

高沢 和雄  
K. Takazawa

田代 和夫  
K. Tashiro

陣内 功  
I. Jinnai

プラントの経年劣化および中間負荷運用化が進む既設発電機と電気設備にとって、設備の信頼性を確保しつつ稼働率の向上を図ることはもっとも重要である。そのために各種の改良保全技術が開発されて効果を上げている。

例えば、当社では発電機固定子コイルの絶縁劣化による更新および水冷却固定子コイルの予防保全などの推奨と併せて各種診断装置の適用などを積極的に推進している。またスイッチギヤ関係でも、従来のマグネブラスト遮断器から真空遮断器への更新やスイッチギヤ全体を更新するリニューアル化を推進するとともに、マルチリレー、光伝送の最新技術導入にも積極的に取り組んでいる。

Ensuring high reliability and increasing availability are the most important requirements for turbine generators and other electrical equipment now in operation in aged middle-load power stations.

Toshiba is aggressively promoting improvements in maintenance methods by replacing generator stator coils with higher efficiency coils and introducing various diagnostic devices. With regard to water-cooled stator coils, Toshiba has investigated water leakage problems and developed a new brazing method and new materials. In addition to these improvements in turbine generators, Toshiba is also promoting the replacement of magne-blast type circuit breakers in medium-voltage switchgear with vacuum circuit breakers, as well as replacing the switchgear itself with new equipment. The application of multi-relays and optical transmission technology is also being promoted to reduce cable costs and realize better relaying performance.

### 1 まえがき

当社が納入した国内の事業用タービン発電機は、すでに運転年数 15 年を経過しているユニットが 75% に達している。これらの経年火力発電設備は、原子力や高効率大容量火力発電設備の開発と需要構造の変化に伴いベースロード運用からミドル・ピーク運用へとその運用方法が変化し、厳しい運用を余儀なくされつつあり、経年劣化を促進する傾向にある。

このような状況から、各発電設備としても劣化や過酷な運転条件に対して十分な信頼度を維持し、かつ運転保守コストを低減することが大切である。このため、劣化に関する正しい認識をもち、定期点検などの機会を利用して適切な対応と改良保全を行うことが重要である。

ここでは、発電機と中圧スイッチギヤについて最近実施されている改良保全技術を中心に述べる。

### 2 タービン発電機の改良保全技術

#### 2.1 固定子コイルの寿命診断と更新

発電機の固定子コイルの絶縁劣化形態は一様ではなく、その耐用寿命は運転方法により異なってくる。絶縁劣化要因は、

熱、電気、機械、環境劣化に大別され、複合的に作用して絶縁劣化が進行する<sup>(1)</sup>。

絶縁診断は、固定子コイルの絶縁性能が運転に必要な絶縁耐力 2E+1kV (避雷器の放電電圧との絶縁協調) をもっているかを劣化判定基準に従って判定することが目的であり、定期的な診断を行い絶縁性能の経年劣化を的確に把握し最適な予防保全を施すことが可能になる。しかし、一つの絶縁特性だけで劣化状態を判定することは適切でないため、直流吸収、交流電流、 $\tan\delta$ 、部分放電の四つの特性を測定し、その悪化傾向や定期的な目視点検により総合的に劣化状態を判定する必要がある。

当社ではエポキシレジン絶縁 (B 種) を採用した水素ガス冷却発電機について、実験室における実機大コイルを使つての加速劣化試験により、各劣化要因の平均的な絶縁耐力損耗率は、熱劣化 0.2%/年、電気劣化 0.6%/年、機械劣化 (ヒートサイクル劣化) 3.4%/1,000 回を得ており、運転履歴との関係は図 1 によって表される。なお、負荷変動運転を行っている発電機に対しては、おのおのの負荷変動幅を等価起動回数に換算してヒートサイクル劣化に加える必要がある。

これらの手法については、実機のサンプリングおよび巻替え時の旧コイルの絶縁耐力損耗量計算結果ならびに試験結果

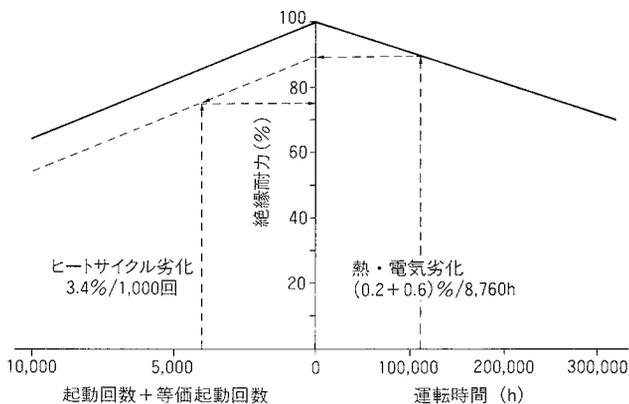


図1. 運転履歴と絶縁耐力の関係 運転時間は熱劣化と電気劣化に関係し、起動停止回数や負荷変動はヒートサイクル劣化に関係する。

Relationship between operating history and breakdown voltage

を基に、統計処理により絶縁破壊電圧中央値と最低値を求め、妥当性を確認している。コイルの寿命は絶縁耐力最低値で決まるので、その値を精度良く推定することが重要である。絶縁耐力最低値の推定には、実験室での評価試験データの統計処理値に加え、実機コイルの試験結果のデータ収集により現在ではそのばらつきを精度良く確認できるようになった<sup>(2)</sup>。

安定した電力供給を図るには、固定子コイル絶縁が寿命に達する前に更新することが重要である。固定子コイルの寿命を一律に定義するのは無理があるが、エポキシ樹脂絶縁のコイルは、現在までの試験結果から起動停止や負荷変動の多いプラントでは25~30年、ベースロード用では30~35年が一つの目安といえる。巻替えにあたり、当社では従来のエポキシ樹脂絶縁(B種)よりさらに耐熱、耐ヒートサイクル性に優れたエポキシ樹脂絶縁(F種相当)の採用と最新のコイル設計技術により、従来のコイルよりも損失の少ないコイルの製作ができ、すでに数台のコイル更新が行われている。

## 2.2 水冷却型発電機用固定子コイルの予防保全

水冷却型発電機で最近新たな問題として注目されているのが、コイルを構成する素線とクリップ(水室部)のろう付け部からの冷却水の漏洩(えい)である。この現象は、素線とクリップのろう付け部分に内在する微小ボイドに冷却水が侵入し水の滞留により水質が悪化すると(pH3程度まで酸化)、ろう付け部の腐食が通常の腐食速度よりも数倍速くなり内在ボイドが拡大連通し、通水パスが形成されクリップと素線のはめあい部外に冷却水が漏れるという現象である。これは異種金属(銅、ろう材)が電解質中(冷却水)に存在することによるガルバニックコロージョンが原因であると考えられている。

当社では、この現象に関し水質変化やろう付け部の腐食速度などについて基礎試験を行うとともにそのメカニズムの解明を行い、ろう付け作業の作業条件や品質管理の見直しを行って内在ボイドのより少いろう付け方法を開発した。さらに、新しいろう材を開発してその設計・製造技術を確認し、信頼

性検証を終えて恒久対策としての固定子コイルの製造ができるようになった。

一方、現在運転中の発電機に対しては、定期点検時における各種リークテストの実施を推奨するとともに、コイル絶縁層への水の浸透を検出し、運転中の絶縁破壊を防止するために水と絶縁物との比誘電率の差を利用してコイルエンド部の静電容量の測定を推奨している。なお、万一素線とクリップのろう付け部に漏洩が発見された場合は、レジン充てんにより応急的に漏洩を止める方法も開発している。しかし固定子コイルの製作には長期間が必要であり、修理期間の短縮には予備コイルの保有が有効である。

水冷却型発電機用固定子コイルのろう付け部に発生するガルバニックコロージョンによる冷却水の漏洩は世界的に注目されている新しい問題であり、当社も今後実機コイルのサンプリングなどによりさらいろう付け部の詳細調査を行い、実態の把握と余寿命の推定技術の確立に取り組んでいる。

## 2.3 回転子構成部品の点検と改良保全

### 2.3.1 エンドリングの点検と新材料への交換

エンドリング材料には電磁気的な理由から18Mn-5Crのオーステナイト非磁鋼を採用している発電機がある。この非磁鋼エンドリングが破断飛散する事故が海外で報告されており、原因は応力腐食割れ(S.C.C.)である。この対策として停止中や解放点検中の防湿対策が重要であり、周囲温度より数℃程度高く保つことによって結露防止が可能で温風機、ヒータまたはランプ照射などが有効である。予防保全として定期点検時の非破壊検査(超音波探傷試験、染色浸透試験)を行う。しかし内面の微小欠陥を発見することは困難で、根本的対策として耐S.C.C.材として新しく開発した18Mn-18Crのエンドリングに更新することが現在国内外で積極的に行われている。

### 2.3.2 シャフトおよび回転子くさびの非破壊検査

発電機のシャフト中心穴は回転中の応力が一番高い所である。したがって、最新の非破壊検査技術により欠陥の有無を確認し安全性を評価しておく必要がある。点検の間隔は約15年、10万時間である。その他、トルクを伝達するジャーナル部やカップリング段付き部についても同様で、回転子を引き抜く機会(約4年ごと)に実施するように推奨している。

回転子くさびも使用条件は非常に厳しく、異常運転(不平衡負荷運転、過励磁運転など)による温度上昇や電触が引き金となり初期クラックが発生する場合がある。特に高力アルミ合金製の回転子くさびに対してはこのような運転が行われた場合慎重な点検が必要である。回転子を引き抜いた際には外周から超音波探傷試験を行う。また、精密点検(約10万時間運転)時には染色探傷試験により欠陥の有無を確認することが重要である。さらに応力集中緩和のためくさび肩コーナR部を拡大する改良保全対策も長寿命化対策として有効である。

### 2.3.3 回転子コイルに関する点検と改良

回転子コイルの両極間を接続する極間接続銅帯は起動停止に伴い、銅帯が

伸縮し疲労が進行する。このため各機の構造と運用法に応じた最適な長寿命化構造を採用しているが、疲労によるクラックの発生と進展をファイバースコープや鏡により定期的に確認し、適切な処置を行う必要がある。

回転子を水素ガスで直接冷却している発電機で、電気的に同一ターンを構成する二層重ねコイル銅帯間の接触面に梨地状の荒れが発見された。この原因は、低速回転（ターニング時）時にコイルが自重によりスロット内の間隙（げき）以内で、上下、左右に動き、コイル銅帯の相対的な動きによって接触面が荒れて銅粉が発生するものである。この銅粉がスロット内に滞留すると層間短絡、回転子接地およびコイル間短絡にいたる可能性があり、当社では銅粉滞留量の推定カーブを作成し、適切な時期にコイルの分解清掃と対策を推奨している。対策は同一層間のコイルを点ろう付けにより固定する方法が採用されている。

#### 2.4 診断・保護装置の改良開発

部品の改良・交換による改良保全技術と合わせて、現状の状態を正しく診断、判断することや異常の兆候を検出する装置を採用することも既設発電機の信頼性向上に有効であり、改良保全技術と合わせて積極的に推進している<sup>(3)</sup>。

主な装置としては次のものがある。

- (1) 固定子くさびのゆるみ計測装置
- (2) エンドリングの非破壊検査装置
- (3) コレクタリングの火花監視装置

なかでもコレクタリングの火花監視装置はブラシの火花発生を常時監視し、火花の発生を早期に発見して適切な処置を行うことにより、コレクタ部分の損傷を未然に防止するために使用され、多くの発電機に採用されている。

また、発電機保護継電器として当社では高調波成分を考慮し、かつ保護特性を向上させたデジタル型逆相継電器および検出感度を向上させた改良型界磁地絡継電器の適用も推進している。

### 3 スイッチギヤの寿命と改良保全技術

スイッチギヤにおいては、改良保全やリニューアルの時期を見極める手だてとして標準的な耐用年数を知ることが重要である。ユーザ、電気主任技術者、メーカーを対象としたアンケート結果<sup>(4)</sup>を総合すると、電気機器の種類にもよるが15～25年が耐用寿命と考えられている。

また、スイッチギヤの根幹をなす構成部品が寿命と見なされたら、それら部品の改良保全を実施するより、むしろ本体の改良保全を実施したほうがより投資効果を得ることができるといえる。ここでは、代表例として制御電線の寿命評価について述べるとともに、スイッチギヤをリニューアルする際の最近のスイッチギヤの制御回路技術について紹介する。

#### 3.1 制御回路電線の寿命評価

スイッチギヤの内部配線に使用されている電線の劣化は、絶縁被覆の脆性で判断する方法がある。これは絶縁被覆材の安定剤として添加されている可塑剤の減少により絶縁物がもろくなり、引っ張って切れるときの伸び率が小さくなる。このため JIS C 3005 により絶縁物の伸び率を測定して劣化の傾向を判断することができる。

図2はいくつかの電線をサンプリングして測定した結果を寿命曲線としたものである。伸び率の規格値は100%以上であるが、使用限界値は裕度をみて150%としている。環境条件によるばらつきがあるものの、おおむね27年～33年が寿命の目安といえる。

#### 3.2 スイッチギヤ制御回路の改良保全

スイッチギヤから中央操作室（CRT オペレーション、計算機）にはスイッチギヤ盤面に取り付けている保護継電器の動作状態や電流、電圧、電力量といった各種計測量、さらに開閉器の入切状態など数百本の制御ケーブルが敷設されている。これらケーブルのリニューアルも大変な作業となる。また、現状保護継電器としてもっとも適用実績の多い電磁式継電器

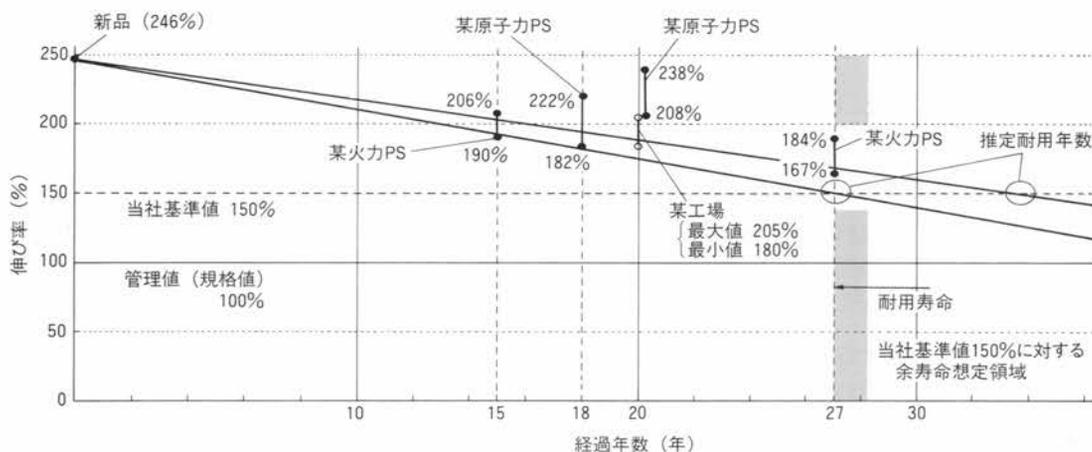


図2. 電気機器用ビニル絶縁電線 (IV) の劣化寿命特性 (伸び率) 使用開始後27～33年程度で伸び率が管理値以下になり、使用限界となる。

Deterioration curves of vinyl-insulated wire (IV) for electrical equipment

の保守を行うのも困難となりつつある。これらを解決するものとして、マルチリレー (MCR23 型) の導入を積極的に進めている。

**3.2.1 マルチリレー (MCR23 型)** MCR23 型マルチリレーは保護・監視・計測機能を一体化したスイッチギヤ用の多機能デジタルリレーであり、VTL 型をはじめ電力用中圧スイッチギヤ一般に適用可能である。

特長として次に示す項目がある。

- (1) 常時監視と自動点検により従来定期点検時しか発見できなかった誤不動作故障が運転中に発見可能
- (2) 特性変化が小さく点検周期延長と項目簡素化が可能
- (3) 過去の最大電流や保護動作時の電流などが表示可能
- (4) 5 種類の反限時特性により機器耐量との協調が容易
- (5) 遮断器動作時間監視やトリップコイル断線監視が可能

図 3 に MCR23 型マルチリレーの構成を示す。

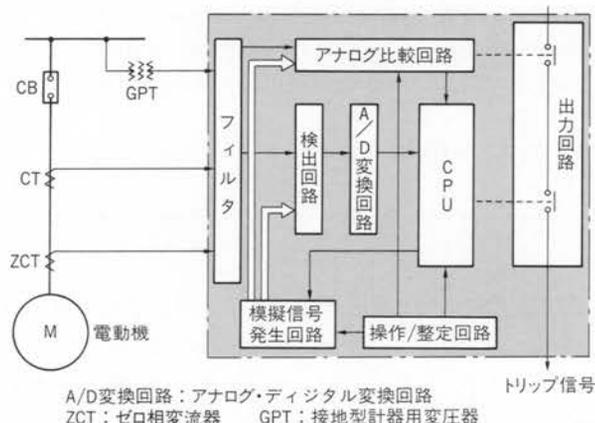


図 3. マルチリレー (MCR23 型) の構成 アナログとデジタルの AND 出力で誤動作を防止し、模擬信号でそれぞれの回路を自動点検する。

System configuration of multi-relay for switchgear, type MCR23

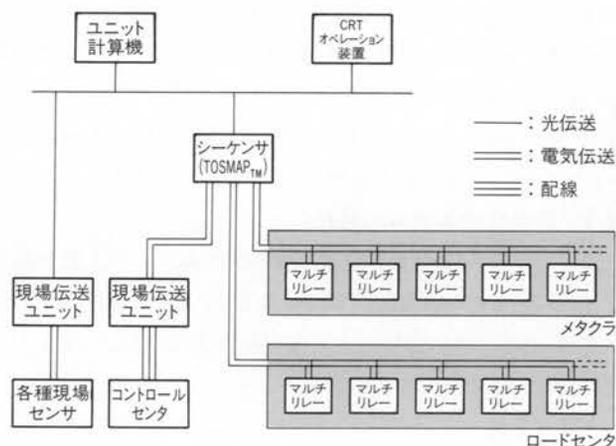


図 4. マルチリレーによるネットワーク構成例 中央との情報伝達が光伝送となり制御ケーブルが節減できる。

Example of application of multi-relay

**3.2.2 マルチリレーの伝送機能** 従来、制御電線数百本でスイッチギヤから中央操作室に送信していた各種計測量、開閉器の入切情報、異常情報 (保護動作) を 2 本の電線でシリアル通信する。また、マルチリレーにより伝送することで保護整定値、保護動作時の事故電流、電圧なども中央操作室に送信することができ、中央操作室では保護協調や事故時の解析も可能になり、システム構築が容易になる。

図 4 はマルチリレーによるネットワーク構成例である。

## 4 あとがき

発電設備のうち発電機およびスイッチギヤに関する最近の改良保全技術の一例を紹介したが、タービン発電機の最重要部品である固定子コイルの絶縁劣化診断技術の確立により、計画的に更新時期を決め、早めの更新を行うことは予防保全から非常に大切なことであり、またエンドリングの点検と新材料への交換は、回転体の破損という重大事故の未然防止に有効であることはいままでのないことである。一方、スイッチギヤに関しても耐用年数に応じたリニューアル時に保護装置の多機能化や計算機との伝送取合いを行うことにより、保守の大幅な省略化を行うことができる。

このように最近の改良保全技術を有効に活用することによって、発電設備の信頼度を高め運転保守コストの低減に役立つものと確信する。今後とも最新の技術を採用した改良・予防保全技術の開発改良に努める所存である。

## 文 献

- (1) 赤堀秀夫, 他: タービン発電機巻線の予防保全, 東芝レビュー, 44, 6, pp. 506-509 (1989)
- (2) 関戸 忍, 他: エポキシ樹脂絶縁コイルの診断技術 (タービン発電機), 第 19 回日科技連信頼性・安全性シンポジウム (1989)
- (3) 関戸 忍, 他: タービン発電機の検査・診断技術, 東芝レビュー, 46, 6, pp.499-502 (1991)
- (4) 日本電機工業会 '89/9: 汎用高圧機器の更新推奨時期に関するアンケート調査報告書 (1989)



高沢 和雄 Kazuo Takazawa

1973 年入社。火力・原子力電気システムの改良保全に従事。現在、火力統括部火力原子力電機技術部主務。  
Thermal Power Plant Engineering Div.



田代 和夫 Kazuo Tashiro

1961 年入社。タービン発電機の機械構造設計に従事。現在、京浜事業所発電機部課長。  
Keihin Product Operations



陣内 功 Isao Jinnai

1962 年入社。スイッチギヤの開発・設計に従事。現在、府中工場スイッチギヤ部主査。  
Fuchuu Works