C V ケーブル遮水層の性能と高精度な透湿度測定の検討

正員 岩崎 公裕 (東京電力)

正員 田中 敦 (東京電力)

正員 中出 雅彦 (東京電力)

An Estimation of Performance of Waterproof Layer on XLPE Cable and a Development of Precision Measurement of Permeation Coefficient

Kimihiro Iwasaki, Member Atsushi Tanaka, Member Masahiko Nakade, Member
(Tokyo Electric Power Co.)

Our company uses a part of 22kV, and 66kV and 154kV XLPE cables with a waterproof layer in the purpose of preventing water penetration to the insulation. We modeled the water volume of a XLPE cable insulation with waterproof layer as RC series circuit, and we calculated a certain 66kV XLPE cable by using this model. The result was that the time was 35.0 years when relative humidity reaches 50%, and P (Permeation coefficient) equaled 4.4×10^{-10} [$\text{g} \cdot \text{cm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{mmHg})$].

Precision of permeation coefficient of present water penetration test is about 10^{-8} [$\text{g} \cdot \text{cm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{mmHg})$]. At first, we improved the test by reducing the initial water volume and so on. The result was that P equaled 3.8×10^{-10} [$\text{g} \cdot \text{cm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{mmHg})$]. At second, we improved it by using a dew-point hygrometer. The result was that P equaled 1.4×10^{-10} [$\text{g} \cdot \text{cm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{mmHg})$]. We can estimate precisely a performance of waterproof layer by using second improved test and the calculation model.

キーワード：遮水層，C V ケーブル，透湿度，水分量モデル，遮水性能試験

keywords : waterproof layer, XLPE cable, Permeation coefficient, model for water volume, water penetration test

1. はじめに

当社では現在、22kVの一部と66kV・154kVのC V ケーブルには、絶縁体への水分浸入による水トリー劣化を防止する目的で、遮水層を設けたケーブルが用いられている。遮水層の遮水性能を示す指標として、当社の154kV C V ケーブル標準規格において、透湿度 P を定義している。

本研究においては、ボウタイトリーが発生しない絶縁体中臨界水分量は相対湿度で50～75%との報告⁽¹⁾があることから、絶縁体中相対湿度をケーブル設計寿命である30年間50%以下に保つ透湿度を要求性能と考え、遮水層がこれを満たしているかどうかを正確に判断するための手法を開発した。

まず、遮水層付きC V ケーブルの長期における絶縁体中の水分量変化について、新たに計算モデルを考案し、算出を行った。

また、現行の遮水性能試験は遮水層の透湿度実力値に対して精度が低く、正確に評価できないことから、新たに精度を向上した遮水性能試験法を開発した。

2. 遮水性能の推定

〈2・1〉 透湿度の定義 遮水層付きC V ケーブルの透湿度は、遮水性能試験により測定する。

遮水性能試験は、長さ約0.3mの遮水層付きC V ケーブルからコアを取り除き、内部にシリカゲルを入れ、両端を密閉する。この試料を60℃の温水中に入れ、10日、20日、30日の吸湿剤の重量変化を測定し、次式により透湿度 P を求める。

$$P = \frac{Q}{2\pi \cdot L \cdot t \cdot d} \ln(R_2/R_1) \cdots (1)$$

[$\text{g} \cdot \text{cm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{mmHg})$]

 Q : 透過水分量 [g] d : 飽和水蒸気圧 [mmHg] L : 試料長 [cm] R_1 : 遮水層内径 [cm] R_2 : シース外径 [cm] t : 試験時間 [day]

(2.2) 遮水構造と物性値 遮水層は、C Vケーブルの弱点である、外部からの水分供給を絶つ手段として、ビニルシースの下部に設けられている。遮水層の構造は、一般的に中層は金属層（鉛層またはアルミ層）で、内外層に補強プラスチック層や半導電性プラスチック層などで構成されている場合が多い。

遮水層はケーブル外周に縦添えされており、ラップ部は接着されている。金属層は水分を透過しないが、その他の層については水分を透過するため、ラップ部を通じて水分流 i が通過する。補強プラスチック層・半導電プラスチック層を通過する水分流をそれぞれ i_1 , i_2 とすると、全体の水分流は $i = i_1 + i_2$ と表される。遮水層構造の違いにより、外部からの水分流量が異なるものと考えられる。

また、外部より浸入した水分については、絶縁体、内部・外部半導電層、布テープ類にそれぞれ蓄積されるため、これらの構成の差によっても、絶縁体内水分量が変化すると考えられる。

(2.3) 透過水分量の計算手法 遮水層付きC Vケーブルを図2のようにモデル化し、水分量変化 $q(t)$ を、RC直列回路の電荷量の時間応答に置き換えた。なおこのモデルでは、水分のケーブル内部における拡散現象は考慮していない。

図1 遮水層構造 (例)

Fig. 1. An example of the structure of the Waterproof layer.

図2 遮水層付きケーブル計算モデル

Fig. 2. Calculation model for waterproof cable.

$$C_j = m_j \cdot K_j \quad (j=1, 2, 3) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$V = P_o \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$R = \frac{1 \ln (R_b / R_a)}{2 \pi P} \quad \dots\dots\dots (3)$$

m : 単位長あたりの重量 [g/cm]

K : 溶解度係数 [g/(g · mmHg)]

P_o : 外部の飽和水蒸気分圧 [mmHg]

R_a : 遮水層内径 [cm]

R_b : シース外径 [cm]

P : 遮水層付シースの透湿度

[g · cm/(cm² · day · mmHg)]

上記RC回路にて C_1 (XLPE) に充電される電荷量, すなわち吸収される水分量 $q_1(t)$ [g/cm]は(4)式で示される。

ただし q_{o1} [g/cm]は初期水分量とし、式中の添字 1, 2, 3 はそれぞれ XLPE, 内外導, 布テープを示す。

$$q_1(t) = C_1 V \left\{ 1 - \exp \left(- \frac{t}{R (C_1 + C_2 + C_3)} \right) \right\} + q_{o1} \cdot \exp \left(- \frac{t}{R (C_1 + C_2 + C_3)} \right) \quad \dots\dots (4)$$

(4)式に(1)~(3)式を代入すると XLPE に吸収される水分量 $q_1(t)$ は(5)式で示される。

$$q_1(t) = m_1 \cdot K_1 \cdot P_o \left\{ 1 - \exp (A \cdot t) \right\} + q_{o1} \cdot \exp (A \cdot t) \quad \dots\dots (5)$$

但し,

$$A = \frac{-2 \pi P}{1 \ln (R_b / R_a) \cdot (m_1 K_1 + m_2 K_2 + m_3 K_3)} \quad \dots\dots (6)$$

(6)式に用いる透湿度 P は、遮水層を構成する各層の材質固有の透湿度から、全体の透湿度を誘導することで、(7)式のように求めた。なお簡便のため遮水層構成として補強プラスチック層・半導電プラスチック層のみを考えることとする。

$$P = \frac{P_1 \cdot d_1 + P_2 \cdot d_2}{2 \pi L} 1 \ln (R_b / R_a) \quad \dots\dots (7)$$

P_1 : 補強プラスチック層単体の透湿度
[g · cm/(cm² · day · mmHg)]

P_2 : 半導電プラスチック層単体の透湿度
[g · cm/(cm² · day · mmHg)]

d_1 : 補強プラスチック層厚さ [cm]

d_2 : 半導電プラスチック層厚さ [cm]

L : ラップ長 [cm]

R_a : 遮水層内径 [cm]

R_b : シース外径 [cm]

図3 遮水層付きCVケーブルの
絶縁体水分量

Fig. 3. Calculation result of the water volume in insulation of XLPE cable with waterproof layer.

表1 透湿度・相対湿度50%到達時間計算結果
Table 1. Calculation result of Permeation coefficient and the arrival time of 50% relative humidity for Waterproof cable.

要求透湿度 [$\text{g} \cdot \text{cm} / (\text{cm}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{mmHg})$]	5.1×10^{-10}
透湿度実力値 [$\text{g} \cdot \text{cm} / (\text{cm}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{mmHg})$]	4.4×10^{-10}
相対湿度50%到達時間 [年]	35.0

〈2・4〉 計算結果 前項の計算モデルを用いて、ケーブルメーカーA社製66kV200mm²遮水層付きCVケーブルにおける水分量変化を計算した結果を図3に、遮水層の要求透湿度、透湿度実力推定値、相対湿度が50%に到達する時間を計算した結果を表1に示す。なお、ポリエチレンの溶解度係数は $1.0 \times 10^{-5} [\text{g}/\text{gcmHg}]^{(2)}$ であることから、周囲温度が60℃のとき、飽和水蒸気圧から、ポリエチレン中の飽和水分量は約150ppmと計算される。

A社製CVケーブルの要求透湿度、透湿度実力値はそれぞれ $P=5.1 \times 10^{-10}$, $4.4 \times 10^{-10} [\text{g} \cdot \text{cm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{mmHg})]$ で、透湿度実力値の方が小さく、要求性能を満たしている計算となる。また、相対湿度が50% (75ppm) に達する時間は35.0年である。

3. 高精度遮水性能試験手法

〈3・1〉 現行試験法の測定精度検証 遮水層の遮水性能を把握するには、遮水性能試験の測定精度が重要となる。現行の遮水性能試験の精度を検証するための試験を行った。

(1) 試験条件 66kV 1×500mm² CVケーブル (遮水層付および遮水層無し) のコアを引き抜き、内部にシリカゲルを封入した。遮水層付きシースを60℃温水中および60℃気中に、また遮水層無しシースを60℃温水中に設置し、30日間のシリカゲルの重量変化を追跡した。

(2) 試験結果 試験によるシリカゲル吸湿量経時変化

図4 現行遮水性能試験法

Fig. 4. Present water penetration test for XLPE cable with waterproof layer.

図5 現行試験法によるシリカゲル吸湿量経時変化
Fig. 5. The time dependency of weight of moisture absorption of the silica gel at present water penetration test.

を図5に、透湿度経時変化を図6に示す。遮水層付きシースでは60℃温水中、60℃気中各々のシリカゲル重量変化に差異は見られなかった。それに対し、遮水層無しシースでは確実に増加した。

現行の遮水性能試験については、シース内初期水分量、シリカゲル取り扱い時の吸湿、測定誤差、端末部からの水分浸入等の誤差要因が支配的で、外部からの浸入水分量を正確に測定できていないものと考えられる。

また、図6より遮水ケーブル温水浸漬・気中それぞれの透湿度は $P=3.7 \times 10^{-9}$, $3.6 \times 10^{-9} [\text{g} \cdot \text{cm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{mmHg})]$ であるが、初期水分量の多さなど誤差要因が大きいことを考慮すると、透湿度の実質的な測定精度は $P=10^{-9} [\text{g} \cdot \text{cm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{mmHg})]$ オーダーであると考えられる。

〈3・2〉 改良試験法 No.1 初期水分量等の低減 現行試験法の精度低下要因を極力廃するため、以下の改良試験法を行った。

(1) 試験条件 66kV 1×800mm² 遮水層付CVケーブルのコアを引き抜き、ケーブルシース、ならびに銅キャップを60℃で24時間乾燥処理した。シリカゲル

図6 現行試験法による透湿度経時変化

Fig. 6. The time dependency of permeation coefficient at present water penetration test.

初期重量測定を、乾燥室内に設置したデシケータ内で行ったのち、ケーブルシース内にシリカゲルを入れ、試料内へ乾燥空気を吹き流しながら端末キャップを被せ、シースと端末キャップの接合部を半田付けで遮水処理した。

試料を60℃温水浸漬し、試料と水槽全面をビニル袋に密封し、袋内にもシリカゲルを入れた状態で恒温槽にいった。10日、20日、30日経過後に、初期重量測定時と同様な方法でシリカゲルの重量測定を行った。

(2) 試験結果 シリカゲル吸湿量の経時変化を図8に、透湿度経時変化を図9に示す。

30日経過後のシリカゲル増加重量を元に、前述の(1)式より透湿度を算出すると、 $P=2.3 \times 10^{-9} [\text{g} \cdot \text{cm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{mmHg})]$ となる。しかし、シリカゲル重量は10日目では0.0116gと大きく増加しているものの、10日目の重量増加を起点と考え20日目、30日目の重量増加から差し引くと、それぞれ0.0013g、0.0014gと低く抑えられていることがわかる。

これは、試料内面の表面や遮水層のプラスチック層に含有した水分が蒸発したことにより、初期において水分量変化が大きかったものと考えられる。また全体的に、重量測定誤差等の要因も考えられる。

10日目～30日目までの重量変化から、試験期間20日間として透湿度を算出すると、 $P=3.8 \times 10^{-10} [\text{g} \cdot \text{cm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{mmHg})]$ となり、これが実質の透湿度を示すものと考えられ、精度も同程度であると思われる。

これをケーブルサイズ200mm²に換算すると $P=4.2 \times 10^{-10} [\text{g} \cdot \text{cm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{mmHg})]$ となる。これは現行試験法より大幅な改善がみられるものの、 $P=10^{-10} [\text{g} \cdot \text{cm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{mmHg})]$ オーダーと推定される透湿度の実力値を評価するにはやや精度が不足している。

なお、サイズ $\alpha \text{ mm}^2$ のケーブル遮水性能試験で得られた透湿度 P_α を、サイズ $\beta \text{ mm}^2$ のケーブルの透湿度 P_β に換算するには、以下の(8)式を用いる。

図7 遮水性能試験改良試験法 No.1

Fig. 7. Improved water penetration test No.1 for XLPE cable with waterproof layer.

図8 改良試験法 No.1によるシリカゲル吸湿量経時変化

Fig. 8. The time dependency of moisture absorption volume of the silica gel at improved water penetration test No.1.

図9 改良試験法 No.1による透湿度経時変化

Fig. 9. The time dependency of Permeation coefficient at improved water penetration test No.1.

図 10 遮水性能試験改良試験法 No.2

Fig. 10. Improved water penetration test No.2 for XLPE cable with waterproof layer.

$$P_{\beta} = P_{\alpha} \times P_{\beta}' / P_{\alpha}' \dots\dots\dots (8)$$

P_{α}' : (7)式で求めた α mm² ケーブルの透湿度
計算値

P_{β}' : (7)式で求めた β mm² ケーブルの透湿度
計算値

(3-3) 改良試験法 No.2 露点計による水分量測定

シリカゲルを用いた試験には精度の面で限界がみられることから、さらなる初期水分量等の低減に加え、露点計で試料中の水分量を直接測定する手法を試みた。

(1) 試験条件 66 kV 1×800 mm² CV ケーブルのコアを引き抜き、ケーブルシースを60℃で48時間、銅キャップを70℃で48時間乾燥処理した。端末キャップを加工し露点計センサーを取付けた後、試料内へ乾燥空気を吹き流しながら、シースと端末キャップの接合部を半田付けで遮水処理した。端末部はアルミラミネート袋にて密封し袋内にシリカゲルを入れた。

シースを60℃温水浸漬ならびに気中で30日間、露点計による露点測定を行い、水分量変化を観察した。

(2) 試験結果 試料内露点・水分量の経時変化を図11に、透湿度経時変化を図12に示す。

図11、12より温水浸漬と気中で水分量・透湿度変化にあまり差がないことから、測定した水分量は試料内面の表面や遮水層のプラスチック層に含有した水分の蒸発分が支配的と考えられる。

特に気中において、10日目程度まで水分量・露点変化が大きく、それ以降は安定しているため、10日目までの水分量変化は蒸発水分等の誤差要因の割合がかなり高いものと考えられる。30日間経過時の透湿度は、温水浸漬で $P=1.3 \times 10^{-10}$ [g・cm/(cm²・day・mmHg)]、気中で $P=1.4 \times 10^{-10}$ [g・cm/(cm²・day・mmHg)] であるが、10日目～30日目の水分量変化をもとに、試験期間20日として透湿度を算出すると、温水浸漬で $P=1.1 \times 10^{-10}$ [g・cm/(cm²・day・mmHg)]、気中で $P=9.7 \times 10^{-11}$ [g・cm/(cm²・day・mmHg)] であり、温水浸漬の透湿度が気中の透湿度より大きい値となる。よって、10日目以降の透湿度が、実質の透湿度を示すものと考えられる。

図 11 改良試験法 No.2 による露点・水分量
経時変化

Fig. 11. The time dependency of dew point and water volume at improved water penetration test No.2.

図 12 改良試験法 No.2 による透湿度経時変化

Fig. 12. The time dependency of Permeation coefficient at improved water penetration test No.2.

この結果をケーブルサイズ200 mm²に換算すると、温水浸漬 $P=1.4 \times 10^{-10}$ [g・cm/(cm²・day・mmHg)]、気中 $P=1.3 \times 10^{-10}$ [g・cm/(cm²・day・mmHg)] となり、精度はこれと同程度であると考えられる。

なお、2章で求めたA社製200 mm² CV ケーブルの透湿度が 4.4×10^{-10} [g・cm/(cm²・day・mmHg)] であることから、実測値が計算値より小さい値となったが、この要因は、各プラスチック層の単体透湿度が計算に用いた値よりも低い可能性や、各プラスチック層厚さの実測値が計算に用いたA社の標準値より薄いことなどが考えられる。

いずれにせよ、要求透湿度 $P=5.1 \times 10^{-10}$ [g・cm/(cm²・day・mmHg)] を測定するには十分な精度であるといえる。

以上の結果から、改良試験法 No.2 は、 10^{-10} [g・cm/(cm²・day・mmHg)] オーダーと推定される遮水層の要求透湿度を満たすかどうかを正確に評価できるといえる。

4. まとめ

遮水層付き CV ケーブル中の水分量変化を、RC 直列回

路の電荷量の時間応答に置き換えた計算モデルを用いて計算した。計算対象のケーブルは、透湿度が $P=4.4 \times 10^{-10} [\text{g} \cdot \text{cm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{mmHg})]$ であり、要求透湿度である 30 年間絶縁体中相対湿度を 50% 未満に押さえるとの条件を満たしていることがわかった。

また、現行の遮水性能試験では測定精度が不足していることから、初期水分量の低減等による改良試験法 No.1 と、露点計による改良試験法 No.2 を開発した。この 2 つの試験法を評価したところ、透湿度は改良試験法 No.1 で $P=4.2 \times 10^{-10} [\text{g} \cdot \text{cm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{mmHg})]$ 、改良試験法 No.2 で $P=1.4 \times 10^{-10} [\text{g} \cdot \text{cm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{mmHg})]$ (全てケーブルサイズ 200 mm^2 換算) と、現行の遮水性能試験に比べ大幅な精度向上が見られた。

特に、露点計による改良試験法 No.2 は、遮水層の要求透湿度である $P=10^{-10} [\text{g} \cdot \text{cm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{mmHg})]$ オーダーを正確に測定でき、この試験法と水分量計算モデルの使用により、遮水層が要求性能を満たすかどうかを判断できるようになった。

最後に、遮水性能試験の改良試験法 No.1 の開発にご協力頂いた株式会社フジクラ、改良試験法 No.2 の開発にご協力頂いた社団法人電線総合技術センターの関係者各位に深く感謝いたします。

(平成 14 年 2 月 28 日受付, 平成 14 年 6 月 5 日再受付)

文 献

- (1) 大島勝一・保坂文芳・植杉賢司・松葉博則・植松忠之・田辺輝義・相沢栄二:「遮水ケーブルの開発 (その 1)」, 昭 56 電気学会全国大会, No.1231 (1981)

- (2) T. Kojima, M. Hanai, F. Aida, E. Itô, K. Shimanuki, and K. Yagi: "Electrical Effect of Water in Polyethylene Insulation", *Showa Densen Denran Review*, Vol. 23, No.1 (1973) (in Japanese)
児島 健・花井 節・会田二三夫・伊東英一・島貫浩至・八木賢二:「ポリエチレン絶縁におよぼす水分の効果」, 昭和電線レビュー, 23, No.1 (1973)

岩崎 公裕

(正員) 1974 年 1 月 6 日生。1996 年東京大学工学部都市工学科卒業。同年東京電力㈱入社。現在、同電力技術研究所送変電グループ所属。主として地中電力ケーブルの研究開発に従事。

田中 敦

(正員) 1969 年 3 月 3 日生。1993 年武蔵工業大学工学部修士課程電気工学専攻修了。同年東京電力㈱入社。現在、同工務部地中送電グループ所属。主として地中電力ケーブルの研究開発に従事。

中出 雅彦

(正員) 1961 年 4 月 24 日生。1987 年東京工業大学エネルギー科学専攻修士課程修了。同年東京電力㈱入社。現在、同電力技術研究所送変電グループ所属。主として地中電力ケーブルの研究開発に従事。

電力・エネルギー部門大会座長のコメントと回答

——B08 電力ケーブル——

質 疑

座長 関口 洋逸

1. 同セッションでの対象論文への質疑応答 (1)

Q：シリカゲルを用いた改良試験法 No.1 は容器の内部が

常に乾燥状態にあるのに対し，露点計を用いる改良試験法 No.2 では内部を乾燥しないため，徐々に湿度が上昇することになる。飽和状態に近付くと露点法のほうが低めの透湿度を示すのではないか。

A：今回の測定では，ケーブル内部の水分量は最高でも 1mg 程度であり，飽和状態までは余裕がある。十分な精度で測定できていると考えている。