ケーブル絶縁劣化診断のライフサイクルコスト評価

学生員 島陰 豊成* 正 員 呉 カイ**
 正 員 加藤 丈佳* 正 員 岡本 達希***
 正 員 鈴置 保雄*

Life-Cycle-Cost Evaluation on Degradation Diagnosis for Cables

Toyonari Shimakage*, Student Member, Kai Wu**, Member, Takeyoshi Kato*, Member,
 Tatsuki Okamoto***, Member, Yasuo Suzuoki*, Member

Degradation diagnosis is aimed at preventing unexpected failure and extending the service life of electric power apparatuses. It is, however, necessary to investigate the economic feasibility of degradation diagnosis, because the life-cycle cost of cable maintenance changes with the diagnostic parameters such as diagnosis cost, diagnosis interval and replacement criterion. In this paper, based on the actual data of water-tree degradation, we proposed a method of life-cycle-cost evaluation and evaluated the economic effect of degradation diagnosis. We also discussed the economic feasibility of practical nondestructive diagnosis of 6.6 kV XLPE cable, i.e. DC leakage current measurement and residual charge measurement, and compared the economic effects of these methods. As a result, the residual charge measurement is economically feasible and has higher effectiveness than the DC leakage current measurement.

キーワード：水トリー，劣化診断，漏れ電流法，残留電荷法，経済的最適化

Keywords：water tree, degradation diagnosis, DC leakage current measurement, residual charge measurement, economic optimization

1. まえがき

系統事故による損失の発生防止や機器を真の寿命付近まで効率よく使用するためには，劣化診断が非常に有効であり，現在では様々な診断手法の開発が進められている。しかし，診断にはある一定のコストが必要であることから，定期的な診断を考える場合にはその周期（以下，診断周期）が経済的に大きな意味を持つ。また，診断の際に機器を交換する基準（以下，交換基準）を如何に設定するかによっても診断の経済効果は大きく異なる。そのため，規制緩和に伴う電力設備のコスト削減が電気事業者の大きな課題となっている近年においては，設備運用コストを最小化する

最適な診断条件を見極めることが重要である。また，診断を実施することがコスト削減に繋がるかなど，診断の経済的メリットの有無についても検討する必要がある，ライフサイクルコストを評価パラメータとしたリスク管理の検討が行われるようになってきた。例えば，穂積らはライフサイクルコストの低減効果を確率論に基づいて推定する手法を提案し，仮想的な機器と診断手法を想定して解析を実施している⁽¹⁾。この手法は，診断によって余寿命分布が推定可能であるという想定に基づいた検討であるが，現段階では余寿命診断を行うことは困難であると考えられる。

そこで本研究では，データに基づいた具体的な検討を行うことが重要であると考え，電力機器の中でも設備量が多いことから大幅なコスト削減効果が期待できる CV ケーブルに着目し，水トリー劣化の実測データを用いた劣化診断のライフサイクルコスト評価を行った。そして，診断を実施することで診断を実施しない場合と比べてコストを削減出来るかなど，診断の有用性について評価した。さらに，劣化診断の効用を経済性の観点から評価した。

2. 水トリー長に基づいた劣化診断のライフサイクルコスト評価

〈2・1〉 評価手法 CV ケーブルの水トリー劣化にお

* 名古屋大学大学院工学研究科
 〒464-8603 名古屋市千種区不老町
 Department of Electrical Engineering, Graduate School of
 engineering, Nagoya University

** 名古屋大学理工学総合研究センター
 〒464-8603 名古屋市千種区不老町
 Center for Integrated Research in Science and Engineering, Nagoya
 University

*** 電力中央研究所
 〒240-0196 横須賀市長坂 2-6-1
 Central Research Institute of Electric Power Industry
 2-6-1, Nagasaka, Yokosuka 240-0196

いて、診断の対象とする指標の中で水トリ長が適切な指標であると考えられている⁽²⁾。特に最大水トリ長はCVケーブル中の劣化状態と破壊強度を関係づける有効な指標である。本手法では診断の際にケーブルの交換の判定を下す指標に最大水トリ長を採用する。

検討を行うにあたり想定した条件を以下に示す。

- ケーブルを破壊することなく最大水トリ長を測定することが可能であり、診断は周期的に行われる。
- ケーブルを交換する際の基準を最大水トリ長で定義し、測定したケーブルの最大水トリ長が基準値 L_c [μm] 以上であればケーブルを交換する。

計算の手順を以下に示す。

(i) 実測データから、ケーブルごとの最大水トリ長の密度分布及び最大水トリ長と故障率の関係を導出する。ここでは、6.6kVCVケーブルより切り出した5mの試料ケーブルに周波数1kHzで加速劣化試験を実施した実測データを使用した⁽³⁾。

(ii) 最大水トリ長の密度分布及び最大水トリ長と故障率の関係を利用し、経年の故障率と診断を行った場合のケーブルの交換率を算出する。

(iii) ライフサイクルコストを算出する。

これらのうち、手順(i)については3章に示す。本章では、手順(ii)および(iii)についての具体的な計算式を述べる。

〈2・2〉 故障率の算出

(1) 診断実施年 図1は、劣化診断を行う時点での、最大水トリ長とその最大水トリ長を示すケーブルの出現確率密度の関係を模式的に表す。診断を行うことにより、図の網掛け部分にあたるケーブルが撤去され、新品に交換されることになる。すなわち、診断が経年 k 年の初めに行われる場合、診断後に残るケーブルは最大水トリ長が基準値 L_c 以下のケーブルのみである。よって、 k 年において診断後に故障するケーブルの割合 $p(k)$ は (1) 式で表される。 $p(k)$ は、診断による交換や故障によるケーブルの減少を考慮せずに、 k 年における最大水トリ長の密度分布の面積を1とする場合の割合である。

$$p(k) = A_k \int_0^{L_c} N_k(l) \cdot f(l) \cdot dl \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 l は最大水トリ長であり、 $N_k(l)$ は k 年における最大水トリ長の密度分布、 $f(l)$ は最大水トリ長 l のケーブルにおける最大水トリ長 $100 \mu\text{m}$ ごとの故障率である。また、 A_k は診断を考慮しない場合の k 年における残存ケーブルの割合であり、(2) 式より得られる。 A_k を用いる理由は、本検討に用いている最大水トリ長密度分布の経年変化 $N_k(l)$ には故障によるケーブルの減少が考慮されていないためである。

$$A_k = A_{k-1} \cdot \left\{ 1 - \int_0^{\infty} N_{k-1}(l) \cdot f(l) \cdot dl \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

基準値以下で故障する割合である (1) 式を k 年における基準値以下の残存ケーブルの割合で除したものが診断実施年の故障率となるので、 k 年における故障率は

図1 最大水トリ長とその最大水トリ長を示すケーブルの出現確率密度および診断時のケーブル交換との関係
Fig. 1. Relation between maximum water-tree length and density distribution of cables with the corresponding maximum water-tree length and cable replacement when diagnosis is carried out.

$$P(k) = \frac{A_k \int_0^{L_c} N_k(l) \cdot f(l) \cdot dl}{A_k \int_0^{L_c} N_k(l) \cdot dl} \quad \dots\dots\dots (3)$$

で表される。

(2) 診断非実施年 (最初の診断実施前) 最初の診断を実施するまでは基準値を考慮する必要がないため、経年 k 年において故障する割合は

$$p(k) = A_k \int_0^{\infty} N_k(l) \cdot f(l) \cdot dl \quad \dots\dots\dots (4)$$

で表される。よって、最初の診断が実施される前の k 年における故障率は

$$P(k) = \frac{A_k \int_0^{\infty} N_k(l) \cdot f(l) \cdot dl}{A_k \int_0^{\infty} N_k(l) \cdot dl} \quad \dots\dots\dots (5)$$

で表される。

(3) 診断非実施年 (最初の診断実施後) まず、基準値を超える最大水トリ長を有するケーブルの割合を求める。経年 $k'-1$ 年から k' 年までの1年間に基準値を新たに超えるケーブルの割合 $M_{k'}$ は

$$M_{k'} = A_{k'} \int_{L_c}^{\infty} N_{k'}(l) \cdot dl - A_{k'-1} \int_{L_c}^{\infty} N_{k'-1}(l) \cdot dl + A_{k'-1} \int_{L_c}^{\infty} N_{k'-1}(l) \cdot f(l) \cdot dl \quad \dots\dots\dots (6)$$

によって与えられる。第1項と第2項はそれぞれ k' 年と $k'-1$ 年に基準値を超えたケーブルの割合である。第3項の $A_{k'-1} \int_{L_c}^{\infty} N_{k'-1}(l) \cdot f(l) \cdot dl$ について説明する。故障によって全体のケーブル本数が減少しているため、 $A_{k'-1} \int_{L_c}^{\infty} N_{k'-1}(l) \cdot dl$ よりも $A_{k'} \int_{L_c}^{\infty} N_{k'}(l) \cdot dl$ のほうが小さくなる場合が考えられる。そのため、基準値以上のケーブルの

中で故障により減少したケーブルの割合を考慮する必要がある、それを足し合わせることによって $k'-1$ 年から k' 年の 1 年間で基準値を新たに超えるケーブルの割合を算出することが出来る。

診断実施後の診断非実施年に故障する割合を評価するためには、診断実施後の各年での最大水トリ長を評価する必要がある。最大水トリ長が診断実施年 k 年の翌年に新たに基準値 L_C を超えるケーブルでは、ケーブル中の最大水トリ長が基準値よりも 1 年分伸長した長さに達していると考えられる。水トリが 1 年間に伸長する長さを Δl [μm] とすると、診断の翌年に基準値を超えるケーブルの割合 M_{k+1} 中の最大水トリ長は L_C [μm] から $L_C + \Delta l$ [μm] までの範囲に分布している。この分布は不明であるが、この割合 M_{k+1} のケーブル中の最大水トリ長を $L_C + \Delta l$ [μm] と仮定した。これにより、 M_{k+1} のうちで故障するケーブルの割合は $M_{k+1} \cdot f(L_C + \Delta l)$ で与えられる。ところで、 $k+2$ 年の時点で基準値よりも大きな最大水トリを有して存在しているケーブルには、 $k+1$ 年に最大水トリ長が基準値 L_C を超えたが $k+1$ 年には故障しなかったケーブル $M_{k+1} \cdot \{1 - f(L_C + \Delta l)\}$ が含まれる。当然、そのケーブル中の最大水トリ長は $L_C + 2\Delta l$ [μm] に達していると考えられる。よって、 $k+2$ 年に故障するケーブルの割合は、新たに基準値を超えて故障するものと、前年度に基準値を超えたが故障せず翌年に故障するもので表されるので、

$M_{k+1} \cdot \{1 - f(L_C + \Delta l)\} \cdot f(L_C + 2\Delta l) + M_{k+2} \cdot f(L_C + \Delta l)$ となる。

以上より、診断後 h 年が経過した時点で基準値 L_C よりも大きな最大水トリ長を有するケーブルが故障する割合は

$$P_{L_C}(k+h) = \sum_{i=1}^h \left[M_{k+i} \cdot f\{L_C + (h+1-i)\Delta l\} \cdot \prod_{j=1}^{h-i} \{1 - f(L_C + j\Delta l)\} \right] \quad (7)$$

で表される。

基準値以上の最大水トリ長を有するケーブルが故障する割合 (7) 式に基準値以下で故障するケーブルの割合を加え、それを $k+h$ 年における残存ケーブルの割合で除いたものが診断後 h 年経過した年における故障率となる。よって、診断非実施年 $k+h$ 年における故障率は

$$P(k+h) = \frac{P_{L_C}(k+h) + A_{k+h} \int_0^{L_C} N_{k+h}(l) \cdot f(l) \cdot dl}{\sum_{i=1}^h \left[M_{k+i} \cdot \prod_{j=1}^{h-i} \{1 - f(L_C + j\Delta l)\} \right] + A_{k+h} \int_0^{L_C} N_{k+h}(l) \cdot dl} \quad (8)$$

で表すことが出来る。この式で、分母は $k+h$ 年における残存ケーブルの割合であり、分子は $k+h$ 年にケーブルの故障する割合である。

〈2・3〉 交換率の算出 診断実施年 k 年に基準値 L_C よりも大きな最大水トリ長を有するケーブルが診断時に交

換される。よって、診断周期を T 年とすると、 $k+T$ 年の診断時における交換率は

$$R(k+T) = \frac{\sum_{i=1}^T \left[M_{k+i} \cdot \prod_{j=1}^{h-i} \{1 - f(L_C + j\Delta l)\} \right]}{\sum_{i=1}^T \left[M_{k+i} \cdot \prod_{j=1}^{h-i} \{1 - f(L_C + j\Delta l)\} \right] + A_{k+h} \int_0^{L_C} N_{k+h}(l) \cdot dl} \quad (9)$$

で表すことが出来る。この式で、分母は $k+T$ 年における残存ケーブルの割合であり、分子は $k+T$ 年に基準値を超えているケーブルの割合 (すなわち診断によって交換するケーブルの割合) である。

〈2・4〉 ケーブル長さの効果を考慮した故障率、交換率

本研究では 5m の試料ケーブルの実測データを用いているが、実際のフィールドでは 5m よりも長いケーブルの使用が予想される。水トリ劣化が CV ケーブル長手方向に均一に発生・進展すると想定すると、故障率、交換率はケーブル長に応じて上昇するため、フィールドでのケーブル長を考慮した故障率、交換率を求める必要がある。そこで、都市部での使用を想定し、ケーブル 1 ユニットの長さを 50m と設定した。ケーブルは最弱点によって全体の強度が決定されることから最弱リンクモデル⁽⁴⁾を適用すると、経年 k 年における故障率、交換率はそれぞれ (10) 式、(11) 式で表される。

$$P_{50}(k) = 1 - \{1 - P_5(k)\}^{10} \quad (10)$$

$$R_{50}(k) = 1 - \{1 - R_5(k)\}^{10} \quad (11)$$

ここで、 $P_{50}(k)$ 、 $P_5(k)$ はそれぞれケーブル長が 50m と 5m の k 年における故障率である。また、 $R_{50}(k)$ 、 $R_5(k)$ はそれぞれケーブル長が 50m と 5m の k 年における交換率である。

〈2・5〉 ライフサイクルコストの算出

(1) ケーブル本数 ケーブル本数の時系列変化を観測するにあたり、ケーブルの経年にとらわれない評価年数を観測年と定義し、最初にケーブルを導入した年を観測年 0 年とする。経年 $k-1$ 年のケーブルの故障率を $P(k-1)$ 、診断におけるケーブルの交換率を $R(k-1)$ 、観測年 $n-1$ 年目の時点で導入から $k-1$ 年経過しているケーブルの本数を $g_{n-1}(k-1)$ とすると、観測年 n 年目に導入から k 年が経過したケーブルの本数は (12) 式で表される。

$$g_n(k) = g_{n-1}(k-1) \cdot \{1 - P(k-1)\} \cdot \{1 - R(k-1)\} \quad (12)$$

ここで、 $P(k-1)$ 、 $R(k-1)$ はケーブル長に関わらず故障率、交換率を代表する記号として用いている。また、 $k-1$ 年が診断実施年でなければ、当然のことながら $R(k-1)=0$ である。

各観測年におけるケーブルの総本数を一定に保つため、故障や診断によって交換したケーブルはその都度補充する。観測年 n 年目に新たに導入されるケーブルの本数は (13) 式で表される。

$$g_n(0) = \sum_{k=1}^m g_{n-1}(k-1) \cdot [1 - \{1 - P(k-1)\} \cdot \{1 - R(k-1)\}] \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここで、同観測年における経年の計算限界として、 m にはケーブルが既に存在しないと考えられる十分に大きな値である 100 年を設定した。

(2) ライフサイクルコスト 観測期間が短い場合、診断周期すなわち観測期間中に実施される診断回数の違いがライフサイクルコストに大きく影響する。そのため、観測期間をケーブルの寿命よりも十分長くとる必要がある。そこで、一般的にケーブルの寿命とされている 30 年よりも十分に長い 300 年を観測期間と設定する。また、貨幣価値の変化を考慮して、すべてのコストを年間利率 τ で初期導入年に現価換算する。

一回の故障で発生する平均の損失（以下、故障損失）を FL 、ケーブル単価や施工費を含んだ交換にかかる費用（以下、交換費用）を RE 、一回の診断に発生する費用（以下、診断費用）を DE とすると、故障によって発生する損失の総和（総故障損失： TFL ）、交換にかかる費用の総和（総交換費用： TRE ）及び診断にかかる費用の総和（総診断費用： TDE ）はそれぞれ以下のように表される。

$$TFL = \sum_{n=1}^{300} \left[FL \cdot \sum_{k=1}^m g_{n-1}(k-1) \cdot \{1 - R(k-1)\} \cdot P(k-1) / (1 + \tau)^n \right] \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$TRE = \sum_{n=1}^{300} \left\{ RE \cdot g_n(0) / (1 + \tau)^n \right\} + RE \cdot g_0(0) \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$TDE = \sum_{n=2}^{300} \left[DE \cdot \sum_{k=2}^m g_{n-1}(k-1) / (1 + \tau)^n \right] \quad \dots\dots\dots (16)$$

以上を足し合わせたものがライフサイクルコスト LCC となる。

$$LCC = TFL + TRE + TDE \quad \dots\dots\dots (17)$$

3. 使用データとその処理

〈3・1〉 使用データ 本研究には、撤去された 6.6kVVCV ケーブルより切り出した 5m の試料ケーブルに周波数 1kHz で加速劣化試験を実施した実測データを使用した⁽³⁾。ここで、水トリ劣化は周波数によって加速され、加速倍率はほぼ 1 となると報告されている⁽³⁾ことから、加速倍率を 20 と設定した。本研究に使用した、最大水トリ長の異なる試料における破壊電圧と累積故障率の関係と、加速劣化時間と最大水トリ長の関係を、それぞれ図 2、図 3 に示す⁽³⁾。

〈3・2〉 最大水トリ長と故障率の関係 6.6kV の CV ケーブルを想定していることから、定格相電圧の 1.05 倍に等しい最大系統電圧 4.0kV を破壊電圧として設定し、図 2 中の 3 本の直線を延長することにより、4.0kV での累積故障率を得た。最大水トリ長が 500 μ m 以下、500 μ m から 1000

図 2 異なる最大水トリ長を持つケーブルの破壊電圧のワイブル分布（文献(3)より）

Fig. 2. Weibull distribution plot of breakdown voltage for the cables with different maximum water-tree length (replotted from Ref. (3)).

図 3 加速劣化時間と最大水トリ長の関係（文献(3)より）

Fig. 3. Relation between the accelerated time and maximum water-tree length (replotted from Ref. (3)).

図 4 最大水トリ長と故障率の関係（5m, 4.0kV）

Fig. 4. Failure probability of the sample cable (5m, 4.0kV).

μ m, 1000 μ m から 1500 μ m の各領域の代表値をそれぞれ 250 μ m, 1000 μ m, 1250 μ m と仮定し、最大水トリ長と累積故障率の関係を算出した。さらに、図 3 から最大水トリ長の 1 年分の平均の伸び Δl を求め、 Δl の伸長による

図5 最大水トリー長の密度分布
(経年：0年，5年，10年，15年，20年)

Fig. 5. Density distribution of maximum water-tree length in the initial, 5th, 10th, 15th and 20th year.

累積故障率の増加分を計算し，これを年間故障率 $f(t)$ とした（図4参照）。

〈3・3〉 最大水トリー長の経年密度分布 図3の各加速劣化時間におけるケーブルを最大水トリー長 $100\mu\text{m}$ ごとに集計して度数分布で表し，対数正規分布で近似することによって，各経年における最大水トリー長の密度分布 $N_k(l)$ を算出した（図5参照）。対数正規分布は，金属疲労や電気絶縁などある種の寿命データに用いられることが多い⁽⁵⁾。

4. 経済的に最適な診断条件の算定及び劣化診断の有用性の評価

〈4・1〉 条件設定 ケーブル導入初年度におけるケーブル本数を $g_0(0)=10^4$ 本とする。また，年間利率 r を5%と設定して，全てのコストはケーブル導入初年度に現価換算する。本手法では $100\mu\text{m}$ ごとに区切った密度分布を用いているので，診断の検出精度は $100\mu\text{m}$ となる。

〈4・2〉 最適診断条件 電力会社により公表されている停電時の補償費用とケーブル布設費用の関係から，故障損失は交換費用の数10倍から数100倍程度になると見積ることが出来る。実際の各費用の絶対値が明らかでないため，交換費用を1（無名数）とし，これに対して故障損失を100，診断費用を0.1と仮定し，異なる診断条件に対してライフサイクルコストを交換費用に対する比として算出した。結果を図6に示す。同図よりライフサイクルコストを最小化する交換基準，診断周期が存在することがわかる。この傾向は各種コストを変化させても同様であり，経済的に最適な交換基準，診断周期が存在することを意味するとともに，本手法によって最適値を算出することが可能であることを示している。

各種コストを変化させて算出した，ライフサイクルコストを最小化する経済的に最適な診断周期と交換基準をそれぞれ図7，図8に示す。両図は故障損失の増加に従い診断周期は短く，交換の判定基準は厳しくなるという定性的な結果を定量的に示している。本検討では，ケーブルの絶縁厚

図6 異なる診断条件におけるライフサイクルコスト
(診断手法：最大水トリー長測定，故障損失：100，
交換費用：1，診断費用：0.1)

Fig. 6. Life-cycle-costs for difference diagnostic parameters (diagnosis method: maximum water-tree length measurement, failure loss: 100, replacement expense: 1, diagnosis expense: 0.1).

図7 最適交換基準

Fig. 7. Optimized replacement criterion.

を $3000\mu\text{m}$ と想定し，最適交換基準が絶縁厚を超えるものに関しては，最適交換基準を $3000\mu\text{m}$ として計算した。

〈4・3〉 劣化診断の有用性 図7，図8に示した最適診断条件で診断を実施した場合の最小ライフサイクルコスト及び，診断を実施しない場合における最小化されたライフサイクルコストを合わせて図9に示す。診断を実施しない場合には，あらかじめ設定した推定寿命に達したケーブルを一斉交換することとした。

図 8 最適診断周期

Fig. 8. Optimized diagnosis interval.

図 9 最小ライフサイクルコスト

(ケーブル長：50m, 診断手法：最大水トリー長測定)

Fig. 9. Minimum life-cycle-costs at the different costs (50m cable, diagnosis method: maximum water-tree length measurement).

診断費用が交換費用の 0.1 倍であれば故障損失が交換費用の 10 倍の時に、診断費用が交換費用の 0.2 倍であれば故障損失が交換費用の 100 倍の時に、診断費用が交換費用の 0.5 倍であれば故障損失が交換費用の 10^4 倍の時に、診断費用が 0 であれば故障損失の額に関わらず、診断を実施することに経済的メリットが得られるという結果が得られた。この結果は、故障損失、交換費用、診断費用に応じて適切な診断条件を設定することが必要であることを示している。

5. 劣化診断手法を想定したライフサイクルコスト評価

実際に、最大水トリー長を測定するためにはケーブルを

撤去した後に切り出して観測する必要がある、診断をケーブル保守の一環として考える場合には現実的でない。そのため、ケーブルを破壊することなく劣化状態を測定できる非破壊診断手法を想定したライフサイクルコスト評価が必要となる。最大水トリー長を測定できる診断手法は確立されていないため⁽²⁾、何らかの計測可能な非破壊試験パラメータの値からケーブルの劣化状態を表す指標を推定しなければならない。そこで、橋絡水トリーすなわち絶縁厚に到達した最大水トリーの存在を確実に検出できる漏れ電流法⁽⁶⁾と、交流課電電圧の最大値と残留電荷の関係から水トリー長分布を推定できる可能性を有する残留電荷法⁽⁷⁾に着目し、これらの診断方法を想定した検討を行う。

〈5・1〉 漏れ電流法 漏れ電流法は橋絡水トリーのみを精度良く検出できる診断法であるので、診断によって橋絡水トリーが検出された時にケーブルを交換することとする。すなわち、ケーブルの交換基準をケーブル絶縁厚の 3000 μm で一定として変化させない時の最適診断周期における最小ライフサイクルコストを算出する。

〈5・2〉 残留電荷法

(1) 考え方 残留電荷成分が放出される交流課電電圧に対する残留電荷量分布と、水トリー長に対する発生個数分布は類似した分布形状を持っており、このことは残留電荷法によるケーブル中の水トリー長分布測定の可能性を示唆している⁽⁷⁾。

水トリー長分布はケーブル中の劣化状態を表していることから、この水トリー長分布の持つ故障率を診断の指標として残留電荷法を評価する。しかし、各水トリー長に対する故障率は今のところ得られていない。そこで、Monte-Carlo シミュレーションを用いて、既知のデータである 5m ケーブルの最大水トリー長密度分布から 50m ケーブルの故障率分布を算出する。

(2) 評価手法 劣化の進んだケーブル中には水トリーが多数存在していることから、5m ケーブルにおける最大水トリー長と故障率の関係は、ケーブル中に多数存在する水トリーの中の代表値である最大の水トリー長と故障率を対応づけた関係であると考えられるので、5m ケーブル中の水トリー長分布と故障率の関係であると言える。

水トリー劣化がケーブル長手方向に均一に発生・進展していると想定すると、50m ケーブル中に存在する水トリーの数は、5m ケーブル中に存在する水トリーの数の 10 倍であると考えられる。よって、残留電荷法によって診断されるケーブル長さが 50m であるならば、測定された 50m ケーブルの水トリー長分布の中には、5m ケーブルにおける最大水トリー長が 10 個含まれているはずである。

Monte-Carlo シミュレーションを用いて 5m ケーブルの最大水トリー長密度分布から 10^5 個の最大水トリー長を選出し、これらを 10 個ずつ 10^4 セットに分割することで、50m ケーブルの故障率を 10^4 本分求める。この 50m ケーブルの故障率 $x(k)$ は最弱リンクモデルに基づき (18) 式より算出する。

図 10 故障率累積密度分布
(経年：0 年，5 年，10 年，15 年，20 年)

Fig. 10. Cumulative density distribution of the failure probability in the initial, 5th, 10th, 15th and 20th year.

$$x(k) = 1 - \prod_{i=1}^{10} \{1 - f(l_i(k))\} \quad (18)$$

ここで、 $l_i(k)$ は経年 k 年の最大水トリー長密度分布よりランダムに抽出された最大水トリー長、 $f(l_i(k))$ は最大水トリー長 $l_i(k)$ の 5m ケーブルにおける 1 年あたりの故障率である。

Monte-Carlo シミュレーションの手法を用いて算出した、診断の際に基準となる故障率 $x(k)$ の累積密度分布を図 10 に示す。残留電荷法を想定した検討はこの分布を用いて進められる。故障率、交換率、ケーブル本数、コスト等の算出方法は 2 章と同じである。

6. 劣化診断手法の比較

〈6・1〉 漏れ電流法 最適診断周期で診断を実施した場合の最小ライフサイクルコスト及び、診断を実施しない場合における最小化されたライフサイクルコストを合わせて図 11 に示す。診断費用が 0 であれば故障損失が交換費用の 1 倍から 100 倍の時に、診断費用が交換費用の 0.1 倍であれば故障損失が交換費用の 10 倍から 100 倍の時に僅かながら診断を実施することに経済的メリットが得られた。しかし、最大水トリー長が非破壊劣化診断によって測定可能であるとした場合の最小ライフサイクルコスト (図 9 参照) と比べて、メリットが得られない範囲は増大した。つまり、漏れ電流法によって水トリーが橋絡したケーブルを交換する場合では、各種コストが限られた条件を満たす場合を除いて、ほとんどの条件で経済的メリットが得られないことが分かった。

〈6・2〉 残留電荷法 各種コストを故障損失：100，交換費用：1，診断費用：0.1 と設定して算出した、診断条件の異なる場合のライフサイクルコストを図 12 に示す。この結果は、水トリー長分布の持つ故障率を交換基準とする残留電荷法を想定した手法によって、ライフサイクルコストを最小化する経済的に最適な交換基準、診断周期を算出で

図 11 最小ライフサイクルコスト
(ケーブル長：50m，診断手法：漏れ電流法)

Fig. 11. Minimum life-cycle-costs at the different costs (50m cable, diagnosis method: DC leakage current measurement).

図 12 異なる診断条件におけるライフサイクルコスト
(故障損失：100，交換費用：1，診断費用：0.1)

Fig. 12. Life-cycle-costs at different diagnostic parameters.

きることを示している。

故障損失：100，交換費用：1，診断費用：0.1 の同一条件下における、診断手法の違いによるライフサイクルコストの比較を図 13 に示す。診断を実施しない場合と比べて残留電荷法を実施する場合のライフサイクルコストは減少していることから、残留電荷法を実施することによって経済的メリットが得られることが分かる。また、最大水トリー長を基準とする手法と、残留電荷法を想定して水トリー長分布から算出される故障率を基準とした手法の両結果を比較すると、両者のライフサイクルコストは同程度となってお

図 13 診断手法の違いによるライフサイクルコストの比較
(故障損失: 100, 交換費用: 1, 診断費用: 0.1)

Fig. 13. Minimum life-cycle-cost comparison of different degradation diagnosis methods (failure loss: 100, replacement expense: 1, diagnosis expense: 0.1).

り、残留電荷法を実施することで最大水トリー長を測定する診断と同程度の経済的効果が得られることが分かる。

〈6・3〉 診断手法の効用について 経済的評価手法に基づき、各劣化診断手法の効用を比較する手段として、「各診断手法のコストを同一とする条件で、最適化された交換基準および診断周期に対応する最小ライフサイクルコストの小さい診断手法の方が効用は大きい」と定義する。この考えに基づけば、本章で検討した、残留電荷法、漏れ電流法、および比較のため用いた最大水トリー長が非破壊的に測定できると仮定した場合の 3 種の中で、残留電荷法と最大水トリー長測定は同程度の効用を有しており、漏れ電流法は効用が一番小さいということが分かる。すなわち、非破壊診断手法である残留電荷法を用いることで、ケーブルを切断しなければ測定できない最大水トリー長を測定する場合と同程度の効用が得られると言える。

7. まとめ

診断を実施する際のライフサイクルコストの評価手法を提案するとともに、水トリー劣化した CV ケーブルの実測データを用いて経済的に最適な診断条件の算定を行い、最適診断条件下でのライフサイクルコストを評価した。また、診断実施による経済的メリットの有無についても検討を行った。さらに、経済性の観点からケーブル劣化診断の効用を評価した。

故障損失、交換費用、診断費用の各種コストの比率によっては、診断を実施することで経済的メリットが得られることを確認した。それにより、各種コストに応じて適切な診断条件を設定することが必要であることが示された。

最大水トリー長測定法、漏れ電流法、残留電荷法を想定してライフサイクルコストを評価した。その結果、漏れ電流法では診断実施による経済的メリットが殆ど得られない

ことが分かった。また、経済性の観点から評価すると、残留電荷法は最大水トリー長測定と同程度の効用を有しているという結果を得た。

本研究では、一定周期で診断を実施する TBM (Time Based Maintenance) を想定したが、今後の課題として、劣化状態に基づいて次回診断時期を決定する CBM (Condition Based Maintenance) を考慮した検討が必要であると考えられる。また、本手法の適用範囲を故障損失の大きい電圧レベルのケーブルへ拡大した検討も必要であると考えられる。

(平成 15 年 3 月 31 日受付, 平成 15 年 9 月 29 日再受付)

文 献

- (1) N. Hozumi, M. Kanegami, T. Takahashi, T. Takeda, and T. Okamoto : "Study on Life Cycle Management for Power Apparatus Based on Insulation Diagnosis", *T. IEE Japan*, Vol.122-A, No.4, pp.421-428 (2002-4) (in Japanese)
穂積直裕・金神雅樹・高橋紹大・武田敏尚・岡本達希:「絶縁診断による電力機器のライフサイクル管理の検討」, 電学論 A, **122**, 4, pp. 421-428 (2002-4)
- (2) K. Matsuura: "Insulation Life Expectancy of Electric Machines and Cables and Criteria of Life Terminal", 1998 National Convention Record IEE Japan, S.8-2, pp. S.8-3 - S.8-6 (1998-3) (in Japanese)
松浦度士:「機器・ケーブルの余寿命診断と判定基準の考察」, 平成 10 年電気学会全国大会, S.8-2, pp. S.8-3 - S.8-6 (1998-3)
- (3) Electric Technology Research Association: Report of Electric Technology Research Association, Vol.43 No.2, 1987, pp.93-100, 141-143 (1987-10) (in Japanese)
(社)電気協同研究会:「電気協同研究」, Vol. 43, No. 2, pp. 93-100, 141-143 (1987-10)
- (4) 塩見 弘: 信頼性工学入門, p. 15, 丸善 (1972-1)
- (5) W. Nelson : Applied life data analysis, pp.30-31, JUSE Press, Ltd. (1988-4) (in Japanese)
W. ネルソン: 寿命データの解析, pp.30-31, 日科技連出版社 (1988-4)
- (6) M. Akimoto, T. Matsubara, K. Hirotsu, T. Hayami, and S. Kashiwagi : "New Diagnostic method of XLPE Cables by Measurement of DC Leakage Current", Proc. The 24th Symposium on Electrical Insulating Materials, IV-8, pp.165-168 (1987-9) (in Japanese)
秋本光政・松原知秋・弘津研一・速水敏幸・柏木信治:「CV ケーブルの直流漏れ電流による劣化診断」, 第 20 回電気絶縁材料シンポジウム, IV-8, pp. 165-168 (1987-9)
- (7) K. Miyajima, K. Uchida, H. Kon, and K. Watanabe : "Investigation of Residual Charge Measurement", 2001 National Convention Record IEE Japan, 7-077, pp.2919-2920 (2001-3) (in Japanese)
宮島和久・内田克巳・今 博之・渡辺和夫:「残留電荷測定法の検討」, 平成 13 年電気学会全国大会, 7-077, pp. 2919-2920 (2001-3)

島 陰 豊 成

(学生員) 1978 年 10 月 16 日生。2003 年 3 月名古屋大学大学院工学研究科電気工学専攻博士前期課程修了, 同年 4 月 NTT ファシリティーズ入社。現在に至る。絶縁劣化診断に関する研究に従事。

呉 カ イ

（正員） 1969 年 2 月 2 日生。1998 年 4 月中国西安交通大学博士後期課程卒業。1992 年 7 月～1998 年 11 月中国西安交通大学電力設備電気絶縁国家重点実験室助手。1998 年 11 月～2000 年 3 月名古屋大学理工科学総合研究センター非常勤研究員。2000 年 4 月～2003 年 3 月同センター助手。2003 年 4 月英国 Leicester 大学研究員。現在に至る。工学博士。電気絶縁材料，エネルギーシステムに関する研究に従事。IEEE 会員。

加 藤 丈 佳

（正員） 1968 年 5 月 7 日生。1996 年 3 月名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程修了。同年 4 月名古屋大学理工科学総合研究センター助手。2000 年 4 月名古屋大学大学院工学研究科助手。現在に至る。2001 年 10 月～2002 年 9 月国際応用システム分析研究所（IIASA）研究員。工学博士。超伝導電力システム，エネルギーシステムに関する研究に従事。エネルギー・資源学会会員。

岡 本 達 希

（正員） 1951 年 9 月 21 日生。1976 年 3 月名古屋大学大学院工学研究科博士課程前期課程修了。同年 4 月(財)電力中央研究所入所。現在電力部長。1998 年 4 月～2000 年 12 月名古屋大学理工科学総合研究センター寄附研究部門客員教授。工学博士。主として，電気絶縁材料，エネルギーシステムに関する研究に従事。IEEE，エネルギー・資源学会会員。

鈴 置 保 雄

（正員） 1950 年 5 月 26 日生。1978 年 3 月名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程修了。同年 4 月同大学工学部助手。同講師，助教授を経て，95 年 4 月名古屋大学理工科学総合研究センター教授。2003 年 4 月名古屋大学大学院工学研究科教授。現在に至る。工学博士。主として，電気電子材料，エネルギーシステムに関する研究に従事。IEEE，応用物理学会，高分子学会，エネルギー・資源学会会員。