



XLPE

ケーブルを用いた部分放電電流の長距離伝搬特性

メタデータ	言語: jpn 出版者: 宮崎大学工学部 公開日: 2020-11-02 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 山下, 勝也, 迫田, 達也, Yamashita, Katsuya メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10458/00010080

XLPE ケーブルを用いた部分放電電流の長距離伝搬特性

山下 勝也^{a)}・迫田 達也^{b)}

Study on Propagation Characteristics of High Frequency Pulse Current in Electric Power Cable

Katsuya YAMASHITA, Tatsuya SAKODA

Abstract

The demand of reliable power systems and stability of electrical power supply are quite crucial for all of power companies. On the other hand, power systems installed during the period of high economic growth have been operating for over 30 years in Japan. For transmission and distribution lines, cross-linked polyethylene (XLPE) cable plays an important role in distributing the stable power to customers. Electric failure for the XLPE cable decreases year by year because of progress of manufacturing. However, at joint and terminal sections of the XLPE cable, partial discharges (PDs) occur in defects of insulating materials. The PD generation can occur at any points in the insulation system where electric field strength exceeds a PD inception electric field and can develop until breakdown occurs. That is, PDs which are owing to local electrical stress in the insulation or on the surface of the insulation reflect a kind of sign of insulation deterioration. Therefore, PD measurement is a useful technique of assessing the insulation deterioration of XLPE cables. In this study, the pulse propagation characteristics of a PD on actual 22kV XLPE cables were investigated.

Keywords: Partial Discharges, Power Cable, Propagation Characteristics, Attenuation

1. まえがき

現在、日本各地で使用される架橋ポリエチレン絶縁ケーブル（以下、XLPE ケーブル）は、その多くが高度成長期に導入されたものであり高経年化が進行している。XLPE ケーブルの寿命は約 30 年とされ、劣化による事故が全国各地で発生している。一度電気事故が発生すると、各家庭のみならず、企業のオフィスや工場等まで操業停止となり復旧にも長時間を要し多大な損害をもたらすため¹⁾、信頼性の高い保守や異常の兆候を早期に発見できる技術が不可欠である。しかし、電力需要の頭打ちの傾向や電力自由化等を背景にした最近の厳しい社会情勢下では、点検・診断や更新時期を計画的に運用し、事故を未然に防ぎつつ寿命限界まで使用したいという要望があり、上述した保守・監視作業は効率的に低コストで実施できることが望ましい²⁾³⁾。

電力ケーブルの事故要因の一つに絶縁破壊がある。これはケーブル絶縁体中のボイド・異物・突起等を起点として、部分放電・電気トリー・水トリーといった劣化形態が現れ

絶縁破壊に至る⁴⁾。絶縁破壊に至る過程では極めて微小な放電である部分放電が発生することが知られている。同放電はケーブルの絶縁性能低下の前駆現象であり、これを検出することは事故の未然防止に繋がる。従って、設備の効率的な運用及び保守が求められる中、部分放電検出による劣化診断はますます重要になっており、電力ケーブルの寿命を最大限に利用するため、部分放電測定による劣化診断の高精度化が期待されている⁵⁾。

活線状態の電力ケーブルの劣化診断技術の 1 つに、絶縁破壊の予兆現象である部分放電を観測することにより絶縁劣化診断を行うものがある。同技術においては、部分放電の発生箇所を特定すれば部分放電の規模を明らかにでき、不良ケーブル区間が特定されるため経済的な保守管理が可能となる。なお、部分放電の位置を特定する手法には点標定方式がある。同方式は、部分放電により発生した電流パルスをも 2 地点に配したセンサで検出し、センサ間での検出時間差（伝搬時間差）から発生点を特定するものであり、電力ケーブルの不良点を標定する技術に広く応用されている。しかし、部分放電によって発生する高周波電流は、長距離伝搬により大きく減衰するため、片端の電流センサで電流を検出できずに伝搬時間差を算出できないことが想定される。このような場合には、電流センサの配置を変えて測定を再度行う必要があり、労力とコストがかかることになる。効率的な位置標定技術の確立を目指すにあつ

a) 電気電子工学専攻大学院生

b) 工学教育研究部

て、長距離線路における高周波電流の減衰特性の検討は非常に重要である。

本研究では、長尺ケーブル内を伝搬する部分放電電流の減衰特性を明らかにすることを目的として、実ケーブルを用いた高周波電流の伝搬試験を行った。得られた結果をもとに、使用するCTセンサの適切な測定周波数帯域の選定、減衰率を用いた部分放電発生近傍での電荷量予測について検討した。

2. 劣化位置標定手法の概要

図1に点標定方式の概要を示す。ケーブルのある位置で発生した部分放電による電流パルスが被測定ケーブルの両端に設置した Current Transformer (CT) センサで検出し、各 CT センサへの電流パルスの到達時間差から部分放電発生箇所を特定する。ケーブル両端の CT センサで部分放電による電流パルスを検出した場合、電流パルスの到達時間差を Δt 、電力ケーブルの長さを L [m]、電力ケーブル中の電流パルスの伝搬速度を v [m/s] とすると、ケーブル片端から部分放電発生箇所までの距離 x [m] は以下のように与えられる。

$$X = (L - \Delta t \cdot v) / 2 \quad (1)$$

しかし、一般に配電系統は接続部や分岐が数多く存在するため、長距離線路において位置標定を行う場合、電流パルスが分岐及び減衰し、両端の CT センサで電流パルスを観測することが困難になる場合がある。CT センサで電流パルスを検出できなければ、到達時間差を算出できないため位置標定ができない。

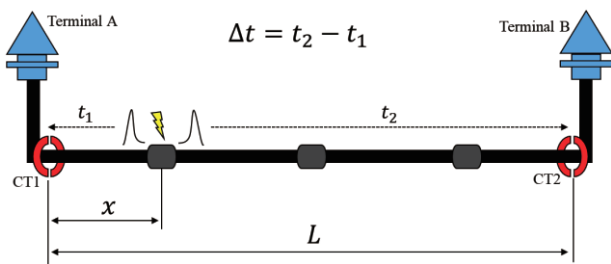


図1. 位置標定の概要

3. 高周波電流の長距離伝搬による減衰

3.1 CT センサ遮蔽クランプ時の減衰特性

図2に実験概要を示す。22 kV 級 XLPE ケーブル 150 mm² (50 m、150 m) を用いて、各々のケーブル長を伝搬する際の部分放電電流の減衰特性を評価した。ケーブル末端部の導体部と遮蔽部間にエポキシ成形電極 (電極間距離 1 mm) を挿入した。ケーブル近端は、交流 60 Hz の高電圧 5 kV を導体部に印加し、遮蔽層を接地した。電極を挿入したケーブル末端部の遮蔽部に CT 1 をクランプ、さらに

ケーブル近端側の遮蔽部に CT 2 をクランプすることで、放電が発生した電極近傍から 50 m または 150 m のケーブルを伝搬した後の放電電流を観測した。使用した電極及び電極近傍で発生した部分放電電流波形 (ケーブル長 50 m 時) を図3に示す。なお、コロナ放電の発生を抑制するためにケーブル両端部は絶縁油に浸した。

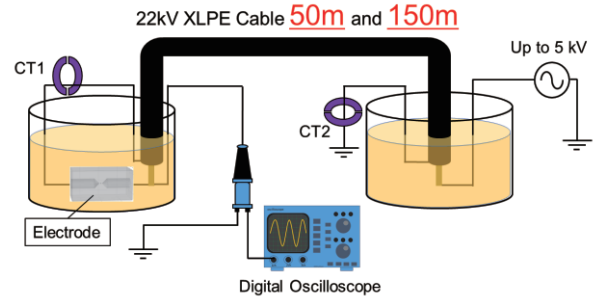


図2. 実験回路

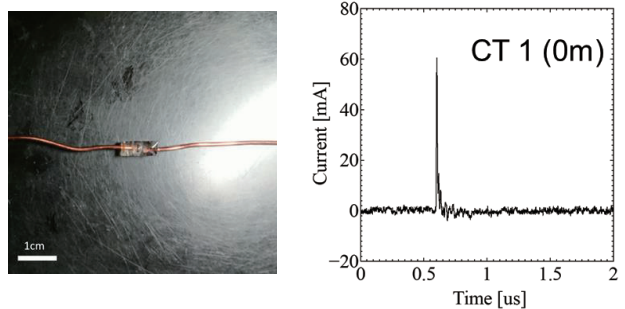


図3. 使用した電極と電極直下での放電波形

3.2 CT センサ導体クランプ時の減衰特性

図4に実験概要を示す。22 kV 級 CV ケーブル 150 mm² (150 m) を用いて、伝搬する際の部分放電電流の減衰特性を評価した。ケーブル末端部の導体部と遮蔽部間にエポキシ成形電極 (電極間距離 1 mm) を挿入し絶縁油に浸した。ケーブル近端は、交流 60 Hz の高電圧 3 kV を導体部に印加し、遮蔽層を接地した。CT 1 はケーブルの末端部 0 m (電極近傍) に固定、CT 2 をケーブル長 50 m 地点、100 m 地点及び 150 m 地点にクランプして、それぞれの地点で伝搬した部分放電電流の波形を観測した。

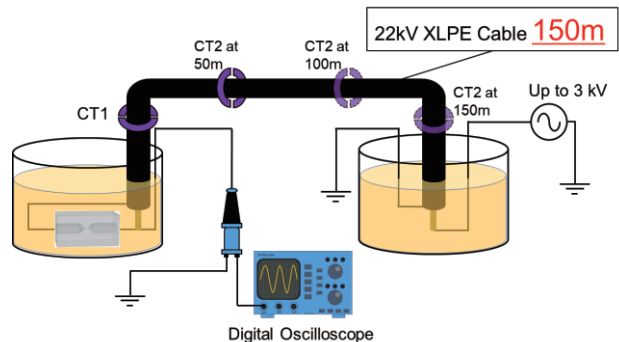


図4. 実験回路

4. 実験結果

4.1 CT センサ遮蔽クランプ時の減衰特性

図5及び図6に伝搬前後で観測した模擬部分放電電流波形を示す。150 m伝搬後の放電信号には比較的信号強度の高い部分放電電流の他、図中0.5 us周辺で逆極性の低強度の部分放電電流を観測した。これは、接地線を介した放電信号の回り込みが原因と考えられる。また、50 m伝搬後の放電電流には、信号の第一波目で部分放電電流の主成分を観測し、その後ケーブルのインピーダンスによる反射成分や振動成分が追従する。伝搬前後での放電信号のピーク値を比較し減衰率を評価した結果、50 mの伝搬で-33.53 dB、150 mの伝搬で-31.50 dBの減衰を確認した。

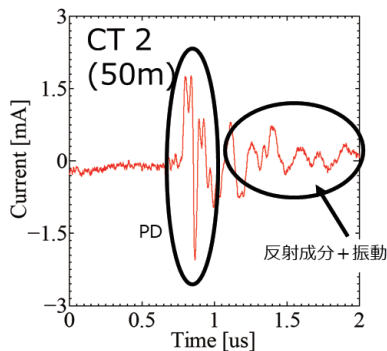


図5. 観測波形 (50 m地点)

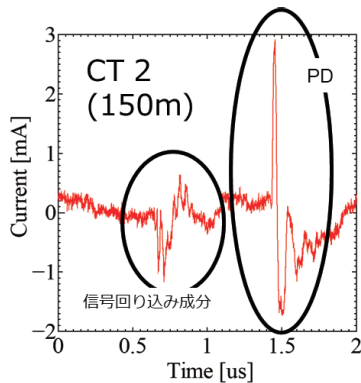


図6. 観測波形 (150 m地点)

また、図7に観測した各放電電流の強度と周波数の関係を示す。数十MHz以上の高周波成分は、低周波成分と比較して大幅に減衰していることが分かる。このように、部分放電電流は発生直後に数十MHz以上の高周波成分を含有している。さらに、この高周波電流が長尺ケーブルを伝搬すると、高周波成分は数m程度で減衰する。したがって、ケーブルを伝搬することで部分放電電流の波形はその形を大きく変えることが分かる。部分放電は、ケーブルの誘電率や絶縁材料、対地容量やインダクタンス成分等様々な要素が、その電流波形や伝搬特性に影響を与える。そのため、ケーブルのサイズや長さ、負荷の大きさ、接続部数、分岐数等でその特性は変化することが考えられる。

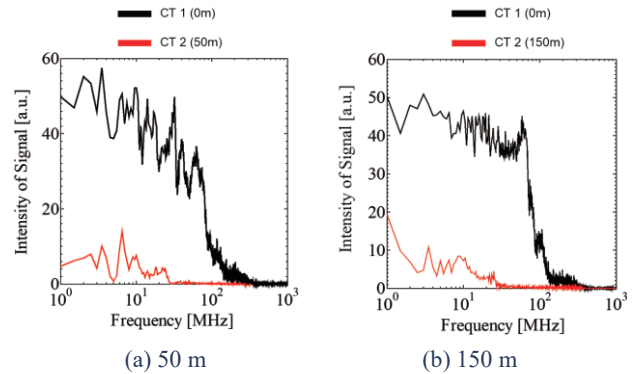


図7. 観測波形の周波数解析

また、図8に減衰率と周波数の関係を示す。同図から、50 mで既に数MHzの低周波帯も減衰しており、部分放電電流が数kmに亘って伝搬する場合その周波数成分の多くはさらに低周波(数kHzオーダー)での観測となる。しかし、低周波になると、変電所や接地線等から入るノイズとの区別が難しくなる。そのため、対象となる部分放電電流の周波数帯域は数百kHzが下限値となる。

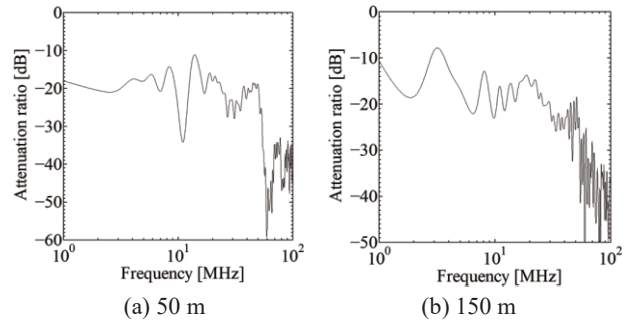


図8. 減衰率と周波数の関係

4.2 CT センサ導体クランプ時の減衰特性

図9に観測した部分放電電流の強度と周波数の関係を示す。遮蔽クランプ時と同様、数十MHz以上の周波数帯域の電流成分は低周波成分と比較して大幅に減衰していることが分かる。電極近傍で観測した放電波形は、100 MHzを超える高周波成分を含有しているにも関わらず、50 m伝搬後で既に減衰している。従って、被対象ケーブル区間の全長に対して、対象とする部分放電電流の周波数帯域を決定することが好ましい。上に述べた通り、下限値は数百kHz、上限は、100 mを超えるケーブル区間では100 MHz以下、100 m以内では50 MHz以下でバンドパスフィルタ等を使用する必要がある。また、部分放電電流のピーク値から算出した減衰率は、短いケーブルから、-24.52 dB、-26.68 dB、-28.41 dBであった。

また、図10に観測した部分放電電流の減衰率と周波数の関係を示す。保有しているCTセンサの数に限りがあり、同一の放電信号を取得することができないため、ケーブル長毎に電極近傍で観測している波形や周波数成分が異なる。発生している放電電流の波形・強度が異なるため、伝搬後の波形や周波数成分も異なる。本来、ケーブル長が長

尺になるほど各周波数帯域で減衰が見られることが予想されるが、同図の150 m地点にCTをクランプした際の結果は、その他の結果と比較して全体的に減衰率が小さいことが分かる。従って、本結果から各周波数帯の減衰率を検討するには不十分であるためCTの個数を増やす等、再検討が必要である。

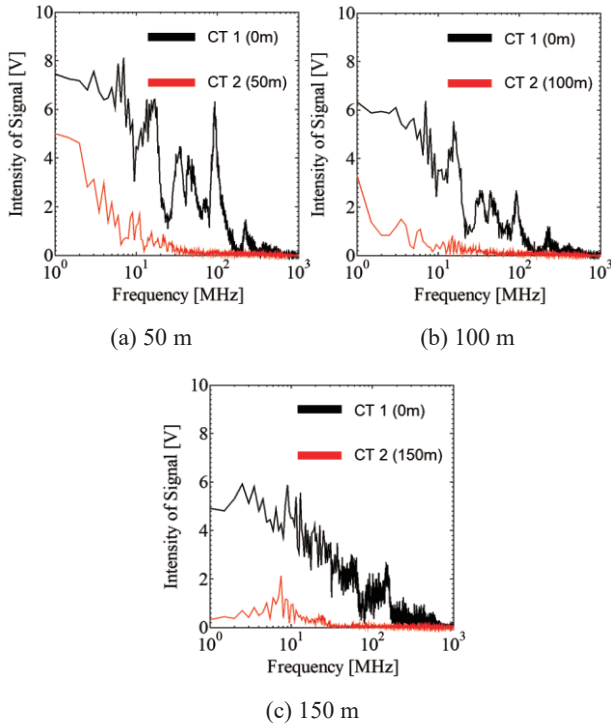


図9. 観測波形の周波数解析

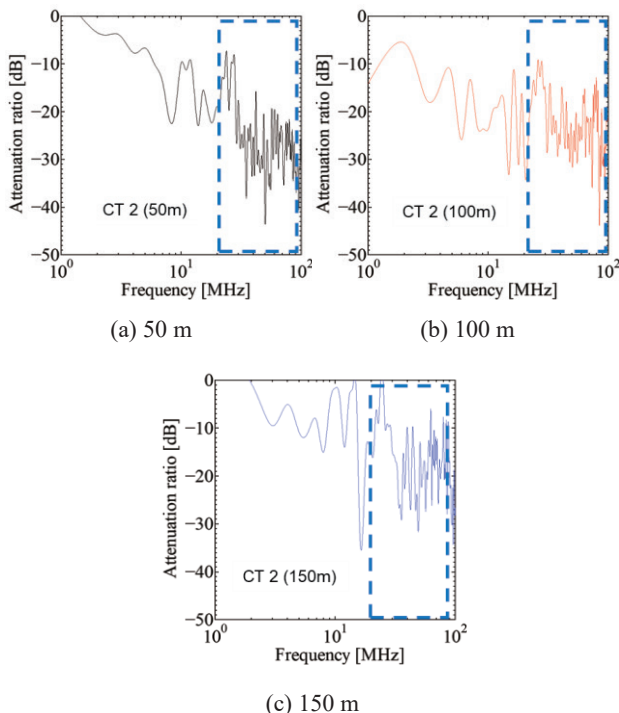


図10. 減衰率と周波数の関係

5. 両クランプ形態による減衰特性の比較

5.1 減衰率

各CTクランプ形態における部分放電電流の減衰率を図11に示す。CTセンサ導体クランプにおいて、50 mまでに-20 dB以上減衰し、それ以降は緩やかに減衰する指数関数を示した。上述した通り、高周波成分はケーブル長50 mを伝搬する段階で既に大幅に減衰する特徴を持つ。一方で、遮蔽クランプの場合は50 m地点より150 m地点で観測した信号強度が大きいことが分かる。これは、接地線を介した信号の回り込みによる波形の重ね合わせ、または遮蔽部と導体部それぞれの伝搬特性の違いによるものと考えられる。CTセンサのクランプ形態が異なれば、それぞれ材質や絶縁材料の相違から伝搬特性は異なるため、観測する信号の波形や強度も異なる。

また、ここでxをケーブル長として、同図の曲線を開関で表すと以下の通りである。

$$\text{導体クランプ} : y = -3.874 \ln(x) - 9.0548 \quad (2)$$

$$\text{遮蔽クランプ} : y = -4.702 \ln(x) - 11.304 \quad (3)$$

以上の各式から、導体クランプ時は1 km伝搬すると-36 dB = 1/63となり、遮蔽クランプ時は-43 dB = 1/141となる。

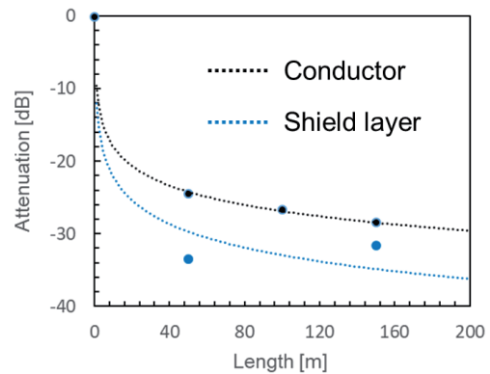


図11. 導体部と遮蔽層の部分放電電流の減衰特性

5.2 伝搬特性の相違

CT 1 (電極近傍)で観測した信号はクランプ形態の違いで強度が大きく異なった。図12に各クランプ形態で観測した波形を示す。放電の観測強度は遮蔽クランプで110 mA、導体クランプで11.1 mAと約10倍の差となった。これは、遮蔽クランプではIV線の被覆とその長さによるインダクタンス成分が影響するが、導体クランプではシースや架橋ポリエチレン等の絶縁層による対地容量に加え、導体部の太さや構造が大きく異なるためであると考えられる。さらに、一般に部分放電電流はケーブルの絶縁層で発生し、導体部と遮蔽層間での電荷の注入によって伝搬することが知られている⁶⁾。従って、導体クランプでは遮蔽層を流れる電流成分と導体を流れる成分で打ち消し合うため、遮蔽

クランプと比較して信号強度が低くなる。図13に概要を示す。

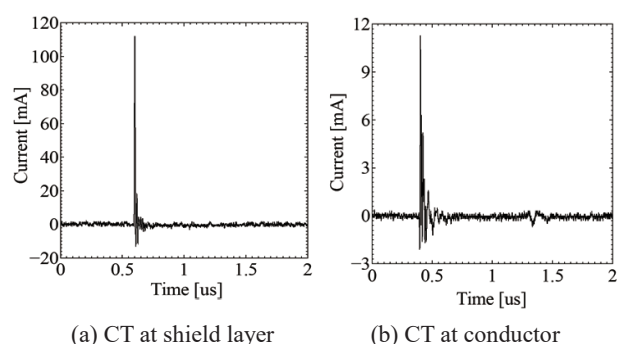


図12. 観測した部分放電電流波形

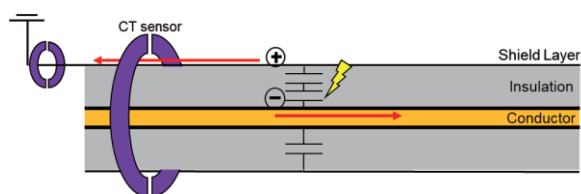


図13. 部分放電電流の伝搬特性

6. まとめ

本論文では、エポキシ成形電極を用いて発生させた模擬部分放電電流をXLPEケーブル内で伝搬させ減衰特性を評価した。その結果、導体クランプにおける減衰率は-36 dB/km (1 kmの伝搬で約1/63)、遮蔽クランプにおける減衰率は-43 dB/km (1 kmの伝搬で約1/141) であることが分かった。この結果から、位置標定や常時監視において観測した部分放電電流の発生位置の予測が可能となる。また、今回観測した電流波形の周波数特性から、対象とする部分放電電流の周波数帯域は、下限を数百kHz、上限を100 m超のケーブルは100 MHz、100 m未満のケーブルは50 MHzとすることが望ましい。さらに、CTセンサを導体クランプした際、部分放電電流の伝搬特性上、観測する信号強度が遮蔽クランプと比較して小さくなることが分かった。

参考文献

- 1) 江藤計介：「絶縁診断事例と今後の課題」, 平成 29 年電気学会全国大会, 2-S21-7, pp.23-26 (2017).
- 2) 高橋紹大, 岡本達希：「電流流通設備更新計画判断支援ツール開発」, 電学論 B, 128 巻, 1 号, pp. 336-341 (2008).
- 3) 内田克己, 岡本達希：「CV ケーブル絶縁劣化診断技術」, 電学論 A, 124 巻, 11 号, pp.935-938 (2004).
- 4) 犬塚博, 井上剛, 仲山正樹, 松本隆宇：「電力ケーブルの故障点探査における信号処理による精度改善」, 電学論 B, 120 巻, 11 号, pp.1416-11423 (2000).
- 5) 高橋俊裕, 宮寄悟, 野沢祐介, 栗原隆史, 牧野裕太, 岡本達希：「電力ケーブルの現場劣化診断のための部分放

電測定 of 階層化手法の提案」, 電力中央研究所, No. H14017, (2015).

- 6) 小川達也, 新元孝, 浦辺裕二, 室伏辰也：「実線路に適用可能な部分放電検出装置の開発」, 電学論 B, 127 巻 2 号, p.353-360, (2007).