水トリー内の連結チャンネルの一定課電下におけるダイナミズム

正員 川井 二郎 正員 荻島 みゆき 正員 李 英

正員 品川 潤一 正員 海老沼 康光 (昭和電線電纜)

正員 中村 修平 正員 澤 五郎 (三重大)

Dynamism of Interconnected Channels in Water Treed Polyethylene under a Constant Voltage

Jiro Kawai (Member), Miyuki Ogishima (Member), Ying Li (Member),

Junichi Shinagawa (Member) and Yasumitsu Ebinuma (Member) (Showa Electric Wire and Cable Co., Ltd.)

Shuhei Nakamura (Member) and Goro Sawa (Member) (Mie University)

The fundamental and 3rd harmonic waves of loss current through a non-penetrated water treed polyethylene have been numerically calculated based on a model where current density j through channels interconnecting micro-voids is assumed to depend on electric field E as $j = (\sigma_0/h) \cdot \sinh(h \cdot E)$, where h is a parameter which characterizes the electric field dependence of j . The numerical results obtained by this model give a good agreement with the observed changes in the magnitudes of fundamental and 3rd harmonic waves, I_1 and I_3 , and their phase angles θ_1 and θ_3 , respectively, for the application of a constant voltage. It has been concluded that the length of interconnected channels in the water treed region grows with time duration. It is also concluded that conductivity of interconnected channels shows a little increase with their growth.

キーワード: 水トリー、損失電流、非線形電気伝導、高調波、架橋ポリエチレン

1. まえがき

水トリー劣化した電力ケーブルやシート試料において、印加電圧と同相成分であるいわゆる損失電流に高調波成分が含まれることはよく知られており⁽¹⁾、この高調波成分の中でも最も大きな電流を示す第3高調波成分は、交流破壊電圧や水トリー長とよい相関を示すことから、電力ケーブルの有効な劣化診断法として期待されている⁽²⁾。

著者らは、未橋絡水トリー劣化シート試料を未劣化部と劣化部の二層からなる複合誘電体とみなし、劣化部の電気伝導に電界に対して非線形な伝導特性を考慮したモデルを提案した⁽³⁾⁽⁴⁾。このモデルは、従来報告されている課電電圧に対する損失電流波形の変化をうまく説明した⁽⁴⁾。しかしながら、パルス静電応力法 (P E A法)により、直流電圧印加時に評価された水トリー長を用いて計算した結果は、損失電流の基本波成分が観測された値に比べて約6倍大きくなり、定量的観点で問題があった⁽⁴⁾。

一般に、水トリーは微小なボイドとこれらを連結する水トリーパス (以降ではチャンネルとする) から構成されていることが報告されている⁽⁵⁾。また、誘電特性の課電電圧に対する非線形性は微小なボイドとそれを連結するチャンネルからなる水トリーモデルを用いて説明されている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

著者らは損失電流の実測値と計算値の違いを検討するために、水トリー劣化部に存在するチャンネルには、チャンネルの開いた部分と閉じた部分が存在し、電圧の印加によりチャンネルの開いた部分が次第に進展すると仮定したモデルを提案した⁽⁸⁾。ここで「チャンネルの開いた状態」とは、課電により微小ボイド内の水分がチャンネルを通して移動できる状態や伝導性キャリアが移動できる状態とし、「チャンネルの閉じた状態」とは、劣化した領域ではあるがコンダクタンスがゼロの状態を考えている⁽⁹⁾。このようなモデルを仮定することにより、課電電圧を変化させた時の損失電流の基本波成分および第3高調波成分それぞれの大きさや位相の変化を定量的に説明することができた⁽⁸⁾。

本論文では、一定課電下において損失電流の時間変化を測定するとともに、水トリー劣化領域の進展を考慮したパラメータを導入して計算した損失電流を実測値と比較した。適切なパラメータの選定により、計算による損失電流波形と実測された波形を適合させることが可能となった。また得られたパラメータの値から、水トリーの実効長が課電時間とともに進展すると考えられる結果が得られた。

2. 水トリー劣化部と非線形伝導特性を組み入れたモデル

従来のモデルでは、水トリー劣化試料が、健全領域と劣化領域の二層からなるものとし、劣化領域の大きさは変化しないものとしていた⁽⁹⁾。新しいモデルでは、図1 (a) に示すように、劣化領域を更に二層に分け、チャンネルが閉じている領域とチャンネルが開いている厚さ d_3 の領域に分け、水トリーの実効長、すなわちチャンネルの開いている領域の厚さ d_3 が変化できるものとした⁽⁹⁾。「チャンネルの開いている状態」としては、微小ボイド内の水分がチャンネルを通して移動できる状態や伝導性キャリアが移動できる状態を仮定している。このような仮定は、印加電界によるマクスウェル応力により、チャンネルに微小なボイドからの水が流入することが既に示唆されている⁽⁹⁾ことから不合理ではないと考えている。また、水トリー劣化部の開いたチャンネルは、水電極により水トリーを発生させた電極から対向電極に進展し、閉じているチャンネルのコンダクタンスはゼロと仮定することにより⁽⁹⁾、水トリー試料は、図1 (b) に示すように、チャンネルが開きコンダクタンス G_2 の大きい厚さ d_3 の領域と厚さ $d - d_3$ の層の二層からなる複合誘電体とみなすことができる。ここで試料厚さに対する水トリー長の比を R とすると、実測した水トリー長 $R \cdot d$ と PEA 法で観測される水トリー長はほぼ対応する⁽¹⁰⁾ことから、PEA 法は図1 (a) の d_2 の長さをおおよそ測定していると考えられる。

図1 (b) の等価回路を図1 (c) に示す。なお、水トリー劣化部の誘電率の変化が数倍なのに対し、導電率の変化が数百倍と大きいことが指摘されている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾ことから、本論文では、変化の大きい導電率に注目している。健全部とチャンネルが閉じている劣化部の静電容量を併せて C_1 とし、チャンネルが開いている領域の静電容量を C_2 、また $r = d_3 / d$ とする。この時、試料に流れる電流 $i(t)$ は

$$i(t) = \frac{dq_2(t)}{dt} + \frac{r \cdot C_2 \cdot d}{h} f_0 \cdot \sinh(h \cdot \frac{q_2(t)}{r \cdot C_2 \cdot d}) \cdots (1)$$

で与えられる⁽⁹⁾。ここで、 $q_2(t)$ は C_2 に充電される電荷である。また、 f_0 と h はパラメータであり、 h は電界依存性を規定するパラメータである。式 (2) に示すようにチャンネルが開いている領域の電流密度 j_{G2} を、電界 E に対して

$$j_{G2} = \frac{\sigma_0}{h} \cdot \sinh(h \cdot E) \cdots (2)$$

なる形とした⁽⁹⁾。ここで、 σ_0 は低電界における導電率である。計算にあたり、基準となる h の値 h_s は $2.2 \times 10^{-6} \text{ m/V}$ とした⁽⁹⁾。一方、パラメータ f_0 は

$$f_0 = \frac{\sigma_0}{(\epsilon_0 \epsilon_r')} \cdots (3)$$

(a) Model of water treed sheet sample .

(b) Model used in calculation where conductance of closed channels is assumed to be zero .

(c) Equivalent circuit of (b) .

図1 水トリー劣化シート試料のモデル化と等価回路
Fig.1. Model of treed sheet sample and its equivalent circuit.

と定義した。ここで、 ϵ_0 は真空の誘電率、 ϵ_r' ($= 2.3$) は XLP E の比誘電率である。以下の計算に用いる場合の

f_0 の基準値 f_{0s} は、 4916 sec^{-1} を用いた⁹⁾。これは σ_0 がおよそ 10^{-7} S/m に相当する。

損失電流 $i_{\text{loss}}(t)$ は、基本的には式(1)で表された電流 $i(t)$ から容量性電流 $\omega C v_0 \cdot \cos \omega t$ (v_0 : 試料にかかる電圧の最大値、 C : 試料の静電容量、 $\omega = 2\pi f$ (f : 電源の周波数)、 t : 時間)を差し引くことにより求まる。数値計算では、 $i_{\text{loss}}(t)$ が課電電圧の周期 T の整数倍のある時刻 t でゼロになるように適当に C の大きさを調整した。これは2つの誘電層からなる複合誘電体の C が、誘電緩和の影響を受けるためである。

本論文では、第3高調波電流の大きさが高調波成分の中では最も大きく、水トリー長や交流絶縁破壊電圧と相関のあることが知られていることから、損失電流の基本波および第3高調波に注目した。その場合の損失電流波形は、基本波の大きさ I_1 とその位相 θ_1 および第3高調波の大きさ I_3 とその位相 θ_3 の4つの値として表現することができる。パラメータ r と h の基準値 h_s および f_0 の基準値 f_{0s} に乘ずる係数は、測定された4つの値に式(1)から算出される4つの値が適合するようにして求めた。具体的な計算手順は、観測された $i_{\text{loss}}(t)$ の基本波成分 I_1 にほぼ一致するように r の値を0.01の刻みで変化させ、適切と思われる2~3の値を選択する。それぞれの r に対して、 I_3/I_1 、 θ_1 および θ_3 の大きさが観測値と一致とするように、 f_0 と h の基準値 f_{0s} 、 h_s に乘ずる係数を変化させた。最終的に最も適合するようなパラメータの組み合わせを決定した。なお θ_1 に比べて θ_3 は課電時間に対して大きく変化するため、 θ_1 よりも θ_3 に合致するように、 f_0 と h の基準値に乘ずる係数を変えた。結果として、 f_0 および h の基準値に乘ずる係数は、それぞれおよそ0.90~1.25および0.67~0.80の範囲にあった。

3. 試料および実験方法

シート状試料はプレス成型により加工した厚さ $d=1 \text{ mm}$ の架橋ポリエチレン (XLPE)を用いた。水トリー劣化試料の作製方法は前報⁹⁾に述べているので省略する。水トリーは、5 kV、5 kHzの電圧を780時間課電することにより発生・進展させた。直流電圧印加時のパルス静電応力法 (PEA法)による測定から、水トリーは試料の厚さ $d=1 \text{ mm}$ に対し、0.62 mmまで進展していると評価された。従って、試料厚さに対する水トリー長の比 R は $R=0.62$ となる。

このように準備した試料の下部には導電性電極 (銀ペイント)を塗布し下部電極とした。高圧側上部電極として、直径30 mmの金属電極を用いた。電流測定回路は、前報⁹⁾の図1の回路図と全く同様である。課電電圧の周波数は500 Hz、課電電圧は1000 V一定とし、5分後から所定の経過時間ごとに損失電流を測定した。

4. 実験結果および計算に用いたパラメータ

図2に水トリー劣化試料の電流と損失電流の課電時間に

図2 劣化試料の電流と損失電流および未劣化試料の電流の課電時間に対する変化

Fig.2. Changes of current and loss current through a treed sample and current through a non-degraded sample for time duration under 1000 V.

図3 損失電流の基本波成分の大きさ I_1 と I_1 に対する第3高調波の大きさ I_3 の比 I_3/I_1 の課電時間に対する変化
Fig.3. Changes of the magnitude of fundamental wave, I_1 , and the relative magnitude of 3rd harmonic wave to the fundamental wave, I_3/I_1 in % for time duration under 1000 V.

対する変化を示す。同図には、未劣化試料の電流も参考のために示している。未劣化試料の電流は課電時間に対して

変化を示さないが、水トリートメント劣化試料の電流は課電時間と共に増加し、その後ほぼ一定になる。同様の傾向は損失電流においても観測された。従来より、水トリートメント劣化試料の電流が課電時間に対して安定しないことが経験されていたが、図2に示すような経時的な変化も一因と考えられる。以下の図3および図4に示す白抜き記号は観測結果であり、黒抜き記号は観測結果に適合するように定めたパラメータから算出した値である。図3より、損失電流の基本波 I_1 は時間と共に増加するが、基本波に対する第3高調波の比 I_3/I_1 は減少する。図4には θ_1 と θ_3 の課電時間に対する変化を示す。 θ_1 は課電時間と共に大きくなり、逆に θ_3 は小さくなる。一方、計算から得られた黒抜き記号で示す I_1 、 I_3/I_1 、 θ_1 および θ_3 の4つの値は、 θ_1 を除き観測値とほぼ一致している。この結果は、従来のパラメータに加え新たにパラメータ r を導入することで、実測された損失電流とほぼ同じ波形が算出できることを示している。なお、 θ_1 における差異は、 I_1 、 I_3/I_1 、および θ_3 の3つの値を重視して、計算の際に r および f_0 と h の基準値に乘ずる係数を選択したためである。しかし、計算より得られた θ_1 の時間に対する変化の仕方は、観測値の変化を定性的に示している。

図4 損失電流の基本波成分の位相 θ_1 と第3高調波の位相 θ_3 の課電時間に対する変化

Fig. 4. Changes of θ_1 and θ_3 of the fundamental wave and the 3rd harmonic wave, respectively, for time duration under 1000 V.

図5および図6には計算に用いたパラメータ r と f_0 および h の基準値 h_s 、 f_{0s} に乗じた係数を示す。図5における r は、36%から80%まで変化し、長時間側で飽和する傾向にある。パラメータの計算手順にも記したように、損失電流の基本波成分 I_1 はパラメータ r によりほぼ定めることができる。このことは、課電時間に伴う損失電流の基本波成分の増加は、チャンネルの開いている領域 d_3 、すなわち水トリートメントの実効長が次第に進展していると

考えると説明することができる。図5に示す r の最大値80%は、PEA法で評価された $R=0.62$ に比べて、30%程度大きい。PEA法で観測される水トリートメント長は、顕微鏡で観測される水トリートメント長とよい一致を示すとされている⁽¹⁰⁾ことから、PEA法で観測される水トリートメント長は、図1(a)における d_2 を測定しているものと思われる。計算より評価された r の最大値とPEA法により測定された R との差は、課電時間依存性や課電電圧依存性の実験による水トリートメント長の更なる進展が関係していることも考えられる。

図5 数値計算より評価された連結した開いたチャンネルの長さ r の課電時間に対する変化

Fig. 5. Change of r in % obtained by calculation for time duration under 1000 V.

図6 数値計算に用いた各課電時間におけるパラメータ f_0 および h の基準値に乘じた係数

Fig. 6. Changes of factors multiplied to f_{0s} and h_s used in calculation for time duration under 1000 V.

図6に示す f_0 の基準値 f_{0s} に乘じた係数は課電時間と共に大きくなり、長時間側で飽和する傾向にある。逆に、 h の基準値 h_s に乘じた係数は時間と共に僅かに減少し、長時間側でその減少は小さくなる傾向にある。式(3)を用いて、低電界における導電率 σ_0 を求め、 r に対して示したのが図7である。同図には、式(2)に現れるパラメータ h ($=h_s \times$ 係数)の値も示している。図より、 r の進展により σ_0 は僅かに大きくなる傾向を示した。一方、非線形電気伝導を特徴づけるパラメータ h は、 r が進展するほど小さくなることから、チャンネルの長さにより h は変化することを示唆している。また図3に示したように、 I_3/I_1 は課電時間に伴い減少している。これは第3高調波が式(2)に表されているように h に依存することから、 r の進展に伴う h の減少が関係していると考えられる。一定課電電圧下における r に対するこれらパラメータ σ_0 と h の変化の仕方は、課電電圧を変えて r が変化した場合の結果⁽⁶⁾と一致した。

図7 数値計算より評価された σ_0 および式(2)に現れるパラメータ h の値

Fig. 7. Changes of conductivity in low electric fields, σ_0 , and h in eq. (2) for r in % obtained by calculation.

5. まとめ

厚さ1mmのXLPEシートのおよそ60%まで水トリーが進展した未橋絡試料に対して、周波数が500Hzで1000Vの電圧を印加し、その課電時間に対する損失電流の基本波と第3高調波の大きさ I_1 、 I_3 およびそれぞれの位相 θ_1 、 θ_3 を測定した。その際に、水トリー劣化部のチャンネルが微小ボイド間を連結し、連結したチャンネルの領域が次第に進展することを仮定したモデルを用いて損失電流波形を解析した。得られた知見を要約すると、以下

のようになる。

- (1) 課電時間と共に、水トリー劣化試料の電流および損失電流 I_1 は増加するが、 I_3/I_1 は減少した。これらは時間の経過につれて飽和する傾向にあった。一方、 θ_1 は課電時間と共に大きくなり、逆に θ_3 は小さくなった。
- (2) パラメータ h および f_0 に加えて新たにパラメータ r を導入した結果、 θ_1 を除き計算と観測値とがほぼ一致した値を与えた。このことから r を含めた調整が重要であることがわかった。
- (3) 実測値に適合するように求めたパラメータ r より、水トリーの実効長、すなわちチャンネルの開いている領域が、課電時間と共に進展している結果が得られた。その最大値 $r=0.8$ は、PEA法で測定された値より30%程度大きかったが、この差には課電による水トリー長の更なる進展も考えられる。
- (4) r の進展と共に水トリー劣化領域の導電率が僅かに増加する傾向を示し、一定値に飽和した。また、 r の進展と共に非線形伝導を特徴づけるパラメータ h は減少し、ある一定値を示した。パラメータ h は連結チャンネルの長さにより変化することが示唆された。

(平成11年3月24日受付、平成11年9月6日再受付)

文 献

- (1) 例えば、横山、所、水野、長尾、小崎：「交流損失電流による新しい水トリー劣化診断法の開発」、平元電気関係学会東海支部大会、No 214
- (2) 例えば、海老沼、久保田、川井、藤原：「22kV CVケーブルの絶縁劣化測定法の検討」、電学論B、114、pp. 305~309 (平6)
- (3) 川井、品川、中村、澤：「水トリー劣化ポリエチレンの損失電流波形と非線形電気伝導」、電学論A、119、92~99 (平11-1)
- (4) 川井、李、荻島、品川、海老沼、中村、澤：「水トリー劣化架橋ポリエチレンの高調波電流と非線形電気伝導」、電学論A、119、327~333 (平11-3)
- (5) 武藤、丸山：「水トリーの有害性について」、電気学会誘電・絶縁材料研究会、DEI-93-108、pp.89~98 (平5)
- (6) 中村、高橋、中山、丹羽：「水トリー発生CVケーブルの誘電特性に関する一考察」、第13回電気絶縁材料シンポジウム予稿集、V-7 (昭55)
- (7) S. Hvidsten, E. Ildstad and H. Faremo: "MECHANISMS CAUSING NONLINEAR DIELECTRIC RESPONSE OF WATER TREED XLPE CABLES", 1998 IEEE 6th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, pp.73-78 (1998)
- (8) 中村、澤、川井、荻島、李、品川、海老沼：「水トリー

内の連結チャンネルの課電電圧に対するダイナミズム」、平11電気学会電力・エネルギー部門大会、No.44

- (9) 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6電気学会電力・エネルギー部門大会、No.538
- (10) 李、川井、海老沼、藤原、相原、大木：「水トリー劣化した架橋ポリエチレンにおける空間電荷の挙動」、電学論A、116、818～825（平8-9）
- (11) 李、足立、荻島、川井、海老沼：「水トリー劣化部の導電率及び誘電率の新測定法の開発」、電学論A、118、84～85（平10-1）
- (12) 李、住本、荻島、川井、品川：「異なる周波数測定による水トリー劣化部の導電率及び誘電率の新測定法の開発」、平10電気学会全大、No.348

川井 二郎

（正員）82年3月三重大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程修了。同年4月昭和電線電纜（株）入社。電力ケーブルおよび付属品の開発に従事。97年電気学会論文賞受賞。工博。

荻島 みゆき

（正員）86年3月東京理科大学卒業。同年4月昭和電線電纜（株）入社。主として電力ケーブルの劣化診断法の開発に従事。現在、電力システム開発室研究員。

李 英

（正員）84年中国西安交通大学・院・電気工学専攻修了。87年同大学講師。94年武蔵工業大学・院・電気工学専攻博士課程修了。同年4月昭和電線電纜（株）入社。固体誘電体内部の空間電荷分布に関する研究に従事。96年電気学会進歩賞、97年電気学会論文賞受賞。工博。

品川 潤一

（正員）75年3月東北大学大学院電気及び通信工学専攻修士課程修了。同年4月昭和電線電纜（株）入社。現在、電力システム開発室室長。この間、超高圧ケーブルおよび付属品の開発、高電圧試験法や高電圧過渡現象の研究に従事。

海老沼 康光

（正員）72年3月東京都立大学大学院修士課程修了。同年4月昭和電線電纜（株）入社。現在、電力システム品質保証部部長。89年、97年電気学会論文賞受賞。工博。

中村 修平

（正員）73年3月信州大学・院・電気工学専攻修了。工学博士（76年3月名古屋大学）。77年三重大学助教授。電子材料に関する研究に従事。

澤 五郎

（正員）65年3月名古屋大学大学院博士課程満了。76年5月三重大・工・電子工学科教授。88年～91年および94年～97年まで工学部長。工博。誘電体電気物性および複合絶縁系の高電圧現象の研究と教育に従事。69年英国サルフォード大学。70年電気学会論文賞受賞。