現れない水トリーの情報が含まれていることが期待される^{(3),(4)}。

本研究では、水トリー劣化と損失電流中に発生する高調波成分との関係を実験により確認した。また、水トリーの非線形な電圧-電流特性を実測して確認した上で、この非線形特性を考慮に入れた未橋絡水トリー劣化絶縁体の等価回路を構築し、これを用いたシミュレーションにより高調波成分の発生機構に関して検討を行った。さらに、より実用的な診断方法として、水トリーの非線形特性に基づく相

互変調作用を利用した方法（損失電流相互変調法）を考案し、シミュレーションと実験によりその効果を確認した。

2. 水トリー劣化と損失電流波形に関する実験

〈2.1〉 試料 実験にはシート試料とケーブル試料を用いた。シート試料は直径 90 mm、厚さ 0.5 mm の円盤状に加工された架橋ポリエチレンに対して、水トリーを発生させるために次の処理を行ったものである。まず、試料片面の中央部のある領域（直径 5～10 mm）に対してサンドペーパーで表面を荒らし、この部分に水電極（NaCl 溶液、1 mol/l）を設けた。もう一方の面には導電性ペイントを塗布して低圧側電極とし、両電極間に高周波電圧（3.0～3.4 kV、1 kHz）を一定期間印加して水トリーを発生させた。この高周波電圧の印加時間を調整することで、異なる劣化程度の試料を作成した^{(5),(6)}。

ケーブル試料としては、22 kV CV ケーブル（絶縁厚 6 mm）の新品、実線路撤去品及び高周波加速劣化品を測定に供試した。これらは、いずれも乾式架橋方式で製造された三層同時押し出し品であり、試料長は 5～7 m である。高周波加速劣化品は、試料の一部分の絶縁体表面をサンドペーパーで荒らした後に、この部分を NaCl 溶液に浸水させて 12.7 kV、1 kHz の電圧を一定期間印加したものである。

〈2.2〉 実験方法 損失電流は図 1 に示すように、基本的には $\tan \delta$ 測定と同様の回路構成で測定される。試料と並列に標準コンデンサを配置して電圧を印加して両者に流れる電流をブリッジ回路に入力する。ブリッジ回路では、標準コンデンサに流れる電流を用いて、試料を流れる電流から容量性の電流を除去することで損失電流を得る。ここで用いた測定系では 1 kHz 以下の周波数において、利得の周波数特性はフラットであり、位相回転も生じていない。

図 1. 損失電流測定回路

Fig.1 Measurement circuit for AC loss current

シート試料の場合は 1 kV、ケーブル試料の場合は運転電圧である 12.7 kV を印加電圧として測定した。電界としてはいずれも 2 kV/mm である。なお、実験に用いた印加電圧の高調波含有率は、1% 以下であった。得られた損失電流波形をデジタルオシロスコープで離散数値データとして取得し、FFT 解析により基本波成分と高調波成分に分離した。印加電圧を $V = V \sin \omega t$ とした場合、損失電流は次式のように表される。

$$i_{\text{loss}} = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(\omega t + \theta_n) \quad \text{ここで、} \theta_1 = 0 \quad [1]$$

測定後の試料については、シート試料及びケーブル試料とも AC 破壊試験を実施して破壊性能を確認した。シート試料の場合は開始電圧 3 kV / 1 分で 1 kV / 1 分昇圧の条件とし、ケーブル試料の場合は開始電圧 30 kV / 5 分で 5 kV / 5 分昇圧とした。なお、撤去ケーブル試料の破壊試験では前駆遮断を行うことにより、破壊起点となった水トリーを同定した。シート試料及び高周波加速劣化ケーブル試料については、水トリー発生領域の絶縁体スライス片を顕微鏡で観察することにより、水トリー最大長を計測した。

〈2.3〉 結果および考察 図 2 に示した波形は劣化処理を全く施していないシート試料、および 3.0 kV の高周波電圧を 100, 300, 500 時間印加したシート試料において測定された損失電流波形である。なお、図中にはそれぞれの試料の水トリー発生状況を断面写真で示した。

図 2. 水トリー劣化シートの損失電流波形

Fig.2 AC loss current waveform of water tree aged XLPE sheet specimens

印加電圧が単一の周波数（50 Hz）の正弦波であるにも関わらず、水トリー劣化の進行によりその損失電流波形が歪んでいくことがわかる。それぞれの損失電流波形の FFT 解析結果から、この歪みの原因は奇数次の高調波成分、特に第 3 高調波成分の発生によるものであることが確認された。

言い換えれば、この損失電流中に発生する第 3 高調波成分を評価することによって、水トリー劣化に関する情報が得られることが期待できる。第 3 高調波成分を評価する場合、特性量としては [1] 式に示したように振幅 I_3 と重畳位相 θ_3 の 2 つが考えられ、図 2 の各波形には FFT 解析によ

り得られたこれらの値を併記した。このように、水トリー劣化の進行に従って I_3 が増加するとともに、 θ_3 の値も一定方向に推移する傾向があることが確認できる。

なお、このような水トリー劣化による損失電流波形の歪みは、図3に示すように水トリー劣化したケーブル試料においても観測されるものであり、シート試料特有の現象ではないことがわかる。

図3. 損失電流波形 (22 kV 劣化ケーブル)
Fig.3 AC loss current waveform (22 kV aged cable)

水トリー劣化の程度と損失電流中に発生する第3高調波成分との関係をさらに詳しく把握するために、 I_3 、 θ_3 と試料中の水トリー長及び試料の破壊性能との関係を整理した結果が図4～図7である。

図4及び図5は θ_3 と水トリー長との関係及び破壊性能との関係を示したものである。このように、シート試料及びケーブル試料の結果とも、水トリーの進展及び破壊性能の低下とともに θ_3 が -60° の側から 0° の方向へ相関良く推移しており、劣化指標としての有効性が期待される結果となった。一方、図6及び図7にはシート試料の結果として、 I_3 と水トリー長及び破壊性能との関係について示した。こちらは、劣化進行とともにその値が増加する傾向を示すものの、 θ_3 の場合と比較してばらつきが大きいものとなった。なお、図6及び図7にはケーブル試料の結果を記載していないが、ケーブル試料の I_3 に関する結果は、さらにばらつきの大きなものであった。

これらの結果は、 I_3 という特性量が水トリーの発生数に大きく影響されることを意味するものである。高調波成分の発生が水トリーに起因するものであるならば、測定される I_3 は個々の水トリーが発生する信号の合計、厳密には個々の水トリーが発生する第3高調波電流のベクトル和の絶対値となるので、当然ながら水トリーの発生数に大きく影響を受けるものと考えられる。同時に、 θ_3 が水トリー発生数に影響を受けにくい特性量であることも理解できる。水トリー発生領域の異なるシート試料で別途実施した検討ではこの傾向が顕著に現れており、上記のことを支持するものである⁽⁵⁾。従って、損失電流中に発生する第3高調波成分の大きさ (I_3) のみを劣化指標として用いた場合には、画一的な評価ができなくなるといった $\tan\delta$ と同様の問題点を抱えてしまう可能性が大きい。ただし、高調波成分の発生は水トリーの単純な損失特性に起因するものではないと考えられ、 $\tan\delta$ とは異質の情報を I_3 が反映している可能性はあるものと考えられる。

図4. θ_3 と水トリー長の関係
Fig.4 Relation between θ_3 and water tree length

図5. θ_3 と破壊性能の関係
Fig.5 Relation between θ_3 and break down strength

図6. I_3 と水トリー長の関係
Fig.6 Relation between I_3 and water tree length

図7. I_3 と破壊性能の関係
Fig.7 Relation between I_3 and break down strength

3. 高調波成分の発生機構に関する考察

〈3.1〉 水トリーの電圧-電流特性 入力周波数以外の周波数が発生することは、回路中に何らかの非線形要素が存在することを意味する。水トリー劣化の進行に応じて高調波成分の発生状況が変化する実験結果を踏まえれば、水トリーがその非線形要素に相当することは容易に推測される。水トリーの非線形な電気伝導特性については、複数の印加電圧下で測定された電流の実効値データからそれを示唆した報告例がある^{(7),(8)}。今回筆者等は、交流印加電圧波形及びその場合に水トリー中を流れる電流波形を実測し、それらの瞬時値データから水トリーの電圧-電流特性を定式化し、その非線形性を把握することを試みた。

水トリーの発生したシート試料の厚さ方向（電界方向）に残存する健全絶縁体部分を削り落として作成した橋絡水トリー試料を用いて、図8に示すように50 Hzの電圧400Vを印加した際に流れる電流を10 kΩの抵抗で測定した。

図8. 橋絡水トリーの電流測定

Fig.8 Measuring current of bridged water tree

図9. 水トリーのV-I特性

Fig.9 V-I characteristics of water tree

こうして得られた電流には試料中の健全絶縁体部分を流れる電流が含まれており、厳密には水トリー部分のみを流れる電流とは異なる。図9(a)に示した波形は、測定された電流から印加電圧より位相が90°進んだ成分を除去して

得た水トリー部分のみを流れる電流 I と印加電圧 V の波形である。図9(b)はそれらの瞬時値データを V - I 平面上に描いたものであり、図中のプロットは個々の瞬時値データを示し、曲線は最小二乗法により求めた近似曲線である。

このように、交流電圧下における水トリーの電圧-電流特性が、電圧の上昇とともに電流が急増する非線形なものであることが確認された。また、その関係は[2]式のように、電圧の1乗の項と3乗の項の和で近似できる。つまり、 r は線形抵抗要素に相当し、 k は非線形の程度を示す定数と見ることができる。しかし、この式だけでは第3高調波成分の発生を説明できても、その重畳位相が変化することを説明できない。換言すれば、第3高調波成分の重畳位相の変化は、電界方向に健全絶縁体が存在する未橋絡水トリーゆえの現象であるということの意味するものである。

$$I = \frac{1}{r}(V + kV^3) \quad [2]$$

〈3.2〉 非線形性を考慮した等価回路 未橋絡水トリーを含む絶縁体の等価回路としては一般的に図10に示すものが考えられる^{(9),(10)}。つまり、 C_0 と R_0 の並列部分は水トリーが発生していない領域の絶縁体を表し、 R は水トリーを、 C は水トリー先端から対向電極間に存在する健全絶縁体部分を表す。厳密には水トリー部の R に並列な容量要素、及び残存絶縁部分の C に並列な抵抗要素が存在するが、水トリーの導電性の高さから、これらはいずれも無視できるものとした。

図10. 水トリー劣化絶縁体の等価回路

Fig.10 Equivalent circuit of insulation with water tree

損失電流は R 、 C 直列部分を流れる電流 i_{WT} の印加電圧と同位相の成分 i_{WTloss} と、 R_0 を流れる電流 i_{loss} の和で表される（ C_0 は損失電流に寄与しない）。ただし、ここで議論するような低電界領域（ ~ 2 kV/mm）では、未劣化絶縁体の抵抗要素 R_0 が水トリーのような著しい非線形性を示すとは考え難く、損失電流中の高調波成分発生への寄与は無視できるとして、 R 、 C 直列部分のみを検討対象とした。水トリーが[2]式で示される特性を有するとすれば、この R 、 C 直列部分に流れる電流 i_{WT} は次式で与えられる。

$$i_{WT} = \frac{1}{r}(\dot{V}_R + k\dot{V}_R^3) = C \frac{d}{dt}(\dot{V} - \dot{V}_R) \quad [3]$$

〈3.3〉 損失電流波形のシミュレーション 未橋絡水トリーが発生した絶縁体の損失電流波形をシミュレートするには、まず[3]式を満足する $\dot{V}_R$ を求めて i_{WT} を算出し、

この i_{WT} 中から容量成分を除去することで導出できる。しかし、[3] 式は解析的には解くことができないため、数値計算的手法を用いることになる。

シミュレーションにおいて想定したモデルは、0.5 mm 厚のシート試料に周波数 50 Hz の正弦波交流電圧 1 kV を印加した場合である。図10中の R, C 直列部分の幾何形状を直径 1 mm の円柱とし、水トリーの長さ L 、抵抗率 ρ ([2] 式の $V=0$ における傾き r を決定する)、非線形定数 k を与えて計算した。水トリー劣化の進行とともに損失電流及び高調波成分が増加し、かつ第3高調波成分の重畳位相 θ_3 が -60° の側から 0° の方向へ移行していくという実験結果を満足するように未知パラメータ (r, k) を設定して得られた損失電流波形を図11に示す。図中の (a), (b), (c) はそれぞれ、シート厚の 50, 70, 90 % にまで進展した水トリーを想定した場合の計算結果である。

このように、水トリーに適当な非線形性を考慮することによって、例えば図2に示したような損失電流の実測波形の特徴（第3高調波成分の発生と重畳位相の移行）を再現することができる。図12は (a), (b), (c) それぞれの場合において設定した水トリーの $V-I$ 特性を示したものである。(a), (b), (c) の順に曲線の傾きが大きくなり、かつ曲率が小さくなる方向に推移する結果は、劣化進行過程において

図11. 計算により得られた損失電流波形
Fig.11 Calculation of AC loss current waveform

図12. 劣化進行過程における水トリーの $V-I$ 特性の推移
Fig.12 Aging and change of water tree's $V-I$ characteristics

水トリーの導電性が増加するとともに非線形性の程度も増大していくことを意味するものである。図9からは非線形定数 $k = 7 \times 10^{-6}$ が得られ、抵抗率 ρ は試料中の実効的な水トリー発生領域を正確に見積れないため厳密な値は導出できないが、 $10^{-7} \sim 10^{-8} \Omega \cdot m$ 程度が導かれた。これより、計算に使用した値はおおよそ現実的なものと考えられる。

また、劣化進行とともに水トリーに加わる電圧 V_R は印加電圧 V に比べて進み位相で現れる結果となった。この位相変化は θ_3 の変化の方向と一致しており、劣化進行における θ_3 の移行はこの V_R の位相変化に起因して生じるものであると考えられる。この V_R の位相は水トリーの特性値 (r, k) と残存絶縁部分の C で決定されるものである。したがって、逆に考えれば θ_3 は残存絶縁部分の情報（水トリー長の情報）を反映した値ということであり、劣化指標としてふさわしい特性量であると考えられる。

4. 損失電流相互変調法

<4.1> 第3高調波成分を用いる劣化診断法の問題点

一般的に電力系統電圧には奇数次の高調波成分が恒常的に含まれており、その中でも第3高調波成分は他と比較して大きいものであるとされている⁽¹¹⁾。印加電圧中にもともと第3高調波成分が含まれている場合、この影響により損失電流中に水トリー劣化とは無関係の第3高調波成分が現れてしまい、これと本来の劣化信号を分離することができないため、正確な診断ができなくなることがある。この印加電圧中の第3高調波成分による誤差を回避するためには、十分に高調波対策が施された電源を用意する必要があるが、これでは機器サイズが大型化してしまい実用的ではない。

上記の問題は、水トリーからの劣化信号がノイズの多い周波数領域に発生することがそもそもの原因となっている。したがって、この劣化信号をノイズ環境の良い他の周波数領域に発生させることが可能ならば、この問題を解決することができる。ここでは、第3高調波成分以外に劣化信号を発生させる方法として、2種の異なる周波数からなる印加電圧を用いる方法について検討した。

<4.2> 異周波数入力時の非線形要素の応答

[2] 式で与えられる特性を示す非線形要素に対して、2種の異なる周波数 ($\omega_1 = 2\pi f_1, \omega_2 = 2\pi f_2$) からなる電圧 ([4] 式) を入力した場合の応答は [5] 式の通りとなる。ただし、[2] 式の特性は周波数 f_1, f_2 間で周波数依存性を持たないとする。

$$V = V_1 \sin \omega_1 t + V_2 \sin \omega_2 t \quad [4]$$

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{r} (V + k V^3) \\ &= I_{\omega_1} \sin \omega_1 t + I_{\omega_2} \sin \omega_2 t \\ &\quad + I_{3\omega_1} \sin 3\omega_1 t + I_{3\omega_2} \sin 3\omega_2 t \\ &\quad + I_{2\omega_1 - \omega_2} \sin(2\omega_1 - \omega_2)t + I_{2\omega_1 + \omega_2} \sin(2\omega_1 + \omega_2)t \\ &\quad + I_{\omega_1 - 2\omega_2} \sin(\omega_1 - 2\omega_2)t + I_{\omega_1 + 2\omega_2} \sin(\omega_1 + 2\omega_2)t \end{aligned} \quad [5]$$

ここで、 $I_{\omega_1} \cdots I_{\omega_1 + 2\omega_2}$ は r, k, V_1, V_2 で表される定数

このように、2種の異なる周波数 ω_1 , ω_2 を非線形要素に入力した場合、その応答には入力周波数である ω_1 , ω_2 の他に $3\omega_1$, $3\omega_2$, $2\omega_1 \pm \omega_2$, $\omega_1 \pm 2\omega_2$ なる周波数成分が発生する。このうち、 $3\omega_1$, $3\omega_2$ は ω_1 , ω_2 をそれぞれ単独で入力した場合においても発生する高調波歪み現象に起因する周波数成分（第3高調波成分）である。一方、 $2\omega_1 \pm \omega_2$, $\omega_1 \pm 2\omega_2$ は入力周波数である ω_1 及び ω_2 が非線形要素において相互に作用することにより発生する相互変調歪み現象に起因する周波数成分（相互変調波）である。

水トリー劣化したCVケーブルにおいてもこの相互変調波が発生するならば、これを劣化診断に応用可能と考えられる。例えば、 $f_1 = 50 \text{ Hz}$, $f_2 = 100 \text{ Hz}$ とすれば、0, 150, 200, 250 Hz が相互変調波に相当する。これを損失電流測定に応用した場合、これまで劣化信号としていた第3高調波成分（150 Hz）に加え、相互変調作用により第4高調波成分（200 Hz）にも劣化信号が発生することが期待される。ここで相互変調波として発生する 200 Hz という劣化信号は、50 Hz の印加電圧に対しても、また 100 Hz の印加電圧に対しても偶数次の周波数に相当するものである。つまり、この方法によれば、電源中に含まれる奇数次高調波成分の影響を受けることのない、耐ノイズ性に優れた高精度の劣化診断法を実現することができると考えられる。

ただし、[5] 式は非線形要素に電圧がすべて加わった場合、つまり橋絡水トリーの場合の例に過ぎない。未橋絡水トリーの場合の応答は、回路方程式が非線形微分方程式となるため解析的に相互変調波を導出することはできない。そこで、先の水トリーの等価回路を用いたシミュレーションにより検討を行い、さらに水トリー劣化したシート試料及びケーブル試料を用いた確認実験を行った。

〈4.3〉 シミュレーション シミュレーションに使用したモデルは図11(c) で用いたものと同じであり、0.5 mm の絶縁厚の 90 % にまで水トリーが進展したシート試料を想定したモデルである。このモデルに対し、まず周波数 50 Hz の電圧 $V_1 = 1 \text{ kV}$ を印加した場合の損失電流を算出し、次にこれに周波数 100 Hz の電圧 $V_2 = 0.2 \text{ kV}$ を重畳印加した場合の損失電流を算出した。図13はこの両者の電流に含まれる周波数成分をFFT解析により求めた結果である。このように、未橋絡水トリーであっても 50 Hz の電圧を単

図13. 100 Hz 電圧重畳前後における損失電流の周波数成分
Fig.13 Harmonics in AC loss current before and after superposing 100 Hz voltage

独で印加した場合の損失電流中には発生が認められなかった 200 Hz 成分が、100 Hz の電圧重畳後には発生することを確認することができる。

〈4.4〉 実験による確認 劣化状況の異なる複数の水トリー劣化シート試料（絶縁厚 0.5mm）に対して、図14に示す回路にて次の手順で測定を実施した。まず試料に 50 Hz の電圧 $V_1 = 0.5 \text{ kV}$ のみを印加して損失電流波形を測定した。その後、損失電流測定用ブリッジ回路のバランス状態を保持したまま 100 Hz の電圧 $V_2 = 0.2 \text{ kV}$ を重畳印加し、この時の出力波形を取得した。

図15は、50 Hz の電圧を単独印加した場合に測定された損失電流中の第3高調波成分（150 Hz） I_3 と、50 Hz の電圧に 100 Hz の電圧を重畳印加した場合の出力中の4高調波成分（200 Hz） I_4 との関係を示したものである。両者は非常に良い相関を示しており、 I_3 と I_4 がともに同じ水トリーの特性から発生する信号であることが確認できる。

図14. 測定回路

Fig.14 Measurement circuit

図15. V_1 単独印加時の I_3 と $V_1 + V_2$ 重畳印加時の I_4 の関係
Fig.15 Relation between I_3 under V_1 and I_4 under $V_1 + V_2$

続いて、高周波加速劣化処理を施した 22 kV CV ケーブル（ $n = 3$, Sample A, B, C）を用いて、100 Hz の重畳電圧値と発生する劣化信号との関係について確認した。印加電圧としては、22 kV CV ケーブルの運転電圧値の半分である 50 Hz の電圧 $V_1 = 6.4 \text{ kV}$ に対して、この電圧値のおおよそ 15, 30 % の 100 Hz の電圧 V_2 を重畳する場合について実施した。測定回路及び測定手順はシート試料の場合と同一である。

測定結果を図16に示す。いずれの試料においても、損失電流中に発生する第4高調波成分 I_4 が 100 Hz の電圧 V_2 の増加に従って比例的に増加する傾向を確認できる。また、

図中には 50 Hz の電圧 V_1 単独印加時における損失電流中の第 3 高調波成分の値を示した。このように、重畳する 100 Hz の電圧 V_2 として 30 % 程度を重畳すれば、通常の損失電流中の第 3 高調波成分と同程度の大きさの信号が得られることがわかる。

図16. I_4 の重畳電圧依存性

Fig.16 Relation between I_4 and superposition voltage

以上より、50 Hz と 100 Hz の重畳電圧下においては、50 Hz 単独印加時における第 3 高調波成分 (150 Hz) に替わる劣化信号が第 4 高調波成分 (200 Hz) にも現れることが確認された。前述したように、200 Hz という周波数は印加電圧中の奇数次高調波成分に該当しないため、損失電流中の第 3 高調波成分を用いる方法では診断が不可能な場合であっても、相互変調法では印加電圧中の高調波成分の影響をほとんど受けることなく、精度の高い診断が可能になると考えられる。また、この耐ノイズ面における優位性を考えれば、印加電圧値を低くすることができ、測定システム全体の小型化を実現できる。

5. まとめ

22 kV 級以上の CV ケーブルを対象とした劣化診断技術として、損失電流中に発生する高調波成分を用いた劣化診断方法について検討した。得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 損失電流中に発生する高調波成分は水トリー劣化を反映しており、第 3 高調波成分の重畳位相は水トリー長や破壊性能といった劣化程度と相関が良い。
- 2) 交流電圧下における水トリーの非線形な電圧-電流特性を確認し、これを考慮したシミュレーションから、損失電流中の高調波発生、その重畳位相の移行を再現した。また、劣化進行過程における水トリーの導電性増加及び非線形性増大の可能性を示唆する結果を得た。
- 3) 50 Hz と 100 Hz の重畳電圧下では、相互変調作用により 200 Hz 成分に水トリーからの劣化信号が現れることを確認した。この特性を利用した劣化診断法 (損失電流相互変調法) では、印加電圧の高調波に影響されことなく精度の高い診断が可能と考えられる。

(平成 10 年 8 月 3 日受付、同 10 年 11 月 27 日再受付)

- (1) 電気学会技術報告第 668 号
- (2) 所、長尾、小崎：「誘電材料における新しい交流損失電流測定法の開発」、電学論 A、109 巻 11 号、平成元年
- (3) M.Nagao, T.Tokoro, A.Yokoyama, M.Kosaki, "New Approach to Diagnostic Method of Water Trees", Conf. Record of the 1990 IEEE Intern. Symp. on Electr. Insul., Toronto, Canada, June 3-6, 1990, pp.296-299
- (4) A.Bulinski, E.So, S.Bamji, Y.Chen, "Diagnostic Measurements of High Voltage Insulation Using Current Comparator Technology", Conf. Record of the 1990 IEEE Intern. Symp. on Electr. Insul., Pittsburgh, PA USA, June 5-8, 1994, pp.115-118
- (5) 八木、田中：「水トリー劣化過程における損失電流高調波成分の発生と推移」、平成 9 年 電気学会全国大会 1855
- (6) 八木、田中：「損失電流高調波成分による CV ケーブル劣化診断法の検討」、平成 10 年 電気学会全国大会 1705
- (7) 速水：「高圧 CV ケーブルの直流漏れ電流を中心とした絶縁劣化診断法」、平成 3 年 誘電・絶縁材料研究会 DEI-91-20
- (8) 坂本、井上、境：「水トリー劣化 CV ケーブルの交流充電電流の電圧特性と高調波成分の測定」、平成 3 年 電気学会全国大会 1479
- (9) 山口、吉田、坂本、森：「水トリー劣化 CV ケーブルの交流損失電流波形の検討」平成 5 年 電気学会電力・エネルギー部門大会 473
- (10) 弘津、細江、井上、松生：「高調波電流測定による CV ケーブルの劣化診断法の開発」平成 6 年 電気学会電力・エネルギー部門大会 538
- (11) 電気協同研究 第 37 巻 第 3 号 p 9 - 10

八木 幸弘 (正員)

(正員) 1970年9月14日生。1994年3月京都大学工学部電気工学科卒業。同年4月古河電気工業(株)入社。千葉研究所勤務。CV ケーブルの劣化診断技術の開発に従事。

田中 秀郎 (正員)

(正員) 1963年10月21日生。1988年3月東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月古河電気工業(株)入社。千葉研究所勤務。500 kV CV ケーブルの開発、CV ケーブル線路の竣工試験方法並びに劣化診断技術の開発に従事。

武藤 秀二 (正員)

(正員) 1958年5月24日生。1985年3月横浜国立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月古河電気工業(株)入社。1988年から1年半 NRC 客員研究員として、プラスチックの劣化現象の研究に従事。現在、電力技術部勤務。主として、高電圧プラスチック絶縁ケーブルの研究開発に従事。

木村 人司 (正員)

(正員) 1947年11月26日生。1974年3月北海道大学大学院工学研究科応用化学専攻修士課程終了。同年4月古河電気工業(株)入社。千葉研究所勤務。主として、電力ケーブルの絶縁に関する研究に従事。