等価回路モデルを用いた水トリー劣化 ポリエチレンの損失電流解析

正員 鈴木 雅史* 正員 伊藤 淳**
正員 吉村 昇*

Loss Current Analysis of Water Tree Degradation in Polyethylene using Equivalent Circuit Model

Masafumi Suzuki*, Member, Atsushi Itoh**, Member, Noboru Yoshimura*, Member

It is well known that the degradation of XLPE cable by water tree gives rise to harmonics in the loss current. Many researches by simulation and experiment have been carried out for the purpose of the elucidation of the mechanism of the harmonics in the loss current generation. In the present study, the loss current was calculated from the equivalent circuit model composed of voltage-dependent resistance and condenser. These elements are being connected with the matrix state.

As a result, we were able to obtain the good agreement between the experimental value and the calculated value by appropriately choosing the characteristics of the voltage-dependent resistance. The equivalent circuit model determined in this study can consider not only the electrical characteristic of water tree but also its shape.

キーワード：水トリー，損失電流，等価回路

Keywords: water tree, loss current, equivalent circuit

1. まえがき

架橋ポリエチレン絶縁ケーブル（XLPE ケーブル）は布設及び保守管理の容易さから使用量は年々増加し、現在では電力ケーブルの主流となっている。一方で XLPE ケーブルが長時間にわたり水が共存する状態で電界にさらされると、半導電層の突起や絶縁体中の異物や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。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。この水トリー劣化による絶縁破壊事故を未然に防ぐために、各種測定法が開発され絶縁劣化診断に用いられている。特に交流電圧印加における損失電流波形を測定する手法の開発が進んでいる⁽¹⁾。損失電流は試料を流れる電流からその充電電流を取り除いたものであり、その波形の観測・評価から高調波成分を含む損失電流の発生メカニズム解明が行えると考えられている⁽¹⁾。

損失電流波形を計測する手法を水トリー発生試料に適用

した場合、印加電圧のピーク付近でより波形が突出したり、劣化が顕著な場合には波形に二つのピークが現れる等の報告がなされている⁽²⁾⁻⁽⁹⁾。このような波形の歪みによる高調波の発生、特に高調波のうち最大である第3高調波電流と水トリー寸法、交流破壊電圧等との間には相関関係が見られ、非貫通水トリーでも検出できる有効な劣化診断方法として考えられている。

損失電流波形の歪みや高調波発生の原因としては、水トリー部の非線形な電気伝導特性に起因しているものと考えられ、このような非線形な電圧-電流特性を双曲線関数や多項式によりモデル化し、水トリー発生試料を未劣化部と劣化部の2層からなるマクスウェル-ワグナー型の誘電体とみなして損失電流の解析を試みる研究も行われている⁽¹⁰⁾⁻⁽¹³⁾。これらの研究より、モデルのパラメータを適切に設定すると過去に報告されている損失電流の特徴が再現できることが明らかにされている。一方で水トリーは印加電圧、水分量などの条件の違いによりその形状を様々に変えるため、水トリーの長さのみを考慮した検討ではまだ不十分な点もあり、その形状までを考慮した検討が必要であると考えられる。

筆者らはバリスタなどの非線形な電気伝導特性を持つ誘電体材料を等価回路モデルに置き換え、回路シミュレータを用いて解析することにより、実験だけでは検討の難しい

* 秋田大学工学資源学部
〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1
Akita University

1-1 Tegata-Gakuencho, Akita 010-8502
** 福島工業高等専門学校
〒970-8034 いわき市平上荒川字長尾 30
Fukushima National College of Technology
30 Taira Kamiarakawa Aza Nagao, Iwaki 970-8034

内部の微細な部分の電気的特性を考慮することに成功し、報告している^{(14)~(17)}。本稿では、この手法を水トリー劣化試料に適用し、水トリーの長さだけではなく、その形状も考慮したシミュレーションが可能か検討する。

2. 水トリー劣化試料の等価回路モデル

本研究においては、図1に示すように厚さ1mmのポリエチレン(XLPE)試料に水トリーが発生した状態を模擬することにした。なお、試料の厚さは幅に比べて薄く、電界は縦方向であるため、水トリーを図1のように上部水電極を含む電界に平行な断面に投影した2次元モデルで考えることにする。

始めに、水トリー劣化のない、純粋なXLPEの等価回路モデルを決定する。図1に示すような試料を、横方向に250分割、高さ方向に25分割し、それぞれのブロックの境界部分に図2に示すようにインピーダンス Z を考える。ポリエチレンの等価回路は微視的には抵抗 R と静電容量 C の並列回路で考えることが出来るので、 Z は R と C の並列回路となる。ここで、XLPEは均一であると仮定すると、場所による電気特性の変化はないため、 Z すなわち R と C の値は全

図1 水トリーの概略図
Fig. 1. Schematics of water tree.

図2 未劣化XLPEの等価回路
Fig. 2. The equivalent circuit of non-degraded XLPE.

て等しくなる。なお、等価回路中の R 及び C の値は実際のXLPEを図1の形状にカットし、インピーダンスアナライザ(HP4192A)を用いて誘電特性を測定し、等価回路より算出される誘電特性がこの実測値と一致するように、 $R=8.4\text{ T}\Omega$ 、 $C=0.264\text{ pF}$ と決定された。

水トリーは水を含む微小なボイドとそれらを接続する細い線状のパスから構成されていると考えられる⁽¹⁸⁾。このような構造の水トリーに高電界が加わると微小ボイド内の水がMaxwell応力によって電界方向に引っ張られ、細い線状のパスに流入し、ボイド間が電気的に接続されるため電流が急増すると考えられている⁽¹⁸⁾。ここで、水トリー部を微視的に見ると、非線形特性を示す回路が複数個つながって構成されているとも考えられる。そこで本研究では、先にモデル化したXLPEに水トリーが発生し、存在する場合、水トリー劣化部は非線形な電気伝導特性を示すと考えられるので、モデル中のインピーダンス Z 上に水トリーが存在する箇所は、その箇所の Z を電圧依存型抵抗(VDR)に置き換えた水トリー劣化試料のモデルを考案した。これは、VDRに置き換えることでこの箇所の電圧-電流特性を容易(非線形)に変更できるためである。なお、水トリー劣化部の電気伝導特性は領域の位置によらず同じであると仮定したので、全てのVDRは同じ電圧-電流特性を示すものとした。例えば、XLPEの一部に図3(a)のような水トリーが存在する場合の等価回路は図3(b)のようになる。

VDRの特性は本井ら⁽¹⁹⁾の一本の貫通水トリーの電圧電流特性の実測値より決定された。彼らの測定した貫通水トリーの形状は不明であったため、本研究では図4に示すような一本のパスを仮定し、これより図5に示す等価回路モデルを構築した。

この等価回路モデルにおいて、電圧-電流特性を回路シミュレータPSpiceを用いて計算し、その値が本井ら⁽¹⁹⁾の実測値に一致するようにVDRの特性が決定された。決定された単一のVDRの電圧-電流特性を図6に、図5に示す等価回路より算出された電圧-電流特性を本井ら⁽¹⁹⁾の実測値と共に図7にそれぞれ示す。図7より、本研究で仮定した一本の貫通水トリーを持つXLPEの等価回路モデルは、実際の一本の貫通水トリーの電圧-電流特性をよく再現できていることが分かる。

図3 水トリー劣化部のモデル
Fig. 3. The model in the water tree degradation division.

図4 水トリー一本が貫通した試料のモデル
Fig. 4. The model of a water tree path.

図5 水トリー一本が貫通した試料の等価回路
Fig. 5. The equivalent circuit of a water tree path.

このように、本研究で提案した解析手法では、水トリーの形状と電圧－電流特性が既知であれば、正確な等価回路モデルが構築できる。なお、現在水トリーの形状とその電気的特性が正確に分かっているデータがないため、これ以降の解析では図6のように決定されたVDRの特性を基準としながら検討を進めていく。

図6 VDR単体の電圧－電流特性
Fig. 6. Voltage-current characteristic of one VDR.

図7 電圧－電流特性の計算値と実測値
Fig. 7. Calculated and measured value of voltage-current characteristic of the penetrated water tree.

3. 損失電流波形の算出と検討

前述のように、VDRの特性を適切に設定することにより、貫通水トリーの電圧－電流特性が本研究で提案した等価回路モデルにより再現できることが分かった。そこで、次に実験⁽²⁰⁾や他のシミュレーション手法^{(10)~(12)}により分かっている損失電流波形の歪みが本等価回路においても模擬できるか検討した。

八木ら⁽²⁰⁾の実験によると、印加電圧 1kV、50Hz において、水トリーが試料の 40%程度まで進展すると損失電流波形のピークが潰れる傾向が見られ、70%、80%と進展が進むにつれピークが二つ現れ、次第に後ろのピークが大きくなっていくことが報告されている。一方、川井ら⁽¹⁰⁾は水トリー劣化試料を、劣化部と未劣化部に分け、未劣化部および劣化部を静電容量とコンダクタンスを用いて表し、劣化部のコンダクタンスを流れる電流密度を双曲線関数で近似し、損失電流波形のシミュレーションを行っている。そして、電流密度の非線形性を適切に選ぶことにより、実験値と同様の傾向を示す損失電流波形の計算が可能であることを示した。

そこで、本研究では八木ら⁽²⁰⁾の実験と同一の条件でシミュレーションを行い、VDRの特性を適切に変化させることで損失電流波形の歪みに同様の傾向が現れるか検証した。なお、八木ら⁽²⁰⁾の実験に用いられた水トリーの形状は明ら

(a) Water tree extended to 40%

(b) Water tree extended to 70%

(C) Water tree extended to 80%

図 8 水トリーのモデル

Fig. 8. The model of water tree.

かにされていないため、図 8 に示すような形状と仮定した。これより、前述の手法と同様に XLPE の等価回路モデルのうち、水トリーの進展した部分を VDR に置き換えたモデルをそれぞれ作成し、PSpice により印加電圧 1kV、50Hz で損失電流波形の計算を行った。

損失電流の計算結果を図 9 に示す。図より、(a)に示す水トリーが 40%まで進展したモデルにおいて算出された損失電流波形では、ピークが潰れていることが分かる。(b)に示す水トリーが 70%まで進展したモデルより算出される損失電流波形には二つのピークが見られ、更に(c)に示す 80%まで水トリーが進展したモデルでは、二つのピークのうち、後ろのピークが大きくなっていく様子がシミュレーションによって得られることが分かる。なお、この時の VDR 単体の電圧-電流特性を図 10 に示す。この特性は、図 6 に示した一本の貫通水トリーの電圧-電流特性の実測値より求めたものとは多少異なる。これは、先に決定した VDR の特性

(a) Water tree extended to 40%

(b) Water tree extended to 70%

(C) Water tree extended to 80%

図 9 損失電流の計算結果

Fig. 9. Calculated loss current.

図 10 VDR の電圧-電流特性

Fig. 10. Voltage-current characteristic of one VDR.

は本井ら⁽¹⁹⁾の貫通水トリーの電圧-電流特性より求めたものであり、八木ら⁽²⁰⁾の実験で用いられた水トリーとは異なるためである。なお、水トリーの電圧-電流特性は個々の水トリーにより若干異なるためこのような差が生じるものと考えられる。

このような水トリー進展に伴う損失電流波形の変化は八

木ら⁽²⁰⁾の実験により求められた結果と良く一致し、矛盾しないものである。従って、本研究で導出した水トリーの等価回路モデルは実際の水トリーの電気的特性を良く再現できるものであり、妥当であると考えることができる。

4. 水トリー形状と損失電流波形

次に、水トリーの形状の違いにより損失電流波形にどのような違いが見られるか、図 11(a)~(c)に示す 3 つのモデルにおいてシミュレーションした。Model 1 と Model 2 は水トリー劣化部が占める割合は同じ（水トリーの総面積は等しい）であるが、電界方向の長さが異なり、Model 1 は細く長く、Model 2 は横に広がっている。Model 1 と Model 3 は電界方向の長さは等しいが、横への広がり方が異なる。なお、ここでは水トリーを表す VDR の電圧－電流特性は図 6 において

図 11 水トリーモデルの形状

Fig. 11. The shape of the water tree model.

(a) Applied voltage is 1kV

(b) Applied voltage is 3kV

図 12 損失電流波形

Fig. 12. The loss current waveform.

1 本の貫通トリーの実測値から求められた値を用いた。

図 12(a)および(b)に交流印加電圧 1kV, 3kV における各モデルの損失電流波形を示す。なお、印加電圧の周波数はいずれも 50Hz である。

Model 1 より計算される損失電流波形と Model 2 より計算される損失電流波形を詳細に比較すると、Model 1 では印加電圧が 1kV の時は、電流のピークが二つ現れ、僅かに後ろのピークが大きいのが分かる。これに対して Model 2 ではピークがつぶれた形状となっている。印加電圧が 3kV となると、Model 1 では前のピークが大きくなり、後方のピークは見られなくなっている。一方、Model 2 では後ろのピークが大きくなり、前方のピークは見られない。このように、水トリーの総面積が同じでも、形状（電界方向の伸び）が異なると損失電流波形には大きな違いが見られる。

同様に Model 1 より計算される損失電流波形と Model 3 より計算される損失電流波形を比較すると、印加電圧 1kV において、Model 3 は電流のピークが前にずれ、後ろのピークはほとんど見られず、明らかに Model 1 と異なった損失電流波形を示している。印加電圧 3kV においては、Model 3 では後ろのピークが大きくなって、前のピークは見られなくなっているのに対して、Model 1 では前のピークが大きくなっており、全く異なった損失電流波形となっている。

このように、水トリーの形状により損失電流波形は大きく変化する可能性があり、水トリーの形状を考慮した解析が必要であると考えられる。なお、水トリーの形状の変化に伴い、水トリー劣化部の電圧－電流特性が異なる事も予想されるため、今後更なる検討が必要である。

5. まとめ

本研究では、格子状に配置した静電容量と抵抗からなる XLPE の等価回路の一部を、水トリーを模擬した電圧依存型抵抗(VDR)に置き換えることにより、水トリー劣化した XLPE 試料の等価回路モデルを作製し、回路シミュレータにより損失電流波形の計算を行った。本研究により得られた成果を以下にまとめる。

(1) 本研究で提案した等価回路モデルにおいて、貫通水トリーの電圧－電流特性の実測データより VDR の特性を適切に設定することにより貫通水トリーの電圧－電流特性を正確に表現できることが分かった。また、水トリーの進展に伴う損失電流波形の変化をシミュレーションしたところ、過去に報告されている結果とよく一致することが分かった。これらのことより、本研究で提案した等価回路モデルおよびこれを用いた解析手法は妥当であると考えられる。

(2) 水トリーの形状を変え損失電流波形の変化を検討したところ、試料内のトリーの全長が等しくても、その形状が異なると損失電流波形には大きな違いが見られることが分かった。すなわち、電界方向へのトリーの伸びが等しくとも、水トリーの横方向への広がり方が異なると損失電流波形に違いが見られる。

本研究手法では、水トリーの形状を正確に表現したシミュレーションが可能であり、今後様々な形状の水トリーの電圧－電流特性等を詳細に測定することにより更に詳細な検討が可能になると考えられる。

最後に、本研究の遂行に多大な協力を頂いた、本学博士前期課程（現富士通 AMD）猪俣仁吉氏、都泰紀氏、福田剛士氏に謝意を表する。本研究は科学研究費（課題番号 15660235）の援助による。

（平成 16 年 3 月 15 日受付，平成 16 年 11 月 1 日再受付）

文 献

- (1) T.Tokoro, M.Nagao, and M.Kosaki: "Development of New Method for Measuring AC Dissipation Current in Dielectric Materials", *T.IEE Japan*, Vol.109-A, No.11, pp.467-473 (1989-11) (in Japanese)
所 哲郎・長尾雅行・小崎正光:「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**, 11, pp.467-473 (1989-11)
- (2) 横山昭彦・所 哲郎・水野幸男・長尾雅行・小崎正光:「交流損失電流波形による新しい水トリー劣化診断法の開発 (II)」, 平成 2 年電気学会全国大会, No.314 (1990)
- (3) 横山知弘・脇所 厚・坂本 中・森 浩一・中川雅善:「交流損失電流測定による 22 k VCV ケーブルの劣化診断法の検討」, 平成 7 年電気学会全国大会, No.1752 (1995)
- (4) 蒲原弘昭・工藤善則・篠原 功・伊藤 彰:「水トリーの誘電特性」, 電気学会誘電・絶縁材料研資, DEI-96-103 (1996)
- (5) 八木幸弘・田中秀郎・一柳直隆:「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, No.1855 (1997)
- (6) 蒲原弘昭・工藤善則・篠原 功・伊藤 彰:「低周波損失電流測定による CV ケーブルの絶縁劣化診断に関する検討」, 電気学会誘電・絶縁材料研資, DEI-97-93 (1997)
- (7) 藤井雅之・遠山和之・所 哲郎・村本裕二・長尾雅行・小崎正光:「交流高電界領域における高分子フィルムの損失電流波形に対する検討」, 電気学会誘電・絶縁材料研資, DEI-98-64 (1998)
- (8) 蒲原弘昭・工藤善則・篠原 功・伊藤 彰:「低周波電圧を用いた絶縁診断における水トリー劣化検出性能」, 電気学会誘電・絶縁材料研資, DEI-98-76 (1998)
- (9) 岡村博行・元治 崇・原田 真・淡路貴洋・弘津研一:「22kVCV ケーブルの高調波損失電流」, 電気学会誘電・絶縁材料研資, DEI-98-81 (1998)
- (10) J.Kawai, J.Shinagawa, S.Nakamura, and G.Sawa: "Distorted ac Loss Current and Non-Linear Electrical Conduction of Water Treeing Degraded Polyethylene", *T.IEE Japan*, Vol.119-A, No.1, pp.92-99 (1999-1) (in Japanese)
川井二郎・品川潤一・中村修平・澤 五郎:「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**, 1, pp.92-99 (1999-1)
- (11) J.Kawai, M.Ogishima, Y.Li, J.Shinagawa, Y.Ebinuma, S.Nakamura, and G.Sawa: "Dynamism of Interconnected Channels in Water Treed Polyethylene under a Constant Voltage", *T.IEE Japan*, Vol.120-A, No.1, pp.56-61 (2000-1) (in Japanese)
川井二郎・荻島みゆき・李 英・品川潤一・海老沼康光・中村修平・澤 五郎:「水トリー内の連結チャネルの一定電圧下におけるダイナミズム」, 電学論 A, **120**, 1, pp.56-61 (2000-1)
- (12) J.Kawai: "Simulation of Water Tree Phenomena", *J.IEJ*, Vol.24, No.5, pp.245-248 (2000-5) (in Japanese)
川井二郎:「水トリー現象のシミュレーション」, 静電気学誌, **24**, 5, pp.245-248 (2000-5)
- (13) S.Nakamura, N.Ito, J.Kawai, J.Shinada, and Y.Ebinuma: "Frequency Dependence of Conductivity of the Open Channel Region in Water Treed XLPE", *T.IEE Japan*, Vol.120-A, No.12, pp.1114-1120 (2000-12) (in Japanese)
中村修平・伊東則幸・川井二郎・品川潤一・海老沼康光:「水トリー劣化ポリエチレンの開いたチャンネル領域の導電率の周波数依存性」, 電学論 A, **120**, 12, pp.1114-1120 (2000-12)

- (14) M.Suzuki, S.Shibata, and N.Yoshimura: "Analysis for Noise Reduction Mechanism of Ceramic Varistor using SPICE", *T.IEE Japan*, Vol.115-A, No.4, pp.384-385 (1995-4) (in Japanese)
鈴木雅史・柴田信悦・吉村 昇:「回路シミュレータによるセラミックバリスタのノイズ吸収特性の解析」, 電学論 A, **115**, 4, pp.384-385 (1995-4)
- (15) M.Suzuki, S.Shibata, and N.Yoshimura: "Analysis for Noise Reduction Characteristics of Ceramic Varistor using Circuit Simulator", *T.IEE Japan*, Vol.116-A, No.4, pp.177-182 (1996-4) (in Japanese)
鈴木雅史・柴田信悦・吉村 昇:「等価回路モデルによるセラミックバリスタのノイズ吸収特性の解析」, 電学論 A, **116**, 4, pp.177-182 (1996-4)
- (16) M.Suzuki, S.Shibata, and N.Yoshimura: "Determination of Equivalent Circuit of Ceramic Varistor", *J.IEJ*, Vol.24, No.6, pp.343-347 (2000-6) (in Japanese)
鈴木雅史・柴田信悦・吉村 昇:「セラミックバリスタの等価回路モデルの作製」, 静電気学誌, **24**, 6, pp.343-347 (2000-6)
- (17) M.Suzuki, S.Shibata, and N.Yoshimura: "Analysis of Noise Absorption Characteristics of Ceramic Varistor Using Equivalent Circuit", *J.IEJ*, Vol.25, No.3, pp.153-157 (2001-3) (in Japanese)
鈴木雅史・柴田信悦・吉村 昇:「等価回路モデルによるバリスタのノイズ吸収機構の解明」, 静電気学誌, **25**, 3, pp.153-157 (2001-3)
- (18) S.Hvidsten, E.Ildstad, and J.Sletbak: "Understanding water treeing mechanisms in the development of diagnostic test methods", *IEEE Trans. Dielect. Elect. Insulation*, Vol.5, No.5, pp.754-760 (1998)
- (19) 本井見二・弘津研一・細江勝広・徳丸亀鶴・松生徹治:「損失電流測定による CV ケーブル劣化診断法の研究」, 電気学会誘電・絶縁材料研資, DEI-95-37 (1995)
- (20) Y.Yagi, H.Tanaka, H.Muto, and H.Kimura: "Study on Diagnostic Method for XLPE Cable by Harmonics in Loss Current", *T.IEE Japan*, Vol.119-B, No.4, pp.438-444 (1999-4) (in Japanese)
八木幸弘・田中秀郎・武藤秀二・木村人司:「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」, 電学論 B, **119**, 4, pp.438-444 (1999-4)

鈴木 雅 史

（正員）1990 年北海道大学大学院博士課程単位取得退学。同年秋田大学助手，1993 年同講師，1995 年同助教授，現在に至る。工学博士。専門はシミュレーション工学。照明学会，静電気学会，日本素材物性学会会員。

伊 藤 淳

（正員）1987 年秋田大学大学院修士課程修了。同年福島工業高等専門学校助手，1996 年同講師，現在に至る。専門は電気・電子材料工学。応用物理学会，静電気学会，日本セラミックス協会，日本素材物性学会会員。

吉 村 昇

（正員）1969 年秋田大学大学院修士課程修了。同年秋田大学助手，1983 年同教授。1995～98 年秋田大学鉱山学部長。1998～2000 年学部名称変更に伴い秋田大学工学資源学部長，2002～2004 年同学部長，現在に至る。工学博士。専門は電気・電子材料工学，バイオ電磁気工学。日本素材物性学会名誉会長，静電気学会理事。IEEE，他会員。