

電気設備の絶縁診断における経済性評価

Economical Assessment of Insulation Diagnosis for Power Apparatus

穂積直裕 †

Naohiro Hozumi

Abstract: Optimal condition in insulation diagnosis for power apparatus was studied. The condition for minimizing the average maintenance cost per year through the term of guarantee was formulated. Two parameters, i.e., the term of guarantee and tolerance limit of deviation (margin) of the diagnosis, were optimized. The tolerance limit of deviation is related to the tolerance risk ratio. The maintenance cost accompanied with diagnosis was compared with that without performing the diagnosis. In the early stage of the lifetime, the maintenance cost was proved to be lower when the apparatus was continuously used without diagnosis. In the late stage, the cost was lower when the apparatus was replaced without diagnosis. Diagnosis was effective in the midterm between these two stages. It was shown that the term of guarantee should be optimized in accordance with the degree of degradation. A condition suitable for performing on-line diagnosis is also discussed.

1. はじめに

電力システムの事故を未然に防止し、重大な損失を避けるためには適切なリスクマネジメントが必要であり、その一環として老朽化した機器の劣化診断や計画的な更新が行われる。しかし近年に至るまで機器の更新の多くは、増大を続けた需要に対応する増容量を主目的としていたとされる。

ところが、近年低成長あるいはゼロ成長といわれる経済情勢を迎え、増容量のための交換を行う機会が少なくなったことから、一旦設置された機器を寿命ぎりぎりまで使用する傾向が現れている。この傾向は 10 年以上前から指摘されているが、電力自由化に伴うコストダウンへの要請と相乗し、愈々現実的な事態として捉えられている。今後は既に構築したインフラ構造の信頼性を保ちつつ、寿命点に近く真に必要な機器から更新していく保守方法に切り替えることが重要となり、意思決定を支援するツールとしての診断技術が真価を問われる局面を迎えているといえる。

このような背景のもと、筆者は絶縁診断を行うことによるライフサイクルコストの低減効果を、確率論にもとづいて評価する手法を提案した⁽¹⁾。この研究を含み、診

断の経済効果に関する研究が近年活発化している⁽¹⁻³⁾。

さて、診断には診断のマージン(許容危険度)、診断周期などのパラメータがあり、経済効果を最大にするには、与えられた条件すなわち、余寿命の確率分布、診断精度、診断コスト、交換コスト、故障損失などに応じてこれらのパラメータの最適化を図る必要がある。また、現実の劣化診断においては、経年に応じて診断周期(本論文では診断の保障期間と表現する)を変化させることがしばしば行われる。また、機器の新設時ではなく、ある程度経年を経た時点で診断計画をたて、維持コストを極小化する必要に迫られることが多い。そこで、余寿命の確率分布に応じて診断のマージンと保障期間の最適条件を求める方法について検討した。

2. 検討の条件と定式化

2-1 条件

1 回の診断を実施すると、余寿命が短いと判断された場合には新品と交換されるとする。その後一定期間は新たな故障が発生しないことが保障される。この期間を保障期間とする。保障期間は診断周期とほぼ同じ意味をもつが、以下に保障期間の最適値が劣化状態によって異なることが示されるので、周期ではなく期間という表現を用いた。

† 愛知工業大学 工学部 電気学科電気工学専攻(豊田市)

経済効果は、保障期間内の平均年間維持コストを評価パラメータとする。真の余寿命が長い機器を交換しても損失(利益の逸失)は発生しないが、交換の判断を下す確率が高くなると平均年間維持コストは増大する。故障した機器は新品と交換されるとし、部分交換、オーバーホールによる寿命延伸は考えない。

2-2 診断による交換の判断

図 1 は診断による交換の判断を説明している。対象とする機器の真の余寿命 $h(\tau)$ 、および新品の寿命の確率分布 $f(\tau)$ は与えられたものとする。真の余寿命と予測余寿命の間には相関があるが、診断を実施する者は個別機器の真の余寿命を知らないので、予測値の周りに真値が分布すると仮定して判断を下す⁽¹⁾。保障期間にマージンを加え、予測余寿命がこれを下回った場合に交換の判断を下す。このマージンを許容偏差 Δt_c と定義する。真の余寿命が τ である機器に対する予測余寿命 t は平均値 τ 、標準偏差 σ_d の正規分布 $p(t-\tau)$ をとるものとする。測定者は予測余寿命が判定限界点 $t_c = t_d + \Delta t_c$ よりも短いときに「交換」の判断を下す。「交換」と判定される確率は $p(t-\tau)$ を $t=-\infty$ から $t=t_c$ まで積分して

$$\int_{-\infty}^{t_d + \Delta t_c} p(t-\tau) dt \tag{2-1}$$

となる。余寿命の確率分布 $h(\tau)$ および許容偏差 Δt_c が決まると、許容危険度は

$$r_c = \int_{-\infty}^{t_d + \Delta t_c} h(\tau) p(t_d + \Delta t_c - \tau) d\tau \tag{2-2}$$

で計算できる⁽¹⁾。本論文においては議論を簡単にするため、最適危険度を求める代わりに許容偏差の最適値を求めることにする。

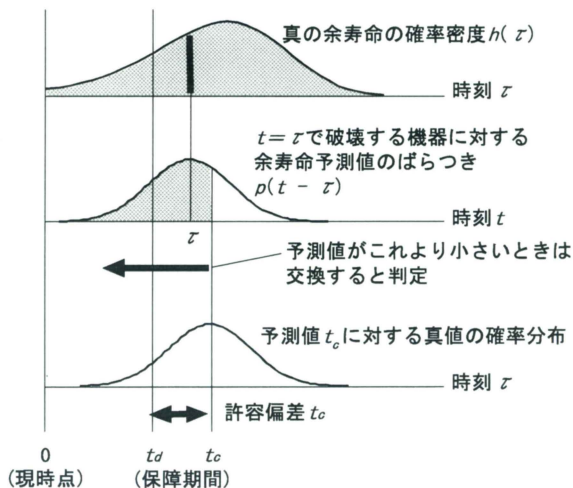


図 1 診断による交換の判断。

2-3 診断の結果発生する事象

図 2 に診断の結果発生する事象を示す。経年 T を経た機器の余寿命の確率分布を考慮すると、診断により新品に交換される確率は

$$P_{replace} = \int_0^{\infty} h(\tau) \int_{-\infty}^{t_d + \Delta t_c} p(t-\tau) dt d\tau \tag{2-3}$$

診断直後に交換されず残留する確率は $(1 - P_{replace})$ であり、この場合は経年が T となる。診断後に残留した機器の余寿命の確率分布は

$$P_{failure_0}(\tau) = h(\tau) \left\{ 1 - \int_{-\infty}^{t_d + \Delta t_c} p(t-\tau) dt \right\} \tag{2-4}$$

2-4 平均年間維持コスト

診断直前の経年を T とすると、診断後の機器の経年は確率分布として与えられる。図 3 は理解を助けるためにこれを離散形で表現したものである。図の横軸は対象とする機器の経年であり、棒の長さは確率密度を示す。診断直後には経年が 0 である、すなわち新品に交換される確率が $P_{replace}$ 、経年が T となる、すなわちそのまま使用される確率が $1 - P_{replace}$ となる。交換された新品の余寿命は $f(\tau)$ で与えられる。交換した機器が再び保障期間内に故障すると、再び交換される。すなわち、新品に交換した場合でも、保障期間内に複数回の交換が発生する可能性がある。診断により交換されず残留した場合でも、保障期間内に故障すると新品に交換される。診断により交換された場合と同様、保障期間内に複数回の交換が発生する可能性がある。

診断後の時刻 t における経年 T の確率分布を $a(t, T)$ とすると、時刻 $t+dt$ における経年の確率分布は

$$a(t+dt, T) = a(t, T-dt) - a(t, T-dt) f(T) \tag{2-5}$$

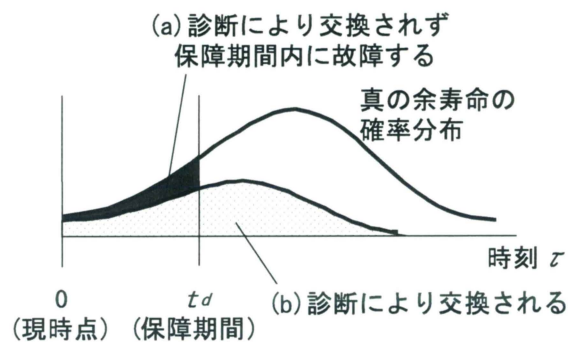


図 2 診断の結果発生する事象。

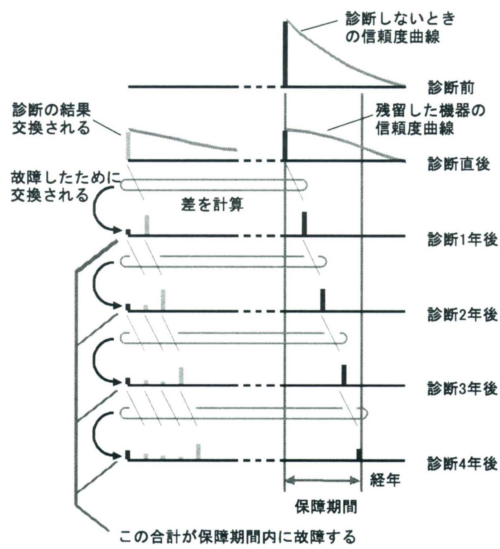


図3 診断後の経年の確率分布。

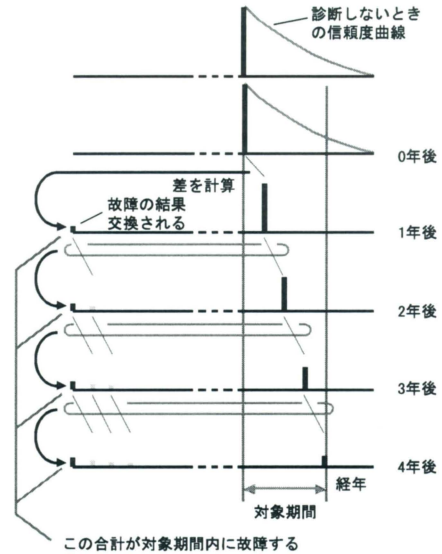


図4 診断せず継続使用したときの経年の確率分布。

但し

$$\begin{aligned}
 a(t + dt, 0) &= P_{replace} \cdot f(t) \\
 &+ \int_0^t a(t, T - dt) f(T) \\
 &+ P_{failure_0}(t)
 \end{aligned} \quad (2-6)$$

すなわち、微小時間 dt の間に新たに故障して経年ゼロの機器に交換される確率は、診断により交換され、再び故障する確率(第1項)、同じく複数回の故障・交換を経て再び故障する確率(第2項)、および診断後に残留して故障する確率(第3項)の合計となる。(2-6)式は、初期条件が判っているので、順次計算可能である。全保障期間内で故障が発生する確率は、

$$P_{failure} = \int_0^d a(t, 0) dt \quad (2-7)$$

保障期間内の平均年間維持コストは交換1回当たりのコスト $L_{replace}$ 、故障復旧1回当たりのコスト(交換コストを含む) $L_{failure}$ および診断コスト $L_{diagnosis}$ として

$$\begin{aligned}
 L_{total} &= \frac{1}{t_d} (L_{replace} \cdot P_{replace} \\
 &+ L_{failure} \cdot P_{failure} + L_{diagnosis})
 \end{aligned} \quad (2-8)$$

となる。一方、金利を考え、「将来発生する損失は至近に発生するものに比べて低く評価される」ことが広く行われている。これは割戻現在価値への変換である。診断および診断によって交換するコストは診断と同時に発生するので、割戻は行わない。割戻は故障の損失のみに適用でき、割戻年率を γ とすると、

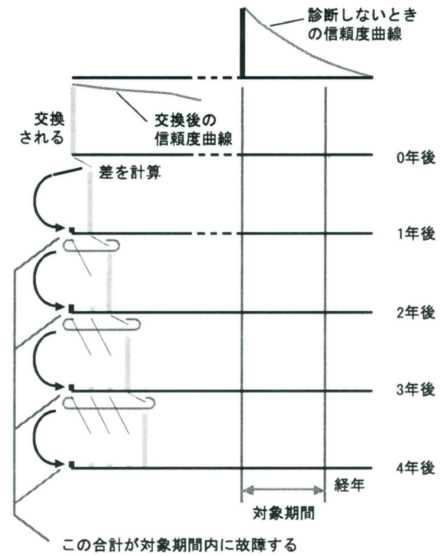


図5 診断せず交換したときの経年の確率分布。without diagnosis.

$$\begin{aligned}
 L_{total} &= \frac{1}{t_d} \{ L_{replace} \cdot P_{replace} \\
 &+ \int_0^d L_{failure} \cdot a(t, 0) \frac{1}{(1 + \gamma)^t} dt \\
 &+ L_{diagnosis} \}
 \end{aligned} \quad (2-9)$$

となる。

2-5 診断をしないときの平均年間維持コスト

経年が T であった機器を診断せず継続使用した場合には図 4 に示すように、当該機器は確率 1 で残留し、信頼曲線に従って故障を発生し交換される。交換された場合には新品の信頼曲線に従って故障を発生し、故障した機器は再び交換される。 $t=t_d$ までの平均年間維持コストは(2-6)式において $P_{replace}=0$ 、 $p_{failure}(\tau)=h(\tau)$ とすることにより計算できる。

経年が T である機器を診断せず即交換した場合には図 5 に示すように、当該機器は確率 1 で新品に交換され、新品の信頼曲線に従って故障を発生し、故障した機器は再び交換される。 $t=t_d$ までの平均年間維持コストは(2-6)式において $P_{replace}=1$ 、 $p_{failure}(\tau)=0$ とおくことにより計算できる。

3. 計算例

3-1 計算条件

新設機器の寿命の確率分布を $f(\tau)$ とする。計算例では、経年に従って余寿命の確率分布が変化したときに診断を行う際の経済効果を考える。使用開始後 T 年を経過した試料の余寿命の確率分布は新品の寿命の確率分布を短時間側に T 年平行移動して求められると仮定する。真の余寿命が負になることはない、負の余寿命に対する確率密度はゼロとする。使用開始後 T 年を経た機器の中から、任意の 1 個を抽出したときの余寿命の確率分布は、

$$h(\tau) = \begin{cases} \frac{f(\tau+T)}{\int_0^{\infty} f(\tau+T)d\tau} & (\tau \geq 0) \\ 0 & (\tau < 0) \end{cases} \quad (3-1)$$

これを真の余寿命の確率分布とする。

使用開始後 T 年までに診断を行った場合には、予測された余寿命が長かったものが選別されて残留していると考えられるため、余寿命の確率分布は(1)式とは異なる分布となる。この計算は、それぞれの余寿命に対し、診断の結果残留する確率を乗じることにより可能であるが、本計算例における検討範囲からは外す。

$f(\tau)$ として、平均 28 年、標準偏差 8 年の分布を仮定する。水トリー劣化による架橋ポリエチレン絶縁ケーブルの絶縁破壊のワイブル解析に関する過去の報告⁽⁴⁾を参考にしたが、現在の寿命特性は著しく改善されていると考えられる。また、機器の種類を限定した解析は本論文の目的ではないので、解析結果に現実性を持たせるための便宜上の値として認識していただきたい。機器の新設コストを 100 円とする。既設機器を計画交換する場合のコストも、同様に 100 円とする。故障が生じたときに交換

する場合のコストは交換コスト、事故による経済損失等を加味した値として 1000 円とした。診断は 1 回 5 円、診断精度(真値の回りの予測値のばらつきの標準偏差)を 4 年とした。

3-2 計算結果

許容偏差を小さくし、診断を甘くすると、保障期間内に故障が発生する確率が増加するため、平均年間維持コストが増大する。許容偏差を大きくして診断を厳しくすると、保障期間内に故障しないにもかかわらず交換される確率が増加するため、平均年間維持コストが増大する。許容偏差の最適点はその中間領域にある。保障期間を短くすると、交換コストと診断コストの回収ができないため、平均年間維持コストが増大する。保障期間を長くすると、交換される確率が増大するとともに、交換された新品が保障期間内に故障する確率は増大し、平均年間維持コストが増大する。保障期間の最適点はその中間領域にある。

図 6 は、経年 0 年、8 年、16 年、28 年の場合について、保障期間と平均年間維持コストの関係を示したものである。許容偏差はそれぞれの経年および保障期間に対して最適化されている。保障期間の最適点は、平均年間維持コストが極小となる点である。劣化の進行にともない、保障期間の最適点における平均年間維持コストは増大する。最適保障期間は経過 0 年では 8-9 年であるが、劣化の進行にともない一旦減少し、経過 8 年では 5 年程度となる。劣化の進行がほとんど進んでいない場合には故障確率が低いため、診断コストを回収するために保障期間をある程度長く取る必要があることによる。

最適保障期間は、劣化がさらに進行すると、経年 16 年で 10 年、経年 28 年で 13 年程度と、再び長時間側に移動する。これは、「劣化の進行にともない、診断の間隔を拡げるべき」であることを示唆し、「劣化の進行にともない診断周期を短くするべき」という常識と逆の結果となっている。しかし、劣化が非常に進行した場合には「予測余寿命がよほど長くない限り交換した方が得」と考えると理解することができる。劣化が進んだ機器を交換せず、頻繁に診断を実施することは、交換コストの繰り延べ効果をもたらすが、現金フローのみを考えた場合にはコスト増の要因となる可能性を孕んでいる。

図 6 には、診断をせずに交換した場合と、診断をせずに使用を継続した場合について、その後の経過時間に亘る平均年間維持コストを併記してある。「診断の保障期間と同じだけ経過した時点」までの平均年間維持コストを「診断した場合の平均年間維持コスト」と比較することにより、診断のコストメリットを評価できる。

診断せず継続使用した場合、劣化が進んでいない機器では時間経過とともに劣化が進み故障確率が増えるので平均年間維持コストは増大傾向をとる。しかし劣化が進んだ機器では、故障して新品に交換されていくので、平均年間維持コストは時間経過とともに減少する。

診断せずに交換した場合、初年度に交換コストが発生するので、初年度の平均年間維持コストは 100 円となる。その後一定期間は故障がほとんど発生しないので、平均年間維持コストは経過時間に逆比例して減少する。さらに時間を経ると、故障の発生が始まるため、平均年間維持コストは増大に転じる。この曲線は劣化状態に無関係である。

図 5(a)に示すように、経年 0 年の新品を診断した場合、保障期間を 8-9 年とすることで最適条件が得られるが、診断せずに同じ期間継続使用した場合に比べてコストを抑制することができない。同図(b)に示すように、経年 8 年では、診断の最適保障期間は 5 年程度なるが、診断せず 1-2 年使用する場合と同程度の平均年間維持コストとなる。同図(c)は劣化の進行状況が中程度の場合であり、保障期間 8 年程度の診断を行うことで平均年間維持コストを最も抑制できる。同図(d)は新品の平均寿命程度の経年をもつ場合である。この場合、保障期間 13 年程度が診

断の最適条件となるが、診断せず交換して同じ期間使用するのとはほとんど同じ平均年間維持コストとなる。厳密には診断コスト分だけ診断した場合の損失が大きいため診断のコストメリットは成立しない。

以上のように、診断の保障期間は劣化の進行状況にあわせて最適化されるべきであることが示された。しかしながら経年が非常に短い場合には診断せずに使用を継続する方がコスト抑制効果が高く、同様に経年が非常に長く劣化が進行している場合には診断せずに交換する方がコスト抑制効果が高い。診断のコストメリットは両者の中間領域で成立する。

図 7 は同じ計算を割戻し年率 0%、5%および 10%として計算した結果である。割戻し率が高くなると遠い将来に発生する故障の損失の相対評価が低くなるので、最適保障期間は長くなる傾向を示す。年率 10%では損失の極小を与える保障期間がなくなり、「故障するまで使用する」ことが最適コスト条件となる。

図 8 は診断精度および診断コストの影響を調べたものである。診断精度が高く診断コストが低い場合には保障期間を短くして頻繁に診断を実施することが最適コスト条件をもたらす。オンライン診断の経済バランスはこの延長上にあると考えられる。

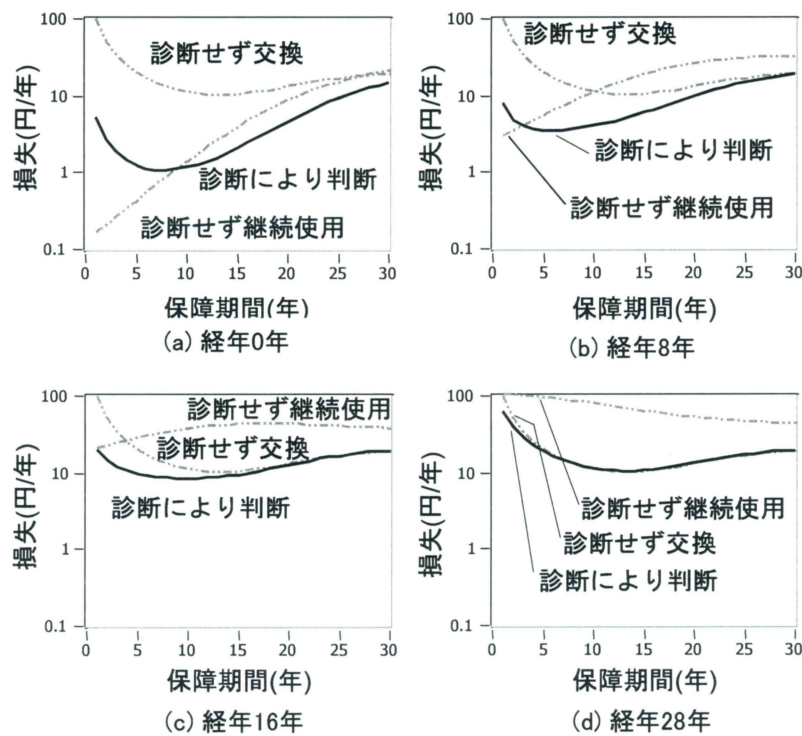
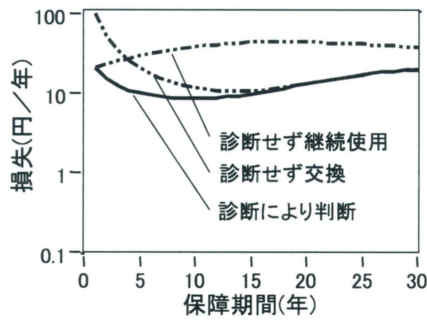
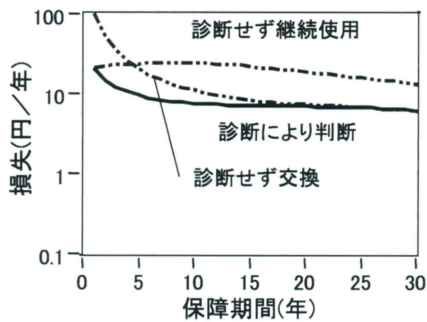


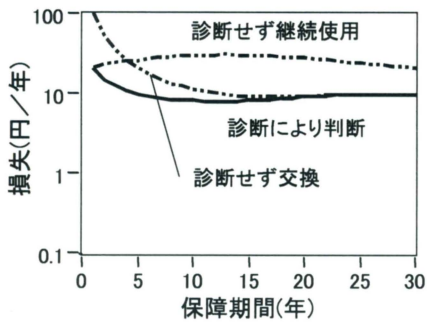
図 6 保障期間をパラメータとした平均年間損失の計算結果。許容偏差を最適化。新品の設置コスト 100 円、平均寿命 28 年、寿命の標準偏差 8 年、診断精度 4 年、故障損失 1000 円、診断コスト 5 円。



(a) 割戻年率 0%



(b) 割戻年率 5%

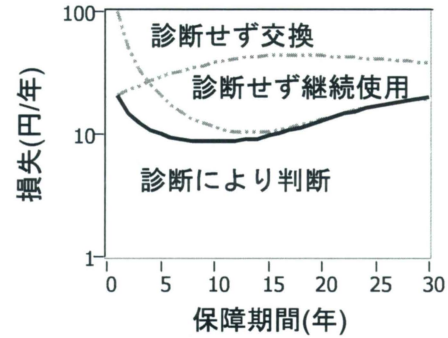


(c) 割戻年率 10%

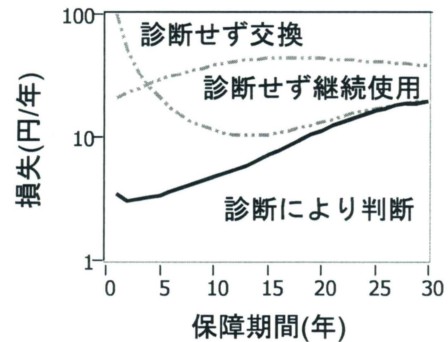
図 7 割戻年率の影響。計算条件は図 6 と同様。経年 16 年。

4. まとめ

絶縁診断における保障期間中の平均年間維持コストを最小化する条件を、保障期間と許容偏差(診断の-margin)をパラメータとして定式化した。一般的な劣化型の故障が発生する機器を使用する過程では、診断することなく使用を続けるべき時期と、診断することなく使用を中断して交換するべき時期が存在する。診断のメリットが成立する期間はこれらの間にある。最適保障期間は最適許



(a) 診断精度4年、診断コスト5円



(b) 診断精度1年、診断コスト0.1円

図 8 診断コストの影響。計算条件は図 6 と同様。経年 16 年。

容偏差とともに余寿命の確率分布に応じて計算できる。すなわち、診断のコストパフォーマンスをよくするためには、劣化の進行状態に応じた保障期間を選ぶ必要があることが示された。

5. 参考文献

- (1) 穂積、金神、高橋、武田、岡本: 「絶縁診断による電力機器のライフサイクル管理の検討」、電気学会雑誌, Vol.122-A, No.4, pp.421-427 (2002).
- (2) 島陰、呉、加藤、岡本、鈴置: 「ケーブル絶縁劣化診断のライフサイクルコスト評価」、電気学会雑誌, Vol.124-A, No.3, pp.277-285 (2004).
- (3) 新藤、八島、高須、岡本: 「設備診断に関する一考察」、2001年電気学会基礎・材料・共通部門大会講演論文集, #13-9.
- (4) 石田、森村: 「送配電設備の劣化診断技術」、電気学会雑誌, Vol. 105-1, pp. 13-17 (1985).

(受理 平成 19 年 3 月 19 日)