タービン発電機の予防保全技術

一固定子コイル,回転子の絶縁劣化診断,余寿命評価技術
Preventive Maintenance Technology for Turbine Generators

後藤和夫*	Kazuo Gotô
神谷宏之*	Hiroyuki Kamiya
吉田直美*	Naomi Yoshida
臼井 崇*	Takashi Usui



タービン発電機の構造 コイル, リテイニングリングなど重要構成部品について, 診断と余寿命評価による予防保全を施している。

火力発電プラント,原子力発電プラントは,最近 の電力事情から安定供給上重要な役割を担ってい る。火力発電プラントではますます進む経年化と中 間負荷対応などから,また,原子力発電プラントも 徐々に経年化に向かいつつあることから,それぞれ よりいっそうの高信頼性を要求されており,従来に も増した信頼性向上のためのきめ細かな管理が必要

日立製作所は,発電機の心臓部である回転子や固 定子をはじめとする主要部品について,最新の技術 による保守と的確な寿命評価によって信頼性の確保 に努めてきた。

一連の予防保全に関する最新の技術として,エポ キシ絶縁固定子コイルの精度の高い余寿命評価技 術,回転子など主要部品の信頼性向上技術,予測保

となっている。

全のための監視装置などを開発し,実用化している。

* 日立製作所 日立工場

25

1 はじめに

日立製作所が初期に納入した国内事業用火力タービン 発電機の場合,すでに運転開始後15年を経過し,運転時 間も10万時間以上のユニットが70%を超えている。今後 ますます進むこれら経年火力機の長期運用に加え,火力 発電ユニットの高効率運用のため中間負荷運用が増大 し,発電機にとって厳しい運転を余儀なくされつつあり, 経年劣化が加速される傾向にある。また同様に,原子力 タービン発電機でも運転開始後20年を経過した機械もあ り,より高信頼性への要求は高まっている。

日立製作所はコイル,回転子軸などの発電機の主要部 品について,おのおの劣化要因を分析し,劣化要因に基 づく劣化診断,寿命評価技術を確立し,計画的な保守点 検によって信頼性の確保に努めてきた。ここでは,この ような状況下にあって,最近開発したタービン発電機の への要求が強まっており,これを考慮したエポキシ絶縁 の余寿命評価技術の開発が重要視されている。

3.1 絶縁劣化のメカニズムと検出法

絶縁劣化は主に電気的, ヒートサイクル的および熱的 劣化によって生じる。絶縁劣化に対し, 余寿命を評価す る手法として2手法が考えられる。前者は運転履歴から 劣化の程度を推定して余寿命評価を行うNYマップ法で あり,後者は絶縁診断から劣化状況を推定して余寿命評 価を行うDマップ法である。

3.2 運転履歴による余寿命評価技術(NYマップ法)

劣化要因のうち特に影響が大きい3種類の劣化の積を 複合劣化と考え,(1)式から図1に示すエポキシ絶縁シス テムのNYマップが得られる。

ここに、*Vo*:初期値

予防保全技術について述べる。

2 主要部品の経年劣化と余寿命管理

発電機の構成部品が受ける経年劣化の要因を大別する

と、次の項目があげられる。

(1) 起動・停止による機械的低サイクル疲労

(2) 回転,電磁振動による高サイクル疲労

(3) 温度変化によるヒートサイクル疲労

(4) 長時間運転による電気的劣化,熱劣化

(5) 経年による腐食,浸食,地盤沈下など

発電機は鉄合金,非鉄合金,絶縁物など各種の材料を 用いており,その材料が個々の特性を持ち,しかも電気 的,機械的,熱的といった多様なストレスが,種々の運 転モードで合成された形で作用することを考えれば,発 電機の期待寿命を一義的に評価,予測することは困難で ある。

しかし日立製作所は,発電機として機能するための主 要部品について,劣化要因,余寿命管理方法を明確にす ることにより,部品ごとの有効寿命を評価する方法を開 発してきた。以下の章ではタービン発電機の最近の予防 保全,信頼性向上技術について述べる。

3 固定子コイルの余寿命評価

Vr/Vo:残存破壞電圧(%)

Ve/Vo: 電気的劣化による残存破壊電圧(%) Vh/Vo: ヒートサイクル劣化による残存破壊 電圧(%)

Vt/Vo:熱劣化による残存破壊電圧(%) エポキシ絶縁システムのNYマップが,先に検討した ポリエステル絶縁システムのNYマップと異なる点は, 起動・停止回数を等価起動・停止回数とした点である。 これはポリエステル絶縁システムの時代の発電機が,ベ ースロードで運用されることが多く,単に起動・停止回 数で評価しても高精度の余寿命評価が可能であったから である。ところが,エポキシ絶縁システムの時代の発電



発電機の固定子コイル絶縁システムは、ポリエステル 絶縁システムからエポキシ絶縁システムへと変遷してき た。近年、発電機の大容量化、高電圧化とともに運転形 態、すなわちDSS(Daily Start-Stop)や頻繁な負荷調整 運転時間 Y(h)
注:略語説明 A~G(発電機), A', G'機は絶縁更新時
図 I 平均値のエポキシ絶縁寿命曲線(NYマップ平均値)
日台の発電機に挿入されている固定子コイル約100本の残存破壊
電圧の平均値を示す。

タービン発電機の予防保全技術 809

機では、DSSや頻繁な負荷変動など運用状況に変化(負 荷調整運用)が認められ、負荷変動などの影響を考慮す る¹¹必要がある。負荷変動などの影響は固定子コイルの 温度変化による応力疲労となる。そこで負荷変動などの 影響を起動・停止回数に換算する手法としては、金属材 料の応力疲労の評価に一般的に用いられるマイナー則を 適用した。マイナー則を用いた等価換算式を(2)式に示す。

ここに、NE:等価起動・停止回数

N₁:起動・停止回数

N₂ :負荷変動回数

N₃ :VAR(無効電力)変動回数

N₁₀: 起動・停止による寿命回数

N₂₀:負荷変動による寿命回数

N₃₀:VAR変動による寿命回数



注: o (実機サンプリングデータ)

図3 残存破壊電圧平均値と標準偏差の関係 残存破壊電 圧平均値が低くなるに従って標準偏差が大きくなることは,絶縁劣 化が進むに従って残存破壊電圧のばらつきも大きくなることを意 味する。

に提案されており、ポリエステル絶縁システム²⁾のNYマ

(2)式によって求められた等価起動・停止回数NEと運転時間Yから図1に示すNYマップによって残存破壊電 圧の平均値を推定することができる。この推定が正しい ことを確認するために、9台の発電機からサンプリング した結果を図2に示す。残存破壊電圧平均値の推定値と 実測値は、ほぼ一致していることがわかる。しかし、発 電機の信頼性は平均値ではなく各発電機の最弱点部、す なわち最低値で決まるのでこれを求める必要がある。

最低値の一般的な管理方法としては3σ法がJISなど



ップ法による推定でも良好な一致が認められたことか ら、エポキシ絶縁システムの余寿命評価でもこの3 σ 法 を用いるのが妥当と考えた。残存破壊電圧平均値Xと標 準偏差 σ の関係を図3に示す。絶縁劣化が進むに従って 残存破壊電圧のばらつきも大きくなる傾向があった。最 小二乗法による平均値 σ_1 を同図によって求め、さらに平 均値の90%信頼区間 σ_2 をt分布表から統計的に求めた。

この σ_2 値を用いて先の図1の平均値を示すNYマップ から最低値を3 σ 法によって計算すると、図4に示す最 低値を示すエポキシ絶縁のNYマップが得られる。最低 値を示す同図による推定値と実測値の比較を先の図2に 示す。よく一致していることが同図からわかる。

3.3 絶縁診断による余寿命評価技術(Dマップ法)

絶縁劣化は絶縁層内部のボイドが増加する形で現れ, 平均的にボイドが多いほど,また局部的に大きなボイド



* (NYマップ法による推定最低値 Xs-3σ₂) A', G'機は絶縁更新時再度サンプリング

図2 NYマップ法による残存破壊電圧推定値と実測値の比較 較 実機サンプリング試験による残存破壊電圧の実測値とNYマ ップ法による推定値とを比較したものである。よく一致しているこ とがわかる。

図4 最低値のエポキシ絶縁寿命曲線(NYマップ最低値) 1台の発電機中の残存破壊電圧最低値を示す。

27

が存在するほど残存破壊電圧は低下する。平均的なボイドの検出法としては、交流電流試験の電流増加率*ΔI*と誘電体正接試験の*Δ*2があり、局部的なボイドの検出法としては部分放電試験の最大放電電荷量*Q*maxがある。

残存破壊電圧は、平均的劣化を示す放電パラメータ $\Delta = \Delta_2 + \Delta I$ と局部的劣化を示す最大放電電荷量 Q_{max} の 関数として求めるのがDマップ法であり、ポリエステル 絶縁システムのDマップと同様に、エポキシ絶縁システ ムのDマップを求めた。実機からのサンプリングコイル や複合劣化モデルコイルの試験結果を、最小二乗法によ る重回帰分析を実施することにより、実験式として(3)式 が得られた。(3)式から**図5**に示すグラフが得られる。

 $BDV = 100 - 1.8 \times (\Delta - 0.8) - 27.4 \times \log_{1.500}^{Q_{\text{max}}} \dots (3)$

ここに、BDV:残存破壊電圧のDマップ法推定値(%)

 Δ : 放電パラメータ (= $\Delta_2 + \Delta I$)



注:記号説明 O(サンプリングコイル), + (複合劣化コイル)

図6 Dマップ法による推定値と実測値の比較(エポキシ絶縁) Dマップ法による残存破壊電圧の推定値は95%信頼区間に ほぼ入っており,高い精度で残存破壊電圧を推定していることがわ かる。

の観点から適切な時期での水冷部位の点検も必要である。

Δ₂:誘電正接増加率(定格電圧までの増加)

△I: 交流電流増加率 (定格電圧までの増加)

Q_{max}:最大放電電荷量(常規電圧での)

エポキシ絶縁のDマップ法による推定値Vsと実測値 Vrの比較を図6に示す。推定値のほとんどが実測値に 対して95%信頼区間内に入っていることを確認した。ま た,相関性も0.74とかなり高い値を示した。

3.4 総合評価

 $\mathbf{28}$

固定子コイル絶縁の余寿命評価手法としてNYマップ 法とDマップ法について述べたが,実機に対してはさら にフィールドデータを収集するとともに,これら2手法 を総合して評価することが重要である。

また,長期運転した直接水冷却機では,コイルろう付け部の腐食進展状況,接水部への銅酸化膜生成状況など



4 回転子の予防保全技術

4.1 回転子コイル絶縁の余寿命診断

一般的なタービン発電機回転子コイル各部の絶縁構成 を図7に示す。一般に回転子コイルの場合は固定子コイ ルに比べて運転電圧が低く、したがって、各部の絶縁に 与える劣化要因は電気的よりも熱的、機械的(起動・停止 によるヒートサイクルおよび高遠心力によるストレス) および環境による劣化が主である。これらの絶縁の余寿 命診断について、以下に代表的な適用例を述べる。

アース絶縁であるスロットアーマの寿命については,



最大放電電荷量 Qmax (pC)

注:記号説明 O(サンプリングコイル), + (複合劣化コイル)

図 5 Dマップ(エポキシ絶縁) 実機で絶縁診断を実施し, D マップ法で残存破壊電圧を推定できる。 図7 タービン発電機の回転子コイル絶縁構成 対地絶縁 のスロットアーマおよびレヤー絶縁材質には,一般にエポキシガラ ス積層板が用いられている。

スロット端部で経年劣化が顕著に現れる。このスロット 端部を走査電子顕微鏡撮影やEPMA(X線マイクロアナ ライザ)分析を行うと、スロットアーマが部分的に摩耗 し, ガラス繊維の露出や切断が見られ, また摩耗部付近 には多量の銅粉の付着が認められている。これは回転子 コイルの熱伸びにより,スロット端近傍に曲げ応力が発 生したり、コイル導体とスロットアーマの接触部で相対 的な熱伸び差や動きによって摺(しゅう)動し、スロット アーマが摩耗したり、コイル導体の摩耗粉(銅粉)がスロ ットアーマに付着することによって絶縁機能の低下が生 ずるためである。このようにスロット端部に注目して, 運転時間の異なる17台の発電機についてサンプリングを 行った。これらのスロットアーマの曲げ強度, 圧縮強度 および絶縁破壊電圧の実機サンプリングデータを基に, それぞれの特性の有意差検定を行って回帰直線を求め, 相関係数を検討したところ, 圧縮強度が高い相関性のあ

65

Eは数ボルト程度以下である。したがって,寿命点はス ロットアーマやレヤー絶縁が破断したときであると言え る。また圧縮強度で,スロットアーマの場合はスロット 端部に加わる運転時の圧縮応力値が,レヤー絶縁の場合 はコイルの遠心力の総和がそれぞれ運転上必要な特性値 となる。しかし,この運転必要値は破壊すると考えられ る最低値であることから,図8に示したように更新計画 時期としては,安全側に考慮して運転必要値の2倍程度 が妥当性があると考える。

運転履歴の異なる多くの発電機に適用するには, さら にフィールドデータを広く収集することに努め, 余寿命 診断技術の精度向上を図っていくことが重要である。

4.2 回転子コイルの信頼性向上

大容量タービン発電機では,回転子コイルは直接水素 冷却方式が採用されており,界磁電流の大きさによって 巻回される回転子コイルは2層ないし4層重ねのコイル

ることがわかった(図8)。同図は得られた回帰直線で, データの99.9%信頼区間の値を求め,さらに特性がすべ て常温で採取されているため,運転時のコイル温度を考 慮し,100℃での特性値の補正を行った特性直線を示して いる。横軸は起動・停止回数に対する特性変化よりも運 転時間が特性変化に支配的であるので,運転時間が採用 されている。一方,レヤー絶縁も同様な方法で圧縮強度 特性の経年変化を用いて余寿命評価を行っている。

回転子コイル絶縁の寿命点の考え方について述べる。 一般的に界磁電圧は数百ボルト程度であり,レヤー間電



導体で1ターンを形成している。この構造を採用してい る発電機で、コイル導体間の接触面の摩耗によって銅粉 が発生する現象が問題となった。

銅粉発生の原因は、回転子スロット内のコイル導体と スロットアーマ間にはコイル組み込みのため必要な微少 なクリアランスがスロット幅方向,深さ方向に設けられ ている。回転子のターニング時にコイル導体は、図9に 示すように自重によってスロット内で幅方向,深さ方向 にわずかに動くが,これはコイル導体間に相対的な動き や滑りが生じることによる。コイル導体間の接触面が摺 動,摩耗して発生した銅粉がスロットアーマ側に堆(た い)積すると層間短絡や接地に至る可能性があり,米国で は事故例が報告されている。

銅粉の発生因子について, モデル試験によって確認し





図8 スロットアーマの寿命推定(圧縮強度) 運転時間の 異なる17台の実機サンプリングデータを基に求めた。寿命推定は 図中の温度補正で行う。

図9 銅粉発生のメカニズム 実断面模擬回転モデル試験に よってターニング速度で回転すると、コイル導体の動きが観察で きた。

29



注:(1) ●(実機発生量実測値), A~Q(発電機) (2) 銅粉発生量は軸方向長さ300mm, 1スロット当たりの発生量 (3) 推定直線はスロット形状によって異なる。

スロット形状と累積タ 図10 ターニング回数と銅粉発生量 ーニング回数により、銅粉発生量は推定可能である。



注: ●(18 Mn 5Cr鋼), O(18 Mn 18 Cr鋼)

図|| SCC(Stress Corrosion Cracking:応力腐食割れ)耐力の 実証試験 18Mn18Cr鋼は、従来の材料より厳しい条件下でも SCCは発生しないことを確認した。

欠点があり,海外では破断飛散事故が報告されている。 そこでSCC防止のために、従来は、製作、据付け、定期 検査中の結露防止と定期的非破壊検査により, 信頼性を 確保してきた。

た結果,酸化皮膜が形成されない水素雰囲気中で遠心力 の小さいターニング時だけに生じる現象であることが判 明した。さらに実断面を模擬した回転モデル試験、実機 調査の結果から図10に示す累積ターニング回数と銅粉発 生量の関係が得られた。ターニング回数を目安に銅粉が 発生しない構造や, 万一発生しても接地しにくい構造に 改善することで信頼性向上を図った。

また、回転子コイルの一部である口出しリード線とウ ェッジについては, 運転中の高遠心力, 起動・停止によ る疲労など過酷な条件にさらされるので、定期的な点検 や耐力向上対策を行っている。

4.3 リテイニングリングの信頼性向上

回転子コイルエンド部を保持するリテイニングリング は、電磁気的、機械的な要求から主に高耐力の非磁性鋼 を採用している。この材料は1960年代に開発され発電機 の容量増大に貢献してきたが、SCC(Stress Corrosion Cracking:応力腐食割れ)に対して感受性が高いという

この間,本質的対策としての新材料の開発が望まれ, 1980年ごろから耐SCC性能を向上した材料の開発を始 めた。新材料は従来の18Mn5Cr鋼に対し、C(カーボン) の量を減らしCr(クローム)とN(窒素)を増やして機械的 強度を確保しながら耐SCC性能を向上した18Mn18Cr鋼 である。18Mn18Cr鋼の耐SCC性能実証試験の結果を 図11に示す。耐SCC性能の実証試験後、さらに中・小容 量機での使用実績を踏まえ,順次国内事業用発電機にも
 新材料に交換することを提案し採用を得ている。

5 おわりに

タービン発電機は定期的な保守管理によって信頼性の 確保、向上を図ってきているが、今後ますます厳しくな る運用に耐えながら長期間安定した運転を継続するため には、 さらに 適切な 劣化診断、 寿命子測に 基づく 計画的 な保守管理が要請される。今後、なおいっそうフィール ドデータを積み重ね, さらに開発, 改良を加えて発電機 の長寿命化に貢献していく考えである。

参考文献

30

- 1) 谷口,外:高電圧エポキシ絶縁固定子コイルの寿命評価, 電気学会 絶縁材料研究会資料 EIM-87-105(1987) 2) 臼井,外:大形回転機コイルの寿命診断技術,第17回 日 本科学技術連盟 信頼性・保全性シンポジウム Sess.7-9(1987-6)
- 3) 滝川,外:発電機の予防保全技術,日立評論,**72**,8,741~ 748(平2-8)
 - 4) 池田,外:合成レジン絶縁発電機巻線の絶縁劣化判定法, 電気学会 絶縁材料研究会資料 EIM-90-12(1990)