キーワード

ライフサイクル信頼性, 診断技術, 予防保全, 信頼性重視保全,
ヒューマン・マシン信頼性

熊丸 智雄
南 裕二
(株)東芝

1. はじめに

発電所には大形発電機や超高圧送変電機器から受配電設備に至るまで、多種多様の電力機器や設備が設置されている。それらの信頼性を論ずるとき、設計製造技術の進歩による高信頼化という観点で述べられることが多い。事実、高電圧設計法や絶縁材料の進歩、つまり固有技術によって高信頼化が成し遂げられた部分が多々ある。

しかし、本稿では信頼性・保全性の手法に焦点を当てて設備のライフサイクル信頼性やヒューマン・マシン信頼性の面から見る。特に配電盤や制御保護装置のような施設は、定常時の使命のみならず、異常監視や故障波及防止に寄与しており、最近ではヒューマン・マシンシステムの知能化による高信頼化という役割も加わった。

2. ライフサイクル信頼性

ライフサイクルの信頼性問題を出荷品質に基づく製造信頼性と環境ストレスに依存する使用信頼性とに分けると、後者の方がはるかに長期間に関与する。その信頼性を保持するため、発電所で突発故障が発生した場合は、保護装置によって損傷や被害を抑え、また、経年劣化には早期検出と予防保全によって対処している。

最近、使用信頼性を論ずるのに故障率より、寿命の方に関心が向けられることが多い。これは、故障対応の方は施設の多重構成などで万全を期しているのに対し、経年発変

図1 設計寿命と推定寿命の関係⁽¹⁾

Technologies to Support Reliability of Facilities for Power Plants and Substations.

By Toshio Kumamaru & Yuji Minami (Toshiba Corporation).

電所の増加で、寿命推定の重要性がより高まったからである。

図1に、設計時に設定した寿命と診断により推定した寿命との関係を示す。設計からは固有技術の面が多いのに比べ、診断からはデータの管理技術が主となる。多量のデータの統括的解析を要する場合は、保全センターでの遠隔診断にする方法もある。

3. 設備診断と予防保全

使用信頼性を確保するため、発電所に限らず産業界で広く使われている現用技術の概念と適用例を述べる。

3.1 信頼性重視保全

診断と保全は別々に存在するのではなく、信頼性重視保全という概念に統合される。その実施手順は次の5つのステップから成っており、経験に頼っていた保全方式を客観的基準によって選択する一連の作業と見なせる。⁽²⁾

S1 データの収集：設計と運転関係の文書、現行の保全方式と習慣、故障記録と修理保守記録などを収集する。

S2 対象の明確化と区分：保全単位にサブシステムに区分し、その境界、入出力、故障波及の関連を明確にする。

S3 問題の解析：故障樹木解析や故障モード影響解析を用いて、故障の発生機構や影響度などを解析する。

S4 保全方式の選択：故障特性に応じて状態監視保全や時間基準保全などを選択する。

S5 基準のパッケージ化：保全内容を明確にし、作業の間隔、点検箇所などを手順化する。

図2 設備保全体系

これらを図2に示すような設備保全体系の中で具体化する。保全対象となる機器なり発電所に対し、監視・診断・保全管理の各段階がある。監視機能は、設備異常時の警報とともに、上位の診断機能に対するトリガーとデータ処理を受け持つ。診断機能は、原因診断と異常程度の判定を含む。品質保全支援は状態監視保全とも呼ばれる。そして最上位の保全管理では、情報処理を主体として発電所全体を統括管理する。

3.2 開閉保護分野への適用

故障兆候の検出では、機器を停止することなく、機器を外部から監視する必要がある。そのため変圧器、遮断器をはじめとして多くの機器に、表1に示すような絶縁異常、通電異常および動作異常の監視が行われる。監視性能を高めるため、検出装置（センサ）の信頼性、耐久性、診断アルゴリズム（原因と現象の因果関係）に対する追究がなされている。⁽³⁾⁽⁴⁾

表1 ガス遮断器の故障監視

劣化項目	前兆現象	検出技術
絶縁性能に関わるもの	部分放電 異常音 ガス圧低下 ガス中水分増加 ガス分解	部分放電検出器 超音波検出器 圧力センサ ハイクロメータ ガス分析装置
通電性能に関わるもの	温度上昇増大 主回路抵抗増大 ガス圧上昇 電極消耗増大 開閉時間増大	温度センサ 主回路抵抗計 圧力センサ X線診断法 低速駆動法
機械性能に関わるもの	電極消耗増大 動作回数過多 駆動摩耗増大	低速駆動法 動作回数計 低速駆動法

これらの技術により自動診断システムを形成し、事後保全や時間計画保全を状態監視保全へ切り換えていくことが可能となる。

4. 新しい診断技術

盤や装置を対象とした診断で、音響や画像を使った新たな技術を紹介する。

図3 絶縁劣化検出の概念図

4.1 受配電盤の絶縁劣化診断

スイッチギヤに用いられている絶縁物は、温度・電氣的・環境的・機械的要因により劣化すると沿面や空隙（ボイド）で部分放電が発生し、劣化の進展につれ部分放電電荷量は徐々に増大する。そこで、図3に挙げた3つの方法で、劣化の軽微な段階で検出できれば、絶縁破壊を未然に防止できる。⁽⁵⁾

図中のAE法による超音波の計測が、非接触で安全であり劣化位置の特定にも都合がよい。最近、その信号処理にウェーブレット変換を用いて、検出感度やノイズ耐量を向上させる研究がある。⁽⁶⁾

ウェーブレット変換の一般式は式(1)で表される。

$$(W_\psi f)(b, a) := |a|^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cdot \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx \quad (1)$$

右辺の関数 ψ はアナライジングウェーブレットと呼ばれる変換関数である。 a 、 b は、それぞれスケールパラメータ、シフトパラメータと呼ばれるパラメータである。 a 、 b を変更することによって、周波数域や時間域（位相）が変化する。

図4にサンプリング周波数 25kHzで測定したAE信号を示す。電源電圧の1サイクル分を0クロス点を基準に切り出しており、横軸は0〜360度の位相に対応している。

図4 部分放電時のAE信号

ウェーブレット変換を行った結果を、等高線グラフ表示したのが図5である。ウェーブレット係数の絶対値の大きさによって、8階調で区分けしている。白地で黒線緑取りの部分は、ウェーブレット係数の絶対値が最も大きくなる最大レベル領域である。この領域の中心位相と面積から、AE波の電源電圧からの位相ずれや大きさを読みとること

図5 変換結果の等高線グラフ

で、絶縁劣化を診断する。高い周波数域や位相の離れた位置のノイズは、この診断を妨げない。

この技術は、変成器の励磁騒音のような連続性ノイズへの耐量を高め、センサ位置の移動が可能ことから、放電の大きさや放電発生箇所の把握にも有効である。

4.2 制御保護装置の高信頼化

欠陥状態は初期段階では内在しており、また障害レベルに達していても、特定の制御条件と重ならないと顕在化しないこともある。その抽出にはシステム機能の自己診断や電子部品・材料の劣化診断などが用いられる。⁽⁷⁾

自己診断は技術的に新しくはないが、高度に自動化されたシステムでは、希に発生する異常時処置の観点からの利便性の再評価が求められている。

最近、IECで安全性に関する規格改訂が進められており、適用技術・手段のランク付けがなされている。今後のシステムづくりの指針となっていくことが予想されるので、その一端を紹介する。

Draft IEC 1508 - Functional safety: safety-related systems

IEC 65A WG10(電気/電子/プログラマブル電子システム)、WG9(産業安全関連システムの分野で利用されるコンピュータ用ソフトウェア)の規格ドラフトが改訂された。その中で、システムに要求される安全性の水準を、適用手法によって表2のように5段階に分類し、そのレベルに応じた異なる安全基準を設定している。

表2 処理ユニットでの適用手法

適用技術・手段	インテグリティレベル				
	0 安全と 無関係	1 低い	2 中位	3 高い	4 非常に 高い
ソフトウェアによる自己診断	R	R	R		
ハードウェア支援の自己診断	R	R	R		
誤り訂正の内部構造			R		
ソフトウェアによる相互比較			R	R	R
比較器の使用			R	R	R
多数決方式	R	R	R	R	R

次に、部品・材料の面から信頼性を考える。装置の高信頼性の源は、多量に使われるICの信頼性に依存しているが、10年以上経過した装置は、さすがに劣化が観測されるようになり、劣化診断が重要になってきた。⁽⁸⁾

そこで、電気的特性では検知できない微小な欠陥を元に余寿命を推定する方法として、顕微鏡で観察できる腐食などの劣化画像による方法が開発された。劣化の時間依存性をあらかじめ予備実験で調べておき、診断時の劣化画像と比較することにより寿命を推定する。

具体的には、まず診断対象と同種類のICに、高加速試

図6 ICの余寿命推定方法⁽⁸⁾

験でストレスをかけ劣化させる。そして、その劣化画像を時系列的にサンプリングしていき、劣化度と時間との関数Fを図6の要領で求める。その後、発変電所から定期点検時などに取り出してきたICの劣化画像を撮影し、その画像から分かる劣化度から、その部品が関数Fのどの部分に適合するかを判定するという原理である。

図7にICの腐食パターンを計測系と観測写真を示す。この結果から、稼働中の装置の余寿命が推定される。例えば、定期点検で抜き取った経年部品の腐食量が u だったとすると、寿命消費率 L は、

$$L = f^{-1}(u) \quad \dots\dots\dots (2)$$

で与えられる。さらに、発変電所での使用が T 年だったとすると、比例配分により寿命と余寿命は、

$$(\text{寿命}) = T/L \quad (\text{年}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$(\text{余寿命}) = T \times (1/L - 1) \quad (\text{年}) \quad \dots\dots (4)$$

として求められる。

回路構成に依らず、対象ICは劣化の初期値が全てゼロで連続的に増加するという条件を満たす。さらに発変電所の空調環境と高加速試験環境とに相似性があることから、この方法が妥当であることが分かる。

図7 画像計測系と観測写真⁽⁸⁾

5. ヒューマン・マシン信頼性

人間と機械との関わり合いに、信頼性問題の根源が潜んでいるとの認識の元に、システムの知能化手法やマルチメディア、仮想現実感等の技術が注目されている。この観点から、最近の認知理論を応用した生態学的インターフェース(EI)とその原子力プラントへの応用例を紹介する。⁽⁸⁾

EIの基本は、目的-手段の関係をモデル化した図8のような階層構成である。運転員は機能目的を認識し、エネルギーと重量のバランスという自然法則に照らして、プラントの入出力関係を認知する。

これを元に、運転員が操作を選択する認知制御レベルの方は、スキルベース、ルールベースおよび知識ベースに分けられる。後者になる程、複雑な思考が求められる。EIは、局面に応じて最も適切な制御レベルを支援するものでなければならない。

原子力プラントへの応用例として、電力生産階層モデルが提案された。図8の一般機能に関しては、核分裂エネルギー源から電力網へのエネルギー流の流れ関数によって表現する。CRT表示画面には、エネルギーバランスとランキンサイクル表示を用いて、エネルギー変換プロセスにおける因果関係が表示される。また、物理機能に関して、エネルギー貯蔵のための原子炉圧力容器があり、エネルギー

図8 原子力プラント機能の階層構成

ランスが原子炉冷却系の圧力を決定する。そのため、エネルギー蓄積量をその時間微係数と共に表示している。

このような表示は、運転員のプラント状態の知覚と思考を支援し、作業要求への適応の支援にも効果があると考えられる。

6. まとめ

信頼性を支える技術を発変電関係に限っても、実に様々な技術がある。それらは信頼性情報を共有しながら、運転と診断、診断と保全を有機的に結びつける。その結果、定常運転状態の監視系の信頼性を高め、異常の兆候をよりの確に把握できるようになり、事故対応時のヒューマンエラーを防ぐのに重要な役割を果たしている。

(平成9年1月16日受付)

文 献

- (1) 山村 監：電気・電子部品の寿命診断, 日本規格協会
- (2) 大島：「設備の信頼性と安全性」, 機械学会 RC 94 研究分科会資料(平3-3)
- (3) 小特集：「電力設備の非接触計測・診断技術」, 電学誌(平4-3)
- (4) 「受配電システムの開閉保護に関する予防保全技術の動向」, 電気学会技報, No. 567 (平7)
- (5) 渡部, 他：「受配電設備診断用部分放電検出装置」, 電学論 B, 116, No. 1 (平8-1)
- (6) 野崎・根本：「絶縁劣化診断へのウェーブレット変換の適用」, 電気学会研資, SP-97-1 (平9-2)
- (7) 熊丸・小島：「計測制御システムに内在する欠陥・障害の抽出方法」, 平8 電気学会全大, S.13-2-2
- (8) 佐々木・南：「ICのアルミ配線腐食を劣化指標とする診断法」, 第9回信頼性シンポジウム(平8-11)
- (9) 門田・龍沢：「生態学的インターフェースの原子力プラントへの応用」, 機械学会 RC 139 研究分科会研究中間報告書(平8-7)

熊丸 智雄 (正員) 1941年5月25日生。1964年3月九州大学工学部電気工学科卒業。同年(株)東芝入社。現在、同社重電技術研究所信頼性技術グループに所属。主として、制御保護装置に対する信頼性・診断技術の研究、開発に従事。日本信頼性学会会員。

南 裕二 (正員) 1965年11月7日生。1991年3月九州工業大学工学部制御工学科卒業。同年(株)東芝入社。現在、同社重電技術研究所信頼性技術グループに所属。主として、制御保護装置用電子基板に対する診断技術の研究、開発に従事。