

修士学位論文要約（令和 4 年 3 月）

60kV 級 CV ケーブルにおける水トリーのモデル化手法と 損失電流および絶縁破壊電圧の評価に関する研究

板垣 航大

指導教員：斎藤 浩海， 研究指導教員：八島 政史

Study on Modeling Method of Water Trees and Evaluation of Loss Current and Breakdown Voltage in XLPE Cable at 60kV Class

Kodai ITAGAKI

Supervisor : Hiroumi SAITOH, Research Advisor : Masafumi YASHIMA

Water tree is one of the causes of insulation deterioration of XLPE cable. In this study, the conductivity of water tree in XLPE cable at 60kV class is estimated from the measured values of breakdown voltage and AC loss current. Using the estimated conductivity, the maximum electric field is evaluated by varying the length of water tree.

1. はじめに

水トリーは CV ケーブルの絶縁劣化の主要因のひとつであり、CV ケーブルに対する劣化診断を行う際に、水トリーに起因した劣化信号を検出する必要がある。特別高圧クラスの CV ケーブルに対する水トリー劣化診断手法として、交流損失電流法が実用されている。この手法では、交流損失電流波形に含まれる第 3 次高調波成分の波高値 (I_3) と重畳位相 (θ_3) に基づいて劣化判定が行われている。近年、水トリーをモデル化し数値シミュレーションを用いることで、水トリーによって発生する電界や電流の評価が試みられている。水トリーのモデル化において、水トリーの導電率は重要なパラメータであり適切に設定する必要がある。本研究では、前駆遮断電圧と交流損失電流の実測値から水トリーの導電率を推定した。推定した導電率を用いて水トリーをモデル化し、水トリーの長さを変化させて最大電界を評価した。

2. 水トリーのモデル化による 60kV 級 CV ケーブルにおける水トリーの導電率の設定

本解析では、有限要素法に基づく電界計算ソフト (Simcenter MAGNET Electric, Siemens 社製) を用い、図 1 に示す 60kV 級撤去 CV ケーブルに対する前駆遮断試験¹⁾ によって検出された内導水トリー、内外導非到達ボウタイトリー (以下、内外導非到達 BTT) をモデル化し、ケーブル構造を模擬した 3 次元同軸円筒モデルの架橋ポリエチレン層内に配置した。解析では、水トリー先端の最大電界と印加電圧の関係は算出した。

水トリーの導電率は式(1)から導出した。

$$\sigma = d(1 + kV^2)/Sr \quad (1)$$

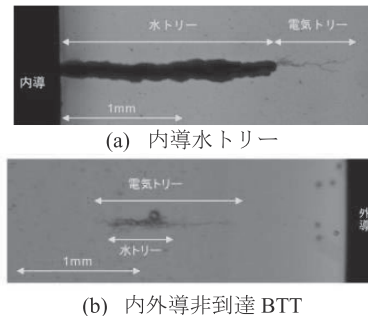


図 1 60kV 級 CV ケーブルで検出された水トリー¹⁾

ここで、 d は電極間距離、 V は印加電圧、 S は水トリーの断面積、 k は非線形の程度を表す定数、 r は線形抵抗要素である。これらの数値は文献 2) を参考に、 $d = 3.1\text{mm}$ 、 $S = 1.06\text{mm}^2$ 、 $k = 9.5 \times 10^{-7}$ 、 $r = 1.0 \times 10^{10}$ と設定した。また、式(1)の S と d は固定し、 k と r の値を $k = 9.5 \times 10^{-8}$ 、 $r = 1.0 \times 10^{11}$ と $k = 9.5 \times 10^{-9}$ 、 $r = 1.0 \times 10^{12}$ へと、導電率を低く、非線形を弱くするように変化させた導電率も使用した。ここで、 $k = 9.5 \times 10^{-7}$ 、 $r = 1.0 \times 10^{10}$ としたとき、 $k = 9.5 \times 10^{-8}$ 、 $r = 1.0 \times 10^{11}$ としたとき、 $k = 9.5 \times 10^{-9}$ 、 $r = 1.0 \times 10^{12}$ としたときの導電率をそれぞれ導電率①、導電率②、導電率③と呼称する。

図 2 に内導水トリーに対する、導電率を変化させたときの印加電圧と水トリー先端の最大電界の関係を示す。電気トリー発生電界とされている 220 [kV/mm] ~ 300 [kV/mm]³⁾ となる印加電圧と前駆遮断電圧の実測値から導電率③が妥当であると考えられる。内外導非到達 BTT に対しても同様に解析を行ったところ、導電率③が妥当であると評価した。

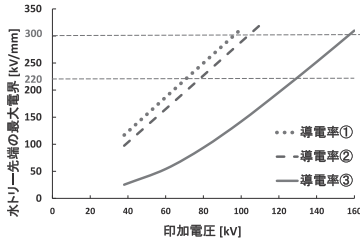


図2 印加電圧と最大電界の関係

3. 交流損失電流の測定結果との比較

〈3.1〉 撤去 CV ケーブル内に存在するポウタイリーの長さ—個数分布 本研究で観察対象とした東北電力ネットワークの管内で運用された 2 本の線路(線路①, 線路②)について, それぞれ無作為に抽出した 4 枚のケーブルスライス片の断面を観察した。スライス片 1 枚につき約 5mm² の範囲を 12 ヶ所撮影し, ポウタイリー (以下 BTT) の個数と長さを計測した。図 3 に線路①, 線路②のスライス片 4 枚に対する BTT の個数—長さ分布を平均化した分布を示す。

〈3.2〉 交流損失電流の推定 図 4 に示す長さ 100μm, 200μm, 300μm の BTT をモデル化し, 解析を行った。解析では BTT の個数と体積を変化させ, 実効値で 15kV の交流電圧を周波数 50Hz で印加したときの I_3 と θ_3 の値を算出した。水トリーの導電率は導電率③とした。 I_3 の値は BTT の個数と総体積に比例し, θ_3 の値はほとんど変化しなかった。この解析結果と計測した個数—長さ分布からケーブル全体を流れる交流損失電流を推定する。

300μm の BTT 1 本あたりの I_3 は 9.6×10^{-14} [A] と求められた。これに BTT の長さから換算した体積比率, BTT の個数, 観察対象 12 ヶ所の面積とスライス片 1 枚の面積比率, スライス片の厚みとケーブル全長の比率を乗算することで, ケーブル全体の I_3 を推定した。

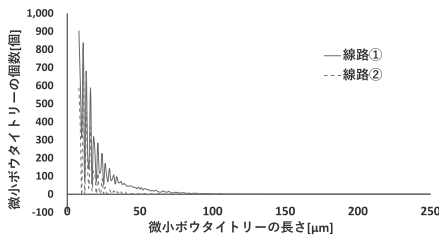


図3 BTT の個数—長さ分布

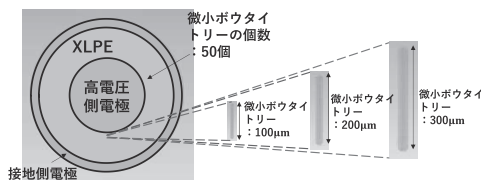


図4 BTT とケーブル構造を考慮した 3 次元モデル

表 1 交流損失電流の実測値と推定値

	線路①		線路②	
	実測値	推定値	実測値	推定値
I_3 [A]	4.5×10^{-6}	5.3×10^{-6}	3.3×10^{-7}	7.8×10^{-7}
θ_3 [°]	-45	-56.6	-36	-55.4

表 1 に I_3 , θ_3 の実測値と推定値を示す。 I_3 の推定値と実測値のオーダーの一致が見られたことから, 交流損失電流の面でも導電率③が妥当であると考えられる。また, モデル化によって, I_3 の概ねの評価が可能であると考えられる。

4. 絶縁破壊電圧の推定

内外導非到達 BTT をモデル化し, 解析を行った。解析では, 内外導非到達 BTT の長さを仮想的に 1mm, 2mm, 3mm, 4mm と伸展させたとき, 水トリーの先端の最大電界が 220[kV/mm], あるいは 300[kV/mm] に達する印加電圧の算出を試みた。

図 5 に内外導非到達 BTT 長と絶縁破壊電圧の関係を示す。水トリー長が長くなるほど絶縁破壊電圧は低下した。このように水トリーの形状と絶縁破壊電圧を評価することで CV ケーブルの劣化度や余寿命を評価できると考えられる。

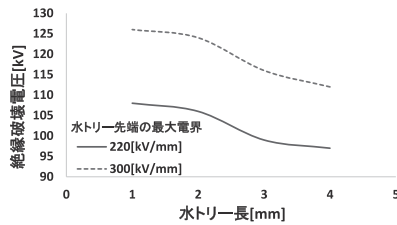


図5 水トリー長と絶縁破壊電圧の関係

5. まとめ

水トリーの導電率として, 導電率③が妥当であると考えられる。また, 架橋ポリエチレンの電気トリー発生電界を用いて, CV ケーブルの絶縁破壊電圧を推定できる見通しを得られた。

文献

- 1) 高橋俊裕 ほか: 「乾式架橋方式 60kV 級撤去 CV ケーブルの絶縁破壊前駆遮断による絶縁性能の経年低下特性と低下要因の把握」, 電学論 B, Vol.140, No.4, pp.299-304 (2020)
- 2) 牧野広俊 ほか: 「加速劣化試験を実施した 6.6kV CV ケーブルの水トリー劣化調査に基づく水トリーのモデル化と過渡電界解析による直流漏れ電流・交流重量電流の算出と交流絶縁破壊電圧の推定」, 電学論 A, Vol.140, No.10, pp.491-499 (2020)
- 3) 片貝昭史 ほか: 「ボウ・タイ状水トリーからの電気トリー発生メカニズムの検討」, 電学論 A, Vol.139, No.5, pp.264-276 (2019)