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

正員 中村 修平 正員 澤 五郎 (三重大)

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)

Dynamism of Interconnected Channels in Water Treed Polyethylene for Changing Applied Voltage

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

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

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

The 3rd harmonic wave of loss current through a non-penetrated water treed polyethylene has been numerically calculated based on a model where current density j through opened 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 magnitudes of fundamental wave and 3rd harmonic wave, I_1 and I_3 , and their phase angles θ_1 and θ_3 , respectively. It has been concluded that the length of interconnected channels in the water treed region grows with increasing applied voltage. It is also concluded that conductivity of interconnected channels slightly increases 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、この高調波成分の中で、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^{(1)~(5)}。

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⁽⁶⁾。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⁽⁷⁾。しかしながら、パルス静電応力法 (PEA法) から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⁽⁷⁾。

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⁽⁸⁾。また、誘電特性の課電電圧に対する非線形性はマイクロ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⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

本論文では、課電電圧を変えたときの損失電流を、著者

等の提案したモデル⁽⁶⁾に基づいて解析を行ったものである。その際、電圧の印加により水トリー劣化部のチャンネルがマイクロボイド間を連結し、連結したチャンネルの領域が次第に伸展することを仮定した。その結果、損失電流の基本波および第3高調波のそれぞれの大きさと位相をほぼ定量的に説明することができた。

2. 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⁽⁶⁾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・伸展させた。パルス静電応力法 (PEA法) による測定⁽¹¹⁾から、水トリーは試料の厚さ $d = 1 \text{ mm}$ に対し、0.62 mmまで伸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⁽⁶⁾の図1の回路図と全く同様である。損失電流の測定時の課電電圧は250 Vから2000 Vまで順次昇圧し、再び250 Vまで降圧した。なお周波数は500 Hzとして、損失電流波形を観測した。

3. 水トリー劣化部と非線形伝導特性を組み入れたモデル

著者らの提案したモデルにおいて、P E A法で評価された水トリー長を用いた場合、数値計算から得られる損失電流の基本波成分の大きさは、観測されたそれに比べて約6倍大きかった⁹⁾。このことは、P E A法で評価された水トリー長よりも小さな値を数値計算に用いるのが望ましいことを示唆している。また、水トリー劣化シート試料の電流および損失電流の大きさは、課電電圧の昇圧時と降圧時において異なる値を示した⁹⁾。モデルにより計算される電流や損失電流の大きさは水トリー長に大きく依存することから、水トリー長が課電履歴により変わることが示唆された。

(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.

このような結果を踏まえて、本論文では以下に示す水トリー劣化試料のモデルを仮定した。図1 (a) に示すように、厚さ d の試料は、基本的には厚さ d_1 の健全部と厚さ d_2 の劣化部の二層から成るが、更に劣化部をチャンネルの閉じている領域とチャンネルの開いている厚さ d_3 の領域の二層に分け、チャンネルの開いている領域 d_3 が電圧の印加により変化できるものとした。ここで、「チャンネルの開いている状態」として、微小ポ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、チャンネルにマイクロポイドからの水が流入することが既に示唆されている⁹⁾⁽¹⁰⁾ことから不合理ではないと考えている。水トリー劣化部の開いたチャンネルは、水電極によりトリーを発生させた電極から対向電極に伸展するものとした。また、水トリー劣化部のチャンネルが閉じている領域のコンダクタンスはゼロと仮定した。これにより、水トリー試料は、前報⁹⁾⁽¹¹⁾と同様に、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。P E A法で観測される水トリー長 $R \cdot d$ は、実測した水トリー長とほぼ対応する⁽¹²⁾ことから、P E A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⁽¹²⁾⁽¹³⁾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

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

で与えられる⁹⁾。ここで、 $q_2(t)$ は $C_2 (= C / r)$ に充電される電荷である。式 (1) に現れるパラメータ h と f_0 は以下のようなものである。 h は電界依存性を規定するパラメータであり、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

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

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

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

と定義した。ここで、 ϵ_0 は真空の誘電率、 $\epsilon_r' (= 2, 3)$

はX L P Eの比誘電率である。以下の計算に用いる場合の f_0 の基準値として、 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¹⁰⁾ためである。

本論文では次節で述べるように、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つの値の課電電圧に対する変化に注目しており、数値計算を次のような手順で行った。観測された $i_{\text{loss}}(t)$ の基本波成分 I_1 に合うように r の値を0.01の刻みで変化させる。この際、観測された I_1 を与える r の最適値を r_0 とすると隣接する値 $r_0 \pm 0.01$ も最終的には最適な計算結果を与える場合がある。次に I_3/I_1 の大きさが一致するように f_0 と h のそれぞれの基準値に乗ずる係数を変化させた。 θ_1 に比べて θ_3 は課電電圧に対して大きく変化することから、 θ_1 よりも θ_3 に合致するように、これら f_0 と h の基準値に乗ずる係数を調整した。以上の操作により適切な r の値が限定され、結果として、これら3つのパラメータの組み合わせが一意的に定まる。 f_0 および h の基準値に乗ずる係数は、それぞれおよそ0.68~1.0および0.37~4.4の範囲にあった。なお、それぞれの係数の変化の最小刻みは0.01とした。

4. 実験結果および計算に用いたパラメータ

<4.1> 実験結果および検討 課電は250Vから2000Vまで順次昇圧し、再び250Vまで降圧した。各課電電圧における損失電流波形の測定は、およそ15分程度である。劣化試料の損失電流波形のフーリエ解析より、各課電電圧における基本波成分の大きさ I_1 を基準とすると、第3高調波の大きさ I_3 および第5高調波の大きさ I_5

図2 損失電流波形の典型的な例(1000V昇圧時)

Fig.2. A typical wave form of loss current through a treed sample at 1000V.

は、それぞれ12%~15%および数%程度であった。このように、第3高調波の電流の大きさは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関連のあることが知られていることから、本論文では基本波の大きさ 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 に注目して実験結果を整理することとした。

損失電流波形の典型的な一例を図2に示す。課電電圧は昇圧時の1000Vである。図より、正弦波を示す電圧波形に対して、損失電流波形が歪んでいることがわかる。損失電流波形の頂上部を凹型に例えると、課電電圧の大きさにより凹型部分の前部が後部に比べて高かったり、逆に低かったりする。これは第3高調波の大きさやその位相が課電電圧により変化するからである。

劣化試料の電流と損失電流の課電電圧依存性を図3に示す。同図には参考のために、未劣化試料の電流も掲げる。劣化試料の電流および損失電流は、課電電圧の昇圧時と降圧時でそれらの大きさが異なり、降圧時の電流が大きい。一方、未劣化試料では、課電電圧の昇圧時および降圧時の電流が一致していることが判る。

以下の図4および図5において、観測された I_1 、 I_3/I_1 、 θ_1 および θ_3 の課電電圧に対する変化を白抜き記号で示す。図4は課電電圧に対する I_1 および I_3/I_1 の変化を示す。 I_1 は課電電圧に対して非線形に増加し、降圧時の I_1 は昇圧時のそれに比べて大きい。一方、 I_3/I_1 は課電電圧の増加に伴い減少し、昇圧時の I_3/I_1 は降圧時のそれに比べて大きい。

図5は課電電圧に対する θ_1 および θ_3 の変化を示す。 θ_1

図3 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電圧に対する変化

Fig.3. Changes of current and loss current through a treed sample and current through a non-treed sample for applied voltage.

は課電電圧の増加に伴い大きくなるが、昇圧時と降圧時で差異がある。 θ_3 は θ_1 に比べて課電電圧の増加に対して大きく減少し、またその課電履歴の影響も θ_1 に比べて大きいことが分かる。

< 4. 2 > 数値計算結果とそれに用いたパラメータ

図4および図5に示す黒抜きの記号は数値計算から得られた I_1 、 I_3/I_1 、 θ_1 および θ_3 の4つの値である。これらの図に示す数値計算の結果は、図5において、課電電圧の低い場合には、 θ_1 の観測結果と計算結果の差異がやや大きいように思われるが、全体的には、計算結果は実験

図4 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 の課電電圧に対する変化
Fig.4. Applied voltage dependence 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 %.

図5 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 の課電電圧に対する変化
Fig.5. Applied voltage dependence of θ_1 and θ_3 of the fundamental wave and the 3rd harmonic wave, respectively.

結果とほぼ一致すると考えられる。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、数値計算の際に r および f_0 と h の基準値に乘じる係数を選択したためである。これら図4および図5に現れる各課電電圧に対する I_1 、 I_3/I_1 、 θ_1 および θ_3 の観測値にそれらの数値計算結果が一致するように選んだ r および f_0 と h の基準値に乘じた係数を図6および図7にそれぞれ示す。図6より、 r ($=d_3/d$) は課電電圧の増加に伴い

図6 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 の課電電圧に対する変化
Fig.6. Applied voltage dependence of r in % obtained by calculation.

図7 各課電電圧に用いたパラメータ f_0 および h の基準値に乘じた係数
Fig.7. Applied voltage dependence of factors for standard values of f_0 and h used in calculation.

図8 非線形伝導を考慮したモデルにより評価された σ_0 および式(2)に現れるパラメータ h の値
Fig.8 Changes of conductivity in low electric fields, σ_0 , and h in eq. (2) for r in % obtained by calculation.

1.5%から3.8%に及ぶ変化を示した。 r は課電により伸展することが判る。また図6に示すように、降圧時の r は昇圧時に比べて大きいことから、課電により一旦開いたチャンネルが閉じにくいことが示唆される。

図7に示すように、 f_0 の基準値に乘じた係数は課電電圧の増加に伴い大きくなる。式(3)を用いて σ_0 を求め、その値を計算結果より得られた r に対して示したのが図8である。 σ_0 は 10^{-7} S/mのオーダーである。水トリ劣化シート試料の誘電正接や導電率の周波数依存性から、 σ_0 として $5 \times 10^{-11} \sim 2.5 \times 10^{-8}$ S/mの値や $1.6 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-4}$ S/mの値が報告されている⁽¹²⁾⁽¹³⁾。 σ_0 の値は、課電電圧の大きさ、課電履歴や水トリ劣化の模擬の際に用いる水電極の電解液などに影響されることも考えられるが、数値計算から得られた σ_0 は過去に報告されている値と比べ決して不合理ではないと考えられる。また、図8より、 r の増加に伴い σ_0 はわずかに増加する傾向を示した。

図7に示すように、 h の基準値に乘ずる係数は課電電圧が低くなると大きくなる傾向を示している。この係数と h の基準値を乘じた値、つまり式(2)に現れる h の変化を、 r に対して示したのが図8である。 r が短いほど、式(2)に現れる h は大きくなる。これは、チャンネル部を流れる電流の電界依存性を特徴づけるパラメータ h が、チャンネルの長さにより変化することを示唆している。また、図4に示したように、 I_3/I_1 は課電電圧の増加につれて減少している。これは、第3高調波は式(2)に表されているように h に依存しており、 I_3/I_1 の課電電圧の増加による減少は、 r の伸展に伴う h の減少が関係していると考えられる。

本論文における数値計算に用いたモデルは、 r 、 h およ

び f_0 のパラメータを含んでいる。従って、観測された I_1 、 I_3/I_1 、 θ_1 および θ_3 の値に数値計算結果が一致するように適切なパラメータの選択を行うことにより、これらパラメータの課電電圧の大きさに対する変化を知ることができた。得られた r の値は、顕微鏡観察で確認される水トリ一長と良い対応を示すPEA法⁽¹⁴⁾から評価された水トリ一長と異なり、課電電圧により変化することが見いだされた。このことは、従来から報告されている水トリ劣化部のマイクロボイドを連結するチャンネルが、課電により開きまた伸展するモデルを導入することにより説明できるものと考えている。

5. まとめ

未橋絡水トリ劣化シート試料における高調波成分を含む損失電流の中で、他の高調波成分に比べて大きくかつ交流絶縁破壊電圧とも相関を有する第3高調波の大きさ I_3 とその位相 θ_3 を、基本波成分の大きさ I_1 およびその位相 θ_1 とともに、課電電圧に対する変化を調べた。また、水トリ劣化部を、多数のマイクロボイドとそれを連結するチャンネルにより形成されているとし、「チャンネルが開いている状態」として、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た。この開いたチャンネル部の伝導の電界依存性に双曲線関数を用いて、観測された I_1 、 I_3/I_1 、 θ_1 および θ_3 の解析を行った。その結果、以下のようなことが結論された。

- (1) I_1 、 I_3/I_1 、 θ_1 および θ_3 の観測値に数値計算結果をほぼ一致させることができた。
- (2) 水トリ一部のマイクロボイド間を連結するチャンネルが、課電電圧により伸展する結果が得られた。
- (3) 低電界の導電率は、課電電圧方向のチャンネルの伸展とともにわずかに増加した。
- (4) 連結したチャンネルの伝導の電界依存性を特徴づけるパラメータ h は、チャンネルの伸展とともに小さくなる傾向にあることが判った。

このように、水トリ劣化部の電気伝導機構に双曲線関数を導入したモデルを用い、観測された第3高調波成分を数値計算により解析することで、このモデルにおけるパラメータと水トリ劣化部の状態を理解できる可能性が示唆された。今後は、異なる水トリ一長試料による測定を行い、電力ケーブルの絶縁劣化診断法の基礎となる検討を進めていく予定である。

(平成11年6月10日受付、同11年9月17日再受付)

文 献

- (1) 横山、所、水野、長尾、小崎：「交流損失電流による新しい水トリ劣化診断法の開発」、平元電気関係学会東海支部大会、No 214
- (2) 坂本、井上、堺：「水トリ劣化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3電気学会全大、No. 1479

- (3) 八木、田中、一柳：「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9電気学会全大、No. 1855
- (4) 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）
- (5) 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
- (6) 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**、pp. 92～99（平11-1）
- (7) 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**、pp. 327～333（平11-3）
- (8) 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）
- (9) 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）
- (10) 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)
- (11) 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**、pp. 818～825（平8-9）
- (12) 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**、pp. 84～85（平10-1）
- (13) 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
- (14) 犬石、中島、川辺、家田：「誘電体現象論」、電気学会（1983年11版）

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。

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。

電力・エネルギー部門大会座長のコメントと回答

——B 01 電力ケーブル劣化・診断(1)——

質 疑

座長 品川 潤一

1. 同セッションでの対象論文への質疑応答

(1)

Q：水トリー部の比誘電率を2.3としているが、実際は数倍大きいのではないか。その場合は r が異なる結果になると考えられる。

A：現段階では一定としているが、水トリー部の ϵ は10程度という結果もある。 ϵ が違う場合の検討が必要と考えている。

(2)

Q：チャンネルのオープン・クローズでは何が変わるのか。

A：水の出入りがあると考えているが、実際に何が変わるかは分からない。

(3)

Q：パスは、電極側から順番に開いていくのではなく、ランダムな位置で開くのではないか。

A：そのとおりと考える。ただし、それでは計算できないので、一方向から順に開くものとした。

応 答

中村 修平・澤 五郎 (三重大)

川井 二郎・荻島みゆき

李 英・品川 潤一

海老沼康光 (昭和電線電纜)

1. 「同セッションでの質疑応答」に対する追加説明

(3)に対する追加説明

ミクロに見ると、ご指摘のようにパスはランダムな位置で発生していると思われますが、マクロ的には劣化領域という広がりをもって次第に伸展していくと考えています。なぜならば、マクロ的にもランダムに発生するとすれば、例えば、PEA法で得られた値をもとにトリー劣化領域の大きさを一定として、劣化領域の導電率が次第に増加するという考え方から損失電流の数値計算を進める必要があります。しかし、観測された損失電流の四つの値、 I_1 , I_3 , θ_1 , θ_3 に対して、うまく一致するような計算結果は得られないと考えています。

電力・エネルギー部門大会書面討論

—B 01 電力ケーブル劣化・診断(1)—

論文題目「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」

質問事項

質問者 渡辺 和夫

(1) 開いたチャンネル/閉じたチャンネルなどの考え方が、現状の文章では物理的イメージがつかみにくいと考えられます。

(2) シミュレーションにおいて3個のパラメータの設定により測定結果との一致を試みられておりますが、解の一意性はあるのでしょうか？ また、これだけのパラメータを導入すれば測定結果と一致しても当然のようにも考えられないでしょうか？

回 答

中村 修平・澤 五郎 (三重大)
川井 二郎・荻島みゆき
李 英・品川 潤一
海老沼康光 (昭和電線電纜)

(1)の質問への回答

開いたチャンネル/閉じたチャンネルの考え方は、第3章「水トリー劣化部と非線形伝導特性を組み入れたモデル」に記載しておりますが、以下のように文章を一部変更しました。また、数式(1)には劣化領域の大きさを示すパラメータ r が出てくるように変更しました。

「図1(a)に示すように、厚さ d の試料は、基本的には

厚さ d_1 の健全部と厚さ d_2 の劣化部の2層から成るが、更に劣化部をチャンネルの閉じている領域とチャンネルの開いている厚さ d_3 の領域の二層に分け、チャンネルの開いている領域 d_3 が電圧の印加により変化できるものとした。ここで、「チャンネルの開いている状態」として、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。」

(2)の質問への回答

今回の論文の主張の一つは、劣化領域の大きさを示すパラメータ r を追加することで、実測された損失電流と計算から得られた損失電流とを非常に良く合わせることができたという点です。従来のモデルでは、劣化領域の伝導特性の電界依存性を与えるパラメータ h と劣化領域の低電界における導電率を意味するパラメータ f_0 の二つを用いて実測値と計算値との比較を進めてきました。しかしながら、定性的な一致はあるものの、定量的には「ずれ」がありました。この原因として、水トリー劣化領域の大きさを一定としていたためと考え、今回劣化領域の大きさを示すパラメータ r を導入しました。その結果は、図4、図5に示すように3種類のパラメータを適切に選定することにより、損失電流の実測値と計算から求めた値をよく一致させることができました。現時点では、観測された値にうまく適合できるパラメータの組み合わせは一つです。

なお、多くのパラメータを導入すれば、測定結果と一致しても当然のご指摘ですが、今回のモデルに用いました上記の3種類のパラメータは、物理的にも意味のある重要なものと考えています。

質問事項

質問者 熊澤 孝夫 (中部電力)

(1) 2ページ目, 図1(b)の開いたチャンネル領域の比誘電率として, 閉じたチャンネル領域の比誘電率と同じ値(2.3)を採用しておられますが, 導電率の変化より小さいという理由のみで比誘電率の変化を無視してもよいのでしょうか。無視できるかどうかは, ωC_1 , ωC_2 および G_2 の大小関係によって判断すべきではないでしょうか。

(2) 2ページ目, (1)式の h については, イオン伝導の解釈から $ea/2kT$ となりますが, これに倍率を掛けることの物理的意味は何でしょうか(4ページ目, 図7では印加電圧にほぼ反比例)。文献(6)の94ページ目, 図3の理論曲線は, h を定数として(倍率1として)描かれていますが。

(3) 2ページ目, (2)式の E は, G_2 に印加される電界を指していますが, 厳密には, この E をボイドや連結チャンネルの内部構造とリンクさせて考える必要があるように思います。つまり, 損失電流を(2)式で制限しているものの正体は何か, 水トリー内部のどこに存在するのかという点です。そこに印加される電界が E ということではないでしょうか。単に G_2 に印加される電界とすると, どうしても説明できない現象があります。例えば, 貫通水トリーや先端部をカットした水トリーでは Poole-Frenkel 型の電流-電界特性 ($\log I \propto \sqrt{E}$) が観測されることがあります⁽¹⁾⁽²⁾。この場合, 電界依存性を決定する係数が $(e^3/\pi\epsilon)^{1/2}/2kT$ で固定されており, 印加電界を理論的に代入しても指数部が小さすぎて, 全く特性を再現できません。したがって, 水トリー内部には損失電流を制限している“あるミクロな領域”が存在し, そこでは印加電界に対して数十倍以上の電界が発生していると考えざるを得ません(この電界は印加電界に比例するはずですので, 結果的に印加電界と電流をプロットすれば Poole-Frenkel 型の電流-電界特性が得られます)。このような理由で, E は損失電流を制限している“あるミクロな領域”の電界と考えておりますが, その正体については残念ながらまだ知見が得られておりません。既発表の文献(6)では, h から計算されたイオンのホッピング距離 a が 200 nm となっています。印加電界から計算すると a は非常に大きくなりますが, E を“あるミクロな領域”の電界とすれば, a は数 nm 以下の常識的な値になります。いずれにしても, 1 kV/mm 程度の弱い印加電界で, イオン伝導や電子性伝導のような電流が観測されてしまう理由, すなわち電界 E の真相を解明することは, 連結チャンネルのダイナミズムを議論するうえで避けられないテーマであるように思われます。なぜなら, h や $\alpha_0(f_0)$ の解釈を誤って現象の本

質を見失う危険性があるからです。なお, これを避ける一つの方法は, G_2 を $V_2(t)$ の関数, 例えばべき乗関数や多項式などで表現するやり方です(電界 E が不明である以上, 安易に伝導形式を導入することは危険です)。現時点では G_2 の非線形特性を表現する有効な手段と考えます。この方法で, 損失電流のリサージュ波形や α_0 をシミュレーションしたのが下記文献(3)です。文献(3)は, そうした危険性を意識的に回避しているように思われます。

(4) 4ページ目, 図7の f_0 は, 印加電圧(または r)に対して1.5倍程度変化していますので, (3)式より, 5ページ目, 図8の α_0 も1.5倍程度変化しています。この開いたチャンネルの α_0 が変化する物理的な意味は何でしょうか。 α_0 の増加は, キャリヤの密度や移動度の増加を示唆していますが, このような低電界(3ページ目, 図3では水トリー試料の損失電流が印加電圧に対してほぼ ohmic に増加していますので, G_2 に印加される電界 E はかなり低いと思われる)で起きる現象とは考えられませんが。

(5) 損失電流の測定に用いた印加電圧の周波数が 500 Hz となっていますが, 損失の主な起源が伝導損失であることは確認されたのでしょうか。

(6) 水トリー劣化試料に電極を取り付けた場合, 水トリーの位置関係から健全部のみからなる静電容量も含まれません。もしそうであれば, 試料の静電容量 C を C_1 , C_2 の合成静電容量で表すことができないのではないのでしょうか。

(7) 本論文に直接関連する既発表の論文 DEI-99-51「高調波損失電流と水トリー内連結チャンネルの挙動」の図8において, 1 kV の電圧を 20 時間印加した場合, 最終的には $r=0.8$ で飽和しています。一方, 本論文の4ページ目, 図6では, ステップ昇圧開始から1時間あまり経過した 2 kV 印加時に, $r=0.38$ で飽和しています。恐らく, 上記論文で述べられている試料と同一 ($R=0.62$) と思われるので, このような短い時間(1 kV 印加以降)で飽和傾向が現れることはあり得ないと思われる。この結果をどのように解釈されますか。水分量がもともと少なかったということでしょうか。もしそうであれば, 水分量のデータが必要と思いますが。

文 献

- (1) 坂本・井上・堺・中川:「水トリー劣化ケーブルの交流誘電特性の検討 ($\tan \delta$ の電圧特性と温度特性)」, 平4電気学会大会, No. 1426
- (2) 熊澤・都築・有馬・渡辺・高木:「水トリー劣化 CV ケーブルの直流成分電流発生機構に関する実験的考察」, 電学論 B, 114, pp. 988~993 (平6-10)
- (3) 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5電気学会大会, No. 473

回 答

中村 修平・澤 五郎 (三重大)

川井 二郎・荻島みゆき

李 英・品川 潤一

海老沼康光 (昭和電線電纜)

(1)の質問への回答

等価回路における各素子に流れる電流を計算するために、 ωC_1 、 ωC_2 および G などその大小関係を問わず同時に計算しています。水トリー劣化部の比誘電率に用いるべき値の検討は、このような1 mm 厚の試料でも測定可能なブリッジを用いて測定し更に検討を進める予定ですが、現在用いている値では、例えば、比誘電率が3~4倍変化しても劣化部での分担電圧には大差ありません

水トリー劣化部の誘電率が変わっても、 $f_0 = \sigma / \epsilon_0 \epsilon_r$ の関係から、低電界のオーミックな導電率が変化すると思われる。

(2)の質問への回答

現段階では、伝導機構には深く立ち入っていないのが現状ですが、パラメータ h に関する物理的イメージをとらえようとすると、ご指摘のように第一段階としてイオン伝導機構を考えるのが適切かと思います。本論文で提案しているモデルは、その妥当性を検討するために、課電時間、課電電圧および課電周波数を変化させて検討しております。それらの結果によると、本モデルにより損失電流の変化をかなり定量的に説明できると考えています。したがって、水トリー劣化部の伝導機構について、具体的な検討が必要な段階になってきているのが現状です。

ご指摘の h の問題点は極めて重要です。文献(6)94ページで h を固定してカーブフィッティングを行い、電流の電界依存性を規定している。それに対して、本論文の課電電圧依存性では h の値を変えています。前者は1本の橋絡水トリーですが、後者は未短絡水トリーであり、チャンネルの開いた導電性の高い領域が課電により伸展するという違いがあります。もちろん、 h の値にはこのような導電性の高いチャンネルの伸展とともに、水トリー劣化部の長さや水電極の電界液の違いなど、更に検討は必要と考えています。

(3)の質問への回答

二つのボイドとそれを連結するチャンネルの最小構造と局所電界を利用して、水トリー劣化試料における非線形現象をうまく説明しているのが、文献(10)です。ただし、こ

の考え方では $\tan \delta$ の周波数依存性の説明については失敗しています。ご指摘のように、局所電界を検討する必要がありますとは考えています。なお、 $\sinh$ 関数も次式のようにべき級数展開として表現できます。

$$\sinh x \approx x + x^3/3! + x^5/5! \cdots$$

(4)の質問への回答

低電界導電率は本質的にオーミックなもので、その周波数依存性を知ることにより伝導機構を考える糧を与えてくれます。水トリー劣化試料における低電界の導電率は周波数に比例します (平成11年度東海支部連合大会に発表)。この周波数に比例するという興味深い結果は未発表ですが、ブリッジによるコンダクタンス G の測定でも確認しています。まだ伝導機構の検討には入っていませんが、低電界導電率は孤立ペアモデルにおける始状態と終状態の分極電流から説明できるのではないかと考え、検討中です。この孤立ペアモデルの間隔は、通常の高分子中のホッピング距離に比べて極めて長く、その妥当性も含めて検討する予定です。

ご指摘のように、印加電界によりわずかに増加するのは、ボイド間を連結するチャンネルが編目構造を形成している (複雑系の一種) 可能性もあります。例えば、樹脂に導電性粒子を分散した系において、パーコレーションしきい値以上における導電粒子の添加による導電率の増加は、電極間を橋絡する導電通路の数の増加が寄与します。このような考え方から、観測された結果は十分説明できると考えています。

(5)の質問への回答

従来、水トリー劣化試料における損失電流は、一般に観測される充電電流において、容量性電流成分を取り除いた課電電圧と同相成分の電流を損失電流としております。その考え方に従って、観測される電流を区分しました。

(6)の質問への回答

厳密に考えると、健全部からなる静電容量も含まれている可能性があります。故意に健全部の静電容量を導入して更に検討すると、興味深い結果が得られるかもしれません。

(7)の質問への回答

本論文の図6は決して飽和しているわけではありません。課電電圧に対する変化を調べ、課電電圧の上昇と下降で異なる値を示すことを述べたものです。