直埋ケーブル線路における部分放電測定方法の検証

正員 陳 敏[†], 正員 浦野 幸治^{††},

正員 関口 洋逸[†], 正員 米田 英彦[†], 正員 神野 厚英[†], 正員 福永 定夫[†]

([†]: ㈱ジェイ・パワーシステムズ, ^{††}: 住友電気工業株式会社)

Verification of Partial Discharge Measuring Method via Coaxial Bonding Wire for Direct-buried Power Cable

Chen Min[†], Member; Koji Urano^{††}, Member; Yoitsu Sekiguchi[†], Member; Hidehiko Kometa[†], Member; Atsuhide Jinno[†], Member; Sadao Fukunaga[†], Member

([†]: J-Power Systems Corp.; ^{††}: Sumitomo Electric Industries, Ltd.)

This paper describes a new method of measuring partial discharge (PD) via coaxial bonding wire for direct-buried power cable, with which partial discharge can be measured at the so-called link box usually installed beside the joint but on the ground. When cable joints are directly buried under ground, it is difficult to use the conventional measuring method to detect PD, since it is necessary to install a PD detection sensor directly at or on the joint. For direct-buried cable line, the formation of sheath bonding for each joint can be usually determined at a link box that is connected to joint via coaxial bonding wire. Five kinds of PD sensing circuits were proposed for PD measurement at link box and the methods have been verified through several experiments using sample cables in laboratory or being carried practically on a real cable line on-site. The paper summarizes the experimental results and gives a comparison of each method. The paper also shows the possibility of measuring PD for three phases instantaneously at one joint bay on-site. Some practical PD measurement for those kinds of direct-buried power cable conducted on-site will be also introduced with on-site photos.

キーワード: 部分放電, 直埋ケーブル, 同軸ボンド線, クロスボンド結線, ブロッキングコイル, 高周波CT, 伝搬減衰

Keyword: PD, buried cable, coaxial bonding wire, cross bonding, blocking coil, high frequency CT, propagation attenuation

1. まえがき

地中送電ケーブル接続部は現地で施工する必要があるため、運用前に電気的性能を確認するための耐圧試験などが実施されており、最近では超高压 CV ケーブル線路をはじめとする重要線路において部分放電 (PD) 試験が実施されている。日本国内の超高压地中送電線路は、主に洞道内に布設されているため、接続箱へのセンサ取り付けが容易であることから、様々な測定方法⁽¹⁾が提案されてきたが、特に箔電極センサを用いた方法⁽²⁾が一般に広く用いられている。PD検出感度についての要求は年々厳しくなっているが、この箔電極法は、測定対象である接続箱に直接センサを取り付けることで、高感度を実現している。

一方、海外の超高压ケーブルの多くは、直埋式、すなわち地中に直接埋設する方式で布設されている。直埋線路においても、竣工試験として高感度なPD測定の実施が強く求められているが、箔電極法などを適用してPD測定を行うためには、布設時に前もってセンサを取り付けておく必要がある。すでに埋設された接続箱をも対象とした場合、直接センサを取り付けることができないため、箔電極法などの従来法の適用は非常に困難である。このため、直埋線

路でのPD測定は実施が困難であり、実施例もほとんど報告されていないのが現状である。

そこで、著者らは前報⁽³⁾にて直埋状態にある接続箱のPDを測定する方法を提案した。これは、測定のための特別な線路工事なしにPD試験を行うことができ、竣工試験や定期点検等の合理化を図ることが可能である。本論文は、直埋線路でのPD測定方法について前報よりもさらに詳細な検討を行ったものであり、現地でのPD測定実施に適した具体的な測定方法を提案した。またこれに基づいて、実際に直埋状態での実線路においてPD測定を行った結果を報告する。

2. 直埋ケーブル線路のPD検出方法

日本国内の超高压地中送電線路では、竣工耐圧試験などでPD測定が行われており、線路の高電圧化に伴って検出感度についての要求が年々厳しいものとなっている。国内の電力ケーブルは主に洞道内に布設されているため、測定対象である接続箱に直接センサを取り付けることで、高感度でのPD測定を実現している。近年、海外の直埋線路においても健全性を確認するための高感度なPD測定の実施が強く求められているが、直埋線路で部分放電を測定しよ

うとしても、すでに埋設された接続箱に直接センサを取り付けることができないため、測定が非常に困難であった。

結線方法の変更やアレスタを取り付けるなどの目的で、直埋ケーブルの接続部シースは、図 1 (a) に示すように同軸ケーブルによって地上に設置されたリンクボックスまで導かれることが多い。この同軸ケーブルはシース電流を流すことを目的としており、特に超高压線路では导体サイズが 300mm^2 以上で長さ $10\sim 30\text{m}$ 程度のものが使用されている。リンクボックスの端子は、図 1 (b), (c) の様に金属板で IJ 結線（三相のシースをクロスボンドする）や NJ 結線（同じ相のシースを短絡）に接続される。

そこで、著者らはこの直埋線路での PD 測定法について検討を行い、リンクボックスにセンサを取り付けて PD 測定を行う同軸ケーブル法を前報⁽³⁾にて提案した。前報の同軸ケーブル法は、リンクボックスの接続端子にコイルを取り付けることで、PD によってシースに発生する高周波信号を同軸ケーブルを介して検出するものであり、比較的容易に実施することができる。前報における回路解析と実験検証によって、同軸ケーブルのインピーダンスによって若干感度が低下するものの、原理的に測定が可能であることを明らかにした。

しかしながら、前報で示した方法は NJ 結線のリンクボックスには容易に適用することが可能であったが、測定対象が IJ 結線の場合は線路の接地系統を変更することになってしまう。実線路への適用を考慮すると、接地系統を変更せずに IJ 結線のままで PD を測定する結線方法が必要であると考えられる。そこで、前報で示した方法以外の結線方法を提案し、検証実験と現地測定適用への検討を行った。

3. 検出法の検証実験

3.1. 近接注入による検証実験 提案する各結線方法において、同軸ケーブルによる感度低下について検討を行うため、図 2 に示す模擬実験回路を構築し、ケーブルコア-シース間に信号を直接注入（近接注入）した時の検出信号について実験を行った。シース中央に電気的非接触とした絶縁部を設けて接続箱を模擬した超高压 CV ケーブルに、実線路で使用されている同軸ケーブルを接続し、リンクボックスを模擬した。ここで、現地では三相同時測定が必要なため、3つの模擬接続箱を用いた。その同軸ケーブル先端に、表 1 に示す 5 つの結線方法でセンサを取り付けた。①, ②は NJ 結線での接続方法、③～⑤は IJ 結線での接続方法である。ここで、①は前報で示した従来法であるが、三相結線時の他相への影響を確認するため、また他結線方法との比較のために実施した。また、スペクトラムアナライザでの周波数分布測定の結果から、低周波ノイズと同軸ケーブルの減衰を考慮し、測定周波数を $10\sim 30\text{MHz}$ とした。

注入点 1 のケーブルコア-シース間へパルスジェネレータ (PG) によって PD 模擬パルスを入力し、センサ S1～

(a) 直埋式線路のリンクボックスの概要

(b) リンクボックスの IJ 結線

(c) リンクボックスの NJ 結線

図1 直埋式線路のリンクボックス

Fig.1. Link Box for Direct-Buried Cable

S4 で信号を観測した。これを表 1 に併記するが、検出方法の違いによらず、同軸ケーブル法 (S4) の信号レベルは箔電極法 (S2) のおよそ $1/2\sim 1/3$ であった。表中には示していないが、注入点 2 よりパルスを入力した場合には、S4 : S2 の関係はちょうど逆となる。この結果は前報とほぼ一致しており、S4 : S2 の割合を把握することで、こ

図2 近接注入用模擬実験回路

Fig.2. Experiment Circuit with Sample Cables for Local Injection

で提案した5種の結線方法全てで定量的な較正が可能であることを示している。

検出感度に着目すると、IJ結線に比べNJ結線で感度が高く、現地でのノイズレベルにもよるが、数pCが期待できる。また、IJ結線、NJ結線共に高周波ブロッキングコイルを用いた方法で検出感度が高い。すなわち、詳細な測定にはコイルを用いた方法(①, ③)が適しているといえる。

3. 2. 隣接注入による検証実験 同軸ケーブル法で信号を正常に検出していることを確認し、さらに異常相以外の相への影響を評価するため、図3に示す回路を構築して実験を行った。超高压線路のリンクボックスに表1と同様な結線方法でセンサを取り付け、ここから500m離れたリンクボックスのA相に250pCの模擬パルスを入力(隣接注入)し信号を測定した。検出結果を表2に示すが、全ての結線方法で信号を検出していることが確認できた。このことは、接続箱でPD信号が発生した場合でも、信号検

出が可能であることを裏付けるものである。

各結線方法における隣接注入時の検出感度は、概ね100pC程度であり、10MHz以上の信号は減衰が大きい。また、コイルを使用した方法(①, ③)では、異常相以外の相への影響がほとんどみられず、異常相の特定が可能であることが示唆された。④, ⑤の手法では、異常相以外の相でも信号が検出されており、異常相の特定は困難である。

3. 3. 現地測定適用への検討 これまで、5種の結線方法について実験による検討を行ってきたが、ここでは作業性や測定実施の容易さなどを含め、実際に現地測定に適用するための検討を行った。

実験結果と作業性などを、表3にまとめて示す。検出感度が高く、異常信号を検出した際に異常相の特定が容易なことから、ブロッキングコイルを用いた結線方法(①, ③)が、詳細な測定には最も適している。しかしながら、この方法はコイルにシース電流を流す必要があり電流容量に対

図3 400kV 線路での隣接注入実験

Fig.3. Next-joint Injection and Measuring Experiments at Real EHV Cable Line

表 1 三相同時測定における各近接注入方法のまとめ
Table 1 Summary of Each Local Injection Methods for Three-phase PD Measurement

No.	結線	検出回路	検出方法	検出信号の波形(20pC 注入)	検出信号の周波数分布(20pC 注入)	各 Ch の検出感度比較
①	NJ		ブロッキングコイルで高周波を 検出 コンデンサでP D検出器を接 続	Time 200ns/div S1 500mV/div S2 500mV/div S3 500mV/div S4 200mV/div	S4 10dB/div ↑ 5MHz/div → (0~50MHz)	サンプルケーブル端末に 20pC 直接注入した場合、各検 出信号レベルは S1 ≒ S2 ≒ S3 S2 : S4 ≒ 2 : 1 S4 は他のセンサの約 1/2 S4 の感度: 2pC 程度
②	NJ		高周波CTにて 信号を直接検 出	Time 100ns/div S1 100mV/div S2 100mV/div S3 100mV/div S4 100mV/div	S4 10dB/div ↑ 5MHz/div → (0~50MHz)	サンプルケーブル端末に 20pC 直接注入した場合、各検 出信号レベルは S1 ≒ S2 ≒ S3 S2 : S4 ≒ 3 : 2 S4 は他のセンサの約 2/3 S4 の感度: 3pC 程度
③	IJ		ブロッキングコイルで高周波を 検出 コンデンサでP D検出器を接 続	Time 200ns/div S1 500mV/div S2 500mV/div S3 500mV/div S4 200mV/div	S4 10dB/div ↑ 5MHz/div → (0~50MHz)	サンプルケーブル端末に 20pC 直接注入した場合、各検 出信号レベルは S1 ≒ S2 ≒ S3 S2 : S4 ≒ 2 : 1 S4 は他のセンサの約 1/2 S4 の感度: 5pC 程度
④	IJ		高周波CTにて 信号を直接検 出	Time 200ns/div S1 200mV/div S2 200mV/div S3 200mV/div S4 100mV/div	S4 10dB/div ↑ 5MHz/div → (0~50MHz)	サンプルケーブル端末に 20pC 直接注入した場合、各検 出信号レベルは S1 ≒ S2 ≒ S3 S2 : S4 ≒ 3 : 1 S4 は他のセンサの約 1/3 S4 の感度: 10pC 程度
⑤	IJ		直接コンデンサ でPD検出器を 接続	Time 200ns/div S1 200mV/div S2 200mV/div S3 200mV/div S4 100mV/div	S4 10dB/div ↑ 5MHz/div → (0~50MHz)	サンプルケーブル端末に 20pC 直接注入した場合、各検 出信号レベルは S1 ≒ S2 ≒ S3 S2 : S4 ≒ 2 : 1 S4 は他のセンサの約 1/2 S4 の感度: 8pC 程度

表2 三相同時測定における各隣接注入方法のまとめ

Table 2 Summary of Each Next-joint Injection Methods for Three-phase PD Measurement

No.	結線	検出回路	検出方法	検出信号の波形(250pC 注入)	検出信号の周波数分布(250pC 注入)	各相の検出感度比較
①	NJ		<p>ブロッキングコイルで高周波を検出</p> <p>コンデンサでPD検出器を接続</p>	<p>A相 10dB/div</p> <p>B相 5MHz/div</p> <p>C相 5MHz/div</p> <p>20mV/div</p> <p>500mSec/div</p>	<p>10dB/div</p> <p>5MHz/div</p> <p>(0~50MHz)</p>	隣接するリンクボックスにてR相に250pC注入した場合、測定点のR相の検出信号レベルは A = 100pC (B ≒ 0, C ≒ 0)
②	NJ		高周波CTにて信号を直接検出	<p>A相 20mV/div</p> <p>500mSec/div</p>	<p>10dB/div</p> <p>5MHz/div</p> <p>(0~50MHz)</p>	隣接するリンクボックスにてR相に250pC注入した場合、測定点のR相の検出信号レベルは A = 50pC (A > C, B ≒ 0)
③	IJ		<p>ブロッキングコイルで高周波を検出</p> <p>コンデンサでPD検出器を接続</p>	<p>A相 20mV/div</p> <p>500mSec/div</p>	<p>10dB/div</p> <p>5MHz/div</p> <p>(0~50MHz)</p>	隣接するリンクボックスにてR相に250pC注入した場合、測定点のR相の検出信号レベルは A = 100pC (B ≒ 0, C ≒ 0)
④	IJ		高周波CTにて信号を直接検出	<p>A相 10mV/div</p> <p>500mSec/div</p>	<p>10dB/div</p> <p>5MHz/div</p> <p>(0~50MHz)</p>	隣接するリンクボックスにてR相に250pC注入した場合、測定点のR相の検出信号レベルは A = 100pC (A ≒ C, C > B)
⑤	IJ		直接コンデンサでPD検出器を接続	<p>A相 20mV/div</p> <p>500mSec/div</p>	<p>10dB/div</p> <p>5MHz/div</p> <p>(0~50MHz)</p>	隣接するリンクボックスにてR相に250pC注入した場合、測定点のR相の検出信号レベルは A = 100pC (A ≒ C, C > B)

する検討が必要である、リンクボックスへの繋ぎ込みが面倒であるなど、作業に要する時間も長く、最も作業性が悪い方法であるともいえる。一方、CTやカップリングコンデンサを用いた方法②、④、⑤は、検出感度が若干落ち、異常相の特定が困難となってしまうものの、センサの繋ぎ込みが非常に簡単であり、作業性が良い。特に IJ 結線の場合、⑤の方法はカップリングコンデンサを介してリンクボックスの端子にセンサを繋ぎ込むだけで済むため、コイルを用いる方法に比べ作業性が非常に良い。

以上の検討結果より、詳細な測定が必要なケースでは、ブロッキングコイルを用いた方法の①、③が適しているといえる。しかしながら、停電時間を短くするため、実線路での測定では検出感度が若干低下しても測定準備時間を短縮すべき場合も多く、まず作業性の良い方法②、⑤にて測定を行い、異常信号を検出した場合に詳細な測定①、③を行うのが効率的であると考えられる。

図5 センサ接続状況および測定の様子
Fig.5. Sensor Circuits and Measuring System

表3 各検出方法の比較と評価

Table 3 Comparison and Evaluation of Each Measuring Method

ケース No.	結線方式	検出方法	検出感度	異常相特定	作業性の評価	準備に必要な時間
①	NJ	コイル法	◎	○	×	かかる
②	NJ	CT法	○	○	△	短時間
③	IJ	コイル法	○	△	×	かかる
④	IJ	CT法	△	×	△	短時間
⑤	IJ	コンデンサ法	△	×	◎	すぐできる

図6 実線路での測定結果

Fig.6. Example of a Practical Measurement Results

図4 実線路の測定システム概略図

Fig.4. Example of a Practical PD Measuring System on-site

4. 実線路での測定結果

これまでに、直埋ケーブル線路におけるPD測定方法についての検証試験と適用検討を行ってきた。この方法を用いて、実際に海外の直埋ケーブル（超高压実線路）におけるPD測定を行った。線路と測定システムの概要を図4に示す。測定対象の接続箱は、約20mの同軸ケーブルを介してリンクボックスに接続されており、リンクボックスにてII結線となっている。このケースでは、金属板によってリンクボックス端子がII結線されているため、作業性を考慮して⑤の結線方法で測定を行った。この方法はカップリングコンデンサを用いてリンクボックス端子に直接センサを接続するものであり、異常信号が発生した際の相特定は困難であるが、リンクボックスの配線を変更する必要がなく作業性が非常に良い。実際に、作業時間を大幅に短縮することができ、作業性が非常に向上した。また、ノイズ測定を目的として、リンクボックス周辺にアンテナを設置した。センサの接続状況及び測定の様子を図5に、現地で得られた測定結果を図6に示す。ここでは、A～C相とアンテナ信号の $q-\phi-t$ （信号強度-課電位相-時間）分布を示した。時折、突発的な外来ノイズが観測（図中上段）されたものの、位相性を持つPD信号は検出されず、線路の健全性を確認することができた。

この他の実施例として、110kV直埋ケーブル線路におけるII結線のリンクボックスで、カップリングコンデンサを用いてPD測定を行った様子を図7に示す。運転状態においてPD測定を実施した結果、異常信号は検出されなかった。さらに、132kV直埋ケーブル線路において、NJ結線のリンクボックスの各相に、高周波CTを挿入してPD測定を行った様子を図8に示す。①のブロッキングコイルを使用した場合と比較すると、接続箱にセンサを繋ぎ込む作業を短時間に行うことができ、作業量を減少させることが可能となった。この例においても、線路の運転状態において異常信号は検出されず、線路の健全性を確認できた。

5. まとめ

直埋ケーブル線路に設置されたリンクボックスの端子にセンサを接続してPD測定を行う同軸ケーブル法において、センサの結線方法を新たに提案した。これらの検出方法について検証実験を行い、センサ結線方法による検出感度を明らかとした。また、作業量や異常相の特定など、実線路での測定時に有用であろう項目についても併せて検討し、現地での測定に適した方法を提案した。以上の結果をもとに、このPD検出方法を用いて国外の直埋式実線路のPD測定を実施し、この測定例について示した。これらの測定結果と較正結果から、本測定法の有用性と実用性を示した。

（平成13年8月6日受付、平成13年11月22日再受付）

図7 110kV線路の測定様子

Fig. 7. PD Measuring System for 110kV Cable Line

図8 132kV線路の測定様子

Fig. 8. PD Measuring System for 132kV Cable Line

文 献

- (1) 電気学会技術報告第695号
- (2) 勝田銀造・戸谷 敦・遠藤 桓・鈴木弘・関井康雄：「超高压長尺CVケーブル線路の活線部分放電検出法の開発」，電学論B，111巻，11号，1223～1232（平3-11）
- (3) 陳他：「直埋ケーブル線路における部分放電測定方法の検討」，電学論B，Vol.121-B，No.1，pp.95-101

陳 敏 (正員) 1960 年 2 月 14 日生まれ。1992 年 3 月

東京工業大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻修士課程修了。同年 4 月住友電気工業(株)入社, 送電線系統 EMT P 解析と電力ケーブルの診断技術に関する研究に従事。現在、(株)ジェイ・パワーシステムズ研究開発センター所属。

浦野 幸治 (正員) 1971 年 3 月 27 日生まれ。1998 年 3 月

武蔵工業大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。同年 4 月住友電気工業(株)入社。主として電力ケーブルの診断技術に関する研究に従事。博士(工学)。

関口 洋逸 (正員) 1961 年 1 月 25 日生まれ。1986 年 3 月

大阪大学大学院理学研究科博士前期課程修了。同年 4 月住友電気工業(株)入社。主として、電力ケーブルの研究開発に従事。現在、(株)ジェイ・パワーシステムズ研究開発センター所属。

米田 英彦 (正員) 1960 年 6 月 8 日生まれ。1985 年 3 月

大阪大学大学院工学研究科応用物理学専攻(前期課程)終了。同年 4 月住友電気工業(株)入社。架空送電線・電力ケーブルの監視システム開発・納入に従事。2001 年 10 月より、(株)ジェイ・パワーシステムズ電力情報システム部所属。

神野 厚英 (正員) 1952 年 1 月 29 日生まれ。1976 年 3 月

京都大学大学院工学研究科電気工学修士課程修了。同年 4 月住友電気工業(株)入社。主に超高圧電力ケーブル・システムの開発, 設計、製造に従事。現在、(株)ジェイ・パワーシステムズ電力事業部技術部所属。

福永 定夫 (正員) 1949 年 4 月 10 日生まれ。1974 年 3 月

東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年 4 月住友電気工業(株)入社。電力ケーブル関係の業務に従事して 2001 年 6 月 同社取締役。2001 年 10 月より (株)ジェイ・パワーシステムズ 取締役。