

電力機器の絶縁評価技術

吉村 学* 大竹泰智*
海永壮一郎* 菅 健一**
梅本貴弘*

Insulation Evaluation Technologies of Power Equipments

Manabu Yoshimura, Soichiro Kainaga, Takahiro Umemoto, Yasutomo Otake, Kenichi Suga

要 旨

電力機器の開発では、過去からの社会ニーズに対応し、安全・信頼性の追求、小型・軽量化、運用・保守性の改善に取り組んできた。近年では、地球温暖化防止を始めとする環境負荷低減、ライフサイクルコスト削減などの新たなニーズもあり、開発に反映させてきた。

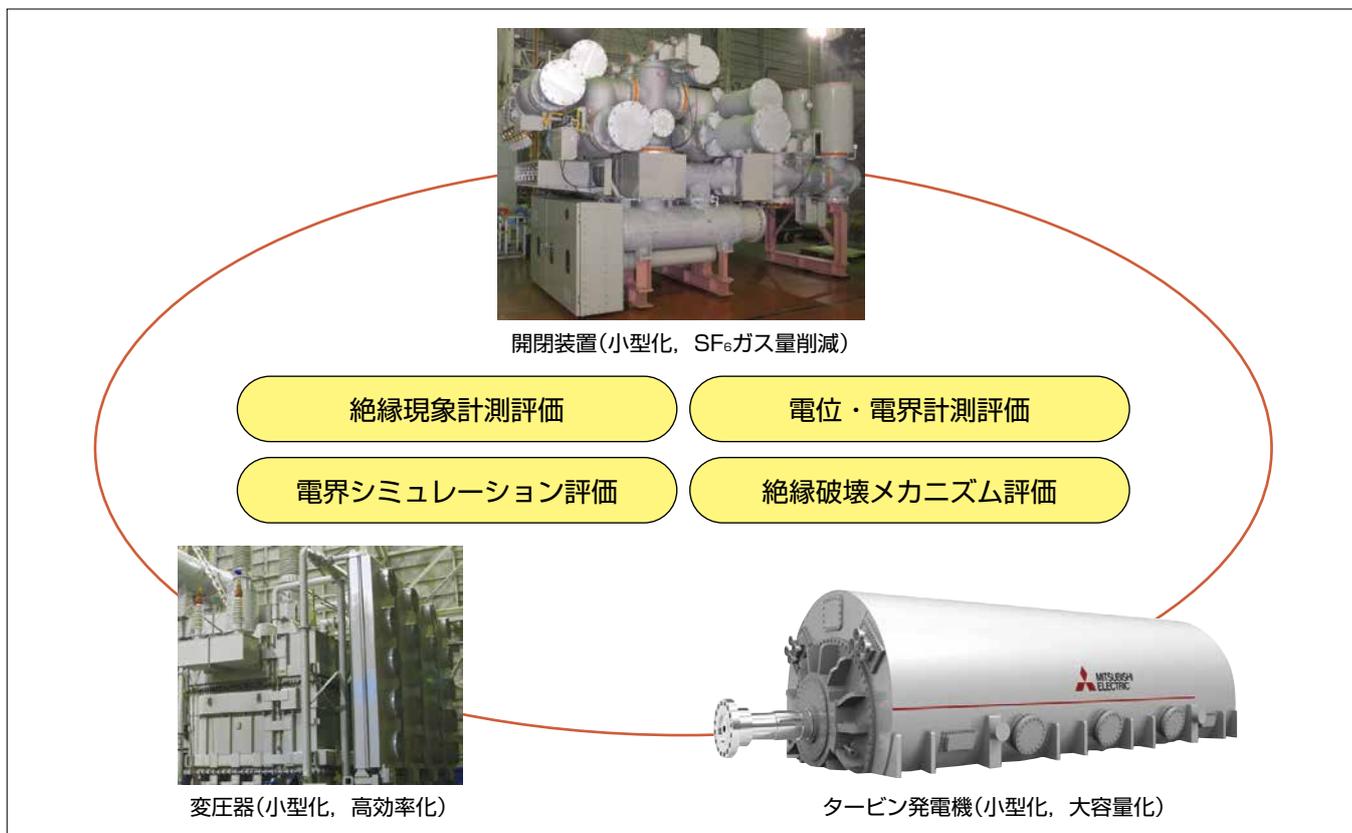
三菱電機は、発電及び送配電の主な電力機器を提供することで社会に貢献している。電力機器は6.6kVから765kVと電気機器の中で最も高電圧の環境下で使用されるため、製品開発をする上で絶縁信頼性の確保が最も重要な課題である。また、先に述べた社会ニーズの一つである機器の軽量化・小型化への要求は機器内の使用電界を高めるため、なお一層の絶縁信頼性の確保が必要になっている。

様々なニーズに対応しながら絶縁信頼性を確保するには

高度な絶縁評価技術を製品設計に反映させることが重要である。絶縁評価技術の開発には様々な項目があるが、代表的なものとして“絶縁現象計測評価”“電位・電界計測評価”“電界シミュレーション評価”“絶縁破壊メカニズム評価”が挙げられる。今回、次の四つの絶縁評価技術を開発した。

- (1) AEセンサを用いた部分放電検出システム
- (2) 電気光学ポッケルス効果を用いた表面電位計測技術
- (3) 有限要素法を用いた過渡電界／熱伝導連成解析による温度上昇と沿面電界の定量評価技術
- (4) 球状ボイドの欠陥サイズと寿命の定量評価技術

今後、社会ニーズは更に変化する可能性はあるが、電力機器の絶縁信頼性を確保する重要度が変わりはなく、絶縁評価技術の開発を継続的に実施する。



電力機器の絶縁に関連する主な開発ニーズと絶縁評価技術の開発項目

開閉装置、変圧器、タービン発電機の製品ごとに絶縁評価技術が関連する代表的な開発ニーズと、それらを開発するために必要な絶縁評価技術の開発項目を示す。

1. ま え が き

電力機器の開発では、過去からの社会ニーズに対応し、安全・信頼性の追求、小型・軽量化、運用・保守性の改善に取り組んできた。電力機器は、低コスト化、低環境負荷のため小型化を目指すとして機器内部の電界が一層高くなることから、絶縁信頼性を確保する重要性が増す。

本稿では絶縁の信頼性を高める上で必須である絶縁現象計測評価、電位・電界計測評価、電界シミュレーション評価、絶縁破壊メカニズム評価に関する最新の開発技術を述べる。

2. 最新の絶縁評価技術

2.1 部分放電計測技術

電力用変圧器は、落雷時のサージ波形を模擬した雷インパルス電圧への耐電圧が重要な評価項目の一つである。絶縁耐力の評価には、絶縁破壊の前駆現象である部分放電の検出が有効である。ただ、古くから部分放電の検出技術が確立されている交流電圧に対して、雷インパルス電圧の場合は技術課題が大きく検出技術が確立されていなかった。雷インパルス電圧発生器自身が発する多大な電磁ノイズと、変圧器内部のコイルの振動に起因する弾性ノイズによって、微弱な部分放電信号が埋没することにある。これら二つのノイズを除去する方法として、AE(Acoustic Emission)センサを用いた部分放電検出システムを構築した⁽¹⁾。この手法ではAE信号と電磁ノイズの伝搬速度の違いから、センサへの到達時間に差が生じ、部分放電信号と電磁ノイズを分離できる。さらに、部分放電信号だけを抽出するフィルタを適用することで部分放電信号と弾性ノイズの分離を試みた。

図1に実規模変圧器モデルに対して構築した雷インパルス部分放電検出システムを示す。中心周波数120kHzのAEセンサ(Physical Acoustics社, R15-a)を実規模変圧器モデルのタンク壁面に設けたアクリル窓に固定し、AEセンサの後段に遮断周波数200kHzの低域通過フィルタと、120kHz付近だけを増幅する狭帯域アンプを設置した。図2に、低域通過フィルタと狭帯域アンプがない場合で、部分放電の発生しない低電圧を印加した際のAEセンサ波形及び同波形の時間-周波数特性を示す。電圧印加直後に電磁ノイズとみられるパルス波形と電圧印加から1.5ms以降に、弾性ノイズとみられる数kHz~50kHzの周波数成分を持つ振動波形が検出された。なお、1.5msは変圧器コイル-AEセンサ間距離を油中音波の伝搬速度で割った値と同等であった。図3に低域通過フィルタと狭帯域アンプを使用した場合のAEセンサ波形及び同波形の時間-周波数特性を示す。絶縁破壊電圧を1.0とすると0.96倍となる破壊直

前の電圧を印加した場合である。フィルタとアンプの効果によって弾性ノイズとみられる数kHz~50kHzの振動波形は見られなくなり、代わりに電圧印加から1.3ms後に90~180kHz付近にピークを持つ部分放電とみられる波形を検出できた。

今後、実規模変圧器モデルでのデータ蓄積と、それに基づく検出精度の向上に継続的に取り組んでいく。

2.2 電気光学効果を応用した電位・電界計測技術

電力機器の絶縁設計を合理化する上で、高電圧部位での詳細な電位・電界分布の把握が重要である。近年の計算機の高性能化と汎用解析ソフトウェアの発達によって、容易に電位・電界分布を推定できるようになった一方で、計測は電位・電界センサが金属部を持ち、高電圧部位に配置して測定するため測定電圧に限界があった。そこで今回、電圧・電界に応じて透過光特性が変化する、電気光学ポッケルス効果を用いた表面電位計測技術を新たに開発した。センサ部を絶縁物だけで構成できるため、高電圧部に近接させる計測ができる点が最大の特長である。ここでは、開発

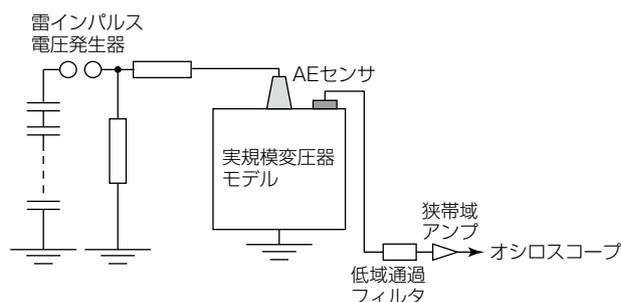


図1. 雷インパルス部分放電検出システム

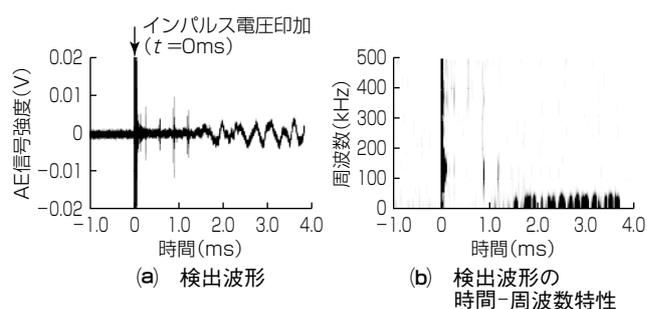


図2. ノイズ対策前の低電圧印加時のAEセンサ波形

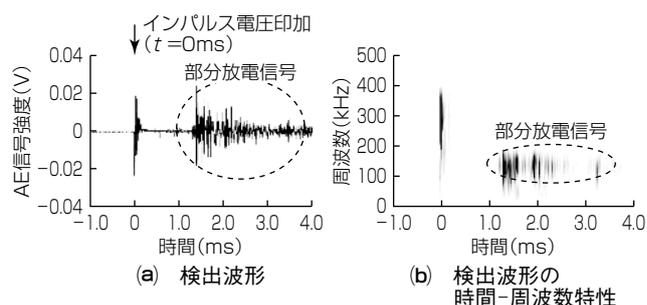


図3. ノイズ対策後の絶縁破壊前のAEセンサ波形

技術をタービン発電機の固定子コイル電界緩和層での表面電位分布計測に適用した例について述べる。

図4に、タービン発電機と固定子コイル電界緩和層の構造を示す。同部位には、2.3節で述べる非線形抵抗材料を塗布して沿面電界の低減を図っている。発電機の高効率化と出力密度の向上には、コイル主絶縁の薄肉化による放熱性の向上が有効であるが、そのためには電界緩和層の表面電位分布や沿面電界の定量評価が必要である。図5に、開発した表面電位計測システムの基本構成を示す。レーザー光が電気光学結晶内部を透過する際に生じる偏光状態の変化を光量変化として測定するため、光路上に2枚の偏光子と1/4波長板を配置した。また光源、及び光検出器との間を光ファイバで接続する構造とし、センサを可搬型にした。さらに、計測システムをコイルに沿って動作させることで得られる電界分布を、コイル表面電位分布に変換する信号処理手法を確立した⁽²⁾。発電機の試験電圧に相当する50kVを固定子コイル導体に印加した際の表面電位の実測結果、及び有限要素法を用いた過渡電界解析結果を図6に示す。両者はよく一致しており、開発した測定技術の妥当性を実証できた。

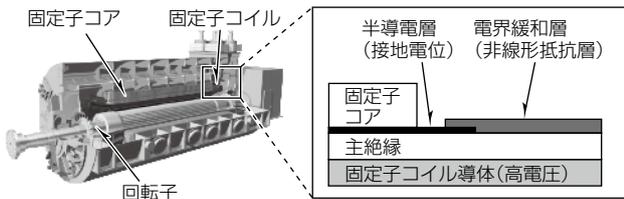


図4. タービン発電機と固定子コイル電界緩和層の構造

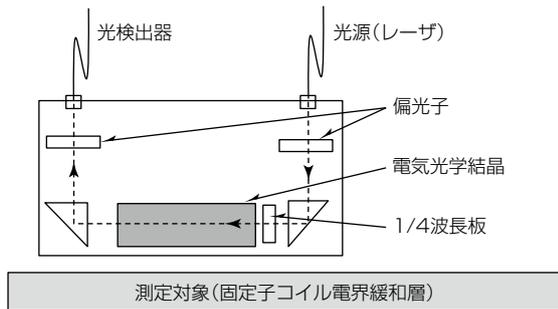


図5. 開発した表面電位計測システムの基本構成

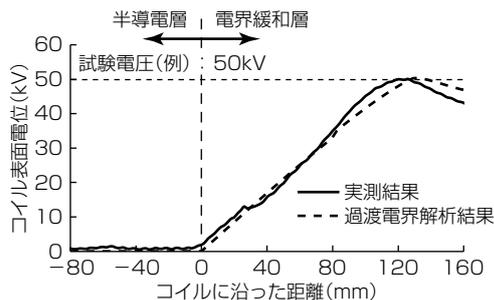


図6. 電界緩和層での表面電位分布の実測・解析結果

今後、発電機の開発に適用し、性能向上に貢献するとともに、他の電力機器の絶縁評価にも適用範囲を広げ、設計合理化を図る。

2.3 非線形抵抗材料を用いた電界緩和構造設計技術

電界に応じて抵抗率が変化する非線形抵抗材料は、沿面電界を緩和し、機器の絶縁信頼性を向上させるために有効な機能性材料であるが、図4に示した発電機固定子コイルへの適用には、電界緩和に伴って同材料に発生する電流のジュール発熱を抑制することが重要な課題である。2.2節で述べた発電機の高効率化と出力密度の向上に付随して電界緩和層に加わるストレスは増大する傾向にあり、電界緩和層での発熱と電界を同時に評価する解析手法の確立と、それに基づく電界緩和層の最適設計技術の確立が望まれる。

電圧階級の高い発電機では、異なる抵抗を持つ2種類の非線形抵抗材料を組み合わせた電界緩和構造(ダブルバンド方式)が用いられる。ダブルバンド方式の構造、及び表面電位・発熱分布を図7に示す⁽³⁾。ダブルバンド方式で、表面電位の傾きは各層の抵抗率に依存し、低抵抗層側で小さく、高抵抗層側で大きくなる。一方、発熱箇所は半導電層と低抵抗層、及び低抵抗層と高抵抗層の境界の2か所でピークを持つ分布になるが、単一の非線形抵抗材料を用いたシングルバンド方式と比較して最大発熱値が低減できる。ここで発熱分布は2種類の非線形抵抗材料の抵抗率組合せと、低抵抗層の長さ L_1 に依存する。当社は、有限要素法を用いた過渡電界/熱伝導連成解析を開発し⁽⁴⁾、温度上昇と沿面電界の定量評価技術を構築した。電界緩和層の表面電位・温度分布の解析例を図8に示す。また、これら評価手法に基づいて電界緩和構造を最適化したモデルコイルを製

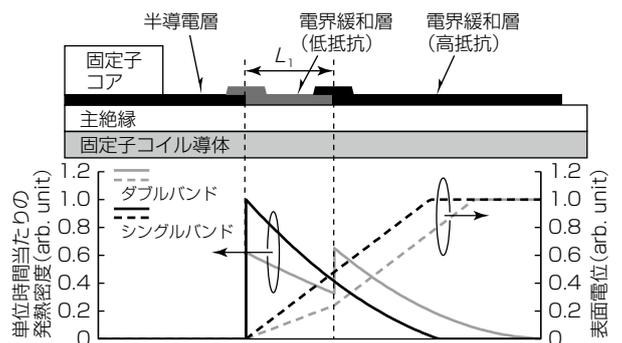


図7. ダブルバンド方式電界緩和層での電位・発熱分布

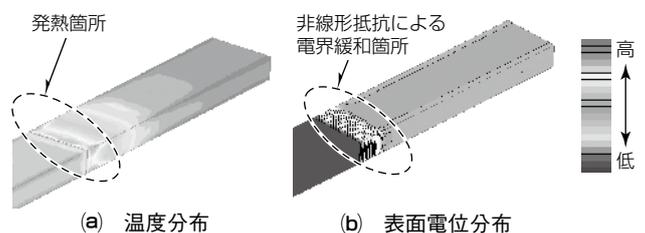


図8. 有限要素法による電位・温度分布の解析結果

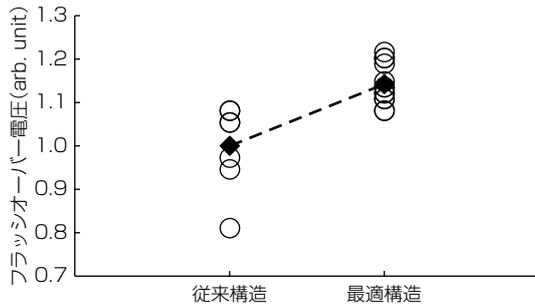


図9. 最適構造設計によるフラッシュオーバー電圧の向上

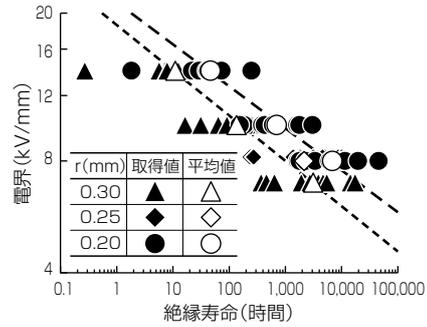


図11. 欠陥サイズごとのV-t試験結果

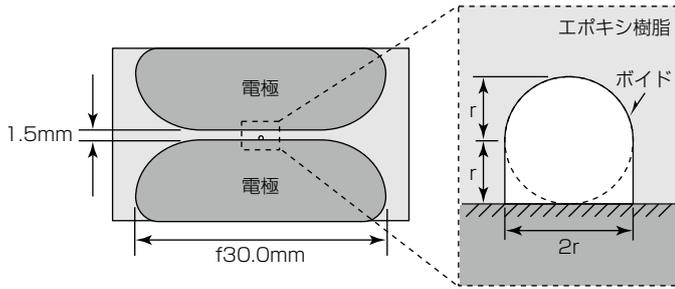


図10. 絶縁寿命評価サンプル

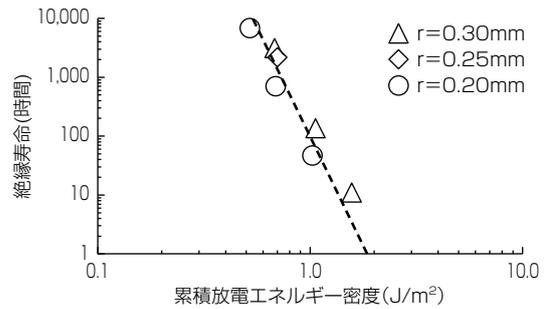


図12. 累積部分放電エネルギー密度と寿命の関係

作してフラッシュオーバー電圧を評価した結果を図9に示す。従来構造と比較すると、フラッシュオーバー電圧の平均値で15%程度向上し、また電圧のばらつきを低減できたことから、この電界緩和層の評価技術・最適設計技術の有効性を実証した。

2.4 固体絶縁物寿命評価技術

電力機器への固体絶縁の適用で、欠陥存在下の絶縁劣化特性の把握は極めて重要である。部分放電による絶縁物の劣化過程や実器に見られるポイド・剥離・クラックといった欠陥形状の違いによる絶縁寿命への影響については過去にも研究が行われている。しかし、欠陥サイズと寿命の相関関係は解明されていないため、今回は出荷時の部分放電試験で検出困難であり高リスクと想定される球状ポイドを対象を絞り、欠陥サイズと寿命に関する定量評価を実施した⁽⁵⁾。

図10に示す半径 r の球状ポイド欠陥を内包するエポキシ樹脂サンプルの絶縁寿命を評価した。各欠陥サイズの破壊時間特性(V-t特性)を図11に示す。欠陥サイズが大きいくほど短寿命であり、かつ、傾きが増大する傾向が分かる。樹脂厚さや欠陥サイズが異なる実器に対して絶縁寿命を推定するため、支配要因と考えられる部分放電特性に着目して寿命との関係を検討した。交流電圧印加時の1サイクル当たりの放電回数と部分放電1回当たりに欠陥内壁で消費される放電エネルギー密度を理論計算し、これらの積である1サイクル当たりの累積部分放電エネルギー密度を欠陥サイズごと及び印加電圧ごとに算出した。絶縁寿命との関係を図12に示す。欠陥サイズが異なる場合も共通の絶縁寿命指標として累積放電エネルギーを使用できることが分かった。

今後、製品開発時の絶縁寿命評価への適用に向けて検討を進めていく。

3. む す び

電力機器の絶縁信頼性を高める上で必須である絶縁評価技術について述べた。今後、社会ニーズは変化する可能性はあるが、絶縁信頼性を確保する重要度には変わりはなく、継続的に技術開発を進めていく。

参 考 文 献

- (1) 梅本貴弘：電力用変圧器の雷インパルス部分放電検出技術，電気評論，No.624，26～29（2016）
- (2) Onishi, D., et al. : Surface potential measurement of stress grading system of high voltage rotating machine coils using pockels field sensor, 2017 International Symposium on Electrical Insulation Materials (ISEIM), D4, 95～98（2017）
- (3) Umemoto, T., et al. : Optimization of multiple-layer end-turn stress grading system for high voltage turbogenerators, 2018 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), 120～123（2018）
- (4) 梅本貴弘，ほか：インバータ駆動回転機のコイルエンド電界緩和システムにおける局所発熱低減手法の検討，電気学会論文誌A，138，No.4，133～140（2018）
- (5) 大竹泰智，ほか：エポキシ樹脂における絶縁寿命のPDエネルギー依存性，平成28年電気学会電力・エネルギー部門大会，376（2016）