

予測保全の統計的考察

広瀬 英雄*

内容梗概

現在提唱されている予測保全技術に将来どのような技術を付加していったらよいかといった観点から、特に統計的側面について述べる。具体的には、現在行われている状態監視保全技術に加えて、機器の異常が発覚してから故障するまでの、いわば余命の統計的推定技術が要求されてくること、また、これを解決する一つの方法として情報量の利用が考えられること、を考察した。

Statistical Aspects on Predictive Maintenance in Power Engineering

Hideo Hirose*

Synopsis

Statistical aspects of the predictive maintenance technology is discussed on the point of view of what technologies should be added to the presently envisaged predictive maintenance technology.

More concretely, in addition to the state supervising technology of a power substation that has been used, a new concept called "residual lifetime" of equipments, should be used, the length of which is counted after some abnormalities in equipments are found.

Also in deriving the lifetime, the concept of information mass might be used.

1. まえがき

特に4～5年前から、電力システムシステム、変電所、電力機器に対して、予測保全といった観点からの信頼性向上がさげられるようになった。それ以前は今日程厳しいオンライン管理は注目されていなかったと思われる。機器に関しては工場出荷時の絶対的な信頼性が要求されているにすぎなかったものが、運転中の状態を把握し、かつ将来の事故の可能性までも予測するという極めて高度な技術が要求される時代に移ってきたのである。それ程今日の（日本の）電力システムの無停電信頼性が要求されている。

ここでは、ここ数年蓄積されてきた従来の予測保全技術に加えて、更に要求されるであろう技術について、特に統計的側面から議論してみたい。その中でも特に寿命について取りあげる。

さて、寿命予測の必要性は、機器がオンラインで監視されていない時こそ重要であり、いつでも機器の状態が把握できる状態ならば不要であるとも考えられる。つまり、故障の徴候が見えたらすぐに取り換えればよいのだから。しかし、電力システム運用のコストのことを考えると、どうしてもやはり寿命予測はさけて通れない課題なので

ある。そこで、従来の寿命推定技術に加えて、今後取り組んで行くべき技術についても少し述べてみたい。

2. 信頼性工学の中での予測保全

信頼性工学の中では「予測保全」という言葉は使われていないが、図1の「状態監視保全」という言葉が最もよくあてはまると思われる。それは、「JIS Z 8115」の中で、「状態監視保全」に対して次のように定義されているからである。『固有技術的対応により、システムや部位の劣化程度を監視して故障を予知する方法』。一方「時間計画保全」に対しての定義は、『システムの寿命分布または故障率をデータによって推定・把握し、これによって数理モデルを形成した後に、最適な点検・取り替え周期を見出す方法』となっており、これら2つを合わせて予防保全と言っている。ついでに、「保全」というのは『アイテムを使用および運用可能に維持し、または故障、欠点などを回復するためのすべての処置、および活動』と定義され、要するにシステムが止まらないように考慮することと考えられる。

さて、以前電力機器の信頼性を議論するときには、その運転状態での寿命を議論することが多かった、特に電力機器では、その要求される寿命が20～30年と非常に長

*技術本部 数値情報研究室

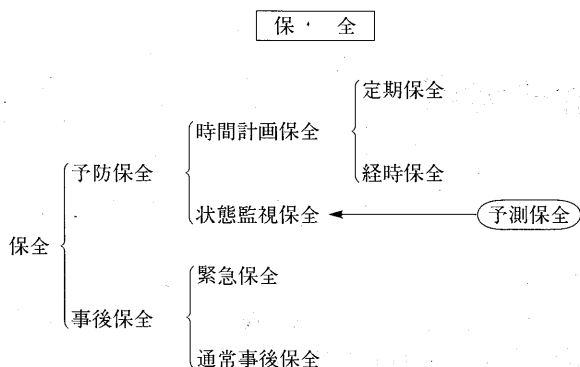


図1 予測保全の位置付け

く、寿命試験をするのも工夫が要った。それが加速劣化試験であり「環境が過酷になればなる程寿命が短くなる」性質を利用したものである。この試験の結果から推し測って、十分に耐えられる寿命の範囲で設計値を定めるといった性質のものであった。そのため「故障したら取り替える」という「事後保全」の考え方が背後にはあったと思われる。

「信頼性工学」では、次の3つのことを大まかに取り扱う。

- (i) 耐久性：これは平均寿命とか平均故障間隔というキーワードに代表されるように、寿命推定の問題である。
- (ii) 保全性：これは平均修復時間というキーワードが示すように、システムが運転を維持できるようにするための問題である。
- (iii) 設計信頼性：これは冗長性、フェールセーフ、フルプルーフという言葉に代表されるように、誤った操作でも危険を伴わない、あるいは多重信頼性システムにするというものである。

このように見てくると、電力系統、あるいは変電所といった電力工学の分野でも、時代とともに低次元の信頼性(耐久性のみ)からより高次元の信頼性へと移ってきていることがわかる。このことは、変電所が変圧器、断路器、遮断器といった単体の機器から、それらを一体にして、更にSF₆ガス絶縁によりコンパクトなより高度なシステムへと成長していったことがその背景にあると思われる。例えば、航空機や、ロケットなどシステムが複雑になればなる程、上の(i)から(iii)へと信頼性の比重が増していることからわかることである。

次に「耐久性」の中での寿命推定の意義について少し考えてみたい。先に述べたように、機器に異常が見つかった時点で、それを取り替える、という考え方ならば、寿命予測は要らない。監視システムを完璧なものにし、取り替えのタイミングの悪さに伴うコスト意識を無くせば全く不要の項目である。しかし、ユーザの利便性の中には当然供給者のコストも入っている訳で、したがって、機器の取り換えタイミングの最適性を追求するという考え方があってもよいと思われる。当然のことながら、ユ

ーザ側から寄せられる利便性、供給者への信用という概念もこの中には含まれなければならない。

最終的には、最適コストで最良の状態での電力供給ということを考えているとき、機器あるいはシステムの寿命を知っておき、それらの重要度に応じて取り替え時期を計画する(これには勿論、緊急取り替えも含まれる)ことが望ましいと考えられる。そうして、このためにはやはり予測保全において寿命予測の技術は必要であり、中心的役割を果たす技術の1つと考えられる。

3. 寿命予測技術

寿命推定は寿命試験を利用して行う。短い寿命であればとりたてて試験をする必要もないが、電気機器のように、20~30年の長寿命になると加速劣化試験技術や、打ち切りデータの取り扱いなどの統計的技術が要求される。加速劣化の種類としては、(i)熱劣化、(ii)電圧劣化、(iii)機械的振動劣化、(iv)空気などのよごれによる環境劣化などがあるが、電気機器に重要なのは(i)、(ii)である。(i)についてはアレニウス則、(ii)については逆n乗則あるいは指数則といった化学的または経験的な法則が知られており、この性質を利用して、短期間に「平均寿命」を知ることができる。

ここで、「平均寿命」と書いたのには意味がある。つまり、ここでの試験は機器の工場出荷時から、故障、破壊までの時間であり、「人」に用いられている「平均寿命」と同じ概念である。さて、「人」は病気にかかり、回復したり、致命的になったりする。たとえば、定期的に検診を受けていて、ガンの徴候が見つかったと仮定する。その後精密に検査して、はっきりとガンと診断された場合その患者は何年生きられるだろうか、というのが「余命」である。「余命」は、勿論健康な人にもあるが、ガン患者の余命は、健康人のものとははっきり異なる傾向を示す。ガンが発覚してからの余命は、新たな別なデータとして平均寿命を形成すると考えることもできる。

このように考えると、電力機器にも同じような考え方が適用できる。つまり、例えば接地線電流や、コロナ測定により機器を常時監視していて、故障に結びつきそうな予徴をとらえることができたとき、その時点から測って機器の完全な故障までの時間を求めることができれば、これが機器の異常が観測された場合の余命になる。

この時、平均余命の推定法は、従来の平均寿命の推定法と大まかには変わらないと考えられる。(ただ、加速劣化の概念は除かれよう。)したがって、今後特に重要なデータは、故障予徴後のものであると言える。

寿命分布は(i)指数分布、(ii)対数正規分布、(iii)ワイブル分布、(iv)ガンマ分布などが代表的であるが、特にワイブル分布は形状パラメータの変化や、極値分布との対応などで広く用いられ、また実際のデータに適合している。このことは、既に電気、機械の工学系のみならず、医・

薬学系, 社会科学における行動計量系など広範囲な適合が報告されていることから明らかである。そこで, 今後も引き続き特にワイブル分布を中心とした寿命推定法技術を確立することが重要であると言えよう。

さて, 寿命試験を効率的に行うにあたって, 統計的な知識を応用することが肝要であるが, 最近興味ある方法が発表されているので, 基本的な考え方のみ紹介したい。

寿命データのとり方としては, 図2に示すように3つ

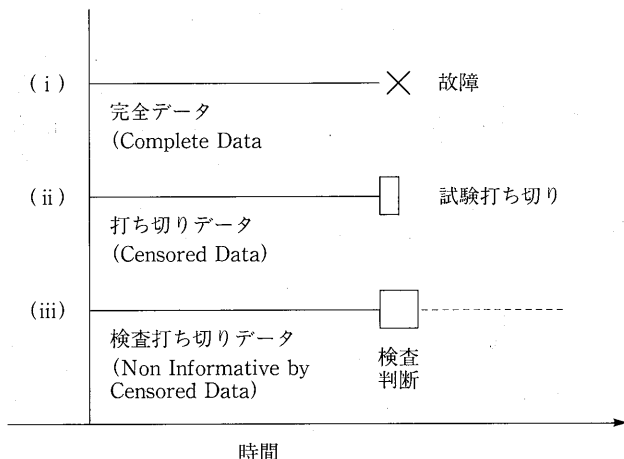


図2 寿命データの種類

の方法が考えられる。(i)完全データ (Complete Data) : 機器が故障するまで試験を続行し, 故障した時刻を記録するもの, (ii)打ち切りデータ (Censored Data) : 試験時間を予め決めておき, その時点までに故障すればその時刻を, しなければしなかったという記録をとる。(iii)検査打ち切りデータ (Noninformatively Censored Data) : 予め決められた時刻に, その機器の状態を判定する。判定には言語変数 (例えば Good, Fair, Bad) を用いる。その判断はエキスパートが行う。

(i), (ii)については最尤推定法 (Maximum Likelihood Estimation) が有効である。(iii)については, 言語変数という従来にない考え方が入っている。これは Fuzzy 理論に基づいているもので数値のみでなく, 言葉の持つあいまいさをも取り扱って寿命推定を行おうという試みである⁽¹⁾。

4. 情報量の利用

確率分布の異なるモデルについて, 得られたデータからそれぞれパラメータ推定を行うことはできる。しかし, この段階ではモデルそのものについては言及していない。寿命分布に数種類のものがあることは先に述べた。このモデルを選定 (同定) するにあたって, 一つの方法は χ^2 検定であろう。しかし, モデルがより複雑になると, もっと簡単に信頼のおける方法が提案されている。AIC (Akaike Information Criterion), 赤池の情報量規準である。AIC は,

$$AIC = -2 \times (\text{モデルの最大対数尤度}) + 2 \times (\text{モデルの自由パラメータ数})$$

といったって簡単である。また, 最大対数尤度が示すようにこれは最尤推定法と深くかかわっている。最尤推定法により, パラメータを推定するときに必要になる対数尤度を直接使い, 各モデル間での比較を行えばよいので, 手続きも簡便である。

この AIC は, 寿命分布モデルを選定するような方法⁽²⁾のみならず, 次のような分野にも適用が可能と考えられる。北川⁽³⁾は, 時系列解析を通常の正規分布を用いて処理せず, 非ガウス分布を用いて処理すると, 平均値の急激なジャンプをみごとにとらえることができることを示した。もし, 電力機器を常時監視し, 異常の徴候を時系列データから見つけようとするとき, トレンドの急変を発見する一つの有力な方法であろうと考える。

AIC による情報量の利用は, 静的な寿命データの分布の同定から, 時系列データの中から重要なシグナルを抽出しようとするまで応用され, 今後もその利用価値は増すものと思われる。

5. あとがき

予測保全技術を統計的側面からながめてみて, 従来の技術, 今後必要になるとと思われる技術についてごく簡単に述べてみた。

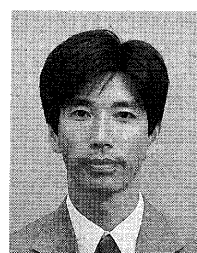
予測保全は状態監視技術が現在までの最大の関心事であったが, これを今後更に発展させるには, 従来の機器単体に適用されてきた寿命予測技術を故障予徴発見後の余命予測に応用し, また予徴発見も情報量等を用いれば可能であることなど, 統計的方法について示唆した。

このような定量的な判断を行うことによって, システムのコストと深く結びつき, 最適なシステム形成ができる可能性があることを指摘した。

また, 寿命予測にも Fuzzy が用いられていることを紹介した。

参考文献

- (1) Wang, Liittshwager, Raz: Censored Life-Deta Analysis Using Linguistic Variables, IEEE, Reliability 37,1, April (1988)
- (2) 広瀬: 長時間 V-t 特性における最適数学モデル選定と寿命推定の統計的方法, 電学論 A, 107, 4, P. 185 (1987)
- (3) Kitagawa: Non-Gaussian State-Space Modeling of Nonstationary Time Series, JASA, 82, 400 P. 1032 (1988. 12)



広瀬 英雄
Hideo Hirose
昭和52年入社
数値計算の
研究開発に従事