

# 分岐線路における部分放電電流パルスの伝搬特性

山下 勝也<sup>a)</sup>・三宅 琢磨<sup>b)</sup>・迫田 達也<sup>c)</sup>・川野 渉<sup>d)</sup>

## Propagation Characteristics of Partial Discharge Pulse Current on Branched Line

Katsuya YAMASHITA, Takuma MIYAKE, Tatsuya SAKODA, Wataru KAWANO

### Abstract

Electric failure for the Cross-linked Polyethylene (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. We propose a partial discharge locator (PDL) system which uses a time synchronization system instead of measuring PDs propagation velocity. The PDL is a two sides system in a distance of over 1 km and possible to detect the fault position owing to PDs on the power cable without power interruption. In this study, we investigated how PDs propagate in XLPE cables which have a branch.

**Keywords:** Partial Discharge, Fault Locator, Branch Line, Propagation Characteristics

### 1. まえがき

電力ケーブルをはじめとする高経年設備の増加及び電力需要の減少によるコスト削減が重要視される中、既設設備の円滑な運用と維持管理への関心が一層高まっている<sup>①</sup>。既存の活線診断手法による保守管理の課題として、不良箇所の特定まで可能なシステムはほとんど実用化されていないこと、劣化予兆の発見に至ってもケーブル全体を交換する必要があるため経済的でないこと等が挙げられる。そのため電力設備を停止することなく監視できる技術、設備異常の兆候を診断するための劣化診断技術の高度化が望まれており、特に劣化箇所の位置標定技術が重要視されている<sup>②</sup>。

著者らは、部分放電検出による電力ケーブルの劣化箇所を活線状態で標定するシステムの開発を行っている。本システムを用いて実線路で広範囲において部分放電の位置標定を行う場合、線路上に複数の分岐が存在することが考えられる。長距離に亘り電流パルスが伝搬する際、電流パルスが含有する周波数に依存して減衰するほか、ケーブル長や分岐線が及ぼす影響が懸念される。ケーブル長及び周波数が減衰率に与える影響については検討が行われてい

るものの<sup>③</sup>、分岐線路が高周波を含む電流パルスに与える影響については検討例がない。分岐が電流パルスに与える影響を検討することは、効率的かつ経済的に位置標定ができるシステムの開発を進める上で必須である。

そこで本論文では、分岐を有する送電線路における部分放電による電流パルスの挙動について、実環境を模擬した試験と EMTP を用いた解析を行った。その結果、部分放電により発生した高周波信号は分岐点において、その信号の周波数成分及び分岐後のケーブルインピーダンスに依存して分流することを明らかとした。さらに、ケーブルの共振周波数より高周波の信号成分は、より長尺ケーブル側に流入する傾向にあり、広範囲での位置標定を行うにあたって長距離に亘り伝搬する可能性が得られたため報告する。

### 2. PDL(Partial Discharge Locator)システム

Fig.1 に PDL システムの概要を示す。測定対象ケーブルの左端の A 地点には CT (Current Transformer) センサと制御用 PC、電流誘導用コイル、さらに同コイル用の駆動電源が付随する。右端の B 地点には、CT センサと制御用 PC が配される。部分放電 (PD) によって発生する電流パルスはケーブル両端へ伝搬する。これを CT センサで取得することで位置標定を行う。それぞれの PC には USB デジタイザ (National Instruments 社製

a) 電気電子工学専攻大学院生

b) 工学部教育研究支援技術センター

c) 工学教育研究部

d) 西日本電線株式会社

USB-5133) が取り付けられており、CT センサで検出した電流パルス信号をデジタル化して PC に取り込む。B 地点側の PC で取得したデータは、無線通信で A 地点側へ送信される。このようにして得られた時間差情報を式(1)と(2)に代入することで位置を特定できる<sup>(3)</sup>。なお、データ取得や各種解析は LabVIEW によって作成した位置標定用プログラムを用いて行う。

$$l_1 = L (1 - \Delta t / \Delta T) / 2 \dots\dots\dots (1)$$

$$l_2 = L (1 + \Delta t / \Delta T) / 2 \dots\dots\dots (2)$$

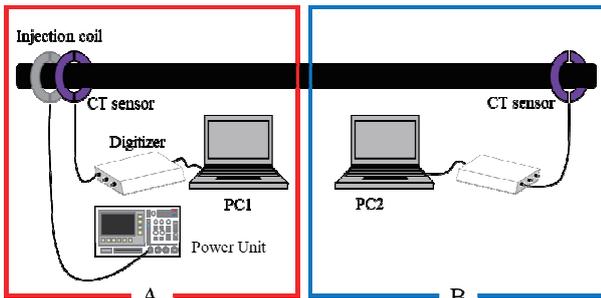


Fig.1 Schematic diagram of a PDL system

3. 分岐点における PD 伝搬特性の周波数解析

3.1 部分放電発生時の等価回路

部分放電発生時の等価回路を Fig.2 に示す。放電が発生すると放電部近傍の電圧が降下し、電荷の流入が起こる。これにより電流パルスが流れ、徐々に遠端へ伝搬していく<sup>(4)</sup>。伝搬していく過程で線路上のインピーダンスによりその強度は低下する。また、部分放電が線路の分岐点を伝搬する場合、その成分の一部は分岐点による影響を受けて分配される。PDL システムは、部分放電信号が両端に配置した CT センサで観測されない限り位置標定ができないため、分岐点における部分放電の伝搬特性を明確化することはシステムにとって重要な課題である。以下に示す回路において EMTP を用いて、高周波信号が分岐点においてどのように分配されるかを解析した<sup>(5)</sup>。

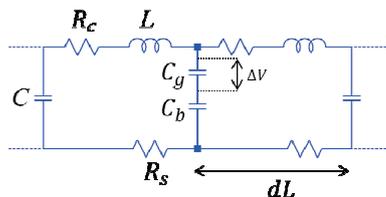


Fig.2 Equivalent circuit when partial discharge occurs<sup>(4)</sup>

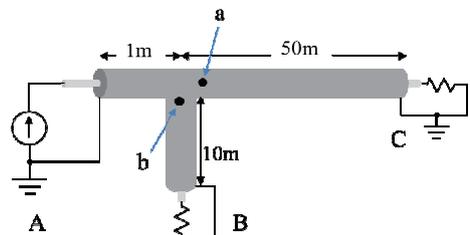
- $R_c$  : 導体の抵抗
- $R_s$  : 遮蔽層の抵抗
- $L$  : インダクタンス
- $C_g$  : 部分放電発生点の静電容量

- $C_b$  : 部分放電発生点近傍の静電容量
- $C$  : 絶縁体の静電容量
- $dL$  : 解析における単位長さ

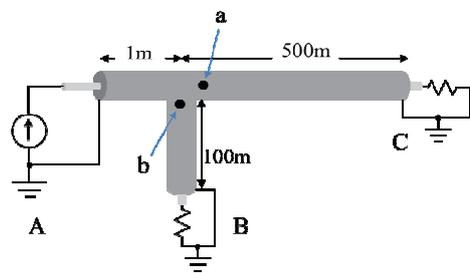
3.2 解析方法

Fig.3 に EMTP を用いて評価した具体的な解析モデルを示す。ここでは、それぞれ長さの異なるケーブルが接続された線路で 22kV 級架橋ポリエチレンケーブル 150mm<sup>2</sup> をモデルとして採用している。また、分岐後のケーブル長は、後述する実ケーブルを用いた検証との比較のため 1 対 5 に設定した。なお、末端のインピーダンス整合より、反射波の影響は考慮していない。

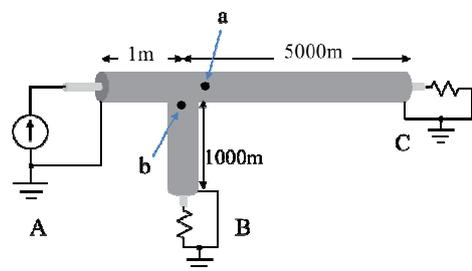
図中 A 地点から周波数の異なる正弦波電流波形 1A、1 周期を入射し、分岐直後の a 点と b 点で波形を観測し、分岐による電流波高値の変化を評価した。



(a) Circuit model 1



(b) Circuit model 2



(c) Circuit model 3

Fig.3 Circuit model for analyzing influence of branch

### 3.3 解析結果

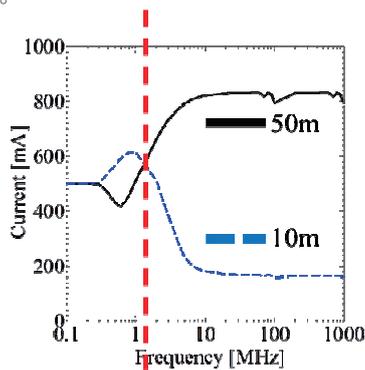
3つの解析回路モデルのそれぞれのa点及びb点の波高値をもとに作成した分岐点における高周波電流の伝搬特性をFig.4に示す。また、それぞれのケーブル互長のインピーダンスから算出した固有共振周波数と、各解析モデルにおいて線路全体を合成した場合の共振周波数をTable 1に示す。

Fig.4 (a)において50mと10mのケーブルインピーダンスを合成した場合の共振周波数が1.72MHzであり、周波数特性波形が互いに交わる付近に存在することがわかる。この共振周波数を境に、50mのケーブル側により高い波高値の電流信号を観測している。

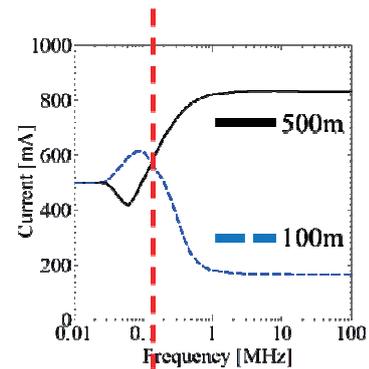
同様にFig.4 (b)において500mと100mのケーブルインピーダンスを合成した場合、共振周波数は0.172MHzとなり(a)の1/10の値となった。さらに(a)同様、周波数特性波形が互いに交わる付近に合成共振周波数は存在し、それを境に500mのケーブル側により高い波高値の電流信号を観測した。Fig.4 (c)においても、互いの周波数特性波形が交わった点を境に、長尺ケーブル側により高い電流信号を観測する結果となった。

高周波成分を含む電流信号の分岐点における伝搬特性は、ケーブル及び系統のインピーダンスに依存し、ケーブルが長くなる、つまりインピーダンスが高くなるにしたがって、より高周波成分が伝搬する傾向にあることが示唆された。

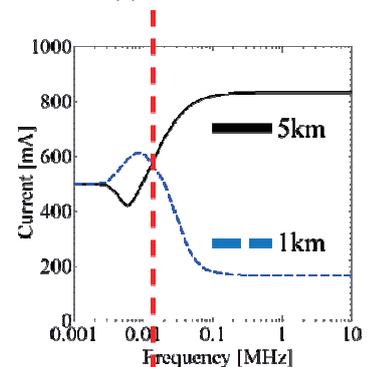
以上の結果より、電流パルス信号が分岐点を伝搬する場合、高周波成分は長いケーブル側もしくはインピーダンス値の高い系統側へ伝搬し、一方で低周波成分は短いケーブル側もしくはインピーダンス値の低い系統側へ伝搬する傾向にある。さらにその境界は、線路全体のインピーダンスによる共振周波数から求められることが示唆された。具体的に100m以下の系統(分岐あり)でPDLを行う場合、解析回路モデル①に従って伝搬することが考えられる。部分放電は高周波成分(数MHz以上)を含んで伝搬するため、分岐点においてその多くが長尺側に流れる。これはPDLシステムにとって好都合で、より広範囲において位置標定が可能であることを意味する。また、より長尺側に高周波成分が流れることで、長距離伝搬による減衰の懸念が緩和される。



(a) Circuit model 1



(b) Circuit model 2



(c) Circuit model 3

Fig.4 Frequency characteristics of pulse current

Table 1. Resonant frequency of circuit model

Length [m]	Resonant Frequency [MHz]	Combined resonant frequency [MHz]
10	2.87	1.72
50	0.574	
100	0.287	0.172
500	0.0574	
1000	0.0287	0.0172
5000	0.00574	

Resonant frequency is calculated by impedance when the cable is considered as a distributed constant circuit. Combined resonant frequency means when each cables are considered as a parallel circuit. (i.e. 10m and 50m)

### 3.4 PD 信号伝搬特性のインピーダンス依存性

分岐線路を模擬する際、Fig.3で示すように $\pi$ 型で表されるケーブルの等価回路が並列接続される。分岐後のケーブル長が異なることにより各ケーブル長の共振周波数は異なり、電流パルスの分岐特性も異なる。Fig.5にモデル回路2の解析に用いた条件における各ケーブル長のf-Z特性を示す。両曲線が交わる点が合成した際の共振周波数0.172 MHzと一致しており、この点を境に分岐特性が変化したことを確認した。さらにFig.5より、0.172 MHz以上の周波数においては100 mのケーブル側が高いインピー

ダンスを示していることがわかる。これにより、合成した場合の共振周波数以上の周波数帯において短尺ケーブル側の信号強度が長尺ケーブル側と比較して低い値となることが考えられる。

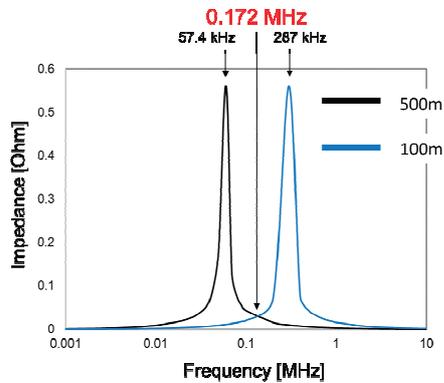


Fig.5 f-Z characteristics of model cables

#### 4. まとめ

本論文では、分岐点における電流パルスの伝搬特性についてEMTPを用いた周波数解析と、実ケーブルを用いて検証を行い、FFT解析結果において類似した結果を得た。電流パルスは分岐点を通過する際、分岐後のケーブルインピーダンスに依存しており、長いケーブル（比較的高インピーダンス）側に高周波成分が多く含まれる傾向にあることが分かった。数MHz以上の周波数成分が主な部分放電は分岐点を伝搬する場合、長いケーブル側に伝搬する傾向にあるためPDLシステムは、分岐の存在する線路においても適用可能であることが考えられる。

#### 参考文献

- (1) 電気協同研究：「地中送電ケーブルの保全技術」，電気協同研究第70巻，第1号，pp.39-45 (2014)
- (2) 電気学会：電気設備の診断技術 改訂版，オーム社 (2003)
- (3) 高橋俊裕 他：「高周波信号伝搬特性に基づく電力ケーブルでの効果的な部分放電測定手法の提案」，電力中央研究所，NO.H11031，p25，(2012)
- (4) Fred Steennis et al: "Permanent on-line monitoring of mv power cables based on partial discharge detection and localization -An update", Jicable 2007
- (5) 小川達也・新元孝・浦部裕二・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, pp.353-360 (2007)
- (6) 小川達也：「活線下部分放電検出装置 PDD-7202」，フジクラ技報，第 125 号, Vol.2, pp.31-36, (2013)