Life-Cycle-Management of CV Cables based on Degradation Diagnosis

— Effect of Changing Diagnosis Condition According to Degradation —

Takeyoshi Kato Member (Nagoya University)

Mamoru Niwa Student Member (Nagoya University)

Yasuo Suzuoki Member (Nagoya University)

Keywords : degradation diagnosis, life cycle cost, asset management, XLPE cable, water tree

Life-cycle management combined with degradation diagnosis is useful for preventing an unexpected failure and extending service life of electric power apparatuses, resulting in the decreased life-cycle cost (LCC). We have examined a method of life-cycle management based on TBM (Time-Based Maintenance) and CBM (Condition Based Maintenance), and discussed the economically optimum parameters of diagnosis, i.e. interval and criterion of the diagnosis. A power cable with water-tree degradation was studied as an example of power apparatuses.

In our previous work, the method of life-cycle management based on CBM was very simplified, assuming that the parameters of diagnosis were unchanged throughout the service life of a power cable (CBM-1). In this paper, as more condition-oriented life-cycle management, we examined a method of life-cycle management based on two diagnosis intervals (CBM-2).

Figure 1 shows the relation between replacement criterion and the LCC in CBM-1 and CBM-2. In Figure 1, LCC is normalized to the minimum LCC in TBM where replacement interval is 21 years. If the replacement criterion can be set longer than 1500 μm , LCC in CBM-1 is smaller than TBM. The advantage of CBM-2 appears if the replacement criterion can be set at 2000 μm or shorter. Furthermore, if the replacement criterion can be set properly, the LCC in CBM-1 and CBM-2 does not vary so much. The results suggest that the condition-based management can contribute to a robust life-cycle management even if the diagnosis parameters can not be set at the optimum value.

To carry out reliable life cycle management, accurate data on the relation between extent of degradation and failure probability

Fig. 1. Relation between replacement criterion and LCC in CBM-1 and CBM-2

Fig. 2. Increase of LCC by wrong assumption of standard deviation of annual change in maximum water-tree length of CV-cable

or remaining life as well as a well-established diagnostic method are necessary. In this paper, we examine the influence of accuracy of the data used to determine the optimum diagnostic parameters and evaluate how the life-cycle cost is affected by the employment of inaccurate data.

Assuming that the standard deviation of annual change in maximum water-tree length is evaluated as larger value than the actual, we calculated the increase in LCC. Figure 2 shows the results. In this case, because we expect the larger number of CV cables with longer maximum-water tree length, hence possible larger failure loss for the future, the replacement interval in TBM is set at shorter value than that in the optimum value, resulting in the increased cable replacement cost. In CBM-1, although we set shorter diagnosis interval, the number of cables actually replaced is much smaller due to the diagnosis, resulting in smaller increase in LCC in CBM-1 than that in TBM. The influence of data accuracy on CBM-2 is small also. As for the relation between failure probability and maximum water-tree length, the influence of data accuracy on LCC is much smaller in CBM-1 and CBM-2 than in TBM, because the actual number of replaced cables is much smaller due to the condition diagnosis. The sensitivity analyses suggest that the influence of data accuracy on LCC is smaller with a condition based management. Consequently, a condition diagnosis can contribute to the reliable and robust life-cycle management.

絶縁劣化診断に基づく CV ケーブルのライフサイクルマネジメント

——劣化状況に応じた診断条件変更の効果——

正員 加藤 丈佳* 学生員 丹羽 守*

正員 鈴置 保雄*

Life-Cycle-Management of CV Cables based on Degradation Diagnosis
— Effect of Changing Diagnosis Condition According to Degradation —

Takeyoshi Kato*, Member, Mamoru Niwa*, Student Member, Yasuo Suzuoki*, Member

Life-cycle management combined with degradation diagnosis is useful for preventing an unexpected failure and extending service life of electric power apparatuses, minimizing life-cycle cost. We examined a method of life-cycle management based on TBM (Time-Based Maintenance) and CBM (Condition Based Maintenance), and evaluated the economic effect of degradation diagnosis. To carry out reliable life cycle management, however, accurate data on the relation between extent of degradation and failure probability or remaining life as well as a well-established diagnostic method are necessary. In this paper, we examine the influence of accuracy of the data used to determine the optimum diagnostic parameters and evaluate how the life-cycle cost is affected by the employment of inaccurate data. As more condition-oriented life-cycle management, we discuss the effects of a method of life-cycle management based on two diagnosis intervals in terms of reliable life-cycle management. We also discuss the measurement sensitivity necessary for an effective asset management based on diagnosis.

キーワード：劣化診断，ライフサイクルコスト，アセットマネジメント，CV ケーブル，水トリー

Keywords：degradation diagnosis, life cycle cost, asset management, XLPE cable, water tree

1. まえがき

近年，電力機器の運用に伴うコスト削減のため，機器故障による損失を未然に防止するだけでなく，電力機器を真の寿命近くまで有効利用することが求められている。そこで，劣化診断に基づく電力機器のライフサイクルマネジメントが注目されており，その効果について確率論に基づき推定する手法が提案されている⁽¹⁾。また，診断のためのコストを考慮して機器の運用のライフサイクルコスト（LCC）を最小化するためには，診断の周期（以下：診断周期）や診断の際に機器を交換する基準（以下：交換基準）について，最適な診断条件を決定することが重要である。そこで筆者らは，電力機器の中でも設備量が多い 6.6kV の CV ケーブルに着目し，水トリー劣化の実測データを用いて，劣化診断を考慮したライフサイクルマネジメントについて検討を行ってきた⁽²⁾。その結果，1 回あたりの故障損失コスト，交換コスト，診断コストの各種コストの比率によっては，ケーブル導入から一定周期で診断を実施する場合でも，劣化診断を行うことが経済的に有利となり，LCC が最小となる最適診断条件を算定可能であることを確認している。

筆者らのこれまでの検討では，一定周期で診断を実施する場合を想定し，診断周期や交換基準を変えて LCC が最小となる診断条件を算定することにより，機器の劣化具合に基づき交換や修理，次の診断時期が決定される CBM (Condition Based Maintenance) の効果が反映されていると想定してきた（以下，この場合を CBM-1 と呼ぶ）。本論文では，劣化状況に応じて診断条件を変更する効果をより明確に反映させるため，「最初の診断を導入から T_1 年後，2 回目以降の診断を一定周期 T_2 年で行う場合（CBM-2）」を想定し，LCC に関して，上述の CBM-1 や「診断を行わずに一定周期でケーブル交換を行う場合（TBM: Time Based Maintenance）」との比較を行った。

また，これまでの検討では，最大水トリー長分布と破壊確率との関係や使用期間と最大水トリー長分布との関係

* 名古屋大学大学院工学研究科電子情報システム専攻
〒464-8603 名古屋市千種区不老町
Department of Electrical Engineering and Computer
Science, Graduate school of Engineering, Nagoya
University
Furo, Chikusa, Nagoya 464-8603

は、実測データに基づき正確に推定できることが前提となっていた。しかしながら、実際に LCC 評価に用いることができるデータの数や精度は十分ではなく、評価対象の CV ケーブルの使用実態に適したデータを利用できるわけではない。そこで、LCC 評価に用いるデータが一定の不確実性を持つものと仮定し、データの精度が最適診断条件に与える影響を解析した。以上の検討により、データ精度による LCC 評価のロバスト性の観点から、劣化状況に応じた診断条件変更の効果を明らかにした。

2. 最大水トリート長に基づく劣化診断の LCC 評価

〈2・1〉 LCC 評価モデルの概要 CV ケーブルの水トリート劣化において、診断時における各種の評価指標の中で、水トリート長は適切な指標であると考えられている⁽³⁾。特に最大水トリート長は、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。そこで筆者らの LCC 評価モデルでは、以下の仮定に基づき、CV ケーブルを交換する際の判定基準として最大水トリート長を用いることとした。

- ・ CV ケーブル 1 ユニットの長さ（本論文では 50m と想定）における最大の水トリート長を最大水トリート長と定義する。
- ・ CV ケーブルを破壊することなく最大水トリート長を知ることが可能である。

このような仮定に基づき、次の 3 つの場合について、LCC を算定した。

(1) TBM 使用期間を通じて診断を実施せずに一定の使用期間を経過した全ての CV ケーブルを交換する。

(2) CBM-1 使用期間を通じて一定周期で診断を実施し、診断結果が交換基準を超える CV ケーブルを交換する。使用期間を通じて交換基準は一定とする。

(3) CBM-2 最初の診断を導入から T_1 年後に、2 回目以降の診断を一定周期 T_2 年で実施し、診断結果が交換基準を超える CV ケーブルを交換する。使用期間を通じて交換基準は一定とする。

LCC の計算手順の概要は以下の通りである。なお、具体的な計算式等の詳細については、文献(2)を参照されたい。

(i) 撤去された 6.6kV の CV ケーブルにおける実測データに基づき、使用期間 k 年の CV ケーブルにおける最大水トリート長 l の確率密度 $N_k(l)$ 、最大水トリート長 l における故障確率 $f(l)$ を定式化する。

(ii) $N_k(l)$ と $f(l)$ とから、使用期間 k 年の CV ケーブルにおける故障確率 $P(k)$ を算定する。

(iii) 推定した CV ケーブルの最大水トリート長が基準値 $l_c[\mu\text{m}]$ 以上であれば交換するとし、 $N_k(l)$ と $f(l)$ とから、使用期間 k 年の CV ケーブルを診断した際の交換率 $R(k)$ を算定する。

(iv) 1 回あたりの故障損失コスト、交換コストおよび診断コストの任意の組み合わせに対して、診断条件（診断周期およびケーブル交換基準）を変化させて LCC を算定し、LCC が最小となる診断条件を決定する。

図1 ケーブル使用期間と最大水トリート長との関係に関する想定

Fig. 1. Assumption of relation between operation period and maximum water-tree length of CV-cable.

以下、手順(i)については〈2・2〉節で、(ii)～(iv)については〈2・3〉節でそれぞれ説明する。

〈2・2〉 最大水トリート長および故障確率の想定 撤去された 6.6kV の CV ケーブルから切り出した 5m の試料ケーブルを加速劣化試験（周波数 1kHz）して得られたデータ⁽⁴⁾に基づき、使用期間 k 年の CV ケーブルにおける最大水トリート長 l の確率密度 $N_k(l)$ 、最大水トリート長 l における故障確率 $f(l)$ を次のように定式化した。

加速劣化試験条件から換算した実際の使用期間と最大水トリート長との関係を図 1 に示す。同図に示すように、4 種類の加速劣化時間における最大水トリート長のばらつきを対数正規分布で近似し、対数正規分布の確率密度関数により、使用期間 k 年の CV ケーブルにおける最大水トリート長 l の確率密度 $N_k(l)$ を定式化した。その際、周波数加速の加速係数がほぼ周波数に比例することを考慮して、使用期間 k 年の CV ケーブルにおける最大水トリート長の対数平均値 $\mu(k)$ と対数標準偏差 $\sigma(k)$ をそれぞれ次式のように定式化した。

$$\mu(k) = 0.092 \times k + 5.11 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\sigma(k) = 0.617 \quad \dots\dots\dots (2)$$

なお、対数標準偏差については、使用期間によらず一定と想定した。

次に、図 2 に示すように、最大水トリート長 l が異なる 3 種類の試料グループ（500 μm 以下、500～1000 μm および 1000～1500 μm ）について、それぞれ破壊電圧 V に対する累積故障確率 $F(V)$ をワイブル分布によって表し、6.6kV の CV ケーブルにおける最大系統電圧 4 kV（定格相電圧の 1.05 倍）における累積故障確率を算定した。そして、算定した 3 点の累積故障確率をそれぞれ最大水トリート長 l が 250 μm 、750 μm および 1250 μm における 4 kV での故障確率と考え、3 点に対する累乗近似により、最大水トリート長 l に対する累積故障確率 $f(l)$ を次式のように定式化した。

$$f(l) = 3.196 \times 10^{-14} \times l^{3.649} \quad \dots\dots\dots (3)$$

〈2・3〉 LCC の算定方法 以下に LCC 算定方法の概要を示す。前節で求めた $N_k(l)$ と $f(l)$ を用いて、使用期間 k 年のケーブルの故障確率 $P_k(l)$ を算定した。なお、 $f(l)$ は 5m

の撤去ケーブルに関する値である。そこで本論文では、実際の使用状況を想定し、最弱点によって全体の強度が決定されるとして、50m のケーブル長の値に換算した $P_k(l)$ を算定した。また、一回の故障で発生する平均の損失コスト（以下、故障損失コスト）を C_f とした。

同様に、診断時において最大水トリー長が基準値を超えるケーブルの交換率 $R(k)$ を算定した。また、ケーブル単価や施工費を含んだ交換にかかるコスト（以下、交換コスト）を C_R とした。なお、本論文では最初にケーブルを導入した年を観測年 $n=0$ 年とし、総ケーブル本数が常に一定となるように各観測年におけるケーブル交換数を算定した。さらに、一回の診断に発生するコスト（以下、診断コスト）を C_D とした。

以上の想定に基づき、診断条件（診断周期および交換基準）を変化させて TBM, CBM-1 および CBM-2 について、検討対象期間中において故障によって発生する損失コストの総和 (TC_f)、交換にかかるコストの総和 (TC_R) および診断にかかるコストの総和 (TC_D) をそれぞれ求め、これらの合計値 ($TC_f + TC_R + TC_D$) を LCC とした。なお、診断を実施しない TBM については $TC_D=0$ となる。

検討対象期間については、診断回数の違いが LCC 評価に与える影響を考慮して、ケーブルの寿命よりも十分に長い 300 年と設定し、いずれの場合にも数回の診断・交換が実施されるようにした。また、ケーブル導入初年度におけるケーブル本数を 10000 本とした。なお、これまでの検討の結果、各単位コストを変化させても CBM において経済的に最適な交換基準や診断周期（最適診断条件）が存在することを確認している⁽²⁾。そこで本論文では、紙面の制約上、現実

図2 異なる最大水トリー長を持つケーブルの破壊電圧に関するワイブルプロット
(破線は〈4・3〉節で用いる)

Fig. 2. Weibull distribution plot of breakdown voltage for cables with different maximum water-tree length.

的な値の例として、故障損失コスト $C_f=10$ 、交換コスト $C_R=1$ 、診断コスト $C_D=0.001$ （いずれも無名数）の組み合わせについてのみ示す。

3. 劣化診断に基づくマネジメントの効果

〈3・1〉 CBM-1 の場合 TBM では、ある周期で全てのケーブルを交換する。これに対し、CBM-1 では、同じ周期で診断を実施しても、最大水トリー長が交換基準以上のケーブルのみ交換する点が TBM とは異なる。図3に TBM および CBM-1 における交換・診断周期と LCC との関係を示す。同図の縦軸は TBM における LCC の最小値（交換周期 21 年の場合）を 100 としている。これ以降、本論文では、各場合の LCC を TBM の LCC 最小値に対する割合として表記する。また、同図において、CBM-1 の交換基準は各診断周期において LCC が最小となる値である。

TBM の場合、LCC が最小となる交換周期 21 年に対し、15 年に設定すると LCC は 20% 増加、25 年に設定すると 25% も増加する。このことは、交換周期を適切に設定できなければ、LCC が大幅に増加することを意味する。これに対して CBM-1 の場合、最適診断条件（診断周期 15 年、交換基準 2000 μm ）における LCC は TBM の約 81% となる。しかも、診断周期を 23 年以下に設定すれば、診断周期による LCC の変化は小さく、TBM における最適交換周期の LCC よりも小さい。また、CBM-1 の診断周期・交換基準と LCC との関係を図4に示す。同図に示すように、CBM-1 では、交換基準に関しても 1500~2500 μm の範囲であれば LCC の変化は小さく、概ね TBM における LCC 最小値の 85% 以下となる。すなわち、診断周期を適切に設定できずに最適条件から数年ずれた場合や、交換基準が最適値と数 100 μm 異なる場合でも、LCC は最適診断条件の場合と同程度である。このことから、CBM-1 のように一定周期で診断を実施する際に最適診断条件を適切に設定できないような状況で

図3 TBM および CBM-1 における交換・診断周期と LCC との関係

Fig. 3. Relation between replacement or diagnosis interval and LCC in TBM and CBM-1.

図4 CBM-1における診断条件とLCCとの関係
Fig. 4. Relation between diagnostic condition and LCC in CBM-1.

も、劣化診断に基づく交換は経済的にロバストなマネジメントを実現できることを示している。

ただし、図3に示すように、CBM-1の場合でも、診断周期が長すぎると、診断しない年の故障損失の割合が大きくなるため、LCCはTBMの場合と同程度となる。また、本論文では単位診断コストを単位交換コストの1000分の1に設定しているが、両者の値が同程度であれば、診断コストと交換コストの両方が必要なCBM-1の方がTBMよりもLCCは大きくなる。しかし、一般にケーブル1本あたりの交換コストよりも診断コストの方が大幅に小さいと考えられ、このような状況においては、一定周期で診断を実施して劣化状況に応じて交換することが有効であること示している。

〈3・2〉 CBM-2の効果 劣化状況に応じた診断の効果をより明確にするため、最初の診断を導入から T_1 年後、2回目以降の診断を一定周期 T_2 年で実施する場合(CBM-2)を想定し、同様の検討を行った。交換基準が100~3000 μm のそれぞれの場合について、 T_1 と T_2 を変化させてLCCの最小値を算定した。結果を図5に示す。同様に、CBM-1における各交換基準の場合のLCC(各交換基準において交換周期を変化させて算定したLCCの最小値)を併記する。同図に示すように、CBM-2の場合、交換基準が1500 μm 程度であれば、LCCはTBMの最小LCCの65%程度であり、CBM-1の場合よりもさらに小さい。また、このときの診断周期は、概ね $T_1=9$ 年、 $T_2=25$ 年となった。すなわち、本論文で想定している最大水トリ長を経年変化および最大水トリ長に対する故障確率の場合、導入初期に最大水トリ長が数100 μm に達しているケーブルを交換して将来的な故障損失のリスクを低減し、残存ケーブルについては、寿命の期待値程度で診断を行うことが合理的なマネジメントとなる。このように、診断周期を簡易的に2段階に分けて診断を実施するだけで、さらに経済的なマネジメントが

図5 CBM-1およびCBM-2における交換基準とLCCとの関係

Fig. 5. Relation between replacement criterion and LCC in CBM-1 and CBM-2.

実現でき、劣化状況に応じたマネジメントの有効性が確認できた。

ただし、上述のようにCBM-2がCBM-1よりも有利となるのは、交換基準が2000 μm 以下の場合である。このことは、劣化状況に応じたマネジメントを行うためには、劣化状況(ここでは最大水トリ長)を高感度で検出できる必要があることを意味する。また、図5の結果では、交換基準が大きい場合でもCBM-1やCBM-2のLCCはTBMよりも小さいが、大きな水トリ長しか検出できずに交換基準が大きくなり、しかも1回あたりの故障損失コストが大きい場合には、劣化診断を実施せずに一定の周期でケーブルを交換するTBMの方が経済的に有利となる場合があることを確認している。

4. 実測データの精度がLCC評価に及ぼす影響

〈4・1〉 計算方法 上述の検討では、最大水トリ長分布と破壊確率との関係、使用期間と最大水トリ長の関係等は、実測データに基づき正確に推定できることが前提となっていた。しかし、実際にLCC評価に用いることができるデータの数や精度は十分ではなく、評価対象のCVケーブルの使用実態に適したデータを利用できるわけではない。そこで、意図的にデータの値や処理方法を変化させて実測データの精度などが正確な推定をするのに不十分であることを表現し、データの精度がLCC評価に与える影響について検討した。本論文では、(2)式に示した最大水トリ長に関する対数標準偏差および図2の最大水トリ長に対する累積故障確率に関するワイブルプロットの形状パラメータの影響について検討した。

まず、前章までの検討では、対数標準偏差等が正しい値、すなわち検討対象とするCVケーブルの実態を反映した値を用いたLCC評価であると想定する。この場合を基準ケースと呼ぶ。次に、対数標準偏差が正しい値とは異なる不適

切な値を用いて、LCC が最小となる診断条件、すなわち診断周期 (TBM の場合には交換周期) と交換基準を算定する。そして、その診断周期・交換基準において、対数標準偏差等が正しい値を用いる場合の LCC を不適切なデータの利用による誤った LCC として算定する。

このようにして算定した LCC は、正しい値を用いて算定した最適診断条件の LCC のよりも大きくなる。しかし、その増加量が小さければ、LCC の算定においてデータの精度が十分でない場合でも、ロバストなマネジメントができると考えられる。

〈4・2〉 最大水トリ一長に関する対数標準偏差 本論文では、使用期間 k 年の CV ケーブルにおいて最大水トリ一長が l となる確率を対数正規分布で表せると想定し、その対数平均値および対数標準偏差をそれぞれ (1) 式および (2) 式に示したように想定した。ここでは、対数平均値は (1) 式と同じであるが、使用したデータのばらつきが大きく、対数標準偏差が (2) 式の 1.5 倍および 2 倍となる場合を想定し、TBM, CBM-1 および CBM-2 の各場合について、LCC を算定した。結果を図 6 に示す。

同図に示すように、TBM の場合、対数標準偏差が基準ケースの 2 倍の値を用いると、LCC は約 2.2 倍に増加する。これは以下の理由による。最大水トリ一長の確率密度の算定において大きな値の対数標準偏差を用いると、最大水トリ一長が大きなケーブルの割合を多く見積もることになる。そこで、故障損失の増加を抑制するため、交換周期は小さく設定されることになる。その結果、実際には最大水トリ一長が短く故障確率が低いケーブルであっても、設定した周期で交換されるため、LCC は大きく増加する。

これに対して CBM-1 の場合、大きな値の対数標準偏差を用いることによって診断周期は短く設定されるが、実際の診断の際に交換されるケーブルの割合は、当初の予想、す

なわち、誤ったデータを用いて予想された割合よりも小さい。このため、対数標準偏差が基準ケースの 2 倍の値を用いる場合でも、LCC は約 1.1 倍に増加するのみである。

さらに、CBM-2 の場合には、データの精度によらず、導入初期の段階で最初の診断を実施して最大水トリ一長が $1000\ \mu\text{m}$ 弱のケーブルを交換する。このため、図 6 に示すように、LCC 評価に用いるデータ精度の影響は小さい。このように、CBM-1 や CBM-2 の場合には、大きな値の対数標準偏差を用いて診断周期・交換基準を設定した場合でも、LCC への影響は小さく、ロバストなマネジメントができることがわかった。

〈4・3〉 ワイブルプロットの形状パラメータ 上述のように、本論文では、CV ケーブルの破壊電圧 V に対する累積故障確率 $F(V)$ をワイブル分布によって表し、最大水トリ一長 l に対する故障確率 $f(l)$ を (3) 式のように定式化している。その際、最大水トリ一長 $500\ \mu\text{m}$ 以下の場合の破壊電圧のワイブル分布について、ワイブル確率紙上の傾きである形状パラメータを 5.52 と設定した。この値を 4.52~6.52 の範囲で変化させ (図 2 の破線の範囲)、最大水トリ一長が短い場合の故障確率が誤った値に見積もられる場合について、LCC を算定した。結果を図 7 に示す。

同図に示すように、TBM の場合、最大水トリ一長 $500\ \mu\text{m}$ 以下の場合の破壊電圧のワイブル分布の形状パラメータを実際よりも大きく見積もっても、LCC はほとんど変化しないが、形状パラメータを小さく見積もると LCC は 2 倍程度増加する。これは以下の理由による。最大水トリ一長 $500\ \mu\text{m}$ 以下の場合の形状パラメータを小さく見積もると、最大水トリ一長が短い場合の故障確率を大きく見積もることになる。しかし、最大水トリ一長が長い場合の故障確率は正しく見積もれているため、結果的に最大水トリ一長の増加に対する故障確率の増加の割合は小さく見積もられることに

図 6 最大水トリ一長の経年変化に関する対数正規分布の誤った想定による LCC の増加

Fig. 6. Increase of LCC by wrong assumption of standard deviation of annual change in maximum water-tree length of CV-cable.

図 7 最大水トリ一長に対する故障確率のワイブルプロットにおける形状パラメータの誤った想定による LCC の増加

Fig. 7. Increase of LCC by wrong assumption of shape parameter of weibull distribution plot of breakdown voltage.

なる。このようなデータを用いて最適診断条件を算定すると、ケーブルの使用期間が長くなっても故障しにくいと判断されるため、診断周期および交換基準は長めの場合にLCCは最小となる。しかし、実際には、形状パラメータを誤って小さく見積もった場合よりも、ケーブル経年によって最大水トリー長が大きなケーブルの割合が増加した場合の故障確率の増加は大きい。その結果、診断を実施しない年の故障損失が大きくなり、結果としてLCCは大きくなる。

同図に示すように、この傾向はCBM-1およびCBM-2の場合も同様である。CBM-1およびCBM-2では、診断を実施して交換すべきケーブルを抽出しているが、上記のように最大水トリー長の増加による故障確率の増加が小さいと想定されているので交換基準は短い。その結果、本来ならば交換されるべき最大水トリー長のケーブルが交換されず、故障損失が大きくなる。その結果、同図に示すように、形状パラメータの誤った見積もりに対するLCCの増加はTBMと同様の傾向を示したと考えられる。ただし、CBM-1およびCBM-2の場合は、診断によって実際に最大水トリー長が長いケーブルのみを交換することにより、TBMとは異なり、形状パラメータの値が多少異なる場合でも、LCCの増加は抑制されたと考えられる。

5. あとがき

劣化診断に基づいてライフサイクルマネジメントを実施する際の評価手法を提案し、水トリー劣化に関する実測データを用いて、ライフサイクルコストが最小となる最適診断条件が存在すること、また、その算定が可能であることを確認した。しかしながら実際の実測データは数や精度が不十分であることが想定されるため、データの精度の影響を検討した。その結果、データの変化が最適診断条件やライフサイクルコストに与える効果を定量的に示すと共に、データの見積もり方によっては、データが不十分であっても診断を用いた運用の有効性が損なわれることはないことを確認した。また、劣化診断に基づくライフサイクルマネジメントが有効となるために必要とされる最大水トリー長の検出感度を示した。

今後の課題として、本論文では、診断時の劣化状態に基づくマネジメントについて、簡易的に、一定周期で診断を実施するCBM-1および最初の診断を導入から T_1 年後、2回目以降の診断を一定周期 T_2 年で行うCBM-2を想定したが、診断時の劣化状況に応じて次回診断時期や交換基準を随時決定する運用方法についてもモデル化を行い、コスト削減効果やデータ精度に対するロバスト性を評価する予定である。また、具体的な非破壊診断手法（残留電荷法、直流重量法など）を想定し、有限な時間・労力の制約下において、どれだけの量またはどの程度の精度の実測データが得られれば、ライフサイクルマネジメントを信頼性高く行うことができるか、また診断にはどれだけの検出感度が必要か、について検討することが揚げられる。

（平成18年7月3日受付，平成18年12月25日再受付）

文 献

- (1) N. Hozumi, K. 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 (2002-3) (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**, 3, pp.421-428 (2002-3)
- (2) T. Shimakage, K. Wu, T. Okamoto, T. Kato, and Y. Suzuoki: "Life-Cycle-Cost Evaluation on Degradation Diagnosis for Cables", *IEEJ Trans. FM*, Vol.124, No.3, pp.277-285 (2004-3) (in Japanese)
島陰豊成・呉 カイ・岡本達希・加藤文佳・鈴置保雄:「ケーブル絶縁劣化診断のライフサイクルコスト評価」, 電学論 A, **124**, 3, pp.277-285 (2004-3)
- (3) K. Matsuura: "Insulation Life Expectancy of Electric Machines and Cables and Criteria of Life Terminal", 1998 National Convention Record IEE Japan, S.8-2 (1998-3) (in Japanese)
松浦虔士:「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 (1998-3)
- (4) 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, **43**, No.2, pp.93-100, 141-143 (1987-10)

加 藤 文 佳

（正員） 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，2005年5月同大学大学院工学研究科助教授，現在に至る。2002年国際応用システム分析研究所（IIASA）研究員。工学博士。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，日本LCA学会会員。

丹 羽 守

（学生員） 2006年3月名古屋大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程前期課程修了。同年4月より，松下電器産業に勤務，現在に至る。在学中，電力機器のライフサイクルマネジメントに関する研究に従事。

鈴 置 保 雄

（正員） 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月名古屋大学工学部助手，同講師，同助教授を経て，1995年4月同大学理工科学総合研究センター教授，2003年4月同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。