

主論文の要約

論文題目 回転機における電気絶縁および
熱設計技術に関する研究
(Electrical Insulation and
Thermal Design Techniques
for Rotating Machines)

氏名 吉武 勇一郎

論文内容の要約

世界的な人口の増加と持続的な経済成長に伴い、今後もエネルギー需要は増え続ける傾向にある。これにより、産業・自動車・家電・電力および社会インフラなど広範な分野において、回転機の継続的な新規導入と設備更新が見込まれている。その一方で、環境問題として、2015年に開催されたCOP21においてパリ宣言が採択され、多くの国と地域により合意が形成された。日本においても経団連主導のもと、2050年のCO₂排出量ゼロ化に向けて、多くの企業および団体が、各々に温暖化対策に関する長期ビジョンを創案し、すでに目標に向かって精力的に推進されている。

回転機と地球環境の関係性についてしてみると、世界における消費電力の約半分は回転機で消費されており、最もウェイトが高い。このように回転機は、現代社会生活を営む上で必要不可欠な存在となっていることがわかる。したがって、環境問題に取り組むうえで、回転機における消費電力の削減は不可避な課題である。回転機における消費電力の削減は、SDGsの大目標のうちNo.7, 9, 12, 13などに該当する。

分野別の動向として、自動車、航空機やドローンなどの運輸部門では、2050年に向けて化石燃料から脱却し、電気エネルギーによる回転機駆動(電動化)が積極的に進められている。また、近年、風力や太陽光などの自然エネルギー発電における低コスト化も進んでおり、風力発電機などの再生エネルギー向けの発電機の需要も確実に伸びていくものと予想される。以上を総じて、今後も数十年に渡って、回転機の運用は既存領域への新規導入とリプレイスに留まらず、新たな事業分野に拡大されることにより、回転機全体の需要と供給は

着実に増加していくと予想される。必然的に、回転機における消費電力も増加することになる。

本研究では、これらの回転機の消費電力低減策を検討するものであり、産業用回転機を対象に、電気絶縁と放熱技術の境界領域にフォーカスを当てて研究開発を推進するものである。

回転機の消費電力の低減施策について以下に示す。現在の回転機分野の研究・開発状況を鑑みて、消費電力の低減策は主に以下の3つの方針に分類されると筆者は考えている。

- ①回転機の小型化および軽量化
- ②回転機制御による省エネルギー化
- ③回転機の限界使用

①回転機の小型化および軽量化は、回転機の製造時における資源とエネルギーの直材削減にダイレクトに影響を及ぼす。また、小型化することで回転機を輸送する際の運送エネルギーを低減し、材料の再生処理のエネルギー低減にも寄与できる。②回転機制御による省エネルギー化として、回転機の効率改善による無効電力の削減や可変速運転を目的としたインバータ制御が挙げられる。これにより回転機の運転中におけるエネルギーロスに貢献できる。③回転機の限界使用は、長寿命化および診断により、個々の回転機を限界まで使用することにより新規導入を減らし、資源の削減に寄与するものである。リサイクルやリユースも限界使用に該当する。

①回転機の小型化および軽量化は回転機の温度上昇の低減と関係があり、②の回転機制御による省エネルギー化は今日においてインバータ制御の適正活用がキーテクノロジーとなっている。①および②の方針を踏まえて、本研究は、「回転機の高熱伝導絶縁システムの開発」および「インバータ駆動回転機のサージ急峻化と高放熱化を両立した絶縁システムの開発」の2つのテーマを主眼として取り組むものである。

第1章 緒論

第1章では、回転機の高効率化を目的として、本研究で対象とした産業用低圧および高圧回転機の構造や特徴について説明しながら、回転機における絶縁および熱設計に関する国内外の研究動向について述べる。

第2章 低圧回転機向け高熱伝導絶縁システムの開発

産業用低圧回転機を対象に、特にコイルエンドを有さない回転機に対してコイル温度上昇の低減に有効な「高熱伝導絶縁化」について検討する。熱回路網法およびロバストデザインを併用したアプローチにより、回転機のステータに対して最適な放熱構造を明らかにし、新たな高熱伝導絶縁方式を提案する。現行と提案方式を適用した試作を行い、実測および計算の面から検証することで、以下の結論が導かれた。

(1) 高熱伝導樹脂(5W/mK)および提案した「樹脂被膜絶縁方式」の適用により、回転機内部

の温度上昇は 23K→4K まで低減され、コイル温度上昇は 73%となった。

- (2) 樹脂熱伝導率が 0.6W/mK の場合、樹脂被膜絶縁方式の適用により、回転機内部温度上昇は 23K→13K まで低減されコイル温度上昇は 85%となった。
- (3) 樹脂被膜絶縁方式における PDIV および BDV として、従来の絶縁シート方式と同等な絶縁特性を有することがわかった。

以上より、提案した樹脂被膜絶縁方式は放熱性を高めながら絶縁性を両立できることを明らかにした。これにより、温度上昇の低減分に対して出力密度の向上が可能となり、その上昇分に対して回転機小形化に寄与することができる。本技術は、回転機全般に適用可能な共通基盤技術である。

第 3 章 インバータ駆動機におけるカーボン遊離現象に関する要素検討

産業用高压回転機を対象に、SiC-IGBT を想定した超高速な立ち上がり峻度を有するインバータサージを再現可能な要素モデル実験系を構築する。SiC-IGBT 想定下において、ステータコア内部に絶縁焼損の前駆現象となるカーボン遊離現象が生じることを見出し、要素実験系を用いることで、印加電圧、電圧立ち上がり時間および電極荷重を変化させてカーボン遊離の発生パラメータについて定量的に評価する。カーボン遊離の発生抑制策として、非離型面同士が面した RN-NR 構造を提案し、提案構造の遊離抑制効果について検証しつつ、カーボン遊離発生メカニズムを解明する。以下の結論が導かれた。

- (1) カーボン遊離発生開始において、絶縁紙間の電位差はパッシェン曲線の極小値の 80% 未満になることから、カーボン遊離の発生原因は部分放電ではなく、サージ漏れ電流が局所的に集中によるものと帰結した。
- (2) 上部電極荷重が大きい領域では、非離型面同士が面した RN-NR 構造のカーボン遊離発生開始電圧が、離型面と非離型面が面した RN-RN 構造のカーボン遊離開始電圧よりも高くなることを確認できた。
- (3) RN-NR 構造において電圧立ち上がり時間を 150 ns と高速化したときの遊離抑制電圧は、RN-RN 構造において電圧立ち上がり時間を 800 ns としたときの遊離抑制電圧と同等となった。
- (4) (3)より RN-NR 構造の適用により、SiC インバータ駆動機に対して、主絶縁厚みを厚くせず、現行同等のカーボン遊離耐性を有することが確認できた。

以上により、インバータサージ電圧の高 dV/dt 化に対して、カーボン遊離が生じる電圧を明らかにできた。また、絶縁紙の離型部位を適正化しつつ、絶縁紙間の接触性を管理することによって、カーボン遊離を抑制できることを原理的に実証した。

第 4 章 実機分割ステータ評価に基づくカーボン遊離防止構造の開発

第 3 章では構築した要素モデルを用いてカーボン遊離について検証したが、製品と同じプロセス、かつ、同等の規模で製作された実機構造を対象として、定量的に検討されてい

る事例は筆者の知る限りにおいて存在しない。実機設計において要素モデルでの知見を活かすためには、要素モデルと実機における相関関係を明確にすることが必須である。そこで、第4章では、実機を分割したステータを製造して評価することで、要素モデルとの相関性が定量的に明らかにする。また、カーボン遊離防止構造の実機適用性を検証する。以下の結論が導かれた。

- (1) 絶縁厚み 83%と薄肉化した場合、離型面と非離型面が面した RN-RN 構造ではカーボン遊離の発生確率が 60%であるのに対し、非離型面同士が面した RN-NR 構造ではカーボン遊離は発生しなかった。
- (2) 要素モデルの妥当性について実機分割ステータに対する合致度を設けて評価した結果、電界強度は 120%となり誤差が大きいことが分かる。一方で、サージ漏れ電流における合致度は 9%であり、温度上昇の合致度は 17%となり、良好なことを示した。
- (3) RN-NR 構造の適用により、サージ漏れ電流の許容閾値を 15%ほど向上となり、RN-NR 構造の有意差が確認できた。

以上により、要素モデルで得られたパラメータサーベイの結果を基に、実機分割ステータを製造し、両者の相関性を明らかにすることができた。カーボン遊離の評価手法を確立し、絶縁紙の構造を適正化することによって、カーボン遊離を抑制可能な絶縁設計指針を得ることができた。

今後の展望

直近のインバータ駆動システムの開発動向について、高出力・高電圧領域での IGBT 素子の材料開発は、Si から SiC への移行を踏まえた実機への応用開発が主眼になるものと予想される。その後、高電圧領域で SiC を超える性能を有する素子の実機適用には、数年の時間を要するものと予想している。よって、本研究により、SiC-IGBT インバータ駆動機を対象としたカーボン遊離対策技術の開発については一段落したと考える。今後、さらなる性能限界の打破には、ポスト SiC となる革新的な新材料の開発が重要となるが、そのような新材料が出現した際には、本研究で確立したサージ漏れ電流に対する熱設計技術の展開により、いち早く新材料の実機製品への適用が可能になると期待される。

高熱伝導絶縁システムについては、他のアプリケーションへの展開と製造技術の容易化が進むと予想される。こちらに関しても、新規材料の開発が重要であり、新材料が出現した際にそれを応用可能な新規な絶縁システムをいち早く見出すことが必須となる。新材料適用を想定した次世代絶縁システムの構想立案には、絶縁システムに対するロバストデザインによる適正な放熱構造の検討プロセスをそのまま展開することができる。また、本研究で提案した樹脂被膜絶縁方式における伝熱特性、絶縁特性およびこれらの評価に関する知見の展開が期待される。